



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ  
ΕΚΛΕΠΤΥΝΣΕΩΝ ΤΟΥ ΚΙΟΝΑ Κ31 ΤΟΥ ΝΑΟΥ ΤΟΥ ΝΕΜΕΙΟΥ ΔΙΟΣ  
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΣΑΡΩΤΗ



ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ  
ΕΛΙΣΑΒΕΤ ΤΕΛΕΙΩΝΗ  
ΓΙΩΡΓΟΣ ΓΕΩΡΓΟΠΟΥΛΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ Κ. ΤΣΟΝΤΖΟΥ

ΑΘΗΝΑ ΜΑΙΟΣ 2014



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλα τα άτομα τα οποία με διαφορετικό τρόπο το καθένα συνέβαλαν στην επίτευξή της.

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Λέκτορες, Γιώργο Γεωργόπουλο και Ελισάβετ Τελειώνη, για την ανάθεση της εργασίας καθώς και για την συνεχή και ουσιαστική βοήθεια και υποστήριξη τόσο σε επιστημονικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Η συμβολή τους ήταν καθοριστική για την εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή Γεώργιο Πανταζή για τις συμβουλές του. Ευχαριστίες ακόμη οφείλονται: στην κυρία Kim Shelton, Καθηγήτρια Κλασικής Αρχαιολογίας του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνιας στο Berkeley και Διευθύντρια αναστήλωσης και ανασκαφών του κέντρου Νεμέας, στη ΛΖ' Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων και ιδιαίτερα στην κυρία Κασσίμη, στην κυρία Νικητάκου, αρχιφύλακα του Μουσείου της Νεμέας καθώς και στο προσωπικό του μουσείου.

Επιπλέον, ευχαριστώ τους συμφοιτητές μου Ολάνθη Αθανασίου και Οδυσσέα Χριστοδούλου για την βοήθειά τους κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας καθώς και τις φίλες μου για την συμπαράστασή τους. Τέλος, τις πιο θερμές ευχαριστίες μου χρωστώ στους γονείς μου οι οποίοι με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια.

Αναστασία Κ. Τσόντζου



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....                                                                    | 1  |
| ABSTRACT.....                                                                    | 3  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....                                                        | 5  |
| 1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....                                       | 7  |
| 1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....                                          | 7  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ .....                                                | 11 |
| 2.1 ΓΕΝΙΚΑ .....                                                                 | 13 |
| 2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....                                                       | 14 |
| 2.3 Ο ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟΣ ΧΩΡΟΣ.....                                                   | 16 |
| 2.4 ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ.....                                                               | 17 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ο ΝΑΟΣ ΤΟΥ ΝΕΜΕΙΟΥ ΔΙΟΣ .....                                        | 21 |
| 3.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΡΧΑΙΩΝ ΝΑΩΝ .....                                             | 23 |
| 3.1.1 Τα κύρια μέρη του Ναού (στοιχεία κάτοψης) .....                            | 23 |
| 3.1.2 Τα αρχιτεκτονικά μέλη του Ναού (στοιχεία όψης).....                        | 25 |
| 3.1.3 Οι αρχιτεκτονικοί ρυθμοί των αρχαίων ναών .....                            | 28 |
| i. Ο Δωρικός ρυθμός.....                                                         | 28 |
| ii. Ο Ιωνικός ρυθμός .....                                                       | 30 |
| iii. Ο Κορινθιακός ρυθμός .....                                                  | 31 |
| 3.2 ΟΙ ΟΠΤΙΚΕΣ ΕΚΛΕΠΤΥΝΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΡΧΑΙΩΝ ΝΑΩΝ.....                                | 32 |
| 3.3 Ο ΝΑΟΣ ΤΟΥ ΝΕΜΕΙΟΥ ΔΙΟΣ .....                                                | 35 |
| 3.3.1 Ιστορική Αναδρομή .....                                                    | 35 |
| 3.3.2 Η αρχιτεκτονική του Ναού .....                                             | 36 |
| 3.3.3 Η αναστήλωση του Ναού .....                                                | 37 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Η ΕΠΙΓΕΙΑ ΣΑΡΩΣΗ .....                                               | 41 |
| 4.1 ΓΕΝΙΚΑ .....                                                                 | 43 |
| 4.2 ΕΠΙΓΕΙΟΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΣΑΡΩΤΕΣ LASER (TERRESTRIAL LASER<br>3D SCANNERS)..... | 43 |
| 4.2.1 Σύγκριση με κλασικές γεωδαιτικές μεθόδους .....                            | 44 |
| 4.2.2 Η αρχή λειτουργίας των σαρωτών .....                                       | 45 |
| 4.2.3 Διάκριση σαρωτών βάσει της μεθόδου σάρωσης.....                            | 51 |
| i. Σάρωση με τη μέθοδο των παλμών (Time of flight) .....                         | 52 |
| ii. Σάρωση με τη μέθοδο διαφοράς φάσης (Phase shift).....                        | 53 |

|                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.3 ΣΥΝΕΝΩΣΗ ΝΕΦΟΥΣ ΣΗΜΕΙΩΝ .....</b>                                           | <b>54</b> |
| 4.3.1 Γενικά.....                                                                  | 54        |
| 4.3.2 Συνένωση νεφών με χρήση ομόλογων σημείων<br>(Cloud based Registration) ..... | 57        |
| 4.3.3 Συνένωση νεφών με χρήση ειδικών στόχων<br>(Target based Registration) .....  | 59        |
| 4.3.4 Με συνδυασμό των μεθόδων .....                                               | 60        |
| <b>4.4 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑΣ .....</b>                                      | <b>61</b> |
| 4.4.1 Έμμεση γεωαναφορά (indirect georeference).....                               | 62        |
| i. Γεωαναφορά σε ένα βήμα (one step approach) .....                                | 62        |
| ii. Γεωαναφορά σε δύο βήματα (two steps approach) .....                            | 63        |
| 4.4.2 Άμεση γεωαναφορά (direct georeference).....                                  | 63        |
| <b>4.5 ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΩΝ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΣΑΡΩΤΩΝ LASER.....</b>                                | <b>64</b> |
| 4.5.1 Ακρίβεια μέτρησης γωνίας.....                                                | 65        |
| 4.5.2 Ακρίβεια μέτρησης απόστασης.....                                             | 65        |
| 4.5.3 Η ανάλυση του σαρωτή (resolution).....                                       | 66        |
| 4.5.4 Εκτίμηση της ακρίβειας.....                                                  | 67        |
| <b>4.6 ΜΕΛΕΤΗ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ.....</b>                                    | <b>68</b> |
| <b>4.7 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΑΡΩΣΗΣ .....</b>                                                | <b>69</b> |
| 4.7.1 Σφάλμα ακμής .....                                                           | 69        |
| 4.7.2 Θόρυβος σάρωσης .....                                                        | 69        |
| 4.7.3 Άλλες πηγές σφαλμάτων .....                                                  | 70        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΑΡΩΣΕΙΣ .....</b>                                     | <b>71</b> |
| <b>5.1 ΓΕΝΙΚΑ .....</b>                                                            | <b>73</b> |
| <b>5.2 ΠΕΙΡΑΜΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΣΤΙΩΝ.....</b>                                            | <b>73</b> |
| 5.2.1 Περιγραφή γεωδαιτικής μεθοδολογίας.....                                      | 73        |
| 5.2.2 Περιγραφή μεθοδολογίας σαρώσεων .....                                        | 77        |
| 5.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων .....                                                 | 81        |
| <b>5.3 ΠΕΙΡΑΜΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΛΑΜΠΑΔΑΡΙΟΥ .....</b>                                      | <b>83</b> |
| 5.3.1 Περιγραφή γεωδαιτικής μεθοδολογίας.....                                      | 83        |
| 5.3.2 Περιγραφή μεθοδολογίας σαρώσεων .....                                        | 84        |
| 5.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων .....                                                 | 86        |
| <b>5.4 ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΑΡΩΣΕΩΝ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΣΤΟΧΟΥΣ.....</b>                          | <b>86</b> |
| <b>5.5 ΠΕΙΡΑΜΑ ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑΣ ΝΕΦΟΥΣ ΒΑΣΕΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΣΤΑΣΕΩΝ .....</b>             | <b>88</b> |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΔΙΚΤΥΟ ΟΤΙΖΟΝΤΙΟΥ ΚΑΙ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ .....</b>                 | <b>81</b> |

|                                                                             |            |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>6.1 ΓΕΝΙΚΑ .....</b>                                                     | <b>93</b>  |
| <b>6.2 ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΙΔΡΥΣΗ ΚΟΡΥΦΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ .....</b> | <b>93</b>  |
| <b>6.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ.....</b>                                 | <b>96</b>  |
| 6.3.1 Όργανα και παρελκόμενα .....                                          | 96         |
| 6.3.2 Μετρήσεις στοιχείων δικτύου ελέγχου .....                             | 97         |
| 6.3.3 Τα στοιχεία του δικτύου ελέγχου .....                                 | 97         |
| <b>6.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ .....</b>                                    | <b>98</b>  |
| 6.4.1 Επίλυση του δικτύου οριζοντίου ελέγχου .....                          | 98         |
| 6.4.2 Στατιστικοί έλεγχοι δικτύου οριζοντίου ελέγχου.....                   | 100        |
| i. Μονοδιάστατος έλεγχος αξιοπιστίας – Test $\chi^2$ .....                  | 100        |
| ii. Σάρωση δεδομένων .....                                                  | 100        |
| 6.4.3 Επίλυση του δικτύου κατακόρυφου ελέγχου .....                         | 101        |
| 6.4.4 Στατιστικοί έλεγχοι του δικτύου κατακόρυφου ελέγχου .....             | 103        |
| i. Μονοδιάστατος έλεγχος αξιοπιστίας – Test $\chi^2$ .....                  | 103        |
| ii. Σάρωση δεδομένων .....                                                  | 103        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ ΚΙΟΝΑ .....</b>   | <b>105</b> |
| <b>7.1 ΓΕΝΙΚΑ .....</b>                                                     | <b>107</b> |
| <b>7.2 ΟΙ ΣΑΡΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΙΟΝΑ.....</b>                                       | <b>107</b> |
| 7.2.1 Ο προγραμματισμός των σαρώσεων .....                                  | 107        |
| 7.2.2 Εξοπλισμός και παρελκόμενα .....                                      | 107        |
| 7.2.3 Η διαδικασία της σάρωσης, γεωαναφοράς και συνένωσης.....              | 108        |
| 7.2.4 Η επεξεργασία του νέφους σημείων .....                                | 110        |
| <b>7.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....</b>                             | <b>114</b> |
| 7.3.1 Δημιουργία τομών.....                                                 | 114        |
| 7.3.2 Υπολογισμός κέντρων και ακτίνων .....                                 | 118        |
| <b>7.4 ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΚΙΟΝΑ.....</b>                  | <b>121</b> |
| 7.4.1 Μετακινήσεις και στροφές μεταξύ των σπονδύλων .....                   | 121        |
| 7.4.2 Οι οπτικές εκλεπτύνσεις του κίονα .....                               | 125        |
| i. Η μείωση και ένταση του κίονα .....                                      | 126        |
| ii. Η κλίση του κίονα.....                                                  | 131        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ .....</b>                                  | <b>133</b> |
| <b>8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>                                                   | <b>135</b> |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....</b>                             | <b>139</b> |
| <b>9.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>                                                | <b>141</b> |
| 9.1.1 Συμπεράσματα από την μελέτη του κίονα .....                           | 141        |
| 9.1.2 Συμπεράσματα πειραματικών εργασιών.....                               | 143        |

|                                                     |            |
|-----------------------------------------------------|------------|
| <b>9.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....</b>                          | <b>144</b> |
| <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΙΣΤΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>                | <b>145</b> |
| <b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι-ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ .....</b>      | <b>147</b> |
| <b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ-ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....</b> | <b>153</b> |
| <b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ-ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΔΙΚΤΟΥ .....</b>        | <b>159</b> |



## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

|                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Διάγραμμα 7.1:</b> Ένταση κίονα.....                                     | 130 |
| <b>Διάγραμμα 8.1:</b> Κατανομή των εργασιών της διπλωματικής εργασίας ..... | 135 |
| <b>Διάγραμμα 8.2:</b> Κατανομή των εργασιών υπαίθρου .....                  | 136 |
| <b>Διάγραμμα 8.3:</b> Κατανομή των εργασιών γραφείου .....                  | 137 |

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

|                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Εικόνα 2.1:</b> Αεροφωτογραφία της κοιλάδας της Αρχαίας Νεμέας από ανατολή. ....                                                        | 14 |
| <b>Εικόνα 2.2:</b> Ο Αρχαιολογικός χώρος της αρχαίας Νεμέας.....                                                                           | 16 |
| <b>Εικόνα 2.3:</b> Αναπαράσταση του Σταδίου και του βόρειου άκρου του.....                                                                 | 18 |
| <b>Εικόνα 2.3:</b> Αναπαράσταση του αποδυτηρίου με την ελεγχόμενη πρόσβαση προς τη στοάς.....                                              | 19 |
| <b>Εικόνα 3.1:</b> Κάτοψη περίπτερου ναού .....                                                                                            | 24 |
| <b>Εικόνα 3.2:</b> (α) Απλός ναός εν παραστάσι<br>(β) Απλός ναός πρόστυλος.....                                                            | 24 |
| <b>Εικόνα 3.3:</b> (α) Διπλός ναός εν παραστάσι<br>(β) Διπλός ναός αμφιπρόστυλος .....                                                     | 24 |
| <b>Εικόνα 3.4:</b> (α) Περίπτερος ναός<br>(β) Δίπτερος ναός<br>(γ) Ψευδοπερίπτερος ναός .....                                              | 25 |
| <b>Εικόνα 3.5:</b> Κρηπίδα ναού .....                                                                                                      | 26 |
| <b>Εικόνα 3.6:</b> Ναός Δωρικού Ρυθμού.....                                                                                                | 29 |
| <b>Εικόνα 3.7:</b> Ιωνικός Ρυθμός.....                                                                                                     | 31 |
| <b>Εικόνα 3.8:</b> Κορινθιακό κιονόκρανο.....                                                                                              | 32 |
| <b>Εικόνα 3.9:</b> Οπτικές εκλεπτύνσεις ναού .....                                                                                         | 35 |
| <b>Εικόνα 3.10:</b> Κάτοψη Ναού του Νεμείου Διός.....                                                                                      | 37 |
| <b>Εικόνα 3.11:</b> (α) Πιθανή επόμενη επέκταση αναστήλωσης<br>(β) Πιθανή μελλοντική επέκταση αναστήλωσης.....                             | 39 |
| <b>Εικόνα 4.1:</b> Το στιγμιαίο οπτικό πεδίο (IFOV) και το οπτικό πεδίο (FOV) για την μέτρηση τρισδιάστατων καρτεσιανών συντεταγμένων..... | 46 |
| <b>Εικόνα 4.2:</b> (α) Περιστρεφόμενο κάτοπτρο<br>(β) Ταλαντευόμενο κάτοπτρο<br>(γ) Πολυγωνικό κάτοπτρο .....                              | 47 |

|                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Εικόνα 4.3:</b> Τομή σαρωτή με διπλά κάτοπτρα .....                                                                                                         | 47  |
| <b>Εικόνα 4.4:</b> Σχήματα σάρωσης .....                                                                                                                       | 48  |
| <b>Εικόνα 4.5:</b> Διατάξεις μέτρησης οριζόντιας και κατακόρυφης γωνίας .....                                                                                  | 49  |
| <b>Εικόνα 4.6:</b> Σχηματική απεικόνιση συστημάτων συν/νων σαρωτή και αντικειμένου .....                                                                       | 51  |
| <b>Εικόνα 4.7:</b> Αρχή λειτουργίας time of flight.....                                                                                                        | 53  |
| <b>Εικόνα 4.8:</b> Διαφορά φάσης εκπεμπόμενου και επιστρέφοντος κύματος .....                                                                                  | 53  |
| <b>Εικόνα 4.9:</b> Συνένωση επικαλυπτόμενων σαρώσεων .....                                                                                                     | 57  |
| <b>Εικόνα 4.10:</b> Ειδικοί στόχοι (HDS targets).....                                                                                                          | 57  |
| <b>Εικόνα 4.11:</b> Συνένωση σαρώσεων με χρήση ειδικών στόχων.....                                                                                             | 60  |
| <b>Εικόνα 4.12:</b> Έμμεση γεωαναφορά μοντέλου σε δύο βήματα.....                                                                                              | 62  |
| <b>Εικόνα 4.13:</b> Έμμεση γεωαναφορά μοντέλου σε ένα βήμα .....                                                                                               | 63  |
| <b>Εικόνα 4.14:</b> Άμεση γεωαναφορά μοντέλου .....                                                                                                            | 64  |
| <b>Εικόνα 4.15:</b> Αβεβαιότητα μέτρησης σαρωτή .....                                                                                                          | 65  |
| <b>Εικόνα 4.16:</b> Διασπορά του μεγέθους της διαμέτρου της ακτίνας laser.....                                                                                 | 67  |
| <b>Εικόνα 5.1:</b> Ειδική κατασκευή για σημειακή εφαρμογή της σταδίας .....                                                                                    | 75  |
| <b>Εικόνα 5.2:</b> (α) Νέφος σημείων υποστυλώματος στο περιβάλλον του Cyclone<br>(β) Μοντελοποιημένη επιφάνεια υποστυλώματος στο περιβάλλον του Geomagic ..... | 81  |
| <b>Εικόνα 5.3:</b> (α) Τοίχος που μελετήθηκε<br>(β) Μοντελοποιημένη επιφάνεια τοίχου στο περιβάλλον του Geomagic .....                                         | 85  |
| <b>Εικόνα 5.4:</b> Επιφάνειες υλικών διαφορετικής υφής.....                                                                                                    | 85  |
| <b>Εικόνα 5.5:</b> (α) Σφαιρικός στόχος<br>(β) Σαρωμένος σφαιρικός στόχος.....                                                                                 | 87  |
| <b>Εικόνα 5.6:</b> (α) Αυτοσχέδιος επίπεδος στόχος<br>(β) Σαρωμένος αυτοσχέδιος επίπεδος στόχος .....                                                          | 87  |
| <b>Εικόνα 6.1:</b> Ο κίονας K31 του ναού του Νεμείου Διός .....                                                                                                | 94  |
| <b>Εικόνα 7.1:</b> Πλαίσιο διαλόγου των αποτελεσμάτων της γεωαναφοράς.....                                                                                     | 109 |
| <b>Εικόνα 7.2:</b> Νέφος σημείων της νοτιοανατολικής πλευράς του ναού .....                                                                                    | 110 |
| <b>Εικόνα 7.3:</b> (α) Νέφος σημείων του κίονα ως αποτέλεσμα επεξεργασίας στο λογισμικό Cyclone.....                                                           | 112 |
| (β) Μοντελοποιημένη επιφάνεια του κίονα ως αποτέλεσμα επεξεργασίας στο λογισμικό Geomagic Studio .....                                                         | 113 |

|                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Εικόνα 7.4:</b> (α) Μοντέλο κίονα με επιλεγμένο τον σπόνδυλο που θα αποτελέσει νέο αντικείμενο<br>(β) Ο απομονωμένος σπόνδυλος ως νέο αντικείμενο ..... | 115 |
| <b>Εικόνα 7.5:</b> Δημιουργία οριζόντιας τομής στη μέση του 7 <sup>ου</sup> σπονδύλου .....                                                                | 106 |
| <b>Εικόνα 7.6:</b> Σημειοσύνολο ως αποτέλεσμα της οριζόντιας τομής .....                                                                                   | 116 |
| <b>Εικόνα 7.7:</b> Σύνολο τομών στον κίονα K31 .....                                                                                                       | 117 |
| <b>Εικόνα 7.8:</b> Τομή σπονδύλου με κατάλληλο επίπεδο για τον προσδιορισμό των άνισων υψών .....                                                          | 132 |

### **ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ**

|                                                                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Πίνακας 5.1:</b> Τεχνικά χαρακτηριστικά γεωδαιτικού σταθμού TCR405 .....                                                                                 | 74  |
| <b>Πίνακας 5.2:</b> Τελικές συντεταγμένες κορυφών όδευσης .....                                                                                             | 76  |
| <b>Πίνακας 5.3:</b> Σύγκριση αποτελεσμάτων κέντρου κύκλου και ακτίνας .....                                                                                 | 82  |
| <b>Πίνακας 5.4:</b> Σύγκριση της ακτίνας από την εφαρμογή των τριών μεθόδων .....                                                                           | 82  |
| <b>Πίνακας 5.5:</b> Τελικές συντεταγμένες κορυφών όδευσης .....                                                                                             | 84  |
| <b>Πίνακας 5.6:</b> Σύγκριση αποτελεσμάτων διαφόρων διαστάσεων .....                                                                                        | 86  |
| <b>Πίνακας 5.7:</b> Αποτελέσματα γεωαναφοράς με χρήση διαφορετικών στόχων .....                                                                             | 88  |
| <b>Πίνακας 5.8:</b> Αποτελέσματα γεωαναφοράς με τοποθέτηση στόχου σε διαφορετικές κορυφές .....                                                             | 89  |
| <b>Πίνακας 6.1:</b> Τεχνικά χαρακτηριστικά γεωδαιτικού σταθμού TCR303 .....                                                                                 | 96  |
| <b>Πίνακας 6.2:</b> Κατακόρυφες και οριζόντιες γωνίες, κεκλιμένα μήκη, οριζόντιες αποστάσεις και τελικές υψομετρικές διαφορές, μεταξύ κορυφών δικτύου ..... | 98  |
| <b>Πίνακας 6.3:</b> Στοιχεία του δικτύου Οριζοντίου Ελέγχου .....                                                                                           | 89  |
| <b>Πίνακας 6.4:</b> Προσωρινές και τελικές συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου Οριζοντίου Ελέγχου με τις αβεβαιότητές τους .....                          | 99  |
| <b>Πίνακας 6.5:</b> Στατιστικός έλεγχος παρατηρήσεων του δικτύου Οριζοντίου Ελέγχου κατά Baarda .....                                                       | 101 |
| <b>Πίνακας 6.6:</b> Στοιχεία του δικτύου Κατακόρυφου Ελέγχου .....                                                                                          | 102 |
| <b>Πίνακας 6.7:</b> Τελικά υψόμετρα κορυφών δικτύου Κατακόρυφου Ελέγχου με τις αβεβαιότητές τους .....                                                      | 103 |
| <b>Πίνακας 6.8:</b> Στατιστικός έλεγχος παρατηρήσεων του δικτύου Κατακόρυφου Ελέγχου κατά Baarda .....                                                      | 104 |
| <b>Πίνακας 7.1:</b> Πλαίσιο διαλόγου των αποτελεσμάτων της γεωαναφοράς .....                                                                                | 109 |

|                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Πίνακας 7.2:</b> Υψόμετρα, οριζοντιογραφικές συντεταγμένες κέντρου και ακτίνες σπονδύλων με τις αβεβαιότητές τους για κάθε τομή .....               | 120 |
| <b>Πίνακας 7.3:</b> Στροφές και μετατοπίσεις σπονδύλων με τις αβεβαιότητές τους, διεύθυνση διανυσμάτων μετακίνησης και στατιστικός έλεγχος αυτών ..... | 122 |
| <b>Πίνακας 7.4:</b> Μετακινήσεις σπονδύλων με τις αβεβαιότητές τους, διεύθυνση διανυσμάτων μετακίνησης και στροφές .....                               | 125 |
| <b>Πίνακας 7.5:</b> Ένταση και διάμετροι σπονδύλων με τις αβεβαιότητές τους για κάθε τομή .....                                                        | 128 |

### **ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

|                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Σχήμα 3.1:</b> Τα άνισα ύψη των πρώτων σπονδύλων και οι κλίσεις του κίονα ..... | 34  |
| <b>Σχήμα 6.1:</b> Δίκτυο Ελέγχου .....                                             | 95  |
| <b>Σχήμα 7.1:</b> Προσαρμογή εγγεγραμμένου κύκλου στην τομή του κίονα .....        | 118 |
| <b>Σχήμα 7.2:</b> Αλληλουχία μετατοπισμένων κέντρων .....                          | 124 |
| <b>Σχήμα 7.3:</b> Ένταση κίονα με τις οριζόντιες διαστάσεις σε έξαρση .....        | 129 |

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η περιοχή της Νεμέας, παρουσιάζει ιδιαίτερο ανασκαπτικό ενδιαφέρον, αφού συγκεντρώνει σημαντικό αριθμό μνημειακών συνόλων, τα οποία αποτελούν πολιτιστική κληρονομιά, που χρειάζεται να αναδειχθεί. Ειδικότερα, όσον αφορά τον Ναό του Νεμείου Διός, κατά καιρούς έχει τονισθεί η αναγκαιότητα της αναστήλωσής του, εφόσον αποτελεί κομβικό μνημείο της αρχαιότητας. Επιπλέον, το γεγονός ότι το μεγαλύτερο ποσοστό του αυθεντικού δομικού στοιχείου των κίωνων (σπόνδυλοι) διασώζεται, ενθαρρύνει τις αναστηλωτικές ενέργειες στην περιοχή. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι τρεις, ιστάμενοι από την αρχαιότητα, κίονες οι οποίοι έχουν υποστεί σημαντικές παραμορφώσεις, λόγω των μετακινήσεων των σπονδύλων τους. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το ενδιαφέρον εστιάσθηκε στον κίονα K31 στην ανατολική πλευρά της περίπτωσης, οι σπόνδυλοι του οποίου έχουν εμφανείς μετακινήσεις.

Συγκεκριμένα, αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής, αποτέλεσε η διερεύνηση της δυνατότητας προσδιορισμού των παραμορφώσεων του προαναφερθέντος κίονα του ναού, μέσω της δημιουργίας τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου. Επιπλέον, διερευνήθηκε η δυνατότητα προσδιορισμού των οπτικών εκλεπτύνσεων του κίονα, δηλαδή η μείωση, ένταση και κλίσεις αυτού.

Για τον σκοπό αυτό, ιδρύθηκαν πάνω στο ναό και περιμετρικά του, δίκτυο οριζοντίου και κατακόρυφου ελέγχου. Μετρήθηκαν τα στοιχεία του δικτύου και οι παρατηρήσεις συνορθώθηκαν με τη μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων. Τέλος το δίκτυο επιλύθηκε με τις ελάχιστες εξωτερικές δεσμεύσεις.

Στη συνέχεια, από τις κορυφές του δικτύου, πραγματοποιήθηκαν σαρώσεις του κίονα K31 με την χρήση Επίγειου Τρισδιάστατου Σαρωτή (Terrestrial Laser Scanner) και δημιουργήθηκε το τρισδιάστατο μοντέλο του. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία, προσδιορίστηκαν οι σχετικές μετακινήσεις και στροφές μεταξύ των σπονδύλων του, καθώς και τα γεωμετρικά στοιχεία τους. Η επεξεργασία των ψηφιακών δεδομένων έγινε με τα λογισμικά Cyclone και Geomagic Studio.



## **ABSTRACT**

The area of ancient Nemea and especially the temple of Zeus have been important cases of excavation and restoration works. More especially, as far as the temple is concerned, the importance of its restoration has been emphasized many times in the past, especially since its demolition was due to human and not natural causes. The fact that most of the original material of the columns is preserved and still in place, has encouraged the restoration works of the temple. A project, concerning the restoration of 4 columns of the northeastern corner of the peristasis, took place, and was accomplished, during 2004 – 2013. Three columns that have been standing erect since the ancient times are also of great interest since they have undergone significant deformations. In this diploma thesis the interest is focused on the column K31 (4<sup>th</sup> from north) of the eastern side of the peristasis, where the movements between its drums are visible.

The purpose of this diploma thesis is to investigate the possibility to determine the deformations and the documentation of this column through the creation of a three-dimensional digital model. For this purpose, an Horizontal and a Vertical Control Network were established on the body and in the vicinity of the temple, its elements were measured and the observations were adjusted using the Least Squares Method.

Scans of the column were carried out, using a three dimensional terrestrial laser scanner and the column's three dimensional digital model was created. After editing the raw model, the drums' displacements, the rotations between column's drums together with the drums' features were estimated. Moreover, the column's optical refinements such as the meiosis, the entasis and the column's inclination were determined through the 3D digital model. Finally, the conclusions withdrawn are presented.





Κεφάλαιο 1  
ΕΙΣΑΓΩΓΗ



### **1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής αποτέλεσε η διερεύνηση της δυνατότητας προσδιορισμού των παραμορφώσεων καθώς και η τεκμηρίωση των εκλεπτύνσεων κίονα της περίπτωσης του Ναού του Νεμείου Διός, μέσω της δημιουργίας τρισδιάστατου μοντέλου με την χρήση επίγειου τρισδιάστατου σαρωτή.

Επιλέχθηκε να μελετηθεί ο Κ31 κίονας της περίπτωσης του ναού, του οποίου οι παραμορφώσεις μεταξύ των σπονδύλων είναι εμφανείς. Συγκεκριμένα, βασικό σκοπό αποτέλεσε ο προσδιορισμός των γεωμετρικών στοιχείων από το τρισδιάστατο μοντέλο του κίονα, όπως αυτό προέκυψε μετά από τις σαρώσεις.

Για τον λόγο αυτό ιδρύθηκε στην περιοχή μελέτης δίκτυο οριζοντίου και κατακόρυφου Ελέγχου το οποίο επιλύθηκε με την Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων και εξασφαλίστηκε με τον τρόπο αυτό ο μετέπειτα αξιόπιστος προσδιορισμός των παραμορφώσεων και εκλεπτύνσεων.

Αφού έγινε κατάλληλη επεξεργασία των σαρώσεων, προσδιορίστηκε η ακτίνα του κίονα σε διάφορες στάθμες. Ακολούθησε η ανίχνευση των μετατοπίσεων και στροφών μεταξύ των σπονδύλων του κίονα αξιόπιστα, μέσω της εφαρμογής γεωδαιτικής μεθοδολογίας.

Εντοπίστηκαν επιπλέον οι εκλεπτύνσεις του κίονα οι οποίες είναι απαραίτητο να είναι γνωστές σε πιθανές αναστηλωτικές εργασίες. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με αντίστοιχα της μελέτης αναστήλωσης του κίονα και τελικά αποδείχθηκε ότι είναι δυνατόν να προσδιορισθούν με γεωδαιτική μεθοδολογία που αξιοποιεί εξελιγμένα όργανα όπως είναι οι επίγειοι τρισδιάστατοι σαρωτές.

### **1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από εννέα κεφάλαια και τρία παραρτήματα. Ειδικότερα:

Στο **πρώτο κεφάλαιο** περιλαμβάνεται η εισαγωγή, η οποία απαρτίζεται από τον σκοπό και την δομή της διπλωματικής εργασίας.

Το **δεύτερο κεφάλαιο** αφορά την περιοχή μελέτης. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται ο ευρύτερος αρχαιολογικός χώρος της Νεμέας στον οποίο πραγματοποιείται ιστορική αναδρομή.

Το **τρίτο κεφάλαιο** περιλαμβάνει τα γενικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής των αρχαίων ναών. Γίνεται αναφορά στους τρεις χαρακτηριστικούς ρυθμούς της αρχαιότητας. Στη συνέχεια αναλύονται οι οπτικές εκλεπτύνσεις των αρχαίων ναών. Τέλος, παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία που αφορούν τον ναό του Νεμείου Διός.

Το **τέταρτο κεφάλαιο** αναφέρεται στους επίγειους σαρωτές. Συγκεκριμένα περιγράφεται, η αρχή λειτουργίας τους και πραγματοποιείται μια συνοπτική περιγραφή των διαφόρων μεθόδων σάρωσης. Περιγράφεται η διαδικασία της συνένωσης και οι διάφοροι τρόποι που αυτή πραγματοποιείται. Επίσης, αναλύεται η διαδικασία της γεωαναφοράς και οι διάφορες μέθοδοι με τις οποίες επιτυγχάνεται. Ακολουθούν στοιχεία σχετικά με την ακρίβεια της σάρωσης και τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται. Τέλος παρατίθενται πληροφορίες σχετικά με την μελέτη των παραμορφώσεων σε περιπτώσεις σαρωμένων μοντέλων και δίνεται μια συνοπτική περιγραφή των προβλημάτων που παρουσιάζονται σε τέτοιου είδους εργασίες.

Το **πέμπτο** κεφάλαιο αναφέρεται στην διεξαγωγή των πειραματικών εργασιών που πραγματοποιήθηκαν, πριν από τις σαρώσεις στο ναό. Οι εργασίες αυτές αφορούν την μελέτη υποστυλώματος κυκλικής διατομής της περιοχής της Παλαιάς Φοιτητικής Εστίας καθώς και τοίχου του κτιρίου Λαμπαδαρίου. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά την διαδικασία των σαρώσεων και τα λογισμικά με τα οποία έγινε η επεξεργασία του νέφους σημείων. Τέλος γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάμεσα στις διάφορες μεθόδους που εφαρμόστηκαν, δηλαδή στην κλασική γεωδαιτική, στις άμεσες μετρήσεις και στις σαρώσεις.

Το **έκτο** κεφάλαιο περιλαμβάνει την ίδρυση των κορυφών του δικτύου ελέγχου (οριζοντίου και κατακόρυφου) στο ναό, την μέτρηση των στοιχείων τους, την συνόρθωση των παρατηρήσεων, την επίλυσή τους και τους ελέγχους αξιοπιστίας των λύσεων. Εν συνεχεία παρατίθενται τα αποτελέσματα της επίλυσης, οι τελικές συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου, καθώς και τα υψόμετρα αυτών με τις αβεβαιότητες τους.

Το **έβδομο** κεφάλαιο αφορά τις εργασίες σάρωσης στην περιοχή μελέτης. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται ο τρόπος συλλογής των ψηφιακών δεδομένων και η μετέπειτα επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων. Στην συνέχεια περιγράφεται η επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε για την τεκμηρίωση του κίονα και τον προσδιορισμό των γεωμετρικών του στοιχείων. Υπολογίζονται στοιχεία όπως οι μετακινήσεις και στροφές μεταξύ των σπονδύλων του καθώς και η διάμετρός του σε κάθε στάθμη. Επίσης, υπολογίζονται οι οπτικές εκλεπτύνσεις του, που είναι η μείωση της διαμέτρου του, η έντασή του και οι κλίσεις του.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο **έκτο** κεφάλαιο παρουσιάζεται η χρονική κατανομή των εργασιών που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματική εργασίας.

Στο **έβδομο** κεφάλαιο, αναφέρονται τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής και οι προτάσεις που προέκυψαν.

Το **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I** περιλαμβάνει τους υπολογισμούς που αφορούν τις πειραματικές σαρώσεις. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η επεξεργασία των μετρήσεων, ο υπολογισμός των τοποσταθερών καθώς ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας της προσομοίωσης του υποστυλώματος με κύκλο.

Στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II** της εργασίας συμπεριλαμβάνεται η επεξεργασία των μετρήσεων της περιοχής μελέτης και οι πίνακες μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας του δικτύου οριζοντίου και κατακόρυφου ελέγχου.

Στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ III** συμπεριλαμβάνεται η τεκμηρίωση των κορυφών του δικτύου ελέγχου καθώς και η φωτογραφική τεκμηρίωση της περιοχής μελέτης.



Κεφάλαιο 2  
ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ





## 2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η Νεμέα, κωμόπολη του Νομού Κορινθίας, βρίσκεται περίπου 42 χλμ. νοτιοδυτικά της Κορίνθου. Αποτελεί την έδρα του ομώνυμου Δήμου Νεμέας, ο οποίος απαρτίζεται από 10 κοινότητες. Ο Δήμος Νεμέας περιβάλλεται από αρχαιολογικούς χώρους, μερικοί από τους οποίους έχουν ήδη αναδειχθεί ενώ άλλοι παραμένουν αναξιοποίητοι. Ένας από τους γνωστούς και αξιοποιημένους αρχαιολογικούς χώρους της περιοχής είναι η αρχαία Νεμέα, στην οποία λειτουργεί οργανωμένο μουσείο.

Η ευρύτερη περιοχή της αρχαίας Νεμέας βρίσκεται στις ανατολικές υπώρειες των βουνών της βορειοανατολικής Πελοποννήσου. Έχει υψόμετρο περίπου 350 μέτρα και περιβάλλεται από χαμηλούς λόφους που σχηματίζουν μια λεκάνη πλάτους περίπου ενός χιλιομέτρου με κατεύθυνση από ανατολή προς δύση και μήκους περίπου τριών χιλιομέτρων. Η φυσική αποστράγγιση της κοιλάδας, η οποία πραγματοποιείται από τον βορρά προς τον Κορινθιακό Κόλπο, δεν ήταν πάντοτε απρόσκοπτη, με συνέπεια το χειμώνα να μετατρέπεται σε έλος σε αντίθεση με το καλοκαίρι, που η περιοχή αποστραγγιζόταν πλήρως.

Το όνομα «Νεμέα» προέρχεται από την γεωμορφολογία της περιοχής. Έχει σχέση με το γεγονός ότι κατά το μεγαλύτερο διάστημα του έτους η κοιλάδα δεν ήταν αρόσιμη ή κατοικήσιμη, αλλά μόνο κατάλληλη για βοσκή. Η κοιλάδα κατοικήθηκε μετά τα έργα αποστράγγισης που έγιναν στο χώρο.

Πρώτες μαρτυρίες για οικισμό στην περιοχή εμφανίζονται το 1500 π.Χ. στο ύψωμα Τσουγκίζα, χωρίς όμως να υπάρχουν γραπτά κείμενα. Τον 10<sup>ο</sup> αιώνα κτίσθηκε σε απόσταση τριών χιλιομέτρων από την Νεμέα, η πόλη Φλειούντα. Αυτή η πόλη θεωρείται ότι είναι η αρχαία Νεμέα. Η Φλειούντα γνώρισε ιδιαίτερη ακμή τον 6<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. Κοντά στην σημερινή αρχαία Νεμέα (Ηράκλειο) το 576 π.Χ. θεμελιώθηκε το ιερό του Δία, το οποίο περιλάμβανε ξενώνα, λουτρό και στάδιο. Εκεί διεξάγονταν οι γνωστοί ομώνυμοι αγώνες, τα Νέμεα.

Τα Νέμεα εντάχθηκαν στον κύκλο των ιερών πανελληνίων αγώνων της αρχαιότητας το 573 π.Χ και έκτοτε συναποτέλεσαν με τα Ολύμπια, τα Πύθια και τα Ίσθμια τους αγώνες της λεγόμενης «αρχαίας περιόδου». Διεξάγονταν κάθε δύο χρόνια, τη δεύτερη πανσέληνο μετά το θερινό ηλιοστάσιο και η διάρκειά τους εικάζεται ότι ήταν πέντε ημέρες. Τα Νέμεα ήταν ταφικοί αγώνες προς τιμήν των «Επτά επί Θήβας» αλλά και προς τιμήν του Οφέλτη Δία. Κατά την αρχαία ελληνική μυθολογία, το βρέφος Οφέλτης, γιος του βασιλιά της Νεμέας Λυκούργου, βρήκε τραγικό πρόωρο θάνατο, που αποτέλεσε την αφορμή των πρώτων Νέμεων Αγώνων. Ο πένθιμος χαρακτήρας των αγώνων εκφραζόταν κατά τους ιστορικούς χρόνους με το στεφάνι της νίκης, τα μαύρα ενδύματα των κριτών και το άλσος από κυπαρίσσια

που περιέβαλε το ναό του Διός. Κατά την διάρκειά τους συνομολογούνταν ιερή εκχειρία, με βάση την οποία σταματούσε κάθε εχθροπραξία ανάμεσα στις ελληνικές πόλεις (<http://www.orheltes.gr>).

### 2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στην κοιλάδα της Νεμέας έχουν εντοπισθεί προϊστορικά ευρήματα, τα οποία πείθουν για την ύπαρξη ανθρώπινης δραστηριότητας από αυτήν την εποχή. Τα ευρήματα εντοπίζονται στο μικρό λόφο της Τσούγκιζας, που βρίσκεται στο βορειοδυτικό άκρο της σύγχρονης κωμόπολης.



**Εικόνα 2.1:** Αεροφωτογραφία της κοιλάδας της Αρχαίας Νεμέας από ανατολή. Στο κέντρο διακρίνεται το στάδιο, αριστερά το σημερινό χωριό και δεξιά ο προϊστορικός λόφος της Τσούγκιζας. Κεντρικά, πίσω από το στάδιο φαίνεται το μουσείο και δεξιά αυτού ο ναός του Νεμείου Διός.

**Picture 2.1:** Aerial view of the valley of Ancient Nemea from east. The stadium is distinguished on the center, the village on the left and the prehistoric hill Tsoungiza on the right. The Temple of Nemean Zeus is detected on the right of the ancient stadium.

Ειδικότερα, σημαντικές ποσότητες κεραμικών (όστρακα), αλλά και λίθινων εργαλείων που έχουν βρεθεί σε μεγάλα κοιλάματα, αποδεικνύουν την ύπαρξη οικισμού σημαντικού μεγέθους της Πρώιμης Νεολιθικής περιόδου (περίπου 5000 π.Χ.). Μετά από περίπου 3000 χρόνια (Μεσο-Ελλαδικά), εμφανίζονται και πάλι σημάδια κατοίκησης στην ίδια περιοχή. Στη συνέχεια, αρχιτεκτονικά υπολείμματα ενός οικισμού, διάσπαρτα σε όλη την επιφάνεια του λόφου, δείχνουν ότι η περιοχή κατοικήθηκε κατά την ύστερη Εποχή του Χαλκού (1400 – 1300 π.Χ.). Προς το τέλος της Εποχής του Χαλκού, όλες οι ενδείξεις ανθρώπινης δραστηριότητας εξαφανίζονται και επανεμφανίζονται τον 7<sup>ο</sup> και 8<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ.. Παρ' όλα αυτά, το τοπίο αλλάζει σημαντικά περίπου το 600 π.Χ. με την εμφάνιση κεραμικών και άλλων υλικών γεγονός που αποδεικνύει την συστηματική τους χρήση, συνεπώς και έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα. Την ίδια περίοδο καθιερώθηκαν και οι Νέμεοι αγώνες οι οποίοι εντάχθηκαν στον κύκλο των πανελλήνιων αγώνων το 573 π.Χ., ενώ τότε αναπτύχθηκε και το ιερό του Νεμείου Διός.

Ανασκαφές έχουν φέρει στο φως αρκετά στοιχεία σχετικά με την κατάσταση του ιερού του Διός κατά τον 6<sup>ο</sup> με 5<sup>ο</sup> π.Χ.. Αυτά τα στοιχεία αφορούν κυρίως στον ναό και στον βωμό μπροστά από αυτόν. Το οικοδόμημα καταστράφηκε κατά την διάρκεια του Πελοποννησιακού Πολέμου και για 80 περίπου χρόνου δεν υπήρξε καμία παρέμβαση. Περί το 330 π.Χ., στα πλαίσια μεγάλου οικοδομικού προγράμματος, πραγματοποιήθηκε η κατασκευή περιβόλου γύρω από το ιερό του βρέφους Οφέλτη, Λουτρού, Ξενώνα για τους αθλητές των αγώνων, κατοικιών για το προσωπικό τους καθώς και του Σταδίου. Κέντρο βεβαίως του προγράμματος ανοικοδόμησης αποτέλεσε ο ναός του Δία, προορισμένος ως εστιακό σημείο συγκεντρώσεων θρησκευτικού χαρακτήρα των αγώνων.

Μετά την μεταφορά των αγώνων το 271 π.Χ στο Άργος, το ιερό παρακμάζει. Περίπου 400 χρόνια αργότερα, γίνεται λόγος για αρχαίο μνημείο με γκρεμισμένη στέγη και χωρίς το λατρευτικό του άγαλμα.

Μετά από μια σύντομη περίοδο χρήσης του ναού ως εκκλησία κατά την παλαιοχριστιανική περίοδο, ο ναός κατεδαφίσθηκε προκειμένου να εξασφαλισθούν δομικά υλικά για μια Βασιλική<sup>1</sup>, περίπου 100 μέτρα προς τα νότια. Περισσότεροι από 1300 δόμοι αφαιρέθηκαν όπως και το μεγαλύτερο μέρος των θεμελίων των κίωνων ώστε να είναι προσβάσιμοι οι κατώτεροι λίθοι.

Έκτοτε η περιοχή έχει αποτελέσει αντικείμενο σημαντικών ανασκαπτικών μελετών. Συγκεκριμένα, οι πρώτες μικρές ανασκαφές έγιναν το 1766 από την αποστολή Dilettanti και το 1884-1912 από την Γαλλική Αρχαιολογική Σχολή. Το 1924, τον χώρο ανέλαβε η Αμερικανική Σχολή Κλασικών Σπουδών, η οποία με τους H.Hill και C.Belegan πραγματοποίησαν ανασκαφή στο ιερό και τον λόφο Τσουγκιζα μέχρι το 1926. Μετά από μια μακρόχρονη διακοπή, ο C.William ανέσκαψε το 1964 μέρος των

*Βασιλική<sup>1</sup>: Δημόσιο κτίριο το οποίο χρησιμοποιούνταν ως χώρος συνεδριάσεων, εμπορικών συναλλαγών ή δικαστηρίων.*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

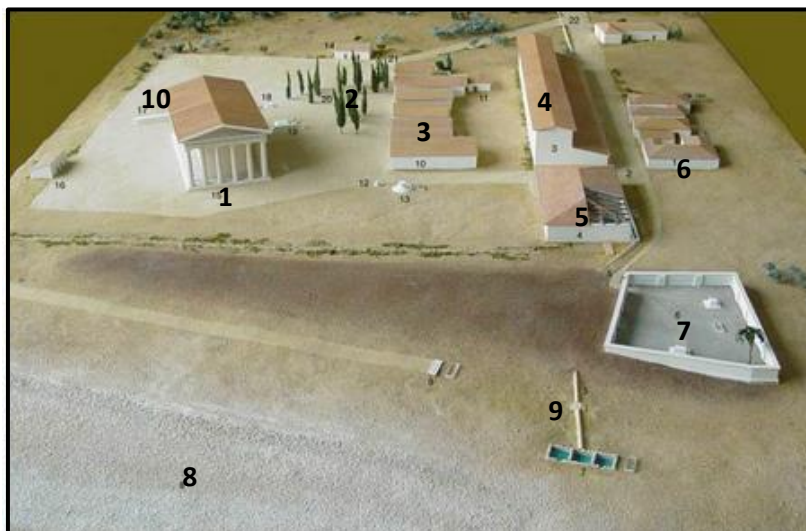
οίκων και του ξενώνα και έναν κλίβανο. Από το 1973 έως το 1986, το Πανεπιστήμιο Berkeley της Καλιφόρνια, υπό την διεύθυνση του S.Miller διεξήγαγε εκτεταμένες και συστηματικές ανασκαφές στον χώρο.

Σχετικά με τις αναστηλωτικές εργασίες, αυτές ξεκίνησαν το 1984 στο ναό του Διός. Μέχρι το 1985, οπότε διακόπηκαν, είχαν τοποθετηθεί στη θέση τους αρχαίοι λιθόπλινθοι από το κρηπίδωμα, το οποίο συμπληρώθηκε εν μέρει με σύγχρονο υλικό. Εκτενής αναφορά πρόκειται να πραγματοποιηθεί στην συνέχεια (παράγραφος 3.3.3) (<http://www.nemeangames.org>).

### 2.3 Ο ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟΣ ΧΩΡΟΣ

Παρά το γεγονός ότι οι αγώνες και η Νεμέα απέκτησαν πανελλήνια εμβέλεια το 573 π.Χ., τα φυσικά κατάλοιπα αυτής της πρώιμης περιόδου είναι διάσπαρτα και αποσπασματικά. Η φύση του χώρου γίνεται αντιληπτή μόνο μετά την επιστροφή των αγώνων από το Άργος το 330 π.Χ.

Τα κύρια μέρη του αρχαιολογικού χώρου ήταν (εικόνα 2.2) ο Ναός του Διός(1), το Ιερό άλσος με τα κυπαρίσσια(2), οι Πρεσβείες(3), ο Ξενώνας(4), το Λουτρό(5), τα οικιακά κτίρια(6), το περιφραγμένο Ηρώον του Οφέλτη(7), ο Ιππόδρομος(8) και η Δεξαμενή(9), ο βωμός του Διός(10).



**Εικόνα 2.2:** Ο Αρχαιολογικός χώρος της αρχαίας Νεμέας  
**Picture 2.2:** The archaeological site of Ancient Nemea

Ο ναός του Διός αποτελούσε το λατρευτικό κέντρο του τόπου. Σε μικρή απόσταση από τον ναό και ανατολικά αυτού, υπήρχε ο Βωμός του Διός, μια επιμήκης και στενή κατασκευή στην οποία αθλητές και προσκυνητές πραγματοποιούσαν θυσίες. Δυτικά του Βωμού υπήρχε το Ιερό Άλσος των κυπαρισσιών στο οποίο έχουν αναφερθεί και οι Πίνδαρος και Πausανίας. Νότια αυτού, υπήρχε σειρά κτιρίων που καλούνταν Οίκοι και χρησίμευαν ως πρεσβείες των διαφόρων πόλεων-κρατών όπως ήταν η Επίδαυρος και η Ρόδος. Οι Οίκοι λειτουργούσαν ως κέντρα διαμονής των κατοίκων τους κατά τους αγώνες.

Ακόμη νοτιότερα συναντούσε κανείς τον διώροφο Ξενώνα όπου φιλοξενούνταν οι αθλητές κατά τη διάρκεια των αγώνων και σε ευθεία γραμμή προς τα δυτικά υπήρχε το Λουτρό το οποίο χρησιμοποιούσαν οι αθλητές κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας τους αλλά και των αγώνων. Στα δυτικά του Λουτρού υπήρχε επιμήκης στενός τύμβος, το περιφραγμένο Ηρώον του Οφέλη, της πρώιμης περιόδου ο οποίος περιελήφθη σε πεντάγωνο περίβολο μεταγενέστερης εποχής εντός του οποίου έχουν βρεθεί βωμοί και εκτεταμένα υπολείμματα θυσιών. Δυτικά αυτού, υπήρχε ιππόδρομος όπου διεξάγονταν τα ιππικά αγωνίσματα των Νεμέων Αγώνων. Μια μακρόστενη δεξαμενή τριών διαμερισμάτων νότια του ιπποδρόμου, εξασφάλιζε επαρκή ποσότητα νερού για τα άλογα. Τέλος, νότια του Ξενώνα είχε οικοδομηθεί σειρά κατοικιών οι οποίες πιθανώς εξυπηρετούσαν το προσωπικό των αγώνων για το προσωπικό των Αγώνων (Ιερείς, κριτές, επιμελητές κ.λπ.).

Πρέπει εντούτοις να σημειωθεί ότι ο αρχαιολογικός χώρος της Αρχαίας Νεμέας δεν αποτελούσε ποτέ οικισμό. Περιελάμβανε τις αθλητικές εγκαταστάσεις, το ναό και όλα τα απαραίτητα κτίρια και υποδομές για την διοργάνωση των αγώνων, όμως δεν είχε ποτέ μόνιμους κατοίκους πέραν ορισμένων, λίγων ιερέων. Βεβαίως, κατά την διάρκεια των αγώνων συγκέντρωνε πλήθος αθλητών και προσκυνητών (<http://www.orpheltes.gr>).

### **2.4 ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ**

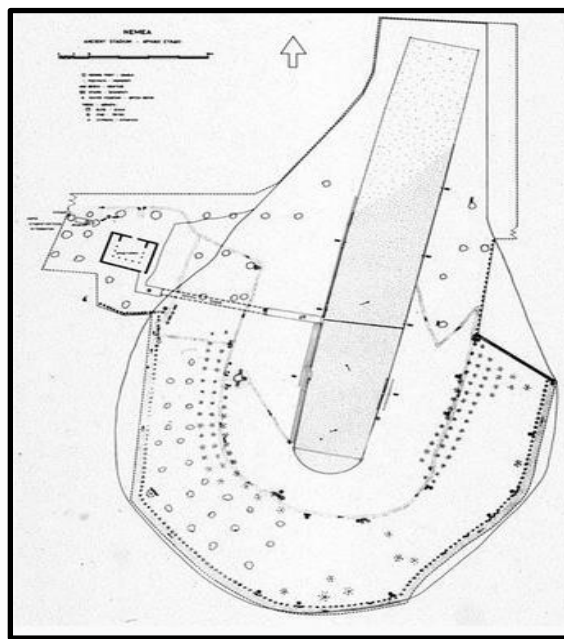
Κατά την αρχαϊκή περίοδο, το στάδιο βρισκόταν στα ανατολικά της βάσης του τύμβου ενώ ο ιππόδρομος διέτρεχε το μήκος της δυτικής πλευράς. Όμως, το 335 π.Χ μεταφέρθηκε σε άλλη θέση και συγκεκριμένα σε απόσταση 400 περίπου μέτρων νοτιοανατολικά. Υπολογίζεται ότι χωρούσε 40.000 θεατές που συγκεντρώνονταν από όλα σχεδόν τα μέρη της χώρας.

Εκεί πραγματοποιούνταν κάθε δύο χρόνια τα Νέμεα, πανελλήνιοι αγώνες προς τιμήν του βρέφους Οφέλη και αφιερωμένοι στο Δία. Οι αγώνες περιελάμβαναν αγώνες δρόμου των 200, 400 και 5000 μέτρων, πάλη, πυγμαχία, παγκράτιο (είδος

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

πάλης) και το κλασικό πένταθλο το οποίο περιελάμβανε αγώνα δρόμου 200 μ., ακοντισμό, δισκοβολία, άλμα εις μήκος και πάλη. Το 271 π.Χ. οι αγώνες μεταφέρθηκαν στο Άργος, και παρά τη μάταιη προσπάθεια του Άρατου να τους επαναφέρει στη Νεμέα το 235 π.Χ., τεκμηριώνεται ότι παρέμειναν στο Άργος για όλη την υπόλοιπη αρχαιότητα.

Το στάδιο, είχε χαρακτηριστικά όμοια με τα υπόλοιπα στάδια της πρώιμης Ελληνιστικής περιόδου όπως αυτά της Ολυμπίας και της Αθήνας. Η νότια κυρτή του απόληξη βρίσκονταν μεταξύ δύο κορυφογραμμών και το βόρειο άκρο του εδράζονταν σε τεχνητό επίχωμα.



