

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Προοδευτική κατάρρευση
μεταλλικού φοριδωτού θόλου (lamella)*

Φοιτήτρια: Βασιλική Πανταζή

Επιβλέπων: Δ. Σ. Σοφιανόπουλος
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Βόλος, Οκτώβριος 2006



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 5122/1
Ημερ. Εισ.: 05-10-2007
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ -ΠΜ
2006
ΠΑΝ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Προοδευτική κατάρρευση
μεταλλικού φοριδωτού θόλου (lamella)*

Φοιτήτρια : Βασιλική Πανταζή

Επιβλέπων : Δ. Σ. Σοφιανόπουλος
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Βόλος, Οκτώβριος 2006

Αφιερώνεται στη μητέρα μου,
Αγγελική Μαυρογάλου

❖ **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<u>Κεφάλαιο 1^ο</u>	4
1.1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	4
1.2.ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	5
<u>Κεφάλαιο 2^ο</u>	7
2.1.ΘΟΛΩΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ.....	7
2.2.ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	10
2.3.ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	12
2.4.ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	12
2.5.ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΩΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	13
<u>Κεφάλαιο 3^ο</u>	15
3.1.ΦΟΛΙΔΩΤΟΙ (LAMELLA) ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΙ ΘΟΛΟΙ ΑΠΛΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	15
Θόλος lamella.....	16
3.2.ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΘΟΛΩΝ.....	17
Διαφορές θόλων ενός και πολλαπλών στρωμάτων.....	17
Περιπτώσεις κρίσιμων φορτίων.....	18
Μέθοδοι σχεδιασμού και ανάλυσης.....	19
3.3.ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΩΣ ΦΟΛΙΔΩΤΩΝ ΘΟΛΩΝ (LAMELLA).....	19
Astrodome.....	19
The Iris dome.....	23
<u>Κεφάλαιο 4^ο</u>	24
4.1.ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	24
Γραμμική ανάλυση.....	24
Ανάλυση ευστάθειας/αστάθειας.....	24
Μεταλυγισμική απόκριση.....	25
Ισοδύναμα μήκη λυγισμού.....	25
4.2.ΠΡΟΟΔΕΥΤΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ.....	26
Δυναμικές επιρροές της αστοχίας μελών.....	27
Αβεβαιότητες της κατασκευής.....	27

<u>Κεφάλαιο 5°</u>	28
5.1.ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΦΟΛΙΔΩΤΟΥ ΘΟΛΟΥ (LAMELLA) ΑΠΛΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ... 28	
Γενική περιγραφή του έργου- γεωμετρικά στοιχεία.....	28
Σχεδίαση θόλου lamella.....	28
Επιλογή υλικών και διατομών.....	32
5.2.ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	34
Υπολογισμός φορτίων λόγω ανέμου.....	34
Εμβαδό επιρροής.....	38
Υπολογισμός φορτίων λόγω χιονιού.....	39
<u>Κεφάλαιο 6°</u>	45
6.1. ΕΠΙΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ ΓΙΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥΣ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ.....	45
Μελέτη προοδευτικής κατάρρευσης λόγω φορτίων ανέμου.....	45
Μελέτη προοδευτικής κατάρρευσης λόγω φορτίων χιονιού.....	58
Μελέτη προοδευτικής κατάρρευσης λόγω φορτίων χιονιού και ανέμου.....	64
<u>Κεφάλαιο 7°</u>	70
Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	70
<u>Βιβλιογραφία</u>	71

ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Είναι διεθνώς αναγνωρισμένη η συνεχής εφαρμογή – κατασκευή θολωτών μεταλλικών κατασκευών παγκοσμίως με θεαματικά τόσον αισθητικά όσο και «δομοστατικά» αποτελέσματα. Η μέχρι σήμερα έρευνα, τα πειράματα και τα μοντέλα προσομοίωσης που σχετίζονται με τη συμπεριφορά των μεταλλικών θολωτών κατασκευών, λόγω των διάφορων φορτίσεων, αλλά και των φαινομένων λυγισμού (ακαριαίου - τοπικού), είναι αναμφισβήτητη. Γεγονός όμως αποτελεί η έλλειψη έρευνας σε δικτυωτούς θόλους μεγάλων ανοιγμάτων ενός μόνο στρώματος, όσο αφορά την απόκριση της κατασκευής στα φαινόμενα λυγισμού, καθώς και στις περιπτώσεις φορτίσεων που θεωρούνται περίπλοκες συνεπώς και δύσκολες στην προσομοίωση (άνεμος - χιόνι).

Η διπλωματική αυτή εργασία η οποία εκπονήθηκε στον δομοστατικό τομέα, έχει σαν βασικό στόχο της την μελέτη της προοδευτικής κατάρρευσης μεταλλικού φολιδωτού θόλου (lamella) ενός στρώματος, υπό την επήρεια των κρίσιμων φορτίων (ανέμου – χιονιού) που πιθανώς να οδηγήσουν σε φαινόμενα λυγισμού. Έτσι, σχεδιάστηκε ένα μοντέλο συγκεκριμένων διαστάσεων και ερευνήθηκε ουσιαστικά η ποιοτική γραμμικοποιημένη ανάλυση της συμπεριφοράς του σε ευστάθεια, δίνοντας έμφαση σε φαινόμενα καθολικής αστάθειας (ακαριαίος λυγισμός) καθώς επίσης και σε φαινόμενα τοπικής αστάθειας μελών (τοπικός λυγισμός), τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε προοδευτική κατάρρευση του εν λόγω φορέα εξαιτίας των κρίσιμων φορτίων.

Οι έρευνες που προαναφέρθηκαν είναι πολύτιμες και γι' αυτό κάποια από τα στοιχεία τους παρατίθενται και χρησιμοποιούνται στην συνέχεια ως εφόδια στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Το περιεχόμενο της εργασίας απαρτίζεται από επτά (7) κεφάλαια. Συνοπτικά το περιεχόμενο των κεφαλαίων αυτών είναι:

Κεφάλαιο 1^ο : Εισαγωγή, γενικές έννοιες και ιστορική αναδρομή

Κεφάλαιο 2^ο : Γενικά περί θολωτών κατασκευών, διαδεδομένες μορφές θόλων, γεωμετρικούς παραμέτρους σχεδιασμού και μεθόδους, επιλογή δομικού συστήματος και μεθόδους ανάλυσης.

Κεφάλαιο 3^ο : Φολιδωτοί (lamella) μεταλλικοί θόλοι απλού στρώματος

Ορισμός, γεωμετρικά στοιχεία, υφιστάμενες κατασκευές παγκοσμίως

Κεφάλαιο 4^ο : Μέθοδοι ανάλυσης, γραμμική ανάλυση, προοδευτική κατάρρευση

Κεφάλαιο 5^ο : Χαρακτηριστική εφαρμογή, γενική περιγραφή του έργου, γεωμετρικά στοιχεία, σχεδίαση θόλου lamella, υπολογισμός φορτίων κατασκευής

Κεφάλαιο 6^ο : Επίλυση φορέα για τους συνδυασμούς των φορτίσεων και μελέτη προοδευτικής κατάρρευσης λόγω αυτών των περιπτώσεων

Κεφάλαιο 7^ο : Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

➤ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Στις μέρες μας οι δικτυωτές χωρικές κατασκευές αποτελούν μια ευρέως διαδεδομένη λύση εξαιτίας της ικανότητας τους να καλύπτουν μεγάλα ανοίγματα, χωρίς ενδιάμεσες στηρίξεις, έχοντας ως πλεονεκτήματα την τεράστια ποικιλία σχημάτων καθώς και τη δυνατότητα κατασκευής από μια μεγάλη γκάμα υλικών.

Με τον όρο «χωρική κατασκευή» αναφερόμαστε σ' ένα δομικό σύστημα τριών (3) διαστάσεων, δηλαδή η γεωμετρία της κατασκευής μας, τα εξωτερικά φορτία, οι εσωτερικές δυνάμεις καθώς και οι παραμορφώσεις εκτείνονται πέραν του ενός επιπέδου. Ουσιαστικά αναφερόμαστε σ' έναν αριθμό κατασκευών που περιλαμβάνει εσχάρες (grids), κυλινδρικούς θόλους (barrel vaults), άλλες θολωτές κατασκευές (domes), πύργους (towers), δίκτυα καλωδίων (cable nets), συστήματα μεμβρανών (membrane structures), πτυσσόμενες κατασκευές (foldable, deployable) και εφελκυσόμενες μορφές (tensegrity forms). Οι κατασκευές αυτές διαιρούνται σε δικτυωτές, συνεχείς και διπλής μορφής ανάλογα με τα μέλη που τις απαρτίζουν είτε σε κατασκευές ενός ή περισσότερων στρωμάτων (layers).

Εσχάρα θεωρείται ένα δομικό σύστημα που περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα στρώματα μελών (στοιχείων). Η απλούστερη εσχάρα ενός στρώματος αποτελείται από δύο (2) σύνολα αλληλοτεμνόμενων δοκών παράλληλων με τις οριακές γραμμές της εσχάρας. Για να δημιουργήσουμε έναν κυλινδρικό θόλο (barrel vault) δημιουργούμε τόξο καμπύλωσης σε μία εσχάρα κατά μήκος της μίας διεύθυνσης της.

Αντίθετα με τους κυλινδρικούς θόλους, με τον όρο «θόλος» (dome) εννοούμε ένα δομικό σύστημα, που αποτελείται από ένα ή περισσότερα στρώματα μελών καμπυλωμένων προς όλες τις διευθύνσεις.

Γενικά, οι δικτυωτές χωρικές κατασκευές έχουν το μειονέκτημα της πολυπλοκότητας της ανάλυσης τους. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μη γραμμικής συμπεριφοράς τους και της επίδρασης διαφόρων παραγόντων όπως είναι : ο υψηλός βαθμός αοριστίας (υπερστατικότητα), η ανακατανομή της έντασης, οι επιρροές γεωμετρικών και άλλων μη γραμμικοτήτων, ο ρόλος της δυσκαμψίας των κόμβων, η ευαισθησία σε κατασκευαστικές ατέλειες (αρχική καμπυλότητα μελών, παραμένουσες τάσεις κατά την ανέγερση, ελλιπή ή ελαττωματική συνδεσμολογία), η αλλαγή της συμπεριφοράς ανάλογα με τον τρόπο επιβολής των φορτίων (απευθείας στους κόμβους ή στα μέλη).

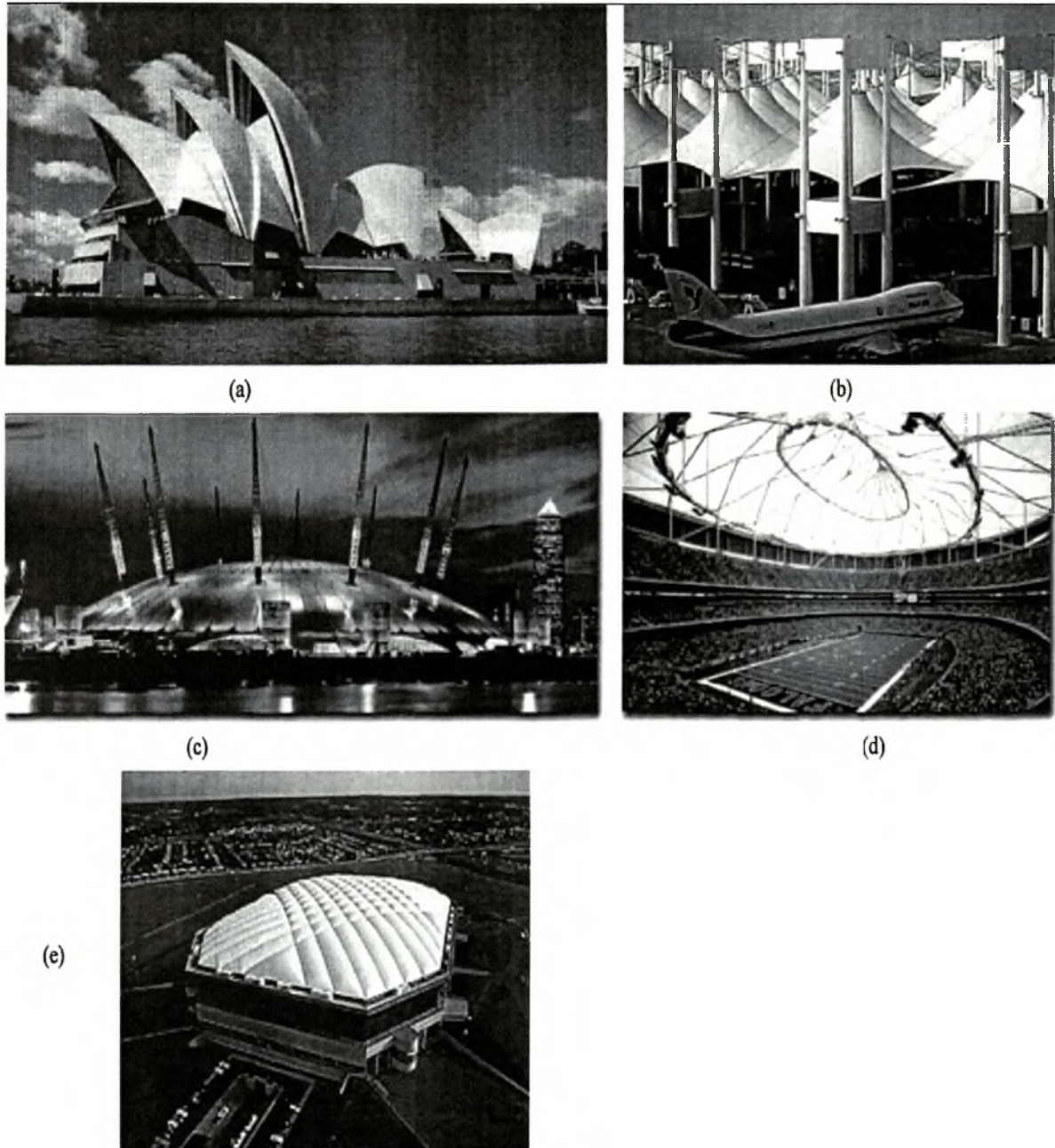
Ειδικότερα στους μεταλλικούς θόλους που διαφοροποιούνται κατά πολύ στο σχήμα, στην πυκνότητα του δικτυώματος (συνδεσμολογία), στο λόγο ύψος/διάμετρο (διαστάσεις), στην ακαμψία των κόμβων, στις απαιτήσεις χώρων και επικαλύψεων καθώς και φορτίων ηλεκτρομηχανολογικών και άλλων εγκαταστάσεων δεν υφίστανται συγκεκριμένοι κανόνες σχεδιασμού.

Λόγω των ανωτέρω καταλήξαμε στη δημιουργία ενός μοντέλου μεταλλικού φολιδωτού θόλου (Lamella) απλού στρώματος και συγκεκριμένων διαστάσεων, το οποίο επελέγη με βάση την υψηλή αρχιτεκτονική αισθητική του αλλά κυρίως λόγω της καμπύλης χωρικής συμμετρίας του. Το μοντέλο αυτό εξετάστηκε για φορτίο ανέμου (κατ' ουσίαν δυναμική φόρτιση) και φορτίο χιονιού (στατική φόρτιση). Ουσιαστικά ασχοληθήκαμε με την ποιοτική γραμμική ανάλυση της συμπεριφοράς του σε ευστάθεια δίνοντας έμφαση αφ' ενός μεν σε φαινόμενα μη γραμμικής (ελαστικής και ανελαστικής) καθολικής αστάθειας, αφ' ετέρου δε σε φαινόμενα τοπικής αστάθειας μελών, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε προοδευτική κατάρρευση.

1.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Ως «ξεχωριστές κατασκευές», θεωρούνται εκείνες που αποτελούν ορόσημα ανάμεσα στα επιτεύγματα του κατασκευαστή πολιτικού μηχανικού. Είναι αυτές που με μια ιστορική αναδρομή μας δείχνουν τον τρόπο με τον οποίο διαμόρφωσαν τις συνθήκες πρακτικής στο κατώφλι του 21^{ου} αιώνα και μας δίνουν μια προοπτική για πιθανή εξέλιξη στο μέλλον. Είναι η πραγματική αντιπροσώπευση των εξισώσεων ισορροπίας, τόσο στατικών όσο και δυναμικών, για κατασκευές τριών διαστάσεων (3D). Ουσιαστικά είναι οι επιβεβαιώσεις των αναλυτικών τεχνικών, του σχεδιασμού και της κατασκευής στην πράξη. Κάθε «ξεχωριστή κατασκευή» είναι πρωτότυπη και όχι πιστή αντιγραφή κάποιας άλλης. Είναι αυτές οι κατασκευές που μας κάνουν υπερήφανους για την επιστήμη μας και μας εξάπτουν το ενδιαφέρον ώστε να συνεχίσουμε να δημιουργούμε αξιόλογες κατασκευές και στο μέλλον.

Με τον όρο «ξεχωριστή κατασκευή» αναφερόμαστε σε καινοτομίες κατασκευαστικών συστημάτων μεγάλων ανοιγμάτων (long-span), κυρίως στεγών και κάλυψης μεγάλων εσωτερικών χώρων χωρίς ενδιάμεσες στηρίξεις. Ειδικότερα, περιλαμβάνουν πολλούς τύπους κατασκευών όπως: χωροδικτυώματα, εσχάρες, δίκτυα καλωδίων (cable nets), εφελκόμενες μορφές (tensegrity), γεωδαιτικούς θόλους (geodesic domes), λεπτά κελύφη (thin shells) κ.λ.π. Παρατίθενται μερικά παραδείγματα όπως: το Georgia Dome στην Ατλάντα, το Livestock Pavilion στο Raleigh και το Madison Square Garden στη Νέα Υόρκη, το Olympic Stadium στο Μόναχο, το Pontiac Silverdome στο Μίσιγκαν, το Sydney Opera House στην Αυστραλία καθώς και το Haj terminal στη Σαουδική Αραβία (βλ. Σχήμα 1.1).



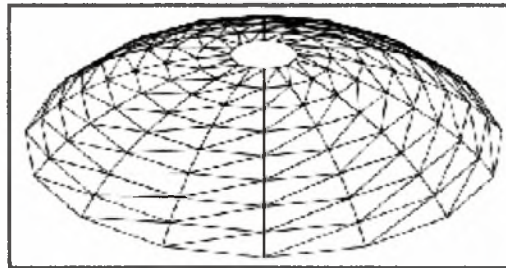
Σχήμα 1.1: a) Sydney Opera House, b) Haj Terminal (Geiger Engineers), c) Millennium Dome (Birdair), d) Georgia Dome (Geiger Engineers), e) Pontiac Silver Dome (Geiger Engineers)

➤ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2.1. ΘΟΛΩΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

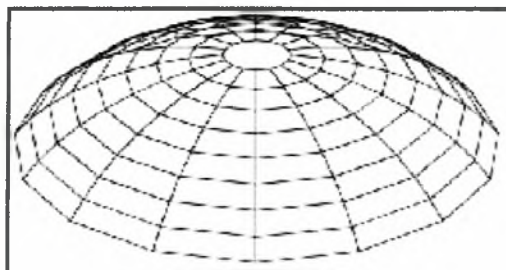
Οι θόλοι αποτελούν έναν από τους πιο αρχαίους τρόπους κατασκευής. Ανεξάρτητα από το πόσο μεγάλο ή μικρό είναι το μέγεθος τους, το περίγραμμα της διαστάτης βάσης τους σε κάτοψη είναι συνήθως κυκλικό. Ο σκελετός της θολωτής κατασκευής μπορεί να καταταχθεί σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη θέση των κύριων μελών του. Η επιφάνεια ενός κατ' εξοχή θόλου μπορεί να είναι τμήμα μιας μοναδικής επιφάνειας (σφαίρας, παραβολοειδούς κλπ) ή δυνατόν να απαρτίζεται από «συρραφή» τμημάτων διαφορετικών επιφανειών. Οι έξι (6) πιο διαδεδομένες μορφές θόλων είναι: Schwedler Dome, Ribbed Dome, Lamella Dome, Diamatic Dome, Great Circle Dome, Geodesic Dome, οι οποίες παρατίθενται στα παρακάτω σχήματα.

Schwedler Dome : Διαθέτει ραβδώσεις, που βρίσκονται πάνω στις μεσημβρινές γραμμές, δακτυλίους που συνθέτουν οριζόντια πολύγωνα και διαγώνιους που εκτείνονται από την τομή μεταξύ ραβδώσεων και δακτυλίων, ενός οριζώντιου δακτυλίου στην τομή του επόμενου (σχήμα 2.1).



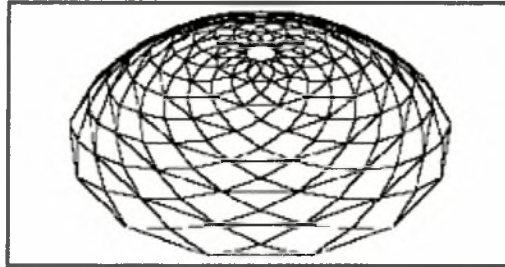
Σχήμα 2.1

Ribbed Dome : Έχει ραβδώσεις που βρίσκονται πάνω στις μεσημβρινές γραμμές και δακτυλίους που συνθέτουν οριζόντια πολύγωνα (σχήμα 2.2).



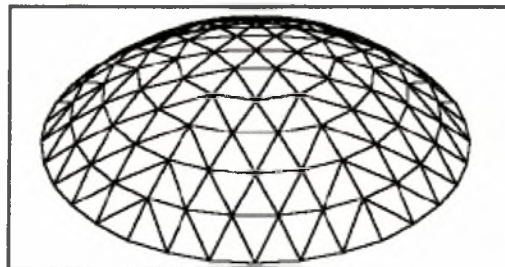
Σχήμα 2.2

Lamella Dome : Έχει διαγώνιους που εκτείνονται από τη στέψη προς τον ισημερινό του θόλου σε δύο (2) διευθύνσεις σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού και αντίθετα. Επιπρόσθετα μπορεί είτε να έχει είτε όχι οριζόντιους δακτυλίους, αλλά δεν έχει μεσημβρινές ραβδώσεις (σχήμα 2.3).



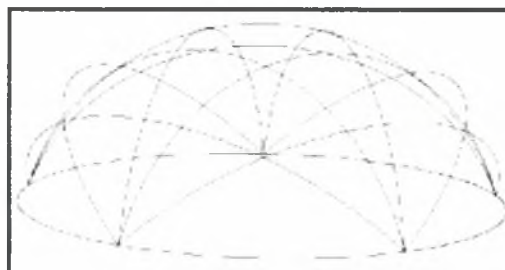
Σχήμα 2.3

Diamatic Dome : Αποτελείται από τριγωνοποιημένους τομείς (pie-shaped sectors) που επαναλαμβάνονται σε ακτινοειδή διάταξη γύρω από τη στέψη (σχήμα 2.4).



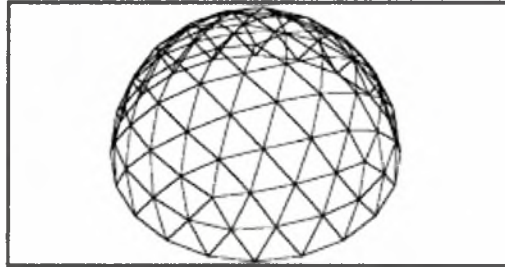
Σχήμα 2.4

Great Circle Dome : Η ονομασία του οφείλεται στο ότι όλα τα στοιχεία του ακολουθούν είτε λίγο είτε πολύ μεγάλες κυκλικές διατάξεις πάνω από την επιφάνεια του θόλου (σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5

Geodesic Dome : Ο θόλος αυτός διαφοροποιείται ανάλογα με την προέλευση του με βάση τα αρχαίωνα Πλατωνικά ή Αρχιμήδεια στερεά, ή από κάποιο πρίσμα.. Οι θόλοι αυτοί προκύπτουν απεικονίζοντας (mapping) μορφές στις πλευρές ενός πολυέδρου και προβάλλοντας την προκύπτουσα πάνω σε μια καμπύλη επιφάνεια (σχήμα 2.6).

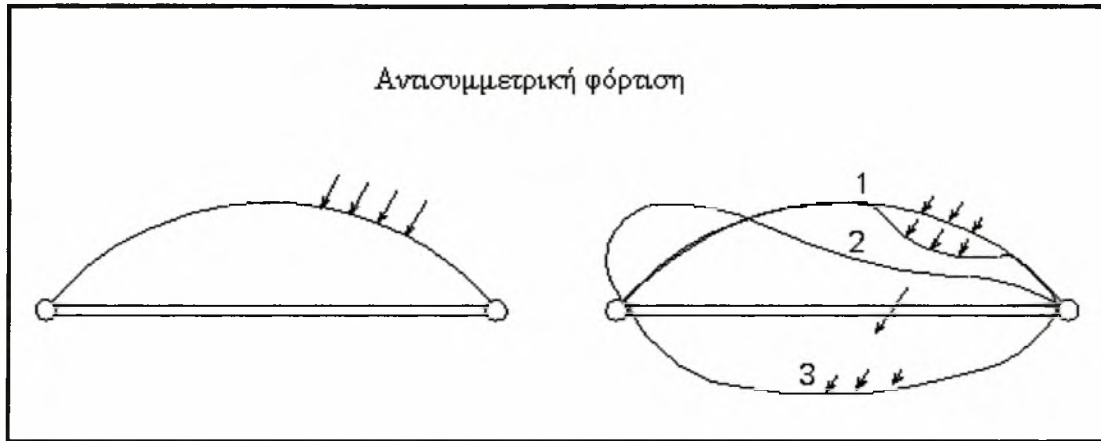


Σχήμα 2.6

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον προκαλούν οι θόλοι τόσο στους μηχανικούς όσο και στους αρχιτέκτονες εξαιτίας του ότι μπορούν να περικλείσουν τον μέγιστο όγκο στη μικρότερη δυνατή επιφάνεια. Τα τελευταία 25 χρόνια ο τομέας των μεταλλικών κατασκευών έχει σε μεγάλο βαθμό αντικαταστήσει τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα παραδείγματα που αναφέρθηκαν πιο πάνω αφορούν συστήματα και απλού και πολλαπλού στρώματος. Ειδικότερα οι τύποι ribbed dome και Schwedler dome επιτρέπουν ανοίγματα γύρω στα 40m και περισσότερα από 100m αντιστοίχως. Μερικές λύσεις διπλού στρώματος έχουν προωθήσει την δημιουργία ανοιγμάτων μεγαλύτερων από 200m.

Η ακριβής ανάλυση των θολωτών κατασκευών (domes) έχει καταστεί δυνατή εξαιτίας της ύπαρξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η ταχύτητα και η υπολογιστική ισχύς των σημερινών υπολογιστών (H/Y) σε συνδυασμό με τον πολύ μεγάλο όγκο τεχνικού λογισμικού επιτρέπουν την ακριβή μελέτη της ελαστικής συμπεριφοράς του φορέα, αφού εισάγουν την ακριβή ελαστική στατική ανάλυση. Η προσοχή πλέον δίνεται στην ελαστοπλαστική συμπεριφορά και τον λυγισμό των μελών και των υποσυστημάτων, στα οποία ο λυγισμός ή η διαρροή, ενδέχεται να οδηγήσει σε προοδευτική κατάρρευση της κατασκευής.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σε θόλους ενός στρώματος, μεγάλων ανοιγμάτων, που είναι εκτεθειμένοι σε μη συμμετρικές φορτίσεις, μπορεί να δημιουργηθεί το φαινόμενο της καθολικής αστάθειας. Επιπροσθέτως, στη μελέτη της αστάθειας του φορέα, ειδική προσοχή επισύρει το φαινόμενο του (καθολικού) «ακαριαίου λυγισμού» ή snap-through buckling, που σχετίζεται με απομακρυσμένες θέσεις ευσταθούς ισορροπίας, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα :



Σχήμα 2.7 : Ακαριαίος λυγισμός «snap through buckling» για θόλους

Η επιρροή της δράσης του ανέμου δεν έχει ακόμη πλήρως αναλυθεί, λόγω της πολυπλοκότητας που την διακρίνει και των ιδιαίτερα μη γραμμικών αεροδυναμικών φαινομένων που υπεισέρχονται. Η εφαρμογή δράσεων με χρήση συντελεστών, σε περιπτώσεις μη κρίσιμων φορτίσεων, δεν καλύπτει απαραίτητα την πιο δυσμενή κατάσταση. Ακόμα και η παραδοχή ενός κατάλληλου επιπλέον βάρους δεν οδηγεί απαραίτητα στην ασφαλή αναπαράσταση της πιο δυσμενούς φόρτισης.

Είναι σημαντικό να τονιστεί η διαφορά στη συμπεριφορά μεταξύ των θόλων (domes) και των κυλινδρικών θόλων (barrel vaults). Η ευαισθησία του φορέα σε μη συμμετρική φόρτιση καθώς και η αντοχή του σε φαινόμενα καθολικού λυγισμού είναι αυστηρά συνδεδεμένες με την ακαμψία που προέρχεται από τη γεωμετρία του.

Ο καθορισμός της γεωμετρικής διάταξης των στοιχείων του φορέα, είτε είναι κατασκευή απλού είτε πολλαπλού στρώματος, είναι ένα δύσκολο πρόβλημα, το οποίο πρέπει να λυθεί. Η διερεύνηση έχει ως σκοπό τη χρήση μελών με όσο το δυνατόν λιγότερα διαφορετικά μήκη. Επιπλέον, είναι σημαντικό να ελέγξουμε ότι τα πολύγωνα που ορίζονται είναι όσο το δυνατόν όμοια, ώστε να διευκολύνουν την εφαρμογή της επικάλυψης.

2.2. ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Στο στάδιο σχεδιασμού είναι σημαντικό να ορίσουμε την γεωμετρία της κατασκευής, δίνοντας καθορισμένες θέσεις για τις στηρίξεις, που αποτελούν έναν σημαντικό παράγοντα στην αντοχή και ακαμψία του συστήματος.

Παράμετροι του γεωμετρικού σχεδιασμού είναι:

- το συνολικό σχήμα. Για καμπυλωμένες επιφάνειες και στις δύο (2) διευθύνσεις μας ενδιαφέρει η αναλογία ύψους/ανοίγματος, η οποία πρέπει να είναι τέτοια ώστε να ικανοποιεί τα δομοστατικά αλλά και τα αρχιτεκτονικά κριτήρια. Παραδείγματος χάριν, πρέπει να αποφεύγεται αναλογία τέτοια ώστε ο θόλος που θα προκύψει να είναι ιδιαίζόντως χαμηλού ύψους, για προφανείς λειτουργικούς λόγους.
- η γεωμετρία των στηριγμάτων της επικάλυψης.
- ο αριθμός των στρωμάτων. Ο κατασκευαστικός λόγος (βάθος/άνοιγμα) επηρεάζει το βάρος, την αντοχή και το κόστος,
- η συχνότητα του δικτυώματος. Δηλαδή, ο αριθμός των γεωμετρικών στοιχείων για ένα δεδομένο μήκος.

Οι επιλογές των παραμέτρων επηρεάζουν τον αριθμό των μελών που συγκλίνουν σε κάθε κόμβο καθώς και τη γωνία σύνδεσης μεταξύ τους. Αυτές οι δύο παράμετροι προσδιορίζουν την απαιτούμενη αντοχή των κόμβων. Όταν είναι μεγάλος ο αριθμός των στοιχείων που συγκλίνουν σε έναν κόμβο με διαφορετικές γωνίες, όπως επίσης και η έλλειψη της επανάληψης, τούτο αποτελεί συνήθως ανυπέρβλητο εμπόδιο για την κατασκευασσιμότητα της κατασκευής. Η επιλογή δε της απόστασης μεταξύ των επάλληλων εσχάρων θα πρέπει να σχετίζεται με τις γεωμετρικές συνδέσεις.

Η επιλογή των στηρίξεων δεν θέτει συγκεκριμένα προβλήματα αλλά επηρεάζει τη συμπεριφορά της κατασκευής.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, εξαιτίας του μικρού βάρους της κατασκευής, το βάρος των εξοπλισμών που στηρίζονται σ' αυτήν πρέπει να μην θεωρείται αμελητέο. Όμοια, οι δράσεις που είναι αποτέλεσμα της μεθόδου κατασκευής - ανέγερσης πρέπει να εξετάζονται προσεκτικά. Τα αποτελέσματα των συγκεντρωμένων φορτίων και των μερικώς κατανεμημένων φορτίων, τα οποία είναι μεγαλύτερα όταν η ολική φόρτιση δεν είναι συμμετρικά κατανεμημένη, πρέπει επίσης να εξετάζονται. Εξαιρεση σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να αποτελέσουν δυναμικά φορτία, τα οποία μπορούν να αντικατασταθούν με κατάλληλα αυξημένες στατικές δράσεις.

