



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ 2^αΣ ΤΑΞΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ
ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΘΟΛΟΥ ΤΥΠΟΥ SCHWEDLER



Φοιτητές

Αναστάσιος Αργυρίου

Κλεάνθης Παπανικολάου

Επιβλέπων

Δ. Σοφιανόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής

Βόλος, Μάρτιος 2011

Το εξώφυλλο είναι η ολοκληρωμένη απεικόνιση του θόλου Schwedler που μελετήθηκε στη διπλωματική αυτή εργασία, σχεδιασμένος στο πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης και φωτορεαλισμού Rhino, με τις πραγματικές διατομές και διαστάσεις, καθώς και την προσθήκη υαλοπινάκων

Σκοπός και Αντικείμενο

Η παρούσα εργασία σχετίζεται με την πλαστική 2^{ης} τάξης ανάλυση και σχεδιασμό χαλύβδινου θόλου τύπου Schwedler μέσω εξειδικευμένου λογισμικού (Nida_Pro_7). Αρχικά, επιλέχθηκε ένας τύπος μεταλλικού δικτυώματος σύμφωνα με τυχαία ενιαία διατομή. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε η ως άνω ανάλυση του θόλου με τη βοήθεια του προγράμματος NIDA_Pro_7, λαμβάνοντας υπόψη τις φορτίσεις που υπαγορεύει ο Ευρωκώδικας 3 για ίδιο βάρος, φορτία χιονιού και ανέμου. Μετά τους απαραίτητους ελέγχους σε λυγισμό και τις απαιτούμενες αλλαγές των προεπιλεγμένων διατομών προέκυψε ότι η τελική κατασκευή επαρκεί τόσο σε ευστάθεια όσο και σε αντοχή. Ακολούθησε η αναλυτική σχεδίαση του θόλου σε όψη με τις αντίστοιχες διατομές των στοιχείων του. Στο τέλος αυτού του τεύχους περιέχεται CD με εικόνες από δικτυωτούς θόλους σε διάφορα μέρη παγκοσμίως, οι Ευρωκώδικες που χρησιμοποιήθηκαν, τα σχέδια του συγκεκριμένου θόλου σε μορφή που υποστηρίζεται από το AutoCAD καθώς και τα αρχεία σε μορφή που υποστηρίζονται από το NIDA_pro_7.

Ευχαριστίες

Θερμές ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας κ. Δημήτριο Σοφιανόπουλο καθώς και τον S. L. Chan, καθηγητή του Πολυτεχνείου του Hong Kong, για την πολύτιμη βοήθειά του όσον αφορά τη χρήση του προγράμματος NIDA_Pro_7.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Μεταλλικές κατασκευές – Θόλοι.....	5
1.1.1. Εισαγωγή και γενικές έννοιες.....	5
1.1.2. Ιστορική αναδρομή.....	6
1.1.3. Θολωτές κατασκευές.....	7
1.2. Γεωμετρικοί παράμετροι σχεδιασμού.....	10
1.2.1. Μέθοδος σχεδιασμού.....	11
1.2.2. Επιλογή δομικού συστήματος.....	12
1.2.3. Μέθοδοι ανάλυσης χωρικών συστημάτων.....	12

2. JOHAN WILHELM SCHWEDLER

2.1. Σχεδιασμός του θόλου.....	15
2.2. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θόλου.....	22
2.3. Προεπιλογή διατομών του θόλου.....	23

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΩΝ

3.1. Μόνιμα Φορτία (G).....	24
3.1.1. Υπολογισμός Ιδίου Βάρους.....	25
3.2. Κινητά Φορτία (Q).....	25
3.3. Κλιματικά Φορτία (W).....	26
3.3.1. Φορτία Ανέμου.....	26
3.3.1.1. Πίεση ανέμου σε επιφάνειες.....	30
3.3.1.2. Πίεση ταχύτητας αιχμής.....	30
3.3.1.3. Συντελεστής δύναμης C_f	32
3.3.1.4. Υπολογισμός χαρακτηριστικής πίεσης ταχύτητας αιχμής.....	35
3.3.1.5. Υπολογισμός συντελεστή πληρότητας.....	37

3.3.1.6. Ενεργός λυγηρότητα λ.....	38
3.3.1.7. Υπολογισμός Δυνάμεων ανέμου (Fw).....	39
3.3.2. Φορτία Χιονιού.....	40
3.3.2.1. Υπολογισμός συντελεστή σχήματος μ_i	42
3.3.2.2. Υπολογισμός εξαιρετικού φορτίου επί εδάφους.....	42
3.3.2.3. Υπολογισμός φορτίου επί εδάφους για δεδομένη τοποθεσία Sk.....	43
4. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΝΙΔΑ	
4.1. Διαδικασία Ανάλυσης, Second Order Analysis, Plastic Analysis.....	44
4.2. Σχεδιασμός του φορέα στο ΝΙΔΑ.....	46
4.3. Καθορισμός Υλικού.....	46
4.4. Καθορισμός των Διατομών.....	48
4.5. Καθορισμός Φορτίων.....	50
4.6. Εισαγωγή Στηρίξεων.....	52
4.7. Εισαγωγή Συνδυασμών Αστοχίας.....	52
4.8. Καθορισμός Παραμέτρων της Ανάλυσης.....	53
5. ΤΕΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	
5.1. Επισυναπτόμενα σχέδια του φορέα σε διάφορα βήματα.....	58
5.2. Παραμορφώσεις – Αστοχίες φορέα.....	59
5.2.1. Πρώτος συνδυασμός (1.35G+1.5Q).....	60
5.2.2. Δεύτερος συνδυασμός (1.35G+1.5W).....	64
5.2.3. Τρίτος συνδυασμός (1.35[G+Q+W]).....	72
6. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΛΩΝ ΚΑΙ ΚΟΜΒΩΝ	
6.1. 1 ^{ος} Συνδυασμός (1.35G+1.5Q).....	81

6.2. 3 ^{ος} Συνδυασμός (1.35[G+Q+W]).....	85
6.2.1. Φόρτιση – αποφόρτιση μελών.....	85
6.2.2. Ανακατανομή φόρτισης γειτονικών μελών.....	108

7. ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΘΟΛΟΥ SCHWEDLER

7.1. Η διαδικασία της ανάλυσης linear analysis.....	133
7.2. Αποτελέσματα στατικότητας του θόλου.....	134
7.3. Συγκεντρωτικά στοιχεία σύγκρισης ελαστικής και ανελαστικής ανάλυσης.....	135

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Εισαγωγή

1.1. Μεταλλικές κατασκευές – Θόλοι

1.1.1. Εισαγωγή και γενικές έννοιες

Στη σημερινή εποχή, οι δικτυωτές χωρικές κατασκευές αποτελούν μια ευρέως διαδεδομένη λύση, εξαιτίας της ικανότητάς τους να καλύπτουν μεγάλα ανοίγματα, χωρίς ενδιάμεσες στηρίξεις, έχοντας ως πλεονέκτημα την τεράστια ποικιλία σχημάτων καθώς και τη δυνατότητα κατασκευής από μια μεγάλη γκάμα υλικών.

Ο όρος «χωρική κατασκευή» αφορά ένα δομικό σύστημα τριών (3) διαστάσεων. Δηλαδή, η γεωμετρία της κατασκευής, τα εξωτερικά φορτία, οι εσωτερικές δυνάμεις καθώς και οι παραμορφώσεις, εκτείνονται πέραν του ενός επιπέδου. Ουσιαστικά γίνεται λόγος για έναν αριθμό κατασκευών που περιλαμβάνει εσχάρες (grids), κυλινδρικούς θόλους (barrel vaults), άλλες θολωτές κατασκευές (domes), πύργους (towers), δίκτυα καλωδίων (cablenets), 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 σε κατασκευές ενός ή περισσοτέρων στρωμάτων (layers).

Εσχάρα θεωρείται ένα δομικό σύστημα που περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα στρώματα μελών (στοιχείων). Η απλούστερη εσχάρα ενός στρώματος αποτελείται από δυο (2) σύνολα αλληλοτεμνόμενων δοκών, παράλληλων με τις οριακές γραμμές της εσχάρας. Για να δημιουργηθεί ένας κυλινδρικός θόλος (barrelvault), δημιουργείται τόξο καμπύλωσης σε μια εσχάρα κατά μήκος της μιας διεύθυνσής της.

Αντίθετα με τους κυλινδρικούς θόλους, ως «θόλος» (dome) νοείται 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 ανάλυσής 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 (αστρική καμπυλότητα μελών, παραμένουσες τάσεις κατά την ανέγερση, ελλειπή ή ελαττωματική συνδεσμολογία), η αλλαγή της συμπεριφοράς ανάλογα με τον τρόπο επιβολής των φορτίων (απευθείας στους κόμβους ή στα μέλη) και άλλα.

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 κανόνες σχεδιασμού.

Τα προαναφερθέντα οδήγησαν στη δημιουργία ενός μοντέλου μεταλλικού κωνικού θόλου τύπου Schwedler 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' ουσιών δυναμική φόρτιση) και φορτίο χιονιού (στατική φόρτιση). Ουσιαστικά ερευνήθηκε η 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.

1.1.2. Ιστορική αναδρομή

Ως «ξεχωριστές κατασκευές», θεωρούνται εκείνες που αποτελούν ορόσημα ανάμεσα στα επιτεύγματα του κατασκευαστή πολιτικού μηχανικού. Είναι αυτές που με μια ιστορική αναδρομή δείχνουν τον τρόπο με τον οποίο διαμόρφωσαν τις συνθήκες πρακτικής στο κατώφλι του 21^{ου} αιώνα και 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 μια πρωτότυπη και όχι πίστη αντιγραφή κάποιας άλλης. Είναι αυτές οι κατασκευές που κάνουν κάποιον υπερήφανο για την επιστήμη και του εξάπτουν το ενδιαφέρον να συνεχίσει και να δημιουργεί αξιόλογες κατασκευές και στο μέλλον.

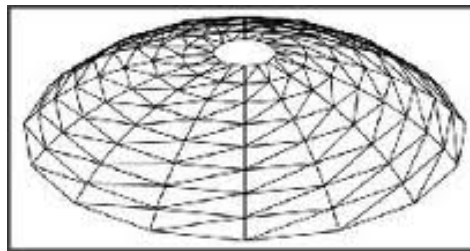
Με τον όρο «ξεχωριστή κατασκευή» γίνεται αναφορά σε καινοτομίες κατασκευαστικών συστημάτων μεγάλων ανοιγμάτων (long span), κυρίως στεγών και κάλυψης μεγάλων εσωτερικών χώρων χωρίς ενδιάμεσες στηρίξεις.

Ειδικότερα, περιλαμβάνουν πολλούς τύπους κατασκευών όπως : χωροδικτυώματα, εσχάρες, δίκτυα καλωδίων (cablenets), εφελκυσόμενες μορφές (tensegrity), γεωδαιτικούς θόλους (geodesic domes), λεπτά κελύφη (thin shells) κ.λ.π.

1.1.3. Θολωτές κατασκευές

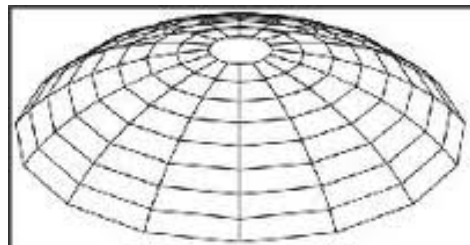
Οι θόλοι αποτελούν έναν από τους πιο αρχαίους τρόπους κατασκευής. Ανεξάρτητα από το πόσο μεγάλο ή μικρό είναι το μέγεθος τους, το περίγραμμα της διαστάσεως της βάσης τους σε κάτοψη είναι συνήθως κυκλικό. Ο σκελετός της θολωτής κατασκευής μπορεί να καταταχθεί σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με τον προσανατολισμό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

Schwedler Dome : Διαθέτει ραβδώσεις, που βρίσκονται πάνω στις μεσημβρινές γραμμές, δακτυλίου που συνθέτουν οριζόντια πολύγωνα και διαγώνιους που εκτείνονται από την τομή μεταξύ ραβδώσεων και δακτυλίων, ενός οριζόντιου δακτυλίου στην τομή του επόμενου (σχήμα 1.1).



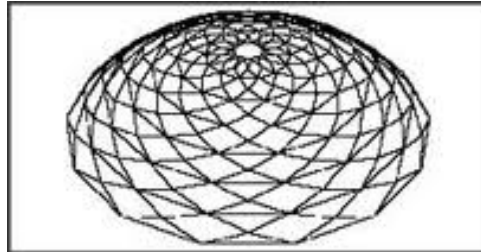
Σχήμα 1.1 : **Schwedler Dome**

Ribbed Dome : Έχει ραβδώσεις που βρίσκονται πάνω στις μεσημβρινές γραμμές και δακτυλίου που συνθέτουν οριζόντια πολύγωνα (σχήμα 1.2).



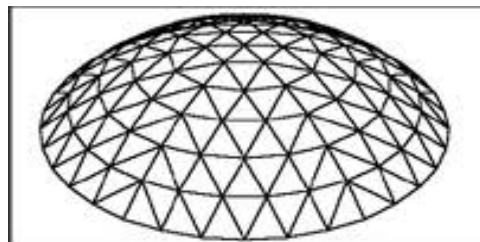
Σχήμα 1.2 : **Ribbed Dome**

Lamella Dome : Έχει διαγώνιους που εκτείνονται από τη στέψη προς τον ισημερινό του θόλου σε δυο διευθύνσεις σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού και αντίθετα. Επιπρόσθετα, μπορεί να έχει, είτε όχι, οριζόντιους δακτυλίους, αλλά δεν έχει μεσημβρινές ραβδώσεις (σχήμα 1.3).



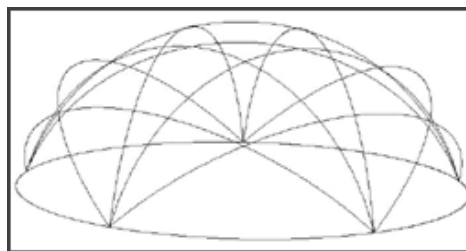
Σχήμα 1.3 : **Lamella Dome**

Diamatic Dome : Αποτελείται από τριγωνοποιημένους τομείς (pie-shaped sectors) που επαναλαμβάνονται σε ακτινοειδή διάταξη γύρω από τη στέψη (σχήμα 1.4).



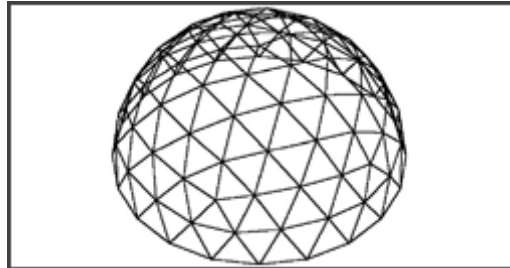
Σχήμα 1.4 : **Diamatic Dome**

Great Circle Dome : Η ονομία του οφείλεται στο ότι όλα τα στοιχεία του ακολουθούν είτε λίγο είτε πολύ μεγάλες κυκλικές διατάξεις πάνω από την επιφάνεια του θόλου (σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5 : **Great Circle Dome**

Geodesic Dome : Ο θόλος αυτός διαφοροποιείται ανάλογα με την προέλευση του με βάση τα αρχέγονα Πλατωνικά ή Αρχιμήδεια στερεά, ή από κάποιο πρίσμα. Οι θόλοι αυτοί προκύπτουν απεικονίζοντας (mapping) μορφές στις πλευρές ενός πολύεδρου και προβάλλοντας την προκύπτουσα, πάνω σε μια καμπύλη επιφάνεια (σχήμα 1.6).

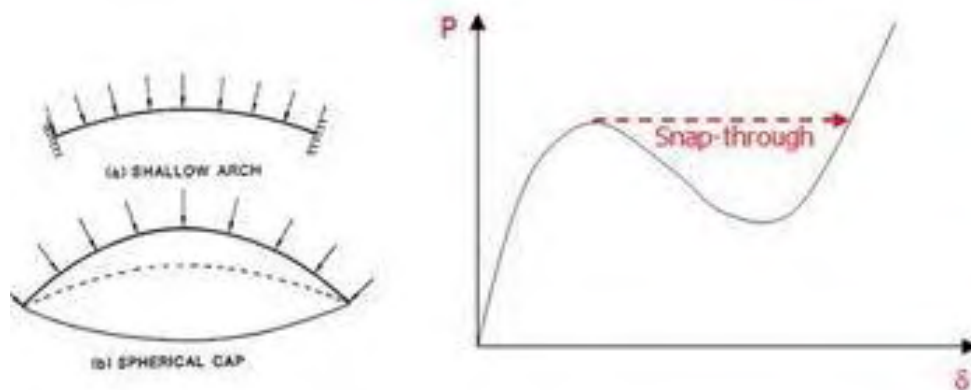


Σχήμα 1.6 : Geodesic Dome

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 λογισμό των μελών και υποσυστημάτων, στα οποία ο λυγισμός ή η διαρροή, ενδέχεται να οδηγήσουν 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) «κακαριαίου λυγισμού» ή snap-through buckling, που σχετίζεται με απομακρυσμένες θέσεις ευσταθούς ισορροπίας, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα :



Σχήμα 1.7 : Ακαριαίος λυγισμός «snap through buckling» για θόλους

Η επιρροή της δράσης του ανέμου δεν έχει ακόμα 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 δυσμενής 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 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 ελεγχθεί ότι τα πολύγωνα που ορίζονται είναι όσο το δυνατόν όμοια, ώστε να διευκολύνουν την εφαρμογή της επικάλυψης.

1.2. Γεωμετρικοί παράμετροι σχεδιασμού

Στο στάδιο σχεδιασμού είναι σημαντικό να οριστεί η 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 δυο διευθύνσεις, ενδιαφέρον έχει 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 ιδιάζοντως 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 η γωνία σύνδεσης μεταξύ τους. Αυτές οι δυο 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 ανυπέβλητο εμπόδιο για την κατασκευασιμότητα της κατασκευής. Η επιλογή δε της απόστασης μεταξύ των επάλληλων εσχαρών 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 - αναίρεσης 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. Εξαίρεση σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να αποτελέσουν δυναμικά φορτία, τα οποία μπορούν να αντικατασταθούν με κατάλληλα αυξημένες στατικές δράσεις.

1.2.1. Μέθοδος σχεδιασμού

Κάθε μελέτη κατασκευής αποτελεί αναμφισβήτητα μια ξεχωριστή περίπτωση. Παρ' όλα αυτά είναι πιθανό να δημιουργηθεί μια αλληλουχία βημάτων για τον σχεδιασμό.

Κυρίως πρέπει να σημειωθεί, ότι για να “καλυφθεί” ένα σχήμα με έναν προαποφασισμένο τρόπο, υπάρχουν δυο διαφορετικές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της επιφάνειας.

- **Είτε η γεωμετρία της συνολικής επιφάνειας προσδιορίζεται από πριν, δηλαδή πρέπει να γίνει μια γεωμετρική διαίρεση όπως για παράδειγμα μια γεωδαιτική διαίρεση για θόλους.**
- **Είτε το μοντέλο παραμένει όπως ήταν αρχικά και η επανάληψη του 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 δικτυώματος είναι σημαντική, για λόγους αντοχής καθώς και για το κόστος, όπως επίσης και για λόγους αισθητικής. Η επιλογή της γεωμετρίας των μελών του δικτυώματος 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 δυο στρωμάτων θέτονται σε γωνία 45 μοιρών (45°). Για το λόγο αυτό πρέπει να εξετάζεται η 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.

1.2.2. Επιλογή του δομικού συστήματος

Μετά την επιλογή του γενικού σχήματος της κατασκευής, είναι απαραίτητο να επιλεγεί το δομικό σύστημα. Μια μεγάλη ποικιλία από δομικά συστήματα είναι διαθέσιμη, η οποία μπορεί να πληροί τις προϋποθέσεις που έχουν προκύψει από τις γεωμετρικές απαιτήσεις του σχεδιασμού. Ωστόσο δεν μπορούν όλα τα συστήματα να αναλαμβάνουν 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.

1.2.3. Μέθοδοι ανάλυσης χωρικών συστημάτων

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 προσδιοριστούν όλες οι άγνωστες ποσότητες, αρκούν αυτές που έχουν σχέση με το πρόβλημα που εξετάζεται. Οι μέθοδοι της ανάλυσης μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής :

1. **Μέθοδος των κόμβων** : εφαρμόζεται σε σύστημα δυο 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.
2. **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 συμπεριληφθεί η γραμμική ελαστική απόκριση του συστήματος. Οι υπολογισμοί ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς, μπορούν να γίνουν χρησιμοποιώντας απλοποιημένα μοντέλα της συμπεριφοράς των μελών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μπορεί να επιτευχθεί μια σταθερή λογική απόκριση των θλιβόμενων μελών και όταν το μέλος φτάσει στο μέγιστο φορτίο που μπορεί να αναλάβει (οριακή αντοχή), τότε λαμβάνει χώρα η ανακατανομή της έντασης. Οι μέθοδοι που αναφέρθηκαν βασίζονται σε όλες τις εξισώσεις ισορροπίας. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι αυτές οι μέθοδοι δεν λαμβάνουν υπόψη :

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

Γι' αυτό είναι απαραίτητο να αξιολογηθεί προσεκτικά η 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 H / Y ανάλυσης κατασκευών.

2. Johan Wilhelm Schwedler

Ο θόλος που επελέγη να σχεδιαστεί πήρε το όνομά του από το Γερμανό μηχανικό Johan Wilhelm Schwedler. Ο Schwedler γεννήθηκε σε μια φτωχή οικογένεια ξυλουργών. Παρακολούθησε το σχολείο του εμπορίου στο Βερολίνο και το ολοκλήρωσε το 1842. Στη συνέχεια, πέρασε με επιτυχία τις εξετάσεις για τη δημόσια διοίκηση και μετεκπαιδεύτηκε στα υδραυλικά και γεωτεχνικά έργα. Το 1852 ήταν διευθυντής κατασκευών των δομικών έργων στην Siegerland.

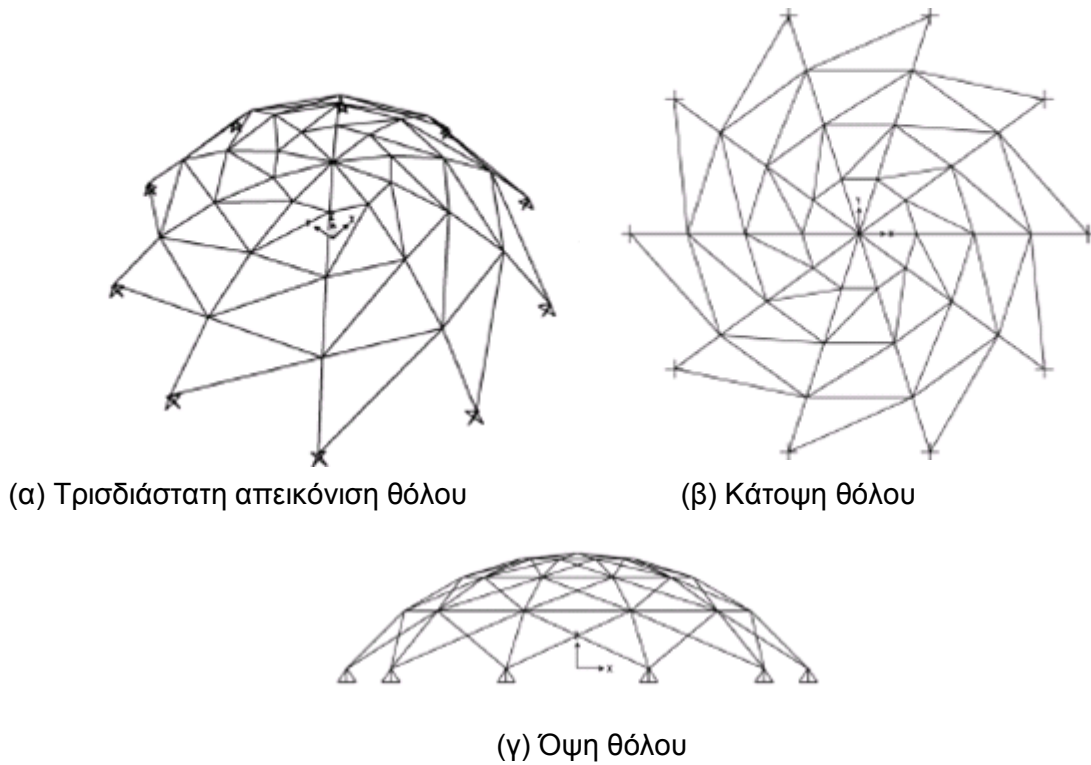
Το 1858 ήταν ο βασιλικός οικοδόμος σιδηροδρόμων και εργαζόταν στο τμήμα σιδηροδρόμων του Υπουργείου Δημοσίων Έργων στο Βερολίνο. Το 1868 του απονεμήθηκε ο τίτλος του έμπιστου κυβερνητικού επιθεωρητή δομικών έργων και κατείχε το πιο υψηλόβαθμο διοικητικό αξίωμα στον τομέα των κατασκευών. Από το 1864 - 1873 δίδαξε στην Ακαδημία Κατασκευών του Βερολίνου. Ο Schwedler ήταν για πολύ καιρό μέλος της συντακτικής επιτροπής του περιοδικού των Πολιτικών Μηχανικών. Μετά τον Schwedler φτιάχτηκε η πεζογέφυρα Schwedlerbrücke (γέφυρα του Schwedler), η οποία είναι πάνω από τον σιδηρόδρομο Frankfurt-Hanauer στη Frankfurt-Ostend και η οδός στα νότια αυτού ονομάστηκε Schwedlerstraße.

Από το 1852 ασχολήθηκε με την κατασκευή σιδηροδρομικών γεφυρών από χάλυβα. Στην «Θεωρία περί δικτυωμάτων στη γεφυροποιία», ανέπτυξε μια επιστημονική θεωρία βάσει της οποίας ένας δικτυωτός φορέας μπορεί να σχεδιαστεί να υπολογιστεί και να διαστασιολογηθεί δεδομένης της παραμόρφωσής του από λυγισμό. Μια συνέπεια της θεωρίας του ήταν ότι η άνω ζώνη του φορέα είχε τοξοειδές σχήμα. Αυτό εφαρμόζεται για πρώτη φορά στη σιδηροδρομική γέφυρα της Czernsk. Στην πραγματικότητα θα έπρεπε το τόξο στη μέση να έχει μια μικρή παραμόρφωση προς τα κάτω. Αυτό όμως αποδοκιμάστηκε για λόγους αισθητικής. Οι διαγώνιοι του Schwedler αλλάζουν

κατεύθυνση στη μέση της γέφυρας εξαιτίας του γεγονότος ότι σε ορισμένες περιοχές μεταβάλλεται η καταπόνηση λόγω των κινητών φορτίων. Έτσι έχουμε το σχηματισμό διασταυρούμενων διαγωνίων, προκειμένου να γίνει ανακατανομή των φορτίων. Ο φορέας Schwedler ήταν ο επικρατέστερος μέχρι και το 1900. Ο ίδιος αντικατέστησε τους συνδέσμους των στηρίξεων με κινητές αρθρώσεις. Αργότερα ανέπτυξε ως εξέλιξη της θεωρίας του την τριαρθρωτή αψίδα. Ο Schwedler έχτισε με αυτή την αρχή τις στέγες διαφόρων σιδηροδρομικών σταθμών (όπως τον Ostbahnhof του Βερολίνου, και το Hauptbahnhof της Φρανκφούρτης). Ο χαλύβδινος θόλος του Schwedler χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1863 στην οροφή της δεξαμενής φυσικού αερίου στην οδό Holzmarktstraße του Βερολίνου. Κατασκεύασε στέγες με μορφή χωροδικτυώματος που το άνοιγμά τους έφτανε τα 45μ.

2.1. Σχεδιασμός του θόλου

Ο σχεδιασμός του θόλου, που είναι τύπου Schwedler, παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 2.1 έτσι όπως τον επινόησε ο Γερμανός μηχανικός. Είναι ένας από τους πιο διάσημους τύπους θολωτών κατασκευών ο οποίος αποτελείται από πλήθος μεσημβρινών ράβδων ενωμένους με ένα αντίστοιχο αριθμό πολυγωνικών οριζόντιων δακτυλίων σχηματίζοντας έτσι την περίπου σφαιροειδή μορφή του. Επιπλέον για να ενισχύσει την αντοχή του πρόσθεσε στην αρχική του μορφή και τα διαγώνια μέλη, δηλαδή διαγώνιες ράβδους οι οποίες ενώνουν τους μεσημβρινούς με τους οριζόντιους δακτυλίους με τέτοιο τρόπο ώστε να διαιρούν τα ήδη υπάρχοντα τραπεζοειδή διάκενα σε δύο τρίγωνα. Για παράδειγμα στη συγκεκριμένη δομή του θόλου όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2 ο αριθμός των κόμβων σε κάθε δακτύλιο έχει διαμορφωθεί έτσι ώστε να είναι 10 (10 κόμβοι), οι αποστάσεις μεταξύ των δακτυλίων είναι ίσες από την βάση έως την κορυφή, το ίδιο και οι αποστάσεις των μεσημβρινών από την αρχή (0°) έως την ολοκλήρωση ενός κύκλου (360°). Η πραγματοποίηση αυτής της συγκεκριμένης δομής του θόλου Schwedler για την γεωμετρία που επιτυγχάνεται στο παρακάτω σχήμα 2.1, γίνεται με την βοήθεια ενός συνόλου μαθηματικών εξισώσεων στις οποίες περιέχεται η διάμετρος $d(m)$ του θόλου, ο συνολικός αριθμός των δακτυλίων (N_r) και το ύψος $h(m)$ του θόλου από τη βάση έως την κορυφή. Το κορυφαίο σημείο στο “στέμμα” του θόλου καλείται ως “πρώτο” όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3 το οποίο βρίσκεται στο κέντρο των αξόνων x και y του σχεδίου.



Σχήμα 2.1 : Πρότυπο σχέδιο θόλου Schwedler

Οι συντεταγμένες των άλλων σημείων σε κάθε δακτύλιο υπολογίζονται με τις παρακάτω εξισώσεις :

$$x_i = \frac{D}{2Nr} \times \cos \left[\frac{360}{4n_i} \times \left(i - \sum_{j=1}^{i-1} 4n_j - 1 \right) \right]$$

$$y_i = \frac{D}{2Nr} \times \sin \left[\frac{360}{4n_i} \times \left(i - \sum_{j=1}^{i-1} 4n_j - 1 \right) \right]$$

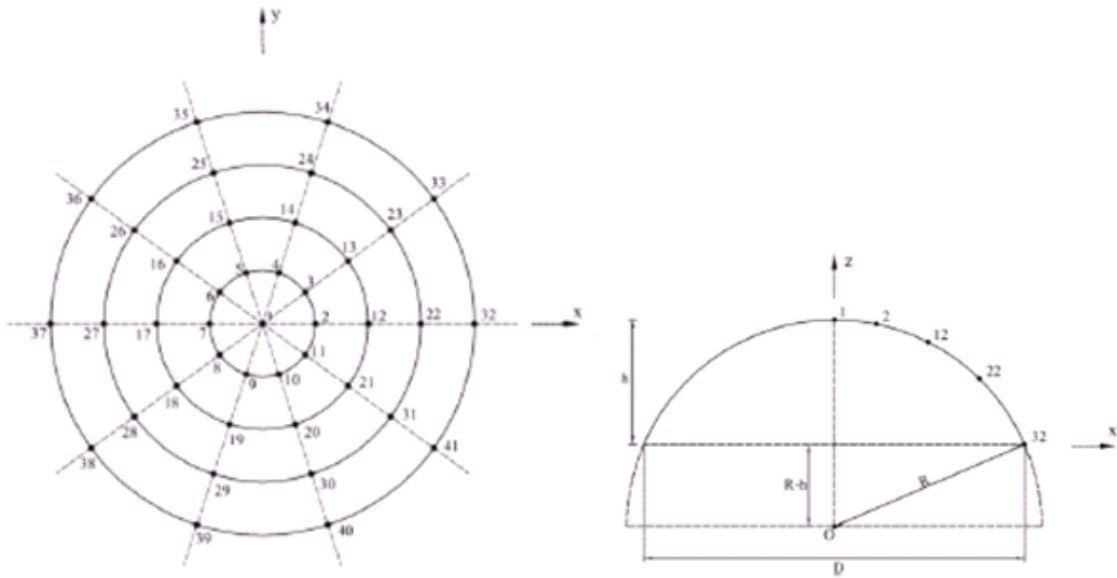
$$z_i = \sqrt{R^2 - \frac{n_i^2 D^2}{4Nr^2}} - (R - n)$$

Όπου :

n_i ο αριθμός δακτυλίου που αντιστοιχεί στον κόμβο i

R η ακτίνα του ημισφαιρίου όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2 και δίνεται από την εξίσωση

$$R = (d^2 + 4h^2) / (8h)$$

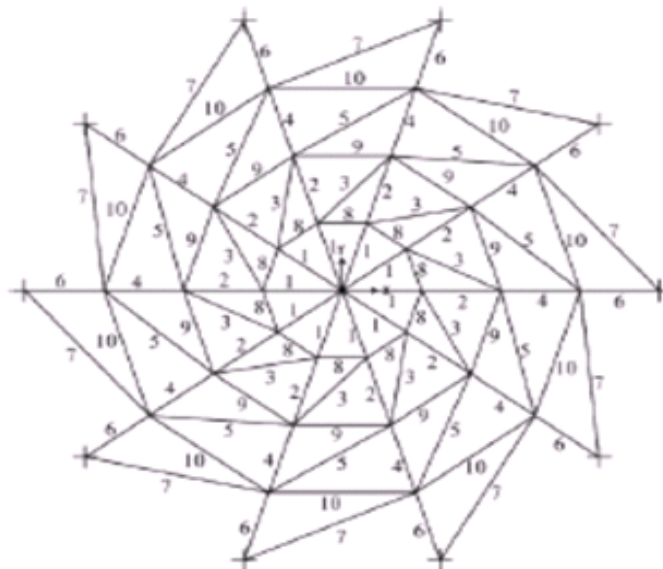


(α) Κάτοψη θόλου με αρίθμηση

(β) Τομή θόλου με αρίθμηση

Σχήμα 2.2 : Αρίθμηση κόμβων για το αντίστοιχο σύστημα συντεταγμένων

Δεδομένου ότι η κατηγοριοποίηση των μελών γίνεται με την λογική ότι η χρησιμότητα της κάθε μονάδας των μελών είναι ξεχωριστή μπορούν να χωριστούν σε τρία “γκρούπ” : τους μεσημβρινούς, των οποίων τα μέλη αποτελούν μια ομάδα ράβδων, τους δακτυλίους, των οποίων τα μέλη αποτελούν με τη σειρά τους μια άλλη ομάδα ράβδων και, τελικώς, τα διαγώνια μέλη ανήκουν στην τρίτη ομάδα ράβδων. Οπότε με βάση αυτή την κατανομή των ομάδων προκύπτει ο συνολικός αριθμός των “γκρούπ” που είναι ίσος με τον αριθμό που προκύπτει από το $3Nr - 2$. Το σχήμα 2.3 δείχνει τον αριθμό των ομάδων που ανταποκρίνεται στους μεσημβρινούς, τους δακτυλίους και τους διαγώνιους.



Σχήμα 2.3 : Θόλος Schwedler με αρίθμηση μελών στα αντίστοιχα “γκρούπς”

Για καθένα από τα μέλη μπορεί να θεωρηθεί ότι η αρχή του προσδιορίζεται με τον αρχικό κόμβο του και το τέλος του με τον αντίστοιχο τελικό του κόμβο. Ο αρχικός κόμβος όλων των στοιχείων είναι το σημείο με το νούμερο 1 και το τέλος της αρίθμησής τους είναι εκεί όπου βρίσκονται οι κόμβοι του πρώτου δακτυλίου. Η αρχή και το τέλος των κόμβων των στοιχείων των δακτυλίων ορίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις :

$$i = 10 \times (n_i - 1) + j + 1$$

$$j = 10 \times (n_i - 1) + j + 2$$

Όπου :

$$j = 1, 2, 3, \dots, 9$$

$$n_i = 1, 2, \dots, Nr - 1$$

και

$$i = 10 \times (n_i - 1) + 2$$

$$j = 10 \times n_i + 1$$

με

$$n_i = 1, 2, \dots, Nr - 1$$

Επίσης για τα πλευρικά και διαγώνια μέλη ισχύει :

$$i = 10 \times (n_i - 1) + 2 + \text{Fix}\left(\frac{j-1}{2}\right)$$

$$j = 10 \times n_i + j - \text{Fix}\left(\frac{j-1}{2}\right)$$

με

$$j = 2, 3, \dots, 20$$

$$n_i = 1, 2, \dots, Nr - 1$$

και

$$i = 10 \times (n_i - 1) + 2$$

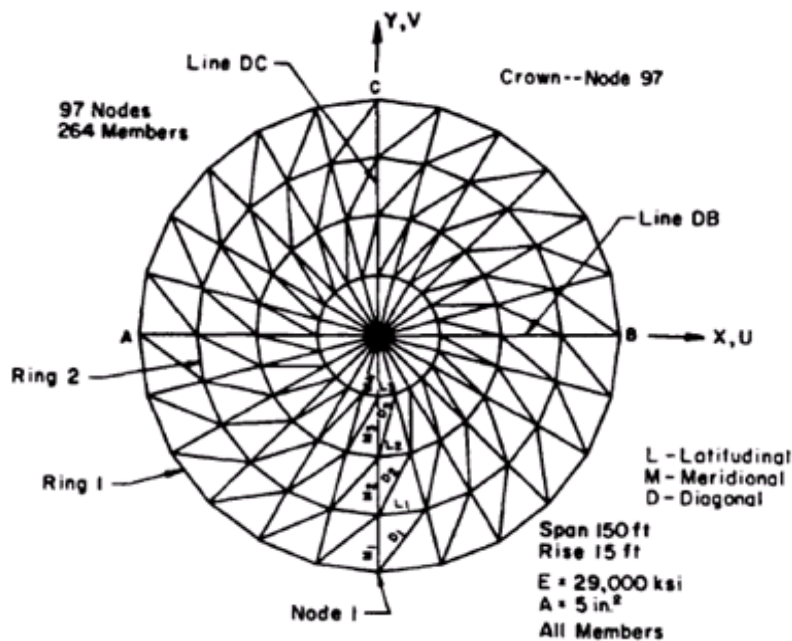
$$j = 10 \times (n_i + 1) + 1$$

με

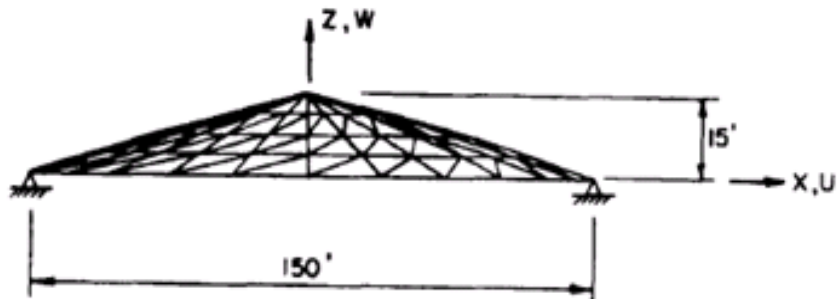
$$n_i = 1, 2, \dots, Nr - 1$$

Όπου i είναι η αρχή και j το τέλος των μελών μου. Η πρώτη κατά σειρά εξίσωση από πάνω προς τα κάτω, ορίζει τα στοιχεία της ομάδας των δακτυλίων τα οποία αποτελούνται από δύο διαδοχικούς κόμβους σε κάθε δακτύλιο. Η δεύτερη και η τρίτη κατά σειρά εξίσωση δίνουν το μεγαλύτερο και το μικρότερο αριθμό σε κάθε δακτύλιο που αντιστοιχεί σε αυτό το “γκρουπ”. Τέλος η τέταρτη εξίσωση δίνει το συνολικό αριθμό των μεσημβρινών και των διαγώνιων μελών τα οποία βρίσκονται μεταξύ των δακτυλίων n_i και $n_i + 1$.

Στο παρακάτω σχήμα 2.4 παρουσιάζεται ένα ακόμα παράδειγμα θόλου τύπου Schwedler σε κάτοψη και τομή και είναι αυτό που χρησιμοποιήθηκε σαν πρότυπο στην παρούσα μελέτη.



(α)



(β)

Σχήμα 2.4 : Γεωμετρικός θόλος Schwedler (α) κάτοψη, (β) τομή

Εν προκειμένω, τα μεγέθη διαστάσεων, τόσο σε ύψος όσο και σε μήκος, είναι μεγαλύτερα, θα πρέπει η κατασκευή του θόλου να γίνει βήμα-βήμα ώστε να είναι δυνατή και η πραγματοποίηση της στον χώρο του εργοταξίου.

Αρχική επιδίωξη ήταν η κατασκευή ενός θόλου αρκετά μεγάλων διαστάσεων, της τάξης του 40m ύψος και διαμέτρου 80m. Έτσι λοιπόν σχεδιάστηκε ο θόλος με αυτές τις διαστάσεις χωρίς να ληφθούν υπόψη οι παράμετροι του υλικού. Απλά κατασκευάστηκε ένας θόλος Schwedler με βάση το παραπάνω πρότυπο όπως στο παράδειγμα σχήμα 2.4 και εισήχθη στο πρόγραμμα NIDA προκειμένου να διαπιστωθεί πόσα μέλη και κόμβοι είχαν σχηματισθεί. Αυτό γιατί η συγκεκριμένη έκδοση του προγράμματος NIDA (φοιτητική έκδοση περιορισμένης χρήσης), μπορούσε να υπολογίσει και να λύσει έως 10.000 μέλη. Προφανώς διαπιστώθηκε ότι η κατασκευή περιείχε πάνω από 20.000 μέλη και ήταν αδύνατον να λυθεί με το συγκεκριμένο πρόγραμμα. Οπότε έπρεπε να αναθεωρηθούν οι αρχικές επιδιώξεις και να δημιουργηθεί ένας νέος θόλος μικρότερων διαστάσεων, ώστε να αποτελείται από μέλη κάτω των 10.000. Ύστερα από πλήθος δοκιμών προέκυψε το τελικό μοντέλο του θόλου ώστε να είναι των ίδιων αναλογιών απλά σε πιο μικρή κλίμακα, δηλαδή διατηρήθηκε η αναλογία ύψους πλάτους στο μισό, όπως θα παρουσιασθεί παρακάτω.

Έτσι λοιπόν κατασκευάστηκε ένας πιο μικρός θόλος ύψους (h) 30m και διαμέτρου (d) 60m με την ανάλογη θεωρία υλοποίησης που διευκρινίστηκε πιο πάνω. Όμως για την δημιουργία αυτής της κατασκευής θεωρήθηκε σαν δεδομένο ότι οι ράβδοι, ή αλλιώς τα μέλη του θόλου, θα πρέπει να τηρούν κάποιες προδιαγραφές τόσο του υλικού από το οποίο θα είναι φτιαγμένες όσο και των διαστάσεων με τις οποίες θα είναι διαμορφωμένες.

Για τις αξιώσεις αυτές και με τους περιορισμούς που τέθηκαν αποφασίστηκε ότι η μεγαλύτερη ράβδος δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τα 2,50m και η μικρότερη να μην είναι λιγότερο από 0,70m. Κατασκευαστικά αυτό δημιούργησε πρόβλημα στην δομή του θόλου, καθώς για να ενωθεί η βάση με την κορυφή με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω, θα έπρεπε να γίνουν κάποιες τεχνικές προσαρμογές χωρίς όμως να αλλάξει η γεωμετρική μορφή του.

Σχεδιάστηκε αρχικά ο θόλος με γνώμονα το γερμανικό μοντέλο Schwedler από τη βάση έως την κορυφή με τις ανάλογες διαστάσεις ύψους 30m και διαμέτρου 60m. Η κατασκευή χωρίστηκε σε 30 οριζόντιους δακτυλίους ίσης απόστασης μεταξύ τους, δηλαδή ανά 1m, οι οποίοι μικραίνουν όσο μεγαλώνει το ύψος έως να φθάσουν την κορυφή. Συγκεκριμένα ο πρώτος οριζόντιος δακτύλιος στη βάση (0m ύψος), έχει διάμετρο 60m, ο αμέσως επόμενος στο 1m ύψος έχει διάμετρο 58m κ.ο.κ. έως την κορυφή αναλογικά.

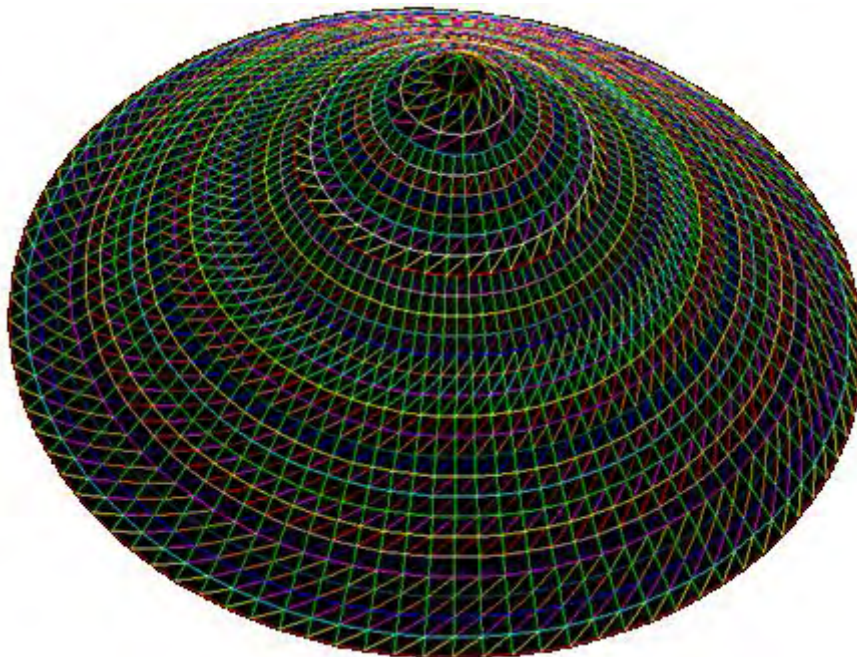
Η αμέσως επόμενη ενέργεια ήταν να επιλεγθεί το πλήθος των μεσημβρινών και κατ' επέκταση να οριστεί ο αριθμός των κόμβων σε κάθε δακτύλιο. Έτσι επελέχθη αρχικά να χωριστούν οι δακτύλιοι σε 120 ίσα μέλη, δηλαδή ο κάθε οριζόντιος δακτύλιος να έχει αντίστοιχα 120 κόμβους και στο σύνολο της κατασκευής να υπάρχουν 120 μεσημβρινοί. Όμως παρατηρήθηκε ότι πύκνωναν τα μέλη πολύ γρήγορα σε σχέση με το ύψος και οι διαστάσεις τους ήταν κάτω του ορίου που είχε αρχικά τεθεί. Παρατηρήθηκε ότι σχεδόν στα 10m ύψους υπήρξαν κιάλας μέλη με μήκος κάτω από 0,70m κάτι που αποκλείστηκε αρχικά θέτοντας τους περιορισμούς των διαστάσεων των μελών. Οπότε έπρεπε να βρεθεί ο κατάλληλος, ή καλύτερα, ο ιδανικός αριθμός μεσημβρινών που θα διαιρούσε τους δακτυλίους με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει καλυφθεί όσο το δυνατόν περισσότερο ύψος με το πλήθος των κόμβων που θα δημιουργούνταν. Ύστερα πάλι από τη διαδικασία πολλών δοκιμών με τη χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος AutoCad επετεύχθη η βέλτιστη επιλογή διαχωρισμού των δακτυλίων ώστε στη βάση να μην υπάρχουν μέλη με μήκος μεγαλύτερο των 2,5m αλλά και όσο αυξάνεται το ύψος να μην υπάρξουν μέλη με μήκος μικρότερο από 0,70m. Αυτό επετεύχθη χωρίζοντας τους δακτυλίους με 90 μεσημβρινούς που ξεκινούν από την κορυφή και καταλήγουν στη βάση με αποτέλεσμα να τη δημιουργία 90 κόμβων σε κάθε οριζόντιο δακτύλιο. Έτσι στον πρώτο δακτύλιο δημιουργήθηκαν 90 ίσα οριζόντια μέλη με μήκος 2,09m στο δεύτερο ίδιο αριθμό κόμβων με μέλη μήκους 2,02m κ.ο.κ., έως το εικοστό επίπεδο των δακτυλίων με την ίδια αναλογία. Θα μπορούσαν βέβαια να χωριστούν με τέτοιο τρόπο οι δακτύλιοι ώστε τα οριζόντια μέλη να έχουν οριακό μήκος τα 2,50m όπως θεωρήθηκε αρχικά, αλλά όπως παρατηρήθηκε τα διαγώνια μέλη που προέκυπταν ήταν πολύ μεγαλύτερα. Για αυτόν ακριβώς το λόγο επελέχθησαν οριζόντια μέλη με μήκος 2,02m και κατακόρυφα μήκους 1,41m, επειδή τα διαγώνια στον πρώτο δακτύλιο έφταναν τα 2,49m, σχεδόν στο όριο των 2,50m. Αυτή η λογική ακολουθήθηκε μέχρι τον εικοστό δακτύλιο, δηλαδή σε ύψος 20m από τη βάση, γιατί εκεί παρουσιάστηκαν οριζόντια μέλη με μικρότερο από το επιτρεπόμενο μήκος που είναι τα 0,70m. Για την ακρίβεια σε εκείνο το επίπεδο δημιουργήθηκαν 90 κόμβοι με αντίστοιχα μέλη μήκους 0,77m και η διαδικασία σταμάτησε εκεί γιατί στον αμέσως επόμενο δακτύλιο δημιουργήθηκαν μέλη με μήκος 0,68m που είναι κάτω από το όριο που τέθηκε αρχικά. Συνεπώς έπρεπε να γίνουν νέες δοκιμές ώστε να βρεθεί ο ιδανικός νέος αριθμός μεσημβρινών για να προκύψουν μέλη με το επιδιωκόμενο μήκος. Δε μεταβλήθηκε ο αριθμός των δακτυλίων γιατί όπως παρατηρήθηκε δεν άλλαζε κάτι στην δομή του θόλου όσον αφορά το μήκος των μελών αφού θεωρήθηκε σταθερή η μεταξύ τους απόσταση. Οπότε το μήκος των κατακόρυφων μελών που ενώνουν τους δακτυλίους, ανεξάρτητα από τον αριθμό των μεσημβρινών παραμένει το ίδιο και είναι στα 1,41m. Στη συνέχεια ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία προκειμένου να διαιρεθούν οι επόμενοι δακτύλιοι ώστε να έχουν τα μέλη τα επιθυμητά μήκη και ύστερα από δοκιμές

θεωρήθηκε προτιμητέος ο χωρισμός ανά δύο οριζόντια μέλη προς τα πάνω. Δηλαδή χωρίστηκαν οι επόμενοι έξι δακτύλιοι, άλλα 6m προς την κορυφή, με 45 μεσημβρινούς οπότε και σχηματίστηκαν 45 κόμβοι διατηρώντας την αρχική δομή και μορφή του θόλου για να μην αλλάξει η στατικότητα του. Έτσι δημιουργήθηκαν τα οριζόντια μέλη με μήκος το διπλάσιο του προηγούμενου δηλαδή $2 \times 0,7678\text{m} = 1,54\text{m}$, τα κατακόρυφα ως έχουν με $1,41\text{m}$ και οι διαγώνιοι με $2,03\text{m}$ και, με τον ανάλογο γεωμετρικό σχηματισμό, προκύπτει ο εικοστός έκτος ($26^{\circ\text{S}}$) δακτύλιος με μικρότερο οριζόντιο μέλος ακριβώς στα $0,70\text{m}$. Κατόπιν, ακολουθώντας την ανωτέρω λογική χωρίστηκε ο $26^{\circ\text{S}}$ δακτύλιος σε τρία τμήματα. Έτσι προκύπτει στο δακτύλιο αυτό το οριζόντιο μήκος $3 \times 0,7 = 2,10\text{m}$ με διαγώνιο $1,66\text{m}$. Κατά τον ίδιο τρόπο χωρίστηκαν και οι επόμενοι τρεις δακτύλιοι, έως τον εικοστό ένατο ($29^{\circ\text{S}}$). Μένει ένας τελευταίος δακτύλιος ο οποίος πάλι χωρίζεται ανά τρία δηλαδή με μήκος $3 \times 0,83\text{m} = 2,49\text{m}$ και διαγώνιο $2,34\text{m}$. Έτσι, η πορεία προς την κορυφή του θόλου φτάνει στο τέλος έχοντας πετύχει το στόχο να διατηρηθούν τα μήκη με μέγιστο $2,50\text{m}$ και ελάχιστο $0,70\text{m}$ και, επιπροσθέτως, να μην αλλάξει η αρχική μορφή του θόλου τόσο στη γεωμετρία του όσο και στη στατικότητα του.