**Εικόνα 2.3:** Αναπαράσταση του Σταδίου και του βόρειου άκρου του  
**Picture 2.3:** Representation of the Stadium and its northern border

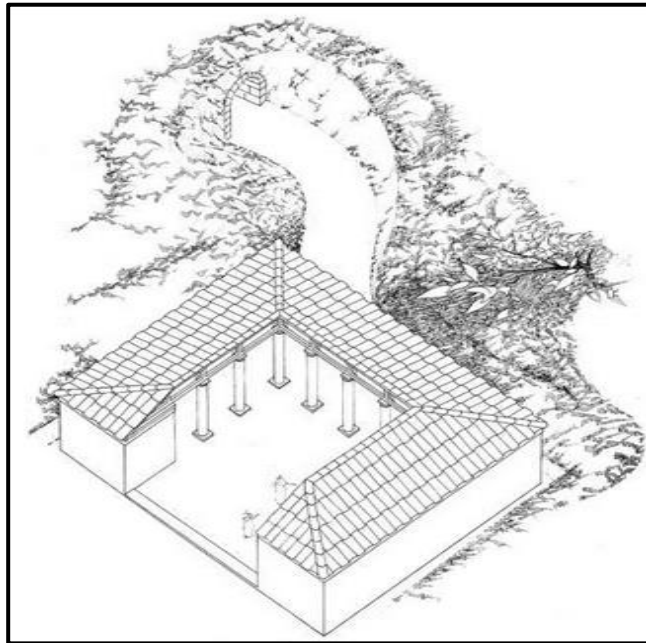
Ο στίβος του σταδίου έχει συνολικό μήκος 178 μέτρων, δηλαδή 600 ποδιών. Στο μέσο του πλαταίνει από 23,63 σε 26,91 μέτρα, δημιουργώντας την ίδια αισθητή καμπυλότητα με τους στίβους άλλων σταδίων, για λόγους που παραμένουν άγνωστοι. Στο διατηρημένο νότιο άκρο του υπάρχει μια τυπική γραμμή εκκίνησης (βαλβίδα), με διπλές αύλακες και εγκοπές οι οποίες όριζαν και τις 12 λωρίδες του στίβου. Στην πορεία, προστέθηκαν στις δύο άκρες της γραμμής αυτής υποδοχές για τις βάσεις της ύσπληγος, του μηχανισμού εκκίνησης. Σε απόσταση 5,30 μέτρων βόρεια της βαλβίδας και 3,40 μέτρων δυτικά του κεντρικού άξονα του στίβου, υπάρχει ένας τετραγωνικός λίθος ενσωματωμένος στο έδαφος του στίβου, που φέρει μια εγκοπή, όπως εκείνες της γραμμής εκκίνησης, σκαλισμένη στην άνω επιφάνειά της. Αυτή αποτελεί τη βάση ενός στύλου αναστροφής (καμπτήρα), που χρησιμοποιούνταν στους αγώνες μεγάλων αποστάσεων (δόλιχος).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Οι αθλητές και οι κριτές, αφού προετοιμάζονταν στο εσωτερικό ενός ορθογωνικού κτίσματος (Αποδυτήριο) με εσωτερική κιονοστοιχία, εισέρχονταν στο Στάδιο μέσω μιας λίθινης θολωτής διόδου. Η στοά είχε μήκος μεγαλύτερο από 36 μέτρα και διατηρείται σε καλή κατάσταση μέχρι τις μέρες μας. Η χρονολόγησή της εκτιμάται, περίπου, στα 320 χρόνια π.Χ. Η θολωτή οροφή της λοιπόν, θεωρείται από τις πιο πρώιμες που συναντώνται στην Αρχαία Ελλάδα. Τόσο αυτό το οικοδόμημα όσο και οι Μακεδονικοί τάφοι αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα των σημαντικών αρχιτεκτονικών εφαρμογών της εποχής.

Όπως προαναφέρθηκε, στο δυτικό άκρο της στοάς υπάρχουν κατάλοιπα ενός ορθογωνικού οικοδομήματος με τρίπλευρη εσωτερική κιονοστοιχία. Η θέση του κτιρίου, ήταν τέτοια ώστε να παρεμποδίζεται η είσοδος στη στοά οποιουδήποτε προερχόμενου από το Ναό του Διός στην κοιλάδα. Η στοά, επομένως, προοριζόταν αποκλειστικά για τους αθλητές και του Κριτές.



**Εικόνα 2.4:** Αναπαράσταση του αποδυτηρίου με την ελεγχόμενη πρόσβαση προς τη στοά  
**Picture 2.4:** Representation of the vestuary and its access to the arcade

Οι θέσεις παρακολούθησης (το θέατρον) των θεατών ήταν περιορισμένης έκτασης. Οι θεατές κάθονταν σε βαθμιδωτά επίπεδα, λαξευμένα στο μαλακό πέτρωμα, ενώ λίθινα καθίσματα βρισκόνταν σε δύο ή τρεις σειρές μεταξύ αφητηρίας και θολωτής διόδου, ίσως για τους προπονητές των αθλητών ή και διακεκριμένους επισκέπτες.

Σήμερα, έχει πραγματοποιηθεί μερική αναστήλωση του Θόλου της στοάς του Σταδίου (εικόνα 2.4) ενώ σώζονται η αρένα, κάποιοι κίονες των αποδυτηρίων και η στοά (<http://www.opheltes.gr>).





Κεφάλαιο 3  
Ο ΝΑΟΣ ΤΟΥ ΝΕΜΕΙΟΥ ΔΙΟΣ



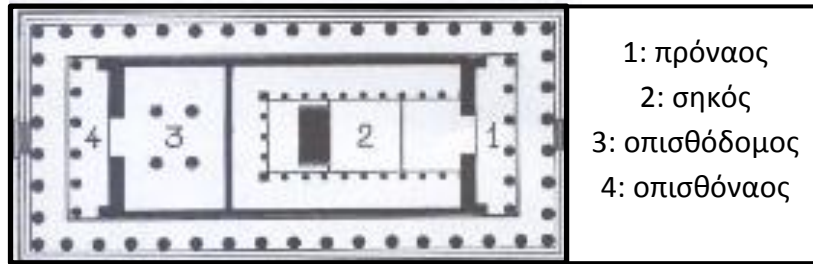
### 3.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΡΧΑΙΩΝ ΝΑΩΝ

Ο ναός στην ελληνική αρχαιότητα ήταν η κατοικία του θεού, το κτίριο που στέγαζε το λατρευτικό άγαλμα μίας ή περισσότερων θεοτήτων, και όχι χώρος συνάθροισης. Το λατρευτικό άγαλμα τοποθετούνταν στο βάθος του ναού πάνω στον κατά μήκος άξονα του κτιρίου. Οι πιστοί συγκεντρώνονταν στον περιβάλλοντα χώρο εκτός του ναού όπου βρισκόταν ο βωμός για την προσφορά των θυσιών και την άσκηση της λατρείας.

Η βασική αυτή λειτουργική ιδιομορφία του ελληνικού ναού είναι ιδιαίτερα σημαντική για την κατανόηση της αρχιτεκτονικής του, καθώς υπάρχουν μαρτυρίες ότι οι ναοί σχεδιάζονταν με βάση το άγαλμα που επρόκειτο να στεγάσουν. Σε αυτήν ακριβώς τη λειτουργικότητα οφείλονται τα κύρια χαρακτηριστικά του ελληνικού ναού τα οποία μπορούν να συνοψιστούν στα εξής: μνημειακότητα και παράλληλα γενική στενότητα του εσωτερικού χώρου δεδομένου ότι οι αρχαίοι ναοί χαρακτηρίζονται από ορθογώνια κάτοψη με επιμήκεις αναλογίες, απόλυτη συμμετρία εκατέρωθεν του κεντρικού τους άξονα, και τέλος ύπαρξη εισόδου στην ανατολική πλευρά του σηκού.

#### 3.1.1 Τα κύρια μέρη του Ναού (στοιχεία κάτοψης)

Πυρήνας του ελληνικού ναού είναι ο **σηκός** (εικόνα 3.1(2)), χώρος ορθογώνιας κάτοψης με είσοδο στην ανατολική στενή πλευρά. Στην απλούστερη μορφή του το κτίριο είναι μονόχωρο. Συνθετότερα αρχιτεκτονήματα περιλαμβάνουν ένα προθάλαμο, τον **πρόδομο** ή **πρόναο** (εικόνα 3.1(1)), και ένα αντίστοιχο χώρο στην αντίθετη πλευρά, που δεν επικοινωνεί με τον κυρίως ναό, τον **οπισθόδομο** (εικόνα 3.1(3)). Ανάμεσα στον οπισθόδομο, που είναι προσβάσιμος μόνο από το εξωτερικό του ναού, και τον κυρίως ναό (ή στη θέση του οπισθόδομου), βρίσκεται συχνά ένας χώρος που επικοινωνεί με τον κυρίως ναό και είναι προσβάσιμος μόνο για τους ιερείς, το **άδυτον**. Σε ορισμένους ναούς, όπως στον Παρθενώνα, υπάρχει και ένας ακόμη χώρος πίσω από τον οπισθόδομο που λέγεται **οπισθόναος** (εικόνα 3.1(4)).



Εικόνα 3.1: Κάτοψη περίπτερου ναού

Picture 3.1: Plan of peripteral temple

1. Pronaos, 2. Cella, 3. Opisthodomos, 4. Opisthonaos

Ανάλογα με την ύπαρξη των παραπάνω χώρων ο ναός χαρακτηρίζεται ως **απλός** (εικόνα 3.2), αν έχει μόνο πρόδομο, ή **διπλός** (εικόνα 3.3), αν διαθέτει και οπισθόδομο. Ο ναός που δεν έχει κανένα από τους δύο χώρους, παρά μόνο τον κυρίως ναό, ονομάζεται όπως προαναφέρθηκε **μονόχωρος**.

Οι αρχαίοι ναοί έχουν κίονες στις στενές πλευρές τους ενώ σε πολλές περιπτώσεις περιβάλλονται από κίονες. Αν ο ναός έχει κίονες μόνο στη μια στενή πλευρά λέγεται **πρόστυλος** (εικόνες 3.2(β)), ενώ αν έχει κίονες και στις δύο στενές πλευρές λέγεται **αμφιπρόστυλος** (εικόνες 3.3(β)).

Οι κίονες των στενών πλευρών (στην είσοδο δηλαδή του πρόδομου και του οπισθόδομου) μπορεί να βρίσκονται ανάμεσα στις παραστάδες που σχηματίζουν οι πλευρικοί τοίχοι, οπότε ο ναός ονομάζεται **εν παραστάσι** (εικόνες 3.2(α) & 3.3(α)).

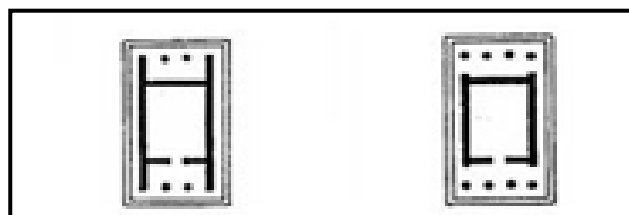


Εικόνα 3.2: (α) Απλός ναός εν παραστάσι

(β) Απλός ναός πρόστυλος

Picture 3.2: (a) Simple temple in antis

(b) Simple prostyle temple



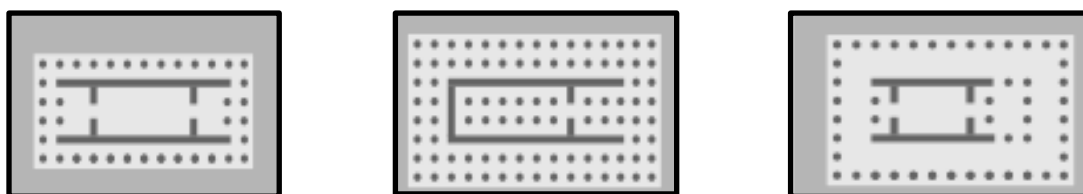
Εικόνα 3.3: (α) Διπλός ναός εν παραστάσι

(β) Διπλός ναός αμφιπρόστυλος

Picture 3.3: (a) Double temple in antis

(b) Double, amphiprostyle temple

Σειρές κίωνων, που ονομάζονται **περίστασις** ή **πτερόν**, περιβάλλουν το σηκό απ' όλες τις πλευρές. Σ' αυτή την περίπτωση ο ναός ονομάζεται **περίπτερος** (εικόνα 3.4(α)). Αν ο ναός περιβάλλεται από διπλό πτερόν, τότε ονομάζεται **δίπτερος** (εικόνα 3.4(β)). Κάποιοι ναοί περιβάλλονται από απλή κιονοστοιχία, που όμως έχει τοποθετηθεί σε τέτοια απόσταση από το σηκό, σαν να ήταν η εξωτερική κιονοστοιχία δίπτερου ναού. Αυτοί οι ναοί ονομάζονται **ψευδοδίπτεροι** (εικόνα 3.4(γ)). Ο διάδρομος που σχηματίζεται ανάμεσα στην κιονοστοιχία του πτερού και στους τοίχους του σηκού ονομάζεται **πτέρωμα**.



**Εικόνα 3.4:** (α) Περίπτερος ναός  
(β) Δίπτερος ναός  
(γ) Ψευδοπερίπτερος ναός  
**Picture 3.4:** (a) Peripteral temple  
(b) Dipteral temple  
(c) Pseudoperipteral temple

Κιονοστοιχίες μπορεί να υπάρχουν και στο εσωτερικό του ναού, συνήθως δύο, χωρίζοντάς τον σε τρία **κλίτη**, ένα πλατύτερο κεντρικό και δύο στενότερα πλευρικά. Συχνά οι εσωτερικές κιονοστοιχίες αποτελούνται από μικρούς κίονες που τοποθετούνται σε δύο επίπεδα, ώστε η μία να πατάει πάνω στην άλλη. Αυτού του είδους η κιονοστοιχία ονομάζεται **δίτονη**.

### 3.1.2 Τα αρχιτεκτονικά μέλη του ναού (στοιχεία όψης)

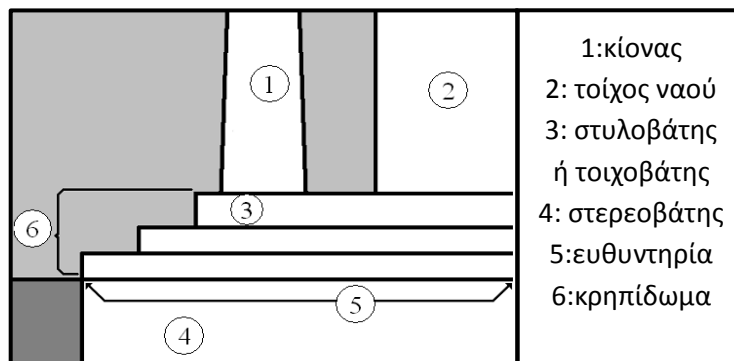
Τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά της όψης ενός αρχαίου ελληνικού ναού παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις, ανάλογα με τον ρυθμό με βάση τον οποίο αυτός είναι χτισμένος. Ως ρυθμός νοείται η συγκεκριμένη τεχνοτροπία αρχιτεκτονικής η οποία επικρατεί σε ορισμένη περίοδο. Κατά τα γνωστά στην Ελλάδα επικράτησαν τρεις αρχιτεκτονικοί ρυθμοί : **ο δωρικός, ο ιωνικός και ο κορινθιακός** οι οποίοι θα αναλυθούν εκτενέστερα στη συνέχεια (παράγραφος 3.1.3).

Τα αρχιτεκτονικά μέλη του ναού είναι τα ακόλουθα:

- **Κρηπίδα ή κρηπίδωμα** (εικόνα 3.5(6)) ονομάζεται η βάση με αναβαθμούς, πάνω στην οποία χτίζονταν οι ναοί. Απαρτίζεται από ένα τμήμα αθέατο, την θεμελίωση, κι ένα υπέργειο. Το κρηπίδωμα χτιζόταν επάνω στην **ευθυντήρια**

(εικόνα 3.5(5)) η οποία εξέχει ελάχιστα από το έδαφος και πατάει στον **στερεοβάτη** (θεμελίωση) (εικόνα 3.5(4)) μόνο κάτω από τους τοίχους ή τις κιονοστοιχίες.

Αρχικά το κρηπίδωμα είχε τρεις αναβαθμούς. Ο ψηλότερος από αυτούς, είναι μεγαλύτερος από τους υπόλοιπους για αισθητικούς λόγους, αφού επάνω του στηρίζονται οι κίονες και όλος ο ναός. Για το λόγο αυτό ονομάζεται και **στυλοβάτης** (εικόνα 3.5(3)), στους περίπτερους ναούς, ή τοιχοβάτης στους ναούς χωρίς περιμετρικές κολώνες. Χαρακτηριστικό του στυλοβάτη (αλλά και της κρηπίδας συνολικά) είναι η καμπυλότητα αυτού. Ο στυλοβάτης δεν είναι απολύτως οριζόντια επιφάνεια μιας και το μέσο της κάθε πλευράς είναι ψηλότερο απ'ότι στα άκρα.



Εικόνα 3.5: Κρηπίδα ναού

Picture 3.5: Temple's Crepidoma

1. Column, 2. Temple's wall, 3. Stylobate, 4. Stereobate, 5. Euthynteria, 6. Crepidoma

- Ο **κίονας** (εικόνα 3.5(1)) θα μπορούσε να θεωρηθεί το πιο χαρακτηριστικό αρχιτεκτονικό μέλος του ναού. Αποτελείται από σπονδύλους που ενώνονται με ξύλινους, χάλκινους ή μολύβδινους συνδέσμους (εμπόλια) και, πιο σπάνια, ο κίονας αποτελείται από μία μόνο πέτρα. Οι σπόνδυλοι δεν είναι ορατοί μετά το πέρας των εργασιών αφού καλύπτονται από ελαφρό επίχρισμα.

Ο κίονας αποτελείται από τρία μέρη: τη βάση, τον κορμό και το κιονόκρανο.

Η **βάση** αποτελεί χαρακτηριστικό μόνον του ιωνικού ρυθμού (εικόνα 3.7). Εδράζεται στον στυλοβάτη και πάνω της στηρίζεται ο κίονας του οποίου **κορμός** μπορεί να είναι λείος ή να έχει ραβδώσεις ή ανάγλυφες παραστάσεις όπως οι θριαμβικοί κίονες. Γενικώς, ο αριθμός και το βάθος των ραβδώσεων ποικίλλουν. Στο δωρικό ρυθμό (εικόνα 3.6) ο κίονας αποτελείται από ραβδώσεις που καταλήγουν σε οξείες ακμές, ενώ στον

ωνικό ρυθμό (εικόνα 3.7) οι ραβδώσει καταλήγουν σε καμπύλες. Ακόμη, σε κάποιους ναούς οι ραβδώσεις είναι βαθύτερες στο πάνω μέρος του κίονα (Παρθενώνας), ενώ σε άλλους είναι βαθύτερες στο κάτω μέρος (Ναός του Ποσειδώνα στο Σούνιο) και σε άλλους παραμένουν σταθερές (Προπύλαια, Ηφαιστείο-Θησείο). Σε κάθε περίπτωση πάντως, η παρουσία των ραβδώσεων εξυπηρετεί τον τονισμό του κυκλικού σχήματος του κίονα.

Ο κίονας καταλήγει στο **κιονόκρανο**. Το δωρικό κιονόκρανο (εικόνα 3.6) είναι λιτό και αποτελείται από τον εχίνο και τον άβακα. Ο ιωνικός κίονας (εικόνα 3.7), είναι πιο κομψός, έχει βάση και κιονόκρανο στολισμένο με έλικες. Οι αύλακές του, σχηματίζουν μεταξύ τους μια λεπτή ταινία, και είναι συνήθως 24 σε αριθμό. Τέλος, ο κορινθιακός κίονας (εικόνα 3.8), μοιάζει με τον ιωνικό, αλλά έχει πιο περίτεχνο κιονόκρανο.

Στο τέλος του κίονα, στο σημείο που αυτός ενώνεται με το κιονόκρανο υπάρχουν οι δακτύλιοι εγκοπής, τρεις ή τέσσερις. Δακτυλίους παρατηρούμε στους ναούς των αρχαϊκών χρόνων, στους ναούς των κλασσικών χρόνων υπάρχει μόνο ένας ενώ στα ελληνιστικά χρόνια καταργούνται.

Τέλος, έχει διαπιστωθεί πως το πλήθος των κίωνων κάθε ναού προκύπτει από το γενικό κανόνα σύμφωνα με τον οποίο για  $a$  πλήθος κίωνων των μικρών πλευρών, το πλήθος των κίωνων των μεγάλων πλευρών είναι  $(2a + 1)$ . Δηλαδή, ένας ναός με 6 κίονες στη μικρή του πλευρά, θα έχει στη μεγάλη  $(6 \times 2 + 1) = 13$  κίονες.

- Το **επιστύλιο** είναι ένα παραλληλεπίπεδο τεμάχιο μαρμάρου που συνδέει τους κίονες (εικόνες 3.6 & 3.7). Ονομάστηκε έτσι διότι βρίσκεται «επί των στύλων». Στα μικρότερα μνημεία το επιστύλιο μπορεί να είναι ολόσωμο, δηλαδή να αποτελείται από ένα συμπαγές τμήμα μαρμάρου, ενώ στα μεγαλύτερα μπορεί να αποτελείται από δύο ή και τρία επιμέρους τμήματα (όπως συμβαίνει και στην περίπτωση του Παρθενώνα). Το τμήμα εκείνο το οποίο είναι τοποθετημένο στο εσωτερικό του μνημείου ονομάζεται **αντίθημα**.

Κατά κύριο λόγο τα επιστύλια δεν είχαν καμία διακόσμηση πέραν των **σταγόνων**, έξι συνήθως στον αριθμό, οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν και στοιχείο των υπερκείμενων μετοπών. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα επιστύλια ακολουθούν την καμπυλότητα της κρηπίδας.

- Στο δωρικό ρυθμό μετά το επιστύλιο συναντούμε τα **τρίγλυφα** και τις **μετόπες** (εικόνα 3.6). Το τρίγλυφο είναι ορθογωνική πλάκα μαρμάρου η οποία έχει κατακόρυφες γλυφές, δύο ολόκληρες και δύο ημίγλυφες δεξιά

και αριστερά. Η μετόπη είναι ορθογώνια πλάκα μαρμάρου η οποία φέρει ανάγλυφη ή γραπτή διακόσμηση. Στο τμήμα μεταξύ δύο διαδοχικών κιόνων αντιστοιχούν 2 μετόπες και 3 τρίγλυφα.

Στον ιωνικό ρυθμό μετά το επιστύλιο συναντούμε τη **ζωφόρο** (εικόνα 3.7), μια ζώνη από ανάγλυφες πλάκες.

- Το **γείσον** (εικόνα 3.6 & 3.7) προεξέχει και προστατεύει τα τρίγλυφα και τις μετόπες ή τη ζωφόρο, δηλαδή τα κάτω μέλη της όψης, από το νερό της βροχής. Κάτω από το γείσον υπάρχουν οι πρόμοχθοι με τις σταγόνες καθένας από τους οποίους έχει πλάτος ίσο με τα τρίγλυφα και τις μετόπες και φέρει συνήθως 18 σταγόνες σε τρεις σειρές (3 × 6). Το επιστύλιο μαζί με τα τρίγλυφα και τις μετόπες ή τη ζωφόρο και το γείσον αποτελούν το **θριγκό**.
- Το **αέτωμα** (εικόνα 3.6 & 3.7) ή τύμπανο αποτελεί την τριγωνική απόληξη της δίρριχτης στέγης στις στενές πλευρές του ορθογωνικού χτίσματος (<http://el.wikipedia.org>).

### 3.1.3 Οι αρχιτεκτονικοί ρυθμοί των αρχαίων ναών

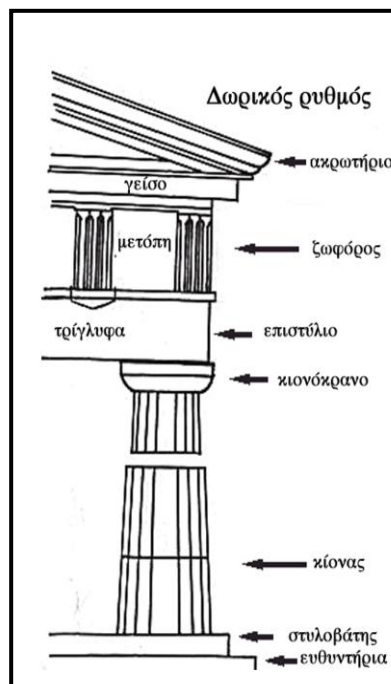
Όπως προαναφέρθηκε, στην Ελλάδα επικράτησαν τρεις αρχιτεκτονικοί ρυθμοί : ο δωρικός, ο ιωνικός και ο κορινθιακός. Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν συνοπτικά τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των ρυθμών αυτών μιας και συναντώνται και οι τρεις στο ναό του Διός στη Νεμέα. Δωρικός ρυθμός ονομάζεται στην αρχαία ελληνική αρχιτεκτονική, και ειδικότερα στη ναοδομία, ο ρυθμός εκείνος που διακρίνεται για τη λιτότητα και την αυστηρότητα του. Ο Ιωνικός ρυθμός είναι λεπτός, κομψός, ελαφρός και γεμάτος χάρη. Συνδυάζοντας λιτή διάθεση και πλούσια καλλιτεχνική ευαισθησία, έγινε η έκφραση του αθηναϊκού πολιτισμού. Ο τρίτος χρονικά, Κορινθιακός ρυθμός, αποτελεί τον πιο διακοσμητικό από τους παραπάνω και χρησιμοποιήθηκε κυρίως στους ρωμαϊκούς χρόνους με ποικιλία μορφών. Κύρια στοιχεία διάκρισης των ρυθμών αυτών είναι η ζωφόρος, τα κιονόκρανα και οι κιονοστοιχίες των αρχαίων κτισμάτων.

#### i) Ο Δωρικός ρυθμός

Οι απαρχές του Δωρικού Ρυθμού πιστεύεται ότι βρίσκονται στο Άργος και την Κόρινθο, τα δύο σημαντικά δωρικά κέντρα τέχνης κατά την Γεωμετρική Περίοδο (8<sup>ος</sup> αι. π.Χ.). Η εξέλιξη του υπήρξε σημαντική κατά την αρχαϊκή εποχή (7ος-6ος αι. π.Χ.) ενώ παρουσίασε τα λαμπρότερα δείγματά του στους κλασικούς χρόνους (5ος-4ος αι. π.Χ.).



Κύριο χαρακτηριστικό του ρυθμού, αποτελούν οι κίονες οι οποίοι στερούνται βάσης, στηρίζονται επομένως απευθείας στον στυλοβάτη. Τα κιονόκρανα είναι λιτά σε σχέση με τους άλλους αρχιτεκτονικούς ρυθμούς (ιωνικός και κορινθιακός) και αποτελούνται από δύο μέρη, τον έχινο και τον άβακα. Ο άβακας είναι το τετράγωνης κάτοψης ανώτερο σημείο του κίονα στο οποίο στηρίζεται το επιστύλιο, ενώ ο έχινος είναι το αμέσως κατώτερο σημείο το οποίο αποτελεί ομαλή μετάβαση από τον άβακα στον κυρίως κίονα. Οι αιχμές των ραβδώσεών των δωρικών κίωνων είναι οξείες και όχι επίπεδες όπως των ιωνικών.



Εικόνα 3.6: Ναός Δωρικού Ρυθμού  
 Picture 3.6: Doric order temple

Ο **θριγκός** στους δωρικούς ναούς αποτελείται από δύο μέρη: το επιστύλιο και τη δωρική ζωφόρο. Το επιστύλιο χαρακτηρίζεται από την απουσία διακοσμητικών στοιχείων με εξαίρεση μία λεπτή ταινία στο ανώτερο μέρος της, που αποτελεί συνέχεια της διακόσμησης των τριγλύφων που βρίσκονται ακριβώς από πάνω. Στη δωρική ζωφόρο, υπάρχει μία συνεχής εναλλαγή από τρίγλυφα και μετόπες. Τα τρίγλυφα είναι τρία κατακόρυφα λαξεύματα στο μάρμαρο. Το σχέδιό τους καθιερώθηκε ώστε να θυμίζει τα ξύλινα δοκάρια που στέγαζαν παλιότερα τους ναούς. Για τον λόγο αυτό, κάτω από το καθένα βρίσκονται απομιμήσεις των καρφιών που συγκρατούσαν κάποτε τις ξύλινες δοκούς, που ονομάζονται "σταγόνες". Οι μετόπες βρίσκονταν ανάμεσα στα τρίγλυφα και ήταν είτε απλά κομμάτια μαρμάρου, είτε έφεραν γραπτές ή ανάγλυφες παραστάσεις. Κατά την αρχαιότητα, τα τρίγλυφα ήταν βαμμένα μπλε ενώ οι μετόπες κόκκινες.

Το σημαντικότερο ζήτημα στον σχεδιασμό των δωρικών ναών αποτέλεσε το «πρόβλημα της γωνιακής τριγλύφου». Κάθε τρίγλυφος ήταν τοποθετημένη με τέτοιο τρόπο ώστε να βρίσκεται ακριβώς πάνω από κίονα. Αυτό όμως ήταν αδύνατο να συμβεί στους γωνιακούς. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν ποικίλες δοκιμές όσον αφορά τον σχεδιασμό, χωρίς όμως να αποφέρουν το επιθυμητό αισθητικό αποτέλεσμα (όπως η μεγέθυνση των γωνιακών τριγλύφων). Η λύση δόθηκε με την κατασκευή του Παρθενώνα. Στην περίπτωση αυτή, οι γωνιακοί κίονες μεταφέρθηκαν πλησιέστερα στους γειτονικούς τους και το πλάτος των μετόπων μεγάλωνε σταδιακά προς το κέντρο. Με αυτόν τον τρόπο το κτίσμα αποκτούσε οπτικά συμμετρία.

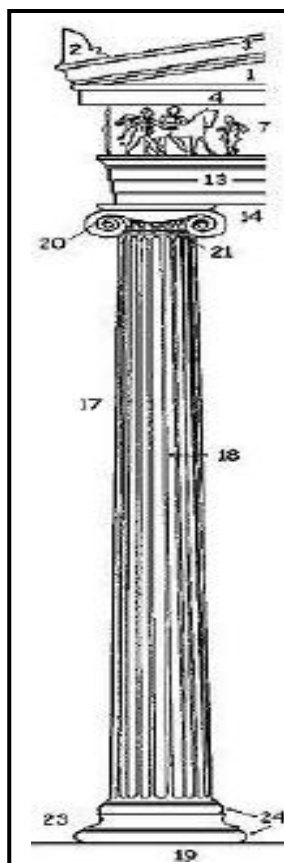
## ii) Ο Ιωνικός ρυθμός

Ο Ιωνικός ρυθμός είναι λεπτός και κομψός. Συνδυάζοντας λιτή διάθεση και πλούσια καλλιτεχνική ευαισθησία, έγινε η έκφραση του αθηναϊκού πολιτισμού.

Ο ρυθμός αυτός, εμφανίζεται στις αρχές του 6<sup>ου</sup> π.Χ. αι. στα παράλια της μικρασιατικής Ιωνίας, στα νησιά του Αιγαίου και στην Αττική ενώ τον 4ο π.Χ. αιώνα άρχισε να τυποποιείται και να διαχωρίζεται εμφανώς από τον δωρικό ρυθμό. Σε σύγκριση με τον Δωρικό ρυθμό, ο Ιωνικός ρυθμός έχει διάφορες παραλλαγές.

Γενικό χαρακτηριστικό του αποτελεί η εξαιρετική ιδιομορφία, δηλαδή η ελευθερία των αρχιτεκτόνων να αναπτύξουν την δική τους τεχνοτροπία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η Σάμος και η Έφεσος όπου συναντώνται διαφορετικές βάσεις στους κίονες των ναών. Με το πέρασμα των χρόνων όμως, ο Ιωνικός ρυθμός τυποποιήθηκε και διαδόθηκε.

Η δομή του Ιωνικού ρυθμού, αν και έχει πολλές ομοιότητες με αυτήν του Δωρικού, έχει και ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Στον Ιωνικό ρυθμό, οι κίονες στηρίζονται απευθείας στον στυλοβάτη, αλλά όπως προαναφέρθηκε έχουν την δική τους βάση. Επιπρόσθετα, είναι λεπτότεροι από αυτούς τους Δωρικού ρυθμού και καθένας τους φέρει 20 έως 24 ραβδώσεις. Οι ακμές μεταξύ των ραβδώσεων δεν είναι οξείες αλλά μικρές καμπύλες επιφάνειες.



**Εικόνα 3.7:** Ιωνικός Ρυθμός: 1) τύμπανον, 2) ακρωτήριο, 3) γείσο καταέτιο, 4) γείσο, 7) ζωοφόρος, 13) επιστύλιο, 14) κιονόκρανο, 17) κίονας, 18) αυλάκια, 19) στυλοβάτης, 20) κοχλίας, 21) αστράγαλος, 23) σπείρα, 24) δακτύλιοι

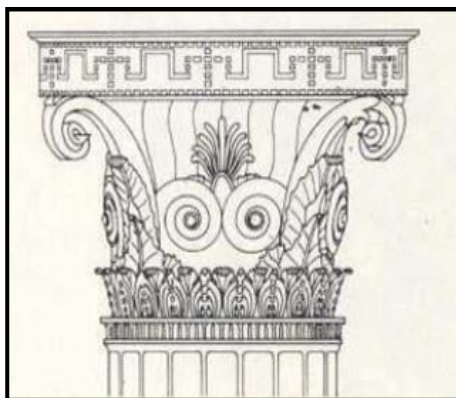
**Picture 3.7:** Ionic order temple: 1) tympanon, 2) acrotirium, 3) cornice, 4) cornice, 7) frieze, 13) architrave of epistyle, 14) column capital, 17) column, 18) groove, 19) stylobate, 20) cochlea, 21) ankle, 23) spiral, 24) top rings

Το κιονόκρανο είναι εκλεπτυσμένο, στηρίζεται στον αστράγαλο, μια λεπτή πλάκα μεταξύ του κίονα και του κιονόκρανου. Διαθέτει μεγάλο αριθμό διακοσμητικών αναγλύφων και καταλήγει στους κοχλίες δεξιά και αριστερά, πάνω στους οποίους στηρίζεται ο άβακας, διακοσμημένος με κυματισμούς.

### iii) Ο Κορινθιακός ρυθμός

Ο ρυθμός αυτός είναι ο νεότερος και ο πιο διακοσμητικός σε σχέση με τους υπόλοιπους. Συναντάται κατά βάση στους ρωμαϊκούς χρόνους με ποικιλία μορφών, ενώ ως εφευρέτης του αναφέρεται ο γλύπτης Καλλίμαχος. Ο πρώτος γνωστός Κορινθιακός κίονας υψώθηκε στον ναό του Επικούριου Απόλλωνα ο οποίος χτίστηκε από τον Ικτίνο. Παρ' όλα αυτά ο ρυθμός χρησιμοποιήθηκε σπάνια από Έλληνες, ενώ μεγάλη χρήση του παρατηρείται στους Ρωμαϊκούς χρόνους. Στην Αθήνα, εξαιρετικό δείγμα Κορινθιακού ναού, αποτελεί ο Ναός του Ολυμπίου Διός.

Το κορινθιακό κιονόκρανο αποτελείται από υψηλό εχίνο (κάλαθος) και άβακα. Ο κάλαθος είναι το κύριο σώμα των κορινθιακών κιονόκρανων και απαρτίζεται από τρεις ζώνες με φυτικό διάκοσμο από φύλλα και έλικες ακάνθης στις τέσσερις γωνίες. Για τον λόγο αυτό μπορεί να θεωρηθεί και εξέλιξη του Ιωνικού ρυθμού (<http://www.el.wikipedia.gr>).



Εικόνα 3.8: Κορινθιακό κιονόκρανο  
Picture 3.8: Corinthian column capital

### 3.2 ΟΙ ΟΠΤΙΚΕΣ ΕΚΛΕΠΤΥΝΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΡΧΑΙΩΝ ΝΑΩΝ

Ο αρχαίος ναός χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο καμπυλοτήτων, από αδιόρατες κλίσεις των αρχιτεκτονικών μελών του, όπως στους αναβαθμούς, στο θριγκό και στους κίονες. Όλες αυτές οι εκλεπτύνσεις είναι σχεδόν μη ορατές αλλά προσδίδουν αρμονία και ζωντάνια στα αρχαία κτίρια.

Βασικό χαρακτηριστικό των κίωνων είναι η **μείωση** αυτών, αφού καθώς αυξάνει το ύψος τους, μειώνεται η διάμετρός τους προκειμένου να εξασφαλισθεί η αίσθηση της αυξημένης ευστάθειας τους. Σημαντικό στοιχείων των κίωνων αποτελεί και η **ένταση**, δηλαδή η ελαφριά καμπύλωση (αύξηση της διαμέτρου) που παρατηρείται, και η οποία μεγιστοποιείται περίπου στα 2/5 του μήκους του. Σε κάθε περίπτωση δεν ξεπερνά τη διάμετρο της βάσης του κίονα όταν αυτή υπάρχει. Ως ένταση, νοείται επομένως η έξαρση του κίονα στις οριζόντιες διαστάσεις αφού σε κάθε αρμό μετά την κάτω έδρα, η διάμετρος του κάθε σπονδύλου είναι λίγο μεγαλύτερη απ'όσο θα ήταν αν δεν υπήρχε ένταση. Με τον τρόπο αυτό διορθώνεται η εικόνα ενός κτιρίου κενού και άχαρου (Ζάμπας Κ., 1998).

Επιπλέον, οι κίονες χαρακτηρίζονται από ένα σύνολο κλίσεων οι οποίες εξυπηρετούν τόσο πρακτικούς όσο και αισθητικούς λόγους. Κύρια αιτία των κλίσεων των κίωνων αποτελεί η καμπύλη του στυλοβάτη η οποία όπως έχει αποδειχθεί είναι κατασκευαστική.

Σε πρόσοψη, η κυρτότητα του στυλοβάτη διορθώνει την εντύπωση της καμπύλωσής του (με τα κοίλα προς τα πάνω), η οποία θα δημιουργούνταν αν ο στυλοβάτης ήταν οριζόντιος. Σε όψη, ο στυλοβάτης παρουσιάζει εγκάρσια κλίση προς τα έξω  $k_E$ , μέσω της οποίας εξασφαλίζεται η απορροή των υδάτων. Ακόμη ο άξονας των κίωνων παρουσιάζει κλίση ως προς την κατακόρυφο  $k_K$  καθώς και μία εγκάρσια κλίση ως προς τον στυλοβάτη  $k_\Sigma$ .

Το σύνολο των κλίσεων του κίονα μπορεί να προσδιορισθεί από τα άνισα ύψη του πρώτου σπονδύλου  $(h_1, h_{11}, h_6, h_{16})^2$ , στοιχεία τα οποία παραμένουν αναλλοίωτα στον χρόνο. Όπου:

- $h_1$  : το ύψος στην πρόσθια αξονική ράβδωση
- $h_{11}$ : το ύψος στην οπίσθια αξονική ράβδωση
- $h_6$  : το ύψος στην δεξιά αξονική ράβδωση
- $h_{16}$  : το ύψος στην αριστερή αξονική ράβδωση

Μέσω των  $h_1$  και  $h_{11}$  είναι δυνατόν να προσδιορισθεί η εγκάρσια κλίση του άξονα του κίονα ως προς τον στυλοβάτη  $k_\Sigma$ , η οποία αποτελεί το άθροισμα της κλίσης του άξονα του κίονα  $k_K$  (ως προς την κατακόρυφο) και της εγκάρσιας κλίσης του στυλοβάτη  $k_E$ .

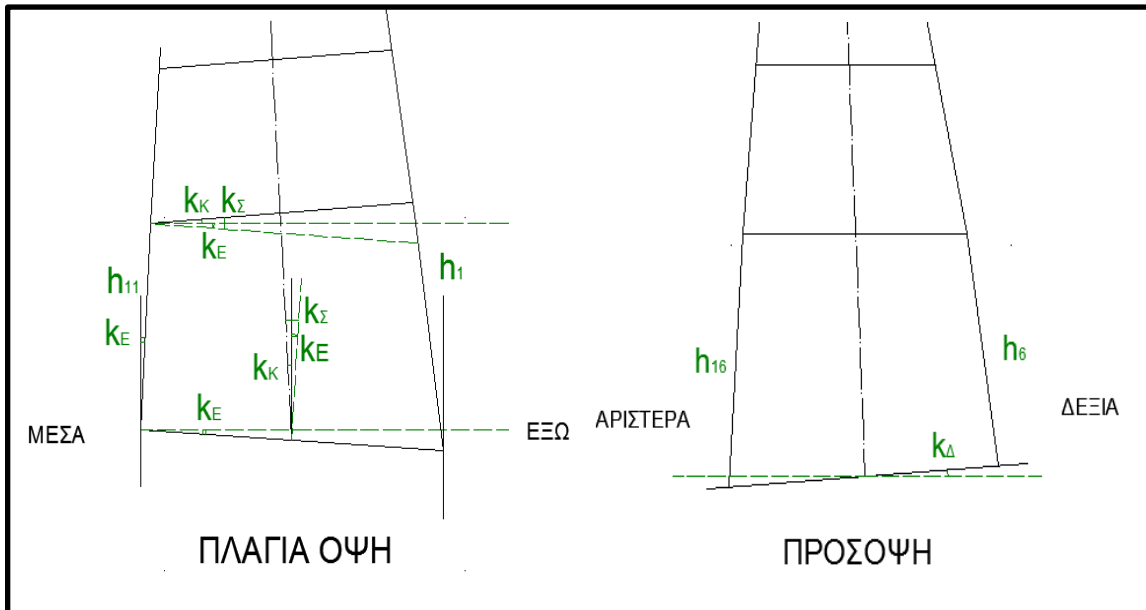
Επιπλέον, ο κίονας σε πρόσοψη φαίνεται κατακόρυφος, άρα μέσω των άνισων υψών  $h_6$  και  $h_{16}$  επιτυγχάνεται η οριζοντιότητα του αρμού της άνω έδρας, ενώ μπορεί να προσδιορισθεί και η διαμήκης κλίση του στυλοβάτη  $k_\Delta$ .

Η εγκάρσια  $k_\Sigma$  και η διαμήκης  $k_\Delta$  του κίονα ως προς τον στυλοβάτη μπορούν να προσδιορισθούν βάσει των άνισων υψών των πρώτων σπονδύλων σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$k_\Sigma = \frac{h_1 - h_{11}}{d_k} \quad (3.1)$$

$$k_\Delta = \frac{h_6 - h_{16}}{d_k} \quad (3.2)$$

Όπου:  $d_k$ , η διάμετρος της κάτω έδρας του 1<sup>ου</sup> σπονδύλου



**Σχήμα 3.1:** Τα άνισα ύψη των πρώτων σπονδύλων και οι κλίσεις του κίονα  
**Figure 3.1:** Uneven heights of the first drum and the column's inclinations

Επίσης, ελαφρά κλίση προς τον σηκό παρουσιάζουν και το επιστύλιο με τη ζωοφόρο. Η καμπυλότητα της κρηπίδας και του θριγκού στο μέσον της κάθε πλευράς έχει ως σκοπό να άρει την εντύπωση της «χαλάρωσης» που προκαλούνταν από τις μακρές, οριζόντιες γραμμές του κτιρίου.

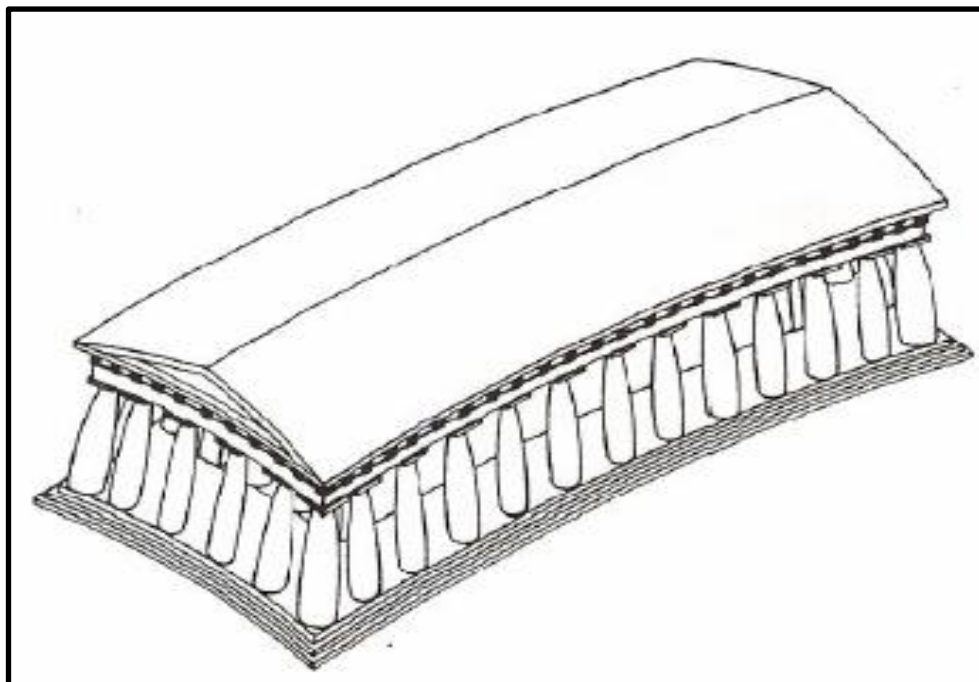
Ακόμη, τα **μεταξόνια** διαστήματα των κίωνων είναι ίσα, με στενότερα ελαφρώς τα ακραία μεταξόνια.

Στις γωνίες του κτιρίου σε όλες τις όψεις τοποθετείται οπωσδήποτε τρίγλυφο. Επειδή όμως ο άξονας του τριγλύφου δεν συμπίπτει με τον αρμό του υποκείμενου επιστυλίου και τον άξονα του κίονα, λόγω του προβλήματος διαφοράς πλάτους ίσου προς το μισό του πλάτους του τριγλύφου, οι αρχιτέκτονες της αρχαϊκής εποχής λύνουν το πρόβλημα κάνοντας λίγο πλατύτερες τις ακραίες μετόπες. Στα κλασικά χρόνια οι μετόπες έμεναν ισοπλατείς, ενώ γινόταν στενότερα τα ακραία μεταξόνια των κίωνων.

Οι αναλογίες των τριγλύφων, ύψους - πλάτους, είναι περίπου 3 προς 2, ενώ το πλάτος τους στην κλασική περίοδο είναι ίσο με το μισό της κάτω βάσης του κίονα.

Η σειρά τριγλύφων - μετοπών ήταν δεσμευμένη σε σταθερές αναλογίες και έπρεπε να συμπίπτει κάθε φορά με τον υποκείμενο άξονα του κίονα (<http://www.el.wikipedia.gr>).

Βάσει όσων ειπώθηκαν, οι αρχαίοι ναοί σχηματίζουν μία διάταξη πυραμιδοειδή (εικόνα 3.10) αντί ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου.



Εικόνα 3.9: Οπτικές εκλεπτύνσεις ναού (Ζάμπας Κ., 1998)  
Picture 3.9: Temple's optical refinements

### 3.3 Ο ΝΑΟΣ ΤΟΥ ΝΕΜΕΙΟΥ ΔΙΟΣ

Όπως έχει αναφερθεί, αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής αποτέλεσε η μελέτη κίονα της περίπτωσης του ναού του Νεμείου Διός. Για τον σκοπό αυτό, στον παρών κεφάλαιο πραγματοποιείται ιστορική αναδρομή του Ναού, παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του καθώς κι ένα σύντομο ιστορικό της αναστήλωσής του.

#### 3.3.1 Ιστορική Αναδρομή

Ο πρώτος ναός του Διός χρονολογείται στα αρχαϊκά χρόνια περί τον 6<sup>ο</sup> π.Χ αιώνα, ενώ δεν υπάρχει ένδειξη παλαιότερης ανθρωπογενούς δραστηριότητας στην περιοχή.

Ανασκαφές έχουν φέρει στο φως αρκετά στοιχεία σχετικά με την κατάσταση του ιερού του Διός κατά τον 6<sup>ο</sup> με 5<sup>ο</sup> π.Χ.. Αυτά τα στοιχεία αφορούν κυρίως στον ναό και στον βωμό μπροστά από αυτόν. Την ίδια περίοδο κατασκευάσθηκαν και οι εννέα οίκοι. Πρόκειται για ιδιωτικές λέσχες (περίπτερα) των πόλεων κρατών στις οποίες φιλοξενούνταν οι πολίτες κατά την τέλεση των Νέμεων αγώνων. Το οικοδόμημα καταστράφηκε κατά την διάρκεια του Πελοποννησιακού Πολέμου, στα τέλη του 5<sup>ου</sup> π.Χ αιώνα και για 80 περίπου χρόνου δεν υπήρξε καμία παρέμβαση στην περιοχή.

Ακολούθησε η κατασκευή του νέου ναού (ως εστιακό σημείο συγκεντρώσεων θρησκευτικού χαρακτήρα των αγώνων) περί το 330 π.Χ. την εποχή των Μακεδόνων, πιθανόν ως πολιτική του βασιλιά της Μακεδονίας Φίλιππου, για συνένωση όλων των Ελλήνων. Την ίδια περίοδο πραγματοποιήθηκε η κατασκευή περιβόλου γύρω από το ιερό του βρέφους Οφέλτη, Λουτρού, Ξενώνα για τους αθλητές των αγώνων και κατοικιών για το προσωπικό. Την ίδια περίοδο κατασκευάστηκε και το Στάδιο.

Μετά την μεταφορά των αγώνων το 271 π.Χ στο Άργος, το ιερό παρακμάζει. Περίπου 400 χρόνια αργότερα, τον 1<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ, γίνεται λόγος για αρχαίο μνημείο με γκρεμισμένη στέγη και χωρίς το λατρευτικό του άγαλμα.

Μετά από μια σύντομη περίοδο χρήσης του ναού ως εκκλησία κατά την παλαιοχριστιανική περίοδο, ο ναός κατεδαφίσθηκε (5<sup>ο</sup> και 6<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ) προκειμένου να εξασφαλισθούν δομικά υλικά για μια Βασιλική περίπου 100 μέτρα προς τα νότια. Περισσότεροι από 1300 δόμοι αφαιρέθηκαν όπως και το μεγαλύτερο μέρος των θεμελίων των κίωνων ώστε να είναι προσβάσιμοι οι κατώτεροι λίθοι.

### **3.3.2 Η αρχιτεκτονική του Ναού**

Ο ναός του Νεμείου Διός αποτελεί χαρακτηριστικό δείγμα μνημείου του τέλους της κλασικής και της αρχής της ελληνοριστικής περιόδου, συνδυάζοντας τους τρεις αρχιτεκτονικούς ρυθμούς με ιδιαίτερη έμφαση στη διακόσμηση.

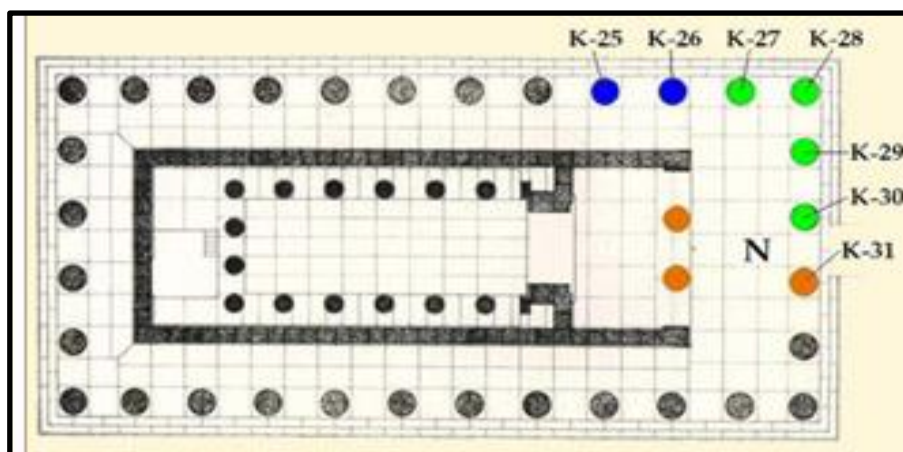
Οι κίονες της περίστασης ήταν δωρικού ρυθμού, έξι στις στενές πλευρές (ανατολική και δυτική) και δώδεκα στις μακρές (βόρεια και νότια). Ο ρυθμός αυτός κυριαρχούσε λοιπόν στην εξωτερική κιονοστοιχία, καθώς και στους κίονες του πρόναου (πρόθυρου του ναού).

Στο εσωτερικό του ναού υπήρχε κιονοστοιχία (στις τρεις πλευρές του σηκού), για την στήριξη της στέγης. Η κιονοστοιχία αποτελούνταν από 14 κίονες κορινθιακού ρυθμού οι οποίοι εδράζονταν στο δάπεδο και έφεραν σε δεύτερο όροφο κίονες ιωνικού ρυθμού.

Ο ναός στερούνταν οπισθόδομου. Στη θέση του υπήρχε μια επέκταση του εσωτερικού χώρου η οποία αντιπροσώπευε το άδυτον, μη προσβάσιμο, απαγορευμένο χώρο. Μοναδικό χαρακτηριστικό του οικοδομήματος αποτελεί η υπόγεια κρύπτη στο πίσω μέρος του σηκού, η χρήση της οποίας δεν έχει διευκρινισθεί.

Η κρηπίδα του ναού έχει μήκος περίπου 44,5 μέτρα και πλάτος 22 μέτρα και κεκλιμένο επίπεδο για πρόσβαση τον ναό. Οι κίονες έχουν ύψος περίπου 10 μέτρα και αποτελούνται από 13 σπονδύλους.