2.3.ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Κάθε μελέτη κατασκευής αποτελεί αναμφισβήτητα μία ξεχωριστή περίπτωση. Παρ' όλα αυτά είναι πιθανό να δημιουργήσουμε μία αλληλουχία βημάτων για τον σχεδιασμό. Κυρίως πρέπει να σημειωθεί, ότι για να καλύψουμε ένα σχήμα με έναν προαποφασισμένο τρόπο υπάρχουν δύο (2) διαφορετικές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της επιφάνειας.

- *είτε η γεωμετρία της συνολικής επιφάνειας προσδιορίζεται από πριν, δηλαδή πρέπει να γίνει μία γεωμετρική διαίρεση όπως για παράδειγμα μία γεωδαιτική διαίρεση για θόλους,*
- *είτε το μοντέλο παραμένει όπως ήταν αρχικά και η επανάληψη του μας δίνει την τελική γεωμετρία.*

Όταν καταλήξει στη συνολική γεωμετρία, ο μελετητής πρέπει να αποφασίσει για τον αριθμό των στρωμάτων. Αυτό βασικά εξαρτάται από το ελεύθερο άνοιγμα, όπως επίσης και από τη γεωμετρική κατανομή των μελών μεταξύ των στρωμάτων. Η επιλογή της συχνότητας του δικτύματος είναι σημαντική, για λόγους αντοχής καθώς και για το κόστος, όπως επίσης και για λόγους αισθητικής. Η επιλογή της γεωμετρίας των μελών του δικτύματος επηρεάζει άμεσα τη συμπεριφορά του φορέα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση μιας εσχάρας διπλού στρώματος, ένας έλεγχος με διαφορετική γεωμετρική διάταξη, απέδειξε τη σπουδαιότητα της επιλογής μιας μορφολογίας στην οποία οι διευθύνσεις των μελών των δύο στρωμάτων θέτονται σε γωνία 45 μοιρών (45°). Για το λόγο αυτό πρέπει να εξετάζουμε τη συμπεριφορά της κατασκευής με κατάλληλους συνδυασμούς φορτίσεων.

Η επιλογή των συνθηκών στήριξης έχει μεγάλη επιρροή στην κατανομή των εσωτερικών δυνάμεων, καθώς επίσης και στο μέγεθος της προκύπτουσας εκκεντρότητας.

2.4.ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Μετά την επιλογή του γενικού σχήματος της κατασκευής, είναι απαραίτητο να επιλέξουμε το δομικό σύστημα. Μια μεγάλη ποικιλία από δομικά συστήματα είναι διαθέσιμη, η οποία μπορεί να πληρεί τις προϋποθέσεις που έχουν προκύψει από τις γεωμετρικές απαιτήσεις του σχεδιασμού. Ωστόσο δεν μπορούν όλα τα συστήματα να αναλάβουν τα φορτία σχεδιασμού και να μπορούν να αντέξουν στον δυσμενέστερο συνδυασμό φόρτισης που προέρχεται από αυτά. Το μέγεθος της διατομής των μελών είναι ένα θέμα του μελετητή, ενώ ο κατασκευαστής του δομικού συστήματος πρέπει να εγγυηθεί ότι οι κόμβοι θα έχουν ικανοποιητική ακαμψία και αντοχή.

2.5.ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΩΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Το αντικείμενο ανάλυσης ενός χωρικού συστήματος είναι να προσδιορίσει τις τιμές των μεταβλητών που είναι απαραίτητες για την επιλογή των διαστάσεων και των στηρίξεων. Οι μεταβλητές που απαιτούνται μπορεί να είναι :

- το μέγεθος των θλιπτικών και εφελκυστικών δυνάμεων στα μέλη του συστήματος,
- το μέγεθος των μετακινήσεων των κόμβων,
- το μέγεθος των τιμών στις αντιδράσεις των στηρίξεων.

Η μελέτη πρέπει να γίνει για διάφορες περιπτώσεις δράσεων καθώς και συνδυασμών τους. Η πιο δυσμενής περίπτωση χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό. Δε χρειάζεται να προσδιορίσουμε όλες τις άγνωστες ποσότητες, αρκούν αυτές που έχουν σχέση με το πρόβλημα που εξετάζουμε. Οι μέθοδοι της ανάλυσης μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής :

- i. **μέθοδος των κόμβων** : εφαρμόζεται σε σύστημα δύο (2) διευθύνσεων, το οποίο είναι εσωτερικά ισοστατικό και για το οποίο οι αντιδράσεις έχουν υπολογιστεί από πριν. Εφαρμόζοντας τις κατάλληλες ισορροπίες υπολογίζονται οι δυνάμεις των μελών, είτε αναλυτικά, είτε γραφικά.
- ii. **μέθοδος τομών** : σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να δώσει απευθείας τις εσωτερικές δυνάμεις, σε έναν περιορισμένο αριθμό μελών, που επιλέγονται από τον σχεδιαστή.

Ο Ευρωκώδικας 3 (Eurocode 3) εκτός από τη χρήση των κανόνων που είναι συνηθισμένοι σε όλες τις κατασκευές, όσον αφορά τις δράσεις και τους συνδυασμούς τους, εισάγει ένα τέλειο αρθρωτό μοντέλο για καθολική ανάλυση. Επιπλέον, θεωρείται ότι όλες οι δράσεις εφαρμόζονται στα συστήματα των κόμβων. Είναι απαραίτητο να προσθέσουμε την γραμμική ελαστική απόκριση του συστήματος. Υπολογισμοί ελαστο-πλαστικής συμπεριφοράς μπορούν να γίνουν χρησιμοποιώντας απλοποιημένα μοντέλα της συμπεριφοράς των μελών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μπορεί να επιτευχθεί μία σταθερή λογική απόκριση των θλιβόμενων μελών και όταν το μέλος φτάσει στο μέγιστο φορτίο που μπορεί να αναλάβει (οριακή αντοχή), τότε λαμβάνει χώρα ανακατανομή της έντασης. Οι μέθοδοι που αναφέρθηκαν βασίζονται όλες στις εξισώσεις ισορροπίας.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι αυτές οι μέθοδοι δεν λαμβάνουν υπόψη :

- μη συμβατότητα τοπικών και καθολικών αξόνων των μελών που συντρέχουν σε έναν κόμβο,
- την κάμψη που προκαλείται από την εφαρμογή των εξωτερικών δράσεων κατά μήκος των μελών, παρά στους κόμβους,

- δευτεροβάθμιες ροπές εξαιτίας της ακαμψίας των κόμβων, οι οποίοι δεν ανταποκρίνονται πλέον στη συμπεριφορά του αρθρωτού μοντέλου,
- μη γραμμικότητες εξαιτίας της γεωμετρίας και/ή του υλικού.

Γι' αυτό είναι απαραίτητο να αξιολογούμε προσεκτικά τη σημασία των παραγόντων που σχετίζονται με την αστοχία του φορέα, είτε κάνοντας επιπλέον υπολογισμούς είτε χρησιμοποιώντας πιο λεπτομερή υπολογιστικά μοντέλα. Για παράδειγμα, το γενικευμένο μοντέλο των μετακινήσεων, το οποίο λαμβάνει υπόψη την δυσκαμψία (stiffness) στην κάμψη και στη στρέψη.

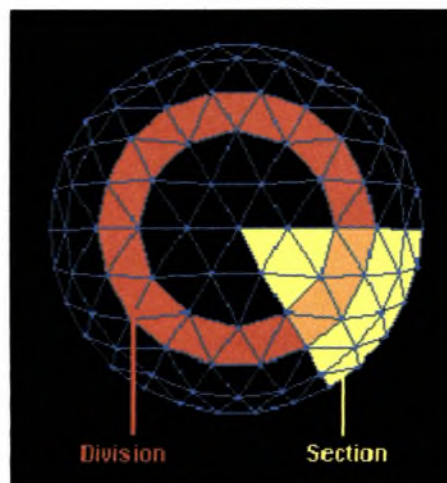
Η μέθοδος των μετακινήσεων είναι η πιο γενικευμένη μέθοδος και εφαρμόζεται σε όλες τις χωρικές κατασκευές. Η συμπεριφορά των υλικών προσομοιάζεται να είναι ελαστική και γραμμική. Η μέθοδος αυτή είναι άμεσα εφαρμόσιμη σε προγράμματα Η/Υ ανάλυσης κατασκευών.

➤ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3.1.ΦΟΛΙΔΩΤΟΙ (LAMELLA) ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΙ ΘΟΛΟΙ ΑΠΛΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Η σειρά των εργασιών που περιγράφεται παρακάτω οδηγεί στη δημιουργία ενός φολιδωτού θόλου-lamella. Ένας θόλος ο οποίος βασίζεται στην υποδιαίρεση μίας σφαίρας από την κορυφή έως τη βάση με δύο τρόπους, σε «κομμάτια πίτας» (pie shaped) και σε δακτυλίους (ring shaped), (βλ. σχήμα 3.1).

Τα «κομμάτια πίτας» ονομάζονται τομείς (sections), έκαστος των οποίων υποδιαιρείται σε ένα σύνολο τριγωνικών υποεπιφανειών. Αυτές επίσης δημιουργούν ένα σύνολο από ομόκεντρους δακτυλίους (division) γύρω από τους κεντρικούς άξονες, όπου ο καθένας έχει βαθμιαία περισσότερα τρίγωνα. Οι πάνω και οι κάτω ακμές των τριγώνων μίας σειράς είναι όλες στο ίδιο ύψος. Τα ομοιόμορφα στρώματα είναι αυτά που το κάνουν φολιδωτό θόλο που ονομάζεται lamella.



Σχήμα 3.1

Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους μπορούμε να προσδιορίσουμε τα χαρακτηριστικά ενός θόλου lamella, ανάλογα με τη διαδικασία μορφοποίησης του.

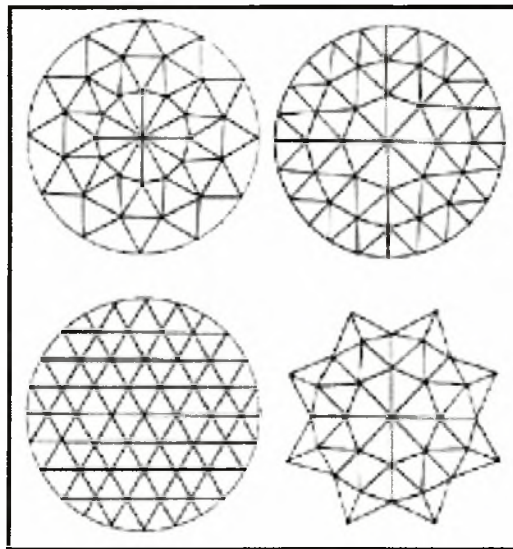
Ο πρώτος τρόπος αντιστοιχεί σε μία βασική μέθοδο παραγωγής, βάσει της οποίας ένας θόλος προσδιορίζεται από την ακτίνα και το ύψος του. Ο τρόπος αυτός χρησιμοποιείται συνήθως για τη δημιουργία θόλων, με μειωμένες αρχιτεκτονικές απαιτήσεις.

Ο δεύτερος τρόπος αντιστοιχεί σε μία εξελιγμένη μέθοδο δημιουργίας, στην οποία ένας θόλος προσδιορίζεται από μία σφαιρική ακτίνα, μεσημβρινούς και παράλληλους. Αυτός ο τρόπος χρησιμοποιείται συνήθως για τη δημιουργία ενός θόλου σαν κομμάτια (sections) μίας σφαίρας.

Και οι δύο μέθοδοι δημιουργούν τον ίδιο συνδυασμό κόμβων, δοκών και φατνωμάτων αλλά έχουν διαφορετική σχεδιαστική φιλοσοφία .

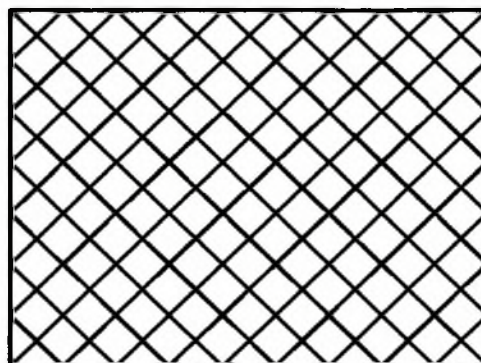
Θόλος lamella

Πρόκειται περί θόλου, που αποτελείται από ένα σύνολο αλληλοτεμνόμενων λοξών τόξων, από κοντά μέλη, λόγω δε της φοιιδωτής μορφής του ονομάζεται lamella. Τα μέλη αυτά είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με μία γωνία τέτοια ώστε το καθένα να διασταυρώνεται με δύο (2) ίδια γειτονικά μέλη στο μέσο του. Έτσι σχηματίζεται μία σύνδεση σε σχέδιο διαμαντιού (diamond patterned network), (βλ. σχήμα 3.2).



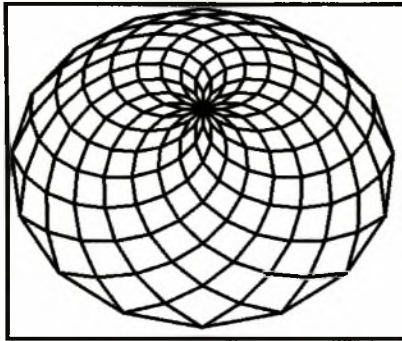
Σχήμα 3.2 : Θόλος lamella

Πρόκειται συνεπώς περί μίας εσχάρας διαγώνιας μορφής (βλ. σχήμα 3.3), η οποία αποτελείται και αυτή από δύο σύνολα παράλληλων μεταξύ τους δοκών, υπό γωνία ως προς τις οριακές γραμμές,

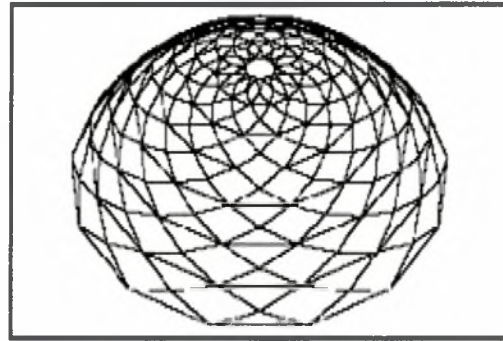


Σχήμα 3.3 Διαγώνια εσχάρα

η οποία καμπυλώνεται και προς τις δύο (2) διευθύνσεις, δημιουργώντας ένα φοιιδωτό θόλο, που ονομάζεται lamella, ο οποίος μπορεί να έχει έναν (βλ. σχήμα 3.4) ή περισσότερους δακτυλίους (βλ. σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.4 lamella με ένα δακτύλιο



Σχήμα 3.5 lamella με πολλούς δακτυλίους

3.2.ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΘΟΛΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην εισαγωγή, λόγω των πολλών και διαφορετικών εφαρμογών τους οι θόλοι διαφοροποιούνται κατά πολύ σε κάποια από τα χαρακτηριστικά τους. Το σχήμα, η συνδεσμολογία, οι διαστάσεις, ο λόγος ύψος/άνοιγμα είναι μερικά από αυτά.

Διαφορές θόλων ενός και πολλαπλών στρωμάτων

Σπουδαία είναι επίσης και η διαφορά μεταξύ της συμπεριφοράς που αναπτύσσουν οι θόλοι ενός στρώματος σε σύγκριση με τους θόλους πολλαπλών στρωμάτων. Κατά τον σχεδιασμό θόλων ενός μόνο στρώματος, θα πρέπει το σύστημα των κόμβων να προσδίδει την απαιτούμενη δυσκαμψία στην κατασκευή και τα μέλη να έχουν μελετηθεί ώστε να ανθίστανται τόσο σε αξονικές όσο σε τέμνουσες δυνάμεις καθώς και σε καμπτικές ροπές. Σε αντίθετη περίπτωση η θολωτή κατασκευή κινδυνεύει από ακαριαίο λυγισμό (snap-through buckling). Η μεγάλη ευαισθησία των θόλων ενός στρώματος έναντι του καταστροφικού φαινομένου του ακαριαίου λυγισμού οφείλεται τόσο σε κατακόρυφα όσο και σε οριζόντια επιβαλλόμενα φορτία αλλά και λόγω αρχικών γεωμετρικών ατελειών ή/και λόγω μερικής δυσκαμψίας των κόμβων, και αυτό διότι η απόκριση του θόλου σχετίζεται εκ κατασκευής με μεγάλες ελαστικές και ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις, κατά την διεύθυνση επιβολής των δυνάμεων, οι οποίες μπορούν να καταστούν ανεξέλεγκτες. Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι είτε η προοδευτική κατάρρευση είτε ο καθολικός λυγισμός (global buckling) της θολωτής κατασκευής.

Αντίθετα, οι θόλοι πολλαπλών στρωμάτων έχουν την δυνατότητα να ανακατανέμουν την ένταση και να περιορίζουν καθώς και να ελέγχουν τις παραμορφώσεις. Επιπλέον, από την πλευρά της δυναμικής αποκρίσεως είναι περισσότερο δύσκαμπτοι, οπότε παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντίσταση σε φορτία δυναμικής φύσεως. Γενικότερα, η συμπεριφορά των θόλων πολλαπλών στρωμάτων έναντι ταλαντώσεων είναι πολύ πιο ευνοϊκή σε σχέση με αυτή των θόλων απλού στρώματος που θεωρούνται ιδιαίτερα εύκαμπτοι.

Περιπτώσεις κρίσιμων φορτίων

Χιόνι

Υπάρχουν περιπτώσεις θόλων που λόγω μορφής εμφανίζουν σημαντική καμπυλότητα προς τη βάση τους, δηλαδή γίνεται έντονη μετά από ένα σημαντικό ύψος (μετρούμενο από την κορυφή) όπως για παράδειγμα σε σφαιρικούς θόλους. Αυτοί οι θόλοι αντιμετωπίζουν τον σημαντικό κίνδυνο συσσώρευσης χιονιού γύρω από την κορυφή, με αποτέλεσμα τον αυξημένο κίνδυνο καθολικού λυγισμού ή μερικής κατάρρευσης, που θα οδηγούσε σε απώλεια της ευστάθειας ή της λειτουργικότητας της κατασκευής. Προφανώς, ο κίνδυνος αυτός, πρέπει να προβλεφθεί κατά τη μελέτη της κατασκευής και όσον αφορά τους συνδυασμούς φόρτισης της και όσον αφορά της πιθανές μορφές αστοχίας της.

Άνεμος

Πάντως, η μεγαλύτερη δυσκολία στην ανάλυση των δικτυωτών μεταλλικών θόλων έγκειται στον ακριβή και αξιόπιστο υπολογισμό των δυνάμεων λόγω ανέμου. Τα φορτία ανέμου είναι συναρτήσεις της ταχύτητας του ανέμου, της πυκνότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, της επιφάνειας της κατασκευής που είναι εκτεθειμένη στον άνεμο, του υψόμετρου και της τραχύτητας της επιφάνειας του εδάφους, της τοπογραφικής διαμόρφωσης της περιοχής, της ύπαρξης άλλων κατασκευών στη περιοχή καθώς και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και του σχήματος του δομήματος.

Σε απλές περιπτώσεις, όπως θόλοι με κυλινδρική βάση, κυλινδρικές στέγες, οι κανονισμοί φορτίσεων δίνουν μια αρκετά καλή προσέγγιση της κατανομής των δυνάμεων λόγω ανέμου και προβλέπουν με ασφάλεια τα σχετικά αεροδυναμικά φαινόμενα. Σε πιο σύνθετες περιπτώσεις, δεν υπάρχουν γενικοί σχετικοί κανόνες. Αυτό συμβαίνει διότι λόγω της ποικιλίας των μορφών αλλά και της κρίσιμότητας της ανεμοφόρτισης, απαιτείται είτε ακριβής προσομοίωση του ανέμου και του οριακού στρώματος μέσω εξειδικευμένου λογισμικού είτε πειράματα υπό κλίμακα σε αεροσήραγγα, με ακριβή αποτύπωση και των περί την κατασκευή εδαφικών χαρακτηριστικών, των κτισμάτων κ.λ.π. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η πίεση του ανέμου μπορεί να επηρεάσει και το φορτίο λυγισμού ενός θλιβόμενου μέλους στην ανελαστική περιοχή.

Μέθοδοι σχεδιασμού και ανάλυσης

Η υπολογιστική ισχύς των σημερινών υπολογιστών (H/Y) και τα υφιστάμενα προγράμματα προχωρημένης στατικής αλλά και δυναμικής μη γραμμικής ανάλυσης, τόσο ελαστικής όσο και ελαστοπλαστικής, όπως τα ANSYS, MSc Nastran, Abacus, Adina κ.α. παρέχουν τη δυνατότητα στο μελετητή πολλών επαναλαμβανόμενων υπολογισμών μέχρι την επίτευξη της βέλτιστης τεχνικο-οικονομικά λύσης. Παρόλα αυτά όμως η ουσιαστική αποτελεσματικότητα της διαδικασίας σχεδιασμού βασίζεται στη δυνατότητα του μελετητή να καθορίσει έναν αρχικό σχεδιασμό της κατασκευής πολύ κοντά στην τελική γεωμετρία της. Αυτό επιτυγχάνεται είτε μέσω της σχεδιαστικής εμπειρίας του μελετητή είτε βάσει κατάλληλων και απλών εμπειρικών σχέσεων. Αυτές οι εμπειρικές σχέσεις δίνουν κυρίως έναν προκαταρκτικό υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας θολωτών κατασκευών απλού στρώματος. Ενώ αντίθετα, στο στάδιο της οριστικής μελέτης και της μελέτης εφαρμογής μόνο η μη γραμμική στατική και δυναμική ελαστοπλαστική ανάλυση μπορεί να οδηγήσει σε εμπεριστατωμένο σχεδιασμό[▼].

3.3.ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΩΣ ΦΟΛΙΔΩΤΩΝ ΘΟΛΩΝ (LAMELLA)

Σήμερα είναι γνωστές δύο (2) κατασκευές φολιδωτού θόλου lamella. Η μία από αυτές είναι πραγματική κατασκευή (Astrodome) ενώ η δεύτερη αποτελεί μοντέλο (Iris dome). Και οι δύο αυτές υφιστάμενες κατασκευές έχουν δημιουργηθεί από θόλο διπλού στρώματος. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή τους.

Astrodome

Το Astrodome είναι το θολωτό στάδιο του Χιούστον, στο Τέξας των ΗΠΑ, και αποτελεί ορόσημο στις μεταλλικές κατασκευές. Λειτουργήσε το 1965 και ήταν το πρώτο κλειστό στάδιο ποδοσφαίρου και μπέιζμπολ το οποίο θεωρήθηκε «το 8^ο θαύμα του κόσμου». Ο μεταλλικός καμπυλωμένος θόλος lamella υποστήριξε ένα άνοιγμα οροφής 642 ft (=195,68 m) το οποίο είναι περισσότερο από το διπλάσιο οποιουδήποτε άλλου ανοίγματος είχε κατασκευαστεί μέχρι τότε.

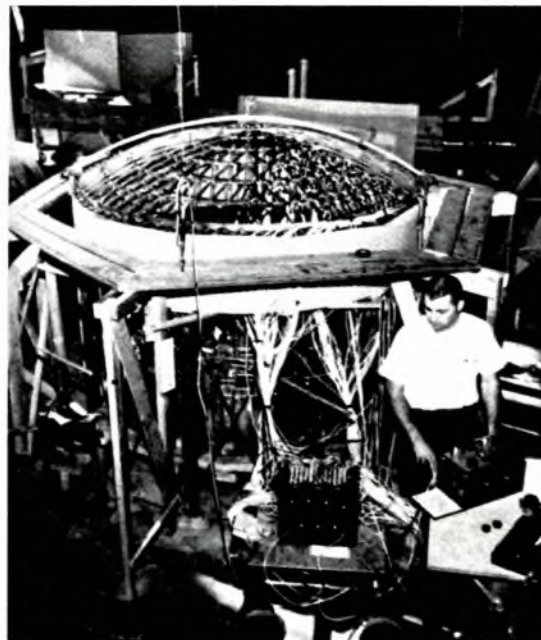
Το στάδιο είναι ένα κτίριο με κυκλικό θολωτό δικτύωμα φτιαγμένο από σκυρόδεμα και χάλυβα. Καλύπτει μια επιφάνεια μεγαλύτερη από 9 acres (=36.421,7 m²). Το ύψος της οροφής είναι 202 ft (=61,57 m), στο κέντρο του γηπέδου. Μπορεί να φιλοξενήσει όλους τους τύπους αθλημάτων - συνεδριάσεων ή εκδηλώσεων, από ροντέο μέχρι πολιτικά συνέδρια με θέσεις για περισσότερους από

[▼] *Nonlinear Integrated Design and Analysis of steel frames*, NIDA-NAF Series, (www.nida-naf.com). Prof S.L. Chan, Center for Advances in Technology in Structural Engineering (CATISE), Department of Civil and Structural Engineering, Hong Kong Polytechnic University.

66.000 θεατές. Τα προβλήματα των μηχανικών ήταν τεράστια και συμπεριελάμβαναν και μερικά τελείως καινούρια, όπως το ποσοστό του ηλιακού φωτός που θα έπρεπε να επιτρέψουν να περνάει από την οροφή, ώστε ούτε να δημιουργεί πρόβλημα όρασης αλλά συγχρόνως να βοηθάει στην ανάπτυξη του χλοοτάπητα του γηπέδου.

Βασικό πρόβλημα αποτελούσε ο τρόπος στήριξης της θολωτής κατασκευής, χωρίς εσωτερικές στηρίξεις, ενός ανοίγματος τέτοιου που θεωρείται ασυνήθιστα μεγάλο για κατασκευές στεγών. Υπήρξε η σκέψη της δημιουργίας μιας στέγης που θα άνοιγε και θα έκλεινε, όμως αυτό θα προκαλούσε καταστροφή στο σύστημα του αερισμού (air-conditioning system) του χώρου, και θα ήταν πολύ ακριβό. Η εκτίμηση του κόστους των διάφορων σταθερών συστημάτων, προσδιόρισε το βασικό σχέδιο το οποίο θα ήταν ένας μεταλλικός φολιδωτός θόλος –lamella, ένας τύπος δικτυώματος για κατασκευή στεγών. Αυτό το σύστημα είχε χρησιμοποιηθεί κατά το παρελθόν επιτυχημένα σε διάφορους θόλους με ανοίγματα μεγαλύτερα από 285,01 ft (=86,87 m).

Οι εμπειρογνώμονες μηχανικοί, που ασχολήθηκαν με τον έλεγχο των υπολογισμών της στέγης, αποφάσισαν να αναλύσουν με μαθηματικές μεθόδους το σύνθετο δικτυωτό θόλο και μετά να δημιουργήσουν ένα μοντέλο (προσομοίωμα) (βλ. σχήμα 3.6) στο εργαστήριο για να επιβεβαιώσουν την ανάλυση.



Σχήμα 3.6 :Μοντέλο Astrodome

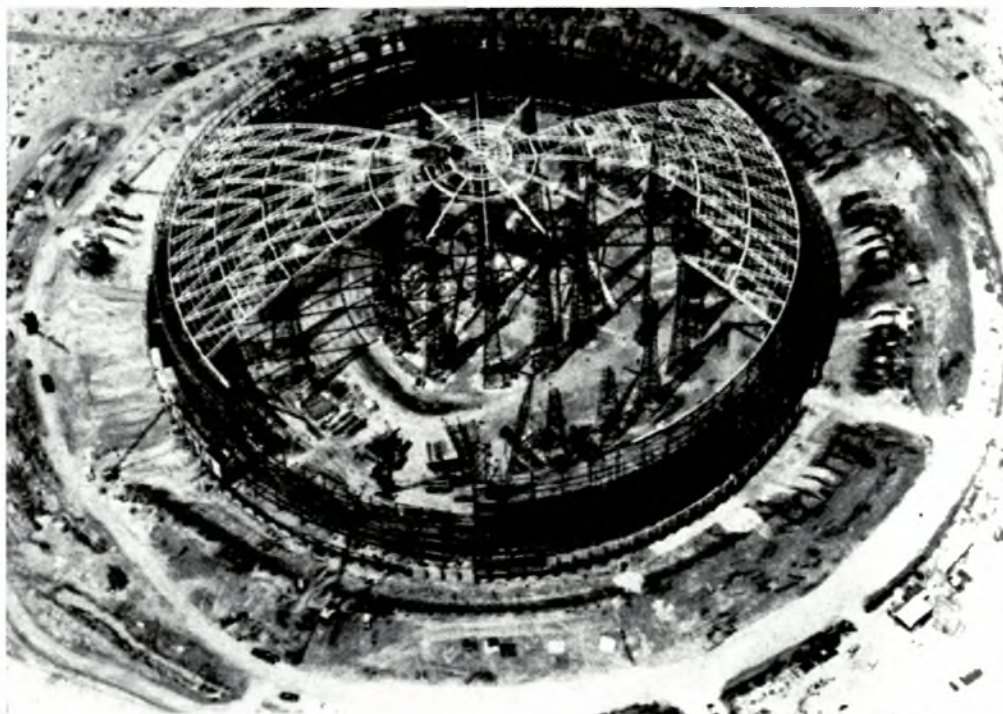
Ήταν απαραίτητο να προσδιοριστούν οι δυνάμεις του ανέμου που εφαρμόζονται στην επιφάνεια της οροφής, όταν μια δυναμική φόρτιση ανέμου της τάξης των 40 psf (pounds per square foot) εφαρμόζεται από τους τυχαίους τυφώνες που επικρατούν στην περιοχή του Χιούστον. Γι' αυτό αποφάσισαν να δημιουργήσουν μια αεροσήραγγα για πειράματα υπό κλίμακα. Το πείραμα έγινε για 48 διαφορετικές συνθήκες φόρτισης για την επιρροή του ανέμου. Τελικά το κτίριο σχεδιάστηκε να αντέχει σε τυφώνες με ανέμους 165,00 mph (=265,54 km/h) με συνεχόμενες φορτίσεις ανέμου της τάξης των 135,00 psf (=217,26 km/h). Αυτό επίσης προκαλεί μια αύξηση των 40 psf, η οποία πρέπει να συμπεριληφθεί τους υπολογισμούς.

Η αρχική ανάλυση ήταν σε προσομοίωση κελύφους που χρησιμοποιείται για την επιλογή μεγεθών για το βάθος των 5 ft (=1,52 m), του δικτυώματος lamella που σχηματίζει την οροφή. Χρειάστηκαν τέσσερις (4) κύκλοι ανάλυσης και επαναδιαστασιολόγησης, με τη μέθοδο της ελαστικής ανάλυσης, ώστε να βρεθεί η πιο οικονομική λύση. Τα αποτελέσματα καθόρισαν την ποσότητα του χάλυβα που χρειάζεται, τα οποία είναι 2.150 τόνοι χάλυβα για την οροφή του δικτυώματος και 376 τόνοι για το δακτύλιο. Τριάντα επτά (37) πύργοι συναρμολογήθηκαν για να σχηματίσουν το θολότυπο, εκ των οποίων ο ψηλότερος ήταν 212 ft (=64,62 m) και βρισκόταν στο κέντρο του κτιρίου. Η κατασκευή σχεδιάστηκε για ομοιόμορφο επιφανειακά κατανομημένο κινητό φορτίο 15 psf, μονόπλευρο φορτίο 7,5 psf και μόνιμο φορτίο 30 psf.

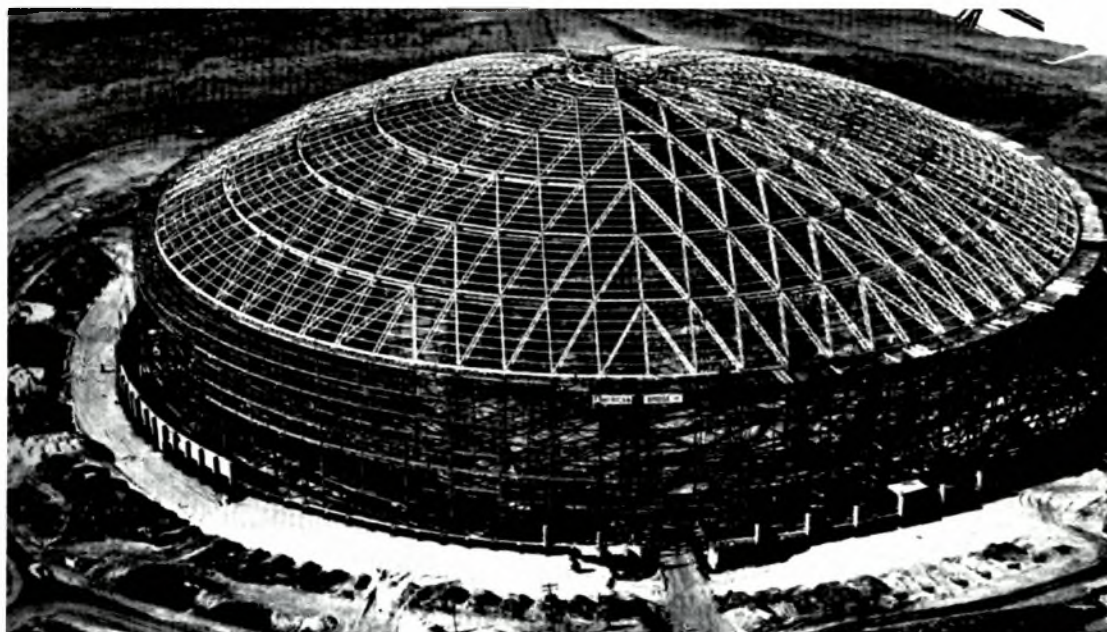
Οι συνθήκες φόρτισης ήταν περίπλοκες, ειδικά αν προσθέσουμε την ασύμμετρη διάταξη των εξοπλισμών, το ηχητικό δυναμικό φορτίο από τα αεροσκάφη, τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας της τάξης των 140 βαθμών κελσίου, το φορτίο ανέμου που ποικίλει γύρω από την κατασκευή και φυσικά το κινητό φορτίο.

