

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

«Μελέτη προοδευτικής κατάρρευσης χαλύβδινου γεωδαιτικού θόλου για φορτία χιονιού»



**Κωνσταντίνος Δράκος-Μυσιρλόπουλος ΑΜ: 01254**  
**Βασίλειος Σταμούλης ΑΜ: 01246**  
**Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτριος Σοφιανόπουλος**

**ΙΟΥΛΙΟΣ 2017**

© 2017 Κωνσταντίνος Δράκος-Μυσιρλόπουλος  
Βασίλειος Σταμούλης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων των συγγραφέων (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## **Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Δημήτριος Σοφιανόπουλος  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Χρήστος Παπακωνσταντίνου  
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Βασιλική Κατσαρδή  
Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Θα θέλαμε αρχικά να ευχαριστήσουμε μέσα απ' τη καρδιά μας τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δημήτριο Σοφιανόπουλο για τη πολύτιμη βοήθεια και εξαιρετική συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια υλοποίησης της διπλωματικής μας εργασίας. Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κ. Ευριπίδη Μυστακίδη για τη παραχώρηση ενός εξυπηρετητή του εργαστηρίου «Ανάλυσης και Σχεδιασμού Κατασκευών» για το «τρέξιμο» των αναλύσεων.

Επιπλέον ευχαριστούμε συνολικά τους διδάσκοντες τους τμήματος για τις γνώσεις που μας παρείχαν.

Τέλος ευχαριστούμε ιδιαίτερα τις οικογένειές μας που τόσα χρόνια μας στηρίζουν τόσο οικονομικά όσο και συναισθηματικά.

# ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΟΔΕΥΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΥ ΘΟΛΟΥ

Κωνσταντίνος Δράκος-Μυσιρλόπουλος, Βασίλειος Σταμούλης  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2017

Επιβλέπων Καθηγητής: Σοφιανόπουλος Δημήτριος, Αναπληρωτής Καθηγητής

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς ενός ελλειψοειδούς γεωδαιτικού θόλου έναντι φορτίων χιονιού, η τελική μορφή κατάρρευσης της κατασκευής καθώς επίσης και η εύρεση του κρίσιμου φορτίου κατάρρευσης.

Αρχικά έγινε επιλογή των διαστάσεων και της γεωμετρίας του γεωδαιτικού θόλου. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα κατακόρυφα φορτία χιονιού βάση του κανονισμού Ευρωκώδικα 1 και ανήχθησαν τα επιφανειακά σε αντίστοιχα επικόμβια με σκοπό την μείωση του υπολογιστικού φόρτου και απλοποίηση των αναλύσεων.

Για τα φορτία σχεδιασμού έγινε ανάλυση και διαστασιολόγηση της κατασκευής. Έπειτα για τη μελέτη της προοδευτικής κατάρρευσης έγιναν διαδοχικές αναλύσεις αυξάνοντας σταδιακά το φορτίο του χιονιού σε κάθε βήμα έως ότου επέλθει μερική ή ολική κατάρρευση του γεωδαιτικού θόλου. Για τη μελέτη της προοδευτικής κατάρρευσης επελέγησαν δύο διαφορετικές μέθοδοι ανάλυσης.

Τέλος έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις δύο μεθόδους.

## Πίνακας περιεχομένων

|  |            |
|--|------------|
| <b>Κεφάλαιο 1 Γεωδαιτικοί θόλοι .....</b>  | <b>1</b>   |
| 1.1 Θολωτές κατασκευές .....   | 1          |
| 1.2 Γεωδαιτικοί θόλοι .....  | 7          |
| 1.3 Σχεδίαση γεωδαιτικών θόλων .....   | 10         |
| 1.4 Λογισμικό για τη σχεδίαση γεωδαιτικών θόλων .....  | 12         |
| 1.5 Συστήματα κόμβων: Γενικά στοιχεία.....   | 14         |
| <b>Κεφάλαιο 2 Υπολογισμός φορτίων χιονιού .....</b>  | <b>18</b>  |
| 2.1 Γεωμετρία φορέα .....  | 18         |
| 2.2 Υπολογισμός φορτίων χιονιού .....  | 20         |
| <b>Κεφάλαιο 3 Μελέτη προοδευτικής κατάρρευσης γεωδαιτικού θόλου.....</b>                                       | <b>34</b>  |
| 3.1 Ανάλυση και σχεδιασμός γεωδαιτικού θόλου .....   | 34         |
| 3.2 Μελέτη προοδευτικής κατάρρευσης .....  | 41         |
| <b>Συμπεράσματα .....</b>  | <b>74</b>  |
| <b>Παράρτημα Α: Φύλλο Ms Excel για τον υπολογισμό των κλίσεων των τριγώνων του<br/>γεωδαιτικού θόλου .....</b> | <b>75</b>  |
| <b>Παράρτημα Β: Φύλλο Ms Excel για τον υπολογισμό επικόμβιων φορτίων χιονιού.....</b>                          | <b>80</b>  |
| <b>Παράρτημα Γ: Λογισμικό διαστασιολόγησης κοίλων κυκλικών διατομών (θερμής<br/>έλασης) μέσω EC3.....</b>      | <b>84</b>  |
| <b>Βιβλιογραφία.....</b>   | <b>108</b> |

## Κατάλογος Σχημάτων

|  |    |
|--|----|
| Σχήμα 1.1 Παράδειγμα θολωτής κατασκευής.....   | 1  |
| Σχήμα 1.2 Ραβδωτοί θόλοι: α) χωρίς αποκοπές, β) με αποκοπές νευρώσεων στη κορωνίδα τους.....   | 2  |
| Σχήμα 1.3 Θόλοι τύπου: Schwelder, Diamatic, Lamela και Γεωδαιτικοί.....  | 3  |
| Σχήμα 1.4 Αυτούσιοι θόλοι (domes).....   | 4  |
| Σχήμα 1.5 Ελεύθεροι θόλοι (freedomes).....   | 4  |
| Σχήμα 1.6 Υπερθόλοι (Hyperware).....   | 5  |
| Σχήμα 1.7 Τρισδιάστατα δικτυώματα (3D lattice).....  | 5  |
| Σχήμα 1.8 Ταξινόμηση θόλων με βάση το μέτρο (module), α) θόλοι ενός στρώματος (single layer), β) θόλοι με δύο στρώματα (double layer), γ) θόλοι (Vierendel)..... | 6  |
| Σχήμα 1.9 Μορφή γεωδαιτικού θόλου.....   | 7  |
| Σχήμα 1.10 Γεωδαιτικός θόλος μισού στερεού εκ περιστροφής (α), γεωδαιτικός θόλος σε σχήμα σφαίρας (β).....   | 8  |
| Σχήμα 1.11 Πρότυπα σχέδια του Fuller.....  | 8  |
| Σχήμα 1.12 Γήπεδο baseball στη Nagoya της Ιαπωνίας – στέγαστρο από γεωδαιτικό θόλο.....  | 9  |
| Σχήμα 1.13 Γεωδαιτήσεις πλατωνικών στερεών τάξης 1,2,3.....  | 10 |
| Σχήμα 1.14 Τρισδιάστατη άποψη εικοσάερδου.....   | 11 |
| Σχήμα 1.15 Συχνότητες $n$ και κλάσεις τριγώνων.....  | 11 |
| Σχήμα 1.16 Επεξήγηση γεωμετρίας γεωδαιτικών θόλων Class I.....   | 12 |
| Σχήμα 1.17 User interface του προγράμματος WinDome.....  | 13 |
| Σχήμα 1.18 Άδεια χρήσης του προγράμματος WinDome.....  | 13 |
| Σχήμα 1.19 Συνδεσμολογία συστήματος Mero.....  | 15 |
| Σχήμα 1.20 The Eden Project (Cornwall, United Kingdom).....  | 15 |
| Σχήμα 1.21 Συνδεσμολογία συστήματος Triodetic.....   | 16 |
| Σχήμα 1.22 Cinesphere (Ontario, Canada).....   | 17 |
| Σχήμα 2.1 Σχήματα ελλειψοειδών.....  | 18 |
| Σχήμα 2.2 Γενέτιρες μισού ελλειψοειδούς εκ περιστροφής και διαστάσεις του υπό μελέτη γεωδαιτικού θόλου.....  | 19 |

|  |    |
|--|----|
| Σχήμα 2.3 Επιλεγμένες ρυθμίσεις στο WinDome για τη σχεδίαση του θόλου.....   | 20 |
| Σχήμα 2.4 Κατανομή φορτίου χιονιού σε κυλινδρικές στέγες.....  | 21 |
| Σχήμα 2.5 Διάγραμμα $\mu_3$ και $h/b$ .....  | 21 |
| Σχήμα 2.6 Χάρτης ταξινόμησης περιοχών σε ζώνες.....  | 22 |
| Σχήμα 2.7 Το σχήμα της έλλειψης που επιλέχθηκε για τους υπολογισμούς της κλίσης .....  | 24 |
| Σχήμα 2.8 Περιοχή άσκησης φορτίου χιονιού (πάνω από το γραμμοσκιασμένο επίπεδο) στην επιφάνεια του ελλειψοειδούς.....  | 26 |
| Σχήμα 2.9 Επικόμβια φορτία $P_{ti}$ του κάθε τριγώνου λόγω επιφανειακού φορτίου $q$ .....  | 27 |
| Σχήμα 2.10 Τρίγωνα με κοινό κόμβο .....  | 27 |
| Σχήμα 2.11 Γεωμετρία ενός τριγώνου.....  | 28 |
| Σχήμα 2.12 Διάγραμμα εμβαδών τριγώνων (Area) - $z_m$ .....   | 29 |
| Σχήμα 2.13 Συσχέτιση καρτεσιανών και σφαιρικών συντεταγμένων.....  | 30 |
| Σχήμα 2.14 Διάγραμμα μεταξύ των μεταβλητών $\theta$ , $\phi$ , $A_i$ (theta, phi, area) .....  | 30 |
| Σχήμα 2.15 Διάγραμμα μεταξύ των μεταβλητών $\theta$ , $A_i$ (theta, area).....   | 31 |
| Σχήμα 2.16 Κάτοψη θόλου – περιοχή που ασκείται το φορτίο του χιονιού .....   | 31 |
| Σχήμα 2.17 Επιφάνεια προσαρμογής στα δεδομένα $A$ , $\theta$ , $\phi$ (area, theta, phi) του κάθε τμήματος (του Σχ.2.16).....                                    | 32 |
| Σχήμα 3.1 Φορέας του γεωδαιτικού θόλου στο λογισμικό SAP2000.....  | 34 |
| Σχήμα 3.2 Διαστάσεις κοίλης κυκλικής διατομής TUBO-D142X2.5.....   | 36 |
| Σχήμα 3.3 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης του φορέα για διατομή TUBO-D145X2.5.....   | 36 |
| Σχήμα 3.4 Διαστάσεις κοίλης κυκλικής διατομής TUBO-D125X2.0.....   | 37 |
| Σχήμα 3.5 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης του φορέα για τις τελικές διατομές.....  | 39 |
| Σχήμα 3.6 Παραμόρφωση φορέα για το φορτίο σχεδιασμού του χιονιού, με γκρι φαίνεται η αρχική απαραμόρφωτη και αντίστοιχα με μπλέ η παραμορφωσιακή κατάσταση ..... | 40 |
| Σχήμα 3.7 Προοδευτική κατάρρευση κτιρίου .....   | 41 |
| Σχήμα 3.8 1 <sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού για το φορτίο σχεδιασμού (scale factor x1000) .....  | 45 |
| Σχήμα 3.9 1 <sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού για το φορτίο σχεδιασμού (scale factor x500) – κοντινή όψη.....  | 45 |
| Σχήμα 3.10 1 <sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού για φορτίο $P_{ολ}=1,15P_{αρχ}$ .....   | 46 |
| Σχήμα 3.11 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 1 <sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί) .....  | 47 |



|  |    |
|--|----|
| Σχήμα 3.12 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 2 <sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί) .....                                  | 47 |
| Σχήμα 3.13 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 3 <sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί) .....                                  | 48 |
| Σχήμα 3.14 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 4 <sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί) .....                                  | 48 |
| Σχήμα 3.15 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 5 <sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί) .....                                  | 49 |
| Σχήμα 3.16 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 6 <sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί) .....                                  | 49 |
| Σχήμα 3.17 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 7 <sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί) .....                                  | 50 |
| Σχήμα 3.18 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 8 <sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί) .....                                  | 50 |
| Σχήμα 3.19 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 9 <sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί) .....                                  | 51 |
| Σχήμα 3.20 Τελική μορφή κατάρρευσης του γεωδαιτικού θόλου, σύμφωνα με τη 1 <sup>η</sup> μέθοδο<br>αναλύσεων .....        | 51 |
| Σχήμα 3.21 Άξονες U1,U2,U3 που ορίζουν τη κατεύθυνση των μετακινήσεων των κόμβων   | 52 |
| Σχήμα 3.22 Η θέση των κόμβων που επελέγησαν .....  | 53 |
| Σχήμα 3.23 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) -U1, U2, U3 για τον Κόμβο 1<br>.....                            | 53 |
| Σχήμα 3.24 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) -U1, U2, U3 για τον Κόμβο<br>1469 .....                         | 54 |
| Σχήμα 3.25 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) -U1, U2, U3 για τον Κόμβο<br>8675 .....                         | 54 |
| Σχήμα 3.26 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) –U3 (κατακόρυφη μετακίνηση)<br>και για τους τρεις κόμβους ..... | 55 |
| Σχήμα 3.27 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) –U2 (οριζόντια μετακίνηση)<br>και για τους τρεις κόμβους .....  | 55 |
| Σχήμα 3.28 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) –U1 (οριζόντια μετακίνηση)<br>και για τους τρεις κόμβους .....  | 56 |
| Σχήμα 3.29 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 1 <sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί) .....                                  | 56 |
| Σχήμα 3.30 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 2 <sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί) .....                                  | 57 |
| Σχήμα 3.31 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 3 <sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί) .....                                  | 57 |
| Σχήμα 3.32 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 4 <sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί) .....                                  | 58 |
| Σχήμα 3.33 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 5 <sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί) .....                                  | 58 |
| Σχήμα 3.34 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 6 <sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί) .....                                  | 59 |
| Σχήμα 3.35 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 7 <sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί) .....                                  | 59 |

|   |    |
|---|----|
| Σχήμα 3.36 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 8° βήμα (με πορτοκαλί) .....   | 60 |
| Σχήμα 3.37 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 9° βήμα (με πορτοκαλί) .....   | 60 |
| Σχήμα 3.38 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 10° βήμα (με πορτοκαλί) .....  | 61 |
| Σχήμα 3.39 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 11° βήμα (με πορτοκαλί) .....  | 61 |
| Σχήμα 3.40 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 12° βήμα (με πορτοκαλί) .....  | 62 |
| Σχήμα 3.41 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 13° βήμα (με πορτοκαλί) .....  | 62 |
| Σχήμα 3.42 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 14° βήμα (με πορτοκαλί) .....  | 63 |
| Σχήμα 3.43 Τελική μορφή κατάρρευσης του γεωδαιτικού θόλου, σύμφωνα με τη 2 <sup>η</sup> μέθοδο αναλύσεων .....                            | 63 |
| Σχήμα 3.44 Η θέση των κόμβων που επελέγησαν .....   | 64 |
| Σχήμα 3.45 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) -U1, U2, U3 για τον Κόμβο 1 .....  | 65 |
| Σχήμα 3.46 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) -U1, U2, U3 για τον Κόμβο 15310 .....  | 65 |
| Σχήμα 3.47 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) -U1, U2, U3 για τον Κόμβο 8675 .....   | 66 |
| Σχήμα 3.48 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) -U3 (κατακόρυφη μετακίνηση) και για τους τρεις κόμβους .....                     | 66 |
| Σχήμα 3.49 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) -U2 (οριζόντια μετακίνηση) και για τους τρεις κόμβους .....                      | 67 |
| Σχήμα 3.50 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) -U1 (οριζόντια μετακίνηση) και για τους τρεις κόμβους .....                      | 67 |
| Σχήμα 3.51 Η τελική μορφή κατάρρευσης για τη 3 <sup>η</sup> μέθοδο αναλύσεων .....  | 68 |
| Σχήμα 3.52 Η τελική μορφή κατάρρευσης για τη 1 <sup>η</sup> μέθοδο αναλύσεων (α) και αντίστοιχα για τη 2 <sup>η</sup> (β) .....           | 69 |
| Σχήμα 3.53 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) -U3 (κατακόρυφη μετακίνηση) για το Κόμβο 1 για τις τρεις μεθόδους ανάλυσης ..... | 71 |
| Σχήμα 3.54 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) -U2 (οριζόντια μετακίνηση) για το Κόμβο 1 για τις τρεις μεθόδους ανάλυσης .....  | 72 |
| Σχήμα 3.55 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) -U1 (οριζόντια μετακίνηση) για το Κόμβο 1 για τις τρεις μεθόδους ανάλυσης .....  | 73 |

## Κατάλογος Πινάκων

|  |    |
|--|----|
| Πίνακας 2.1 Συντελεστές της 5 <sup>ο</sup> βαθμιας πολυωνυμικής εξίσωσης.....                    | 33 |
| Πίνακας 2.2 Συντελεστές της 5 <sup>ο</sup> βαθμιας πολυωνυμικής εξίσωσης (συνέχεια).....         | 33 |
| Πίνακας 2.3 Συντελεστές της 5 <sup>ο</sup> βαθμιας πολυωνυμικής εξίσωσης (συνέχεια).....         | 33 |
| Πίνακας 3.1 Κατάταξη κοίλων κυκλικών διατομών .....  | 38 |
| Πίνακας 3.2 Συντεταγμένες κόμβων που επελέγησαν .....  | 53 |
| Πίνακας 3.3 Συντεταγμένες κόμβων που επελέγησαν .....  | 64 |
| Πίνακας 3.4 Πλήθος ράβδων που αστοχούν σε κάθε βήμα για τη 1 <sup>η</sup> μέθοδο αναλύσεων ..... | 70 |
| Πίνακας 3.5 Πλήθος ράβδων που αστοχούν σε κάθε βήμα για τη 2 <sup>η</sup> μέθοδο αναλύσεων ..... | 70 |
| Πίνακας 3.6 Πλήθος ράβδων που αστοχούν σε κάθε βήμα για τη 3 <sup>η</sup> μέθοδο αναλύσεων ..... | 71 |

# Κεφάλαιο 1 Γεωδαιτικοί θόλοι

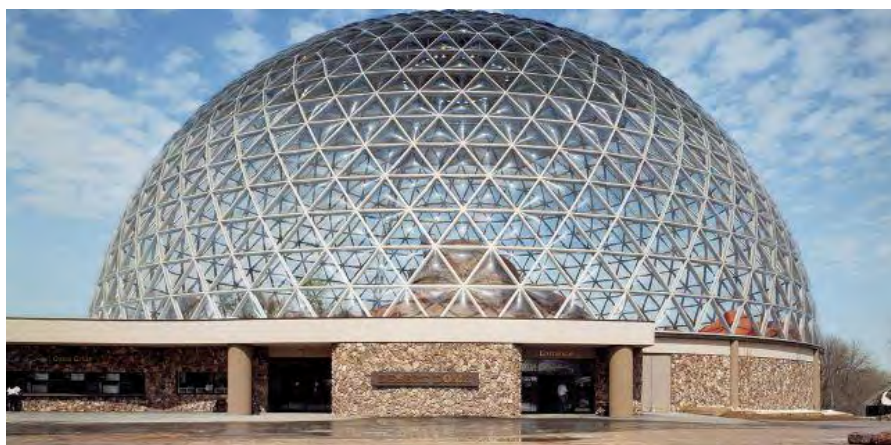
## 1.1 Θολωτές κατασκευές

Γενικότερα με την έννοια «θολωτή κατασκευή» (Σχήμα 1.1) αναφερόμαστε σε κάθε είδους δομικό σύστημα που αποτελείται από ένα ή περισσότερα στρώματα μελών καμπυλωμένα σε κάθε διεύθυνση. Αξίζει να σημειωθεί ότι από τον παραπάνω ορισμό εξαιρούνται οι κυλινδρικοί θόλοι (barrel vaults). Οι θόλοι προκαλούν ιδιαίτερο ενδιαφέρον από άποψη λειτουργικότητας, για το λόγο ότι καταφέρνουν να περικλείσουν το μέγιστο όγκο στη μικρότερη δυνατή επιφάνεια.

Διεθνώς υπάρχουν πολλά παραδείγματα εφαρμογής της ιδέας του θόλου στις κατασκευές, με σκοπό τη κάλυψη διάφορων αναγκών. Το κοινό χαρακτηριστικό όλων των θόλων, ανεξάρτητα της χρησιμότητά τους, είναι ότι έχουν τη δυνατότητα κάλυψης μεγάλων ανοιγμάτων χωρίς ενδιάμεσα υποστηρίγματα, επιτρέποντας έτσι μεγαλύτερη ελευθερία κινήσεων στο εσωτερικό τους, σε σύγκριση με άλλους τύπους κατασκευών.

Δύο βασικοί λόγοι που συντελούν στη δημιουργία μεγαλύτερων διαστάσεων θόλων, είναι η χρήση του χάλυβα και η κατάλληλη σύνθεση του δομικού συστήματος. Ειδικότερα, ο δεύτερος λόγος αναφέρεται τόσο στη σύνδεση των μελών μεταξύ τους, όσο και στον αριθμό των στρώσεων, κάτι που με κατάλληλη διαμόρφωση συνεισφέρει στην ευστάθεια (stability) της κατασκευής.

Η αύξηση στη χρήση των θολωτών κατασκευών τις τελευταίες δεκαετίες συνδέεται άμεσα και με την άνθιση των Η/Υ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τέτοιου είδους κατασκευές, και ειδικά μεγάλων διαστάσεων, έχουν εξαιρετικά μεγάλο υπολογιστικό φόρτο για την ανάλυση και το σχεδιασμό τους. Επομένως οι Η/Υ και ειδικά οι πλέον σύγχρονοι με την τεράστια υπολογιστική ισχύ που διαθέτουν, όχι μόνο παραμέρισαν αυτό το πρόβλημα, αλλά κατέστησαν και εφικτή τη διενέργεια αναλύσεων με μεγαλύτερη ακρίβεια..



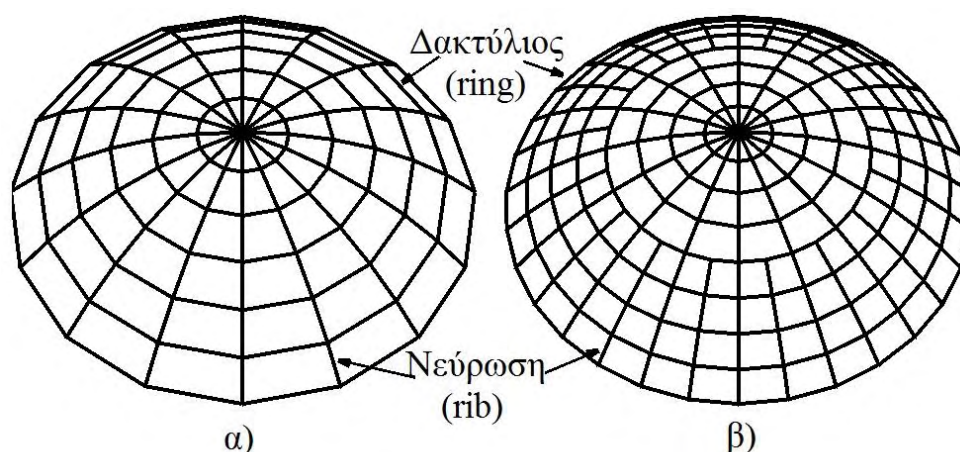
Σχήμα 1.1 Παράδειγμα θολωτής κατασκευής

### 1.1.1 Διάκριση θόλων με βάση την αρχιτεκτονική τους

Η διάκριση των θόλων βάσει της αρχιτεκτονικής τους και της μόρφωσης του δομικού τους συστήματος, γίνεται με τα ακόλουθα κριτήρια:

- τη μορφή (pattern)
- τη γεωμετρία ή τύπο (type)
- το μέτρο (module)

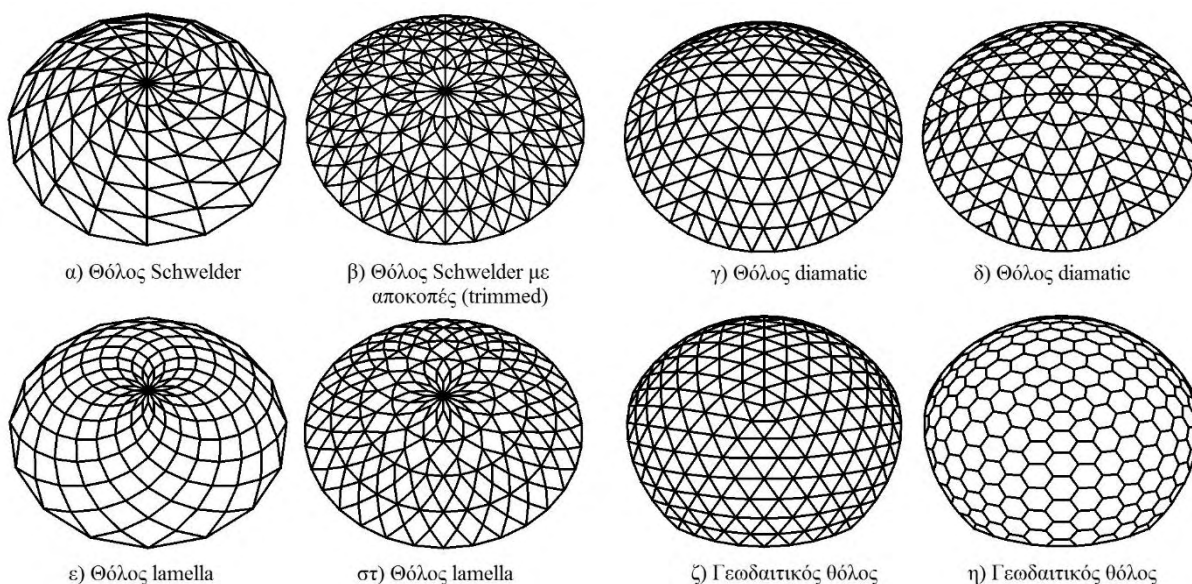
Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μορφές θόλων είναι οι: Ραβδωτοί, Schwedler, Lamella, Diamatic και Γεωδαιτικοί. Αυτές προκύπτουν με βάση το προσανατολισμό και τη διάταξη των μελών του θόλου στο χώρο. Αναλυτικότερα επί των μορφών των θόλων, έχουμε ότι οι ραβδωτοί θόλοι (ribbed domes) αποτελούνται από νευρώσεις και δακτύλιους που τέμνονται μεταξύ τους (Σχήμα 1.2). Ως νεύρωση ορίζεται το σύνολο των μελών που βρίσκονται πάνω σε μια μεσημβρινή γραμμή και ως δακτύλιος, το σύνολο των μελών που σχηματίζουν ένα οριζόντιο πολύγωνο. Η συγκεκριμένη μορφή θόλου είναι δομικά ασταθής, εκτός αν οι κόμβοι του είναι αρκετά δύσκαμπτοι .



Σχήμα 1.2 Ραβδωτοί θόλοι: α) χωρίς αποκοπές, β) με αποκοπές νευρώσεων στη κορωνίδα τους

Οι θόλοι τύπου Schwedler (Σχήμα 1.3α), το όνομά των οποίων προήρθε από το Γερμανό μηχανικό Schwedler που ήταν ο πρώτος που ασχολήθηκε με την κατασκευή τους, προκύπτουν αν στα τετράπλευρα των ραβδωτών θόλων προστεθεί μια διαγώνιος ράβδος. Μια παραλλαγή της μορφής των ραβδωτών και τύπου Schwedler θόλων, προκύπτει αν απ' την κορωνίδα τους αποκοπούν ανώτερα τμήματα των νευρώσεων (trimmed domes), όπως φαίνεται και στα Σχήματα 1.2β και 1.3β αντίστοιχα. Έπειτα στα Σχήματα 1.3γ,δ παρουσιάζονται οι θόλοι τύπου Diamatic, που αποτελούνται από τριγωνοποιημένες ενότητες. Οι θόλοι τύπου Lamella ή φολιδωτοί (Σχήματα 1.3ε,στ) έχουν διαγώνιους που εκτείνονται από τη στέψη προς τον ισημερινό του θόλου σε δύο διευθύνσεις σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού και αντίθετα. Επιπλέον ενδέχεται να έχουν οριζόντιους δακτυλίους

αλλά χωρίς νευρώσεις. Τέλος, στα Σχήματα 1.3ζ,η απεικονίζονται οι γεωδαιτικοί θόλοι (geodesic domes) των οποίων η γεωμετρία προκύπτει από ένα πολύεδρο, οι έδρες του οποίου διακριτοποιούνται (πολύγωνα) σχηματίζοντας μορφές (π.χ. είτε τρίγωνα – Σχήμα 1.3στ, είτε εξάγωνα – Σχήμα 1.3η), οι οποίες στη συνέχεια προβάλλονται σε μια καμπύλη επιφάνεια δημιουργώντας έτσι τη τελική μορφή του θόλου. Περισσότερες πληροφορίες για τη σχεδίαση γεωδαιτικών θόλων παρατίθενται στο κεφάλαιο 1.3.



Σχήμα 1.3 Θόλοι τύπου: Schwelder, Diamatic, Lamella και Γεωδαιτικοί

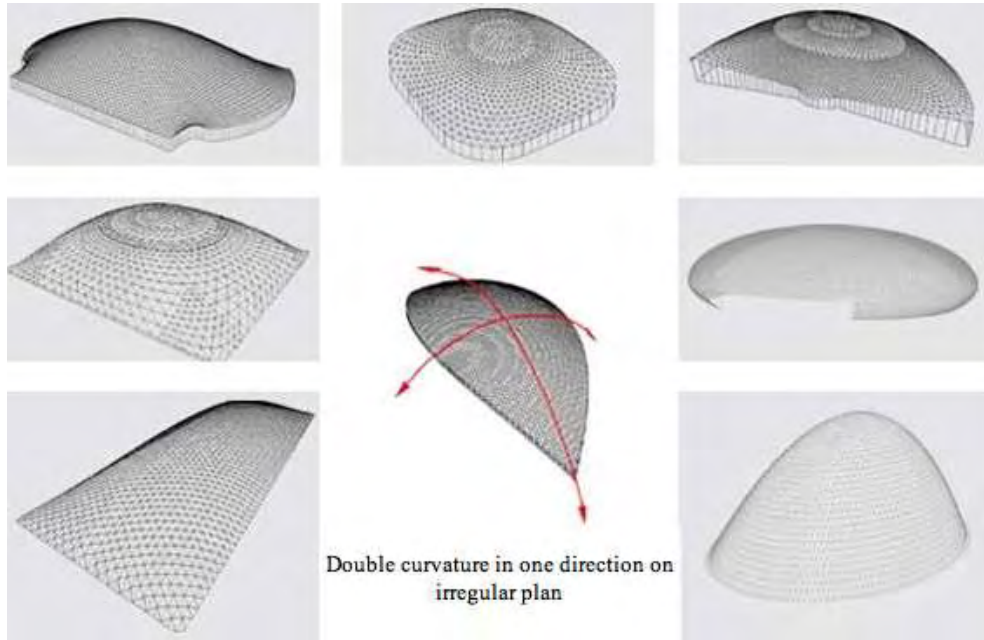
Αναφορικά με τη γεωμετρία ενός θόλου, αυτή συχνά προσεγγίζει την επιφάνεια ενός γνωστού στερεού εκ περιστροφής (όπως σφαίρας, ελλειψοειδούς, παραβολοειδούς κ.λπ.) ή ενδέχεται να είναι μια σύνθεση διαφορετικών επιφανειών. Μια λεπτομερέστερη διάκριση πάνω σ' αυτό το θέμα, παρουσιάζεται στο διαδικτυακό ιστότοπο (website) της εταιρείας Geometrica [15]. Ειδικότερα, αυτός ο διαχωρισμός φαίνεται στα Σχήματα 1.4-1.7, όπου αρχικά οι θόλοι ταξινομούνται στις βασικές κατηγορίες :

- Αυτούσιοι θόλοι (domes), με κύριο στοιχείο τους τη διπλή καμπυλότητα σε μια διεύθυνση κωνικής τομής κάτοψη (Σχήμα 1.4)
- Ελεύθεροι θόλοι (freedomes), με κύριο στοιχείο τους τη διπλή καμπυλότητα σε μια διεύθυνση ανώμαλης κάτοψης (Σχήμα 1.5)
- Υπερθόλοι (hyperware), με κύριο στοιχείο τους τη διπλή καμπυλότητα σε αντίθετες διευθύνσεις (Σχήμα 1.6)
- Τρισδιάστατα δικτυώματα (3D lattice), με κύριο στοιχείο τους τη διπλή καμπυλότητα σε μια διεύθυνση ανώμαλης κάτοψης (Σχήμα 1.7)

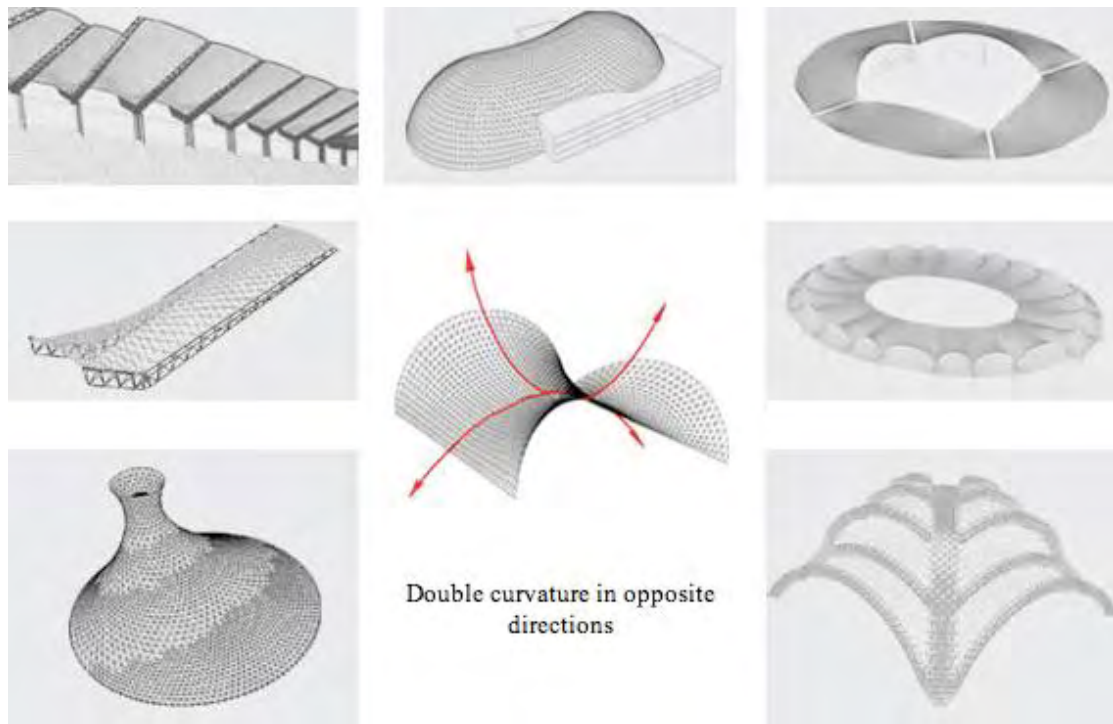
Επίσης στα Σχήματα 1.4-1.7, συμπεριλαμβάνονται και υποκατηγορίες των παραπάνω βασικών κατηγοριών.



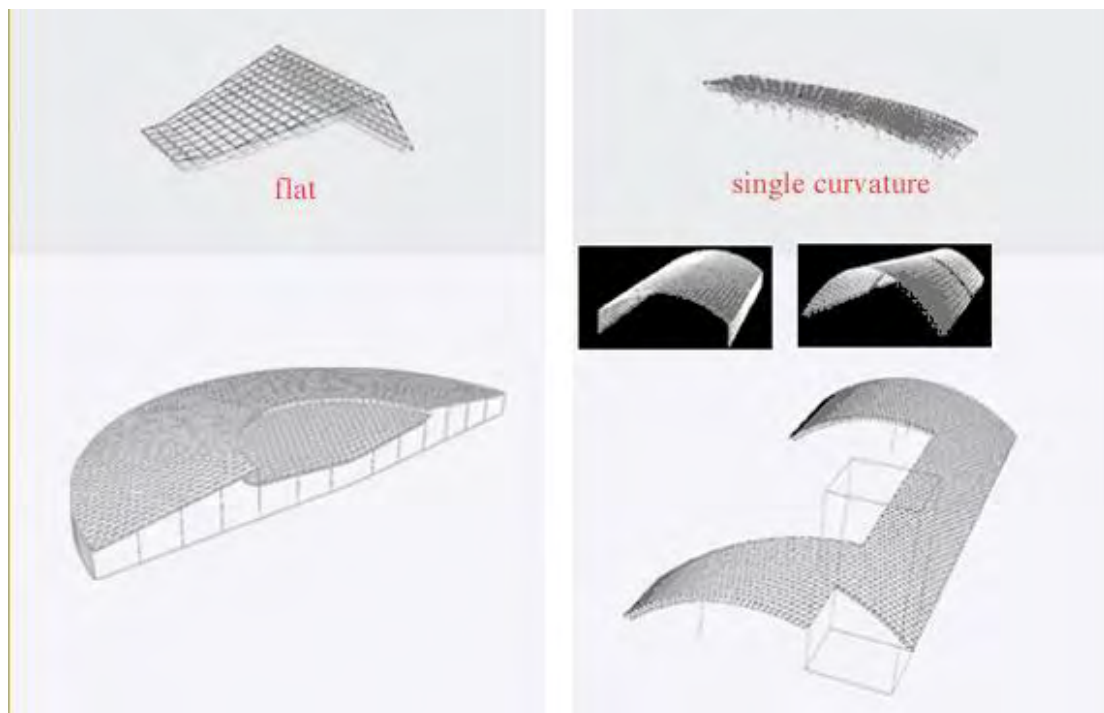
Σχήμα 1.4 Αυτούσιτοι θόλοι (domes)



Σχήμα 1.5 Ελεύθεροι θόλοι (freedomes)



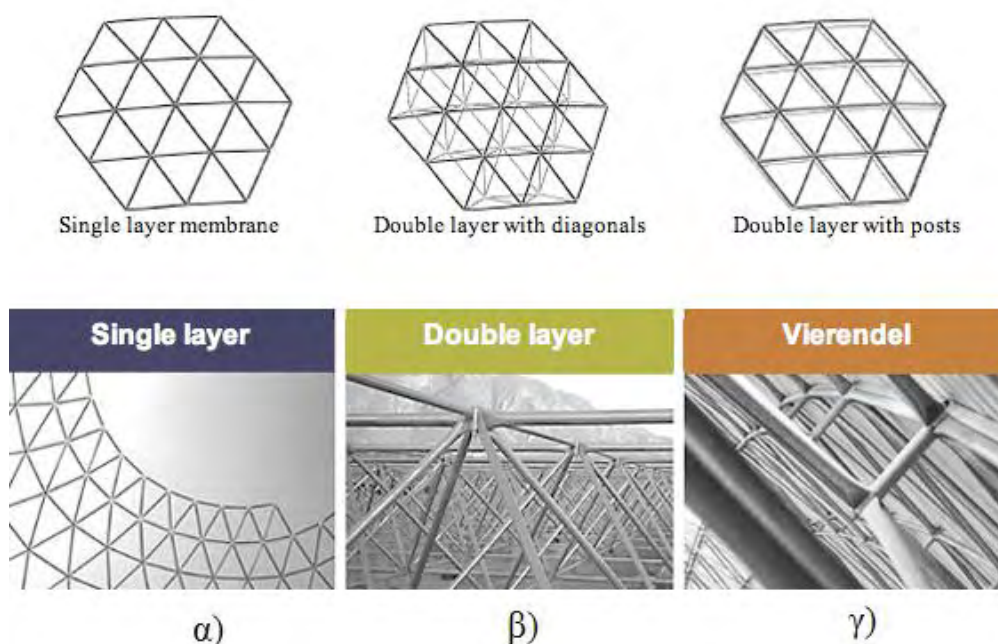
Σχήμα 1.6 Υπερθόλοι (Hyparware)



Σχήμα 1.7 Τρισδιάστατα δικτυώματα (3D lattice)



Η ταξινόμηση που γίνεται με βάση το μέτρο (module), σχετίζεται με τον αριθμό και την συνδεσμολογία των στρωμάτων (layers) του θόλου. Τρεις χαρακτηριστικοί τύποι αυτής της κατηγορίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.8. Ο πρώτος αναφέρεται σε θόλο ενός στρώματος μελών (single layer- Σχήμα 1.8α) ενώ ο δεύτερος και ο τρίτος σε δύο στρώματα (double layer) με τη διαφορά μεταξύ τους να έγκειται στη σύνδεση των δύο στρώσεων. Συγκεκριμένα στο δεύτερο τύπο, η σύνδεση των στρώσεων γίνεται με διαγώνιους ράβδους (Σχήμα 1.8β), ενώ στον τρίτο με ορθοστάτες (τύπου Vierendeel – Σχήμα 1.8γ).