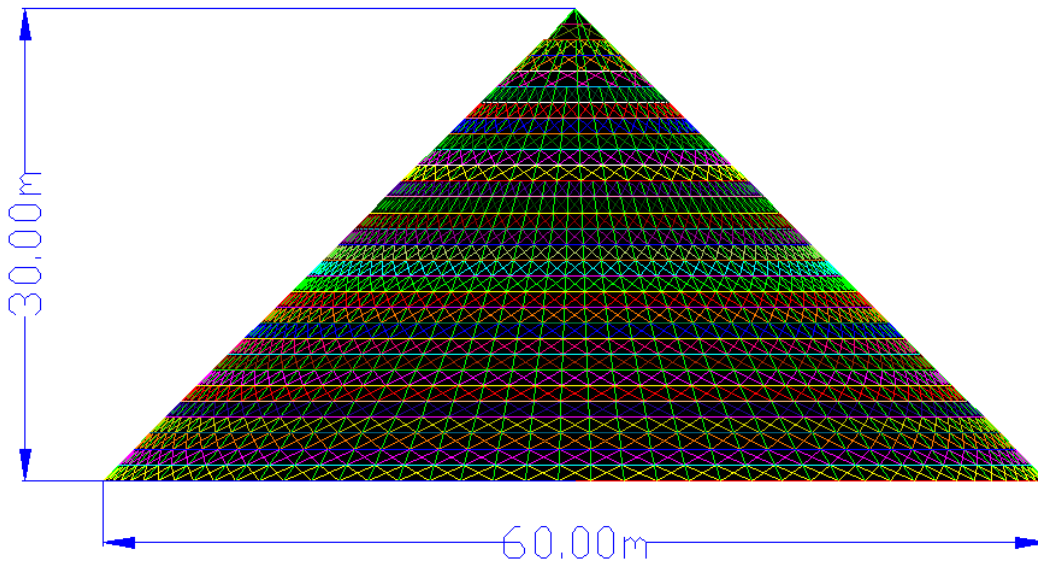
Έτσι προέκυψε η τελική μορφή του θόλου όπως παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα σε περιβάλλον AutoCad. Στη συνέχεια τροποποιήθηκε το αρχείο αυτό σε αντίστοιχο dxf ώστε να μπορέσει να εισαχθεί στο στατικό πρόγραμμα NIDA και να αρχίσει η επίλυση με τις ανάλογες παραμέτρους που θα παρουσιαστούν αναλυτικά παρακάτω.

2.2. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θόλου

Ο μεταλλικός θόλος που πρόκειται να μελετηθεί φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 2.5 : Τρισδιάστατη απεικόνιση του δικτυωτού θόλου



Σχήμα 2.6 : Διαστάσεις οριζόντια και καθ' ύψος του δικτυωτού θόλου

2.3. Προεπιλογή διατομών του θόλου

Σε πρώτη φάση η προεπιλογή των διατομών του θόλου μπορεί να γίνει κυρίως εμπειρικά, με βάση τις διατομές που έχουν χρησιμοποιηθεί σε άλλες παρόμοιες κατασκευές. Η ιδιαιτερότητα της στατικής και δυναμικής απόκρισης του φορέα σε συνδυασμό και με τις υψηλές απαιτήσεις λειτουργικότητας και τα χαμηλά όρια επιτρεπόμενης λυγηρότητας των μελών του έχει σαν αποτέλεσμα να γίνεται μια επαρκώς αυστηρή προεπιλογή διατομών. Σε αυτή τη λογική εξάλλου συμβάλλει και η έλλειψη τυποποίησης που υπάρχει σε αυτό το είδος των μεταλλικών κατασκευών, λόγω της οποίας υπάρχουν αβεβαιότητες για τη συμπεριφορά του θόλου, κυρίως σε ακραίους συνδυασμούς δράσεων. Σαν πρώτη δοκιμή επελέχθη μια ενιαία διατομή μεσαίου σχετικά μεγέθους διάστασης από τις ήδη καταχωρημένες στο NIDA (TUBOD193,7x4,5). Παρατηρήθηκε πως κάποιες από τις ράβδους έχαναν την συνοχή τους με την υπόλοιπη κατασκευή και η στρέψη τους ήταν μεγάλη, σε τέτοιο βαθμό, που προκαλούσαν κατάρρευση, διότι δεν επαρκούσε η αντοχή τους στα επιβαλλόμενα φορτία και στο συνδυασμό αυτών. Η επιλογή των διατομών βασίστηκε στην ελαστοπλαστική ανάλυση τόσο για τη στατικότητα του φορέα όσο και για την επικείμενη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων προκειμένου να καλυφθούν οι περιορισμοί αστοχίας στα αντίστοιχα μέλη. Έτσι επελέχθησαν τυχαία διατομές στα τρία διαφορετικά φέροντα στοιχεία, δηλαδή στους δακτυλίους, τους μεσημβρινούς και τα διαγώνια ραβδιά. Σαν πρώτη δοκιμή με αυτή τη λογική επιλέχθησαν οι μικρότερες από αυτές που δίνει το πρόγραμμα για οικονομία υλικού αλλά και για λιγότερο ίδιο βάρος κατασκευής. Θεωρήθηκε ότι τα κατακόρυφα στοιχεία (μεσημβρινούς) έχουν πιο μεγάλη διατομή (TUBOD144,3x3,6) γιατί παίζουν το

ρόλο των κύριων στατικών στοιχείων (τύπου υποστηλωμάτων), την αμέσως μικρότερη διατομή για τους δακτυλίους (TUBOD133x4) και για τα διαγώνια στοιχεία που παίζουν περισσότερο το ρόλο της συνοχής στην κατασκευή τύπου “τεγίδας” (TUBOD101,6x3,6), αλλά και πάλι υπήρξε το ίδιο πρόβλημα : κάποια ραβδιά αστοχούσαν παρασύροντας την κατασκευή στην κατάρρευση. Με γνώμονα λοιπόν το είδος της αστοχίας κάθε φορά, αλλάχθηκαν και οι διατομές στα ανάλογα μέλη, με στόχο τον προσδιορισμό της ευστάθειας της κατασκευής συνολικά. Έτσι στην τρίτη δοκιμή θεωρήθηκε για τους μεσημβρινούς (TUBOD273x5,6), τους δακτυλίους (TUBOD193,7x4,5) και τα διαγώνια μέλη (TUBOD133x4). Στην τέταρτη αναλόγως πάλι, με το, τι αστόχησε, θεωρήθηκε για μεσημβρινούς (TUBOD355,6x6,3), για δακτυλίους (TUBOD298,5x5,9) και για τα διαγώνια (TUBOD152,4x4). Ύστερα από πλήθος δοκιμών άλλαξε λίγο η νοοτροπία της επιλογής διατομής και τέθηκε μεγαλύτερη διατομή για τους δακτυλίους, οπότε επελέχθησαν για μεσημβρινούς (TUBOD298,5x5,9), για δακτυλίους (TUBOD355,6x6,3) και για τα διαγώνια (TUBOD152,4x4).

Παρατηρήθηκε ότι αυτή η θεώρηση είχε χειρότερα αποτελέσματα στη συμπεριφορά της κατασκευής οπότε ύστερα από 5-6 δοκιμές του ίδιου τρόπου επιλογής διατομών (με μέγιστο στους δακτυλίους) αποφασίστηκε και αναθεωρήθηκε η διαδικασία επιλογής και υιοθετήθηκε η αρχική, δηλαδή μέγιστη διατομή στους μεσημβρινούς, λίγο μικρότερη στους δακτυλίους και την αμέσως μικρότερη στα διαγώνια μέλη. Πλήθος διαδοχικών δοκιμών με αυτή τη λογική οδήγησαν στον παρακάτω τελικό συνδυασμό διατομών, ο οποίος είναι για τις συγκεκριμένες διαστάσεις και το είδος φορτίσεων του ειδικού αυτού τύπου θόλου ο ιδανικός για την επίλυση και την περεταίρω ευστάθειά του.

Συγκεκριμένα για το **θόλο τύπου Schwedler** επελέγησαν οι ακόλουθες διατομές :

TUBO-D219.1x5 για τα 2035 κατακόρυφα μέλη (μεσημβρινοί).

TUBO-D193.7x4.5 για τα 2120 οριζόντια μέλη (δακτύλιοι).

TUBO-D139.7x4 για τα 2030 διαγώνια μέλη.

3. Υπολογισμός φορτίων

3.1. Μόνιμα φορτία (G)

Ως μόνιμα φορτία σύμφωνα με τον «**Ευρωκώδικα 0, Βάσεις Σχεδιασμού**» σελ. 16 και παράγραφος 1.5.3.3 (ευρωκώδικα) ορίζονται :

“οι δράσεις οι οποίες είναι πιθανό να δρουν καθ’ όλη την δεδομένη περίοδο αναφοράς και για τις οποίες η μεταβολή του μεγέθους τους σε συνάρτηση με τον χρόνο

είναι αμελητέα ή για τις οποίες η μεταβολή τους είναι πάντα στην ίδια διεύθυνση (μονοτονική) μέχρι η δράση να φτάσει στην οριακή της τιμή”.

Στον θόλο τα μόνιμα φορτία που υπάρχουν είναι το ίδιο βάρος όλων των μελών.

3.1.1. Υπολογισμός ίδιου βάρους

Το ίδιο βάρος του κάθε μέλους εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του καθώς και από το ειδικό βάρος του χάλυβα. Στο NIDA_Pro_7 υπάρχει εντολή ώστε να αντιλαμβάνεται το ίδιο βάρος όλων των μελών.

Πίνακας Ίδιων Βαρών

Name	No. of Members	Weight
TUBO-D219.1X5	2035	7.356E+2 kN
TUBO-D193.7X4.5	2120	5.937E+2 kN
TUBO-D139.7X4	2030	5.264E+2 kN

3.2. Κινητά φορτία (Q)

Ως κινητά φορτία σύμφωνα με τον «**Ευρωκώδικα 0, Βάσεις Σχεδιασμού**» σελ. 16 και παράγραφος 1.5.3.4 (ευρωκώδικα) ορίζονται :

“οι δράσεις στις οποίες η μεταβολή του μεγέθους τους δεν είναι ούτε αμελητέες ούτε μονοτονικές”.

3.3. Κλιματικά φορτία (W)

3.3.1. Φορτίο ανέμου (F_w)

Επιδιώκεται να αναλυθεί ο φορέας για τις δυσμενέστερες φορτίσεις. Οπότε επελέγη ταχύτητα ανέμου $V_b = 120 \text{ km/h} = 33 \text{ m/s}$.

Από τον Ευρωκώδικα 1-4 στο αντίστοιχο παράρτημα και για φορτίο σε θόλους με κυκλική βάση, προκύπτει ο διαχωρισμός των περιοχών δράσης του ανέμου πάνω στην κατασκευή. Προκύπτουν έτσι δύο περιοχές εκ των οποίων η πρώτη είναι η Α και δηλώνει την πίεση του ανέμου προς την κατεύθυνση εκείνη όπως φαίνεται στο σχέδιο από το πρόγραμμα NIDA (σελ.28 σχ. 3.2) και η δεύτερη, που είναι η Β και δηλώνει την υποπίεση από την ακριβώς αντίθετη φορά (ομοίως σελ.28).

Η κατασκευή στηρίζεται κατευθείαν στο έδαφος οπότε το ύψος του θόλου, f , είναι ίδιο με το ύψος h όπως φαίνεται στο σχήμα 7.12 της παραγράφου 7.2.8 του Ευρωκώδικα 1-4 (βλέπε σχ. 3.1 του παρόντος) και το d είναι η αντίστοιχη διάμετρος.

Άρα λοιπόν :

$$f = 30\text{m}$$

$$d = 60\text{m}$$

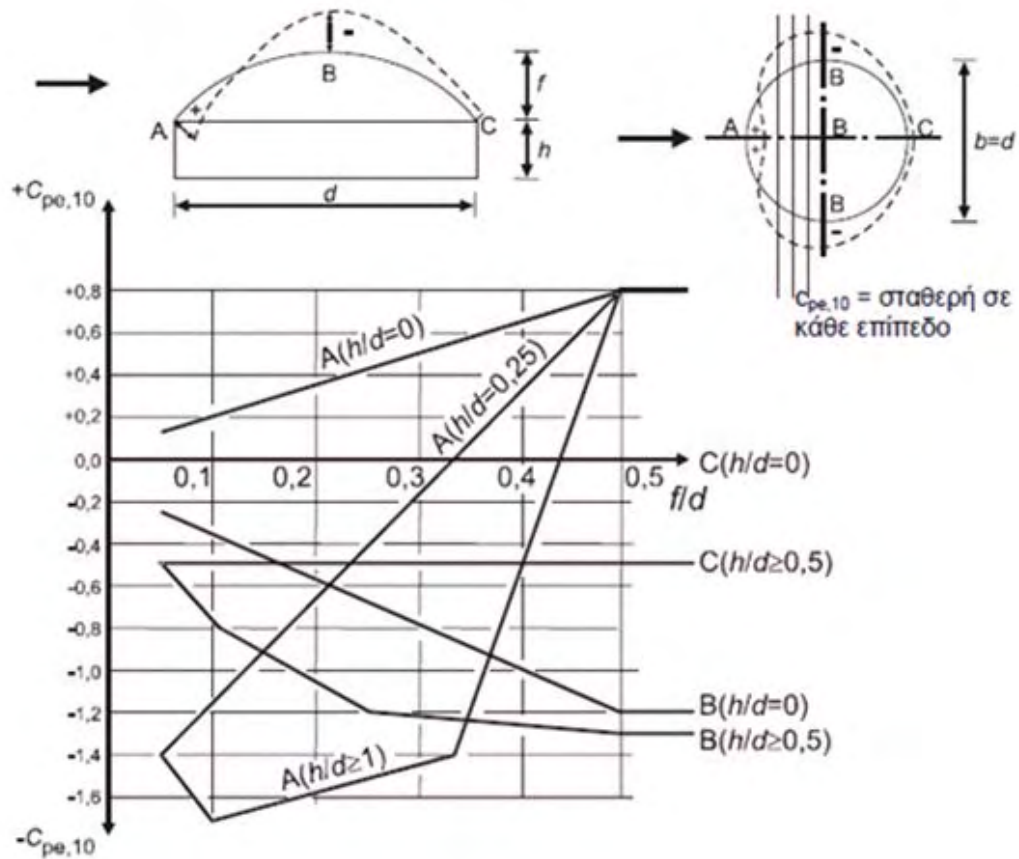
$$\text{και ο λόγος } \frac{f}{d} = 0,5$$

και από το διάγραμμα σχήμα 3.1 (σχήμα 7.12 του Ευρωκώδικα) θα προκύψουν οι τιμές των δύο περιοχών και συγκεκριμένα ο τρόπος με τον οποίο θα γίνει η κατανομή των φορτίων.

Συνεπώς, για τις περιοχές επίδρασης του ανέμου στο θόλο θα ισχύει :

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

Άρα είναι γνωστό ότι τα φορτία στην περιοχή Α θα είναι προς την κατεύθυνση του $+x$ άξονα ενώ τα φορτία στην περιοχή Β θα είναι προς την αντίθετη κατεύθυνση $-x$.



Σχήμα 3.1 : Προτεινόμενες τιμές των συντελεστών εξωτερικής πίεσης $C_{pe,10}$ για θόλους με κυκλική βάση

Οι περιοχές και τα όρια τους προκύπτουν από το παραπάνω σχήμα με βάση το $C_{pe,10}$, τη δομή της κατασκευής και τα μήκη των ανάλογων προς αυτά ύψη και πλάτη. Έτσι προκύπτει η περιοχή A με ύψος 12m και πλάτος 12m και η περιοχή B η οποία είναι ό,τι υπολείπεται δηλαδή τα 48m πλάτους και τα 28 m ύψους έως την κορυφή του θόλου.

Αναλυτικά ο υπολογισμός τους δίνεται από το παρακάτω σχήμα 3.2 (7.5 υπόμνημα από Ευρωκώδικα 1-4), από όπου προκύπτει ότι :

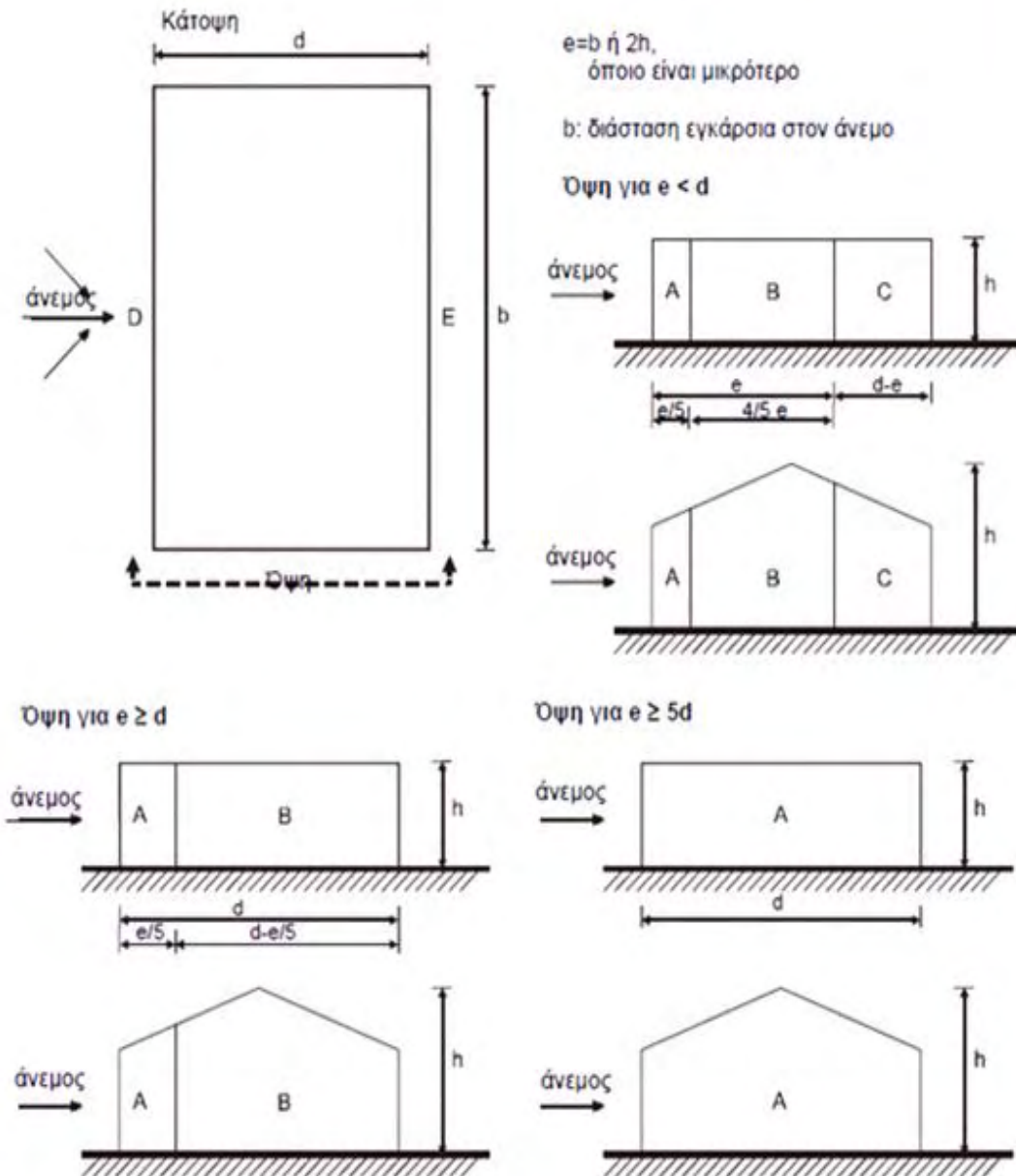
από τη δεύτερη κατηγορία σχήματος όπου $e \geq d$ που ισχύει για τη δική κατασκευή

θα έχουμε $e = b = 60m$

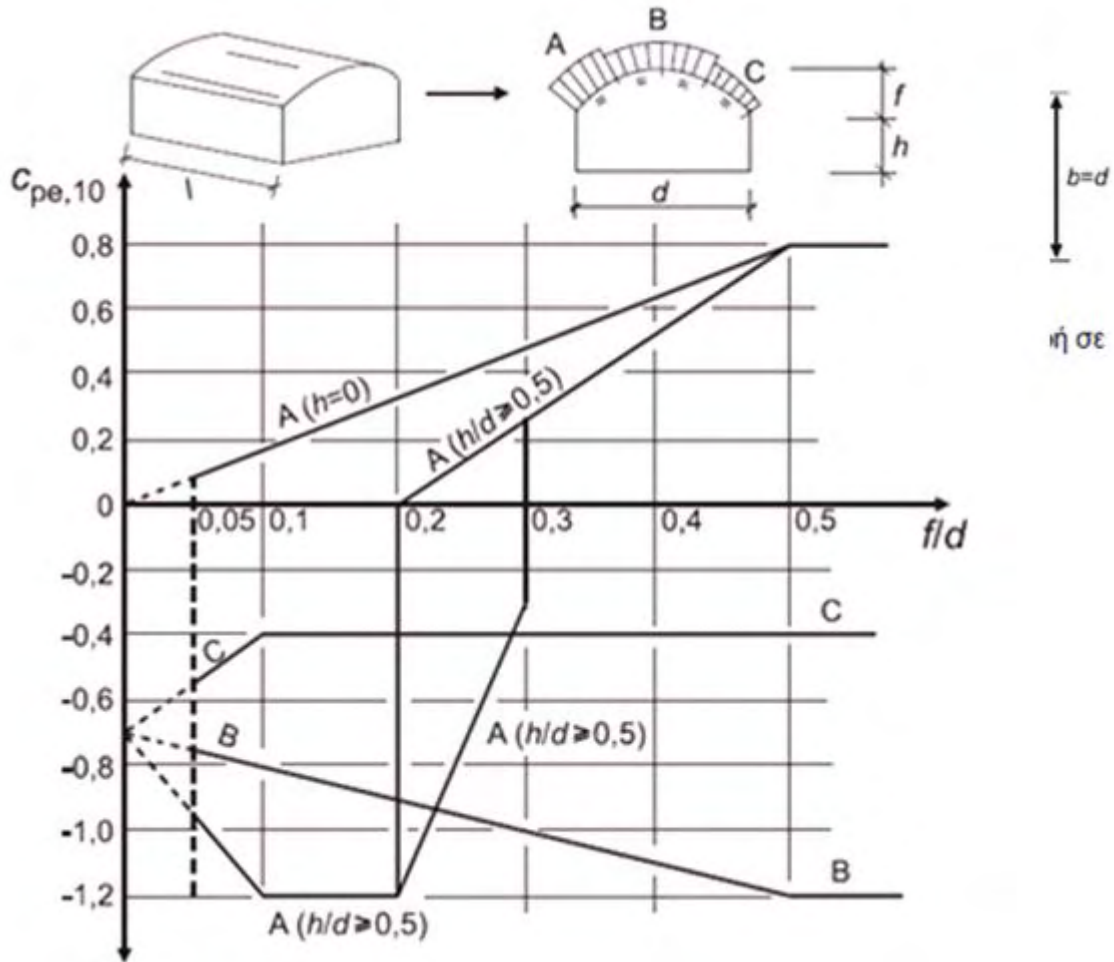
$$\text{Άρα } A \rightarrow \frac{e}{d} = 12m$$

$$\text{και } B \rightarrow d - e/5 = 48m$$

Οπότε, όπως θα υπολογιστεί παρακάτω για τα δύο αντίστοιχα εμβαδά επιρροής $A_{ref1,2}$ θα ασκηθούν οι πιέσεις στην περιοχή A έως τα 12m βάθος και ύψος ενώ στην B περιοχή από τα 12m της A τόσο στο ύψος όσο και στο βάθος, έως το τέλος.



Σχήμα 3.2 : Υπόμνημα για κατακόρυφους τοίχους



Σχήμα 3.3 : Προτεινόμενες τιμές συντελεστών εξωτερικής πίεσης $c_{pe,10}$ για κυλινδρικές στέγες

Ως δράσεις ανέμου σύμφωνα με τον «Ευρωκώδικα 1-Μέρος1-4, Γενικές Δράσεις-Δράσεις Ανέμου» (σελ.28 και παράγραφος 5.3 ευρωκώδικα) ορίζονται :

“οι δυνάμεις του ανέμου για τη συνολική κατασκευή ή για ένα τμήμα της κατασκευής”.

Η κατανεμημένη δύναμη F_w , που υπολογίζεται από την παρακάτω συνάρτηση, αναπαριστά την επίδραση που θα προκύψει στην κατασκευή από τον άνεμο.

Οπότε ισχύει η εξίσωση :

$$F_w = c_s c_d \times c_f \times q_p(z) \times A_{ref}$$

$c_s c_d$: συνδυασμένος δυναμικός συντελεστής

c_f : συντελεστής πίεσης.

$q_p(z)$: χαρακτηριστική πίεση ταχύτητας αιχμής.

A_{ref} : είναι η αθροιστική προβαλλόμενη επιφάνεια των μελών και κομβοελασμάτων κάθετα στον άνεμο.

3.3.1.1. Πίεση ανέμου σε επιφάνειες

Ως πίεση ανέμου χαρακτηρίζεται σύμφωνα με τον «**Ευρωκώδικα 1 - Μέρος 1-4, Γενικές Δράσεις-Δράσεις Ανέμου**» (σελ.27 και παράγραφος 5.2 ευρωκώδικα) :

“Η πίεση του ανέμου που δρα στις επιφάνειες”

και δεδομένου ότι μελετάται ένα μεταλλικό δικτύωμα, συνεπώς στην κατασκευή δεν θα αναπτυχθούν εσωτερικές πιέσεις. Επομένως, γίνεται η παραδοχή μηδενικής εσωτερικής πίεσης καθώς και μη ύπαρξης στροβιλισμού. Συνεπώς η πίεση που ασκείται στις επιφάνειες των μελών της κατασκευής θα προκύψει από τον παρακάτω τύπο :

$$w_e = q_p(z) \times c_f$$

3.3.1.2. Πίεση ταχύτητας αιχμής

Για την εύρεση της χαρακτηριστικής πίεση ταχύτητας αιχμής $q_p(z)$, βάσει του «Ευρωκώδικα 1 - Μέρος 1-4, Γενικές Δράσεις-Δράσεις Ανέμου» (σελ.25 και παράγραφο 4.5 ευρωκώδικα) χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος :

$$q_p(z) = [1 + 7 \times I_v(z)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times V_m^2(z)$$

Όπου:

$c_{e(z)} = [1 + 7 \times I_v(z)]$: συντελεστής έκθεσης

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω ο στροβιλισμός $I_v(z)$ θεωρείται ίσος με μηδέν, επομένως $c_{e(z)} = 1$.

$$q_p(z) = q_b = \frac{1}{2} \times \rho \times V_m^2(z)$$

ρ : είναι η πυκνότητα του αέρα, που εξαρτάται από το υψόμετρο, τη θερμοκρασία και τη βαρομετρική πίεση που αναμένονται σε μια περιοχή κατά τη διάρκεια ανεμοθυελλών και με βάση το «**εθνικό προσάρτημα στον Ευρωκώδικα, σημείωση 2 της παραγράφου 4.5**» το παίρνουμε ίσο με 1,25.

Για την εύρεση της μέσης ταχύτητα του ανέμου $V_m(z)$, σε ύψος z πάνω από το έδαφος, βάσει του «**Ευρωκώδικα 1 - Μέρος 1-4, Γενικές Δράσεις-Δράσεις Ανέμου**» (σελ.20 και παράγραφο 4.3 ευρωκώδικα) χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος τύπος :

$$V_m(z) = c_r(z) \times c_o(z) \times V_b$$

$V_b=33 \text{ m/s}$: η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας του ανέμου σύμφωνα με το «**εθνικό προσάρτημα στον Ευρωκώδικα 1,1-4, σημείωση 2 της παραγράφου 4.5**»

$c_o(z)=1$: Η μεταβολή ανάγλυφου με βάση το «**εθνικό προσάρτημα στον Ευρωκώδικα, σημείωση 1 της παραγράφου 4.3.1**»

Για την εύρεση του συντελεστή τραχύτητας $c_r(z)$ με βάση του «**Ευρωκώδικα 1 - Μέρος 1-4, Γενικές Δράσεις-Δράσεις Ανέμου**» (σελ.21 και παράγραφο 4.3.2 ευρωκώδικα) παίρνουμε τον ακόλουθο τύπο :

$$C_r(z) = k_r \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ για } z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$$

ή

$$C_r(z) = C_r(z_{\min}) \text{ για } z \leq z_{\min}$$

Για την εύρεση του συντελεστή εδάφους εξαρτώμενου από το μήκος τραχύτητας Z_0 με βάση τον «**Ευρωκώδικα 1 - Μέρος 1-4, Γενικές Δράσεις-Δράσεις Ανέμου**» (σελ.21 και σχέση 4.5 ευρωκώδικα) χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος :

Όπου :

$$K_r = 0.19 \times \left(\frac{z_0}{z_{0,ii}}\right)^{0.07}$$

Για τον καθορισμό των διάφορων μηκών χρησιμοποιείται ο πίνακας 4.1 του Ευρωκώδικα 1 σελ.22. Για κατηγορία II ισχύει :

$$z_{\min}=10$$

$$z_0=1$$

$$z_{0,ii} = 0,05 \text{ m (κατηγορία εδάφους II)}$$

$$K_r = 0.19 \times \left(\frac{z_0}{z_{0,ii}}\right)^{0.07} = 0,234$$

$$Z = 30 \text{ m : ύψος θόλου}$$

$$C_r(z) = 0.234 \times \ln\left(\frac{30}{1,0}\right) = 0,796$$

$$V_m(z) = c_r(z) \times c_o(z) \times V_b = 0,796 \times 1 \times 33 = 26,268 \text{ m/s}$$

$$q_p(z) = q_b = \frac{1}{2} \times \rho \times V_m^2(z) = 0,5 \times 1,25 \times 10^{-2} \times 26,268^2 = 0,431 \text{ KN/m}^2$$

3.3.1.3. Συντελεστή δύναμης C_f

Ο συντελεστής δύναμης C_f μπορεί να προκύψει από δύο Ευρωκώδικες. Με βάση τον «Ευρωκώδικα 1 - Μέρος 1-4, Γενικές Δράσεις-Δράσεις Ανέμου» (σελ.74 και παράγραφο 7.9 ο οποίος αναφέρεται σε κυκλικούς κυλίνδρους 7.9.2 ευρωκώδικα) και υπολογίζει το C_f με τον παρακάτω τύπο :

$$c_f = c_{f,o} \times \psi_\lambda$$

$c_{f,o}$: συντελεστής δύναμης κυλίνδρων χωρίς ροή ελευθέρων άκρων και προκύπτει από το σχήμα 7.28 ευρωκώδικας.

$A = A_{ref} = \sum b_i * l_i$: είναι η αθροιστική προβαλλόμενη επιφάνεια των μελών κάθετα στον άνεμο

A_C : η επιφάνεια της προβολής του περιγράμματος σε επίπεδο κάθετο προς τον άνεμο
=dx L

L : μήκος του δικτυώματος

D : το πλάτος του δικτυώματος

b_i, l_i : το πλάτος και το μήκος του μεμονωμένου μέλους i προβαλλόμενου κάθετα στην επιφάνεια.

z_e : ίσο με το μέγιστο ύψος του στοιχείου πάνω από το έδαφος.

ψ_λ : συντελεστής επίδρασης άκρων που προκύπτει από το κεφ. 3.3.1.6

Η τιμή της θα υπολογιστεί σαν συνάρτηση της λυγηρότητας λ από το σχήμα 3.9 και από το συντελεστή πληρότητας φ με γραμμική παρεμβολή.

Τώρα θα πρέπει να αναφερθεί η επιρροή των κυλινδρικών στοιχείων από τα οποία αποτελείται η κατασκευή, τα οποία επηρεάζουν την εξωτερική πίεση μέσω των συντελεστών πίεσης οι οποίοι με την σειρά τους εξαρτώνται από τον αριθμό Reynolds.

Ο αριθμός αυτός δίνεται από τη παρακάτω σχέση :

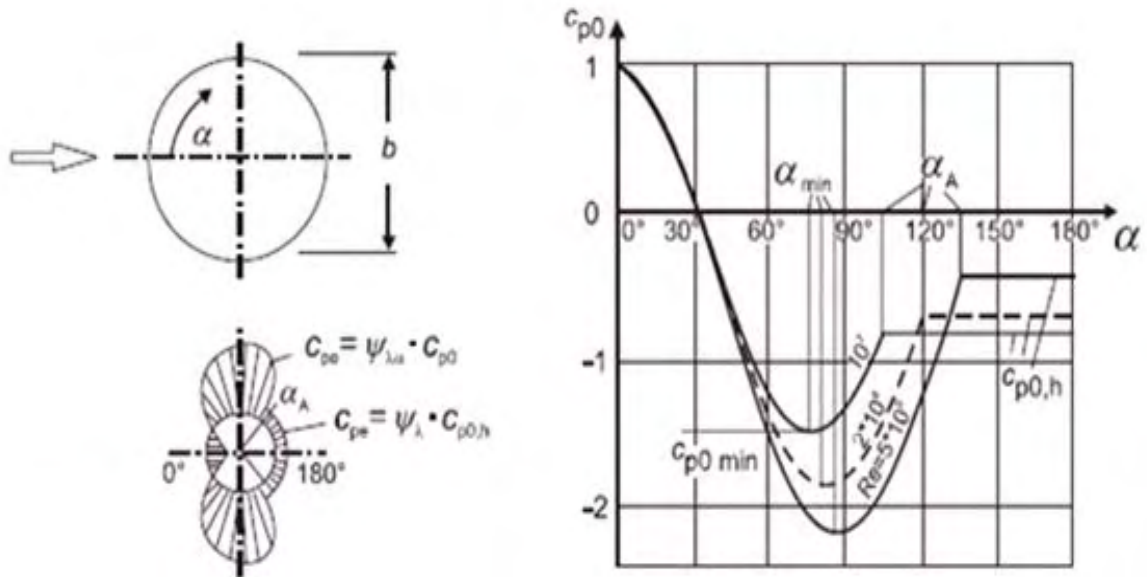
$$Re = \frac{b \times v(z_e)}{\nu}$$

Όπου :

b είναι η διάμετρος

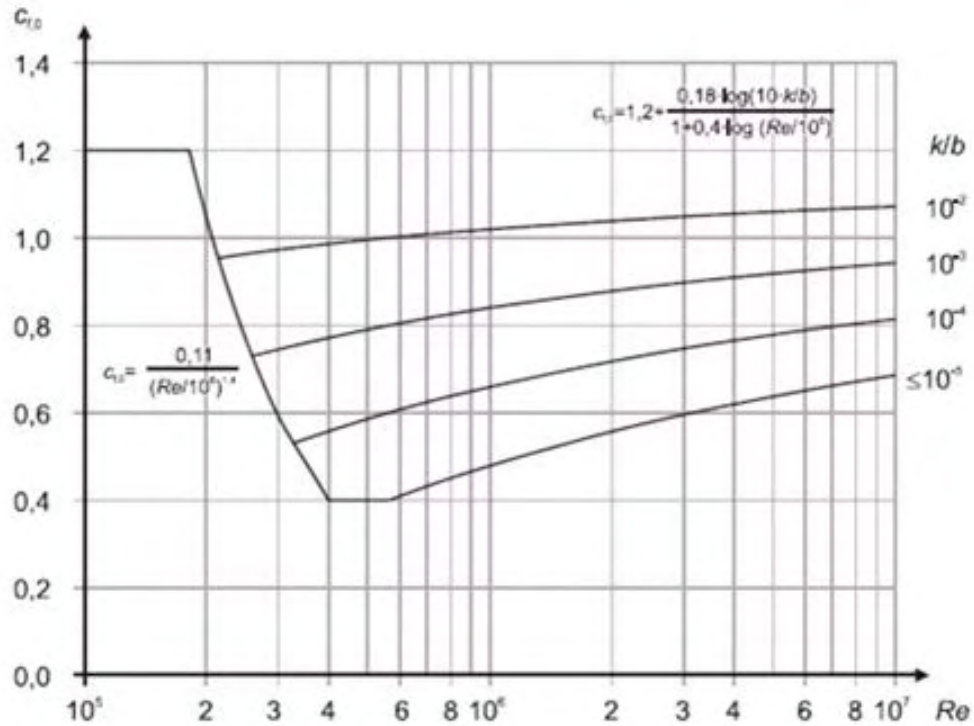
ν είναι το κινηματικό ιξώδες του αέρα = $1,5 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$

$\nu(z_e)$ είναι η ταχύτητα αιχμής του ανέμου η οποία ορίζεται από τη Σημείωση του σχήματος 3.4 (7.27 ευρωκώδικα σε ύψος z_e).



Σχήμα 3.4 : Κατανομή πιέσεων για κυκλικούς κυλίνδρους για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds και χωρίς επίδραση άκρων

Συνεπώς θα πρέπει να υπολογιστεί ο αριθμός Reynolds (Re) και ο ισοδύναμος συντελεστής τραχύτητας k/b ώστε να υπολογιστεί το $c_{f,o}$, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5 (διάγραμμα 7.28 σελ.78,1-4, ευρωκώδικα).



Σχήμα 3.5 : Συντελεστής δύναμης $c_{f,0}$ για κυκλικούς κυλίνδρους χωρίς ροή ελευθέρων άκρων και για διάφορες ισοδύναμες τραχύτητες k/b

Τύπος επιφάνειας	Ισοδύναμη τραχύτητα k mm	Τύπος επιφάνειας	Ισοδύναμη τραχύτητα k mm
γυαλί	0,0015	λείο σκυρόδεμα	0,2
σπλιωμένο μέταλλο	0,002	πλανισμένο ξύλο	0,5
λεπτή βαφή	0,006	τραχύ σκυρόδεμα	1,0
βαφή με ψεκασμό	0,02	τραχύ πριονισμένο ξύλο	2,0
σπλιπνός χάλυβας	0,05	σκουριά	2,0
χυτοσίδηρος	0,2	τούβλα	3,0
γαλβανισμένος χάλυβας	0,2		

Σχήμα 3.6 : Πίνακας ισοδύναμης τραχύτητας επιφανείας k

άρα ισχύει :

$$\nu = 15 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$$

$$k = 0,2 \text{ (γαλβανισμένος χάλυβας)}$$

$$b = 0,273 \text{ m}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \times q_p}{\rho}}$$

Όπου :

$$q_p = 0,431 \text{ KN/m}^2$$

$$\rho = 1,25$$

$$\text{Άρα } v(z_e) = 8,30 \text{ m/s}$$

Και συνεπώς ο Re θα είναι

$$\text{Re} = 0,15 \times 10^6$$

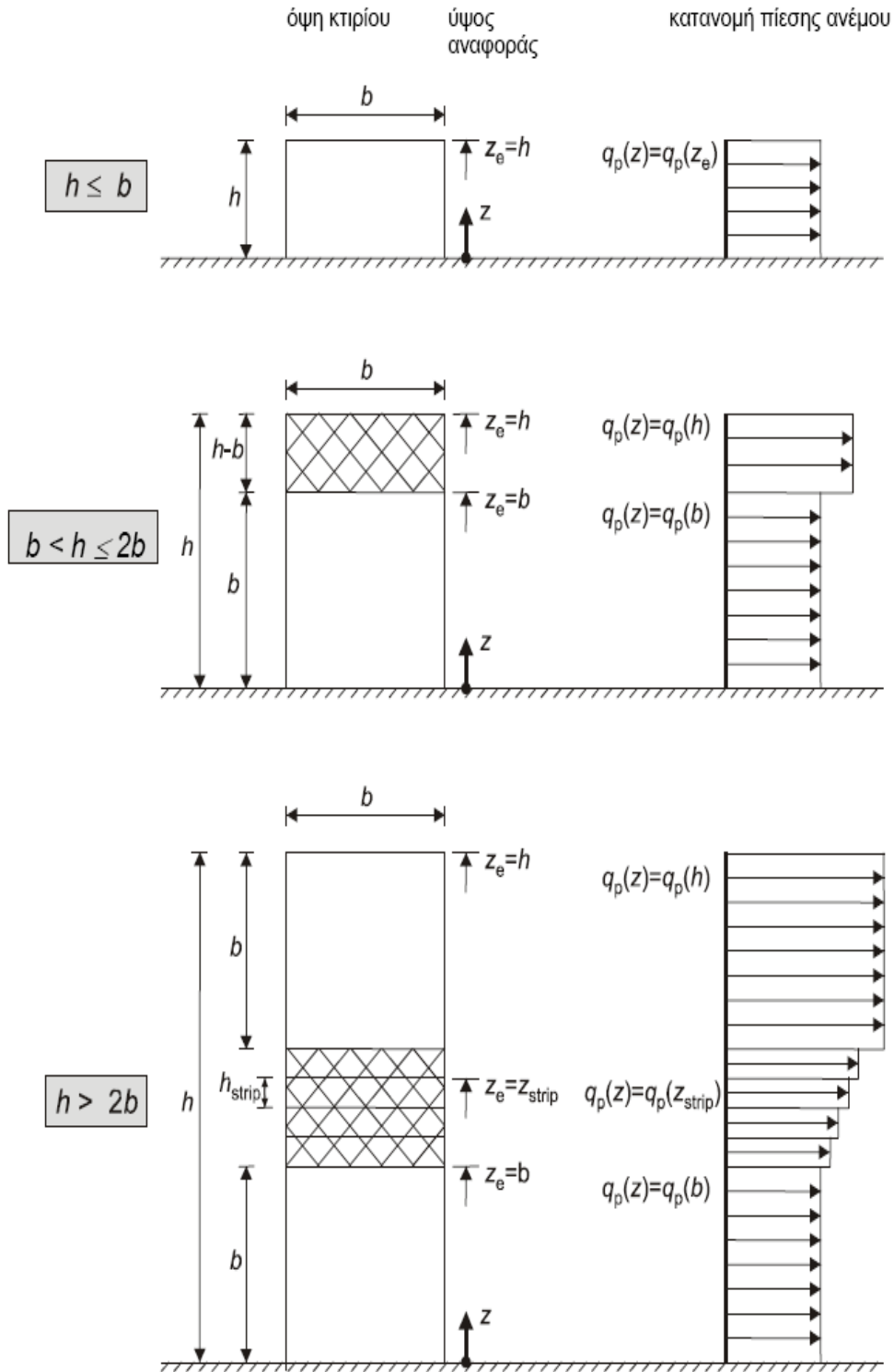
Οπότε από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι :

$$c_{f,o} = 0,80$$

3.3.1.4. Υπολογισμός χαρακτηριστικής πίεσης ταχύτητας αιχμής

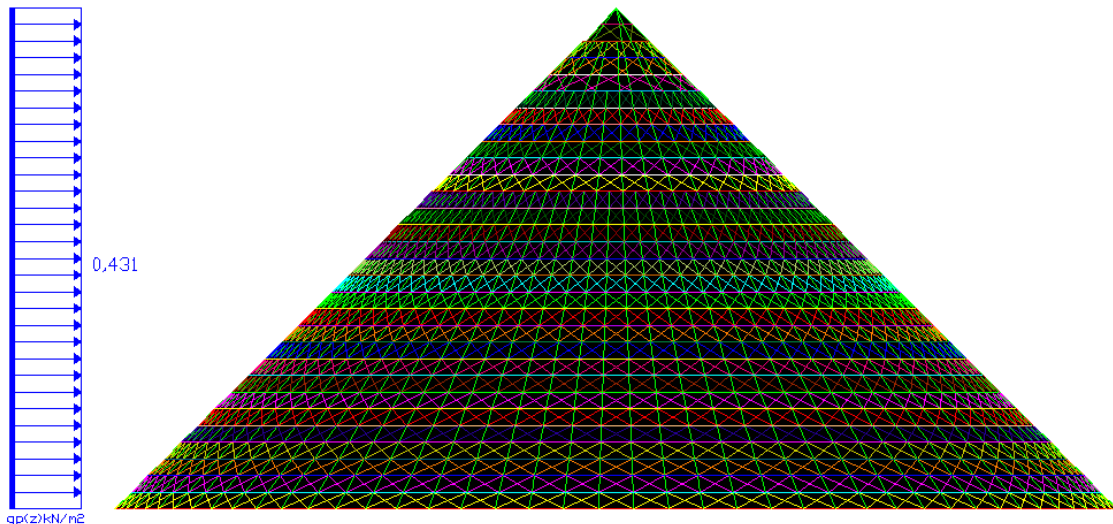
Σύμφωνα με τον «**Ευρωκώδικα 1 - Μέρος 1-4, Γενικές Δράσεις-Δράσεις Ανέμου**» οι πιέσεις του ανέμου πρέπει να ακολουθούν την κατανομή σχήμα 3.7. Στην μεταλλική κατασκευή η οποία μελετάται ισχύει ότι $h \leq b$, επομένως η κατανομή η οποία θα ακολουθηθεί είναι η πρώτη στο σχήμα.

Επιλέχτηκε η πρώτη κατηγορία του παρακάτω σχήματος γιατί οι διαστάσεις που αναλογούν στην κατασκευή αυτή του θόλου Schwedler είναι σε αυτή την περίπτωση. Δηλαδή τόσο η κατακόρυφη απόσταση όσο και η οριζόντια με βάση τον τύπο του πηλίκου που φαίνεται στο σχήμα οδηγούν στην επιλογή της πρώτης κατηγορίας με την οποία καταπονεί ο άνεμος την κατασκευή. Συνεπώς είναι διακριτό ότι η κατανομή πιέσεων του ανέμου θα έχει την μορφή οριζόντιου κατανεμημένου φορτίου όπως ακριβώς παρουσιάζεται παρακάτω.



ΣΗΜΕΙΩΣΗ Η πίεση ανέμου θα θεωρείται ομοιόμορφη σε κάθε οριζόντια λωρίδα.

Σχήμα 3.7 : Κατανομή πιέσεων ανάλογα με το ύψος αναφοράς



Σχήμα 3.8 : Κατανομή πιέσεων

3.3.1.5. Υπολογισμός συντελεστή πληρότητας (φ)

Ως συντελεστής πληρότητας χαρακτηρίζεται σύμφωνα με τον «**Ευρωκώδικα 1-Μέρος 1-4, Δράσεις Ανέμου**» (σελ. 85 και παράγραφος 7.11 ευρωκώδικα) από τον ακόλουθο τύπο :

$$\varphi = \frac{A_{ref}}{A_C}$$

$A=A_{ref} = \sum bi * li$: είναι η αθροιστική προβαλλόμενη επιφάνεια των μελών κάθετα στον άνεμο

A_C : είναι η επιφάνεια της προβολής του περιγράμματος σε επίπεδο κάθετο προς τον άνεμο = $d \times L$

Το συνολικό A_{ref} θα προκύψει από την πρόσθεσή των συνολικά τριών χιλιάδων μελών του (μέτωπο ανέμου), περίπου ΣA_w . Η τιμή αυτού $A_{ref} = 819,000 m^2$.