**Εικόνα 3.10:** Κάτοψη Ναού του Νεμείου Διός. Με πορτοκαλί χρώμα απεικονίζονται οι τρεις κίονες που παρέμειναν πάντα όρθιοι, με μπλε οι κίονες που αναστηλώθηκαν την περίοδο 1999-2002 και με πράσινο αυτοί που αναστηλώθηκαν έκτοτε

**Picture 3.10:** Plan view of the Temple of Nemean Zeus. The three ancient columns are shown with orange color, the columns restored during 1999-2002 are shown with blue color and those restored during 2004-2013 are shown with green color

### 3.3.3 Η αναστήλωση του Ναού

Η ιδέα της αναστήλωσης του ναού του Διός έχει προ πολλού γοητεύσει τους επισκέπτες της Νεμέας. Αρχαιολόγοι έχουν κατ' επανάληψη συζητήσει για τη σκοπιμότητα της αναστήλωσης, ιδιαίτερα εφόσον η καταστροφή του Ναού προκλήθηκε από ανθρωπογενή και όχι φυσικά αίτια.

Το 1978, ο αρχαιολόγος Stephen G. Miller, διετύπωσε την ιδέα της αναστήλωσης του Ναού του Διός.

Κατά την περίοδο 1980-1982 ο καθηγητής Frederick A. Cooper του Πανεπιστημίου της Minnesota, ηγήθηκε των προσπαθειών καταγραφής 1.100 περίπου αρχαίων λίθων που βρίσκονταν στην περιοχή και εκπόνησε αρχιτεκτονική προμελέτη για την αναστήλωση του ναού. Λίγο αργότερα, το Υπουργείο Πολιτισμού ενέκρινε την πιλοτική αναστήλωση δύο κίωνων κατά μήκος της βόρειας πλευράς του ναού.

Το 1984, αρχαίοι λιθόπλινθοι (δόμοι) που είχαν αφαιρεθεί από το κρηπίδωμα επανατοποθετήθηκαν στη θέση τους, συμπληρωμένοι εν μέρει με νέο υλικό. Μέχρι το 1985, οπότε και διακόπηκαν οι αναστηλωτικές εργασίες, τοποθετήθηκαν στη θέση τους 42 λιθόπλινθοι. Τελικά η αναστήλωση των δύο πρώτων κίωνων πάνω σε αυτό το κρηπίδωμα, ξεκίνησε το 1999 και ολοκληρώθηκε το καλοκαίρι του 2002. Αναστηλώθηκαν επομένως, και προστέθηκαν στους τρεις αρχικούς κίονες ακόμη δύο (εικόνα 3.10). Ως το 2003 είχαν τοποθετηθεί δύο επιστύλια και η τρίγλυφος των υπαρχόντων κίωνων. Στο μεταξύ, την αναστήλωση ανέλαβε ο καθηγητής Νίκος Μακρής και στη συνέχεια ο πολιτικός μηχανικός Κωνσταντίνος Παπαντωνόπουλος.

Μετά την επιτυχή αναστήλωση των δύο κίωνων, κατατέθηκε από την ομάδα αναστήλωσης του ναού του Διός στη Νεμέα, μέσω της Αμερικανικής Σχολής Κλασικών Σπουδών, η μελέτη αναστήλωσης τεσσάρων επιπλέον κίωνων, προκειμένου να ολοκληρωθεί η βορειοανατολική γωνία της περίπτωσης του ναού. Η νέα αυτή μελέτη αναστήλωσης εγκρίθηκε από το Υπουργείο Πολιτισμού τον Μάρτιο του 2004. Προκειμένου να αναστηλωθούν οι κίονες, καταβλήθηκε μεγάλη προσπάθεια για τη συμπλήρωση των αρχαίων σπονδύλων, οι οποίοι παρουσίαζαν μεγάλες φθορές ενώ σε αρκετές περιπτώσεις κρίθηκε αναγκαίο να κατασκευασθούν εξ ολοκλήρου νέοι σπόνδυλοι. Παρουσιάσθηκαν ακόμη σημαντικά προβλήματα ευστάθειας και μορφολογικής συνέχειας αφού το αρχαίο υλικό έπρεπε να «δέσει» με το νέο, ενώ απαιτούνταν ιδιαίτερη προσοχή γιατί οι σπόνδυλοι καταπονούνταν από θλιπτικές τάσεις. (<https://www.opheltes.gr>)

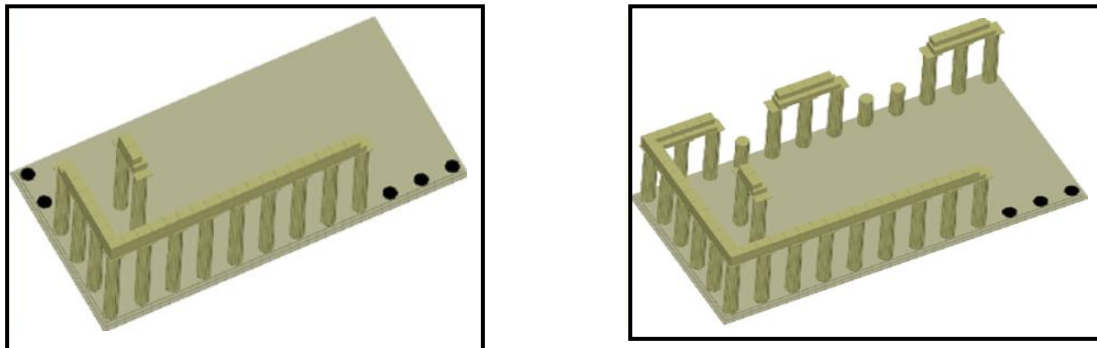
Στη συνέχεια, διερευνήθηκαν συστηματικά οι προτάσεις της προμελέτης Cooper για την ακριβή θέση των αρχιτεκτονικών μελών με προσθήκες και άλλων μελών και θραυσμάτων ενώ ειδικά στους σπονδύλους προσδιορίστηκε ο αυθεντικός προσανατολισμός τους. Για κάθε αρχιτεκτονικό μέλος (σπόνδυλο, κιονόκρανο, επιστύλιο) ετοιμάστηκε ένα ατομικό δελτίο που περιγράφει την «παθολογία» του και τις προτάσεις αποκατάστασής του.

Από το 2004 ως το 2009 αναστηλώθηκαν τέσσερις κίονες στη βορειοανατολική γωνία. Από το 2010 ως το Δεκέμβριο του 2012 οι δόμοι του επιστυλίου των κίωνων αυτών συντηρήθηκαν, αποκαταστάθηκαν και επανατοποθετήθηκαν σε αυτούς. Προκειμένου να πραγματοποιηθούν όλες αυτές οι εργασίες αποκαταστάθηκε σημαντικό μέρος του κρηπιδώματος. Αποκαταστάθηκαν επίσης οι δόμοι του επιστυλίου που γεφυρώνουν το διάστημα ανάμεσα στον νοτιότερο αναστηλωμένο κίονα και τον εξ αρχής διατηρημένο στην ανατολική πλευρά .

Η αναστήλωση του κάθε κίονα διαρκεί περισσότερο από 1-1,5 έτος. Με την αναστήλωση των κίωνων και των επιστυλίων συμπληρώθηκε, το 2013, ολόκληρη η βορειοανατολική γωνία του ναού αποτελούμενη πλέον από εννέα κίονες (εικόνα 3.10).

Το γεγονός ότι το αυθεντικό υλικό της εξωτερικής κιονοστοιχίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναστήλωση του ναού του Διός στη Νεμέα ανέρχεται σε ποσοστό 70%, ενθαρρύνει ασφαλώς τη συνέχιση των εργασιών και τα επόμενα χρόνια ενώ υπάρχει προοπτική αναστήλωσης και τμήματος του σηκού. Παρ' όλα αυτά το γεγονός ότι λείπουν 1.300 λίθοι της τοιχοδομής του σηκού, καθιστά δυστυχώς την ανακατασκευή του αδύνατη.

Η ιεράρχηση των εργασιών γίνεται βάσει των προτεραιοτήτων που καθορίζει η κατάσταση διατήρησης του μνημείου σε συνδυασμό με την επιθυμητή ανάδειξή του.



**Εικόνα 3.11:** (α) Πιθανή επόμενη επέκταση αναστήλωσης  
(β) Πιθανή μελλοντική επέκταση αναστήλωσης

**Picture 3.11:** (a) Possible next restoration  
(b) Possible future restoration

Η πιθανή μελλοντική αναστήλωση του ναού θα διευκολύνει σημαντικά την κατανόηση του αρχαίου αυτού μνημείου, δεδομένου ότι η σημερινή ατελής μορφή προκαλεί σύγχυση στον επισκέπτη, ιδίως όταν το βλέπει από μακριά.



Κεφάλαιο 4  
Η ΕΠΙΓΕΙΑ ΣΑΡΩΣΗ



#### **4.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Η τεχνολογία σε ό,τι αφορά την αποτύπωση έχει σημειώσει τα τελευταία χρόνια σημαντική πρόοδο. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της συνεχούς εξέλιξης αποτελούν οι δέκτες δορυφορικού εντοπισμού, οι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί που παρέχουν τη δυνατότητα μέτρησης μήκους χωρίς την χρήση ανακλαστήρα (reflectorless), οι φωτογραμμετρικές εφαρμογές. Όμως η πιο πρόσφατη τεχνολογία η οποία βρίσκει εφαρμογή στις αποτυπώσεις είναι αυτή των επίγειων τρισδιάστατων σαρωτών laser. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα όργανο που γίνεται όλο και πιο διαδεδομένο καθώς το πεδίο εφαρμογών του συνεχώς αυξάνεται.

Στο παρελθόν, η γεωμετρική τεκμηρίωση και μελέτη των μνημείων και γενικότερα των αντικειμένων ενδιαφέροντος γίνονταν με μη αυτοματοποιημένες διαδικασίες χρησιμοποιώντας απλές μετρητικές διατάξεις όπως είναι οι μετροταινίες και τα θεοδόλιχα ή οι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί. Τα παράγωγα τα οποία μπορούσαν να προκύψουν μέσω αυτών των διαδικασιών ήταν κατά βάση διδιάστατα, γραμμικά σχέδια κατόψεων, όψεων και τομών των αντικειμένων.

Σήμερα, οι μέθοδοι συλλογής μετρητικών δεδομένων χρησιμοποιώντας εξελιγμένες και αυτοματοποιημένες μετρητικές διατάξεις πάντα συνδυαστικά με μεθόδους ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων και όρασης υπολογιστών (computer vision), μπορούν να δώσουν εξαιρετικά αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα αυτά δεν περιορίζονται σε απλά γραμμικά σχέδια, μιας και πρόκειται για τρισδιάστατα μοντέλα του αντικειμένου, τα οποία δίνουν τόσο ποσοτικές πληροφορίες (γεωμετρικές), όσο και ποιοτικές (π.χ. εκείνες που αφορούν στην υφή του αντικειμένου).

#### **4.2 ΕΠΙΓΕΙΟΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΣΑΡΩΤΕΣ LASER (TERRESTRIAL LASER 3D SCANNERS)**

Κάνοντας λόγο για laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation-ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας), εννοείται η εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας η συχνότητα της οποίας εμπίπτει στο φάσμα του ορατού φωτός. Στην πράξη, ο όρος laser δεν χρησιμοποιείται μόνο για τις συχνότητες της ορατής περιοχής του οπτικού φάσματος αλλά και για εκείνες οι οποίες εμπίπτουν στο μακρύ ή εγγύς υπέρυθρο, στο υπεριώδες καθώς και στην περιοχή των ακτίνων X.

Γενικώς, τα laser μπορούν να παράγουν **συνεχές κύμα** ή **παλμό**. Στην περίπτωση των laser **συνεχούς κύματος**, ο μηχανισμός διέγερσης παρέχει σταθερή ισχύ στο ενεργό μέσο μέχρις ότου το σύστημα να φθάσει σε μικρό χρονικό διάστημα σε μια «σταθερή» κατάσταση παραγωγής ακτίνας συνεχούς κύματος. Στην περίπτωση του **laser παλμού**, ο μηχανισμός διέγερσης παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια σε παλμούς μικρής διάρκειας. Η ισχύς εξόδου ανέρχεται γρήγορα σε ορισμένη υψηλή τιμή και εν συνεχεία μειώνεται, προκαλώντας με τον τρόπο αυτό «έκρηξη φωτός». Χαρακτηριστικά του laser παλμού αποτελούν η επαναληπτική συχνότητα (laser repetition rate) η οποία καθορίζει την ταχύτητα συλλογής δεδομένων, καθώς και η διάρκεια του παλμού η οποία με την σειρά της καθορίζει την ανάλυση.

Με βάση τα όσα συνοπτικά αναπτύχθηκαν, οι σαρωτές laser αποτελούν όργανα τα οποία, μέσω της αξιοποίησης της εκπεμπόμενης laser ακτινοβολίας, συλλέγουν στοιχεία αφενός της θέσης διακεκριμένων σημείων του χώρου και αφετέρου της ανακλαστικότητας αυτών (υπό τη μορφή RGB τιμών). Μέσω κατάλληλης επεξεργασίας, προκύπτουν οι τρισδιάστατες συντεταγμένες πολύ μεγάλου πλήθους σημείων (νεφών) του προς αποτύπωση αντικείμενου και τελικά καθίσταται δυνατή η τρισδιάστατη αναπαράσταση αυτού.

### 4.2.1 Σύγκριση με κλασικές γεωδαιτικές μεθόδους

Όπως είναι αναμενόμενο, οι εφαρμογές του σαρωτή laser ποικίλουν με ιδιαίτερη έμφαση σε χώρους όπως η βιομηχανία θεάματος, ο σχεδιασμός βιομηχανικών αντικειμένων, ο έλεγχος ποιότητας, οι αποτυπώσεις εδαφολογικών χαρακτηριστικών καθώς και η γεωμετρική τεκμηρίωση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς.

Οι σαρωτές laser όπως και τα reflectorless total stations δίνουν τη δυνατότητα αποτύπωσης αντικειμένων από απόσταση χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα. Τα όργανα αυτά είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε περιπτώσεις:

- Περιοχών στις οποίες δεν υπάρχει φυσική πρόσβαση (φυσικοί σχηματισμοί, κάθετοι βράχοι, βιομηχανικές εγκαταστάσεις κ.λ.π.)
- Περιοχών με επικίνδυνα χαρακτηριστικά (πολυσύχναστοι οδικοί άξονες, κτίρια υπό κατάρρευση κ.λ.π.)
- Ευαίσθητα αντικείμενα ή περιοχές (πολιτιστικά αντικείμενα, περιοχές ατυχημάτων κ.λ.π.)

Σε περιπτώσεις επομένως όπως οι παραπάνω κρίνεται αναγκαία η χρήση των σαρωτών αν και πρόκειται για αισθητά πιο ακριβές, από οικονομική άποψη, τεχνολογίες σε σχέση με τα κλασικά όργανα.



Μια ακόμη σημαντική διαφοροποίηση έχει να κάνει με την οργάνωση της εργασίας. Στις περιπτώσεις όπου εφαρμόζονται οι συμβατικές τοπογραφικές μέθοδοι (μετρήσεις με γεωδαιτικό σταθμό, δέκτες GPS κλπ), η κύρια διαδικασία περιλαμβάνει τον εντοπισμό και την αποτύπωση συγκεκριμένων, χαρακτηριστικών σημείων τα οποία είναι απαραίτητα ώστε να αναπαραχθεί η περιοχή ή το αντικείμενο της αποτύπωσης. Με βάση τα παραπάνω ο μελετητής επιλέγει κάθε φορά αφαιρετικά τα κατά το δυνατό λιγότερα δυνατά σημεία τα οποία πρέπει να μετρήσει προκειμένου να είναι δυνατή η τρισδιάστατη αποτύπωση. Αντιθέτως, κατά την σάρωση με laser αποτυπώνεται νέφος εκατομμυρίων, πυκνών σημείων. Αυτό που απαιτείται είναι η γνώση χρήσης του λογισμικού επεξεργασίας του νέφους ώστε να παραχθεί η τελική εικόνα του αντικειμένου.

Γίνεται λοιπόν σαφές πως απαιτείται πολύ λιγότερο χρόνος στο πεδίο ενώ ελαττώνεται σημαντικά και ο αριθμός των ατόμων των συνεργείων. Παρ' όλα αυτά οι σαρωτές laser δεν αποτελούν πανάκεια και σίγουρα δεν υποβαθμίζουν την αξία των γεωδαιτικών σταθμών. Κάθε νέα τεχνολογία πρέπει με προσοχή να αξιοποιείται και να εκτιμάται σε τι βαθμό ικανοποιεί τις εκάστοτε απαιτήσεις (Συμεωνίδης Π., 2007).

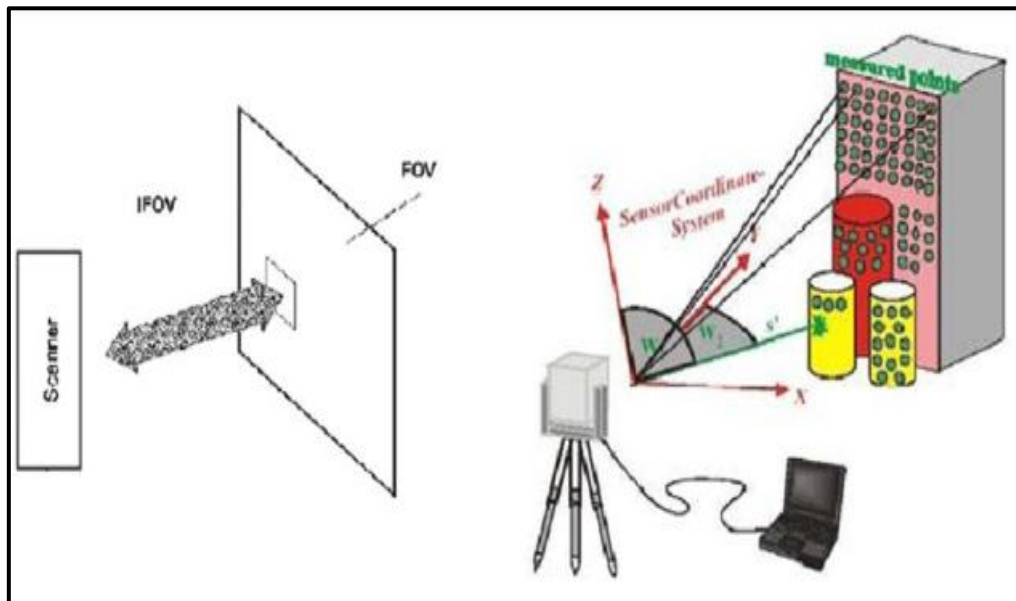
### **4.2.2 Η αρχή λειτουργίας των σαρωτών**

Ο laser σαρωτής, αποτυπώνοντας εξαιρετικά πυκνά, διακριτά σημεία της επιφάνειας του αντικειμένου δημιουργεί ένα «νέφος σημείων» (point cloud). Τα σημεία αυτά μετά από κατάλληλη επεξεργασία η οποία θα αναλυθεί στη συνέχεια εκτενέστερα, αποδίδουν πιστά το αντικείμενο (φυσικά όσο πυκνότερα είναι τα σημεία, τόσο πιστότερη είναι η απόδοση). Παράλληλα συλλέγεται και χρωματική πληροφορία των σημείων. Οι σαρωτές μετρούν και την ανακλαστικότητα του κάθε σημείου, ενώ έχουν τη δυνατότητα και της λήψης ψηφιακών φωτογραφιών της περιοχής ή του αντικειμένου που αποτυπώνεται. Ακόμη οι επίγειοι τρισδιάστατοι σαρωτές αποδίδουν ικανοποιητικά επιφάνειες διαφορετικής υφής, παρουσιάζοντάς τις με διαφορετική χρωματική πληροφορία.

Στην περίπτωση των σαρωτών laser, αποτυπώνεται ένα κωνοειδές πεδίο με κορυφή το ηλεκτροπτικό κέντρο του οργάνου, καταγράφοντας πληροφορίες σχετικά με την απόσταση του αντικειμένου από τον σαρωτή. Πρέπει επομένως τα αντικείμενα να είναι ορατά από το σημείο αποτύπωσης και κατά βάση αδιαφανή.

Οι επίγειοι τρισδιάστατοι σαρωτές αξιοποιούν ακτίνες laser οι οποίες ανήκουν στο ορατό ή υπέρυθρο τμήμα του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Για την αποτύπωση μιας επιφάνειας η στενή δέσμη laser, που συνιστά το στιγμιαίο οπτικό πεδίο (Instant Field Of View-IFOV), πρέπει να μετακινηθεί κατά μήκος και

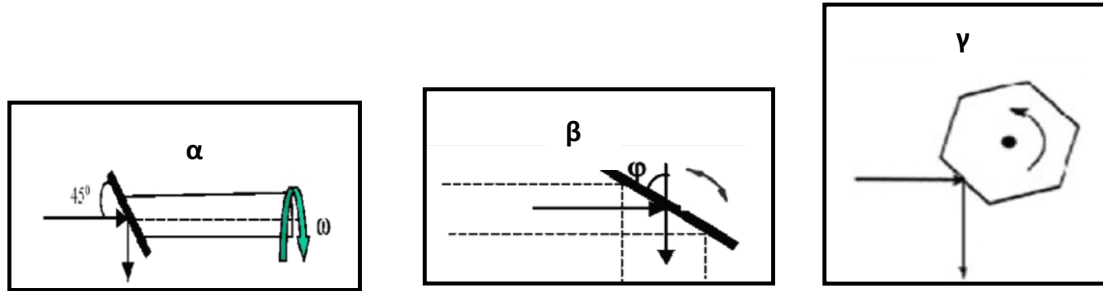
πλάτος αυτής ώστε να καλύψει το σύνολο του οπτικού πεδίου (Field of View-FOV)(εικόνα 4.1).



**Εικόνα 4.1:** Το στιγμιαίο οπτικό πεδίο (IFOV) και το οπτικό πεδίο (FOV) για την μέτρηση τρισδιάστατων καρτεσιανών συντεταγμένων.

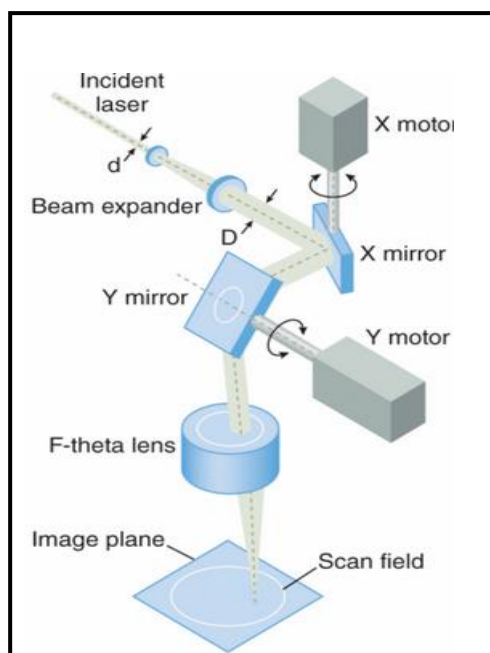
**Picture: 4.1:** The instant field of view (IFOV) and the field of view (FOV) for the measurements of three-dimensional Cartesian coordinates

Ο σαρωτής αναλαμβάνει την εκτροπή της ακτίνας με συγκεκριμένο τρόπο (σχήμα σάρωσης) και υψηλή, ομοιόμορφη συνήθως, γωνιακή δειγματοληψία. Η ομοιόμορφη δειγματοληψία στο επίπεδο της εικόνας (image space) δεν εξασφαλίζει πάντα και ομοιόμορφη κατανομή σημείων στον τρισδιάστατο χώρο. Η εκτροπή της ακτίνας σε μία διεύθυνση επιτυγχάνεται με διάφορες οπτικομηχανικές διατάξεις, όπως περιστρεφόμενα με σταθερή ταχύτητα επίπεδα (εικόνα 4.2(α)), πολυγωνικά κάτοπτρα (εικόνα 4.2(γ)) ή ταλαντευόμενα κάτοπτρα (εικόνα 4.2(β)). Ακόμη, για την εκτροπή της ακτινοβολίας σε δύο διευθύνσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διπλά κάτοπτρα σε διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους (εικόνα 4.3) ή να συνδυασθούν οι παραπάνω διατάξεις με μηχανική περιστροφή της κεφαλής του σαρωτή. Η ταυτόχρονη εκτροπή της ακτίνας σε δύο διευθύνσεις είναι επίσης δυνατή με διάθλασή της από ζεύγος κυκλικών σφηνοειδών πρισμάτων (optical waxes).



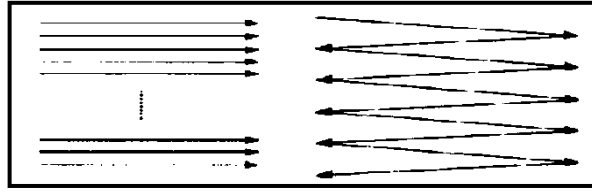
**Εικόνα 4.2:** (α) Περιστρεφόμενο κάτοπτρο  
(β) Ταλαντευόμενο κάτοπτρο  
(γ) Πολυγωνικό κάτοπτρο

**Picture 4.2:** (a) Rotating mirror  
(b) Oscillating mirror  
(c) Polygon mirror



**Εικόνα 4.3:** Τομή σαρωτή με διπλά κάτοπτρα  
**Picture 4.3:** Cross section of scanner with double mirrors

Η χρήση περιστρεφόμενου επιπέδου ή πολυγωνικού κατόπτρου με σταθερή ταχύτητα έχει σαν αποτέλεσμα τη σάρωση του αντικειμένου κατά παράλληλες γραμμές ενώ η χρήση ταλαντευόμενου κατόπτρου δίνει ως αποτέλεσμα σάρωση σε σχήμα Z ή μαιάνδρου (ευθύγραμμου ή ελλειπτικού), όταν χρησιμοποιούνται δύο γαλβανόμετρα (και στους δύο άξονες).



**Εικόνα 4.4:** Σχήματα σάρωσης  
**Picture 4.4:** Forms of scanning

Γενικώς, η διαδικασία που ακολουθείται συνοψίζεται στα ακόλουθα: Αρχικά ορίζονται τα όρια της επιφάνειας που θα αποτυπωθεί και η πυκνότητα σάρωσης. Ο σαρωτής είναι συνδεδεμένος με ηλεκτρονικό υπολογιστή και μέσω της CCD κάμερας αυτού είναι δυνατόν να εμφανιστεί η εικόνα της επιφάνειας που θα σαρωθεί και να πραγματοποιηθεί επεξεργασία αυτής. Στη συνέχεια ξεκινά η εκπομπή παλμού laser (στην πράξη πρόκειται για ένα πλήθος μοναδιαίων παλμών).

Ο παλμός αυτός, αφού ανακλαστεί στην προς σάρωση επιφάνεια, επιστρέφει στο σαρωτή όπου ολοκληρωμένοι οπτικοί κωδικοποιητές μετρούν το χρόνο μετάβασης και επιστροφής και τις γωνίες ανάκλασης της δέσμης. Μεταφέρονται οι πληροφορίες αυτές, σε πραγματικό χρόνο (real time) στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και υπολογίζεται η απόσταση του σαρωτή από το σημείο αποτύπωσης. Υπάρχει η δυνατότητα να αποτυπωθούν με αυτόν τον τρόπο από 1.000 ως 100.000 σημεία ανά δευτερόλεπτο, για καθένα από τα οποία προσδιορίζονται οι τρισδιάστατες συντεταγμένες του ως προς το σύστημα αναφοράς του σαρωτή.

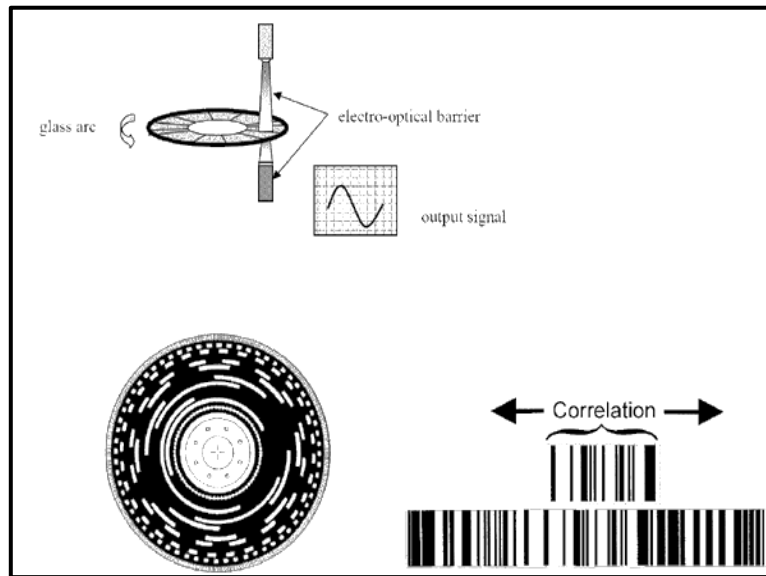
Οι laser scanners είναι λοιπόν όργανα που μετρούν τις σφαιρικές συντεταγμένες και την ανακλαστικότητα μεγάλου πλήθους σημείων χωρίς τη χρήση κατάφωτου. Το αποτέλεσμα της σάρωσης είναι, όπως προαναφέρθηκε, ένα «νέφος σημείων». Οι θέσεις των σημείων υπολογίζονται ως προς το σύστημα αναφοράς του σαρωτή το οποίο ορίζεται ως εξής:

- η αρχή του συστήματος ταυτίζεται με το ηλεκτροπτικό κέντρο της μετρητικής κεφαλής του οργάνου,
- ο άξονας Y ταυτίζεται με το μαγνητικό βορρά που προσδιορίζεται από τη μαγνητική πυξίδα του σαρωτή,
- ο άξονας X επιλέγεται με κατεύθυνση προς την ανατολή έτσι ώστε να προκύπτει δεξιόστροφο σύστημα αναφοράς,
- ο άξονας Z ταυτίζεται με την κατακόρυφο στη θέση του οργάνου

Ορίζεται με λίγα λόγια ένα σύστημα σφαιρικών συντεταγμένων με αρχή τον αισθητήρα του σαρωτή και τιμές  $\theta = \alpha = 0$  για το διάνυσμα που ξεκινάει από τον αισθητήρα του οργάνου και κατευθύνεται εμπροσθεν του σαρωτή. Τα  $\theta$  και  $\alpha$  (οριζόντια και κατακόρυφη γωνία) μαζί με την απόσταση του εκάστοτε σημείου από

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Η ΕΠΙΓΕΙΑ ΣΑΡΩΣΗ

τον αισθητήρα (η τρίτη δηλαδή παράμετρος των σφαιρικών συντεταγμένων,  $\rho$ ) περιγράφουν πλήρως τη θέση του αντικειμένου στο σύστημα του σαρωτή και είναι αυτά τα στοιχεία τα οποία μετρούνται στο ύπαιθρο. Όπως αναφέρθηκε, η απόσταση  $\rho$  υπολογίζεται μέσω του χρόνου μετάβασης και επιστροφής της ανακλώμενης δέσμης. Η μέτρηση της οριζόντιας και κατακόρυφης γωνίας ( $\theta$  και  $\alpha$ ) πραγματοποιείται μέσω ηλεκτρο-οπτικής σάρωσης ψηφιακών barcodes υψηλής ακρίβειας, χαραγμένων σε περιστρεφόμενο κυλινδρικό γυαλί ή δίσκο στο εσωτερικό του οργάνου (εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.5: Διατάξεις μέτρησης οριζόντιας και κατακόρυφης γωνίας (Schulz 2007)  
Picture 4.5: Devices for measuring horizontal and vertical angle (Schulz 2007)

Η μετατροπή των πρωτογενώς μετρημένων σφαιρικών συντεταγμένων  $\rho_i$ ,  $\theta_i$ ,  $\alpha_i$  σε καρτεσιανές για κάθε σημείο του νέφους  $i$ , δίνεται από τις σχέσεις:

$$x_i = \rho_i * \sin(\theta_i) * \cos(\alpha_i) \quad (4.1)$$

$$y_i = \rho_i * \cos(\theta_i) * \sin(\alpha_i) \quad (4.2)$$

$$z_i = \rho_i * \cos(\alpha_i) \quad (4.3)$$

Όπου:  $\rho$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$  οι σφαιρικές συντεταγμένες του σημείου σάρωσης  
 $x_i, y_i, z_i$  οι καρτεσιανές συντεταγμένες του σημείου σάρωσης στο σύστημα αναφοράς του σαρωτή

Επομένως, οι καρτεσιανές συντεταγμένες  $(x, y, z)$ , προκύπτουν ως το αποτέλεσμα των πρωτογενών μετρήσεων  $(\rho, \theta, \alpha)$  και θεωρούνται οι βασικές παρατηρήσεις της διαδικασίας σάρωσης. Η παραμετροποίηση αυτή διευκολύνει τις μαθηματικές σχέσεις που απαιτείται να επιλυθούν στις μετέπειτα διαδικασίες όπως είναι η

συνένωση των νεφών σημείων σε μοντέλο και ο μετασχηματισμός του σε ενιαίο σύστημα αναφοράς (γεωαναφορά).

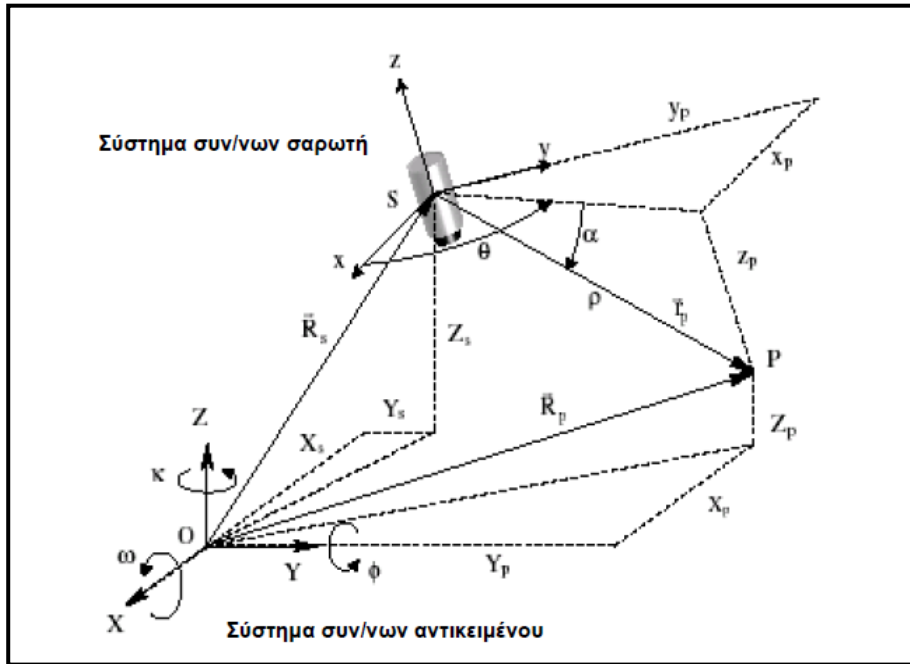
Είναι σαφές πως με τους επίγειους σαρωτές δεν επιτυγχάνεται διακριτός προσδιορισμός σημείων πάνω στο αντικείμενο. Ως εκ τούτου προκύπτει η έννοια του νέφους των σημείων των οποίων απαιτείται η επεξεργασία.

Στην πλειονότητα μάλιστα των περιπτώσεων, μία μόνο σάρωση δεν μπορεί να δημιουργήσει ορθή και ολοκληρωμένη απεικόνιση του αντικείμενου. Για το λόγο αυτό απαιτούνται αρκετές σαρώσεις από διαφορετικές θέσεις. Μάλιστα για πολύπλοκα αντικείμενα όπως είναι οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή τα πολυώροφα κτίρια, μπορεί να απαιτούνται και εκατοντάδες σαρώσεις. Κρίνεται αναγκαίο αυτές οι διαφορετικές σαρώσεις να αναφερθούν σε ένα ενιαίο σύστημα αναφοράς (alignment ή registration) με τη βοήθεια ειδικών λογισμικών ώστε να προκύψει το τελικό, ενιαίο μοντέλο. Όσον αφορά αντικείμενα με απλή γεωμετρία, για την απεικόνιση των οποίων δεν απαιτούνται σαρώσεις από διαφορετικές θέσεις και γωνίες, είναι προφανές πως μία σάρωση αρκεί.

Προκειμένου λοιπόν να καταστεί δυνατή η επεξεργασία νεφών σημείων που συλλέχθηκαν από διαφορετικές στάσεις του σαρωτή, είναι απαραίτητη η συνένωσή τους σε ενιαίο καρτεσιανό σύστημα αναφοράς (X,Y,Z). Ακόμη, συχνά απαιτείται η σύγκρισή τους με στοιχεία μετρημένα σε τοπικό, αυθαίρετο ή γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς γεγονός το οποίο οδηγεί και στην ανάγκη γεωαναφοράς του σαρωμένου μοντέλου από το σύστημα αναφοράς του σαρωτή στο προαναφερθέν αυθαίρετο ή γεωδαιτικό σύστημα (Παγούνης Β., 2011), (Τσακίρη Μ., κ.α 2008).

Επομένως η μετατροπή των «ακανόνιστων» νεφών σημείων που συλλέγει ο σαρωτής, σε ένα φωτορεαλιστικό, (δεδομένου ότι συλλέγεται και χρωματική πληροφορία) τρισδιάστατο μοντέλο που αναπαριστά πιστά την πραγματικότητα και παράλληλα είναι εύκολα διαχειρίσιμο και προσβάσιμο στο μέσο χρήστη, θα μπορούσε να ειπωθεί πως δεν είναι εύκολη διαδικασία.

Στη συνέχεια πρόκειται να παρουσιασθούν οι βασικές διαδικασίες της συνένωσης και γεωαναφοράς των νεφών σημείων, οι οποίες αποτέλεσαν κι ένα από τα βασικά αντικείμενα της διπλωματικής αυτής (κεφάλαια 4.3 & 4.4)



Εικόνα 4.6: Σχηματική απεικόνιση συστημάτων συν/νων σαρωτή και αντικειμένου  
 Picture 4.6: Representation of the coordinate system of the scanner and object

#### 4.2.3 Διάκριση σαρωτών βάσει της μεθόδου σάρωσης

Γενικώς, οι επίγειοι σαρωτές laser μπορούν να διακριθούν στους **σαρωτές επαφής** και στους **σαρωτές αποστάσεως** οι οποίοι με τη σειρά τους χωρίζονται σε **ενεργούς** και **παθητικούς**.

Οι ενεργοί σαρωτές απόστασης αποτελούν την πιο διαδεδομένη κατηγορία και αναλόγως με τις διαφορετικές τεχνολογίες αποτύπωσης που τους χαρακτηρίζουν συναντούμε τις εξής βασικές κατηγορίες:

- ✓ Σαρωτές τεχνολογίας με την μέθοδο των παλμών Time-of-flight
- ✓ Σαρωτές τεχνολογίας με τη μέθοδο διαφοράς φάσης (Phase shift)
- ✓ Σαρωτές τεχνολογίας Τριγωνισμού (Triangulation Scanners)

Άλλες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στους ενεργούς σαρωτές είναι η τεχνολογία Κωνοσκοπικής Ολογραφίας (Conoscopic Holography Scanners), η τεχνολογία Δομημένης ακτίνας (Structured Light Scanners) και η τεχνολογία Διαμορφωμένου Φωτός (Modulated Light Scanners).

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την τεχνολογία των σαρωτών οι αναγνώστες μπορούν να ανατρέξουν στην ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία. Ενδεικτικά αναφέρονται οι (Ιωαννίδης, 2008), (Froehlich et al., 2004) και (Lerma et al., 2008).

**i) Σάρωση με τη μέθοδο των παλμών (Time of flight)**

Κρίνεται σκόπιμο να γίνει εκτενέστερη αναφορά στους **σαρωτές παλμού ή μέτρησης χρόνου πτήσης της ακτίνας laser (time of flight – pulse principle)** εφόσον αυτού του είδους η τεχνολογία εφαρμόσθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Οι σαρωτές time-of-flight εφαρμόζονται κυρίως στην αποτύπωση κτιρίων, σχηματισμών του εδάφους κ.λ.π για την παραγωγή τρισδιάστατων μοντέλων. Οι συσκευές αυτές έχουν τη δυνατότητα μέτρησης σημείων σε μεγάλες αποστάσεις και για μεγάλο εύρος του οπτικού τους πεδίου. Η λειτουργία τους στηρίζεται στην ανάκλαση μίας ακτίνας laser η οποία σαρώνει το αντικείμενο αποτύπωσης. Επί της ουσίας τα όργανα χρησιμοποιούν ένα αποστασιόμετρο laser, το οποίο μετράει την απόσταση υπολογίζοντας με ακρίβεια τον χρόνο που χρειάζεται η ακτίνα laser που εκπέμπεται από τον σαρωτή laser προκειμένου να ανακλαστεί στο αντικείμενο και να επιστρέψει στην πηγή της.

Ειδικότερα, ο σαρωτής εκπέμπει ακτίνα laser και υπολογίζει τον ακριβή χρόνο που απαιτείται ώστε να ανακλαστεί στο προς αποτύπωση αντικείμενο και να επιστρέψει στον αισθητήρα του οργάνου. Δεδομένου ότι η ταχύτητα διάδοσης του laser είναι σταθερή και ίση με την ταχύτητα του φωτός στο κενό και ότι εκτιμάται ο χρόνος μετάβασης και επιστροφής της ακτίνας, μπορεί να υπολογισθεί η ζητούμενη απόσταση από την σχέση:

$$s = (c \times t)/2 \quad (4.4)$$

Όπου:  $c = 3 \pm 10^8 \text{ m/s}$  , η ταχύτητα του φωτός στο κενό.

«Ουσιαστικά, η αρχή λειτουργίας ενός σαρωτή είναι ίδια με αυτή των ηλεκτρονικών οργάνων μέτρησης μηκών με τη μέθοδο των παλμών (Electronic Distance Measurement, EDM).

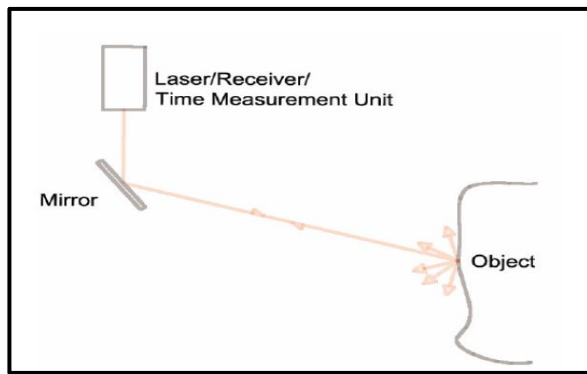
Οι σαρωτές αυτής της τεχνολογίας δεν χρησιμοποιούν κάποιον παθητικό δέκτη (κάτοπτρο), ειδικό κατάφωτο, πρίσμα ή άλλου είδους ανακλαστήρα για την μέτρηση αποστάσεων, αλλά δέχονται την ανακλώμενη ακτινοβολία απευθείας από το αντικείμενο. Επομένως η ενέργεια του ανακλώμενου παλμού εξαρτάται από παράγοντες γεωμετρικούς (γωνία πρόσπτωσης, τραχύτητα επιφάνειας) και φυσικούς (μήκος κύματος της ακτινοβολίας, απώλειες κατά την ανάκλαση).

Βεβαίως πρέπει κάθε φορά να λαμβάνονται υπ'όψιν και οι απαιτούμενες παράμετροι διόρθωσης όπως είναι η πορεία της ακτίνας μέσα στον σαρωτή και η απόσταση της πηγής και του αισθητήρα από το νοητό κέντρο του οργάνου. Κάθε φορά υπολογίζεται η απόσταση ενός σημείου από το όργανο μέσω της σχέσης (4.4). Όπως προαναφέρθηκε, για την αποτύπωση μιας επιφάνειας η στενή δέσμη



laser, που συνιστά το στιγμιαίο οπτικό πεδίο (Instant Field Of View-IFOV), πρέπει να μετακινηθεί κατά μήκος και πλάτος αυτής ώστε να καλύψει το σύνολο του οπτικού πεδίου (Field of View-FOV) (εικόνα 4.1). Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η αλλαγή διεύθυνσης της ακτίνας σε κάθε μέτρηση, είτε μέσω της κίνησης κεφαλής του οργάνου είτε με την κίνηση των κατόπτρων στο εσωτερικό αυτού. Προτιμάται συνήθως η δεύτερη μέθοδος μιας και η κίνηση των κατόπτρων είναι σαφώς ευκολότερη και αποφεύγονται οι κραδασμοί του οργάνου.

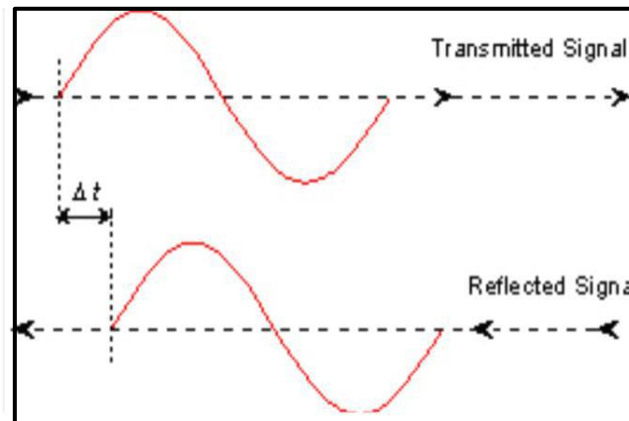
Ένας τυπικός σαρωτής αυτής της κατηγορίας έχει τη δυνατότητα να σαρώνει 10.000-100.000 σημεία το δευτερόλεπτο με ακρίβεια μερικών χιλιοστών.



**Εικόνα 4.7:** Αρχή λειτουργίας time of flight  
**Picture 4.7:** Time of flight Principle of operation

**ii) Σάρωση με τη μέθοδο διαφοράς φάσης (Phase shift)**

Στην περίπτωση αυτή, το εκπεμπόμενο σήμα διαμορφώνεται ως ένα αρμονικό κύμα και η απόσταση υπολογίζεται μέσω της διαφοράς φάσης μεταξύ του εκπεμπόμενου και του επιστρέφοντος από το αντικείμενο κύματος (εικόνα 4.8).



**Εικόνα 4.8:** Διαφορά φάσης εκπεμπόμενου και επιστρέφοντος κύματος  
**Picture 4.8:** Phase difference between the emitted and returning wave

Εξαιτίας της πολύπλοκης ανάλυσης του σήματος, ο προσδιορισμός του χρόνου που απαιτείται, συνεπώς και της απόστασης, είναι ακριβέστερος συγκριτικά με τα αποτελέσματα της μεθόδου time-of-flight. Παρ'όλα αυτά, δεδομένου ότι απαιτείται το ανακλώμενο σήμα να είναι ισχυρό και καλά προσδιορισμένο, οι σαρωτές αυτής της τεχνολογίας έχουν μικρότερο βεληνεκές.

Η μέθοδος μέτρησης της διαφοράς φάσης δεν απαιτεί την ύπαρξη χρονομέτρου μεγάλης ακρίβειας, όπως στην προηγούμενη περίπτωση, καθώς προβλέπει μια απλή ηλεκτρονική διάταξη για τη μέτρηση της διαφοράς φάσης και τον υπολογισμό του χρόνου μετάβασης και επιστροφής του σήματος μέσω της σχέσης:

$$t = (T * \Phi) / (2 * \pi) \quad (4.5)$$

Όπου,  $t$ : ο χρόνος μετάβασης και επιστροφής του σήματος,

$T$ : η χρονική διάρκεια ενός μήκος κύματος

$\Phi$ : η διαφορά φάσης.

Λόγω της πολύπλοκης ανάλυσης των σημάτων, τα αποτελέσματα της μεθόδου αυτής είναι συνήθως ακριβέστερα (εις βάρος όμως του συνολικού αριθμού των μετρούμενων σημείων αλλά και της μέγιστης μετρούμενης απόστασης). Συμπερασματικά, δεδομένου ότι απαιτείται, όπως προαναφέρθηκε, καλά καθορισμένο σήμα επιστροφής για τον υπολογισμό των αποστάσεων, οι σαρωτές που λειτουργούν με βάση αυτήν την τεχνολογία μπορεί να έχουν μειωμένη εμβέλεια και να παράγουν περισσότερα λανθασμένα ή αποκλεισμένα από τις ανοχές σε σφάλματα σημεία (Συμεωνίδης Π., 2007).

### **4.3 ΣΥΝΕΝΩΣΗ ΝΕΦΟΥΣ ΣΗΜΕΙΩΝ**

#### **4.3.1 Γενικά**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, συνήθως, μία μόνο σάρωση δεν αρκεί για να δημιουργήσει ολοκληρωμένη απεικόνιση του αντικειμένου. Απαιτούνται αρκετές σαρώσεις από διαφορετικές θέσεις, ειδικότερα όταν επιδιώκεται η γεωμετρική τεκμηρίωση πολύπλοκων αντικειμένων. Από κάθε σάρωση προκύπτει νέφος σημείων στο αυθαίρετο σύστημα του σαρωτή, σε εκείνη τη θέση (παράγραφος 4.2.2).

Κρίνεται αναγκαίο αυτές οι διαφορετικές σαρώσεις να αναφερθούν σε ένα ενιαίο σύστημα αναφοράς (alignment ή registration) ώστε να προκύψει το τελικό, ενιαίο μοντέλο. Με τον τρόπο αυτό, τα νέφη σημείων είναι συσχετισμένα και αξιοποιήσιμα. Προκειμένου λοιπόν να καταστεί δυνατή η επεξεργασία νεφών

σημείων που συλλέχθηκαν από διαφορετικές στάσεις του σαρωτή, είναι απαραίτητη η συνένωσή τους σε ενιαίο καρτεσιανό σύστημα αναφοράς  $(X, Y, Z)$ .

**Συνένωση (registration)**, καλείται η διαδικασία κατά την οποία διαφορετικές σαρώσεις μετασχηματίζονται σε ένα ενιαίο μοντέλο και σύστημα αναφοράς. Η συνένωση αυτή επιτυγχάνεται μέσω της δημιουργίας ενός συνόλου δεσμών όπου συγκεκριμένα αντικείμενα, γεωμετρικές οντότητες ή σημεία τα οποία εμφανίζονται στην ίδια θέση σε δύο ή περισσότερες σαρώσεις συνδέονται με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργείται μία ακριβής σχέση μεταξύ των νεφών (εικόνα 4.9).

Ο μετασχηματισμός ο οποίος αναφέρθηκε είναι συνήθως της μορφής (σχέση 4.6):

$$R_p = Mr_p + R_s \quad (4.6)$$

Όπου:

$R_p = [X_p, Y_p, Z_p]^T$  είναι το διάνυσμα θέσης του σημείου  $p$  στο σύστημα αναφοράς του σαρωτή (συνήθως αναφερόμαστε στο σύστημα του μητρικού ScanWorld)

$r_p = [x_p, y_p, z_p]^T$  είναι το διάνυσμα θέσης του σημείου  $p$  στο σύστημα αναφοράς του σαρωτή σε ορισμένη θέση

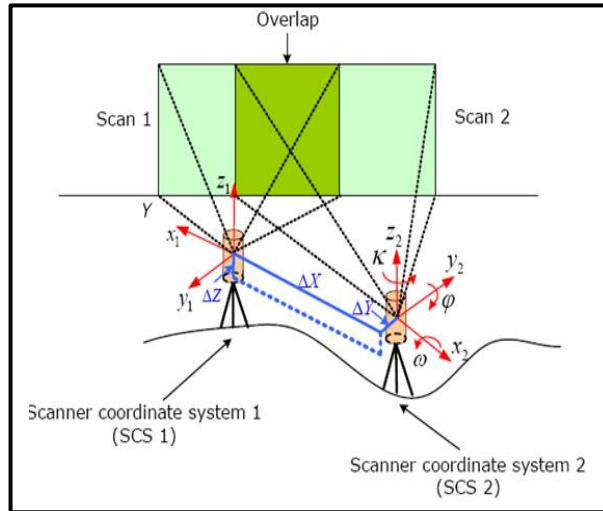
$R_s = [X_s, Y_s, Z_s]^T$  είναι το διάνυσμα της αρχής του συστήματος αναφοράς του σαρωτή (συνήθως αναφερόμαστε στο σύστημα του μητρικού ScanWorld)

$M$ : ο πίνακας στροφών  $\omega, \varphi, \kappa$  γύρω από τους άξονες  $X, Y, Z$  αντίστοιχα και δίνεται από:

$$M = \begin{pmatrix} \cos\varphi \cos\kappa & \cos\omega \cos\kappa + \sin\omega \sin\varphi \cos\kappa & \sin\omega \sin\kappa - \cos\omega \sin\varphi \cos\kappa \\ -\cos\varphi \sin\kappa & \cos\omega \cos\kappa - \sin\omega \sin\varphi \sin\kappa & \sin\omega \cos\kappa + \cos\omega \sin\varphi \sin\kappa \\ \sin\varphi & -\sin\omega \cos\varphi & \cos\omega \cos\varphi \end{pmatrix}$$

Η μοναδική λύση για τον προσδιορισμό των παραμέτρων μετασχηματισμού δηλαδή των τριών μεταθέσεων της αρχής  $[X_s, Y_s, Z_s]$  καθώς και των τριών γωνιών στροφής  $(\omega, \varphi, \kappa)$ , απαιτεί 6 παρατηρήσεις σε 3 κοινά σημεία στα δύο νέφη σημείων που πρόκειται να συνενωθούν, ενώ για περισσότερες παρατηρήσεις χρησιμοποιείται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων. Δεδομένου ότι οι σαρωτές time of flight υπολογίζουν την απόσταση με βάση το χρόνο μετάδοσης και επιστροφής της οπτικής ακτινοβολίας, η κλίμακα είναι γνωστή και ίση με τη μονάδα. Προκειμένου λοιπόν να προσδιοριστούν οι τρεις μετατοπίσεις και οι τρεις στροφές που αναφέρθηκαν, δηλαδή οι παράμετροι του μετασχηματισμού, απαιτείται να

επιλυθούν οι παραπάνω σχέσεις ούτως ώστε τα νέφη σημείων να μετατοπισθούν και να στραφούν έως ότου συνδεθούν κατά τον καλύτερο τρόπο στα σημεία σύνδεσης, να έχουν δηλαδή τις κατά το δυνατό ίδιες συντεταγμένες μοντέλου.