Μια ενδιαφέρουσα λεπτομέρεια της κατασκευής αφορά στη λεπτομέρεια σύνδεσης των στύλων. Οι στύλοι μπορούν να κινηθούν ελεύθερα ακτινικά και είναι ημί-άκαμπτοι, ενώ εφάπτονται κάτω από τον δακτύλιο. Ο στύλος είναι πακτωμένος στο κατώτερο άκρο, 6 ft (=1,83 m) από τον δακτύλιο, ενώ είναι αρθρωμένος στο ανώτερο άκρο. Αυτός ο μηχανισμός εμποδίζει την δημιουργία πρωτοβάθμιων και δευτεροβάθμιων ροπών ανάμεσα στην οροφή και στην κατασκευή.

Η οροφή αποτελείται σχεδόν από 4.600 φεγγίτες (skylights), το σχέδιο των οποίων επιλέχθηκε έτσι ώστε να καλύπτονται οι ακουστικές ανάγκες της κατασκευής, αφήνοντας το πενήντα τις εκατό (50%) καλυμμένο και το υπόλοιπο διαθέσιμο για την είσοδο του φωτός. Οι φεγγίτες σχεδιάστηκαν με δύο στρώματα (layer) πλαστικού. Το εξωτερικό στρώμα είναι διαφανές για μέγιστη μετάδοση του φωτός, ενώ το εσωτερικό στρώμα έχει μεγάλο βαθμό μετάδοσης αλλά διασκορπίζει το διαχεόμενο φως σε όλα τα μέρη του γηπέδου.



Σχήμα 3.7 : Αρχικό στάδιο ανέγερσης



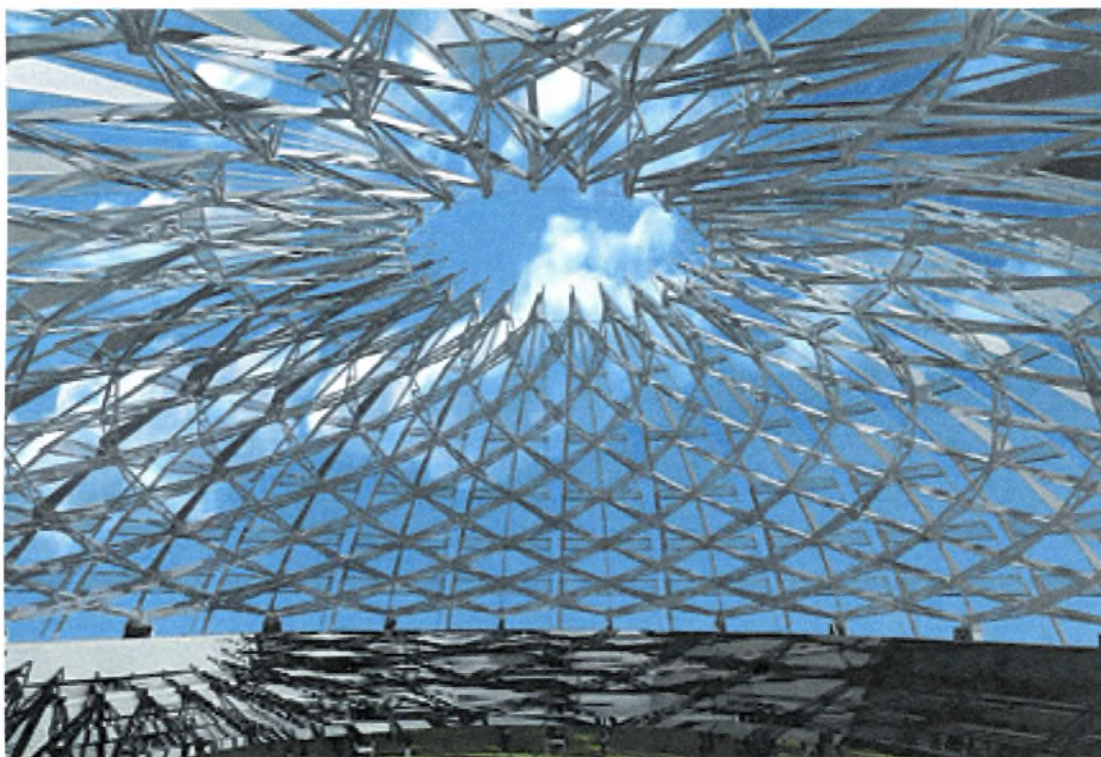
Σχήμα 3.8 : Στάδιο ανέγερσης πριν την τοποθέτηση της επικάλυψης

The Iris dome

Το Iris dome είναι μία πτυσσόμενη οροφή, η οποία παραμορφώνεται (συστολο-διαστέλλεται) όπως η ίριδα του ματιού, εξ' ου και η ονομασία του. Καθώς εκτείνεται και συμπύσσεται, μετασχηματίζει τον εσωτερικό χώρο από μέσα προς τα έξω. Η περίμετρος του παραμένει ουσιαστικά σταθερή και αμετάβλητη. Στην πλήρως ανεπτυγμένη κατάστασή του σχηματίζει ένα θόλο lamella, του οποίου τα μέλη απεικονίζουν ένα σχέδιο από αλληλοεμπλεκόμενες σπείρες.

Το Iris dome έχει άκαμπτες επικαλύψεις που συνδέονται πάνω στα μέλη της κατασκευής του. Τα τμήματα αυτά των επικαλύψεων γλιστρούν ομαλά το ένα πάνω στο άλλο, για να σχηματίσουν ένα συνεχόμενο «δέρμα», το οποίο καλύπτει το θόλο όταν είναι τελείως ανεπτυγμένος.

Το μοντέλο αυτό είχε εκτεθεί στο Μουσείο Μοντέρνας Τέχνης το 1994 (The Museum of Modern Art). Ένα μοντέλο μεγέθους 1,5 m παρουσιαζόταν ως έκθεμα, το οποίο είχε την ακριβεία ενός θόλου με ευδιάκριτες επικαλύψεις καθώς και ένα μοντέλο σταδίου. Επιπρόσθετα παρουσιαζόταν και ένα μεγάλο μέρος από ένα θόλο 20m. Και τα δύο αυτά εκθέματα, εκτείνονταν και συμπύσσονταν συνεχώς υπό μηχανικό έλεγχο.



Σχήμα 3.9 : Iris dome

➤ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4.1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Γενικά, οι μέθοδοι ανάλυσης μιας κατασκευής, ταξινομούνται είτε σε πειραματικές είτε σε αναλυτικές. Ενώ οι πειραματικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται σε μερικές περιπτώσεις, οι αναλυτικές είναι περισσότερο κοινές και πρακτικές, ειδικά σε συνδυασμό με τον μεγάλο αριθμό προγραμμάτων Η/Υ γενικής σκοπιμότητας. Για την ανάλυση, μορφώνεται κατ' αρχήν ένα ιδεατό μοντέλο της κατασκευής, με τα κατάλληλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και παραμέτρους υλικού. Κατόπιν επιλέγεται μια κατάλληλη αναλυτική μέθοδος για την πρόβλεψη της απόκρισης της κατασκευής.

Λόγω της ταχύτητας και της υπολογιστικής ισχύος των σημερινών Η/Υ, σε συνδυασμό με τον πολύ μεγάλο όγκο τεχνικού λογισμικού, η ελαστική στατική ανάλυση των δικτυωτών χωρικών κατασκευών έπαψε να αποτελεί πλέον πρόβλημα. Προσοχή δίνεται πλέον στην ελαστοπλαστική συμπεριφορά και τον λυγισμό των μελών και των υποσυστημάτων στα οποία ο λυγισμός ενδέχεται να οδηγήσει σε προοδευτική κατάρρευση της κατασκευής.

Γραμμική ανάλυση

Στα πλαίσια της γραμμικής ανάλυσης, το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο ενός μέλους ορίζεται από το φορτίο αξονικού λυγισμού του σε θλίψη ή το εφελκυστικό φορτίο διαρροής του. Απαραίτητη θεωρείται και η έρευνα της προ-και μεταλυγισμικής συμπεριφοράς των μελών υπό στατικά φορτία.

Ανάλυση ευστάθειας/αστάθειας

Αστάθεια ενός μεμονωμένου μέλους μπορεί να οδηγήσει σε προοδευτική κατάρρευση της κατασκευής μέσω ανακατανομής της έντασης και διαδοχικών φαινομένων λυγισμού ή διαρροής άλλων μελών του θόλου. Για να μην συμβεί κάτι τέτοιο, θα πρέπει να δοθεί λεπτομερής προσοχή στα ακόλουθα:

- i. Στις παραμέτρους που επηρεάζουν τον λυγισμό (λυγηρότητα μελών, καμπτική δυσκαμψία στα άκρα, σταθερότητα συνδέσεων – κόμβων, ατέλειες, στροφές κόμβων),
- ii. Στην ανακατανομή της έντασης αμέσως μετά το λυγισμό το 1^{ου} μέλους.

Μεταλυγισμική απόκριση

Ο μεγάλος βαθμός στατικής αοριστίας (στατική υπερεπάρκεια, redundancy) στους θόλους επιτρέπει τη δημιουργία ενός μηχανισμού ανακατανομής των φορτίων (δηλαδή της έντασης του φορέα) αν αστοχήσουν από λυγισμό ένα ή περισσότερα κρίσιμα μέλη. Αν ληφθεί υπ' όψη η μεταλυγισμική συμπεριφορά των θλιβόμενων στοιχείων, ενισχύεται η φέρουσα ικανότητα των θόλων, καθώς δεν απαιτείται πλήρης ανακατανομή της έντασης λόγω αστοχίας κάποιων μελών. Προκύπτει συνεπώς άμεσα το ερώτημα, περί του μεγέθους και του είδους της μεταλυγισμικής αυτής αντοχής. Συντηρητικά, η μεταλυγισμική αντοχή των μελών μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, παραδοχή που προσεγγίζει την πραγματικότητα για μέλη με μικρή ή μεσαία λυγηρότητα, ενώ αντίθετα πολύ λυγηρές ράβδοι-μέλη διατηρούν σημαντικό ποσοστό της αντοχής τους και μετά τον λυγισμό.

Ισοδύναμα μήκη λυγισμού

Οι περιορισμοί (restraints) στα άκρα των μελών, ουσιαστικά δηλαδή οι συνθήκες στήριξης αυτών, διαδραματίζουν θεμελιώδη ρόλο στον υπολογισμό της αντοχής έναντι λυγισμού. Η πραγματική συμπεριφορά των μεταλλικών κατασκευών είναι ημιάκαμπτη, ευρισκόμενη ενδιάμεσα της πλήρως δύσκαμπτης και της ιδεατά αρθρωτής. Μέλη με πεισμένα (πεπλατυσμένα) άκρα στους κόμβους έχουν το μεγαλύτερο ισοδύναμο μήκος λυγισμού k , μέλη με πλήρη διατομή στα άκρα έχουν την μικρότερη τιμή του k (ιδιαίτερα όταν οι συνδέσεις είναι συγκολλητές), ενώ ενδιάμεση είναι η τιμή του k για μέλη με μειωμένη διατομή στα άκρα τους. Σαν γενική οδηγία για την εφαρμογή σε ελαστική ανάλυση ευστάθειας συνιστώνται οι εξής τιμές του k :

Μέλη με πεπλατυσμένα άκρα $k = 0.95$

Μέλη με πλήρη διατομή άκρων $k = 0.90$

Μέλη με μειωμένη διατομή άκρων $k = 0.70$

Πάντως, για μια συντηρητική προσέγγιση της αντοχής σε λυγισμό, είναι προτιμότερο να γίνεται χρήση του θεωρητικού μήκους του κάθε μέλους.

4.2. ΠΡΟΟΔΕΥΤΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ

Διάφορες καταστάσεις, όπως υπερβολικές ταλαντώσεις, αρχική έλλειψη εφαρμογής, βλάβες – ατέλειες υλικού ή συνδέσεων καθώς και φαινόμενα λυγισμού, μπορούν να οδηγήσουν σε φυσικές (πραγματικές) βλάβες, σε μεγάλες (ανελαστικές) παραμορφώσεις ή υπερβάσεις τάσεων σε ένα ή περισσότερα μέλη της κατασκευής. Παρόλο όμως που οι βλάβες αυτές είναι αρχικά τοπικού χαρακτήρα, ενδέχεται να διαδοθούν και σε άλλο τμήμα του δομήματος, με αποτέλεσμα πλήρη κατάρρευση του. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός αστοχίας καλείται **προοδευτική κατάρρευση** και προέρχεται από την ανακατανομή της έντασης όταν κάποια μέλη αστοχούν και τα γειτονικά τους υπερφορτίζονται. Αποτέλεσμα είναι ανάπτυξη παραμενουσών τάσεων στα μέλη, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μη αναμενόμενη κατάρρευση για φορτία αρκετά μικρού μεγέθους.

Υπάρχουν τέσσερις (4) μορφές αστοχίας ενός μεμονωμένου μέλους, που μπορεί να προκαλέσουν την προοδευτική κατάρρευση ενός θόλου:

- i. λυγισμός ενός θλιβόμενου μέλους (με ή χωρίς μεταλυγισμική αντοχή),
- ii. διαρροή ενός εφελκυσμένου μέλους,
- iii. θραύση εφελκυσμένου μέλους ή σύνδεσης και
- iv. περιστροφική αστάθεια κόμβου (λόγω εκκεντροτήτων ή μειωμένης δυσκαμψίας συνδεόμενων μελών στον κόμβο).

Οι δύο πλέον διαδεδομένες πρακτικές μέθοδοι ανάλυσης θόλου για προοδευτική κατάρρευση είναι:

- I. η μέθοδος αφαίρεσης μελών και
- II. η μέθοδος παραμένουσας αντοχής μελών.

Και οι δύο μέθοδοι ακολουθούν κατά βάση την ίδια διαδικασία, που έχει ως εξής:

- (α) Ανάλυση της κατασκευής (μέσω γραμμικών ελαστικών διαδικασιών) για τον προσδιορισμό του πρώτου μέλους που θα αστοχήσει,
- (β) Ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο (I) πλήρης αφαίρεση του μέλους αυτού είτε (II) μείωση της αντοχής του μέλους που βρέθηκε στο βήμα (α)
- (γ) Εκ νέου ανάλυση του φορέα έτσι όπως μορφώθηκε μετά το βήμα (β) και προσδιορισμός του επόμενου αστοχούντος μέλους και

(δ) Επανάληψη των βημάτων (β) και (γ) μέχρι η κατασκευή να είναι έτοιμη να καταρρεύσει ή να μη δύναται να φέρει πλέον τα φορτία σχεδιασμού.

Δυναμικές επιρροές της αστοχίας μελών

Δύο βασικοί τύποι αιφνίδιας αστοχίας μελών μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές δυναμικές επιρροές ενός θόλου :

(α) ψαθυρή αστοχία εντός της ελαστικής περιοχής και

(β) ακαριαίος δυναμικός λυγισμός (dynamic snap-through buckling).

Ουσιαστικά, η αστοχία μελών που οδηγεί σε προοδευτική κατάρρευση είναι φαινόμενο δυναμικού χαρακτήρα. Το όλο επιστημονικό πρόβλημα παραμένει ακόμα ανοικτό, λόγω των πολλών παραμέτρων του και του έντονα μη γραμμικού χαρακτήρα του.

Αβεβαιότητες της κατασκευής

Στην πραγματικότητα τα διάφορα δομικά μέλη διαθέτουν πάντοτε κάποια αρχική γεωμετρική ατέλεια, εκκεντρότητες άκρων, αρχική καμπυλότητα και οι κόμβοι κάποιο βαθμό ευκαμψίας. Έτσι, οι διαστάσεις του δομήματος και οι ιδιότητες του υλικού κατασκευής του υπόκεινται σε διαφοροποιήσεις σε σχέση με τις ιδεατές τιμές σχεδιασμού. Επίσης και τα φορτία, όπως το χιόνι και το ίδιο βάρος (στατικά φορτία) καθώς και ο άνεμος (δυναμικό φορτίο) είναι γνωστά μέχρι κάποια ακρίβεια. Επίσης αβεβαιότητα προκαλούν τα ανθρώπινα σφάλματα κατά τη μελέτη και την ανέγερση.

Καταλήγοντας, λόγω όλων των παραπάνω, θέματα ιδιαιτέρου ενδιαφέροντος για έρευνα αποτελούν η προοδευτική κατάρρευση, οι επιρροές αρχικών ατελειών των μελών, η δυσκαμψία των κόμβων και τέλος οι ιδιότητες του υλικού.

Συνεπώς, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, καταλήξαμε στο να επιλύσουμε ένα μεταλλικό φολιδωτό θόλο lamella, φορτίζοντας τον με φορτίο χιονιού και ανέμου, ώστε να παρακολουθήσουμε και να αναλύσουμε τη συμπεριφορά της κατασκευής σε προοδευτική κατάρρευση. Η χαρακτηριστική εφαρμογή ακολουθεί στο παρακάτω κεφάλαιο.

➤ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

5.1.ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΦΟΛΙΔΩΤΟΥ ΘΟΛΟΥ (LAMELLA) ΑΠΛΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Γενική περιγραφή του έργου- γεωμετρικά στοιχεία

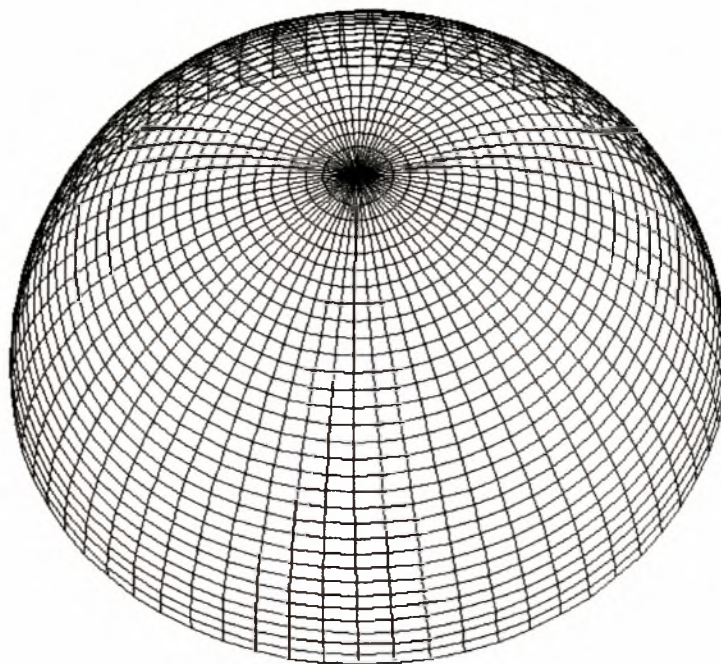
Η κατασκευή χωροθετείται στην περιοχή της Μαγνησίας. Ο θόλος έχει μορφή φολιδωτή (θόλος τύπου lamella) και είναι ενός στρώματος. Καταπονείται από στατικά φορτία, από το ίδιο βάρος του καθώς και από χιόνι, αλλά και από δυναμικά φορτία ανέμου, τα οποία θα εξεταστούν σε διάφορους συνδυασμούς. Τα φορτία χιονιού και ανέμου θεωρούνται, όπως έχει προαναφερθεί, ως οι πιο κρίσιμες συνθήκες φόρτισης.

Η κατασκευή μας είναι δικτυωτή (lattice), δηλαδή αποτελείται από διακριτά ευθύγραμμα ραβδωτά μέλη καθώς και από κόμβους εγγεγραμμένους σε ημισφαίριο. Τα φορτία τα δέχεται το δικτυωτό μέρος της κατασκευής, διότι το συνεχές είναι μια απλή επικάλυψη, που προφανώς δεν είναι σε θέση να αναλάβει φορτίο και επομένως δεν συνεργάζεται με το δικτύωμα για την ανάληψη φορτίων από κοινού.

Επιλέξαμε να μορφώσουμε το φορέα μας και να τον επιλύσουμε με απλά και βασικά προγράμματα που χρησιμοποιούνται από όλους τους μηχανικούς για μελέτες και κατασκευές. Η σωστή χρήση των προγραμμάτων αυτών ανήκει στις απαραίτητες γνώσεις που θα έπρεπε να έχει ο κάθε εν δυνάμει πολιτικός μηχανικός. Έτσι, αντί να πάρουμε το φορέα έτοιμο τον μορφώσαμε εμείς με το σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD 2002 και τον επιλύσαμε με το υπολογιστικό πρόγραμμα SAP2000 8 αντί για την χρήση προγραμμάτων όπως το ANSYS, Abacus, Adina και άλλα που προαναφέρθηκαν (κεφ.3), τον οποίων το κόστος αγοράς είναι γενικώς απαγορευτικό για το μηχανικό της καθημερινής πράξης.

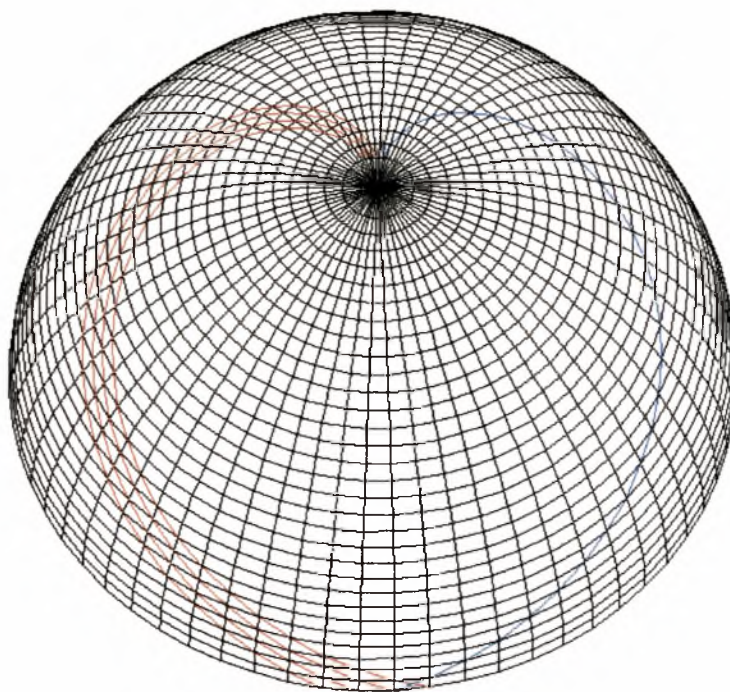
Σχεδίαση θόλου lamella

Ο υπό μελέτη θόλος έχει διάμετρο 50 m και ύψος 25 m. Έχει 64 ραβδώσεις (longitudinal – μεσημβρινούς) και 32 δακτυλίους (latitudinal – παράλληλοι). Στο AutoCAD από την εντολή Draw→Surfaces→3D Surfaces και από τον πίνακα 3D Objects διαλέγουμε το σχήμα του θόλου → Dome. Δίνονται τα δεδομένα που προαναφέρθηκαν όμως ο θόλος που σχηματίζεται είναι ένας θόλος με νευρώσεις (ribbed dome)(βλ. σχήμα 5.1).

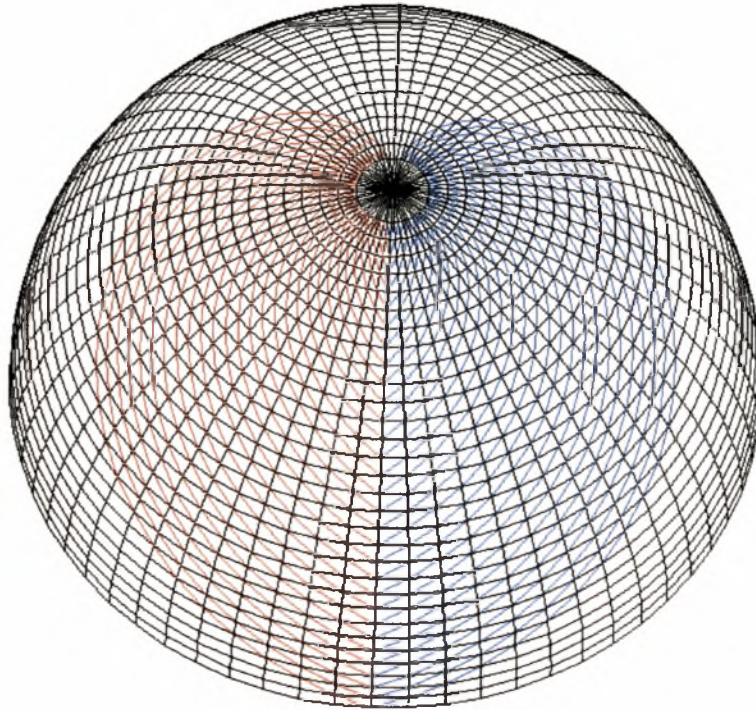


Σχήμα 5.1 : Θόλος με νευρώσεις

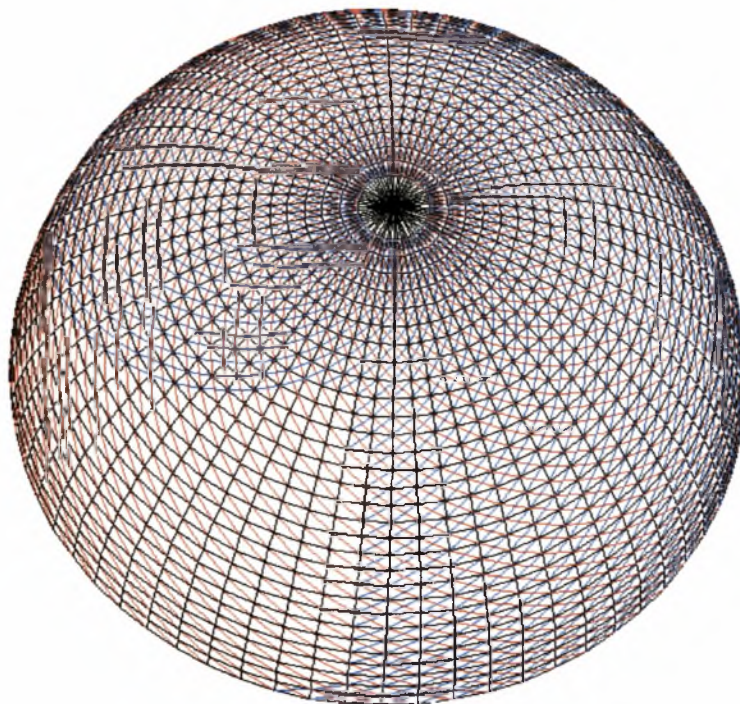
Έτσι, χρησιμοποιήθηκε ως βάση ο θόλος του σχήματος 5.1 και σχεδιάστηκε ο επιθυμητός φολιδωτός θόλος. Με την απλή εντολή line (γραμμή) δημιουργήσαμε τις διαγώνιους, από τη στέψη προς τον ισημερινό του θόλου σε δύο (2) διευθύνσεις σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού και αντίθετα, ενώνοντας τα σημεία που τέμνονται οι παράλληλοι με τις ραβδώσεις. Στα σχήματα που ακολουθούν παρατίθενται κάποια στάδια της σχεδίασης του θόλου lamella.



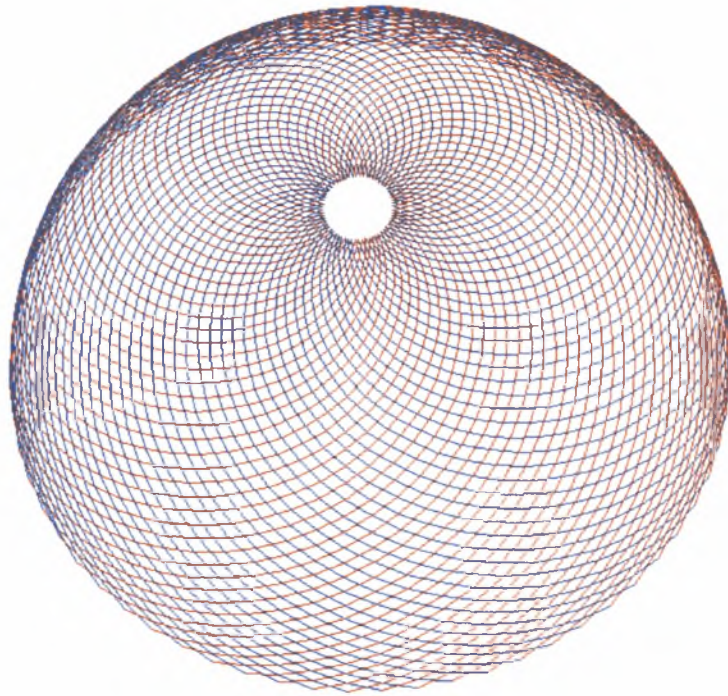
Σχήμα 5.2



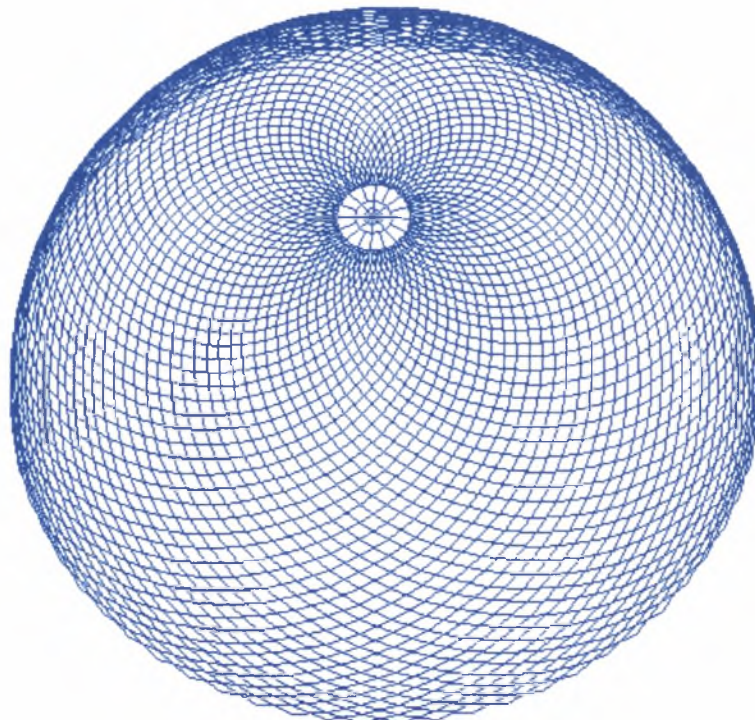
Σχήμα 5.3



Σχήμα 5.4



Σχήμα 5.5



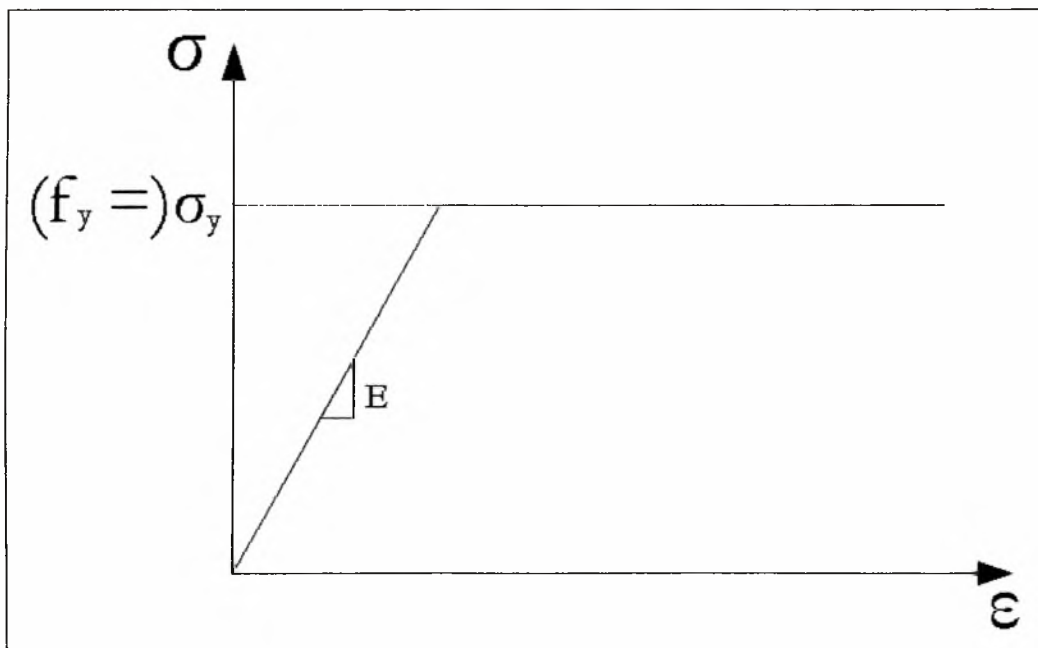
Σχήμα 5.6 : Ο τελικός φορέας

Στο σχήμα 5.6 εμφανίζεται ο φορέας όπως ακριβώς είναι στο τελικό σχέδιο. Το μοντέλο μας δεν έχει οριζόντιους δακτυλίους παρά μόνο στην κορυφή του, η οποία μορφώθηκε έτσι ώστε το μήκος του μικρότερου μέλους να είναι 0.2405 m, το οποίο

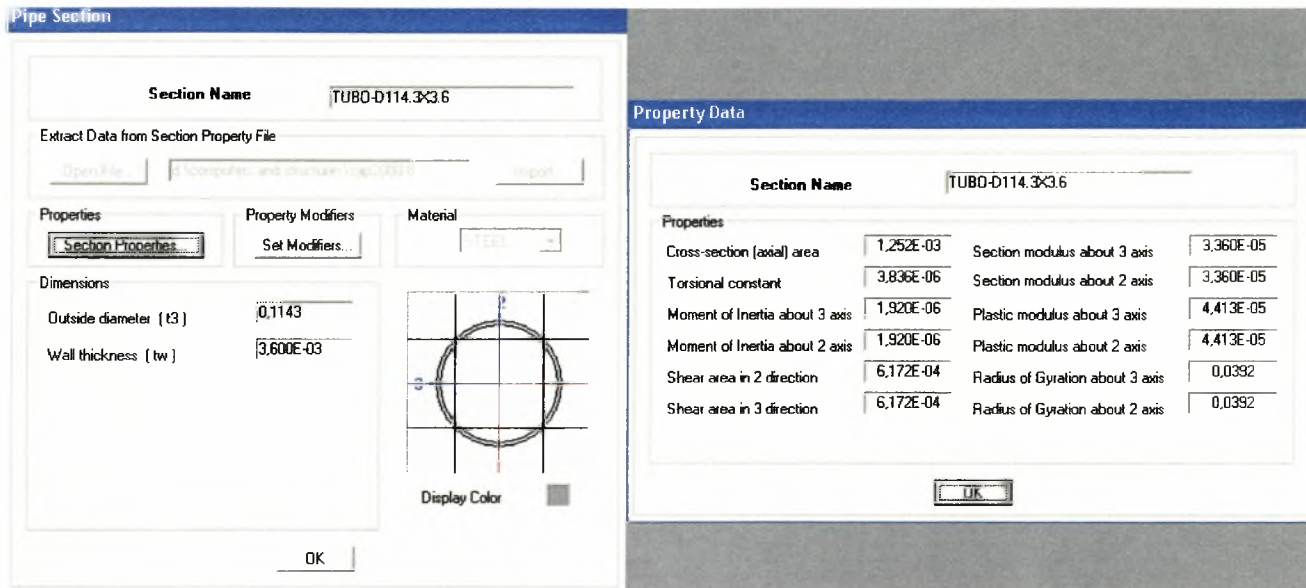
αντιστοιχεί στις ράβδους του δακτυλίου. Το μοντέλο μας αποτελείται από 7.800 ράβδους και από 3.929 κόμβους.