Η τιμή της επιφάνεια της προβολής του περιγράμματος σε επίπεδο κάθετο προς τον άνεμο, A_C είναι ουσιαστικά το εμβαδό που περικλείεται μέσα στην μεταλλική κατασκευή και είναι ίσο με $A_C = 900,000 m^2$.

Επομένως η τελική τιμή του συντελεστή πληρότητας της κατασκευής θα είναι :

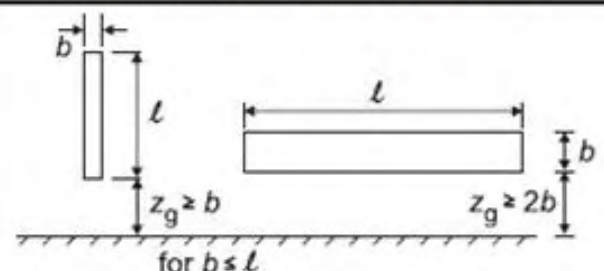
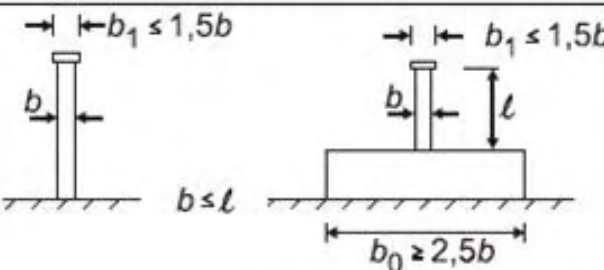
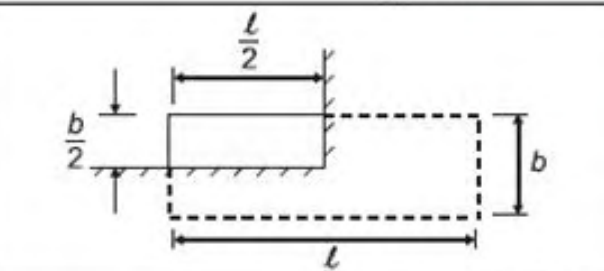
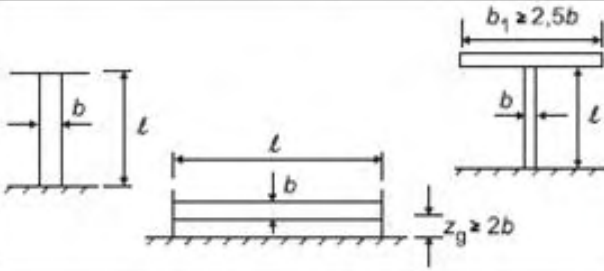
$$\varphi = \frac{A_{ref}}{A_C} = \frac{819}{900} = 0,91$$

$$\varphi = 0,91$$

3.3.1.6. Ενεργός λυγηρότητα λ

Η ενεργός λυγηρότητα βρίσκεται από το σχήμα 3.9, (πίνακα 7.16 σελ.87,1-4 στον «Ευρωκώδικα 1-Μέρος1-4, Δράσεις Ανέμου»).

Και φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί :

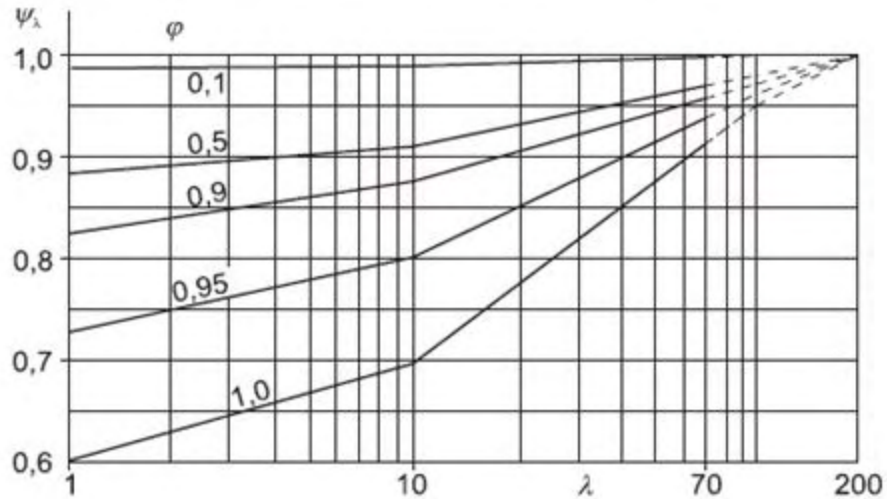
No.	Θέση της κατασκευής, άνεμος κάθετα στο επίπεδο της σελίδας	Ενεργός λυγηρότητα λ
1		<p>Για πολυγωνικές, ορθογωνικές και διατομές με αιχμηρές γωνίες:</p> <p>για $l \geq 50 \text{ m}$, $\lambda = 1,4 \ell/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μικρότερο</p>
2		<p>για $l < 15 \text{ m}$, $\lambda = 2 \ell/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μικρότερο</p> <p>Για κυκλικούς κυλίνδρους:</p> <p>για $l \geq 50$, $\lambda = 0,7 \ell/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μικρότερο</p> <p>για $l < 15 \text{ m}$, $\lambda = \ell/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μικρότερο</p>
3		<p>Για ενδιάμεσες τιμές του ℓ, θα χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή</p>
4		<p>για $l \geq 50 \text{ m}$, $\lambda = 0,7 \ell/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μεγαλύτερο</p> <p>για $l < 15 \text{ m}$, $\lambda = \ell/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μεγαλύτερο</p> <p>Για ενδιάμεσες τιμές του ℓ, θα χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή</p>

Σχήμα 3.9 : Προτεινόμενες τιμές λ για κυλίνδρους, πολυγωνικές διατομές ορθογωνικές διατομές, διατομές με αιχμηρές γωνίες και δικτυωτές κατασκευές

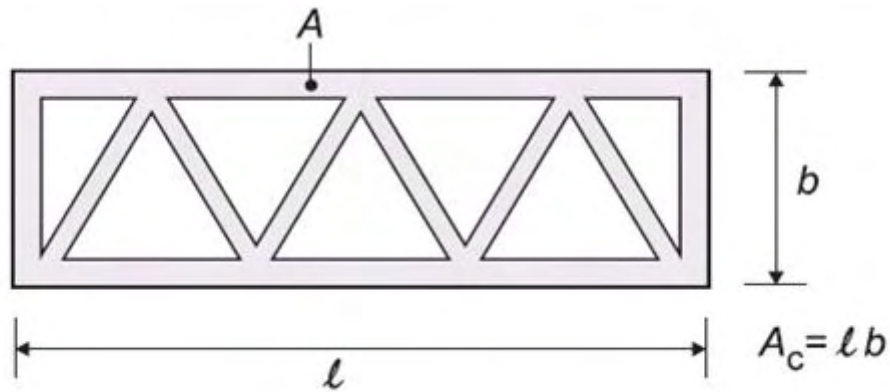
Όπου παρατηρείται ότι με γραμμική παρεμβολή από την 2^η κατηγορία προκύπτει το λ :

$$\lambda = 0,44$$

Συνεπώς το ψ_λ θα είναι με βάση το σχήμα 3.10, διάγραμμα (α)



(α) ενδεικτικές τιμές του συντελεστή επίδρασης άκρων ψ_λ , ως συνάρτηση του συντελεστή πληρότητας ϕ και της λυγηρότητας λ



(β) ορισμός του συντελεστή πληρότητας ϕ

Σχήμα 3.10 : (α) διάγραμμα εύρεσης ψ_λ , (β) ορισμός ϕ με βάση τη διατομή

Δηλαδή ο συντελεστής επίδρασης των άκρων ψ_λ θα είναι :

$$\psi_\lambda = 1$$

Άρα ο συντελεστής δύναμης c_f θα είναι :

$$c_f = 0,8 \times 1 = 0,8$$

3.3.1.7. Υπολογισμός Δυνάμεων ανέμου F_w

Βάση «Ευρωκώδικα 1 - Μερos 1-4, Γενικές Δράσεις-Δράσεις Ανέμου» σελ.28 :

$$F_w = c_s c_d \times c_f \times q_p(z) \times A_{ref}$$

Μέχρι στιγμής έχει υπολογιστεί ο συντελεστής δύναμης $C_f = 0,8$, ο οποίος παραμένει σταθερός σε όλο το ύψος της κατασκευής, καθώς και την κατανομή της πίεσης ταχύτητας αιχμής $q_p(z)$, η οποία μεταβάλλεται με το ύψος. Επομένως για τον προσδιορισμό των τελικών δυνάμεων ανέμου F_w θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το πάχος των διατομών σαν A_{ref} . Στη προκειμένη περίπτωση υπάρχουν δυο τομείς με τα αντίστοιχα εμβαδά A_{ref1} , A_{ref2} στα οποία επιδρά ο άνεμος.

$$A_{ref1} = 1154 \text{ m}^2$$

$$A_{ref2} = 5672 \text{ m}^2$$

$$q_{p(z)} = 0,431 \text{ kN/m}^2$$

$$C_s \times C_d = 1$$

$$C_f = 0,8$$

$$\text{κόμβοι}_{ref1} = 622$$

$$\text{κόμβοι}_{ref2} = 1499$$

συνεπώς θα έχουμε τις δυο τιμές για το αντίστοιχο σύνολο των κόμβων των δυο περιοχών :

$$F_{w1} = 1 \times 0,8 \times 0,431 \times 1154 / 622 = 0,64 \text{ kN}$$

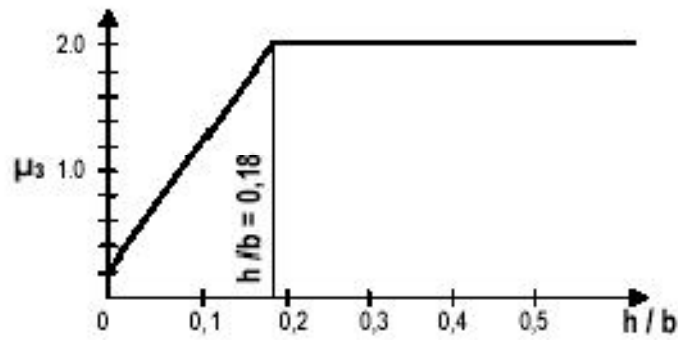
$$F_{w2} = 1 \times 0,8 \times 0,431 \times 5672 / 1499 = 1.30 \text{ kN}$$

$$\mathbf{F_{w1} = 0,64 \text{ kN}}$$

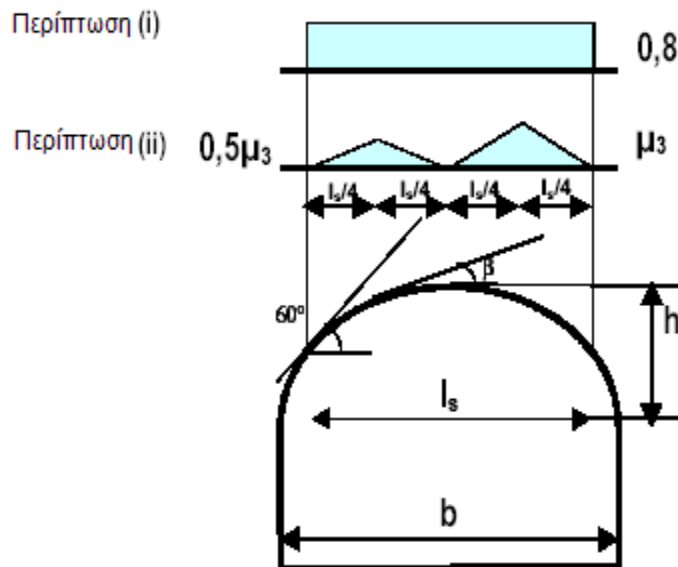
$$\mathbf{F_{w2} = 1,30 \text{ kN}}$$

3.3.2. Φορτίο χιονιού (F_s)

Στη παρούσα κατασκευή η οποία είναι ένας τύπος θόλου με την λογική σχεδιασμού του Schwedler όπως προαναφέρθηκε και στο σχεδιασμό, εξετάζεται η περίπτωση δράσης χιονιού με βάση τον «**Ευρωκώδικα 1 - Μέρος 1-3, Φορτία χιονιού**» σχήμα 3.11 και σχήμα 3.12 για δικλινή στέγη ή κυλινδρική. Στην προκειμένη περίπτωση μια ενδιάμεση κατάσταση, δηλαδή μια δικλινούς στέγης σε τρισδιάστατη μορφή όπως απεικονίζεται στα σχέδια παραπάνω. Οπότε προκύπτει από τα παρακάτω σχήματα :



Σχήμα 3.11: Συντελεστής σχήματος φορτίου χιονιού για κυλινδρικές στέγες διαφόρων λόγων ύψους προς άνοιγμα (για $\beta \leq 60^\circ$)



Σχήμα 3.12 : Συντελεστής σχήματος φορτίου χιονιού για κυλινδρικές στέγες

Από τα σχήματα του κανονισμού προκύπτει το συμπέρασμα ότι εφόσον όλη η κατασκευή είναι δομημένη με τέτοια κλίση ώστε να είναι μικρότερη των 60° και είναι για την ακρίβεια 45° , θα πρέπει να υπολογίσουμε την δράση του χιονιού σε όλη την επιφάνεια του θόλου. Συνεπώς θα πρέπει να γίνουν οι ανάλογοι υπολογισμοί όπως φαίνονται αναλυτικά παρακάτω ώστε να συνυπολογιστεί η δράση του χιονιού.

Ως δράσεις χιονιού χαρακτηρίζονται σύμφωνα με τον «**Ευρωκώδικα 1 - Μέρος 1-3, Φορτία χιονιού**» (σελ.10 και παράγραφος 1.6.3 και 1.6.4 ευρωκώδικα) :

Η χαρακτηριστική τιμή φορτίου χιονιού επί της στέγης είναι το γινόμενο της χαρακτηριστικής τιμής φορτίου χιονιού επί του εδάφους (το φορτίο του στρώματος χιονιού επί του εδάφους, που είναι αποτέλεσμα μιας χιονοπτώσεως με εξαιρετικά σπάνια πιθανότητα εμφάνισεως) με τους κατάλληλους συντελεστές.

Οι δράσεις αυτές θεωρούνται ότι ασκούνται κάθετα στα μέλη.

Τα φορτία χιονιού σε στέγες που χαρακτηρίζονται σαν τυχηματικές καταστάσεις σχεδιασμού θα προσδιορίζονται με τον ακόλουθο τύπο :

$$s = \mu_i \times C_e \times C_t \times s_{Ad}$$

Όπου :

μ_i : ο συντελεστής σχήματος του φορτίου χιονιού (βλ. 5.3 και παράρτημα Β)

s_{Ad} : η τιμή σχεδιασμού του εξαιρετικού φορτίου χιονιού επί του εδάφους για μια δεδομένη τοποθεσία

$C_e = 0.8$: ο συντελεστής εκθέσεως. Σύμφωνα με τον πίνακα στην σελ.20 πιν.5.1 ευρωκ.

$C_t = 1$: ο θερμικός συντελεστής. Σύμφωνα με την παρ.5.2 και την σημείωση (8) ευρωκ.

3.3.2.1. Υπολογισμός συντελεστή σχήματος μ_i

Προφανώς στην προκειμένη μεταλλική κατασκευή την οποία μελετάται, όλα τα μέλη της είναι με κλίση, δηλαδή μπορεί να θεωρηθούν σαν δικλινείς στέγες. Επομένως, η τιμή του συντελεστή σχήματος μ_i θα προκύψει από την σελ.21 και το σχήμα 5.1 ευρωκώδικα.

$$\mu_i = 0.8$$

3.3.2.2. Υπολογισμός εξαιρετικού φορτίου χιονιού επί του εδάφους

Σύμφωνα με την παράγραφο 4.3 σελ.17 το φορτίο εξαιρετικού χιονιού θα προκύψει από τον παρακάτω τύπο :

$$s_{Ad} = C_{esl} \times s_k$$

$C_{esl} = 2$: ο συντελεστής εξαιρετικών φορτίων χιονιού. Σύμφωνα με το ΕΘΝΙΚΟ ΠΡΟΣΑΡΤΗΜΑ του «**Ευρωκώδικα 1 - Μέρος 1-3, Φορτία χιονιού**» (σελ.5 ευρωκώδικα).

s_k : η χαρακτηριστική τιμή φορτίου χιονιού επί του εδάφους για τη δεδομένη τοποθεσία.

3.3.2.3. Υπολογισμός φορτίου χιονιού επί του εδάφους για τη δεδομένη τοποθεσία S_k

Σύμφωνα με το ΕΘΝΙΚΟ ΠΡΟΣΑΡΤΗΜΑ του «Ευρωκώδικα 1 - Μέρος 1-3, Φορτία χιονιού» (σελ.4 ευρωκώδικα) το φορτίο χιονιού επί του εδάφους δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$s_k = s_{k,0} \times \left[1 + \left(\frac{A}{917} \right)^2 \right] = 1.7309 \text{ KN/m}^2$$

$s_{k,0}=1.7 \text{ KN/m}^2$: είναι το χαρακτηριστικό φορτίο χιονιού σε έδαφος που βρίσκεται στην στάθμη της θάλασσας. Σύμφωνα με τον πίνακα 1 σελ.4. (ζώνη 4)

$A=200$: είναι το υψόμετρο της τοποθεσίας πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (σε m).

$$\rightarrow s_{Ad} = c_{esl} \times s_k = 2 * 1.7309 = 3,4618 \text{ KN/m}^2$$

$$\rightarrow s = \mu_i \times C_e \times C_t \times s_{Ad} = 0.8 * 0.8 * 1 * 3,4618 = 2.2155 \text{ KN/m}^2$$

Το φορτίο του χιονιού το οποίο έχει υπολογιστεί παραπάνω θεωρείται κατανεμημένο στο εμβαδό του κάθε στοιχείου. Επομένως για να προσομοιαστεί στο πρόγραμμα NIDA_Pro_7 το οποίο χρησιμοποιήθηκε, θα πολλαπλασιαστεί το φορτίο με εμβαδόν του κώνου.

Άρα έχουμε :

$$E_{\mu\beta} = \pi \times r \times (l + r)$$

Όπου :

$$\pi = 3,14$$

$$r = 30\text{m}$$

$$l = 42,42\text{m}$$

άρα $E_{\mu\beta} = 6825,42\text{m}^2$ (συνολικό εμβαδό κατασκευής)

με 2121 κόμβους,

και η δύναμη στο ανάλογο εμβαδόν της περιοχής αυτής θα είναι (για το αντίστοιχο εμβαδό με την ίδια λογική όπως υπολογίστηκε στον άνεμο, κατά αναλογία διαιρούμενη) για τον κάθε κόμβο :

$$f_s = E_{\mu\beta} \times S = 6825,42\text{m}^2 \times 2,22\text{kN/m}^2 = \mathbf{15152,43\text{kN}}$$
 στους κόμβους συνολικά

άρα σε καθένα ξεχωριστά θα είναι :

$$F_{s/\text{κόμβο}} = f_s / 2121 \text{ κόμβους} = 15152,43 / 2121 = 7,14 \text{ kN}$$

$$\mathbf{F_s = 7,14 \text{ kN}}$$

4. Εισαγωγή στο NIDA

Το πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε είναι το NIDA_Pro_7. Η μέθοδος της ανάλυσης που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα βασίζεται στις μετακινήσεις που εξαρτώνται από την μέθοδο της ακαμψίας.

Το πρόγραμμα αυτό διαθέτει 3 διαφορετικά περιβάλλοντα τα οποία είναι τα ακόλουθα:

- **NAF-NIDA.EXE** : Το περιβάλλον όπου πραγματοποιείται ο σχεδιασμός του φορέα (κόμβοι, μέλη, διατομές, υλικά, φορτία και συνδυασμοί φορτίσεων).
- **NSD.EXE** : Το πρόγραμμα που κάνει την ανάλυση.
- **PostViewer.EXE** : Το περιβάλλον όπου εξάγει τα αποτελέσματα και η επεξεργασία τους γίνεται μέσα σε αυτό το πρόγραμμα.

Η διαδικασία που επιλέχθηκε με σκοπό να επιλυθεί ο φορέας είναι η “second-order analysis”. Σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία όταν ένα μέλος φτάνει στην οριακή αντοχή του τότε σε αυτό το μέλος εισέρχεται μια πλαστική άρθρωση και η ανάλυση συνεχίζεται κανονικά με ανακατανομή των δυνάμεων.

4.1. Η διαδικασία της ανάλυσης, second order plastic analysis

Γενικότερα, στην πλαστική ανάλυση όταν ένα μέλος φτάσει την αντοχή του σχεδιασμού η ανάλυση συνεχίζεται και εισάγεται μία πλαστική άρθρωση στο μέλος, μέχρις ότου ο φορέας να καταρρεύσει. Ο φορέας καταρρέει με το φορτίο αστοχίας το οποίο πρέπει να είναι ίσο ή μεγαλύτερο του φορτίου σχεδιασμού για όλες τους συνδυασμούς φόρτισης. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία.

Α) Υπολογίζει τις μετακινήσεις και τις στροφές όλων των κόμβων καθώς και των ενώσεων όλων των μελών, επιτρέποντας τις αλλαγές στην γεωμετρία του φορέα με τις επιρροές των P-δ και P-Δ.

Β) Υπολογίζει τα διαγράμματα των ροπών κάμψης σε όλες τις διευθύνσεις του μέλους, την ροπή στρέψης καθώς και την αξονική δύναμη, επιτρέποντας τα φαινόμενα 2^{ης} τάξης λόγω αξονικής δύναμης.

Γ) Ο σχεδιασμός του φορέα σύμφωνα με τον έλεγχο του συντελεστή αντοχής για το οποίο δεν χρειάζεται να υπολογιστεί το μήκος λυγισμού.

Δ) Κάνει έλεγχο των μελών καθώς και τον αντίστοιχο έλεγχο ευστάθειας όλης της κατασκευής.

Ε) Ο σχεδιασμός του φορέα γίνεται με βάση όλο το σύστημα σε αντίθεση με την μέθοδο που ήταν βασισμένη στο κάθε μέλος.

Έλεγχος του συντελεστή αντοχής

Ο συντελεστής αντοχής είναι αυτός που ουσιαστικά καθορίζει στο πρόγραμμα, ποιά και πότε είναι τα μέλη του φορέα τα οποία θα υπερβούν την αντοχή τους. Η παρακάτω ανίσωση απαιτείται για τον έλεγχο της αντοχής του μέλους.

$$\frac{P}{A_g \sigma_y} + \frac{M_y + P(\delta_y + \Delta_y)}{M_{ry}} + \frac{M_z + P(\delta_z + \Delta_z)}{M_{rz}} = \varphi \leq 1$$

σ_y : τάση διαρροής.

P : αξονική δύναμη μέλους.

A_g : εμβαδό διατομής.

M_y, M_z : εξωτερικές ροπές στους αντίστοιχους άξονες.

M_{ry}, M_{rz} : ροπές αντοχής στους αντίστοιχους άξονες.

$P(\delta_y + \Delta_y), P(\delta_z + \Delta_z)$: ροπές λόγω αλλαγής της ακαμψίας του φορέα του μέλους υπό τα φορτία και λόγω των επιπτώσεων παραμόρφωσης.

Όταν η ανίσωση αυτή δεν ικανοποιείται τότε η δράση είναι μεγαλύτερη από την αντοχή και στο πρόγραμμα θα εμφανίζεται κόκκινο ραβδάκι στα τελικά αποτελέσματα.

Ο υπολογισμός από το πρόγραμμα των τάσεων, δυνάμεων μελών και ροπών γίνεται σε κάθε διατομή σε όλο το μήκος του σκελετού της κατασκευής (όχι μόνο στα δύο άκρα γιατί μπορεί να χάσει τις κρίσιμες τιμές) επιτρέποντας τα φαινόμενα λυγισμού στα μέλη.

Ειδικά χαρακτηριστικά της ανάλυσης 2^{ης} τάξης

Τα παρακάτω μη γραμμικά φαινόμενα τα οποία απαιτούνται από κάποιους κώδικες, έχουν συμπεριληφθεί για τον υπολογισμό των δυνάμεων όλων των μελών :

Α) Η επιρροή της λυγηρότητας των μελών (L_e/r) για την αντοχή της αξονικής δύναμης στις κολώνες και στα υποστυλώματα.

Β) Η μείωση της δυσκαμψίας λόγω παρουσίας της αξονικής δύναμης.

Γ) Ο λόγος του μήκους λυγισμού (L_e/r) ή ο K-factor υπολογίζεται και χρησιμοποιείται αυτόματα, και δεν χρειάζεται να υπολογίζεται σε κάθε στάδιο.

Δ) Φαινόμενα όπως λυγισμός και επιρροές P-Δ συμπεριλαμβάνονται στην επαναληπτική-αυξητική διαδικασία.

Ε) Η αντοχή σχεδιασμού και η αντοχή έναντι λυγισμού της κατασκευής υπολογίζεται μέσω της αύξησης της φόρτισης μέχρις ότου το μέλος να αστοχήσει η διατομή.

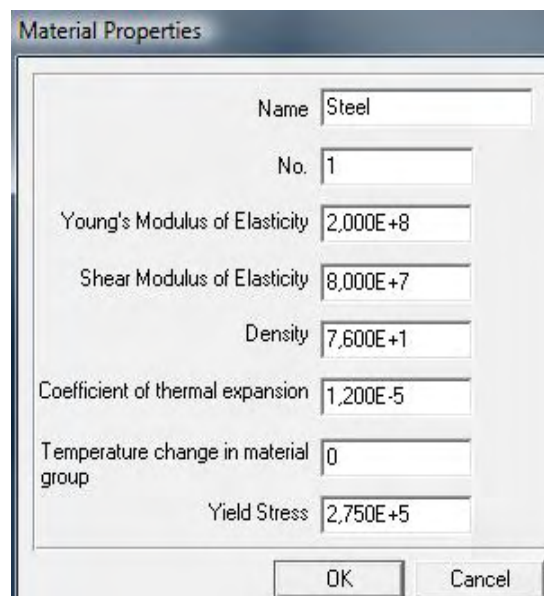
4.2. Σχεδιασμός του φορέα στο NIDA

Στο περιβάλλον του NIDA μπορεί να σχεδιαστεί ο φορέας με την παρακάτω λογική: Σχεδιάζονται όλοι οι κόμβοι από την υπαρκτή κατασκευή και στην συνέχεια ενώνονται οι κόμβοι με βάση το σχέδιο του φορέα. Επίσης μπορεί να σχεδιαστεί ο φορέας στο AutoCAD και μετά να τον εισαχθεί στο NIDA, όπως και έγινε.

4.3. Καθορισμός Υλικού

Η εντολή για τον καθορισμό του υλικού είναι η ακόλουθη:

Construct → New Material

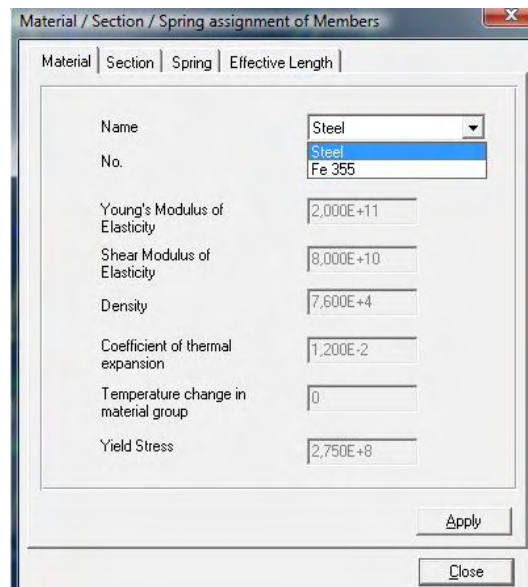


- Name : Το όνομα του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί
- No. : Ο ονοματικός αριθμός για κάθε υλικό στην περίπτωση που υπάρχουν παραπάνω από ένα υλικό.
- Young Modulus of Elasticity : Το μέτρο Ελαστικότητας του υλικού
- Shear Modulus of Elasticity : Το μέτρο Διάτμησης
- Density: πυκνότητα του υλικού
- Coefficient of thermal expansion: Ο συντελεστής θερμικής διαστολής
- Yield Stress: Τάση Διαρροής

Στην συνέχεια επιλέγονται τα ομαδοποιημένα μέλη που θα έχουν ίδια διατομή, στην προκειμένη περίπτωση ένα υλικό για όλο τον φορέα.

Έπειτα, επιλέγεται από το μενού :

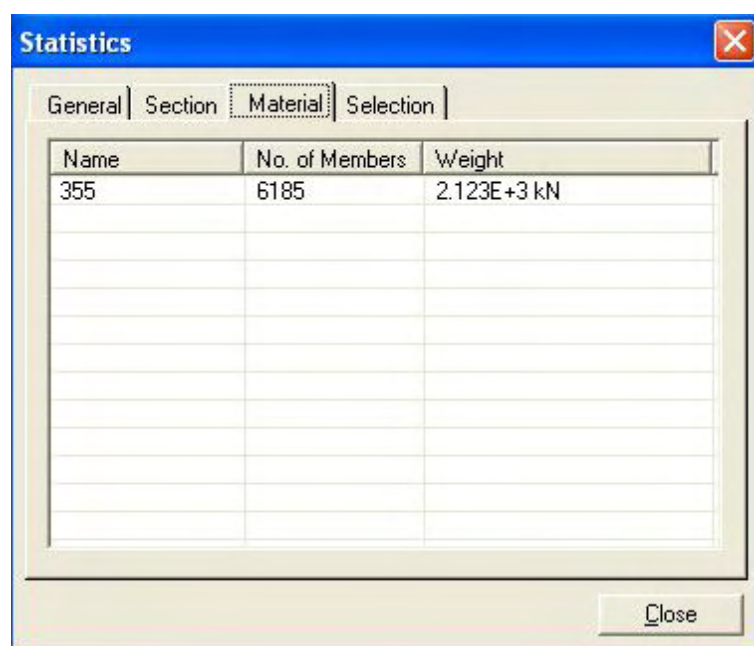
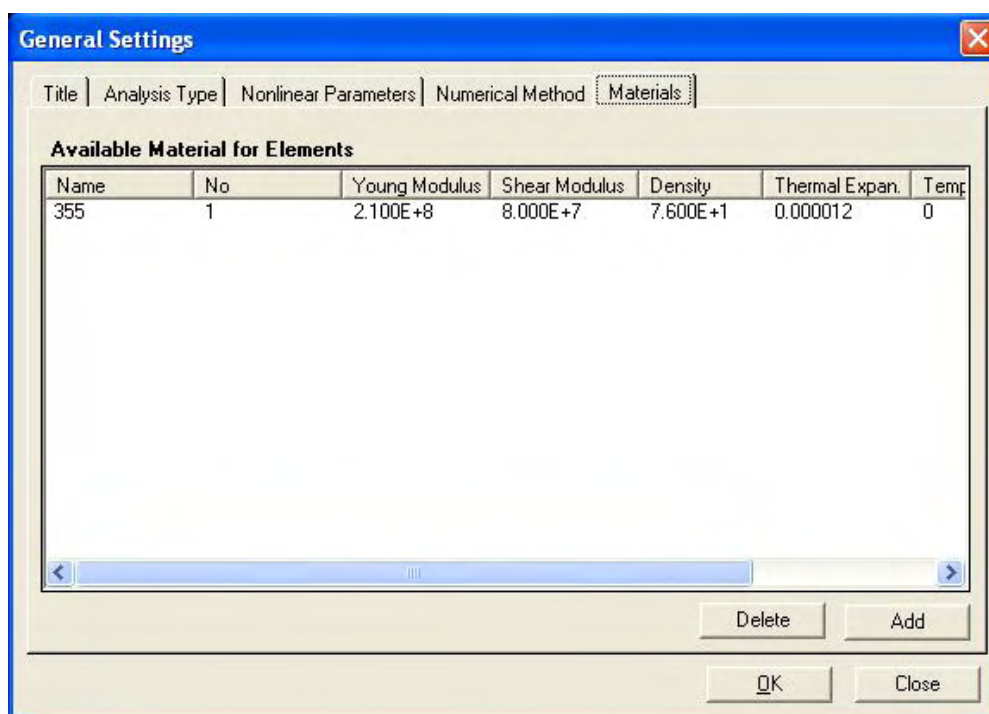
Gr-Assign → Material



Διαλέγεται το υλικό και εφαρμόζεται στα επιλεγμένα μέλη πατώντας το [Apply] και στην συνέχεια κλείνει με το [Close].

Εδώ επελέχθη το υλικό όπως προβάλλεται στην πρώτη εικόνα.

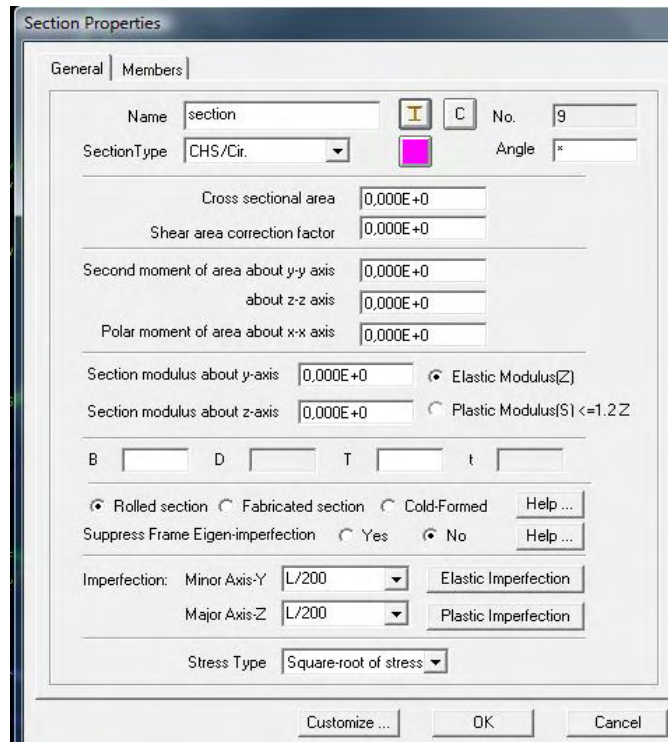
Ενώ στις δύο παρακάτω είναι όπως φαίνεται στην ανάλυση.




4.4. Καθορισμός των διατομών

Η εισαγωγή των διατομών που θα χρησιμοποιηθούν γίνεται με την παρακάτω διαδικασία. Στο μενού επιλέγεται :

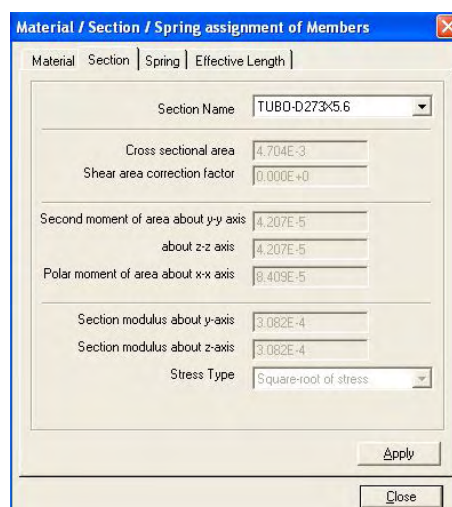
Construct → New Section



Η πλειονότητα των διατομών που χρησιμοποιούνται ευρέως βρίσκονται στο “κουμπί”  και από εκεί μπορεί να επιλεχθούν οι διατομές που θα χρησιμοποιηθούν. Μετά αλλάζεται το χρώμα για να μπορούν να παρατηρηθούν καλύτερα και τελειώνει με το [OK]. Επαναλαμβάνεται η διαδικασία μέχρι να εισαχθούν όλες οι διατομές που θα χρησιμοποιηθούν.

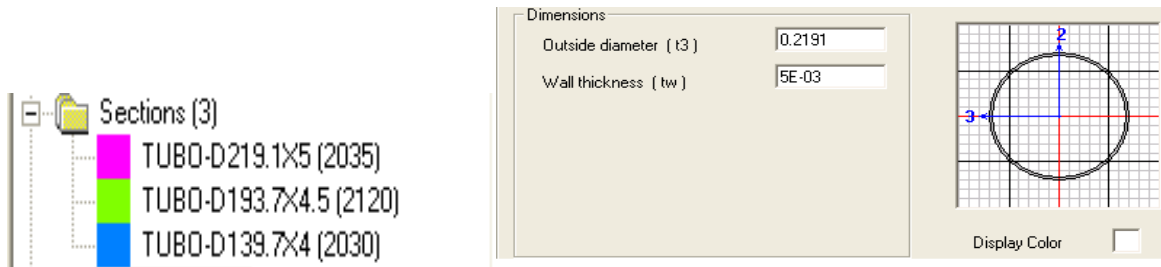
Στην συνέχεια ομαδοποιούνται όλα τα μέλη που θα έχουν τις ίδιες διατομές και :

Gr-Assign → Section



Επιλέγεται η διατομή από το [SectionName] και εφαρμόζεται με το [Apply] και κλείνει με το [Close]. Επαναλαμβάνεται η διαδικασία μέχρι να οριστούν όλα τα μέλη με διατομές.

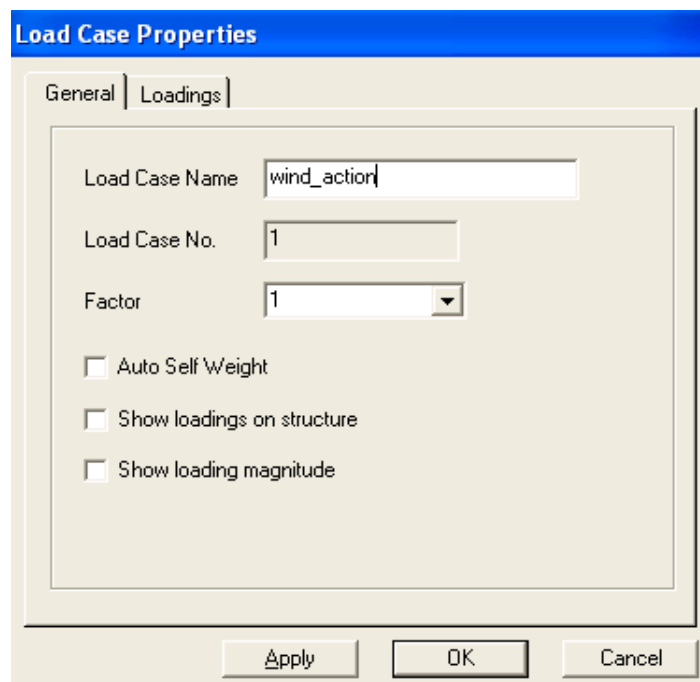
Ενδεικτικά για τον φορέα επιλέχθηκαν :



4.5. Καθορισμός φορτίων

Σε προηγούμενο κεφάλαιο ορίστηκαν τα αντίστοιχα φορτία και τώρα θα αρχίσει η διαδικασία εισαγωγής τους στο NIDA. Αρχικά πρέπει να προσδιοριστούν τα είδη των φορτίων με την παρακάτω διαδικασία :

Construct → New Load Case



- Load Case Name : Το όνομα του φορτίου που ορίζεται.
- Load Case No. : Η αρίθμηση του φορτίου.
- Factor : Συντελεστής του φορτίου.

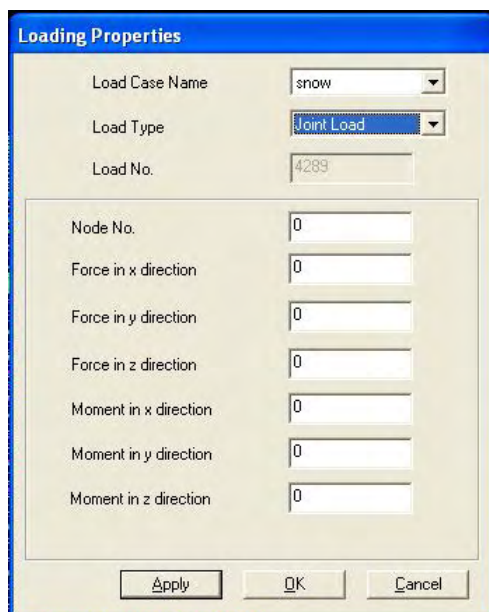
Προσδιορίστηκαν 3 διαφορετικά είδη φορτίων :

- 1) Φορτίο ανέμου.
- 2) Φορτίο χιονιού.
- 3) Ίδιο βάρος της κατασκευής (αρκεί να επιλεγεί το Auto Self Weight, και να προσδιοριστεί η φορά του ίδιου βάρους).

Στο παρακάτω στάδιο ακολουθεί η εφαρμογή των φορτίων όπως αυτά έχουν υπολογιστεί. Όλα τα φορτία είναι συγκεντρωμένα φορτία. Αναλυτικότερα, τα φορτία του ανέμου εφαρμόζονται σε όλους τους κόμβους του θόλου, από τη μεριά που θεωρήθηκε ότι θα έχει κατεύθυνση ο αέρας με το ανάλογο εμβαδό επιρροής και με τιμή 0,64 kN/κόμβο σε κάθε κόμβο και από την αντιδιαμετρική του με αντίθετη φορά στο υπόλοιπο εμβαδό επιρροής με τιμή 1,30 kN/κόμβο.

Με τα φορτία του χιονιού πραγματοποιήθηκε η αντίστοιχη διαδικασία για την κατακόρυφη διεύθυνση με αναγωγή της πίεσης χιονιού στους κόμβους με τιμή 7,14 kN/κόμβο. Η εισαγωγή των φορτίων παρουσιάζεται παρακάτω :

Construct→ Group-Add Loadings



- Load Case Name : Επιλογή του φορτίου που τοποθετείται π.χ. φορτίο ανέμου.
- Load Type : Τι είδους φόρτιση υπάρχει (επικόμβια, θερμική, συγκεντρωμένη κτλ.) στην προκειμένη περίπτωση τα φορτία είναι Joint Load.
- Load No. : Ο χαρακτηριστικός αριθμός της φόρτισης που εισάγεται.

Για τα Joint Load :

- Member No. : ο αριθμός του μέλους που θα εφαρμοστεί το φορτίο.
- Τέλος επιλέγεται το σύστημα συντεταγμένων (τοπικό ή γενικό) που θα εισαχθούν τα φορτία καθώς και την διεύθυνση και φορά των φορτίων.

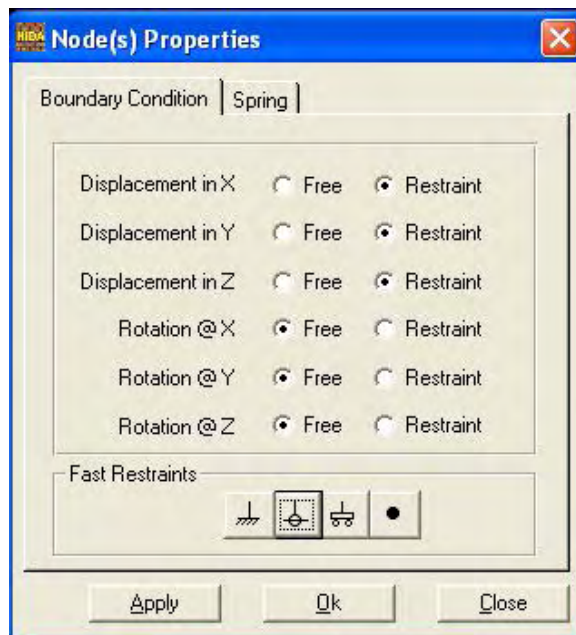
Η εισαγωγή του κάθε φορτίου έγινε με βάση το κεφάλαιο 3.

4.6. Εισαγωγή στηρίξεων

Ο θόλος θεωρείται ότι σαν στηρίξεις κάτω έχει αρθρώσεις. Εισαγωγή των αρθρώσεων :

Επιλογή των κόμβων στους οποίους θεωρείται ότι βρίσκονται οι στηρίξεις. Στον φορέα είναι οι 90 κάτω κόμβοι στη βάση. Από το μενού :

Gr-Assign → Boundary conditions

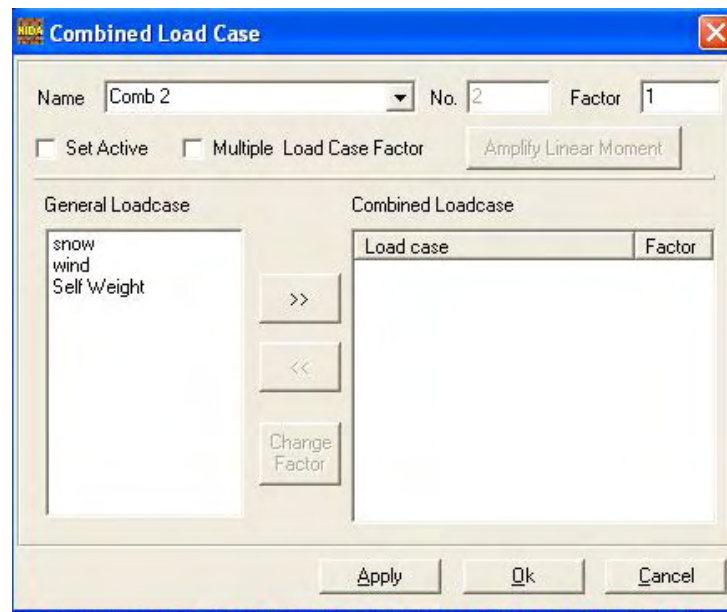


Για να εισαχθεί η άρθρωση στους επιλεγμένους κόμβους, επιλέγεται το δεύτερο “κουτί” που αντιστοιχεί στις ανάλογες δεσμεύσεις.

4.7. Εισαγωγή συνδυασμών αστοχίας

Εισάγονται οι 3 συνδυασμούς αστοχίας όπως αυτοί υπολογίστηκαν στο κεφάλαιο 3, σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία.

Construct → Add combined Load Case



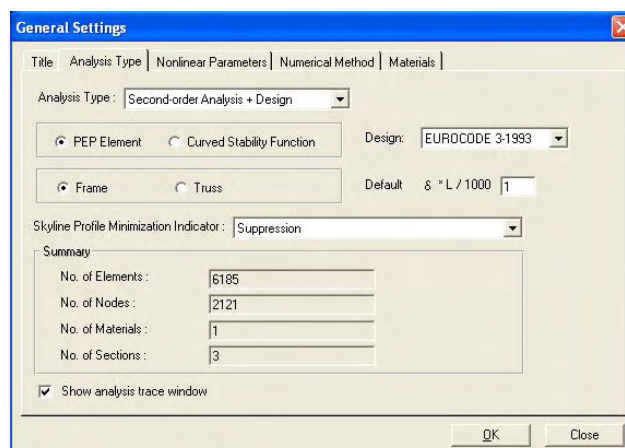
- Name : Το όνομα του συνδυασμού (π.χ. 1,35G+1,5Q)
- Εισάγουμε τα φορτία που πρέπει από τα General Load Case στο Combined Load Case.
- Τέλος, για κάθε ένα Load Case εισάγεται ο συντελεστής που έχει ο συνδυασμός. (π.χ. ο άνεμος με Factor :1,5)

4.8. Καθορισμός παραμέτρων της ανάλυσης

Το επόμενο βήμα είναι να εισαχθούν όλες οι απαραίτητες παράμετροι για την ανάλυση δεύτερης τάξης. Από το μενού :

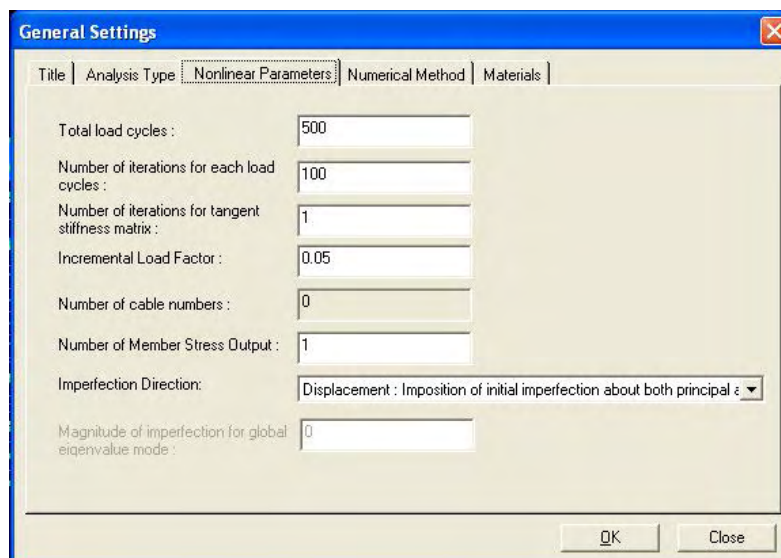
Analyse→Analyse and Design Parameters Setting

Analysis Type:



- Analysis type : Ο τρόπος ανάλυσης που θα χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω θα επιλεγεί η **Second-Order Analysis + Design**. Το Design σημαίνει ότι κάθε διατομή θα ελεγχθεί με κάποιες επιπλέον απαιτήσεις σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3-1993 (π.χ. η αντοχή σχεδιασμού μειώνεται για κάποια μέλη με φαινόμενα λυγισμού).
- Ορίστηκε το πρόγραμμα να δουλέψει με πεπερασμένα στοιχεία καθώς και ότι ο φορέας λειτουργεί σαν πλαίσιο λόγω των κατανεμημένων φορτίων. [PEP Elements&Frame]
- Το Default $\delta \cdot L/1000$ πήρε την τιμή ένα (1) θεωρώντας ότι οι αρχικές παραμορφώσεις είναι οι ελάχιστες δυνατές.