Εικόνα 4.9: Συνένωση επικαλυπτόμενων σαρώσεων (Reshetyuk, 2009)

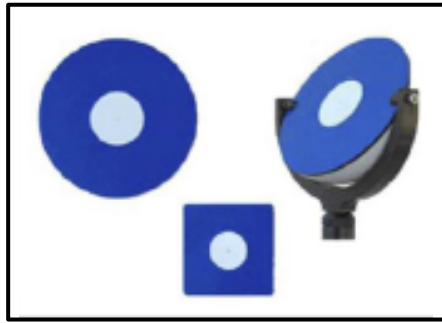
Picture 4.9: Registration of overlapping scans

Το παραμετρικό μοντέλο που εφαρμόζεται προκύπτει όταν στην σχέση (4.6) οι όροι αναδιαταχθούν ως εξής:

$$r_p = M^T (R_p - R_s) \quad (4.7)$$

Ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των εκτιμώμενων παρατηρήσεων  $(x_p, y_p, z_p)$  προκύπτει από τον αντίστοιχο πίνακα των παρατηρήσεων  $(\rho_p, a_p, \theta_p)$  μέσω του νόμου μετάδοσης των μεταβλητοτήτων. Όμως, στην πράξη, θεωρείται ότι προκύπτει διαγώνιος πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας ούτως ώστε να διευκολύνεται ο σχηματισμός των κανονικών εξισώσεων και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της επίλυσης.

Προκειμένου λοιπόν να επιτευχθεί η συνένωση διαδοχικών σαρώσεων, απαιτείται η ύπαρξη επικαλυπτόμενου τμήματος μεταξύ αυτών (τουλάχιστον 30%), στο οποίο να μπορούν να επιλεγούν **τουλάχιστον τρία** διακριτά σημεία τα οποία είναι είτε χαρακτηριστικά λόγω γεωμετρίας πάνω στο προς σάρωση αντικείμενο, είτε ειδικόι στόχοι υψηλής ανακλαστικότητας οι οποίοι επίσης σαρώνονται (εικόνα 4.10). Στην πρώτη περίπτωση γίνεται λόγος για συνένωση με χρήση ομόλογων σημείων (παράγραφος 4.3.2), ενώ στην δεύτερη για συνένωση με χρήση ειδικών στόχων (παράγραφος 4.3.3).



Εικόνα 4.10: Ειδικοί στόχοι (HDS targets)  
Picture 4.10: Special targets (HDS targets)

Σε κάθε περίπτωση, με την επιλογή του ενός σημείου προκύπτει ο υπολογισμός των τριών μεταθέσεων  $[X_s, Y_s, Z_s]$ , με την επιλογή ενός δεύτερου σημείου εξασφαλίζεται η δυνατότητα υπολογισμού των δύο στροφών ενώ απαιτείται και η επιλογή τρίτου σημείου ώστε να υπολογισθεί και η τελευταία στροφή και να επιλυθεί αναλυτικά το πρόβλημα.

Τέλος, πρέπει να επισημανθεί πως όταν το όργανο κεντρώνεται σε σημείο γνωστών συντεταγμένων, τότε απλουστεύεται σημαντικά και η διαδικασία της συνένωσης, γεγονός το οποίο θα αναλυθεί στη συνέχεια εκτενέστερα, αφού είναι αναγκαίο να παρουσιασθεί πρώτα η διαδικασία της γεωαναφοράς (παράγραφος 4.4).

#### 4.3.2 Συνένωση νεφών με χρήση ομόλογων σημείων (Cloud based Registration)

Μέσω της μεθόδου αυτής γίνεται συνένωση σαρώσεων που έχουν επικάλυψη (τουλάχιστον 30%) χρησιμοποιώντας κατ' ελάχιστον τρία ομόλογα σημεία στα δύο νέφη. Η επιλογή των σημείων πραγματοποιείται κατά το στάδιο επεξεργασίας των δεδομένων και δεν γίνεται σήμανσή τους στο προς σάρωση αντικείμενο. Για να αυξηθεί η ακρίβεια συνένωσης, τα σημεία αυτά πρέπει:

- i.* Να είναι ευδιάκριτα (προτιμώνται σημεία σε γωνίες, στην κορυφή ή τη βάση ενός κατακόρυφου αντικειμένου)
- ii.* Να κατανέμονται σε όλη την επιφάνεια επικάλυψης
- iii.* Να μην είναι συνευθειακά ή στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο.

Η συνένωση επιτυγχάνεται μέσω του δεσμού που δημιουργεί ο χρήστης μεταξύ δύο σαρώσεων αξιοποιώντας μόνο τα νέφη σημείων (point clouds). Ο αλγόριθμος της συνένωσης ευθυγραμμίζει τα νέφη με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των ομόλογων σημείων μεταξύ των επικαλυπτόμενων σαρώσεων.

Οι συνενώσεις πραγματοποιούνται με τη χρήση του αλγορίθμου ICP (Iterative Closest Point). Ο αλγόριθμος αυτός ενώνει ομόλογα σημεία, που χονδρικά του έχει

υποδείξει ο χρήστης, μεταξύ δύο επικαλυπτόμενων νεφών με τέτοιο τρόπο ώστε οι αποστάσεις μεταξύ τους να είναι οι μικρότερες δυνατές. Η βέλτιστη λύση της συνένωσης των δύο νεφών επιτυγχάνεται μέσω επαναληπτικής διαδικασίας η οποία σταματά όταν το άθροισμα των τετραγώνων των αποστάσεων των ομόλογων σημείων γίνει το ελάχιστο δυνατό ( $\sum S_i^2 = \min$ ). Ουσιαστικά, με την επιλογή των σημείων (pick) δίνονται σε αυτά προσεγγιστικές τιμές έτσι ώστε να εκτιμηθούν προσεγγιστικά οι αποστάσεις μεταξύ των ομόλογων σημείων και να ακολουθήσει η επαναληπτική διαδικασία για την ελαχιστοποίησή τους. Η γενική σχέση η οποία περιγράφει τη λειτουργία του αλγορίθμου είναι εξής:

$$\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N \llbracket x_i - R * p_i - T \rrbracket^2 = \min \quad (4.8)$$

Όπου:  $x_i$ , είναι η θέση του σημείου  $i$  ( $X_i, Y_i, Z_i$ ) στο «μητρικό» μοντέλο

$p_i$  είναι η θέση του ομόλογου σημείου  $i'$  ( $X_i', Y_i', Z_i'$ ) στο δεύτερο μοντέλο

$T$  είναι το διάνυσμα μετάθεσης και

$R$  ο πίνακας στροφής του συστήματος αναφοράς του δεύτερου μοντέλου ως προς το σύστημα αναφοράς του «μητρικού» μοντέλου

Στην πράξη, σε πρώτη φάση ο χρήστης στο πλαίσιο διαλόγου της συνένωσης προσθέτει τις προς συνένωση σαρώσεις. Στη συνέχεια, επιλέγει τα ομόλογα σημεία των δύο σαρώσεων λαμβάνοντας όμως υπόψιν ότι για να εφαρμοσθεί ο αλγόριθμος που περιγράφηκε νωρίτερα, πρέπει η σχετική απόσταση των ομόλογων σημείων που έχει επιλέξει (pick) στα δύο νέφη να μην ξεπερνάει συγκεκριμένο μήκος που έχει ορίσει ο κατασκευαστής (για παράδειγμα στην περίπτωση του σαρωτή Scan Station 2, τα 10mm).

Ακολουθεί η δημιουργία των δεσμών μεταξύ των σημείων που επιλέχθηκαν ενώ ξεκινά η μαθηματική διαδικασία προσδιορισμού του βέλτιστου μετασχηματισμού ευθυγράμμισης μεταξύ των νεφών. Στο σημείο αυτό μπορεί ο χρήστης, μέσω του ιστογράμματος που εμφανίζεται, να παρακολουθήσει την πορεία της συνένωσης (δεδομένου ότι στον άξονα των  $X$  παρουσιάζεται το σφάλμα αυτής και στον άξονα των  $Y$  ο αριθμός των σημείων που έχουν συνενωθεί). Αναμένεται το ιστόγραμμα συνεχώς να κινείται προς την αρχή των αξόνων μιας και καθώς προχωρά η επαναληπτική διαδικασία, μειώνεται και το σφάλμα της συνένωσης. Ένας ακόμη δείκτης για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων της συνένωσης είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMS (root mean square). Σαρώσεις με περίπλοκη γεωμετρία και επιφάνεια δίνουν και μεγαλύτερο RMS αφού τα ομόλογα σημεία υπάρχει πιθανότητα να μην ανήκουν στην ίδια επιφάνεια.

Στην περίπτωση που ικανοποιούνται όλα τα κριτήρια σύγκλισης και ακρίβειας τότε το αντικείμενο χαρακτηρίζεται από το λογισμικό ως ευθυγραμμισμένο (aligned). Σε αντίθετη περίπτωση το αντικείμενο χαρακτηρίζεται ως μη ευθυγραμμισμένο (not

aligned) και ο χρήστης μπορεί να απενεργοποιήσει τους δεσμούς που παρουσιάζουν μεγάλο σφάλμα ή να επιλέξει καλύτερα ομόλογα σημεία.

Ακολουθεί η διαδικασία της συνένωσης, δηλαδή η συνόρθωση κατά την οποία προσδιορίζονται οι τρεις μεταθέσεις και τρεις στροφές του ενός ScanWorld ως προς το άλλο. Σε περίπτωση που παρουσιασθεί πρόβλημα με τα ομόλογα σημεία, εμφανίζεται σχετικό μήνυμα ούτως ώστε να επιλεγθούν διαφορετικά. Αυτό συμβαίνει όταν έχουν συνήθως επιλεγθεί συνευθειακά, συνεπίπεδα ή με μεγάλη μεταξύ τους απόκλιση σημεία.

Τέλος ο χρήστης μπορεί πέρα από το συνενωμένο νέφος να εμφανίσει και τα αποτελέσματα της συνένωσης (diagnostics).

### 4.3.3 Συνένωση νεφών με χρήση ειδικών στόχων (Target based Registration)

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί συνένωση μεταξύ διαδοχικών και επικαλυπτόμενων σαρώσεων, έχουν κατασκευασθεί σφαιρικοί (sphere targets) και επίπεδοι (HDS ή Black-white targets) στόχοι (εικόνα 4.10), υψηλής ανακλαστικότητας, οι οποίοι είναι δυνατόν να σαρωθούν και να μοντελοποιηθούν προκειμένου να εξαχθεί το κέντρο του σφαιρικού ή επίπεδου στόχου. Οι στόχοι αυτοί χρησιμοποιούνται ώστε να δημιουργηθούν δεσμεύσεις (constraints) ανάμεσα σε επικαλυπτόμενες σαρώσεις προκειμένου αυτές να συνενωθούν. Η ίδια διαδικασία χρησιμοποιείται και στην περίπτωση που συνενωμένα ή μη νέφη πρόκειται να αποκτήσουν συντεταγμένες σε προκαθορισμένο σύστημα αναφοράς, αρκεί οι στόχοι που έχουν σαρωθεί να έχουν γνωστές συντεταγμένες στο σύστημα αυτό.

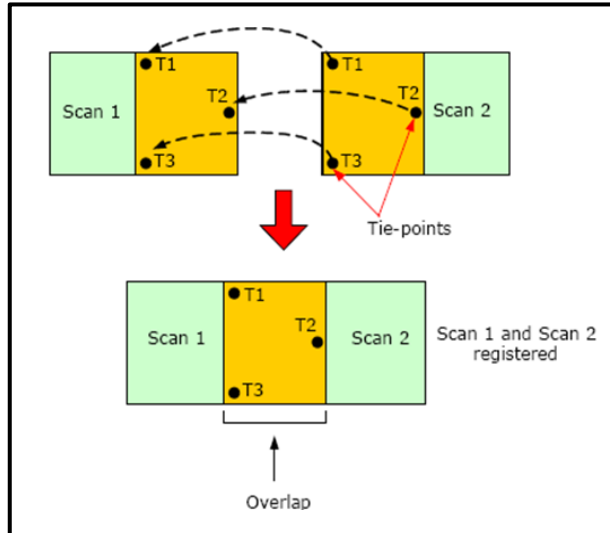
Η τοποθέτηση των ειδικών στόχων πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να πληρούνται οι εξής προϋποθέσεις:

- i.* Χρήση τουλάχιστον τριών ειδικών στόχων.
- ii.* Τοποθέτηση των στόχων με τέτοιο τρόπο ώστε να κατανέμονται σε όλη την επιφάνεια επικάλυψης.
- iii.* Τα σημεία τοποθέτησης των στόχων να μην είναι συνευθειακά ή να μην ανήκουν στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο.

Οι στόχοι αυτοί χρησιμοποιούνται ως σημεία σύνδεσης κατά το στάδιο επεξεργασίας, μέσω κατάλληλου λογισμικού. Με βάση αυτούς του στόχους, το ένα νέφος σημείων μετατίθεται και στρέφεται γύρω από τους τρεις άξονες έτσι ώστε να προσαρμοστεί στο άλλο νέφος το οποίο θεωρείται σταθερό.

Ο χρήστης, σε πρώτη φάση επιλέγει τις σαρώσεις που πρόκειται να συνενωθούν. Στη συνέχεια δίνει εντολή στο λογισμικό να αναζητήσει στόχους που έχουν το ίδιο

ID και να δημιουργήσει μεταξύ τους δεσμούς. Ακολουθεί η συνένωση αυτών ενώ ο χρήστης μπορεί να εμφανίσει και τα στατιστικά αποτελέσματα της συνένωσης όπως περιγράφηκε (παράγραφος 4.3.2).



Εικόνα 4.11: Συνένωση σαρώσεων με χρήση ειδικών στόχων  
Picture 4.11: Registration of scans using special targets

#### 4.3.4 Με συνδυασμό των μεθόδων

Για την επίτευξη καλύτερου αποτελέσματος, υπάρχει η δυνατότητα συνδυασμού των παραπάνω μεθόδων. Συγκεκριμένα ο χρήστης μπορεί πρώτα να πραγματοποιήσει συνένωση δύο σαρώσεων με χρήση ειδικών στόχων και στη συνέχεια να προσθέσει δεσμούς (cloud constraints) μεταξύ ομόλογων σημείων ούτως ώστε να συνδεθούν κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο οι διαδοχικές σαρώσεις.

Μπορεί να ακολουθηθεί και η αντίστροφη διαδικασία, να γίνει δηλαδή πρώτα συνένωση των νεφών με χρήση ομόλογων σημείων και στη συνέχεια μέσω των ειδικών στόχων.

Με βάση τα όσα παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, παράγωγο της διαδικασίας συνένωσης των νεφών σημείων (point clouds), αποτελεί το τελικό, ενιαίο μοντέλο της επιφάνειας που αποτυπώνεται στο σύστημα αναφοράς του σαρωτή (συνήθως του μητρικού νέφους στο οποίο συνδέθηκαν όλα τα υπόλοιπα). Προκύπτει όμως η ανάγκη μετασχηματισμού αυτού του μοντέλου, από το σύστημα αναφοράς του σαρωτή σε γεωδαιτικό ή και σε κάποιο τοπικό αυθαίρετο σύστημα αναφοράς προκειμένου τα παράγωγα της σάρωσης να είναι αξιοποιήσιμα και συγκρίσιμα με άλλες μετρήσεις. Απαιτείται επομένως η διαδικασία της γεωαναφοράς του (Παγούνης Β,2011), (ScanStation2, Manual).



#### 4.4 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑΣ

Ως **γεωαναφορά (georeference)** ορίζεται η διαδικασία μετασχηματισμού μίας σάρωσης ή ενός μοντέλου, από το σύστημα αναφοράς του σαρωτή στο γεωδαιτικό ή και σε τοπικό αυθαίρετο σύστημα αναφοράς.

Όπως έχει ειπωθεί, κατά την σάρωση εκτιμάται ο χρόνος μετάβασης και επιστροφής της οπτικής ακτινοβολίας και υπολογίζεται η ζητούμενη απόσταση του κέντρου του σαρωτή από το εκάστοτε σημείο. Συνεπώς προκύπτουν οι πραγματικές διαστάσεις των αντικειμένων, τα οποία αποτυπώνονται στο πραγματικό τους μέγεθος, απαλλάσσοντας τον χρήστη από την διαδικασία διόρθωσης λόγω κλίμακας. Έχοντας λυθεί το ζήτημα αυτό, όπως και στην περίπτωση της συνένωσης, απαιτούνται πλέον τρία σημεία γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων προκειμένου να επιλυθεί ο μετασχηματισμός (3 μεταθέσεις και 3 στροφές) και να επιτευχθεί η γεωαναφορά του αντικειμένου. Πρόσθετοι στόχοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη πιο αξιόπιστου αποτελέσματος.

Ανάλογα με το αν το όργανο είναι κεντρωμένο και οριζοντιωμένο μπορούμε να διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

- Την περίπτωση κατά την οποία το όργανο τοποθετείται σε τυχαία θέση, δηλαδή δεν είναι κεντρωμένο σε σημείο γνωστών συντεταγμένων. Τότε, είναι απαραίτητη η σάρωση τουλάχιστον τριών σημείων των οποίων είναι γνωστές οι γεωδαιτικές συντεταγμένες. Τα σημεία αυτά είναι είτε χαρακτηριστικά λόγω γεωμετρίας πάνω στο προς σάρωση αντικείμενο, είτε ειδικοί στόχοι υψηλής ανακλαστικότητας οι οποίοι επίσης σαρώνονται. Κατά τα γνωστά, με την σάρωση του ενός σημείου προκύπτει ο υπολογισμός των τριών μεταθέσεων  $[X_s, Y_s, Z_s]$ , με την σάρωση ενός δεύτερου σημείου εξασφαλίζεται η δυνατότητα υπολογισμού των δύο στροφών ενώ απαιτείται και η σάρωση τρίτου σημείου ώστε να υπολογισθεί και η τελευταία στροφή και να επιλυθεί αναλυτικά το πρόβλημα.
- Την περίπτωση που ο σαρωτής είναι κεντρωμένος και οριζοντιωμένος σε σημείο γνωστών συντεταγμένων. Με την οριζοντίωση του σαρωτή οι γωνίες  $\omega$  και  $\phi$  λαμβάνουν μηδενικές τιμές. Η κέντρωση σε σημείο γνωστών συντεταγμένων εξασφαλίζει και τον προσδιορισμό των 3 παραμέτρων της μετάθεσης της αρχής των αξόνων. Μπορούμε επομένως να παραλληλίσουμε την λειτουργία του σαρωτή με εκείνη των γεωδαιτικών σταθμών. Σαρώνοντας τη σφαίρα ή τον στόχο ο scanner, και γνωρίζοντας τις συντεταγμένες του αλλά και του στόχου, μπορεί να

προσδιορισθεί πλήρως ο προσανατολισμός και να υπολογισθούν τελικά οι παράμετροι του μετασχηματισμού. Από το σημείο αυτό κι έπειτα, ό,τι μετρά ο σαρωτής είναι πλέον σε γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Ομοίως ένας γεωδαιτικός σταθμός κεντρώνεται και οριζοντιώνεται σε σημείο γνωστών συντεταγμένων, γίνεται σκόπευση σε επίσης σημείο γνωστών συντεταγμένων (μηδενισμός), και στη συνέχεια μπορεί να γίνει προσδιορισμός των συντεταγμένων οποιουδήποτε άλλου σημείου με την εφαρμογή των θεμελιωδών προβλημάτων.

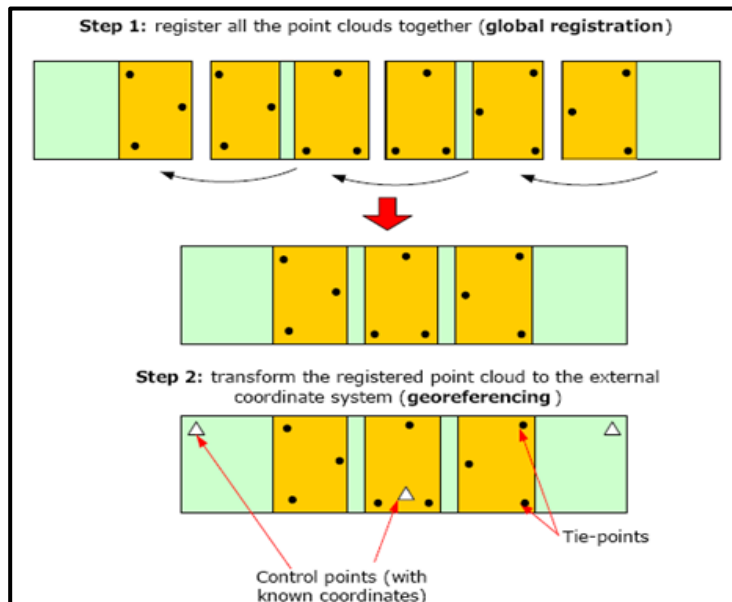
Με βάση τα παραπάνω, αναλύονται στη συνέχεια περιπτώσεις γεωαναφοράς νέφους σημείων ή ενιαίου μοντέλου.

#### 4.4.1 Έμμεση γεωαναφορά (indirect georeference)

Πρόκειται να γίνει μια συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας αυτής μιας και στην παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε να εφαρμοσθεί η μέθοδος της άμεσης γεωαναφοράς. Η έμμεση γεωαναφορά μπορεί με τη σειρά της να διακριθεί σε:

##### i) Γεωαναφορά σε ένα βήμα (one step approach)

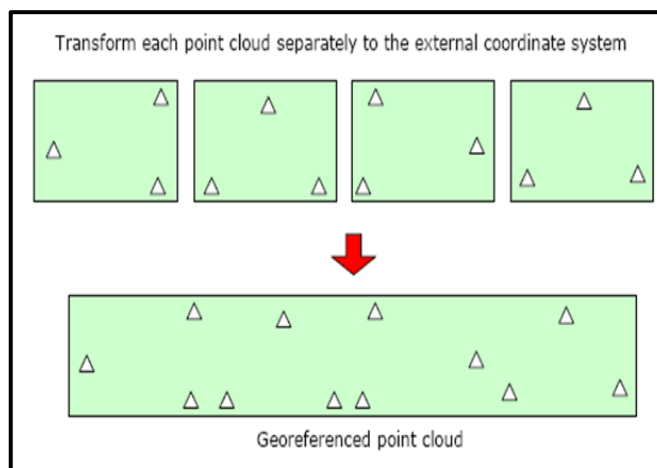
Στο πρώτο βήμα όλα τα ScanWorlds συνενώνονται σε ενιαίο με σύστημα αναφοράς, αυτό του μητρικού ScanWorld.



Εικόνα 4.12: Έμμεση γεωαναφορά μοντέλου σε δύο βήματα (Reshetyuk, 2009)  
 Picture 4.12: Indirect georeference of model in two steps

Στο δεύτερο βήμα το ενιαίο μοντέλο συνενώνεται όπως αναφέρθηκε με το ScanWorld το οποίο περιέχει τα σημεία γνωστών συντεταγμένων σε προκαθορισμένο σύστημα αναφοράς και τελικά γεωαναφέρεται σε αυτό.

## ii) Γεωαναφορά σε δύο βήματα (two steps approach)



**Εικόνα 4.13:** Έμμεση γεωαναφορά μοντέλου σε ένα βήμα (Reshetnyuk, 2009)  
**Picture 4.13:** Indirect georeferencing of model in one step

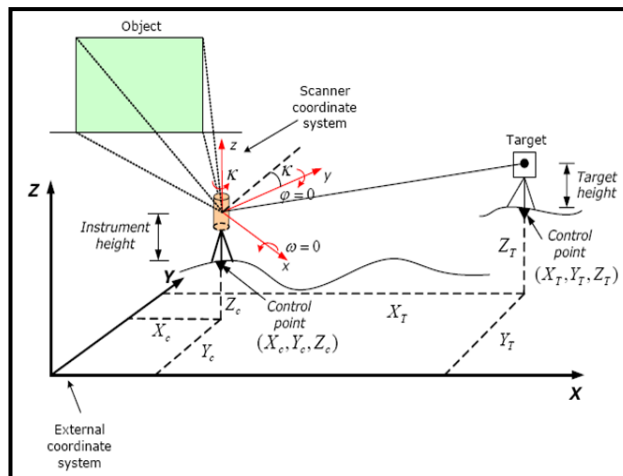
Στην περίπτωση αυτή κάθε νέφος σημείων γεωαναφέρεται στο προκαθορισμένο σύστημα αναφοράς με τον τρόπο που αναφέρθηκε και εν συνεχεία τα γεωαναφερμένα, πλέον, νέφη συνενώνονται σε ενιαίο μοντέλο.

### 4.4.2 Άμεση γεωαναφορά (direct georeference)

Αφορά την διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε προκειμένου να μεταβούμε στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς. Στην περίπτωση αυτή, εκτός από το αντικείμενο ενδιαφέροντος, σαρώνονται και στόχοι ή σημεία στα οποία αποδίδονται συντεταγμένες σε προκαθορισμένο σύστημα αναφοράς μέσω του λογισμικού απευθείας, στο πεδίο. Οι συντεταγμένες αυτές προσδιορίζονται με χρήση γεωδαιτικού σταθμού (total station). Οι στόχοι ή τα σημεία αυτά δεν χρειάζεται να βρίσκονται σε επικαλυπτόμενη επιφάνεια μεταξύ των διαφόρων σαρώσεων.

Όπως έχει αναφερθεί, ο σαρωτής συλλέγει πλήθος σημείων τα οποία όμως αναφέρονται στο σύστημα αναφοράς του. Ο ορισμός λοιπόν της σχέσης μεταξύ του σαρωτή και ενός γνωστού συστήματος αναφοράς γίνεται μέσω της διαδικασίας ορισμού των παραμέτρων του πεδίου μετρήσεων (field setup-παράγραφος 5.2.2). Με τον τρόπο αυτό, τα αποτελέσματα των μετρήσεων που δίνει ο σαρωτής

μετατρέπονται και παρουσιάζονται αυτόματα στο σύστημα αναφοράς που έχει ορισθεί από τον χρήστη, και όχι στο προεπιλεγμένο σύστημα του σαρωτή.



**Εικόνα 4.14:** Άμεση γεωαναφορά μοντέλου  
**Picture 4.14:** Direct georeference of model

Στην παρούσα διπλωματική ακολουθήθηκε η παραπάνω μεθοδολογία. Σε πρώτη φάση κάθε σάρωση γεωαναφέρεται άμεσα στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Η διαδικασία της συνένωσης στην συνέχεια είναι ιδιαίτερα απλουστευμένη, χωρίς να απαιτείται επικαλυπτόμενο μέρος ή κοινά σημεία μεταξύ των σαρώσεων μιας και τα νέφη σημείων αναφέρονται στο σύνολό τους σε κοινό σύστημα αναφοράς (Παγούνης Β., 2011), (ScanStation2, Manual).

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι βάσει των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν (παράγραφος 5.4), το οριζοντιογραφικό σφάλμα μέσω της μεθόδου της άμεσης γεωαναφοράς αναμένεται να είναι της τάξης  $\sigma_{Hor.}^{direct\ geor.} = \pm (2mm \div 6mm)$  και το υψομετρικό σφάλμα  $\sigma_{Vert.}^{direct\ geor.} = \pm (1mm \div 4mm)$ .

#### 4.5 ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΩΝ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΣΑΡΩΤΩΝ LASER

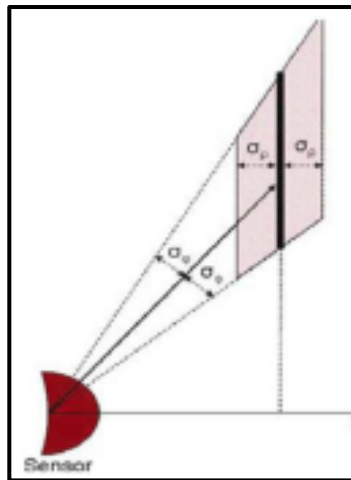
Ένα από τα ζητήματα τα οποία θα απασχολήσουν στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι αυτό της ικανοποίησης της απαιτούμενης, κάθε φορά, ακρίβειας μιας και έχει άμεση επίδραση στην ποιότητα του τελικού προϊόντος και αποτελεί μέτρο της χρησιμότητας και της δυνατότητας εφαρμογής της σάρωσης laser σε κάθε περίπτωση. Για το λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Είναι αναμενόμενο πάντως πως πυκνές σαρώσεις με μικρό μέγεθος κουκκίδας να δίνουν και καλύτερα

αποτελέσματα μιας και αυτό βοηθάει στον καλύτερο και σαφέστερο καθορισμό του σημείου που αποτυπώνεται κάθε φορά.

### 4.5.1 Ακρίβεια μέτρησης γωνίας

Όπως έχει αναφερθεί, ο παλμός laser προσπίπτει σε περιστρεφόμενη συσκευή (κάτοπτρο) και από εκεί ανακλάται και κατευθύνεται στο προς αποτύπωση αντικείμενο (εικόνες 4.2, 4.3). Οποιαδήποτε απόκλιση θα έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της πορείας της ακτίνας και κατά συνέπεια τη γραμμική μετατόπιση του σημείου πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου. Για να εντοπισθούν τέτοιου είδους σφάλματα, συνιστάται η μέτρηση οριζόντιων και κατακόρυφων αποστάσεων μεταξύ αντικειμένων που έχουν σαρωθεί με τον σαρωτή, και η σύγκριση αυτών με άμεσες μετρήσεις προερχόμενες από αποδεδειγμένα πιο ακριβείς τοπογραφικές μεθόδους (Τσακίρη Μ. κ.α 2008).

Στην παρούσα διπλωματική και για τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε, εκτιμάται σφάλμα στην οριζόντια και κατακόρυφη γωνία  $\sigma_{\theta} = \sigma_{\alpha} = \pm 12''$  σύμφωνα με τον κατασκευαστή του οργάνου.



**Εικόνα 4.15:** Αβεβαιότητα μέτρησης σαρωτή  
**Picture 4.15:** Scanner's measuring accuracy

### 4.5.2 Ακρίβεια μέτρησης απόστασης

Το είδος του σαρωτή laser επηρεάζει την ακρίβεια μέτρησης της απόστασης. Στους σαρωτές μεγάλης εμβέλειας, η απόσταση υπολογίζεται βάσει του χρόνου που κάνει η ακτίνα laser να μεταβεί στο αντικείμενο και να επιστρέψει στο δέκτη του σαρωτή. Σφάλματα στην απόσταση είναι δυνατόν να παρατηρηθούν όταν σαρωθούν και υπολογισθούν μέσω του νέφους σημείων αποστάσεις οι οποίες είναι ήδη γνωστές από άλλες μεθόδους (μετρήσεις με γεωδαιτικό σταθμό ή άμεσες μετρήσεις με

μετροταινία). Στην περίπτωση που ο σαρωτής δεν είναι κεντρωμένος σε σημείο γνωστών συντεταγμένων, μπορούν να μετρηθούν μόνο σχετικές αποστάσεις μεταξύ στόχων.

Στην παρούσα διπλωματική και για τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε, εκτιμάται σφάλμα στην απόσταση  $\sigma_s = \pm 4mm$  σύμφωνα με τον κατασκευαστή του οργάνου.

#### 4.5.3 Η ανάλυση του σαρωτή (resolution)

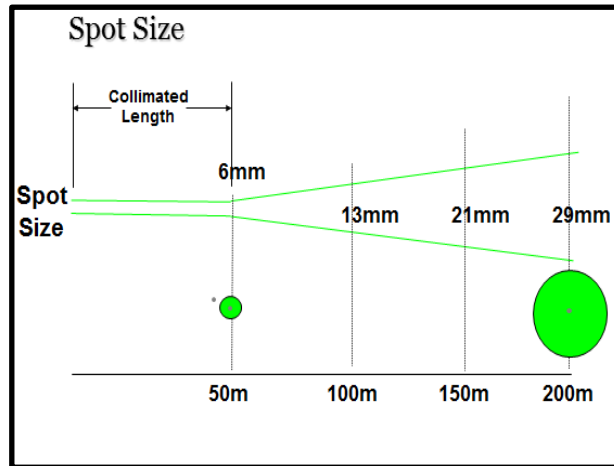
Μία από τις πρώτες ενέργειες που πραγματοποιούνται κατά τη διαδικασία της σάρωσης είναι αυτή του καθορισμού του βήματος σάρωσης, της απόστασης δηλαδή μεταξύ των γειτονικών σημείων που θα αποτυπώσει ο σαρωτής. Το βήμα αυτό δίνεται είτε ως απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων πάνω στο αντικείμενο (γραμμικό βήμα) είτε ως γωνία μετακίνησης της οπτικής ακτίνας μεταξύ επίσης δύο διαδοχικών μετρήσεων (γωνιακό βήμα). Γενικώς, όσο πιο πυκνή είναι μια σάρωση, τα δεδομένα θα είναι λιγότερο θορυβώδη και μεγαλύτερης ακρίβειας.

Το γεγονός αυτό συνδέεται άμεσα με την **διάσταση της κουκίδας laser** (spot size). Μικρό μέγεθος κουκίδας σε συνδυασμό με πυκνές σαρώσεις προσφέρει πληθώρα πλεονεκτημάτων μιας και ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα ακμής (παράγραφος 4.7.1), ο θόρυβος και τα κενά στις σαρώσεις.

Το μέγεθος της κουκίδας ορίζεται συνήθως με βάση την σχέση:

$$\left(\frac{1}{e^2}\right) \times l_{max} \quad \text{όπου } e: \text{ μαθηματική σταθερά (περίπου ίση με 2,7183) και } l_{max} \text{ είναι η μέγιστη ένταση της ακτίνας laser.}$$

Το μέγεθος  $1/e^2$  ισούται με 0,135 ή 13,5%. Αν λοιπόν ο κατασκευαστής δίνει μέγεθος κουκίδας  $6mm$ , σημαίνει ότι η ακτίνα στο όριο των  $6mm$  θα έχει το 13,5% της έντασης που αντιστοιχεί στο κέντρο της κουκίδας. Ουσιαστικά σε αυτά τα  $6mm$  εντοπίζεται το μεγαλύτερο μέρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Στην πραγματικότητα η ακτίνα εκτείνεται και πέρα από αυτό το όριο, όμως το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας βρίσκεται εντός αυτής της διαμέτρου και αυτό το μέγεθος λαμβάνεται ως διάσταση της κουκίδας (Geoff Jacobs, 2006).



Εικόνα 4.16: Διασπορά του μεγέθους της διαμέτρου της ακτίνας laser  
 Picture 4.16: Dispersion of the diameter size of the laser beam

Όσον αφορά τον σαρωτή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική, το μέγεθος της κουκκίδας μεγαλώνει σταδιακά σε σαρώσεις μεγαλύτερες των 50m (εικόνα 4.16). Παρ'όλα αυτά οι σαρώσεις των αντικειμένων πραγματοποιήθηκαν από μικρότερες αποστάσεις οπότε αβεβαιότητα λόγω μεγέθους της κουκκίδας περιορίσθηκε στα πλαίσια του θορύβου του οργάνου.

#### 4.5.4 Εκτίμηση της ακρίβειας

Στις προηγούμενες παραγράφους (4.5.1, 4.5.2, 4.5.3), παρουσιάσθηκαν οι βασικότερες πηγές σφαλμάτων ενός επίγειου σαρωτή προκειμένου να εκτιμηθεί η ακρίβεια η οποία αναμένεται στον προσδιορισμό των σημείων που συλλέγονται. Για τον σκοπό αυτό, εφαρμόσθηκε ο Νόμος Μετάδοσης Σφαλμάτων στις σχέσεις 4.1, 4.2, 4.3. Σε κάθε περίπτωση, ο κατασκευαστής του οργάνου εκτιμά σφάλμα στον προσδιορισμό σημείου μέσω τρισδιάστατης σάρωσης, ίσο με  $\pm 6mm$ .

Όπως αναφέρθηκε, εκτιμάται σφάλμα στην οριζόντια και κατακόρυφη γωνία  $\sigma_\theta = \sigma_\alpha = \pm 12''$  ή  $6 \times 10^{-5} rad$  αντίστοιχα, ενώ στην απόσταση ισχύει  $\sigma_s = \pm 4mm$

Με Ν.Μ.Σ καταλήγουμε στις σχέσεις:

$$\sigma_x = \pm \sqrt{(\sin\theta * \cos\alpha)^2 * \sigma_\rho^2 + (\rho * \cos\theta * \cos\alpha)^2 * \sigma_\theta^2 + (\rho * \sin\theta * (-\sin\alpha))^2 * \sigma_\alpha^2} \quad (4.9)$$

$$\sigma_y = \pm \sqrt{(\sin\theta * \sin\alpha)^2 * \sigma_\rho^2 + (\rho * \cos\theta * \sin\alpha)^2 * \sigma_\theta^2 + (\rho * \sin\theta * \cos\alpha)^2 * \sigma_\alpha^2} \quad (4.10)$$

$$\sigma_z = \pm \sqrt{(\cos\theta)^2 * \sigma_\rho^2 + (\rho * (-\sin\theta))^2 * \sigma_\theta^2} \quad (4.11)$$

Τελικά προκύπτει  $\sigma_x = \sigma_y = \pm 5,7 \text{ mm}$  και  $\sigma_z = \pm 5 \text{ mm}$ .

#### 4.6 ΜΕΛΕΤΗ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Όπως προαναφέρθηκε, οι επίγειοι τρισδιάστατοι σαρωτές συλλέγουν σε μικρό χρονικό διάστημα, δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης. Παρ' όλα αυτά, δεν διαθέτουν την ακρίβεια των κλασικών τεχνολογιών όπως εκείνη των ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών. Προκύπτει επομένως το ζήτημα του κατά πόσο είναι δυνατή η χρήση τους σε εφαρμογές όπως η ανίχνευση παραμορφώσεων μικρής κλίμακας και ποιοι παράγοντες μπορούν να συμβάλλουν θετικά σε τέτοιου είδους εργασίες.

Αρχικά, προκειμένου να εξασφαλισθεί η ορθή λειτουργία του σαρωτή, είναι απαραίτητη η αξιολόγηση αυτού μέσω της βαθμονόμησης τόσο του υλικού (hardware) όσο και του λογισμικού (software), η οποία στην πλειονότητα των περιπτώσεων έχει γίνει από τον κατασκευαστή του οργάνου.

Ως μειονέκτημα ενός μοντέλου που έχει προέλθει από επίγειες σαρώσεις θα μπορούσε να αναφερθεί η δυσκολία εντοπισμού συγκεκριμένων σημείων επί αυτού εκτός κι αν πρόκειται για ειδικούς στόχους οι οποίοι μπορούν να αναγνωρισθούν από το λογισμικό του σαρωτή. Προκειμένου λοιπόν να ανιχνευθούν παραμορφώσεις ή μετακινήσεις είναι προτιμότερη η δημιουργία της, βέλτιστα προσαρμοσμένης στο μοντέλο, επιφάνειας και επεξεργασία αυτής, παρά η προσπάθεια εξαγωγής τους μέσω επιλεγμένων σημείων. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής και για τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε, η ακρίβεια προσδιορισμού σημείου σε μοντελοποιημένη επιφάνεια είναι ίση με  $\pm 2\text{mm}$  (πρέπει να επισημανθεί πως σε μη μοντελοποιημένη επιφάνεια η αντίστοιχη ακρίβεια ισούται με  $\pm 6\text{mm}$ ) (ScanStation 2, User Manual).

Τέλος, με βάση τα όσα αναπτύχθηκαν και σύμφωνα με πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί, ένα απλός τρόπος παρακολούθησης μετακινήσεων είναι η χρήση ειδικών στόχων οι οποίοι τοποθετούνται στο αντικείμενο. Οι στόχοι αυτοί είναι απαραίτητο να αναγνωρίζονται από τον σαρωτή προκειμένου να εξαχεται το κέντρο τους. Σύμφωνα με τα πειράματα αυτά μετακινήσεις της τάξης  $\pm 0,5\text{mm}$  μπορούν να ανιχνευθούν για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (Tsakiri M, Lichti D, Pfeifer N, 2006).

Συμπερασματικά, παρά το γεγονός της μειωμένης ακρίβειας που προσφέρουν οι επίγειοι σαρωτές (σε σύγκριση με τους ολοκληρωμένους γεωδαιτικού σταθμούς), με κατάλληλη μεθοδολογία η οποία επιβάλλει την βαθμονόμηση του οργάνου και



την μοντελοποίηση του σαρωμένου αντικειμένου ή την χρήση ειδικών στόχων, καθίσταται δυνατή η μελέτη παραμορφώσεων.

### 4.7 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΑΡΩΣΗΣ

Στο στάδιο αυτό πρόκειται να παρουσιασθούν ορισμένα από τα βασικότερα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν κατά τη διάρκεια μιας σάρωσης και πώς αυτά μπορούν να αποφευχθούν. Τέλος, αναλύονται και άλλες, πιθανές πηγές σφαλμάτων.

#### 4.7.1 Σφάλμα ακμής

Χαρακτηριστικό των σαρωτών τεχνολογίας time-of-flight, αποτελεί το πρόβλημα που παρουσιάζεται όταν αποτυπώνονται οι ακμές των αντικειμένων. Συγκεκριμένα, μέρος της ακτίνας laser που φτάνει στην ακμή του αντικειμένου, ανακλάται, όπως έχει αναφερθεί, πίσω στον δέκτη. Υπάρχει όμως και μια δεύτερη ανάκλαση από τις επιφάνειες που υπάρχουν στο φόντο της ακμής, από φωτόνια που πέρασαν αυτήν. Στο δέκτη, όπως είναι αναμενόμενο, φτάνουν σήματα από δύο διαφορετικές περιοχές και το όργανο προκειμένου να προσδιορίσει τη θέση του αντικειμένου υπολογίζει το μέσο όρο των μετρήσεων των αποστάσεων με αποτέλεσμα η ακμή του αντικειμένου να φαίνεται σε λάθος θέση, δημιουργώντας «θόρυβο» στην περιοχή. Υπάρχει δυνατότητα μέσω του οργάνου ορισμού της πρώτης ανακλώμενης τιμής ως τιμή μέτρησης της απόστασης.

#### 4.7.2 Θόρυβος σάρωσης

Συχνά, και ειδικότερα στις περιπτώσεις όπου οι μετρήσεις γίνονται σε εξωτερικούς χώρους, αποτυπώνεται μεγάλος όγκος άχρηστης πληροφορίας. Πολλές φορές αυτό γίνεται και εσκεμμένα προκειμένου να εξασφαλισθεί η συλλογή όλης της απαραίτητης πληροφορίας και να ελαχιστοποιούνται τα φαινόμενα των «κενών» περιοχών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα θορύβου αποτελούν η βλάστηση ή άλλα φυσικά και τεχνητά εμπόδια μπροστά από το αντικείμενο σάρωσης, άνθρωποι ή άλλα εμπόδια που παρεμβάλλονται στιγμιαία στην ακτίνα laser.

Ο έλεγχος, ο εντοπισμός και η απαλοιφή αυτών των περιοχών πραγματοποιείται με ευκολία κατά τη διαδικασία επεξεργασίας του νέφους, είτε με παρέμβαση του χρήστη (μέσω επιλογής και διαγραφής των σημείων) είτε μέσω ειδικών αλγορίθμων.

#### 4.7.3 Άλλες πηγές σφαλμάτων

Κατά τη διάρκεια σαρώσεων υψηλής πυκνότητας, οι οποίες αφορούν την αποτύπωση εκατομμύριων σημείων, μπορούν να εμφανιστούν πρόσθετες πηγές σφαλμάτων όπως:

- Σφάλματα που οφείλονται στις μετακινήσεις του σαρωτή λόγω των κινήσεων και δονήσεων του. Για το λόγο αυτό οι σαρωτές συνήθως επιλέγεται να τοποθετούνται σε ειδικούς τρίποδες ή πλατφόρμες οι οποίες περιορίζουν την πιθανότητα μετακινήσεων.
- Σφάλματα που οφείλονται στην κίνηση του σαρωτή ή των κατόπτρων του καθώς και οι αλλαγές που προκαλούνται σε αυτόν λόγω της ανομοιόμορφης κατανομής θερμότητας από την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στο σώμα του οργάνου. Γενικώς πρέπει να επιδιώκεται ο κατά το δυνατόν καλύτερος σχεδιασμός των μετρήσεων ώστε να περιορίζονται οι μετακινήσεις της κεφαλής του οργάνου. Παρόλα αυτά οι μικροδονήσεις που προκαλούνται στα κάτοπτρα του εσωτερικού του οργάνου, αν και δεν μπορούν να εξαλειφθούν, είναι δυνατόν να περιοριστούν με τη βοήθεια ειδικών διατάξεων. Όσον αφορά την ανομοιόμορφη κατανομή θερμότητας, πρέπει να αναφερθεί ότι η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία μίας πλευράς του οργάνου δημιουργεί μικροδιαστολές αυτής άρα και πρόσθετους παράγοντες διαφορικών μετακινήσεων. Χαρακτηριστικές, κενές γραμμές κατά τη διεύθυνση της αποτύπωσης οφείλονται στα παραπάνω.

Άλλα προβλήματα σχετίζονται με τη φύση της οπτικής ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται από τον σαρωτή. Η ακτινοβολία με τη σειρά της καθώς και η ανάκλασή της στο αντικείμενο εξαρτάται από παράγοντες όπως η ανακλαστικότητα του αντικειμένου, η απόσταση του σαρωτή από το αντικείμενο, η γωνία πρόσπτωσης και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες. Για λεπτομέρειες ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει σε σχετική βιβλιογραφία (Τσακίρη Μ. κ.α 2008), (Συμεωνίδης, 2007).

Κεφάλαιο 5  
**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΑΡΩΣΕΙΣ**



## 5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Πριν την διεξαγωγή μετρήσεων στην περιοχή μελέτης, κρίθηκε σκόπιμο να γίνουν πειραματικές σαρώσεις σε τμήματα κατασκευών με διαφορετική γεωμετρία αλλά και υφή προκειμένου να διαπιστωθεί πώς αυτά τεκμηριώνονται, τι είδους πληροφορίες μπορούν να εξαχθούν, αλλά και να βρεθεί η «βέλτιστη» μεθοδολογία, η οποία θα δώσει αξιόπιστο αποτέλεσμα.

Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα. Το πρώτο πραγματοποιήθηκε με στόχο την ανίχνευση της δυνατότητας προσδιορισμού των γεωμετρικών στοιχείων υποστυλώματος κυκλικής διατομής με χρήση επίγειου σαρωτή. Το δεύτερο πραγματοποιήθηκε για να διαπιστωθεί η δυνατότητα εντοπισμού διακριτών μελών – δομικών στοιχείων.

Επιπρόσθετα, δοκιμές έγιναν και με διαφορετικά είδη στόχων με σκοπό την ανίχνευση της δυνατότητας χρήσης αυτοσχέδιων στόχων αντί των σφαιρικών στόχων (HDS sphere targets) (εικόνα 4.10).

Βασικό στοιχείο αποτέλεσε η διερεύνηση της ακρίβειας τεκμηρίωσης, μέσω της διεξαγωγής των προαναφερθέντων πειραμάτων και της αξιολόγησης των παραγώγων τους. Αυτή η ακρίβεια είναι συνάρτηση διαφόρων παραγόντων οι οποίοι διερευνώνται στις πραγματικές συνθήκες ενός πειράματος σε κλίμακα 1:1.

## 5.2 ΠΕΙΡΑΜΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΣΤΙΩΝ

Στα πλαίσια του παρόντος πειράματος, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αλλά και σαρώσεις σε υποστύλωμα κυκλικής διατομής του κτιρίου της Παλαιάς Φοιτητικής Εστίας της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Στόχος του πειράματος αποτέλεσε η σύγκριση των γεωμετρικών στοιχείων του αντικειμένου μελέτης, όπως αυτά προκύπτουν μέσω γεωδαιτικής μεθοδολογίας και μέσω σαρώσεων με σκοπό την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

### 5.2.1 Περιγραφή γεωδαιτικής μεθοδολογίας

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε αναγνώριση της περιοχής και επιλογή των κορυφών οι οποίες υλοποιήθηκαν με αυτοκόλλητους στόχους μιας και το επέτρεπαν οι συνθήκες. Ιδρύθηκε κλειστή ανεξάρτητη όδευση με τέσσερις κορυφές (Σ5, Σ6, Σ7, Σ8). Οι κορυφές αυτές επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να εξυπηρετούν τους σκοπούς της γεωδαιτικής μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων των τοποσταθερών που τοποθετήθηκαν περιμετρικά επί του

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΑΡΩΣΕΙΣ

αντικειμένου μελέτης. Παράλληλα, επιλέχθηκαν και με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπουν την πλήρη σάρωση του υποστυλώματος, με επικαλύψεις, προκειμένου να προκύψει η ολογραφία αυτού.

Προκειμένου να δοθούν συντεταγμένες στις κορυφές της όδευσης καθώς και στα τοποσταθερά, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τον γεωδαιτικό σταθμό της εταιρείας Leica, TCR 405 του οποίου τα τεχνικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στην συνέχεια (πίνακας 5.1)

| Τεχνικά Χαρακτηριστικά                |                                                                                    |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Γωνιομετρική ακρίβεια                 | $\pm 5''$ (15cc)                                                                   |
| Εμβέλεια απόστασης με πρίσμα          | 3.500m                                                                             |
| Εμβέλεια απόστασης χωρίς πρίσμα       | 250m                                                                               |
| Ακρίβεια μέτρησης μήκους με πρίσμα    | $\pm(2\text{mm}+2\text{ppm})$                                                      |
| Ακρίβεια μέτρησης μήκους χωρίς πρίσμα | $\pm(3\text{mm}+2\text{ppm})$                                                      |
| Καταγραφή                             | Αποθήκευση σε κάρτα μνήμης                                                         |
| Δυνατότητες                           | Φωτεινός οδηγός χάραξης (Point Guide)<br>Φωτεινός οδηγός σκόπευσης (Laser Pointer) |

Πίνακας 5.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεωδαιτικού σταθμού TCR 405

Table 5.1: Technical characteristics of total station TCR 405

Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν ακόμη:

- ✓ στυλεός, στόχος (κατάφωτο), και τρικόχλια
- ✓ τρίποδες
- ✓ βάση σταθεροποίησης του τρίποδα μιας και ορισμένες εκ των μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν σε χώρο όπου η επιφάνεια έδρασης ήταν λεία.

Οι μετρήσεις για τον προσδιορισμό των υψομετρικών διαφορών μεταξύ των κορυφών της όδευσης πραγματοποιήθηκαν με ψηφιακό χωροβάτη Sprinter της εταιρείας Leica, ονομαστικής ακρίβειας  $\pm 0,6\text{mm}$  στην ανάγνωση στη σταδία.

Χρησιμοποιήθηκαν ακόμη:

- ✓ τρίποδας αλουμινίου.
- ✓ κωδικοποιημένη (barcode) σταδία, μήκους 3m.
- ✓ Ειδική κατασκευή με την οποία εξασφαλίστηκε η σημειακή εφαρμογή της σταδίας (εικόνα 5.1).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΑΡΩΣΕΙΣ

Μετρήθηκαν σε δύο πλήρεις περιόδους όλα τα απαραίτητα στοιχεία (οριζόντια και κατακόρυφη γωνία, κεκλιμένη απόσταση, ύψος οργάνου και ύψος σκόπευσης). Επιπλέον, μετρήθηκαν σε μία πλήρη περίοδο τα παραπάνω στοιχεία και για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων των τοποσταθερών, μέσω των οποίων και μετά από κατάλληλη επεξεργασία προέκυψαν τα βασικά γεωμετρικά στοιχεία του υποστυλώματος.



Εικόνα 5.1: Ειδική κατασκευή για σημειακή εφαρμογή της σταδίας  
Picture 5.1: Special construction used for the levelling

Ο προσδιορισμός των υψομετρικών διαφορών μεταξύ των κορυφών της όδευσης πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της Διπλής Γεωμετρικής Χωροστάθμησης. Οι αποστάσεις οργάνου-σταδίας δεν ξεπερνούσαν τα 10m. Όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκε ειδική κατασκευή η οποία προσαρμόσθηκε στη σταδία ώστε να εφαρμόζει σημειακά (εικόνα 5.1). Η κατασκευή αυτή δεν επηρεάζει τις μετρήσεις μιας και το ύψος της αλληλοαναιρείται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Όπως γίνεται φανερό και στην σχέση 5.1, το ύψος της κατασκευής (Y.K) στη μοναδιαία χωροστάθμηση επειδή παραμένει σταθερό κατά την όπισθεν και έμπροσθεν σκόπευση δεν συμμετέχει στον τελικό υπολογισμό της υψομετρικής διαφοράς.

$$(O_i + Y.K) - (E_i + Y.K) = O_i - E_i = \Delta H_i \quad (5.1)$$

Μετά την μέτρηση των στοιχείων της όδευσης, ακολούθησε η επεξεργασία των μετρήσεων και στη συνέχεια η επίλυση της. Ως σταθερή, θεωρήθηκε, η κορυφή Σ5 (με συντεταγμένες:  $x_{\Sigma 5} = 1000m$ ,  $y_{\Sigma 5} = 1000m$ ,  $H_{\Sigma 5} = 100m$ ) ενώ ως σταθερή διεύθυνση λήφθηκε η Σ5-Σ6 με  $\alpha_{\Sigma 5 \Sigma 6} = 100g$ . Προέκυψαν τελικά οι συντεταγμένες των στάσεων της όδευσης (πίνακας 5.2).

| Στάση | X(m)     | Y(m)     | H(m)    |
|-------|----------|----------|---------|
| Σ5    | 1000,000 | 1000,000 | 100,000 |
| Σ6    | 1005,047 | 999,999  | 100,003 |
| Σ7    | 1008,380 | 1006,688 | 99,958  |
| Σ8    | 1000,030 | 1006,884 | 99,996  |

Πίνακας 5.2: Τελικές συντεταγμένες κορυφών όδευσης

Table 5.2: Final coordinates of traverse's points.

Ακολούθησε ο προσδιορισμός των συντεταγμένων των τοποσταθερών στο παραπάνω αυθαίρετο σύστημα, καθώς και ο προσδιορισμός των υψομέτρων τους.

Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμός του κέντρου και της ακτίνας της τυπικής διατομής του υποστυλώματος μέσω της προσομοίωσης των τοποσταθερών με κύκλο. Οι άγνωστοι στην περίπτωση αυτή είναι τρεις: οι συντεταγμένες του κέντρου του κύκλου ( $X_o, Y_o$ ) και η ακτίνα ( $R$ ). Το πλήθος των εξισώσεων είναι ίσο με τον αριθμό των τοποσταθερών που μετρήθηκαν ( $n = 5$ ), επομένως ο βαθμός ελευθερίας  $r = n - m$  ίσος με 2.