Επιλογή υλικών και διατομών

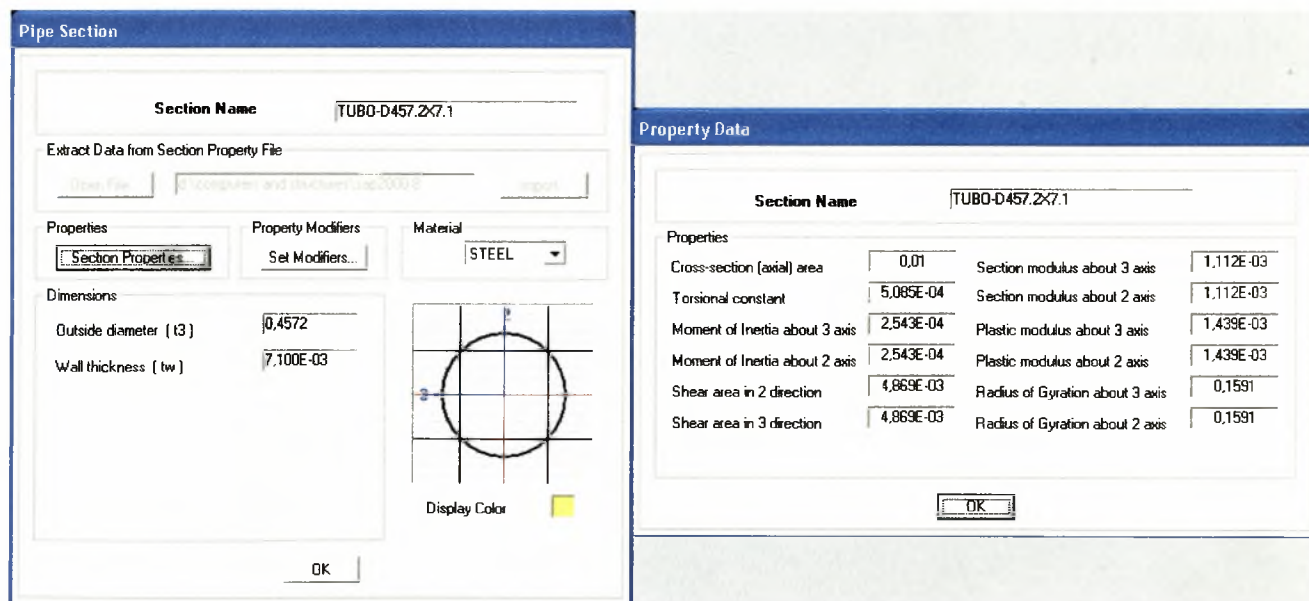
Μετά την ολοκλήρωση της μόρφωσης του θόλου σε περιβάλλον AutoCAD, το σχέδιο εισάχθηκε στο στατικό πρόγραμμα με το οποίο έγινε η επίλυση SAP 2000, με την εντολή File→Import→AutoCAD.dxf file. Αρχικά επιλέξαμε το υλικό της κατασκευής: Define→Materials→Steel με χαρακτηριστικά $f_y=355000$ KN/m² και $f_u=510000$ KN/m², για χάλυβα Fe 510 με μέτρο ελαστικότητας $E=2,1 \times 10^6$ MPa (N/mm²) και λόγο Poisson $\nu=0,30$ (διότι βρισκόμαστε στην ελαστική περιοχή). Στο τεχνικό λογισμικό που χρησιμοποιούμε η απόκριση του υλικού του χάλυβα θεωρείται ελαστική-ιδεατά πλαστική, σύμφωνα με το τυπικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων της εικόνας 5.1. Στη συνέχεια επιλέξαμε διατομές για τις ράβδους (Assign→Frame→Sections). Οι διατομές ήταν ευρωπαϊκών προδιαγραφών (αρχείο euro.pro). Όλα τα μέλη έχουν την ίδια κοίλη κυκλική διατομή (pipe) με χαρακτηριστικά στοιχεία TUBO-D114,3×3,6 (στη συνέχεια χρησιμοποιήσαμε και την διατομή TuboD457,2×7,1 για τους λόγους που θα αναφερθούν), των οποίων τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στις εικόνες 5.2 και 5.3. Τέλος, οι στηρίξεις των κατακόρυφων στοιχείων λήφθηκαν ως πλήρεις αρθρώσεις, με την εντολή Assign→Joint→Restrains, δηλαδή απαγορεύουν τις μετατοπίσεις κατά U_x , U_y , U_z και επιτρέπουν τις στροφές r_x , r_y , r_z .



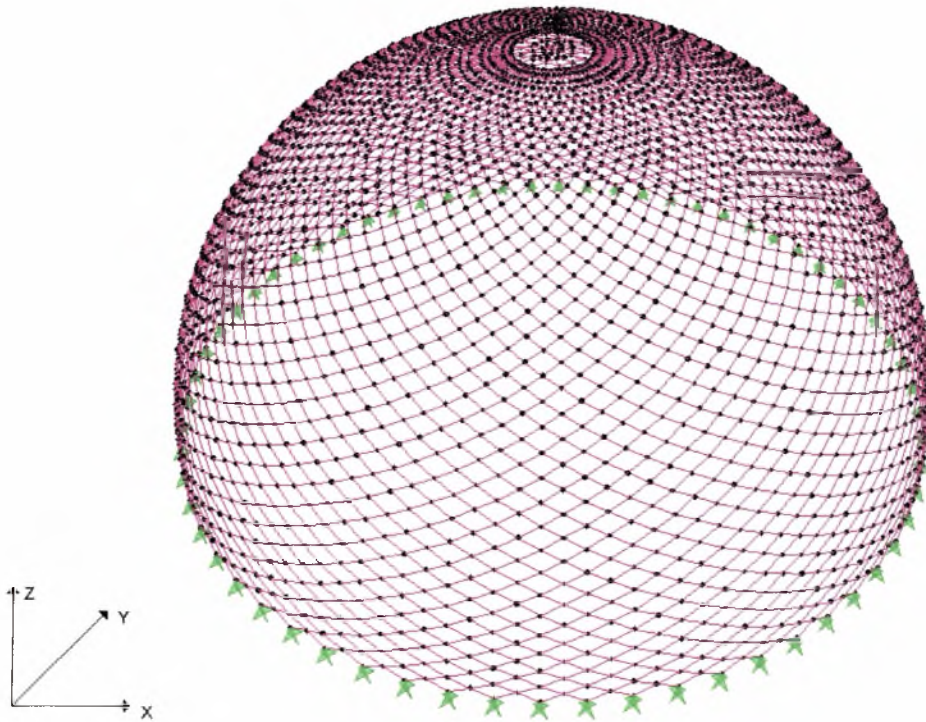
Εικόνα 5.1: Τυπικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα Fe510



Εικόνα 5.2



Εικόνα 5.3



Σχήμα 5.7 : Ο φορέας με τις στηρίξεις του

5.2.ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Μετά την ολοκλήρωση της επιλογής των διατομών της κατασκευής, υπολογίσαμε τα φορτία λόγω χιονιού και ανέμου, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1. Τα μόνιμα φορτία των ράβδων υπολογίζονται αυτόματα από το SAP, ενώ δε λάβαμε κάποια ιδιαίτερη επιπλέον φόρτιση λόγω π.χ. κάποιας εσωτερικής εγκατάστασης (φωτισμός κλπ).

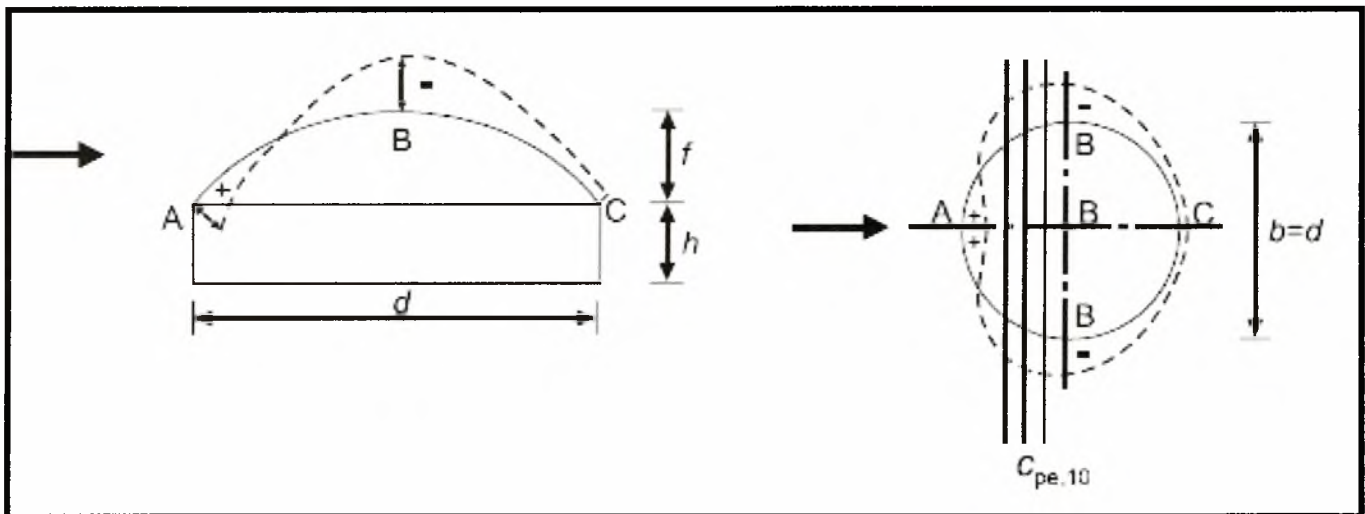
Υπολογισμός φορτίων λόγω ανέμου

Επιδιώκουμε να αναλύσουμε τον φορέα για τις δυσμενέστερες φορτίσεις. Έτσι επιλέγουμε την μέγιστη ταχύτητα του ανέμου $V_b = 120 \text{ km/h} = 33,33 \text{ m/sec}$.

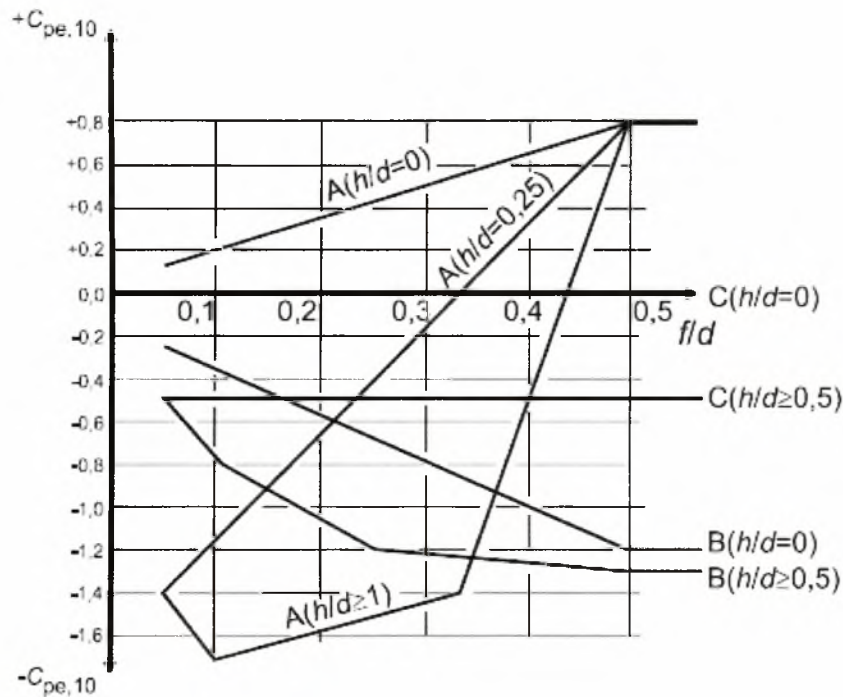
Από τον Ευρωκώδικα 1 (από το παράρτημα που αφορά τον άνεμο) και για φορτίο ανέμου σε θόλους με κυκλική βάση δίνεται το παρακάτω σχήμα 5.8, στο οποίο παρατηρούμε τον τρόπο δράσης του ανέμου πάνω στην κατασκευή μας. Αρχικά έχουμε την περιοχή Α όπου ο άνεμος ασκεί πίεση στον θόλο και τις περιοχές Β, C που ασκείται υποπίεση. Η κατασκευή μας στηρίζεται

κατευθείαν στο έδαφος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.7 άρα το $h=0$ m, ενώ το $d=50$ m και το $f=25$ m. Επίσης από το διάγραμμα που ακολουθεί (σχήμα 5.9) παίρνουμε τις τιμές για το $C_{pe,10}$ για τους τρεις διαφορετικούς τρόπους επίδρασης του ανέμου στην κατασκευή μας.

$C_{pe,10}$: είναι ο συντελεστής πίεσης (ανέμου) για κτίρια, ο οποίος εξαρτάται από το μέγεθος της φορτιζόμενης επιφάνειας (αναφέρεται σε μεγάλη επιφάνεια). Χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό των συνολικών φορτίων ως προς τη συμπεριφορά της κατασκευής.



Σχήμα 5.8 : Τρόπος δράσης του ανέμου



Σχήμα 5.9 : Διάγραμμα των προτεινόμενων τιμών του συντελεστή εξωτερικής πίεσης για θόλους με κυκλική βάση

Λόγω των τιμών που έχει, δηλαδή $h=0$ m, $d=50$ m και $f=25$ m, ο λόγος $h/d=0$ και $f/d=0,5$. Έτσι από το παραπάνω διάγραμμα παίρνουμε για τον τρόπο επιρροής :

- $A \rightarrow C_{pe,10} = +0,8$
- $B \rightarrow C_{pe,10} = -1,2$
- $C \rightarrow C_{pe,10} = 0,5$

Όπου το $C_{pe,10}$ είναι σταθερό για κάθε επίπεδο του φορέα που είναι κάθετο στον άνεμο.

Από τον Ευρωκώδικα 1 για την θεμελιώδη ταχύτητα της πίεσης q_b έχω : $q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_b^2$
g

όπου $\rho =$ η πυκνότητα του αέρα = $1,25 \text{ kg/m}^3$ και $V_b = 33,33 \text{ m/sec}$ και $g = 9,81 \text{ m/sec}^2$

άρα $q_b = 0,5 \cdot 1,25 \cdot 33,33^2 / 9,81 = 70,77 \text{ kg/m}^2 = 0,707 \text{ KN/m}^2$

από το διάγραμμα που ακολουθεί (βλ. σχήμα 5.10) και για την καμπύλη (IV), η οποία σχετίζεται με την κατηγορία εδάφους (διαλέξαμε IV, δηλαδή περιοχή όπου τουλάχιστον το 15% της επιφάνειας καλύπτεται από κτίρια όπου το μέσο ύψος τους υπερβαίνει τα 15 m) παίρνουμε τις τιμές για το

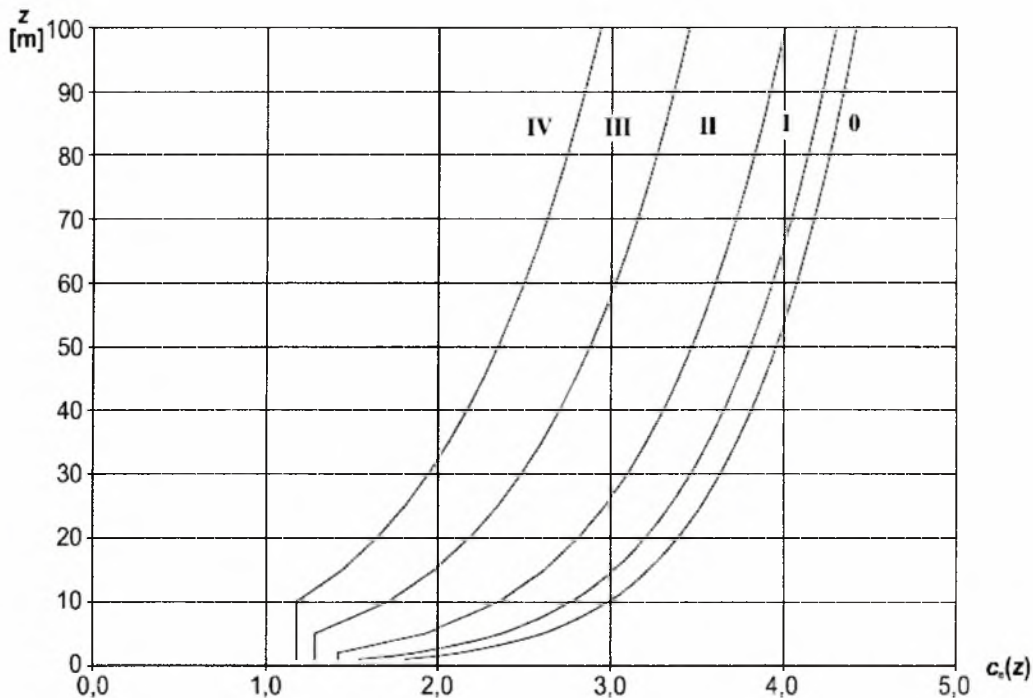
συντελεστή $C_e(z)$ που μας χρειάζεται, όπως φαίνεται από τις εξισώσεις που ακολουθούν. Οι τιμές, τόσο του συντελεστή $C_e(z)$ όσο και τα αποτελέσματα των εξισώσεων που ακολουθούν που καταλήγουν στην πίεση του ανέμου ανά m^2 , παρουσιάζονται στον πίνακα του excel (βλ. πίνακα 5.1).

$$C_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \Rightarrow q_p(z) = q_b \cdot C_e(z)$$

όπου q_p είναι η μέγιστη πίεση και z το ύψος προς τα άνω μετρούμενο από την επιφάνεια του εδάφους.

Η πίεση του ανέμου που δρα στην εξωτερική επιφάνεια w_e ισούται με :

$$w_e = q_p(z) \cdot C_{pe,10}$$



Σχήμα 5.10 : Διάγραμμα του συντελεστή $C_e(z)$

Πίνακας με τα φορτία ανέμου							
					Ζώνη A	Ζώνη B	Ζώνη C
z(m)	ce(z)	q _b (kN/m ²)	q _p (z) (kN/m ²)	C _{pe,10} =	0,8	-1,2	0,5
0	1,18	0,707	0,834		0,667408	-1,00111	0,41713
2,5	1,18	0,707	0,834		0,667408	-1,00111	0,41713
5	1,18	0,707	0,834		0,667408	-1,00111	0,41713
7,5	1,18	0,707	0,834		0,667408	-1,00111	0,41713
10	1,18	0,707	0,834		0,667408	-1,00111	0,41713
12,5	1,30	0,707	0,919		0,735280	-1,10292	0,45955
15	1,42	0,707	1,004		0,803152	-1,20473	0,50197
17,5	1,55	0,707	1,096		0,876680	-1,31502	0,54793
20	1,64	0,707	1,159		0,927584	-1,39138	0,57974
22,5	1,71	0,707	1,209		0,967176	-1,45076	0,60449
25	1,80	0,707	1,273		1,018080	-1,52712	0,63630

Πίνακας 5.1 : Υπολογισμός φορτίων ανέμου σε kN/m²

Τα φορτία υπολογίστηκαν ως επιφανειακά και στη συνέχεια αφού υπολογίσουμε το εμβαδό επιρροής κάθε κόμβου θα τα υπολογίσουμε και ως επικόμβια, καθόσον με αυτά θα φορτίσουμε το φορέα.

Εμβαδό επιρροής

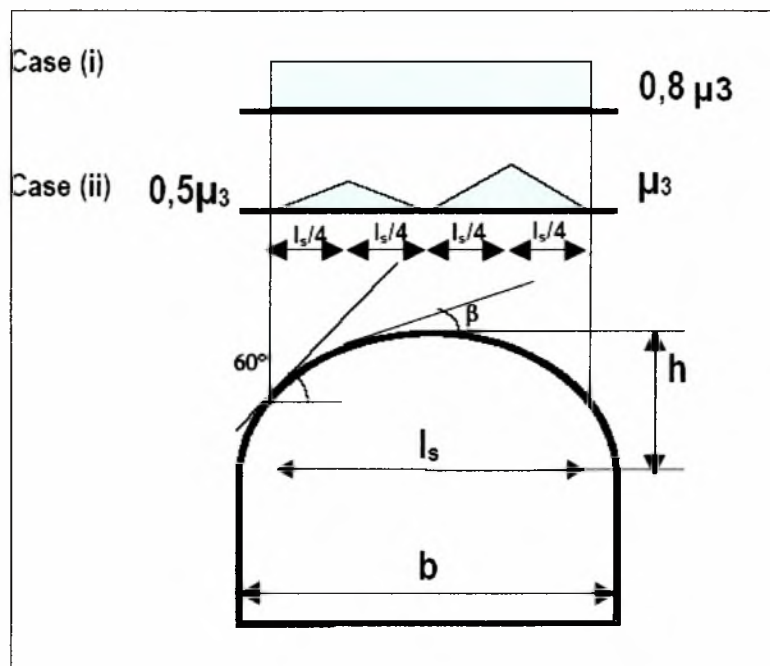
Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7 δημιουργούνται ρόμβοι ανάμεσα στους κόμβους. Αν χωρίσουμε τους ρόμβους αυτούς σε τέσσερα (4) τρίγωνα με βάση τις διαγώνιους τους, τότε μπορούμε να πούμε ότι ο κάθε κόμβος επηρεάζεται από τέσσερα (4) τέτοια τρίγωνα, ένα (1) από κάθε ρόμβο που σχηματίζεται γύρω του. Μετρήσαμε τα μήκη των διαγώνιων στο AutoCAD και η οριζόντια είναι 2,10 m και η κατακόρυφη 1,05 m. Άρα το εμβαδόν σε κάθε τρίγωνο είναι : $A_1 = [(1,05/2) * (2,10/2)] / 2 = 0,2756 \text{ m}^2$, έτσι το εμβαδόν επιρροής σε κάθε κόμβο είναι $4 * A_1 = 4 * 0,2756 = 1,1 \text{ m}^2$. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα φορτία του ανέμου σε kN.

z(m)	εμβαδό επιρροής(m ²)	Ζώνη Α (kN)	Ζώνη Β (kN)	Ζώνη C (kN)
0	1,1	0,734	-1,101	0,459
2,5	1,1	0,734	-1,101	0,459
5	1,1	0,734	-1,101	0,459
7,5	1,1	0,734	-1,101	0,459
10	1,1	0,734	-1,101	0,459
12,5	1,1	0,809	-1,213	0,506
15	1,1	0,883	-1,325	0,552
17,5	1,1	0,964	-1,447	0,603
20	1,1	1,020	-1,531	0,638
22,5	1,1	1,064	-1,596	0,665
25	1,1	1,120	-1,680	0,700

Πίνακας 5.2 : Φορτία ανέμου σε kN

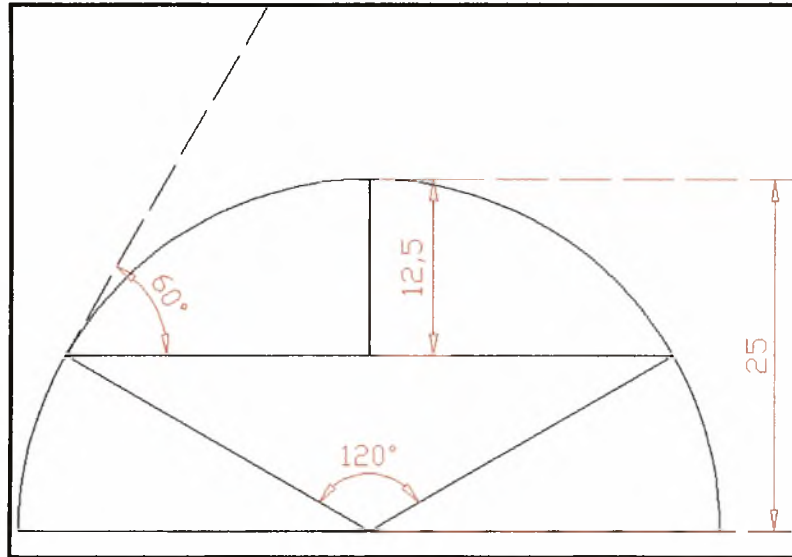
Υπολογισμός φορτίων λόγω χιονιού

Θεωρήσαμε τη δυσμενέστερη ζώνη για το χιόνι στον Ελλαδικό χώρο, Ζώνη 4, στην οποία από τον Ευρωκώδικα 1 πήραμε το στοιχείο της μέσης πυκνότητας χιονιού 1,7 kN/m². Για κυλινδρικές στέγες συνεπώς και θόλους (domes) θα έχουμε χιόνι για ένα h τέτοιο ώστε το χιόνι να μπορεί να σταθεί εκεί. Το h αυτό, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1, μας το δίνει η επαφτομένη στην επιφάνεια που μας ενδιαφέρει. Όταν η γωνία β που σχηματίζεται είναι μικρότερη από 60° (β ≤ 60°), τότε θα υφίσταται φορτίο χιονιού.



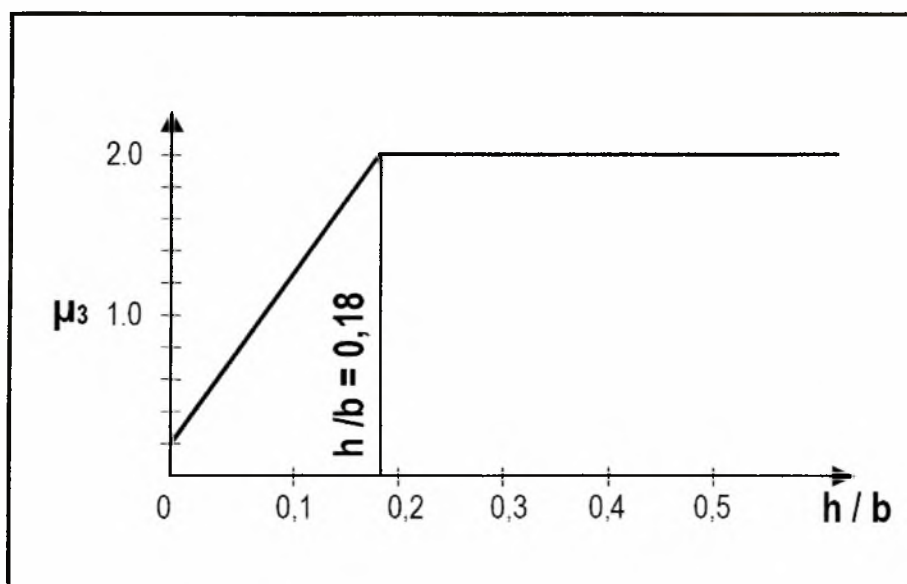
Σχήμα 5.11 : Συντελεστής σχήματος για φορτίο χιονιού σε κυλινδρικές στέγες

Γνωρίζουμε ότι η επίκεντρη γωνία ισούται με το διπλάσιο της β . Έτσι δημιουργήσαμε στο AutoCAD ένα σχέδιο (βλ. σχήμα 5.12) με τις πραγματικές διαστάσεις και ορίσαμε το ύψος h στο οποίο το χόλι στέκεται. Το ύψος αυτό είναι 12,5 m.



Σχήμα 5.12 : Υπολογισμός ύψους h

Γνωρίζουμε ότι το ύψος h ισούται με 25 m και η διάμετρος b ισούται με 50 m, άρα ο λόγος $h/b = 0,5$. Από το σχήμα 5.13, που ακολουθεί, βρίσκουμε το συντελεστή $\mu_3 = 2$.