Nonlinear Parameters

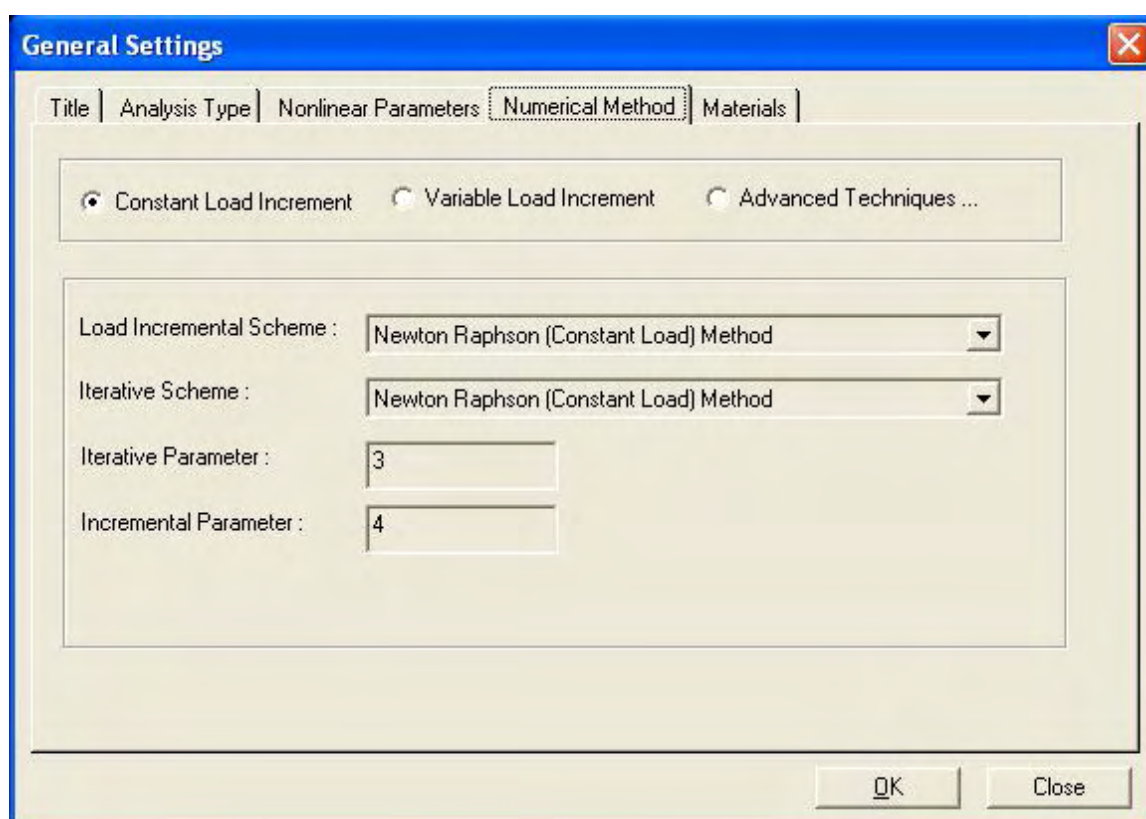


- Total load cycles : ο αριθμός των κύκλων φόρτισης.
- Number of iterations for each load cycles : Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων του κάθε κύκλου φόρτισης.
- Number of iterations for tangent stiffness matrix : Ο αριθμός των επαναλήψεων του μητρώου δυσκαμψίας μέχρι να αναδιαταχθεί. Λόγω της χρήσης της μεθόδου Newton-Raphson (Constant Load) πρέπει να εισαχθεί ως μονάδα.
- Incremental Load Factor : Η αύξηση του φορτίου σε κάθε κύκλο φόρτισης. Εδώ χρησιμοποιήθηκε το 0,05 δηλαδή σε κάθε κύκλο θεωρούσε φορτίο :
 $P_i = i \cdot 0,05 \cdot P$ όπου i = αριθμός βήματος, $P \rightarrow$ το ασκούμενο φορτίο.
- Number of cable numbers : ο αριθμός καλωδίων.

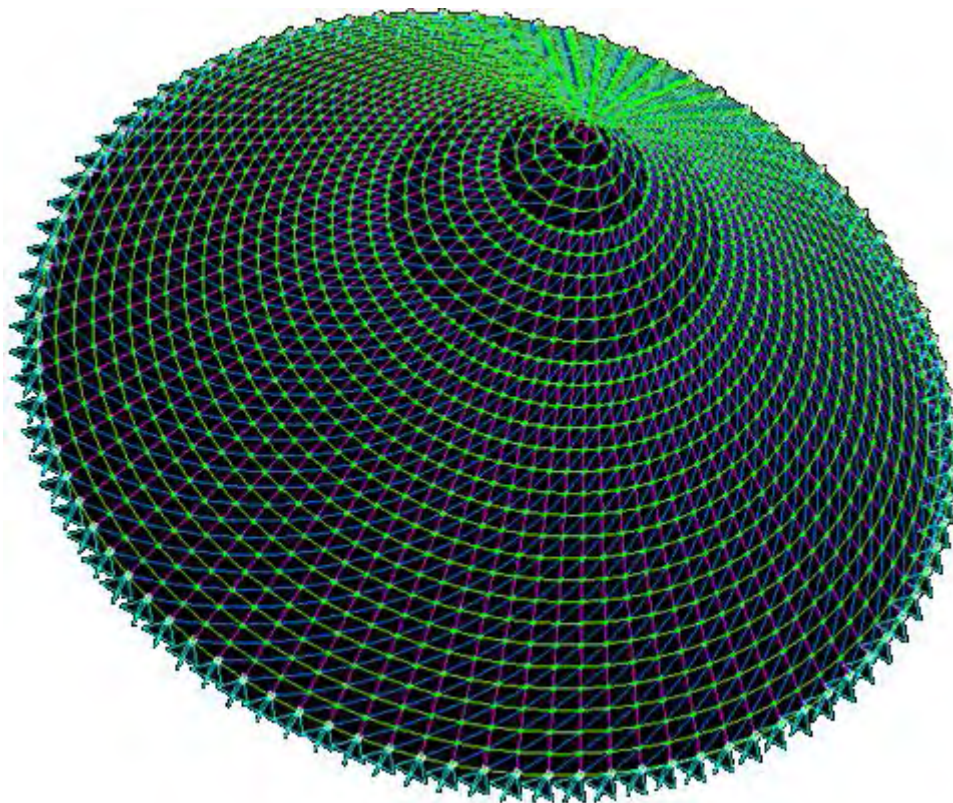
- Number of Member Stress Output : Εμφάνιση στοιχείων μετά την ανάλυση των στοιχείων με την μέγιστη καταπόνηση.
- Imperfection Direction : Η επιλογή αυτή δίνει την δυνατότητα να επιλεγεί, πως θα εισάγονται οι ατέλειες από τον ένα κύκλο φόρτισης στον άλλον.

Numerical Method

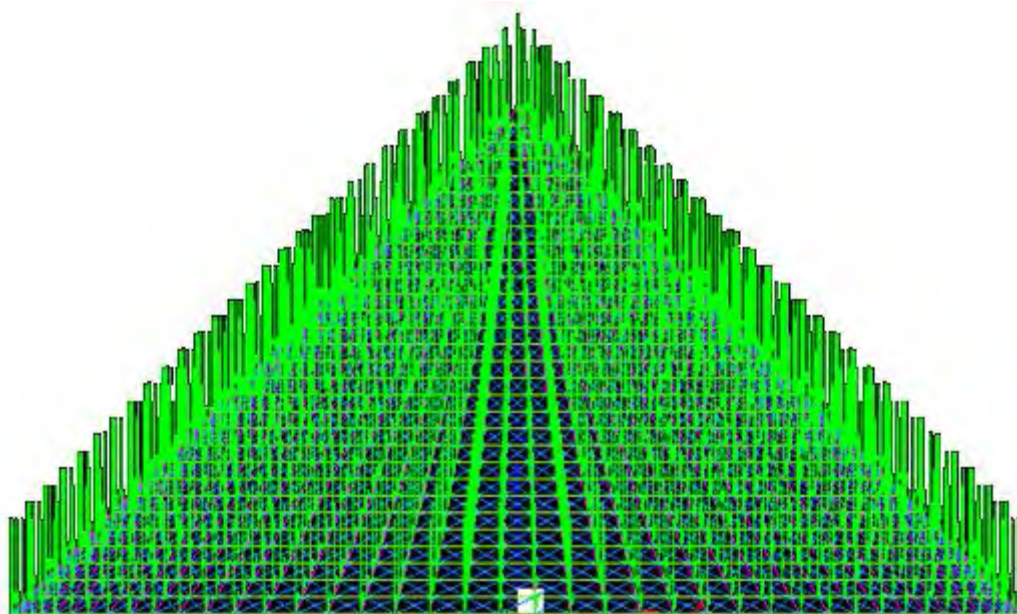
Η ανάλυση έγινε με χρήση της μεθόδου Newton-Raphson (constant load), ύστερα από προτροπή του κ.S.L. Chan, δημιουργό του προγράμματος, για καλύτερα αποτελέσματα.



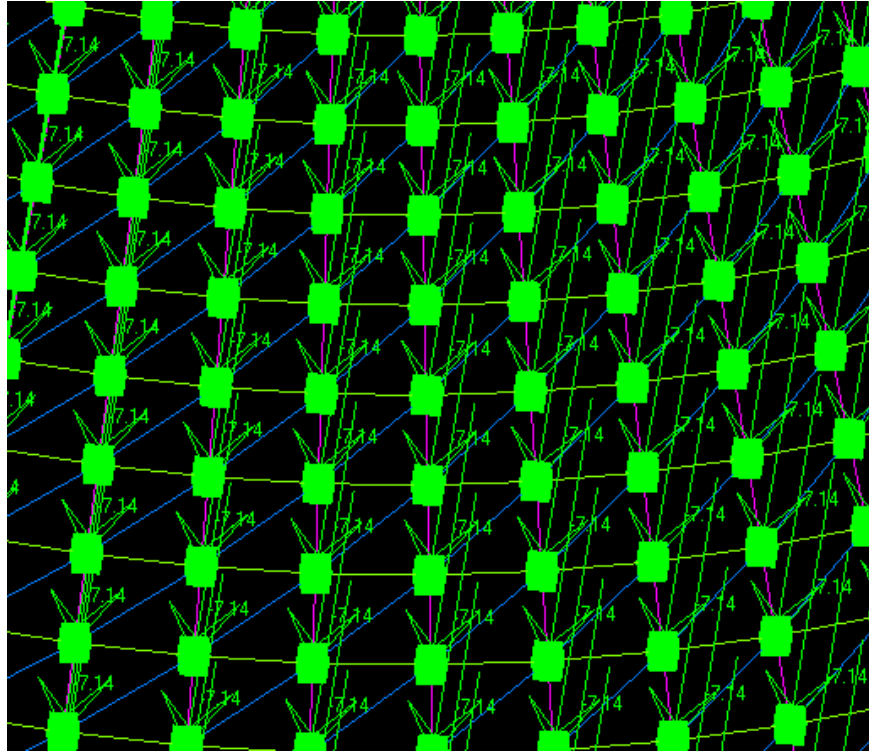
Τελικά ο φορέας στο NIDA μετά την εφαρμογή όλων των παραπάνω παραγραφών έχει την παρακάτω μορφή με βάση το σχεδιασμό και τον τρόπο που εξάγεται από αυτό :



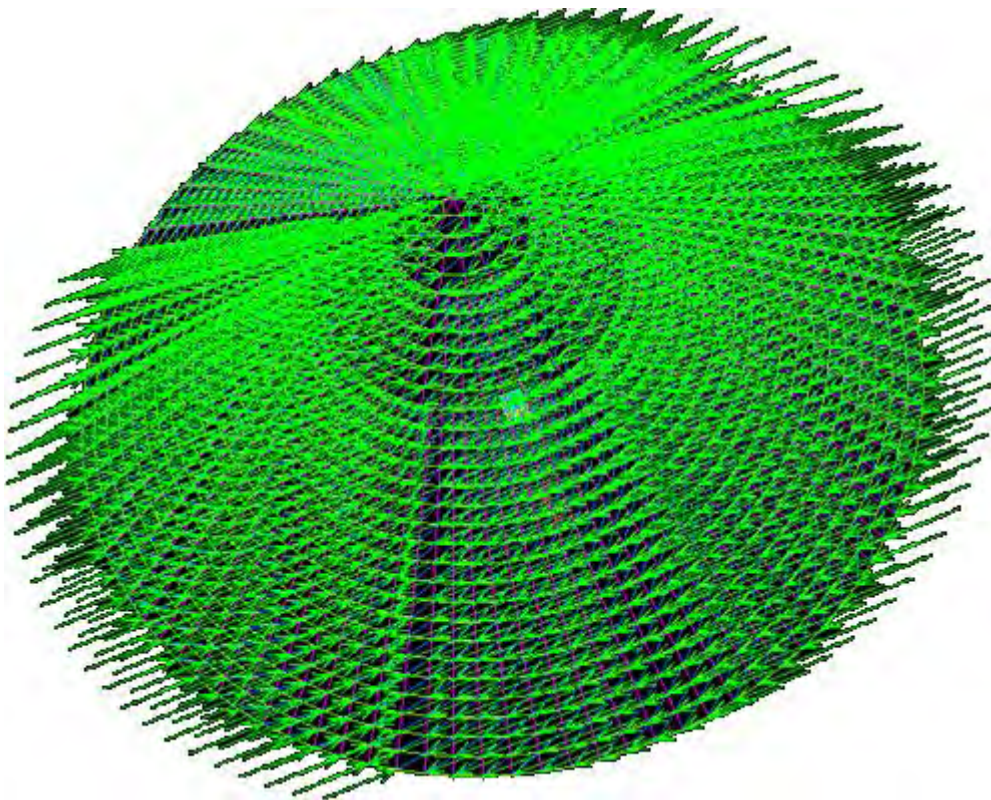
Σχήμα 4.1 : Στηρίξεις του φορέα στο περιβάλλον NIDA



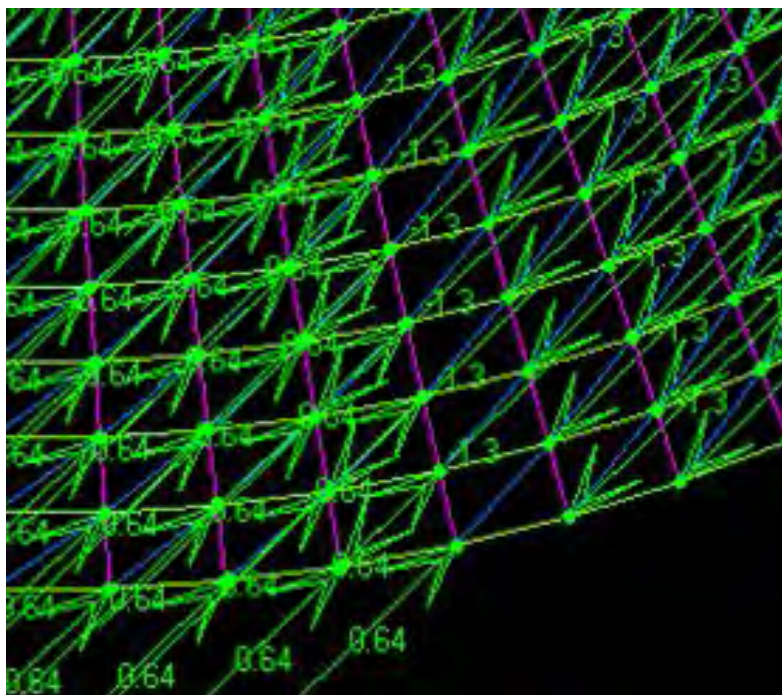
Σχήμα 4.2 : Συνολική εικόνα φορτίου χιονιού στο περιβάλλον NIDA



Σχήμα 4.3 : Μεγέθυνση φορτίου χιονιού στο περιβάλλον NIDA



Σχήμα 4.4 : Συνολική εικόνα φορτίου ανέμου στο περιβάλλον NIDA



Σχήμα 4.5 : Μεγέθυνση φορτίου ανέμου στο περιβάλλον NIDA

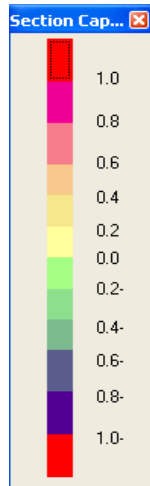
5. Τελικά Αποτελέσματα

Έχει προηγηθεί η επίλυση του φορέα και ακολουθεί η παρουσίαση της παραμορφωμένης κατασκευής σε χαρακτηριστικά βήματα για κάθε ένα συνδυασμό. Αναλυτικότερα, τα βήματα είναι για κάθε συνδυασμό :

- Ο αρχικός-απαραμόρφωτος φορέας.
- Ένα βήμα πριν την πρώτη πλαστική άρθρωση.
- Το βήμα της πρώτης πλαστικής άρθρωσης.
- Χαρακτηριστικά στάδια έντονης ανακατανομής τάσεων.
- Τα τελευταία βήματα με τις έντονες παραμορφώσεις.
- Το στάδιο κατάρρευσης.

5.1. Επισυναπτόμενα σχέδια του φορέα σε διάφορα βήματα

Διευκρινήσεις, στα παρακάτω σχέδια υπάρχει χρωματική διαφοροποίηση των μελών ανάλογα με τον συντελεστή αντοχής τους.



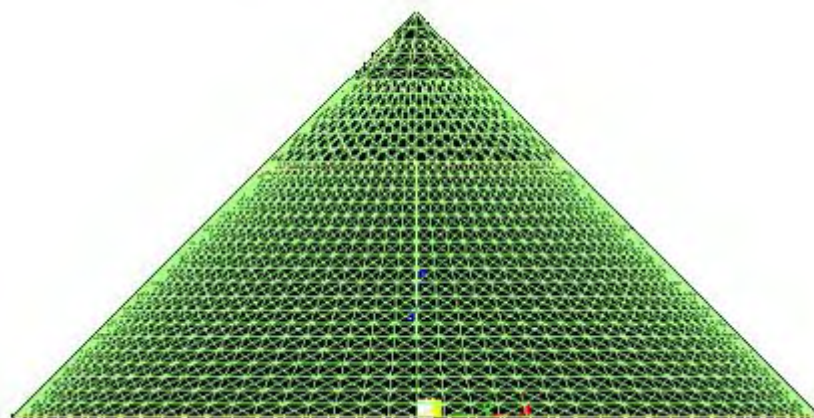
Δηλαδή όταν τα μέλη πλησιάζουν το κόκκινο χρώμα τείνουν στην οριακή τους αντοχή. Επίσης στις αρχικές καταστάσεις των συνδυασμών χρησιμοποιήθηκαν τα σχέδια με τα χρώματα του φορέα.

5.2. Παραμορφώσεις – Αστοχίες Φορέα

Στα παρακάτω σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις του φορέα έως την κατάρρευσή του με την πάροδο των κύκλων φόρτισης όπου αυξάνεται σταδιακά η τιμή των φορτίων με το ανάλογο βήμα που αναφέρθηκε παραπάνω. Αντιστοίχως προκύπτουν τα αποτελέσματα των τριών συνδυασμών φόρτισης με τη σειρά όπως εισήχθησαν στο πρόγραμμα NIDA, και όπως εξήχθησαν απεικονίζοντάς τα με τη χρήση του προγράμματος της ζωγραφικής (paint) ύστερα από την επιλογή φωτογραφιών των πιο κρίσιμων φάσεων (print screen) .

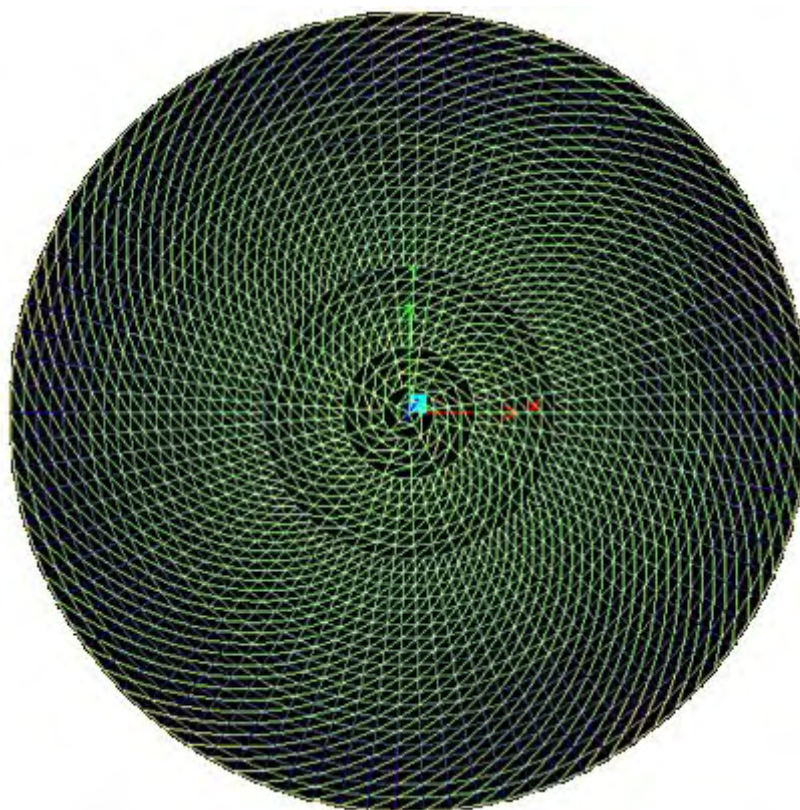
Η παρουσίαση τόσο των εικόνων των παραμορφώσεων των μελών σε κάθε περίπτωση καταπόνησης αλλά και στάδιο φόρτισης, όσο και των αντίστοιχων διαγραμμάτων μετακίνησης των κόμβων τους, γίνεται με βάση των συνδυασμών φορτίσεων. Για αυτό το λόγο θα επακολουθήσει η απεικόνιση των ανάλογων παραμορφώσεων με την παρακάτω σειρά σε σχέση με τους συνδυασμούς παραμορφώσεων.

5.2.1. 1^{ος} Συνδυασμός φορτίσεων (1,35G + 1.5Q)

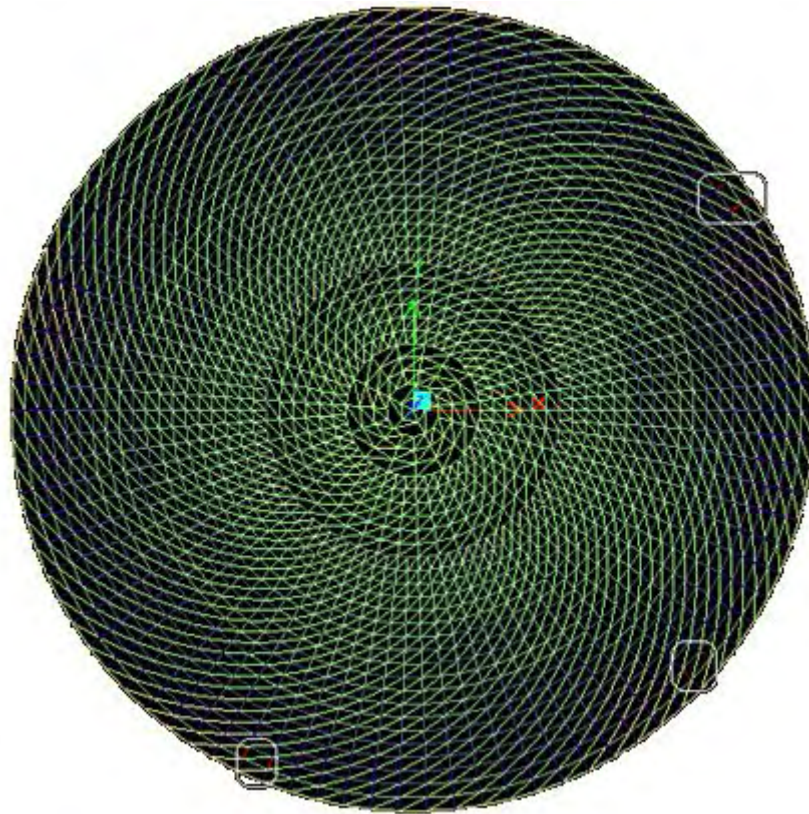


Σχήμα 5.1 : Όψη θόλου για 1^ο κύκλο με load factor 0,05

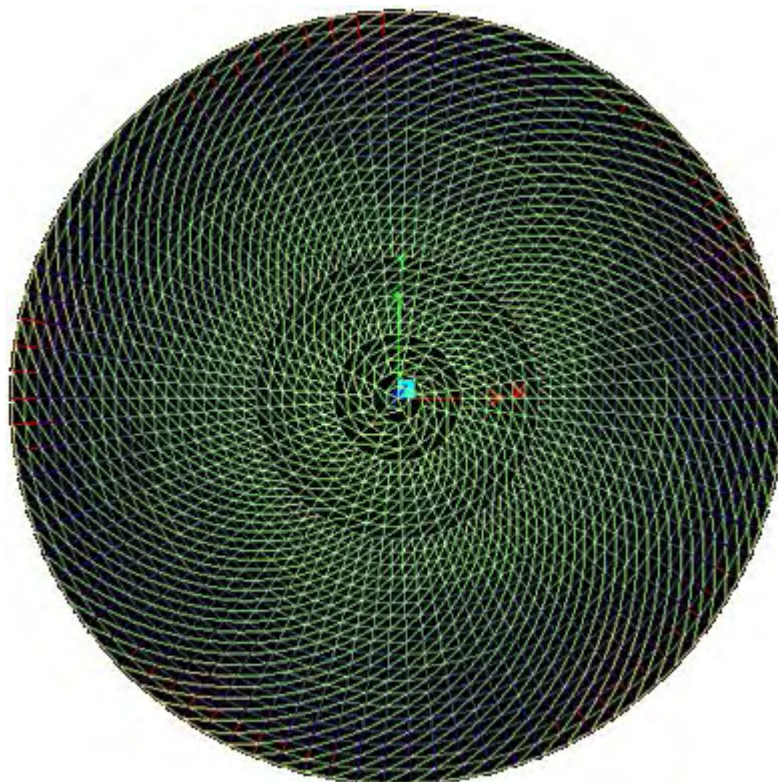
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις του φορέα με την αύξηση του φορτίου τόσο σε κάτοψη όσο και σε όψη.



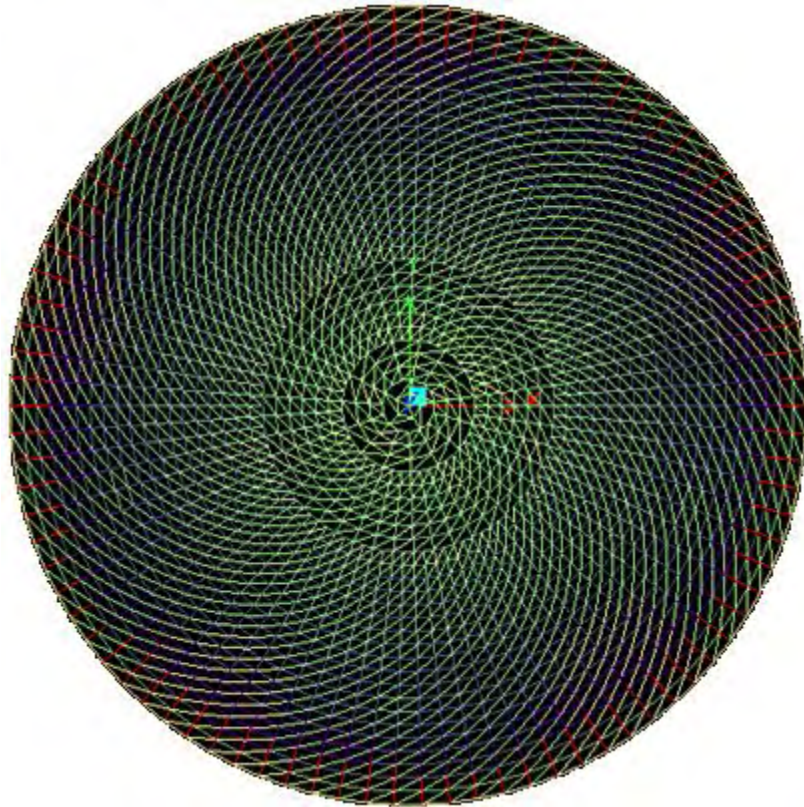
Σχήμα 5.2 : Κάτοψη θόλου για 44^ο κύκλο με load factor 2,20



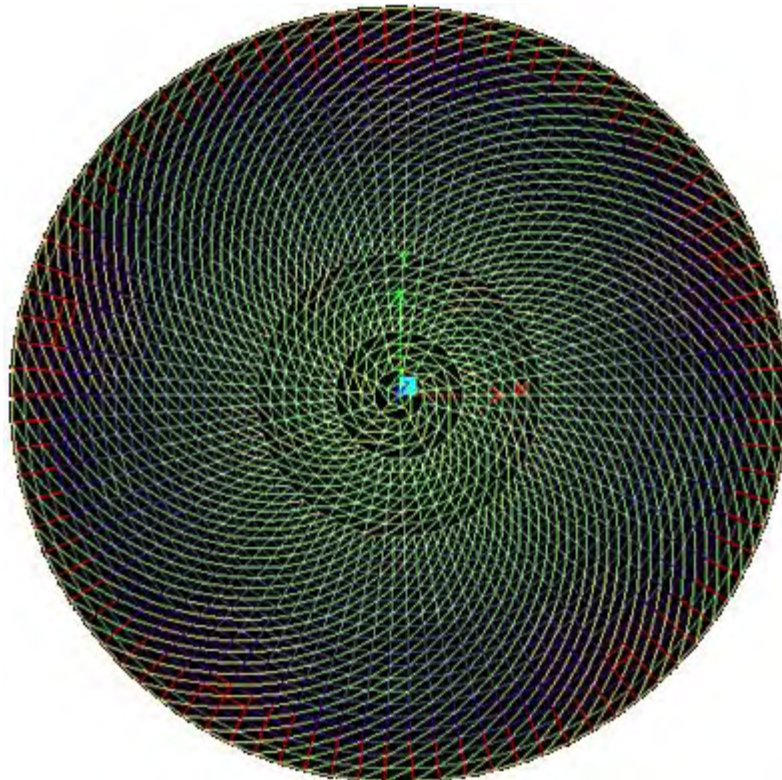
Σχήμα 5.3 : Κάτοψη θόλου για 45° κύκλο με load factor 2,25



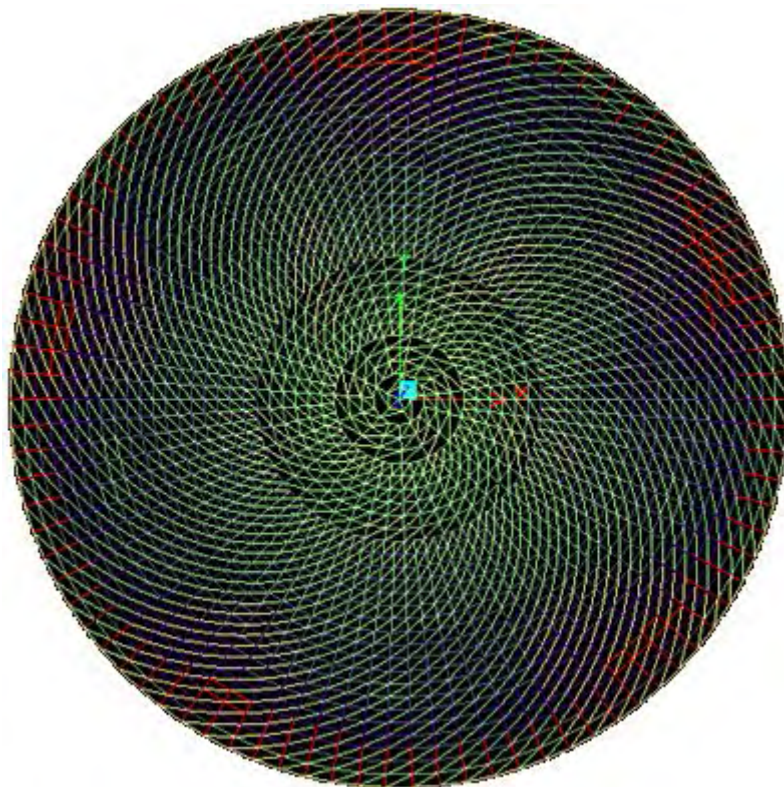
Σχήμα 5.4 : Κάτοψη θόλου για 46° κύκλο με load factor 2,30



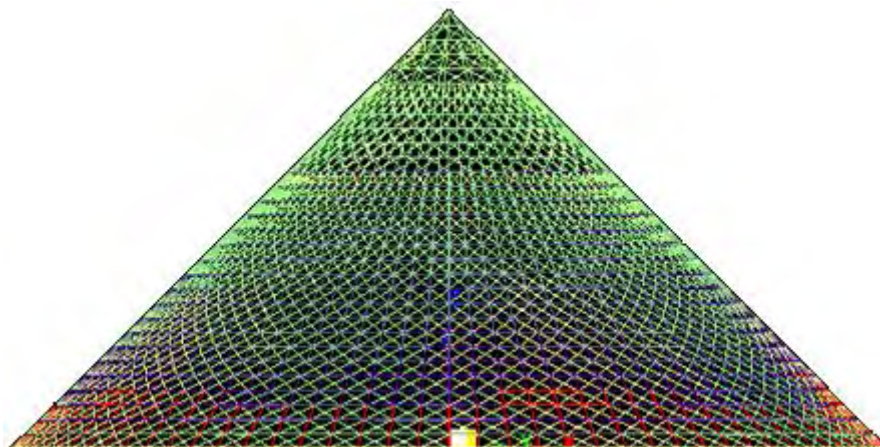
Σχήμα 5.5 : Κάτοψη θόλου για 51° κύκλο με load factor 2,55



Σχήμα 5.6 : Κάτοψη θόλου για 53° κύκλο με load factor 2,65



Σχήμα 5.7 : Κάτοψη θόλου για 54° κύκλο με load factor 2,70

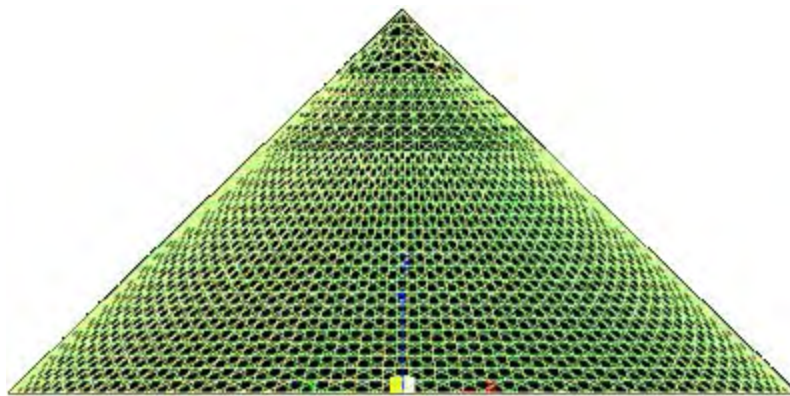


Σχήμα 5.8 : Όψη θόλου για 54° κύκλο με load factor 2,70

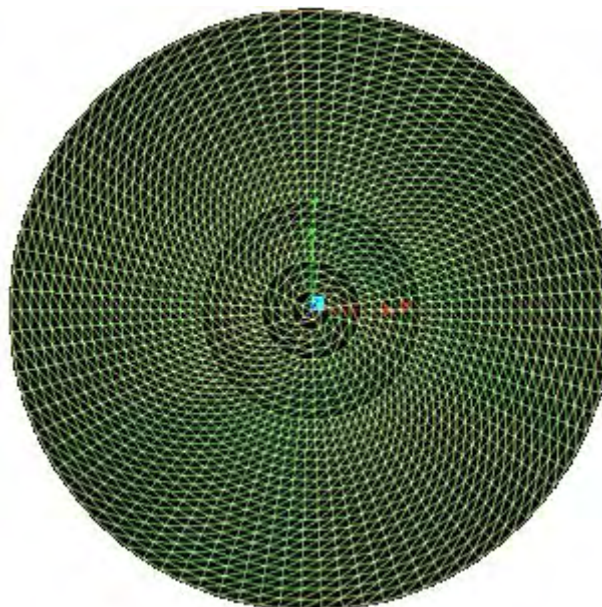
Συμπερασματικά μετά την παρουσίαση του πρώτου συνδυασμού αστοχίας, παρατηρείται ότι, στο σχ. 5.2 αρχίζουν τα μέλη να περνούν στη φάση της καταπόνησής τους και για αυτό το λόγο έχουν χρώμα μπλε προς μωβ. Στη συνέχεια στο σχ. 5.3 παρατηρείται ότι τα πρώτα μέλη του θόλου (μεσημβρινοί) που βρίσκονται στην κατάσταση οριακής αντοχής τους και για αυτό το λόγο είναι με χρώμα κόκκινο. Στα σχ. 5.4 και 5.5 φαίνεται η αύξηση των μελών που περνούν στην οριακή κατάσταση και στο σχ. 5.6 παρατηρείται ότι και οι πρώτοι δακτύλιοι παίρνουν διαδοχικά την ίδια φόρτιση και κοκκινίζουν. Τέλος, στα σχ. 5.7

και 5.8 (τελική κατάσταση) όπου πραγματοποιείται η κατάρρευση του φορέα, φαίνονται σε όψη και σε κάτοψη τα 'κοκκινισμένα' μέλη να είναι αρκετά και συνεπώς αυτά να επιφέρουν την αστοχία στο θόλο. Είναι φανερό πως, σταδιακά, μετά την εμφάνιση των πρώτων μελών σε αστοχία παρατηρείται αύξησή τους με πολύ συγκεκριμένο τρόπο, από τη βάση προς την κορυφή. Ολοένα και πιο πολλά μέλη φτάνουν στα όρια αντοχής τους μεταδίδοντας την τάση τους στα επόμενα προς τα πάνω στοιχεία έως κάποιο ή κάποια από αυτά να αστοχήσουν εντελώς.

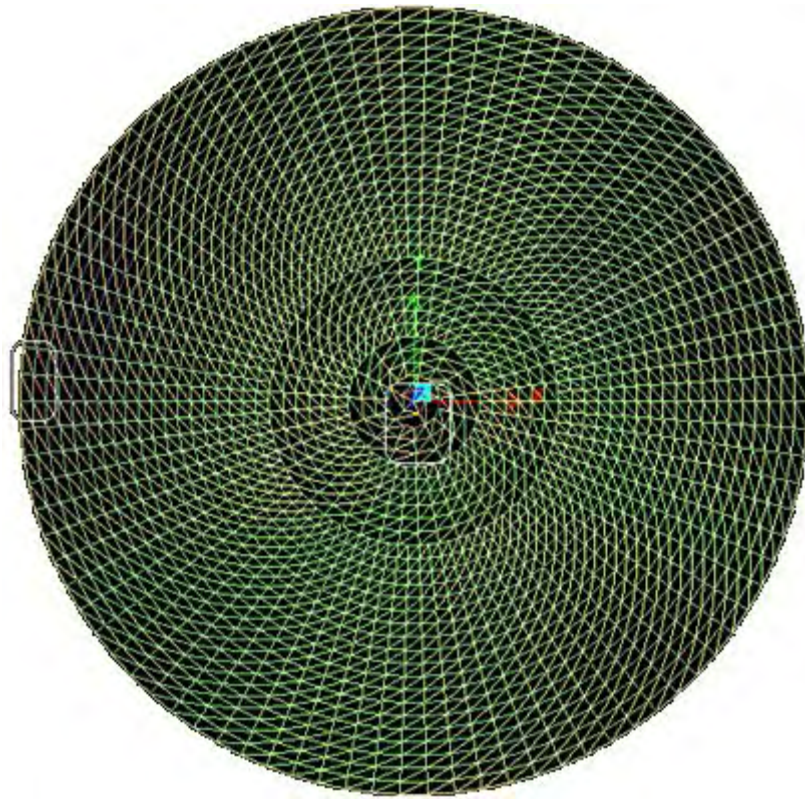
5.2.2. 2^{ος} Συνδυασμός φορτίσεων (1,35G + 1.5W)



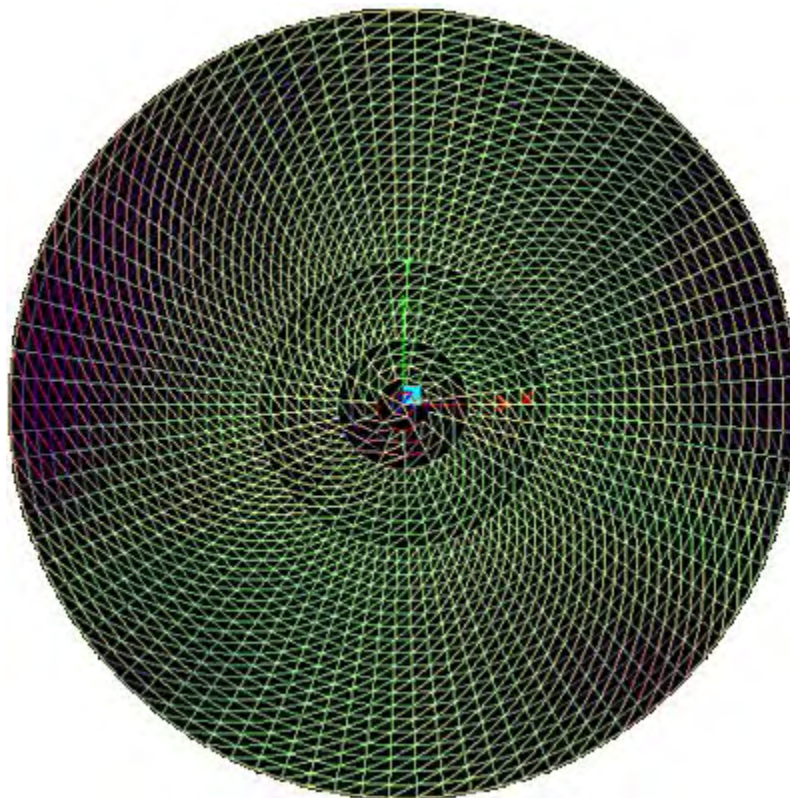
Σχήμα 5.9 : Όψη θόλου για 1^ο κύκλο με load factor 0,05



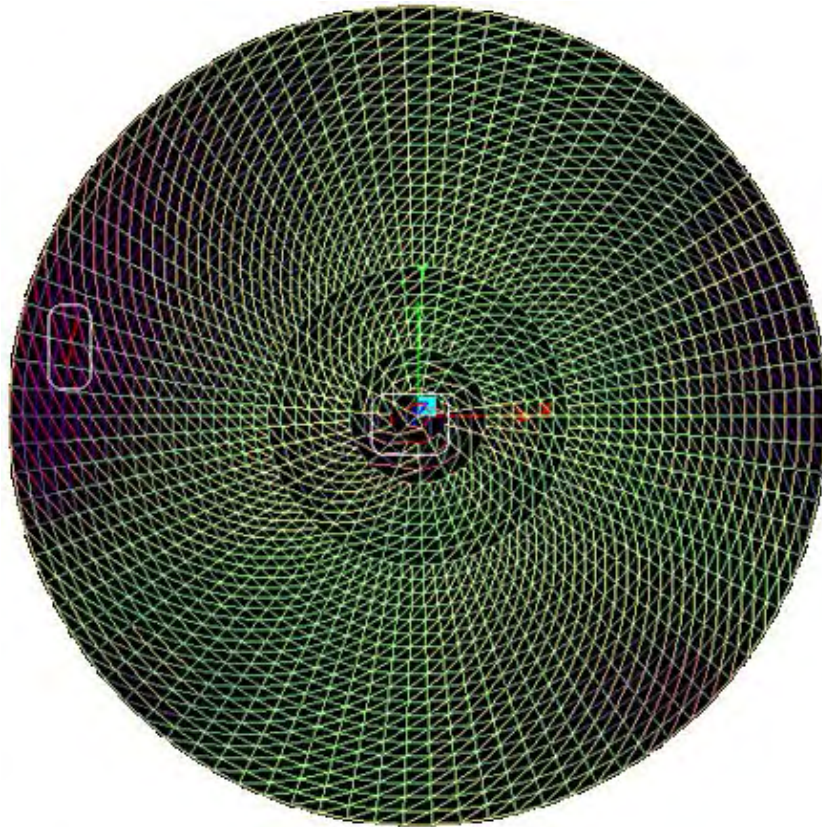
Σχήμα 5.10 : Κάτοψη θόλου για 1^ο κύκλο με load factor 0,05



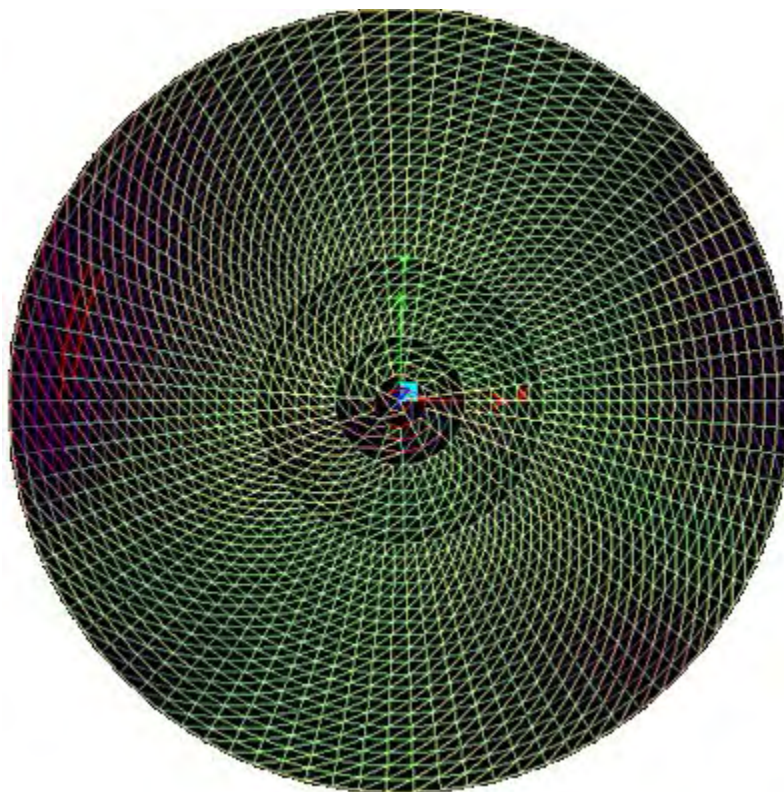
Σχήμα 5.11 : Κάτοψη θόλου για 78° κύκλο με load factor 3,90



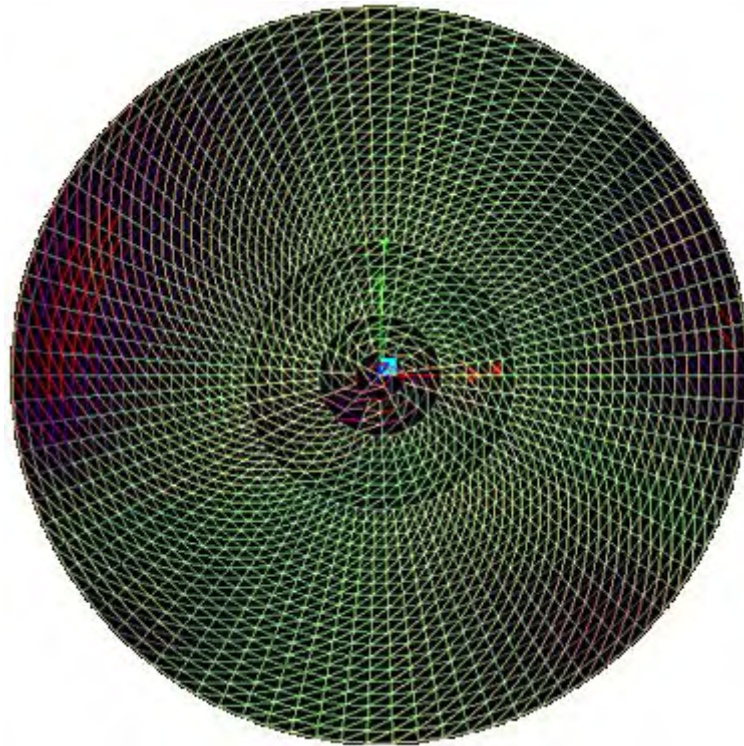
Σχήμα 5.12 : Κάτοψη θόλου για 97° κύκλο με load factor 4,85



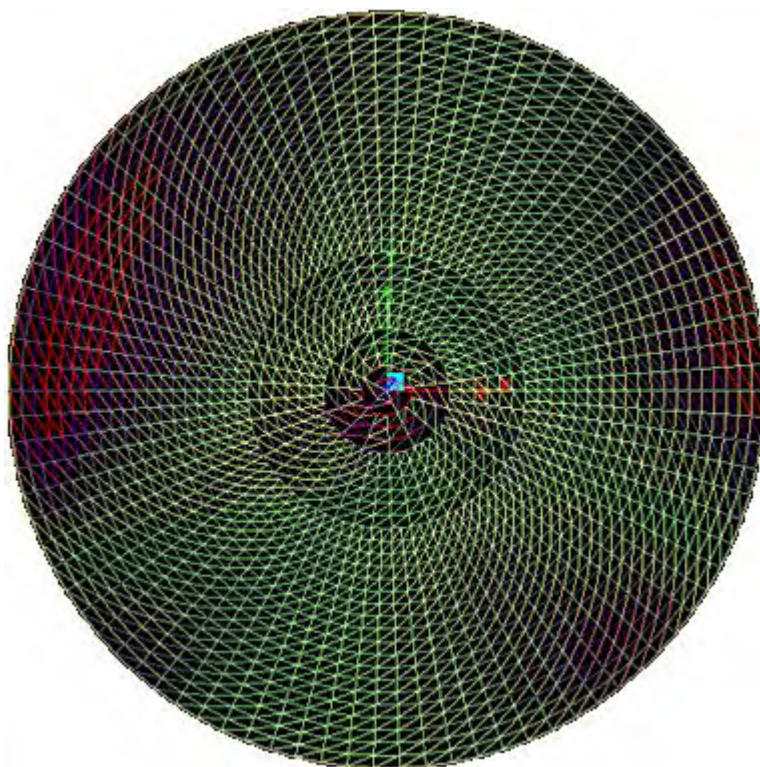
Σχήμα 5.13 : Κάτοψη θόλου για 121° κύκλο με load factor 6,05