Οι σχέσεις που συνδέουν τις μετρήσεις με τις ανεξάρτητες καθοριστικές παραμέτρους είναι της μορφής :

$$l_i = (x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2 - R^2 = 0 \quad (5.2)$$

Επειδή οι σχέσεις δεν είναι γραμμικές, αναπτύσσονται κατά Taylor στη θέση  $(x_o^o, y_o^o, R^o)$ , όπου  $(x_o^o, y_o^o, R^o)$  οι προσωρινές τιμές των ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων που προέκυψαν από το περιβάλλον Autocad.

Επομένως καταλήγουμε στην:

$$a_{i1}\delta_{X_o} + a_{i2}\delta_{y_o} + a_{i3}\delta_R = \delta_{l_i} + v_i \quad (5.3)$$

Το διάνυσμα  $[\delta l]$  προκύπτει από την διαφορά  $[\delta l] = l_i - l_i^o = 0 - l_i^o \rightarrow [\delta l] = -l_i^o$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial X_o} & \frac{\partial f_1}{\partial Y_o} & \frac{\partial f_1}{\partial R} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial X_o} & \frac{\partial f_m}{\partial Y_o} & \frac{\partial f_m}{\partial R} \end{bmatrix}$$



Όπου:

$$a_{i1} = \frac{\partial f_i}{\partial X_0} = -2(X_i - X_0), \quad a_{i2} = \frac{\partial f_i}{\partial Y_0} = -2(Y_i - Y_0) \quad \text{και}$$

$$a_{i3} = \frac{\partial f_i}{\partial R} = -2R$$

Οι μετρήσεις θεωρήθηκαν ισοβαρείς. Από την επίλυση του συστήματος των κανονικών εξισώσεων υπολογίσθηκε το διάνυσμα λύσης:

$$\delta_x = (A^T A)^{-1} (A^T \delta_l) \quad (5.4)$$

Τα υπόλοιπα υπολογίσθηκαν μέσω των εξισώσεων παρατήρησης και του τύπου:

$$u = A * \delta_x - \delta_l \quad (5.5)$$

Το a posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους υπολογίσθηκε από την σχέση:

$$\widehat{\sigma}_o = \pm \sqrt{\frac{[uv]}{n-m}} \quad (5.6)$$

Και ο a posteriori πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας ίσος με:

$$\widehat{V}_{\hat{x}} = \widehat{\sigma}_o^2 (A^T A)^{-1} \quad (5.7)$$

Έτσι, προσδιορίσθηκαν τελικά οι καλύτερες τιμές των ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων:  $(x_0, y_0) = (1003,651, 1003,943)m$  και  $R = 0,275m$  με  $\sigma_{x_0} = \sigma_{y_0} = \sigma_R = \pm 2mm$ .

### 5.2.2 Περιγραφή μεθοδολογίας σαρώσεων

Μετά την ολοκλήρωση και επεξεργασία των μετρήσεων με χρήση ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού, ακολούθησε η διαδικασία των σαρώσεων. Στόχος, όπως και προηγουμένως, αποτέλεσε η εξαγωγή μετά από κατάλληλη επεξεργασία της θέσης του κέντρου και της ακτίνας της τυπικής διατομής του υποστυλώματος.

Πρέπει να σημειωθεί ότι με τον σαρωτή δεν γίνεται διακριτός προσδιορισμός σημείων πάνω σε ένα αντικείμενο, αλλά μια σάρωση. Ως εκ τούτου προκύπτει η έννοια του νέφους των σημείων των οποίων πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία με τρόπο διαφορετικό από αυτόν που ακολουθήθηκε κατά την γεωδαιτική μεθοδολογία.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΑΡΩΣΕΙΣ

Σε πρώτη φάση πραγματοποιήθηκε ο προγραμματισμός των σαρώσεων. Μελετήθηκε η προς σάρωση περιοχή και προσδιορίστηκε ο αριθμός των στάσεων στις οποίες τοποθετήθηκε ο επίγειος σαρωτής, έτσι ώστε να σαρωθεί το υποστύλωμα χωρίς να υπάρχουν κενά και ασυνέχειες. Προκειμένου να προκύψει η ολογραφία του υποστυλώματος, πραγματοποιήθηκαν σαρώσεις από τρεις διαφορετικές στάσεις οι οποίες εν συνεχεία συνενώθηκαν.

Ο βασικός εξοπλισμός για την διεξαγωγή μετρήσεων ήταν:

- ✓ ο Laser Scanner ScanStation 2 της εταιρείας Leica
- ✓ ειδικός τρίποδας που συνοδεύει το όργανο
- ✓ η βάση σταθεροποίησης του τρίποδα (αστερίας)
- ✓ η μπαταρία (τροφοδοσία)
- ✓ η μονάδα ελέγχου (ηλεκτρονικός υπολογιστής).

Ο επίγειος σαρωτής που χρησιμοποιήθηκε, βασίζεται στην αρχή λειτουργίας του χρόνου διαδρομής (time of flight) του παλμού laser, όπως αυτή παρουσιάστηκε αναλυτικά στην ενότητα 4.2.3(i). Χαρακτηρίζεται από υψηλή ταχύτητα συλλογής δεδομένων καθώς συλλέγει 50.000 σημείων ανά δευτερόλεπτο. Η εμβέλεια του οργάνου φτάνει τα 300m, με ακρίβεια μέτρησης της θέσης τα  $\pm 6mm$ , ακρίβεια προσδιορισμού της απόστασης τα  $\pm 4mm$  και γωνιακή ακρίβεια τα  $\pm 60\mu rad$  ( $12''$ ) για εμβέλεια μέχρι τα 50m. Το όργανο διαθέτει ακόμη κινούμενη κεφαλή με δυνατότητα περιστροφής  $360^\circ$  γύρω από τον οριζόντιο άξονα και  $270^\circ$  γύρω από τον κατακόρυφο άξονα. Ουσιαστικά δεν αποτυπώνονται τα σημεία που βρίσκονται στον κατακόρυφο άξονα από  $-45^\circ$  μέχρι  $45^\circ$  εξαιτίας του τρόπου στήριξης του οργάνου. Επίσης, διαθέτει ισοσταθμητή και στους δύο άξονες (dual axis compensator), ηλεκτρονικό σύστημα κίνησης (servo), αυτόματη αναγνώριση στόχων και σκόπευση με τη βοήθεια ψηφιακής οθόνης (imaging). Τέλος, οι διαστάσεις του σαρωτή είναι  $265mm \times 370mm \times 510mm$  (βάθος  $\times$  πλάτος  $\times$  ύψος) και το καθαρό του βάρος 18,8kg.

Τόσο ο καθορισμός των παραμέτρων σάρωσης όσο και η επεξεργασία των δεδομένων πεδίου πραγματοποιήθηκαν μέσω του λογισμικού Cyclone της εταιρείας Leica το οποίο συνοδεύει τον ScanStation2 και λειτουργεί σε περιβάλλον Windows. Το λογισμικό αυτό έχει τη δυνατότητα να διαχειρίζεται μεγάλο όγκο πληροφορίας χωρίς όμως να μειώνεται η απόδοσή του. Η διαδικασία της σάρωσης στο πεδίο είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και συχνά απαιτείται ένα μόνο άτομο για την διεξαγωγή των μετρήσεων.

Ο σαρωτής, σε πρώτη φάση κεντρώνεται και οριζοντιώνεται σε κάθε στάση από την οποία πρόκειται να πραγματοποιηθεί σάρωση και συνδέεται με τον ηλεκτρονικό

υπολογιστή μέσω καλωδίου δικτύου (Ethernet) ενώ παράλληλα ρυθμίζεται και το θέμα τροφοδοσίας αυτού (μέσω μπαταρίας ή ρεύματος).

Κάθε φορά που ένας σαρωτής συνδέεται με έναν νέο ηλεκτρονικό υπολογιστή πρέπει να δημιουργηθεί και μια νέα τοπική σύνδεση η οποία θα λειτουργεί ως δίαυλος επικοινωνίας μεταξύ αυτών. Με τον τρόπο αυτό ο σαρωτής μπορεί να «επικοινωνεί» με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και να δέχεται από αυτόν εντολές με τη βοήθεια του λογισμικού Cyclone με το οποίο όμως πρέπει να εναρμονισθεί μέσω των επιλογών **Cyclone Navigator** → **Configure Scanners** → **Add Scanner**. Στο πλαίσιο διαλόγου που εμφανίζεται επιλέγει ο χρήστης το μοντέλο του σαρωτή, το χαρακτηριστικό όνομα αυτού καθώς και το IP address του. Δημιουργεί ακόμη ο χρήστης τη βάση δεδομένων **Cyclone Navigator** → **Configure Databases** → **Add** στην οποία θα καταγράφονται όλα τα παράγωγα της σάρωσης.

Μέσω των εντολών **Cyclone Navigator** → **Create Project** ο χρήστης ουσιαστικά δημιουργεί τον χώρο στον οποίο πρόκειται να δουλέψει και με όμοιο τρόπο δημιουργεί και τον χώρο εκείνον (**ScanWorld**) στον οποίο πρόκειται να καταγράφονται τα νέφη σημείων.

Στη συνέχεια μπορεί να πραγματοποιηθεί πλοήγηση στο περιβάλλον (Scan Control Window) μέσω του οποίου θα ορισθούν οι παράμετροι της σάρωσης. Σε πρώτη φάση γίνεται η σύνδεση του σαρωτή με τον υπολογιστή (**Scanner** → **Connect**) και ο σαρωτής κάνει περιστροφές προκειμένου να ελέγξει το laser και τα κάτοπτρά του. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο laser scanner διαθέτει ισοσταθμητή και στους δύο άξονες (dual-axis compensator), επομένως αφού συνδεθεί με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή, στην περίπτωση που χαθεί η οριζοντίωση, εμφανίζεται σχετικό μήνυμα οποιαδήποτε στιγμή διεξαγωγής των μετρήσεων.

Επί της ουσίας, η διαδικασία ορισμού των παραμέτρων της σάρωσης ξεκινά με τον καθορισμό της φωτεινότητας ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν **image** → **adjust exposure** → **outdoors**. Στο σημείο αυτό μπορεί να γίνει και αυξομείωση του ανοίγματος του φακού ανάλογα με τις συνθήκες φωτεινότητας που επικρατούν και το αποτέλεσμα που επιδιώκεται. Εν συνεχεία ορίζεται το «παραθύρο» της σάρωσης (**Field of View**) και λαμβάνεται φωτογραφία της επιλεγμένης περιοχής. Ακόμη ο χρήστης διαλέγει την απόσταση μέχρι το πιο μακρινό σημείο που επιθυμεί να σαρώσει (**probe**) προκειμένου τουλάχιστον έως εκεί να διατηρηθεί η ακρίβεια του κατασκευαστή. Επιλέγει το βήμα της σάρωσης (**resolution**) το οποίο τέθηκε ίσο με 5mm και δίνει τελικά την εντολή να ξεκινήσει η σάρωση.

Παράλληλα με το αντικείμενο μελέτης, πραγματοποιούνταν και σάρωση του στόχου, στοιχείου απαραίτητου για την γεωαναφορά. Γενικώς, όταν σαρώνονται στόχοι, εξάγεται ως κορυφή το κέντρο αυτών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΑΡΩΣΕΙΣ

Συγκεκριμένα, σε πρώτη φάση, γίνεται μία γενική σάρωση (rough scan) της ευρύτερης περιοχής του στόχου προκειμένου να εντοπισθεί το κέντρο του. Στη συνέχεια το Cyclone ξεκινά αυτόματα μια πυκνότερη σάρωση στο μισό στόχο χρησιμοποιώντας αλγόριθμο για τον προσδιορισμό του κέντρο του. Υπό φυσιολογικές συνθήκες το σημείο σύνδεσης (tie point), δηλαδή το κέντρο του στόχου, εξάγεται με ακρίβεια  $\pm 2mm$  σε σχέση με την πραγματική του θέση.

Ακολουθεί η διαδικασία της άμεσης γεωαναφοράς του σαρωμένου νέφους. Έχοντας τοποθετηθεί ο σαρωτής και ο στόχος σε σημεία γνωστών συντεταγμένων, εισάγονται οι συντεταγμένες αυτών μέσω της εντολής **Import** → **Coordinate list**. Στο πλαίσιο διαλόγου field setup επιλέγεται η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί (**Known Backsight**). Εισάγονται οι ονομασίες των κορυφών που τοποθετείται ο σαρωτής και ο στόχος καθώς και τα ύψη οργάνου και στόχου. Τέλος, ο χρήστης εισάγει τον τύπο του στόχου που έχει τοποθετηθεί σε σημείο γνωστών συντεταγμένων και εκτελούνται οι εντολές **Calculate** → **Apply**.

Αφού πραγματοποιηθεί η παραπάνω διαδικασία από κάθε στάση, ακολουθεί η συνένωση των νεφών σε ενιαίο μοντέλο, η οποία στην περίπτωση αυτή είναι εξαιρετικά απλουστευμένη (**Create ScanWorld / Freeze Registration** και **Creat and Open Modelspace**).

Η αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας του Cyclone τόσο κατά τη διαδικασία της σάρωσης, όσο και στην συνέχεια, δεν αποτελεί σκοπό της παρούσας διπλωματικής και για τον λόγο αυτό, συνοπτικά αναφέρθηκαν οι επιλογές του χρήστη σε ό,τι αφορά το λογισμικό. Οι αναγνώστες για περαιτέρω πληροφορίες μπορούν να ανατρέξουν σε tutorial της εταιρείας Leica.

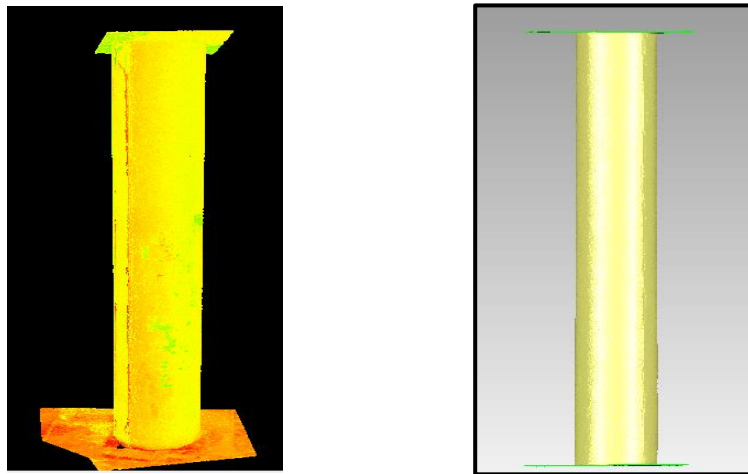
Αφού πραγματοποιήθηκε η σάρωση του υποστυλώματος, η γεωαναφορά και συνένωση των νεφών σημείων που προέκυψαν, ακολούθησε η επεξεργασία του μοντέλου προκειμένου να εξαχθούν τα γεωμετρικά στοιχεία της τυπικής διατομής και να συγκριθούν με εκείνα που προέκυψαν από την χρήση των τοποσταθερών.

Για την επεξεργασία των ψηφιακών δεδομένων του ScanStation2 χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Geomagic Studio 12 το οποίο αξιοποιεί το σαρωμένο μοντέλο, το επεξεργάζεται ενιαία και το αποδίδει ως επιφάνεια σε τρεις διαστάσεις. Ακόμη, το λογισμικό αυτό παρέχει στον χρήστη την δυνατότητα δημιουργίας τομών και την εξαγωγή τους σε περιβάλλον Autocad.

Αρχικά, το υποστυλωμα απομονώθηκε από τον υπόλοιπο σαρωμένο θόρυβο στο λογισμικό του Cyclone. Σε τέτοιες περιπτώσεις επιλέγεται το αντικείμενο ενδιαφέροντος και εκτελούνται οι εντολές **fence** → **delete outside**.

Στη συνέχεια, το νέφος των σημείων εισήχθη στο περιβάλλον του Geomagic όπου έγινε αρχικά λεπτομερέστερη απομάκρυνση του θορύβου. Το συγκεκριμένο

λογισμικό δίνει την δυνατότητα διαγραφής εκείνων των συνόλων σημείων τα οποία είναι απομακρυσμένα από τα υπόλοιπα (**select** → **disconnected components**) καθώς και εκείνα τα οποία απέχουν τουλάχιστον δοσμένη απόσταση από τα υπόλοιπα (**select** → **outliers**). Ακολούθησε η μοντελοποίηση του υποστυλώματος (**wrap**) και η δημιουργία οριζόντιας τομής του αντικειμένου. Δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να τμήσει το αντικείμενο σε όποια κατεύθυνση και θέση επιθυμεί (**polygon** → **trim** → **trim with plane**). Η ζητούμενη τομή είναι ουσιαστικά τα όρια του νέου αντικειμένου τα οποία μπορούν να εξαχθούν στο περιβάλλον του Autocad για περαιτέρω επεξεργασία.



**Εικόνα 5.2:** (α) Νέφος σημείων υποστυλώματος στο περιβάλλον του Cyclone  
(β) Μοντελοποιημένη επιφάνεια υποστυλώματος στο περιβάλλον του Geomagic

**Picture 5.2:** (a) Point Cloud of the column at Cyclone Software  
(b) Modeled column surface at Geomagic software

Με βάση τα παραπάνω, πραγματοποιήθηκε οριζόντια τομή περίπου στο ύψος των τοποσταθερών και το αποτέλεσμα αυτής επεξεργάστηκε περαιτέρω.

Λόγω της απλής γεωμετρίας του συγκεκριμένου αντικειμένου, πραγματοποιήθηκε εύκολα η προσομοίωση της τομής αυτού με κύκλο στο περιβάλλον του Geomagic (**features** → **circle** → **area selection**) και η εξαγωγή εκείνων των στοιχείων που μας ενδιαφέρουν, δηλαδή η ακτίνας και το κέντρου του κύκλου. Συγκεκριμένα προέκυψαν:  $R = 0,273m$  και  $(x_o, y_o) = (1003,648, 1003,943)m$ .

### 5.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Πραγματοποιήθηκε επιπλέον άμεση μέτρηση της περιμέτρου του υποστυλώματος, προκειμένου να υπολογισθεί η ακτίνα αυτού. Συγκεκριμένα, βρέθηκε  $\Pi = 2\pi R = 1,736 m \Rightarrow R = 0,276 m$ .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΑΡΩΣΕΙΣ

|                                            | $x_0$ (m)    | $y_0$ (m) |
|--------------------------------------------|--------------|-----------|
| <b>Γεωδαιτική Μεθ.</b>                     | 1003,651     | 1003,943  |
| <b>Σαρώσεις</b>                            | 1003,648     | 1003,943  |
| <b>Διαφορά</b>                             | 0,003        | 0,0002    |
| <b><math>\sigma \times 1,96</math> (m)</b> | <b>0,004</b> |           |

**Πίνακας 5.3:** Σύγκριση αποτελεσμάτων κέντρου κύκλου και ακτίνας  
**Table 5.3:** Comparison results (circle center and radius)

| <b>Ακτίνα</b>           | <b>R (m)</b> | <b>Διαφορές (m)</b>                            | <b><math>\sigma \times 1,96</math> (m)</b> |
|-------------------------|--------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>Γεωδαιτική Μεθ.</b>  | 0,275        | <b>Γεωδ. Μεθ. - Σαρώσεις:</b><br>0,002         | <b>0,006</b>                               |
| <b>Σαρώσεις</b>         | 0,273        | <b>Σαρώσεις - Άμεσες μετρήσεις:</b><br>0,003   | <b>0,004</b>                               |
| <b>Άμεσες μετρήσεις</b> | 0,276        | <b>Γεωδ. Μεθ. - Άμεσες μετρήσεις:</b><br>0,001 | <b>0,004</b>                               |

**Πίνακας 5.4:** Σύγκριση της ακτίνας από την εφαρμογή των τριών μεθόδων  
**Table 5.4:** Differences of the radius estimated from the three methods Statistical significance test

Στη συνέχεια ελέγχθηκε η στατιστική σημαντικότητα των παραπάνω διαφορών με την εφαρμογή μονοδιάστατου ελέγχου. Προκειμένου οι διαφορές που προέκυψαν να μην είναι στατιστικά σημαντικές, πρέπει, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, να ισχύει η σχέση:

$$\sqrt{\sigma_{1ης\ μεθόδου}^2 + \sigma_{2ης\ μεθόδου}^2} * z \geq |\delta_R| \quad (5.8)$$

Όπου:  $\sigma_{1ης\ μεθόδου}$ ,  $\sigma_{2ης\ μεθόδου}$ , οι αβεβαιότητες προσδιορισμού της ακτίνας μετά την εφαρμογή της 1<sup>ης</sup> μεθόδου και 2<sup>ης</sup> μεθόδου αντίστοιχα  
 $\delta_R$ , η διαφορά που εξετάζεται  
 $z$ , το εκατοστιαίο σημείο της κανονικής κατανομής (για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ισχύει  $z_p = 1,96$ )

Ειδικότερα, κατά την εφαρμογή της γεωδαιτικής μεθοδολογίας έχει υπολογισθεί η αβεβαιότητα προσδιορισμού της ακτίνας ίση με  $\sigma_R = \pm 2mm$ . Όσον αφορά τις άμεσες μετρήσεις, θεωρήθηκε  $\sigma_{\acute{\alpha}\mu\epsilon\sigma.} = \pm 1mm$  ως σφάλμα ανάγνωσης στην μετροταινία. Στα πλαίσια της μεθοδολογία των σαρώσεων και δεδομένου ότι τα απαιτούμενα στοιχεία προσδιορίσθηκαν μετά την μοντελοποίηση του νέφους σημείων, σύμφωνα με τον κατασκευαστή του οργάνου, το σφάλμα στον προσδιορισμό σημείου είναι ίσο με  $\sigma = \pm 2mm$ , (ScanStation 2, Manual). Δεδομένου ότι εξετάζεται η στατιστική σημαντικότητα διαφορών που αφορούν την

ακτίνα του υποστυλώματος (δηλαδή μήκος), εφαρμόσθηκε Νόμος Μετάδοσης Σφαλμάτων στη σχέση του 2<sup>ου</sup> θεμελιώδους προβλήματος και τελικά προέκυψε  $\sigma_{σαρ.} = \pm 2mm$ . Στην συνέχεια εφαρμόσθηκε η σχέση (5.8).

Τελικά, αφού καμία από τις παραπάνω διαφορές δεν ήταν στατιστικά σημαντική για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (πίνακες 5.3 & 5.4), εκτιμήθηκε ότι ο επίγειος σαρωτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τεκμηρίωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του υποστυλώματος.

### **5.3 ΠΕΙΡΑΜΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΛΑΜΠΑΔΑΡΙΟΥ**

Στα πλαίσια του παρόντος πειράματος, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αλλά και σαρώσεις σε τοίχο του κτιρίου Λαμπαδαρίου. Στόχος του πειράματος αποτέλεσε η διερεύνηση της δυνατότητας του σαρωτή να αποτυπώνει, επιφάνειες υλικών διαφορετικής υφής. Για τον λόγο αυτό, σαρώθηκε τοίχος από οπτοπλινθοδομή, για να διαπιστωθεί αν αποτυπώνεται η υφή του υλικού του καθώς και οι αρμοί του. Επιπλέον, βασικό στόχο αποτέλεσε η σύγκριση των διαστάσεων των οπτοπλίνθων και το μέγεθος των αρμών όπως προκύπτουν από τις σαρώσεις και τις άμεσες μετρήσεις.

#### **5.3.1 Περιγραφή γεωδαιτικής μεθοδολογίας**

Όπως περιγράφηκε και σε προηγούμενο πείραμα (παράγραφος 5.2), πραγματοποιήθηκε αναγνώριση της περιοχής και επιλογή των κορυφών της όδευσης που δημιουργήθηκε. Οι κορυφές, επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίσουν την πλήρη σάρωση του τοίχου. Τα όργανα και παρελκόμενα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν όμοια με εκείνα του προηγούμενου πειράματος όπως και η διαδικασία των μετρήσεων υπαίθρου.

Ιδρύθηκε κλειστή ανεξάρτητη όδευση με τέσσερις κορυφές (Σ1, Σ2, Σ3, Σ4). Προκειμένου να υπολογισθούν οι συντεταγμένες των κορυφών της όδευσης, μετρήθηκαν σε μία πλήρη περίοδο όλα τα απαραίτητα στοιχεία (οριζόντια και κατακόρυφη γωνία, κεκλιμένη απόσταση, ύψος οργάνου και ύψος σκόπευσης). Ο προσδιορισμός των υψομετρικών διαφορών μεταξύ των κορυφών πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της Διπλής Γεωμετρικής Χωροστάθμησης. Τόσο τα όργανα και παρελκόμενα που χρησιμοποιήθηκαν, όσο και η διαδικασία των μετρήσεων υπαίθρου, είναι όμοια με το προηγούμενο πείραμα (παράγραφος 5.2). Μετά την ίδρυση της όδευσης (Σ1, Σ2, Σ3, Σ4) και την μέτρηση των στοιχείων της, ακολούθησε η επεξεργασία των μετρήσεων και στη συνέχεια η επίλυση της. Ως

σταθερή, θεωρήθηκε, η κορυφή Σ1 με συντεταγμένες: ( $x_{\Sigma 1} = 1000m, y_{\Sigma 1} = 1000m, H_{\Sigma 1} = 100m$ ) ενώ ως σταθερή διεύθυνση λήφθηκε η Σ1-Σ2 με  $\alpha_{\Sigma 1 \Sigma 2} = 100g$ . Προέκυψαν τελικά οι συντεταγμένες των κορυφών της όδευσης (πίνακας 5.5).

| Στάση | X(m)     | Y(m)     | H(m)    |
|-------|----------|----------|---------|
| Σ1    | 1000,000 | 1000,000 | 100,000 |
| Σ2    | 1004,066 | 1000,001 | 99,997  |
| Σ3    | 1009,657 | 996,946  | 99,995  |
| Σ4    | 1004,569 | 996,941  | 100,000 |

Πίνακας 5.5: Τελικές συντεταγμένες κορυφών όδευσης

Table 5.5: Final coordinates of traverse's points

### 5.3.2 Περιγραφή μεθοδολογίας σαρώσεων

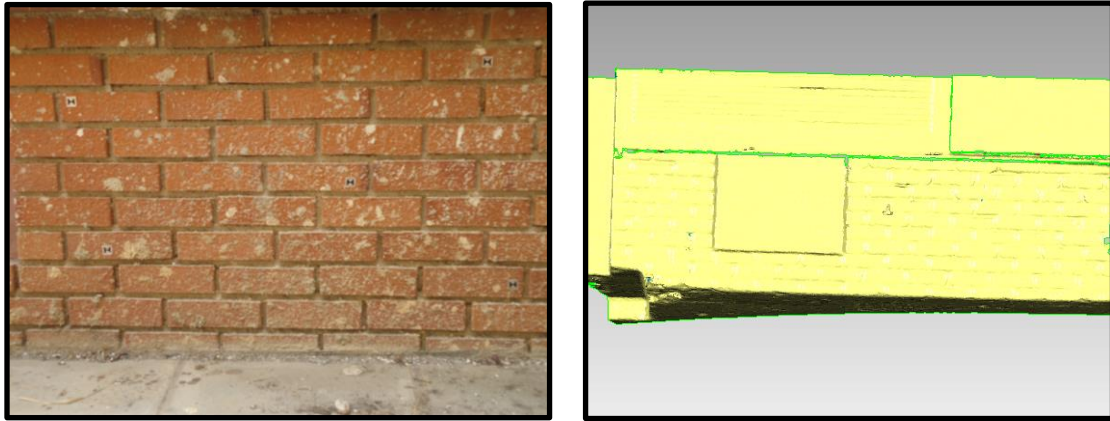
Μετά το πέρας των μετρήσεων με χρήση ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού, ακολούθησε η διαδικασία των σαρώσεων. Στόχος, αποτέλεσε η δημιουργία του μοντέλου του τοίχου και η εξαγωγή των στοιχείων ενδιαφέροντος.

Όπως και πριν, οι εργασίες υπαίθρου περιλαμβάνουν τον προγραμματισμό των σαρώσεων, με την κατάλληλη επιλογή των θέσεων του σαρωτή και του σφαιρικού στόχου. Ακόμη αφορούν τις διαδικασίες συλλογής των πρωτογενών δεδομένων, της γεωαναφοράς των νεφών σημείων που συλλέγονται και την συνένωση των διαδοχικών σαρώσεων (παράγραφος 5.2.2).

Αρχικά μελετήθηκε η προς σάρωση περιοχή και προσδιορίστηκε ο αριθμός των κορυφών στις οποίες τοποθετήθηκε ο laser scanner, έτσι ώστε να σαρωθεί η περιοχή μελέτης χωρίς να υπάρχουν κενά. Ομοίως επιλέχθηκαν και οι κορυφές στις οποίες τοποθετήθηκαν οι απαραίτητοι στόχοι για τις μετέπειτα διαδικασίες συνένωσης διαδοχικών σαρώσεων και γεωαναφοράς οι οποίες είναι όμοιες με του πρηγούμενου πειράματος.

Αφού ολοκληρώθηκαν οι προαναφερθείσες διαδικασίες, ακολούθησε η επεξεργασία του σαρωμένου νέφους. Αρχικά, ο τοίχος απομονώθηκε από τον υπόλοιπο σαρωμένο θόρυβο στο λογισμικό του Cyclone. Στη συνέχεια, το νέφος των σημείων εισήχθη στο περιβάλλον του Geomagic όπου έγινε αρχικά λεπτομερέστερη απομάκρυνση του θορύβου. Το νέφος μοντελοποιήθηκε και τελικά προέκυψε η εικόνα που παρουσιάζεται στην εικόνα 5.3.

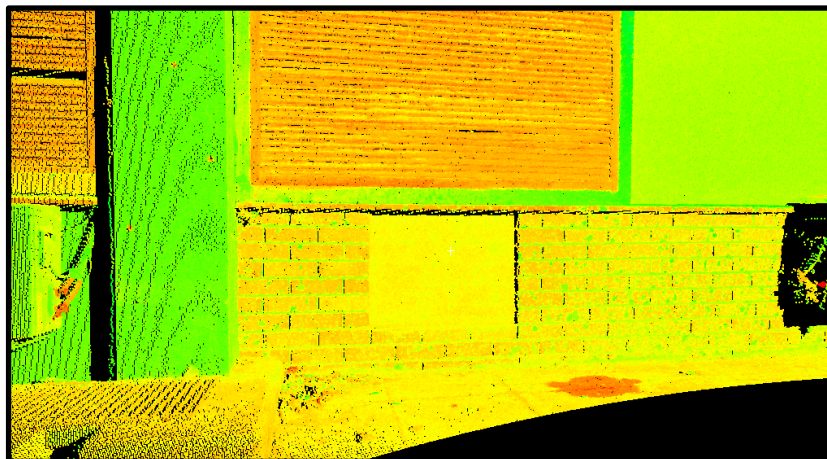




**Εικόνα 5.3:** (α) Τείχος που μελετήθηκε  
(β) Μοντελοποιημένη επιφάνεια τείχου στο περιβάλλον του Geomagic  
**Picture 5.3:** (a) The examined wall  
(b) Modeled surface of the wall at Geomagic software

Στην συνέχεια, στην σαρωμένη επιφάνεια προσδιορίσθηκε το μέγεθος των αρμών και οι διαστάσεις των λίθων του τείχου. Σε κάθε περίπτωση προσαρμόζονταν ευθύγραμμο τμήμα στην διάσταση που πρόκειται να μετρηθεί (**features** → **line** → **two points**) και εξάγονταν το μέτρο αυτού (**properties**→**length**).

Αξίζει να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη περιοχή σαρώθηκε τόσο ο συγκεκριμένος τείχος όσο και ο γειτονικός του τραχύς («σαγρέ»). Το λογισμικό του Cyclone απέδωσε αυτή τη διαφορά στην υφή των αντικειμένων ως διαφορετική χρωματική πληροφορία (εικόνα 5.4)



**Εικόνα 5.4:** Επιφάνειες υλικών διαφορετικής υφής  
**Picture 5.4:** Surfaces of materials of different textures

### 5.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Οι διαστάσεις που μετρήθηκαν στην σαρωμένη επιφάνεια, συγκρίθηκαν με άμεσες μετρήσεις προκειμένου να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα της παραπάνω μεθοδολογίας σε επιφάνειες διαφορετικής υφής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην συνέχεια (πίνακας 5.6). Οι διαφορές αξιολογήθηκαν ως προς την σημαντικότητά τους για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και καμία δεν αποδείχθηκε στατιστικά σημαντική.

|                          | Αρμός (m)    | Μήκος λίθου(m) | Πλάτος λίθου(m) |
|--------------------------|--------------|----------------|-----------------|
| Άμεσες μετρήσεις         | 1,802        | 0,203          | 0,061           |
| Σαρώσεις                 | 1,804        | 0,204          | 0,058           |
| Διαφορές                 | 0,002        | 0,001          | 0,003           |
| $\sigma \times 1,96 (m)$ | <b>0,004</b> |                |                 |

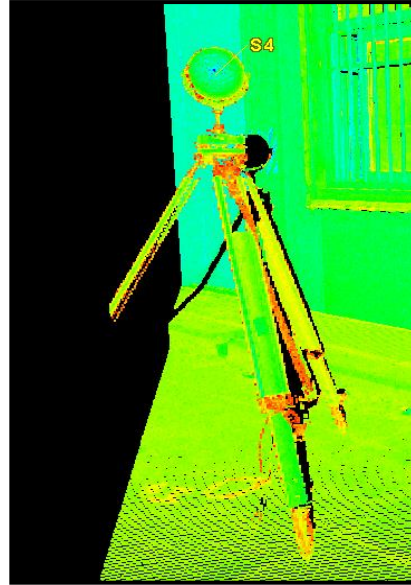
Πίνακας 5.6: Σύγκριση αποτελεσμάτων διαφόρων διαστάσεων  
 Table 5.6: Comparison of results of various dimensions

## 5.4 ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΑΡΩΣΕΩΝ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΣΤΟΧΟΥΣ

Στη παράγραφο αυτή, περιγράφονται οι σαρώσεις που έγιναν στον τοίχο της παραγράφου 5.2 με αυτοσχέδιους στόχους (εικόνα 5.6) αντί των σφαιρικών στόχων (HDS sphere targets). Οι αυτοσχέδιοι στόχοι κατασκευάστηκαν από χαρτόνι και σμυριδόπανο και τοποθετήθηκαν στο πίσω, επίπεδο μέρος των σφαιρικών στόχων έτσι ώστε τα κέντρα τους να ταυτίζονται.

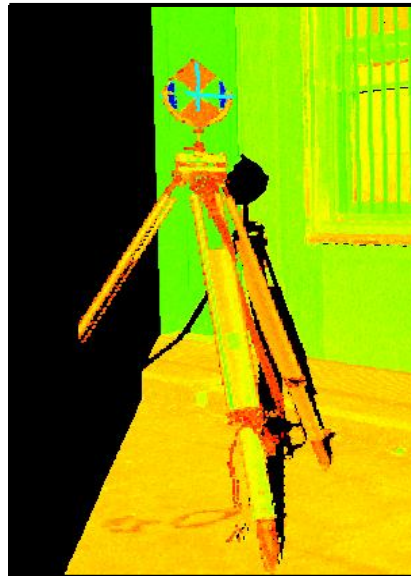
Το υποστύλωμα σαρώθηκε από τρεις κουφές (Σ5,Σ7,Σ8) με βήμα σάρωσης τα 5mm. Με το πέρας κάθε σάρωσης εισάγονταν, όπως έχει αναφερθεί, ως δεδομένα οι συντεταγμένες των κορυφών τόσο του οργάνου όσο και του στόχου καθώς και τα ύψη αυτών ενώ ως αποτέλεσμα προέκυπτε κάθε φορά πλαίσιο διαλόγου με τα οριζοντιογραφικά και υψομετρικά σφάλματα της γεωαναφοράς.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΑΡΩΣΕΙΣ



**Εικόνα 5.5:** (α) Σφαιρικός στόχος  
(β) Σαρωμένος σφαιρικός στόχος

**Picture 5.5:** (a) Sphere target  
(b) Scanned sphere target



**Εικόνα 5.6:** (α) Αυτοσχέδιος επίπεδος στόχος  
(β) Σαρωμένος αυτοσχέδιος επίπεδος στόχος

**Picture 5.6:** (a) Planar target  
(b) Scanned planar target

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των σφαλμάτων της γεωαναφοράς τόσο με τη χρήση σφαιρών όσο και αυτοσχέδιων στόχων (πίνακας 5.7).

| Κορυφή<br>σαρωτή | Κορυφή<br>στόχου | Είδος<br>στόχου | $\sigma_{Hor}$<br>(mm) | $\sigma_{Vert}$<br>(mm) | $ d\sigma_{Hor} $<br>(mm) | $ d\sigma_{Vert} $<br>(mm) | $\sigma \times 1,96$<br>(mm) |
|------------------|------------------|-----------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Σ5               | Σ7               | σφαιρικός       | +3                     | -1                      | 2                         | 2                          | 20,2                         |
|                  |                  | αυτοσχέδιος     | +1                     | -3                      |                           |                            |                              |
| Σ8               | Σ7               | σφαιρικός       | +3                     | -4                      | 1                         | 2                          |                              |
|                  |                  | αυτοσχέδιος     | +2                     | -2                      |                           |                            |                              |
| Σ7               | Σ5               | σφαιρικός       | +4                     | -3                      | 2                         | 2                          |                              |
|                  |                  | αυτοσχέδιος     | +2                     | -5                      |                           |                            |                              |

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα γεωαναφοράς με χρήση διαφορετικών στόχων

Table 5.7: Results of georeference using different type of targets

Διαπιστώνεται ότι τα σφάλματα κυμαίνονται μεταξύ  $\pm(1mm \div 5mm)$  σε κάθε περίπτωση, τα οποία είναι και αποδεκτά μιας και βρίσκονται στον θόρυβο του οργάνου. Τόσο λοιπόν η χρήση σφαιρικών στόχων όσο και αυτοσχέδιων στόχων ικανοποιεί την απαιτούμενη ακρίβεια.

Ακολούθησε ο στατιστικός έλεγχος των αποτελεσμάτων, μέσω της εφαρμογής μονοδιάστατου ελέγχου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% που παρουσιάζεται στις δύο τελευταίες στήλες του πίνακα 5.7. Ελέγχθηκε επομένως αν ισχύει η σχέση:

$$\sqrt{\sigma_{1ης\ μεθ.}^2 + \sigma_{2ης\ μεθ.}^2} * 1,96 \geq |\delta_R| \quad (5.9)$$

Όπου:  $\sigma_{1ης\ μεθόδου}$ ,  $\sigma_{2ης\ μεθόδου}$ , σφάλματα γεωαναφοράς μετά την εφαρμογή της 1<sup>ης</sup> μεθόδου και 2<sup>ης</sup> μεθόδου αντίστοιχα  $\delta_R$ , η διαφορά που εξετάζεται

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή του οργάνου εκτιμάται σφάλμα γεωαναφοράς της τάξης  $\pm(8mm \div 10mm)$ , επομένως θεωρήθηκε  $\sigma_{1ης\ μεθ.} = \sigma_{2ης\ μεθ.} = \pm 8mm$ . Τελικά, καμία διαφορά δεν προέκυψε στατιστικά σημαντική (πίνακας 5.7).

### 5.5 ΠΕΙΡΑΜΑ ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑΣ ΝΕΦΟΥΣ ΒΑΣΕΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΣΤΑΣΕΩΝ

Στο στάδιο αυτό επιχειρήθηκε η σάρωση της ίδιας επιφάνειας ενώ ο στόχος τοποθετούνταν σε διαφορετικές κορυφές. Η θέση του σαρωτή δηλαδή παρέμεινε ίδια, ενώ άλλαζε η θέση του στόχου προκειμένου να διαπιστωθεί αν το γεγονός αυτό επηρεάζει την ακρίβεια της γεωαναφοράς.

Ο σαρωτής παρέμεινε στην κορυφή Σ8 ενώ σφαιρικός στόχος τοποθετήθηκε στην πρώτη σάρωση στην Σ7 ενώ στην επόμενη σάρωση τοποθετήθηκε στην κορυφή Σ6.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΑΡΩΣΕΙΣ

Τα αποτελέσματα των σφαλμάτων της γεωαναφοράς παρουσιάζονται στον πίνακα 5.8.

| Κορυφή<br>σαρωτή | Κορυφή<br>στόχου | $\sigma_{Hor}$<br>(mm) | $\sigma_{Vert}$<br>(mm) |
|------------------|------------------|------------------------|-------------------------|
| Σ8               | Σ7               | +3                     | -4                      |
| Σ8               | Σ6               | +3                     | -4                      |
| Σ5               | Σ7               | +3                     | -1                      |
| Σ5               | Σ8               | +3                     | -1                      |

**Πίνακας 5.8:** Αποτελέσματα γεωαναφοράς με τοποθέτηση στόχου σε διαφορετικές κορυφές

**Table 5.8:** Results of georeference with targets centered in different points

Σε κάθε περίπτωση, διαπιστώνεται ότι τα αποτελέσματα της γεωαναφοράς ήταν εντός του θορύβου γεωαναφοράς ( $8mm \div 10mm$ ).



Κεφάλαιο 6  
ΔΙΚΤΥΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΚΑΙ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ





## **6.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Όπως είναι γνωστό, μέσω της ίδρυσης δικτύου ελέγχου καθίσταται δυνατή η εξασφάλιση της καλύτερης ποιότητας γεωαναφοράς και συνένωσης των νεφών σημείων (παράγραφος 4.4.2). Για τον λόγο αυτό, κρίθηκε απαραίτητη η εγκατάσταση και επίλυση δικτύου οριζοντίου και κατακόρυφου ελέγχου στο ναό του Νεμείου Διός προκειμένου από τις κορυφές του να πραγματοποιηθούν οι σαρώσεις του κίονα που μελετήθηκε.

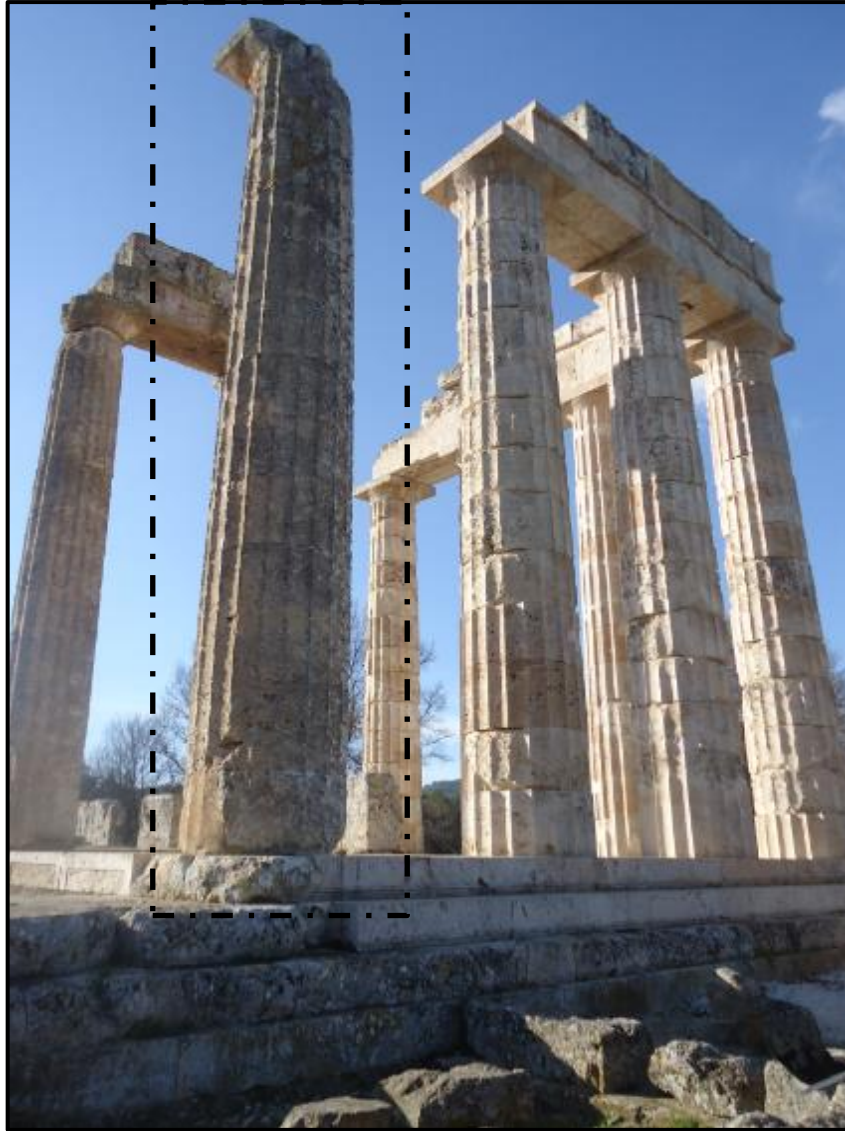
Λόγω της αξίας του μνημείου, η επιλογή και η υλοποίηση των θέσεων των κορυφών του δικτύου οφείλει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην υπάρχει σημαντική παρέμβαση πάνω σε αυτό. Παράλληλα είναι αναγκαίο να εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή μονιμότητα των κορυφών καθώς και όλες οι γνωστές προϋποθέσεις της εγκατάστασης των κορυφών δικτύου ελέγχου (αμοιβαία ορατότητα, θέση κατάλληλη για την τοποθέτηση οργάνων κ.λπ.). Όλα αυτά αναλύονται στην επόμενη παράγραφο, 6.2.

## **6.2 ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΙΔΡΥΣΗ ΚΟΡΥΦΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ**

Σε πρώτη φάση πραγματοποιήθηκε αναγνώριση της ευρύτερης περιοχής μελέτης προκειμένου να εντοπισθούν οι βέλτιστες θέσεις των κορυφών του δικτύου ελέγχου και να εξασφαλισθεί ο καλύτερος προγραμματισμός των μετρήσεων. Έτσι, αναγνωρίστηκε ο χώρος γύρω από τον κίονα K31 της ανατολικής πλευράς της περίπτωσης ο οποίος επρόκειτο να μελετηθεί (εικόνα 6.1). Ο κίονας αυτός είναι ένας από τους τρεις οι οποίοι στέκονται όρθιοι από την αρχαιότητα.

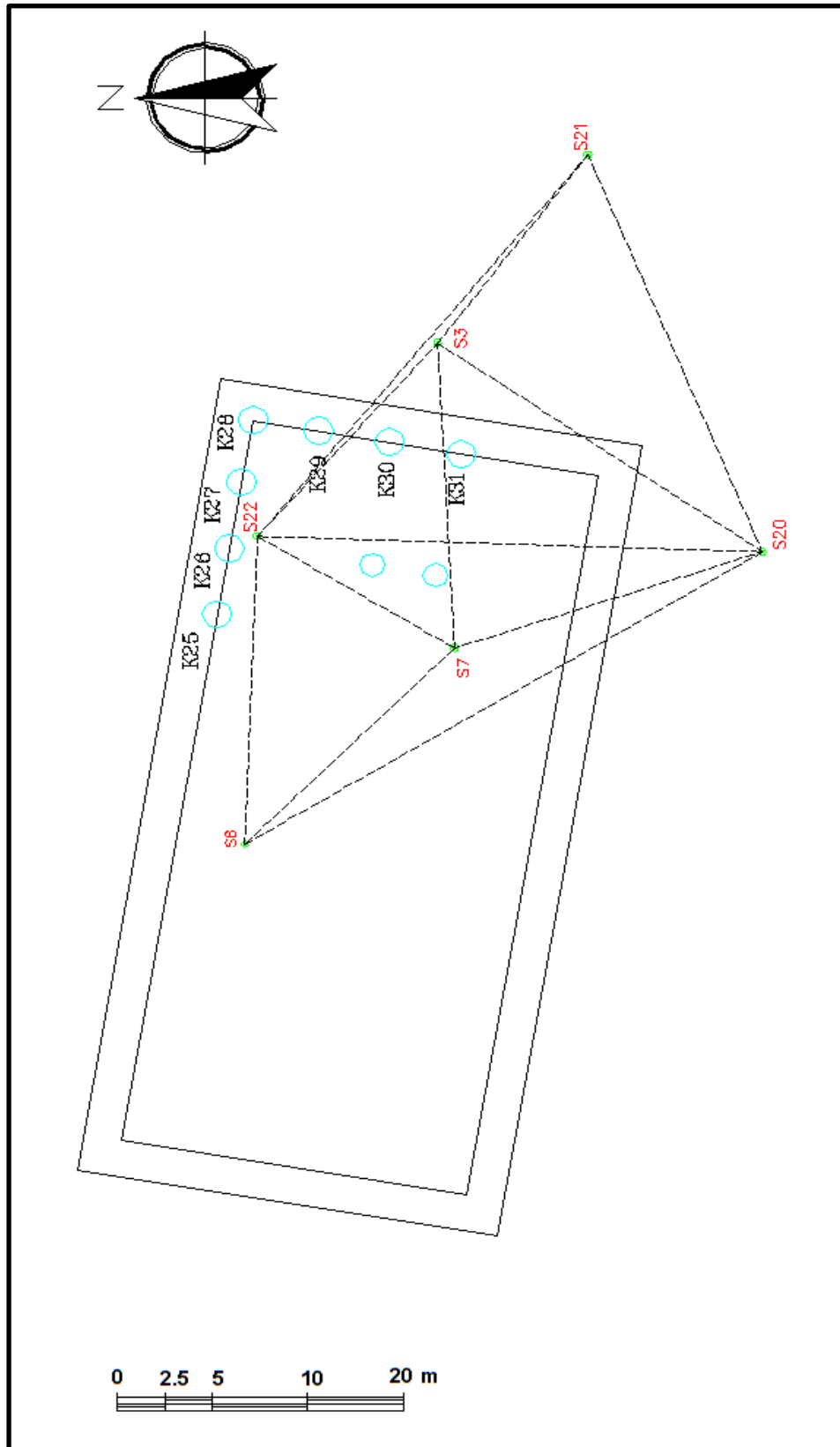
Στη συνέχεια εντοπίστηκαν οι θέσεις των κορυφών του δικτύου ελέγχου από τις οποίες θα γίνονταν οι σαρώσεις. Ακολούθησε η υλοποίηση των κορυφών. Η εργασία ολοκληρώθηκε με την σύνταξη των αυτοσχέδων εξασφάλισης των κορυφών, τα οποία παρουσιάζονται στο παράρτημα III της παρούσας διπλωματικής με αντίστοιχη φωτογραφική τεκμηρίωση.

Δεδομένου ότι στο παρελθόν είχε ιδρυθεί δίκτυο οριζοντίου και κατακόρυφου ελέγχου στα πλαίσια της αναστήλωσης των 4 κίωνων της ΒΑ γωνίας της περίπτωσης (2004-2013), αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν κορυφές του για τη σάρωση του κίονα. Ωστόσο διαπιστώθηκε πως ορισμένες κορυφές είχαν χαθεί και κρίθηκε αναγκαία η ίδρυση νέων που να εξυπηρετούν όσο το δυνατόν καλύτερα τη σάρωση του κίονα.



**Εικόνα 6.1:** Ο Κίονας Κ31 του ναού του Νεμείου Διός  
**Picture 6.1:** The K31 column of the Temple of Nemean Zeus

Ιδρύθηκαν τρεις νέες κορυφές (Σ20, Σ21, Σ22). Η μία από αυτές βρίσκεται στο εσωτερικό του ναού (Σ22), ενώ οι άλλες δυο (Σ20, Σ21) στον περιβάλλοντα χώρο. Ακόμη χρησιμοποιήθηκαν τρεις κορυφές του υπάρχοντος δικτύου (Σ7, Σ8, Σ3), κατανεμημένες επίσης στο εσωτερικό αλλά στο εξωτερικό του ναού (Σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1: Δίκτυο Ελέγχου  
Figure 6.1: The Control Network

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΔΙΚΤΥΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΚΑΙ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Οι κορυφές επιλέχθηκαν με τέτοιον τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η αμοιβαία ορατότητα μεταξύ των νέων κορυφών και των παλαιών ώστε να ενταχθούν οι πρώτες στο προϋπάρχον δίκτυο. Βασικό κριτήριο της επιλογής τους αποτέλεσε επίσης η εξασφάλιση της πλήρους, χωρίς κενά σάρωσης του κίονα.

Οι θέσεις των κορυφών του δικτύου παρουσιάζονται αναλυτικά στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ III.

### 6.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται διαδικασία διεξαγωγής των μετρήσεων των στοιχείων του δικτύου, καθώς και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε.

#### 6.3.1 Όργανα και παρελκόμενα

Τα στοιχεία του δικτύου ελέγχου (οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες, κεκλιμένα μήκη) μετρήθηκαν με τον γεωδαιτικό σταθμό Leica, TCR 303 του οποίου τα τεχνικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στην συνέχεια (πίνακας 6.1):

| Τεχνικά Χαρακτηριστικά                |                                                                                    |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Γωνιομετρική ακρίβεια                 | 3''(10cc)                                                                          |
| Εμβέλεια απόστασης με πρίσμα          | 2.000m                                                                             |
| Εμβέλεια απόστασης χωρίς πρίσμα       | 80m                                                                                |
| Ακρίβεια μέτρησης μήκους με πρίσμα    | $\pm(2\text{mm}+2\text{ppm})$                                                      |
| Ακρίβεια μέτρησης μήκους χωρίς πρίσμα | $\pm(3\text{mm}+2\text{ppm})$                                                      |
| Κέντρωση                              | Laser κέντρωσης ακρίβειας $\pm 0.8\text{mm}$                                       |
| Καταγραφή                             | Αποθήκευση σε κάρτα μνήμης                                                         |
| Δυνατότητες                           | Φωτεινός οδηγός χάραξης (Point Guide)<br>Φωτεινός οδηγός σκόπευσης (Laser Pointer) |

Πίνακας 6.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεωδαιτικού σταθμού TCR 303  
Table 6.1: Technical features of total station TCR 303

Χρησιμοποιήθηκαν επίσης τα ακόλουθα παρελκόμενα:

- ✓ δύο στυλεοί και στόχοι (κατάφωτο)
- ✓ 3 τρίποδες αλουμινίου
- ✓ 3 τρικόχλια οπτικής κέντρωσης

### 6.3.2 Μετρήσεις στοιχείων δικτύου ελέγχου

Η μέτρηση των στοιχείων του δικτύου ελέγχου περιελάμβανε τον προσδιορισμό οριζόντιων και κατακόρυφων γωνιών από κάθε κορυφή προς όσες άλλες κορυφές του δικτύου ήταν ορατές (σχήμα 6.1). Οι γωνιομετρήσεις έγιναν σε μία πλήρη περίοδο, ενώ παράλληλα μετρούνταν τα κεκλιμένα μήκη μεταξύ των κορυφών του δικτύου σε μετάβαση κι επιστροφή. Οι μετρήσεις ολοκληρώνονταν με την καταγραφή του ύψους οργάνου και ύψους σκόπευσης με ακρίβεια  $\pm 1 \text{ mm}$ .