Σχήμα 5.13 : Συντελεστής σχήματος για κυλινδρικές στέγες με διαφορετική τιμή ύψους και ανοίγματος (για $\beta \leq 60^\circ$)

Από το σχήμα 5.11 θα εξετάσουμε τη δυσμενέστερη περίπτωση για φορτίο χιονιού μεταξύ της περίπτωσης i (case i), για κατανεμημένο φορτίο χιονιού και της περίπτωσης ii (case ii), για συγκεντρωμένο φορτίο.

i. $0,8 \cdot \mu_3 = 0,8 \cdot 2 = 1,6$

ii. $0,5 \cdot \mu_3 = 0,5 \cdot 2 = 1$

Προφανώς η δυσμενέστερη περίπτωση είναι για κατανεμημένο φορτίο, άρα θα χρησιμοποιήσουμε τον συντελεστή 1,6. Η μέση πυκνότητα χιονιού είναι $1,7 \text{ kN/m}^2$, έτσι το φορτίο χιονιού ισούται με $1,6 \cdot 1,7 = 2,72 \text{ kN/m}^2$. Το κατανεμημένο φορτίο που υπολογίσαμε θα το πολλαπλασιάσουμε με το εμβαδό επιρροής $1,1 \text{ m}^2$, επομένως το επικόμβιο φορτίο χιονιού είναι ίσο με $2,72 \cdot 1,1 = 2,992 \text{ kN}$. Το φορτίο του χιονιού το θεωρούμε P ενώ του ανέμου $\alpha \cdot P$ (όπου α ποσοστό ανέμου/χιόνι, $\alpha \leq 1$). Έτσι στον πίνακα 5.3 που ακολουθεί υπολογίζεται το φορτίο χιονιού καθώς επίσης και τα ποσοστά του ανέμου ως προς αυτό.

z(m)	χιόνι (kN/m ²)	χιόνι (kN)	Ζώνη A	Ζώνη B	Ζώνη C
0	2,72	2,992	0,245370588	-0,368055882	0,153356618
2,5	2,72	2,992	0,245370588	-0,368055882	0,153356618
5	2,72	2,992	0,245370588	-0,368055882	0,153356618
7,5	2,72	2,992	0,245370588	-0,368055882	0,153356618
10	2,72	2,992	0,245370588	-0,368055882	0,153356618
12,5	2,72	2,992	0,270323529	-0,405485294	0,168952206
15	2,72	2,992	0,295276471	-0,442914706	0,184547794
17,5	2,72	2,992	0,322308824	-0,483463235	0,201443015
20	2,72	2,992	0,341023529	-0,511535294	0,213139706
22,5	2,72	2,992	0,355579412	-0,533369118	0,222237132
25	2,72	2,992	0,374294118	-0,561441176	0,233933824

Πίνακας 5.3

Ως αρχική συγκριτική τιμή για τον υπολογισμό-εισαγωγή των φορτίων χιονιού και ανέμου στην κατασκευή και την μετέπειτα ποσοστιαία αναγωγή τους, επιλέγεται η τιμή $P = N_{pl,Rd}$, όπου $N_{pl,Rd}$ = η οριακή εφελκυστική αντοχή της επιλεγείσας διατομής, η οποία ισούται (από Ευρωκώδικα 3) με $A \cdot f_y / \gamma_{MO}$ όπου :

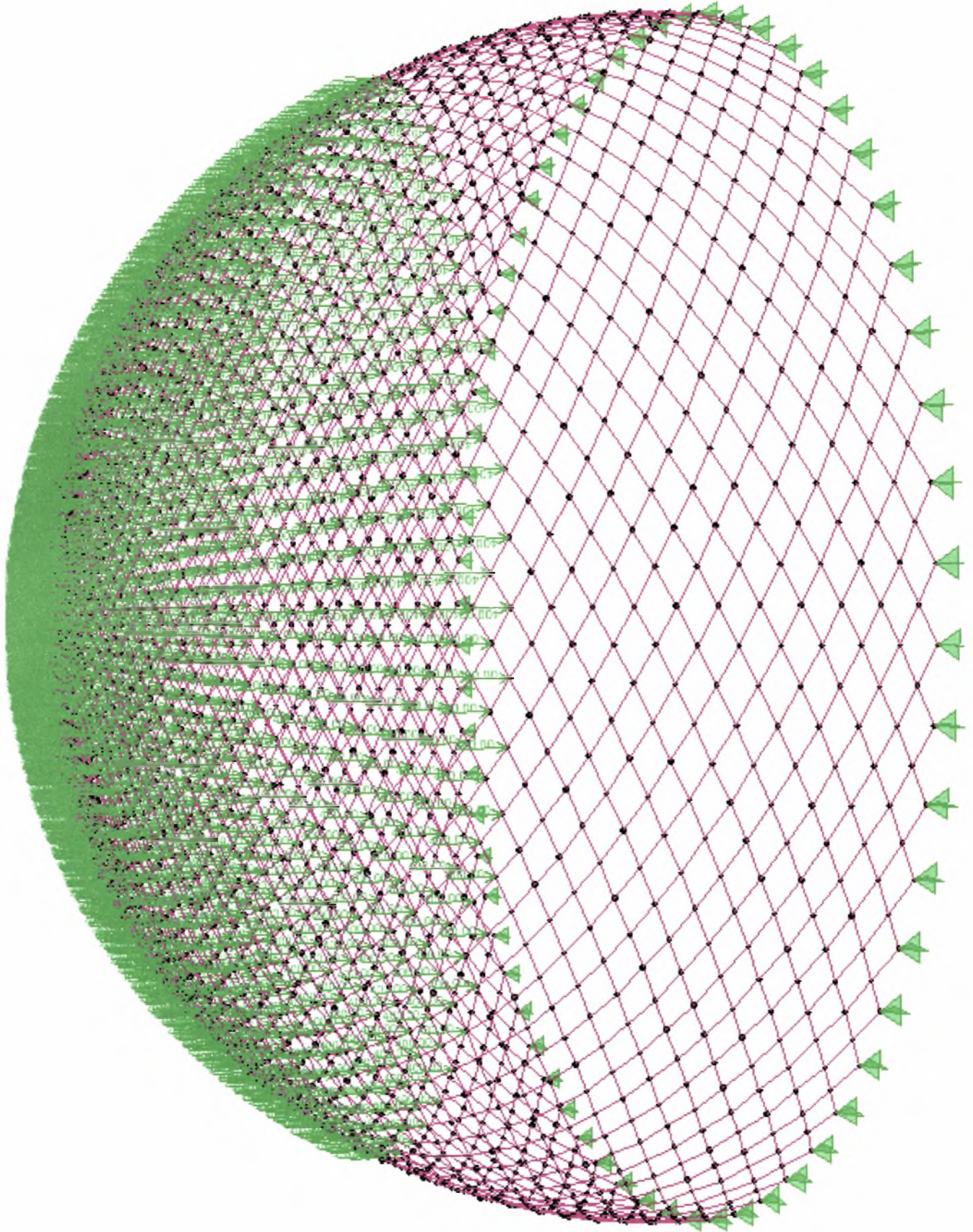
- ✓ $A = 12,52 \text{ cm}^2$ (το εμβαδό της διατομής που έχει επιλεχθεί)
- ✓ $f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2$ (για κατηγορία χάλυβα Fe 510) και
- ✓ $\gamma_{MO} = 1,1$ (μερικώς συντελεστής ασφάλειας)

οπότε $N_{p,rd} = 404 \text{ kN} \approx 400 \text{ kN}$. Έτσι, θεωρώντας φορτίο χιονιού ίσο με 400 kN πολλαπλασιάσαμε τα ποσοστά του ανέμου με αυτό για τον υπολογισμό του αντίστοιχου φορτίου.

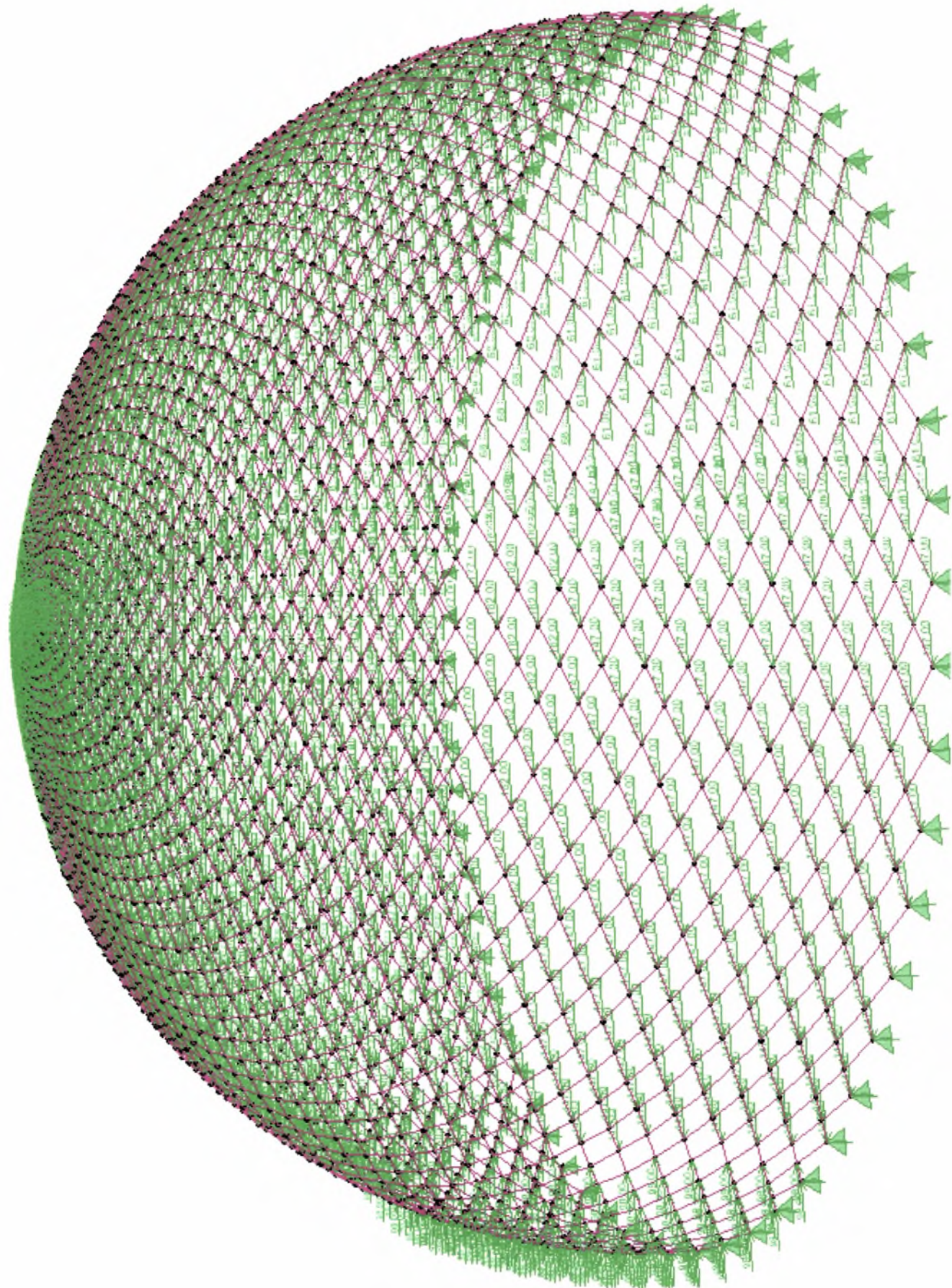
z(m)	φορτίο χιονιού kN	φορτίο ανέμου ζώνη A	φορτίο ανέμου ζώνη B	φορτίο ανέμου ζώνη C
0	400	98	-147	61
2,5	400	98	-147	61
5	400	98	-147	61
7,5	400	98	-147	61
10	400	98	-147	61
12,5	400	108	-162	68
15	400	118	-177	74
17,5	400	129	-193	81
20	400	136	-205	85
22,5	400	142	-213	89
25	400	150	-225	94

Πίνακας 5.4 : Τελικά φορτία φορέα

Με αυτά τα φορτία φορτίσαμε το φορέα μας αρχικά. Από τον Ευρωκώδικα 1 (σχήμα 5.8 αριστερά) υπολογίσαμε και βρήκαμε ότι καθώς η κατασκευή θα δέχεται άνεμο από την μία πλευρά (έστω κατά z-x) ίσο με αυτόν της ζώνης A, για ύψος ίσο με τα 2/5 δηλαδή 10m. Για το υπόλοιπο ύψος 3/5 δηλαδή 15m θα δέχεται φορτίο ίσο με αυτό της ζώνης B. Επίσης από την αντίθετη πλευρά δηλαδή κατά (z-y) θα δέχεται φορτίο ίσο με της ζώνης C. Από το σχήμα 5.8 (δεξιά) υπολογίστηκε και το πλάτος της ζώνης όπου της A είναι 5,70 m, της B είναι 19,30 m και της C είναι 25 m. Η εισαγωγή των δυνάμεων στο φορέα έγινε με την εντολή Assign→Joint Loads→Forces, επιλογή των σημείων που θέλουμε και φόρτιση με την τιμή της δύναμης. Ακολουθούν οι τρόποι φόρτισης του φορέα.



Σχήμα 5.14 : Φορτίο χιονιού



Σχήμα 5.15 : Φορτία ανέμου

➤ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

6.1. ΕΠΙΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ ΓΙΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥΣ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ

Σκοπός μας είναι να παρακολουθήσουμε την προοδευτική κατάρρευση του φορέα εξαιτίας των φορτίων που ασκούνται καθώς και λόγω φαινόμενων τοπικού ή και καθολικού λυγισμού. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 4.2, η προοδευτική κατάρρευση προέρχεται από την ανακατανομή της έντασης όταν κάποια από τα μέλη αστοχούν και τα γειτονικά τους υπερφορτίζονται. Αποτέλεσμα είναι ανάπτυξη παραμενουσών τάσεων στα μέλη, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μη αναμενόμενη κατάρρευση για φορτία αρκετά μικρού μεγέθους (P_{cr}).

Έτσι, αφού φορτίσαμε τον φολιδωτό θόλο μας με τις διαφορετικές περιπτώσεις ανεμοπιέσεων και χιονιού (load cases) παίρνοντας ως συντελεστή το 1 για το ίδιο βάρος και το 0 για το χιόνι και τον άνεμο, δημιουργήσαμε συνδυασμούς φορτίσεων (combinations) παίρνοντας ως συντελεστές το 1,35 για το ίδιο βάρος, για τον άνεμο το 0,9 και για το χιόνι το 1,5. Στη συνέχεια, από την εντολή Define → Analyses Cases, εισάχθηκαν οι φορτίσεις για τις οποίες θέλουμε να αναλυθεί ο φορέας καθώς και το ποσοστό της φόρτισης ($\alpha = P / P_{cr}$). Επίσης προστέθηκε και μια περίπτωση λυγισμού «buckling» μέσω της οποίας θα μελετήσουμε την τοπική λυγισμική συμπεριφορά των μελών.

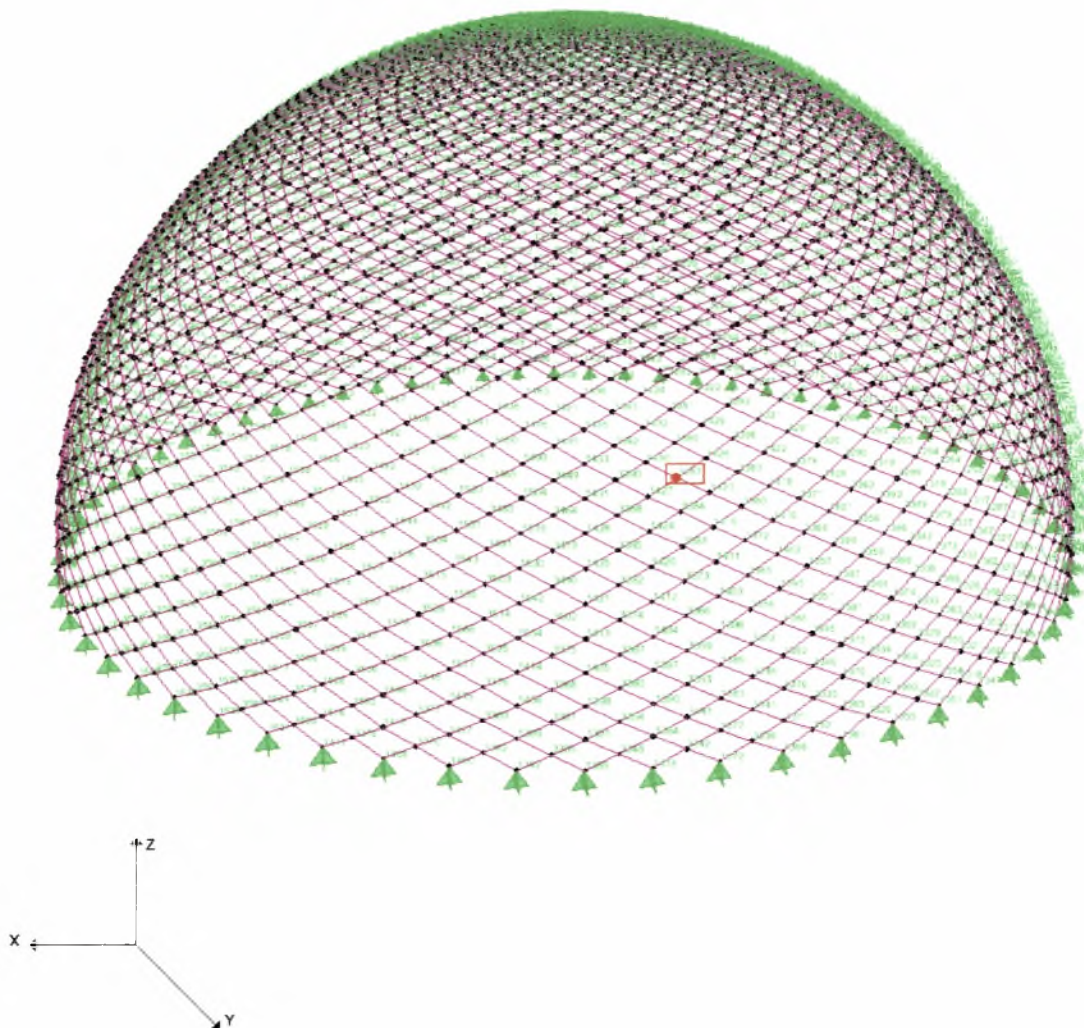
Μελέτη προοδευτικής κατάρρευσης λόγω φορτίων ανέμου

Δημιουργήσαμε στο Analyses Cases μόνο τις περιπτώσεις του ανέμου, του ίδιου βάρους της κατασκευής και του λυγισμού. Επίσης το συνδυασμό (combination) 1,35*ίδιο βάρος φορέα + 0,9*φορτίο ανέμου.

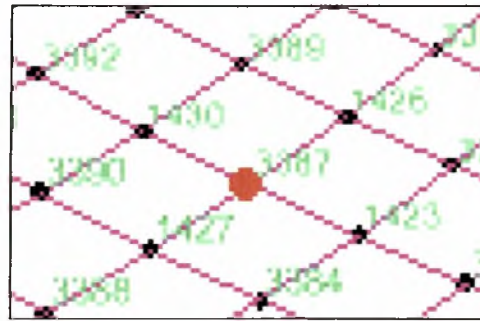
Στη συνέχεια επιλέξαμε τον κανονισμό με τον οποίο θα γινόταν η επίλυση (Option → Preferences → Steel Frame Design → Eurocode 3). Ορίσαμε το φορέα σαν χωρικό πλαίσιο (Analyze → Set Analysis Options → Space Truss) και κάναμε την επίλυση του φορέα (Run Analysis). Ο σχεδιασμός και ο έλεγχος της κατασκευής μας έγινε με την επιλογή Design → Steel Frame Design → Start Design/Check of Structure. Μετά το πέρας του ελέγχου εμφανίζεται ο φορέας χρωματισμένος με μία κλίμακα από τιμές φόρτισης. Όσες ράβδοι έχουν τιμή πάνω από 1 είναι υπερφορτισμένες, έχουν δηλαδή διαρρεύσει.

Η έρευνα μας θα ακολουθήσει την μέθοδο αφαίρεσης των μελών όπως έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 4.2. Για την πραγματοποίηση αυτού του σκοπού ερευνήσαμε και βρήκαμε πιο είναι το ποσοστό εκείνο της φόρτισης για το οποίο ο φορέας έχει όσο το δυνατόν λιγότερες ράβδους υπερφορτισμένες (που έχουν διαρρεύσει).

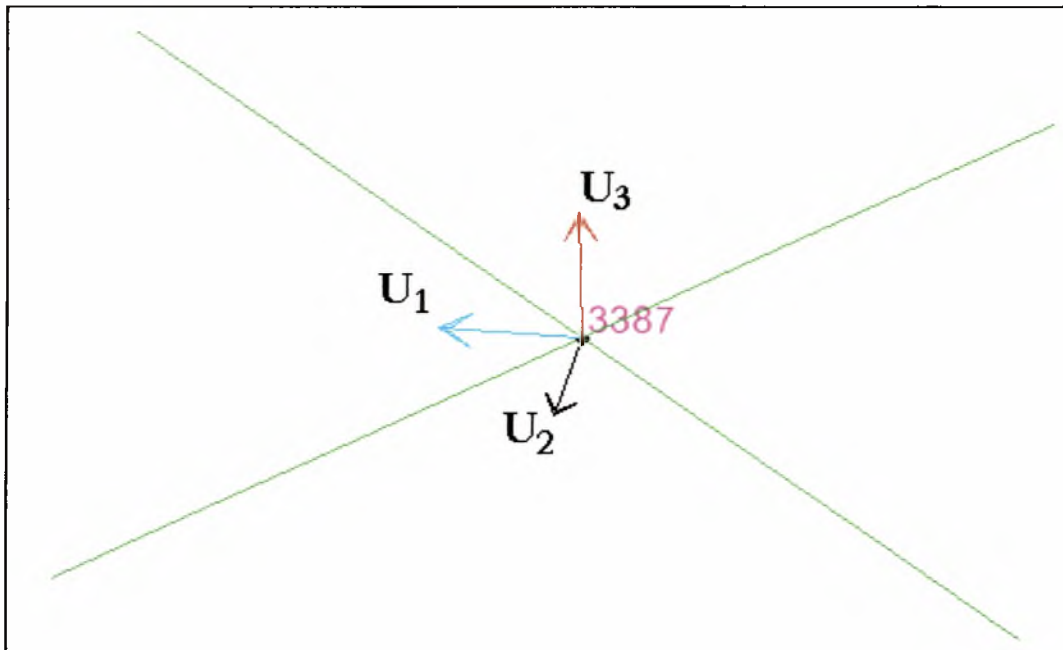
Έτσι, ξεκινήσαμε από το ποσοστό 0,002 του P το οποίο εισήγαμε από Define→Analyses Cases, επιπλέον ελέγχουμε και για τυχόν φαινόμενο τοπικού λυγισμού (buckling) με τον συνδυασμό Acase1 (ίδιο με το αντίστοιχο combination του comb1 αλλά για ανάλυση καθολικής ευστάθειας μέσω του λογισμικού). Στη συνέχεια ξεκινάμε να αφαιρούμε τις ράβδους που έχουν διαρρεύσει, ώστε να δημιουργείται ανακατανομή της έντασης και να φτάσουμε στο φαινόμενο της προοδευτικής κατάρρευσης. Συγχρόνως παρακολουθούμε και την μετατόπιση του κόμβου 3.387, η οποία θα παρουσιαστεί με μορφή διαγραμμάτων και για τις τρεις διευθύνσεις X,Y,Z, με σκοπό να παρατηρηθεί κάποια έντονη ποιοτική αλλαγή, η οποία να σχετίζεται άμεσα με το εν λόγω φαινόμενο.



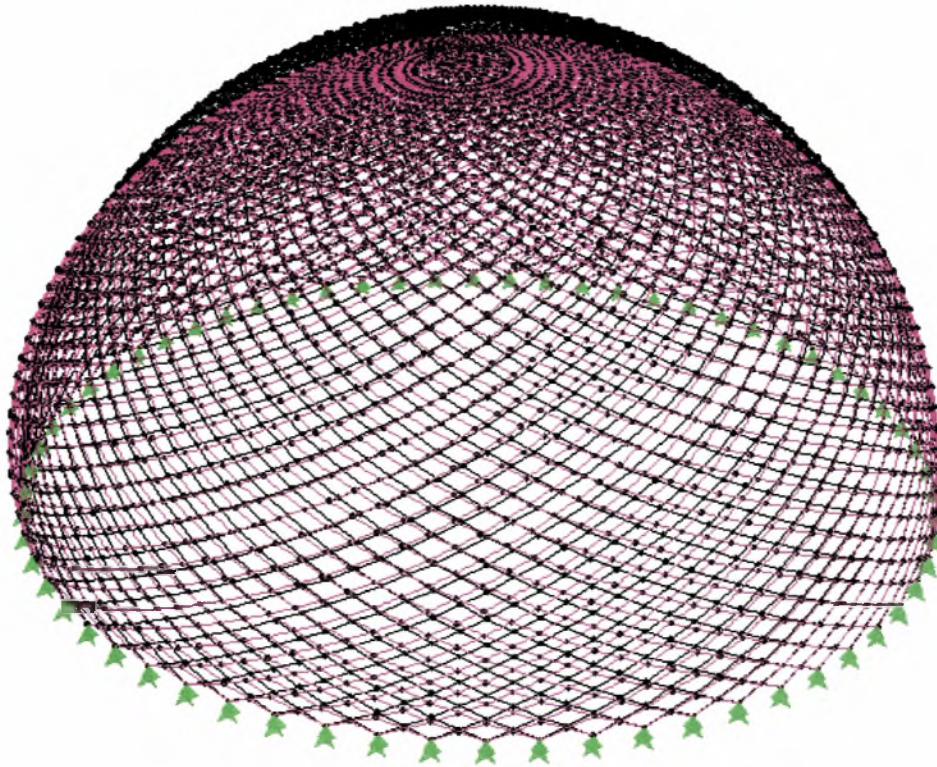
Εικόνα 6.1α : Θέση του κόμβου 3.387 στο φορέα



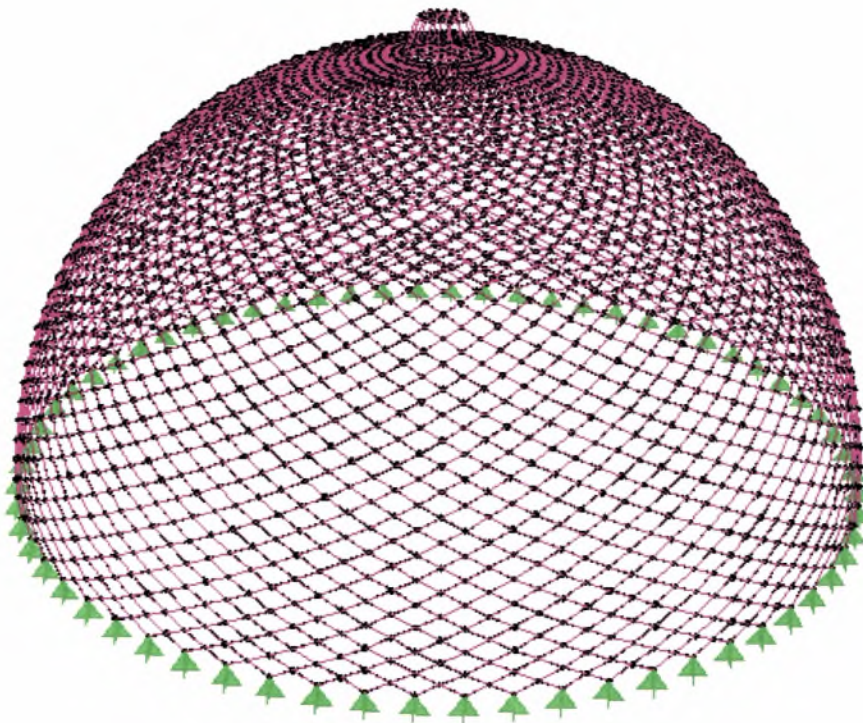
Εικόνα 6.1β : Λεπτομέρεια κόμβου αναφοράς



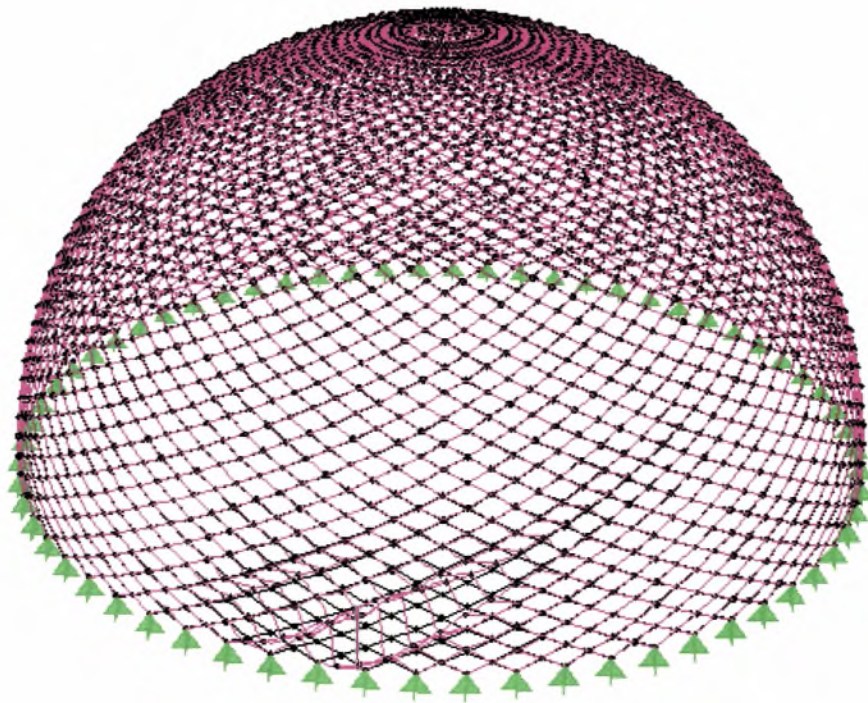
Εικόνα 6.2γ : Τοπικοί άξονες κόμβου αναφοράς



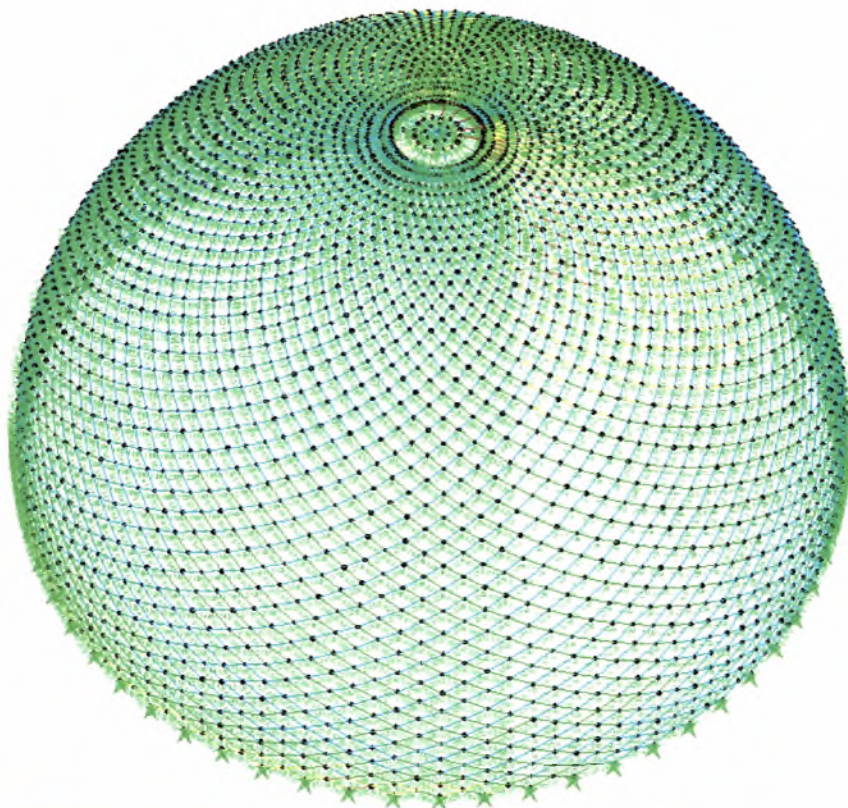
Σχήμα 6.1 : Μετατόπιση του φορέα λόγω comb1



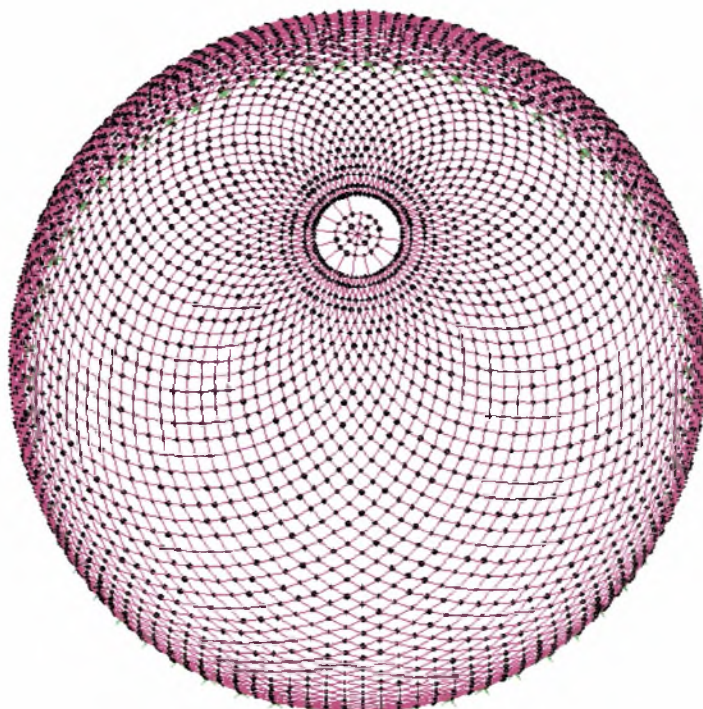
Σχήμα 6.1α : Αυγισμός (Buckling) ιδιομορφή 1