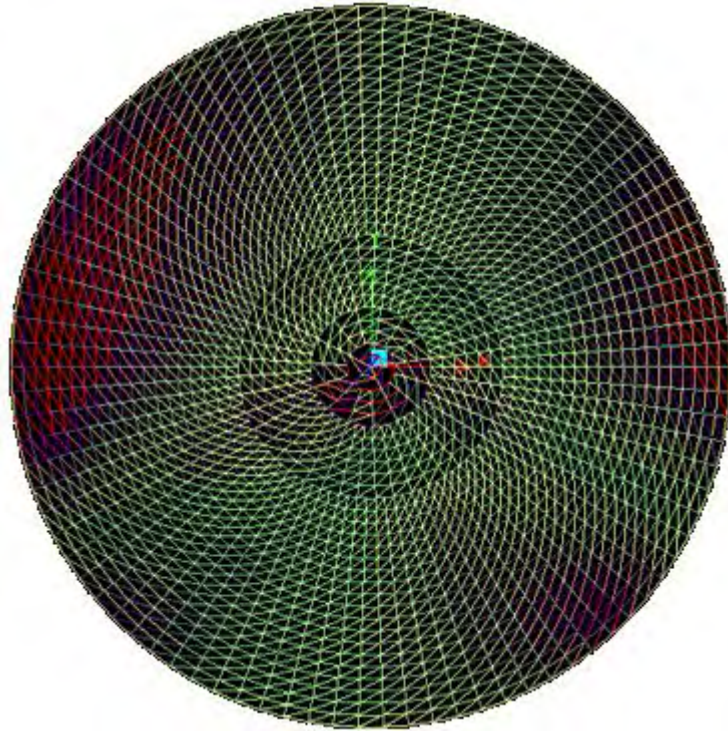
Σχήμα 5.14 : Κάτοψη θόλου για 125° κύκλο με load factor 6,25



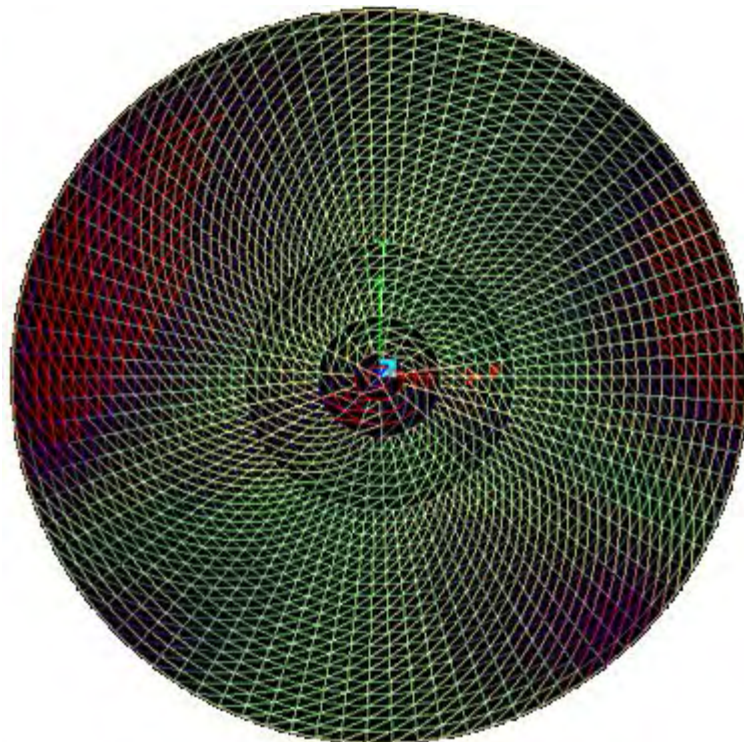
Σχήμα 5.15 : Κάτοψη θόλου για 130° κύκλο με load factor 6,50



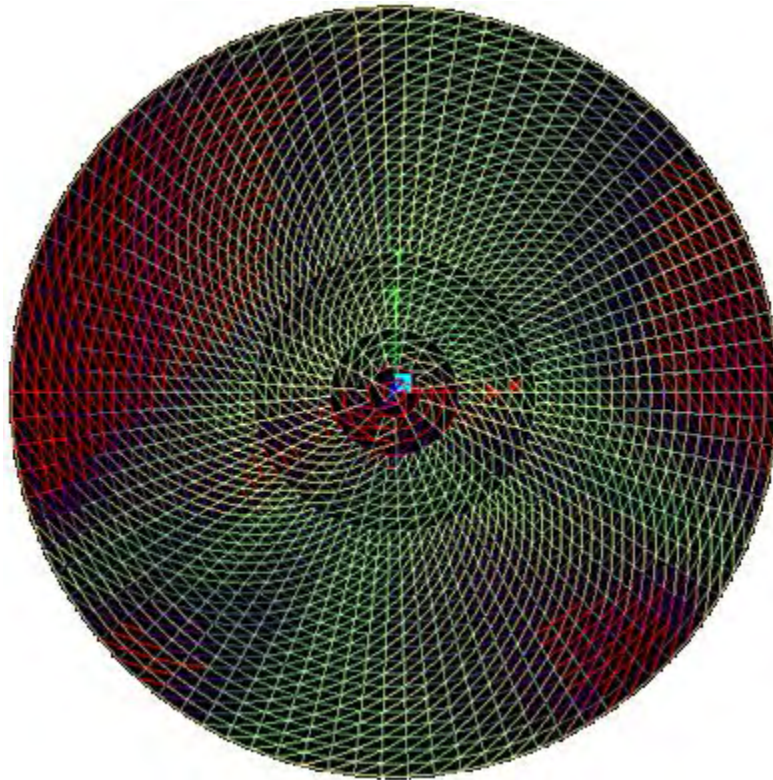
Σχήμα 5.16 : Κάτοψη θόλου για 140° κύκλο με load factor 7,0



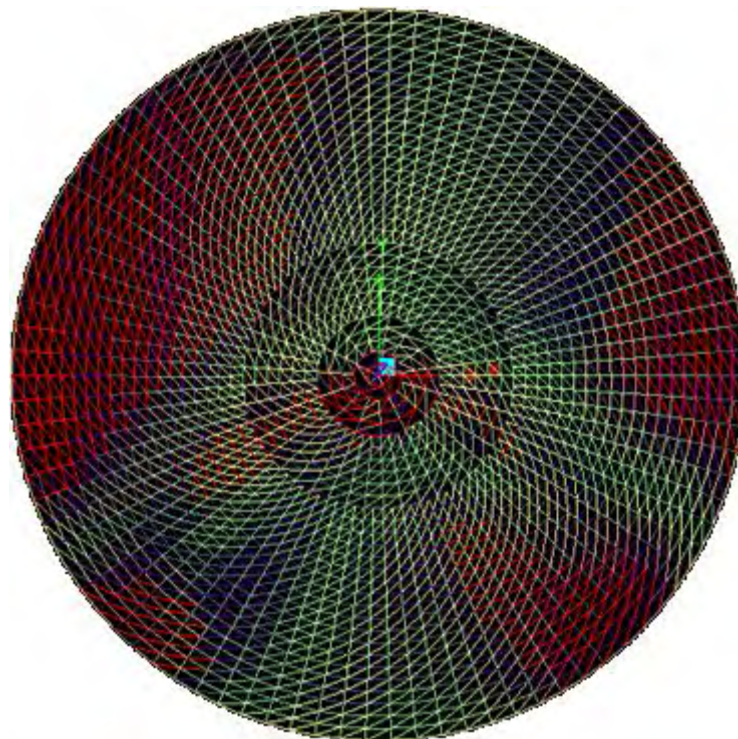
Σχήμα 5.17 : Κάτοψη θόλου για 150° κύκλο με load factor 7,50



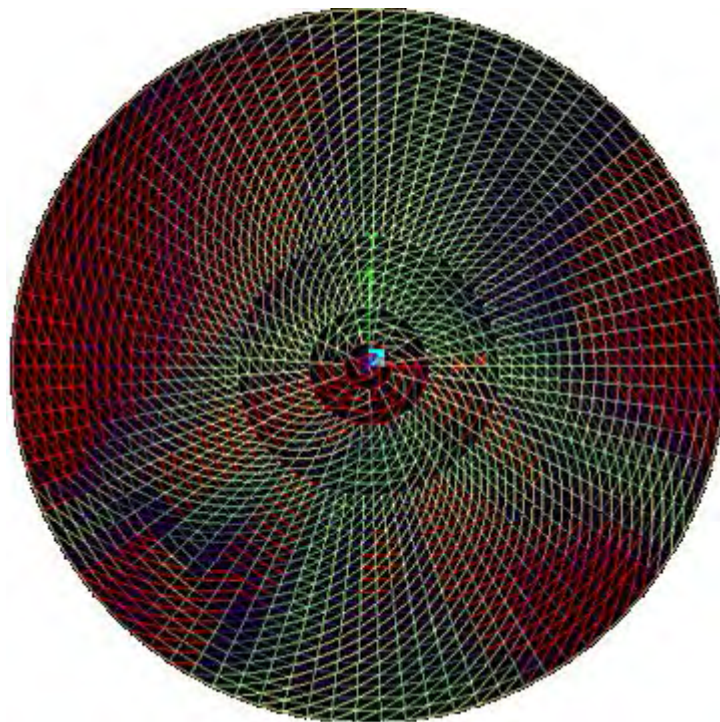
Σχήμα 5.18 : Κάτοψη θόλου για 160° κύκλο με load factor 8,0



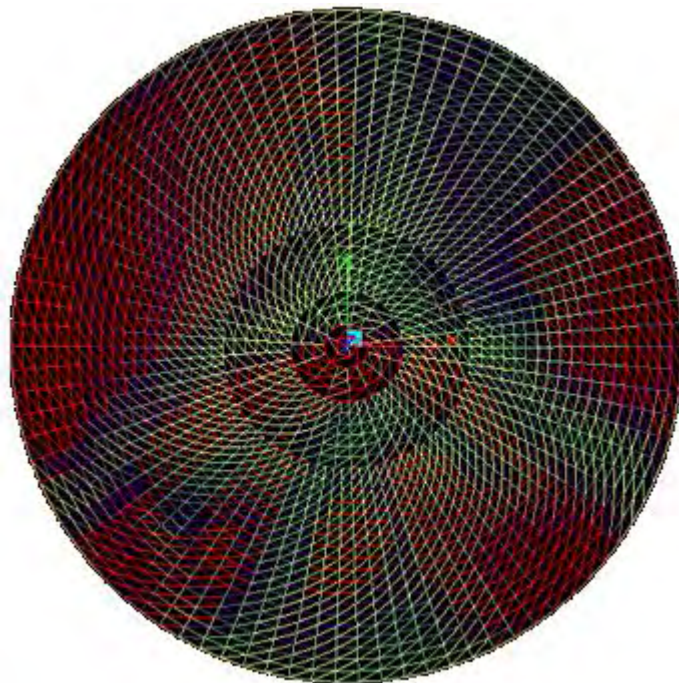
Σχήμα 5.19 : Κάτοψη θόλου για 190° κύκλο με load factor 9,5



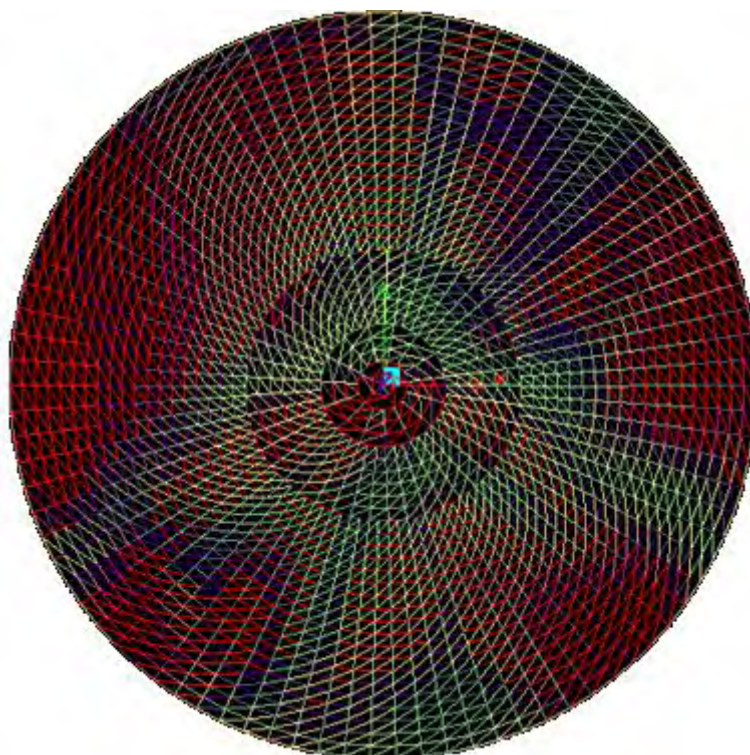
Σχήμα 5.20 : Κάτοψη θόλου για 210° κύκλο με load factor 10,05



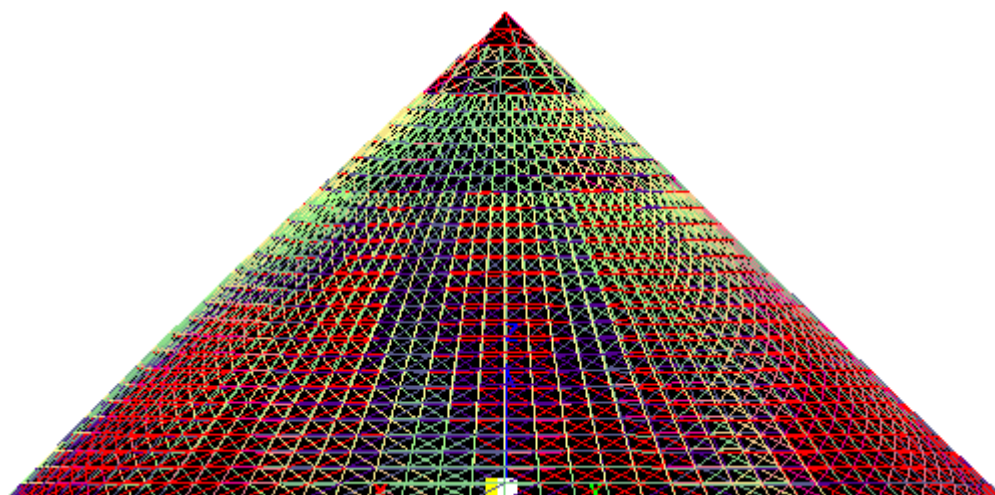
Σχήμα 5.21 : Κάτοψη θόλου για 227° κύκλο με load factor 11,35



Σχήμα 5.22 : Κάτοψη θόλου για 238° κύκλο με load factor 11,75



Σχήμα 5.23 : Κάτοψη θόλου για 238° κύκλο με load factor 11,90

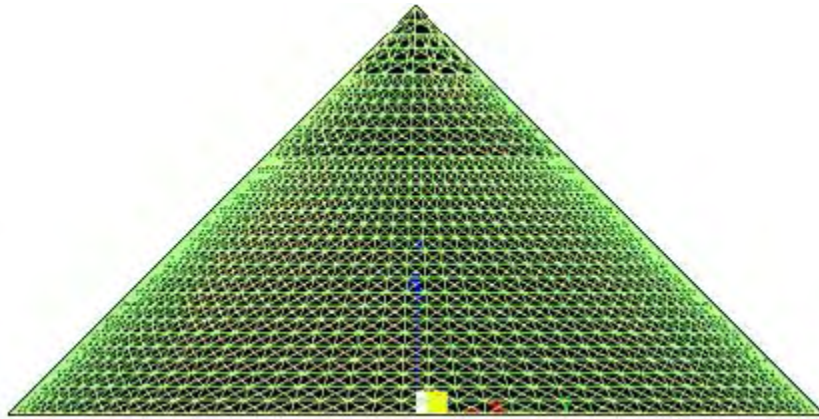


Σχήμα 5.24 : Όψη θόλου για 238° κύκλο με load factor 11,90

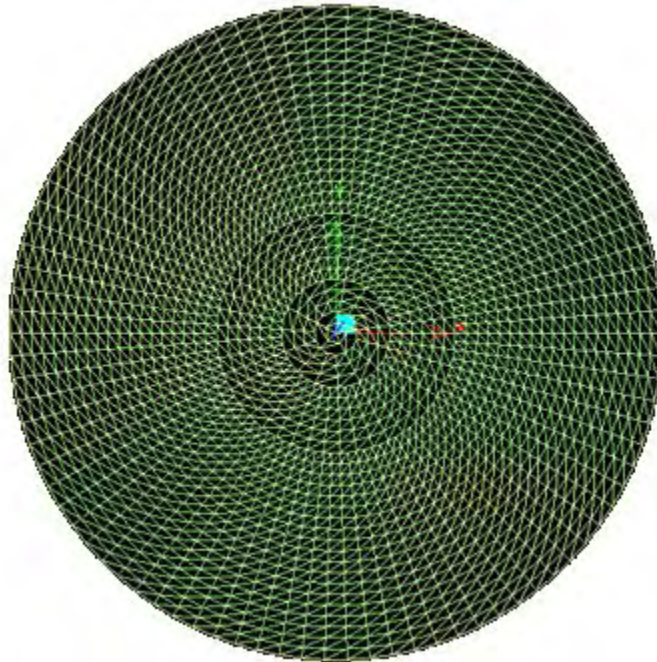
Σε αυτό το συνδυασμό παρατηρείται ότι το σχ.5.11 γίνεται η εμφάνιση των πρώτων ροζ και μωβ διαγώνιων και δακτυλίων στη βάση και στην κορυφή. Μετά στο σχ. 5.12 ολοένα και αυξάνεται αυτή η μορφή αστοχίας με τα ανάλογα χρώματα και στο σχ. 5.13 παρατηρούνται οι πρώτοι κόκκινοι δακτύλιοι κάτω αλλά και στην κορυφή πράγμα που

σημαίνει ότι έχει αρχίσει η κατάσταση αστοχίας για αυτά τα μέλη. Από το σχ. 5.14 έως 5.22 συντελείται η σταδιακή αύξηση μελών που περνούν με τη σειρά τους στο στάδιο οριακής αστοχίας έως και το σχ. 5.23 και 5.24 που είναι η κάτοψη και η όψη αντίστοιχα την στιγμή ακριβώς της αστοχίας του φορέα, όπου σχεδόν τα περισσότερα μέλη έχουν γίνει κόκκινα, έχουν δηλαδή εξαντλήσει την οριακή τους αντοχή και όλα μαζί αναγκάζουν το θόλο να καταρρεύσει.

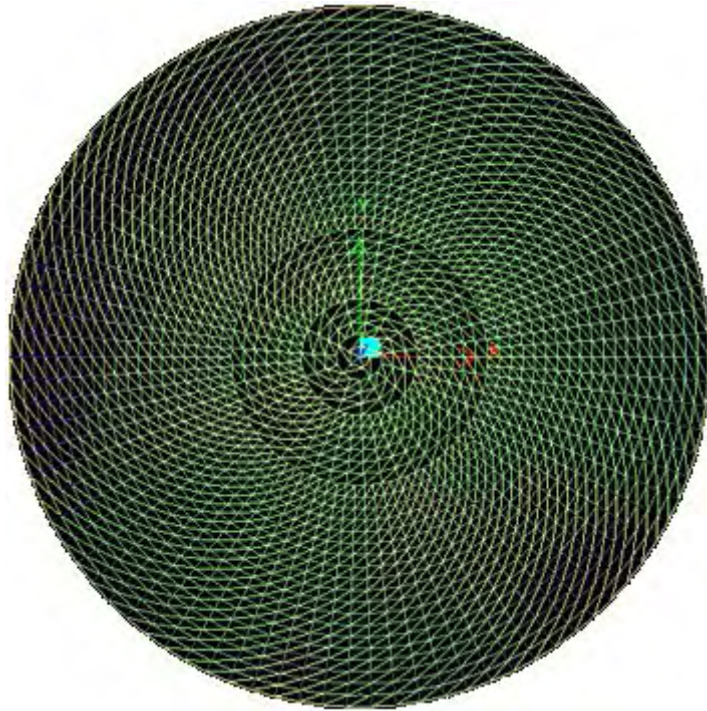
5.2.3. 3^{ος} Συνδυασμός φορτίσεων (1,35G +1.35Q +1.35W)



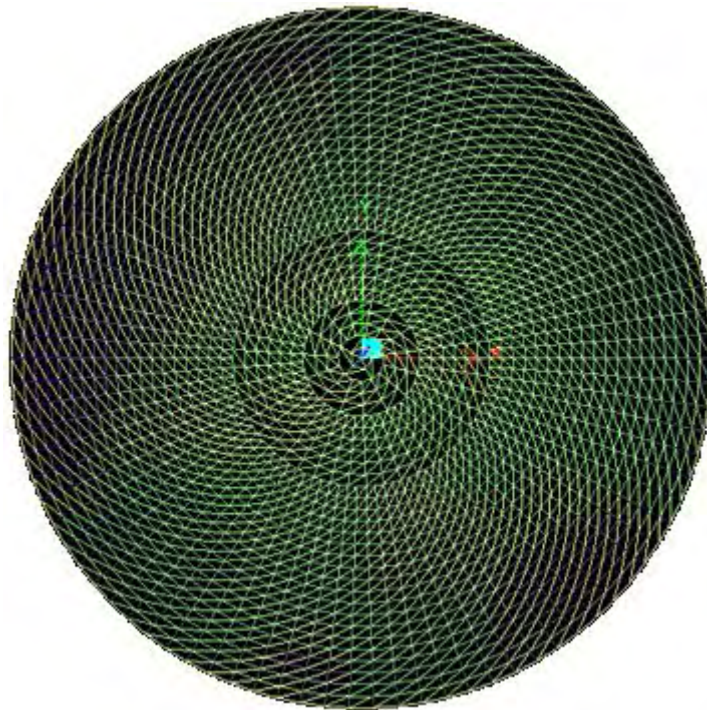
Σχήμα 5.25 : Όψη θόλου για 1^ο κύκλο με load factor 0,05



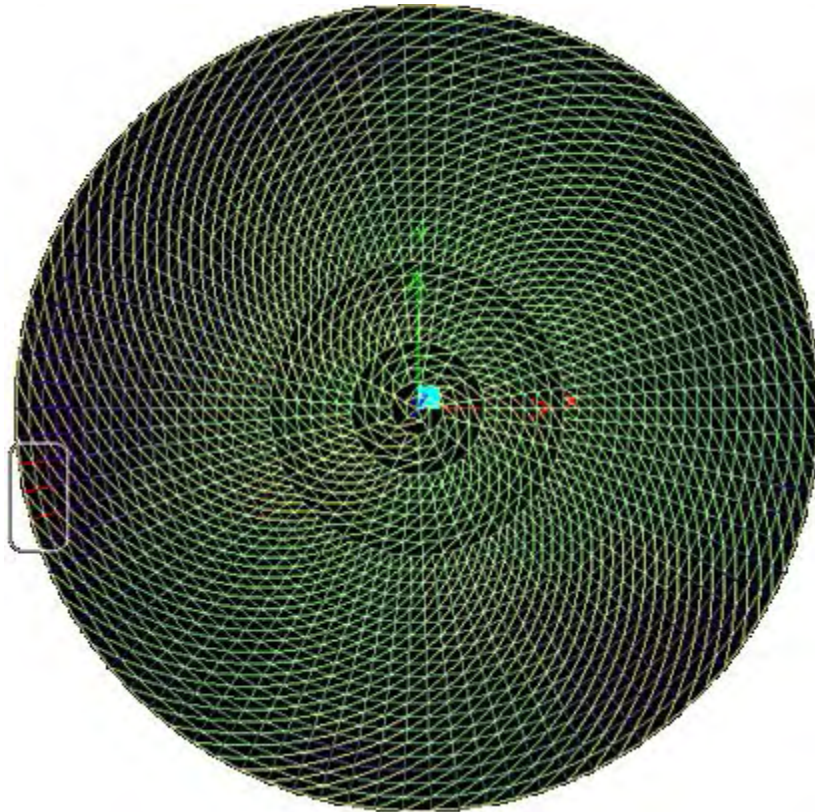
Σχήμα 5.26 : Κάτοψη θόλου για 1^ο κύκλο με load factor 0,05



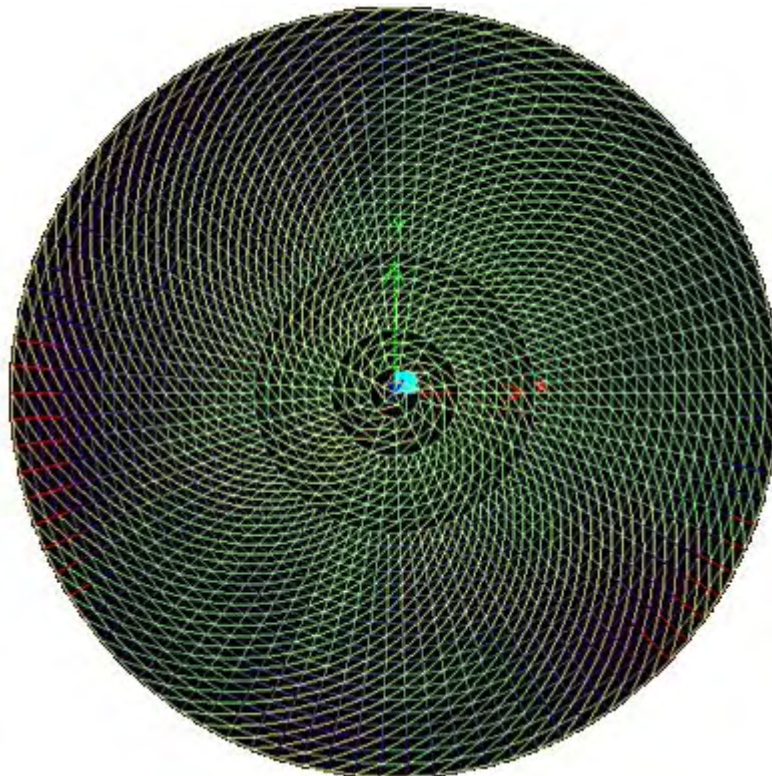
Σχήμα 5.27 : Κάτοψη θόλου για 37° κύκλο με load factor 1,85



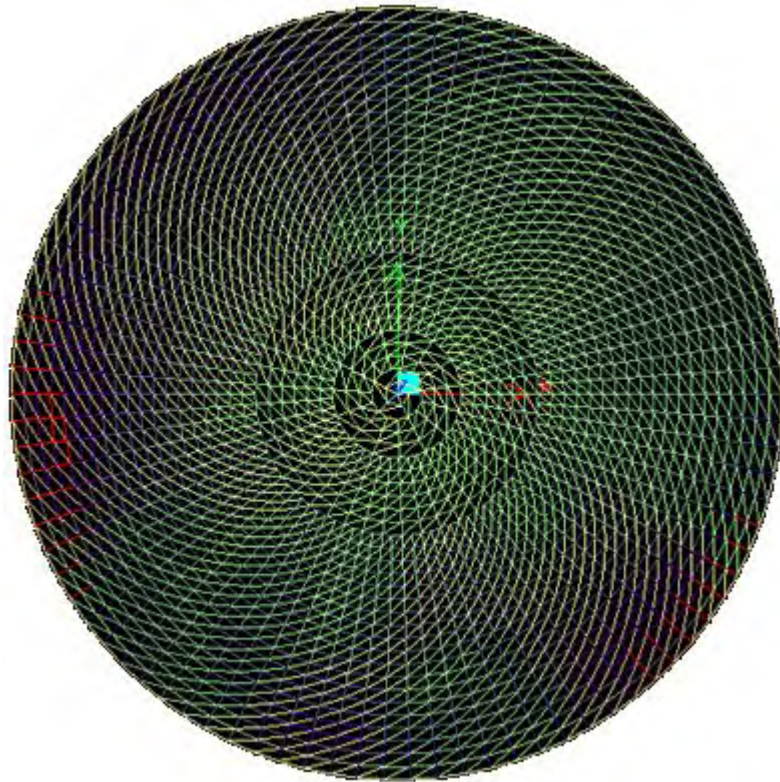
Σχήμα 5.28 : Κάτοψη θόλου για 39° κύκλο με load factor 1,95



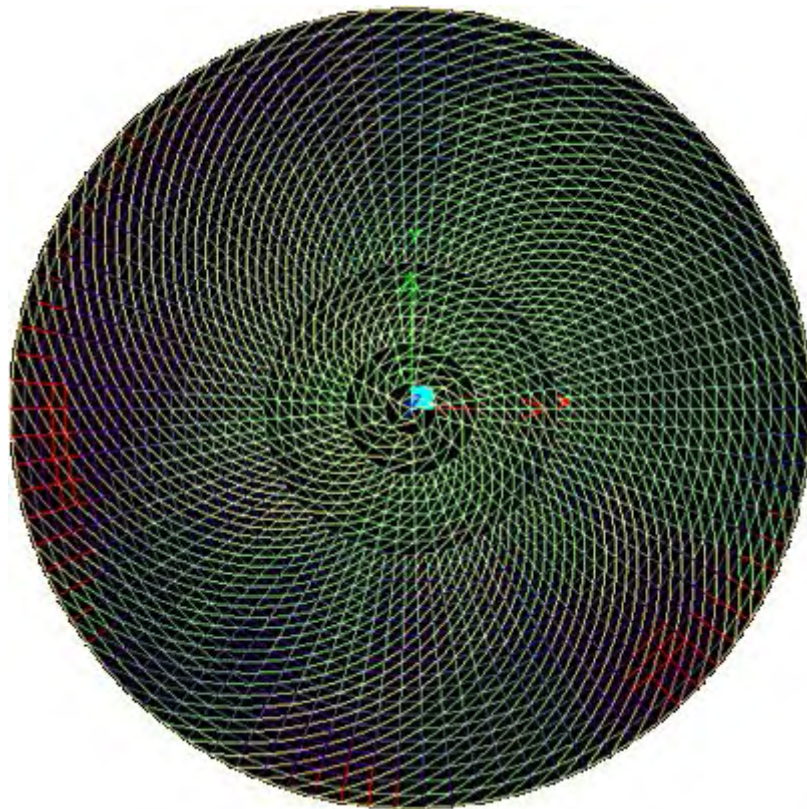
Σχήμα 5.29 : Κάτοψη θόλου για 40° κύκλο με load factor 2,0



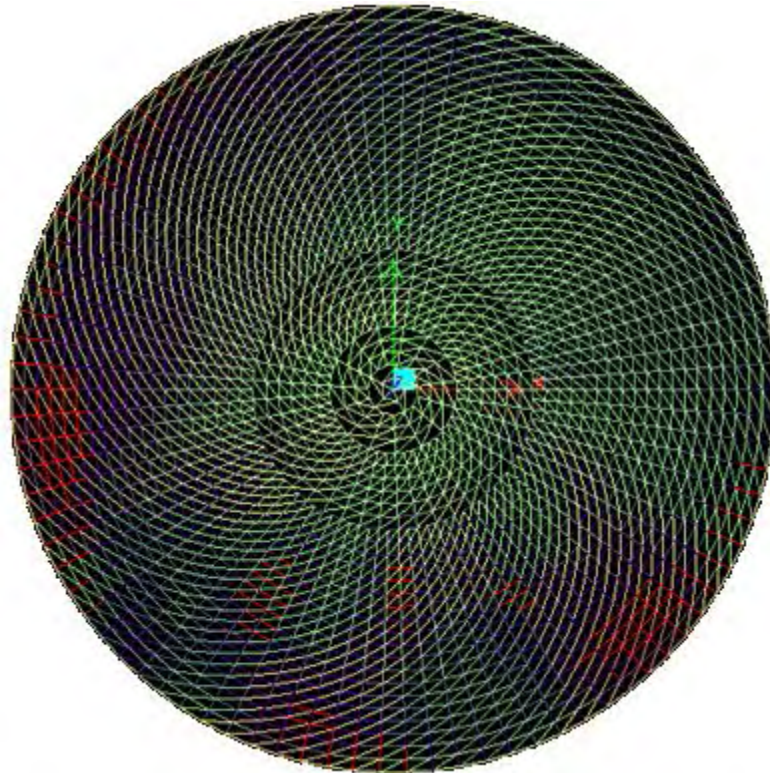
Σχήμα 5.30 : Κάτοψη θόλου για 45° κύκλο με load factor 2,25



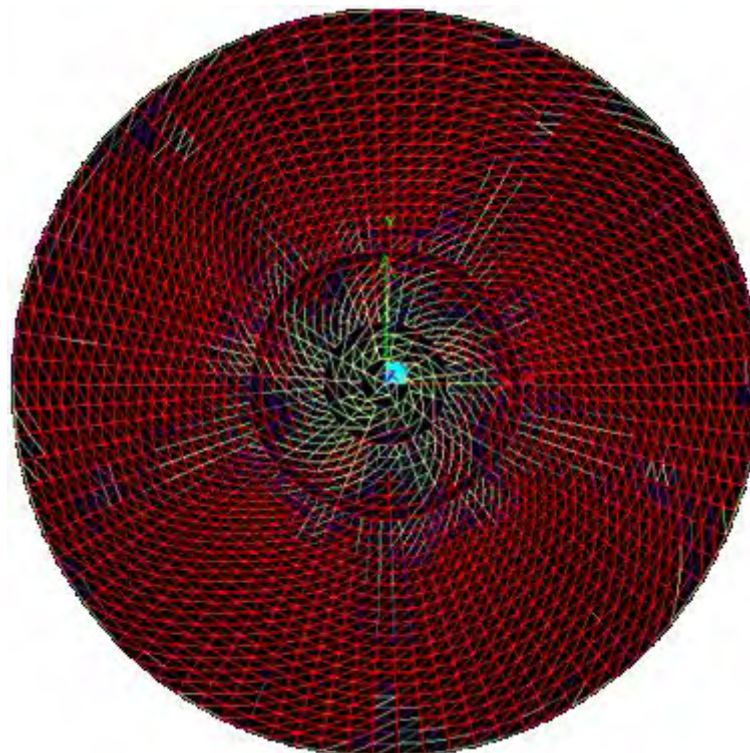
Σχήμα 5.31 : Κάτοψη θόλου για 46° κύκλο με load factor 2,30



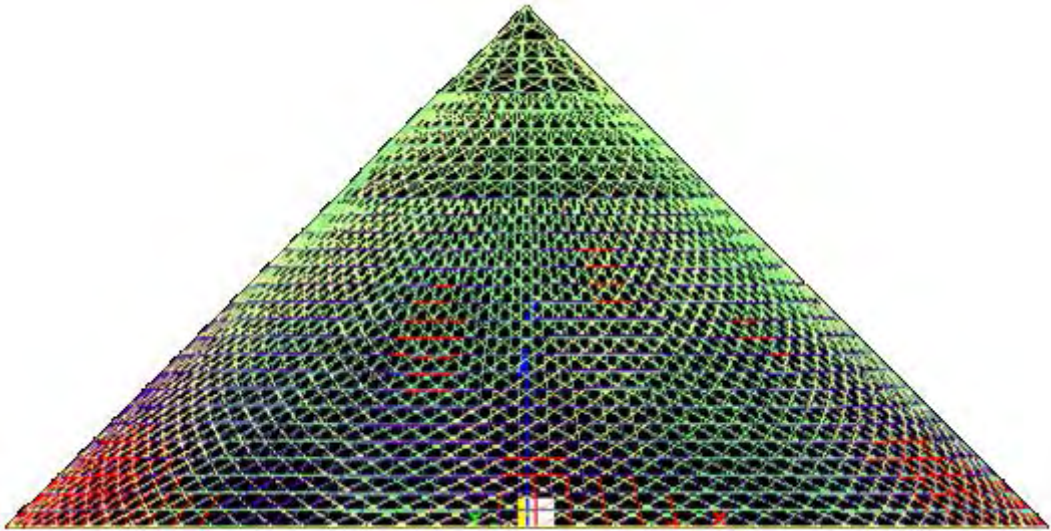
Σχήμα 5.32 : Κάτοψη θόλου για 48° κύκλο με load factor 2,40



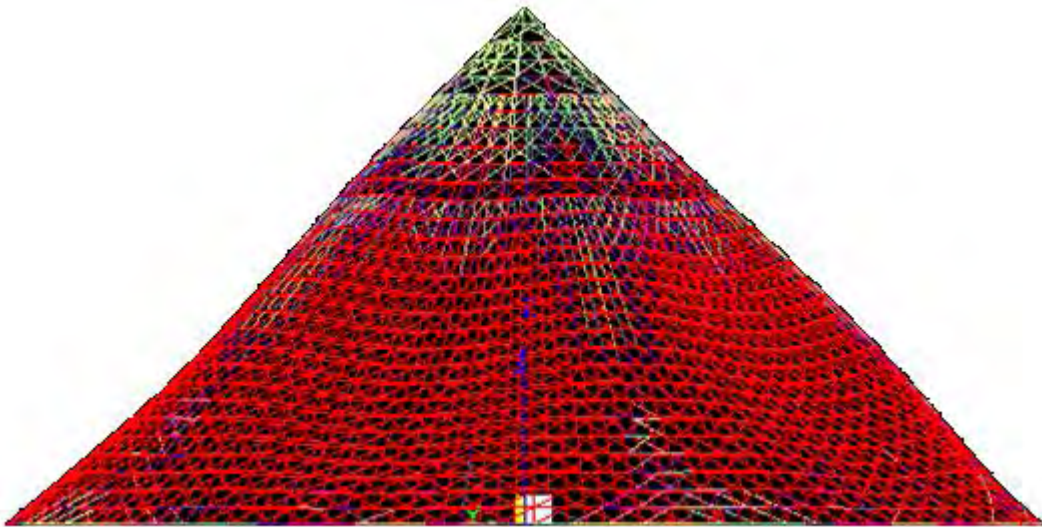
Σχήμα 5.33 : Κάτοψη θόλου για 49° κύκλο με load factor 2,45



Σχήμα 5.34 : Κάτοψη θόλου για 50° κύκλο με load factor 2,50



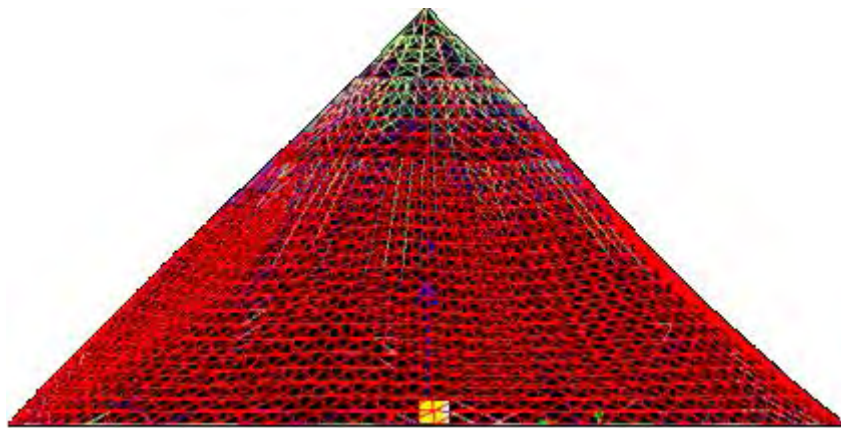
Σχήμα 5.35 : Όψη θόλου για 49° κύκλο με load factor 2,45



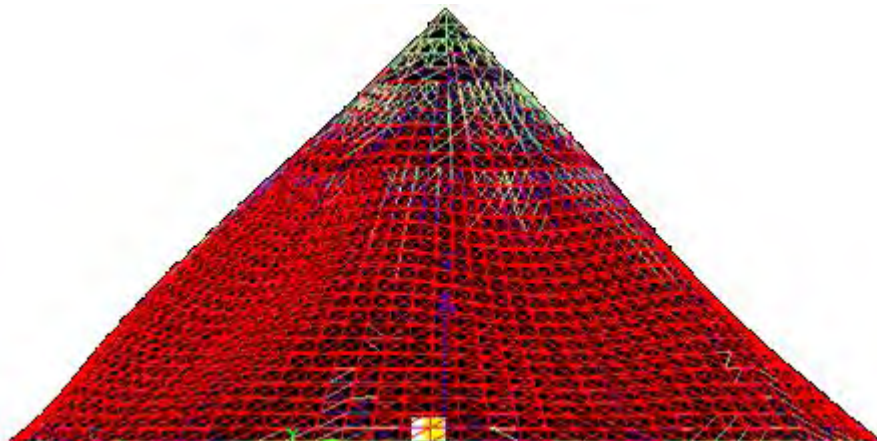
Σχήμα 5.36 : Όψη θόλου για 50° κύκλο με load factor 2,50



Σχήμα 5.36α : Όψη θόλου για 53° κύκλο με load factor 2,65



Σχήμα 5.36β : Όψη θόλου για 53° κύκλο με load factor 2,65



Σχήμα 5.36γ : Όψη θόλου για 53° κύκλο με load factor 2,65

Όπως και στους άλλους δυο συνδυασμούς αξίζει να αναφερθεί κάποια περιγραφή των σταδίων αστοχίας που απεικονίστηκαν παραπάνω. Έτσι για τα σχ. 27,28 παρατηρείται αύξηση των μπλε μελών ενώ στο σχ. 5.29 παρουσιάζονται οι πρώτοι κόκκινοι μεσημβρινοί στη βάση του θόλου υποδηλώνοντας ότι έχουν αρχίσει και περνούν στην κατάσταση της οριακής τους αντοχής. Στο σχ. 5.31 παρατηρείται η παρουσία των πρώτων κόκκινων δακτυλίων και στη συνέχεια από το σχ. 5.32 έως 5.34 η σταδιακή αστοχία όλων των μελών (κόκκινο χρώμα), μέχρι την τελική κατάρρευση του θόλου. Στα σχ. 5.35α έως 5.36γ φαίνεται η αστοχία του φορέα από όλες σχεδόν τις οπτικές γωνίες. Για αυτό το λόγο είναι αντιληπτές όλες οι έντονες παραμορφώσεις μέχρι την κατάρρευση, όπως αναμενόταν, αλλά και κατά το στάδιο αυτό καθαυτό της αστοχίας. Είναι φανερά τα εξογκώματα και οι κοίλες επιφάνειες, δηλαδή τα σημεία όπου ο θόλος εμφάνισε σημεία λυγισμού προς τα έξω και προς τα μέσα, ως αποτέλεσμα δράσης-αντίδρασης αλλά και φόρτισης από τους εξωτερικούς παράγοντες. Δηλαδή στα σημεία όπου τα μέλη δέχονται εφελκυστικές πιέσεις, τα αντιδιαμετρικά τους δέχονται θλιπτικές ή εφελκυστικές πιέσεις με ανάποδο βέλος κάμψης. Το σίγουρο είναι πως σε όλα τα σημεία που από το οπτικό πεδίο φαίνεται να υπάρχει έντονη παραμόρφωση, όλα τα μέλη έχουν φτάσει στην οριακή τους κατάσταση αστοχίας. Αυτό βέβαια ήταν και το ζητούμενο, να εξαντληθεί στο μέγιστο την αντοχή των μελών και να αντέξει ο θόλος 2 με 3 φορές το πολύ το φορτίο επιβολής του. Όπως και έγινε, εφόσον κατέρρευσε με load factor 2,65. Αυτό σημαίνει ότι ο θόλος άντεξε 2,65 φορές με πλήρη παραμόρφωση της αρχικής του μορφής και εξάντληση των ορίων αντοχής των επιμέρους μελών του.

Στη συνέχεια μπορούν να παρουσιαστούν σε σύγκριση και με τους τρεις συνδυασμούς τα αποτελέσματα της σταδιακής εξέλιξης κατάρρευσης του θόλου μιας και εντοπίστηκαν διαφορές στον τρόπο αστοχίας του.

Παρατηρείται λοιπόν, ότι για τον δεύτερο συνδυασμό φορτίσεων που είναι ο άνεμος και το ίδιο βάρος με τους ανάλογους συντελεστές (1,35G +1.5W), υπάρχει πολύ υψηλό κρίσιμο φορτίο κατάρρευσης (load factor = 11,90) το οποίο σημαίνει ότι έχει πολύ μεγάλη αντοχή για το είδος αυτής της καταπόνησης. Με το βήμα που ορίστηκε (0,05), προέκυψε το σύνολο των 238 κύκλων επαναλήψεων και το κρίσιμο φορτίο κατάρρευσης να φτάνει το 11,90 κάτι που ήταν αναμενόμενο, γιατί σχεδιάστηκε ο φορέας με τέτοια γεωμετρία ώστε να μην έχει μεγάλο ύψος και συνεπώς και μεγάλα εντατικά μεγέθη λόγω ανέμου. Δηλαδή να μην αναμένεται άμεση αστοχία της κατασκευής από αυτό το συνδυασμό αλλά από τους άλλους δύο. Αυτό επιδιώχθηκε γιατί ο πρώτος και ο τρίτος αντίστοιχα συνδυασμός, περιέχουν το φορτίο που θεωρήθηκε επικίνδυνο κατά το σχεδιασμό του θόλου. Το χιόνι λοιπόν ήταν ο παράγοντας που αναμενόταν η κατασκευή να αντιμετωπίσει τον κίνδυνο της κατάρρευσης και αυτό γιατί όπως αναφέρθηκε και στο

σχεδιασμό ο θόλος έχει παντού ενιαία κλίση 45° . Συνεπώς το φορτίο χιονιού καταπονεί το θόλο σε όλα τα σημεία και μάλιστα σε αρκετά μεγάλη κλίμακα έντασης και για αυτό ακριβώς αναμενόταν αστοχία, άμεση, στον πρώτο ή στο τρίτο συνδυασμό. Με βάση λοιπόν το γεγονός ότι η αστοχία λόγω του πρώτου και του τρίτου συνδυασμού προηγείται, εξαιτίας του μικρότερου αριθμού κύκλων επανάληψης της φόρτισης και κατ'επέκταση του μικρότερου φορτίου κατάρρευσης, παραθέτονται παρακάτω και αναλύονται επιλεκτικά, μερικά μέλη που αστόχησαν, μόνο των δυο αυτών συνδυασμών.

Θα μπορούσαν να αναλυθούν τα μέλη μόνο του τρίτου συνδυασμού, ο οποίος είναι και ο κρίσιμος τελικά, αλλά επειδή διαφέρουν (ο πρώτος συνδυασμός $1,35G + 1.5Q$, από το τρίτο $1.35G + 1.35Q + 1.35W$) μόνο κατά ένα κύκλο επαναλήψεων (54 ο πρώτος, 53 ο τρίτος) δηλαδή ουσιαστικά κατά 0,05 μονάδες στο φορτίο κατάρρευσης (2,70 ο πρώτος και 2,65 ο τρίτος), αξίζει να παρουσιαστούν οι επιπτώσεις και σε δύο μέλη του φορέα κατά την πρώτη περίπτωση αστοχίας. Έτσι παρακάτω θα υπάρξουν αναλυτικά τα διαγράμματα καταπόνησης τόσο των μελών όσο και των κόμβων του θόλου στις κρίσιμες φάσεις αστοχίας.

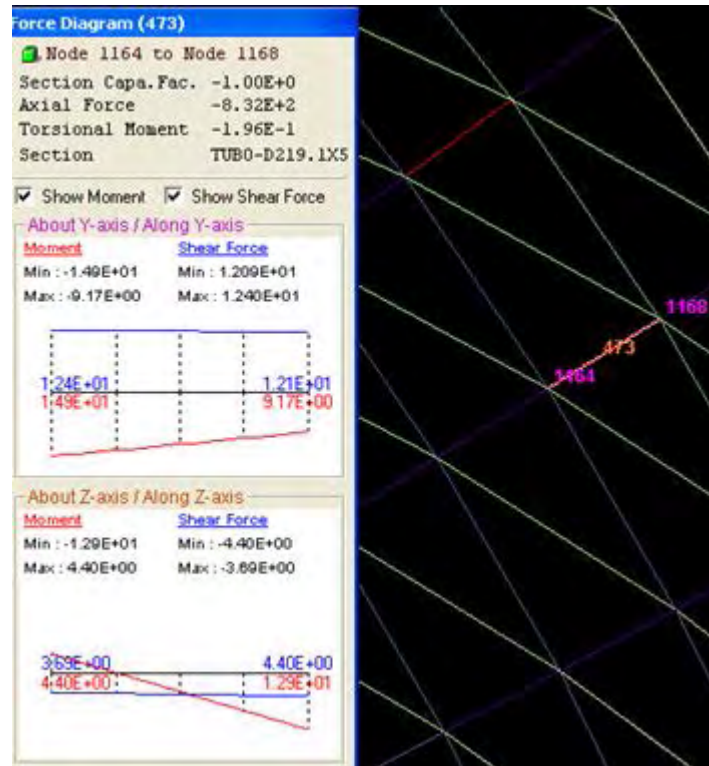
6. Συμπεριφορά (παραμορφώσεις) μελών και κόμβων κατά την διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας

Επιλέχθηκαν από τον κάθε συνδυασμό τα μέλη με την εντονότερη παραμόρφωση. Προσεγγιστικά και χάριν απλότητας επιλέχθηκαν μερικά στοιχεία που παρουσιάζουν έντονα φαινόμενα λυγισμού. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε μία από τις αντίστοιχες λεπτομέρειες του κάθε συνδυασμού συγκεντρώθηκαν τα παρακάτω στοιχεία :

- Το γενικό σχέδιο που δείχνει που είναι αυτά τα μέλη.
- Το σχέδιο αρχικού και τελικού σταδίου παραμόρφωσης.
- Ο συντελεστής της αντοχής του κάθε μέλους.
- Η αξονική δύναμη του κάθε μέλους.
- Τα διαγράμματα συντελεστής φόρτισης – παραμορφώσεως, των κόμβων αυτών των μελών.