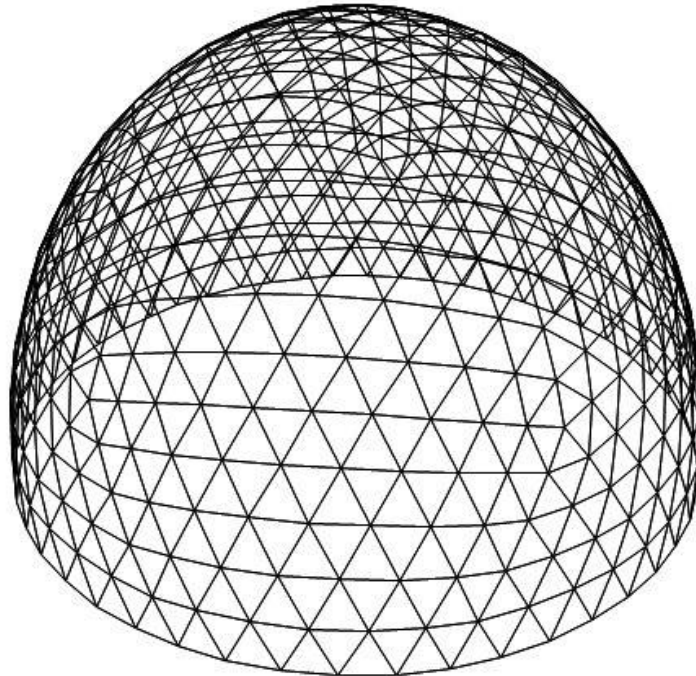


Σχήμα 1.8 Ταξινόμηση θόλων με βάση το μέτρο (module), α) θόλοι ενός στρώματος (single layer), β) θόλοι με δύο στρώματα (double layer), γ) θόλοι (Vierendeel)

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί κατά το σχεδιασμό μονοστρωματικών θόλων (single layer domes) των οποίων οι κόμβοι πρέπει να σχεδιάζονται αρκετά δύσκαμπτοι ώστε να μπορούν να παραλάβουν και άλλα εντατικά μεγέθη πέρα των αξονικών δυνάμεων των μελών, σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει κίνδυνος ακαριαίου λυγισμού (snap through buckling). Επιπλέον ο συγκεκριμένος τύπος θόλου, όταν είναι μεγάλων διαστάσεων πρέπει να μελετάται και σε αντισυμμετρικές φορτίσεις, λόγω του ότι και πάλι υπάρχει το ενδεχόμενο ακαριαίου λυγισμού.

## 1.2 Γεωδαιτικοί θόλοι

Οι γεωδαιτικοί θόλοι όπως αναφέρθηκε και πριν, αποτελούν μια κατηγορία των θολωτών κατασκευών. *Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι ο φέρων οργανισμός αποτελείται από ελαφρά επίπεδα τρίγωνα (Σχήμα 1.9) που συνδέονται στο χώρο μορφώνοντας έτσι μια καμπύλη επιφάνεια η οποία προσεγγίζει τη μορφή ενός στερεού εκ περιστροφής (π.χ. σφαίρα, ελλειψοειδές, παραβολοειδές).* Πρόκειται για μια κατασκευή η οποία παρουσιάζει μεγάλη δυσκαμψία και ευστάθεια. Αυτό οφείλεται κυρίως στο τριγωνοποιημένο πλέγμα της μεμβράνης του. Γενικότερα από τα αρχαία χρόνια υπάρχει η θεώρηση ότι κατασκευές που αποτελούνται από τρίγωνα διαθέτουν μεγάλη δυσκαμψία.



Σχήμα 1.9 Μορφή γεωδαιτικού θόλου

Όσον αφορά την επιφάνεια που προσεγγίζει ο γεωδαιτικός θόλος, αυτή ποικίλει. Υπάρχουν κατασκευές οι οποίες μορφώνουν μισά στερεά εκ περιστροφής ή και ολόκληρα όπως φαίνεται στα Σχήματα 1.10α και 1.10β αντίστοιχα. Ακόμη υπάρχει περίπτωση η γεωμετρία του να μην προσεγγίζει κάποιο ήδη γνωστό στερεό αλλά να είναι είτε σύνθεση ήδη γνωστών στερεών είτε οτιδήποτε άλλο, ανάλογα με τις απαιτούμενες ανάγκες από άποψη αισθητικής και λειτουργικότητας.



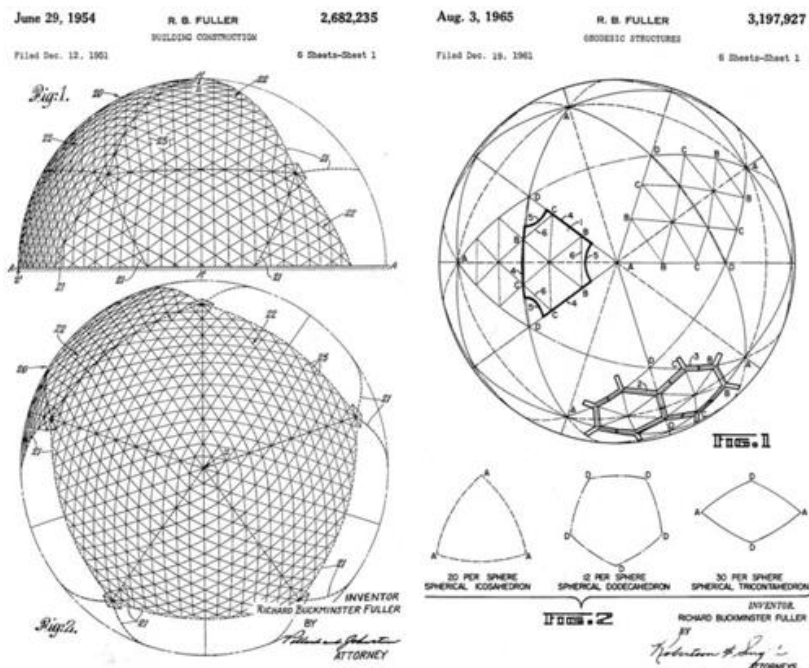
α)



β)

Σχήμα 1.10 Γεωδαιτικός θόλος μισού στερεού εκ περιστροφής (α), γεωδαιτικός θόλος σε σχήμα σφαίρας (β)

Η πρώτη προσπάθεια κατασκευής γεωδαιτικού θόλου έγινε γύρω στο 1922 από το Γερμανό μηχανικό Walther Bauersfeld ο οποίος κατασκεύασε ένα πλανητάριο στη πόλη Jena της Γερμανίας [15]. Αργότερα, την δεκαετία του 1950, η ιδέα του γεωδαιτικού θόλου συνδέθηκε άμεσα με τον φιλόσοφο, μαθηματικό, μηχανικό, ιστορικό και ποιητή R. Buckminster Fuller, ο οποίος το 1954 βραβεύτηκε για την ευρεσιτεχνία ενός τέτοιου ημισφαιρικού θόλου. Ο θόλος αυτός σχεδιάστηκε με βάση ένα εικοσάεδρο, προσθέτοντας ισοσκελή τρίγωνα γύρω από κάθε κορυφή του πολυέδρου και αλλάζοντας ελαφρά τις θέσεις των κορυφών αυτών των τριγώνων, ώστε να τέμνουν μια νοητή ημισφαιρική επιφάνεια. Στο Σχήμα 1.11 φαίνονται τα πρότυπα σχέδια του Fuller .

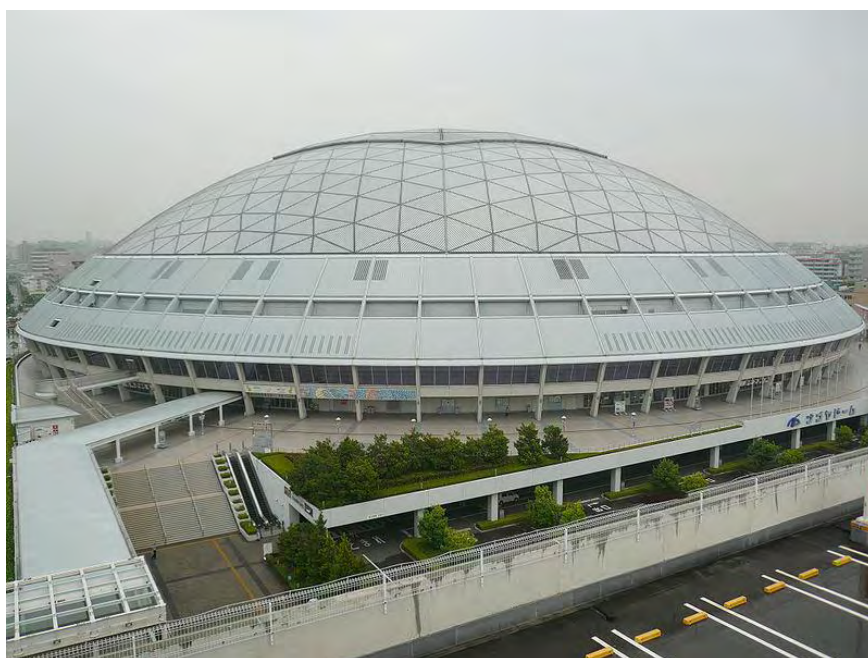


Σχήμα 1.11 Πρότυπα σχέδια του Fuller

Την εποχή που ο Fuller ανακάλυψε το γεωδαιτικό θόλο δόθηκε ελάχιστη σημασία σε αυτή την ιδέα, όμως μετά την εξέλιξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών δόθηκε η δυνατότητα, μέσω της επιστήμης της Συνεργετικής (Synergetics) που ασχολείται με αυτό το αντικείμενο, η πραγματοποίηση αναλύσεων για το σχεδιασμό τέτοιου είδους κατασκευών.

Συνήθως τέτοιου τύπου θόλοι, και ιδιαίτερα μεγάλης κλίμακας, κατασκευάζονται για βιομηχανική χρήση, για στέγαστρα αθλητικών εγκαταστάσεων, πλανητάρια κ.α. Αντίθετα θόλοι μικρότερων διαστάσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για στέγαση χώρων ή ως θερμοκήπια κ.α. Στο Σχήμα 1.12 φαίνεται ένα γήπεδο baseball στη πόλη Nagoya της Ιαπωνίας του οποίου το στέγαστρο είναι από γεωδαιτικό θόλο.

Σημαντικό πλεονέκτημα μιας τέτοιας κατασκευής αποτελεί η δυνατότητα της σε κάλυψη μεγάλων ανοιγμάτων και έτσι η ύπαρξη μεγάλου χώρου στο εσωτερικό της χωρίς την παρεμβολή υποστηριγμάτων. Επίσης η θέρμανση και ψύξη αυτών των κτιρίων είναι καλύτερη δεδομένου ότι υπάρχουν λιγότερες γωνίες, όπου μπορεί να «παγιδευτεί» η θερμότητα. Ως μειονέκτημα μπορεί να αναφερθεί η δυσκολία στην προσαρμογή των επίπλων του εσωτερικού χώρου στις καμπύλες επιφάνειες της κατασκευής. Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί ότι για γεωδαιτικούς θόλους διαμέτρου μεγαλύτερης του μισού μιλίου ο φέρων οργανισμός της κατασκευής είναι πιο ελαφρύς από τον αέρα που περικλείει, με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος να «πετάξει» στον αέρα όπως τα αερόστατα ηλίου [15].

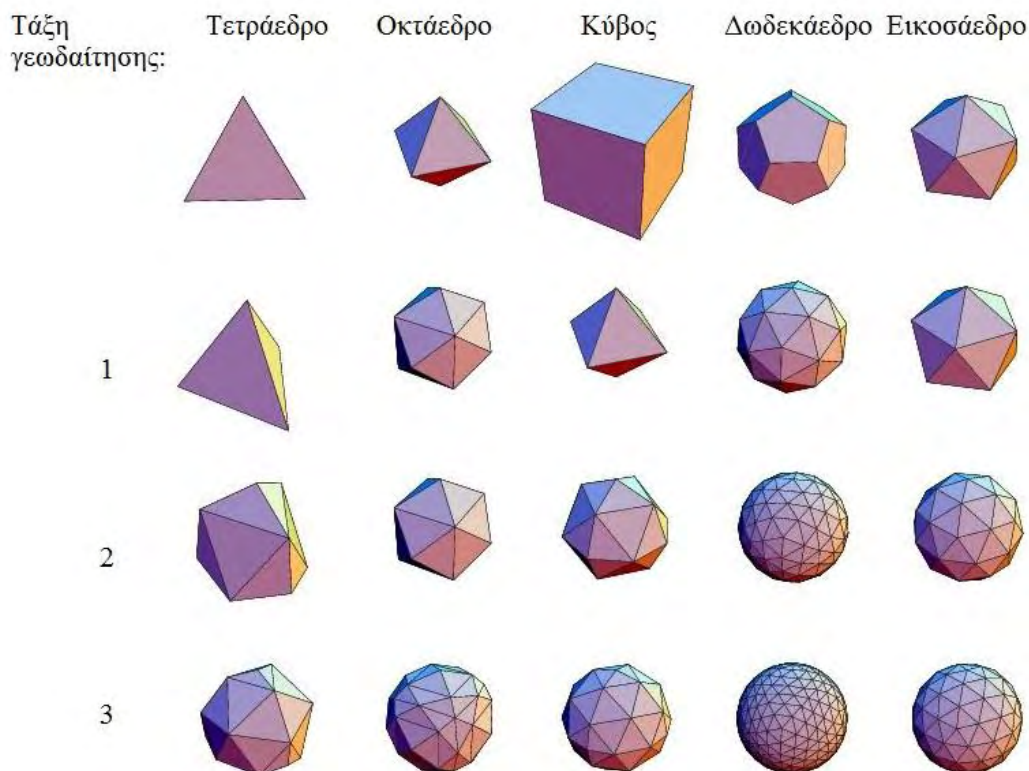


Σχήμα 1.12 Γήπεδο baseball στη Nagoya της Ιαπωνίας – στέγαστρο από γεωδαιτικό θόλο

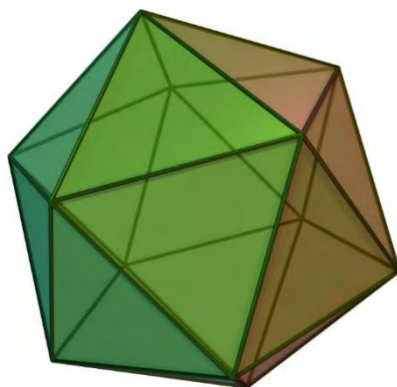
### 1.3 Σχεδίαση γεωδαιτικών θόλων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως για τη σχεδίαση ενός γεωδαιτικού θόλου διατάσσονται κατάλληλα επίπεδα τρίγωνα στο χώρο των οποίων οι κορυφές βρίσκονται κατά προσέγγιση σε μια νοητή επιφάνεια ενός στερεού εκ περιστροφής. Για να επιτευχθεί αυτή η διαδικασία, αρχικά επιλέγεται ένα από τα πλατωνικά στερεά (τετράεδρο, κύβος, οκτάεδρο, δωδεκάεδρο, εικοσάεδρο) ή κάποιο άλλο πολύεδρο, το οποίο θέλουμε να εγγράφεται, με τις κορυφές του, στο στερεό εκ περιστροφής που επιλέξαμε (π.χ. μια σφαίρα). Έπειτα γίνεται n-τάξης γεωδαίτηση (geodesation) που αντικαθιστά κάθε έδρα του πολυέδρου με τη προβολή της στο περιεγραμμένο εκ περιστροφής στερεό κωνικής τομής n-τάξης κανονικής ψηφίδωσης (tessellation) του πολυγώνου αυτού. Στο Σχήμα 1.13 που ακολουθεί φαίνονται βασικά στερεά (πάνω σειρά) και γεωδαιτήσεις τάξης 1 έως 3 (από πάνω προς τα κάτω) των πέντε Πλατωνικών στερεών.

Δηλαδή για να γίνει περισσότερο κατανοητή η διαδικασία της ψηφίδωσης των πολυγώνων των πολυέδρων, έστω ότι επιλέγουμε το εικοσάεδρο. Το εικοσάεδρο αποτελείται από 20 ισόπλευρα τρίγωνα (Σχήμα 1.14) .

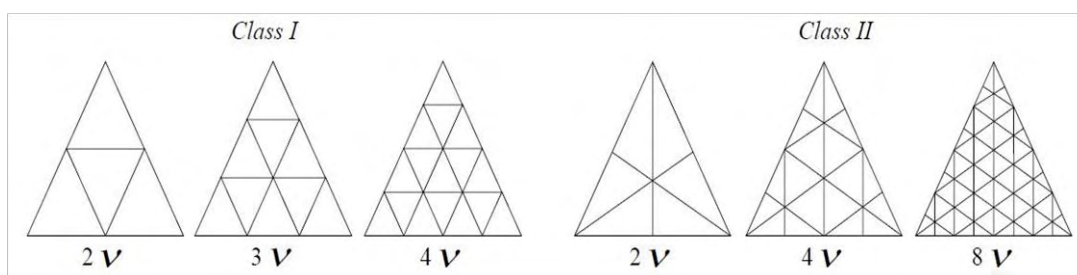


Σχήμα 1.13 Γεωδαιτήσεις πλατωνικών στερεών τάξης 1,2,3



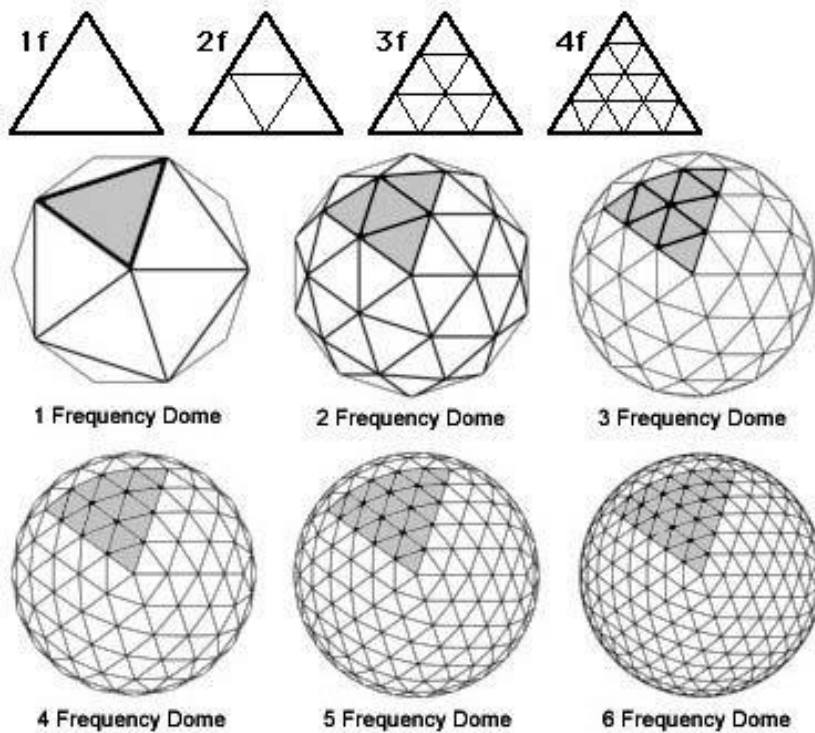
Σχήμα 1.14 Τρισδιάστατη άποψη εικοσάεδρου

Σε αυτά τα τρίγωνα ανάλογα με το βαθμό  $n$ - γεωδαιίτησης ή συχνότητα  $f$  (frequency) όπως αλλιώς ονομάζεται, γίνεται υποδιαίρεση (subdivision) του κάθε τριγώνου σε  $f$  σειρές ίσου διαστήματος όπου κάθε μία σειρά εμπεριέχει μικρότερα τρίγωνα. Η υποδιαίρεση μπορεί να γίνει είτε οριζόντια (Class I) είτε κατακόρυφα (Class II) όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.15. Συγκεκριμένα για τη Class II, αυτή μπορεί να επιτευχθεί μόνο για άρτιο αριθμό συχνοτήτων.



Σχήμα 1.15 Συχνότητες  $n$  και κλάσεις τριγώνων

Η συχνότητα συμβολίζεται και με το ελληνικό γράμμα "ν", για παράδειγμα στο Σχήμα 1.15 φαίνονται οι υποδιαίρεσεις των τριγώνων για συχνότητα 2,3,4,8ν αντίστοιχα ενώ στο Σχήμα 1.16 παρουσιάζονται οι κατόψεις γεωδαιτικών θόλων για Class I, ώστε να γίνει καλύτερη κατανόηση της γεωμετρίας τους στο χώρο. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη συχνότητα χρησιμοποιούμε στη σχεδίαση τόσο καλύτερη προσέγγιση έχουμε του σχήματος που επιδιώκουμε να αναπαραστήσουμε. Οι κορυφές των μικρότερων τριγώνων που προκύπτουν από την υποδιαίρεση των αρχικών τριγώνων του εικοσάεδρου, με κατάλληλη διαδικασία αλλάζουν ώστε να τμήσουν το στερεό εκ περιστροφής, που θέλουμε να δημιουργήσουμε. Αυτό έχει σα συνέπεια κάποια τρίγωνα να μην είναι πλέον ισόπλευρα .



Σχήμα 1.16 Επεξήγηση γεωμετρίας γεωδαιτικών θόλων Class I

Από τη βιβλιογραφία [15] μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τύπους για την εύρεση του αριθμού των κορυφών ή κόμβων, των ράβδων και των τριγώνων ολόκληρου του γεωδαιτικού θόλου που μορφώνεται. Για τη συνήθη περίπτωση της σφαίρας εγγεγραμμένη σε εικοσάεδρο και Κλάσης I έχουμε:

$$V = 10v^2 + 2$$

$$F = 20v^2$$

$$E = 30v^2 \quad , \quad \text{όπου}$$

$V$  : αριθμός κορυφών

$F$  : αριθμός ράβδων

$E$  : αριθμός τριγώνων

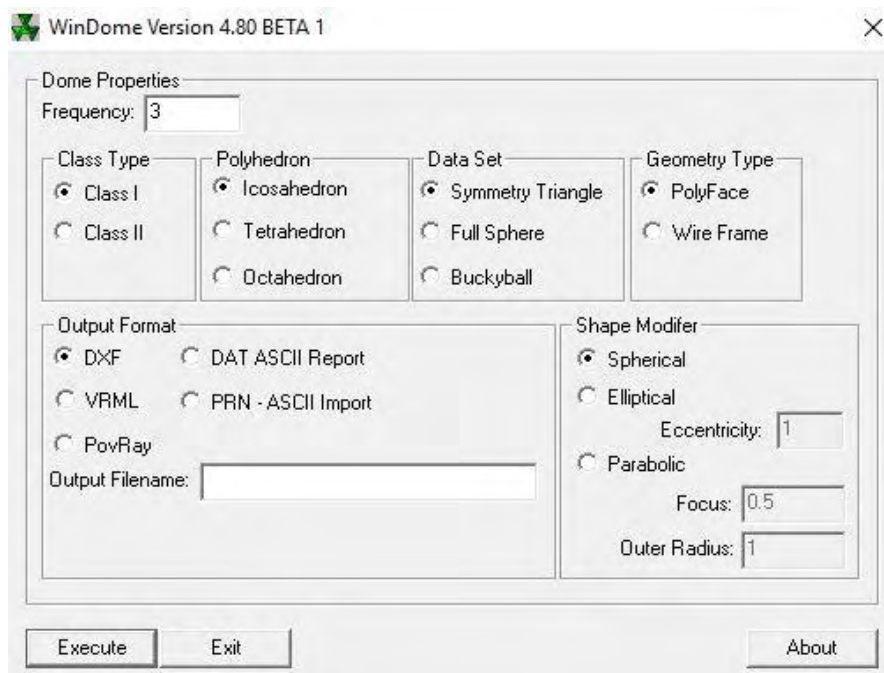
$v$  : συχνότητα

#### 1.4 Λογισμικό για τη σχεδίαση γεωδαιτικών θόλων

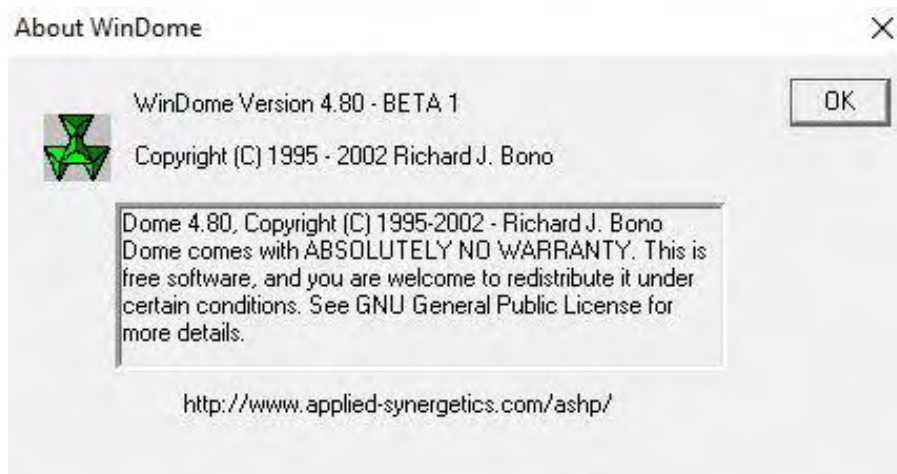
Σύμφωνα με όσα διατυπώθηκαν παραπάνω, η απεικόνιση και η γεωμετρική αποτύπωση ενός γεωδαιτικού θόλου είναι αδύνατο να γίνει με γενικά προγράμματα σχεδίασης CAD, διότι ειδικά για τη περίπτωση ενός θόλου μεγάλων διαστάσεων απαιτείται

να σχεδιαστούν χιλιάδες κόμβοι και ράβδοι. Για να αντιμετωπισθεί αυτό το πρόβλημα πρέπει να γίνει χρήση εξειδικευμένου λογισμικού που έχει τη δυνατότητα να εξάγει τη γεωμετρία του θόλου σε αρχείο παραμετροποιήσιμο (π.χ. dxf) από προγράμματα στατικής και δυναμικής ανάλυσης, που στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση της κατασκευής.

Για την παραγωγή της γεωμετρίας του γεωδαιτικού θόλου που μελετήσαμε, χρησιμοποιήθηκε το Freeware (άδεια: ελεύθερης χρήσης) πρόγραμμα WinDome. Η γραφική απεικόνιση του παραθύρου επικοινωνίας (user interface) του WinDome με το χρήση παρατίθεται στο Σχήμα 1.17.



Σχήμα 1.17 User interface του προγράμματος WinDome



Σχήμα 1.18 Άδεια χρήσης του προγράμματος WinDome



## 1.5 Συστήματα κόμβων: Γενικά στοιχεία

Οι κόμβοι μιας θολωτής κατασκευής είναι εκείνα τα μεταλλικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των ράβδων μεταξύ τους. Αυτή η σύνδεση, που επιτυγχάνεται μεταξύ μελών και κόμβου, χαρακτηρίζεται θεωρητικά ως αρθρωτή.

Ένας κόμβος για να κριθεί αξιόλογος, πρέπει να διαθέτει κάποια χαρακτηριστικά, όπως, η ικανότητα σε παραλαβή και μεταφορά των εντατικών μεγεθών των μελών που συντρέχουν σαυτόν, η ευκολία σε μαζική παραγωγή των στοιχείων του κόμβου, η δυνατότητα προσαρμογής στην εκάστοτε γεωμετρία του θόλου και η απλότητα στη χρήση του. Στη προσπάθεια όμως να συνδυαστούν όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά, προκύπτουν λύσεις αντικοινομικές και περίπλοκες. Συνεπώς οι κατασκευαστικές εταιρείες που ασχολούνται με τη κατασκευή θόλων, ανάλογα με το μερίδιο της αγοράς που καλύπτουν, τους πόρους τους αλλά και την εξειδίκευση τους, έχουν σχεδιάσει τη δική τους μορφή κόμβου. Γενικότερα στο εμπόριο κυκλοφορεί πληθώρα κόμβων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο χαρακτηριστικοί τύποι κόμβων που εφαρμόζονται σε γεωδαιτικούς θόλους, με κύριο υλικό το χάλυβα. Ο λόγος που δε γίνεται αναφορά σε κόμβους από άλλο υλικό (π.χ. αλουμίνιο), είναι διότι και η κατασκευή που αναλύεται στη παρούσα εργασία αποτελείται αποκλειστικά και μόνο από χαλύβδινα μέλη.

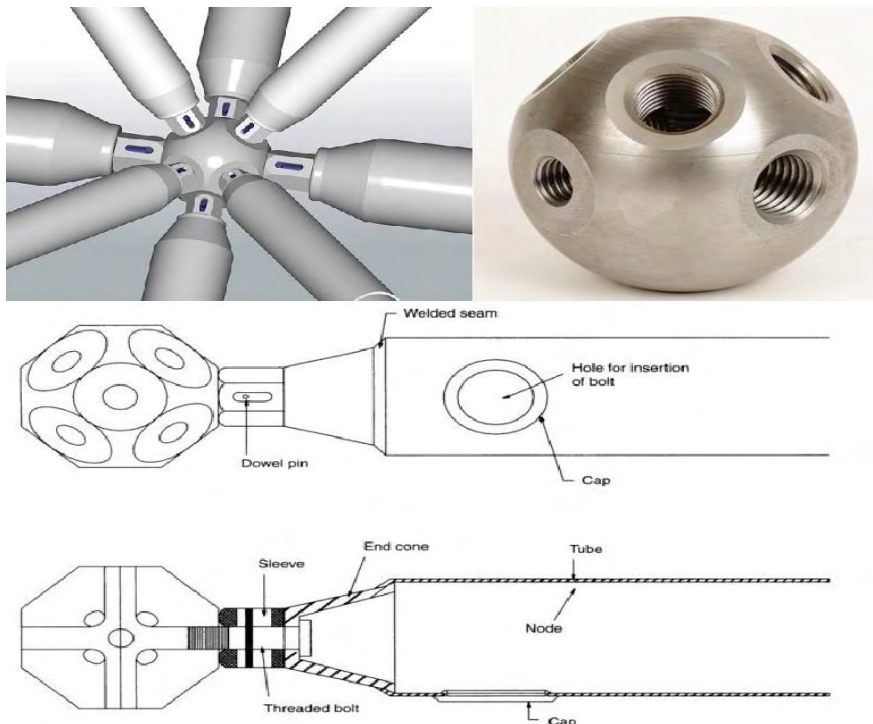
### 1.5.1 Κόμβος Mero ([www.mero.de](http://www.mero.de))

Ο συγκεκριμένος τύπος κόμβου αναπτύχθηκε αρχικά στη Γερμανία από το μηχανικό Max Mengerinhausen, το 1940. Μετέπειτα αυτός ο κόμβος εξελίχθηκε στο γνωστό δομικό σύστημα (structural system) Mero. Το σύστημα Mero γνωρίζει εξαιρετική εμπορική επιτυχία μέχρι και σήμερα, έχοντας εφαρμοστεί σε πολλούς τύπους θόλων αλλά και χωροδικτυωμάτων .

Αναφορικά με τη συνδεσμολογία αυτού του συστήματος, αυτό αποτελείται από κόμβους, ράβδους, τεγίδες, ειδικά τεμάχια αλλά και επικαλύψεις. Ο κόμβος αυτός όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.19 είναι μια στερεά σφαίρα από χάλυβα υψηλής αντοχής που περιέχει σπειροειδής οπές. Οι ράβδοι που ενώνονται με τον κόμβο είναι από κοίλες κυκλικές διατομές και συνδέονται στα άκρα τους με μεταλλικούς κώνους, μέσω των οποίων διέρχονται κοχλίες υψηλής αντοχής που βιδώνονται στις οπές του κόμβου, πετυχαίνοντας έτσι μια σύνδεση χωρίς εκκεντρότητες. Οι τύποι των κόμβων είναι κυρίως δύο (με 10 και 18 οπές αντίστοιχα), επίσης διατίθεται και ένας τρίτος έπειτα από ειδική παραγγελία. Επιπλέον το εύρος της διαμέτρου των κόμβων είναι μεταξύ 50mm έως 250mm .

Στη συνέχεια στο Σχήμα 1.20 παρουσιάζονται γεωδαιτικοί θόλοι, που για τη κατασκευή τους χρησιμοποιήθηκε το σύστημα Mero. Στο συγκεκριμένο σχήμα απεικονίζεται

το Eden Project στη πόλη Cornwall της Αγγλίας, που αποτελεί ένα συγκρότημα θόλων μέσα στο οποίο στεγάζονται διάφορα φυτά, που ευδοκιμούν σε διάφορες κλιματικές συνθήκες .



Σχήμα 1.19 Συνδεσμολογία συστήματος Mero

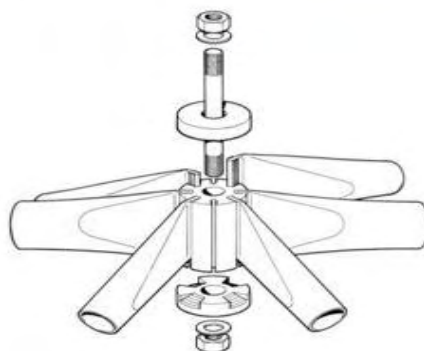


Σχήμα 1.20 The Eden Project (Cornwall, United Kingdom)

### 1.5.2 Κόμβος Triodetic ([www.triodetic.com](http://www.triodetic.com))

Αρχικά, ο κόμβος του συστήματος Triodetic χρησιμοποιήθηκε το 1953 για ανάγκες της Καναδικής Αεροπορίας. Στη συνέχεια όμως με σταδιακή βελτίωση του, εφαρμόστηκε επιτυχώς σε πολλούς τύπους χωροδικτυωμάτων και θολωτών κατασκευών.

Ειδικότερα, όσον αφορά τη συνδεσμολογία του κόμβου αυτού, δεν αποτελείται από ηλώσεις, κοχλιώσεις ή συγκολλήσεις, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.21. Ο κόμβος αυτού του συστήματος αποτελείται από ένα κυλινδρικό δακτύλιο μεγάλου πάχους, από κράμα αλουμινίου AA 6351-T6, που φέρει περιμετρικά διαμήκεις εγκοπές, μέσα στις οποίες τοποθετούνται τα πεπλατυσμένα άκρα των ράβδων. Στον άξονα αυτού του δακτυλίου υπάρχει μια οπή όπου τοποθετείται ένας κοχλίας από το ίδιο κράμα υψηλής αντοχής, με σκοπό να εμποδίζεται η αποσυναρμολόγηση του κόμβου. Όσο αναφορά τις ράβδους που συντρέχουν στον κόμβο, αυτές είναι κοίλες κυκλικές διατομές χαλύβδινες ή αλουμινένιες. Η εφαρμογή του συστήματος Triodetic ενδείκνυται για κάθε μορφή θόλων αλλά και χωροδικτυωμάτων και γενικά έχει μικρό κόστος ανέγερσης, αφού απαιτεί μη εξειδικευμένο προσωπικό και λίγα μικρά ανυψωτικά μηχανήματα. Παρακάτω στο Σχήμα 1.22 απεικονίζεται ένα παράδειγμα γεωδαιτικού θόλου που έχει εφαρμοστεί το σύστημα Triodetic, πρόκειται για ένα χώρο προβολής ταινιών (Cinesphere) στο Ontario του Καναδά.



Σχήμα 1.21 Συνδεσμολογία συστήματος Triodetic

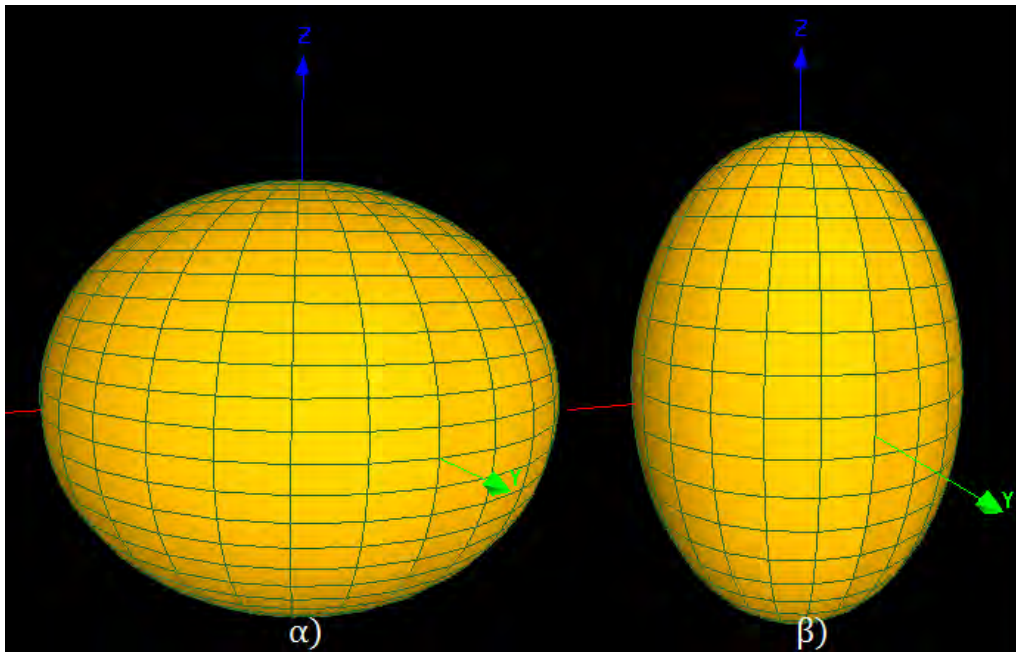


Σχήμα 1.22 Cinesphere (Ontario, Canada)

## Κεφάλαιο 2 Υπολογισμός φορτίων χιονιού

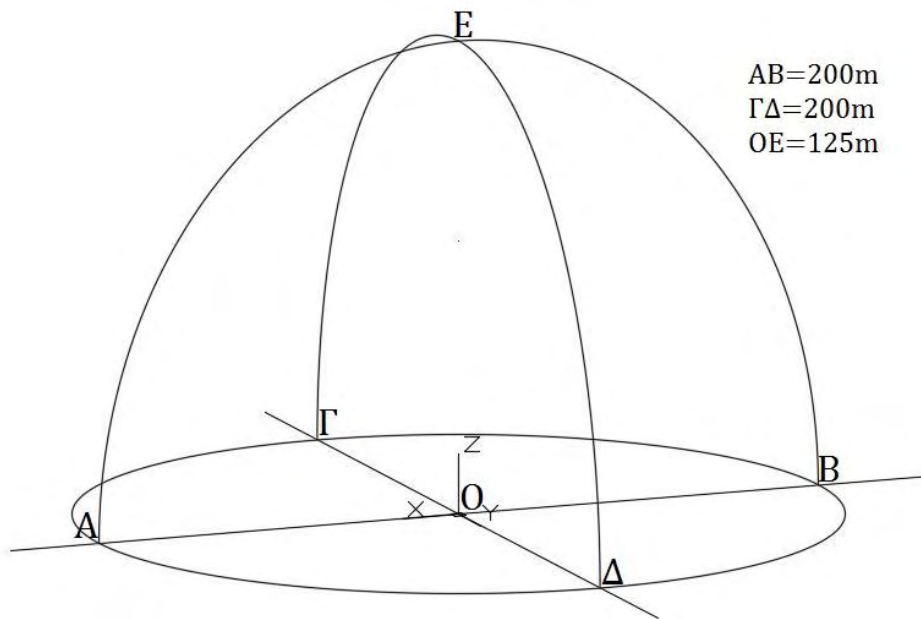
### 2.1 Γεωμετρία φορέα

Στη παρούσα εργασία η κατασκευή που αναλύεται είναι ένας γεωδαιτικός θόλος μεγάλων διαστάσεων, που έχει τη μορφή ενός ελλειψοειδούς εκ περιστροφής. Όσον αφορά το σχήμα ενός ελλειψοειδούς (Σχήμα 2.1), αυτό προκύπτει εάν περιστρέψουμε μια έλλειψη γύρω από έναν από τους δύο άξονές της.



Σχήμα 2.1 Σχήματα ελλειψοειδών

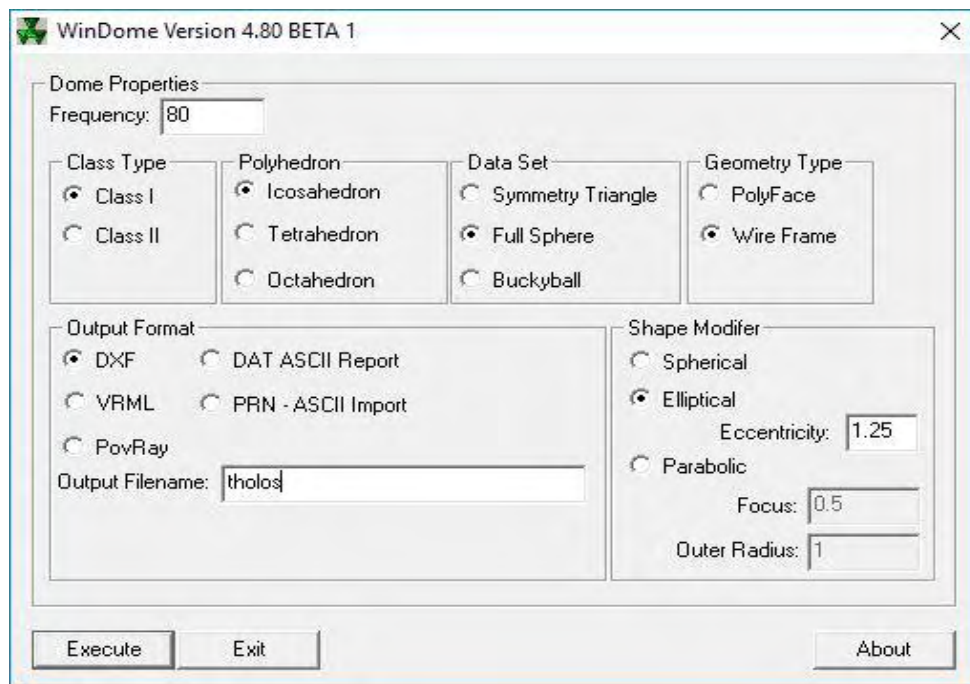
Συγκεκριμένα το σχήμα του θόλου, που θα μελετήσουμε αργότερα, έχει τη μισή όψη του Σχήματος 2.1 β). Η βάση του έχει τη μορφή κύκλου με διάμετρο 200m, ενώ η κορυφή του βρίσκεται σε ύψος 125m. Οι διαστάσεις του θόλου παρουσιάζονται αναλυτικότερα στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 Γενέτιρες μισού ελλειψοειδούς εκ περιστροφής και διαστάσεις του υπό μελέτη γεωδαιτικού θόλου

Για τη δημιουργία της γεωμετρίας του φορέα του θόλου, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα WinDome. Ειδικότερα το πρόγραμμα αυτό, όπως προαναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1.3, έχει τη δυνατότητα σχεδίασης γεωδαιτικών θόλων και εξαγωγής αρχείου dxf, που αργότερα εισάγεται ως το σχήμα του φορέα σε λογισμικά στατικής και δυναμικής ανάλυσης. Οι ρυθμίσεις που επιλέχθηκαν στο WinDome απεικονίζονται στο Σχήμα 2.3, με σκοπό να σχεδιάσουμε ένα γεωδαιτικό θόλο από εικοσάεδρο (Icosahedron) με ClassI και συχνότητα  $\nu = 80$  (frequency). Η επιλογή τόσο μεγάλης συχνότητας έγινε για να έχουμε ένα συγκεκριμένο εύρος (περίπου από 1m έως 2.5 m) στα μήκη των ράβδων του θόλου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το WinDome δε παράγει σχέδια γεωδαιτικών θόλων με συγκεκριμένες διαστάσεις αλλά υπό κλίμακα. Για παράδειγμα με τις ρυθμίσεις του Σχήματος 2.3 ο θόλος θα έχει τη πλήρη μορφή ενός ελλειψοειδούς (Full Sphere) (σαν αυτού του Σχ2.1β), του οποίου η τομή με το επίπεδο  $xy(z = 0)$  είναι ένας κύκλος με διάμετρο 2m και η απόσταση της κορυφής από την αρχή των αξόνων θα ισούται με την εκκεντρότητα (eccentricity), δηλαδή 1.25. Αν η τιμή της εκκεντρότητας είναι κάτω από τη μονάδα, τότε προκύπτει ελλειψοειδές της μορφής του Σχήματος 2.1 α). Με βάση αυτές τις συνθήκες οι τελικές διαστάσεις του θόλου (Σχήμα 2.2), προέκυψαν μετά από επεξεργασία του αρχείου dxf (από το WinDome) στο AutoCAD. Αναλυτικότερα, αποκόπηκε το τμήμα του ελλειψοειδούς κάτω από το επίπεδο  $xy(z = 0)$  και μεγεθύνθηκε το σχήμα επί 100 φορές (scaled x100) με βάση αναφοράς το σημείο (0,0,0).