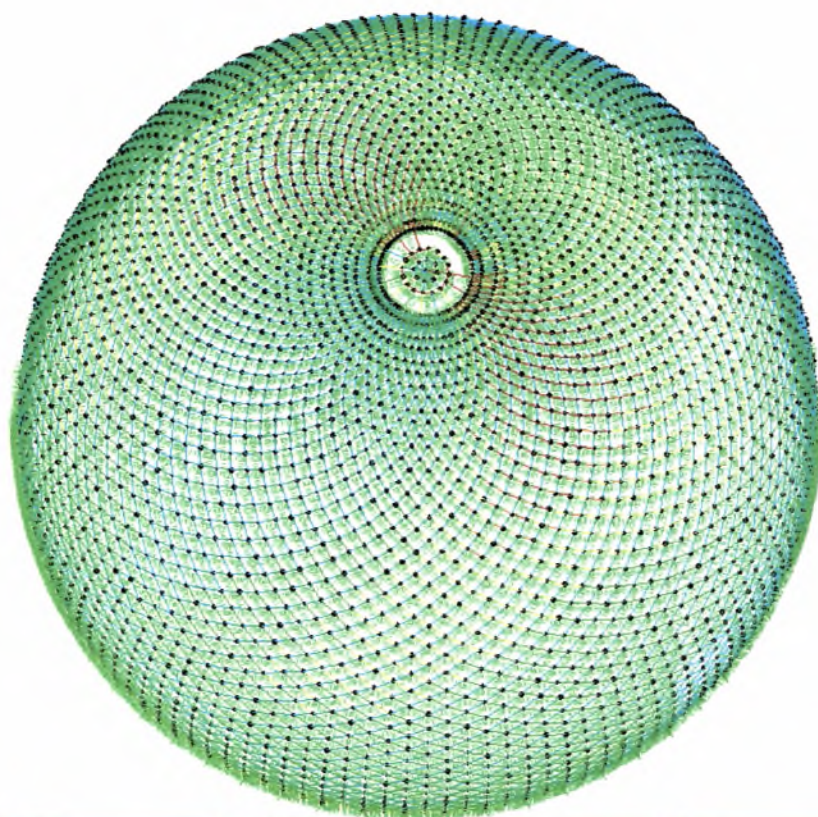
Σχήμα 6.1b : Λογισμός (Buckling) ιδιομορφές 2,3



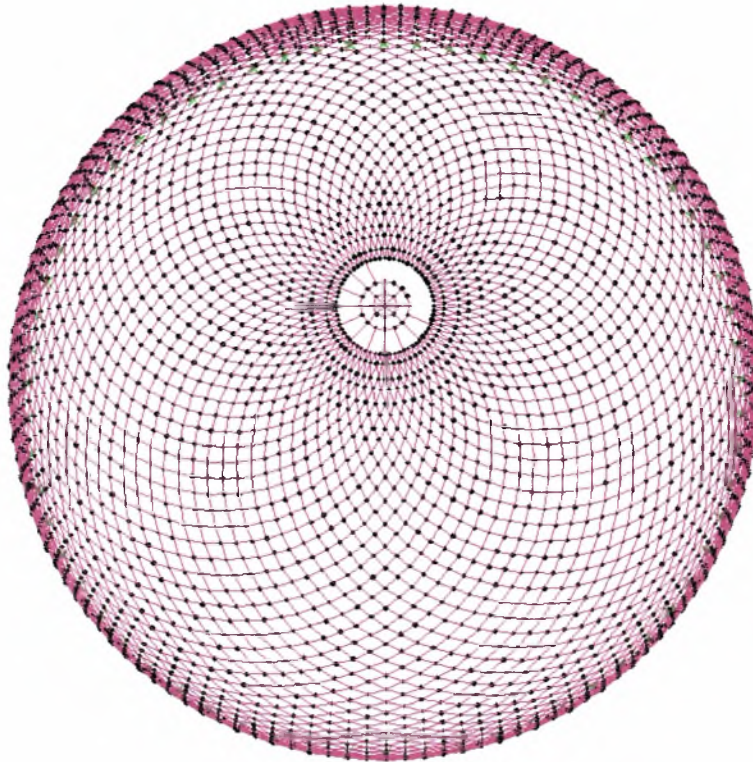
Σχήμα 6.2 : Επίλυση για $P=0,02$. Διαρροή σε 40 ράβδους (κόκκινες) στην στέψη



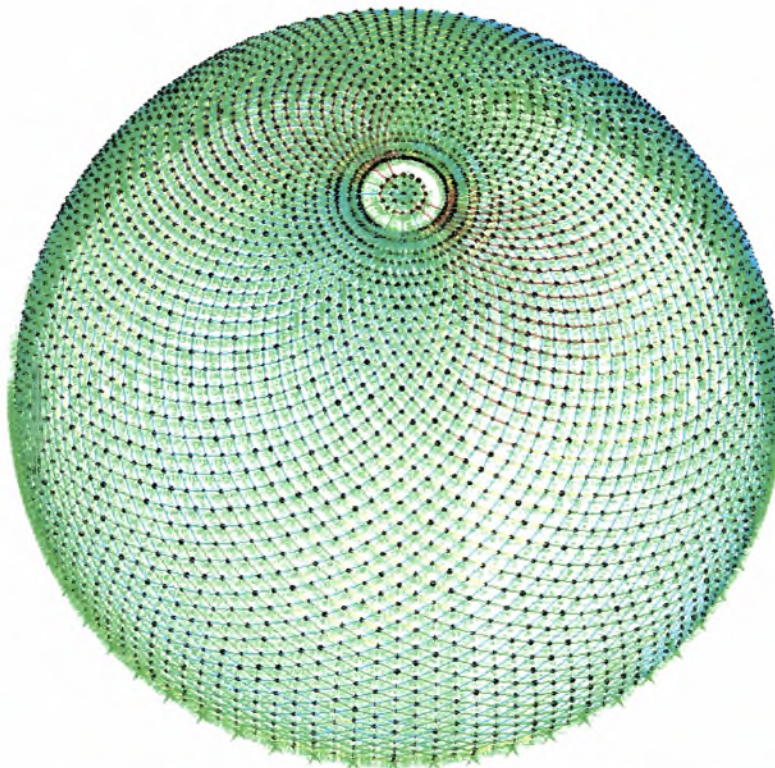
Σχήμα 6.3 : φορέας για την 2^η επίλυση



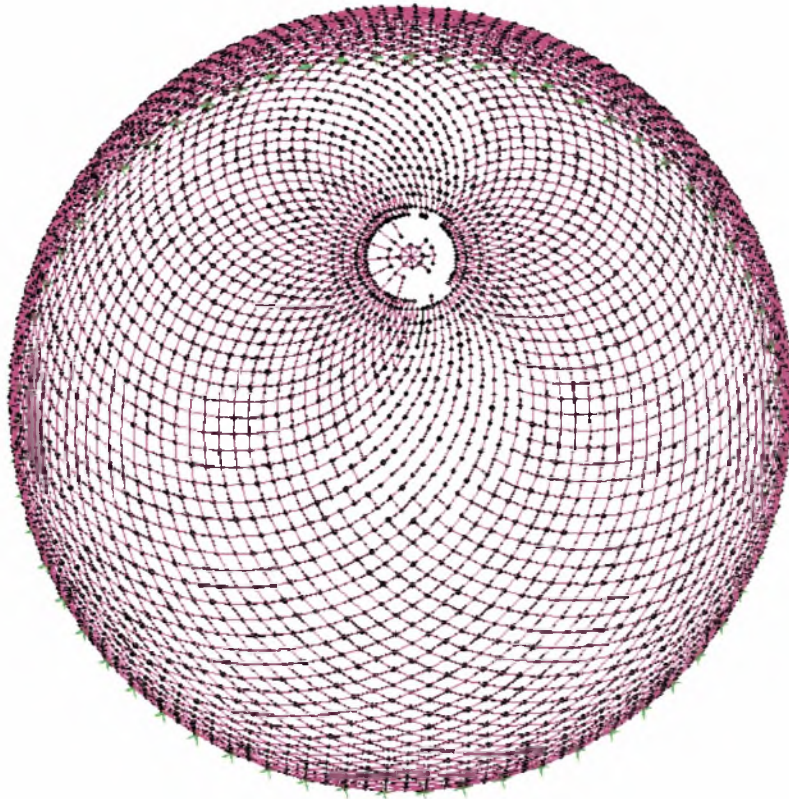
Σχήμα 6.4 : Επίλυση για $P=0,02002$. Διαρροή σε 53 ράβδους (κόκκινες) στην στέψη



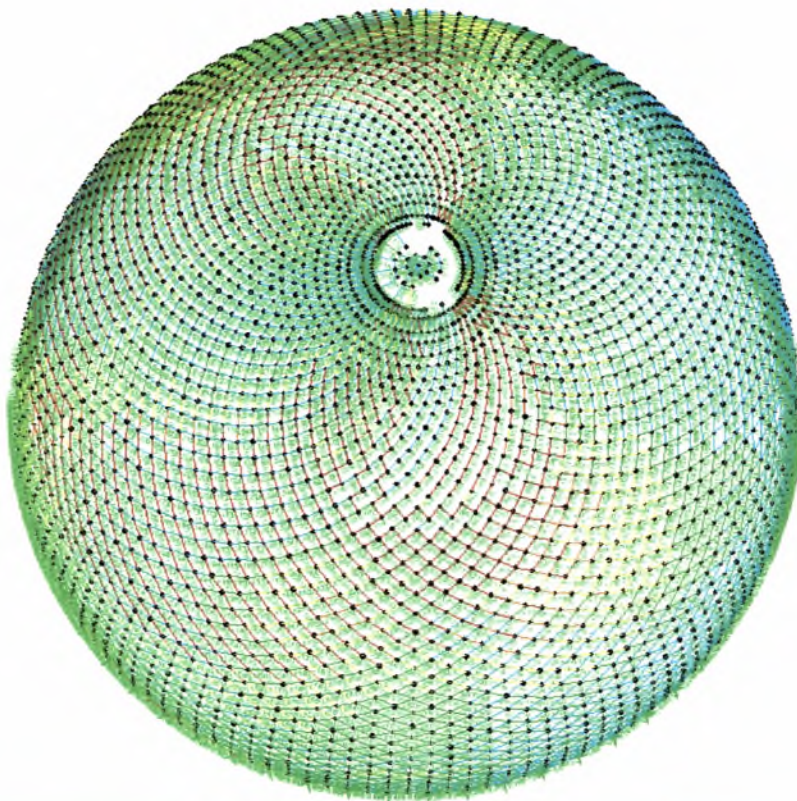
Σχήμα 6.5 : Ο φορέας για την 3^η επίλυση



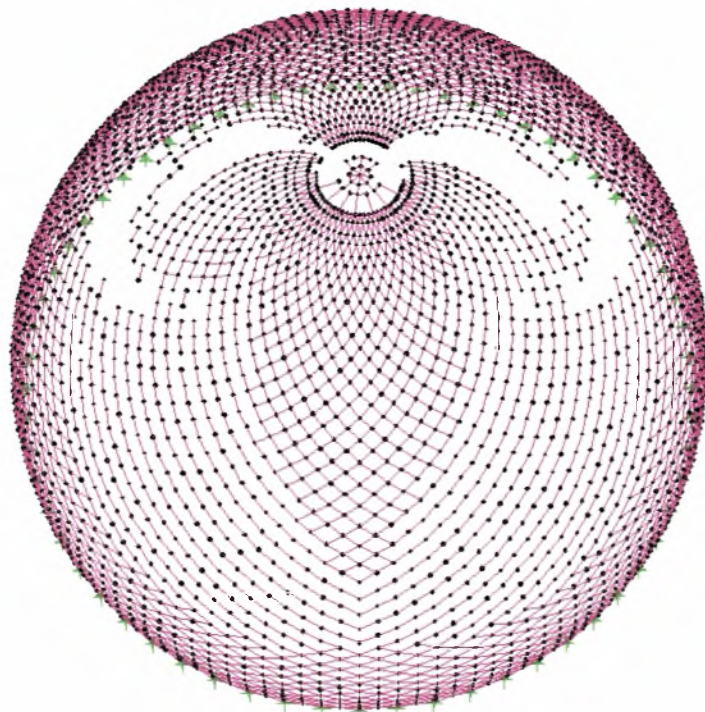
Σχήμα 6.6 : Επίλυση για $P=0,02004$. Διαρροή σε 381 ράβδους (κόκκινες) γύρω από τη στέψη



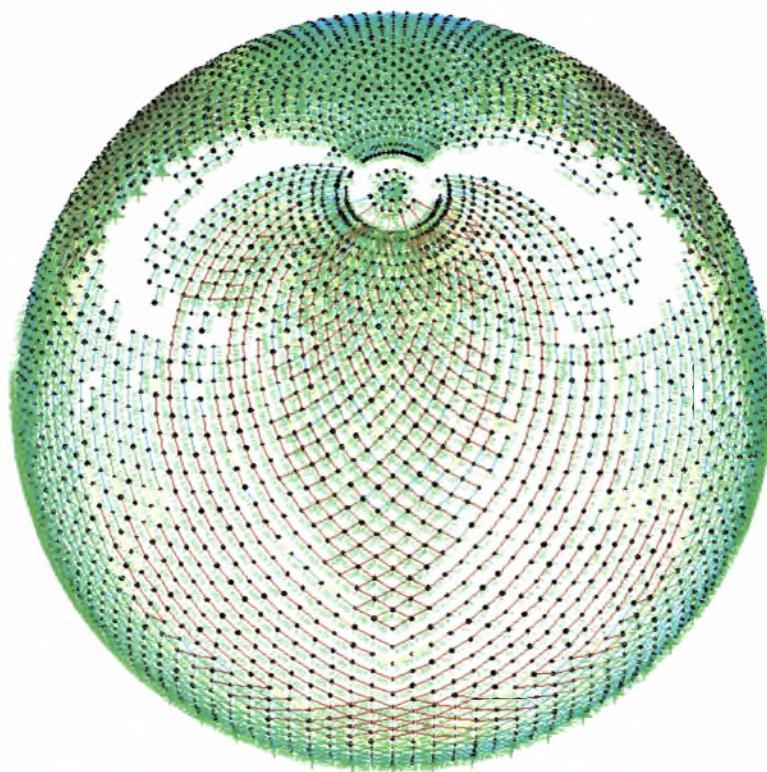
Σχήμα 6.7 : Ο φορέας για την 4^η επίλυση



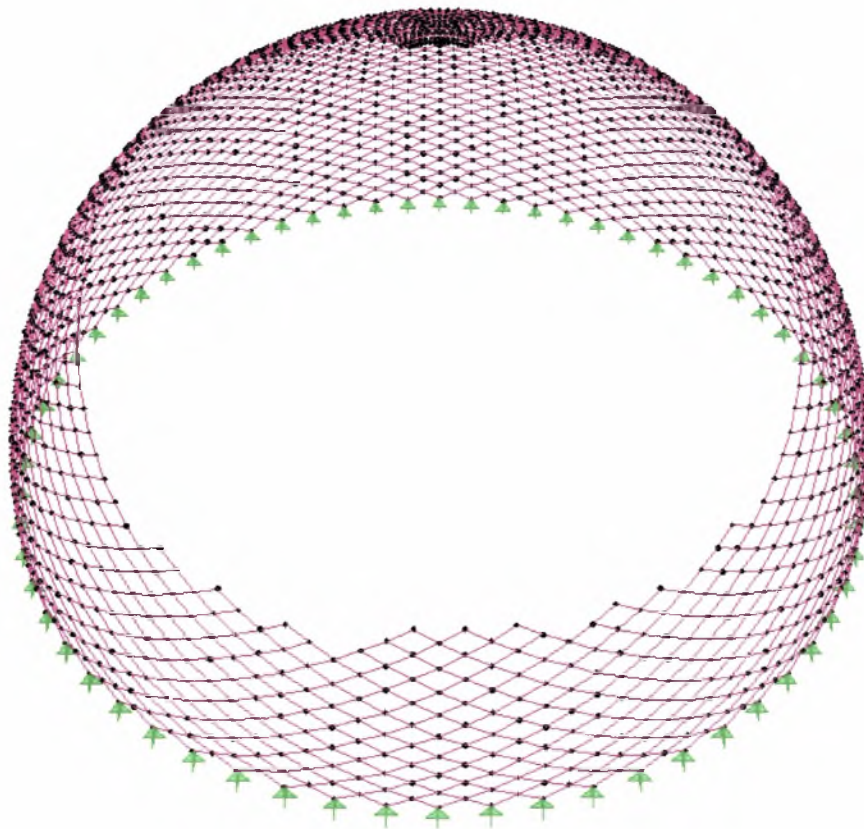
Σχήμα 6.8 : Επίλυση για $P=0,02006$. Διαρροή σε 1075 ράβδους (κόκκινες)



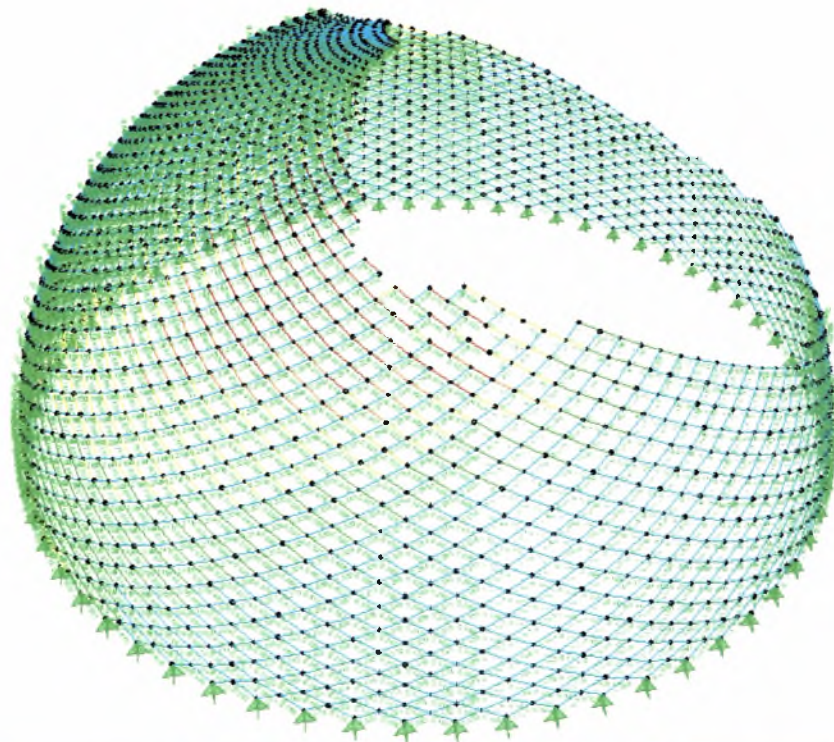
Σχήμα 6.9 : Ο φορέας για την 5^η επίλυση



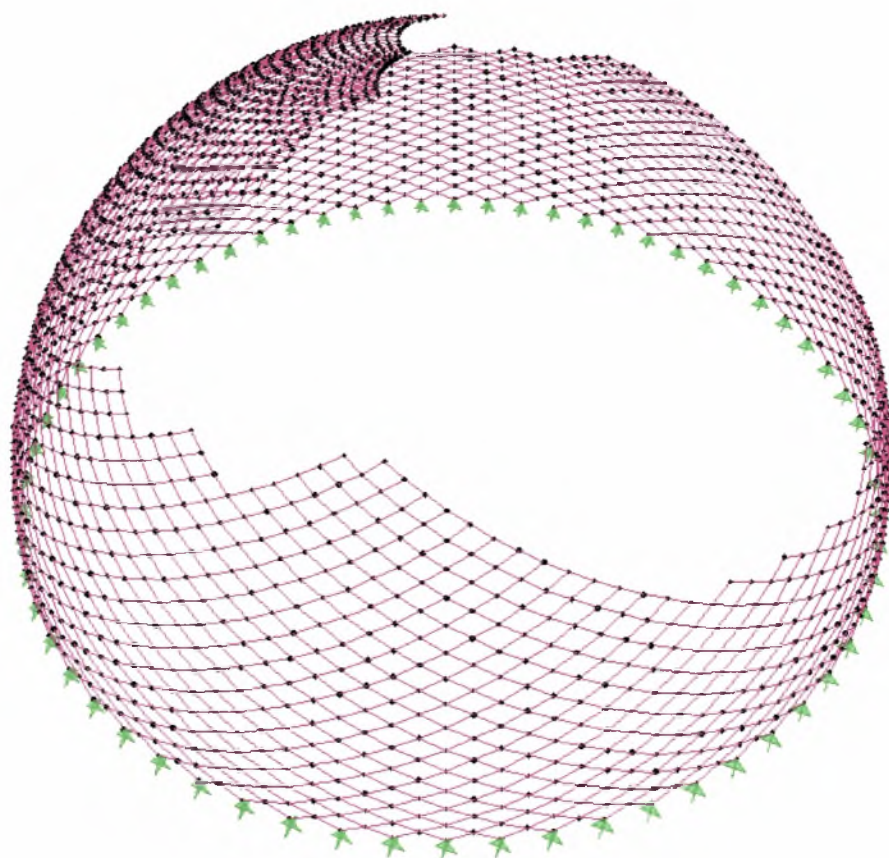
Σχήμα 6.10 : Επίλυση για $P=0,02008$. Διαρρέουν (κόκκινες) πολλές ράβδοι



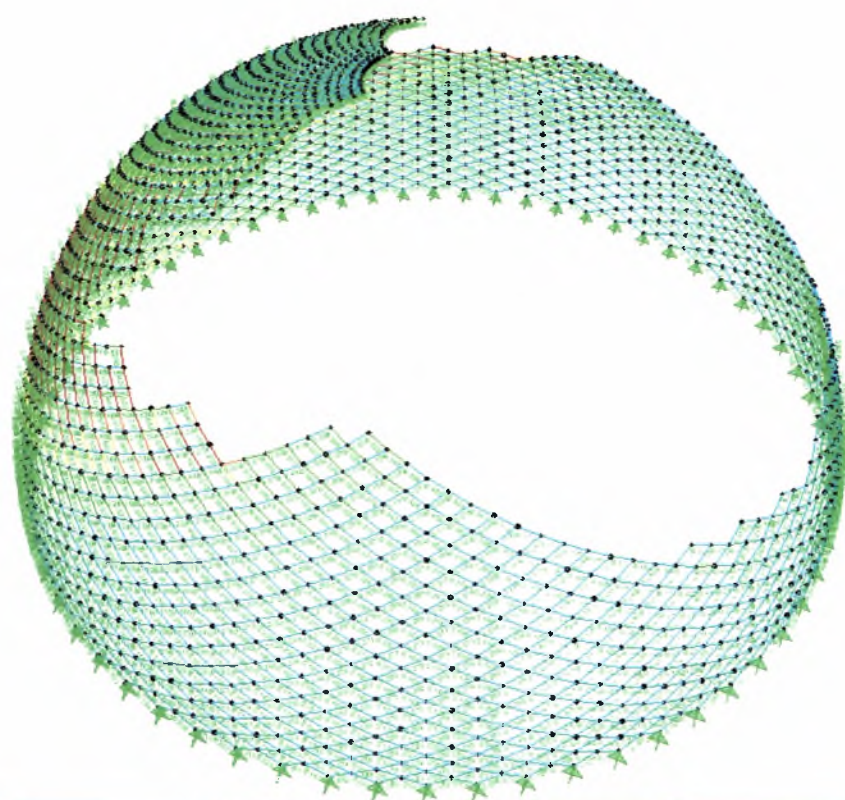
Σχήμα 6.11 : Φορέας για την 6^η επίλυση



Σχήμα 6.12 : Επίλυση για $P=0,0201$. Η κατασκευή είναι προς κατάρρευση

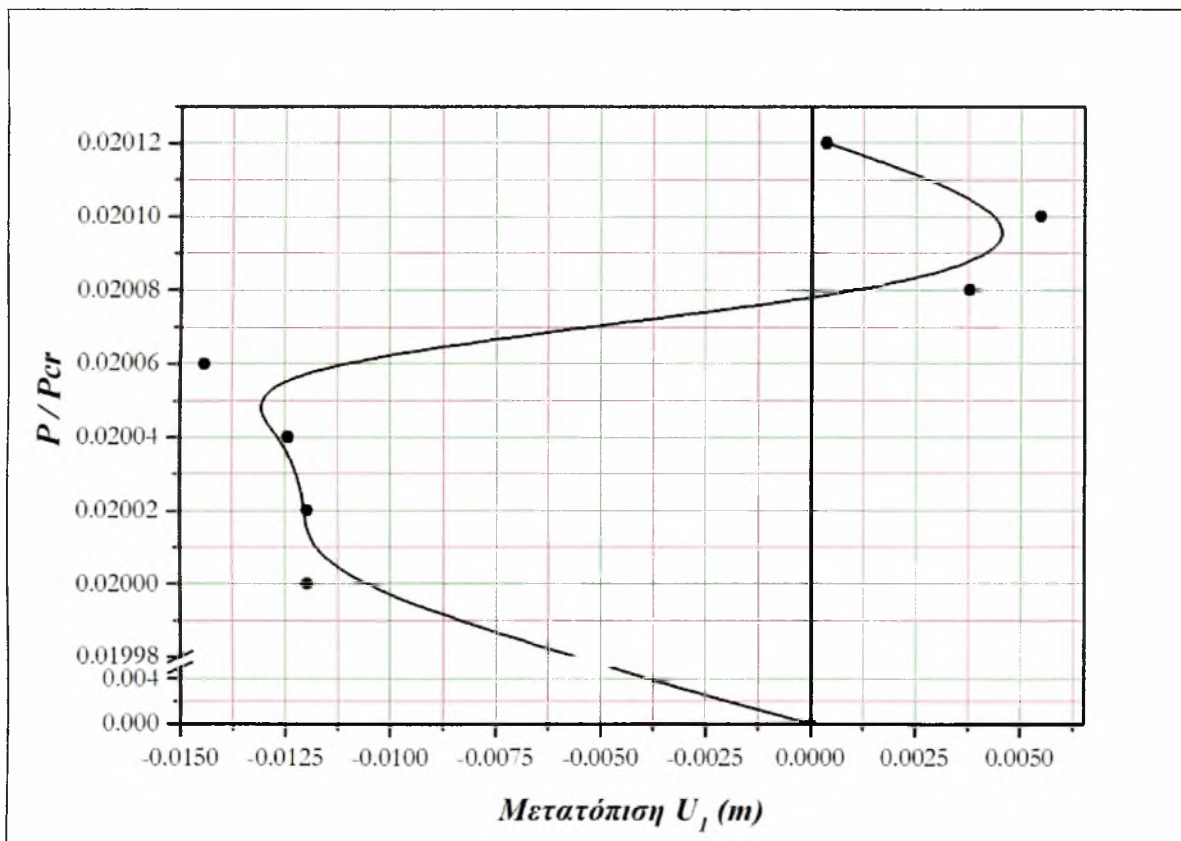


Σχήμα 6.13 : Φορέας για την 7^η επίλυση

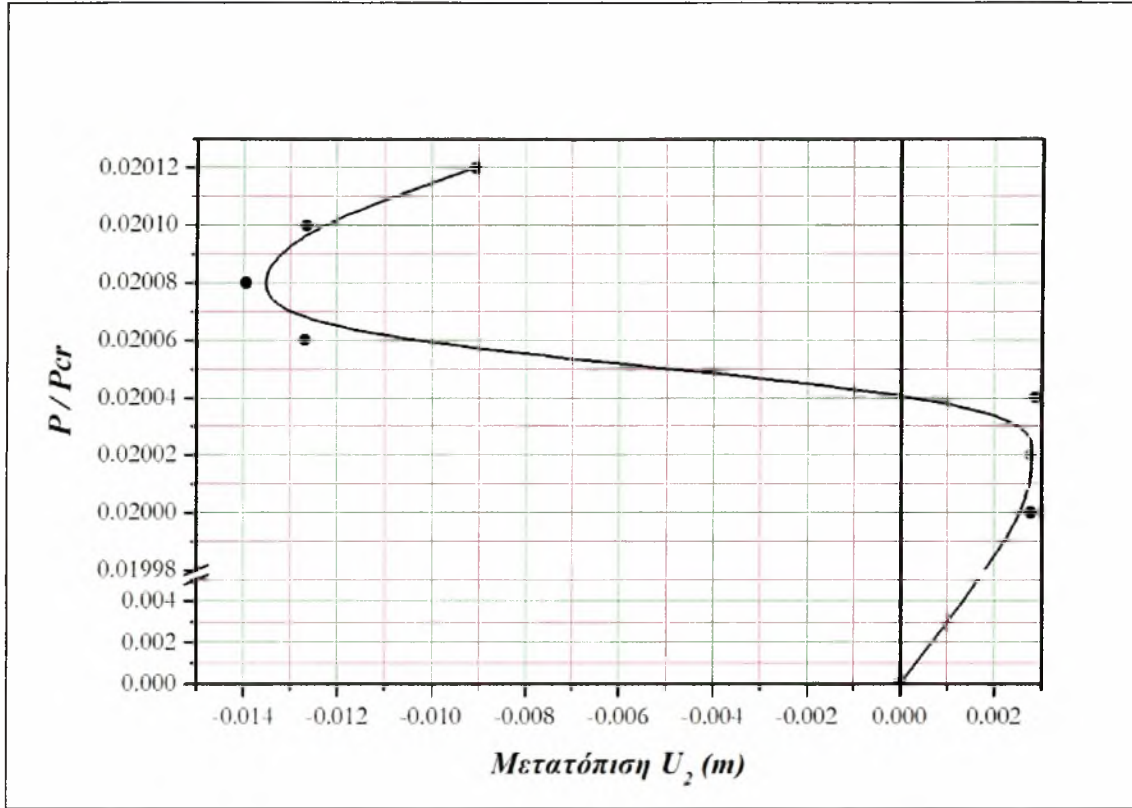


Σχήμα 6.14 : Επίλυση για $P=0,02012$. Η κατασκευή είναι μηχανισμός

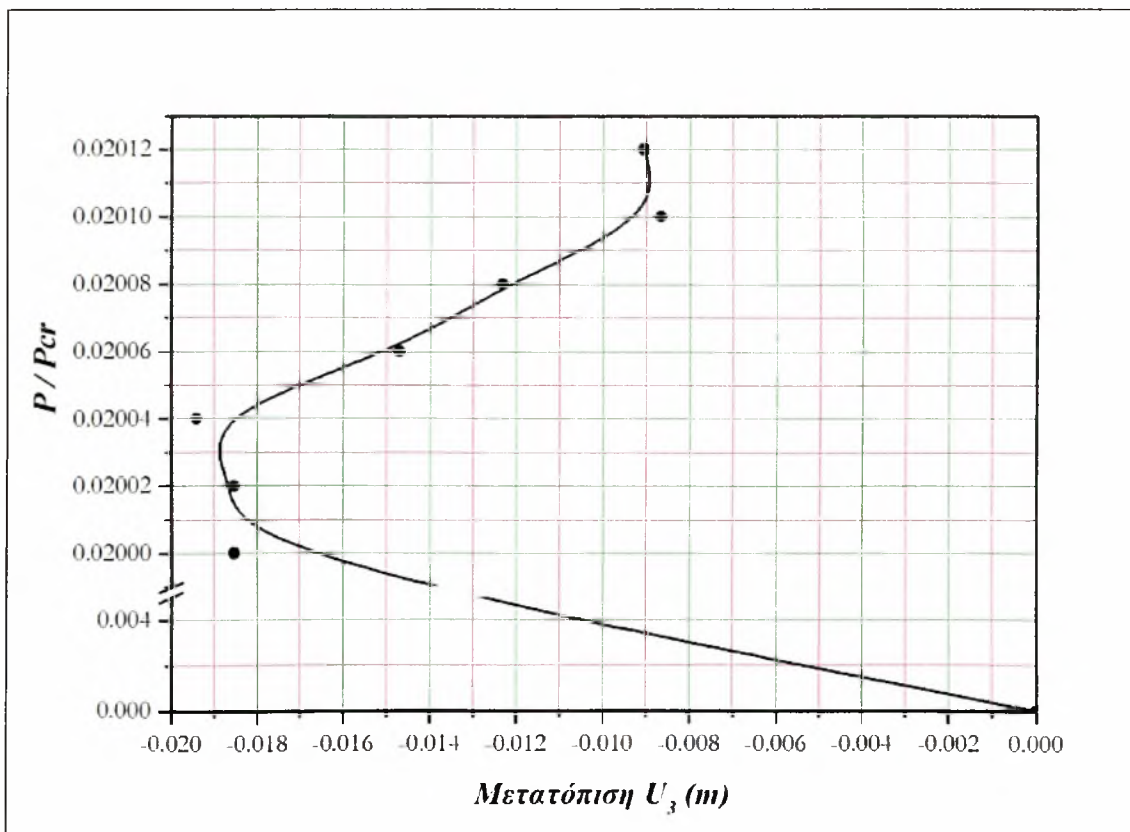
Μετά την επίλυση του φορέα για το φορτίο του ανέμου και αφού παρακολουθήσαμε το φαινόμενο της προοδευτικής κατάρρευσης του, συλλέξαμε τα στοιχεία των μετατοπίσεων του κόμβου 3.387. Τα στοιχεία αυτά αφορούν τις μετατοπίσεις u_1, u_2, u_3 για τις διευθύνσεις X, Y, Z αντίστοιχα και παρουσιάζονται με την μορφή διαγραμμάτων. Τα διαγράμματα αυτά δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος ORIGIN 5 και παρατίθενται στη συνέχεια (βλ. διάγραμμα 6.1 ,6.2 ,6.3)



Διάγραμμα 6.1



Διάγραμμα 6.2



Διάγραμμα 6.3

Μελέτη προοδευτικής κατάρρευσης λόγω φορτίων χιονιού

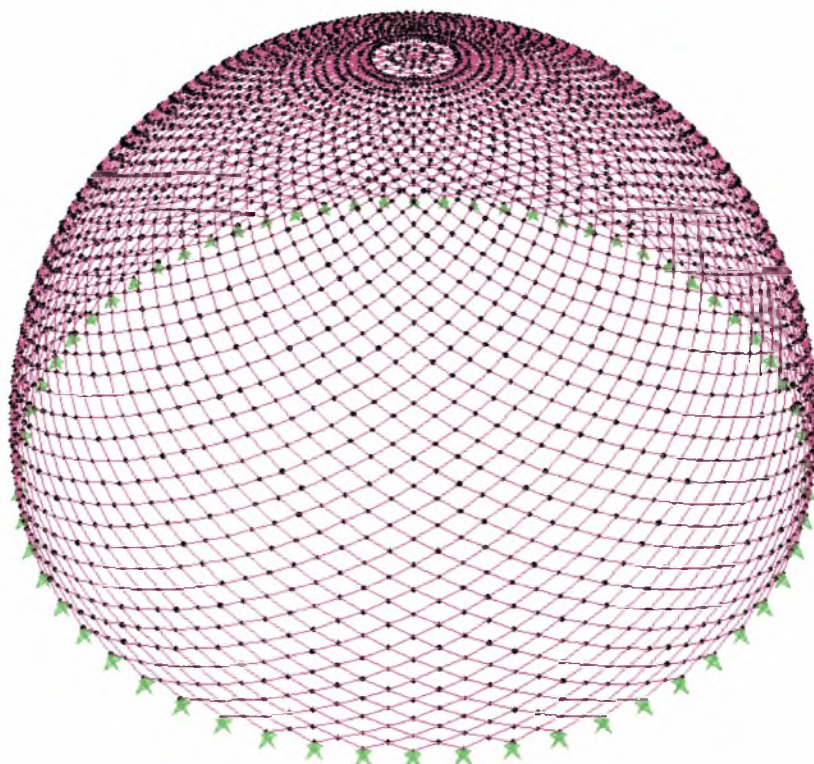
Σε αντιστοιχία με την προηγούμενη επίλυση δημιουργήσαμε στο Analyses Cases μόνο τις περιπτώσεις του χιονιού, του ίδιου βάρους της κατασκευής και του λυγισμού (acase1). Επίσης το συνδυασμό (combination) 1,35*ίδιο βάρος φορέα + 1,5*φορτίο χιονιού. Ο τρόπος επίλυσης είναι ίδιος με πριν όπως και ο έλεγχος της κατασκευής. Έτσι, ξεκινήσαμε από το ποσοστό $1 \cdot 10^{-3}$ του P το οποίο εισήγαμε από Define→Analyses Cases, επιπλέον ελέγχουμε και για τυχόν φαινόμενο τοπικού λυγισμού (buckling) με τον συνδυασμό Acase1 (ίδιο με το αντίστοιχο combination, το comb2). Όμως αυξάνοντας το φορτίο με βήμα $0,2 \cdot 10^{-3}$, στο φορτίο $1,4 \cdot 10^{-3}$ εμφανίζονται ολόκληρες οι δύο κάτω σειρές να διαρρέουν (κόκκινες)(βλ. σχήμα 6.18).