6.1. 1^{ος} Συνδυασμός (1,35 + 1,5Q)

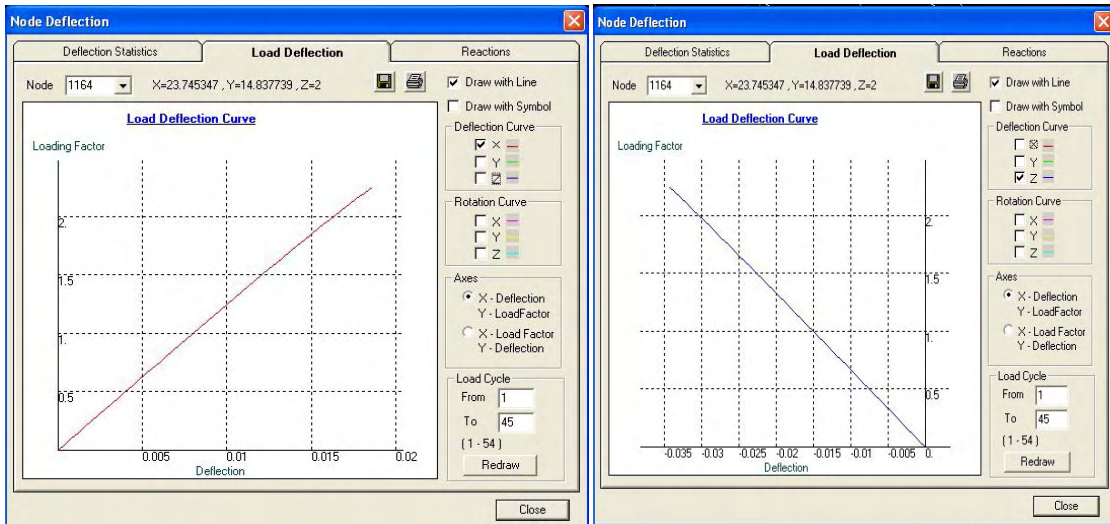
Οριακές καταστάσεις μελών σε κάτοψη



Μέλος 473, μεσημβρινός στο 45° κύκλο με load factor 2,25

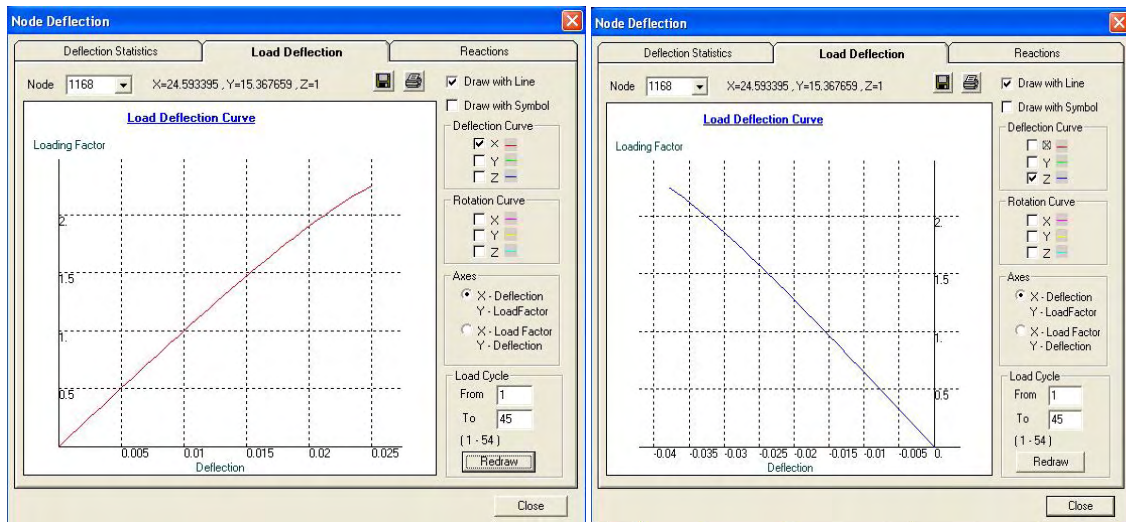
- Το μέλος αυτό ορίζεται από τους κόμβους 1164 και 1168.
- Section Capacity Factor: -1,00
- Axial Force : - 832kN

Παρατηρείται ότι σε αυτό το μέλος και στην κατηγορία στην οποία ανήκει, δηλαδή στα κατακόρυφα στοιχεία, λαμβάνει χώρα η πρώτη κατάσταση οριακής αστοχίας με τη μέγιστη παραμόρφωση. Για αυτό το λόγο έχει και το κόκκινο χρώμα και συνεπώς την τιμή 1,00 στο section capacity, το οποίο όπως αναφέρθηκε παραπάνω δηλώνει την συμπεριφορά του μέλους και την κατάσταση στην οποία βρίσκεται.



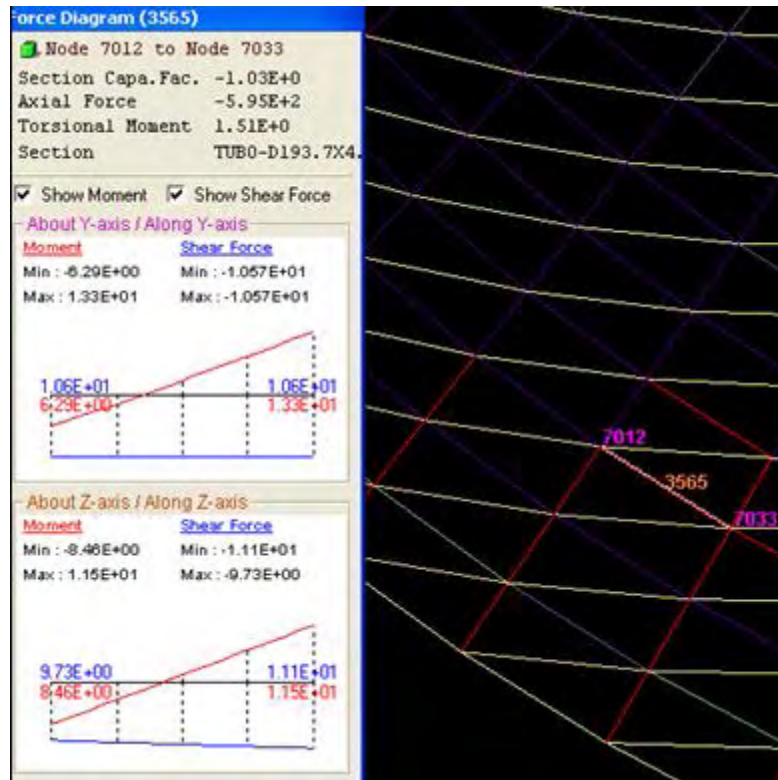
Η συμπεριφορά του κόμβου 1164 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 45

Κατά την διεύθυνση x παρατηρείται ότι ο κόμβος έχει απολύτως γραμμική συμπεριφορά, δηλαδή όσο αυξάνει η τιμή της φόρτισης στον κατακόρυφο άξονα τόσο είναι και η μετακίνησή του στον οριζόντιο άξονα. Το ίδιο συμβαίνει και στην διεύθυνση z όπου παρατηρείται και εκεί γραμμική συμπεριφορά του κόμβου με την μόνη διαφορά ότι είναι στις αρνητικές τιμές. Λογικό εφόσον μόλις έχει αρχίσει να καταπονείται η κατασκευή και είναι το πρώτο στάδιο της παραμόρφωσης.



Η συμπεριφορά του κόμβου 1168 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 45

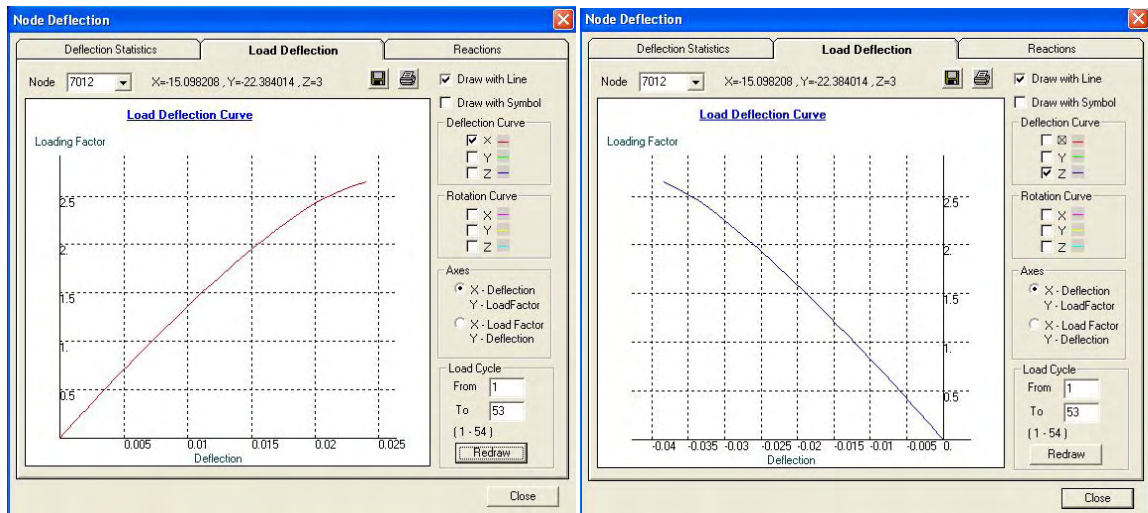
Το ίδιο συμβαίνει και σε αυτόν τον κόμβο που είναι η άλλη άκρη του μέλους. Τόσο στην x διεύθυνση όσο και στην z, παρατηρείται γραμμική συμπεριφορά του κόμβου με τη διαφορά ότι αυξάνεται λίγο περισσότερο το βήμα της φόρτισης όπως φαίνεται στις τιμές του οριζόντιου άξονα.



Μέλος 3565, δακτύλιος στο 53^ο κύκλο με load factor 2,65

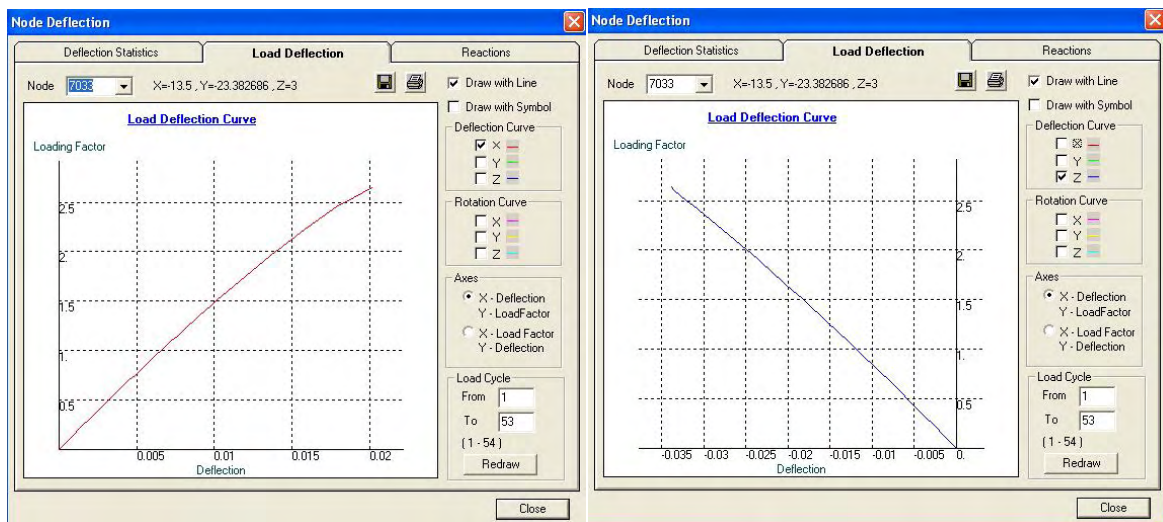
- Το μέλος αυτό ορίζεται από τους κόμβους 7012 και 7033.
- Section Capacity Factor: -1,03
- Axial Force : - 595kN

Επιλέχθηκε αυτό το μέλος για το λόγο ότι παρουσιάζεται η μεγαλύτερη τιμή της αντοχής του στον συγκεκριμένο κύκλο φόρτισης, λίγο πριν την κατάρρευση του θόλου, καθώς όπως φαίνεται έχει φθάσει στο 1,03. Δεν αναφέρθηκε το τελικό στάδιο της κατάρρευσης γιατί οι τιμές δεν αλλάζουν σχεδόν καθόλου, οπότε θεωρήθηκε καλύτερο να δείχθει η αλλαγή της παραμόρφωσης που γίνεται ξαφνικά στο 53^ο κύκλο και τις ανάλογες τιμές που τον συνοδεύουν. Οπότε μπορεί εύκολα να συγκρίνει κάποιος, από τα συμπεράσματα της αστοχίας, ότι ο 53^{ος} και ο 54^{ος} είναι σχεδόν ίδιοι και απλά διαφέρουν στο φορτίο κατάρρευσης και όχι στο είδος της παραμόρφωσης.



Η συμπεριφορά του κόμβου 7012 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 53

Στον συγκεκριμένο κόμβο παρατηρείται η ίδια γραμμική συμπεριφορά όπως προαναφέρθηκε, μόνο που εδώ διαφοροποιείται το εξής: εφόσον πλησιάζει η αστοχία του φορέα, το φαινόμενο της μετακίνησης είναι πιο έντονο στις τελευταίες τιμές του load factor. Δηλαδή παρατηρείται γραμμική συμπεριφορά έως την τιμή 2,3 περίπου όπως πριν, αλλά από την τιμή 2,4 και πάνω αλλάζει κλίση η καμπύλη και είναι πιο έντονο το φαινόμενο της μετακίνησης του κόμβου τόσο στη x όσο και στην z διεύθυνση.



Η συμπεριφορά του κόμβου 7033 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 53

Στο κόμβο 7033 παρατηρούνται τα ίδια φαινόμενα όπως και στον απέναντί του (7012) αλλά με ελάχιστα πιο μικρή αλλαγή κλίσης στην καμπύλη και στις δυο διευθύνσεις.

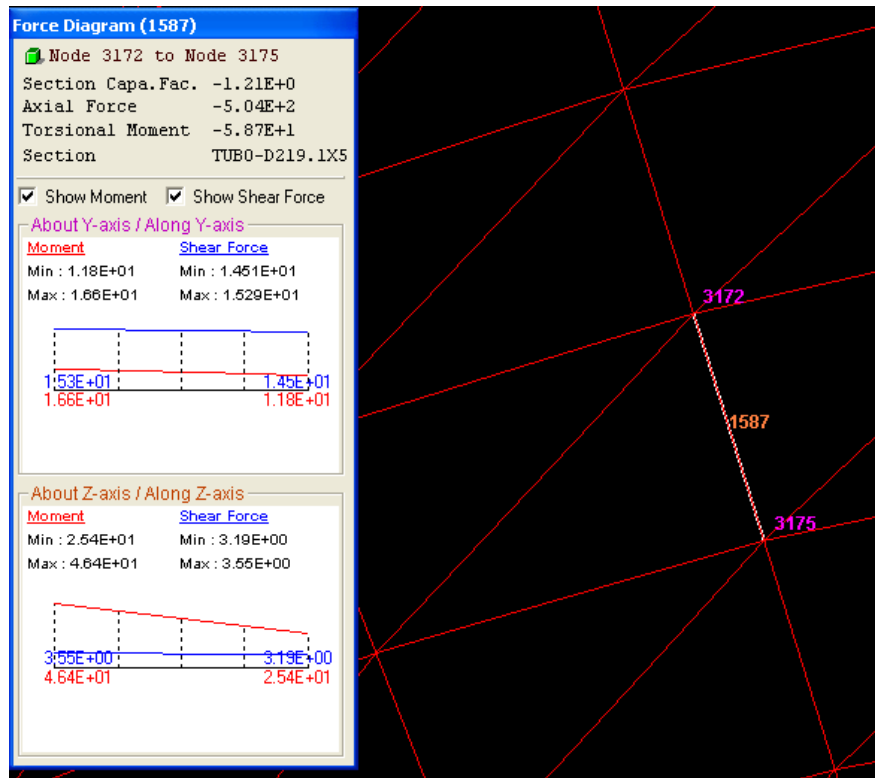
6.2. 3^{ος} Συνδυασμός (1,35G + 1.35Q + 1.35W)

Εφόσον ο τρίτος είναι και ο κρίσιμος συνδυασμός που οδηγεί στην κατάρρευση με load factor 2,60, θα παρουσιάστουν και οι τρεις κατηγορίες μελών (δακτύλιοι, μεσημβρινοί, διαγώνιοι) που αποτελούν το θόλο. Θα αναλυθούν τα μέλη αυτά μαζί με τους κόμβους που τα ενώνουν και τις αστοχίες τους στα πιο κρίσιμα βήματα, δηλαδή σε κάποιο στάδιο λίγο πριν, αλλά και κατά την κατάρρευση του θόλου. Επίσης θα γίνει και μια αναφορά σε όλο το φαινόμενο της αναμενόμενης συμπεριφοράς του θόλου με βάση τις παραμορφώσεις που αναμένονταν, συνοδευόμενη από την απεικόνιση της φόρτισης και αποφόρτισης των αντίστοιχων μελών καθώς και από μέρος της ανακατανομής των φορτίσεων τους.

6.2.1. Φόρτιση – αποφόρτιση μελών

Σε αυτή την προσέγγιση των μελών του θόλου θα παρουσιαστούν τα στάδια των παραμορφώσεων με βάση την φόρτιση και την αποφόρτιση κατά τις επαναλήψεις του φαινομένου. Πιο συγκεκριμένα θα απεικονιστούν η μέγιστη παραμόρφωση του μέλους για τον αντίστοιχο κύκλο φόρτισης, μετά την σταδιακή αποφόρτισή του, διότι επιβαρύνεται το γειτονικό μέλος και συνεπώς το ίδιο κατά κάποιο τρόπο δεν δέχεται το ίδιο μέγεθος φορτίου και τέλος την αναμενόμενη επαναφόρτισή του ώστε να επέλθει η αστοχία όλου του φορέα. Έτσι επιλέχθηκε ένα μέλος από κάθε κατηγορία διατομών, δηλαδή ένα μεσημβρινό, ένα δακτύλιο και ένα διαγώνιο στις φάσεις μέγιστης παραμόρφωσης που είναι οι κύκλοι από το 49° (αναλόγως από ποιο κύκλο έχουμε ορατή και έντονη παραμόρφωση) έως 53° όπου επέρχεται και η κατάρρευση του θόλου. Παρακάτω παρουσιάζεται αυτή η διαδικασία με τις παραμορφώσεις των μελών και των κόμβων που τα συγκρατούν, σε συνεχιζόμενη διάταξη κατόψεων ώστε να φανεί η διαφορά της επιρροής των εντατικών αυτών καταστάσεων.

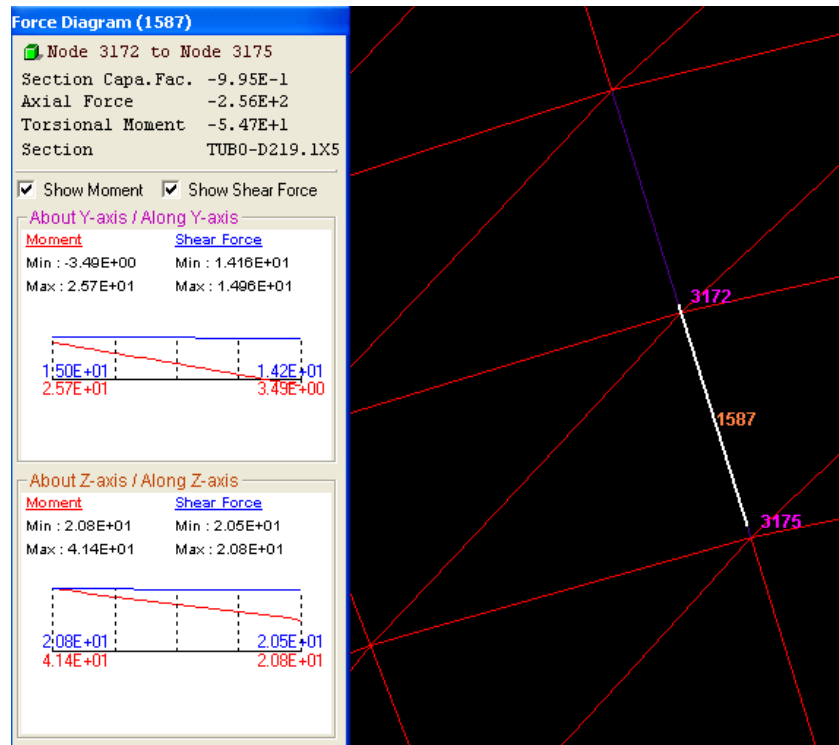
Έτσι αρχικά θα εξεταστεί ένα κατακόρυφο μέλος που ανήκει στους μεσημβρινούς όπως παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω.



Μέλος 1587, μεσημβρινός, κύκλος φόρτισης 50 με load factor 2,50 (κόκκινο)

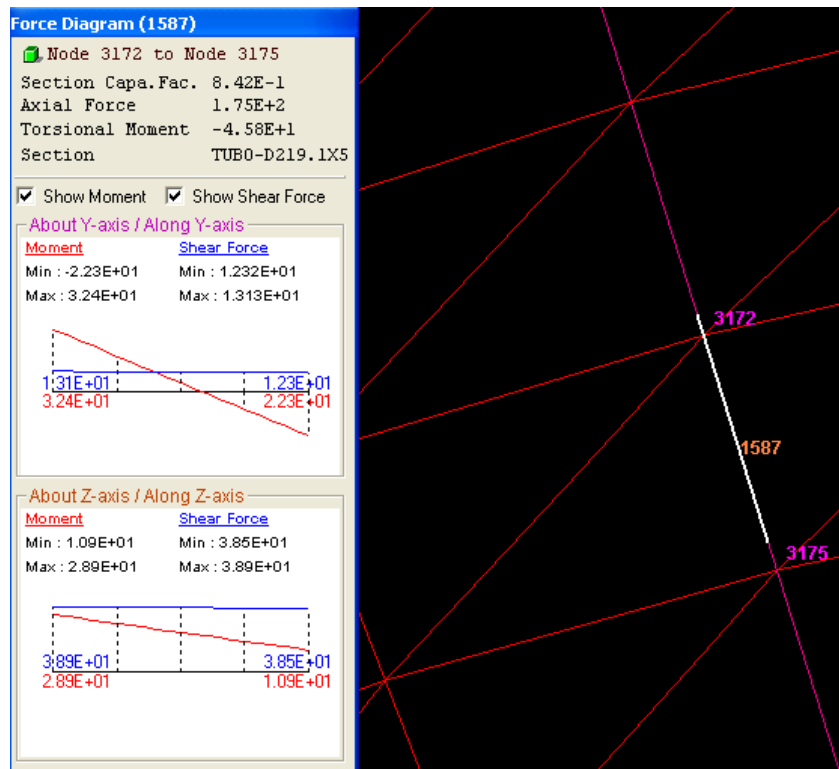
- Το μέλος αυτό ορίζεται από τους κόμβους 3172 και 3175.
- Section Capacity Factor: -1,21
- Axial Force : - 504kN

Στα επόμενα σχήματα που θα ακολουθήσουν θα φαίνεται η άσπρη γραμμή του μέλους 1587 όπως επελέχθη στο 50^ο κύκλο για να είναι ορατή η μικρό-μετακίνηση που δέχεται κατά την εξέλιξη της φόρτισης αλλά και η αλλαγή του χρώματος που δεικνύει την μετάβαση της φόρτισης στην αποφόρτιση.



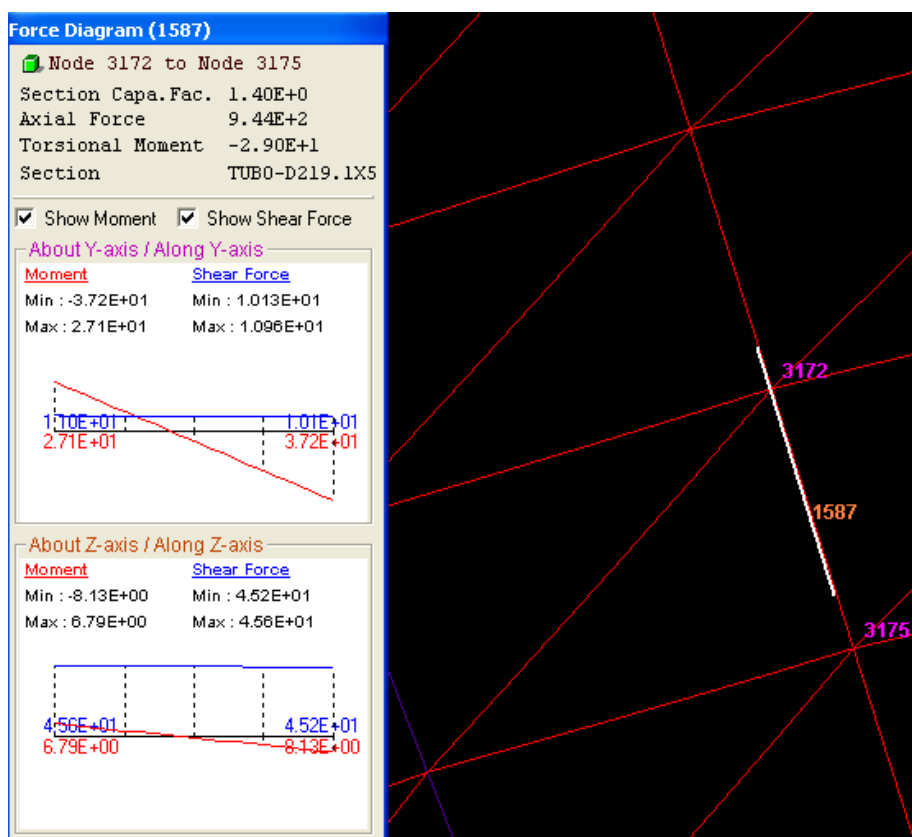
Μέλος 1587, μεσημβρινός, κύκλος φόρτισης 51 με load factor 2,55 (μώβ)

- Section Capacity Factor: -0,995
- Axial Force : - 256kN



Μέλος 1587, μεσημβρινός, κύκλος φόρτισης 52 με load factor 2,60 (ροζ)

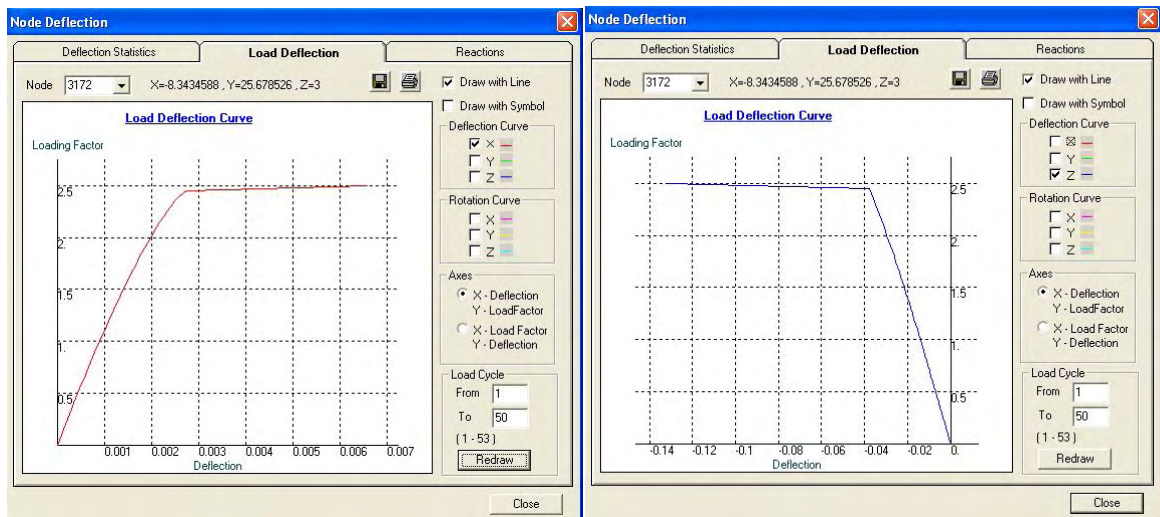
- Section Capacity Factor: 0,842
- Axial Force : 175kN



Μέλος 1587, μεσημβρινός, κύκλος φόρτισης 53 με load factor 2,65 (κόκκινο)

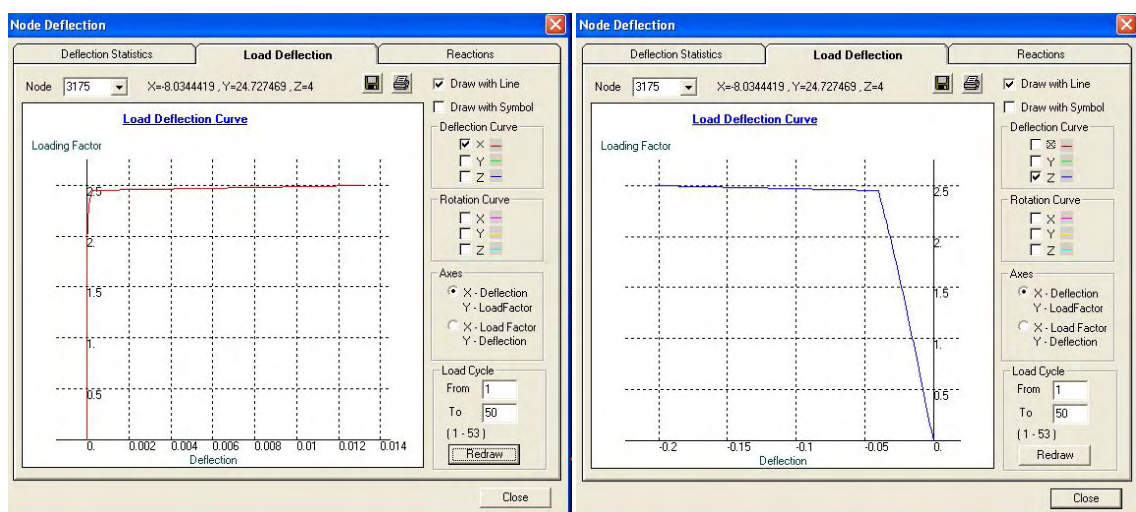
- Section Capacity Factor: 1,40
- Axial Force : 944kN

Και αντίστοιχα παρουσιάζονται παρακάτω οι κόμβοι με τις παραμορφώσεις τους για τον κάθε κύκλο που παρουσιάστηκε ακριβώς πιο πάνω.



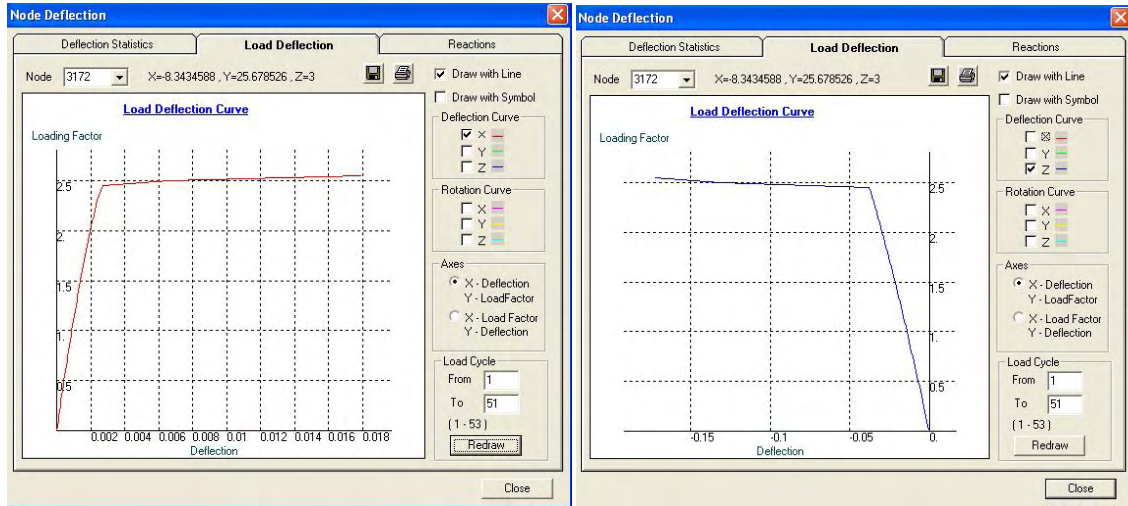
Η συμπεριφορά του κόμβου 3172 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 50

Στο συγκεκριμένο κόμβο παρατηρείται ότι, πριν τις τιμές στις οποίες αρχίζει η έντονη παραμόρφωση του φορέα, στην διεύθυνση x, παρατηρείται γραμμική συμπεριφορά. Ανάλογη είναι η μετακίνηση με την αύξηση του φορτίου. Ακριβώς όμως στη περιοχή όπου οι τιμές του φορτίου είναι πολύ κοντά σε αυτό τις αστοχίας αρχίζει μια έντονη αλλαγή της κλίσης και οι μετακινήσεις είναι πολύ μεγάλες και είναι σχεδόν οριζόντιο το διάγραμμα. Αυτό σημαίνει πως για ελάχιστη αύξηση του φορτίου σε εκείνη τη φάση της επανάληψης του φαινομένου με το βήμα που ορίστηκε, υπάρχει σημαντικά μεγάλη μετακίνηση. Το ίδιο ισχύει και στη άλλη διεύθυνση z αλλά στην άλλη αριθμηση του οριζόντιου άξονα για σχεδόν ίδιο φορτίο αλλά για πολύ μεγαλύτερη τιμή μετακίνησης. Παρουσιάζεται ίδια κλίμακα αλλαγής κλίσης αλλά σε διαφορετική (μεγαλύτερη) τιμή μετακίνησης.



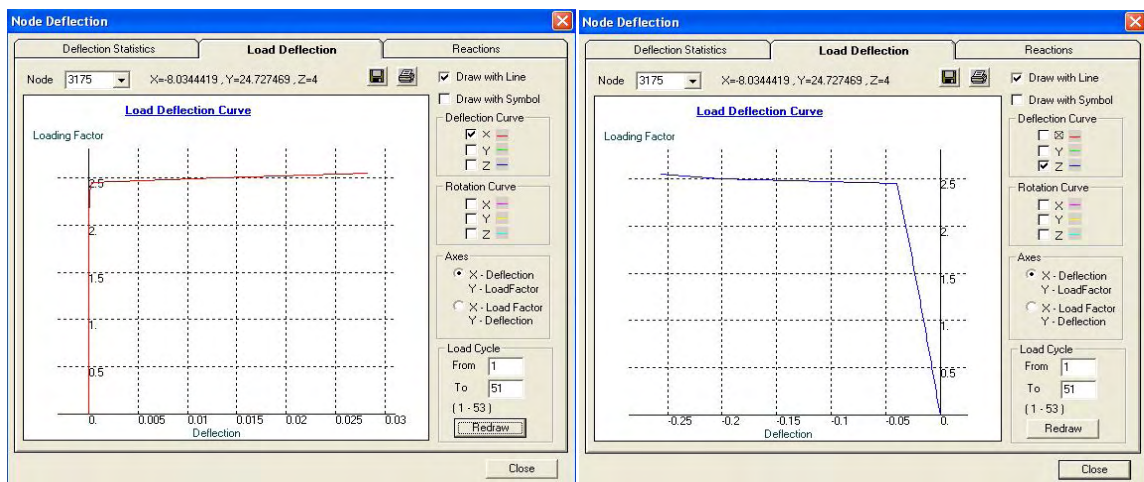
Η συμπεριφορά του κόμβου 3175 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 50

Στον άλλο κόμβο του μέλος (3175) μπορεί να ειπωθεί ότι για τον z άξονα ισχύουν τα ίδια όπως στον παραπάνω κόμβο αλλά για την άλλη διεύθυνση διαφοροποιείται. Στην διεύθυνση x παρατηρείται πως ο κόμβος δεν επηρεάζεται σχεδόν καθόλου κατά την αύξηση της φόρτισης και φτάνει σχεδόν στις τιμές αστοχίας για να αλλάξει ξαφνικά η κλίση της καμπύλης, περίπου στο load factor 2,47 όπου και είναι εκρηκτική η μετακίνηση. Είναι σχεδόν οριζόντια η καμπύλη που σημαίνει ότι εξαντλεί την αντοχή του και μετακινείται έντονα σε σχέση με τα αρχικά στάδια φόρτισης.



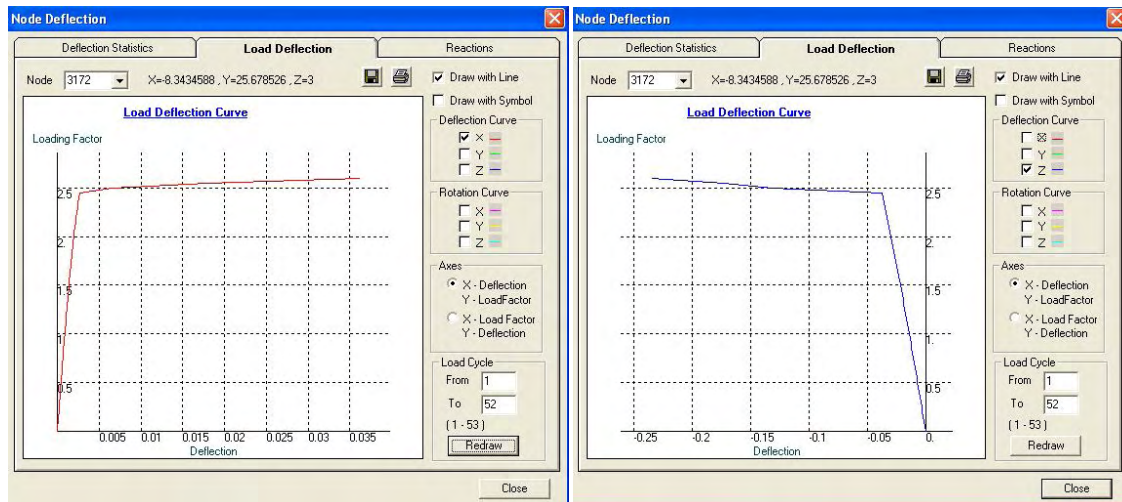
Η συμπεριφορά του κόμβου 3172 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 51

Ο κόμβος εδώ σε αυτό το στάδιο της φόρτισης συμπεριφέρεται ακριβώς όπως και στον 50° κύκλο τόσο στην x όσο και στην z διεύθυνση, απλά στο “μάτι” φαίνεται μικρή διαφορά της κλίσης της καμπύλης (x διεύθυνση) που όμως δεν ισχύει γιατί είναι σε άλλη κλίμακα το διάγραμμα, οι τιμές είναι ίδιες.



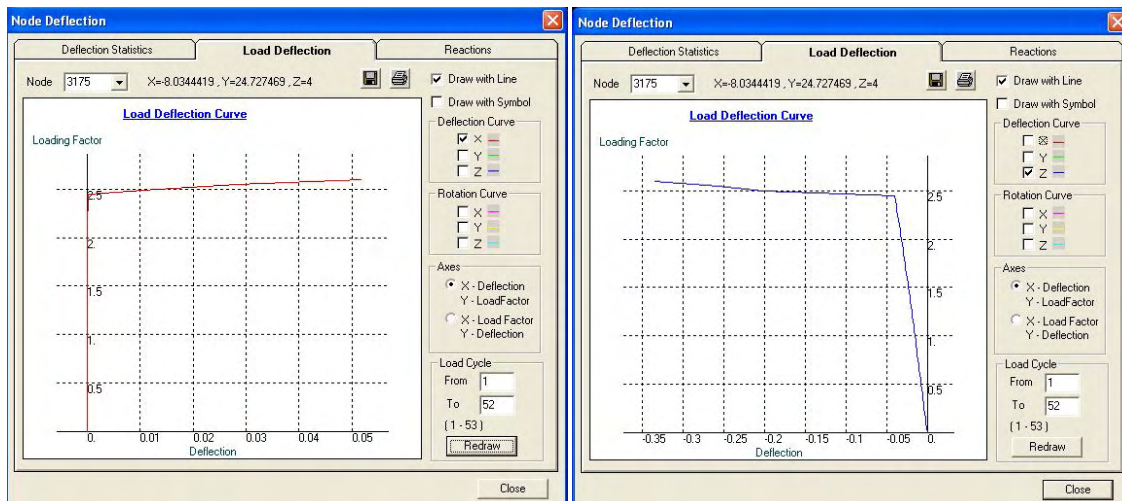
Η συμπεριφορά του κόμβου 3175 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 51

Και εδώ ισχύουν ακριβώς τα ίδια για τον κόμβο 3175, όπως και την φόρτιση στο 50° κύκλο.



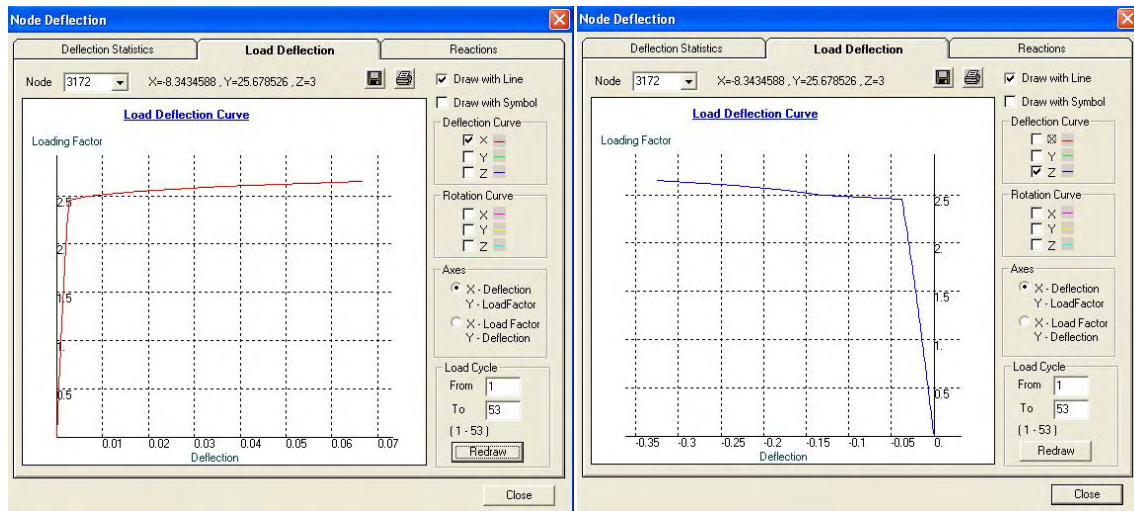
Η συμπεριφορά του κόμβου 3172 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 52

Παρατηρούνται τα ίδια όπως και πριν με μια διαφοροποίηση στην z διεύθυνση όπου προκύπτει μια διπλή έντονη αλλαγή της καμπύλης περίπου στα -0,15, πράγμα που σημαίνει ότι ενώ πάει να μετακινηθεί με μια ομαλή συμπεριφορά ξαφνικά αλλάζει κλίση. Δηλαδή καταπονείται με διαφορετική κλίμακα που εξηγεί και την συμπεριφορά του κόμβου μετά από το φορτίο 2,5 όπου πια μπαίνει στα όρια της κατάρρευσης και προειδοποιεί ότι θα επέλθει σύντομα μια μη αναμενόμενη συμπεριφορά που θα οδηγήσει σε αστοχία.



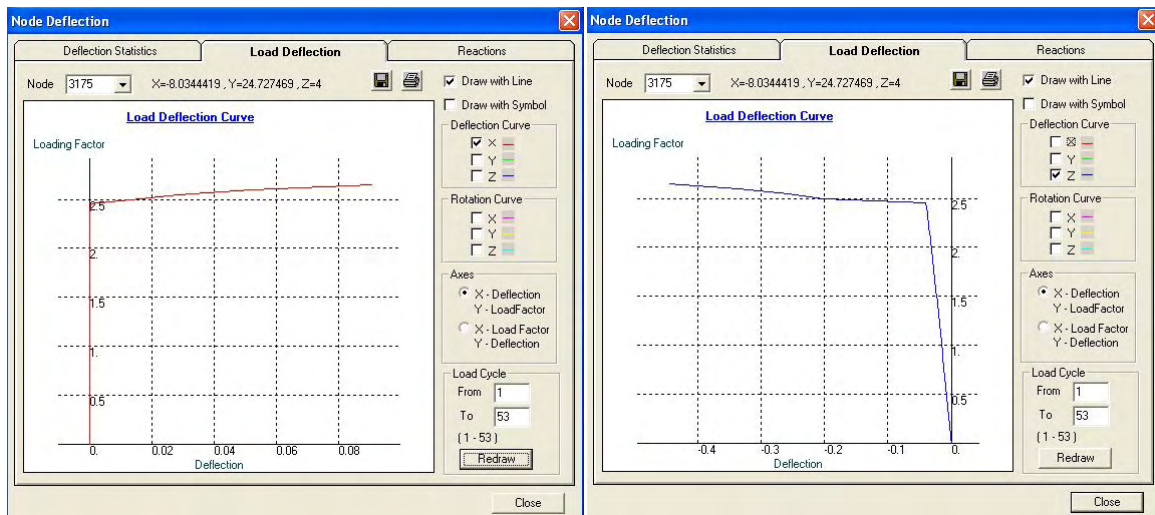
Η συμπεριφορά του κόμβου 3175 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 52

Τα ίδια συμπεράσματα όπως και στο 51^ο κύκλο που αναφέρθηκαν πιο πάνω.



Η συμπεριφορά του κόμβου 3172 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 53

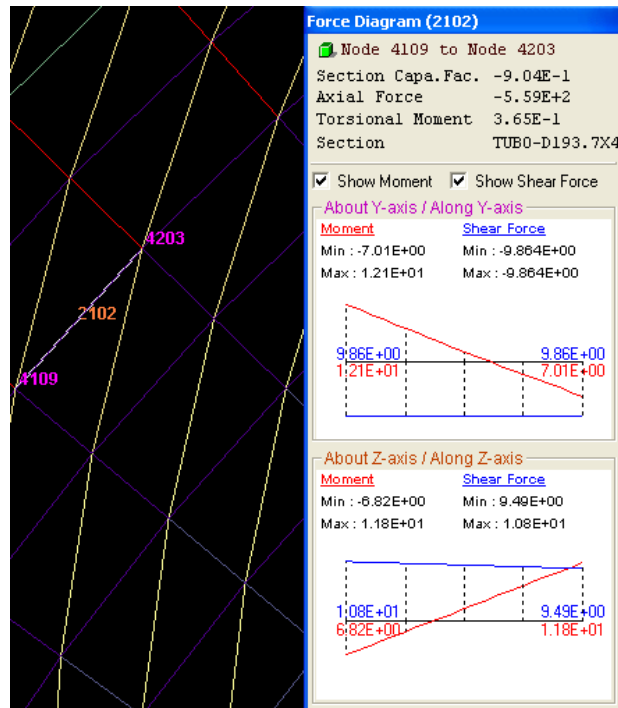
Φτάνοντας στο τελικό στάδιο όπου έχουμε την κατάρρευση του φορέα, παρατηρούνται τα ίδια όπως και στους προηγούμενους κρίσιμους κύκλους φόρτισης, μόνο που εδώ πια δεν είναι εφικτή η περαιτέρω μετακίνηση του κόμβου γιατί επέρχεται αστοχία. Οπότε την στιγμή που αναμενόταν επιπλέον μετακίνηση και συνεπώς και άλλη παραμόρφωση σταματά απότομα γιατί δεν συνεχίζεται το φαινόμενο λόγω της κατάρρευσης του θόλου.



Η συμπεριφορά του κόμβου 3175 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 53

Όπως ακριβώς αναλύθηκε ακριβώς πριν, την συμπεριφορά του κόμβου με βάση τα προηγούμενα αποτελέσματα, έτσι και εδώ ισχύουν τα ίδια. Προλαμβάνει η κατάρρευση τις αναμενόμενες επιπλέον παραμορφώσεις.

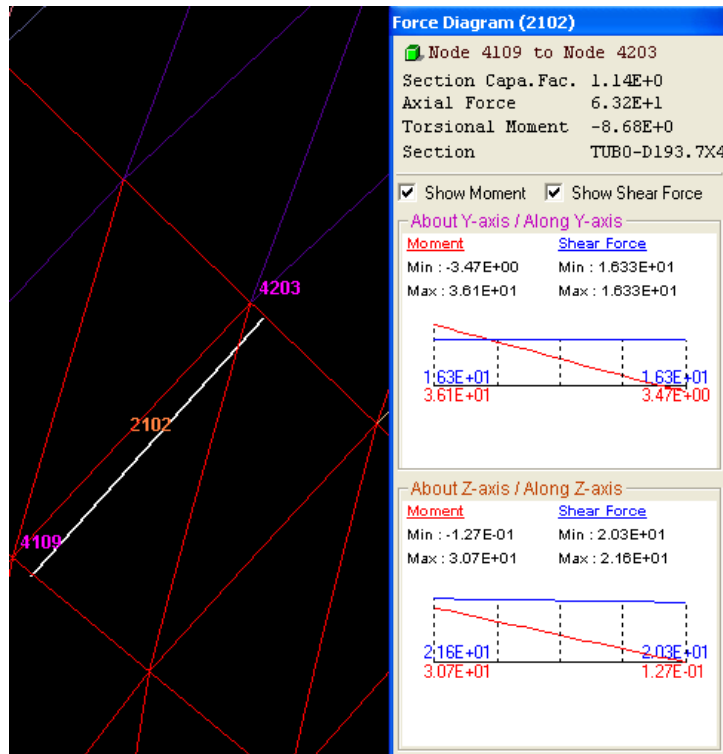
Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν ανάλογες περιπτώσεις για ένα οριζόντιο μέλος που ανήκει στους δακτύλιους.