Σχήμα 2.3 Επιλεγμένες ρυθμίσεις στο WinDome για τη σχεδίαση του θόλου

Τέλος, ο γεωδαιτικός θόλος που προκύπτει με βάση τη τεχνική σχεδίασης που αναφέρθηκε πριν, αποτελείται συνολικά από 96200 ράβδους, 32201 κόμβους και 64000 τρίγωνα.

## 2.2 Υπολογισμός φορτίων χιονιού

Ο υπολογισμός του φορτίου χιονιού γίνεται με βάση τις διατάξεις του EN-1991-1-3. Το φορτίο του χιονιού θεωρείται ως στατικό και εντάσσεται στις μεταβλητές δράσεις. Η τιμή του εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως τη μορφή και τη γεωμετρία της κατασκευής, τη τραχύτητα της επιφάνειας, την απόσταση των γειτονικών κτηρίων, τη ποσότητα της θερμότητας που εκλύεται από το εσωτερικό της κατασκευής, τον περιβάλλοντα χώρο του κτηρίου και τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες. Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 5.2 του EN-1991-1-3 το φορτίο χιονιού σε μία κατασκευή για «καταστάσεις σχεδιασμού με διάρκεια/παροδικές» προσδιορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$s = \mu_i C_e C_t s_k \quad (2.1)$$

Όπου :

$\mu_i$  είναι ο συντελεστής μορφής φορτίου χιονιού

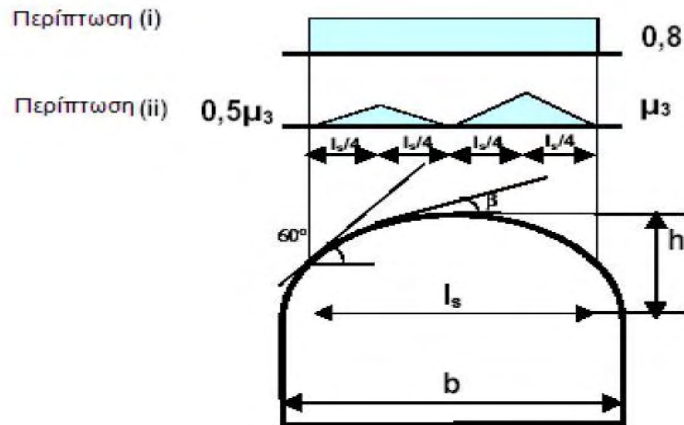
$C_e$  είναι ο συντελεστής έκθεσης (για κανονικές συνθήκες  $C_e = 1$ )

$C_t$  είναι ο θερμικός συντελεστής (για κανονικές συνθήκες  $C_t = 1$ )

$s_k$  είναι η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού

### Συντελεστής μορφής φορτίου χιονιού $\mu_3$ :

Για τη μορφή του θόλου που εξετάζουμε, υπάρχουν διαθέσιμες διατάξεις στον EN-1991-1-3. Γενικότερα αυτές αναφέρονται σε κυλινδρικές στέγες οποιασδήποτε μορφής με απλή καμπυλότητα, στις οποίες δεν εμποδίζεται η ολίσθηση του χιονιού. Η κατανομή του φορτίου χιονιού για τη περίπτωση των κυλινδρικών στεγών φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Κατανομή φορτίου χιονιού σε κυλινδρικές στέγες

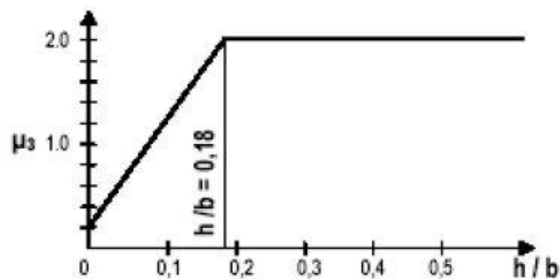
Επιπλέον στο Σχήμα 2.4 παρατηρεί κανείς ότι φορτίζεται μόνο η περιοχή με κλίση επιφάνειας μικρότερη των  $60^\circ$ . Αυτή η παραδοχή ισχύει για οποιονδήποτε τύπο κατασκευής και αυτό διότι, το χιόνι σε επιφάνειες με κλίση μεγαλύτερη των  $60^\circ$  ολισθαίνει και άρα δεν ασκεί πλέον πίεση (φορτίο) στο φορέα.

Ο συντελεστής  $\mu_3$  υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$\text{Για } \beta > 60^\circ, \quad \mu_3 = 0 \quad (2.2)$$

$$\text{Για } \beta \leq 60^\circ, \quad \mu_3 = 0.2 + 10h/b \quad (2.3)$$

ή από το Σχήμα 2.5.

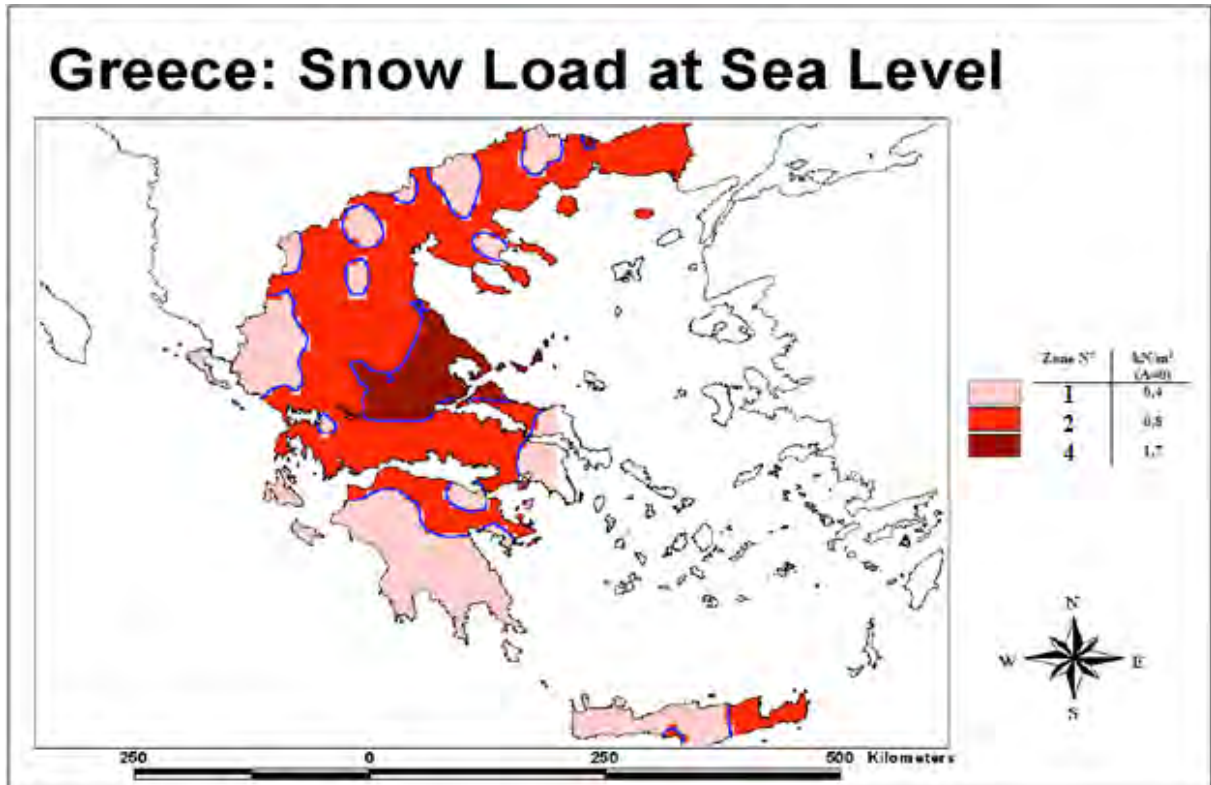


Σχήμα 2.5 Διάγραμμα  $\mu_3$  και  $h/b$



Χαρακτηριστική τιμή φορτίου χιονιού επί του εδάφους,  $s_{k,0}$ :

Η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού επί του εδάφους,  $s_{k,0}$ , υπολογίζεται με βάση τη τοποθεσία της κατασκευής. Στο εθνικό προσάρτημα κάθε χώρας υπάρχει ένας χάρτης που ταξινομεί κάθε περιοχή – νομό σε ζώνες, ανάλογα με τις συνθήκες χιονόπτωσης που έχουν παρατηρηθεί διαχρονικά σε κάθε τόπο. Για την Ελλάδα ο χάρτης αυτός φαίνεται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6 Χάρτης ταξινόμησης περιοχών σε ζώνες

Οι τιμές του συντελεστή  $s_{k,0}$  για κάθε ζώνη είναι οι εξής:

$$\text{Ζώνη I} : s_{k,0} = 0.4 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Ζώνη II} : s_{k,0} = 0.8 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Ζώνη IV} : s_{k,0} = 1.7 \text{ kN/m}^2$$

Χαρακτηριστική τιμή φορτίου χιονιού,  $s_k$ :

Η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού  $s_k$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$s_k = s_{k,0} \left( 1 + \left( \frac{A}{917} \right)^2 \right) \quad (2.4)$$

Όπου:

$s_{k,0}$  είναι η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού επί του εδάφους, σε  $\text{kN/m}^2$

$A$  το υψόμετρο της τοποθεσίας της κατασκευής, σε  $\text{m}$ .

Αξίζει να σημειωθεί ότι για  $A > 1500\text{m}$ , πρέπει να γίνεται ειδική μελέτη για το προσδιορισμό του φορτίου χιονιού.

Υπολογισμός φορτίου χιονιού:

Ο θόλος θεωρείται ότι βρίσκεται στο Βόλο, δηλαδή στο Ν.Μαγνησίας, άρα η τοποθεσία της κατασκευής εντάσσεται στη Ζώνη IV (δυσμενέστερη).

Τότε  $s_{k,0} = 1.7 \text{ kN/m}^2$ . Το υψόμετρο της περιοχής αυτής το θεωρούμε μηδενικό, με το σκεπτικό ότι η κατασκευή θα βρίσκεται κοντά στη θάλασσα. Συνεπώς από τη σχέση (2.4) έχουμε:  $s_k = s_{k,0} = 1.7 \text{ kN/m}^2$ . Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4 υπάρχουν δύο περιπτώσεις κατανομής του φορτίου χιονιού σε κυλινδρικές στέγες. Στη παρούσα εργασία εξετάζεται μόνο η πρώτη περίπτωση φόρτισης, δηλαδή της ομοιόμορφης κατανομής. Άρα μέσω της σχέσης (2.1) και του Σχ2.4 έχουμε:

$$s = 0.8 \times 1 \times 1 \times 1.7 \Rightarrow s = 1.36 \text{ kN/m}^2.$$

### 2.2.1 Εύρεση κλίσης επιφάνειας ελλειψοειδούς

Για την εύρεση της περιοχής που θα ασκηθεί το φορτίο του χιονιού, αναζητούμε το ύψος πάνω από το οποίο η κλίση της επιφάνειας είναι μικρότερη των  $60^\circ$ . Παρακάτω παρουσιάζονται 2 τρόποι υπολογισμού:

#### 1<sup>ος</sup> τρόπος : Μέσω αλγεβρικών εξισώσεων επιφάνειας ελλειψοειδούς

Η εξίσωση του ελλειψοειδούς, έχει τη γενική μορφή:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (2.5)$$

Όπου  $a, b, c$  σταθερές.

Οι υπολογισμοί θα γίνουν υπό κλίμακα, με βάση τις διαστάσεις της γεωμετρίας που παρήγαγε το λογισμικό WinDome.

Για  $z = 0$ : έχουμε κύκλο με ακτίνα ίση με τη μονάδα και εξίσωση:  $x^2 + y^2 = 1$ , επομένως  $a = b = 1$ .

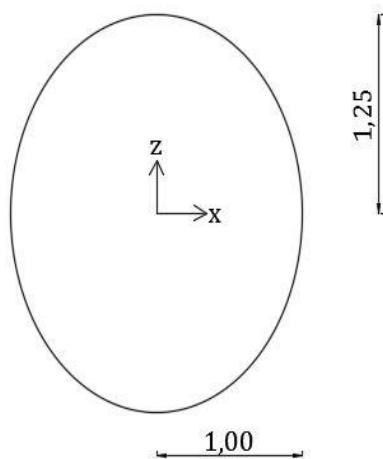
Για  $z = 1.25$ : για την κορυφή του ελλειψοειδούς ισχύει  $x = y = 0 \Rightarrow (2.5)$   
 $\Rightarrow \frac{1.25^2}{c^2} = 1 \Rightarrow c = 1.25$

Άρα η τελική μορφή της εξίσωσης (2.5) είναι:

$$x^2 + y^2 + \frac{z^2}{1.25^2} = 1$$

Η επιφάνεια των ελλειψοειδών έχει την ίδια καμπυλότητα ως προς όλες τις διευθύνσεις. Επομένως για την εύρεση της κλίσης, χρησιμοποιούμε μια οποιαδήποτε έλλειψη που ανήκει στο ελλειψοειδές. Οπότε για το επίπεδο  $xz (y = 0)$  έχουμε:

$$x^2 + \frac{z^2}{1.25^2} = 1 \Rightarrow z = \pm 1.25 \cdot \sqrt{1 - x^2}$$



Σχήμα 2.7 Το σχήμα της έλλειψης που επιλέχθηκε για τους υπολογισμούς της κλίσης

Για θετικά υψόμετρα: ( $z > 0$ )  $\Rightarrow z = 1.25 \cdot \sqrt{1 - x^2}$  (2.6)

Η κλίση της καμπύλης (Σχήμα 2.7) υπολογίζεται παραγωγίζοντας την εξίσωση (2.6) ως προς  $x$ :

$$\frac{dz}{dx} = 1.25 \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - x^2)^{\frac{1}{2}-1} \cdot (-2x) \Rightarrow \frac{dz}{dx} = \frac{-1.25 \cdot x}{\sqrt{1 - x^2}}$$

Αλλά θέλουμε:

$$\frac{dz}{dx} = \tan 60^\circ = \sqrt{3} \Rightarrow \sqrt{3} = \frac{-1.25 \cdot x}{\sqrt{1 - x^2}} \Rightarrow x = 0.81$$

$$\text{Για } x = 0.81 \Rightarrow z = 1.25 \cdot \sqrt{1 - 0.81^2} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{z = 0.733}$$

Έπειτα για να βρούμε τη πραγματική διάσταση για το ύψος (z), πάνω από το οποίο ασκείται το φορτίο χιονιού, πολλαπλασιάζουμε το αποτέλεσμα επί 100. Τότε προκύπτει **z = 73.3m**.

## 2<sup>ος</sup> τρόπος : Μέσω αναλυτικής γεωμετρίας

Κάθε τρίγωνο του γεωδαιτικού θόλου ορίζει ένα επίπεδο στο χώρο. Θα αναζητήσουμε τη γωνία που σχηματίζει το κάθε τρίγωνο ως προς κάποιο οριζόντιο επίπεδο, μέσω αναλυτικής γεωμετρίας. Η εξίσωση ενός επιπέδου έχει τη μορφή:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (2.7)$$

Οι συντελεστές A,B,C μπορούν να προσδιοριστούν με διάφορους τρόπους. Τα διαθέσιμα δεδομένα για τη γεωμετρία των τριγώνων είναι οι συντεταγμένες των κόμβων τους και για αυτό επελέγη ο παρακάτω τρόπος.

Έστω τα σημεία των τριγώνων, με συντεταγμένες  $(x_1, y_1, z_1)$ ,  $(x_2, y_2, z_2)$ ,  $(x_3, y_3, z_3)$ , τότε:

$$A = \begin{vmatrix} y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix}$$

$$B = \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix}$$

$$C = \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{vmatrix}$$

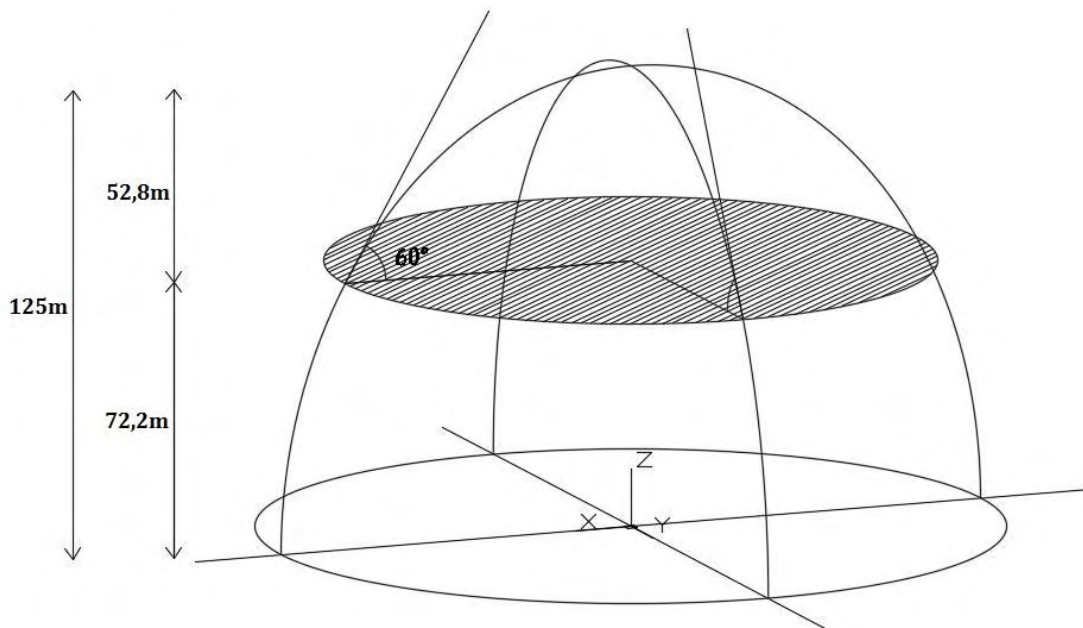
Η διεδρη γωνία  $\theta$  μεταξύ δύο επιπέδων δίνεται από τη σχέση:

$$\cos\theta = \left| \frac{A_1 A_2 + B_1 B_2 + C_1 C_2}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} \cdot \sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}} \right| = ct$$

$$\Rightarrow \theta = \cos^{-1} ct \quad (2.8)$$

Με τη βοήθεια φύλλου Excel (Παράρτημα Α), υπολογίσαμε τις κλίσεις των τριγώνων και στη συνέχεια αναζητήσαμε το σημείο των τριγώνων με κλίση μικρότερη των  $60^\circ$ , που έχει το χαμηλότερο υψόμετρο (z). Το αποτέλεσμα που προέκυψε είναι για  $z = 72.266m$ .

Οπότε λαμβάνουμε ως υψόμετρο πάνω από το οποίο ασκείται το φορτίο του χιονιού στη κατασκευή το **z = 72.2m** (Σχήμα 2.8).



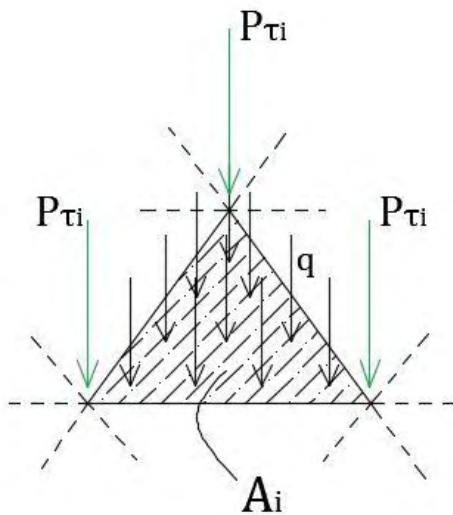
Σχήμα 2.8 Περιοχή άσκησης φορτίου χιονιού (πάνω από το γραμμοσκιασμένο επίπεδο) στην επιφάνεια του ελλειψοειδούς

### 2.2.2 Αναγωγή επιφανειακού φορτίου σε επικόμβια

Για το προσδιορισμό της φόρτισης του χιονιού, υπάρχουν δύο τρόποι είτε μέσω προσομοίωσης της επικάλυψης με πεπερασμένων στοιχεία, όπου θα ασκηθεί απευθείας το επιφανειακό φορτίο, είτε μέσω αναγωγής του φορτίου σε επικόμβια. Λόγω του μεγάλου υπολογιστικού φόρτου, χρησιμοποιώντας πεπερασμένα στοιχεία, επιλέξαμε την αναγωγή του επιφανειακά κατανεμημένου φορτίου του χιονιού σε αντίστοιχα επικόμβια.

Το φορτίο του χιονιού ασκείται στην επιφάνεια του κάθε τριγώνου, όπου το κάθε τρίγωνο στηρίζεται σε τρεις κόμβους. Επομένως επιχειρούμε τον επιμερισμό του επιφανειακού φορτίου σε συγκεντρωμένα επικόμβια.

Από τα δεδομένα για τα μήκη των μελών, τα οποία σχηματίζουν τα τρίγωνα παρατηρούμε ότι, με πολύ καλή προσέγγιση, τα τρίγωνα είναι ισόπλευρα. Άρα το επιφανειακό φορτίο ισοκατανέμεται σε 3 επικόμβια φορτία  $P_{ti}$  (Σχήμα 2.9).



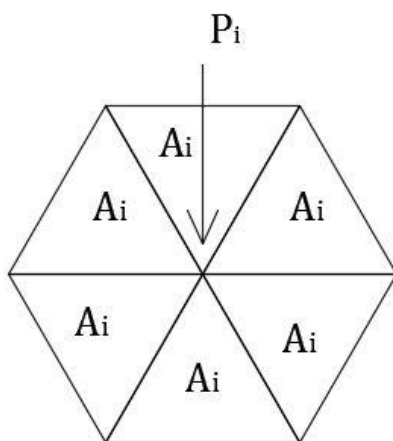
Σχήμα 2.9 Επικόμβια φορτία  $P_{\tau i}$  του κάθε τριγώνου λόγω επιφανειακού φορτίου  $q$

Όπου:  $P_{\tau i} = \frac{1}{3} q A_i$  (2.9)

$A_i$ : εμβαδόν τριγώνου

$q$  : επιφανειακό φορτίο χιονιού

Κάθε κόμβος ανήκει σε έξι τρίγωνα (Σχήμα 2.10), επομένως θα δέχεται και τα αντίστοιχα επικόμβια από αυτά. Κατά προσέγγιση γειτονικά τρίγωνα έχουν περίπου το ίδιο εμβαδόν.



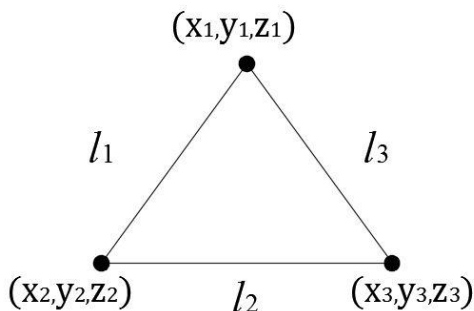
Όπου:  $P_i = 6 \cdot P_{\tau i} = 6 \cdot \frac{1}{3} q A_i$   
 $\Rightarrow P_i = 2qA_i$  (2.10)

Σχήμα 2.10 Τρίγωνα με κοινό κόμβο

Θα μπορούσαμε συντηρητικά να θεωρήσουμε ίδιο φορτίο σε όλους τους κόμβους του φορέα, όμως λόγω της μη ισεμβαδικότητας των τριγώνων, οι τιμές των συγκεντρωμένων φορτίων

διαφέρουν. Για το σκοπό αυτό αναζητούμε μια συνάρτηση που να συσχετίζει το εμβαδόν των τριγώνων με τη θέση τους στο χώρο.

Αρχικά υπολογίζουμε το εμβαδόν του κάθε τριγώνου και αντιπροσωπευτικές τιμές για τη θέση τους στο χώρο. Τα διαθέσιμα δεδομένα για τον υπολογισμό των εμβαδών (όπως αναφέρεται και στο Παράρτημα Α) ήταν οι συντεταγμένες των κόμβων του κάθε τριγώνου  $(x_i, y_i, z_i)$  – Σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11 Γεωμετρία ενός τριγώνου

Μέσω του Πυθαγορείου θεωρήματος υπολογίζουμε τα μήκη των πλευρών των τριγώνων:

$$l_i = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (2.11)$$

και στη συνέχεια από το τύπο του Ήρωνα, τα εμβαδά τους:

$$A_i = \sqrt{\tau(\tau - l_1)(\tau - l_2)(\tau - l_3)} \quad (2.12)$$

Όπου:

$$\tau = \frac{l_1 + l_2 + l_3}{2} \quad (2.13)$$

$\tau$  ημiperίμετρος.

Έπειτα βρίσκουμε τη μέση τιμή των συντεταγμένων  $(x_m, y_m, z_m)$  των τριών κόμβων του κάθε τριγώνου ως αντιπροσωπευτική για τη θέση τους στο χώρο.

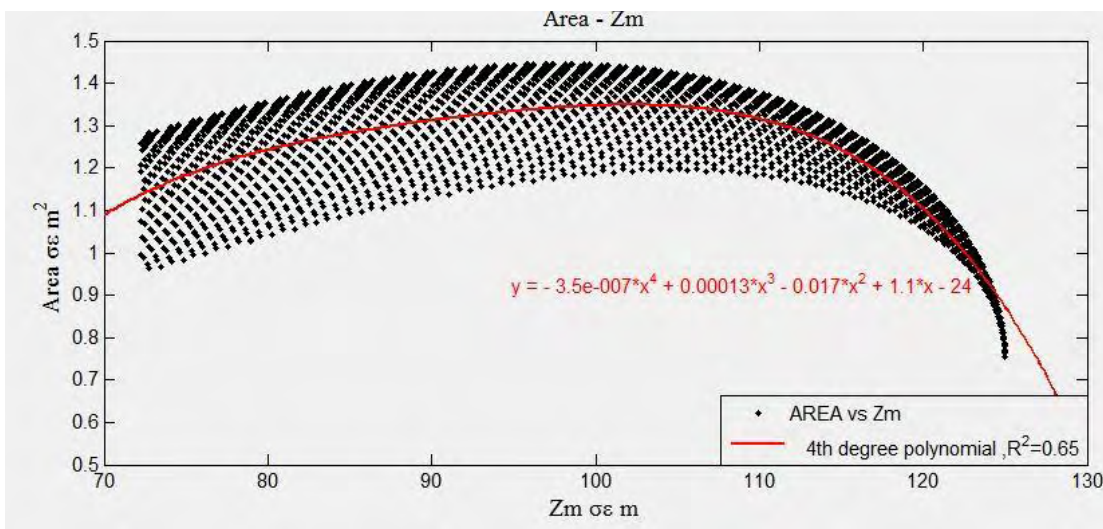
Όπου:

$$x_m = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \quad (2.14)$$

$$y_m = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3} \quad (2.15)$$

$$z_m = \frac{z_1 + z_2 + z_3}{3} \quad (2.16)$$

Λόγω της μη ισεμβαδικότητας των τριγώνων και άρα της ανομοιομορφίας των επικόμβιων φορτίων, αναζητήσαμε μια σχέση, η οποία να μας δίνει τη μεταβολή του εμβαδού συναρτήσει του ύψους του κάθε τριγώνου. Για το λόγο αυτό εισαγάγαμε τα δεδομένα των μέσων υψών  $z_m$  και των εμβαδών αντίστοιχα σε ένα διάγραμμα (Σχήμα 2.12).



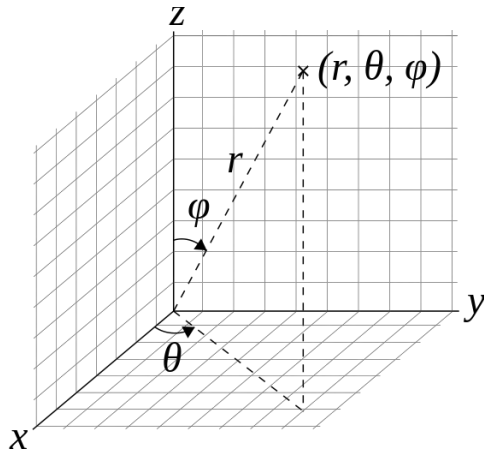
Σχήμα 2.12 Διάγραμμα εμβαδών τριγώνων (Area) -  $z_m$

Παρατηρούμε από το διάγραμμα του Σχήματος 2.12, ότι σε κάθε υψόμετρο  $z_m$  αντιστοιχούν πολλές διαφορετικές τιμές εμβαδού. Επιπροσθέτως στην προσπάθειά μας να βρούμε μια συνάρτηση που να συσχετίζει τις δύο αυτές μεταβλητές, εφαρμόσαμε «προσαρμογή καμπύλης» στα δεδομένα μας (curve fitting). Για να το επιτύχουμε αυτό επιλέξαμε εξίσωση πολυωνύμου, δοκιμάζοντας τη για διάφορους βαθμούς, καταλήγοντας σε μέγιστο συντελεστή προσδιορισμού  $R^2=0.65$ .

Συνεπώς βλέπουμε ότι δεν υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των μέσων υψών και των αντίστοιχων εμβαδών και άρα οι τιμές των εμβαδών είναι συνάρτηση και των υπόλοιπων συντεταγμένων. Για το λόγο αυτό αναζητούμε μια σχέση με περισσότερες μεταβλητές.

Οι μεταβλητές αυτές θέλουμε να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, δηλαδή αλλάζοντας η τιμή της μιας να μη μεταβάλλεται η τιμή της άλλης, πράγμα το οποίο δεν ισχύει στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων για την επιφάνεια του ελλειψοειδούς. Οπότε «μεταφερόμαστε» στο σύστημα σφαιρικών συντεταγμένων και τις τροποποιούμε ανάλογα. Βλέπουμε για την επιφάνεια του ελλειψοειδούς ότι η συντεταγμένη  $\theta$  (Σχήμα 2.13) είναι ανεξάρτητη των μεταβλητών  $\phi$  και  $r$ .



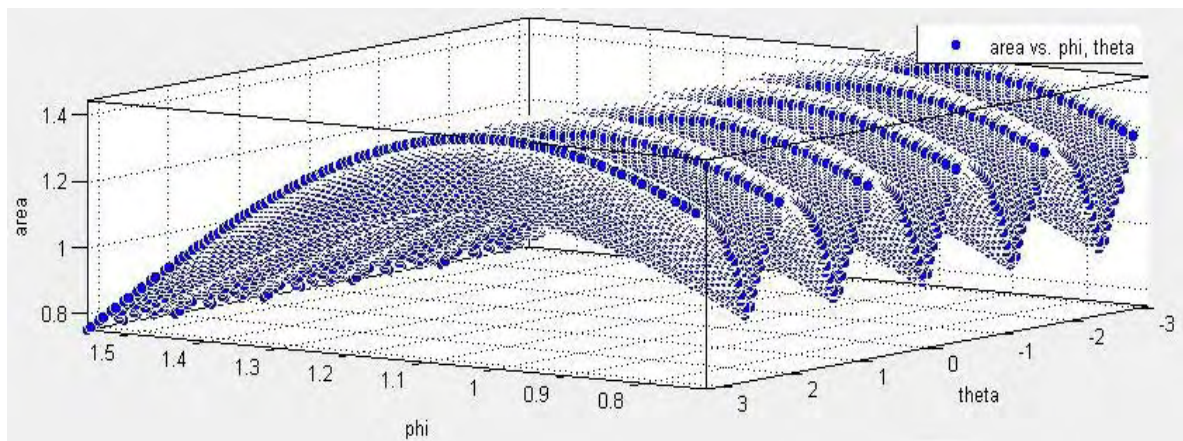


Σχήμα 2.13 Συσχέτιση καρτεσιανών και σφαιρικών συντεταγμένων

Έτσι επιλέγουμε τις μεταβλητές  $\theta$  (theta) και  $\phi$  (phi) για τη συσχέτιση των εμβαδών τριγώνων με τη θέση τους στο χώρο. Μετατρέψαμε λοιπόν μέσω του λογισμικού MATLAB τις καρτεσιανές σε σφαιρικές συντεταγμένες. Αυτό έγινε με τη εντολή:

`[theta, phi, rho] = cart2sph(xm, ym, zm)`

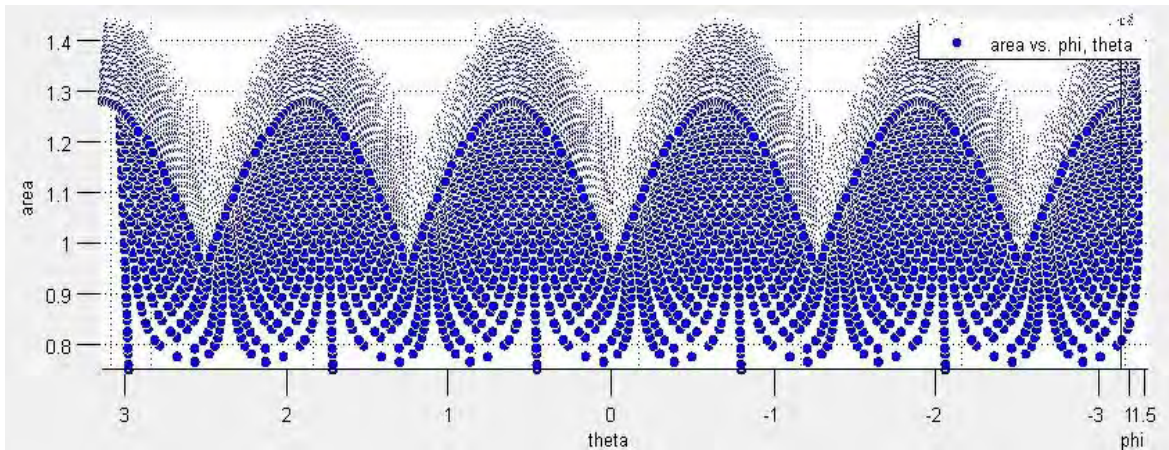
Για την εξαγωγή μίας σχέσης συσχέτισης, εφαρμόζουμε «προσαρμογή επιφάνειας» (surface fitting) για τις τρεις μεταβλητές  $\theta$ ,  $\phi$ ,  $A_i$  (theta, phi, area) – Σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.14 Διάγραμμα μεταξύ των μεταβλητών  $\theta$ ,  $\phi$ ,  $A_i$  (theta, phi, area)

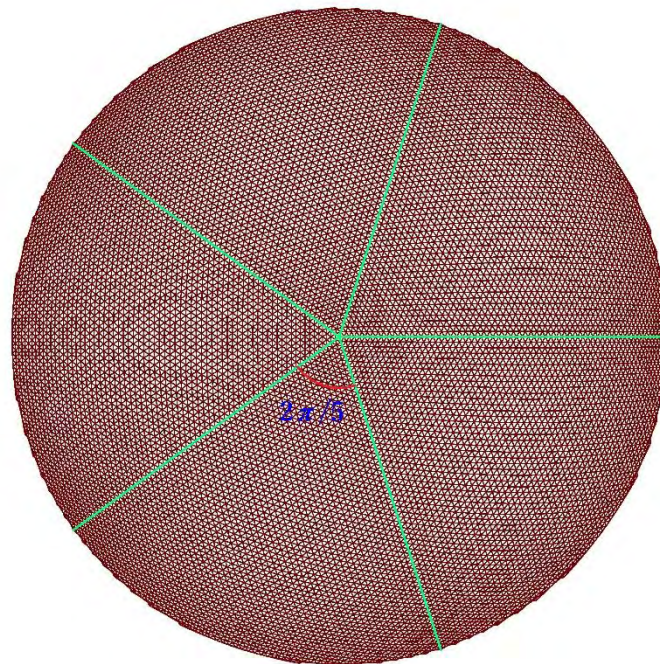
Για τα δεδομένα του Σχήματος 2.14 δε βρέθηκε μετά από δοκιμές εξίσωση επιφάνειας που να προσαρμόζεται σε αυτά με υψηλό συντελεστή συσχέτισης.

Στο Σχήμα 2.15 παρατηρούμε ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο μιας επιφάνειας, διατρέχοντας τον άξονα των μεταβλητών  $\theta$ .



Σχήμα 2.15 Διάγραμμα μεταξύ των μεταβλητών  $\theta$ ,  $A_i$  (theta, area)

Βλέποντας τη κάτοψη της περιοχής του θόλου που ασκείται το χιόνι, διαφαίνεται ότι αυτή διαιρείται σε πέντε ίσα τμήματα, τα οποία οριοθετούνται από πέντε γραμμές – καμπύλες, οι οποίες ξεκινούν από το κορυφαίο σημείο του θόλου και καταλήγουν στη βάση της περιοχής αυτής (Σχήμα 2.16).



Σχήμα 2.16 Κάτοψη θόλου – περιοχή που ασκείται το φορτίο του χιονιού

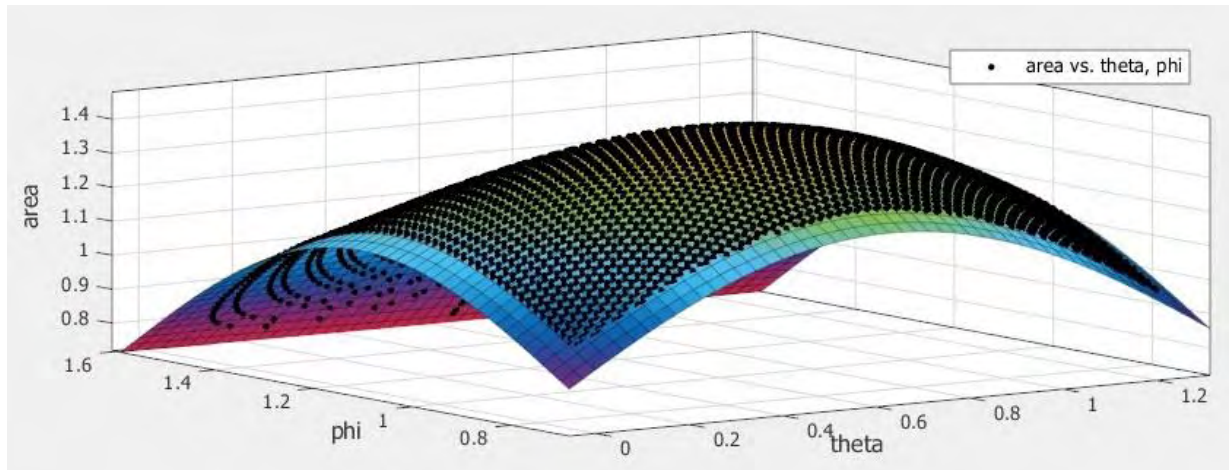
Τόσο από τη κάτοψη του θόλου (Σχήμα 2.16), όσο και από το Σχήμα 2.15 παρατηρούμε ότι ο κύκλος διαιρείται σε τμήματα γωνίας  $\theta=2\pi/5$ .

Προκειμένου να βρεθεί μια σχέση με υψηλή συσχέτιση μεταξύ των  $A$  και  $\theta$ , εξετάζουμε ξεχωριστά κάθε επιμέρους τμήμα (του Σχ.2.16) στα διαστήματα:

$$\left[0 - \frac{2\pi}{5}, \left[\frac{2\pi}{5} - \frac{4\pi}{5}, \left[\frac{4\pi}{5} - \pi, \left[-\frac{2\pi}{5} - 0\right], \left[\left(-\frac{4\pi}{5}\right) - \left(-\frac{2\pi}{5}\right)\right], \left[(-\pi) - \left(-\frac{4\pi}{5}\right)\right]\right.\right.\right.$$

Για εξίσωση πολωνύμου επιφάνειας 5<sup>ου</sup> βαθμού (σχέση 2.17), επετεύχθη συντελεστής προσδιορισμού R<sup>2</sup>=1 (Σχήμα 2.17).

$$\begin{aligned} A(\theta, \varphi) = & p_{00} + p_{10} \cdot \theta + p_{01} \cdot \varphi + p_{20} \cdot \theta^2 + p_{11} \cdot \theta \cdot \varphi + p_{02} \cdot \varphi^2 + p_{30} \cdot \theta^3 + p_{21} \cdot \theta^2 \cdot \varphi \\ & + p_{12} \cdot \theta \cdot \varphi^2 + p_{03} \cdot \varphi^3 + p_{40} \cdot \theta^4 + p_{31} \cdot \theta^3 \cdot \varphi + p_{22} \cdot \theta^2 \cdot \varphi^2 + p_{13} \cdot \theta \cdot \varphi^3 + p_{04} \cdot \varphi^4 \\ & + p_{50} \cdot \theta^5 + p_{41} \cdot \theta^4 \cdot \varphi + p_{32} \cdot \theta^3 \cdot \varphi^2 + p_{23} \cdot \theta^2 \cdot \varphi^3 + p_{14} \cdot \theta \cdot \varphi^4 \\ & + p_{05} \cdot \varphi^5 \end{aligned} \quad (2.17)$$



Σχήμα 2.17 Επιφάνεια προσαρμογής στα δεδομένα A, θ, φ (area,theta, phi) του κάθε τμήματος (του Σχ.2.16)

Τέλος υπολογίσαμε για κάθε επιμέρους τμήμα τους συντελεστές (Πίνακες 2.1-2.3) της πολωνυμικής εξίσωσης 5<sup>ου</sup> βαθμού (2.17) και εξήγαμε τις σχέσεις συσχέτισης του εμβαδού του κάθε τριγώνου με τη θέση του στο χώρο.