Η επεξεργασία τόσο των γωνιών αλλά και η αναγωγή των κεκλιμένων μηκών σε οριζόντιες αποστάσεις, έγινε σε περιβάλλον Microsoft Excel.

Το σύνολο των μετρήσεων και η επεξεργασία τους περιλαμβάνεται στο παράρτημα της παρούσης εργασίας.

### 6.3.3 Τα στοιχεία του δικτύου ελέγχου

Μετρήθηκαν συνολικά 16 οριζόντιες γωνίες, 21 κατακόρυφες γωνίες και 12 κεκλιμένες αποστάσεις. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 6.2.

Οι υψομετρικές διαφορές  $\Delta H$  μεταξύ των κορυφών του δικτύου προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο της Τριγωνομετρικής Υψομετρίας σε μετάβαση και επιστροφή. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 6.2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΔΙΚΤΥΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΚΑΙ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

| Από        | Υ.Ο<br>(m) | Προς | Υ.Σ<br>(m) | S<br>(m) | D<br>(m) | V<br>(grad) | Hor<br>(grad) | $\bar{D}$<br>(m) | $\bar{\Delta H}$<br>(m) |
|------------|------------|------|------------|----------|----------|-------------|---------------|------------------|-------------------------|
| <b>Σ7</b>  | 1,434      | Σ22  | 1,697      | 12,018   | 12,015   | 98,7438     |               | <b>12,013</b>    | -0,028                  |
|            |            | Σ20  | 1,292      | 16,977   | 16,907   | 105,7478    | 144,7153      | <b>16,908</b>    | -1,388                  |
|            |            | Σ8   | 1,689      | 15,461   | 15,458   | 98,7858     | 315,2690      | <b>15,458</b>    | 0,040                   |
|            |            | Σ21  | 1,384      | 28,411   | 28,343   | 104,4020    | 81,0448       | <b>28,342</b>    | -1,916                  |
|            |            | Σ3   | 1,624      | 17,060   | 17,013   | 104,7538    | 61,9955       | <b>17,012</b>    | -1,465                  |
| <b>Σ20</b> | 1,486      | Σ3   | 1,514      | 20,520   | 20,520   | 100,1593    |               | <b>20,522</b>    | -0,081                  |
|            |            | Σ22  | 1,642      | 26,366   | 26,322   | 96,3508     | 363,7748      | <b>26,320</b>    | 1,355                   |
|            |            | Σ7   | 1,532      | 16,969   | 16,908   | 94,6175     | 341,1348      | <b>31,508</b>    | 1,426                   |
|            |            | Σ8   | 1,544      | 31,543   | 31,508   | 97,0033     | 327,0660      |                  |                         |
| <b>Σ22</b> | 1,519      | Σ3   | 1,624      | 14,344   | 14,282   | 105,9165    |               | <b>14,281</b>    | -1,436                  |
|            |            | Σ21  | 1,384      | 27,422   | 27,347   | 104,7003    | 397,6603      | <b>27,347</b>    | -1,890                  |
|            |            | Σ8   | 1,683      | 17,177   | 17,175   | 99,1418     | 156,7482      | <b>17,175</b>    | 0,068                   |
|            |            | Σ20  | 1,404      | 26,359   | 26,318   | 103,5555    | 56,4005       |                  |                         |
|            |            | Σ7   | 1,772      | 12,014   | 12,011   | 98,4980     | 89,0343       |                  |                         |
| <b>Σ21</b> | 1,411      | Σ3   | 1,615      | 13,104   | 13,088   | 96,8130     |               | <b>13,087</b>    | 0,450                   |
|            |            | Σ7   | 1,772      | 28,433   | 28,341   | 94,8880     | 374,9583      |                  |                         |
|            |            | Σ22  | 1,634      | 27,428   | 27,346   | 95,0828     | 2,5488        |                  |                         |
| <b>Σ3</b>  | 1,524      | Σ22  | 1,634      | 14,363   | 14,279   | 93,1080     |               |                  |                         |
|            |            | Σ7   | 1,772      | 17,098   | 17,012   | 93,6058     | 351,0268      |                  |                         |
|            |            | Σ21  | 1,603      | 13,093   | 13,087   | 101,7943    | 195,1250      |                  |                         |
|            |            | Σ20  | 1,512      | 20,525   | 20,524   | 99,7818     | 292,6443      |                  |                         |

Πίνακας 6.2: Κατακόρυφες και οριζόντιες γωνίες, κεκλιμένα μήκη, οριζόντιες αποστάσεις και τελικές υψομετρικές διαφορές μεταξύ κορυφών δικτύου

Table 6.2: Measured vertical and horizontal angles, slope and horizontal distances, height differences between the Control Network's points

## 6.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Μετά την συνόρθωση των παρατηρήσεων το δίκτυο επιλύθηκε οριζοντιογραφικά και υψομετρικά με τις ελάχιστες εξωτερικές δεσμεύσεις. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η επίλυση του δικτύου ελέγχου.

### 6.4.1 Επίλυση του δικτύου οριζοντίου ελέγχου

Για την επίλυση του δικτύου οριζοντίου ελέγχου θεωρήθηκαν οι ελάχιστες εξωτερικές δεσμεύσεις, οι οποίες ήταν οι ίδιες με εκείνες του δικτύου της αναστήλωσης του 2004. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε σταθερή κορυφή Σ8, με  $x_{\Sigma_8} = 1000m$ ,  $y_{\Sigma_8} = 1000m$ . Παράλληλα, θεωρήθηκε σταθερή η διεύθυνση Σ8-Σ7 και ορίσθηκε  $\alpha_{\Sigma_8\Sigma_7} = 150^g$ .

Τα στοιχεία του δικτύου δίνονται στον πίνακα 6.3:

| Συν/νες σταθερής κορυφής                  | $x_{Σ8}, y_{Σ8}$ | 1000, 1000 |
|-------------------------------------------|------------------|------------|
| Πλήθος κορυφών δικτύου                    | p                | 6          |
| Πλήθος παρατηρήσεων                       | n                | 28         |
| Πλήθος αγνώστων καθοριστικών παραμέτρων   | m                | 9          |
| Βαθμός ελευθερίας                         | $r = n - m$      | 19         |
| A priori τυπικό σφάλμα μονάδας βάρους     | $\sigma_o$       | $\pm 1$    |
| A posteriori τυπικό σφάλμα μονάδας βάρους | $\hat{\sigma}_o$ | $\pm 1,06$ |

Πίνακας 6.3: Στοιχεία του δικτύου Οριζοντίου Ελέγχου  
Table 6.3: Elements of Horizontal Control Network

Αρχικά, προσδιορίστηκαν οι προσωρινές τιμές των συντεταγμένων των κορυφών του δικτύου μέσω της επίλυσης απλών εμπροσθοτομιών. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 6.4.

Για την εκτίμηση των βαρών των παρατηρήσεων, θεωρήθηκε αβεβαιότητα στις γωνίες  $\sigma_{γων} = \pm 25^{cc}$  και στις αποστάσεις  $\sigma_{αποστ} = \pm 5mm$ , λαμβάνοντας υπ'όψιν και την αβεβαιότητα στις μετρήσεις λόγω κέντρωσης οργάνου και στόχων.

Τα αποτελέσματα της συνόρθωσης παρουσιάζονται στον πίνακα 6.4.

| Κορυφή | $x^o$ (m) | $y^o$ (m) | x(m)     | $\sigma_x$ (mm) | y(m)     | $\sigma_y$ (mm) |
|--------|-----------|-----------|----------|-----------------|----------|-----------------|
| Σ3     | 1027,924  | 989,941   | 1027,918 | $\pm 2,3$       | 989,948  | $\pm 1,4$       |
| Σ7     | 1010,936  | 989,064   | 1010,927 | $\pm 1,1$       | 989,073  | $\pm 1,1$       |
| Σ8     | 1000,000  | 1000,000  | 1000,000 | $\pm 0,0$       | 1000,000 | $\pm 0,0$       |
| Σ20    | 1016,300  | 973,031   | 1016,293 | $\pm 1,5$       | 973,034  | $\pm 2,3$       |
| Σ21    | 1038,412  | 982,116   | 1038,405 | $\pm 3,0$       | 982,121  | $\pm 2,3$       |
| Σ22    | 1017,166  | 999,337   | 1017,160 | $\pm 1,6$       | 999,333  | $\pm 0,9$       |

Πίνακας 6.4: Προσωρινές και τελικές συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου Οριζοντίου Ελέγχου με τις αβεβαιότητές τους

Table 6.4: Approximate and adjusted coordinates of Horizontal Control Network points and their standard deviations

Το a posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους εκτιμήθηκε :

$$\hat{\sigma}_o = \pm \sqrt{\frac{v^T * P * v}{r}} = \pm 1,06 \quad (6.1)$$

Όπου  $v$  : ο πίνακας υπολοίπων

$p$  : ο πίνακας βαρών

$r$  : ο βαθμός ελευθερίας

#### 6.4.2 Στατιστικοί έλεγχοι δικτύου οριζοντίου ελέγχου

##### i) Μονοδιάστατος έλεγχος αξιοπιστίας-Test $\chi^2$

Για να γίνει η συνόρθωση, γίνονται ορισμένες παραδοχές ως προς το στατιστικό και μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε. Μετά την συνόρθωση ακολουθεί έλεγχος ο οποίος δείχνει αν οι αρχικές παραδοχές ήταν σωστές ώστε η λύση να θεωρηθεί αξιόπιστη. Οι βασικές υποθέσεις οι οποίες ελέγχονται, απαρτίζουν την μηδενική υπόθεση  $H_0$  και είναι οι εξής: τα σφάλματα των παρατηρήσεων έχουν τυχαίο χαρακτήρα (δεν υπάρχουν συστηματικά και χονδροειδή σφάλματα), ο πίνακας βαρών ή των παρατηρήσεων έχει επιλεγεί σωστά και το μαθηματικό μοντέλο (εξισώσεις παρατήρησης) είναι επίσης σωστό.

Με στοιχεία εισόδου τον βαθμό ελευθερίας  $r = 17$  και το επίπεδο εμπιστότητας  $p = 0,95$ , βρίσκεται  $X^2_{0,950,17} = 27,59$  από τους πίνακες της κατανομής  $\chi^2$ .

Οπότε η αρχική υπόθεση γίνεται δεκτή μόνο εάν  $\frac{r \cdot \widehat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} \leq 27,59$  ή  $\widehat{\sigma}_0^2 \leq 1,623$   
 Στην συγκεκριμένη περίπτωση  $\widehat{\sigma}_0^2 = 1,1025 \leq 1,623$  επομένως η μηδενική υπόθεση γίνεται δεκτή.

##### ii) Σάρωση δεδομένων

Με τον έλεγχο αυτό ανιχνεύονται χονδροειδή σφάλματα στις παρατηρήσεις, ακολουθώντας την διαδικασία σάρωσης δεδομένων. Συγκεκριμένα, για κάθε παρατήρηση θεωρείται πως ισχύει η μηδενική υπόθεση  $H_0$  (δεν υπάρχει χονδροειδές σφάλμα) εφόσον:

$$\widehat{W}_I = \left| \frac{v_i}{\sigma_{v_i}} \right| \leq \sqrt{F_{1,\infty,(1-a_0)}} \quad (6.2)$$

Όπου,  $a_0$ : το επίπεδο σημαντικότητας του μονοδιάστατου ελέγχου

$v_i$ : υπόλοιπα

$\sigma_{v_i}$ : τυπικά σφάλματα υπολοίπων  $\sigma^2_{v_i} = \sigma^2_{l_i} - \sigma^2_{\hat{l}_i}$  (διαγώνια στοιχεία του πίνακα  $V_U = V_l - V_{\hat{l}}$ )

$F_{1,\infty,(1-a_0)}$  : οριακή τιμή για την κατανομή Fisher.

Στον έλεγχο μεμονωμένων παρατηρήσεων κατά Baarda, για κάθε παρατήρηση θα ισχύει η μηδενική υπόθεση  $H_0$  εάν ισχύει η ανισότητα:



$$\widehat{W}_I = \left| \frac{v}{\sigma_{v_i}} \right| \leq 3,29 \quad (6.3)$$

Με βάση τον πίνακα (πίνακας 6.5) που ακολουθεί, η ανισότητα ισχύει για τις παρατηρήσεις επομένως σε καμία από αυτές δεν ανιχνεύεται χονδροειδές ή συστηματικό σφάλμα.

| $v_i$   | $\sigma_{v_i}$ | $\left  \frac{v_i}{\sigma_{v_i}} \right $ |
|---------|----------------|-------------------------------------------|
| 1,0mm   | ±5,0mm         | 0,2                                       |
| -4,3mm  | ±5,0mm         | 0,9                                       |
| 4,0mm   | ±5,0mm         | 0,8                                       |
| -0,9mm  | ±5,0mm         | 0,2                                       |
| -0,8mm  | ±5,0mm         | 0,2                                       |
| -1,6mm  | ±5,0mm         | 0,3                                       |
| -1,2mm  | ±5,0mm         | 0,2                                       |
| 2,2mm   | ±5,0mm         | 0,5                                       |
| -1,1mm  | ±5,0mm         | 0,2                                       |
| -0,2mm  | ±5,0mm         | 0,1                                       |
| 1,8mm   | ±5,0mm         | 0,4                                       |
| 2,1mm   | ±5,0mm         | 0,4                                       |
| 2,9cc   | ±11,9 cc       | 0,2                                       |
| -8,8cc  | ±17,1 cc       | 0,5                                       |
| -6,0cc  | ±17,1 cc       | 0,3                                       |
| 8,8cc   | ±18,5 cc       | 0,5                                       |
| 23,5cc  | ±13,6 cc       | 1,7                                       |
| -67,3cc | ±24,5 cc       | 2,7                                       |
| -2,9cc  | ±6,4 cc        | 0,4                                       |
| -31,4cc | ±21,2 cc       | 1,5                                       |
| 7,0cc   | ±21,3 cc       | 0,3                                       |
| -1,7cc  | ±17,7 cc       | 0,1                                       |
| 22,4cc  | ±24,1 cc       | 1,0                                       |
| -14,2cc | ±17,7 cc       | 0,8                                       |
| 45,2cc  | ±18,1 cc       | 2,5                                       |
| 34,0cc  | ±17,7 cc       | 1,9                                       |

Πίνακας 6.5: Στατιστικός έλεγχος παρατηρήσεων του δικτύου Οριζοντίου Ελέγχου κατά Baarda  
**Table 6.5:** Data Snooping of Horizontal Control Network

### 6.4.3 Επίλυση του δικτύου κατακόρυφου ελέγχου

Το δίκτυο επιλύθηκε χρησιμοποιώντας την μέθοδο των έμμεσων παρατηρήσεων, αφού επιβλήθηκαν σε αυτό οι ελάχιστες εξωτερικές δεσμεύσεις. Επομένως επιλύθηκε ως ελεύθερο με  $d = 1$  ατέλεια. Ως άγνωστοι θεωρήθηκαν τα υψόμετρα και δόθηκε τιμή στην κορυφή Σ8 ίση με  $H_{\Sigma 8} = 100m$ .

Τα στοιχεία του δικτύου κατακόρυφου ελέγχου παρουσιάζονται στον πίνακα 6.6:

|                                           |                      |              |
|-------------------------------------------|----------------------|--------------|
| Πλήθος κορυφών δικτύου                    | $p$                  | 6            |
| Υψόμετρο σταθερής κορυφής $\Sigma_8$      | $H$                  | 100          |
| Πλήθος παρατηρήσεων                       | $n$                  | 12           |
| Πλήθος αγνώστων καθοριστικών παραμέτρων   | $m$                  | 5            |
| Βαθμός ελευθερίας                         | $r = n - m$          | 7            |
| A priori τυπικό σφάλμα μονάδας βάρους     | $\sigma_o$           | $\pm 1mm$    |
| A posteriori τυπικό σφάλμα μονάδας βάρους | $\widehat{\sigma}_o$ | $\pm 0,99mm$ |

Πίνακας 6.6: Στοιχεία του δικτύου Κατακόρυφου Ελέγχου  
Table 6.6: Elements of Vertical Control Network

Για κάθε υψομετρική διαφορά  $\Delta H_{ij} = H_j - H_i$  που μετρήθηκε, μορφώθηκε η αντίστοιχη εξίσωση παρατήρησης. Συνολικά δημιουργήθηκαν  $n=12$  εξισώσεις.

Προκειμένου να κατασκευαστεί ο πίνακας βαρών εφαρμόστηκε ο νόμος μετάδοσης σφαλμάτων στην σχέση της Τριγωνομετρικής υψομετρίας. Μετά από την εφαρμογή του Ν.Μ.Σ προκύπτει:

$$\sigma_{\Delta H} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta H}{\partial S}\right)^2 * \sigma_S^2 + \left(\frac{\partial \Delta H}{\partial z}\right)^2 * \left(\frac{\sigma_z}{\rho_{cc}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta H}{\partial Y_0}\right)^2 * \sigma_{Y_0}^2 + \left(\frac{\partial \Delta H}{\partial Y_\Sigma}\right)^2 * \sigma_{Y_\Sigma}^2} \Rightarrow$$

$$\sigma_{\Delta H} = \pm \left[ \cos^2 z * \sigma_S^2 + (-S * \sin z)^2 * \left(\frac{\sigma_z}{\rho_{cc}}\right)^2 + \sigma_{Y_0}^2 + \sigma_{Y_\Sigma}^2 \right] \quad (6.4)$$

Αφού θεωρήθηκαν  $\sigma_S = \pm 5mm$ ,  $\sigma_z = \pm 40cc$  και  $\sigma_{Y_0} = \sigma_{Y_\Sigma} = \pm 1mm$ , τελικά προέκυψε  $\sigma_{\Delta H} = \pm 1,7mm$ .

Δεδομένου ότι οι υψομετρικές διαφορές μετρήθηκαν σε μετάβαση και επιστροφή ισχύει:

$$\overline{\Delta H} = \frac{|\Delta H_{aller}| + |\Delta H_{retour}|}{2} \quad (6.5)$$

Όπου:  $\Delta H_{aller}$ , η υψομετρική διαφορά σε μετάβαση  
 $\Delta H_{retour}$ , η υψομετρική διαφορά σε επιστροφής

Και με Ν.Μ.Σ στην σχέση 6.5 προκύπτει αβεβαιότητα της τελικής υψομετρικής διαφοράς:

$$\sigma_{\Delta H} = \pm \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_{\Delta H_{\text{aller}}}^2 + \sigma_{\Delta H_{\text{retour}}}^2} \quad (6.6)$$

Τελικά προέκυψε  $\sigma_{\Delta H} = \pm 1,2mm$ , και δεδομένου ότι το a priori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους θεωρήθηκε με  $\sigma_o = \pm 1mm$ , μορφώθηκε ο πίνακας των βαρών.

Ακολούθησε η επίλυση του δικτύου και ο υπολογισμός του a posteriori τυπικού σφάλματος της μονάδας βάρους:

$$\widehat{\sigma}_o = \pm \sqrt{\frac{v^T * P * v}{r}} = \pm 0,99m \quad (6.7)$$

Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας με τα αποτελέσματα της συνόρθωσης (πίνακας 6.7).

| <i>Κορυφή</i> | <i>H(m)</i> | <i>σ<sub>H</sub>(mm)</i> |
|---------------|-------------|--------------------------|
| <b>Σ3</b>     | 98,494      | ±1,0                     |
| <b>Σ7</b>     | 99,960      | ±0,9                     |
| <b>Σ8</b>     | 100,000     | ±0,0                     |
| <b>Σ20</b>    | 98,574      | ±0,9                     |
| <b>Σ21</b>    | 98,043      | ±1,1                     |
| <b>Σ22</b>    | 99,932      | ±0,9                     |

**Πίνακας 6.7:** Τελικά υψόμετρα κορυφών δικτύου Κατακόρυφου Ελέγχου με τις αβεβαιότητές τους  
**Table 6.7:** Heights of Vertical Control Network points and their standard deviations

#### 6.4.4 Στατιστικοί έλεγχοι δικτύου κατακόρυφου ελέγχου

##### i) Μονοδιάστατος έλεγχος αξιοπιστίας-Test $\chi^2$ .

Με στοιχεία εισόδου τον βαθμό ελευθερίας  $r=16$  και το επίπεδο εμπιστοσύνης  $p = 0,95$ , υπολογίζεται  $\chi^2_{0.950,16} = 26,30$  από τους πίνακες της κατανομής  $\chi^2$ .

Οπότε η αρχική υπόθεση γίνεται δεκτή μόνο εάν  $\frac{r * \widehat{\sigma}_o^2}{\sigma_o^2} \leq 26,30$  ή  $\widehat{\sigma}_o^2 \leq 1,6438$ .

Στην συγκεκριμένη περίπτωση  $\widehat{\sigma}_o^2 = 0,9801 \leq 1,6438$  επομένως η αρχική υπόθεση γίνεται δεκτή.

##### ii) Σάρωση δεδομένων

Ομοίως με την παράγραφο 6.4.2.(i), κατά τον έλεγχο μεμονωμένων παρατηρήσεων,

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΔΙΚΤΥΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΚΑΙ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

για κάθε παρατήρηση θα ισχύει η μηδενική υπόθεση  $H_0$  εάν ισχύει η ανισότητα

$$\widehat{W}_I = \left| \frac{v_i}{\sigma_{v_i}} \right| \leq 3,29 .$$

Με βάση τον πίνακα (πίνακας 6.8) που ακολουθεί, η ανισότητα ισχύει για τις παρατηρήσεις επομένως σε καμία από αυτές δεν ανιχνεύεται χονδροειδές ή συστηματικό σφάλμα.

| $v_i$ (mm) | $\sigma_{v_i}$ (mm) | $\left  \frac{v_i}{\sigma_{v_i}} \right $ |
|------------|---------------------|-------------------------------------------|
| 0,1        | ±1                  | 0,07                                      |
| 2,2        | ±1                  | 2,85                                      |
| 0,1        | ±1                  | 0,09                                      |
| -0,7       | ±1                  | -0,91                                     |
| -1,6       | ±1                  | -2,05                                     |
| 0,1        | ±1                  | 0,08                                      |
| 2,0        | ±1                  | 2,88                                      |
| -0,2       | ±1                  | -0,14                                     |
| 0,7        | ±1                  | 0,95                                      |
| 1,5        | ±1                  | 2,00                                      |
| 0,1        | ±1                  | 0,05                                      |
| 0,8        | ±1                  | 1,10                                      |

**Πίνακας 6.8:** Στατιστικός έλεγχος παρατηρήσεων του δικτύου Κατακόρυφου Ελέγχου κατά Baarda

**Table 6.8:** Data Snooping of Vertical Control Network

Κεφάλαιο 7  
ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ  
ΚΙΟΝΑ



### **7.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία της συλλογής των ψηφιακών δεδομένων στο ύπαιθρο με χρήση επίγειου σαρωτή. Περιγράφεται ο προγραμματισμός των σαρώσεων πριν από την διεξαγωγή των μετρήσεων, τα όργανα και παρελκόμενα που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και η διαδικασία της σάρωσης, γεωαναφοράς των νεφών σημείων και συνένωσης των διαδοχικών σαρώσεων. Παρουσιάζεται επίσης, ο τρόπος δημιουργίας της μοντελοποιημένης επιφάνειας και η επεξεργασία της.

Ακόμη, αναλύεται η μεθοδολογία η οποία ακολουθήθηκε προκειμένου να εξαχθούν όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών στοιχείων των σπονδύλων του κίονα, των μετακινήσεων τους, καθώς και των εκλεπτύσεων του κίονα που είναι δυνατόν να τεκμηριωθούν.

### **7.2 ΟΙ ΣΑΡΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΙΟΝΑ**

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο προγραμματίστηκαν οι σαρώσεις, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε και οι διαδικασίες συλλογής των νεφών σημείων, η γεωαναφορά και συνένωσή τους.

#### **7.2.1 Ο προγραμματισμός των σαρώσεων**

Αρχικά, έγινε αναγνώριση της εγγύς περιοχής του κίονα K31. Επιλέχθηκαν οι κορυφές του δικτύου στις οποίες τοποθετήθηκε ο laser scanner. Ομοίως επιλέχθηκαν και η κορυφή στην οποία τοποθετήθηκε ο στόχος.

Προκειμένου να προκύψει η ολογραφία του κίονα, πραγματοποιήθηκαν σαρώσεις από τέσσερις κορυφές του δικτύου (Σ7, Σ20, Σ21, Σ22). Πριν από κάθε σάρωση έγινε γεωαναφορά στο τοπικό αυθαίρετο σύστημα αναφοράς στο οποίο έχει ενταχθεί το δίκτυο ελέγχου, με άμεσο τρόπο (παράγραφος 4.4.2) και στη συνέχεια τα διαδοχικά νέφη συνενώθηκαν. Αυτό βεβαίως προϋποθέτει την σάρωση ειδικού στόχου.

#### **7.2.2 Εξοπλισμός και παρελκόμενα**

Κατά την διαδικασία σαρώσεων του κίονα, τόσο τα όργανα και παρελκόμενα που χρησιμοποιήθηκαν, όσο και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, είναι όμοια με εκείνα κατά το στάδιο των πειραματικών εργασιών (παράγραφοι 5.2.1 & 5.2.2).

Έτσι, οι σαρώσεις πραγματοποιήθηκαν με τον τρισδιάστατο σαρωτή Scan Station 2, ενώ χρησιμοποιήθηκαν ακόμη δύο τρίποδες, δύο τρικόχλια με οπτική κέντρωση και ο ειδικός σφαιρικός στόχος.

### 7.2.3 Η διαδικασία της σάρωσης, γεωαναφοράς και συνένωσης

Η διαχείριση των σαρώσεων και η επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων που συλλέχθηκαν, πραγματοποιήθηκαν μέσω του λογισμικού Cyclone, το οποίο παρέχει την δυνατότητα αξιοποίησης μεγάλου όγκου πληροφορίας.

Αρχικά, ο σαρωτής κεντρώνονταν και οριζοντιώνονταν σε κάθε κορυφή από την οποία επρόκειτο να πραγματοποιηθεί σάρωση και συνδέονταν με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω καλωδίου δικτύου (Ethernet) ενώ παράλληλα ρυθμιζόνταν και το θέμα τροφοδοσίας αυτού (μέσω ρεύματος).

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν μπορούν να συνοψισθούν στα εξής:

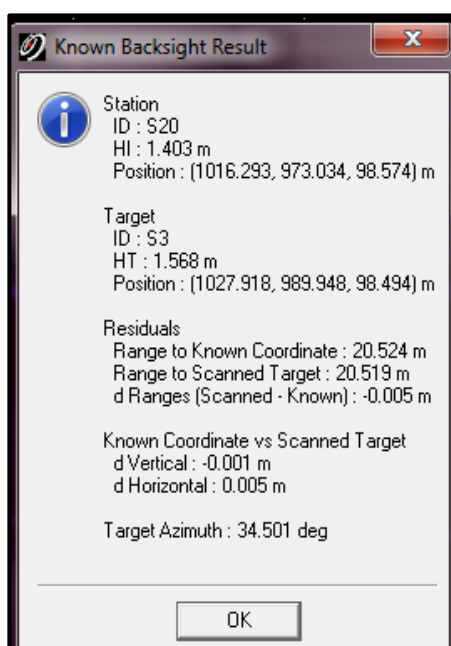
- ✓ Δημιουργία χώρου όπου θα καταγράφονταν τα νέφη των σημείων (**Cyclone Navigator → Create Project**)
- ✓ Σύνδεση του σαρωτή με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή (**Scanner → Connect**)
- ✓ Ρύθμιση συνθηκών φωτεινότητας, με τον ορισμό του χώρου διεξαγωγής των μετρήσεων (**image → adjust exposure → outdoors**)
- ✓ Ορισμός του «παράθυρου» σάρωσης (**Field of View**) και του σημείου (**probe**) μέχρι το οποίο διατηρούνταν η ακρίβεια του σαρωτή
- ✓ Επιλογή βήματος σάρωσης (**resolution**) (τέθηκε ίσο με 2mm)
- ✓ Εκκίνηση σάρωσης

Παράλληλα με το αντικείμενο μελέτης, πραγματοποιούνταν και σάρωση του σφαιρικού στόχου. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας των σαρώσεων, ακολουθούσε η διαδικασία της άμεσης γεωαναφοράς των νεφών:

- ✓ Εισαγωγή αρχείου συντεταγμένων κορυφών στις οποίες τοποθετούνταν σαρωτής και σφαιρικός στόχος (**Import → Coordinate list**)
- ✓ Συμπλήρωση πλαισίου διαλόγου field setup (ο σαρωτής μετρά από το δικό του αυθαίρετο σύστημα σε αυτό που του ορίζει ο χρήστης)
- ✓ Εκτέλεση εντολών **Calculate → Apply**

Σημαντικό παράγωγο της παραπάνω διαδικασίας αποτέλεσε πλαίσιο διαλόγου (εικόνα 7.1) με τα οριζοντιογραφικά και υψομετρικά σφάλματα της γεωαναφοράς.





**Εικόνα 7.1:** Πλαίσιο διαλόγου των αποτελεσμάτων της γεωαναφοράς  
**Picture 7.1:** Dialog of georeference results

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας 7.1 με το οριζοντιογραφικό και υψομετρικό σφάλμα γεωαναφοράς από κάθε κορυφή.

| <i>Κορυφή</i>     | $\sigma_{Hor}(mm)$ | $\sigma_{Vert}(mm)$ |
|-------------------|--------------------|---------------------|
| <b><i>Σ7</i></b>  | +4                 | -1                  |
| <b><i>Σ20</i></b> | +3                 | -1                  |
| <b><i>Σ21</i></b> | +3                 | -4                  |
| <b><i>Σ22</i></b> | +4                 | -1                  |

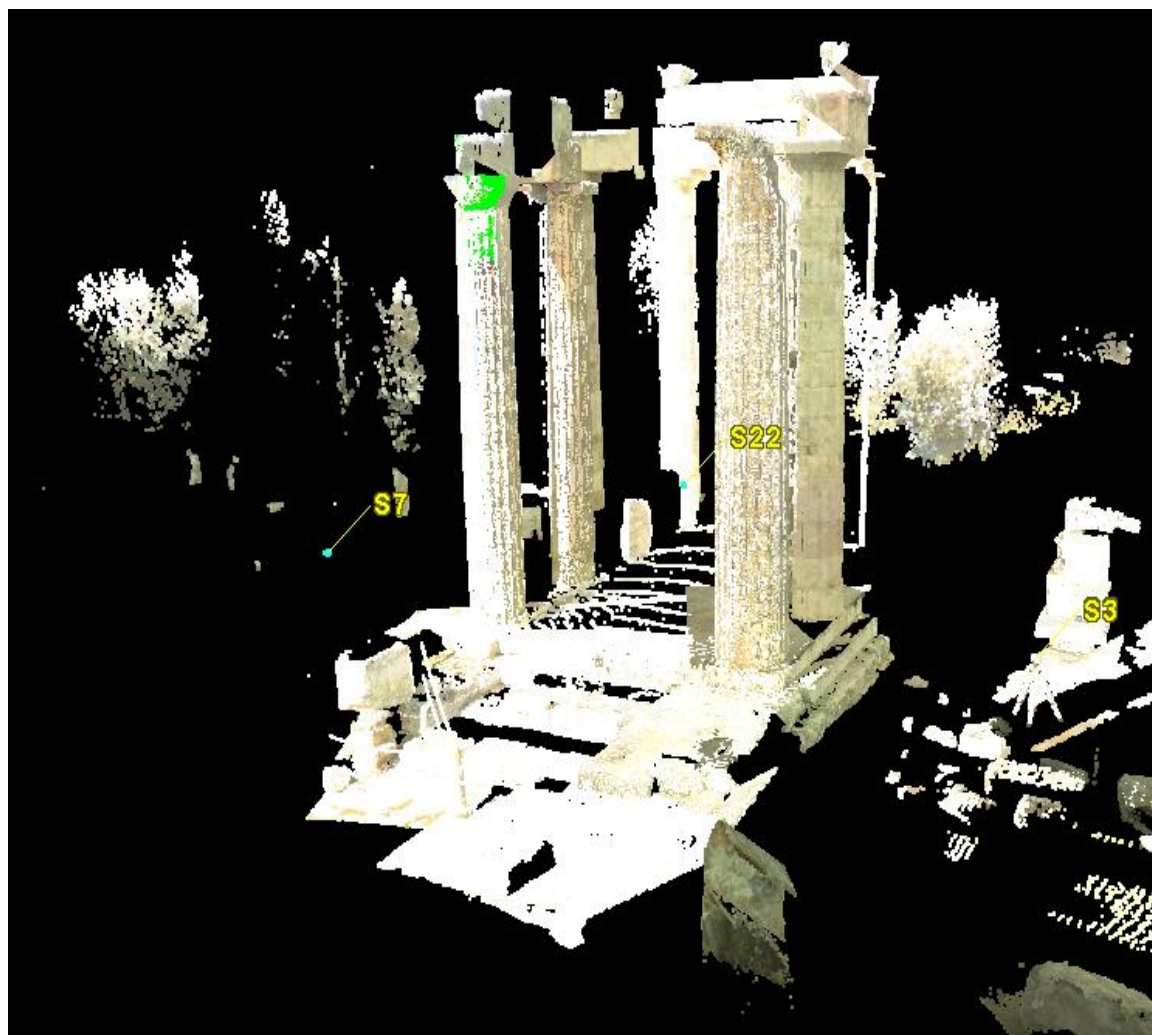
**Πίνακας 7.1:** Αποτελέσματα σφαλμάτων γεωαναφοράς από κάθε κορυφή  
**Table 7.1:** Results of georeferencing errors of each point

Αφού πραγματοποιήθηκε η παραπάνω διαδικασία από κάθε στάση, ακολούθησε η συνένωση των νεφών σε ενιαίο μοντέλο. Η διαδικασία στην περίπτωση αυτή ήταν αρκετά απλουστευμένη, αφού όλες οι σαρώσεις είχαν ήδη γεωαναφερθεί σε ενιαίο σύστημα αναφοράς (**Create ScanWorld / Freeze Registration** και **Creat and Open Modelspace**).

Τα παραπάνω έχουν αναλυθεί εκτενέστερα κατά την διαδικασία των πειραματικών εργασιών (παράγραφος 5.2.2).

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το νέφος σημείων (εικόνα 7.2), όπου απεικονίζεται τόσο ο προς μελέτη κίονας όσο και η ευρύτερη βορειοανατολική πλευρά του ναού.

Πρόκειται για τα πρωτογενή δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν στο πεδίο, πριν ακόμη εφαρμοσθεί σε αυτά οποιοδήποτε είδους επεξεργασία.



Εικόνα 7.2: Νέφος σημείων της νοτιοανατολικής πλευράς του ναού  
Picture 7.2: Point cloud of southeastern side of the temple

### 7.2.4 Η επεξεργασία του νέφους σημείων

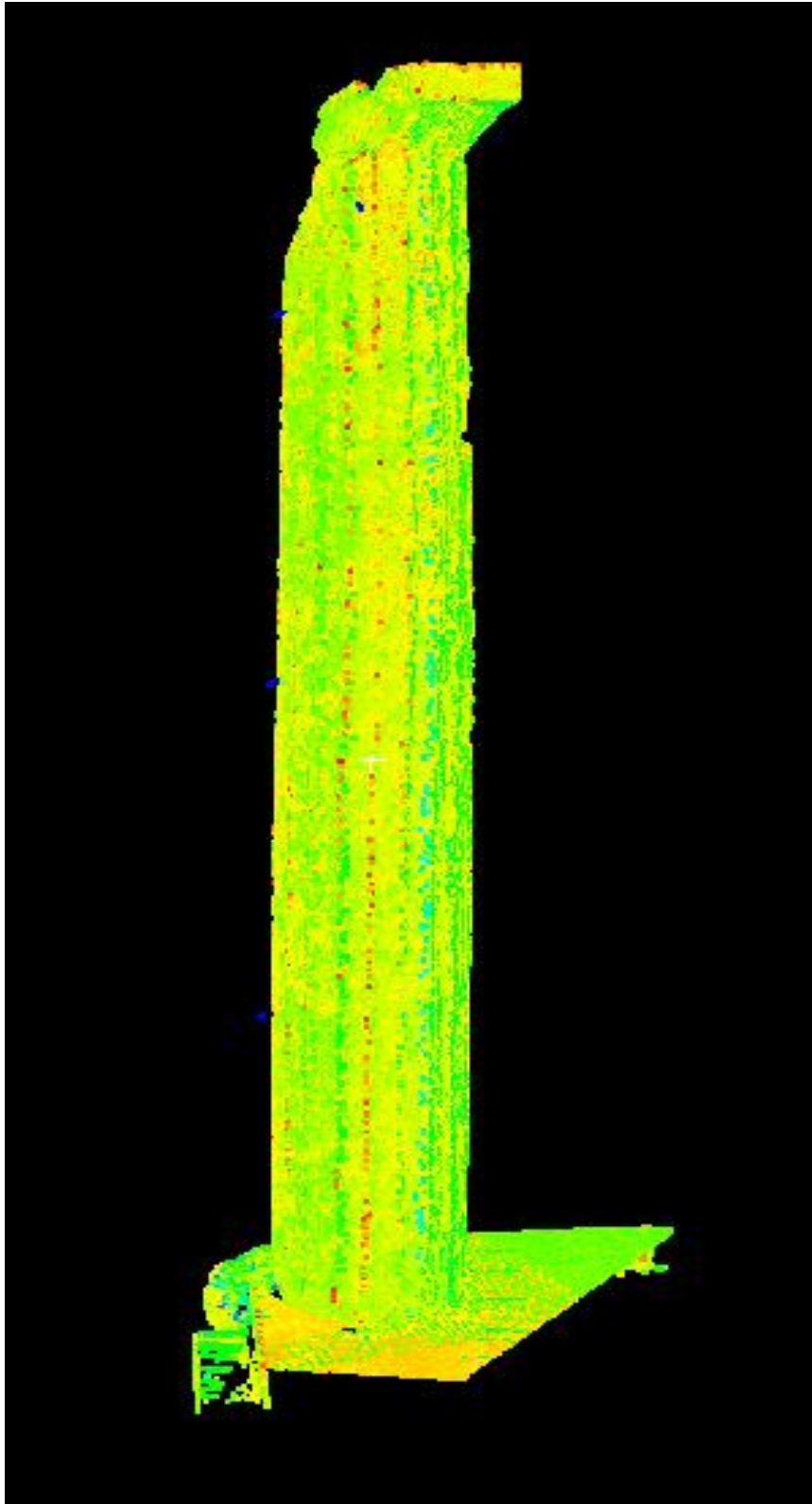
Αφού πραγματοποιήθηκαν οι σαρώσεις, η γεωαναφορά και σύνεωση των νεφών σημείων που συλλέχθηκαν, ακολούθησε η επεξεργασία τους. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά Cyclone και Geomagic Studio 12 , ενώ ακολουθήθηκε διαδικασία όμοια με εκείνη κατά το στάδιο των πειραμάτων (παράγραφος 5.2.5).

Η επεξεργασία μπορεί να συνοψισθεί στα παρακάτω:

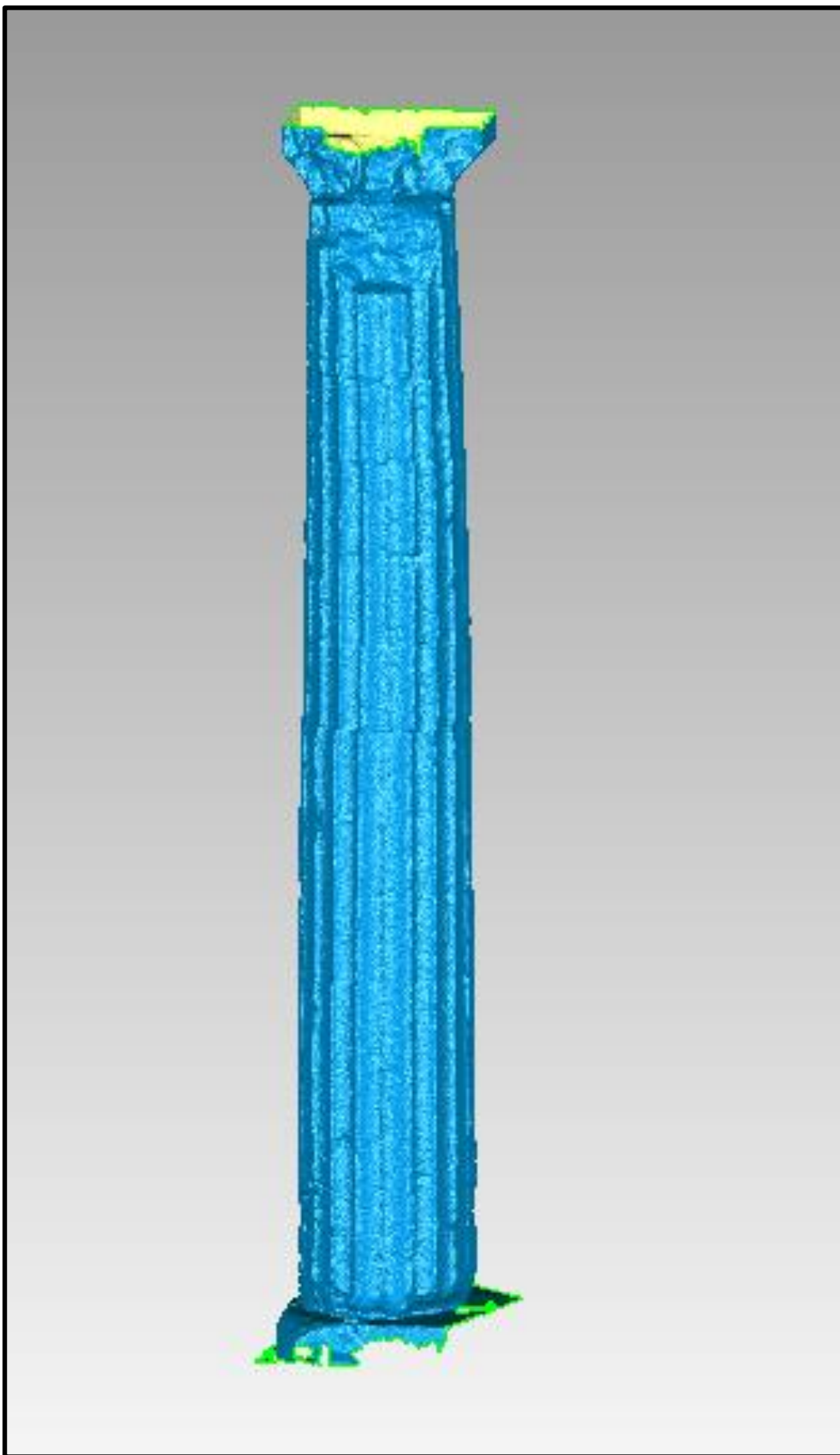
- ✓ Απομάκρυνση θορύβου (κυρίως βλάστησης), περιμετρικά του ναού στο λογισμικό Cyclone (**fence** → **delete outside**). Τελικά απομονώθηκε ο κίονας ο οποίος μελετήθηκε (εικόνα 7.3(α))
- ✓ Εισαγωγή νέφους σημείων στο περιβάλλον του Geomagic, για λεπτομερέστερη απομάκρυνση θορύβου
- ✓ Διαγραφή σημείων που είναι απομακρυσμένα από τα υπόλοιπα (**select** → **disconnected components**)
- ✓ Διαγραφή σημείων τα οποία απέχουν τουλάχιστον συγκεκριμένη απόσταση από κάποιο ποσοστό των υπολοίπων σημείων. Η απόσταση επιλέγεται εσωτερικά από το λογισμικό ενώ ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το προαναφερθέν ποσοστό (επιλέγεται το προτεινόμενο, default ποσοστό 67%) (**select** → **outliers**)
- ✓ Μοντελοποίηση κίονα (**wrap**)
- ✓ Συμπλήρωση κενών που δημιουργούνται κατά την μοντελοποίηση, με τη δημιουργία επιφανειών, οι οποίες να ακολουθούν την γεωμετρία της γειτονικής τους επιφάνειας (**fill single** → **curvature**)

Συνολικά συλλέχθηκαν 4.500.000 σημεία, μετά από την απαλοιφή του θορύβου απομονώθηκαν 1.022.000 σημεία και αφού μοντελοποιήθηκε η σαρωμένη επιφάνεια δημιουργήθηκαν 2.041.000 τρίγωνα.

Τελικά προέκυψε η μοντελοποιημένη επιφάνεια του κίονα (εικόνα 6.3(β)).



**Εικόνα 7.3 (α):** Νέφος σημείων του κίονα ως αποτέλεσμα επεξεργασίας στο λογισμικό Cyclone  
**Picture 7.3 (a):** Point cloud of the column as a result of processing at Cyclone software



**Εικόνα 7.3 (β):** Μοντελοποιημένη επιφάνεια του κίονα ως αποτέλεσμα επεξεργασίας στο λογισμικό Geomagic Studio

**Picture 7.3 (b):** Modeled surface of the column as a result of processing at Geomagic Studio Software

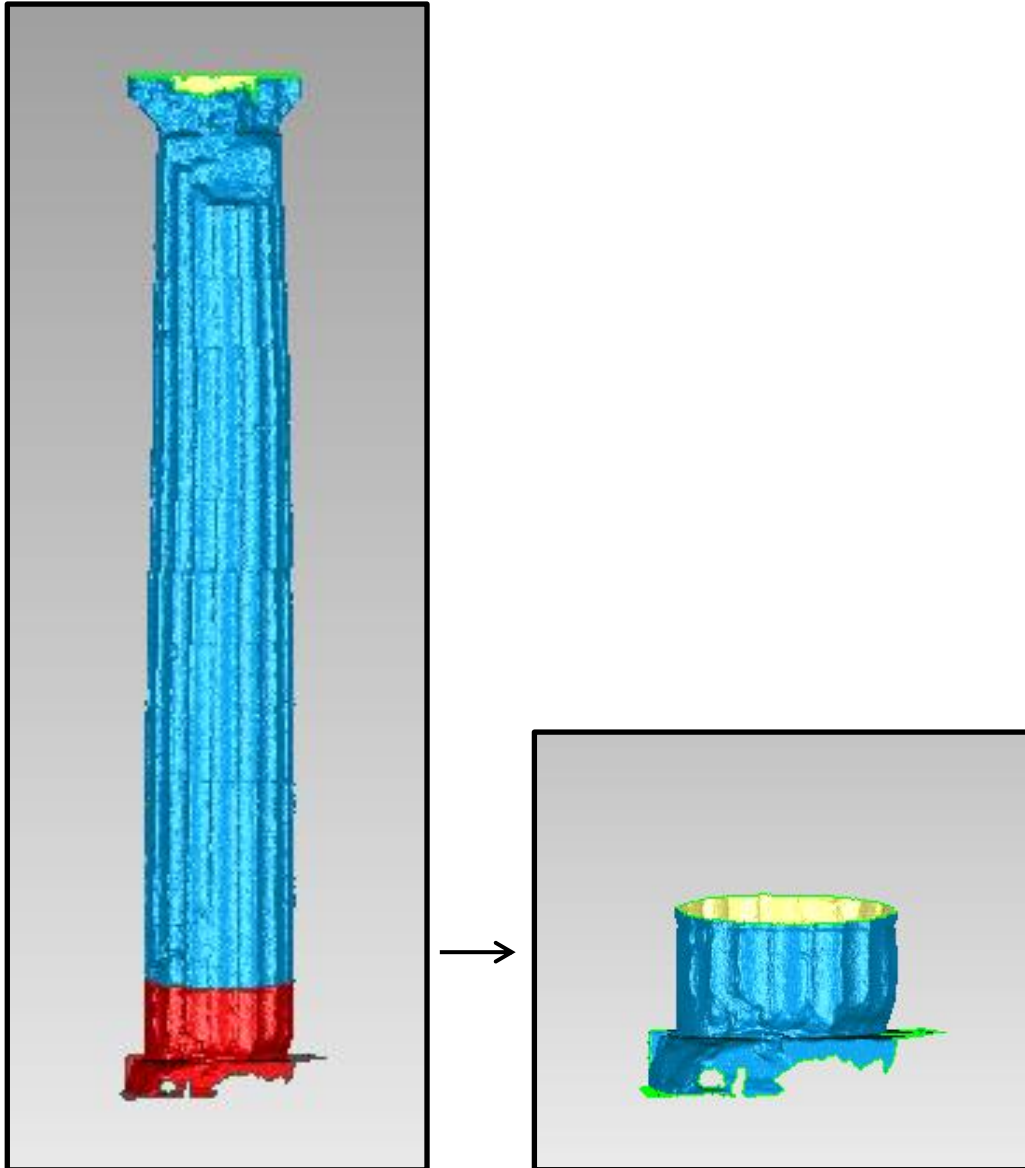
### 7.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Όπως προαναφέρθηκε, στόχος της παρούσας διπλωματικής αποτέλεσε η τεκμηρίωση των γεωμετρικών στοιχείων σπονδύλων του κίονα, καθώς και ο προσδιορισμός των μετακινήσεων μεταξύ τους όπως επίσης και ο προσδιορισμός των εκλεπτύνσεων του. Το γεγονός αυτό προϋποθέτει την κατάλληλη προεπεξεργασία των ψηφιακών δεδομένων η οποία θα παρουσιασθεί στην συνέχεια.

#### 7.3.1 Δημιουργία τομών

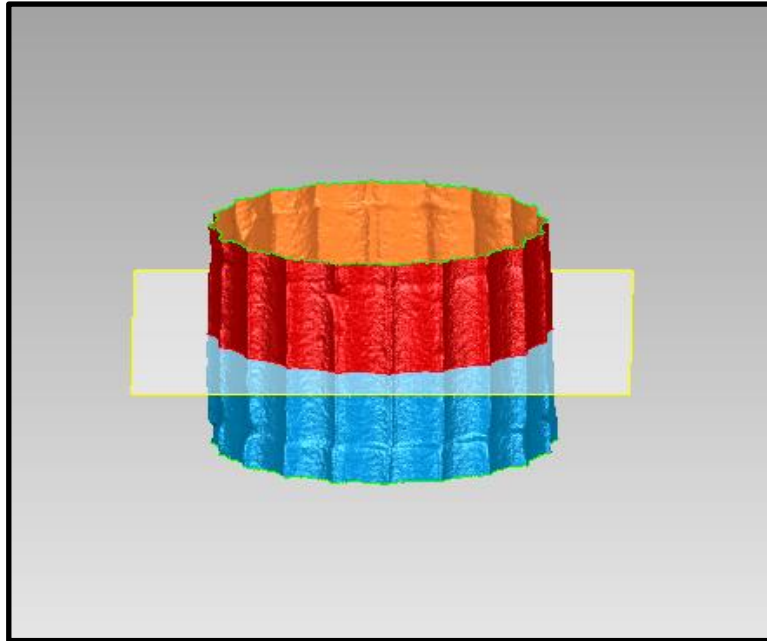
Προκειμένου να προσδιορισθούν όλα τα στοιχεία που αναφέρθηκαν, πραγματοποιήθηκε περαιτέρω επεξεργασία του μοντέλου (στο λογισμικό Geomagis Studio). Κρίθηκε σκόπιμο η επεξεργασία να γίνει τμηματικά ανά σπόνδυλο.

Σε κάθε περίπτωση επιλέγονταν το μέρος του κίονα (ο σπόνδυλος) (**rectangle selection tool** → **select through**) το οποίο θα απομονώνονταν, και θα αποτελούσε νέο αντικείμενο (εικόνα 7.4), εύκολα διαχειρίσιμο (**tools** → **new object** → **from selection**). Συνολικά δημιουργήθηκαν 13 νέα αντικείμενα, όσα και οι σπόνδυλοι του κίονα.

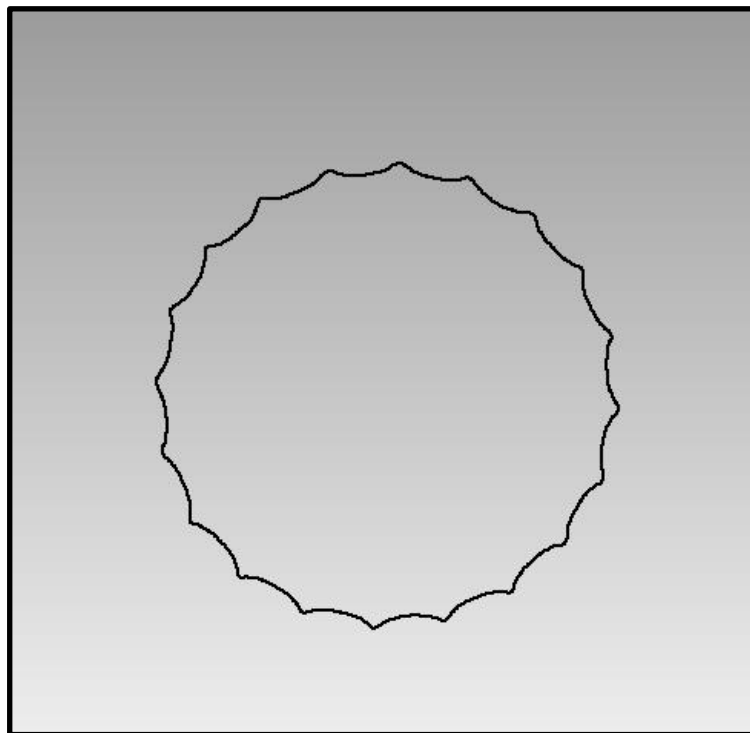


**Εικόνα 7.4 :** (α) Μοντέλο κίονα με επιλεγμένο τον σπόνδυλο που θα αποτελέσει νέο αντικείμενο  
(β) Ο απομονωμένος σπόνδυλος ως νέο αντικείμενο  
**Picture 7.4:** (a) Modeled column and the drum selected that will be a new object  
(b) Isolated drum as a new object

Στη συνέχεια, για τον προσδιορισμό των βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κάθε σπονδύλου, έγιναν οριζόντιες τομές σε καθένα από αυτούς. Το Geomagic Studio παρέχει την δυνατότητα δημιουργίας τομών, μοναδιαίων ή πολλαπλών. Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τη θέση από την οποία θα διέρχεται το επίπεδο που θα τμήσει το αντικείμενο ή και να ορίσει ο ίδιος το επίπεδο αυτό μέσω της επιλογής τριών σημείων επί του αντικειμένου.