Μέλος 2102, δακτύλιος, κύκλος φόρτισης 49 με load factor 2,45 (μωβ)

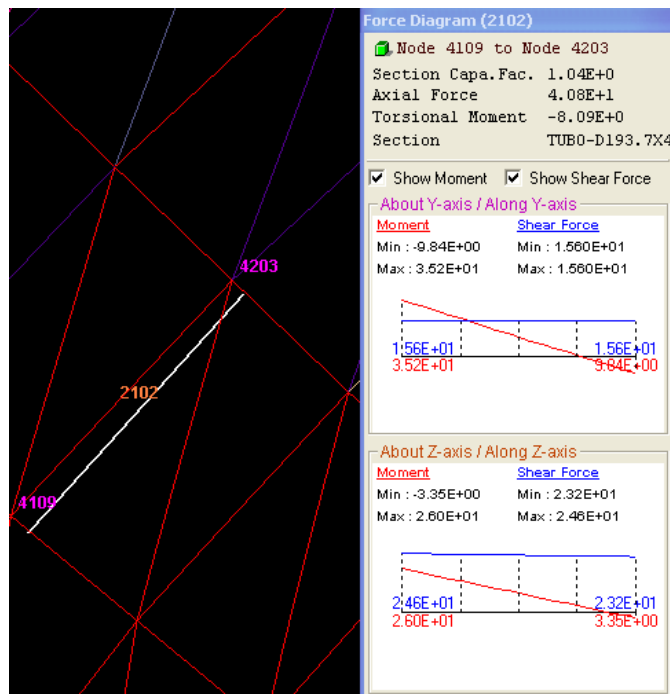
- Το μέλος αυτό ορίζεται από τους κόμβους 4109 και 4203.
- Section Capacity Factor: -0,904
- Axial Force : - 559kN

Στα επόμενα σχήματα που θα ακολουθήσουν (όπως και πριν στο μεσημβρινό), θα φαίνεται η άσπρη γραμμή του μέλους 2102 όπως επελέχθη στο 49^ο κύκλο για να είναι ορατή η μικρό-μετακίνηση που δέχεται κατά την εξέλιξη της φόρτισης αλλά και η αλλαγή του χρώματος που δεικνύει την μετάβαση της φόρτισης στην αποφόρτιση.



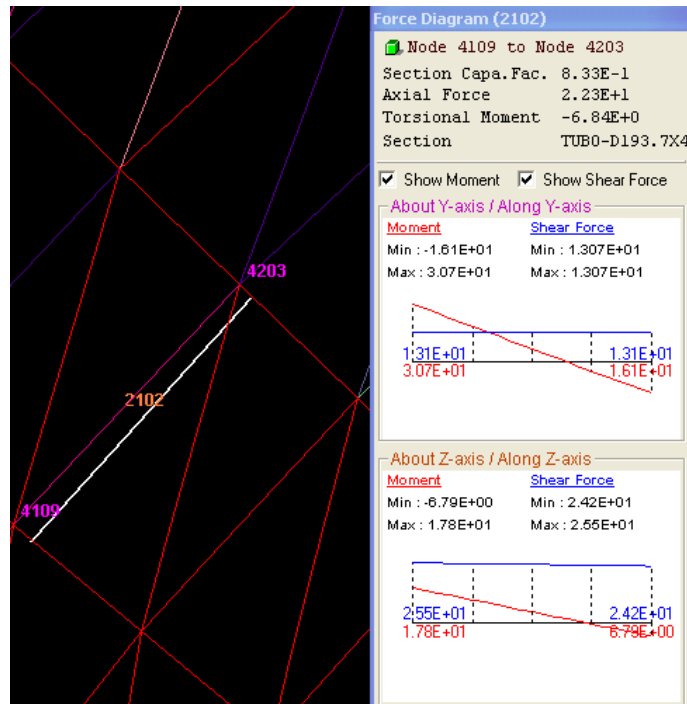
Μέλος 2102, δακτύλιος, κύκλος φόρτισης 50 με load factor 2,50 (κόκκινο)

- Section Capacity Factor: 1,14
- Axial Force : 63,2kN



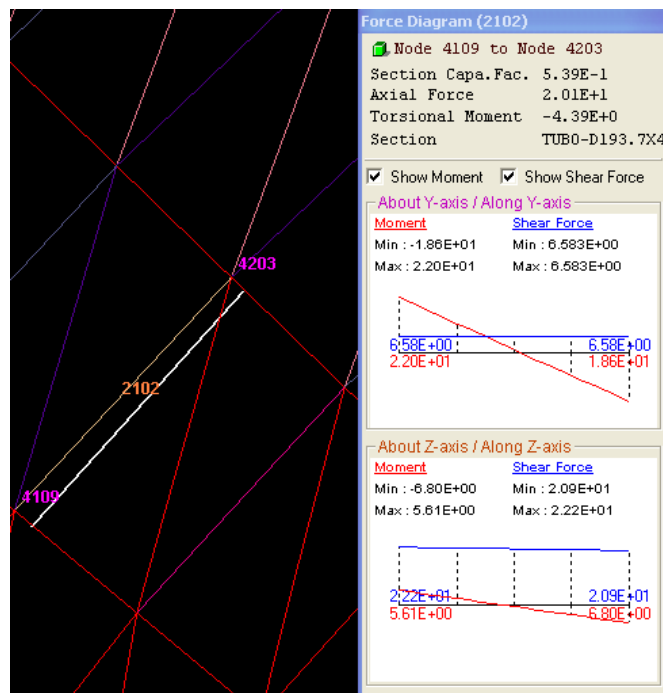
Μέλος 2102, δακτύλιος, κύκλος φόρτισης 51 με load factor 2,55 (κόκκινο)

- Section Capacity Factor: 1,04
- Axial Force : 40,8kN



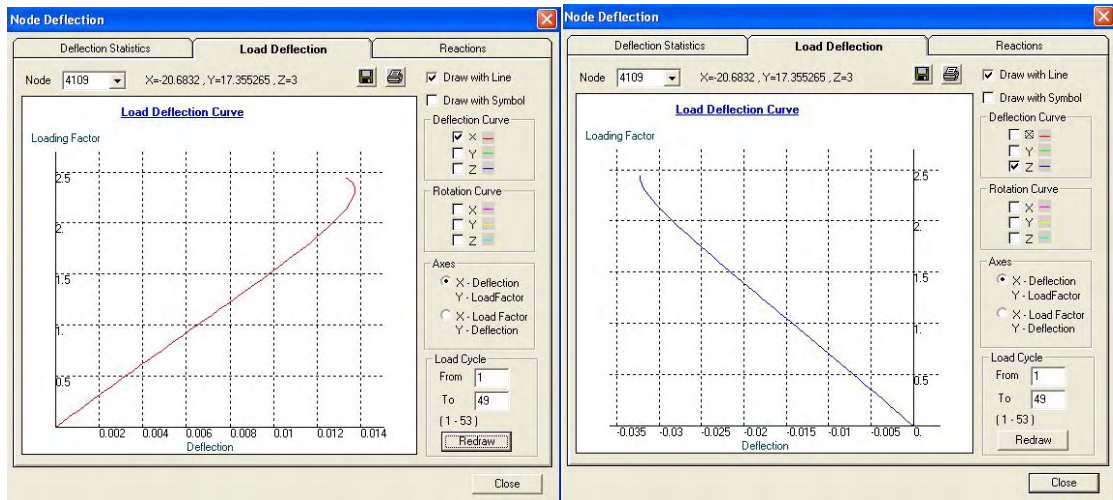
Μέλος 2102, δακτύλιος, κύκλος φόρτισης 52 με load factor 2.60 (ροζ)

- Section Capacity Factor: 0,833
- Axial Force : 22,3kN



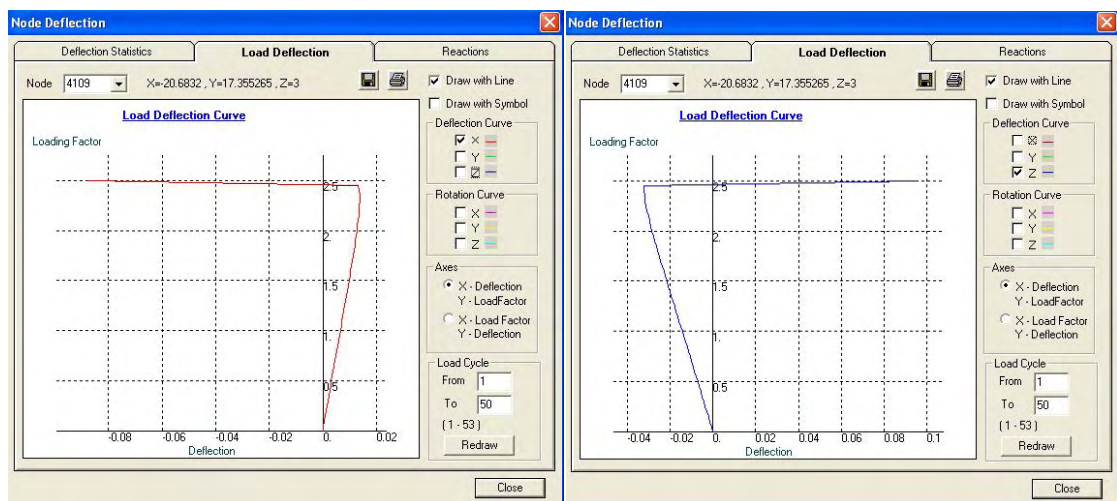
Μέλος 2102, δακτύλιος, κύκλος φόρτισης 53 με load factor 2,65 (κίτρινο)

- Section Capacity Factor: 0,539
- Axial Force : 20,1kN



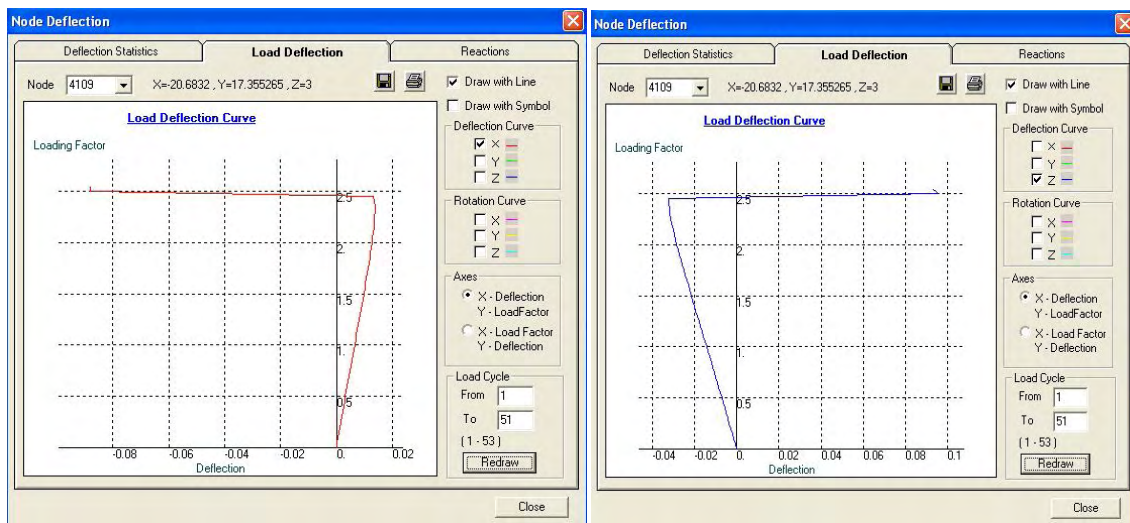
Η συμπεριφορά του κόμβου 4109 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 49

Στον κόμβο αυτό παρατηρείται, για την διεύθυνση x, ότι μέχρι το κρίσιμο φορτίο που αρχίζουν οι παραμορφώσεις παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά στη μετακίνησή του. Όσο αυξάνει το φορτίο τόσο αυξάνεται και η μετατόπιση του κόμβου αλλά έως το σημείο της τιμής εκείνης της φόρτισης περίπου στο 2,2. Από εκεί και έπειτα η καμπύλη αλλάζει σημαντικά κλίση και μάλιστα προς την αντίθετη φορά που σημαίνει ότι ο κόμβος μετά από μια περιοχή μετατόπισής του επιστρέφει στην αρχική του θέση. Αυτό δηλώνει ότι για μια συγκεκριμένη τιμή φορτίου ο κόμβος σταματά να μετακινείται γιατί αλλάζει το είδος της φόρτισης του και συνεπώς προσπαθεί να επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση ώστε να αλλάξει το είδος της καταπόνησής του, για παράδειγμα από θλίψη να περάσει στην κατάσταση εφελκυσμού. Ανάλογα συμβαίνουν και στην άλλη διεύθυνση z, μόνο που η αλλαγή της κλίσης γίνεται πιο ομαλά και δεν υπάρχει εκείνο το άλμα μετάβασης της καμπύλης προς την επιστροφή στην αρχική κατάσταση.



Η συμπεριφορά του κόμβου 4109 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 50

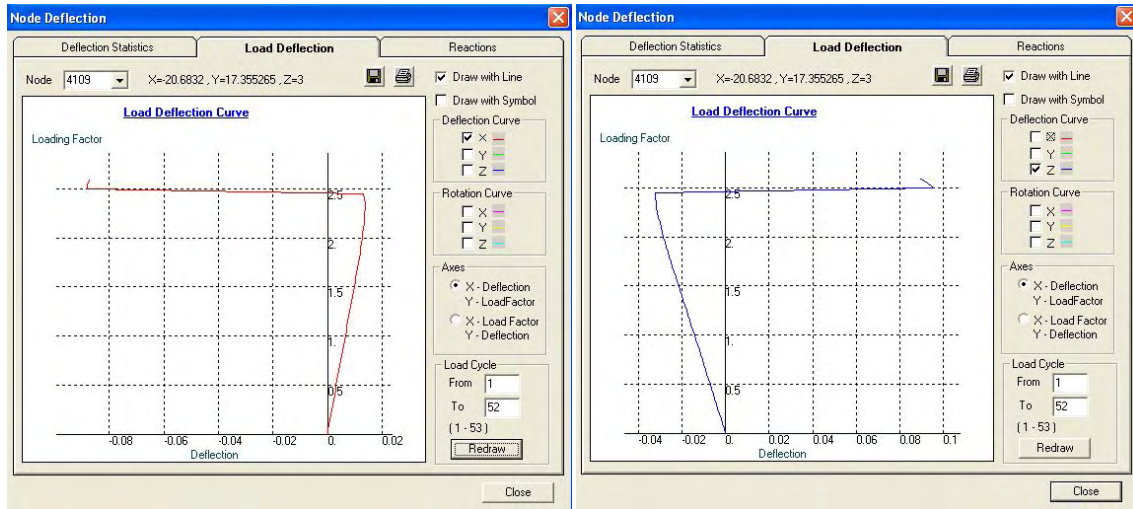
Όπως είναι διακριτό και στα διαγράμματα, ο κόμβος ακολουθεί την ίδια διαδικασία με πριν. Αναμενόταν άλλωστε και τέτοια συμπεριφορά γιατί παρατηρήθηκε ότι ο κόμβος προσπαθεί να επανέλθει στην αρχική του θέση μετά από το κρίσιμο φορτίο παραμορφώσεων. Στο συγκεκριμένο κύκλο φόρτισης είναι ορατή η γραμμικότητα της μετακίνησης με την αύξηση του φορτίου και κατά x αλλά και κατά z διεύθυνση. Όμως ξαφνικά επέρχεται αλλαγή της κλίσης της καμπύλης μετακίνησης και μάλιστα με τρομερά απότομο τρόπο. Και για τους δυο άξονες είναι η τιμή εκείνη του φορτίου περίπου στο 2,4 όπου η μετακίνηση του κόμβου αλλάζει φορά με απότομο τρόπο και επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση στιγμιαία και στη συνέχεια συνεχίζει να κινείται προς την άλλη διεύθυνση τελείως οριζόντια κλίση. Δηλαδή μετά την αλλαγή της φοράς καμπύλης, παρατηρούνται μεγάλες τιμές μετακίνησης για ελάχιστη αύξηση φορτίου. Είναι σημαντική παρατήρηση για το λόγο ότι προσομοιάζει η συμπεριφορά του κόμβου με ολόκληρου του θόλου, ο οποίος έχει ανάλογες μετακινήσεις και αλλαγές φοράς στη κλίση του με την πάροδο των ανακυκλήσεων φόρτισης. Είναι και η απόδειξη της συμπεριφοράς του κόμβου ότι ενώ μετακινείται προς μια διεύθυνση ξαφνικά αλλάζει φορά περνάει από την αρχική του απαραμόρφωτη κατάσταση και μετά συνεχίζει την μετατόπισή του προς την αντίθετη πλευρά. Κάτι το οποίο δίνει την έννοια της παραμορφωσιμότητάς του φορέα κατά τη μη γραμμική ανάλυσή του.



Η συμπεριφορά του κόμβου 4109 (κατά x , κατά z) στο κύκλο 51

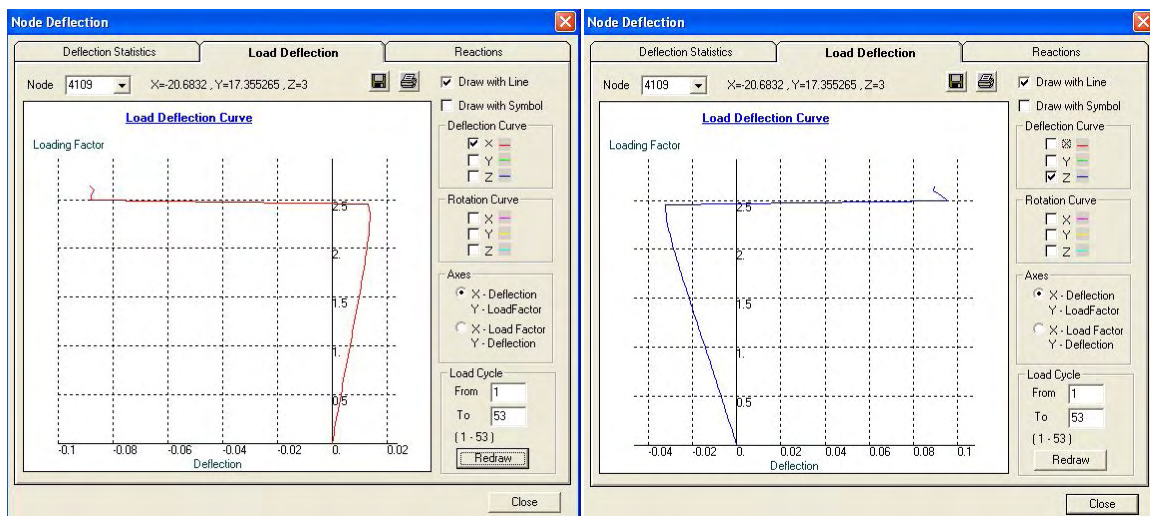
Σε αυτό το στάδιο παρατηρούνται τα ίδια με το προηγούμενο κύκλο φόρτισης (50) μόνο που εδώ υπάρχει ακόμα μια ένδειξη. Είναι φανερό πως ακολουθεί ο κόμβος την ίδια διαδικασία μετακίνησης του, αλλά στο τέλος της καμπύλης κάνει την εμφάνισή του για πρώτη φορά μια ακόμη αλλαγή κλίσης (ανακατανομή φόρτισης). Στο φορτίο περίπου 2,53 βλέπουμε μια “ακίδα” στην άκρη της καμπύλης που δηλώνει την τάση της αλλαγής κλίσης

για μια ακόμη φορά και μάλιστα προς την άλλη πλευρά. Πιο ορατή και καλύτερη ανάλυση δίνεται στο επόμενο στάδιο που ακολουθεί γιατί είναι πιο έντονο το φαινόμενο.



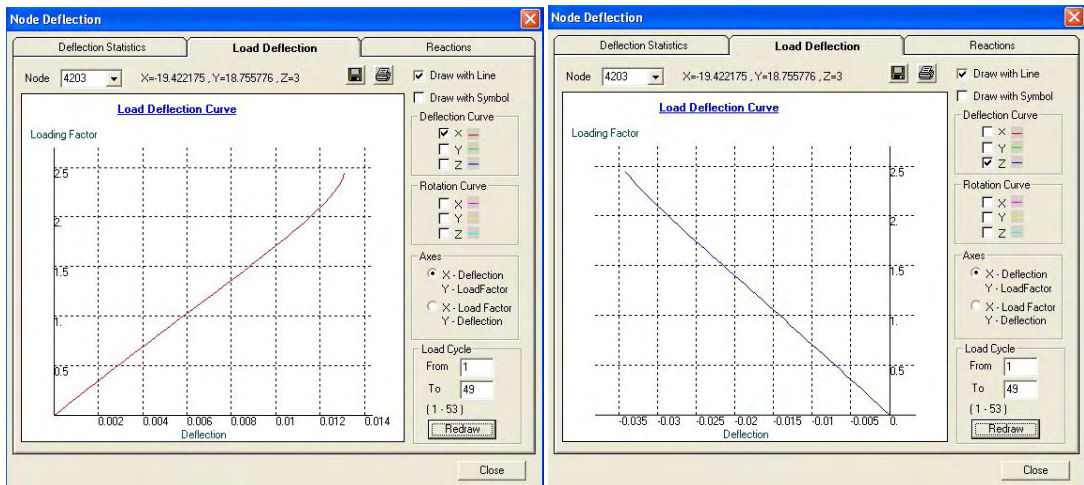
Η συμπεριφορά του κόμβου 4109 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 52

Με βάση λοιπόν αυτά που αναφέρθηκαν ακριβώς πιο πάνω, εδώ παρατηρείται η εντονότερη αυτή αλλαγή στην άκρη της καμπύλης και μάλιστα για την τιμή φορτίου 2,55 που είναι ένα βήμα πριν την κατάρρευση του φορέα. Ισχύει ότι ειπώθηκε και πριν μόνο που εδώ είναι πρόδηλο ότι στον z άξονα κυρίως, ο κόμβος έχει την τάση να επιστρέψει για δεύτερη φορά προς την αρχική του θέση. Αυτό γιατί παρατηρείται πως ξανά αλλάζει κλίση και φορά η καμπύλη. Ο κόμβος δηλαδή, λόγω των τάσεων που αναπτύσσει κάθε φορά το μέλος το οποίο συγκρατεί, έχει την τάση να μετακινείται από τη μια πλευρά στην άλλη συνεχώς έως την κατάρρευση της κατασκευής.



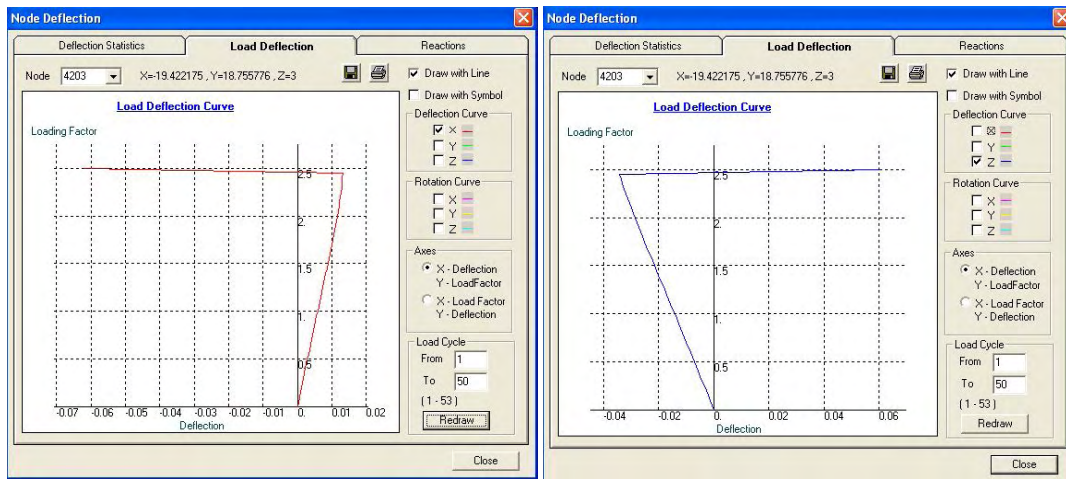
Η συμπεριφορά του κόμβου 4109 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 53

Στον τελικό κύκλο που οδηγεί στην κατάρρευση του θόλου παρατηρούνται τα ίδια όπως πριν και επιβεβαιώνεται και το συμπέρασμα που εξήχθη στο τέλος. Δηλαδή είναι πιο φανερή η τάση που έχει ο κόμβος να αλλάζει συνεχώς διεύθυνση μετακίνησης περνώντας, η τουλάχιστον προσπαθώντας να περάσει, από την αρχική του κατάσταση. Επειδή η παραμόρφωση που επιδιώχθηκε να έχει ο φορέας, είναι της τάξης του να αντέχει, για λόγους οικονομίας και σωστής επιλογής διατομών, το πολύ τρεις φορές, παρατηρείται ότι μια φορά καταφέρνει ο κόμβος να περάσει από την αρχική του κατάσταση και από εκεί και πέρα απλά να έχει μετακινήσεις μικρής κλίμακας όπως παρουσιάστηκαν στα διαγράμματα. Είναι λογικό άλλωστε η παραμόρφωση, μετά από κάποια κρίσιμα στάδια, όπως για παράδειγμα όταν περνάει από την αρχική του κατάσταση ο κόμβος και συνεχίζει μετά τις μετατοπίσεις του προς την αντίθετη φορά, να μην έχει την ίδια ένταση σε μετατόπιση όσο σε αύξηση του φορτίου. Για αυτό το λόγο είναι και έντονες οι αλλαγές κλίσης της καμπύλης κοντά στο φορτίο κατάρρευσης με ελάχιστες μετακινήσεις, κάτι που είναι μαθηματικά βέβαιο εφόσον ο κόμβος έχει εξαντλήσει την ελαστικότητά του και συνεπώς το εύρος των μετακινήσεων του και το μόνο που μπορεί να κάνει είναι μικρο-μετακινήσεις γύρω σχεδόν από τον εαυτό του με αυξημένη φυσικά παραμόρφωση.



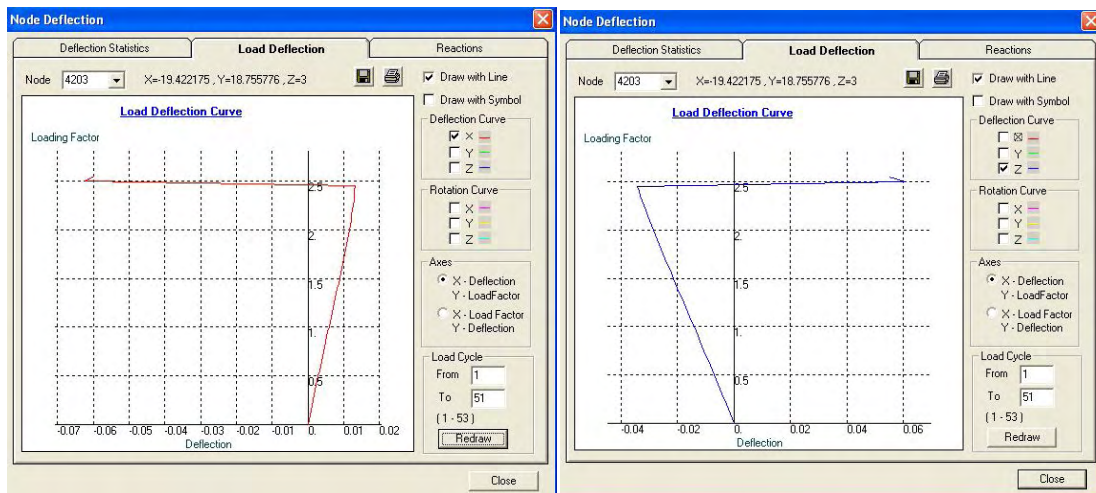
Η συμπεριφορά του κόμβου 4203 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 49

Η ίδια ανάλυση όπως και για τον κόμβο 4109 στον αντίστοιχο κύκλο φόρτισης.



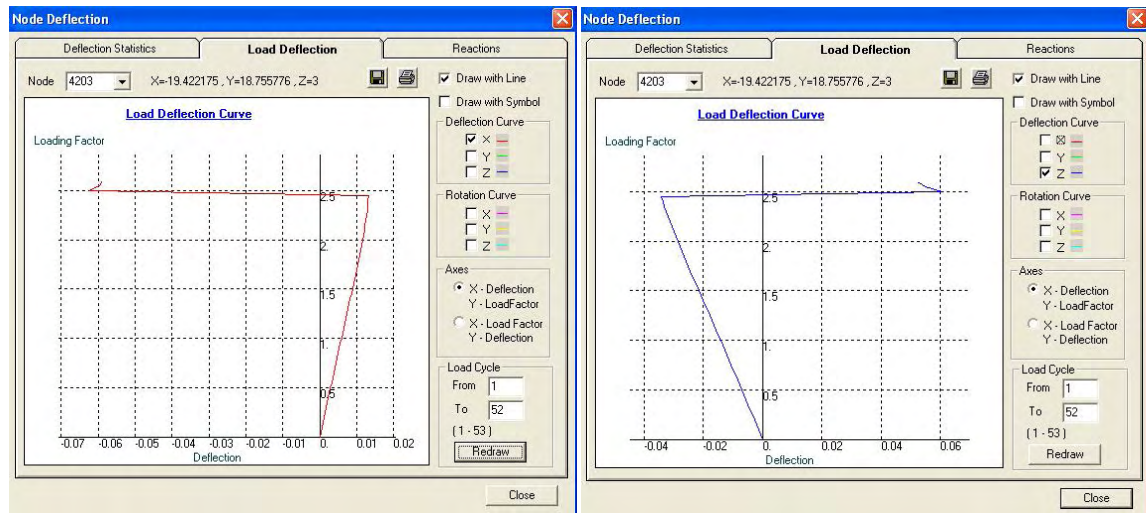
Η συμπεριφορά του κόμβου 4203 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 50

Είναι φανερό ότι ακολουθεί η ήδη αναφερόμενη ανάλυση όπως στον κόμβο 4109 γιατί προκύπτουν σχεδόν ίδια διαγράμματα.



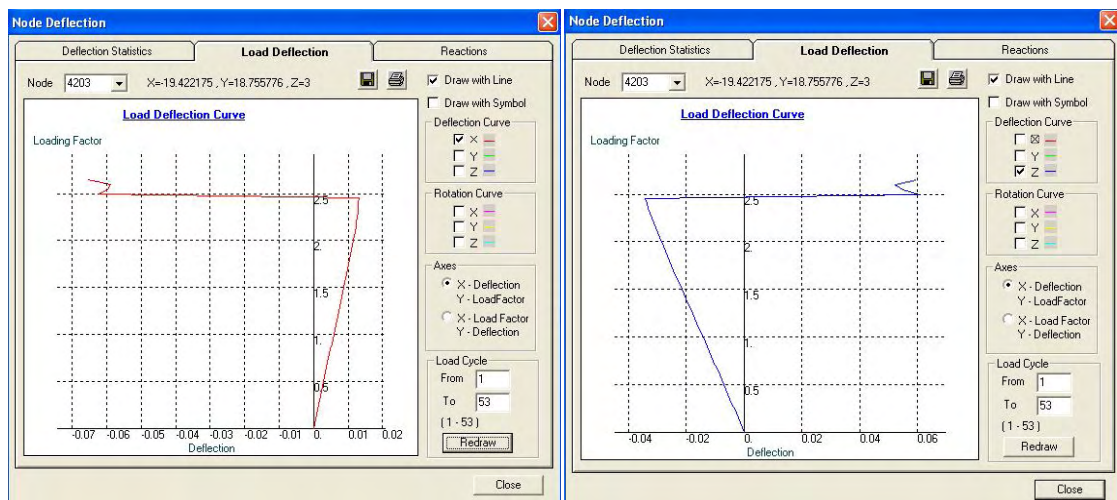
Η συμπεριφορά του κόμβου 4203 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 51

Όπως ακριβώς και στα παραπάνω διαγράμματα του κόμβου 4109 αντιστοιχεί παρόμοια ανάλυση.



Η συμπεριφορά του κόμβου 4203 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 52

Ομοίως με την ίδια θεώρηση όπως ακολουθήσαμε την διαδικασία ανάλυσης του φαινομένου του κόμβου 4109.



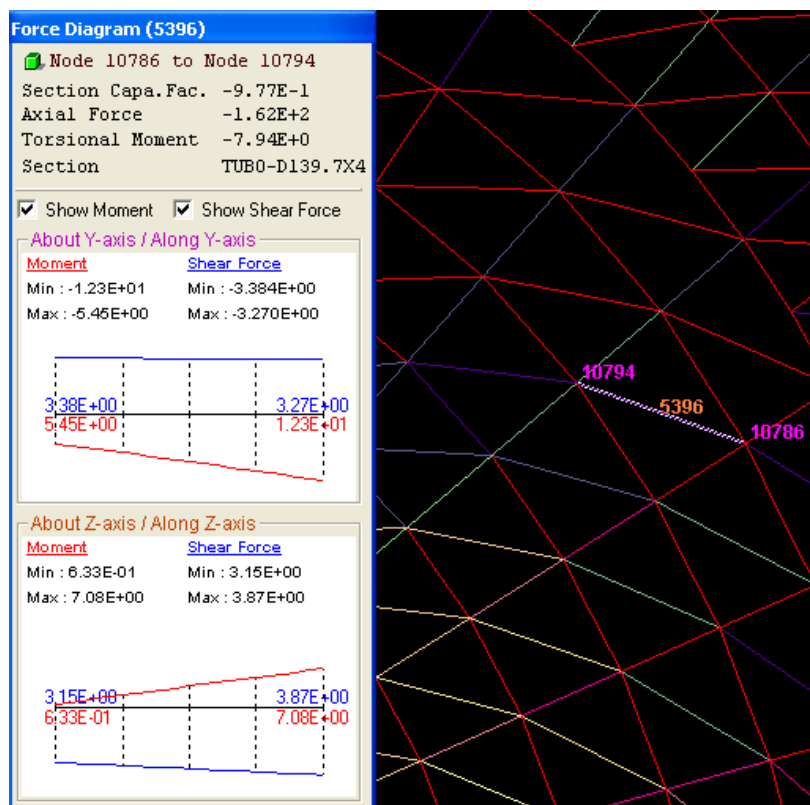
Η συμπεριφορά του κόμβου 4203 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 53

Εδώ θα μπορούσε να πει κανείς ότι παρατηρείται ακριβώς η ίδια συμπεριφορά με τον κόμβο 4109 στον 53^ο κύκλο αλλά αξίζει να σταθεί κανείς στην έντονη αλλαγή της καμπύλης όπως σχολιάστηκε πιο πάνω. Δηλαδή εδώ ακριβώς επιβεβαιώνεται ο ισχυρισμός ότι ο κόμβος κοντά στις τιμές του κρίσιμου φορτίου κατάρρευσης έχει συχνές μικρο-μετατοπίσεις αλλά με μικρή τιμή απομάκρυνσης. Φαίνεται καθαρά ότι το σχηματιζόμενο “φιδάκι” της καμπύλης λόγω των αλλαγών κλίσεων αποδεικνύει την παραμόρφωση του κόμβου με τον τρόπο που αναφέρθηκε έως τώρα. Το ζικ-ζακ δηλώνει την πολύ κρίσιμη ισορροπία του κόμβου που τον αναγκάζει να μετακινείται έντονα και πολύ γρήγορα από τη μια θέση στην άλλη (ανακατανομή φόρτισης), έως να έλθει η αστοχία του στοιχείου. Συμπερασματικά θα ευσταθούσε ο ισχυρισμός ότι ο κόμβος μετακινείται με μια γραμμική συμπεριφορά έως το κρίσιμο φορτίο όπου αρχίζουν οι

παραμορφώσεις, μετά αρχίζει να αλλάζει φορά μετατοπίσεων και προσπαθεί να επανέλθει στην αρχική του θέση. Περνάει από αυτή και συνεχίζει προς την αντίθετη πλευρά και μετά στην περιοχή πολύ κοντά στο φορτίο κατάρρευσης, αλλάζει συνεχώς διεύθυνση εκτροπής δημιουργώντας την καμπύλη ζιγκ-ζαγκ έως να καταλήξει σε πλήρη αστοχία.

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι ανάλογες περιπτώσεις για ένα διαγώνιο μέλος, μόνο που εδώ αναμένονται πιο μεγάλες μετατοπίσεις μιας και τα διαγώνια μέλη επελέχθησαν με τη μικρότερη διατομή και συνεπώς θα είναι πιο παραμορφώσιμα όσον αφορά την μετατόπιση τους.

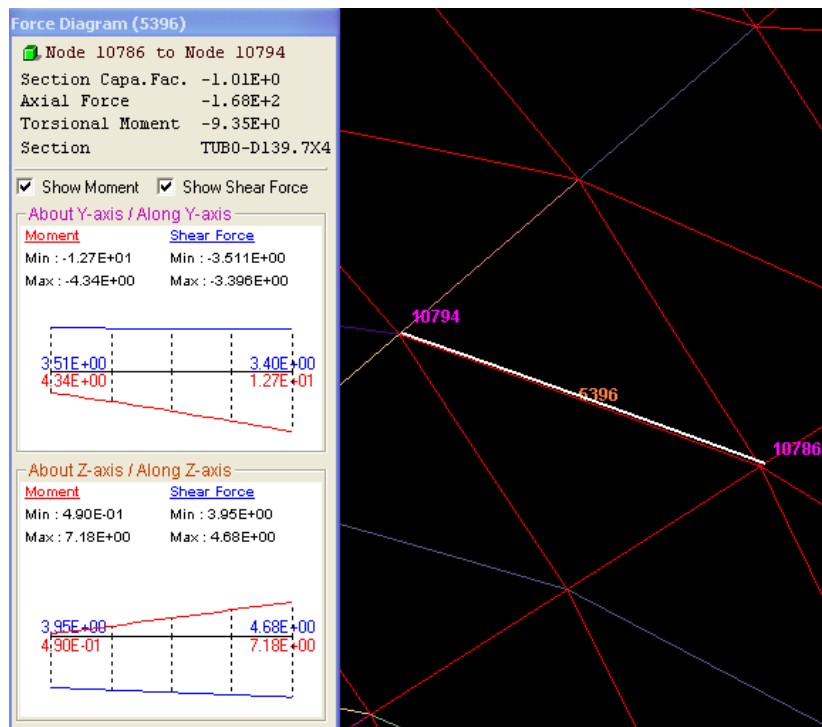
Συνεπώς :



Μέλος 5396, διαγώνιος, κύκλος φόρτισης 50 με load factor 2,50 (μωβ)

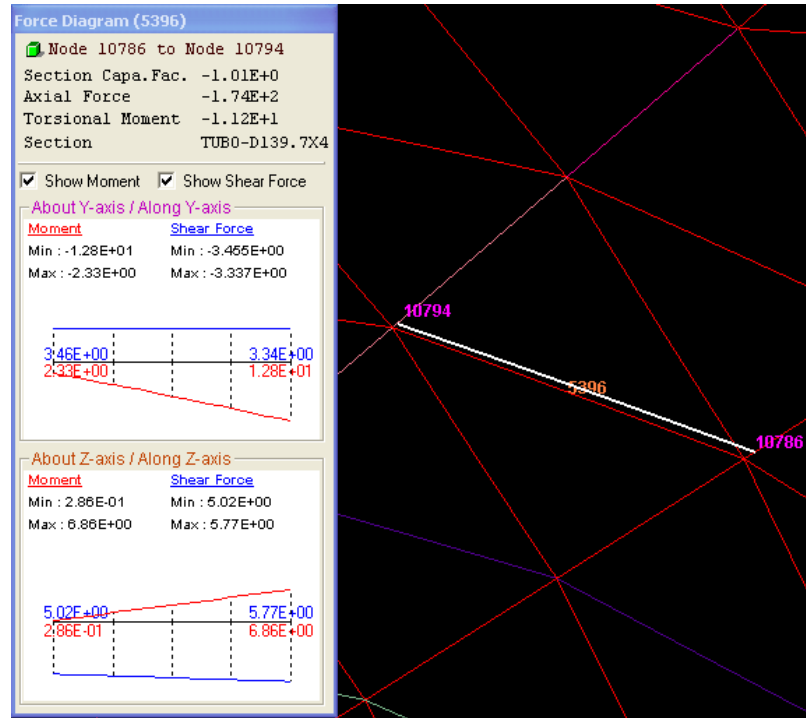
- Το μέλος αυτό ορίζεται από τους κόμβους 10786 και 10794.
- Section Capacity Factor: -0,977
- Axial Force : - 162kN

Στα επόμενα σχήματα που θα ακολουθήσουν (όπως και πριν στο μεσημβρινό και τον δακτύλιο) θα φαίνεται η άσπρη γραμμή του μέλους 5396 όπως επελέχθη στο 50° κύκλο για να είναι ορατή η μικρό-μετακίνηση που δέχεται κατά την εξέλιξη της φόρτισης αλλά και η αλλαγή του χρώματος που δεικνύει την μετάβαση της φόρτισης στη αποφόρτιση.



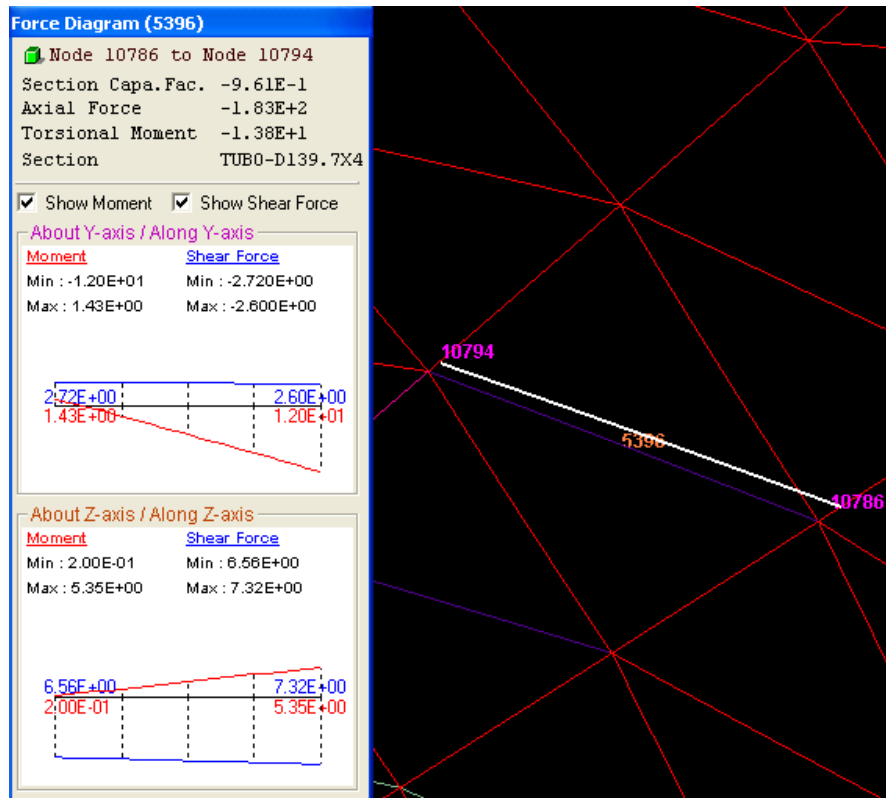
Μέλος 5396, διαγώνιος, κύκλος φόρτισης 51 με load factor 2,55 (κόκκινο)

- Section Capacity Factor: -1,01
- Axial Force : - 168kN



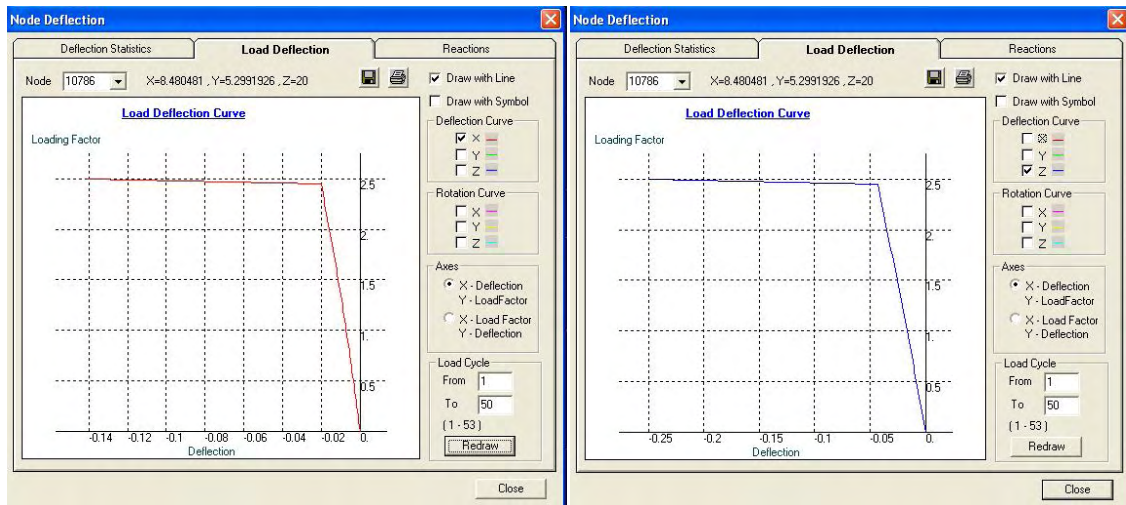
Μέλος 5396, διαγώνιος, κύκλος φόρτισης 52 με load factor 2,60 (κόκκινο)

- Section Capacity Factor: -1,01
- Axial Force : - 174kN



Μέλος 5396, διαγώνιος, κύκλος φόρτισης 53 με load factor 2,65 (μωβ)

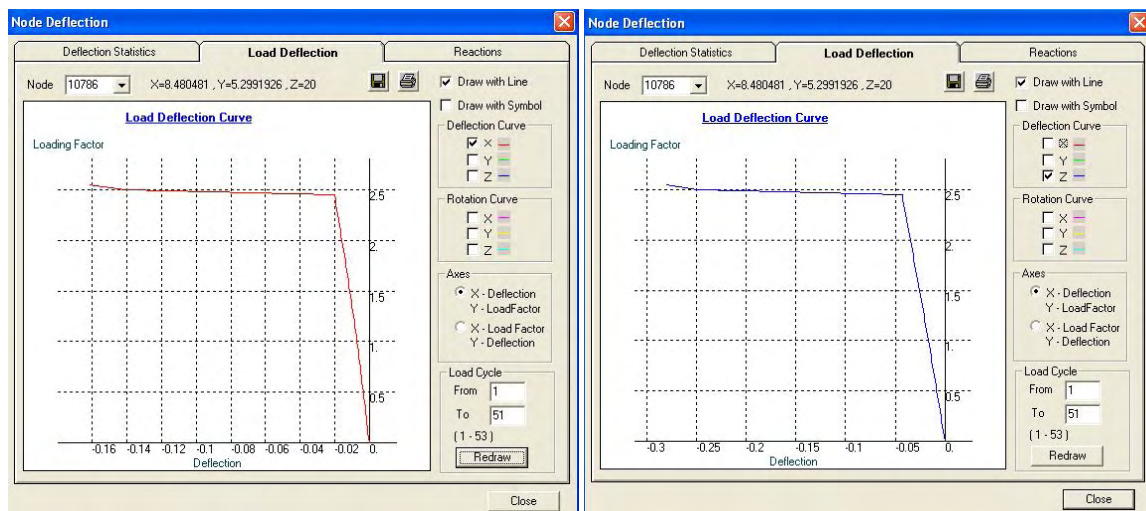
- Section Capacity Factor: -0,961
- Axial Force : - 183kN



Η συμπεριφορά του κόμβου 10786 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 50

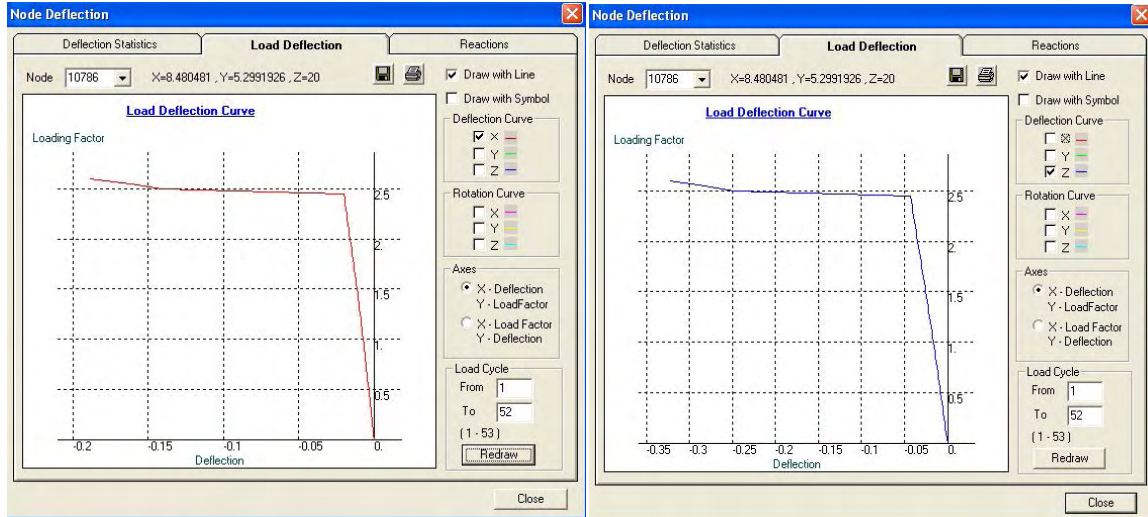
Στο συγκεκριμένο κύκλο φόρτισης είναι ορατή η γραμμικότητα της μετακίνησης με την αύξηση του φορτίου και κατά x αλλά και κατά z διεύθυνση. Όμως ξαφνικά παρατηρείται αλλαγή της κλίσης της καμπύλης μετακίνησης και μάλιστα με απότομο τρόπο.

Και για τους δυο άξονες είναι η τιμή εκείνη του φορτίου περίπου στο 2,4 όπου η μετακίνηση του κόμβου αλλάζει φορά με απότομο τρόπο και επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση στιγμιαία και στη συνέχεια συνεχίζει να κινείται προς την άλλη διεύθυνση σε τελείως οριζόντια κλίση. Δηλαδή μετά την αλλαγή της φοράς καμπύλης, παρατηρούνται μεγάλες τιμές μετακίνησης για ελάχιστη αύξηση φορτίου.