Πίνακας 2.1 Συντελεστές της 5<sup>ο</sup> βαθμιας πολωνυμικής εξίσωσης

| Διαστήματα:     | $P_{00}$ | $P_{10}$ | $P_{01}$ | $P_{20}$ | $P_{11}$ | $P_{02}$ | $P_{30}$ |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0-2π/5          | 1.413    | -1.703   | -4.624   | 2.24     | 7.758    | 9.002    | -1.408   |
| 2π/5-4π/5       | 11.28    | -18.45   | -27.91   | 12.86    | 32.31    | 26.79    | -4.227   |
| 4π/5-π          | 54.74    | -61.63   | -89.27   | 25.55    | 81.31    | 51.17    | -4.237   |
| (-2π/5)-0       | 1.413    | 1.703    | -4.624   | 2.24     | -7.758   | 9.002    | 1.408    |
| (-4π/5)-(-2π/5) | 11.28    | 18.45    | -27.91   | 12.86    | -32.31   | 26.79    | 4.227    |
| (-π)-(-4π/5)    | 37.99    | 39.19    | -68.36   | 13.2     | -60.6    | 38.78    | 0.7876   |

Πίνακας 2.2 Συντελεστές της 5<sup>ο</sup> βαθμιας πολωνυμικής εξίσωσης (συνέχεια)

| Διαστήματα:     | $P_{21}$ | $P_{12}$ | $P_{03}$ | $P_{40}$ | $P_{31}$ | $P_{22}$ | $P_{13}$ |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0-2π/5          | -6.775   | -7.075   | -5.155   | 0.5603   | 0.9535   | 5.632    | 1.799    |
| 2π/5-4π/5       | -13.97   | -21.22   | -9.684   | 0.5613   | 2.862    | 5.629    | 5.4      |
| 4π/5-π          | -28.19   | -32.18   | -11.25   | 0.117    | 4.563    | 6.347    | 5.807    |
| (-2π/5)-0       | -6.775   | 7.075    | -5.155   | 0.5603   | -0.9535  | 5.632    | -1.799   |
| (-4π/5)-(-2π/5) | -13.97   | 21.22    | -9.684   | 0.5613   | -2.862   | 5.629    | -5.4     |
| (-π)-(-4π/5)    | -20.11   | 24.07    | -6.689   | -0.3692  | -3.107   | 4.472    | -4.015   |

Πίνακας 2.3 Συντελεστές της 5<sup>ο</sup> βαθμιας πολωνυμικής εξίσωσης (συνέχεια)

| Διαστήματα:     | $P_{04}$ | $P_{50}$   | $P_{41}$ | $P_{32}$    | $P_{23}$ | $P_{14}$   | $P_{05}$ |
|-----------------|----------|------------|----------|-------------|----------|------------|----------|
| 0-2π/5          | 0.2185   | -0.0001621 | -0.3794  | 0.00004803  | -1.433   | 0.0004563  | 0.3175   |
| 2π/5-4π/5       | 0.2212   | -0.0001213 | -0.3797  | 0.0002664   | -1.433   | 0.0005064  | 0.3169   |
| 4π/5-π          | -1.115   | 0.02615    | -0.3393  | -0.1229     | -1.333   | 0.5927     | 0.2555   |
| (-2π/5)-0       | 0.2185   | 0.0001621  | -0.3794  | -0.00004803 | -1.433   | -0.0004563 | 0.3175   |
| (-4π/5)-(-2π/5) | 0.2212   | 0.0001213  | -0.3797  | -0.0002664  | -1.433   | -0.0005064 | 0.3169   |
| (-π)-(-4π/5)    | -2.07    | -0.05361   | -0.2374  | -0.0262     | -1.14    | -0.7568    | 0.3472   |

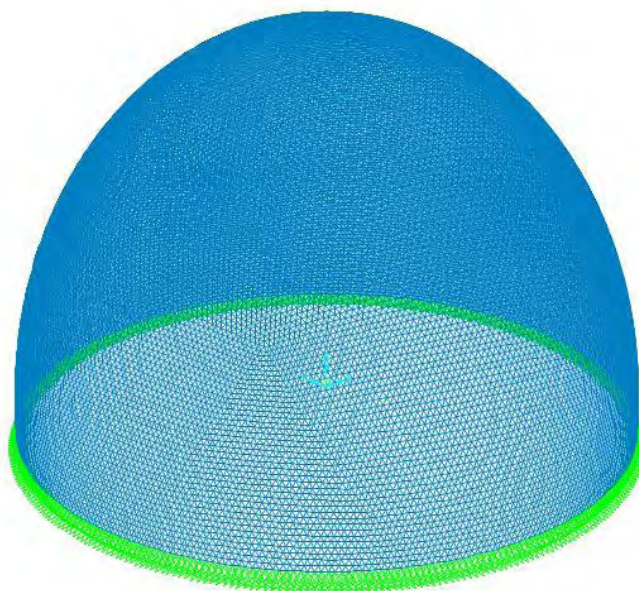
Έτσι έχουμε τη τελική σχέση (2.18) με την οποία υπολογίζουμε τα επικόμβια φορτία σε κάθε σημείο συναρτήσει των συντεταγμένων του.

$$P_i = 2qA_i(\theta, \varphi) \quad (2.18)$$

## Κεφάλαιο 3 Μελέτη προοδευτικής κατάρρευσης γεωδαιτικού θόλου

### 3.1 Ανάλυση και σχεδιασμός γεωδαιτικού θόλου

Αρχικά εισήγαμε το μοντέλο του φορέα στο λογισμικό SAP2000, μέσω αρχείου dxf (Κεφ. 2.1). Τα μέλη του είναι γραμμικά – ραβδωτά στοιχεία. Οι στηρίξεις στη βάση του θόλου θεωρούνται αρθρωτές (Σχήμα 3.1). Οι κόμβοι του θόλου θεωρήθηκαν πλήρως δύσκαμπτοι, δηλαδή δεν επιτρέπεται σχετική στροφή των μελών που συντρέχουν στον κόμβο.



Σχήμα 3.1 Φορέας του γεωδαιτικού θόλου στο λογισμικό SAP2000

Οι φορτίσεις που εξετάστηκαν στη παρούσα διπλωματική εργασία, αφορούν το φαινόμενο του χιονιού και το ίδιο βάρος της κατασκευής. Τα φορτία του χιονιού υπολογίστηκαν με βάση τη διαδικασία της παρ.2.2.2 (& Παράρτημα Β) και στη συνέχεια εισήχθησαν στη βάση δεδομένων του μοντέλου. Επιπροσθέτως το ίδιο βάρος υπολογίζεται αυτόματα από το λογισμικό ανάλυσης.

Έχοντας υπολογίσει επικόμβια φορτία, καταστρώνουμε το συνδυασμό φόρτισης με βάση τον κανονισμό EC1:

$$1.35DL+1.5SL$$

Όπου:

DL: μόνιμα φορτία – ίδιο βάρος

SL: κινητά φορτία – φορτία χιονιού

Το υλικό που επελέγη για το σχεδιασμό της κατασκευής είναι ο χάλυβας. Ειδικότερα όσον αφορά στην αντοχή του χάλυβα επιλέξαμε, αρχικά χάλυβα ποιότητας S355. Ο τύπος της διατομής που χρησιμοποιήθηκε για τη μόρφωση του φορέα, είναι κοίλη κυκλική διατομή (σωληνοειδής) κυρίως για τους λόγους:

- Υψηλή στρεπτική δυσκαμψία και άρα αποφυγή στρεπτοκαμπτικού λυγισμού
- Μεγάλη ακτίνα αδρανείας και άρα μικρή λυγηρότητα

Ο φορέας αναλύθηκε με: γραμμική ελαστική στατική ανάλυση (linear static) και γραμμική ελαστική ανάλυση λυγισμού (linear buckling).

Κατά την ανάλυση λυγισμού υπολογίζεται μια ιδιοτιμή  $K$  για κάθε ιδιομορφή λυγισμού. Η ιδιοτιμή αυτή μας δίνει το λόγο του θεωρητικού κρίσιμου φορτίου λυγισμού  $P_{cr}$  προς το πραγματικό  $P$ .

$$K = \frac{P_{cr}}{P} \quad (3.1)$$

Για τιμές του συντελεστή  $K$ , μεγαλύτερες της μονάδας, η κατασκευή δεν παρουσιάζει καθολική ή τοπική αστάθεια, ενώ για τιμές του  $K$  μικρότερες της μονάδας έχει ήδη προηγηθεί καθολικός ή τοπικός λυγισμός. Όπου τοπικός λυγισμός αναφέρεται στην απώλεια ευστάθειας μιας περιοχής της κατασκευής.

Τέλος τρέξαμε διαστασιολόγηση του φορέα, χρησιμοποιώντας το κανονισμό EC3.

### 3.1.1 Τελική επιλογή ποιότητας χάλυβα και διατομών

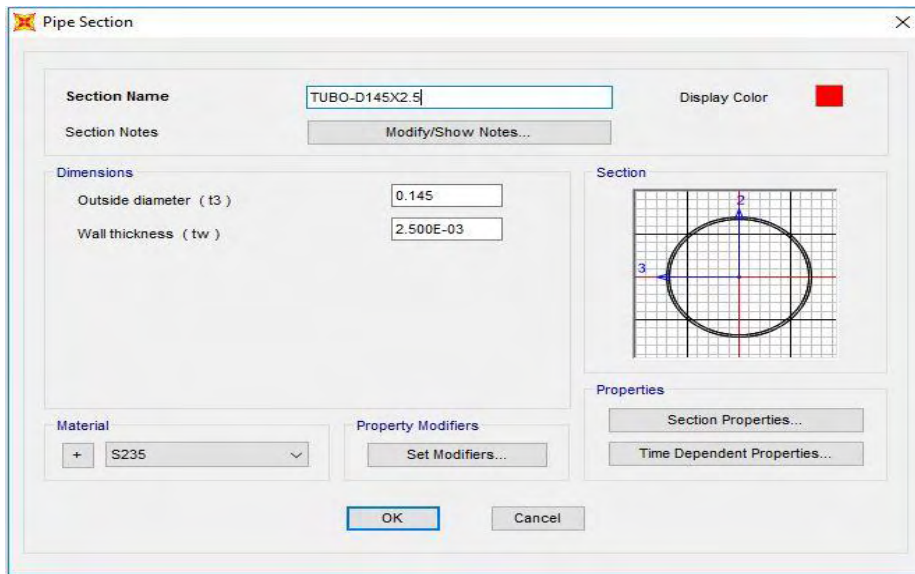
Η επιλογή της κατάλληλης διατομής έγινε με απώτερο σκοπό το βέλτιστο σχεδιασμό της κατασκευής, δηλαδή την πλήρη εκμετάλλευση των διατομών. Μετά την ανάλυση λυγισμού είδαμε ότι η κατασκευή είναι ευπαθής σε τοπικό λυγισμό, δηλαδή ο συντελεστής  $K$  είναι μικρότερος της μονάδας. Προκειμένου να αυξήσουμε το συντελεστή  $K$  πάνω από τη μονάδα επιχειρήσαμε τη μείωση της αντοχής του χάλυβα σε S235 και παράλληλα αύξηση των διαστάσεων της διατομής, έτσι ώστε να αυξηθούν τα αδρανειακά χαρακτηριστικά της διατομής (ροπή αδρανείας, ακτίνα αδρανείας) και άρα η δυσκαμψία της κατασκευής.

Μετά από δοκιμές διαφόρων διατομών και αναλύσεις επί αναλύσεων καταλήξαμε σε χάλυβα ποιότητας S235 και διατομές TUBO-D142X2.5 (Σχήμα 3.2),

όπου:

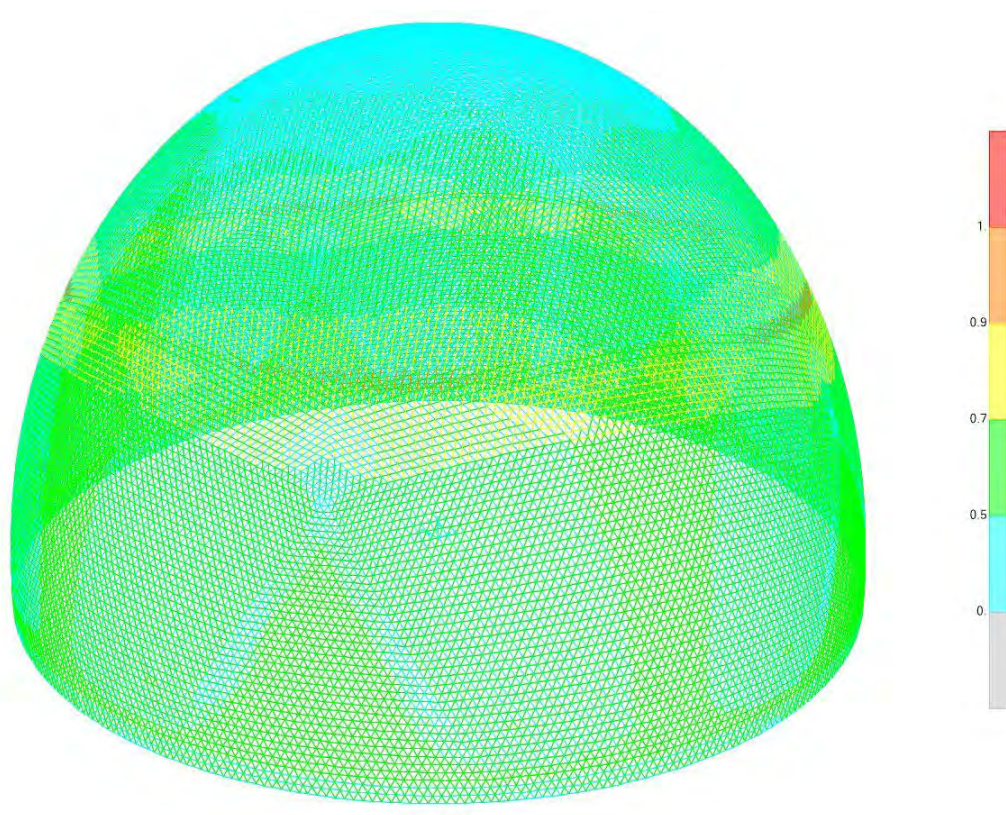
$D=142\text{mm}$ , διάμετρος

$t= 2.5\text{mm}$ , πάχος



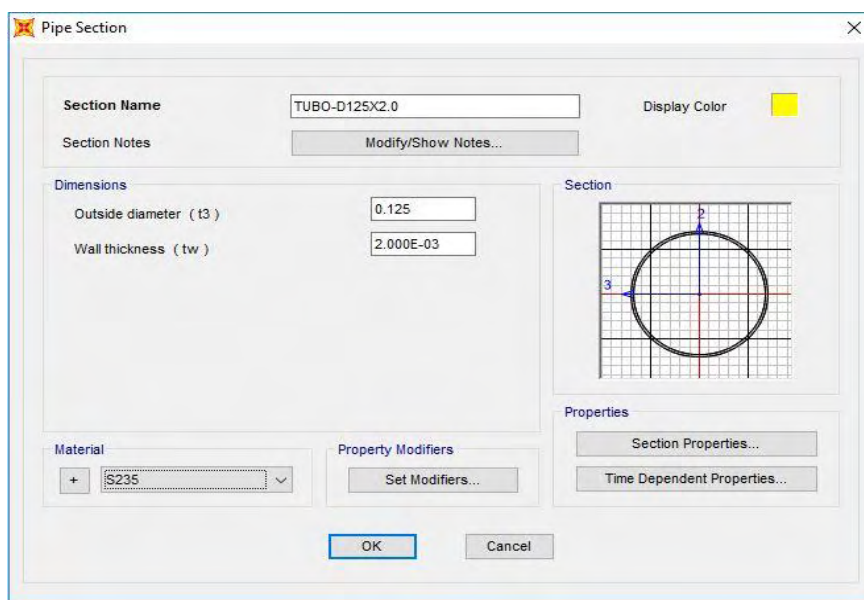
Σχήμα 3.2 Διαστάσεις κοίλης κυκλικής διατομής TUBO-D142X2.5

Διαστασιολογώντας το φορέα με τη επιλεγθείσα διατομή παρατηρούμε ότι σε μια περιοχή η οποία βρίσκεται σε υψόμετρο 72m, που αποτελεί υψομετρικό όριο εφαρμογής της φόρτισης του χιονιού, έχουμε έντονη καταπόνηση των διατομών (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης του φορέα για διατομή TUBO-D145X2.5

Όπως επίσης και το άνω τμήμα του θόλου καταπονείται συγκριτικά πολύ λιγότερο. Για τους λόγους αυτούς επιλέγουμε μικρότερη διατομή στο άνω τμήμα του θόλου, δηλαδή στα μέλη που βρίσκονται πάνω από τα 90m. Η διατομή που επιλέγουμε για το άνω τμήμα είναι TUBO-D125X2.0 (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4 Διαστάσεις κοίλης κυκλικής διατομής TUBO-D125X2.0

### Κατάταξη διατομών σε Κατηγορίες με βάση τις αναλογίες των διαστάσεων τους

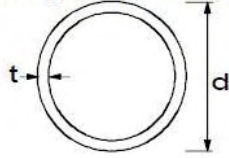
Ο ρόλος της κατάταξης των διατομών είναι να αναγνωρίσει την έκταση στην οποία η αντοχή και η ικανότητα στροφής των διατομών περιορίζεται από την αντοχή τους σε τοπικό λυγισμό (§ 5.5.1 EC3).

Τέσσερις κατηγορίες διατομών καθορίζονται ως εξής:

- Διατομές κατηγορίας 1 είναι εκείνες που μπορούν να σχηματίσουν πλαστική άρθρωση με την απαιτούμενη από την πλαστική ανάλυση δυνατότητα στροφής χωρίς μείωση της αντοχής τους.
- Διατομές κατηγορίας 2 είναι εκείνες που μπορούν να αναπτύξουν την πλαστική ροπή αντοχής τους, αλλά έχουν περιορισμένη δυνατότητα στροφής λόγω τοπικού λυγισμού.
- Διατομές κατηγορίας 3 είναι εκείνες στις οποίες η τάση στην ακραία θλιβόμενη ίνα του χαλύβδινου μέλους, υποθέτοντας ελαστική κατανομή των τάσεων, μπορεί να φθάσει την αντοχή διαρροής, αλλά τοπικός λυγισμός είναι πιθανόν να εμποδίσει την ανάπτυξη της πλαστικής ροπής αντοχής.
- Διατομές κατηγορίας 4 είναι εκείνες στις οποίες τοπικός λυγισμός θα συμβεί πριν την ανάπτυξη της τάσης διαρροής σε ένα ή περισσότερα μέρη της διατομής (§ 5.5.2 EC3).



Πίνακας 3.1 Κατάταξη κοίλων κυκλικών διατομών

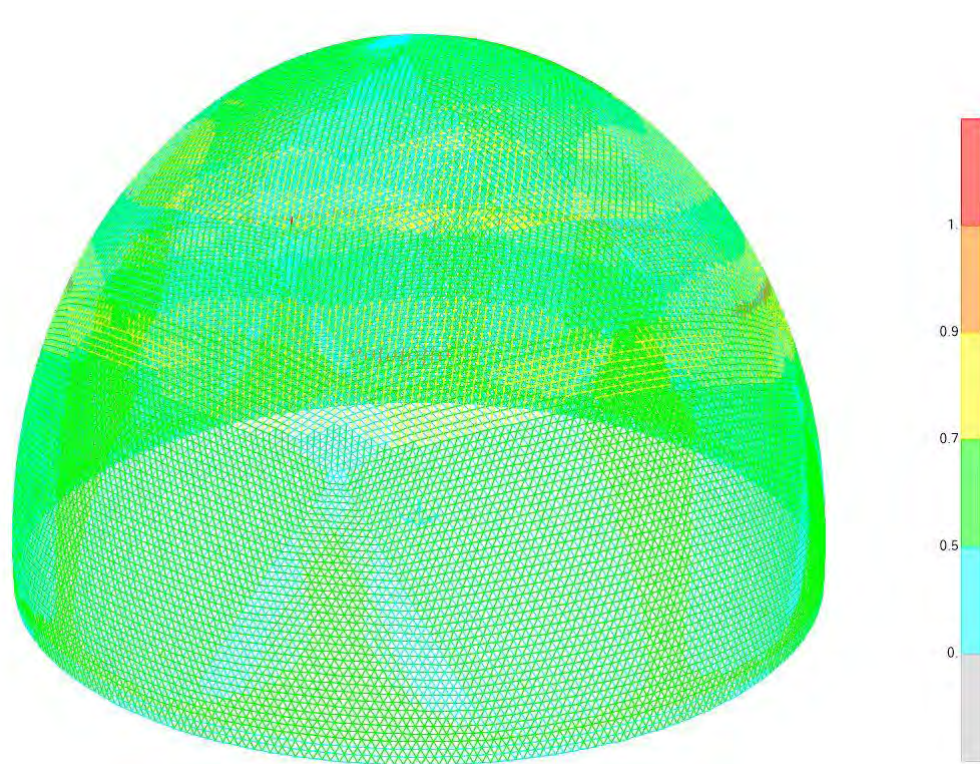
| Σωληνωτές διατομές  |   |      |      |      |      |      |
|---|---|------|------|------|------|------|
|  |   |      |      |      |      |      |
| Κατηγορία   | Διατομή σε κάμψη και/ή θλίψη                                      |      |      |      |      |      |
| 1   | $d / t \leq 50 \varepsilon^2$                                     |      |      |      |      |      |
| 2   | $d / t \leq 70 \varepsilon^2$                                     |      |      |      |      |      |
| 3   | $d / t \leq 90 \varepsilon^2$                                     |      |      |      |      |      |
|   | <b>ΣΗΜΕΙΩΣΗ</b> Για $d / t > 90 \varepsilon^2$ βλέπε EN 1993-1-6. |      |      |      |      |      |
| $\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$  | $f_y$   | 235  | 275  | 355  | 420  | 460  |
|   | $\varepsilon$   | 1,00 | 0,92 | 0,81 | 0,75 | 0,71 |
|   | $\varepsilon^2$   | 1,00 | 0,85 | 0,66 | 0,56 | 0,51 |

Για ποιότητα χάλυβα S235 από Πίνακα 3.1 έχουμε:  $\varepsilon^2 = 1$ .

Διατομή : TUBO-D125X2.0 :  $d/t = 62.5 \leq 70$

Διατομή : TUBO-D145X2.5 :  $d/t = 58 \leq 70$

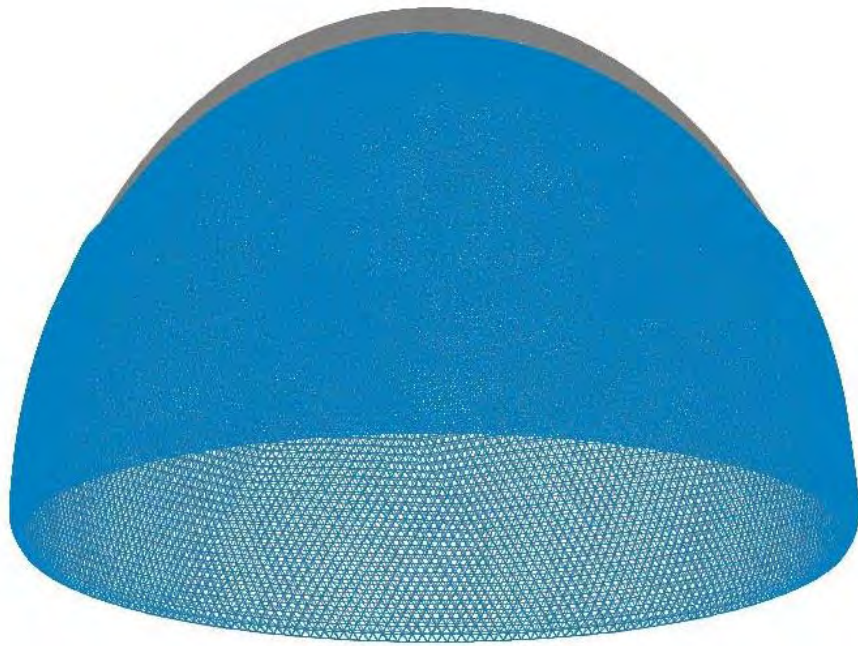
Επομένως και οι δύο διατομές ανήκουν στη Κατηγορία 2.



Σχήμα 3.5 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης του φορέα για τις τελικές διατομές

Για τις επιλεγθείσες διατομές, μετά από ανάλυση και διαστασιολόγηση για τα δεδομένα φορτία χιονιού, καταφέραμε ορισμένες περιοχές της κατασκευής να έχουν ποσοστό εξάντλησης των διατομών τους πάνω από 90%. Έτσι πετύχαμε καλό σχεδιασμό και όχι υπερδιαστασιολόγηση. Σε σχέση με τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης του λογισμικού SAP2000, η κατακόρυφη χρωματική κλίμακα (στα Σχήματα 3.3 και 3.5) ορίζει τα εύρη των ποσοστών εκμετάλλευσης της διατομής.

Η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση που προέκυψε για τα φορτία σχεδιασμού είναι 23.7cm για τον κορυφαίο κόμβο του θόλου (Σχήμα 3.6).

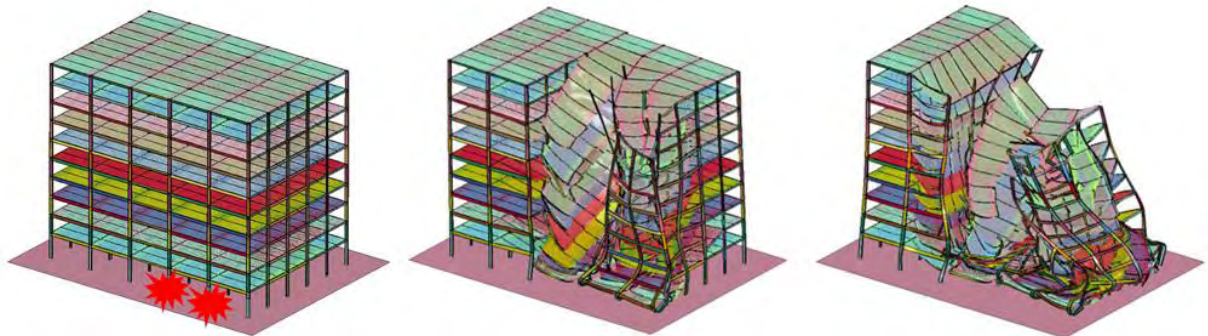


Σχήμα 3.6 Παραμόρφωση φορέα για το φορτίο σχεδιασμού του χιονιού, με γκρι φαίνεται η αρχική απαραμόρφωτη και αντίστοιχα με μπλέ η παραμορφωσιακή κατάσταση

## 3.2 Μελέτη προοδευτικής κατάρρευσης

### 3.2.1 Περιγραφή του φαινομένου

Το φαινόμενο της προοδευτικής κατάρρευσης έχει αρχίσει να μελετάται διεθνώς τα τελευταία χρόνια και αυτό διότι οι μελετητές αναζητούν τρόπους να καταστήσουν τις κατασκευές περισσότερο στιβαρές και ασφαλείς για φορτίσεις πέραν των μέγιστων προβλεπόμενων από τους κανονισμούς. Αν θεωρήσουμε ότι συμβαίνει μια απρόσμενη φόρτιση μικρής διάρκειας και μεγάλης έντασης σε μία μικρή περιοχή της κατασκευής, όπως π.χ. έκρηξη αγωγού φυσικού αερίου, σύγκρουση βαρέως οχήματος σε τμήμα της κατασκευής ή πυροδότηση εκρηκτικού μηχανισμού (τρομοκρατική ενέργεια), τότε η αστοχία ενός δομικού μέλους ή κάποιων δομικών μελών θα οδηγήσει σε ανακατανομή των υφιστάμενων φορτίων στα υπολειπόμενα δομικά μέλη. Αυτό με τη σειρά του θα έχει ως αποτέλεσμα την επιπρόσθετη καταπόνηση των υπολειπόμενων μελών και έτσι την αστοχία κάποιων από αυτά. Η όλη αυτή διαδικασία θα καταλήξει σε μερική ή ολική κατάρρευση της κατασκευής.



Σχήμα 3.7 Προοδευτική κατάρρευση κτιρίου

### 3.2.2 Διαδικασία που ακολουθήθηκε

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς της κατασκευής του γεωδαιτικού θόλου στην περίπτωση αύξησης του φορτίου χιονιού και εύρεση του τελικού φορτίου μερικής ή ολικής κατάρρευσης αυτής. Ο τύπος του θόλου που εξετάζουμε, λόγω του είδους των συνδέσεων των ράβδων μεταξύ τους στο χώρο, διαθέτει μεγάλη υπερστατικότητα. Συγκεκριμένα η κατασκευή μας μορφώνεται από 96200 ράβδους και 32201 κόμβους δηλαδή με αναλογία 3:1. Το γεγονός αυτό τη κάνει μη ευπαθή σε προοδευτική κατάρρευση.

Για τη μελέτη της προοδευτικής κατάρρευσης επελέγησαν δύο βασικές μέθοδοι ανάλυσης και μία τρίτη παραλλαγή της πρώτης, οι οποίες περιγράφονται ως εξής:

#### 3.2.2.1 1<sup>η</sup> μέθοδος αναλύσεων

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη μελέτη του φαινομένου, συνοψίζεται στα εξής βήματα:

1. Ελαστική στατική ανάλυση και ανάλυση λυγισμού για το φορτίο σχεδιασμού
2. Διαστασιολόγηση βάσει EC3 για τα εντατικά μεγέθη που προέκυψαν
3. Εύρεση μέγιστων ποσοστών εξάντλησης της αντοχής των διατομών για όλο το φορέα
4. Υπολογισμός της προσαύξησης του φορτίου σχεδιασμού με βάση το μέγιστο ποσοστό εξάντλησης των διατομών, έτσι ώστε να προκύψει αστοχία κάποιων μελών
5. Ελαστική στατική ανάλυση, ανάλυση λυγισμού και διαστασιολόγηση, για το συνολικά προσαυξημένο φορτίο, βάσει των εντάσεων που προέκυψαν
6. Εύρεση των ράβδων που αρχικά αστόχησαν
7. Ορισμός καινούριου στατικού συστήματος με αφαίρεση των μελών που αστόχησαν
8. Περαιτέρω αύξηση του φορτίου
9. Ελαστική στατική ανάλυση μόνο για τη προσαύξηση του φορτίου και ανάλυση λυγισμού για το συνολικά προσαυξημένο φορτίο
10. Υπολογισμός τελικών εντάσεων και μετακινήσεων του εκάστοτε βήματος, αθροίζοντας τις εντάσεις του προηγούμενου βήματος με αυτές που προέκυψαν από (9) Διαστασιολόγηση για τις τελικές υπολογισμένες εντάσεις.
11. Στις ράβδους που έχουν αστοχήσει λόγω διαρροής του υλικού προστίθενται και οι ράβδοι των οποίων οι κόμβοι εμφανίζουν συνολικές μετακινήσεις μεγαλύτερες του 1cm για τις ιδιομορφές λυγισμού με ιδιοτιμές (K) μικρότερες της μονάδας.
12. Επανάληψη των βημάτων (7)-(11) μέχρι έως ότου επέλθει μερική ή ολική κατάρρευση του δομικού συστήματος και εύρεση τελικού φορτίου κατάρρευσης

Στη παραπάνω διαδικασία έγινε η παραδοχή ότι μετά την αστοχία ενός μέλους λόγω διαρροής από αξονική καταπόνηση κυρίως, το μέλος διατηρεί την ένταση που είχε κατά την αστοχία χωρίς όμως να μπορεί να παραλάβει επιπλέον ένταση για αύξηση του φορτίου. Αυτό μας οδηγεί στην επίλυση του νέου στατικού συστήματος, χωρίς τις ράβδους που έχουν αστοχήσει, μόνο με αύξηση του φορτίου  $\Delta P$  του εκάστοτε βήματος.

Για τις αναλύσεις λυγισμού θεωρήσαμε το συνολικό φορτίο Ρολ για κάθε βήμα και όχι μόνο τη προσαύξησή αυτού και αυτό διότι δεν ισχύει η επαλληλία για τα κρίσιμα φορτία λυγισμού σε διαφορετικά δομικά συστήματα, όπως στην περίπτωση μας κατά τη διαδικασία της κατάρρευσης.

### 3.2.2.2 2<sup>η</sup> μέθοδος αναλύσεων

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη μελέτη του φαινομένου, συνοψίζεται στα εξής βήματα:

1. Ελαστική στατική ανάλυση για το φορτίο σχεδιασμού
2. Εύρεση μετακινήσεων των κόμβων όλου του φορέα
3. Διαστασιολόγηση βάσει EC3 για τα εντατικά μεγέθη που προέκυψαν
4. Εύρεση μέγιστων ποσοστών εξάντλησης της αντοχής των διατομών για όλο το φορέα
5. Υπολογισμός της προσαύξεσης του φορτίου σχεδιασμού με βάση το μέγιστο ποσοστό εξάντλησης των διατομών, έτσι ώστε να προκύψει αστοχία κάποιων μελών
6. Τροποποίηση του δομικού συστήματος με αλλαγή της θέσης των κόμβων, ώστε να προκύψει η παραμορφωμένη κατάσταση για το φορτίο σχεδιασμού
7. Ελαστική στατική ανάλυση και διαστασιολόγηση, για το συνολικά προσαυξημένο φορτίο, βάσει των εντάσεων που προέκυψαν
8. Εύρεση των ράβδων που αρχικά αστόχησαν
9. Ορισμός καινούριου στατικού συστήματος με αφαίρεση των μελών που αστόχησαν και αλλαγή της θέσης των κόμβων
10. Περαιτέρω αύξηση του φορτίου
11. Ελαστική στατική ανάλυση μόνο για τη προσαύξηση του φορτίου
12. Υπολογισμός τελικών εντάσεων και μετακινήσεων του εκάστοτε βήματος, αθροίζοντας τις εντάσεις του προηγούμενου βήματος με αυτές που προέκυψαν από (11). Διαστασιολόγηση για τις τελικές υπολογισμένες εντάσεις.
13. Επανάληψη των βημάτων (9)-(12) μέχρι έως ότου επέλθει μερική ή ολική κατάρρευση του δομικού συστήματος και εύρεση τελικού φορτίου κατάρρευσης.

Κατά τη διαδικασία της 2<sup>ης</sup> μεθόδου έγινε η ίδια θεώρηση σε σχέση με την 1<sup>η</sup> όσον αφορά τον υπολογισμό των τελικών εντάσεων του εκάστοτε βήματος. Για να ληφθούν υπόψη φαινόμενα 2<sup>ης</sup> τάξης (μη γραμμική ανάλυση), οι διαδοχικές ελαστικές επιλύσεις δεν έγιναν στο αρχικό στατικό σύστημα (απαραμόρφωτη κατάσταση) αλλά σε αυτό που προκύπτει στο εκάστοτε βήμα, ως αποτέλεσμα των παραμορφώσεων που προκαλεί το συνολικό προσαυξημένο φορτίο. Αυτό επετεύχθη με αλλαγή της θέσης των κόμβων, προσθέτοντας σε κάθε βήμα στις συντεταγμένες τους, τις μετακινήσεις που προέκυψαν σε προηγούμενα βήματα.

Στη παραπάνω διαδικασία δεν έγιναν αναλύσεις λυγισμού. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι και για τις δυο μεθόδους δεν υπήρχε η δυνατότητα διαστασιολόγησης των μελών μέσω του λογισμικού SAP2000 και για αυτό δημιουργήσαμε δικό μας λογισμικό διαστασιολόγησης (Παράρτημα Γ).

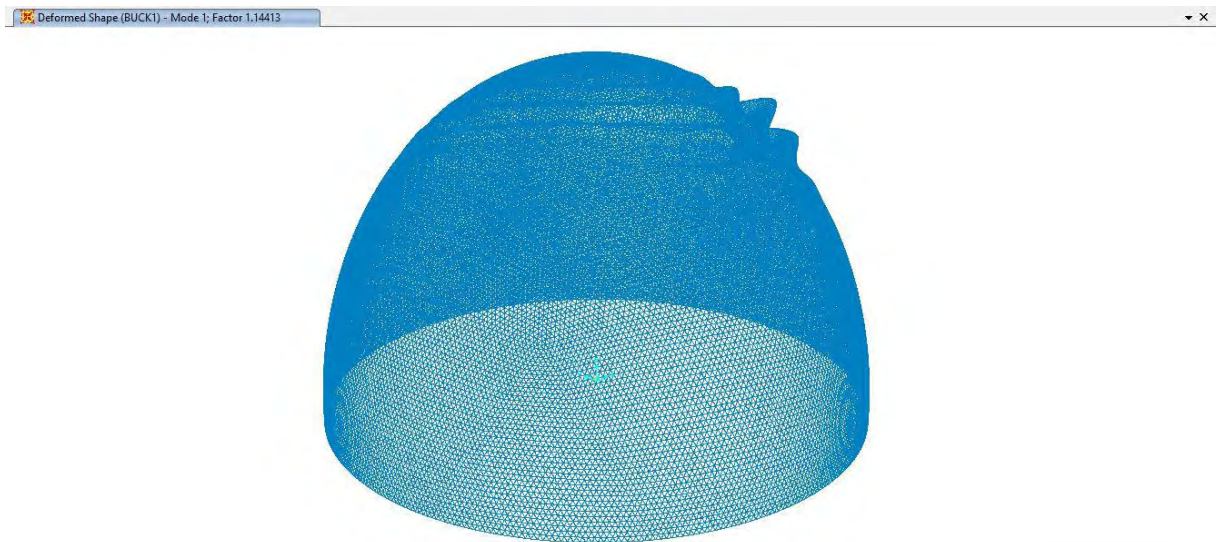
### 3.2.2.3 3<sup>η</sup> μέθοδος ανάλυσης

Η τρίτη μέθοδος ανάλυσης αποτελεί παραλλαγή της πρώτης. Η διαφορά της είναι ότι δεν λήφθηκαν υπόψη οι ιδιόμορφες λυγισμού και άρα φαινόμενα 2<sup>ης</sup> τάξης. Αυτό έγινε με σκοπό τη διερεύνηση των διαφορών τόσο στην τιμή του τελικού φορτίου κατάρρευσης όσο και στη μορφή αστοχίας.

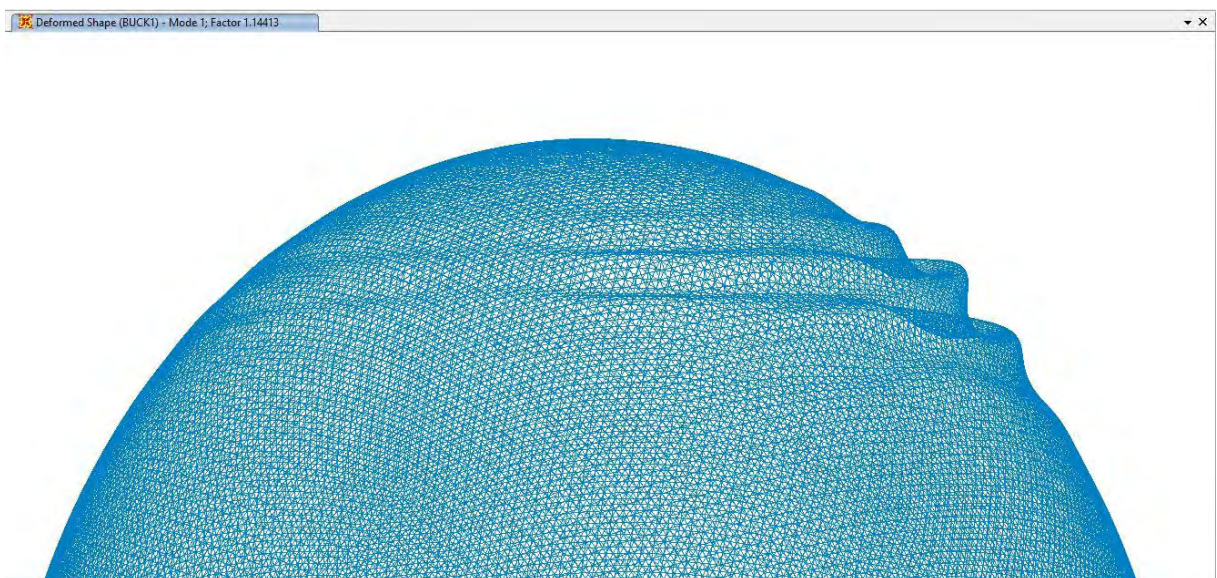
### 3.2.3 Αποτελέσματα αναλύσεων

#### 3.2.3.1 Αποτελέσματα 1<sup>ης</sup> μεθόδου

Αρχικά όσον αφορά τις αναλύσεις λυγισμού που έγιναν παρακάτω παρουσιάζουμε ενδεικτικά κάποιες ιδιομορφές λυγισμού.