**Εικόνα 7.5:** Δημιουργία οριζόντιας τομής στη μέση του 7<sup>ου</sup> σπονδύλου  
**Picture 7.5:** Horizontal cross section at the middle of the 7<sup>th</sup> drum



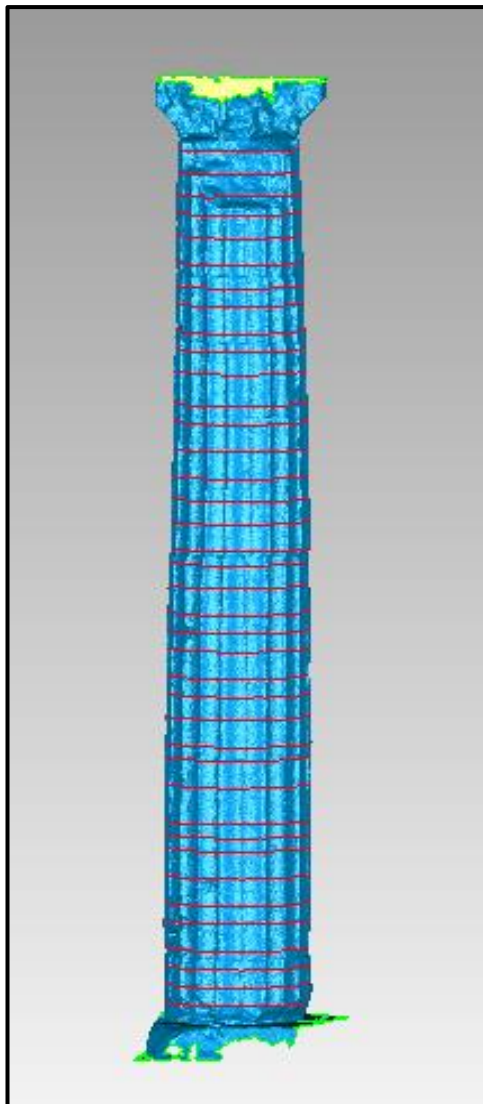
**Εικόνα 7.6:** Σημειοσύνολο ως αποτέλεσμα της οριζόντιας τομής  
**Picture 7.6:** Set of points as a result of the horizontal cross section



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΙΟΝΑ

Σε κάθε περίπτωση, επιλέχθηκε να δημιουργηθούν τρεις οριζόντιες τομές σε κάθε σπόνδυλο, κοντά στην κάτω και άνω έδρα του καθώς και στο μέσον του. Γενικώς, η επιλογή των θέσεων των τομών επηρεάζονταν και από τον βαθμό των φθορών του σπονδύλου στην εκάστοτε στάθμη. Αφού επιλέγονταν η θέση από την οποία θα διέρχονταν το οριζόντιο επίπεδο, δημιουργούνταν το ίχνος της τομής του επιπέδου με τον σπόνδυλο (**trim with plane** → **intersect plane**). Στην συνέχεια, το ίχνος αυτό απομονώνονταν (**curves** → **create from boundary**) και μετατρέπονταν σε σημειοσύνολο το οποίο μπορούσε να εξαχθεί και να επεξεργασθεί περαιτέρω στο περιβάλλον του Autocad.

Συνολικά δημιουργήθηκαν  $3 \times 13 = 39$  τομές οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια (εικόνα 7.7) για το σύνολο του κίονα.



**Εικόνα 7.7:** Σύνολο τομών στον κίονα K31  
**Picture 7.7:** Cross sections of the column K31

### 7.3.2 Υπολογισμός κέντρων και ακτίνων

Όπως αναφέρθηκε, σε κάθε σπόνδυλο έγιναν τομές σε τρεις στάθμες, κοντά στην άνω και κάτω έδρα του καθώς και στο μέσο αυτού. Οι τομές αυτές μετατράπηκαν σε σημειοσύνολα τα οποία εισάχθηκαν στο περιβάλλον του Autocad.

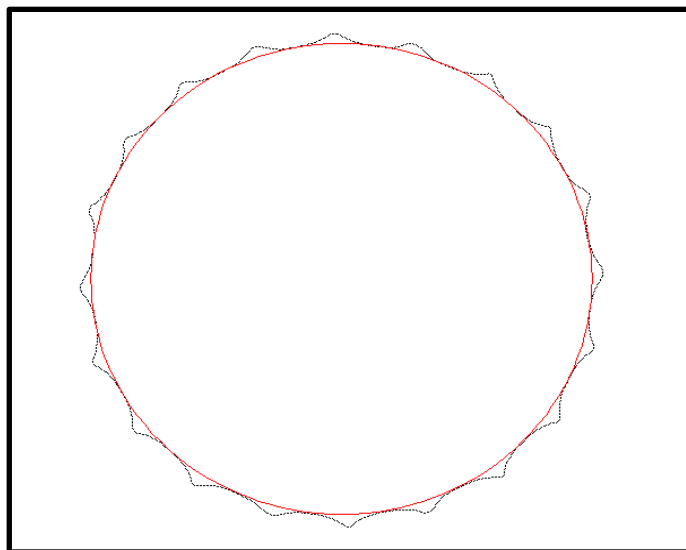
Προκειμένου να προσδιορισθεί το κέντρο και η ακτίνα του κίονα στην εκάστοτε στάθμη, επιλέχθηκε να προσαρμοσθεί εγγεγραμμένος κύκλος σε κάθε μια από τις τομές με την μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων.

Κατά την εφαρμογή αυτής της προσομοίωσης, οι άγνωστοι είναι τρεις: οι συντεταγμένες του κέντρου του κύκλου  $(X_o, Y_o)$  και η ακτίνα αυτού  $(R)$ . Το πλήθος των εξισώσεων είναι ίσο με τον αριθμό των εσωτερικών σημείων που μπορούσαν να προσδιορισθούν. Αυτό το πλήθος, καθορίζονταν από τις φθορές στη συγκεκριμένη στάθμη.

Οι σχέσεις που συνδέουν τις μετρήσεις με τις ανεξάρτητες καθοριστικές παραμέτρους είναι της μορφής :

$$l_i = (x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2 - R^2 = 0 \quad (7.1)$$

Οι σχέσεις δεν είναι γραμμικές, επομένως αναπτύσσονται κατά Taylor στη θέση  $(x_o^o, y_o^o, R^o)$ , όπου  $(x_o^o, y_o^o, R^o)$  οι προσωρινές τιμές των ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων. Οι προσωρινές τιμές προέκυψαν από πρόχειρη προσαρμογή εγγεγραμμένου κύκλου στα εσώτερα σημεία των αυλακών σε κάθε τομή (σχήμα 7.1).



Σχήμα 7.1 : Προσαρμογή εγγεγραμμένου κύκλου στην τομή του κίονα  
 Figure 7.1: The escribed circle that fits a cross section of a drum

Όλες οι μετρήσεις θεωρήθηκαν ισοβαρείς. Από την συνόρθωση υπολογίστηκαν τα  $(x_o, y_o, R)$ , με τις αβεβαιότητές τους, σε κάθε στάθμη (πίνακα 7.2). Η μεθοδολογία και οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται εκτενέστερα στην παράγραφο (5.2.1).

Δεδομένης της γεωμετρίας των κίωνων, οι έδρες των σπονδύλων του είναι οριζόντιες, εκτός από εκείνες του πρώτου. Ειδικά η άνω έδρα του πρώτου σπονδύλου παρουσιάζει κλίση την οποία ακολουθούν και οι υπόλοιποι σπόνδυλοι. Για τον λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθούν τομές με επίπεδα τα οποία ακολουθούν την κλίση αυτή, επίπεδα δηλαδή τα οποία δεν είναι οριζόντια. Στη συνέχεια ακολουθήθηκε η παραπάνω μεθοδολογία εξαγωγής του κέντρου και της ακτίνας του κίονα σε κάθε στάθμη. Παρ' όλα αυτά οι διαφορές που παρατηρήθηκαν ήταν μικρότερες του χιλιοστού, επομένως αποφασίσθηκε οι τομές τελικώς να πραγματοποιηθούν με οριζόντια επίπεδα.

Τέλος, οι υπολογισθείσες ακτίνες της κάτω έδρας κάθε σπονδύλου, συγκρίθηκαν με εκείνες οι οποίες έχουν προκύψει από άμεσες μετρήσεις στα πλαίσια της αναστήλωσης του ναού και αναφέρονται επίσης στην κάτω έδρα του κάθε σπονδύλου (Ζάμπας Κ. – μετρήσεις στον Κ31 στα πλαίσια της αναστήλωσης κίωνων της περίπτωσης του ναού του Νεμείου Διός). Οι άμεσες μετρήσεις παρουσιάζονται στην τελευταία στήλη του πίνακα 7.2. Παρατηρείται ότι οι διαφορές κυμαίνονται μεταξύ  $[0mm \div (\pm 3mm)]$  που κρίνονται στατιστικά μη σημαντικές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΙΟΝΑ

| α/α<br>Σπονδ.    | ΤΟΜΗ | $H_o$<br>(m) | $X_o$<br>(m) | $\sigma x_o$<br>(mm) | $Y_o$<br>(m) | $\sigma y_o$<br>(mm) | $R$<br>(m) | $\sigma R$<br>(mm) | $R^{άμ.}$<br>(m) |
|------------------|------|--------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|------------|--------------------|------------------|
| 1 <sup>ος</sup>  | ΚΑΤΩ | 100,15       | 1021,717     | ±1,3                 | 988,749      | ±1,3                 | 0,760      | ±1,0               | 0,761            |
|                  | ΜΕΣΗ | 100,35       | 1021,717     | ±0,4                 | 988,750      | ±0,5                 | 0,758      | ±0,3               |                  |
|                  | ΠΑΝΩ | 100,55       | 1021,717     | ±0,7                 | 988,750      | ±1,0                 | 0,757      | ±0,6               |                  |
| 2 <sup>ος</sup>  | ΚΑΤΩ | 100,75       | 1021,708     | ±0,1                 | 988,751      | ±1,3                 | 0,755      | ±0,7               | 0,757            |
|                  | ΜΕΣΗ | 101,05       | 1021,706     | ±0,5                 | 988,754      | ±0,5                 | 0,754      | ±0,4               |                  |
|                  | ΠΑΝΩ | 101,25       | 1021,706     | ±0,6                 | 988,756      | ±0,5                 | 0,752      | ±0,4               |                  |
| 3 <sup>ος</sup>  | ΚΑΤΩ | 101,55       | 1021,705     | ±0,5                 | 988,756      | ±0,5                 | 0,751      | ±0,3               | 0,753            |
|                  | ΜΕΣΗ | 101,85       | 1021,704     | ±0,3                 | 988,758      | ±0,3                 | 0,749      | ±0,2               |                  |
|                  | ΠΑΝΩ | 102,00       | 1021,704     | ±0,5                 | 988,758      | ±0,5                 | 0,748      | ±0,4               |                  |
| 4 <sup>ος</sup>  | ΚΑΤΩ | 102,25       | 1021,703     | ±0,3                 | 988,758      | ±0,3                 | 0,745      | ±0,2               | 0,748            |
|                  | ΜΕΣΗ | 102,55       | 1021,702     | ±0,4                 | 988,760      | ±0,4                 | 0,742      | ±0,3               |                  |
|                  | ΠΑΝΩ | 102,80       | 1021,702     | ±0,4                 | 988,760      | ±0,4                 | 0,740      | ±0,3               |                  |
| 5 <sup>ος</sup>  | ΚΑΤΩ | 103,00       | 1021,695     | ±0,6                 | 988,766      | ±0,5                 | 0,738      | ±0,4               | 0,738            |
|                  | ΜΕΣΗ | 103,30       | 1021,694     | ±0,6                 | 988,768      | ±0,5                 | 0,735      | ±0,4               |                  |
|                  | ΠΑΝΩ | 103,55       | 1021,694     | ±0,4                 | 988,768      | ±0,4                 | 0,732      | ±0,3               |                  |
| 6 <sup>ος</sup>  | ΚΑΤΩ | 103,75       | 1021,691     | ±0,4                 | 988,770      | ±0,4                 | 0,730      | ±0,3               | 0,730            |
|                  | ΜΕΣΗ | 104,05       | 1021,690     | ±0,6                 | 988,772      | ±0,6                 | 0,726      | ±0,4               |                  |
|                  | ΠΑΝΩ | 104,25       | 1021,690     | ±0,5                 | 988,772      | ±0,5                 | 0,723      | ±0,4               |                  |
| 7 <sup>ος</sup>  | ΚΑΤΩ | 104,45       | 1021,686     | ±0,3                 | 988,775      | ±0,3                 | 0,721      | ±0,2               | 0,722            |
|                  | ΜΕΣΗ | 104,75       | 1021,685     | ±0,4                 | 988,776      | ±0,4                 | 0,716      | ±0,3               |                  |
|                  | ΠΑΝΩ | 15,00        | 1021,684     | ±0,5                 | 988,777      | ±0,4                 | 0,713      | ±0,3               |                  |
| 8 <sup>ος</sup>  | ΚΑΤΩ | 105,20       | 1021,675     | ±0,5                 | 988,792      | ±0,5                 | 0,709      | ±0,3               | 0,709            |
|                  | ΜΕΣΗ | 105,45       | 1021,674     | ±0,5                 | 988,793      | ±0,5                 | 0,706      | ±0,3               |                  |
|                  | ΠΑΝΩ | 105,70       | 1021,674     | ±0,4                 | 988,794      | ±0,4                 | 0,702      | ±0,3               |                  |
| 9 <sup>ος</sup>  | ΚΑΤΩ | 105,95       | 1021,668     | ±0,4                 | 988,797      | ±0,4                 | 0,698      | ±0,3               | 0,696            |
|                  | ΜΕΣΗ | 106,25       | 1021,667     | ±0,5                 | 988,799      | ±0,5                 | 0,692      | ±0,4               |                  |
|                  | ΠΑΝΩ | 106,55       | 1021,668     | ±0,5                 | 988,800      | ±0,5                 | 0,686      | ±0,4               |                  |
| 10 <sup>ος</sup> | ΚΑΤΩ | 106,75       | 1021,665     | ±0,6                 | 988,797      | ±0,6                 | 0,682      | ±0,5               | 0,682            |
|                  | ΜΕΣΗ | 107,10       | 1021,665     | ±0,7                 | 988,797      | ±0,7                 | 0,674      | ±0,3               |                  |
|                  | ΠΑΝΩ | 107,35       | 1021,663     | ±0,6                 | 988,799      | ±0,5                 | 0,670      | ±0,3               |                  |
| 11 <sup>ος</sup> | ΚΑΤΩ | 107,55       | 1021,665     | ±0,7                 | 988,789      | ±0,6                 | 0,666      | ±0,5               | 0,665            |
|                  | ΜΕΣΗ | 107,85       | 1021,664     | ±0,4                 | 988,790      | ±0,4                 | 0,660      | ±0,4               |                  |
|                  | ΠΑΝΩ | 108,05       | 1021,664     | ±0,4                 | 988,790      | ±0,4                 | 0,656      | ±0,4               |                  |
| 12 <sup>ος</sup> | ΚΑΤΩ | 108,30       | 1021,668     | ±0,7                 | 988,784      | ±0,6                 | 0,650      | ±0,5               | 0,651            |
|                  | ΜΕΣΗ | 108,60       | 1021,666     | ±0,6                 | 988,785      | ±0,6                 | 0,643      | ±0,4               |                  |
|                  | ΠΑΝΩ | 108,85       | 1021,665     | ±0,6                 | 988,786      | ±0,6                 | 0,638      | ±0,4               |                  |
| 13 <sup>ος</sup> | ΚΑΤΩ | 109,05       | 1021,666     | ±1,0                 | 988,780      | ±1,0                 | 0,633      | ±0,5               | 0,633            |
|                  | ΜΕΣΗ | 109,30       | 1021,668     | ±1,0                 | 988,781      | ±1,0                 | 0,628      | ±0,6               |                  |
|                  | ΠΑΝΩ | 109,55       | 1021,667     | ±1,0                 | 988,783      | ±1,0                 | 0,623      | ±1,0               |                  |

Πίνακας 7.2: Υψόμετρα, οριζοντιογραφικές συντεταγμένες κέντρου και ακτίνες σπονδύλων με τις αβεβαιότητές τους για κάθε τομή

Table 7.2: Heights, horizontal coordinates of centres, radius of drums together with their standard deviations for each cross section

## 7.4 ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΚΙΟΝΑ

Μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας της μοντελοποιημένης επιφάνειας, με την εξαγωγή των συντεταγμένων των κέντρων του κίονα και των ακτίνων του σε διάφορες στάθμες, υπολογίσθηκαν οι μετακινήσεις και στροφές μεταξύ των σπονδύλων, καθώς και οι οπτικές εκλεπτύσεις του. Όλα τα παραπάνω στοιχεία παρουσιάζονται στη συνέχεια εκτενέστερα

### 7.4.1 Μετακινήσεις και στροφές μεταξύ των σπονδύλων

Για τον έλεγχο των μετακινήσεων χρησιμοποιήθηκαν οι συντεταγμένες των κέντρων των σπονδύλων όπως αυτές προέκυψαν από την επεξεργασία των μεσαίων τομών εφόσον παρουσιάζουν τις λιγότερες φθορές.

Με βάση τα παραπάνω, υπολογίσθηκαν οι μετακινήσεις μεταξύ των κέντρων των διαδοχικών σπονδύλων καθώς και οι μετακινήσεις του κέντρου κάθε σπονδύλου από το κέντρο του πρώτου. Εκτός από το μέτρο του διανύσματος μετακίνησης  $\delta S_{i,j}$ , υπολογίσθηκε και η διεύθυνσή του  $\alpha_{\delta S_{i,j}}$ . Υπολογίσθηκαν επίσης οι αβεβαιότητές των μετακινήσεων προκειμένου να αξιολογηθεί η στατιστική σημαντικότητά τους, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Για να θεωρηθεί μια μετακίνηση στατιστικά σημαντική πρέπει :

$$\delta S_{i,j} > \sigma_{max} * z \quad (7.2)$$

Όπου:  $\delta S_{i,j}$  ,η μετακίνηση μεταξύ των κέντρων των σπονδύλων  
 $\sigma_{max}$  ,ο μεγάλος ημιάξονας της έλλειψης σφάλματος  
 $z$  ,το εκατοστιαίο της κανονικής κατανομής  
 (για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ισχύει  $z_p = 1,96$ )

Μορφώθηκε ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας της μετακίνησης  $\hat{V}_{\delta S_{i,j}}$  ως άθροισμα των πινάκων μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας της θέσης των εκάστοτε κέντρων. Από τον πίνακα  $\hat{V}_{\delta S_{i,j}}$  υπολογίσθηκε ο μεγάλος ημιάξονας της έλλειψης σφάλματος  $\sigma_{max}$ . Όλες οι μετατοπίσεις προέκυψαν στατιστικά σημαντικές για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (πίνακας 7.3).

Ακολούθησε ο προσδιορισμός της στροφής κάθε σπονδύλου ως προς τον υποκείμενό του (πίνακας 7.3). Για τον σκοπό σχεδιάσθηκαν οι ομόλογες ακτίνες (ακτίνες που καταλήγουν στο εσώτερο σημείο της ίδια ράβδωσης) των κύκλων που είχαν προσαρμοσθεί σε κάθε μία από τις μεσαίες τομές των σπονδύλων και

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΙΟΝΑ

μετρήθηκαν οι μεταξύ τους γωνίες ως διαφορές των αντίστοιχων γωνιών διεύθυνσης. Για τον προσδιορισμό των στροφών επιλέχθηκε η 15<sup>η</sup> ράβδωση (η αρίθμηση ξεκινά από την πρόσθια αξονική ράβδωση και με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού) η οποία δεν έχει υποστεί σημαντικές φθορές σε κανέναν από τους σπονδύλους του κίονα. Όσον αφορά τις στροφές, ως θετική φορά θεωρήθηκε αυτή των δεικτών του ρολογιού. Παρατηρώντας τον πίνακα 7.3, από τον 8<sup>ο</sup> έως τον 11<sup>ο</sup> σπόνδυλο, διαπιστώνεται αριστερόστροφη στροφή των σπονδύλων σαν ενιαίο σώμα.

Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας όπου παρουσιάζονται οι μετακινήσεις και στροφές μεταξύ των σπονδύλων, η διεύθυνση των διανυσμάτων μετακίνησης και ο μεγάλος ημίξονας της έλλειψης σφάλματος για κάθε μετακίνηση.

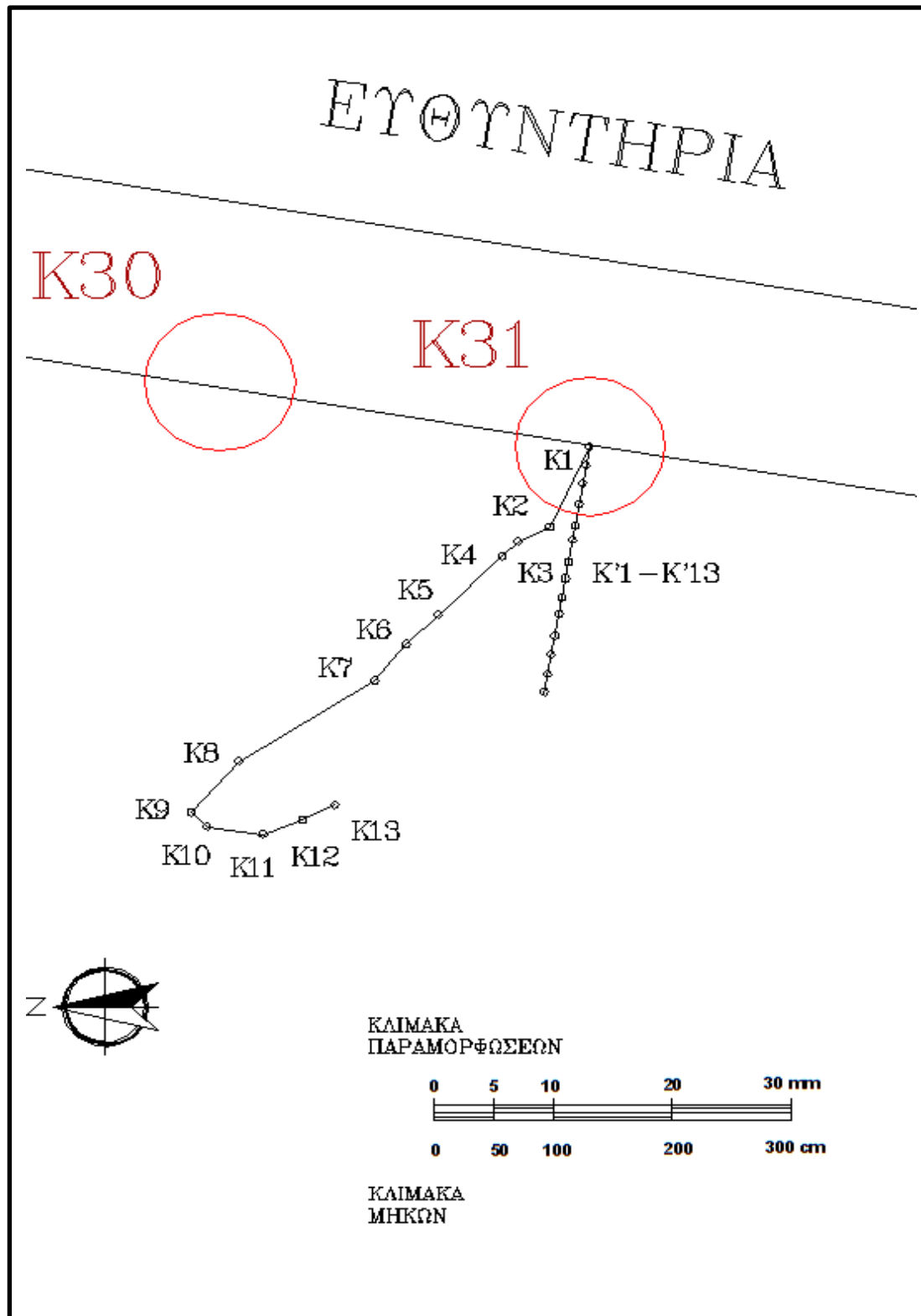
| <i>α/α<br/>Σπονδύλου</i> | <i><math>\delta S_{i,j}</math><br/>(mm)</i> | <i><math>\sigma_{\delta S_{i,j}}</math><br/>(mm)</i> | <i><math>\alpha_{\delta S_{i,j}}</math><br/>(grad)</i> | <i><math>\sigma_{max} * Z</math><br/>(mm)</i> | <i>Στροφές<br/>(grad)</i> |
|--------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------|
| <b>1<sup>ος</sup></b>    | 12                                          | ±0,6                                                 | 325                                                    | <b>1,4</b>                                    | -1,1                      |
| <b>2<sup>ος</sup></b>    |                                             |                                                      |                                                        |                                               |                           |
| <b>3<sup>ος</sup></b>    | 4                                           | ±0,6                                                 | 367                                                    | <b>1,1</b>                                    | 0,7                       |
| <b>4<sup>ος</sup></b>    | 4                                           | ±0,5                                                 | 354                                                    | <b>1,0</b>                                    | -0,2                      |
| <b>5<sup>ος</sup></b>    | 12                                          | ±0,7                                                 | 347                                                    | <b>1,3</b>                                    | -1,2                      |
| <b>6<sup>ος</sup></b>    | 6                                           | ±0,8                                                 | 351                                                    | <b>1,6</b>                                    | 0,3                       |
| <b>7<sup>ος</sup></b>    | 6                                           | ±0,7                                                 | 346                                                    | <b>1,4</b>                                    | -0,4                      |
| <b>8<sup>ος</sup></b>    | 21                                          | ±0,6                                                 | 365                                                    | <b>1,2</b>                                    | -2,5                      |
| <b>9<sup>ος</sup></b>    | 9                                           | ±0,7                                                 | 344                                                    | <b>1,3</b>                                    | -0,2                      |
| <b>10<sup>ος</sup></b>   | 3                                           | ±0,8                                                 | 267                                                    | <b>1,8</b>                                    | -0,3                      |
| <b>11<sup>ος</sup></b>   | 8                                           | ±0,8                                                 | 201                                                    | <b>1,7</b>                                    | -0,1                      |
| <b>12<sup>ος</sup></b>   | 5                                           | ±0,7                                                 | 175                                                    | <b>1,4</b>                                    | 3,0                       |
| <b>13<sup>ος</sup></b>   | 5                                           | ±0,8                                                 | 173                                                    | <b>2,1</b>                                    | 0,1                       |

**Πίνακας 7.3:** Στροφές και μετατοπίσεις σπονδύλων με τις αβεβαιότητές τους, διεύθυνση διανυσμάτων μετακίνησης και στατιστικός έλεγχος αυτών

**Table 7.3:** Rotations and displacements of drums with their standard deviations, direction of displacement vectors and statistical tests

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΙΟΝΑ

Ακολούθησε η σχεδίαση της όδευσης των μετατοπισμένων κέντρων των σπονδύλων (K1-K13) καθώς και η όδευση των κέντρων των σπονδύλων όπως θα ήταν αν δεν υπήρχε καμία μετατόπιση (K'1-K13') (σχήμα 7.2). Η εικόνα της όδευσης των σπονδύλων στην περίπτωση που αυτοί δεν έχουν μετακινηθεί, υλοποιήθηκε βάσει της μελέτης αναστήλωσης του γειτονικού κίονα (K30) και δεδομένου ότι παρουσιάζει την ίδια γεωμετρία με αυτόν που μελετάται (K31). Στο σχήμα εποπτικά απεικονίζεται η θέση του κίονα K30 καθώς και η γραμμή της ευθυντηρίας και του α' αναβαθμού.



Σχήμα 7.2: Αλληλουχία μετατοπισμένων κέντρων  
 Figure 7.2: Sequence of displacements of the drums' centers



Στην συνέχεια, προσδιορίστηκαν οι μετακινήσεις μεταξύ του κέντρου κάθε σπονδύλου και του κέντρου του πρώτου, προκειμένου να κατανοηθεί πως αυτές μεταβάλλονται σε σχέση με την βάση του κίονα (πίνακας 7.4). Στο στάδιο αυτό δεν κρίθηκε σκόπιμο να γίνει στατιστικός έλεγχος δεδομένου ότι οι μετακινήσεις μεταξύ των διαδοχικών σπονδύλων που προσδιορίστηκαν, ήταν στατιστικά σημαντικές, όπως διαπιστώθηκε από προηγούμενο έλεγχο (πίνακας 7.3).

Ακόμη, προσδιορίστηκε η στροφή κάθε σπονδύλου σε σχέση με τον πρώτο (πίνακας 7.4), προκειμένου να γίνει κατανοητό πως αυτές διαμορφώνονται σε όλο τον κορμό του κίονα. Παρατηρήθηκε ότι καθένας από τους σπονδύλους έχει μετακινηθεί αριστερόστροφα σε σχέση με τον 1<sup>ο</sup> ενώ το μέτρο των στροφών μεγιστοποιείται από τον 8<sup>ο</sup> μέχρι τον 11<sup>ο</sup> σπόνδυλο.

| $\alpha/\alpha$                          | $\delta S_{i,j}$<br>(mm) | $\sigma_{\delta S_{i,j}}$<br>(mm) | $\alpha_{\delta S_{i,j}}$<br>(grad) | Στροφές<br>(grad) |
|------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| Σπονδ. 1 <sup>ος</sup> -2 <sup>ος</sup>  | 12                       | ±0,6                              | 325                                 | -1,1              |
| Σπονδ. 1 <sup>ος</sup> -3 <sup>ος</sup>  | 15                       | ±0,5                              | 334                                 | -0,4              |
| Σπονδ. 1 <sup>ος</sup> 4 <sup>ος</sup>   | 18                       | ±0,6                              | 337                                 | -0,6              |
| Σπονδ. 1 <sup>ος</sup> 5 <sup>ος</sup>   | 30                       | ±0,7                              | 341                                 | -1,9              |
| Σπονδ. 1 <sup>ος</sup> -6 <sup>ος</sup>  | 35                       | ±0,7                              | 343                                 | -1,6              |
| Σπονδ. 1 <sup>ος</sup> -7 <sup>ος</sup>  | 41                       | ±0,6                              | 343                                 | -2,0              |
| Σπονδ. 1 <sup>ος</sup> -8 <sup>ος</sup>  | 61                       | ±0,6                              | 351                                 | -4,5              |
| Σπονδ. 1 <sup>ος</sup> -9 <sup>ος</sup>  | 70                       | ±0,7                              | 350                                 | -4,7              |
| Σπονδ. 1 <sup>ος</sup> -10 <sup>ος</sup> | 71                       | ±0,8                              | 347                                 | -5,0              |
| Σπονδ. 1 <sup>ος</sup> -11 <sup>ος</sup> | 66                       | ±0,6                              | 341                                 | -5,0              |
| Σπονδ. 1 <sup>ος</sup> -12 <sup>ος</sup> | 62                       | ±0,7                              | 338                                 | -2,0              |
| Σπονδ. 1 <sup>ος</sup> -13 <sup>ος</sup> | 58                       | ±0,9                              | 336                                 | -1,8              |

Πίνακας 7.4: Μετακινήσεις σπονδύλων με τις αβεβαιότητές τους, διεύθυνση διανυσμάτων μετακίνησης και στροφές

Table 7.4: Displacements of drums with their standard deviations, direction of displacement vectors, and rotations

#### 7.4.2 Οι οπτικές εκλεπτύνσεις του κίονα

Στην παράγραφο αυτή, εκτιμώνται οι εκλεπτύνσεις του κίονα που είναι δυνατό να εντοπισθούν, μέσω κατάλληλης επεξεργασίας από την μοντελοποιημένη επιφάνεια.

**i) Η μείωση και ένταση του κίονα**

Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά στοιχεία των κίωνων είναι η σταδιακή **μείωση** της διαμέτρου τους καθώς αυξάνει το ύψος τους. Στον πίνακα 7.5 δίνονται οι διάμετροι των 3 τομών κάθε σπονδύλου με τις αβεβαιότητές τους και παρουσιάζεται η χαρακτηριστική μείωση. Η μέγιστη διαφορά μεταξύ της διαμέτρου της άνω έδρας του 13<sup>ου</sup> σπονδύλου από την διάμετρο της κάτω έδρα του 1<sup>ου</sup> σπονδύλου είναι ίση με 0,273m και πρόκειται για την συνολική μείωση του κίονα.

Ως **ένταση** νοείται η έξαρση του κίονα στις οριζόντιες διαστάσεις. Σε κάθε αρμό μετά την κάτω έδρα, η διάμετρος του κάθε σπονδύλου είναι λίγο μεγαλύτερη απ’όσο θα ήταν αν δεν υπήρχε ένταση. Αν υπολογισθεί η μείωση ανά μονάδα ύψους σε κάθε σπόνδυλο, διαιρώντας τη μείωση με το ύψος του, παρατηρείται ότι ο λόγος αυτός συνεχώς αυξάνεται προς τα πάνω και είναι πάντα μεγαλύτερος από τη συνολική μείωση του κορμού προς το ύψος του (Ζάμπας, 1998). Πρέπει δηλαδή να ισχύει η σχέση:

$$\frac{\mu_{i+1}}{h_{i+1}} > \frac{\mu_i}{h_i} > \frac{\mu}{h} = \frac{d_{\kappa} - d_{\alpha}}{2h} \quad (7.3)$$

Όπου:  $\mu_i$ , η διαφορά της ακτίνας της άνω έδρα ενός σπονδύλου από την κάτω  
 $\mu$ , η διαφορά της άνω έδρας του 13<sup>ου</sup> σπονδύλου από την κάτω έδρα του 1<sup>ου</sup>  
 $h_i$ , το ύψος του σπονδύλου  
 $d_{\kappa}, d_{\alpha}$ , η διάμετρος της κάτω έδρας του 1<sup>ου</sup> σπονδύλου και της άνω έδρας  
 του 13<sup>ου</sup> σπονδύλου αντίστοιχα

Προκειμένου λοιπόν να γίνει φανερή η ένταση ενός κίονα αρκεί να συγκριθεί ο λόγος της μείωσης προς το ύψος μεταξύ δύο σπονδύλων (σχέση 7.3). Στον πίνακα 7.5 παρουσιάζονται οι προαναφερθέντες λόγοι για κάθε σπόνδυλο, οι οποίοι αποδεικνύουν και την ύπαρξη της έντασης στον κίονα.

Στη συνέχεια υπολογίσθηκε το μέτρο της έντασης μέσω της σχέσης:

$$f_i = \frac{H_i}{h} * \mu - \frac{d_{\kappa} - d_i}{2} \quad (7.4)$$

Όπου:  $f_i$ , το μέτρος της έντασης κάθε σπονδύλου  
 $H_i$ , το ύψος κάθε σπονδύλου μετρημένο από την κάτω έδρα του

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΙΟΝΑ

$h$ , το συνολικό ύψος του κίονα

$\mu$ , η συνολική μείωση του κίονα

$d_k$ , η διάμετρος της κάτω έδρας του 1<sup>ου</sup> σπονδύλου

$d_a$ , η διάμετρος της άνω έδρας του 13<sup>ου</sup> σπονδύλου

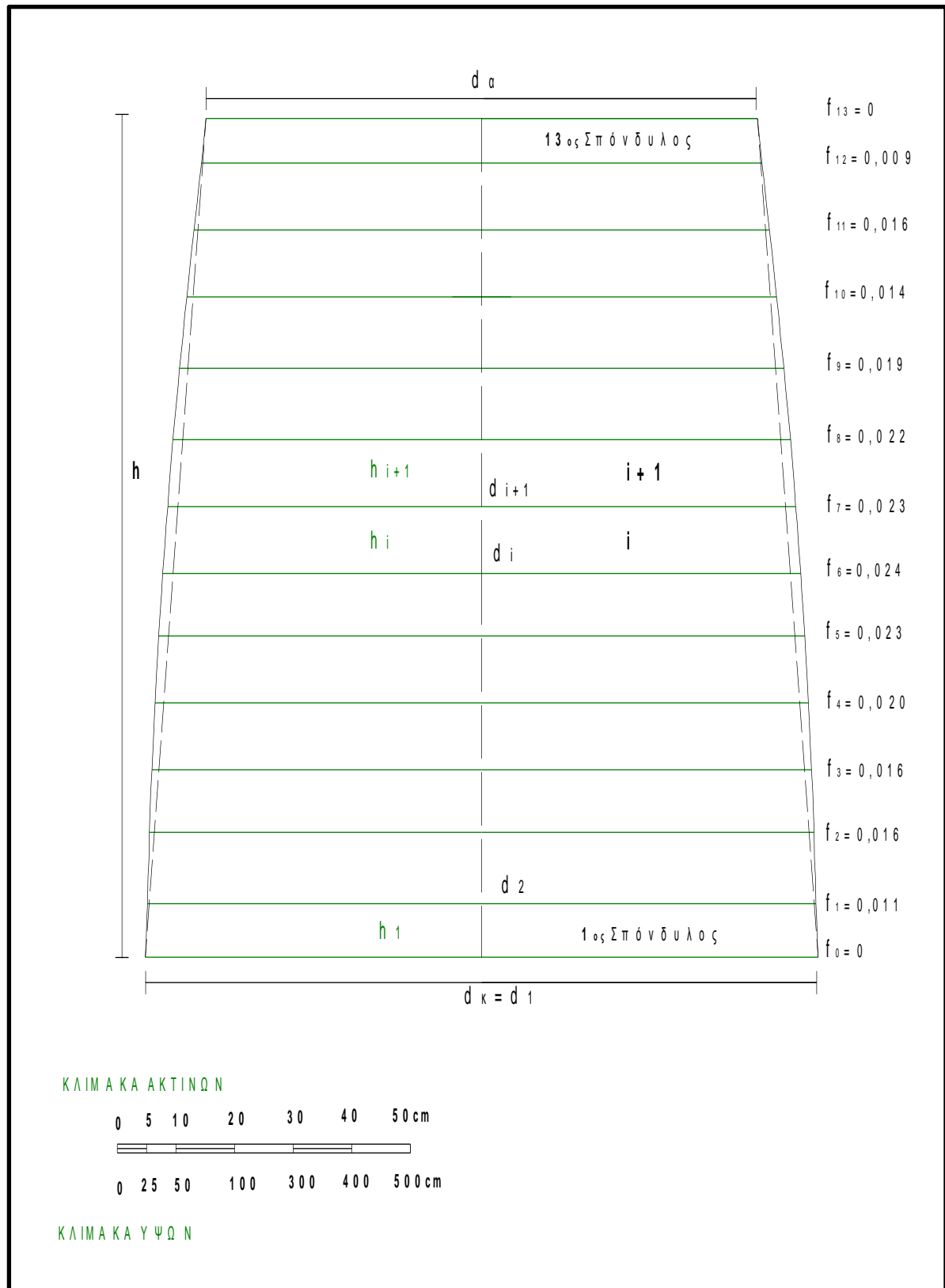
Οι υπολογισθείσες τιμές της έντασης σε κάθε σπόνδυλο παρουσιάζονται στον πίνακα 7.5.

Όπως έχει αναφερθεί, η ένταση γίνεται μέγιστη περίπου στα 2/5 του ύψους των κίωνων. Στον συγκεκριμένο κίονα φαίνεται πως ισχύει αυτός ο κανόνας δεδομένου η ένταση μεγιστοποιήθηκε στο ύψος του 6<sup>ου</sup>-7<sup>ου</sup> σπονδύλου. Ακολουθεί σχήμα (σχήμα 7.3) στο οποίο φαίνεται αυτή η χαρακτηριστική καμπύλωση του κορμού του κίονα. Οι οριζόντιες διαστάσεις (ακτίνες), στο σχήμα, απεικονίζονται σε έξαρση για την καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΙΟΝΑ

| α/α                           | ΤΟΜΕΣ | D (m) | $\sigma_D$ (mm) | $\frac{\mu_i}{h_i}$ | $f_i$ (m) | $f_i$ (m) Διαγρ/τος |
|-------------------------------|-------|-------|-----------------|---------------------|-----------|---------------------|
| 1 <sup>ος</sup><br>Σπόνδυλος  | ΚΑΤΩ  | 1,519 | ±2,1            | 0,0056              | 0         | 0                   |
|                               | ΜΕΣΗ  | 1,516 | ±0,7            |                     |           |                     |
|                               | ΠΑΝΩ  | 1,513 | ±1,3            |                     |           |                     |
| 2 <sup>ος</sup><br>Σπόνδυλος  | ΚΑΤΩ  | 1,510 | ±1,4            | 0,0057              | 0,011     | 0,009               |
|                               | ΜΕΣΗ  | 1,507 | ±0,7            |                     |           |                     |
|                               | ΠΑΝΩ  | 1,504 | ±0,7            |                     |           |                     |
| 3 <sup>ος</sup><br>Σπόνδυλος  | ΚΑΤΩ  | 1,501 | ±0,4            | 0,0064              | 0,016     | 0,009               |
|                               | ΜΕΣΗ  | 1,498 | ±0,5            |                     |           |                     |
|                               | ΠΑΝΩ  | 1,495 | ±0,5            |                     |           |                     |
| 4 <sup>ος</sup><br>Σπόνδυλος  | ΚΑΤΩ  | 1,491 | ±0,4            | 0,0098              | 0,016     | 0,015               |
|                               | ΜΕΣΗ  | 1,484 | ±0,5            |                     |           |                     |
|                               | ΠΑΝΩ  | 1,480 | ±0,5            |                     |           |                     |
| 5 <sup>ος</sup><br>Σπόνδυλος  | ΚΑΤΩ  | 1,477 | ±0,8            | 0,0124              | 0,020     | 0,018               |
|                               | ΜΕΣΗ  | 1,470 | ±0,8            |                     |           |                     |
|                               | ΠΑΝΩ  | 1,463 | ±0,6            |                     |           |                     |
| 6 <sup>ος</sup><br>Σπόνδυλος  | ΚΑΤΩ  | 1,460 | ±0,6            | 0,0126              | 0,023     | 0,020               |
|                               | ΜΕΣΗ  | 1,452 | ±0,8            |                     |           |                     |
|                               | ΠΑΝΩ  | 1,446 | ±0,7            |                     |           |                     |
| 7 <sup>ος</sup><br>Σπόνδυλος  | ΚΑΤΩ  | 1,441 | ±0,4            | 0,0136              | 0,024     | 0,024               |
|                               | ΜΕΣΗ  | 1,433 | ±0,6            |                     |           |                     |
|                               | ΠΑΝΩ  | 1,427 | ±0,6            |                     |           |                     |
| 8 <sup>ος</sup><br>Σπόνδυλος  | ΚΑΤΩ  | 1,419 | ±0,7            | 0,0142              | 0,023     | 0,023               |
|                               | ΜΕΣΗ  | 1,412 | ±0,7            |                     |           |                     |
|                               | ΠΑΝΩ  | 1,404 | ±0,6            |                     |           |                     |
| 9 <sup>ος</sup><br>Σπόνδυλος  | ΚΑΤΩ  | 1,395 | ±0,6            | 0,0191              | 0,022     | 0,022               |
|                               | ΜΕΣΗ  | 1,384 | ±0,7            |                     |           |                     |
|                               | ΠΑΝΩ  | 1,372 | ±0,8            |                     |           |                     |
| 10 <sup>ος</sup><br>Σπόνδυλος | ΚΑΤΩ  | 1,365 | ±0,8            | 0,0202              | 0,019     | 0,016               |
|                               | ΜΕΣΗ  | 1,351 | ±1,0            |                     |           |                     |
|                               | ΠΑΝΩ  | 1,343 | ±0,8            |                     |           |                     |
| 11 <sup>ος</sup><br>Σπόνδυλος | ΚΑΤΩ  | 1,332 | ±0,9            | 0,0207              | 0,014     | 0,012               |
|                               | ΜΕΣΗ  | 1,319 | ±0,6            |                     |           |                     |
|                               | ΠΑΝΩ  | 1,312 | ±0,6            |                     |           |                     |
| 12 <sup>ος</sup><br>Σπόνδυλος | ΚΑΤΩ  | 1,300 | ±0,9            | 0,0215              | 0,009     | 0,009               |
|                               | ΜΕΣΗ  | 1,285 | ±0,8            |                     |           |                     |
|                               | ΠΑΝΩ  | 1,276 | ±0,8            |                     |           |                     |
| 13 <sup>ος</sup><br>Σπόνδυλος | ΚΑΤΩ  | 1,267 | ±1,0            | 0,0217              | 0         | 0                   |
|                               | ΜΕΣΗ  | 1,256 | ±1,0            |                     |           |                     |
|                               | ΠΑΝΩ  | 1,246 | ±2,0            |                     |           |                     |

Πίνακας 7.5: Ένταση και διάμετροι σπονδύλων με τις αβεβαιότητες τους για κάθε τομή  
 Table 7.5: Entasis and diameters with their standard deviations for each cross section



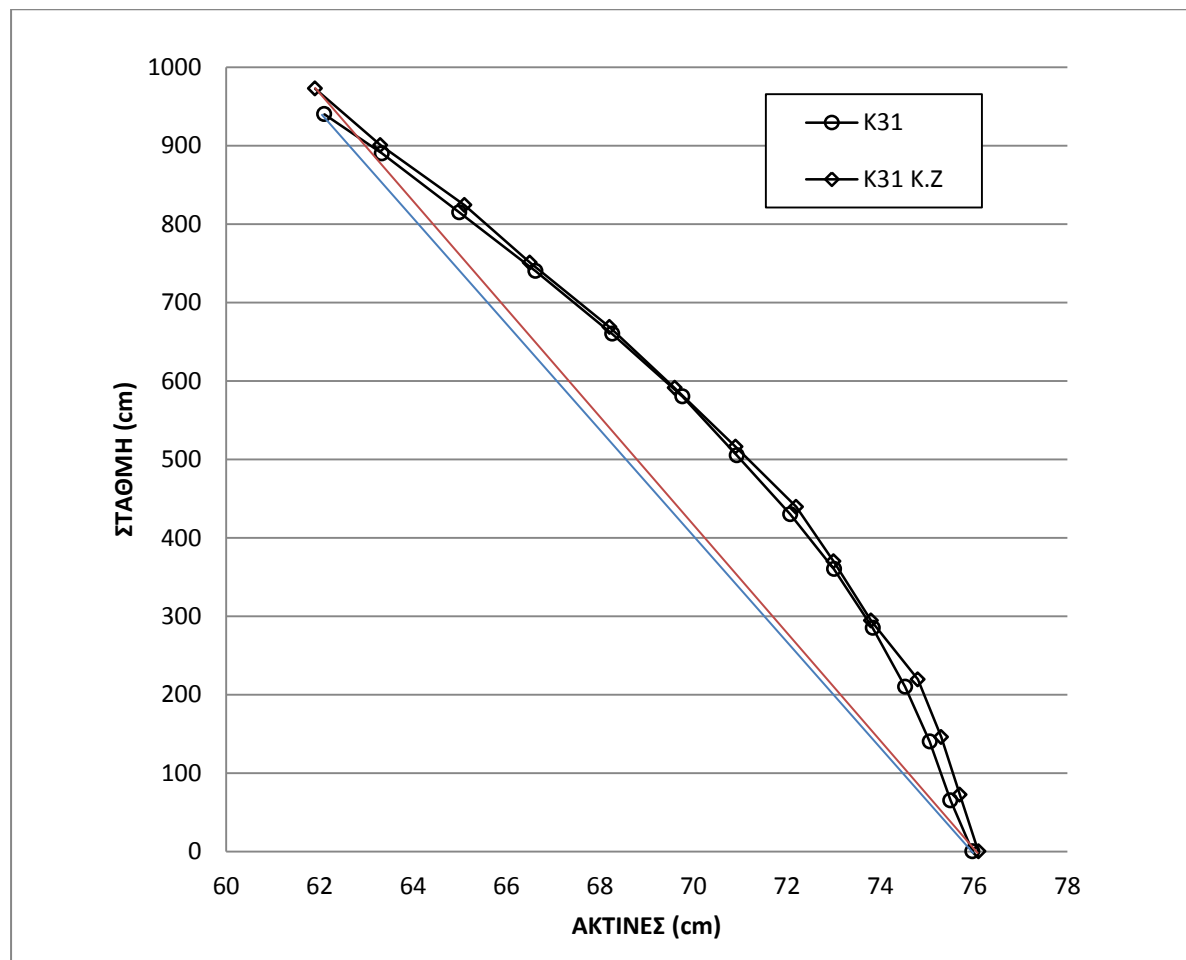
**Σχήμα 7.3:** Ένταση κίονα με τις οριζόντιες διαστάσεις σε έξαρση  
**Figure 7.3:** Entasis of column with the horizontal dimensions deformed

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΙΟΝΑ

Ακόμη δημιουργήθηκε διάγραμμα (διάγραμμα 7.1) στο οποίο απεικονίζεται ακριβώς αυτή η ύπαρξη της έντασης. Για την δημιουργία του άξονα των τετμημένων χρησιμοποιήθηκαν οι ακτίνες της κάτω έδρας κάθε σπονδύλου, ενώ στον άξονα των τεταγμένων τοποθετήθηκαν οι αντίστοιχες στάθμες τους. Αν δεν υπήρχε αυτή η χαρακτηριστική καμπύλωση του κίονα, τότε τα ακραία σημεία της κάτω έδρας του πρώτου και τελευταίου σπονδύλου θα ενώνονταν με ευθεία γραμμή.

Στην συνέχεια, μετρήθηκαν οι οριζόντιες αποστάσεις από κάθε σημείο του διαγράμματος μέχρι την ευθεία που ενώνει τα δύο ακραία σημεία (της κάτω έδρας του 1<sup>ου</sup> σπονδύλου, και της άνω έδρας του 13<sup>ου</sup> σπονδύλου). Οι αποστάσεις αποτελούν το μέτρο της έντασης του κίονα στην συγκεκριμένη στάθμη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 7.5.

Στο διάγραμμα 7.1 απεικονίζεται ακόμη η καμπύλη της έντασης όπως υπολογίσθηκε στον K31 στα πλαίσια της αναστήλωσης κίωνων της περίπτωσης του ναού του Νεμείου Διός (Ζάμπας Κ.).



**Διάγραμμα 7.1:** Ένταση κίονα  
**Diagram 7.1:** Column's entasis

**ii) Η κλίση του κίονα**

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται ο υπολογισμός των κλίσεων του κίονα, οι οποίες παρουσιάστηκαν εκτενώς στο κεφάλαιο 3.2.

Αρχικά, η κλίση του πρώτου σπονδύλου ως προς την κατακόρυφο  $k_K$ , που μορφώνει την αντίστοιχη κλίση όλου του κίονα, υπολογίστηκε από την σχέση:

$$k_K = \frac{\sqrt{\Delta X^2_{\Pi-K} + \Delta Y^2_{\Pi-K}}}{\Delta H_{\Pi-K}} = 3,49 \text{ ‰} \quad (7.5)$$

Όπου  $\Delta X_{\Pi-K}$ ,  $\Delta Y_{\Pi-K}$ ,  $\Delta H_{\Pi-K}$ , οι διαφορές των τετμημένων, τεταγμένων και των υψομέτρων μεταξύ της πάνω και κάτω τομής του 1<sup>ου</sup> σπονδύλου.

Παρατηρείται ότι η τιμή αυτή συμφωνεί με την αντίστοιχη κλίση των αναστηλωμένων κίωνων του ναού η οποία είναι ίση με 3,5 ‰.

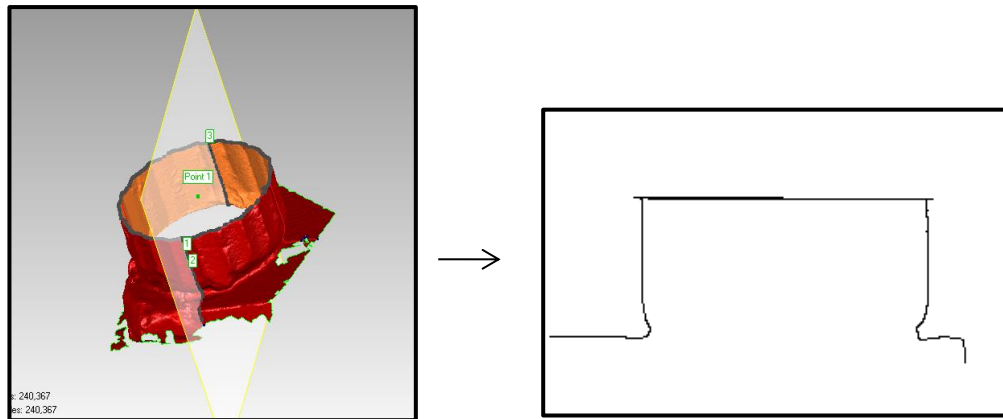
Η εγκάρσια κλίση του κίονα ως προς τον στυλοβάτη,  $k_\Sigma$ , προσδιορίστηκε βάσει των άνισων υψών του πρώτου σπονδύλου σύμφωνα με την σχέση:

$$k_\Sigma = \frac{h_1 - h_{11}}{d_k} \quad (7.6)$$

Όπου  $d_k$  : η κάτω διάμετρος του πρώτου σπονδύλου στο βάθος των ραβδώσεων

Για τον προσδιορισμό της  $k_\Sigma$ , προσδιορίστηκαν τα άνισα ύψη της πρόσθιας και οπίσθιας αξονικής ράβδωσης του πρώτου σπονδύλου  $h_1$  και  $h_{11}$  μέσω κατάλληλης επεξεργασίας της μοντελοποιημένης επιφάνειας του νέφους σημείων. Προκειμένου να μετρηθούν τα παραπάνω ύψη, απομονώθηκε ο πρώτος σπόνδυλος του κίονα μέσω κατάλληλης τομής στον αρμό του με τον δεύτερο σπόνδυλο. Δεδομένης της γεωμετρίας των κίωνων, η άνω έδρα του πρώτου σπονδύλου δεν είναι οριζόντια, επομένως η τομή που υλοποιήθηκε ήταν πλάγια.