Προφανώς αντιλαμβανόμαστε ότι η διαρροή των μελών στη βάση δε θα προκαλέσει προοδευτική κατάρρευση αλλά ακαριαία. Με σκοπό συνεπώς την αποφυγή του φαινομένου αυτού δηλαδή την αποτροπή της πιθανότητας αστοχίας της συγκεκριμένης περιοχής επιχειρείται είτε η δραματική μείωση του ισοδύναμου μήκους λυγισμού των σχετικών μελών είτε η εξωπραγματική αύξηση των διαστάσεων της διατομής. Για την πρώτη επιλογή μας προσπαθούμε να κάνουμε τα κάτω μέλη μη λυγηρά (non-slender) και να τα στηρίζουμε κατάλληλα, ώστε να αντέξει η κατασκευή διότι θέλουμε να βρούμε εκτός της βάσης που αλλού πάσχει ο φορέας. Έτσι επιλύουμε την κατασκευή (και για buckling βλ. σχήμα 6.16 , 6.17) και κάνουμε τον έλεγχο ώστε να δούμε ποια ζώνη παρουσιάζει τα προβλήματα «τοπικού λυγισμού». Στη ζώνη αυτή συμβαίνει το εξής : το ισοδύναμο μήκος λυγισμού των ράβδων της συγκεκριμένης ζώνης (όπως υπολογίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα, επειδή κάναμε γραμμική ανάλυση όπου είναι ίσο με ένα (1)) δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα καθόσον στη ζώνη αυτή παρουσιάζονται φαινόμενα τοπικού λυγισμού.

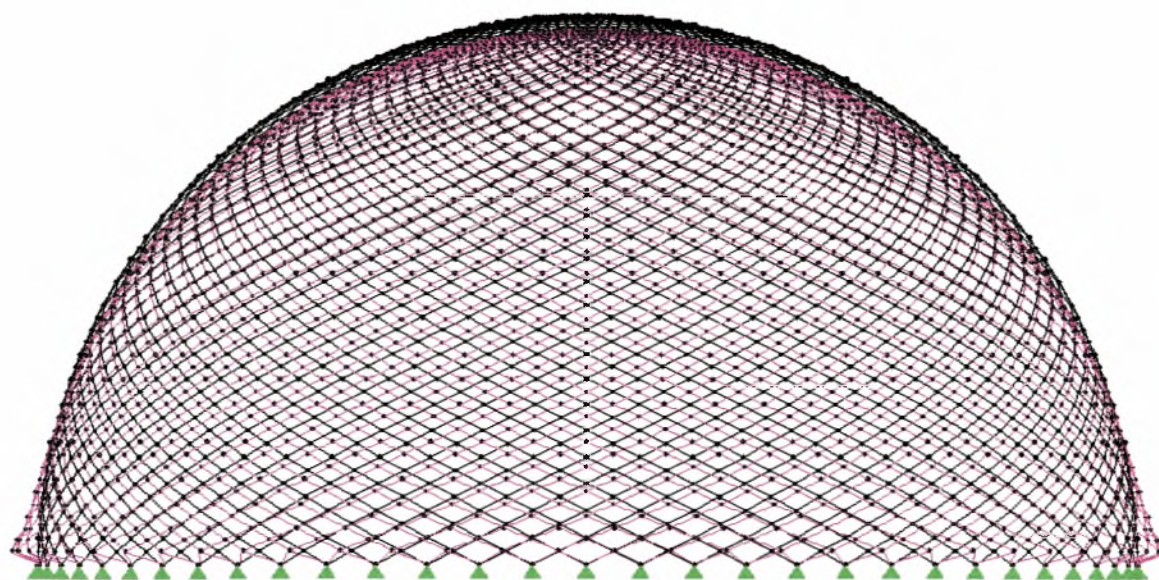
Έτσι υπολογίζουμε το πραγματικό ισοδύναμο μήκος λυγισμού των μελών της ζώνης αυτής. Δηλαδή τον συντελεστή α από την ισότητα $\frac{k_{cr}^2 EI}{L^2} = \frac{\pi^2 EI}{(\alpha L)^2}$ (όπου k_{cr} ο μέσος όρος των ιδιοτιμών της κατασκευής). Οι ιδιοτιμές της κατασκευής μου είναι για την

- ✓ ιδιομορφή 1 : 0,08976
- ✓ ιδιομορφή 2 : 0,090553
- ✓ ιδιομορφή 3 : 0,090554

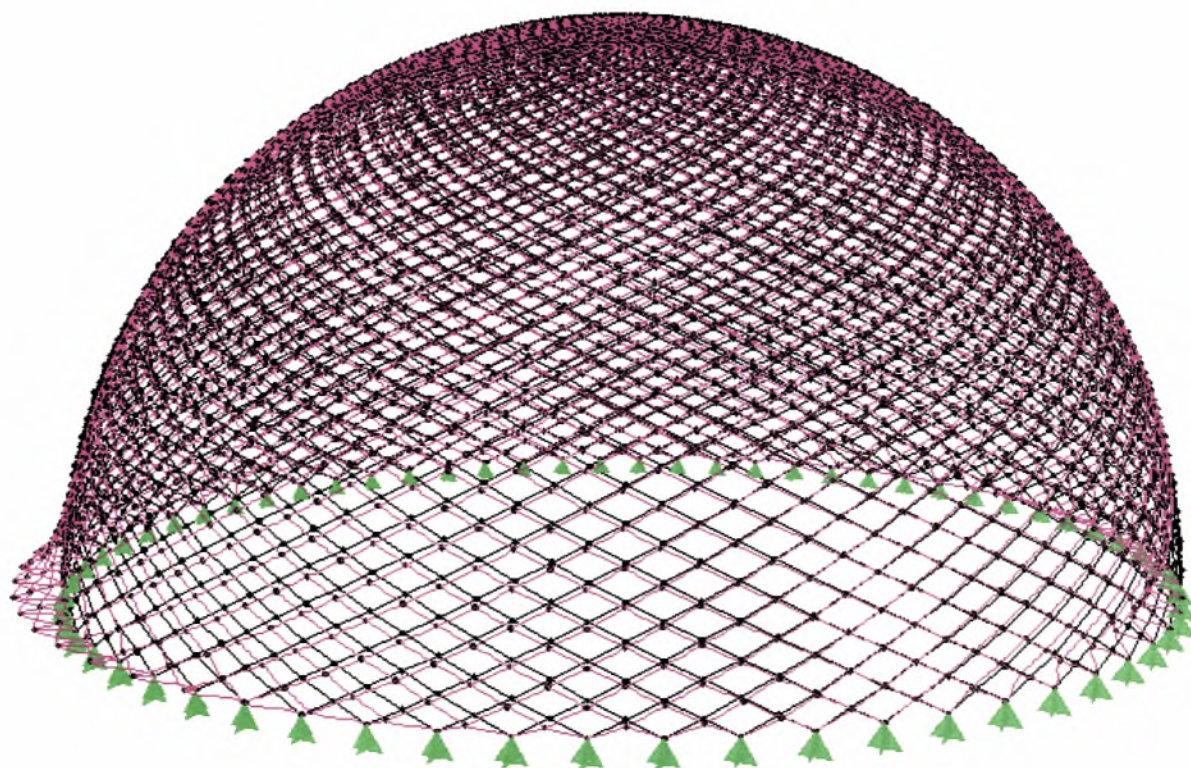
άρα το $k_{cr} = 0,09$. Στη συνέχεια και για τα πρώτα 2,5 m εισάγεται στο SAP (Design→Steel Frame Design→Revise Overwrites→Unbraced Length Ration (Major) = ισοδύναμο μήκος λυγισμού) η τιμή της εν λόγω παραμέτρου 0,09 (ακριβώς αντίθετα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης λόγω της ευπάθειας της περιοχής) και στη συνέχεια ξαναγίνεται κανονικά η επίλυση.



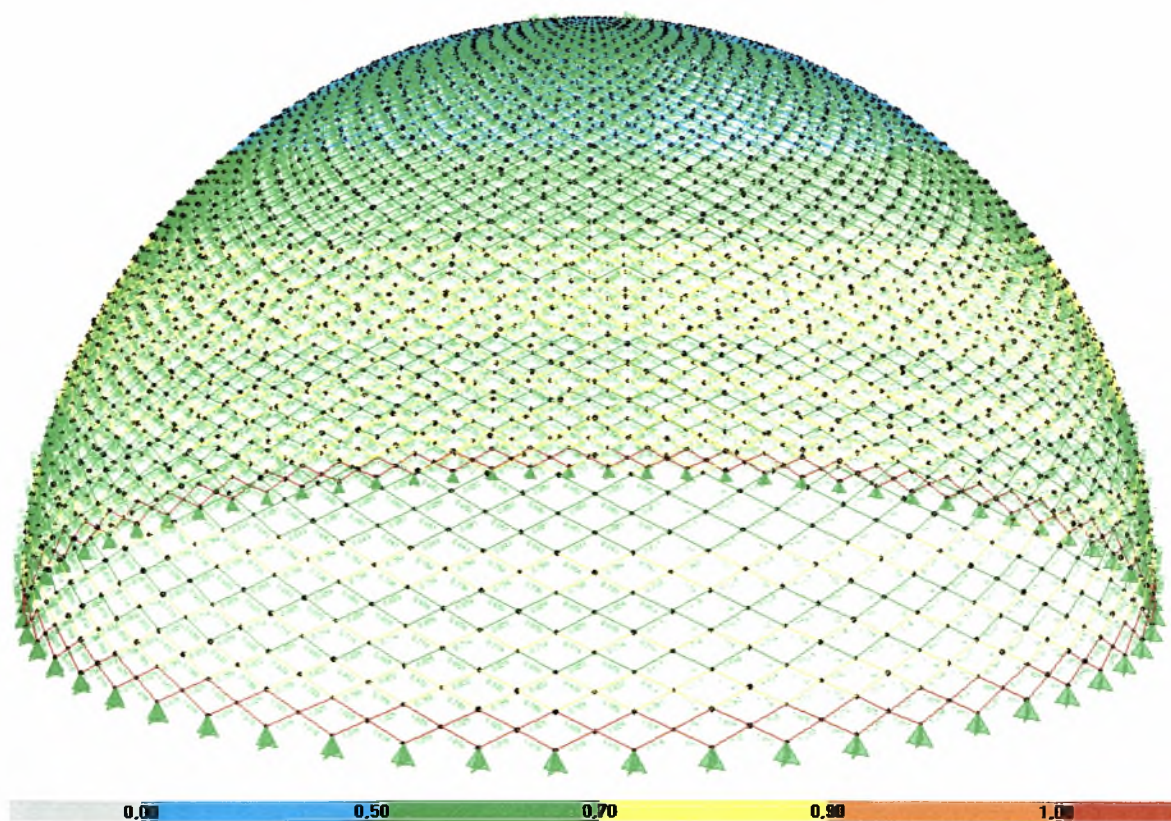
Σχήμα 6.15 : Φορέας



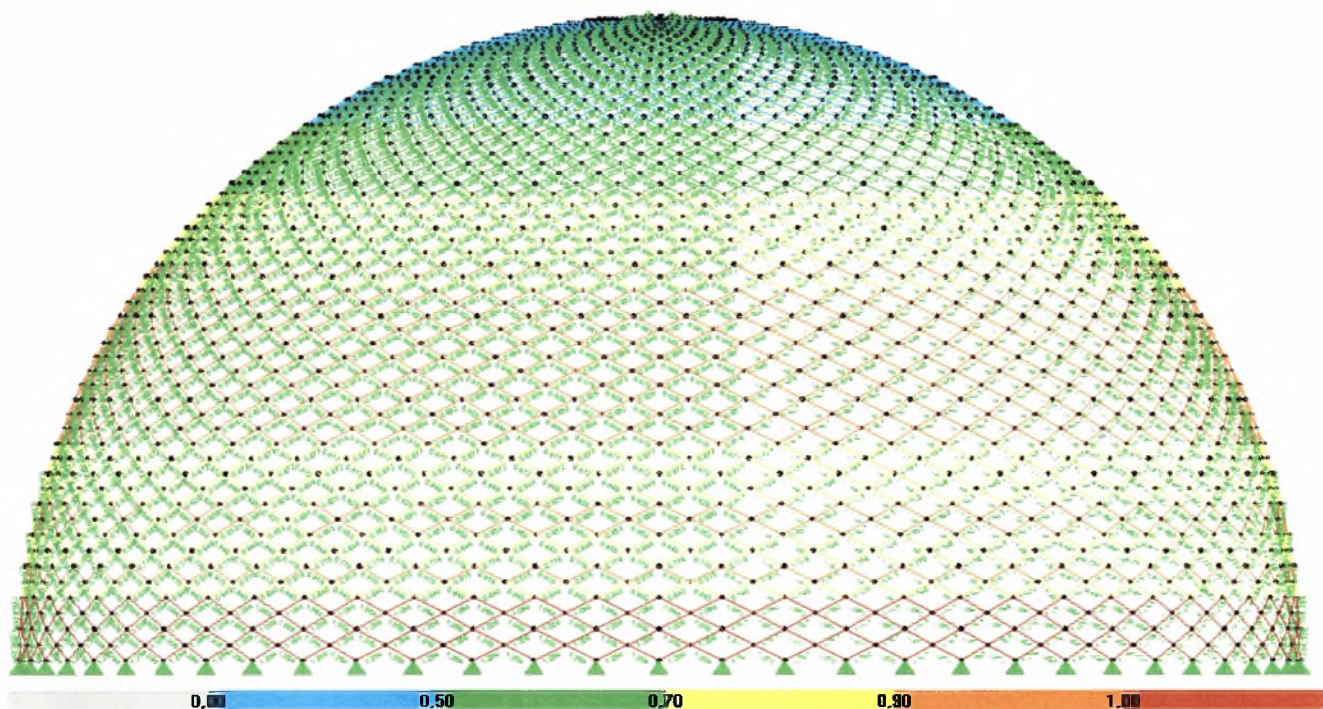
Σχήμα 6.16 : Λυγισμός (Buckling) ιδιομορφή 1



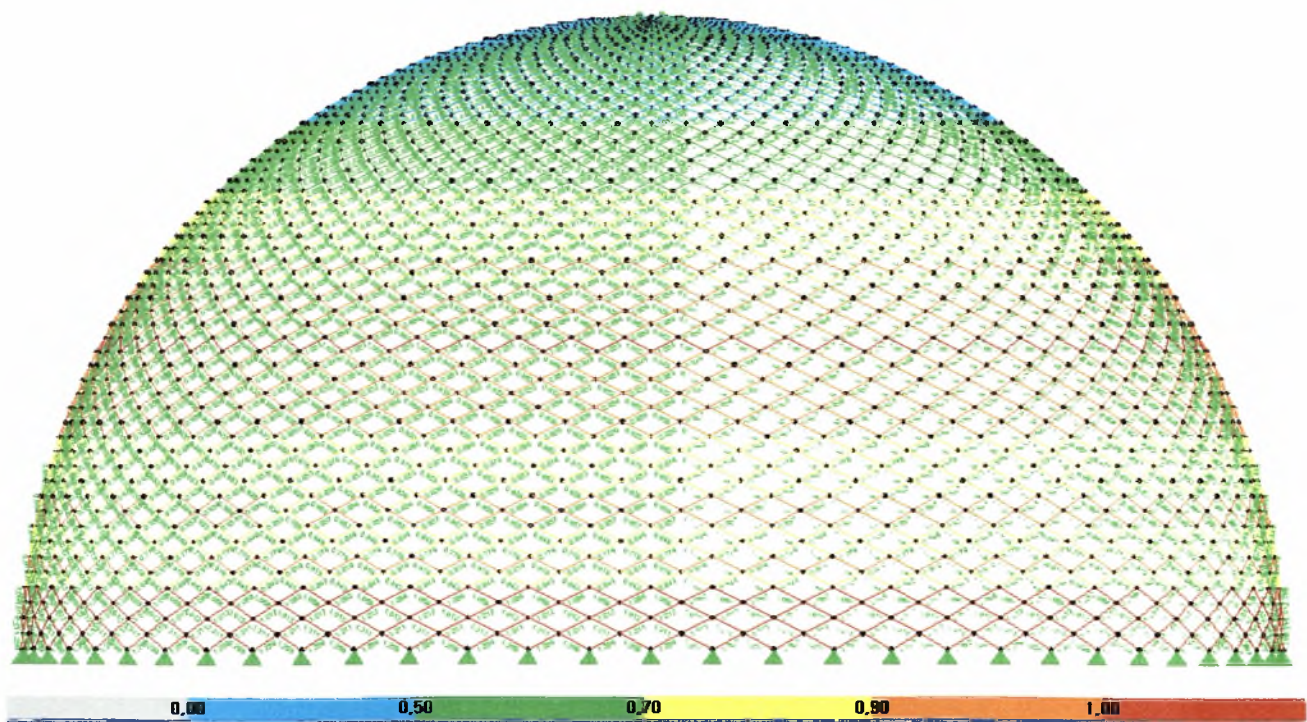
Σχήμα 6.17 : Λογισμός (Buckling) ιδιομορφή 2,3



Σχήμα 6.18 : Επίλυση για $P=1,4 \cdot 10^{-3}$ και αρχικό μήκος ράβδων



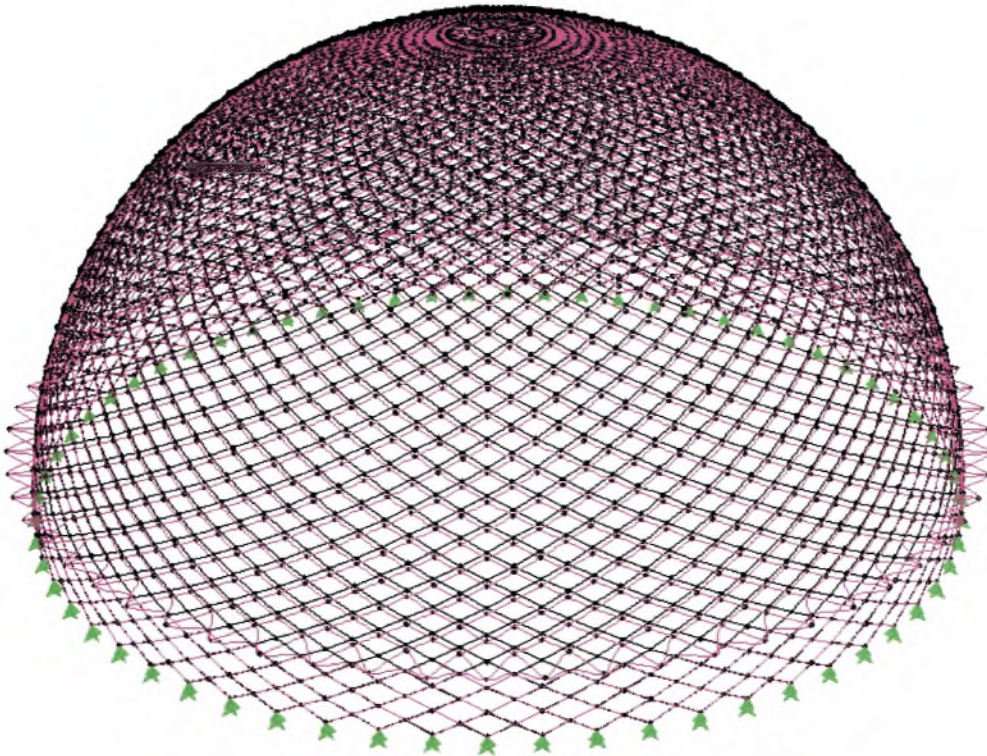
Σχήμα 6.19 : Επίλυση για $P=1,94 \cdot 10^{-3}$ με μήκος=0,09 στα πρώτα 2,5 m, έχουν διαρρέσει (κόκκινα) τα μέλη με το αλλαγμένο μήκος



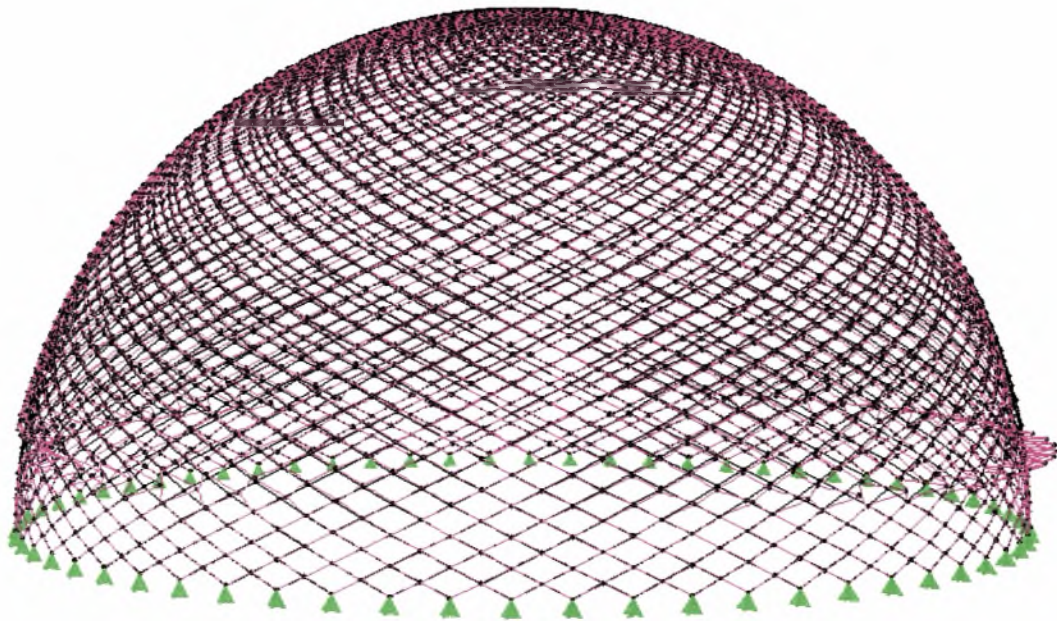
Σχήμα 6.20 : Επίλυση για $P=1,95 \cdot 10^{-3}$ με μήκος=0,09 στα πρώτα 2,5 m. Ολόκληρη η σειρά διαρρέει (κόκκινη) συγχρόνως στα 12 m και εκεί κόβεται ο φορέας, που είναι πλέον μηχανισμός

Παρατηρούμε ότι με την αλλαγή του μήκους λυγισμού δεν έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα της προοδευτικής κατάρρευσης αλλά το φαινόμενο του ακαριαίου λυγισμού, στο ύψος των 12 m.

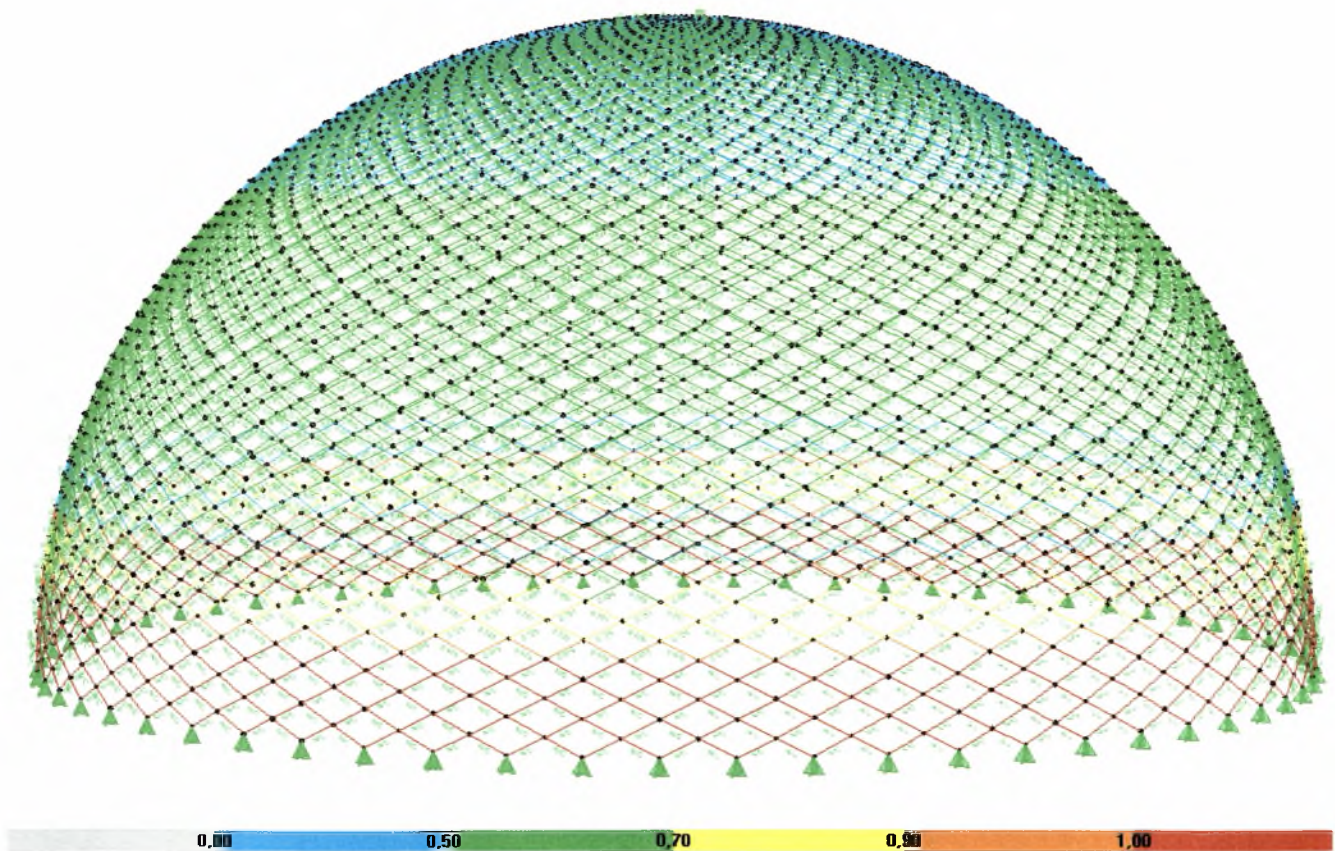
Μια άλλη λύση είναι αντί της αλλαγής του μήκους λυγισμού να ενισχύσουμε τη βάση με αλλαγή της διατομής στα πρώτα 2,5 m από TuboD114,3×3,6 σε TuboD457,2×7,1. Ξεινήσαμε από το φορτίο $0,5 \cdot 10^{-3}$ και με βήμα $0,2 \cdot 10^{-3}$ φτάσαμε στο φορτίο $1,35 \cdot 10^{-3}$ όπου δημιουργείται πάλι μια ολόκληρη κόκκινη σειρά πάνω από την ενισχυμένη ζώνη των 2,5 m. Οπότε πάλι αστοχεί ο φορέας χωρίς προοδευτική κατάρρευση. Παρατηρούμε ότι ο φορέας έχει την ίδια συμπεριφορά σε λυγισμό με την προηγούμενη λύση, απλά εμφανίζεται σε ύψος 2,5 m (βλ. σχήμα 6.21 και 6.22).