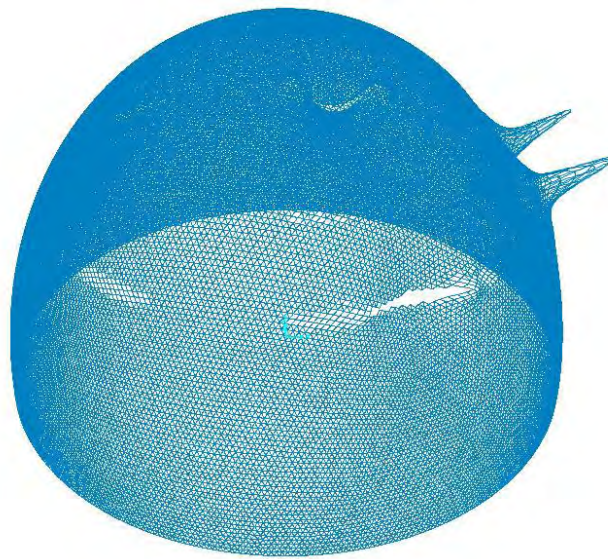


Σχήμα 3.8 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού για το φορτίο σχεδιασμού (scale factor x1000)



Σχήμα 3.9 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού για το φορτίο σχεδιασμού (scale factor x500) – κοντινή όψη





Σχήμα 3.10 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού για φορτίο  $P_{ολ}=1,15P_{αρχ}$

Παρατηρούμε για την 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (Σχήματα 3.8-3.9) ότι η περιοχή στην οποία εμφανίζεται αστάθεια είναι κυματοειδούς μορφής και εντοπίζεται στην περιοχή του θόλου άνω των 90m, εκεί δηλαδή όπου έχουμε επιλέξει ασθενέστερη διατομή. Αντίστοιχα, στην ιδιομορφή λυγισμού Σχήμα 3.10 βλέπουμε ότι έχουμε οξείες παραμορφώσεις στις περιοχές, όπου έχουν αφαιρεθεί ράβδοι και αυτό γιατί οι περιοχές αυτές έχουν καταστεί ασθενέστερες.

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται με πορτοκαλί χρώμα οι περιοχές στις οποίες οι ράβδοι έχουν αστοχήσει.

3.2.3.1.1 Βήμα 1ο:  $P_{ολ} = 1.10 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P = 10\% P_{αρχ}$



Σχήμα 3.11 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 1<sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί)

3.2.3.1.2 Βήμα 2ο:  $P_{ολ} = 1.13 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P = 3\% P_{αρχ}$



Σχήμα 3.12 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 2<sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί)

3.2.3.1.3 Βήμα 3ο:  $P_{ολ} = 1.15 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P = 2\% P_{αρχ}$



Σχήμα 3.13 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 3<sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί)

3.2.3.1.4 Βήμα 4ο:  $P_{ολ} = 1.17 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P = 2\% P_{αρχ}$



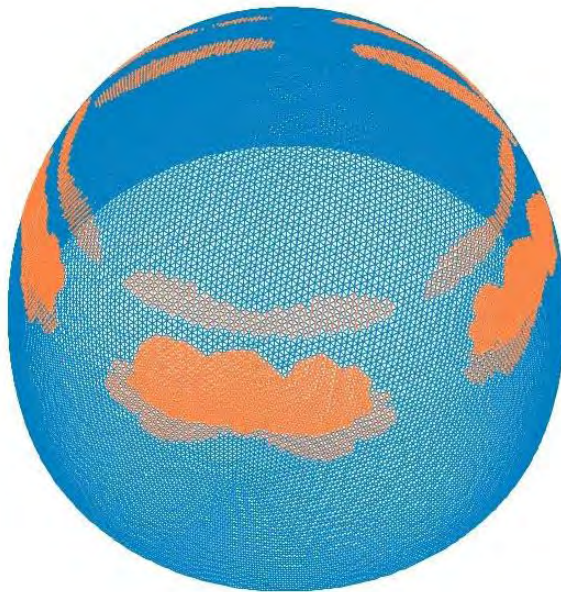
Σχήμα 3.14 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 4<sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί)

3.2.3.1.5 Βήμα 5ο:  $P_{ολ} = 1.18 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P = 1\% P_{αρχ}$



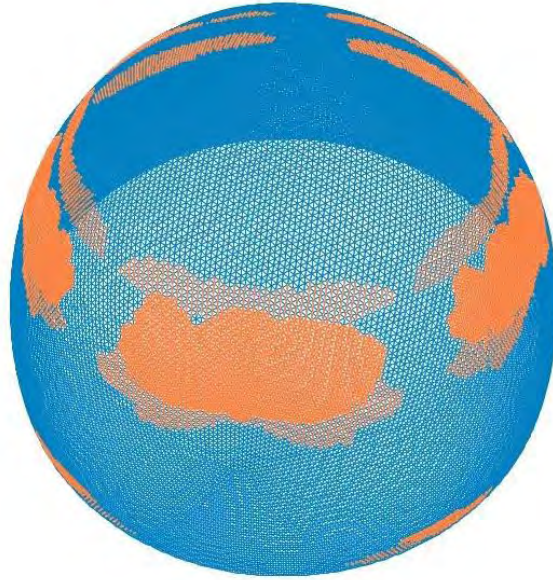
Σχήμα 3.15 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 5° βήμα (με πορτοκαλί)

3.2.3.1.6 Βήμα 6ο:  $P_{ολ} = 1.19 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P = 1\% P_{αρχ}$



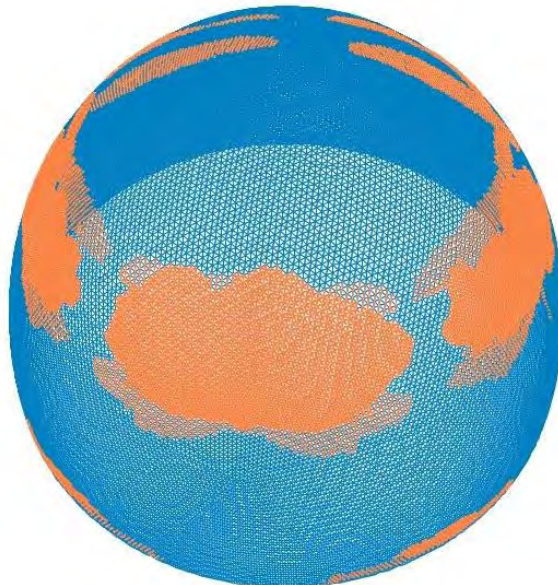
Σχήμα 3.16 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 6° βήμα (με πορτοκαλί)

3.2.3.1.7 Βήμα 7ο:  $P_{ολ} = 1.20 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P = 1\% P_{αρχ}$



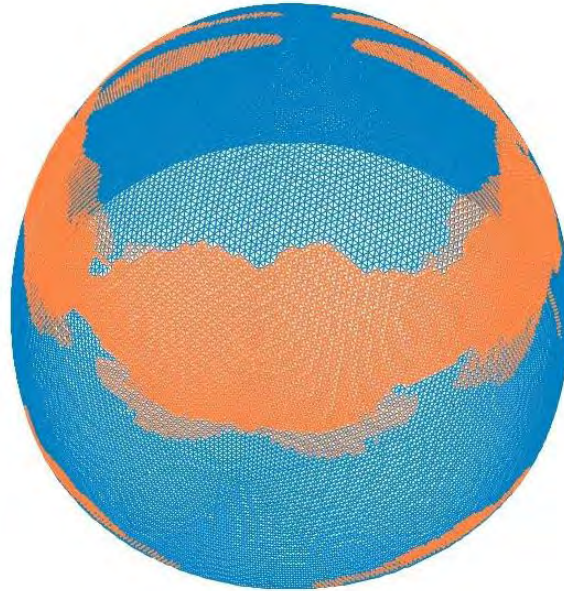
Σχήμα 3.17 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 7<sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί)

3.2.3.1.8 Βήμα 8ο:  $P_{ολ} = 1.205 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P = 0.5\% P_{αρχ}$



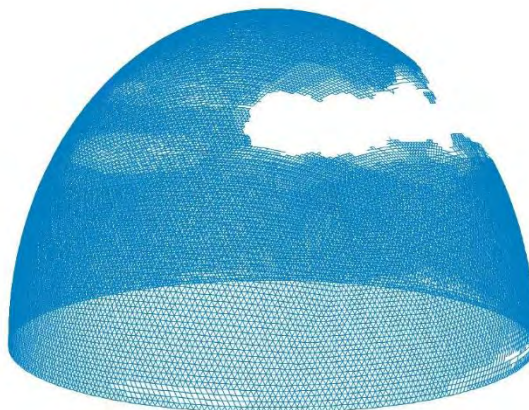
Σχήμα 3.18 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 8<sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί)

3.2.3.1.9 Βήμα 9ο:  $P_{ολ}=1.21 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P=0.5\% P_{αρχ}$



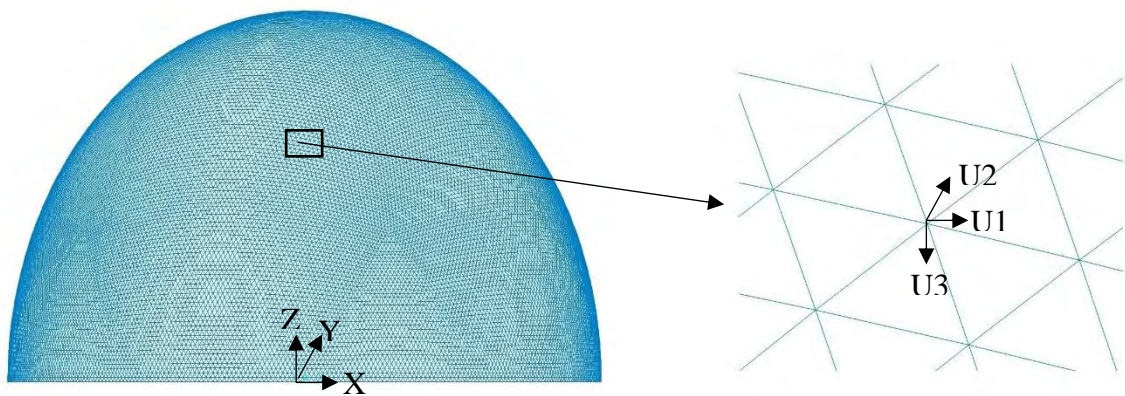
Σχήμα 3.19 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 9° βήμα (με πορτοκαλί)

Σύμφωνα με τη 1<sup>η</sup> μέθοδο αναλύσεων, η τελική κατάρρευση του γεωδαιτικού θόλου επέρχεται μετά από αύξηση του φορτίου χιονιού κατά 21% (Βήμα 9°) και η τελική μορφή κατάρρευσης της κατασκευής φαίνεται στο Σχήμα 3.20.

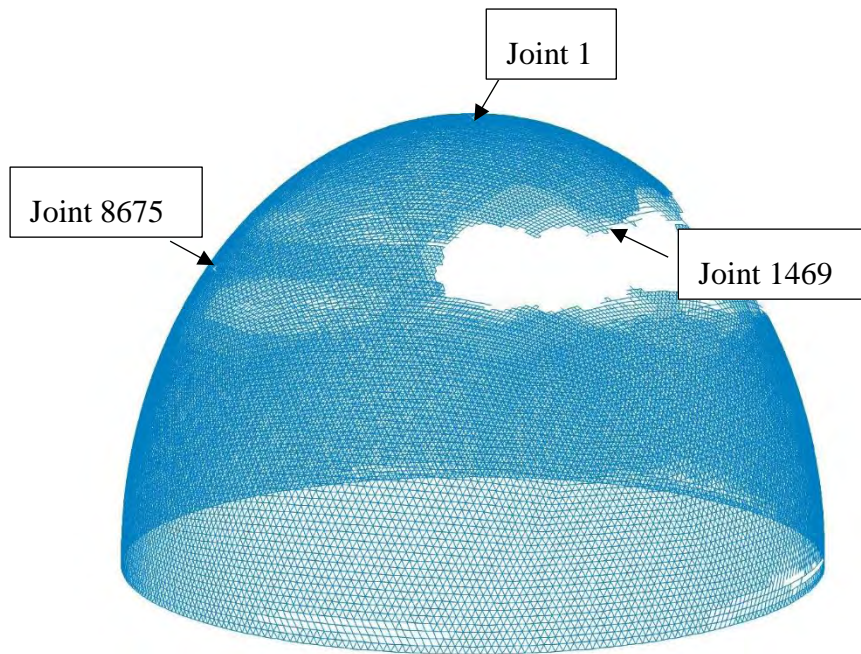


Σχήμα 3.20 Τελική μορφή κατάρρευσης του γεωδαιτικού θόλου, σύμφωνα με τη 1<sup>η</sup> μέθοδο αναλύσεων

Για να παρακολουθήσουμε καλύτερα τη συμπεριφορά της κατασκευής μέχρι το τελικό στάδιο κατάρρευσης καταγράψαμε τις μετακινήσεις όλων των κόμβων. Έπειτα ανάμεσα σε 32201 κόμβους επιλέξαμε τρεις χαρακτηριστικούς κόμβους για τη δημιουργία διαγραμμάτων φορτικού συντελεστή (Load factor) – μετακινήσεων. Συγκεκριμένα ο πρώτος κόμβος, είναι ο κορυφαίος του θόλου (Joint 1), ο δεύτερος βρίσκεται κοντά στη περιοχή που αστόχησε (Joint 1469) και ο τρίτος (Joint 8675) βρίσκεται αντίστοιχα στη περιοχή που δεν αστόχησε. Η καταγραφή των μετακινήσεων έγινε σε τρεις διευθύνσεις (U1, U2, U3) – Σχήμα 3.21, όπου U1,U2 αναφέρονται σε οριζόντιες μετακινήσεις και U3 σε κατακόρυφη μετακίνηση. Η θέση των κόμβων που επελέγησαν φαίνεται στο Σχήμα 3.22 και αντίστοιχα στο Πίνακα 3.2 οι συντεταγμένες τους.



Σχήμα 3.21 Άξονες U1,U2,U3 που ορίζουν τη κατεύθυνση των μετακινήσεων των κόμβων

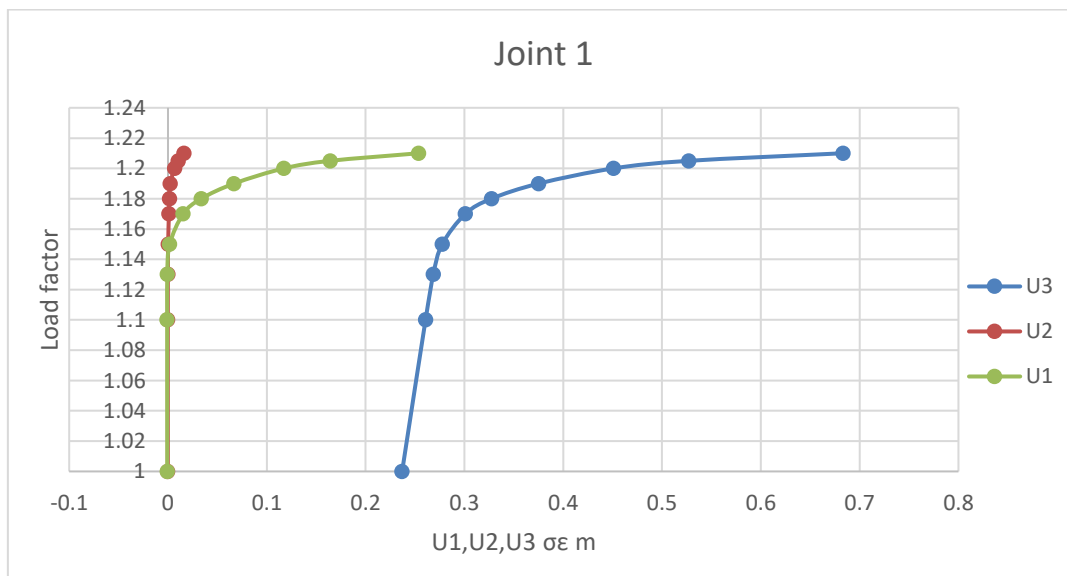


Σχήμα 3.22 Η θέση των κόμβων που επελέγησαν

Πίνακας 3.2 Συντεταγμένες κόμβων που επελέγησαν

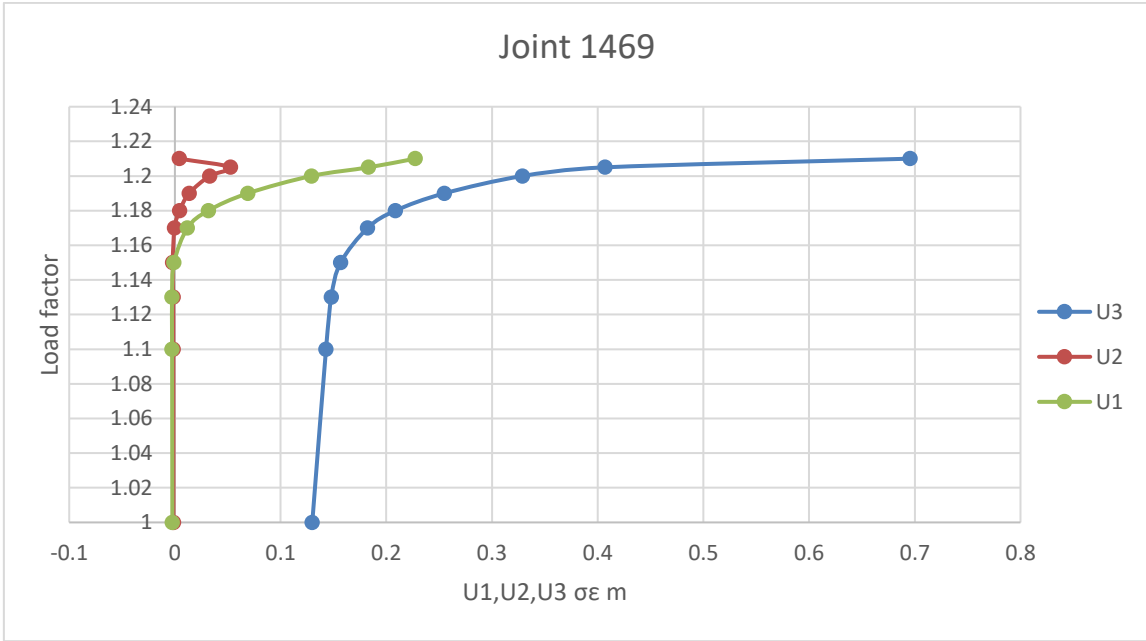
| Joint | CoordSys | CoordType | XorR     | Y       | Z       |
|-------|----------|-----------|----------|---------|---------|
|       |          |           | m        | m       | m       |
| 1     | GLOBAL   | Cartesian | 0        | 0       | 125     |
| 1469  | GLOBAL   | Cartesian | 40.6186  | 52.1014 | 93.8381 |
| 8675  | GLOBAL   | Cartesian | -76.6194 | -2.5693 | 80.262  |

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτικού συντελεστή- μετακινήσεων για τους συγκεκριμένους κόμβους.

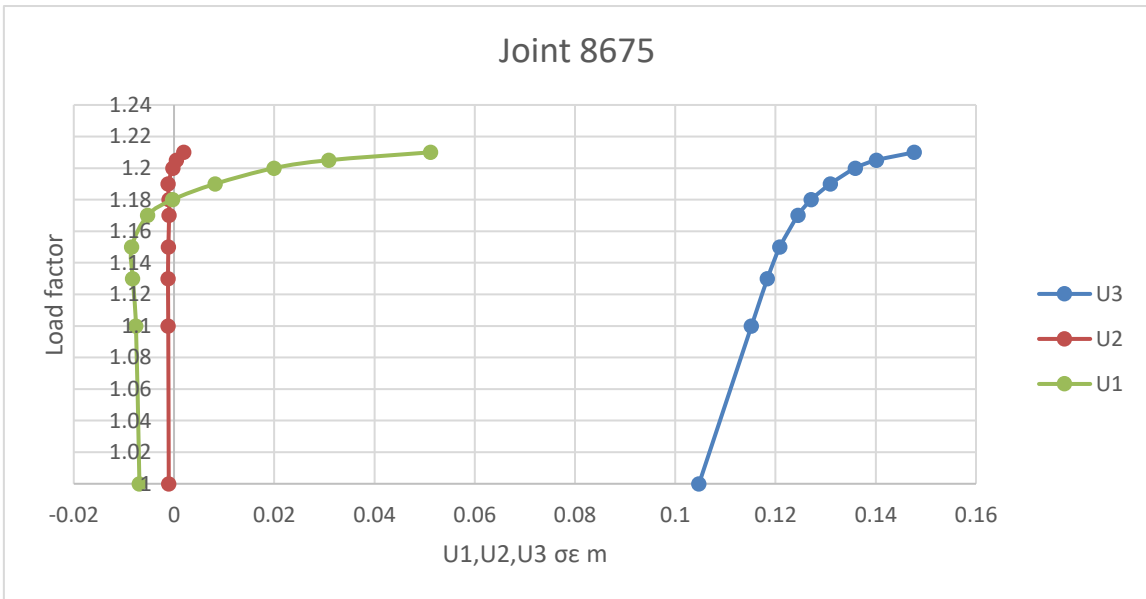


Σχήμα 3.23 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) -U1, U2, U3 για τον Κόμβο 1

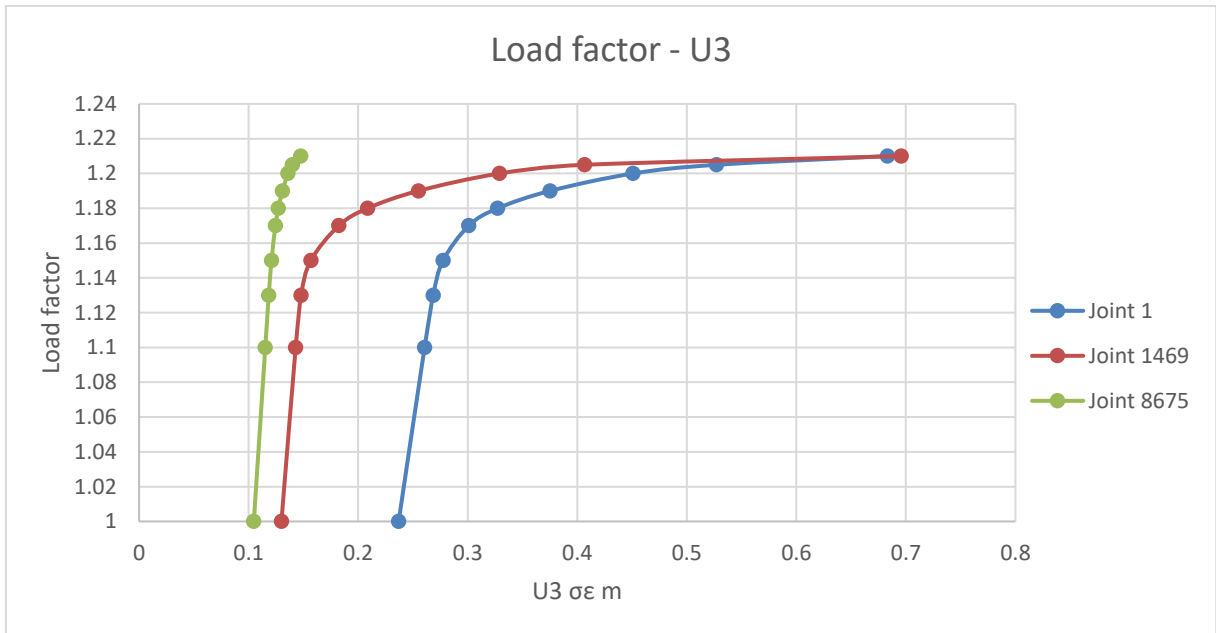




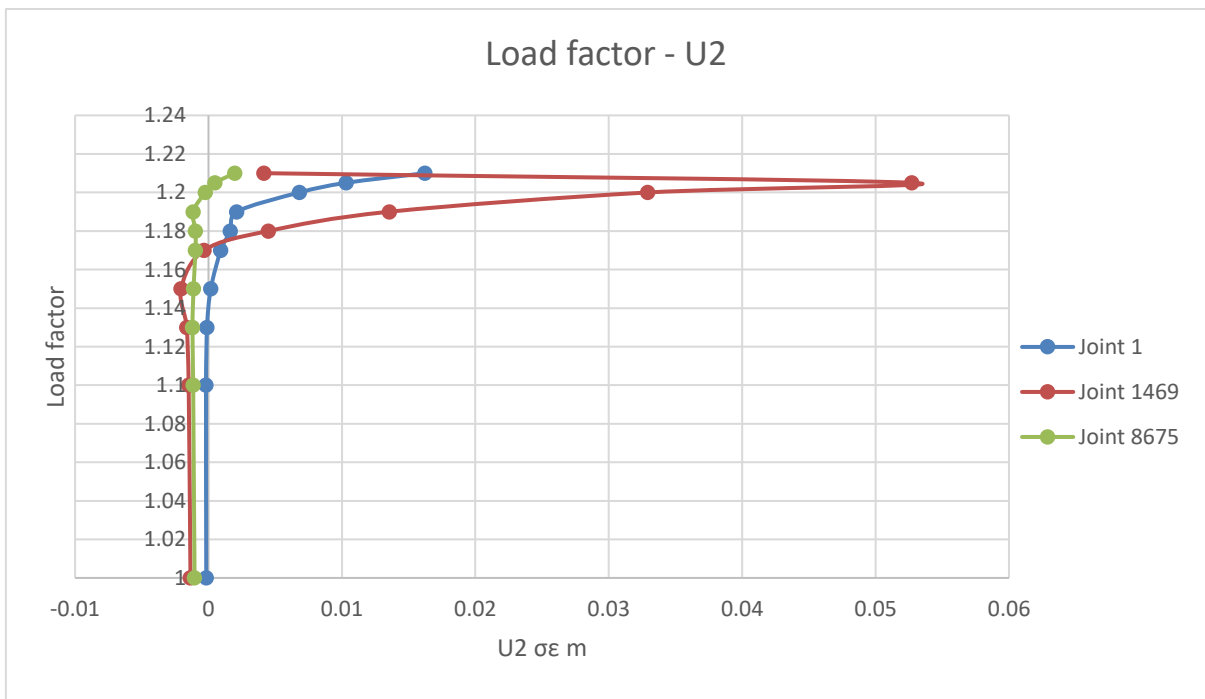
Σχήμα 3.24 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) -U1, U2, U3 για τον Κόμβο 1469



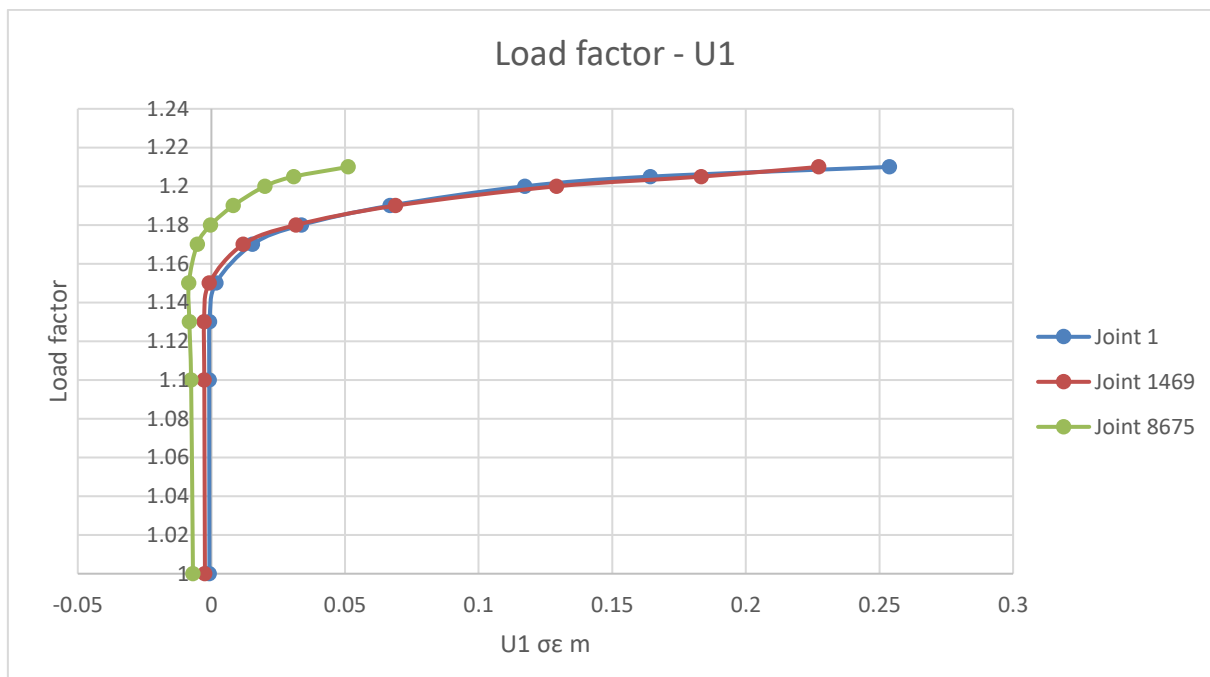
Σχήμα 3.25 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) -U1, U2, U3 για τον Κόμβο 8675



Σχήμα 3.26 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) –U3 (κατακόρυφη μετακίνηση) και για τους τρεις κόμβους



Σχήμα 3.27 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) –U2 (οριζόντια μετακίνηση) και για τους τρεις κόμβους



Σχήμα 3.28 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) –U1 (οριζόντια μετακίνηση) και για τους τρεις κόμβους

### 3.2.3.2 Αποτελέσματα 2<sup>ης</sup> μεθόδου

Επίσης για τη 2<sup>η</sup> μέθοδο στα παρακάτω σχήματα φαίνονται με πορτοκαλί χρώμα οι περιοχές στις οποίες οι ράβδοι έχουν αστοχήσει.

#### 3.2.3.2.1 Βήμα 1ο: $P_{ολ} = 1.05 \cdot P_{αρχ}$ , $\Delta P = 5\% P_{αρχ}$



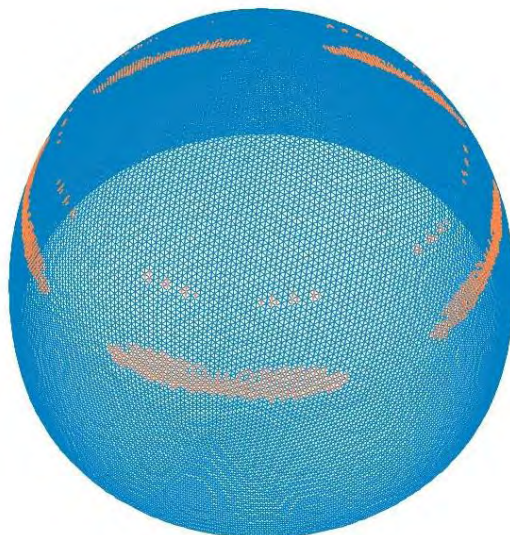
Σχήμα 3.29 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 1<sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί)

3.2.3.2.2 Βήμα 2ο:  $P_{ολ} = 1.08 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P = 3\% P_{αρχ}$



Σχήμα 3.30 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 2<sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί)

3.2.3.2.3 Βήμα 3ο:  $P_{ολ} = 1.11 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P = 3\% P_{αρχ}$



Σχήμα 3.31 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 3<sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί)

3.2.3.2.4 Βήμα 4ο:  $P_{ολ} = 1.13 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P = 2\% P_{αρχ}$



Σχήμα 3.32 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 4<sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί)

3.2.3.2.5 Βήμα 5ο:  $P_{ολ} = 1.14 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P = 1\% P_{αρχ}$



Σχήμα 3.33 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 5<sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί)

3.2.3.2.6 Βήμα 6ο:  $P_{ολ} = 1.15 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P = 1\% P_{αρχ}$



Σχήμα 3.34 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 6<sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί)

3.2.3.2.7 Βήμα 7ο:  $P_{ολ} = 1.16 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P = 1\% P_{αρχ}$



Σχήμα 3.35 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 7<sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί)

3.2.3.2.8 Βήμα 8ο:  $P_{ολ} = 1.17 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P = 1\% P_{αρχ}$



Σχήμα 3.36 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 8<sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί)

3.2.3.2.9 Βήμα 9ο:  $P_{ολ} = 1.18 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P = 1\% P_{αρχ}$



Σχήμα 3.37 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 9<sup>ο</sup> βήμα (με πορτοκαλί)

3.2.3.2.10 Βήμα 10ο:  $P_{ολ} = 1.185 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P = 0.5\% P_{αρχ}$



Σχήμα 3.38 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 10° βήμα (με πορτοκαλί)

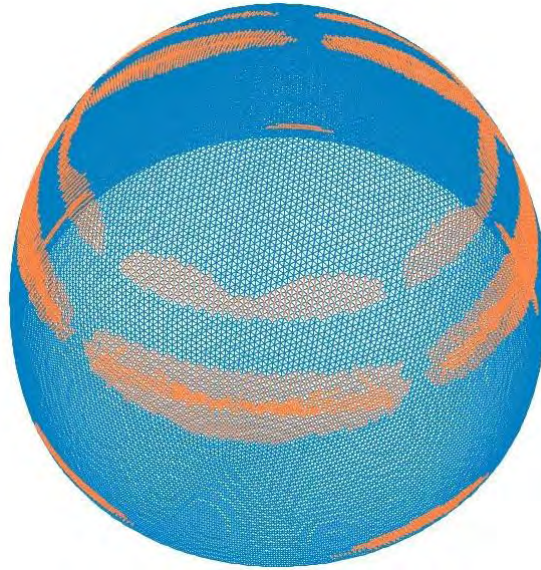
3.2.3.2.11 Βήμα 11ο:  $P_{ολ} = 1.19 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P = 0.5\% P_{αρχ}$



Σχήμα 3.39 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 11° βήμα (με πορτοκαλί)

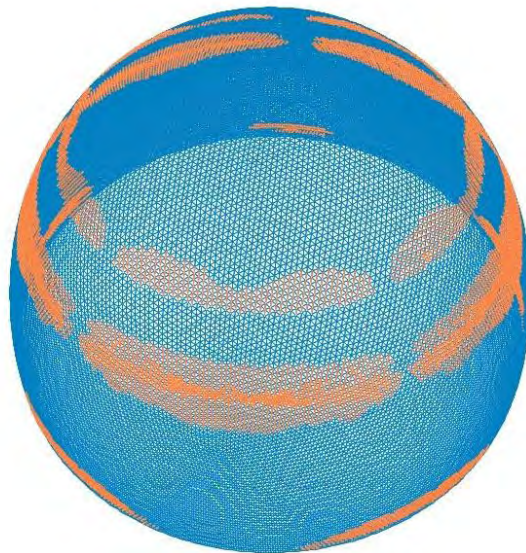


3.2.3.2.12 Βήμα 12ο:  $P_{ολ} = 1.195 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P = 0.5\% P_{αρχ}$



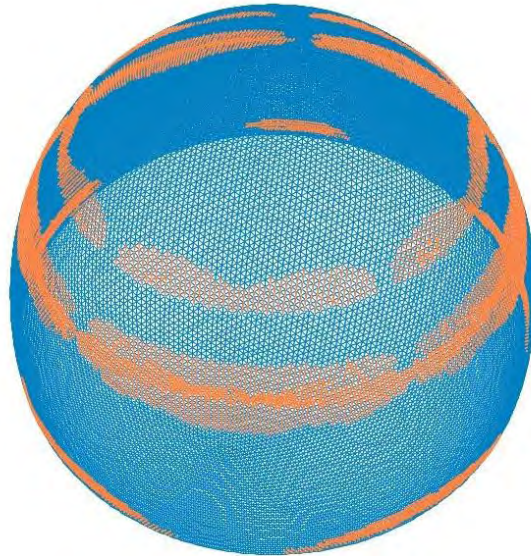
Σχήμα 3.40 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 12° βήμα (με πορτοκαλί)

3.2.3.2.13 Βήμα 13ο:  $P_{ολ} = 1.975 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P = 0.25\% P_{αρχ}$



Σχήμα 3.41 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 13° βήμα (με πορτοκαλί)

3.2.3.2.14 Βήμα 14ο:  $P_{ολ}=1.20 \cdot P_{αρχ}$ ,  $\Delta P=0.25\% P_{αρχ}$



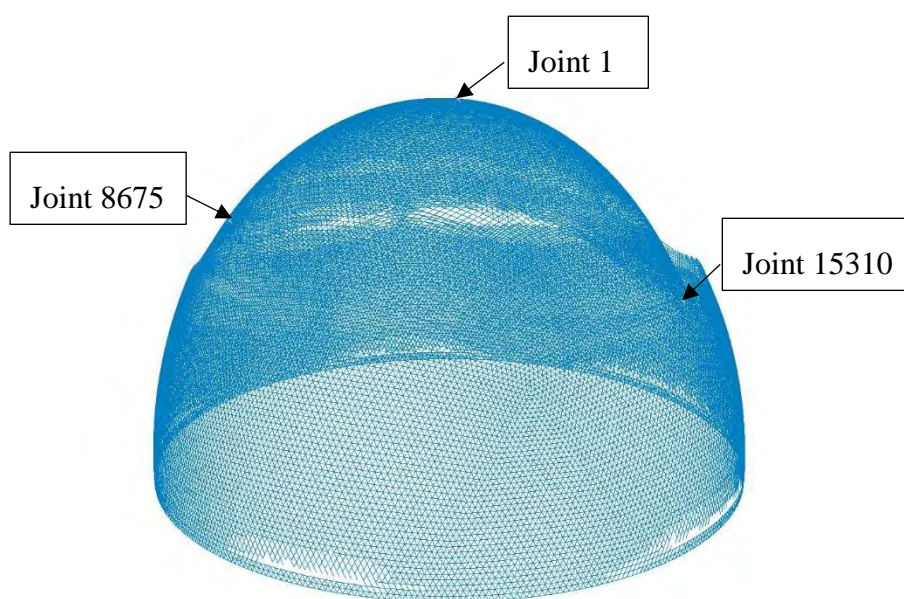
Σχήμα 3.42 Ράβδοι που έχουν αστοχήσει μέχρι το 14° βήμα (με πορτοκαλί)

Σύμφωνα με τη 2<sup>η</sup> μέθοδο αναλύσεων, η τελική κατάρρευση του γεωδαιτικού θόλου επέρχεται μετά από αύξηση του φορτίου χιονιού κατά 20% (Βήμα 14<sup>ο</sup>) και η τελική μορφή κατάρρευσης της κατασκευής φαίνεται στο Σχήμα 3.43.



Σχήμα 3.43 Τελική μορφή κατάρρευσης του γεωδαιτικού θόλου, σύμφωνα με τη 2<sup>η</sup> μέθοδο αναλύσεων

Επίσης όπως και στη 1<sup>η</sup> μέθοδο αναλύσεων, έτσι και για τη περίπτωση της 2<sup>ης</sup> επιλέχθηκαν τρεις χαρακτηριστικοί κόμβοι για τη καταγραφή των μετακινήσεών τους σε συνάρτηση με την αύξηση του φορτίου σχεδιασμού. Οι κόμβοι αυτοί είναι οι εξής: ο πρώτος είναι ο κορυφαίος κόμβος του θόλου (Joint 1), ο δεύτερος (Joint 15310) βρίσκεται κοντά στη περιοχή που αστόχησε και ο τρίτος (Joint 8675) βρίσκεται αντίστοιχα στη περιοχή που δεν αστόχησε. Η θέση και οι συντεταγμένες των συγκεκριμένων κόμβων φαίνονται στο Σχήμα 3.44 και στο Πίνακα 3.3 αντίστοιχα.