Αφού απομονώθηκε ο πρώτος σπόνδυλος, πραγματοποιήθηκε κατακόρυφη τομή σε αυτόν. Συγκεκριμένα υλοποιήθηκε επίπεδο το οποίο να περνά από την πρόσθια και οπίσθια αξονική ράβδωση καθώς και από το κέντρο του σπονδύλου. Προκειμένου να εξασφαλισθεί ότι η τομή που υλοποιήθηκε είναι η επιθυμητή, έγιναν δοκιμαστικές τομές και στις ραβδώσεις δεξιά και αριστερά αυτής. Στη συνέχεια μετρήθηκαν τα άνισα ύψη και τελικά επιλέχθηκε εκείνη η τομή η οποία υλοποιεί το ελάχιστο ύψος στην οπίσθια αξονική ράβδωση  $h_{11}$  και παράλληλα το μέγιστο ύψος στην πρόσθια αξονική ράβδωση  $h_1$  (εικόνα 7.8).



**Εικόνα 7.8:** Τομή πρώτου σπονδύλου με κατάλληλο επίπεδο για τον προσδιορισμό των άνισων υψών

**Picture 7.8:** Cross section of the first drum with an appropriate plane for the determination of uneven height

Επομένως προσδιορίσθηκαν τα άνισα ύψη  $h_1$  και  $h_{11}$  πάνω στον κορμό του σπονδύλου και μέχρι την τομή αυτού με τον στυλοβάτη. Τελικά προέκυψαν  $h_1 = 0,725 m$  και  $h_{11} = 0,732m$  και μέσω της σχέσης 7.6:

$$k_{\Sigma} = 4,9\% \quad (7.7)$$

Επιπλέον, υπολογίσθηκε η εγκάρσια κλίση του στυλοβάτη μέσω της σχέσης:

$$k_E = k_{\Sigma} - k_K = 1,3\% \quad (7.8)$$

Τέλος, όσον αφορά την διαμήκη κλίση του στυλοβάτη  $k_{\Delta}$ , λόγω φθορών της αριστερής αξονικής ράβδωση του πρώτου σπονδύλου, δεν ήταν δυνατός ο υπολογισμός της.



κεφάλαιο 8  
ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ



### 8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η κατανομή των εργασιών που υλοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Οι εργασίες οι οποίες εκτελέστηκαν, διακρίνονται σε πρώτη ανάλυση σε εργασίες πεδίου και σε εργασίες γραφείου. Ειδικότερα, οι εργασίες πεδίου ολοκληρώθηκαν σε 15 ημέρες, καταλαμβάνοντας το 8% των συνολικών εργασιών, ενώ οι εργασίες γραφείου διήρκησαν 160 ημέρες με αντίστοιχο ποσοστό 92%. Ο μέσος όρος εργασιών ανά ημέρα εκτιμήθηκε ίσος με 7 ώρες (Διάγραμμα 8.1).

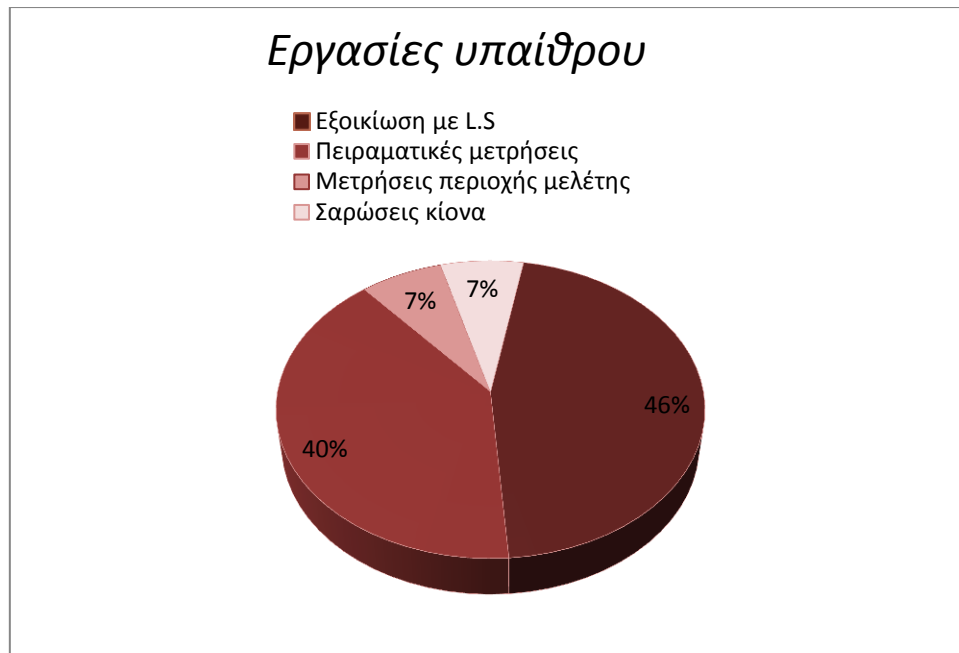


**Διάγραμμα 8.1:** Κατανομή των εργασιών της διπλωματικής εργασίας  
**Diagram 8.1:** Work distribution of this thesis

Πιο αναλυτικά, οι εργασίες **πεδίου** περιελάμβαναν:

- την εξοικείωση με τον τρισδιάστατο σαρωτή, η οποία διήρκησε 7 ημέρες
- τις μετρήσεις που έγιναν στα πλαίσια των πειραματικών σαρώσεων (ίδρυση και μετρήσεις οδεύσεων και χωροσταθμίσεις), διάρκειας 6 ημερών
- την αναγνώριση της περιοχής μελέτης, την ίδρυση δικτύου ελέγχου και την μέτρηση των στοιχείων του διάρκειας μίας ημέρας
- τις σαρώσεις του κίονα οι οποίες επίσης διήρκησαν μία ημέρα

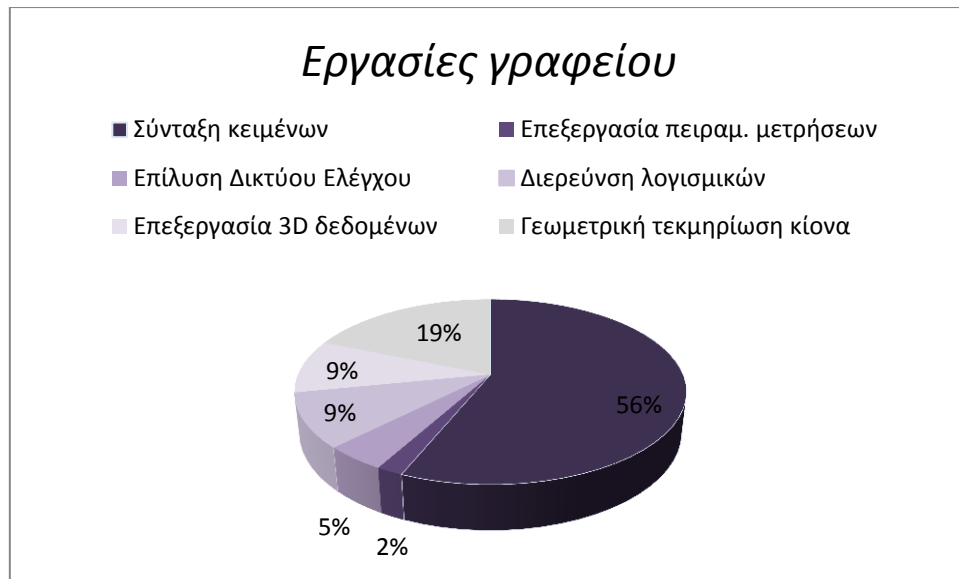
Οι εργασίες υπαίθρου εκτελέστηκαν κατά τις περιόδους Μαΐου-Ιουνίου 2013 και Φεβρουαρίου 2014. Ακολουθεί διάγραμμα με την κατανομή των εργασιών υπαίθρου.



**Διάγραμμα 8.2:** Κατανομή των εργασιών υπαίθρου  
**Diagram 8.2:** Field work distribution

Οι εργασίες **γραφείου** περιελάμβαναν:

- την επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων διάρκειας 3 ημερών
- την επεξεργασία των στοιχείων του Δικτύου Οριζοντίου και Κατακόρυφου Ελέγχου και την επίλυσή τους, διάρκειας 7 ημερών
- την διερεύνηση για την επιλογή του πιο κατάλληλου λογισμικού επεξεργασίας των νεφών σημείων η οποία διήρκησε 15 ημέρες
- την επεξεργασία των τρισδιάστατων δεδομένων σάρωσης, διάρκειας 15 ημερών
- τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων και των οπτικών εκλεπτύνσεων του κίονα διάρκειας 30 ημερών και τέλος,
- την συγγραφή των κειμένων η οποία διήρκησε 90 ημέρες.



**Διάγραμμα 8.3:** Κατανομή των εργασιών γραφείου  
**Diagram 8.3:** Office work distribution



Κεφάλαιο 9  
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ





## 9.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παρούσα διπλωματική εργασία προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα από την μελέτη του κίονα, καθώς και από τις πειραματικές σαρώσεις. Αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

### 9.1.1 Συμπεράσματα από την μελέτη του κίονα

Συμπεραίνεται, πως με την εφαρμογή κατάλληλης μεθοδολογίας μπορεί να προσδιορισθεί το μεγαλύτερο μέρος των στοιχείων του κίονα τα οποία είναι απαραίτητα σε πιθανές, μελλοντικές εργασίες αναστήλωσης του μνημείου. Σε κάθε περίπτωση απαιτούνται και άμεσες μετρήσεις ώστε να εξασφαλισθεί η επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Κυρίως όμως, επιτυγχάνεται η αξιόπιστη τεκμηρίωση της υφιστάμενης κατάστασης του κίονα.

- Σχετικά με την ίδρυση **δικτύου οριζοντίου και κατακόρυφου ελέγχου**:

Δεδομένων των υψηλών απαιτήσεων σε ακρίβεια, κρίθηκε απαραίτητη η ίδρυση δικτύου ελέγχου. Μέσω του δικτύου ελέγχου, εξασφαλίσθηκε τελικά και η υψηλή ακρίβεια της γεωαναφοράς (πίνακας 7.1). Σημειώνεται ότι η αβεβαιότητα του οριζοντιογραφικού σφάλματος κυμάνθηκε από  $(+3mm) \div (+4mm)$  ενώ του υψομετρικού από  $(-1mm) \div (-4mm)$ .

Κατά συνέπεια η ίδρυση του δικτύου ελέγχου εξασφαλίζει τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων των δομικών στοιχείων του ναού του Νεμείου Διός, αξιόπιστα σε ενιαίο σύστημα αναφοράς. Επιπλέον, καθίσταται δυνατή η συσχέτιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών όλων των δομικών στοιχείων και των πιθανών παραμορφώσεών τους μεταξύ τους.

- Σχετικά με την **ταχύτητα των σαρώσεων** του κίονα:

Ο συνολικός χρόνος που απαιτήθηκε για τη σάρωση του κίονα ήταν της τάξης των 4h. Με δεδομένο ότι το βήμα σάρωσης ήταν 2mm συμπεραίνεται ότι σε μία ανθρωπομέρα είναι δυνατή η σάρωση δύο κίωνων με τη μέγιστη δυνατή πυκνότητα σημείων και τα απαιτούμενα ποσοστά επικάλυψης.

- Σχετικά με τον προσδιορισμό των **κέντρων** και **ακτίων** των σπονδύλων:

Με βάση τις αβεβαιότητες προσδιορισμού των οριζοντιογραφικών συντεταγμένων των κέντρων, καθώς και των ακτίων ( $\pm 1mm$  - πίνακας 7.2) συμπεραίνεται ότι η δημιουργία νεφών σημείων μέσω του σαρωτή, η επεξεργασία τους (τομές) σε

συνδυασμό με τη χρήση της Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων (προσομοίωση) δίνουν στατιστικά αξιόπιστα αποτελέσματα.

Για να προκύψουν ποιοτικά αποτελέσματα είναι σκόπιμο οι τομές των σπονδύλων να γίνονται σε τέτοιες θέσεις όπου δεν υπάρχουν σημαντικές φθορές.

- Σχετικά με την ανίχνευση των **μετακινήσεων** των σπονδύλων:

Σε όλον τον κίονα ανιχνεύονται στατιστικά σημαντικές μετακινήσεις μεταξύ των σπονδύλων του. Το μέτρο των μετακινήσεων κυμαίνεται από  $(3mm \div 21mm)$  (πίνακας 7.3), με τις μεγαλύτερες να ανιχνεύονται μεταξύ  $1^{ou} - 2^{ou}$  ( $12mm$ ),  $4^{ou} - 5^{ou}$  ( $12mm$ ) σπονδύλου καθώς και μεταξύ  $7^{ou} - 8^{ou}$  ( $21mm$ ) (πίνακας 7.3).

Από τη μελέτη των διανυσμάτων μετακίνησης (σχήμα 7.9 – πίνακας 7.3) διαπιστώνεται ότι οι σπόνδυλοι του κίονα μέχρι και τον  $9^o$  παρουσιάζουν σταδιακή μετακίνηση προς τα βορειοδυτικά. Στη συνέχεια αλλάζουν κατεύθυνση παρουσιάζοντας μετακίνηση προς τα ανατολικά.

Στατιστικά σημαντικές, όπως άλλωστε είναι αναμενόμενο, είναι και οι μετακινήσεις που υπολογίσθηκαν μεταξύ του  $1^{ou}$  και όλων των υπόλοιπων σπονδύλων. Το μέτρο τους κυμαίνεται από  $(12mm \div 70mm)$  (πίνακας 7.4).

- Όσον αφορά τις **στροφές των σπονδύλων** του κίονα:
  - i. Οι στροφές των σπονδύλων ως προς τον  $1^o$  ήταν όλες αριστερόστροφες. Το μέτρο των στροφών μεγιστοποιείται από τον  $8^o$  μέχρι τον  $11^o$  σπόνδυλο (πίνακας 7.4). Παρατηρείται ότι οι μέγιστες στροφές ανιχνεύονται στους σπονδύλους όπου ανιχνεύονται και οι μέγιστες μετατοπίσεις.
  - ii. Όσον αφορά τις στροφές μεταξύ διαδοχικών σπονδύλων, παρατηρείται ότι από τον  $8^o$  έως τον  $11^o$ , οι σπόνδυλοι στρέφονται (αριστερόστροφα) σαν ενιαίο σώμα.

Η μεθοδολογία που εφαρμόσθηκε έδωσε αξιόπιστο προσδιορισμό των στροφών των σπονδύλων.

- Σχετικά με τον προσδιορισμό ορισμένων **οπτικών εκλεπτύνσεων** του κίονα:

Μέσω της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε, προσδιορίστηκε αξιόπιστα το μεγαλύτερο μέρος των εκλεπτύνσεων του κίονα. Σε αυτό συνηγορεί και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχα στοιχεία της μελέτης αναστήλωσης (πίνακας 7.2 & διάγραμμα 7.1).

### 9.1.2 Συμπεράσματα πειραματικών εργασιών

- Όσον αφορά τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών δομικών στοιχείων (παράγραφοι 5.2 & 5.3), συμπεραίνεται ότι με την χρήση επίγειου σαρωτή και εφαρμογή αυστηρά ελεγχόμενης γεωδαιτικής μεθοδολογίας, αυτά μπορούν να προσδιορισθούν αξιόπιστα (πίνακες 5.3, 5.4 & 5.6).
- Με τους αυτοσχέδιους στόχους επιτεύχθηκε γεωαναφορά με σφάλματα αντίστοιχα των ειδικών στόχων που συνοδεύουν το όργανό (πίνακας 5.7). Επομένως αυτοσχέδιοι στόχοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν δεν διατίθενται οι ειδικοί στόχοι του σαρωτή.

## 9.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Από την παρούσα Διπλωματική Εργασία προκύπτουν οι παρακάτω προτάσεις:

- Η εφαρμογή της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στην παρούσα Διπλωματική Εργασία και στους δύο κίονες του πρόναου οι οποίοι παραμένουν ιστάμενοι από την αρχαιότητα και σύγκριση των στοιχείων τους με τα στοιχεία που προέκυψαν από τον κίονα K31.
- Η εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας και στους έξι αναστηλωμένους κίονες (K25 – K30) της βορειοανατολικής γωνίας της περίπτωσης, με σκοπό την τεκμηρίωση της αναστήλωσης.
- Η σάρωση όλων των υφιστάμενων, διάσπαρτων στον περιβάλλοντα χώρο του ναού, δομικών στοιχείων (σπόνδυλοι, κιονόκρανα, επιστύλια, γείσα κλπ.) για την ψηφιακή τεκμηρίωσή τους.
- Η σάρωση όλης της επιφάνειας της κρηπίδας (ευθυντηρία, 1<sup>ος</sup> και 2<sup>ος</sup> αναβαθμός, στυλοβάτης), με σκοπό την ανίχνευση των παραμορφώσεων της επιφάνειάς της, ιδιαίτερα στο βορειοδυτικό τμήμα της όπου έχουν ανιχνευθεί σημαντικού μεγέθους καθιζήσεις. Η σάρωση αυτή καθώς και του τοιχοβάτη, των τοίχων και του δαπέδου του σηκού δίνουν τη δυνατότητα δημιουργίας του ψηφιακού υποβάθρου που θα χρησιμοποιηθεί για την αναστήλωση του ναού.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Αγατζά-Μπαλοδήμου, Θεωρία σφαλμάτων και Συνορθώσεις I, Αθήνα 2007
2. Αγατζά-Μπαλοδήμου, Θεωρία σφαλμάτων και Συνορθώσεις II, Αθήνα 2009
3. Γεωργόπουλος Γ., Δογγούρης Σ., Λάμπρου Ε., Μπαλοδήμος Δ., Πανταζής Γ., «Σημειώσεις Τεχνικής Γεωδαισίας», Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π., Αθήνα 2005
4. «Εισαγωγή στη Γεωδαισία», Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π., Αθήνα 2008
5. Ζάμπας Κ., «Οι εκλεπτύνσεις των κίωνων του Παρθενώνος», Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π, Αθήνα 1998
6. Ζάμπας Κ., Μετρήσεις στον Κ31 στο πλαίσιο των αναστηλωτικών εργασιών του ναού του Νεμείου Διός
7. Μάκαρη Μ., «Έλεγχος αποκλίσεων, προσδιορισμός των γεωμετρικών στοιχείων ενός κίονα της περίπτωσης του ναού του Ηφαίστου», Διπλωματική Εργασία, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π., Αθήνα 2012
8. Μπαλοδήμος Δ., «Υψομετρία», Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004
9. Παγούνης Β., Σημειώσεις διαλέξεων, Εργαστήριο Γεωδαισίας, Τ.Ε.Ι.Αθηνών, Αθήνα 2013
10. Σκληρή Α., Μελέτη αναστήλωσης 4 κίωνων της ΒΑ γωνίας της περίπτωσης του ναού του Νεμείου Διός
11. Σκουρή Ι., «Χρήση επίγειου σαρωτή laser σε συνήθεις γεωδαιτικές εφαρμογές», Διπλωματική Εργασία, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π., 2010
12. Συμεωνίδης Π., «Σαρωτές laser, τεχνολογία, τεχνικές και εφαρμογές», Τ.Ε.Ι. Σερρών, Σέρρες 2007
13. Cyclone manual
14. Geomagic manual
15. Tsakiri M., Lichti D., Pfeifer N., «Terrestrial Laser Scanning for deformation monitoring», FIG Symposium, Baden, 2006

## **ΙΣΤΟΓΡΑΦΙΑ**

16. [www.culture.gr](http://www.culture.gr)
17. [www.el.wikipedia.org](http://www.el.wikipedia.org)
18. [www.opheltes.gr](http://www.opheltes.gr)
19. [www.nemeangames.org](http://www.nemeangames.org)
20. [www.nemea.gr](http://www.nemea.gr)



*ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι-  
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ*





**1. Επεξεργασία μετρήσεων πειραμάτων Εστίων**

**1<sup>α</sup>. Υπολογισμός οριζόντιων γωνιών**

| Από | Υ.Ο (m) | Προς | Υ.Σ. (m) | Θέση I (grad) | Θέση II (grad) | Μ. ΤΙΜΗ (grad) | Μ.Α.ΤΙΜΗ (grad) | Μ.Ο (grad)      |
|-----|---------|------|----------|---------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Σ5  | 1,239   | Σ8   | 0,1      | 0,0005        | 199,9922       | 399,9964       | 0,0000          | <b>99,7284</b>  |
|     |         | Σ6   | 0,1      | 99,7227       | 299,7192       | 99,7209        | 99,7245         |                 |
| Σ5  | 1,239   | Σ8   | 0,1      | 0,0000        | 199,9962       | 399,9981       | 0,0000          |                 |
|     |         | Σ6   | 0,1      | 99,7350       | 299,7257       | 99,7304        | 99,7323         |                 |
| Σ6  | 1,244   | Σ5   | 0,1      | 0,0000        | 199,9922       | 399,9964       | 0,0000          | <b>129,4321</b> |
|     |         | Σ7   | 0,1      | 129,4290      | 329,4271       | 129,428        | 129,4316        |                 |
| Σ6  | 1,244   | Σ5   | 0,1      | 0,0002        | 199,9951       | 399,9976       | 0,0000          |                 |
|     |         | Σ7   | 0,1      | 129,4324      | 329,4278       | 129,4301       | 129,4325        |                 |
| Σ7  | 1,234   | Σ6   | 0,1      | 0,0000        | 199,9927       | 399,9964       | 0,0000          | <b>72,0832</b>  |
|     |         | Σ8   | 0,7      | 72,0780       | 272,0782       | 72,0781        | 72,0817         |                 |
| Σ7  | 1,234   | Σ6   | 0,1      | 0,0000        | 199,9908       | 399,9946       | 0,0000          |                 |
|     |         | Σ8   | 0,7      | 72,0791       | 272,0792       | 72,0792        | 72,0846         |                 |
| Σ8  | 1,239   | Σ7   | 0,1      | 0,0000        | 199,9966       | 399,9983       | 0,0000          | <b>98,7926</b>  |
|     |         | Σ5   | 0,1      | 98,7962       | 298,792        | 98,7941        | 98,7958         |                 |
| Σ8  | 1,239   | Σ7   | 0,1      | 0,0000        | 199,9976       | 399,9988       | 0,0000          |                 |
|     |         | Σ5   | 0,1      | 98,7870       | 298,7894       | 98,7882        | 98,7894         |                 |

**1<sup>β</sup>. Υπολογισμός κατακόρυφων γωνιών**

| Από | Υ.Ο (m) | Προς | Υ.Σ. (m) | Θέση I (grad) | Θέση II (grad) | Μ. ΤΙΜΗ (grad) | Μ.Ο (grad) | S(m)  | D(m)  |
|-----|---------|------|----------|---------------|----------------|----------------|------------|-------|-------|
| Σ5  | 1,239   | Σ8   | 0,1      | 110,4485      | 289,5627       | 110,4429       | 110,4413   | 6,959 | 6,866 |
|     |         | Σ6   | 0,1      | 114,0431      | 285,9530       | 114,0450       | 114,0437   | 5,154 | 5,029 |
| Σ5  | 1,239   | Σ8   | 0,1      | 110,4395      | 289,5600       | 110,4398       |            |       |       |
|     |         | Σ6   | 0,1      | 114,0398      | 285,9551       | 114,0424       |            |       |       |
| Σ6  | 1,244   | Σ5   | 0,1      | 114,1903      | 285,8037       | 114,1933       | 114,1930   | 5,157 | 5,029 |
|     |         | Σ7   | 0,1      | 110,0193      | 289,9779       | 110,0207       | 110,0206   | 7,548 | 7,455 |
| Σ6  | 1,244   | Σ5   | 0,1      | 114,1923      | 285,8069       | 114,1927       |            |       |       |
|     |         | Σ7   | 0,1      | 110,0190      | 289,9779       | 110,0206       |            |       |       |
| Σ7  | 1,234   | Σ6   | 0,1      | 109,1695      | 290,8250       | 109,1722       | 109,1706   | 7,534 | 7,456 |
|     |         | Σ8   | 0,7      | 103,7530      | 296,2529       | 103,7500       | 103,7461   | 8,352 | 8,338 |
| Σ7  | 1,234   | Σ6   | 0,1      | 109,1685      | 290,8307       | 109,1689       |            |       |       |
|     |         | Σ8   | 0,7      | 103,7409      | 296,2565       | 103,7422       |            |       |       |
| Σ8  | 1,239   | Σ7   | 0,1      | 108,8791      | 291,1198       | 108,8796       | 108,8794   | 8,414 | 8,332 |
|     |         | Σ5   | 0,1      | 110,3592      | 289,6369       | 110,3612       | 110,3687   | 6,958 | 6,866 |
| Σ8  | 1,239   | Σ7   | 0,1      | 108,8777      | 291,1195       | 108,8791       |            |       |       |
|     |         | Σ5   | 0,1      | 110,3911      | 289,6386       | 110,3762       |            |       |       |

### 1<sup>γ</sup>. Επίλυση Γεωμετρικής Χωροστάθμησης

| α/α           | Μήκος σκόπευσης |       | Αναγνώσεις σταδίας |       | Μερικές ΔΗ (m) |        | Προσωρ. ΔΗ (m) | Διόρθ. (mm) | Οριστική ΔΗ (m) | H(m)           |
|---------------|-----------------|-------|--------------------|-------|----------------|--------|----------------|-------------|-----------------|----------------|
|               | Ο (m)           | Ε (m) | Ο (m)              | Ε (m) | +              | -      |                |             |                 |                |
| <b>ALLER</b>  |                 |       |                    |       |                |        |                |             |                 |                |
| Σ5            | 3,74            |       | 1,157              |       |                |        |                |             |                 | <b>100,000</b> |
| Σ6            | 4,14            | 3,80  | 1,134              | 1,154 | 0,003          |        | 0,0030         | 0,25        | 0,0033          | <b>100,003</b> |
| Σ7            | 5,38            | 4,70  | 1,173              | 1,179 |                | -0,045 | -0,0455        | 0,25        | -0,0453         | <b>99,958</b>  |
| Σ8            | 4,07            | 4,00  | 1,130              | 1,135 | 0,038          |        | 0,0380         | 0,25        | 0,0383          | <b>99,996</b>  |
| Σ5            |                 | 3,89  |                    | 1,126 | 0,004          |        | 0,0040         | 0,25        | 0,0043          | <b>100,001</b> |
| <b>RETOUR</b> |                 |       |                    |       |                |        |                |             |                 |                |
| Σ5            | 3,91            |       | 1,125              |       |                |        |                |             |                 |                |
| Σ8            | 4,41            | 3,92  | 1,130              | 1,129 |                | -0,004 |                |             |                 |                |
| Σ7            | 4,70            | 3,61  | 1,171              | 1,168 |                | -0,038 |                |             |                 |                |
| Σ6            | 3,42            | 3,42  | 1,124              | 1,125 | 0,046          |        |                |             |                 |                |
| Σ5            |                 | 3,44  |                    | 1,127 |                | -0,003 |                |             |                 |                |

### 1<sup>δ</sup>. Υπολογισμός Τοποσταθερών

| Από | Υ.Ο (m) | Προς | Υ.Σ (m) | Hor (grad) | V (grad) | D (m) | S(m)  | Χ(m)            | Υ(m)            | H(m)           |
|-----|---------|------|---------|------------|----------|-------|-------|-----------------|-----------------|----------------|
| Σ8  | 1,520   | Σ5   | 1,5     | 0,0000     |          | 6,878 | 6,878 | <b>1000,000</b> | <b>1000,000</b> | <b>100,000</b> |
|     |         | 1    | 0,0     | 341,9644   | 93,0894  | 4,406 | 4,432 | <b>1003,501</b> | <b>1004,170</b> | <b>101,996</b> |
|     |         | 2    | 0,0     | 340,9495   | 113,0671 | 4,437 | 4,532 | <b>1003,569</b> | <b>1004,207</b> | <b>100,593</b> |
|     |         | 3    | 0,0     | 345,9395   | 99,2648  | 4,473 | 4,473 | <b>1003,375</b> | <b>1003,915</b> | <b>101,568</b> |
| Σ6  | 1,522   | Σ5   | 1,5     | 399,9998   |          | 5,041 | 5,041 | <b>1005,047</b> | <b>999,999</b>  | <b>100,033</b> |
|     |         | 4    | 0,0     | 77,7564    | 100,4526 | 3,912 | 3,912 | <b>1003,708</b> | <b>1003,675</b> | <b>101,498</b> |
|     |         | 5    | 0,0     | 82,3394    | 114,4559 | 4,088 | 4,196 | <b>1003,927</b> | <b>1003,931</b> | <b>100,581</b> |

## 2. Επεξεργασία μετρήσεων πειραμάτων περιοχής Λαμπαδαρίου

### 2<sup>α</sup>. Υπολογισμός οριζόντιων γωνιών

| Από | Υ.Ο (m) | Προς | Υ.Σ (m) | Θέση I (grad) | Θέση II (grad) | Μ. ΤΙΜΗ (grad) | Μ.Α.ΤΙΜΗ (grad) |
|-----|---------|------|---------|---------------|----------------|----------------|-----------------|
| Σ1  | 1,461   | Σ4   | 0,100   | 0,0000        | 200,0005       | 0,0002         | 0,0000          |
|     |         | Σ2   | 0,100   | 362,4496      | 162,4441       | 362,4468       | 362,4466        |
| Σ2  | 1,416   | Σ1   | 0,100   | 0,0000        | 200,0012       | 0,0006         | 0,0000          |
|     |         | Σ3   | 0,100   | 231,8341      | 31,8290        | 231,8316       | 231,8310        |
| Σ3  | 1,426   | Σ2   | 0,100   | 0,0000        | 200,0028       | 0,0014         | 0,0000          |
|     |         | Σ4   | 0,100   | 368,1112      | 168,1095       | 368,1104       | 368,109         |
| Σ4  | 1,414   | Σ3   | 0,100   | 399,9999      | 199,9942       | 399,997        | 0,0000          |
|     |         | Σ1   | 0,100   | 237,6165      | 37,6107        | 237,6136       | 237,6166        |

## 2<sup>β</sup>. Υπολογισμός κατακόρυφων γωνιών

| Από | Υ.Ο<br>(m) | Προς | Υ.Σ.<br>(m) | Θέση I<br>(grad) | Θέση II<br>(grad) | Μ. ΤΙΜΗ<br>(grad) | Μ.Ο<br>(grad) | S(m)  |
|-----|------------|------|-------------|------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------|
| Σ1  | 1,461      | Σ4   | 0,100       | 115,4351         | 284,5602          | 115,4374          | 5,647         | 5,482 |
|     |            | Σ2   | 0,100       | 120,5194         | 279,4859          | 120,5168          | 4,270         | 4,050 |
| Σ2  | 1,416      | Σ1   | 0,100       | 119,8726         | 280,1261          | 119,8732          | 4,254         | 4,048 |
|     |            | Σ3   | 0,100       | 112,9809         | 287,0157          | 112,9826          | 6,489         | 6,355 |
| Σ3  | 1,426      | Σ2   | 0,100       | 112,9890         | 287,0012          | 112,9939          | 6,488         | 6,353 |
|     |            | Σ4   | 0,100       | 116,1627         | 283,8312          | 116,1658          | 5,240         | 5,072 |
| Σ4  | 1,414      | Σ3   | 0,100       | 116,0692         | 283,9289          | 116,0702          | 5,238         | 5,072 |
|     |            | Σ1   | 0,100       | 114,8551         | 285,1417          | 114,8567          | 5,634         | 5,481 |

## 2<sup>γ</sup>. Επίλυση Γεωμετρικής Χωροστάθμισης

| α/α           | Μήκος<br>σκόπευσης |          | Αναγνώσεις<br>σταδίας |          | Μερικές ΔΗ<br>(m) |        | Προσωρ.<br>ΔΗ (m) | Διόρθ.<br>(mm) | Οριστική<br>ΔΗ (m) | H(m)           |
|---------------|--------------------|----------|-----------------------|----------|-------------------|--------|-------------------|----------------|--------------------|----------------|
|               | Ο<br>(m)           | Ε<br>(m) | Ο<br>(m)              | Ε<br>(m) | +                 | -      |                   |                |                    |                |
| <b>ALLER</b>  |                    |          |                       |          |                   |        |                   |                |                    |                |
| Σ1            | 2,93               |          | 1,303                 |          |                   |        |                   |                |                    | <b>100,000</b> |
| Σ4            | 3,16               | 3,16     | 1,258                 | 1,305    |                   | -0,002 | -0,0020           | -0,75          | -0,0028            | <b>99,997</b>  |
| Σ3            | 3,82               | 2,87     | 1,269                 | 1,261    |                   | -0,003 | -0,0015           | -0,75          | -0,0023            | <b>99,995</b>  |
| Σ2            | 3,36               | 3,67     | 1,229                 | 1,264    | 0,005             |        | 0,0055            | -0,75          | 0,0048             | <b>100,000</b> |
| Σ1            |                    | 3,38     |                       | 1,228    | 0,001             |        | 0,0005            | -0,75          | -0,0003            | <b>100,000</b> |
| <b>RETOUR</b> |                    |          |                       |          |                   |        |                   |                |                    |                |
| Σ1            | 3,27               |          | 1,205                 |          |                   |        |                   |                |                    |                |
| Σ2            | 3,34               | 3,26     | 1,247                 | 1,205    | 0,000             | 0,000  |                   |                |                    |                |
| Σ3            | 4,58               | 3,37     | 1,259                 | 1,253    |                   | -0,006 |                   |                |                    |                |
| Σ4            | 3,28               | 3,96     | 1,257                 | 1,259    | 0,000             | 0,000  |                   |                |                    |                |
| Σ1            |                    | 3,15     |                       | 1,255    | 0,002             |        |                   |                |                    |                |

## 3. Προσομοίωση Τοποσταθρών (Μ.Ε.Τ)

$$\widehat{V}_{\hat{x}} = \widehat{\sigma}_o^2 (A^T A)^{-1} = 0,0018^2 (A^T A)^{-1} = 10^{-6} * [...] (m^2)$$

$$\widehat{V}_{\hat{x}} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 5,0122 & 1,6104 & 0,3829 \\ \hline 1,6104 & 4,7913 & -0,4345 \\ \hline 0,3829 & -0,4345 & 2,2157 \\ \hline \end{array}$$



*ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ-  
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ*



**1. Επεξεργασία μετρήσεων Δικτύου της περιοχής μελέτης**

**1<sup>α</sup>. Υπολογισμός οριζόντιων γωνιών**

| Από | Υ.Ο (m) | Προς | Υ.Σ. (m) | Θέση I (grad) | Θέση II (grad) | Μ. ΤΙΜΗ (grad) | Μ.Α.ΤΙΜΗ (grad) |
|-----|---------|------|----------|---------------|----------------|----------------|-----------------|
| Σ7  | 1,434   | Σ22  | 1,697    | 0,0025        | 200,0095       | 0,0060         | 0,0000          |
|     |         | Σ20  | 1,292    | 144,7240      | 344,7185       | 144,7213       | 144,7153        |
|     |         | Σ8   | 1,689    | 315,2745      | 115,2755       | 315,2750       | 315,2690        |
|     |         | Σ21  | 1,384    | 81,0525       | 281,0490       | 81,0508        | 81,0448         |
| Σ20 | 1,486   | Σ3   | 1,624    | 62,0015       | 262,0015       | 62,0015        | 61,9955         |
|     |         | Σ3   | 1,514    | 0,0005        | 0,0055         | 0,0030         | 0,0000          |
|     |         | Σ22  | 1,642    | 363,778       | 163,7775       | 363,7778       | 363,7748        |
|     |         | Σ7   | 1,532    | 341,136       | 141,1395       | 341,1378       | 341,1348        |
| Σ22 | 1,519   | Σ8   | 1,544    | 327,0685      | 127,0695       | 327,069        | 327,0660        |
|     |         | Σ3   | 1,624    | 0,0000        | 0,0000         | 199,9965       | 399,9983        |
|     |         | Σ21  | 1,384    | 397,6580      | 397,6580       | 197,6590       | 397,6585        |
|     |         | Σ8   | 1,683    | 156,7458      | 156,7458       | 356,7470       | 156,7464        |
| Σ21 | 1,411   | Σ20  | 1,404    | 56,3995       | 56,3995        | 256,3980       | 56,3988         |
|     |         | Σ7   | 1,772    | 89,0320       | 89,0320        | 289,0330       | 89,0325         |
|     |         | Σ3   | 1,615    | 0,0005        | 200,0065       | 0,0035         | 0,0000          |
|     |         | Σ7   | 1,772    | 374,9615      | 174,9620       | 374,9618       | 374,9583        |
| Σ3  | 1,524   | Σ22  | 1,634    | 2,5525        | 202,5520       | 2,5523         | 2,5488          |
|     |         | Σ22  | 1,634    | 0,0000        | 200,0070       | 0,0035         | 0,0000          |
|     |         | Σ7   | 1,772    | 351,0285      | 151,0320       | 351,0303       | 351,0268        |
|     |         | Σ21  | 1,603    | 195,1295      | 395,1275       | 195,1285       | 195,1250        |
|     |         | Σ20  | 1,512    | 292,6495      | 92,6460        | 292,6478       | 292,6443        |

**1<sup>β</sup>. Υπολογισμός κατακόρυφων γωνιών**

| Από | Υ.Ο (m) | Προς | Υ.Σ. (m) | Θέση I (grad) | Θέση II (grad) | Μ. ΤΙΜΗ (grad) | Μ.Ο (grad) | Σ(m)   |
|-----|---------|------|----------|---------------|----------------|----------------|------------|--------|
| Σ7  | 1,434   | Σ22  | 1,697    | 98,7410       | 301,2535       | 98,7438        | 12,018     | 12,015 |
|     |         | Σ20  | 1,292    | 105,7485      | 294,2530       | 105,7478       | 16,977     | 16,907 |
|     |         | Σ8   | 1,689    | 98,7845       | 301,2130       | 98,7858        | 15,461     | 15,458 |
|     |         | Σ21  | 1,384    | 104,4025      | 295,5985       | 104,4020       | 28,411     | 28,343 |
| Σ20 | 1,486   | Σ3   | 1,624    | 104,7540      | 295,2465       | 104,7538       | 17,060     | 17,013 |
|     |         | Σ3   | 1,514    | 100,1610      | 299,8425       | 100,1593       | 20,520     | 20,520 |
|     |         | Σ22  | 1,642    | 96,3520       | 303,6505       | 96,3508        | 26,366     | 26,322 |
|     |         | Σ7   | 1,532    | 94,6185       | 305,3835       | 94,6175        | 16,969     | 16,908 |
| Σ22 | 1,519   | Σ8   | 1,544    | 97,0035       | 302,9970       | 97,0033        | 31,543     | 31,508 |
|     |         | Σ3   | 1,624    | 105,9155      | 294,0825       | 105,9165       | 14,344     | 14,282 |
|     |         | Σ21  | 1,384    | 104,7015      | 295,3010       | 104,7003       | 27,422     | 27,347 |
|     |         | Σ8   | 1,683    | 99,1420       | 300,8585       | 99,1418        | 17,177     | 17,175 |
| Σ21 | 1,411   | Σ20  | 1,404    | 103,5560      | 296,4450       | 103,5555       | 26,359     | 26,318 |
|     |         | Σ7   | 1,772    | 98,5000       | 301,5040       | 98,4980        | 12,014     | 12,011 |
|     |         | Σ3   | 1,615    | 96,8140       | 303,1880       | 96,8130        | 13,104     | 13,088 |
|     |         | Σ7   | 1,772    | 94,8865       | 305,1105       | 94,8880        | 28,433     | 28,341 |
| Σ3  | 1,524   | Σ22  | 1,634    | 95,0830       | 304,9175       | 95,0828        | 27,4280    | 27,346 |
|     |         | Σ22  | 1,634    | 93,1080       | 306,8920       | 93,1080        | 14,3630    | 14,279 |
|     |         | Σ7   | 1,772    | 93,6030       | 306,3915       | 93,6058        | 17,0980    | 17,012 |
|     |         | Σ21  | 1,603    | 101,7950      | 298,2065       | 101,7943       | 13,0925    | 13,087 |
|     |         | Σ20  | 1,512    | 99,7835       | 300,22         | 99,7818        | 20,5245    | 20,524 |

1<sup>Υ</sup>. Επίλυση Τριγωνομετρικής Υψομετρίας

| Από | Υ.Ο<br>(m) | Προς | Υ.Σ<br>(m) | Z (m)    | S (m)  | ΔΗ<br>(m) | $\overline{\Delta H}$<br>(m) |
|-----|------------|------|------------|----------|--------|-----------|------------------------------|
| Σ7  | 1,434      | Σ22  | 1,697      | 98,7438  | 12,018 | -0,026    | -0,028                       |
|     |            | Σ20  | 1,292      | 105,7478 | 16,977 | -1,389    | -1,388                       |
|     |            | Σ8   | 1,689      | 98,7858  | 15,461 | 0,040     | 0,040                        |
|     |            | Σ21  | 1,384      | 104,4020 | 28,411 | -1,913    | -1,917                       |
|     |            | Σ3   | 1,624      | 104,7538 | 17,060 | -1,463    | -1,465                       |
| Σ20 | 1,486      | Σ3   | 1,514      | 100,1593 | 20,520 | -0,080    | -0,081                       |
|     |            | Σ22  | 1,642      | 96,3508  | 26,366 | 1,355     | 1,356                        |
|     |            | Σ7   | 1,532      | 94,6175  | 16,969 | 1,387     | 1,426                        |
|     |            | Σ8   | 1,544      | 97,0033  | 31,543 | 1,426     | -1,439                       |
| Σ22 | 1,519      | Σ3   | 1,624      | 105,9165 | 14,344 | -1,436    | -1,891                       |
|     |            | Σ21  | 1,384      | 104,7003 | 27,422 | -1,888    | 0,068                        |
|     |            | Σ8   | 1,683      | 99,1418  | 17,177 | 0,068     | 0450                         |
|     |            | Σ20  | 1,404      | 103,5555 | 26,359 | -1,356    |                              |
|     |            | Σ7   | 1,772      | 98,4980  | 12,014 | 0,030     |                              |
| Σ21 | 1,411      | Σ3   | 1,615      | 96,8130  | 13,104 | 0,452     |                              |
|     |            | Σ7   | 1,772      | 94,8880  | 28,433 | 1,920     |                              |
|     |            | Σ22  | 1,634      | 95,0828  | 27,428 | 1,893     |                              |
| Σ3  | 1,524      | Σ22  | 1,634      | 93,1080  | 14,363 | 1,442     |                              |
|     |            | Σ7   | 1,772      | 93,6058  | 17,098 | 1,466     |                              |
|     |            | Σ21  | 1,603      | 101,7943 | 13,093 | -0,448    |                              |
|     |            | Σ20  | 1,512      | 99,7818  | 20,525 | 0,082     |                              |



## 2. Πίνακες μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας Δικτύου Ελέγχου

### 2<sup>α</sup>. Πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας Δικτύου Οριζοντίου Ελέγχου

$$\widehat{V}_{\hat{x}} = \widehat{\sigma}_o^2 (A^T A)^{-1} = 10^{-6} * [...] (m^2)$$

|      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 4,79 | -2,05 | 2,89  | -4,43 | 5,33  | -2,53 | 3,09  | -0,43 | 2,95  |
|      | 2,03  | -0,96 | 2,45  | -1,64 | 2,36  | -1,88 | 1,09  | -1,86 |
|      |       | 2,33  | -2,40 | 3,39  | -1,11 | 1,76  | -0,20 | 1,87  |
|      |       |       | 4,95  | -4,61 | 2,96  | -3,08 | 0,80  | -2,90 |
|      |       |       |       | 8,57  | -3,79 | 3,34  | -0,11 | 3,14  |
|      |       |       |       |       | 0,43  | -0,25 | 1,28  | -2,30 |
|      |       |       |       |       |       | 2,47  | -0,82 | 2,39  |
|      |       |       |       |       |       |       | -0,92 | -0,94 |
|      |       |       |       |       |       |       |       | 2,50  |

### 2<sup>β</sup>. Πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας Δικτύου Κατακορύφου Ελέγχου

$$\widehat{V}_{\hat{x}} = \widehat{\sigma}_o^2 (A^T A)^{-1} = 10^{-7} * [...] (m^2)$$

|      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|
| 9,88 | 7,07 | 6,86 | 8,01 | 7,07 |
|      | 8,34 | 6,24 | 7,28 | 6,43 |
|      |      | 8,53 | 6,45 | 6,24 |
|      |      |      | 11,0 | 7,28 |
|      |      |      |      | 8,34 |



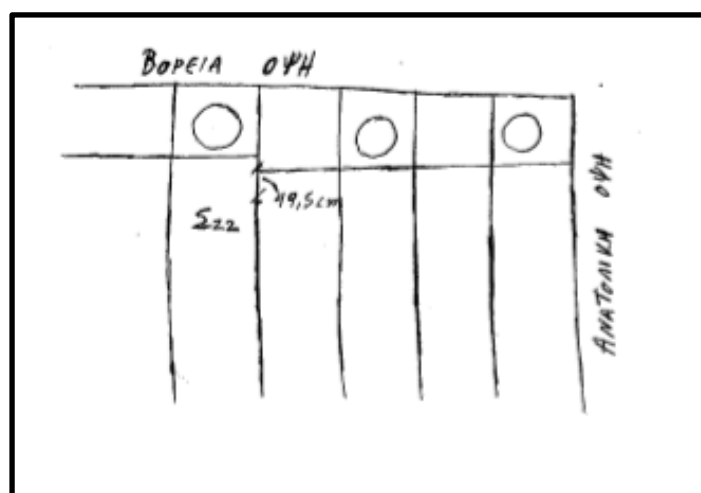
*ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ-  
ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΚΟΡΥΦΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ*



## 1. Τεκμηρίωση κορυφών Δικτύου Ελέγχου

|                                                                                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Κορυφή Σ<sub>22</sub></b>                                                                                                   |
| <b>ΣΥΝΕΝΤΑΓΜΕΝΕΣ</b>                                                                                                           |
| <b>X<sub>Σ<sub>22</sub></sub>=1017,160 m , Y<sub>Σ<sub>22</sub></sub>=999,341 m ,<br/>H<sub>Σ<sub>22</sub></sub>= 99,932 m</b> |

|                                                                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ</b>                                                                                                                             |
| Η κορυφή Σ <sub>22</sub> ήταν υλοποιημένη με μικρό ατσαλόκαρφο στον αρμό μεταξύ λίθων του σηκού, κοντά στην βορειο-ανατολική γωνία του ναού. |



|                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Κορυφή Σ<sub>8</sub></b>                                                              |
| <b>ΣΥΝΕΝΤΑΓΜΕΝΕΣ</b>                                                                     |
| <b>X<sub>Σ8</sub>=1000,00 m , Y<sub>Σ8</sub>=1000,00 m,<br/>H<sub>Σ8</sub>= 100,00 m</b> |

|                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ</b>                                                                                                                                        |
| Η κορυφή Σ <sub>8</sub> ήταν υλοποιημένη με μικρό ατσαλόκαρφο (Cooper) από προηγούμενες τοπογραφικές εργασίες, του τοιχοβάτη της βόρειας όψης του ναού. |



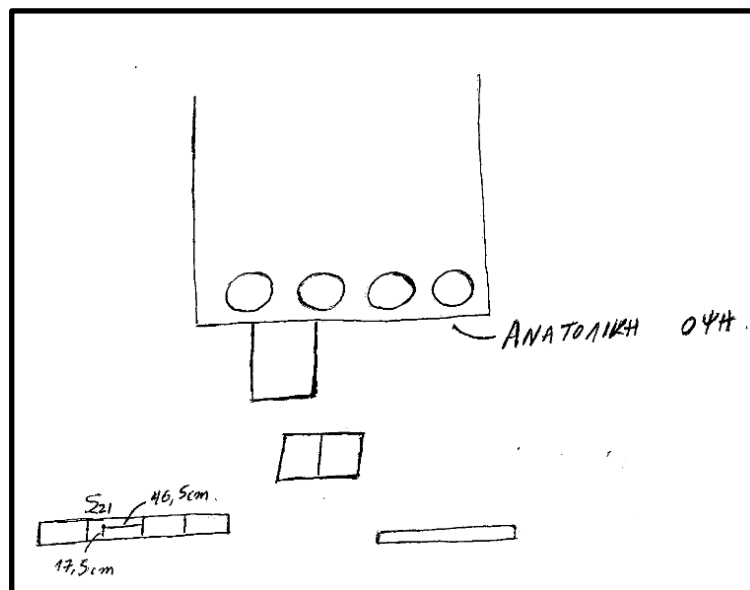
|                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Κορυφή Σ<sub>3</sub></b>                                                               |
| <b>ΣΥΝΕΝΤΑΓΜΕΝΕΣ</b>                                                                      |
| <b>X<sub>Σ3</sub>=1027,918 m , Y<sub>Σ3</sub>=989,948 m ,<br/>H<sub>Σ3</sub>=98,494 m</b> |

|                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ</b>                                                                                                 |
| Η κορυφή Σ <sub>3</sub> υλοποιήθηκε με την χάραξη σταυρού, πάνω σε λίθο, μπροστά από την ανατολική όψη του ναού. |



|                                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Κορυφή Σ<sub>21</sub></b>                                                               |
| <b>ΣΥΝΕΝΤΑΓΜΕΝΕΣ</b>                                                                       |
| <b>X<sub>Σ21</sub>=1038,405 m , Y<sub>Σ8</sub>=982,121 m ,<br/>H<sub>21</sub>=98,494 m</b> |

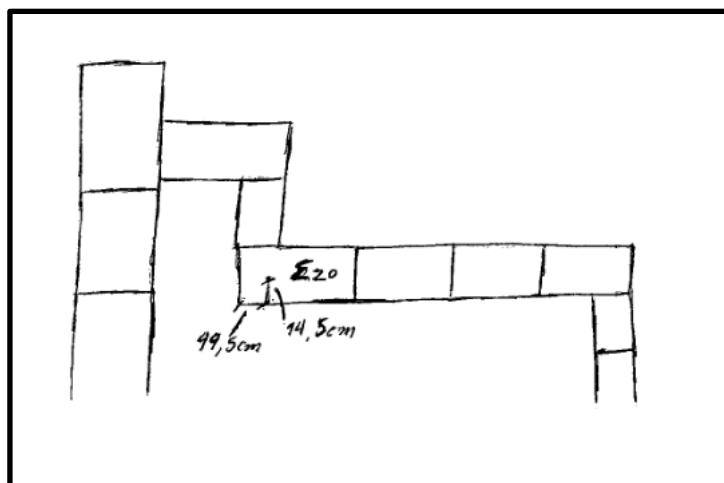
|                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ</b>                                                                                                                          |
| Η κορυφή Σ <sub>21</sub> υλοποιήθηκε με χάραξη σταυρού σε λίθου ο οποίος αποτελούσε μέρος δρόμου κατά την αρχαιότητα, ανατολικά του ναού. |





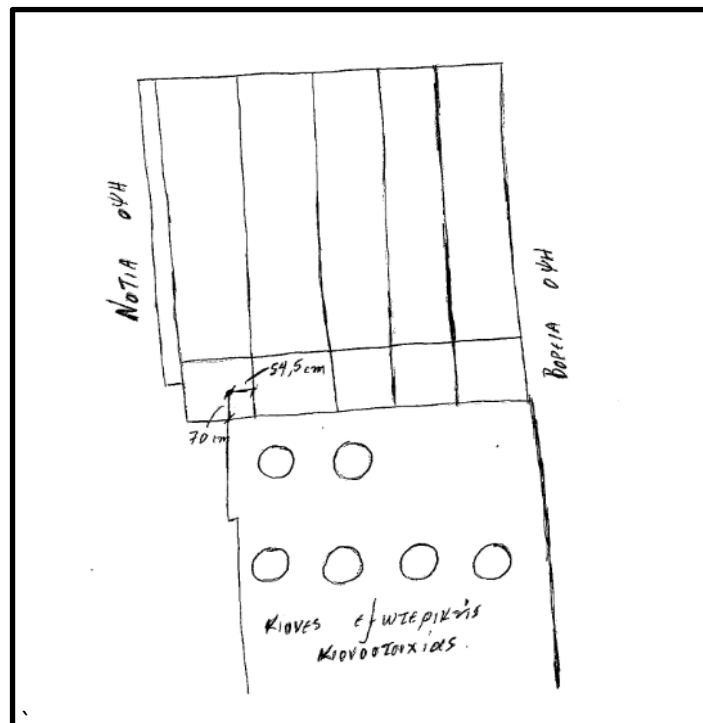
|                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Κορυφή Σ<sub>20</sub></b>                                                                |
| <b>ΣΥΝΕΝΤΑΓΜΕΝΕΣ</b>                                                                        |
| <b>X<sub>Σ20</sub>=1016,293 m, Y<sub>Σ20</sub>=973,034 m ,<br/>H<sub>Σ20</sub>=98,494 m</b> |

|                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ</b>                                                                |
| Η κορυφή Σ <sub>20</sub> υλοποιήθηκε με χάραξη σταυρού σε λίθο, νότια του ναού. |



|                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Κορυφή Σ<sub>7</sub></b>                                                              |
| <b>ΣΥΝΕΝΤΑΓΜΕΝΕΣ</b>                                                                     |
| <b>X<sub>Σ7</sub>=1010,927 m, Y<sub>Σ7</sub>=989,073 m ,<br/>H<sub>Σ7</sub>=98,494 m</b> |

|                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ</b>                                                                                                      |
| <p>Η κορυφή Σ<sub>7</sub> υλοποιήθηκε με την χάραξη σταυρού σε λίθο του σηκού στη νοτιοανατολική πλευρά του ναού.</p> |



## 2. Φωτογραφική Τεκμηρίωση

4<sup>α</sup>. Ο κίονας K31



4<sup>β</sup>. Σάρωση κίονα K31