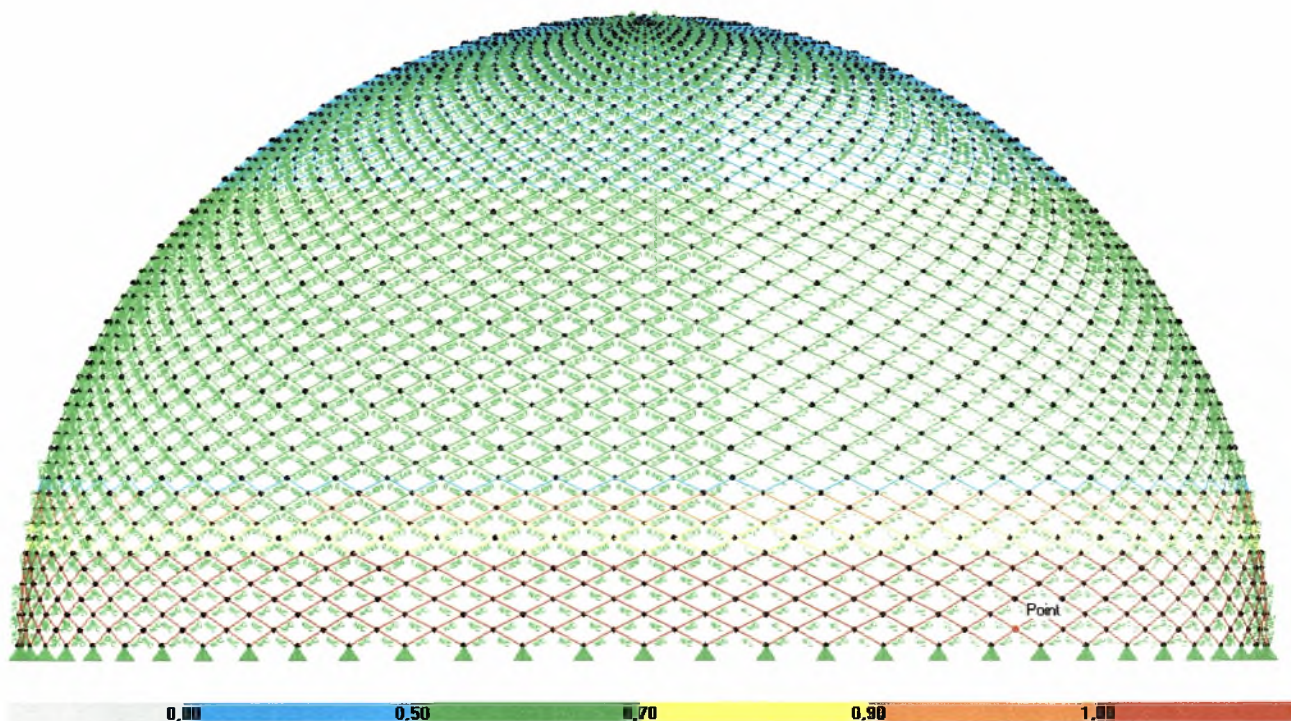
Σχήμα 6.21 : Λυγισμός (Buckling) ιδιομορφή 1



Σχήμα 6.22 : Λογισμός (Buckling) ιδιομορφή 2,3



Σχήμα 6.23 : Επίλυση για φορτίο $P=1,3 \cdot 10^{-3}$. Εμφανίζεται (πορτοκαλί) έτοιμη να διαρρεύσει η πρώτη σειρά των μελών που βρίσκονται ακριβώς πάνω από την ενισχυμένη ζώνη.



Σχήμα 6.24 : Επίλυση για φορτίο $P=1,35 \cdot 10^{-3}$. Εμφανίζεται (κόκκινο) να διαρρέει η πρώτη σειρά των μελών που βρίσκονται ακριβώς πάνω από την ενισχυμένη ζώνη. Εκεί κόβεται ο φορέας, που είναι πλέον μηχανισμός.

Μελέτη προοδευτικής κατάρρευσης λόγω φορτίων χιονιού και ανέμου

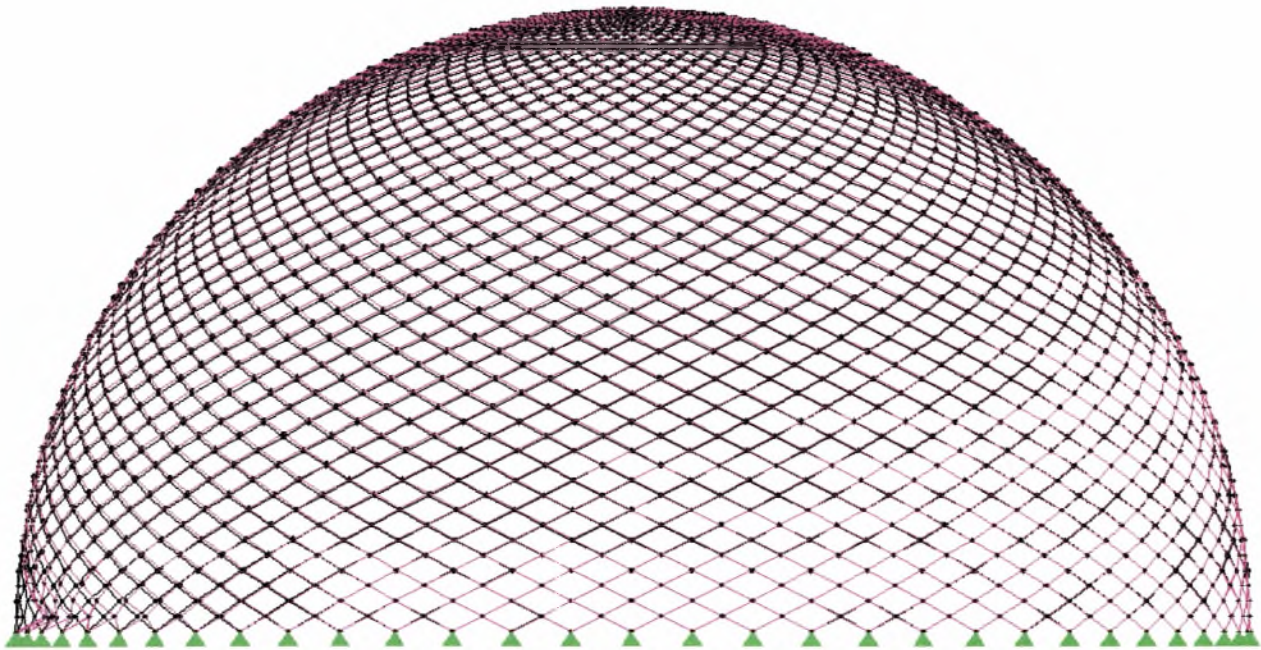
Όπως και στις προηγούμενες επιλύσεις, δημιουργώ στο Analyses Cases τις περιπτώσεις του χιονιού, του ανέμου, του ίδιου βάρους της κατασκευής και του λυγισμού (acase1). Επίσης το συνδυασμό (combination) $1,35 \cdot \text{ίδιο βάρος φορέα} + 1,5 \cdot \text{φορτίο χιονιού} + 0,9 \cdot \text{φορτίο ανέμου}$. Ο τρόπος επίλυσης είναι ίδιος με πριν όπως και ο έλεγχος της κατασκευής. Έτσι, ξεκινήσαμε από το ποσοστό $1 \cdot 10^{-3}$ του P το οποίο εισήγαμε από Define → Analyses Cases, επιπλέον ελέγχουμε και για τυχόν φαινόμενο τοπικού λυγισμού (buckling) με τον συνδυασμό Acase1 (ίδιο με το αντίστοιχο combination, το comb1). Όμως αυξάνοντας το φορτίο με βήμα $1 \cdot 10^{-3}$, στο φορτίο $2 \cdot 10^{-3}$ εμφανίζονται πάρα πολλά μέλη να διαρρέουν (κόκκινα). Επίσης είναι προφανές ότι η κατασκευή πάσχει πάλι στην βάση (βλ. σχήμα 6.25). Έτσι, αποφασίσαμε να ελέγξουμε το φορέα ξεκινώντας από το $1 \cdot 10^{-3}$ με βήμα $0,1 \cdot 10^{-3}$, εφόσον προηγουμένως όπως και στην περίπτωση του χιονιού αλλάζουμε το μήκος λυγισμού στη βάση. Αρχικά αλλάξαμε τα πρώτα 2,5 m και τελικά αποφασίσαμε να ενισχύσουμε τα πρώτα 5 m και να τα στηρίζουμε κατάλληλα ώστε να μελετήσουμε τον θόλο μας σε προοδευτική κατάρρευση λόγω διαρροής άλλων ράβδων πλην αυτών της βάσης του. Οι ιδιοτιμές της κατασκευής μας είναι για την :

✓ ιδιομορφή 1 : 0,08312

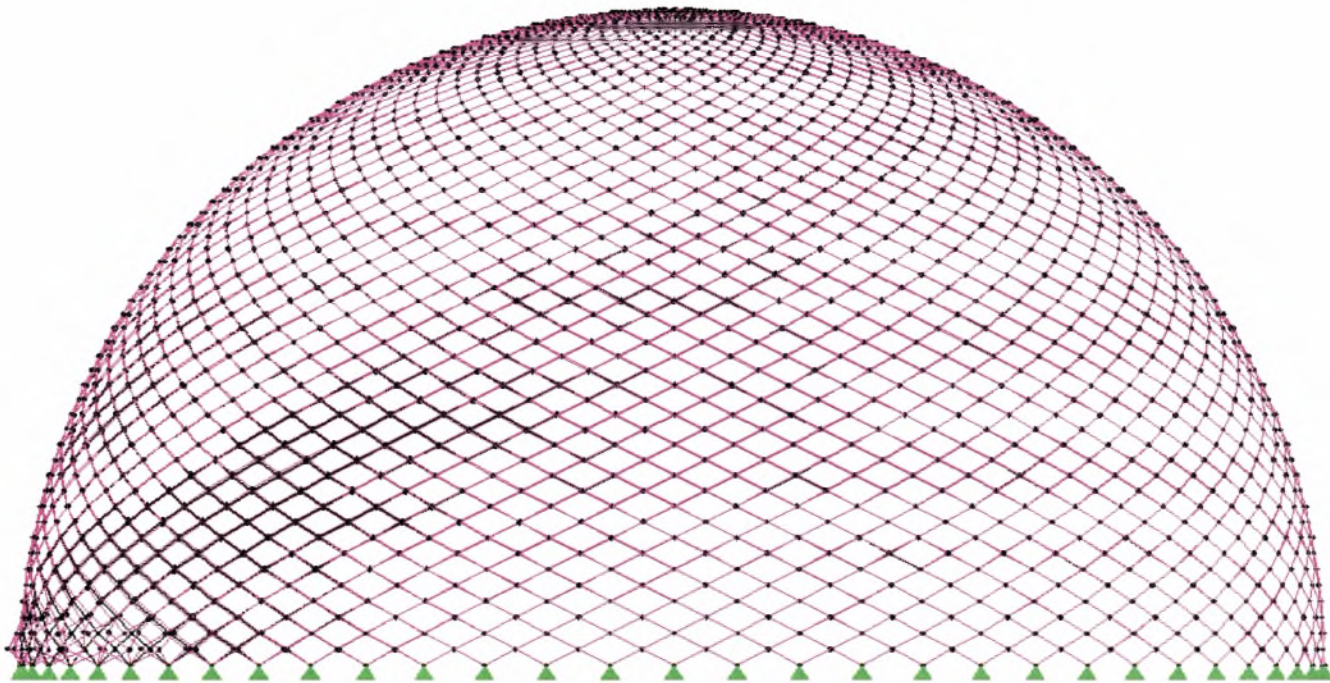
✓ ιδιομορφή 2 : 0,08416

✓ ιδιομορφή 3 : 0,08453

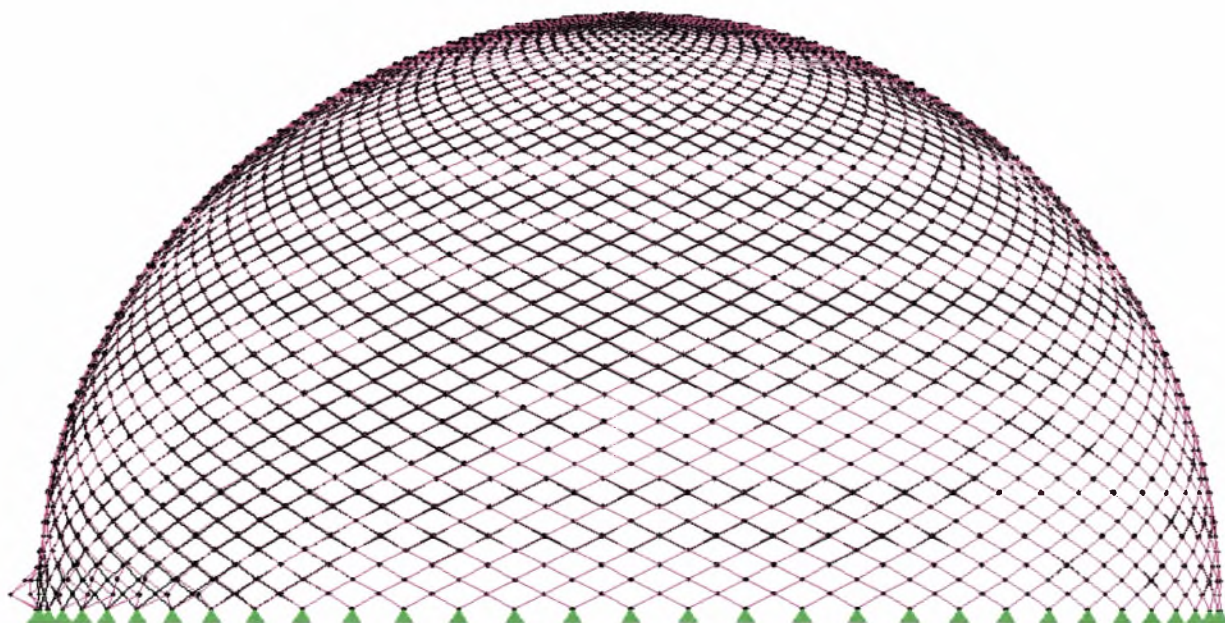
άρα το $k_{cr} = 0,08394$. Από τη σχέση προκύπτει το α . Το αντίστροφο του αριθμού α ($=0,1$ για τα πρώτα 5 m) εισάγεται στο SAP όπως και πριν.



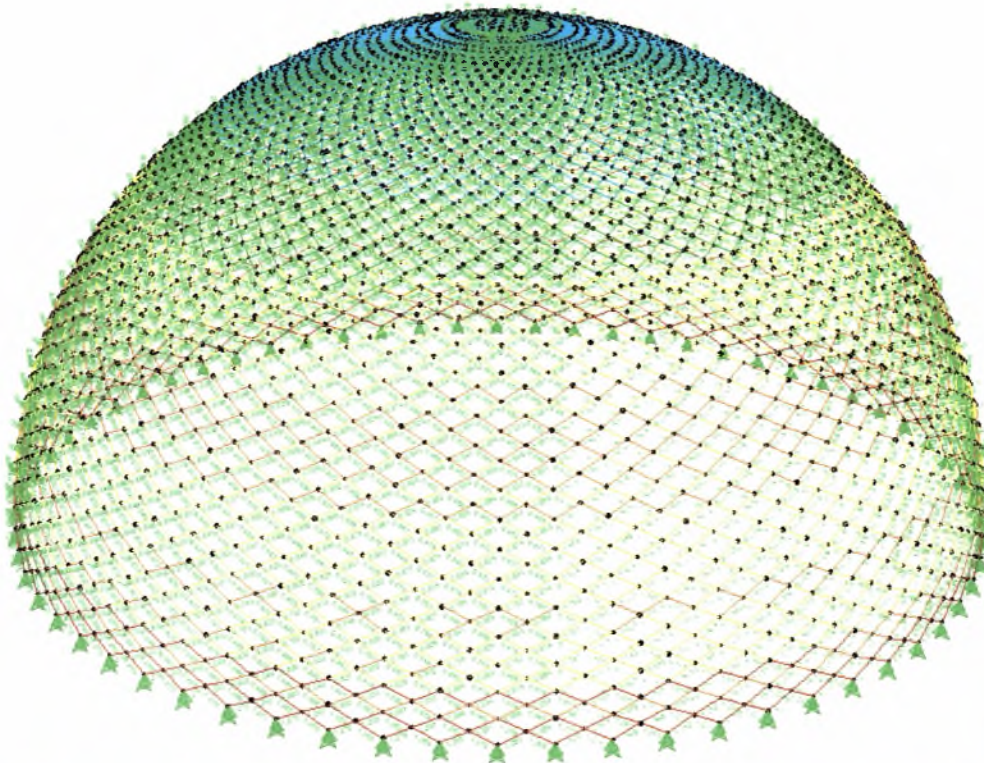
Σχήμα 6.25 : Λυγισμός (Buckling) ιδιομορφή 1



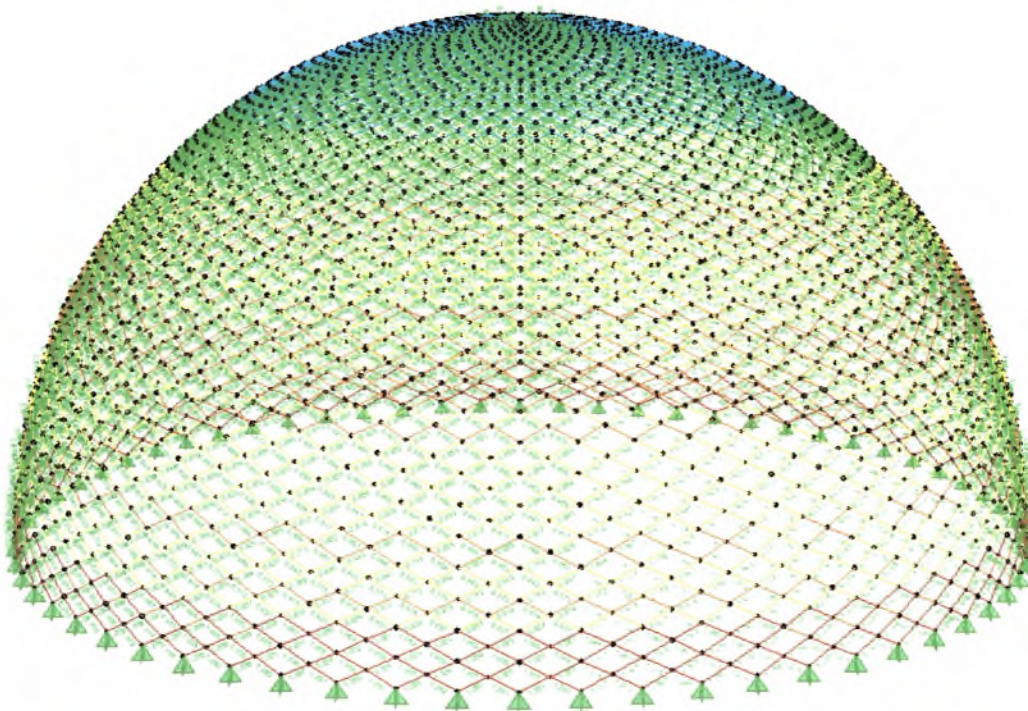
Σχήμα 6.26 : Λυγισμός (Buckling) ιδιομορφή 2



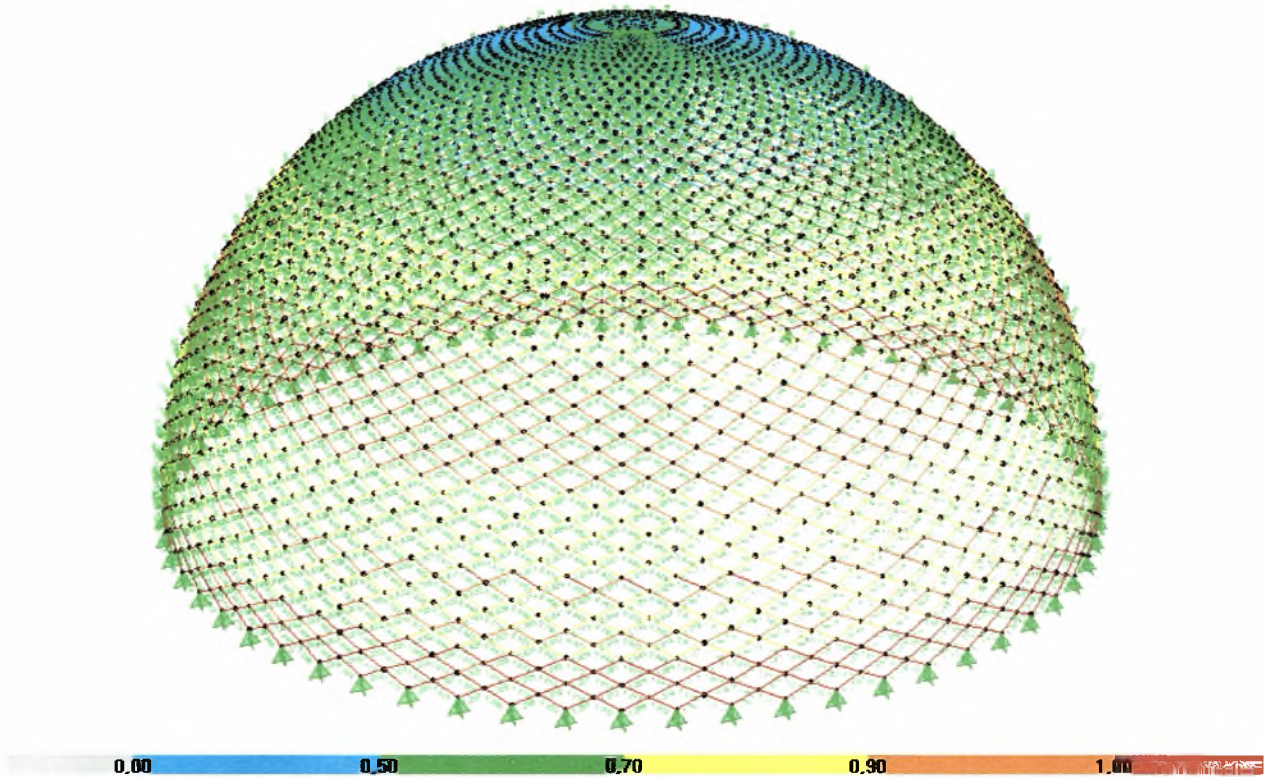
Σχήμα 6.27 : Λυγισμός (Buckling) ιδιομορφή 3



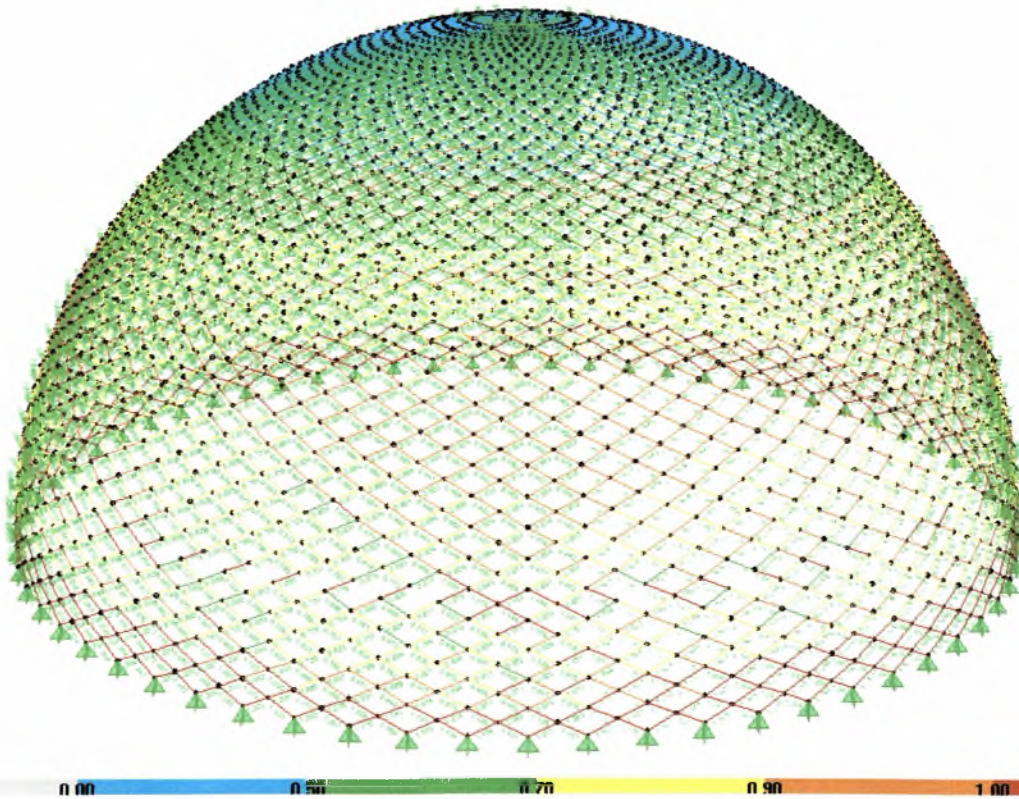
Σχήμα 6.28 : Φόρτιση για $P=1,8*10^{-3}$. Εμφανίζονται πολλές ράβδοι έτοιμες να διαρρεύσουν (πορτοκαλί), ενώ η βάση εμφανίζεται σχεδόν ολόκληρη σε διαρροή (κόκκινη)



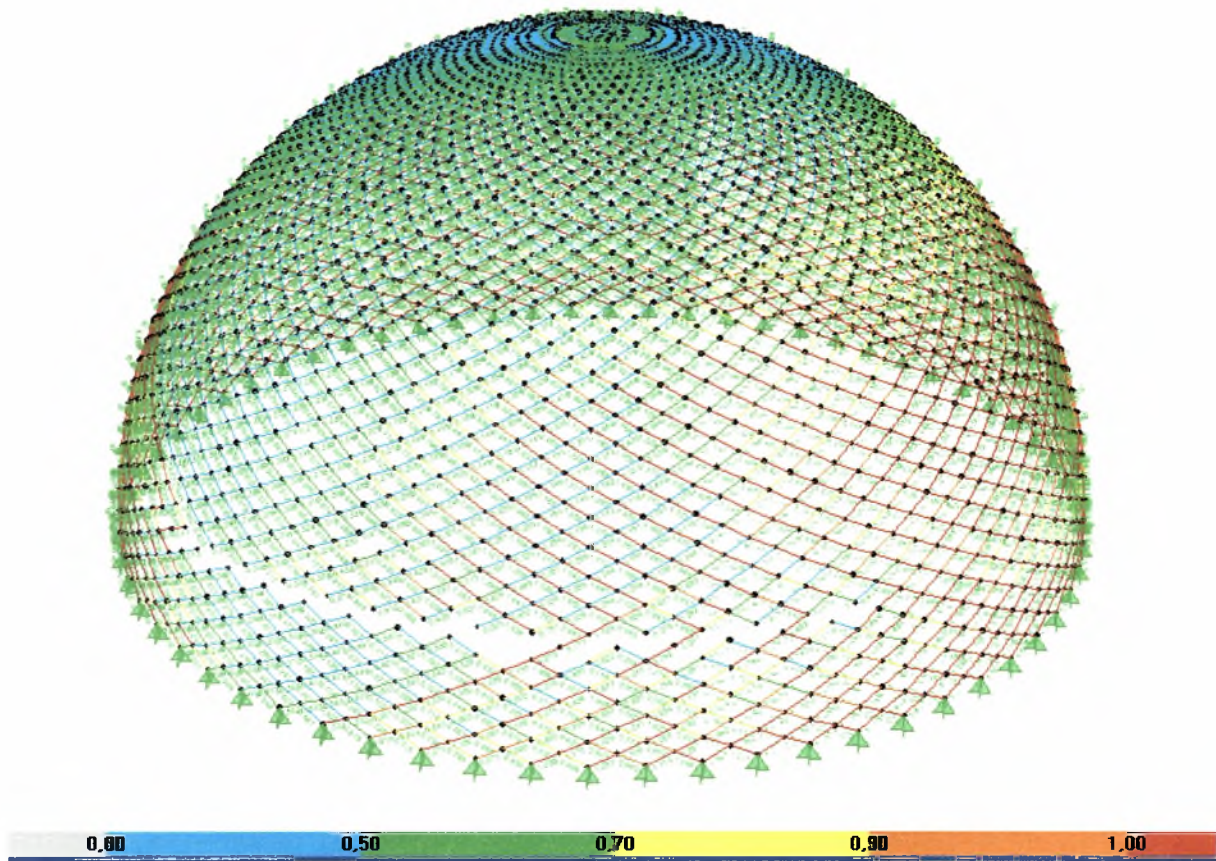
Σχήμα 6.29 : Φόρτιση για $P=1,83*10^{-3}$. Εμφανίζονται πολλές ράβδοι έτοιμες να διαρρεύσουν (πορτοκαλί), ενώ η βάση εμφανίζεται και πάλι να διαρρέει (κόκκινη)



Σχήμα 6.30 : Φόρτιση για $P=1,85 \cdot 10^{-3}$. Εμφανίζονται 9 ράβδοι να διαρρέουν (κόκκινες) στα 5,5 m



Σχήμα 6.31 : Φόρτιση για $P=1,86 \cdot 10^{-3}$. Αφαιρέθηκαν 9 ράβδοι που διέρρευσαν και από την ανακατανομή της έντασης έχουν δημιουργηθεί και άλλες 52 όπως φαίνεται.



Σχήμα 6.32 : Φόρτιση για $P=1,87 \cdot 10^{-3}$. Έχω κόψει ακόμα 52 ράβδους που διέρρευσαν και από την ανακατανομή της έντασης ο φορέας πλέον είναι μηχανισμός

➤ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Μετά από μια σειρά επιλύσεων για διάφορους συνδυασμούς φορτίων καταλήξαμε ότι το P_{cr} τελικά μας το δίνει το χιόνι. Ακόμα και με την ενίσχυση της ζώνης της βάσης με αύξηση της διατομής συνεχίζει να μας δίνει το μικρότερο φορτίο.

Θα περιμέναμε δυσμενέστερο φορτίο να προκαλεί ο συνδυασμός χιονιού και ανέμου. Όμως, τελικά αποδεικνύεται ύστερα από την μελέτη μας ότι ο άνεμος δεν επιβαρύνει την κατασκευή αλλά αντίθετα την ανακουφίζει στην περίπτωση του συνδυασμού. Καθώς επίσης δεν αφήνει την κατασκευή να διαρρεύσει σε κάποιο ύψος συγχρόνως για όλα τα μέλη αλλά με μια υποτυπώδη προοδευτική κατάρρευση ώστε να μας προειδοποιεί η κατασκευή. Η μορφή της κατάρρευσης αυτής ξεκινάει με την διαρροή των μελών από την μεριά που ασκείται η ανεμοπίεση Α.

Στην περίπτωση του χιονιού επειδή είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο είναι λογικό να επηρεάζει συγχρόνως τις ράβδους του ίδιου ύψους. Προφανές είναι ακόμα ότι η φόρτιση του ανέμου θα επηρέαζε κατευθείαν τη βάση του θόλου μας.

Αντίθετα με όλα αυτά δρα ο άνεμος, όπου όπως παρατηρήθηκε από την έρευνα μας δίνει τον αναμενόμενο τρόπο προοδευτικής κατάρρευσης βάση του οποίου οι ράβδοι ξεκινούν να διαρρέουν από την στέψη προς τη βάση.

Τελικά, είναι προφανές ότι ένας δικτυωτός θόλος αυτών των διαστάσεων δεν πρέπει να κατασκευάζεται ως θόλος απλού στρώματος, ενώ συνεχίζει να θεωρείται ιδεώδης η φολιωτή μορφή που επελέγη.

➤ **Βιβλιογραφία**

- [1] A. Lopez, I. Puente and M.A. Serna, Analysis of single layer latticed domes: A new beam – element, Institute of Civil Engineering, University of Navarra, Spain, p.1-6
- [2] A. Lopez, I. Puente and M.A. Serna, Buckling Loads of Semi – Rigidly Jointed Single Layer Latticed Domes, Institute of Civil Engineering, University of Navarra, San Sebastian 20018, Spain, p.1-7
- [3] Brian H. Caudle, P.E, Wide-Open Spaces, Modern Steel Construction, July 2003, p. 48-51
- [4] Bruce R. Ellingwood, Load and Resistance Factor Criteria for Progressive Collapse Design, p. 1-16
- [5] D. Sofianopoulos, Στοιχεία Μεταλλικών Κατασκευών, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Τόμος Ι, Αθήνα 2006, σελ. 59-143
- [6] Donald O. Dusenberry, Principal and Gunjeet Juneja, Engineer Simpson Gumpertz & Heger Inc., Review of Existing Guidelines and Provisions Related to Progressive Collapse, p. 1-31
- [7] El-Sheikh A., Advances in Structural Engineering, vol. 3, Number 3, 1 July 2000, p. 231-244 (14)
- [8] Joseph Burns, John Abruzzo, Mark Tamaro, Thornton-Tomasetti Engineers, Structural Systems for Progressive Collapse Prevention, September 2001, p. 1-5
- [9] M. Papadrakakis, Post-Buckling Analysis of Spatial Structures by Vector Iteration Methods, Institute of Structural Analysis and Aseismic Research, National Technical University, Athens, Greece, 21 January 1981, p. 1-10
- [10] Richard Bradshaw, David Campbell, Mousa Gargari, Amir Mirmiran and Patrick Tripeny, Special Structures: Past, Present and Future, Journal of Structural Engineering, vol. 128, No. 6, June 1, 2002, p. 1-19

- [11] Ronaldo C. Battista, Michele S. Pfeil, Eduardo M. Batista, Strengthening a reticulated spherical dome against local instabilities, 6 March 2000, p. 1-14
- [12] Ted Krauthammer, Robert L. Hall, Stanley C. Woodson, James T. Baylot, John R. Hayes, Young Sohn, Development of Progressive Collapse Analysis Procedure and Condition Assessment for Structures, May 2002, p. 1-12.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000085940