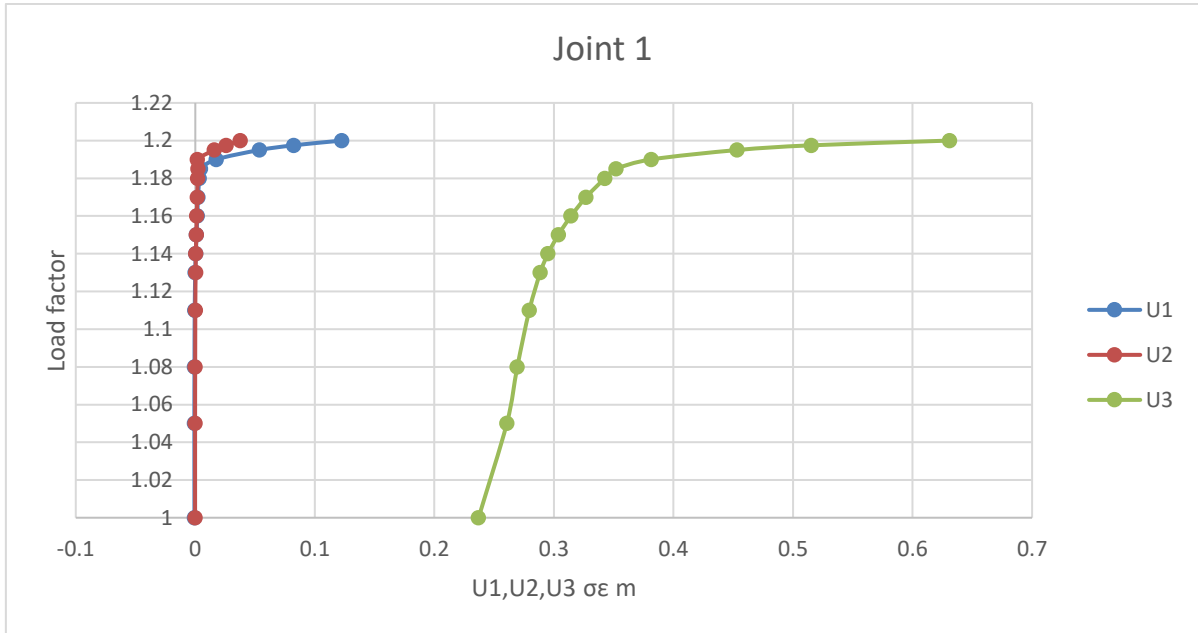


Σχήμα 3.44 Η θέση των κόμβων που επελέγησαν

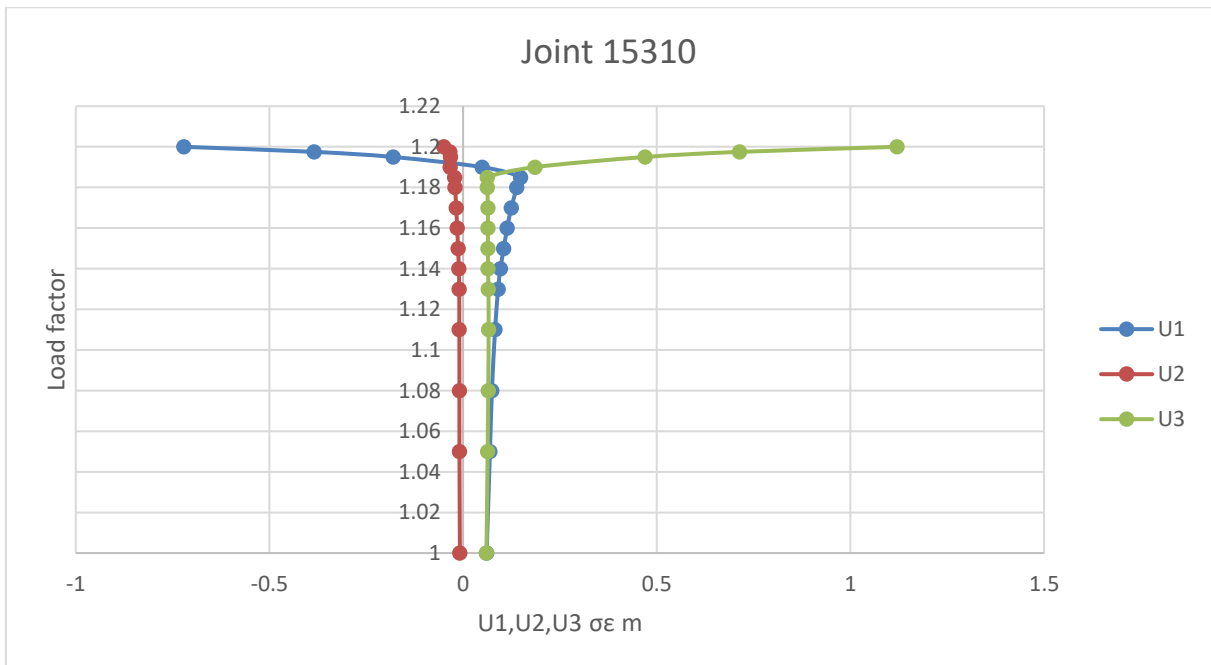
Πίνακας 3.3 Συντεταγμένες κόμβων που επελέγησαν

| Joint | CoordSys | CoordType | XorR     | Y        | Z       |
|-------|----------|-----------|----------|----------|---------|
|       |          |           | m        | m        | m       |
| 1     | GLOBAL   | Cartesian | 0        | 0        | 125     |
| 15310 | GLOBAL   | Cartesian | 81.4817  | -12.6851 | 70.7086 |
| 8675  | GLOBAL   | Cartesian | -76.6194 | -2.5693  | 80.262  |

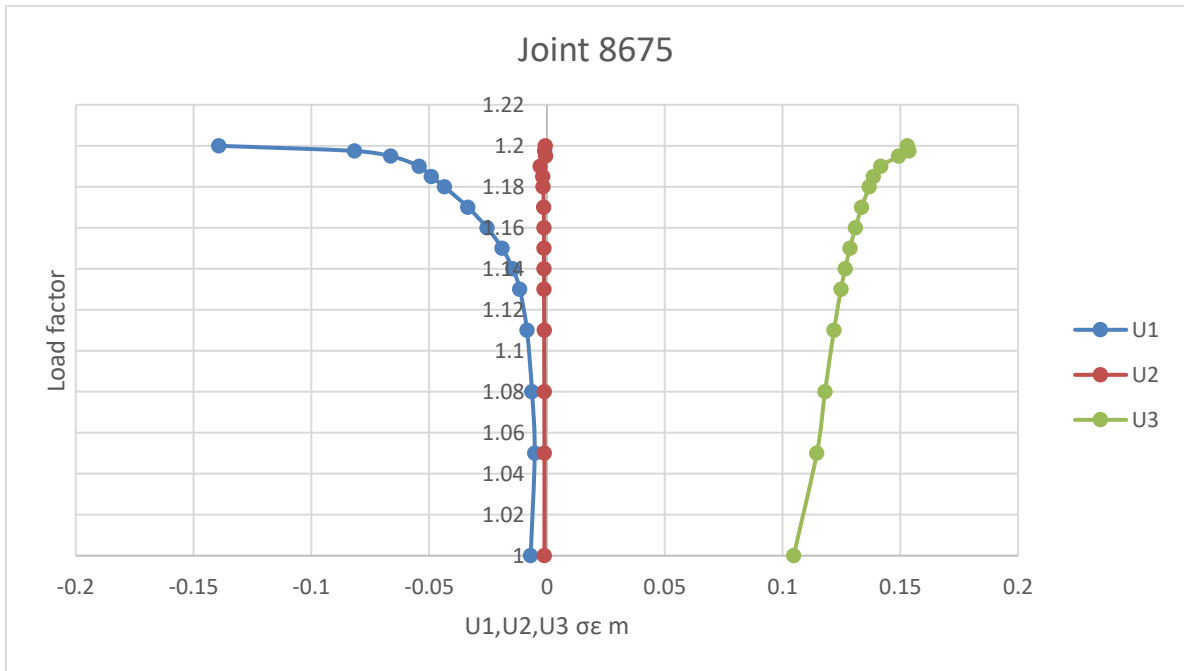
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτικού συντελεστή - μετακινήσεων για τους συγκεκριμένους κόμβους.



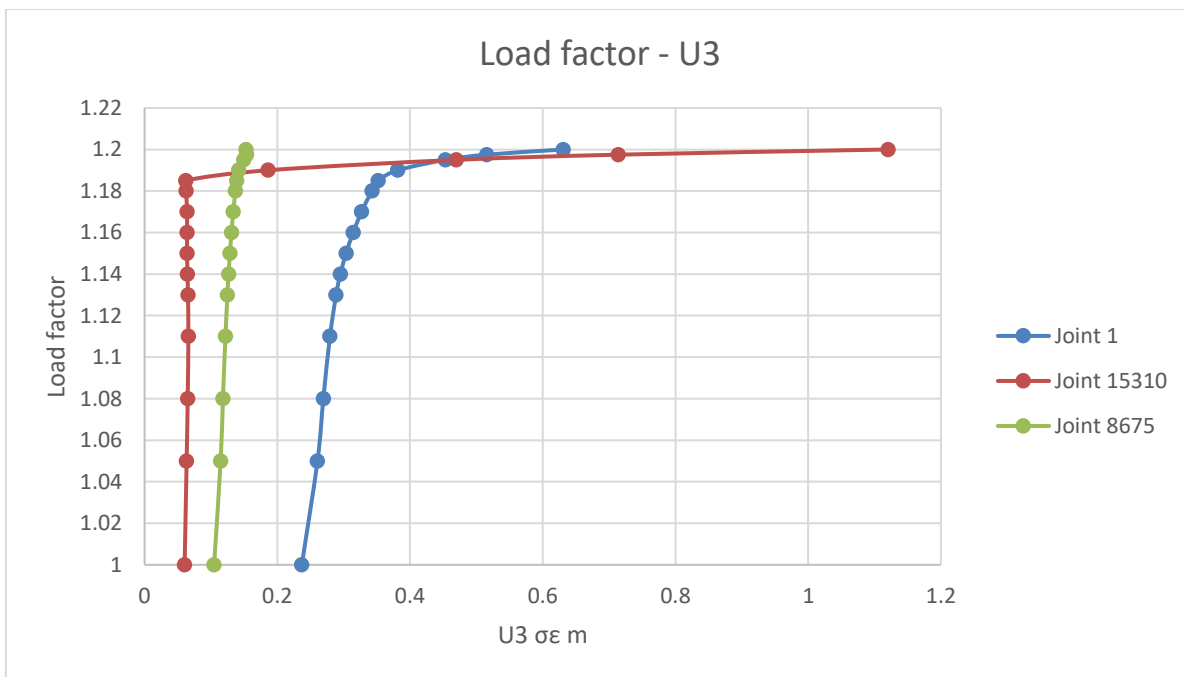
Σχήμα 3.45 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) -U1, U2, U3 για τον Κόμβο 1



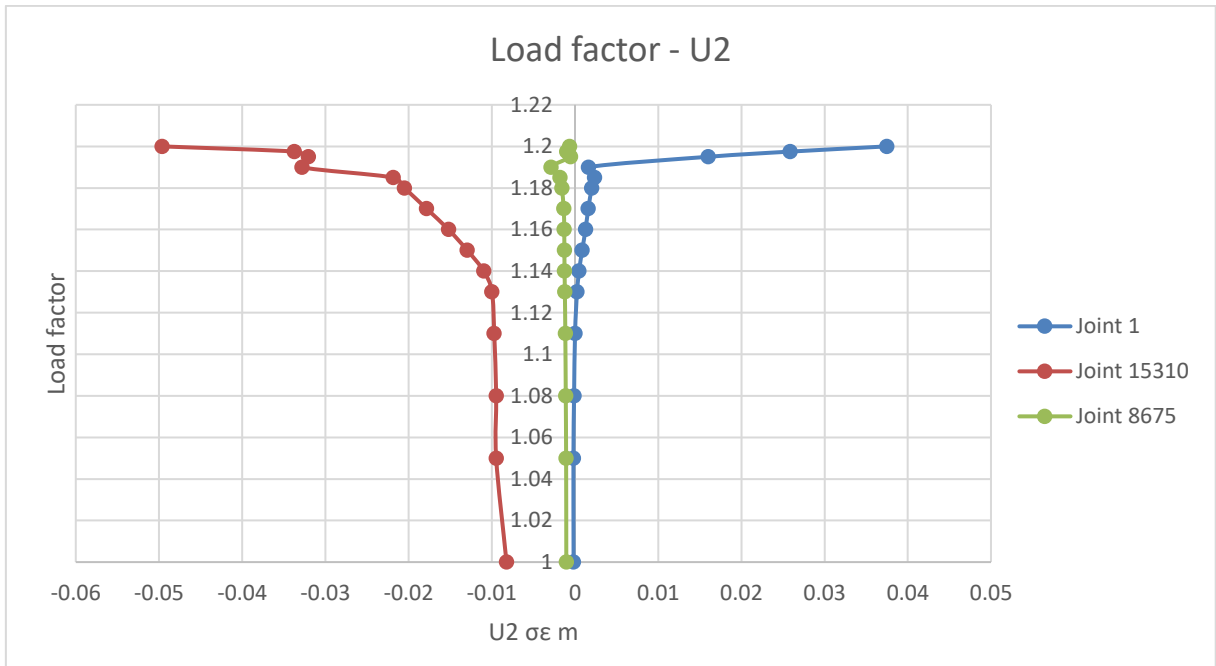
Σχήμα 3.46 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) -U1, U2, U3 για τον Κόμβο 15310



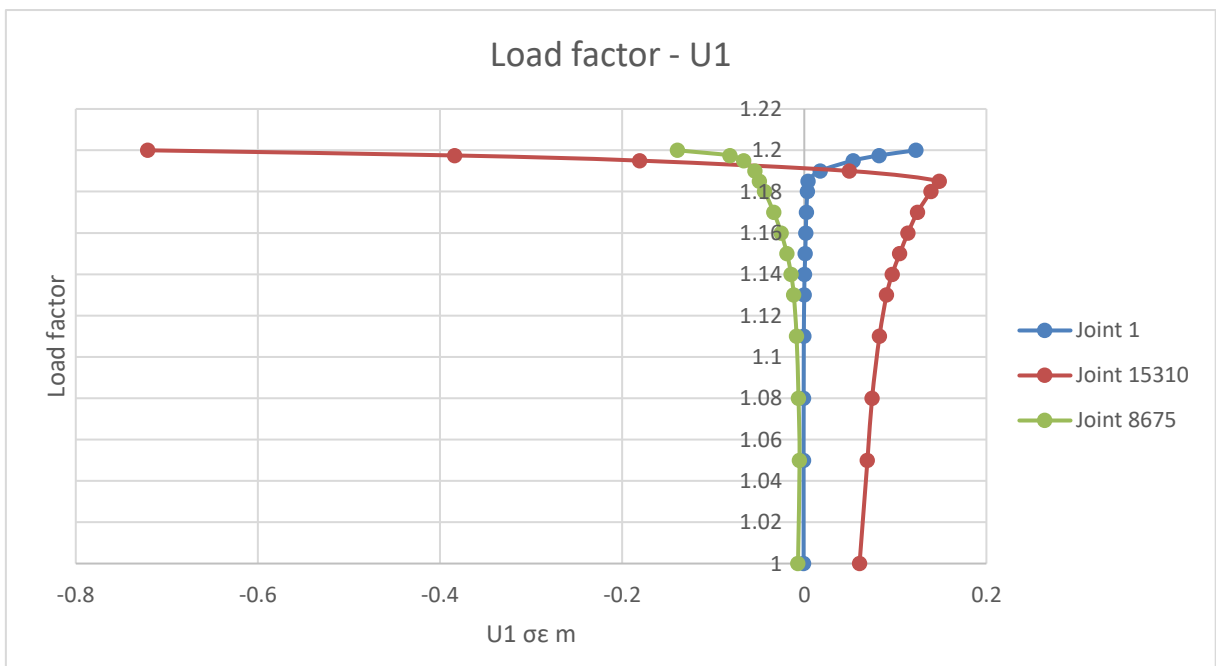
Σχήμα 3.47 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) -U1, U2, U3 για τον Κόμβο 8675



Σχήμα 3.48 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) -U3 (κατακόρυφη μετακίνηση) και για τους τρεις κόμβους



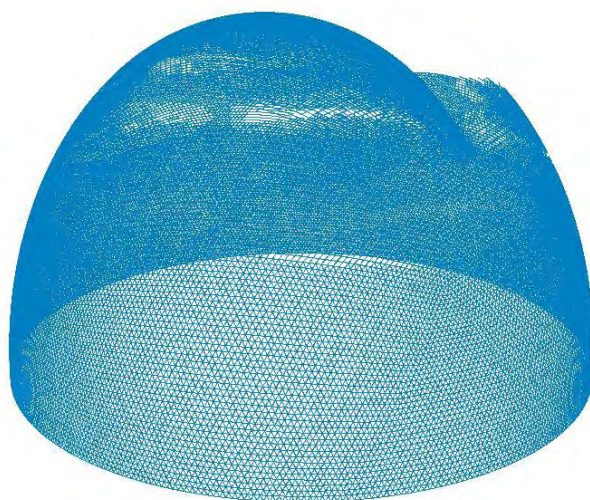
Σχήμα 3.49 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) –U2 (οριζόντια μετακίνηση) και για τους τρεις κόμβους



Σχήμα 3.50 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) –U1 (οριζόντια μετακίνηση) και για τους τρεις κόμβους

### 3.2.3.3 Αποτελέσματα 3<sup>ης</sup> μεθόδου

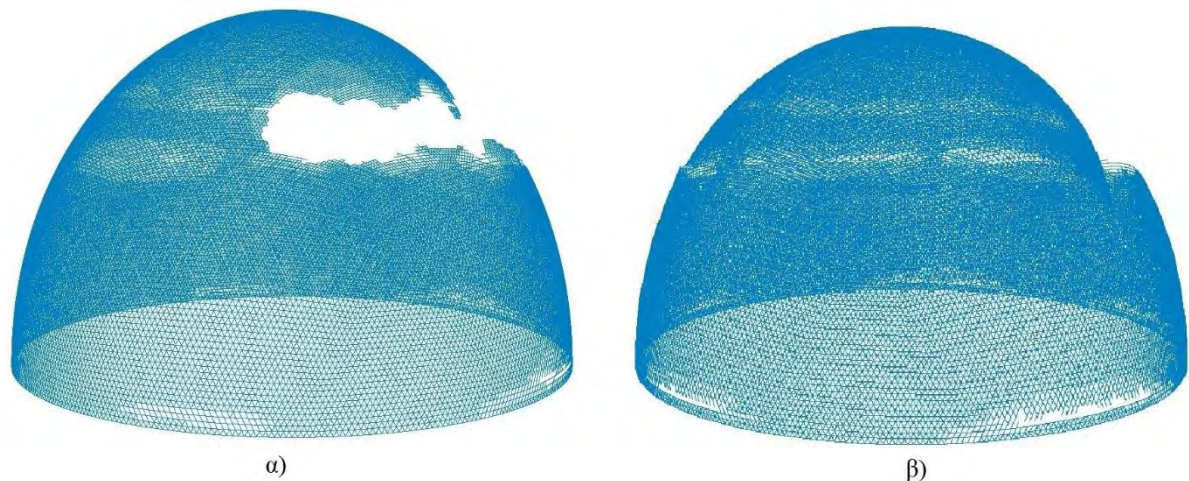
Δηλαδή η τελική κατάρρευση του γεωδαιτικού θόλου επέρχεται μετά από αύξηση του φορτίου χιονιού κατά 25% και η τελική μορφή κατάρρευσης της κατασκευής φαίνεται στο Σχήμα 3.51.



Σχήμα 3.51 Η τελική μορφή κατάρρευσης για τη 3<sup>η</sup> μέθοδο αναλύσεων

### 3.2.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Παρακάτω παρατίθενται οι τελικές μορφές κατάρρευσης του γεωδαιτικού θόλου για τις δύο βασικές μεθόδους ανάλυσης.



Σχήμα 3.52 Η τελική μορφή κατάρρευσης για τη 1<sup>η</sup> μέθοδο αναλύσεων (α) και αντίστοιχα για τη 2<sup>η</sup> (β)

Από τη σύγκριση των τριών μεθόδων εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα:

- Παραπλήσιο τελικό φορτίο κατάρρευσης, συγκεκριμένα για τη 1<sup>η</sup> μέθοδο  $P_{τελ}=1.21P_{αρχ}$  και για τη 2<sup>η</sup>  $P_{τελ}=1.20P_{αρχ}$  ενώ για τη 3<sup>η</sup>  $P_{τελ}=1.25P_{αρχ}$
- Διαφοροποίηση μορφών αστοχίας για τις δύο μεθόδους. Ειδικότερα παρατηρούμε ότι για τη 1<sup>η</sup> μέθοδο έχουμε μονόπλευρη κατάρρευση, η οποία έχει προκληθεί από εκτεταμένη αστοχία ράβδων πάνω από το υψόμετρο των 72m (οριογραμμή εφαρμογής φορτίου χιονιού). Ενώ για τη 2<sup>η</sup> μέθοδο βλέπουμε ότι η κατάρρευση εντοπίζεται σε έναν «λεπτό» δακτύλιο, περιμετρικά του θόλου, στο υψόμετρο των 70m. Τέλος για τη 3<sup>η</sup> μέθοδο η αστοχία εντοπίζεται στο υψόμετρο των 90m, εκεί όπου έχουμε αλλαγή διατομής των ράβδων (Σχήμα 3.51)
- Διαφορετικό πλήθος των μελών που αστόχησαν μέχρι την τελική κατάρρευση (Πίνακες 3.4-3.6)



Πίνακας 3.4 Πλήθος ράβδων που αστοχούν σε κάθε βήμα για τη 1<sup>η</sup> μέθοδο αναλύσεων

| Αριθμός βήματος | Επαυξητικός συντελεστής φορτίου σχεδιασμού (Load factor) | Λόγω μεγάλων μετακινήσεων στην ανάλυση λυγισμού | Λόγω ελέγχου αντοχής μέσω EC3 | Πλήθος ράβδων που διαρρέουν σε κάθε βήμα (συνολικά) |
|-----------------|--|---|-------------------------------|---|
| 1               | 1.1  | 0   | 400                           | 400   |
| 2               | 1.13   | 363   | 392                           | 755   |
| 3               | 1.15   | 549   | 533                           | 1082  |
| 4               | 1.17   | 721   | 777                           | 1498  |
| 5               | 1.18   | 972   | 581                           | 1553  |
| 6               | 1.19   | 1288  | 511                           | 1799  |
| 7               | 1.2  | 1691  | 776                           | 2467  |
| 8               | 1.205  | 1664  | 585                           | 2249  |
| 9               | 1.21   | 2014  | 790                           | 2804  |
|                 | Σύνολο :   | 9262  | 5345                          | 14607   |

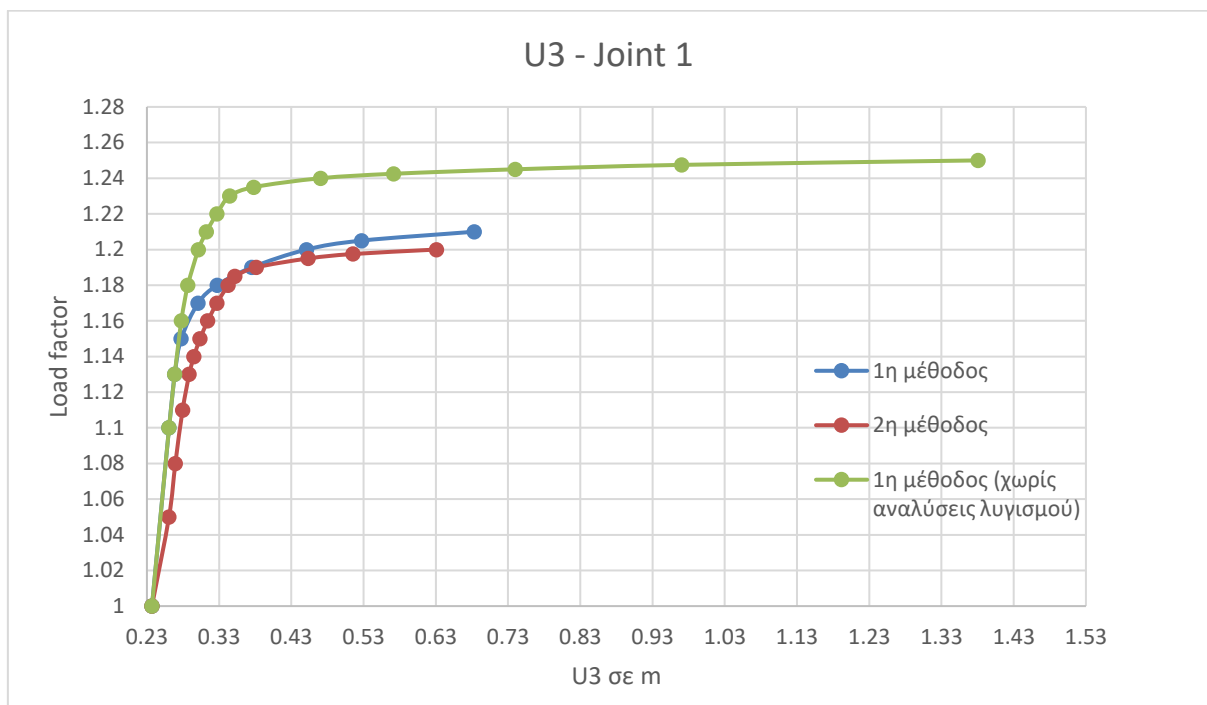
Πίνακας 3.5 Πλήθος ράβδων που αστοχούν σε κάθε βήμα για τη 2<sup>η</sup> μέθοδο αναλύσεων

| Αριθμός βήματος | Επαυξητικός συντελεστής φορτίου σχεδιασμού (Load factor) | Πλήθος ράβδων που διαρρέουν σε κάθε βήμα |
|-----------------|--|--|
| 1               | 1.05   | 537                                      |
| 2               | 1.08   | 309                                      |
| 3               | 1.11   | 549                                      |
| 4               | 1.13   | 589                                      |
| 5               | 1.14   | 508                                      |
| 6               | 1.15   | 502                                      |
| 7               | 1.16   | 462                                      |
| 8               | 1.17   | 606                                      |
| 9               | 1.18   | 749                                      |
| 10              | 1.185  | 938                                      |
| 11              | 1.19   | 648                                      |
| 12              | 1.195  | 937                                      |
| 13              | 1.1975   | 699                                      |
| 14              | 1.2  | 754                                      |
|                 | Σύνολο :   | 8787                                     |

Πίνακας 3.6 Πλήθος ράβδων που αστοχούν σε κάθε βήμα για τη 3<sup>η</sup> μέθοδο αναλύσεων

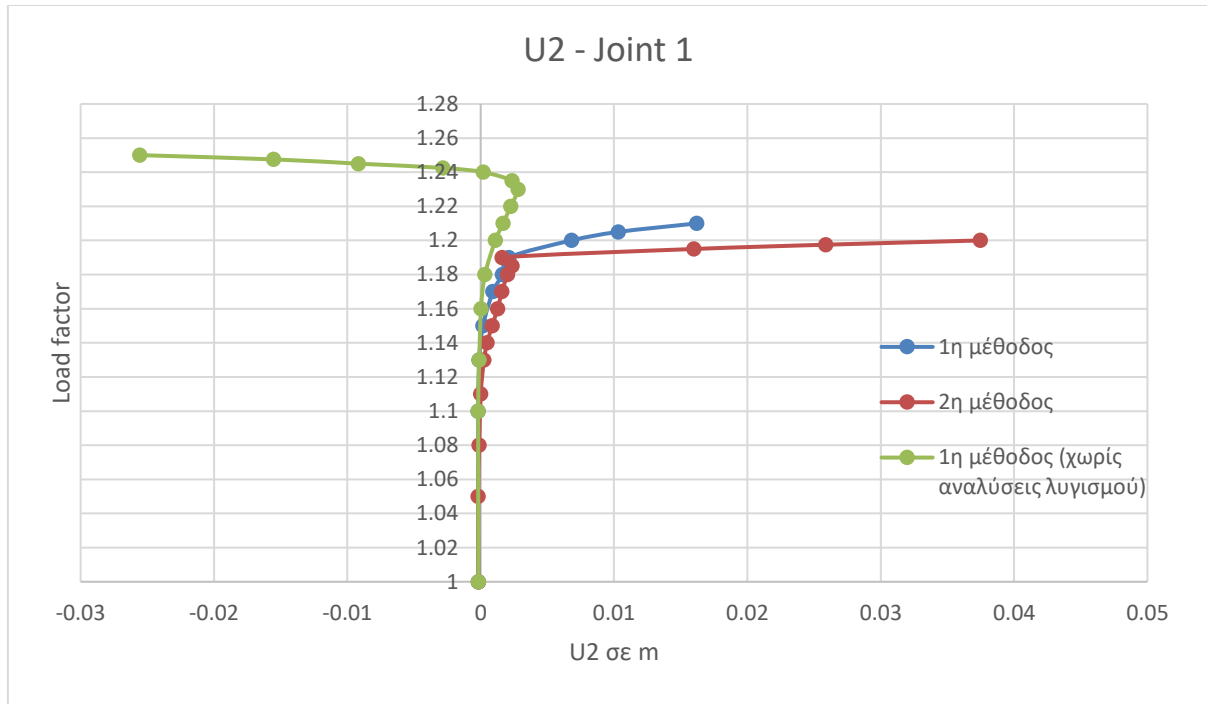
| Αριθμός βήματος | Επαυξητικός συντελεστής φορτίου σχεδιασμού (Load factor) | Πλήθος ράβδων που διαρρέουν σε κάθε βήμα |
|-----------------|--|--|
| 1               | 1.1  | 400                                      |
| 2               | 1.13   | 755                                      |
| 3               | 1.16   | 782                                      |
| 4               | 1.18   | 878                                      |
| 5               | 1.2  | 994                                      |
| 6               | 1.21   | 639                                      |
| 7               | 1.22   | 626                                      |
| 8               | 1.23   | 860                                      |
| 9               | 1.235  | 730                                      |
| 10              | 1.24   | 1083                                     |
| 11              | 1.2425   | 682                                      |
| 12              | 1.245  | 655                                      |
| 13              | 1.2475   | 757                                      |
| 14              | 1.25   | 1306                                     |
| Σύνολο:         |  | 11147                                    |

Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα μετακινήσεων – επαυξητικού συντελεστή φορτίου σχεδιασμού για τον κόμβο 1 (κορυφαίος κόμβος).

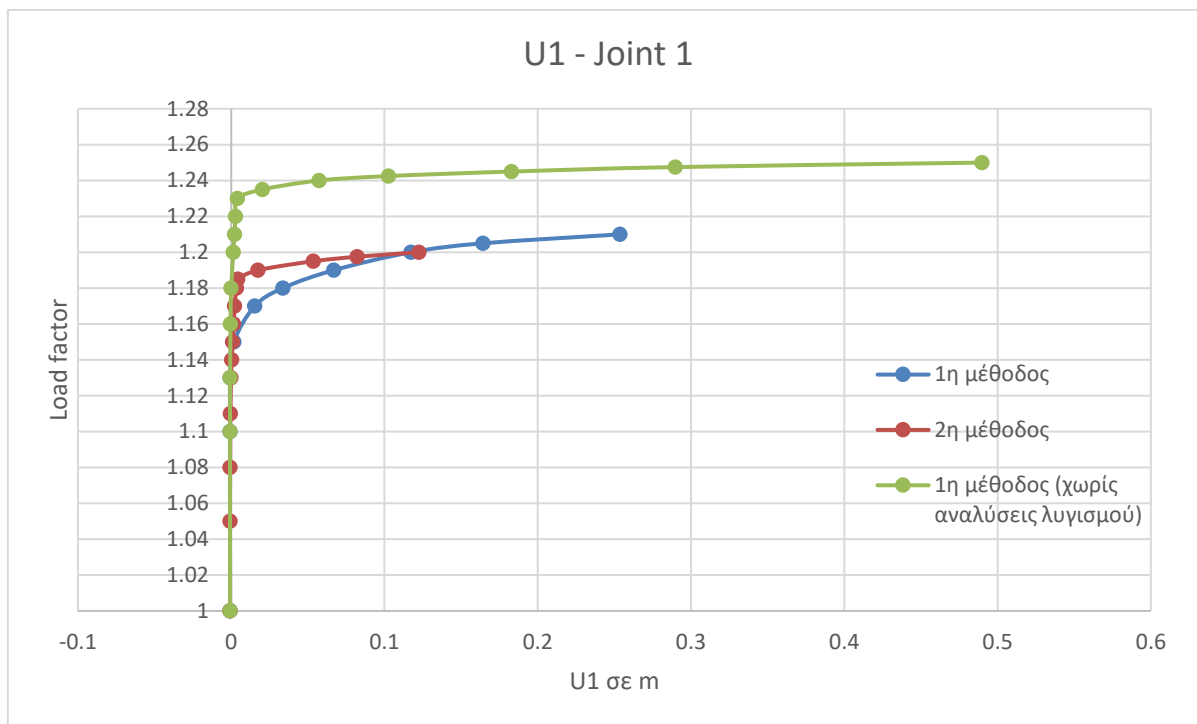


Σχήμα 3.53 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) –U3 (κατακόρυφη μετακίνηση) για το Κόμβο 1 για τις τρεις μεθόδους ανάλυσης

Από το παραπάνω διάγραμμα διαπιστώνουμε ότι οι τιμές για τις τελικές κατακόρυφες μετακινήσεις είναι παραπλήσιες για τις βασικές μεθόδους (1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> μέθοδος) και διπλάσια αυτή της τρίτης. Επίσης από το συγκεκριμένο διάγραμμα φαίνεται ότι η καμπύλη φορτίου – μετακινήσεων χωρίζεται σε μία ελαστική περιοχή και μια πλαστική περιοχή, οι οποίες οριοθετούνται για τιμή του φορτικού συντελεστή περίπου ίση με 1.15 για τις βασικές μεθόδους και περίπου ίση με 1.23 για τη τρίτη.



Σχήμα 3.54 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) –U2 (οριζόντια μετακίνηση) για το Κόμβο 1 για τις τρεις μεθόδους ανάλυσης



Σχήμα 3.55 Διαγράμματα φορτικού συντελεστή (Load factor) – $U_1$  (οριζόντια μετακίνηση) για το Κόμβο 1 για τις τρεις μεθόδους ανάλυσης

Από τα διαγράμματα των οριζόντιων μετακινήσεων του κορυφαίου κόμβου βλέπουμε ότι για τη 1<sup>η</sup> μέθοδο η καμπύλη παρουσιάζει πιο ομαλή μετάβαση από την ελαστική στη πλαστική περιοχή, ενώ για τη 2<sup>η</sup> και τη 3<sup>η</sup> μέθοδο πιο απότομη.

## Συμπεράσματα

Ως τελικά συμπεράσματα μετά την ολοκλήρωση των αναλύσεων και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της μελέτης του γεωδαιτικού θόλου καταλήγουμε στα εξής: μια κατασκευή μεγάλης κλίμακας, σαν αυτή που μελετήσαμε, και τέτοιας συνθετότητας ως προς τη μόρφωση του δομικού της συστήματος, περιέχει μεγάλο βαθμό δυσκολίας στον προσδιορισμό κάποιων παραμέτρων όπως η δυσκαμψία των κόμβων, τα μήκη λυγισμού της κάθε ράβδου λόγω της ασάφειας των συνοριακών συνθηκών της και τη προσομοίωση των φορτίσεων. Επίσης για την απλοποίηση των αναλύσεων έγιναν κάποιες παραδοχές σε σχέση με την αστοχία των μελών. Σκοπός των μεθοδολογιών που ακολουθήθηκαν ήταν η καλύτερη δυνατή προσέγγιση στη συμπεριφορά της κατασκευής με υπολογιστικά μέσα περιορισμένων δυνατοτήτων για τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης κατασκευής.

## Παράρτημα Α: Φύλλο Ms Excel για τον υπολογισμό των κλίσεων των τριγώνων του γεωδαιτικού θόλου

Το πρόβλημα που συναντήσαμε αρχικά για την εύρεση της κλίσης των τριγώνων, ήταν η έλλειψη δεδομένων για τα τρίγωνα. Ειδικά τα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα για εξαγωγή μέσω του λογισμικού AutoCAD, δεν ήταν κατάλληλα για τους υπολογισμούς. Για το λόγο αυτό, χρειάστηκε να γίνει επεξεργασία του αρχείου dxf (Κεφ.2.1) με άλλους τρόπους.

Κάθε αρχείο dxf έχει μια συγκεκριμένη μορφή κώδικα, όπου μέσα σε αυτόν περιέχονται όλες οι πληροφορίες για ένα σχέδιο. Για να γίνει εμφανής ο κώδικας του αρχείου dxf (με το σχέδιο του θόλου), το «ανοίξαμε» με ένα text editor και έπειτα το αποθηκεύσαμε σε αρχείο txt, το οποίο το εισήγαμε αργότερα στο φύλλο Excel, όπου με ειδική υπορουτίνα, εξήγαμε τα δεδομένα με τις συντεταγμένες των σημείων των τριγώνων.

Ο κώδικας αυτής της υπορουτίνας γράφτηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic (όπως και οι υπόλοιπες στα Παραρτήματα), για ένα συγκεκριμένο σχέδιο του θόλου. Για να την χρησιμοποιήσει κάποιος, σε άλλα σχέδια με σκοπό την άντληση δεδομένων, πρέπει να έχει κατανοήσει πως λειτουργεί ο κώδικας ενός αρχείου dxf, ώστε να την τροποποιήσει κατάλληλα. Στη βιβλιογραφία παραθέτουμε ένα εγχειρίδιο της εταιρείας Autodesk που περιγράφει τη λειτουργία ενός τέτοιου αρχείου [15].

### **Κώδικας υπορουτίνας:**

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
Dim txtpath As String
```

```
Dim txt As String
```

```
Application.ThisWorkbook.Sheets("data").Range("A4:J500000").ClearContents
```

```
Application.ThisWorkbook.Sheets("data").Range("K5:O500000").ClearContents
```

```
With Application.FileDialog(msoFileDialogFilePicker)
```

```
.AllowMultiSelect = False
```

```
.Title = "Επιλογή αρχείου txt"
```

```
.ButtonName = "Επιβεβαίωση"
```

```
.InitialFileName = "C:\\"
```

```
If .Show = -1 Then
```

```

'ok clicked
txtpath = .SelectedItems(1)
Else
'cancel clicked
Exit Sub
End If
End With
i = 1
x1 = 15
y1 = 17
z1 = 19
x2 = 21
y2 = 23
z2 = 25
x3 = 27
y3 = 29
z3 = 31
k = 4
Open txtpath For Input As #1
Do While Not EOF(1)
    Line Input #1, txt
    If txt = "3DFACE" Then
        i = 1
    End If
    Select Case i
        Case Is = x1
            Cells(k, 2).Value = txt
        Case Is = y1
            Cells(k, 3).Value = txt
        Case Is = z1
            Cells(k, 4).Value = txt
    End Select

```

```

Case Is = x2
    Cells(k, 5).Value = txt
Case Is = y2
    Cells(k, 6).Value = txt
Case Is = z2
    Cells(k, 7).Value = txt
Case Is = x3
    Cells(k, 8).Value = txt
Case Is = y3
    Cells(k, 9).Value = txt
Case Is = z3
    Cells(k, 10).Value = txt
    Cells(k, 1).Value = k - 3
    k = k + 1
End Select
i = i + 1
Loop
Close #1
End Sub

```

Έπειτα στα κελιά του φύλλου excel (Σχήμα ΠΑ.1) εισήχθησαν οι εξισώσεις για την εύρεση της κλίσης των επιπέδων των τριγώνων (Κεφ. 2.2.1 -2<sup>ος</sup> τρόπος). Το οριζόντιο επίπεδο ορίστηκε μέσω τριών τυχαίων σημείων του επιπέδου  $xy(z = 0)$ . **Το τελικό αποτέλεσμα (Σχήμα ΠΑ.2 ) που προέκυψε είναι, ότι για  $z \geq 72.2 \text{ m}$  τα τρίγωνα του γεωδαιτικού θόλου έχουν κλίση μικρότερη των  $60^\circ$ .**



| A  | B                            | C      | D      | E        | F      | G      | H        | I      | J       | K                                 | L           | M           | N                             | O                  | P                                   | Q   | R  |  |
|----|------------------------------|--------|--------|----------|--------|--------|----------|--------|---------|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------------|---|----|--|
|    | Σημεία τριγώνων (x,y,z σε m) |        |        | Σημείο 2 |        |        | Σημείο 3 |        |         | Συντελεστές εξ. Επιπέδου τριγώνων |             |             | Γωνία μεταξύ των δύο επιπέδων |                    |                                     | Σημεία ενός οριζόντιου νοητού επιπέδου για σύγκριση γωνίας των δύο επιπέδων |    |  |
|    | x1                           | y1     | z1     | x2       | y2     | z2     | x3       | y3     | z3      | A                                 | B           | C           | θ°                            | if θ<=60 then minz | x1                                  | y1  | z1 |  |
| 1  |                              |        |        |          |        |        |          |        |         |                                   |             |             |                               |                    |                                     |   |    |  |
| 2  |                              |        |        |          |        |        |          |        |         |                                   |             |             |                               |                    |                                     |   |    |  |
| 3  | Α.Α τριγώνου                 |        |        |          |        |        |          |        |         |                                   |             |             |                               |                    |                                     |   |    |  |
| 4  | 1                            | 0      | 125    | 1.2586   | 0      | 124.99 | 0.3889   | 1.197  | 124.99  | 0.01118503                        | -0.00861    | 1.5065442   | 0.557062218                   | 124.9901           | x2                                  | 0   | 0  |  |
| 5  | 2                            | 1.2586 | 0      | 124.99   | 2.5342 | 0      | 124.96   | 1.2052 | 124.974 | 0.03639704                        | -0.0088308  | 1.53735312  | 1.395563848                   | 124.9599           | x3                                  | 0   | 1  |  |
| 6  | 3                            | 1.2586 | 0      | 124.99   | 1.6589 | 1.2052 | 124.974  | 0.3889 | 1.197   | 0.01963008                        | -0.0142631  | 1.52733154  | 0.910208541                   | 124.9737           |                                     | y3  | z3 |  |
| 7  | 4                            | 0.3889 | 1.197  | 124.99   | 1.6589 | 1.2052 | 124.974  | 0.7831 | 2.4102  | 0.01964884                        | -0.0318891  | 1.537353156 | 1.395534042                   | 124.9599           |                                     | 1   | 0  |  |
| 8  | 5                            | 2.5342 | 0      | 124.96   | 3.8266 | 0      | 124.908  | 2.9459 | 1.2134  | 0.0624901                         | -0.0090396  | 1.56819816  | 2.305660891                   | 124.9084           | Συντελεστές εξ. Οριζόντιου Επιπέδου |   |    |  |
| 9  | 6                            | 2.5342 | 0      | 124.96   | 2.9459 | 1.2134 | 124.937  | 1.6589 | 1.2052  | 0.0449466                         | -0.0148006  | 1.55826986  | 1.739394686                   | 124.9365           | A                                   | B   | C  |  |
| 10 | 7                            | 1.6589 | 1.2052 | 124.974  | 2.9459 | 1.2134 | 124.937  | 2.0643 | 2.4267  | 0.04513476                        | -0.0327955  | 1.56874622  | 2.036831304                   | 124.9365           | 0                                   | 0   | 0  |  |
| 11 | 8                            | 1.6589 | 1.2052 | 124.974  | 2.0643 | 2.4267 | 124.937  | 0.7831 | 2.4102  | 0.0279693                         | -0.0381743  | 1.5582967   | 1.739482724                   | 124.9365           |                                     |   |    |  |
| 12 | 9                            | 0.7831 | 2.4102 | 124.96   | 2.0643 | 2.4267 | 124.937  | 1.1825 | 3.6393  | 0.02791119                        | -0.0566358  | 1.56813282  | 2.30573541                    | 124.9084           |                                     |   |    |  |
| 13 | 10                           | 3.8266 | 0      | 124.908  | 5.1353 | 0      | 124.835  | 4.2497 | 1.2214  | 0.08952862                        | -0.0091639  | 1.59844618  | 3.222488908                   | 124.8351           |                                     |   |    |  |
| 14 | 11                           | 3.8266 | 0      | 124.908  | 4.2497 | 1.2214 | 124.878  | 2.9459 | 1.2134  | 0.07157272                        | -0.0151484  | 1.58907652  | 2.635933829                   | 124.8777           |                                     |   |    |  |
| 15 | 12                           | 2.9459 | 1.2134 | 124.937  | 4.2497 | 1.2214 | 124.878  | 3.3627 | 2.4431  | 0.07195036                        | -0.0335113  | 1.59994846  | 2.840051115                   | 124.8777           |                                     |   |    |  |
| 16 | 13                           | 2.9459 | 1.2134 | 124.937  | 3.3627 | 2.4431 | 124.892  | 2.0643 | 2.4267  | 0.05399185                        | -0.0392312  | 1.58980696  | 2.403856326                   | 124.892            |                                     |   |    |  |
| 17 | 14                           | 2.0643 | 2.4267 | 124.937  | 3.3627 | 2.4431 | 124.892  | 2.4749 | 3.6643  | 0.05410888                        | -0.0580742  | 1.600166    | 2.839784239                   | 124.8777           |                                     |   |    |  |
| 18 | 15                           | 2.0643 | 2.4267 | 124.937  | 2.4749 | 3.6643 | 124.878  | 1.1825 | 3.6393  | 0.03652432                        | -0.0633877  | 1.58920924  | 2.63568912                    | 124.8777           |                                     |   |    |  |
| 19 | 16                           | 1.1825 | 3.6393 | 124.908  | 2.4749 | 3.6643 | 124.878  | 1.5869 | 4.884   | 0.03637979                        | -0.0823178  | 1.59854028  | 3.222372219                   | 124.8351           |                                     |   |    |  |
| 20 | 17                           | 5.1353 | 0      | 124.835  | 6.4601 | 0      | 124.739  | 5.5699 | 1.2294  | 0.11826828                        | -0.00993288 | 1.62870912  | 4.166082941                   | 124.7389           |                                     |   |    |  |
| 21 | 18                           | 5.1353 | 0      | 124.835  | 5.5699 | 1.2294 | 124.797  | 4.2497 | 1.2214  | 0.09951848                        | -0.0156702  | 1.61957708  | 3.559457067                   | 124.7965           |                                     |   |    |  |
| 22 | 19                           | 4.2497 | 1.2214 | 124.878  | 5.5699 | 1.2294 | 124.797  | 4.6778 | 2.4593  | 0.10009828                        | -0.0344168  | 1.63085078  | 3.7133553617                  | 124.7965           |                                     |   |    |  |
| 23 | 20                           | 4.2497 | 1.2214 | 124.878  | 4.6778 | 2.4593 | 124.825  | 3.3627 | 2.4431  | 0.08171905                        | -0.040357   | 1.62102707  | 3.218024295                   | 124.8253           |                                     |   |    |  |
| 24 | 21                           | 3.3627 | 2.4431 | 124.892  | 4.6778 | 2.4593 | 124.825  | 3.7845 | 3.6889  | 0.08201432                        | -0.0595831  | 1.63151842  | 3.555455265                   | 124.8253           |                                     |   |    |  |
| 25 | 22                           | 3.3627 | 2.4431 | 124.892  | 3.7845 | 3.6889 | 124.825  | 2.4749 | 3.6643  | 0.0636391                         | -0.065248   | 1.6211234   | 3.217939469                   | 124.8253           |                                     |   |    |  |
| 26 | 23                           | 2.4749 | 3.6643 | 124.878  | 3.7845 | 3.6889 | 124.825  | 2.8904 | 4.9174  | 0.06366492                        | -0.0845673  | 1.63083846  | 3.713693078                   | 124.7965           |                                     |   |    |  |
| 27 | 24                           | 2.4749 | 3.6643 | 124.878  | 2.8904 | 4.9174 | 124.797  | 1.5869 | 4.884   | 0.04565758                        | -0.0898059  | 1.61953815  | 3.559582856                   | 124.7965           |                                     |   |    |  |
| 28 | 25                           | 1.5869 | 4.884  | 124.835  | 2.8904 | 4.9174 | 124.797  | 1.9963 | 6.144   | 0.04542292                        | -0.1095939  | 1.62873604  | 4.165961822                   | 124.7389           |                                     |   |    |  |
| 29 | 26                           | 6.4601 | 0      | 124.739  | 7.8005 | 0      | 124.619  | 6.9062 | 1.2372  | 0.14821656                        | -0.009422   | 1.65834288  | 5.1117568946                  | 124.6191           |                                     |   |    |  |

Σχήμα ΠΑ.1 Φύλλο Ms Excel για τον υπολογισμό των κλίσεων των τριγώνων

|    | A  | B           | C |
|----|--|-------------|---|
| 1  | <u>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</u>  |             |   |
| 2  | Σύνολο τριγώνων=   | 64000       |   |
| 3  | max x=   | 100 m       |   |
| 4  | min x=   | -100 m      |   |
| 5  | max y=   | 100 m       |   |
| 6  | min y=   | -100 m      |   |
| 7  | max z=   | 125 m       |   |
| 8  | min z=   | 0 m         |   |
| 9  | maxθ τριγώνων με<br>οριζόντιο επίπεδο=                         | 89.842802 ° |   |
| 10 | minθ τριγώνων με<br>οριζόντιο επίπεδο=                         | 0.5570523 ° |   |
| 11 | minz πάνω απτο οποίο<br>η κλίση $\theta \leq 60^\circ$ : (+/-) | 72.2665 m   |   |
| 12 |  |             |   |
| 13 |  |             |   |
| 14 |  |             |   |

Σχήμα ΠΑ.2 Αποτελέσματα φύλλου Ms Excel για τον υπολογισμό των κλίσεων των τριγώνων

## Παράρτημα Β: Φύλλο Ms Excel για τον υπολογισμό επικόμβιων φορτίων χιονιού

Αυτό το φύλλο excel δημιουργήθηκε κυρίως, για το λόγο ότι οι εξισώσεις που βρέθηκαν για τη συσχέτιση μεταξύ της θέσης των τριγώνων στο χώρο και του εμβαδού τους έχουν πάρα πολλούς όρους, με αποτέλεσμα η απλή εισαγωγή τους σε κελιά να είναι μια επίπονη διαδικασία. Το πρόβλημα αυτό επιλύθηκε πάλι με τη βοήθεια προγραμματισμού και συγκεκριμένα με τη δημιουργία υπορουτίνας, όπου σε αυτή εισάγονται ως δεδομένα οι σφαιρικές συντεταγμένες των κόμβων του φορέα και αντίστοιχα εξάγει το εμβαδόν από τα γειτονικά τους τρίγωνα. Στη συνέχεια με σχέσεις («γραμμένες» σε κελιά) του Κεφ.2.2, προκύπτουν τα επικόμβια φορτία λόγω χιονιού.

### Κώδικας υπορουτίνας:

```
Private Sub CommandButton2_Click()  
Application.ThisWorkbook.Sheets("joints").Range("H:H").ClearContents  
Sheets("joints").Range("H1").Value = "Area"  
Dim constants(21) As Double  
Size = WorksheetFunction.CountA(Worksheets(2).Columns(1)) - 1  
p = 4 * Atn(1)  
  
For i = 1 To Size  
    Z = Sheets("joints").Cells(i + 1, 4).Value  
    If Z >= 72.2 Then  
        theta = Sheets("joints").Cells(i + 1, 5).Value  
        Phi = Sheets("joints").Cells(i + 1, 6).Value  
        If theta <= -4 * p / 5 Then  
            deiktis = 7  
        ElseIf theta <= -2 * p / 5 Then  
            deiktis = 6  
        ElseIf theta <= 0 Then  
            deiktis = 5  
        ElseIf theta <= 2 * p / 5 Then
```

```

    deiktis = 2
ElseIf theta <= 4 * p / 5 Then
    deiktis = 3
ElseIf theta <= p Then
    deiktis = 4
End If
For j = 1 To 21
    constants(j) = Sheets("constants").Cells(deiktis, j + 1).Value
Next j

    Area = constants(1) + constants(2) * theta + constants(3) * Phi + constants(4) * theta ^ 2 +
constants(5) * theta * Phi + constants(6) * Phi ^ 2 + constants(7) * theta ^ 3 + constants(8) * theta ^ 2
* Phi + constants(9) * theta * Phi ^ 2 + constants(10) * Phi ^ 3 + constants(11) * theta ^ 4 +
constants(12) * theta ^ 3 * Phi + constants(13) * theta ^ 2 * Phi ^ 2 + constants(14) * theta * Phi ^ 3 +
constants(15) * Phi ^ 4 + constants(16) * theta ^ 5 + constants(17) * theta ^ 4 * Phi + constants(18) *
theta ^ 3 * Phi ^ 2 + constants(19) * theta ^ 2 * Phi ^ 3 + constants(20) * theta * Phi ^ 4 +
constants(21) * Phi ^ 5

    Else

        Area = 0

    End If

    Sheets("joints").Cells(i + 1, 8).Value = Area
Next i
End Sub

```

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα φύλλα excel που χρησιμοποιήθηκαν.

|    | A                     | B     | C      | D      | E     | F      | G     | H      | I      | J      | K      | L       | M       | N     | O      | P      | Q        | R       | S        | T      | U        | V      | W | X |
|----|-----------------------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|-------|--------|--------|----------|---------|----------|--------|----------|--------|---|---|
|    |                       | p00   | p10    | p01    | p20   | p11    | p02   | p30    | p21    | p12    | p03    | p40     | p31     | p22   | p13    | p04    | p50      | p41     | p32      | p23    | p14      | p05    |   |   |
| 1  | Διαστήματα            |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 2  | $0-2\pi/5$            | 1.413 | -1.703 | -4.624 | 2.24  | 7.758  | 9.002 | -1.408 | -6.775 | -7.075 | -5.155 | 0.5603  | 0.9535  | 5.632 | 1.799  | 0.2185 | -0.00016 | -0.3794 | 4.8E-05  | -1.433 | 0.00046  | 0.3175 |   |   |
| 3  | $2\pi/5-4\pi/5$       | 11.28 | -18.45 | -27.91 | 12.86 | 32.31  | 26.79 | -4.227 | -13.97 | -21.22 | -9.684 | 0.5613  | 2.862   | 5.629 | 5.4    | 0.2212 | -0.00012 | -0.3797 | 0.00027  | -1.433 | 0.00051  | 0.3169 |   |   |
| 4  | $4\pi/5-\pi$          | 54.74 | -61.63 | -89.27 | 25.55 | 81.31  | 51.17 | -4.237 | -28.19 | -32.18 | -11.25 | 0.117   | 4.563   | 6.347 | 5.807  | -1.115 | 0.02615  | -0.3393 | -0.1229  | -1.333 | 0.5927   | 0.2555 |   |   |
| 5  | $(-2\pi/5)-0$         | 1.413 | 1.703  | -4.624 | 2.24  | -7.758 | 9.002 | 1.408  | -6.775 | 7.075  | -5.155 | 0.5603  | -0.9535 | 5.632 | -1.799 | 0.2185 | 0.00016  | -0.3794 | -4.8E-05 | -1.433 | -0.00046 | 0.3175 |   |   |
| 6  | $(-4\pi/5)-(-2\pi/5)$ | 11.28 | 18.45  | -27.91 | 12.86 | -32.31 | 26.79 | 4.227  | -13.97 | 21.22  | -9.684 | 0.5613  | -2.862  | 5.629 | -5.4   | 0.2212 | 0.00012  | -0.3797 | -0.00027 | -1.433 | -0.00051 | 0.3169 |   |   |
| 7  | $(-\pi)-(-4\pi/5)$    | 37.99 | 39.19  | -68.36 | 13.2  | -60.6  | 38.78 | 0.7876 | -20.11 | 24.07  | -6.689 | -0.3692 | -3.107  | 4.472 | -4.015 | -2.07  | -0.05361 | -0.2374 | -0.0262  | -1.14  | -0.7568  | 0.3472 |   |   |
| 8  |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 9  |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 10 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 11 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 12 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 13 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 14 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 15 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 16 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 17 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 18 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 19 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 20 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 21 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 22 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 23 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 24 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 25 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 26 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 27 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 28 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 29 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 30 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 31 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |
| 32 |                       |       |        |        |       |        |       |        |        |        |        |         |         |       |        |        |          |         |          |        |          |        |   |   |

$$f(x,y) = p00 + p10*x + p01*y + p20*x^2 + p11*x*y + p02*y^2 + p30*x^3 + p21*x^2*y + p12*x*y^2 + p03*y^3 + p40*x^4 + p31*x^3*y + p22*x^2*y^2 + p13*x*y^3 + p04*y^4 + p50*x^5 + p41*x^4*y + p32*x^3*y^2 + p23*x^2*y^3 + p14*x*y^4 + p05*y^5$$

Σχήμα ΠΒ.1 Φύλλο Ms Excel με τις σταθερές της 5° βάρθμιας πολ/κης εξίσωσης

| A     | B          | C          | D            | E          | F          | G            | H           | I          | J | K | L                  | M       | N | O |
|-------|------------|------------|--------------|------------|------------|--------------|-------------|------------|---|---|--------------------|---------|---|---|
| Joint | X          | Y          | Z            | theta      | phi        | rho          | Area        | Joint load |   |   |                    |         |   |   |
| 1     | 0.00000000 | 0.00000000 | 125.00000000 | 0.00000000 | 1.57079633 | 125.00000000 | 0.748044913 | 2.0346822  |   |   |                    |         |   |   |
| 2     | 1.25860000 | 0.00000000 | 124.99010000 | 0.00000000 | 1.56072707 | 124.99643664 | 0.762661511 | 2.0744393  |   |   |                    |         |   |   |
| 3     | 0.38890000 | 1.19700000 | 124.99010000 | 1.25665888 | 1.56072714 | 124.99643655 | 0.764365334 | 2.0790737  |   |   |                    |         |   |   |
| 4     | 2.53420000 | 0.00000000 | 124.95990000 | 0.00000000 | 1.55051900 | 124.98559428 | 0.777506309 | 2.1148172  |   |   |                    |         |   |   |
| 5     | 1.65890000 | 1.20520000 | 124.97370000 | 0.62829431 | 1.55439053 | 124.99052023 | 0.773065843 | 2.1027391  |   |   |                    |         |   |   |
| 6     | 0.78310000 | 2.41020000 | 124.95990000 | 1.25664511 | 1.55051878 | 124.98559484 | 0.779079787 | 2.119097   |   |   |                    |         |   |   |
| 7     | 3.82660000 | 0.00000000 | 124.90840000 | 0.00000000 | 1.54017066 | 124.96700068 | 0.792557214 | 2.1557556  |   |   |                    |         |   |   |
| 8     | 2.94590000 | 1.21340000 | 124.93650000 | 0.39071801 | 1.54530081 | 124.97711670 | 0.790375512 | 2.1498214  |   |   |                    |         |   |   |
| 9     | 0.26430000 | 2.42670000 | 124.93650000 | 0.86591842 | 1.54530139 | 124.97711486 | 0.789213546 | 2.1466608  |   |   |                    |         |   |   |
| 10    | 1.18250000 | 3.63930000 | 124.90840000 | 1.25663215 | 1.54017072 | 124.96700045 | 0.78929653  | 2.1468866  |   |   |                    |         |   |   |
| 11    | 5.13530000 | 0.00000000 | 124.83510000 | 0.00000000 | 1.52968284 | 124.94067992 | 0.807787518 | 2.197182   |   |   |                    |         |   |   |
| 12    | 4.24970000 | 1.22140000 | 124.87770000 | 0.27986533 | 1.53540256 | 124.95595914 | 0.807220377 | 2.1956394  |   |   |                    |         |   |   |
| 13    | 3.36270000 | 2.44310000 | 124.89200000 | 0.62830986 | 1.53752785 | 124.96114657 | 0.805012196 | 2.1896332  |   |   |                    |         |   |   |
| 14    | 4.24790000 | 3.66430000 | 124.87770000 | 0.97676596 | 1.53540215 | 124.95596097 | 0.805507953 | 2.1909816  |   |   | Max Joint load     | 3.92879 |   |   |
| 15    | 1.58690000 | 4.88400000 | 124.83510000 | 1.25663851 | 1.52968253 | 124.94068152 | 0.809099954 | 2.2007519  |   |   | SAP joint with max | 1352    |   |   |
| 16    | 6.46010000 | 0.00000000 | 124.73890000 | 0.00000000 | 1.51905358 | 124.90606897 | 0.823173248 | 2.2390312  |   |   | Area with max      | 1.44441 |   |   |
| 17    | 5.56990000 | 1.22940000 | 124.79650000 | 0.21723896 | 1.52512199 | 124.92678505 | 0.823567765 | 2.2401043  |   |   |                    |         |   |   |
| 18    | 4.67780000 | 2.45930000 | 124.82530000 | 0.48402583 | 1.52848338 | 124.93712615 | 0.821962927 | 2.2357392  |   |   |                    |         |   |   |
| 19    | 3.78450000 | 3.68890000 | 124.82530000 | 0.77260683 | 1.52848303 | 124.93712796 | 0.821268783 | 2.2338511  |   |   |                    |         |   |   |
| 20    | 2.89040000 | 4.91740000 | 124.79650000 | 1.03940293 | 1.52512197 | 124.92678515 | 0.821539565 | 2.2345876  |   |   |                    |         |   |   |
| 21    | 1.99630000 | 6.14400000 | 124.73890000 | 1.25663804 | 1.51905292 | 124.90607320 | 0.824356034 | 2.2422484  |   |   |                    |         |   |   |
| 22    | 7.80050000 | 0.00000000 | 124.61910000 | 0.00000000 | 1.50828315 | 124.86299646 | 0.838685868 | 2.2812256  |   |   |                    |         |   |   |
| 23    | 6.90620000 | 1.23720000 | 124.69200000 | 0.17726308 | 1.51458781 | 124.88923543 | 0.839715931 | 2.2840273  |   |   |                    |         |   |   |
| 24    | 6.00950000 | 2.47520000 | 124.73570000 | 0.39070664 | 1.51873895 | 124.90490607 | 0.838974154 | 2.2820097  |   |   |                    |         |   |   |
| 25    | 5.11090000 | 3.71330000 | 124.75030000 | 0.62832030 | 1.52019897 | 124.91015670 | 0.83798922  | 2.2793307  |   |   |                    |         |   |   |
| 26    | 4.21110000 | 4.95050000 | 124.73570000 | 0.86593004 | 1.51873889 | 124.90490650 | 0.837828962 | 2.2788948  |   |   |                    |         |   |   |
| 27    | 3.31080000 | 6.18590000 | 124.69200000 | 1.07937348 | 1.51458753 | 124.88923740 | 0.837488756 | 2.2779694  |   |   |                    |         |   |   |
| 28    | 2.41050000 | 7.41880000 | 124.61910000 | 1.25663880 | 1.50828248 | 124.86300168 | 0.839738988 | 2.28409    |   |   |                    |         |   |   |
| 29    | 9.15610000 | 0.00000000 | 124.47490000 | 0.00000000 | 1.49737076 | 124.81119700 | 0.854297125 | 2.3236882  |   |   |                    |         |   |   |
| 30    | 8.25820000 | 1.24490000 | 124.56330000 | 0.14962056 | 1.50385024 | 124.84295475 | 0.855804659 | 2.3277887  |   |   |                    |         |   |   |
| 31    | 7.35720000 | 2.49090000 | 124.62230000 | 0.32645281 | 1.50854908 | 124.86412868 | 0.855833986 | 2.3278684  |   |   |                    |         |   |   |
| 32    |            |            |              |            |            |              |             |            |   |   |                    |         |   |   |

Find Area

Σχήμα ΠΒ.2 Υπολογισμός επικόμβιων φορτίων χιονιού

## Παράρτημα Γ: Λογισμικό διαστασιολόγησης κοίλων κυκλικών διατομών (θερμής έλασης) μέσω EC3

Κατά τη μελέτη προοδευτικής κατάρρευσης της κατασκευής, οι εντάσεις κάθε μέλους υπολογίζονται με πρόσθεση των εντάσεων από το προηγούμενο βήμα με αυτές που προκύπτουν από την ανάλυση του φορέα, για φόρτιση μόνο με το ποσοστό αύξησης του φορτίου. Στο λογισμικό SAP2000, που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση και το σχεδιασμό της κατασκευής, δεν υπάρχει η δυνατότητα διαστασιολόγησης των μελών για τη μέθοδο που ακολουθούμε κατά τη μελέτη της προοδευτικής κατάρρευσης. Αυτό συμβαίνει διότι το λογισμικό κατά τη φάση της διαστασιολόγησης δεν παρέχει την επιλογή εισαγωγής των εντάσεων που προκύπτουν από τα προηγούμενα βήματα. Για το λόγο αυτό, δημιουργήσαμε δικό μας λογισμικό διαστασιολόγησης.

Η διαστασιολόγηση των μελών του γεωδαιτικού θόλου γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή όλων των εντατικών μεγεθών, που προκύπτουν από τις αναλύσεις. **Οι έλεγχοι για την αντοχή των ράβδων, έγιναν σύμφωνα με τις διατάξεις του EC3 και προσαρμόστηκαν για κοίλες κυκλικές (θερμής έλασης) διατομές, κατηγορίας 1 ή 2.** Παρακάτω παρουσιάζεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της αντοχής των μελών.

### Έλεγχος διατομής μέλους σε εφελκυσμό (§ 6.2.3 EC3):

Για κάθε εφελκυσμένο μέλος πρέπει να ικανοποιείται το παρακάτω κριτήριο:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1.0$$

Όπου:

$N_{Ed}$  η τιμή σχεδιασμού της δρώσας εφελκυστικής δύναμης

$N_{t,Rd}$  η εφελκυστική αντίσταση σχεδιασμού της διατομής

$$N_{t,Rd} = \min\{N_{pl,Rd} ; N_{u,Rd}\}$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad , \quad N_{u,Rd} = \frac{0.9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

$N_{pl,Rd}$  η πλαστική αντοχή σχεδιασμού όλης της διατομής

$N_{u,Rd}$  η οριακή αντοχή σχεδιασμού της καθαρής διατομής (στις θέσεις με οπές κοχλιών)

$A$  καθαρό εμβαδόν διατομής

$A_{net}$  απομειωμένο εμβαδόν διατομής (λόγω οπών)

$f_y$  τάση διαρροής χάλυβα

$f_u$  τάση θράυσης χάλυβα

$\gamma_{M0}$  συντελεστής ασφαλείας (= 1.00)

$\gamma_{M2}$  συντελεστής ασφαλείας (= 1.25)

### Έλεγχος διατομής μέλους σε θλίψη (§ 6.2.4 EC3):

Για κάθε θλιβόμενο μέλος πρέπει να ισχύει:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1.0$$

Όπου:

$N_{Ed}$  η τιμή σχεδιασμού της δρώσας θλιπτικής δύναμης

$N_{c,Rd}$  η θλιπτική αντίσταση σχεδιασμού της διατομής

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

### Έλεγχος διατομής μέλους σε καμπτικό (αξονικό) λυγισμό (§ 6.3.1.1 EC3):

Ένα θλιβόμενο μέλος πρέπει να ελέγχεται έναντι λυγισμού ως εξής:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1.0$$

Όπου:

$N_{Ed}$  η τιμή σχεδιασμού της δρώσας θλιπτικής δύναμης

$N_{b,Rd}$  η αντοχή του θλιβόμενου μέλους σε λυγισμό

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

$\chi$  μειωτικός συντελεστής της αντοχής σε θλίψη λόγω λυγισμού

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1.0$$

$$\Phi = 0.5 \cdot [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2]$$



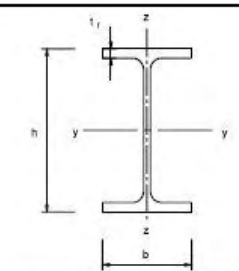
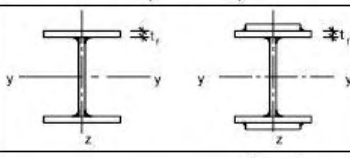
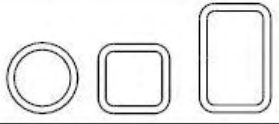
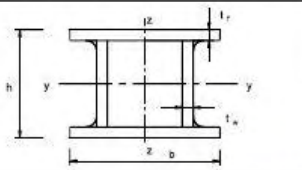
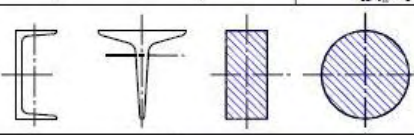
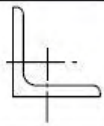
$\bar{\lambda}$  η ανηγμένη λυγηρότητα του μέλους  
 $\alpha$  συντελεστής ατελειών

Ο συντελεστής ατελειών  $\alpha$  υπολογίζεται με βάση τη καμπύλη λυγισμού της διατομής του μέλους (Πίνακας ΠΓ.1).

| Καμπύλη λυγισμού              | $a_0$ | $a$  | $b$  | $c$  | $d$  |
|-------------------------------|-------|------|------|------|------|
| Συντελεστής ατελειών $\alpha$ | 0,13  | 0,21 | 0,34 | 0,49 | 0,76 |

Πίνακας ΠΓ.1 Υπολογισμός συντελεστή  $\alpha$

Η καμπύλη λυγισμού κάθε διατομής αναφέρεται στο Πίνακα ΠΓ.2.

| Διατομή   | Όρια   | Λυγισμός<br>περί των<br>άξονα  | Καμπύλη<br>λυγισμού              |                     |
|---|--|--------------------------------|----------------------------------|---------------------|
|   |  |                                | S 235<br>S 275<br>S 355<br>S 420 | S 460               |
| Ελαττές διατομές<br>                          | $h/b > 1,2$  | $t_f \leq 40 \text{ mm}$       | y-y<br>z-z                       | a<br>a <sub>0</sub> |
|   |  | $40 \text{ mm} < t_f \leq 100$ | y-y<br>z-z                       | b<br>c              |
|   | $h/b \leq 1,2$   | $t_f \leq 100 \text{ mm}$      | y-y<br>z-z                       | b<br>c              |
|   |  | $t_f > 100 \text{ mm}$         | y-y<br>z-z                       | d<br>c              |
| Συγκολλητές<br>I-διατομές<br>                | $t_f \leq 40 \text{ mm}$   | y-y<br>z-z                     | b<br>c                           |                     |
|   | $t_f > 40 \text{ mm}$  | y-y<br>z-z                     | c<br>d                           |                     |
| Κοίλες<br>Διατομές<br>                       | Εν θερμό έλαση   | Κάθε                           | a                                |                     |
|   | Ψυχρή έλαση  | Κάθε                           | c                                |                     |
| Συγκολλητές<br>κίβριτοειδείς<br>διατομές<br> | Γενικά (εκτός των κατωτέρω)  | Κάθε                           | b                                |                     |
|   | Μεγάλα πάχη ραφής:<br>$a > 0,5t_f$<br>$b/t_f < 30$<br>$h/t_w < 30$ | Κάθε                           | c                                |                     |
| U-, I- και<br>συμπαγείς<br>διατομές<br>      |  | Κάθε                           | c                                |                     |
| L-διατομές<br>                               |  | Κάθε                           | b                                |                     |

Πίνακας ΠΓ.2 Καμπύλες λυγισμού για κάθε τύπο διατομής

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1}$$

$N_{cr}$  το κρίσιμο φορτίο λυγισμού

$L_{cr}$  το κρίσιμο μήκος λυγισμού

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$E$  μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα (210 GPa)

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

$i$  η ακτίνα αδρανείας της διατομής ως προς κάποιο άξονα

$I$  η ροπή αδρανείας της διατομής ως προς κάποιο άξονα

### Έλεγχος διατομής μέλους σε τέμνουσα δύναμη (§ 6.2.6 EC3):

Για να επαρκεί ένα μέλος έναντι τέμνουσας πρέπει να ισχύει και στους δύο άξονες (εντός του επιπέδου) της διατομής του μέλους, η εξής ανίσωση:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1.0$$

Όπου:

$V_{Ed}$  η τιμή σχεδιασμού της δρώσας τέμνουσας δύναμης ως προς κάποιο άξονα

$V_{c,Rd}$  η αντοχή σχεδιασμού έναντι τέμνουσας

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}}$$

$V_{pl,Rd}$  η πλαστική διατμητική αντοχή

$A_v$  η επιφάνεια διάτμησης της διατομής

Για ταυτόχρονη ύπαρξη τέμνουσας και στρέψης, η πλαστική διατμητική αντοχή πρέπει να μειωθεί από  $V_{pl,Rd}$  σε  $V_{pl,T,Rd}$ .

$$\rho_T = \frac{V_{pl,T,Rd}}{V_{pl,Rd}} = 1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{(f_y/\sqrt{3})/\gamma_{M0}}$$

$\tau_{t,Ed}$  τάση λόγω στρέψης (κατά St.Venant)

$$\tau_{t,Ed} = \frac{T_{t,Ed}}{W_t}$$

$T_{t,Ed}$  η τιμή σχεδιασμού της δρώσας στρέψης (λόγω θεωρίας St.Venant)

$W_t$  πολική ροπή αντίστασης

### Έλεγχος διατομής μέλους σε κάμψη (§ 6.2.5 EC3):

Ένας μέλος που υπόκειται σε κάμψη πρέπει να ικανοποιεί την ανίσωση:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1.0$$

Όπου:

$M_{Ed}$  η τιμή σχεδιασμού της ροπής κάμψης ως προς κάποιο άξονα

$M_{c,Rd}$  η καμπτική αντίσταση σχεδιασμού της διατομής ως προς κάποιο άξονα

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$W_{pl}$  η πλαστική ροπή αντίστασης της διατομής ως προς κάποιο άξονα

Εάν ισχύει ότι  $V_{Ed} \geq 0.5 \cdot V_{pl,Rd}$ , τότε στον υπολογισμό της ροπής αντοχής έναντι κάμψης πρέπει να ληφθεί και η επιρροή της τέμνουσας. Για το λόγο αυτό, η αντοχή έναντι ροπής κάμψης  $M_{c,Rd}$  γίνεται:

$$M_{y,v,Rd} = (1 - \rho) \cdot M_{y,c,Rd} \quad , \text{όπου :} \quad \rho = \left( \frac{2V_{z,Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2$$

Η αντίστοιχα για τον άλλο άξονα (z):

$$M_{z,v,Rd} = (1 - \rho) \cdot M_{z,c,Rd} \quad , \text{όπου :} \quad \rho = \left( \frac{2V_{y,Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2$$

### Έλεγχος διατομής μέλους σε κάμψη και αξονική (§ 6.2.9 EC3):

Για ταυτόχρονη καταπόνηση του μέλους από κάμψη και αξονική δύναμη πρέπει να ισχύει:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{N,Rd}} \leq 1.0$$

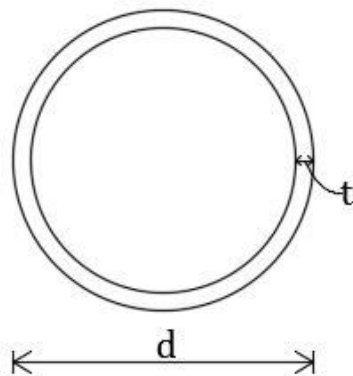
Όπου:

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n)/(1 - 0.5\alpha) \quad , \quad M_{N,Rd} \leq M_{pl,Rd}$$

$\alpha = (A - 2 \cdot d \cdot t)/A$  ( $\alpha \leq 0.5$ ) , οι διαστάσεις  $d, t$  φαίνονται στο Σχήμα ΠΓ.1

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}$$

Ο έλεγχος αυτός, σύμφωνα με τη παράγραφο 6.2.10(2) του EC3, γίνεται μόνο όταν:  
 $V_{Ed} \geq 0.5 \cdot V_{pl,Rd}$ .



Σχήμα ΠΓ.1 Ορισμός διαστάσεων  $d, t$  για τους υπολογισμούς.

### Έλεγχος διατομής μέλους σε διαξονική κάμψη (§ 6.2.9.1(6) EC3):

Για ένα μέλος που υπόκειται σε διαξονική κάμψη πρέπει να ισχύει το εξής κριτήριο:

$$\left[ \frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[ \frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right]^\beta \leq 1.0$$

Όπου:

$M_{y,Ed}$  η τιμή σχεδιασμού για τη δρώσα ροπή κάμψης γύρω από τον άξονα y

$M_{z,Ed}$  η τιμή σχεδιασμού για τη δρώσα ροπή κάμψης γύρω από τον άξονα z

$M_{N,y,Rd}$  μειωμένη ροπή αντοχής λόγω επίδρασης της αξονικής (κατά τον άξονα y)

$M_{N,z,Rd}$  μειωμένη ροπή αντοχής λόγω επίδρασης της αξονικής (κατά τον άξονα z)

$$\alpha = \beta = 2$$

### Έλεγχος διατομής μέλους σε στρέψη (§ 6.2.7 EC3):

Για να επαρκεί ένα μέλος έναντι στρέψης πρέπει:

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} \leq 1.0$$

Όπου:

$T_{Rd}$  η αντοχή του μέλους έναντι στρέψης

$$T_{Rd} = \frac{W_t f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}}$$

$$W_t = 4 \cdot I / d$$

$I = \pi \cdot [d^4 - (d - 2 \cdot t)^4] / 64$  , οι διαστάσεις d,t φαίνονται στο σχήμα ΠΓ.1.

I πολική ροπή αδρανείας

### Έλεγχος διατομής μέλους σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό (§ 6.3.2 EC3):

*Σύμφωνα με τις διατάξεις του EC3 (§ 6.3.2.1 (2)) αλλά και γενικότερα, οι κοίλες κυκλικές διατομές δεν είναι ευαίσθητες σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό, συνεπώς δε χρειάζεται να γίνει έλεγχος για αυτό το είδος καταπόνησης.*

### Έλεγχος διατομής μέλους σε συνδυασμένη κάμψη και θλίψη (§ 6.3.3 EC3):

Ένα μέλος που υπόκειται σε συνδυασμένη κάμψη και θλίψη πρέπει να ικανοποιούνται τα εξής κριτήρια:

$$\frac{N_{Ed}}{x_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1.0$$

$$\frac{N_{Ed}}{x_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1.0$$

Όπου:

$N_{Ed}$  η τιμή σχεδιασμού της δρώσας θλιπτικής δύναμης

$N_{Rk}$  η αντοχή του μέλους έναντι θλίψης

$x_y$  μειωτικός συντελεστής αντοχής σε θλίψης λόγω καμπτικού λυγισμού κατά y

$x_y$  μειωτικός συντελεστής αντοχής σε θλίψης λόγω καμπτικού λυγισμού κατά z

$x_{LT}$  μειωτικός συντελεστής λόγω στρεπτοκαμπτικού λυγισμού

$M_{y,Ed}$  η τιμή σχεδιασμού της δρώσας καμπτικής ροπής κατά y

$M_{z,Ed}$  η τιμή σχεδιασμού της δρώσας καμπτικής ροπής κατά z

$M_{y,Rk}$  η αντοχή του μέλους έναντι κάμψης κατά τον y

$M_{z,Rk}$  η αντοχή του μέλους έναντι κάμψης κατά τον z

$k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$ ,  $k_{zz}$  συντελεστές αλληλεπίδρασης

Όταν το μέλος υπόκειται σε κάμψη και εφελκυσμό οι παραπάνω ανισώσεις γίνονται:

$$k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1.0$$


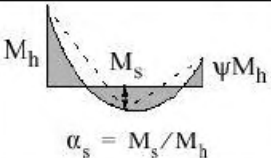
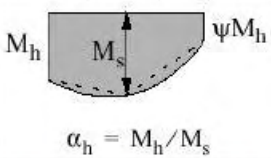
$$k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1.0$$

Οι συντελεστές αλληλεπίδρασης  $k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$ ,  $k_{zz}$  υπολογίζονται με βάση το Παράρτημα Β του EN 1993-1-1 (στη παρούσα εργασία επιλέγεται η Μέθοδος 2). Επειδή οι κοίλες κυκλικές διατομές δεν είναι ευαίσθητες σε στρεπτικές παραμορφώσεις και σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό, επιλέξαμε τους αντίστοιχους πίνακες (ΠΓ.3, ΠΓ.4) και ο συντελεστής  $x_{LT}$ , λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα ( $x_{LT} = 1.0$ ).

| Συντελεστές αλληλεπίδρασης | Τύπος διατομών             | Παραδοχή σχεδιασμού   |  |
|----------------------------|----------------------------|---|--|
|                            |                            | ελαστικές ιδιότητες διατομών κατηγορία 3, κατηγορία 4   | πλαστικές ιδιότητες διατομών κατηγορία 1, κατηγορία 2  |
| $k_{yy}$                   | διατομές I<br>διατομές RHS | $C_{my} \left( 1 + 0,6 \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$<br>$\leq C_{my} \left( 1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ | $C_{my} \left( 1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$<br>$\leq C_{my} \left( 1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$  |
| $k_{yz}$                   | διατομές I<br>διατομές RHS | $k_{zz}$  | $0,6 k_{zz}$   |
| $k_{zy}$                   | διατομές I<br>διατομές RHS | $0,8 k_{yy}$  | $0,6 k_{yy}$   |
| $k_{zz}$                   | διατομές I                 | $C_{mz} \left( 1 + 0,6 \bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$<br>$\leq C_{mz} \left( 1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ | $C_{mz} \left( 1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$<br>$\leq C_{mz} \left( 1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ |
|                            | διατομές RHS               | $C_{mz} \left( 1 + 0,6 \bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$<br>$\leq C_{mz} \left( 1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ | $C_{mz} \left( 1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$<br>$\leq C_{mz} \left( 1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$  |

Για διατομές I και H και ορθογωνικές κοίλες διατομές με αξονική θλίψη και μονοαξονική κάμψη  $M_{y,Ed}$  ο συντελεστής  $k_{zy}$  μπορεί να είναι  $k_{zy} = 0$ .

Πίνακας ΠΓ.3 Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης (μέθοδος 2).

| Διάγραμμα ροπής  | Περιοχή                  | $C_{my}$ και $C_{mz}$ και $C_{mLT}$     |                                      |                                     |
|--|--------------------------|---|--------------------------------------|-------------------------------------|
|  |                          | Ομοιόμορφο φορτίο                       | Συγκεντρωμένο φορτίο                 |                                     |
|   | $-1 \leq \psi \leq 1$    | $0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$                |                                      |                                     |
| <br>$\alpha_s = M_s / M_h$  | $0 \leq \alpha_s \leq 1$ | $-1 \leq \psi \leq 1$                   | $0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$         | $0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$        |
|  | $-1 \leq \alpha_s < 0$   | $0 \leq \psi \leq 1$                    | $0,1 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$         | $-0,8\alpha_s \geq 0,4$             |
|  |                          | $-1 \leq \psi < 0$                      | $0,1(1-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$ | $0,2(-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$ |
| <br>$\alpha_h = M_h / M_s$  | $0 \leq \alpha_h \leq 1$ | $-1 \leq \psi \leq 1$                   | $0,95 + 0,05\alpha_h$                | $0,90 + 0,10\alpha_h$               |
|  |                          | $0 \leq \psi \leq 1$                    | $0,95 + 0,05\alpha_h$                | $0,90 + 0,10\alpha_h$               |
|  | $-1 \leq \alpha_h < 0$   | $-1 \leq \psi < 0$                      | $0,95 + 0,05\alpha_h(1+2\psi)$       | $0,90 - 0,10\alpha_h(1+2\psi)$      |
| Για μέλη με λυγισμό από μετάθεση ο συντελεστής ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής πρέπει να λαμβάνεται $C_{my} = 0,9$ ή $C_{mz} = 0,9$ αντίστοιχα.           |                          |   |                                      |                                     |
| Τα $C_{my}$ , $C_{mz}$ και $C_{mLT}$ πρέπει να λαμβάνονται σύμφωνα με το διάγραμμα ροπών μεταξύ των αντίστοιχων πλευρικά στηριζόμενων σημείων ως εξής: |                          |   |                                      |                                     |
| συντελεστής ροπής  | άξονας κάμψης            | σημεία εξασφαλιζόμενα κατά τη διεύθυνση |                                      |                                     |
| $C_{my}$   | y-y                      | z-z                                     |                                      |                                     |
| $C_{mz}$   | z-z                      | y-y                                     |                                      |                                     |
| $C_{mLT}$  | y-y                      | y-y                                     |                                      |                                     |

Πίνακας ΠΓ.4 Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης (μέθοδος 2) - συνέχεια.

Με βάση τη μεθοδολογία υπολογισμού των αντοχών των μελών που περιεγράφηκε προηγουμένως, δημιουργήσαμε πάλι σε φύλλο Ms Excel λογισμικό για τον υπολογισμό αυτών των ελέγχων. Αρχικά αξίζει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο λογισμικό διεκπεραιώνει τους υπολογισμούς σε 5 λεπτά (για συμβατικούς υπολογιστές), ενώ στο SAP2000 για την ίδια ισχύ υπολογιστή αυτό επιτυγχάνεται σε μιάμιση ώρα αντίστοιχα. Η διαφορά σε αυτούς τους χρόνους έγκειται στο γεγονός ότι το πρόγραμμα που δημιουργήσαμε λαμβάνει στον έλεγχο της αντοχής των μελών σε καμπτικές ροπές, τις τιμές από τις δράσεις ροπές για τις ακραίες θέσεις του μέλους ενώ το SAP2000 λαμβάνει και ενδιάμεσες. Η συγκεκριμένη παραδοχή έγινε για τους λόγους ότι, οι μεγαλύτερες τιμές ροπών παρατηρήθηκαν στα άκρα των μελών και ότι εξοικονομούμαι χρόνο για τις αναλύσεις του θόλου.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν για τη κατασκευή του λογισμικού διαστασιολόγησης. Μέσω αυτών γίνεται υπολογισμός όλων των απαιτούμενων ελέγχων και έπειτα για να κριθεί εάν το μέλος έχει διαρρεύσει ή όχι εξαρτάται εάν ο μέγιστος λόγος των ελέγχων είναι πάνω ή κάτω από τη μονάδα αντίστοιχα. Στο τέλος του λογισμικού παρουσιάζονται τα μέλη που έχουν διαρρεύσει με περιγραφή του είδους της διαρροής τους.



### Κώδικες σε module (functions):

Function Ntrd(a As Double, fy As Double)

' antoxi se efelkysmo'

Ntrd = a \* fy \* 1000 ' a se m<sup>2</sup> , fy se MPa'

End Function

Function non\_slenderness(ulr As Double, I As Double, area As Double, length As Double, fy As Double)

' adiaastath lughrohta - non dimensional slenderness

p = 4 \* Atn(1) ' p =3.14'

l1 = p \* Sqr(210000 / fy)

i1 = Sqr(I / area) ' aktina adraneias - radius of gyration'

lcr = ulr \* length

slenderness = lcr / i1

non\_slenderness = slenderness / l1

End Function

Function x(l2 As Double, a As Double)

' antoxi se kamptiko lugismo'

f = 0.5 \* (1 + a \* (l2 - 0.2) + l2 ^ 2)

x = min(1, 1 / (f + Sqr(f ^ 2 - l2 ^ 2)))

End Function

Function mcrd(wpl As Double, fy As Double)

' antoxi gia mono kampsi xwris epiroth temnousas '

mcrd = wpl \* fy \* 1000 ' mono gia klaseis 1 kai 2 '

End Function

Function Mvrd(mcrd As Double, ved As Double, vplrd As Double)

' roph antoxhs logw epiroths temnousas '

r = (2 \* ved / vplrd - 1) ^ 2

Mvrd = (1 - r) \* mcrd ' tupos mono gia koiles kuklikes '

End Function

Function vplrd(av As Double, fy As Double)

' antoxi se plastikh temnousa xwrish epiroth strepshs '

' av : epifaneia diatmhshs - tupos gia koiles kuklikes(swlhnes) '

vplrd = av \* (fy \* 1000 / Sqr(3))

End Function

Function Vpltrd(ted As Double, fy As Double, vplrd As Double)

' antoxi se plastikh temnousa me epiroth strepshs '

rt = 1 - ted / (fy \* 1000 / Sqr(3)) ' ted streptikh tash logw St Venant '

'tupos mono gia koiles kuklikes '

Vpltrd = rt \* vplrd

End Function

Function Trd(wt As Double, fy As Double)

' antoxi se strepsh '

Trd = wt \* fy \* 1000 / Sqr(3) ' tupos mono gia koiles kuklikes '

End Function

Function kyy\_zz(cm As Double, ned As Double, nbrd As Double, l2 As Double)

' upologismos kyy=kzz ec3 sel77 gia solines (koiles kuklikes) '

k1 = cm \* (1 + (l2 - 0.2) \* ned / nbrd)

k2 = cm \* (1 + 0.8 \* ned / nbrd)

If k1 < k2 Then

    kyy\_zz = k1

Else

    kyy\_zz = k2

End If

End Function

Function min(a As Double, b As Double)

If a < b Then

    min = a

Else

    min = b

End If

End Function

Function max(a As Double, b As Double)

    If a > b Then

        max = a

    Else

        max = b

    End If

End Function

**Κύριος κώδικας υπολογισμού λόγων ελέγχων (EC3 ratios)-**

**(κώδικας που «τρέχει» κάνοντας κλικ το κουμπί «Διαστασιολόγηση» - Σχήμα ΠΓ.3):**

Private Sub CommandButton2\_Click()

Dim k As Long, z As Long, ulr As Double, moment\_of\_inertia As Double, area As Double

Dim member\_length As Double, fy As Double, non\_slenderness2 As Double, sunt\_ateleiwn As Double

Dim ted As Double, vplrd\_1 As Double, mplrd\_1 As Double, maxV2 As Double, vpltrd\_1 As Double

Dim maxV3 As Double, ntrd\_1 As Double, nbrd\_1 As Double, marx2 As Double, mte12 As Double

Dim nn1 As Double, ratio15 As Double, ratio16 As Double

Dim ratio(1 To 17) As Double, maxratios As Double, max\_ratio\_final As Double, maxN As Double, ratio\_final As Double

For j = 1 To 17

    ratio(j) = 0

Next j

    count\_melh = WorksheetFunction.CountA(Sheets("design\_results").Columns(1)) - 1

    count\_sections = WorksheetFunction.CountA(Sheets("data").Columns(1)) - 5

    fy = Sheets("data").Cells(4, 3).Value

For I = 1 To count\_melh

    maxratios = 0

```

member_section = Sheets("design_results").Cells(I + 2, 2).Value
i2 = 1 ' gia to keli pou vriskte h diatomh '
sections = Sheets("data").Cells(i2 + 7, 1).Value
Do While member_section <> sections
    i2 = i2 + 1
    sections = Sheets("data").Cells(i2 + 7, 1).Value
Loop
maxN = Abs(Sheets("data2").Cells(I + 3, 3).Value)
maxV2 = Abs(Sheets("data2").Cells(I + 3, 4).Value)
maxV3 = Abs(Sheets("data2").Cells(I + 3, 5).Value)
maxT = Abs(Sheets("data2").Cells(I + 3, 6).Value)
maxM2 = Abs(Sheets("data2").Cells(I + 3, 7).Value)
maxM3 = Abs(Sheets("data2").Cells(I + 3, 8).Value)
ntrd_1 = Sheets("data").Cells(i2 + 7, 10).Value
vplrd_1 = Sheets("data").Cells(i2 + 7, 11).Value
trd_1 = Sheets("data").Cells(i2 + 7, 12).Value
mplrd_1 = Sheets("data").Cells(i2 + 7, 13).Value
ratio(1) = maxN / ntrd_1 ' eq6.2.3(6.5) kai eq6.2.4(6.9)
ratio(2) = maxV2 / vplrd_1 ' eq.6.2.6(6.17)
ratio(3) = maxV3 / vplrd_1 ' eq.6.2.6(6.17)
ratio(4) = maxT / trd_1 ' eq6.2.7(6.23)
ratio(5) = maxM2 / mplrd_1 ' eq6.2.5(6.12)
ratio(6) = maxM3 / mplrd_1 ' eq6.2.5(6.12)
Sheets("design_results").Cells(I + 2, 7).Value = maxN
member_length = Sheets("data2").Cells(I + 3, 2).Value
ulr = Sheets("design_results").Cells(I + 2, 3).Value
sunt_ateleiwn = Sheets("data").Cells(i2 + 7, 5).Value
moment_of_inertia = Sheets("data").Cells(i2 + 7, 4).Value
area = Sheets("data").Cells(i2 + 7, 2).Value
non_slenderness2 = non_slenderness(ulr, moment_of_inertia, area, member_length, fy)
x2 = min(x(non_slenderness2, sunt_ateleiwn), 1)

```

nbrd\_1 = x2 \* area \* fy \* 1000

proshmoN = Sheets("data2").Cells(I + 3, 3).Value

If proshmoN < 0 Then

'ean h N einai thliptikh upologizetai h antoxh se lugismo kai thlipsh alliws oxi kai  
'antistoixa otan h N einai efelkustikh upologizetai mono h antoxh se efelkusmo '

ratio(7) = maxN / nbrd\_1 'eq6.3.1.1(6.46)

Sheets("design\_results").Cells(I + 2, 8).Value = 0

Sheets("design\_results").Cells(I + 2, 9).Value = ratio(1)

Else

ratio(7) = 0

Sheets("design\_results").Cells(I + 2, 8).Value = ratio(1)

Sheets("design\_results").Cells(I + 2, 9).Value = 0

End If

Sheets("design\_results").Cells(I + 2, 10).Value = ratio(7)

Sheets("design\_results").Cells(I + 2, 11).Value = maxV2

Sheets("design\_results").Cells(I + 2, 12).Value = maxV3

Sheets("design\_results").Cells(I + 2, 13).Value = ratio(2)

Sheets("design\_results").Cells(I + 2, 14).Value = ratio(3)

Sheets("design\_results").Cells(I + 2, 15).Value = maxT

Sheets("design\_results").Cells(I + 2, 16).Value = ratio(4)

wt = Sheets("data").Cells(i2 + 7, 8).Value

ted = maxT / wt

vpltrd\_1 = Vpltrd(ted, fy, vplrd\_1)

ratio(8) = maxV2 / vpltrd\_1 'eq6.2.7(6.25)

ratio(9) = maxV3 / vpltrd\_1 'eq6.2.7(6.25)

Sheets("design\_results").Cells(I + 2, 17).Value = ratio(8)

Sheets("design\_results").Cells(I + 2, 18).Value = ratio(9)

Sheets("design\_results").Cells(I + 2, 19).Value = maxM2

```

Sheets("design_results").Cells(I + 2, 20).Value = maxM3
Sheets("design_results").Cells(I + 2, 21).Value = ratio(5)
Sheets("design_results").Cells(I + 2, 22).Value = ratio(6)
If maxV2 >= 0.5 * vpltrd_1 Then
    mvrld_1 = Mvrld(mplrd_1, maxV2, vpltrd_1)
    ratio(10) = maxM3 / mvrld_1
    mrd3 = mvrld_1
Else
    ratio(10) = 0
    mrd3 = mplrd_1
End If
If maxV3 >= 0.5 * vpltrd_1 Then
    mvrld_2 = Mvrld(mplrd_1, maxV3, vpltrd_1)
    ratio(11) = maxM2 / mvrld_2
    mrd2 = mvrld_2
Else
    ratio(11) = 0
    mrd2 = mplrd_1
End If
Sheets("design_results").Cells(I + 2, 23).Value = ratio(10)
Sheets("design_results").Cells(I + 2, 24).Value = ratio(11)
Sheets("design_results").Cells(I + 2, 25).Value = 0 'gia ratio12
Sheets("design_results").Cells(I + 2, 26).Value = 0 ' gia ratio13 ,pros to paron de vriskei
eq6.2.9.1(6.31)
ratio(14) = (maxM2 / mrd2) ^ 2 + (maxM3 / mrd3) ^ 2
Sheets("design_results").Cells(I + 2, 27).Value = ratio(14)
nrd = min(ntrd_1, nbrd_1)
ratio(15) = maxN / nrd + maxM2 / mrd2 + maxM3 / mrd3
Sheets("design_results").Cells(I + 2, 28).Value = ratio(15)
kyy = kyy_zz(1, maxN, nbrd_1, non_slenderness2) ' y axis --> axis 3 sto sap
kzz = kyy_zz(1, maxN, nbrd_1, non_slenderness2) ' z axis --> axis 2 sto sap

```

kyz = 0.6 \* kzz

kzy = 0.6 \* kyy

If proshmoN < 0 Then

    nn1 = maxN

Else

    nn1 = 0

End If

ratio(16) = nn1 / nbrd\_1 + kyy \* maxM3 / mrd3 + kyz \* maxM2 / mrd2

ratio(17) = nn1 / nbrd\_1 + kzy \* maxM3 / mrd3 + kzz \* maxM2 / mrd2

ratio\_final = max(ratio(16), ratio(17))

Sheets("design\_results").Cells(I + 2, 30).Value = ratio\_final

Sheets("design\_results").Cells(I + 2, 31).Value = kyy

Sheets("design\_results").Cells(I + 2, 32).Value = kyz

Sheets("design\_results").Cells(I + 2, 33).Value = kzy

Sheets("design\_results").Cells(I + 2, 34).Value = kzz

For j = 1 To 14 ' 15 me epiroh ths Eq.6.2.1(6.2) h 14 xwrts thn epiroh ths epeidh  
theoretai suntiritikh'

    If ratio(j) > maxratios Then

        maxratios = ratio(j)

    End If

Next j

maxratios2 = max(maxratios, ratio\_final)

Sheets("design\_results").Cells(I + 2, 6).Value = maxratios2

j = 8

Key = "no exit"

Do While j <= 30 And Key <> "Exit"

    keli = Sheets("design\_results").Cells(I + 2, j).Value

    If keli = maxratios2 Then

        equation = Sheets("design\_results").Cells(1, j).Value

        Key = "exit"

    End If

```

        j = j + 1
    Loop
    Sheets("design_results").Cells(I + 2, 5).Value = equation
    If maxratios2 > 1 Then
        Sheets("design_results").Cells(I + 2, 4).Value = "nai"
    Else
        Sheets("design_results").Cells(I + 2, 4).Value = "oxi"
    End If
Next I

End Sub

```

**Κώδικας εμφάνισης μελών που διαρρέουν (κώδικας που «τρέχει» κάνοντας κλικ το κουμπί «Εμφάνιση μελών που διαρρέουν» - Σχήμα ΠΓ.6):**

```

Private Sub CommandButton1_Click()
Application.ThisWorkbook.Sheets("members overstressed").Range("A2:B1000000").ClearContents
    count_col = WorksheetFunction.CountA(Sheets("design_results").Columns(1)) - 1
    k = 2
    For I = 1 To count_col
        astoxia = Sheets("design_results").Cells(I + 2, 4).Value
        If astoxia = "nai" Then
            melos = Sheets("design_results").Cells(I + 2, 1).Value
            Sheets("members overstressed").Cells(k, 1).Value = melos
            equation = Sheets("design_results").Cells(I + 2, 5).Value
            Sheets("members overstressed").Cells(k, 2).Value = equation
            k = k + 1
        End If
    Next I
End Sub

```



Παρακάτω φαίνονται εικόνες του φύλλου Ms Excel. Ειδικότερα στο Σχήμα ΠΓ.2 απεικονίζεται μέρος του λογισμικού που εισάγονται τα χαρακτηριστικά των διατομών των μελών. Επίσης στο Σχήμα ΠΓ.3 φαίνεται το πλαίσιο που εισάγονται τα δεδομένα για τα δρώντα εντατικά μεγέθη. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τους λόγους των αντοχών παρουσιάζονται στα Σχήματα ΠΓ.4-5. Τέλος στο Σχήμα ΠΓ.6 φαίνεται το μέρος που το λογισμικό εμφανίζει τις ονομασίες των μελών που διαρρέουν και για το λόγο που διαρρέουν.

| A  | B  | C               | D              | E                    | F                             | G               | H                               | I               | J                   | K                          | L                         | M                       |                           |
|----|--|-----------------|----------------|----------------------|-------------------------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|---------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 1  | <b>Διαστασιολόγηση κολών κυκλικών διατομών (θερμής έλασης) μέσω Ευρωκώδικα 3</b> |                 |                |                      |                               |                 |                                 |                 |                     |                            |                           |                         |                           |
| 2  |  |                 |                |                      |                               |                 |                                 |                 |                     |                            |                           |                         |                           |
| 3  | <b>Εισαγωγή δεδομένων (για διατομές ,ποιότητα χάλυβα, συντελεστές ) :</b>        |                 |                |                      |                               |                 |                                 |                 |                     |                            |                           |                         |                           |
| 4  | Ποιότητα χάλυβα: S 235   |                 |                |                      |                               |                 |                                 |                 |                     |                            |                           |                         |                           |
| 5  | <b>Διατομή</b>   | <b>A</b>        | <b>Κλάση</b>   | <b>Imajor/Iminor</b> | <b>συντελεστής ατελειών α</b> | <b>Av</b>       | <b>Wpl</b>                      | <b>Wt</b>       | <b>Ncrd</b>         | <b>Ntrd</b>                | <b>Vpl,rd major/minor</b> | <b>Trd</b>              | <b>Mpl,rd major/minor</b> |
| 6  | Ονομασία   | εμβαδό διατομής | Μόνο κλάση 1,2 | ροπή αδράνειας       | Επιφάνεια διάτμησης           | ροπή αντίστασης | σταθερά για τον υπολ. σε στρέψη | αντοχή σε θλίψη | αντοχή σε εφελκυσμό | πλαστική αντοχή σε τέμνωση | αντοχή στρέψη             | πλαστική αντοχή σε ροπή |                           |
| 7  |  | m <sup>2</sup>  | m <sup>4</sup> | m <sup>4</sup>       | m <sup>2</sup>                | m <sup>3</sup>  | m <sup>3</sup>                  | kN              | kN                  | kN                         | kNm                       | kNm                     |                           |
| 8  | TUBO-D125X2.0  | 0.0007728       | 2              | 0.000001462          | 0.0003865                     | 0.00003026      | 4.67811E-05                     | 181.61          | 181.61              | 52.44                      | 6.35                      | 7.11                    |                           |
| 9  | TUBO-D142X2.5  | 0.001096        | 2              | 0.000002666          | 0.0005479                     | 0.00004866      | 7.50989E-05                     | 257.56          | 257.56              | 74.34                      | 10.19                     | 11.44                   |                           |
| 10 |  |                 |                |                      |                               |                 |                                 |                 |                     |                            |                           |                         |                           |
| 11 |  |                 |                |                      |                               |                 |                                 |                 |                     |                            |                           |                         |                           |
| 12 |  |                 |                |                      |                               |                 |                                 |                 |                     |                            |                           |                         |                           |
| 13 |  |                 |                |                      |                               |                 |                                 |                 |                     |                            |                           |                         |                           |
| 14 |  |                 |                |                      |                               |                 |                                 |                 |                     |                            |                           |                         |                           |
| 15 |  |                 |                |                      |                               |                 |                                 |                 |                     |                            |                           |                         |                           |
| 16 |  |                 |                |                      |                               |                 |                                 |                 |                     |                            |                           |                         |                           |
| 17 |  |                 |                |                      |                               |                 |                                 |                 |                     |                            |                           |                         |                           |
| 18 |  |                 |                |                      |                               |                 |                                 |                 |                     |                            |                           |                         |                           |
| 19 |  |                 |                |                      |                               |                 |                                 |                 |                     |                            |                           |                         |                           |
| 20 |  |                 |                |                      |                               |                 |                                 |                 |                     |                            |                           |                         |                           |

Σχήμα ΠΓ.2 Εισαγωγή δεδομένων διατομών στο λογισμικό

|    | A              | B            | C              | D                         | E                         | F           | G                     | H                     | I | J |
|----|----------------|--------------|----------------|---------------------------|---------------------------|-------------|-----------------------|-----------------------|---|---|
| 1  | Αριθμός μέλους | Length       | P              | V2                        | V3                        | T           | M2                    | M3                    |   |   |
| 2  |                | μήκος μέλους | αξονική δύναμη | τέμνουσα κατά τον άξονα 2 | τέμνουσα κατά τον άξονα 3 | στρέψη      | ροπή κατά τον άξονα 2 | ροπή κατά τον άξονα 3 |   |   |
| 3  |                | m            | kN             | kN                        | kN                        | kNm         | kNm                   | kNm                   |   |   |
| 4  | 1              | 1.25864      | -55.895824     | 0.251795                  | -0.03158291               | 0.01366555  | -0.02006717           | 0.7648                |   |   |
| 5  | 2              | 1.25863      | -63.28         | 0.2280043                 | 0.0700565                 | -0.0405144  | 0.0458411             | 0.67                  |   |   |
| 6  | 3              | 1.47959      | -63.737        | -0.06304362               | -0.0391441                | 0.0290634   | -0.0280279            | 0.4814                |   |   |
| 7  | 4              | 1.27596      | -69.307        | 0.3409561                 | -0.03177723               | 0.0072193   | -0.02061011           | 0.644                 |   |   |
| 8  | 5              | 1.27005      | -91.03         | 0.169393936               | -0.2088912                | -0.0057795  | -0.1313896            | 0.5945                |   |   |
| 9  | 6              | 1.27013      | -82.534        | 0.188784                  | 0.2528005                 | -0.00483493 | 0.1598022             | 0.6711                |   |   |
| 10 | 7              | 1.27599      | -76.916        | 0.297785                  | 0.0881881                 | -0.0404944  | 0.0584211             | 0.57                  |   |   |
| 11 | 8              | 1.48958      | -67.945        | -0.1340894                | -0.227171                 | -0.0316491  | -0.169                | 0.3549                |   |   |
| 12 | 9              | 1.29343      | -79.418        | 0.2146375                 | -0.02733511               | 0.00218456  | -0.01752689           | 0.32013               |   |   |
| 13 | 10             | 1.28156      | -101.885       | 0.1461702                 | -0.2777841                | 0.05729243  | -0.1998837            | 0.4769                |   |   |
| 14 | 11             | 1.48971      | -68.317        | 0.005389668               | 0.14973296                | 0.0686333   | 0.11186576            | 0.4465                |   |   |
| 15 | 12             | 1.28756      | -83.174        | 0.197938                  | 0.222194                  | -0.0477936  | 0.1233337             | 0.4432528             |   |   |
| 16 | 13             | 1.28755      | -91.011        | 0.1754497                 | -0.1745334                | 0.03359069  | -0.09262292           | 0.3977                |   |   |
| 17 | 14             | 1.28152      | -93.411        | 0.166985                  | 0.3108449                 | -0.0516103  | 0.2205432             | 0.5353                |   |   |
| 18 | 15             | 1.29339      | -86.414        | 0.192889                  | 0.0887846                 | -0.0316682  | 0.0587308             | 0.2963                |   |   |
| 19 | 16             | 1.49959      | -68.066        | -0.143781                 | -0.212523                 | -0.07855655 | -0.179                | 0.2332                |   |   |
| 20 | 17             | 1.31075      | -86.49         | 0.08649545                | -0.022892836              | -0.0007661  | -0.014760738          | 0.0658555             |   |   |
| 21 | 18             | 1.29297      | -105.348       | 0.1042191                 | -0.34493881               | 0.0928231   | -0.2530458            | 0.3448                |   |   |
| 22 | 19             | 1.49977      | -71.563        | -0.0641796                | -0.0369511                | 0.0099241   | 0.0090182             | 0.3347                |   |   |
| 23 | 20             | 1.30515      | -86.603        | 0.129193                  | 0.3022229                 | -0.0613383  | 0.1942672             | 0.1892079             |   |   |

Διαστασιολόγηση

Σχήμα ΠΓ.3 Εισαγωγή δεδομένων για τα δρώντα εντατικά μεγέθη των μελών του θόλου

| A              | B       | C                                   | D                  | E   | F         | G       | H                      | I                           | J  | K           | L           | M   | N   | O        | P                            | Q  |
|----------------|---------|-------------------------------------|--------------------|---|-----------|---------|------------------------|-----------------------------|--|-------------|-------------|---|---|----------|------------------------------|--|
| Αριθμός μέλους | Διατομή | ULR 2/3                             | Διαρροή: (ναι/όχι) | Εξίσωση από EC3 με το μεγαλύτερο λόγο (ratio) | Max Ratio | Ned     | Eq.6.2.3(6.5)- εφέλιμο | Eq.6.2.(6.9)- λόγω θάλασσας | Eq.6.3.1(6.46)- λόγω κερματικού λυγισμού | Vecf(αxiz3) | Vecf(αxiz3) | Eq.6.2.6(6.17)-αxiz2- λόγω τεμνουσας στον άξονα 2 | Eq.6.2.6(6.17)- αxiz3-λόγω τεμνουσας στον άξονα 3 | Ted      | Eq.6.2.7(6.23)- λόγω στρέψης | Eq.6.2.7(6.25)-αxiz1- λόγω τεμνουσας 1 επιρροή στρέψης α άξονα 2 |
| 1              |         | Unbraced length ratio for axis 2or3 |                    |   |           | kn      |                        |                             |  | kn          | kn          |   |   | knm      |                              |  |
| 3              | 43704   | TUBO-D125X2.0                       | 1                  | Eq.6.3.3(6.61+6.62)                           | 1.5152    | 168.192 | 0                      | 0.926127                    | 0.986785199                              | 0.408384    | 0.313719    | 0.00778775  | 0.005982519                                       | 0.164799 | 0.02596434                   | 0.0078901  |
| 4              | 4827    | TUBO-D125X2.0                       | 1                  | Eq.6.3.3(6.61+6.62)                           | 1.42278   | 174.71  | 0                      | 0.962017                    | 1.024799289                              | 2.3655717   | 0.113789    | 0.045110681                                       | 0.00169919  | 0.344624 | 0.05429601                   | 0.0463877  |
| 5              | 4807    | TUBO-D125X2.0                       | 1                  | Eq.6.3.3(6.61+6.62)                           | 1.3467    | 154.104 | 0                      | 0.848553                    | 0.903678041                              | 1.124273    | 0.411045    | 0.02143952  | 0.007838494                                       | 0.057122 | 0.00899965                   | 0.021531   |
| 6              | 4824    | TUBO-D125X2.0                       | 1                  | Eq.6.3.3(6.61+6.62)                           | 1.33022   | 141.042 | 0                      | 0.776629                    | 0.827502482                              | 0.7112086   | 0.967376    | 0.013562516                                       | 0.018447545                                       | 0.621711 | 0.09795158                   | 0.0142791  |
| 7              | 43702   | TUBO-D125X2.0                       | 1                  | Eq.6.3.3(6.61+6.62)                           | 1.2648    | 180.296 | 0                      | 0.992776                    | 1.058205541                              | 0.652702    | 0.040109    | 0.012446814                                       | 0.000764866                                       | 0.82141  | 0.12941447                   | 0.0133391  |
| 8              | 14228   | TUBO-D125X2.0                       | 1                  | Eq.6.3.3(6.61+6.62)                           | 1.24161   | 114.489 | 0                      | 0.630418                    | 0.67037859                               | 1.969       | 2.634786    | 0.037548188                                       | 0.05024451  | 0.578717 | 0.09117781                   | 0.0393861  |
| 9              | 43701   | TUBO-D125X2.0                       | 1                  | Eq.6.3.3(6.61+6.62)                           | 1.23729   | 138.438 | 0                      | 0.76229                     | 0.81236134                               | 0.1781683   | 0.629735    | 0.0039397611                                      | 0.012008841                                       | 0.474365 | 0.07473697                   | 0.003532   |
| 10             | 45143   | TUBO-D142X2.5                       | 1                  | Eq.6.3.3(6.61+6.62)                           | 1.22113   | 181.048 | 0                      | 0.702935                    | 0.735554295                              | 0.353868    | 1.251341    | 0.004760283                                       | 0.016833218                                       | 0.8702   | 0.085404                     | 0.0049771  |
| 11             | 4819    | TUBO-D125X2.0                       | 1                  | Eq.6.3.3(6.61+6.62)                           | 1.21166   | 139.888 | 0                      | 0.770274                    | 0.820725171                              | 0.319895    | 0.467389    | 0.006100293                                       | 0.00891296  | 0.285176 | 0.04492996                   | 0.006242   |
| 12             | 6080    | TUBO-D142X2.5                       | 1                  | Eq.6.3.3(6.61+6.62)                           | 1.20941   | 198.709 | 0                      | 0.771506                    | 0.807893231                              | 0.292488    | 1.137       | 0.003939459                                       | 0.015295086                                       | 0.98417  | 0.09658934                   | 0.0041391  |
| 13             | 33797   | TUBO-D125X2.0                       | 1                  | Eq.6.3.3(6.61+6.62)                           | 1.20277   | 130.024 | 0                      | 0.71596                     | 0.762443874                              | 1.411219    | 2.031727    | 0.026911486                                       | 0.038744371                                       | 0.343121 | 0.05405919                   | 0.027661   |
| 14             | 56249   | TUBO-D142X2.5                       | 1                  | Eq.6.3.3(6.61+6.62)                           | 1.20105   | 221.763 | 0                      | 0.861015                    | 0.897819544                              | 1.112692    | 0.401624    | 0.014968092                                       | 0.005402703                                       | 0.8148   | 0.07996688                   | 0.0156051  |
| 15             | 87393   | TUBO-D142X2.5                       | 1                  | Eq.6.3.3(6.61+6.62)                           | 1.19518   | 239.329 | 0                      | 0.929216                    | 0.966577512                              | 0.385551    | 0.020769    | 0.005186487                                       | 0.000279392                                       | 0.6351   | 0.06233059                   | 0.0053561  |
| 16             | 94673   | TUBO-D142X2.5                       | 1                  | Eq.6.3.3(6.61+6.62)                           | 1.19311   | 237.031 | 0                      | 0.920294                    | 0.956948214                              | 0.427125    | 0.036989    | 0.005745746                                       | 0.000497581                                       | 0.6603   | 0.06480379                   | 0.005941   |
| 17             | 94789   | TUBO-D142X2.5                       | 1                  | Eq.6.3.3(6.61+6.62)                           | 1.19075   | 231.886 | 0                      | 0.900318                    | 0.936267475                              | 0.286       | 1.369301    | 0.003847313                                       | 0.018420032                                       | 0.254417 | 0.02496924                   | 0.0038961  |
| 18             | 87512   | TUBO-D142X2.5                       | 1                  | Eq.6.3.3(6.61+6.62)                           | 1.1856    | 231.326 | 0                      | 0.898144                    | 0.934362993                              | 0.229       | 1.32894     | 0.003080541                                       | 0.017877088                                       | 0.2365   | 0.02321081                   | 0.0031161  |
| 19             | 43537   | TUBO-D125X2.0                       | 1                  | Eq.6.3.3(6.61+6.62)                           | 1.18486   | 161.716 | 0                      | 0.890467                    | 0.948832066                              | 0.65451     | 0.097196    | 0.012481292                                       | 0.001853496                                       | 0.414152 | 0.0652503                    | 0.0129091  |
| 20             | 97139   | TUBO-D142X2.5                       | 1                  | Eq.6.3.3(6.61+6.62)                           | 1.17861   | 239.926 | 0                      | 0.931534                    | 0.969314689                              | 0.267253    | 0.017106    | 0.003595125                                       | 0.000230112                                       | 0.5888   | 0.05778657                   | 0.003703   |
| 21             | 43534   | TUBO-D125X2.0                       | 1                  | Eq.6.3.3(6.61+6.62)                           | 1.17599   | 148.541 | 0                      | 0.817921                    | 0.87172097                               | 0.675504    | 0.465954    | 0.012881641                                       | 0.008885591                                       | 0.148879 | 0.02345611                   | 0.0130351  |
| 22             | 14079   | TUBO-D125X2.0                       | 1                  | Fn.6.3.3(6.61+6.62)                           | 1.17426   | 107.922 | 0                      | 0.594258                    | 0.630188711                              | 1.750746    | 2.646749    | 0.033386155                                       | 0.05047264  | 0.625612 | 0.09856619                   | 0.0351641  |

Σχήμα Π.4 Λόγοι ελέγχων των αντοχών των μελών μέσω EC3

| A  | S          | T          | U  | V  | W  | X   | Y  | Z   | AA  | AB  | AC  | AD      | AE      | AF      | AG      | AH     |
|----|------------|------------|--|--|--|---|--|---|---|---|---|---------|---------|---------|---------|--------|
|    | Medf(β1z2) | Medf(β1z3) | Eq.6.2.5(6.12)-<br>ακιε2-λόγος ροπής<br>στον άξονα 2 | Eq.6.2.5(6.12)-<br>ακιε3-λόγος ροπής στον<br>άξονα 3 | Eq.6.2.8(β)(4)λόγος<br>ροπής κατά τον 3<br>και τέμνουσας κατά<br>τον 2 | Eq.6.2.8(β)(4)λόγος<br>ροπής κατά τον 2 και<br>τέμνουσας κατά τον 3 | Eq.6.2.9.1(6.31)-λόγος<br>αξονικής και ροπής κατά<br>τον 2 | Eq.6.2.9.1(6.31)-<br>λόγος αξονικής και<br>ροπής κατά τον 3 | Eq.6.2.9.1(6.41)-<br>λόγος διαστροφικής<br>κλίσης | Eq.6.2.1(6.2)-<br>λόγος<br>αλληλεπίδρασης<br>αξονικής ροπής | Eq.6.3.3(6.61-6.62)-<br>λόγος αλληλεπίδρασης<br>αξονικής, ροπής και<br>καμπιακού λυγισμού | kyy     | kyz     | kyz     | kyz     |        |
| 1  |            |            |  |  |  |   |  |   |   |   |   |         |         |         |         |        |
| 2  |            |            |  |  |  |   |  |   |   |   |   |         |         |         |         |        |
| 3  | 1.4939     | 2.1128     | 0.210080016  | 0.29711296   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0.132409727                                       | 1.499978179   | 1.515202384   | 1.24874 | 0.74924 | 0.74924 | 0.74924 | 1.2487 |
| 4  | 1.6431     | 1.01218    | 0.231061299  | 0.14233867   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0.07364962  | 1.398199255   | 1.422776351   | 1.25757 | 0.75454 | 0.75454 | 0.75454 | 1.2576 |
| 5  | 1.7307     | 1.3972     | 0.243380068  | 0.19648156   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0.09783886  | 1.349539666   | 1.346701549   | 1.2263  | 0.73578 | 0.73578 | 0.73578 | 1.2263 |
| 6  | 2.0754     | 1.4707     | 0.291853581  | 0.20681751   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0.127951995                                       | 1.326173573   | 1.33021668  | 1.20861 | 0.72517 | 0.72517 | 0.72517 | 1.2086 |
| 7  | 0.76854    | 0.65       | 0.108075783  | 0.09140639   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0.020035504                                       | 1.257687717   | 1.26479984  | 1.26808 | 0.76085 | 0.76085 | 0.76085 | 1.2681 |
| 8  | 2.4947     | 1.6555     | 0.350817736  | 0.23280505   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0.177271276                                       | 1.254001377   | 1.241606806   | 1.16458 | 0.69875 | 0.69875 | 0.69875 | 1.1646 |
| 9  | 1.4127     | 1.6595     | 0.198661248  | 0.23336755   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0.093926706                                       | 1.24439014  | 1.237286811   | 1.20524 | 0.72315 | 0.72315 | 0.72315 | 1.2052 |
| 10 | 3.2905     | 2.6406     | 0.28775437   | 0.23092059   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0.136126895                                       | 1.254229252   | 1.221130638   | 1.13903 | 0.68342 | 0.68342 | 0.68342 | 1.139  |
| 11 | 1.4261     | 1.4478     | 0.200545626  | 0.20359719   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0.081670365                                       | 1.22486799  | 1.211663061   | 1.20688 | 0.72413 | 0.72413 | 0.72413 | 1.2069 |
| 12 | 2.7576     | 2.0301     | 0.241152242  | 0.17753233   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0.089672134                                       | 1.226577807   | 1.209406322   | 1.15486 | 0.69292 | 0.69292 | 0.69292 | 1.1549 |
| 13 | 2.1741     | 0.7588     | 0.30573329   | 0.10670642   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0.104859104                                       | 1.174883581   | 1.202765775   | 1.19084 | 0.7145  | 0.7145  | 0.7145  | 1.1908 |
| 14 | 2.3722     | 1.0371     | 0.207448995  | 0.09069444   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0.051260567                                       | 1.19596298  | 1.201054629   | 1.15798 | 0.69479 | 0.69479 | 0.69479 | 1.158  |
| 15 | 2.0788     | 0.2875     | 0.181791152  | 0.02514189   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0.033680137                                       | 1.179510552   | 1.195178088   | 1.16114 | 0.69668 | 0.69668 | 0.69668 | 1.1611 |
| 16 | 2.129      | 0.3377     | 0.186181144  | 0.02953188   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0.035555555                                       | 1.172661238   | 1.193105572   | 1.1582  | 0.69492 | 0.69492 | 0.69492 | 1.1582 |
| 17 | 2.3231     | 0.3268     | 0.203155198  | 0.02857867   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0.042088775                                       | 1.168001347   | 1.19074519  | 1.15513 | 0.69308 | 0.69308 | 0.69308 | 1.1551 |
| 18 | 2.3137     | 0.2852     | 0.202333167  | 0.02494075   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0.041560752                                       | 1.161636913   | 1.185597551   | 1.15618 | 0.69371 | 0.69371 | 0.69371 | 1.1562 |
| 19 | 0.7857     | 0.8829     | 0.110489235  | 0.12415801   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0.027623082                                       | 1.183479308   | 1.184860237   | 1.23931 | 0.74358 | 0.74358 | 0.74358 | 1.2393 |
| 20 | 1.93786    | 0.2005     | 0.169466336  | 0.01753373   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0.029026271                                       | 1.156314759   | 1.178610225   | 1.16284 | 0.6977  | 0.6977  | 0.6977  | 1.1628 |
| 21 | 1.252      | 0.8622     | 0.176062775  | 0.12124706   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0.045698951                                       | 1.169030809   | 1.175391095   | 1.22049 | 0.73229 | 0.73229 | 0.73229 | 1.2205 |
| 22 | 2.4056     | 1.6033     | 0.338288029  | 0.22546441   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0.165272993                                       | 1.195941154   | 1.1742760751  | 1.14888 | 0.68933 | 0.68933 | 0.68933 | 1.1489 |

Σχήμα ΠΠ.5 Λόγοι ελέγχων των αντοχών των μελών μέσω EC3 (συνέχεια)

|    | A                     | B   | C | D                               | E | F |
|----|-----------------------|---|---|---------------------------------|---|---|
| 1  | <b>Αριθμός μέλους</b> | <b>Περιγραφή διαρροής :</b>   |   |                                 |   |   |
| 2  | 2553                  | Eq.6.3.3(6.61-6.62) - λόγω αλληλεπίδρασης αξονικής ,<br>ροπή και καμπτικό λυγισμό |   | Εμφάνιση μελών<br>που διαρρέουν |   |   |
| 3  | 2795                  | Eq.6.3.3(6.61-6.62) - λόγω αλληλεπίδρασης αξονικής ,<br>ροπή και καμπτικό λυγισμό |   |                                 |   |   |
| 4  | 2903                  | Eq.6.3.3(6.61-6.62) - λόγω αλληλεπίδρασης αξονικής ,<br>ροπή και καμπτικό λυγισμό |   |                                 |   |   |
| 5  | 2906                  | Eq.6.3.3(6.61-6.62) - λόγω αλληλεπίδρασης αξονικής ,<br>ροπή και καμπτικό λυγισμό |   |                                 |   |   |
| 6  | 2909                  | Eq.6.3.3(6.61-6.62) - λόγω αλληλεπίδρασης αξονικής ,<br>ροπή και καμπτικό λυγισμό |   |                                 |   |   |
| 7  | 2912                  | Eq.6.3.3(6.61-6.62) - λόγω αλληλεπίδρασης αξονικής ,<br>ροπή και καμπτικό λυγισμό |   |                                 |   |   |
| 8  | 2915                  | Eq.6.3.3(6.61-6.62) - λόγω αλληλεπίδρασης αξονικής ,<br>ροπή και καμπτικό λυγισμό |   |                                 |   |   |
| 9  | 2918                  | Eq.6.3.3(6.61-6.62) - λόγω αλληλεπίδρασης αξονικής ,<br>ροπή και καμπτικό λυγισμό |   |                                 |   |   |
| 10 | 2921                  | Eq.6.3.3(6.61-6.62) - λόγω αλληλεπίδρασης αξονικής ,<br>ροπή και καμπτικό λυγισμό |   |                                 |   |   |
| 11 | 2924                  | Eq.6.3.3(6.61-6.62) - λόγω αλληλεπίδρασης αξονικής ,<br>ροπή και καμπτικό λυγισμό |   |                                 |   |   |
| 12 | 2926                  | Eq.6.3.3(6.61-6.62) - λόγω αλληλεπίδρασης αξονικής ,<br>ροπή και καμπτικό λυγισμό |   |                                 |   |   |

Σχήμα ΠΓ.6 Εμφάνιση μελών που διαρρέουν και περιγραφή διαρροής τους

## Βιβλιογραφία

- [1] Byfield, M., Mudalige, W., Morisan, C., & Stoddart, E. (2013). A review of progressive collapse research and regulations. *Structures and Buildings*, pg. 447-456.
- [2] EN-1990, Ευρωκώδικας, *Βάσεις σχεδιασμού δομημάτων*. CEN, Απρίλιος 2002
- [3] EN-1991-1-3, Ευρωκώδικας 1, Βασικές αρχές σχεδιασμού και δράσεις στις κατασκευές, *Μέρος 1-3: Γενικές δράσεις-Φορτία χιονιού*, CEN, Ιούλιος 2003
- [4] EN-1993-1-1, Ευρωκώδικας 3, Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα, *Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια*, CEN, Ιούνιος 2004
- [5] Feng, F. (2015). *Advanced Modeling Techniques in Structural Design*. Wiley-Blackwell.
- [6] Hall, R., Woodson, S., Baylot, J., & Hayes, J. (2002). *DEVELOPMENT OF PROGRESSIVE COLLAPSE ANALYSIS PROCEDURE AND CONDITION ASSESSMENT FOR STRUCTURES*. Pennsylvania: Protective Technology Center.
- [7] Kubik, M. (2009). *Structural Analysis of Geodesic Domes*. Durham: Durham University (Diploma Thesis).
- [8] McGuire, W., Gallagher, R., & Ziemian, R. (2014). *MATRIX STRUCTURAL ANALYSIS*. Bucknell University.
- [9] Βάγιας, Ι., Ερμόπουλος, Ι., & Ιωαννίδης, Γ. (2005). *ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ*. Αθήνα: ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ.
- [10] Ζιώγας, Β. (2003). *Σχεδιασμός και μελέτη ελλειψοειδούς γεωδαιτικού θόλου με κύριο υλικό κράματα αλουμινίου*. Βόλος: Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας (Διπλωματική Εργασία).
- [11] Κεχαγιάς, Θ. (2009). *Σημειώσεις Αναλυτικής Γεωμετρίας*. Θεσσαλονίκη: Α.Π.Θ.
- [12] Κουραμάνου, Μ. (2013). *ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΚΑΝ.ΕΠΕ., ΕΝΑΝΤΙ ΠΡΟΟΔΕΥΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ*. Αθήνα: ΕΜΠ (Διπλωματική Εργασία).
- [13] Πανταζή, Β. (2006). *Προοδευτική κατάρρευση μεταλλικού φολιδωτού θόλου*. Βόλος: Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας (Διπλωματική Εργασία).
- [14] Σοφριανόπουλος, Δ. (2006). *Στοιχεία Μεταλλικών Κατασκευών*. Αθήνα: Παπασωτηρίου.

[15] Διαδίκτυο:

<http://geometrica.com/en>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Geodesic\\_dome](https://en.wikipedia.org/wiki/Geodesic_dome)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Buckminster\\_Fuller](https://en.wikipedia.org/wiki/Buckminster_Fuller)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Planetarium\\_Jena](https://en.wikipedia.org/wiki/Planetarium_Jena)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Walther\\_Bauersfeld](https://en.wikipedia.org/wiki/Walther_Bauersfeld)

<http://www.salsburg.com/geod/geodesicmath.pdf>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Eden\\_Project](https://en.wikipedia.org/wiki/Eden_Project)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Ontario\\_Place\\_\(theme\\_park\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Ontario_Place_(theme_park))

<https://el.wikipedia.org/wiki/Ελλειψειδή>

[http://images.autodesk.com/adsk/files/autocad\\_2012\\_pdf\\_dxf-reference\\_enu.pdf](http://images.autodesk.com/adsk/files/autocad_2012_pdf_dxf-reference_enu.pdf)