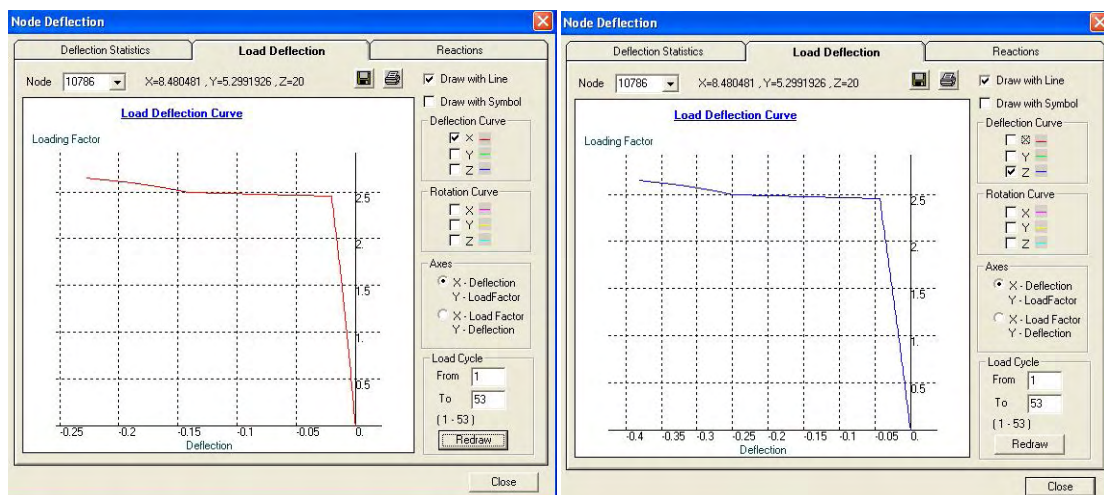
Η συμπεριφορά του κόμβου 10786 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 51

Εδώ παρατηρείται όπως και πριν την ίδια συμπεριφορά του κόμβου μόνο που για το φορτίο 2,51 περίπου, προκύπτει αλλαγή κλίσης στην καμπύλη και μάλιστα με τέτοιο τρόπο που προϋδεάζει για το τι θα επακολουθήσει στον επόμενο κύκλο όπου και εκεί θα αναφερθεί η διαφορά αυτή.



Η συμπεριφορά του κόμβου 10786 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 52

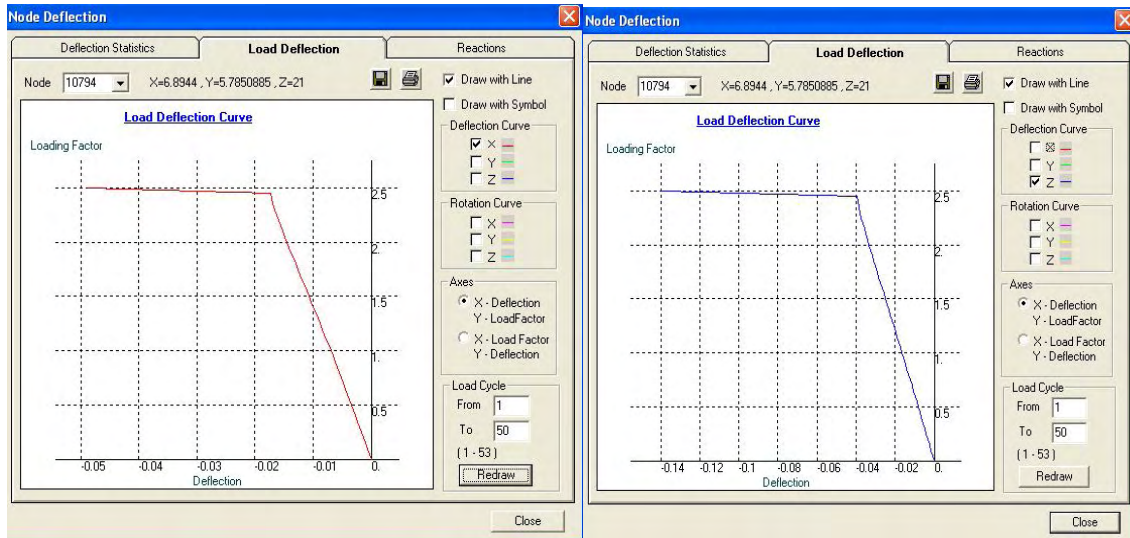
Για τον κύκλο 52 είναι πια φανερό ότι ο κόμβος μετά το φορτίο (όπως αναφέρθηκε ακριβώς πιο πάνω) 2,51 αρχίζει να έχει μικρή μετατόπιση σε σχέση με την αύξηση του φορτίου. Για αυτό το λόγο έχει και αυτό το σχήμα η καμπύλη και φαίνεται ότι ακόμα και πολύ κοντά στο φορτίο κατάρρευσης ο κόμβος δεν έχει μεγάλες μετακινήσεις και ειδικότερα αυτές οι εκτροπές του ακολουθούν την προηγούμενη τάση γραμμικότητας.



Η συμπεριφορά του κόμβου 10786 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 53

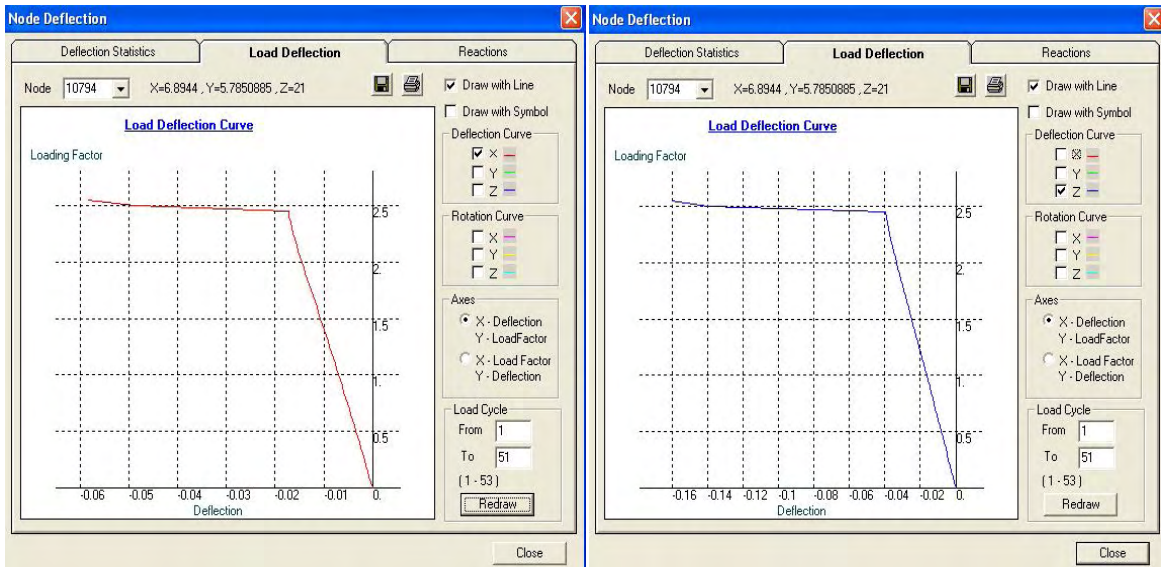
Και εδώ παρατηρούνται τα ίδια με παραπάνω αλλά σε πιο έντονη κλίμακα που έχει και σαν συνέπεια και της μεγαλύτερης κλίσης της καμπύλης. Με τη διαφορά εδώ ότι ενώ έχει

την τάση ο κόμβος να μετακινείται γραμμικά με την αύξηση του φορτίου έρχεται το φορτίο κατάρρευσης όπου και σταματά το φαινόμενο.



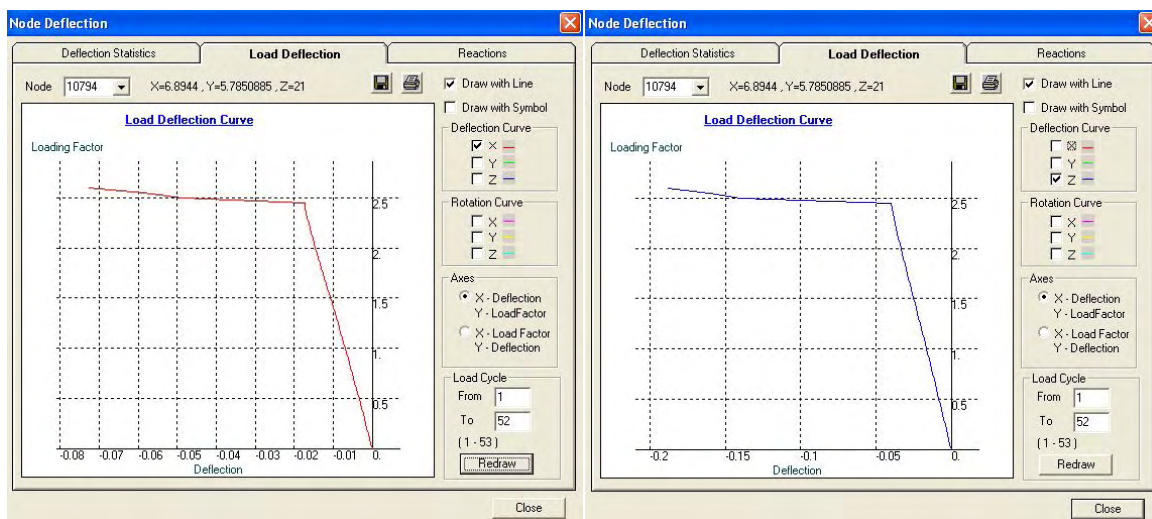
Η συμπεριφορά του κόμβου 10794 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 50

Είναι ακριβώς η ίδια συμπεριφορά με τον κόμβο 10786 που ήδη αναλύθηκε πιο πάνω.



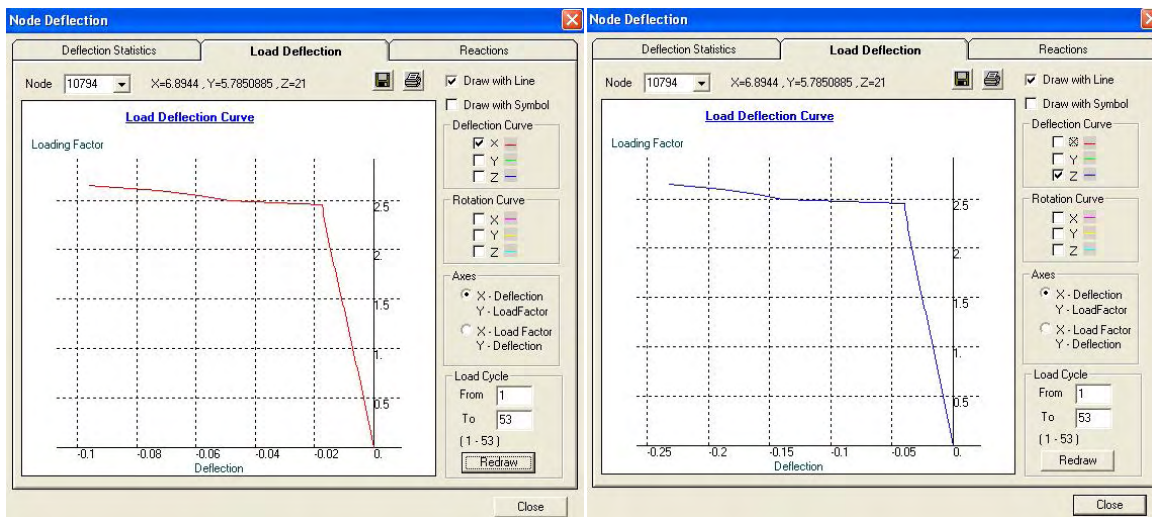
Η συμπεριφορά του κόμβου 10794 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 51

Ομοίως όπως στον κόμβο 10786 για το αντίστοιχο κύκλο φόρτισης.



Η συμπεριφορά του κόμβου 10794 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 52

Με την ίδια διαδικασία αναλύεται και το συγκεκριμένο διάγραμμα όπως στον κόμβο 10786 στο ανάλογο κύκλο φόρτισης.



Η συμπεριφορά του κόμβου 10794 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 53

Και πάλι εξάγονται τα ίδια συμπεράσματα όπως και παραπάνω, με τη διαφορά ότι συντελείται λίγο πιο έντονη μετατόπιση ως προς την αύξηση του φορτίου.

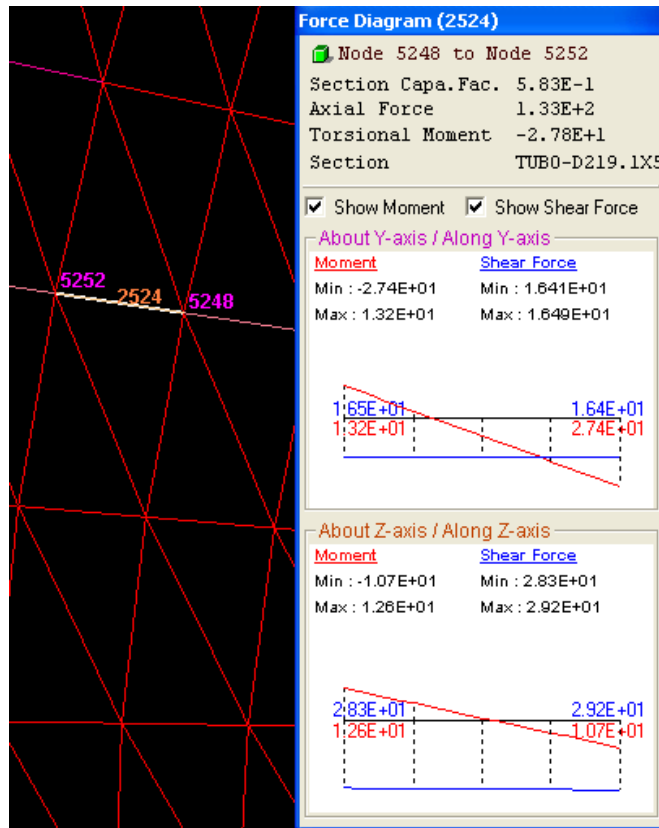
6.2.2. Ανακατανομή της φόρτισης γειτονικών μελών και οριακή κατάσταση αστοχίας τους

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν δυο καταστάσεις ανακατανομής φόρτισης, μια για ένα ζεύγος μεσημβρινών και μια για ένα ζεύγος διαγώνιων. Θα δειχθεί δηλαδή τι συμβαίνει και πως, όταν ένα μέλος φορτίζεται και φτάνει στην οριακή του κατάσταση αστοχίας και το γειτονικό του αντίστοιχο της ίδιας κατηγορίας μέλος, πως αποφορτίζεται

και επανέρχεται σταδιακά στην πιο ευνοϊκή αρχική του κατάσταση με την μικρή παραμόρφωση που μπορεί να έχει. Για αυτό το λόγο αναφέρονται και τα χρώματα κάθε φορά που έχουν, τα οποία δηλώνουν την κατάσταση παραμόρφωσης όπου βρίσκονται, και συγκρίνονται προκειμένου να παρουσιαστεί το φαινόμενο της ανακατανομής τάσεων. Είναι σημαντικό να δοθεί έμφαση στην ανακατανομή, γιατί σε αυτή την διαδικασία συμπεριφοράς των μελών στηρίζεται και όλη η μελέτη του θόλου κατά την οποία αναμένονται μεγάλες παραμορφώσεις πριν την κατάρρευση, κάτι το οποίο επιδιώκεται στη γενική θεώρηση κατασκευής όλων των δομικών στοιχείων. Θα παρουσιαστεί στην συνέχεια η απεικόνιση αυτών των σταδίων φόρτισης και αποφόρτισης των μελών και παράλληλα της αντίστοιχης συμπεριφοράς των γειτονικών του στοιχείων. Για παράδειγμα θα περιγραφεί η διαδικασία κατά την οποία όταν ένα μέλος αρχίζει και “κοκκινίζει”, (τα χρώματα που δηλώνουν την κατάσταση αντοχής μαζί με τις τιμές τους έχουν παρουσιαστεί στο κεφ.5.1. στη σελίδα 62) φτάνει δηλαδή σε οριακές καταστάσεις αστοχίας, ένα άλλο ακριβώς δίπλα του με τη σειρά του, ενώ είναι ήδη στα όρια έντονων φαινομένου λυγισμού και συνεπώς τελείως “κόκκινο” αρχίζει να “ξεκουράζεται” να αποφορτίζεται, διότι την ένταση την παραλαμβάνει το μέλος που εξετάζεται. Αυτό είναι και ουσιαστικά ο ορισμός και η ουσιώδης λειτουργία της ανακατανομής των τάσεων και βοηθάει στην ομαλή παραμόρφωση των μελών και στην κατά κάποιο τρόπο ελεγχόμενη κατάρρευση της κατασκευής .

Παρακάτω παρουσιάζεται αρκετά παραστατικά η διαδικασία αυτή τόσο στο φαινόμενο λυγισμού των μελών, αλλά και των αντίστοιχων κόμβων που τα συνοδεύουν.

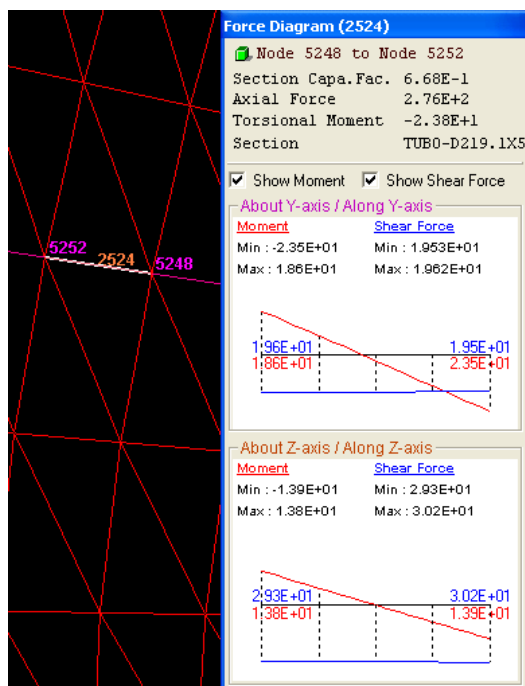
Έτσι διερευνάται αρχικά ένας μεσημβρινός στους ανάλογους κρίσιμους κύκλους φόρτισης.



Μέλος 2524, μεσημβρινός, κύκλος φόρτισης 50 με load factor 2,50 (κίτρινο)

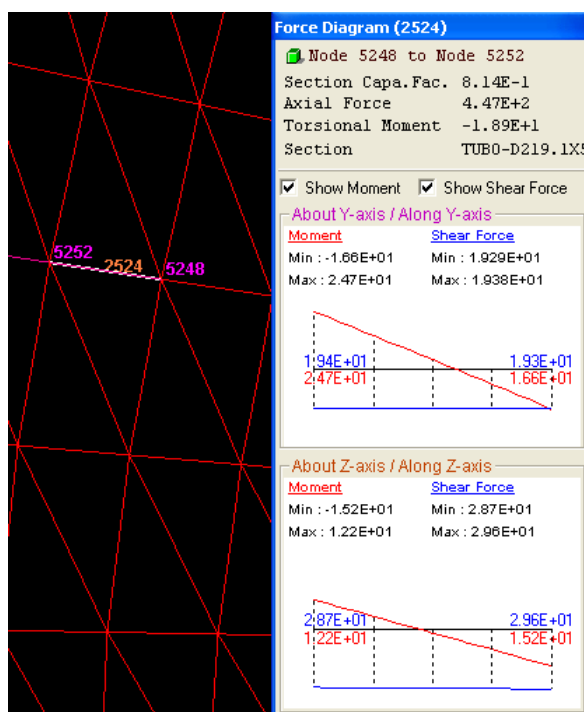
- Το μέλος αυτό ορίζεται από τους κόμβους 5248 και 5252.
- Section Capacity Factor: 0,583
- Axial Force : 133kN

Στα επόμενα σχήματα που θα ακολουθήσουν θα φαίνεται η άσπρη γραμμή του μέλους 2524 όπως επελέχθη στο 50° κύκλο για να είναι ορατή η μικρό-μετακίνηση που δέχεται κατά την εξέλιξη της φόρτισης αλλά και η αλλαγή του χρώματος που δεικνύει την μετάβαση της φόρτισης στη αποφόρτιση.



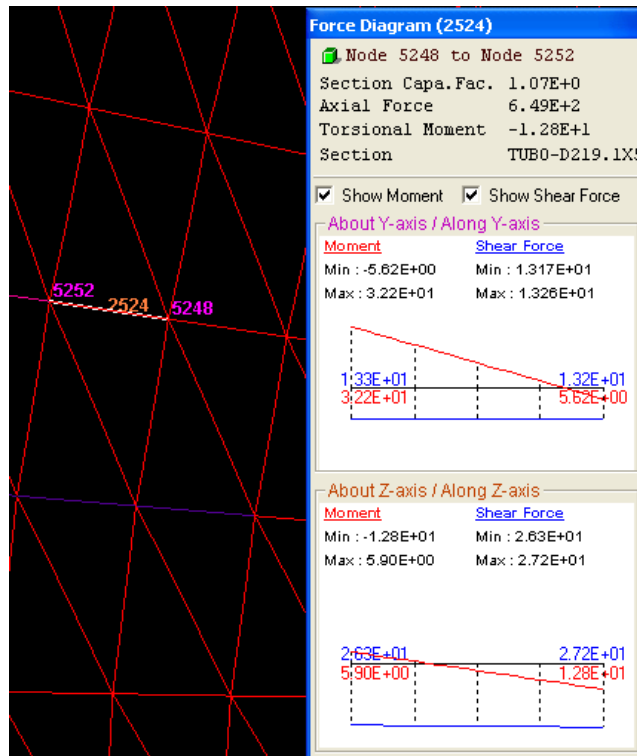
Μέλος 2524, μεσημβρινός, κύκλος φόρτισης 51 με load factor 2,55 (κοραλί)

- Section Capacity Factor: 0,668
- Axial Force : 276kN



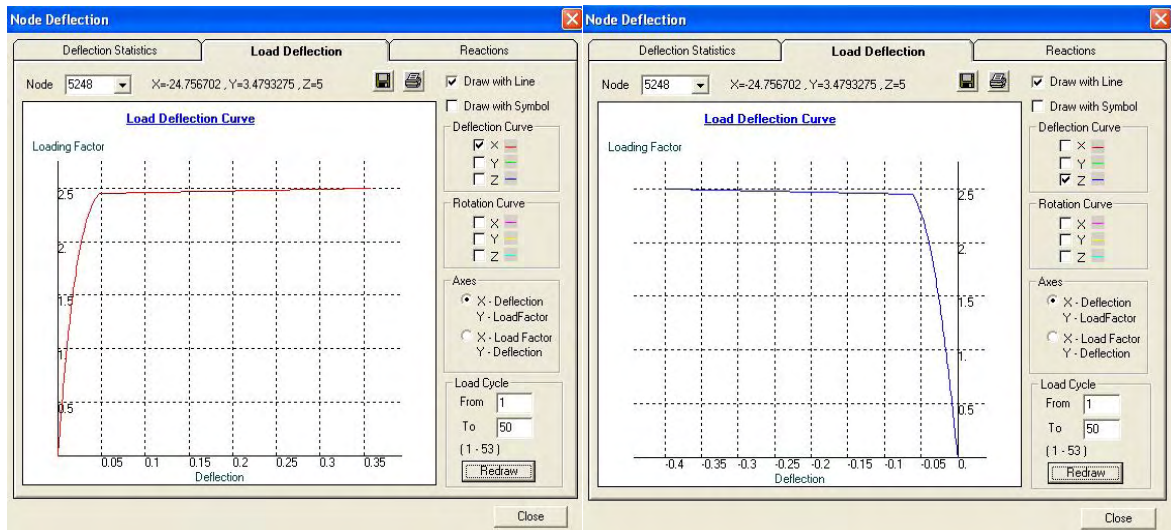
Μέλος 2524, μεσημβρινός, κύκλος φόρτισης 52 με load factor 2,60 (ροζ)

- Section Capacity Factor: 0,814
- Axial Force : 447kN



Μέλος 2524, μεσημβρινός, κύκλος φόρτισης 53 με load factor 2,65 (κόκκινο)

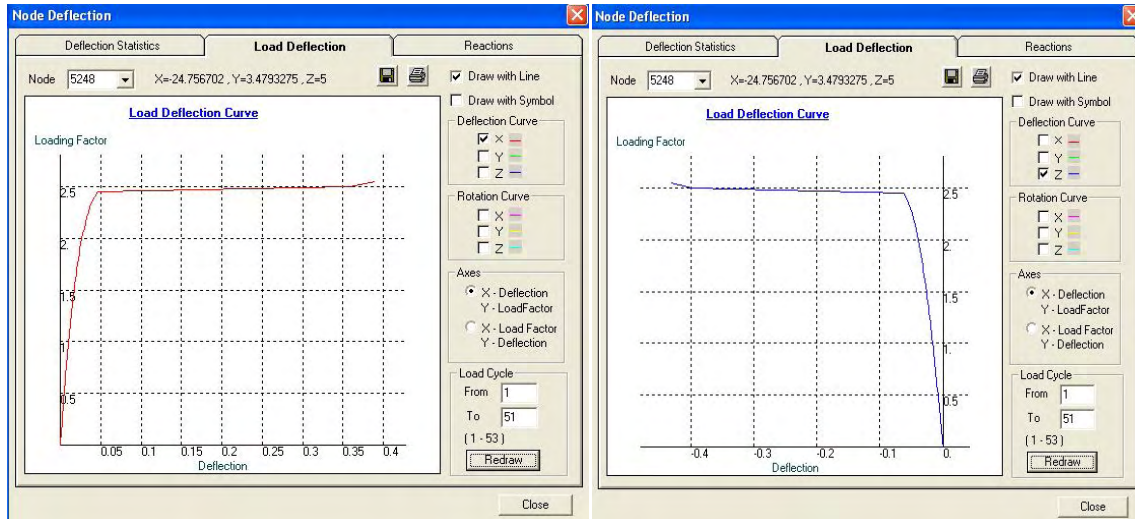
- Section Capacity Factor: 1,07
- Axial Force : 649kN



Η συμπεριφορά του κόμβου 5248 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 50

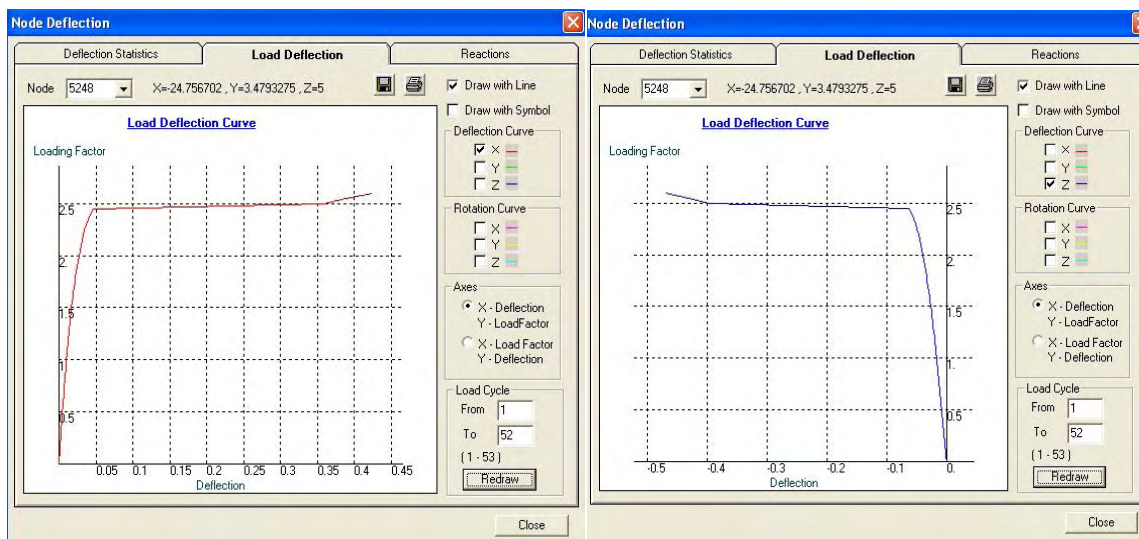
Στο συγκεκριμένο κόμβο παρατηρείται ότι, πριν τις τιμές στις οποίες αρχίζει η έντονη παραμόρφωση του φορέα, στην διεύθυνση x, προκύπτει γραμμική συμπεριφορά ανάλογη είναι η μετακίνηση με την αύξηση του φορτίου. Ακριβώς όμως στη περιοχή όπου οι τιμές του φορτίου είναι πολύ κοντά σε αυτό τις αστοχίας αρχίζει μια έντονη αλλαγή της κλίσης

και οι μετακινήσεις είναι πολύ μεγάλες και είναι σχεδόν οριζόντιο το διάγραμμα. Αυτό σημαίνει πως για ελάχιστη αύξηση του φορτίου σε εκείνη τη φάση της επανάληψης του φαινομένου με το βήμα που ορίσαμε, υπάρχει σημαντικά μεγάλη μετακίνηση. Το ίδιο ισχύει και στη άλλη διεύθυνση z αλλά στην άλλη αρίθμηση του οριζόντιου άξονα για σχεδόν ίδιο φορτίο αλλά για πολύ μεγαλύτερη τιμή μετακίνησης. Παρατηρείται ίδια κλίμακα αλλαγής κλίσης αλλά σε διαφορετική (μεγαλύτερη) τιμή μετακίνησης.



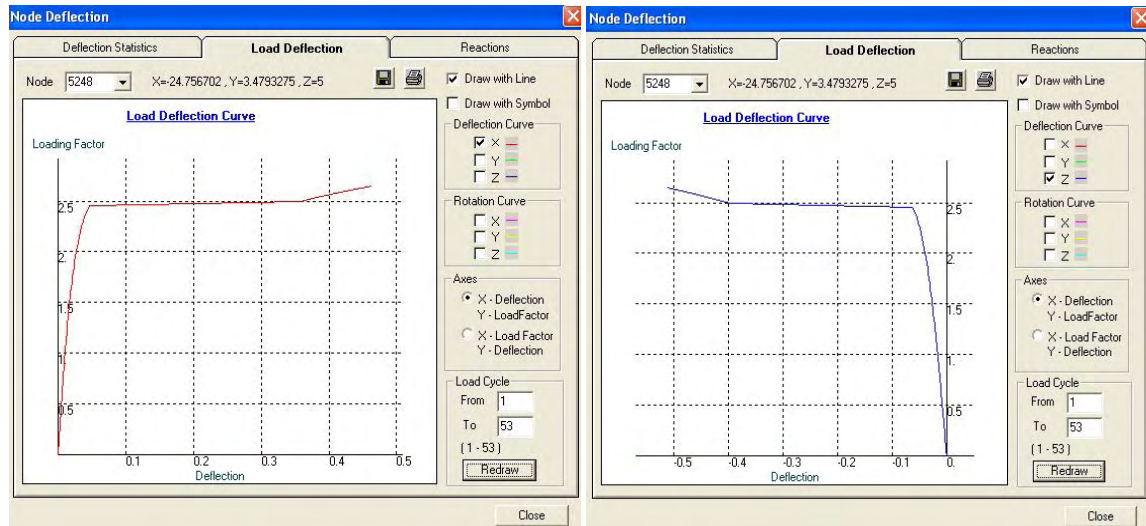
Η συμπεριφορά του κόμβου 5248 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 51

Εδώ παρατηρείται όπως και πριν την ίδια συμπεριφορά του κόμβου μόνο που για το φορτίο 2,51 περίπου υπάρχει αλλαγή κλίσης στην καμπύλη και μάλιστα με τέτοιο τρόπο που προιδεάζει για το τι θα επακολουθήσει στον επόμενο κύκλο όπου και εκεί θα αναφερθεί η διαφορά αυτή.



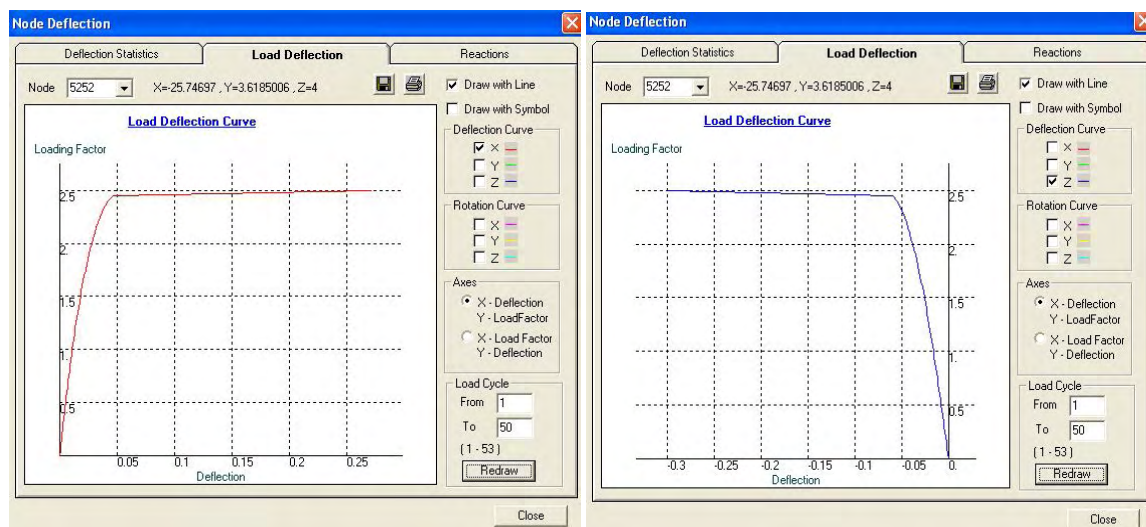
Η συμπεριφορά του κόμβου 5248 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 52

Για τον κύκλο 52 είναι πια φανερό ότι ο κόμβος μετά το φορτίο (όπως αναφέρθηκε ακριβώς από πάνω) 2,51 αρχίζει να έχει μικρή μετατόπιση σε σχέση με την αύξηση του φορτίου. Για αυτό το λόγο έχει και αυτό το σχήμα η καμπύλη και δείχνει ότι ακόμα και πολύ κοντά στο φορτίο κατάρρευσης ο κόμβος δεν έχει μεγάλες μετακινήσεις και ειδικότερα αυτές οι εκτροπές του ακολουθούν την προηγούμενη τάση γραμμικότητας.



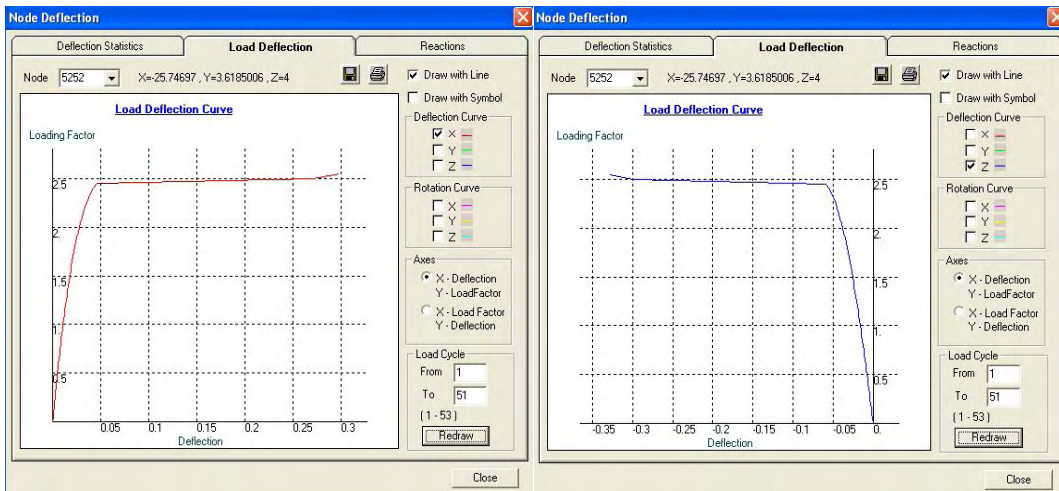
Η συμπεριφορά του κόμβου 5248 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 53

Και εδώ παρατηρούνται τα ίδια με παραπάνω αλλά σε πιο έντονη κλίμακα που έχει και σαν συνέπεια και της μεγαλύτερης κλίσης της καμπύλης. Με τη διαφορά εδώ ότι ενώ έχει την τάση ο κόμβος να μετακινείται γραμμικά με την αύξηση του φορτίου έρχεται το φορτίο κατάρρευσης όπου και σταματά το φαινόμενο.



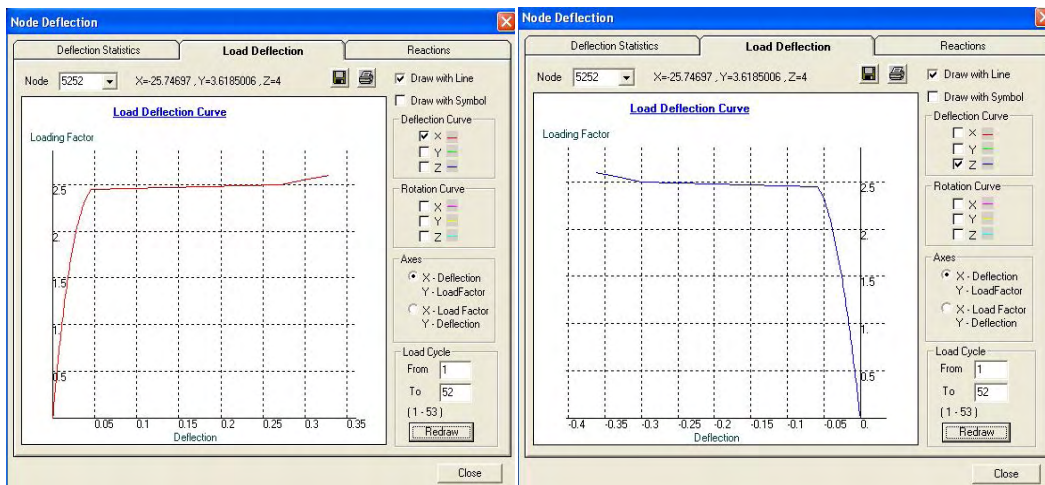
Η συμπεριφορά του κόμβου 5242 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 50

Ισχύουν ακριβώς τα ίδια όπως στον κόμβο 5248 στο κύκλο 50.



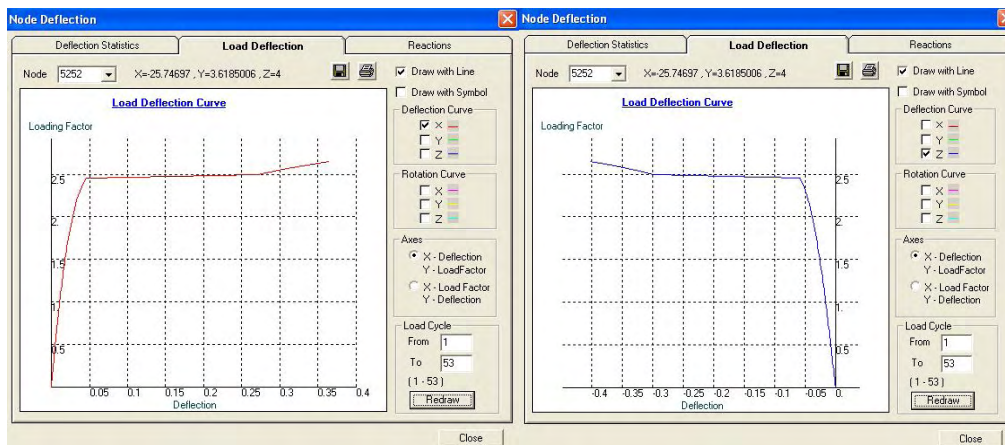
Η συμπεριφορά του κόμβου 5242 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 51

Όπως και πριν ακολουθεί η ανάλυση με βάση τον κόμβο 5248 στον αντίστοιχο κύκλο.



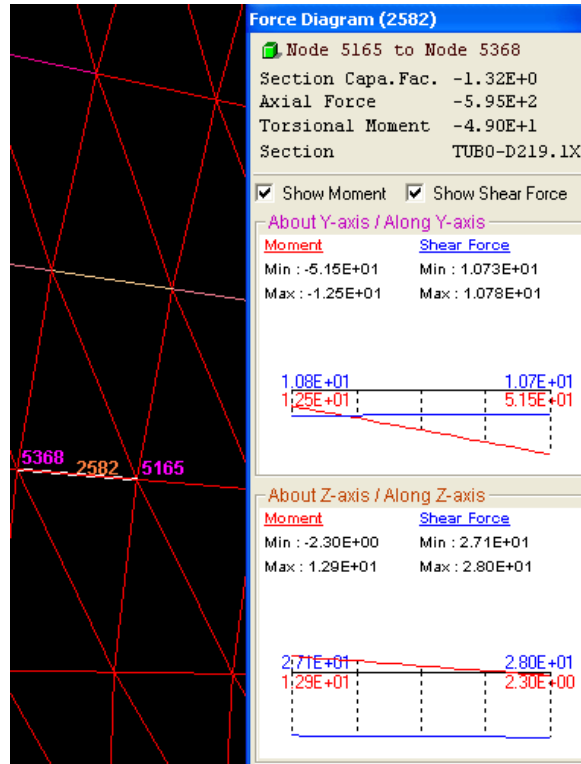
Η συμπεριφορά του κόμβου 5242 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 52

Παρατηρείται ότι δεν αλλάζει κάτι και σε αυτό το διάγραμμα οπότε αρκεί να δει κανείς τον κόμβο 5248 στον 52 κύκλο.



Η συμπεριφορά του κόμβου 5242 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 53

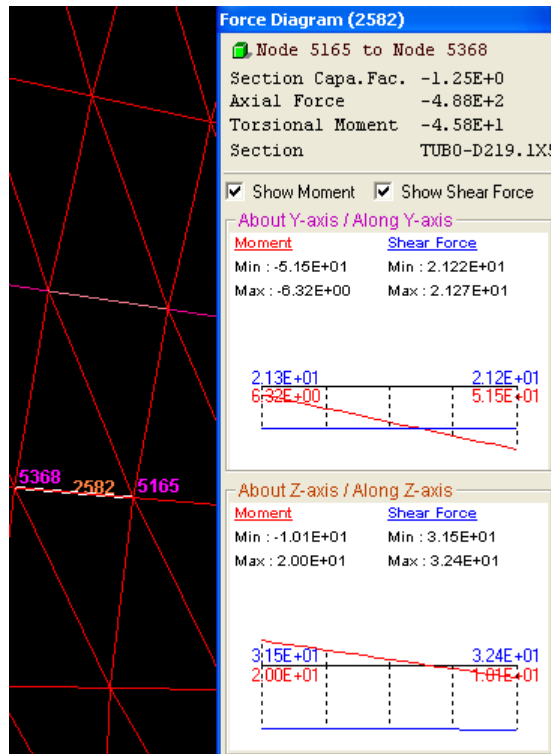
Και εδώ ακριβώς ισχύουν η ίδια ανάλυση και παρόμοια συμπεράσματα όπως στον κόμβο 5248 για το στάδιο της κατάρρευσης όπου και παρατηρείται ότι μετά την γραμμική συμπεριφορά του κόμβου κοντά στην τιμή του κρίσιμου φορτίου παρατηρείται απότομη κλίση οπότε και μικρές μετακινήσεις.



Μέλος 2582, μεσημβρινός, κύκλος φόρτισης 50 με load factor 2,50 (κόκκινο)

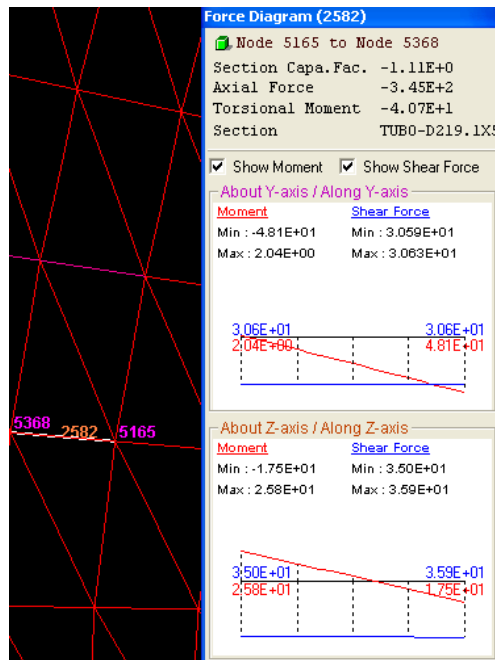
- Το μέλος αυτό ορίζεται από τους κόμβους 5165 και 5368.
- Section Capacity Factor: -1,32
- Axial Force : - 595kN

Στα επόμενα σχήματα που θα ακολουθήσουν θα φαίνεται η άσπρη γραμμή του μέλους 2582 όπως επελέχθη στο 50° κύκλο για να είναι ορατή η μικρο-μετακίνηση που δέχεται κατά την εξέλιξη της φόρτισης αλλά και η αλλαγή του χρώματος που δεικνύει την μετάβαση της φόρτισης στη αποφόρτιση.



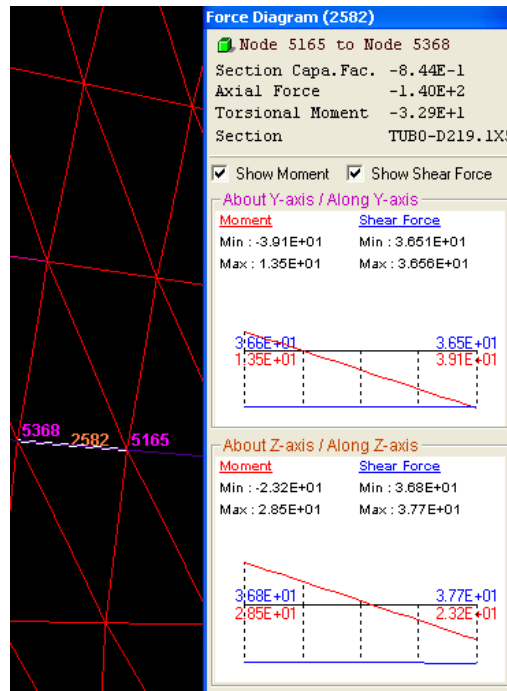
Μέλος 2582, μεσημβρινός, κύκλος φόρτισης 51 με load factor 2,55 (κόκκινο)

- Section Capacity Factor: -1,25
- Axial Force : - 488kN



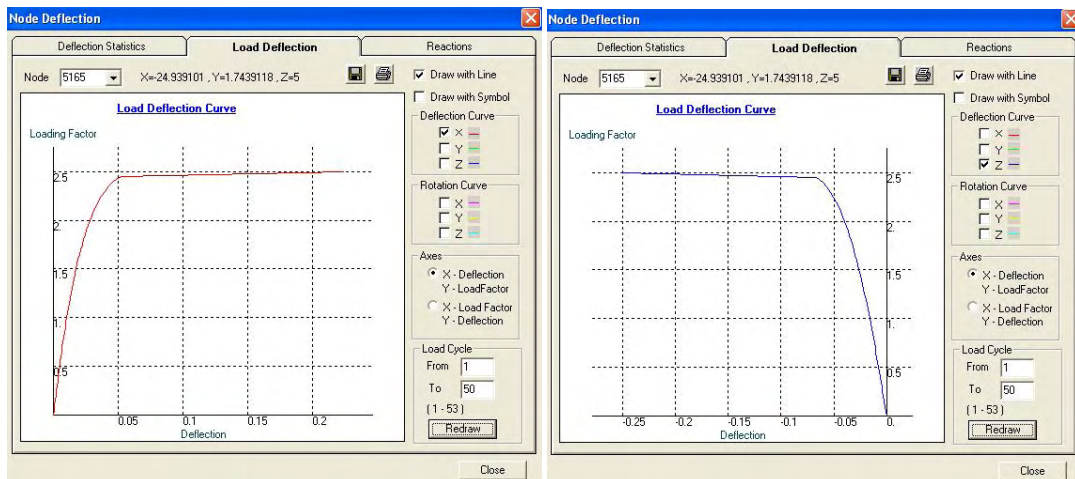
Μέλος 2582, μεσημβρινός, κύκλος φόρτισης 52 με load factor 2,60 (κόκκινο)

- Section Capacity Factor: -1,11
- Axial Force : - 345kN



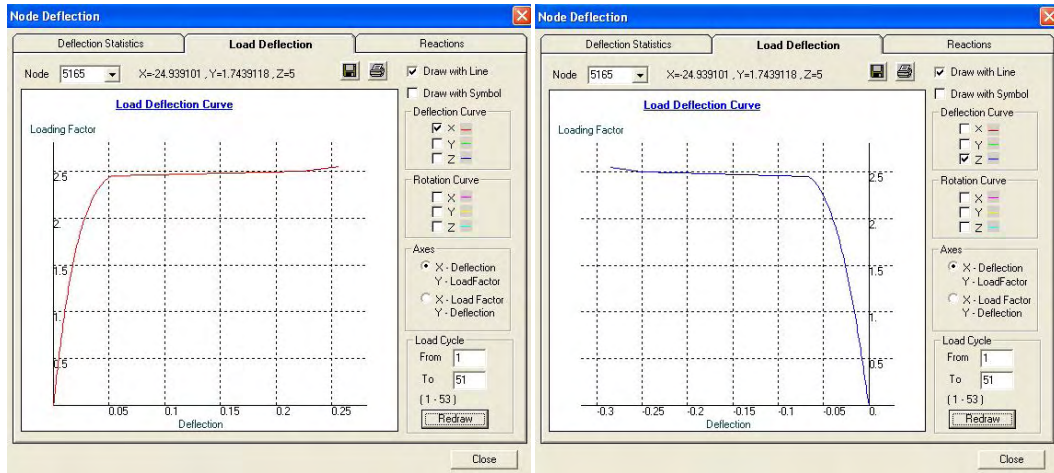
Μέλος 2582, μεσημβρινός, κύκλος φόρτισης 53 με load factor 2,65 (μωβ)

- Section Capacity Factor: -0,844
- Axial Force : - 140kN



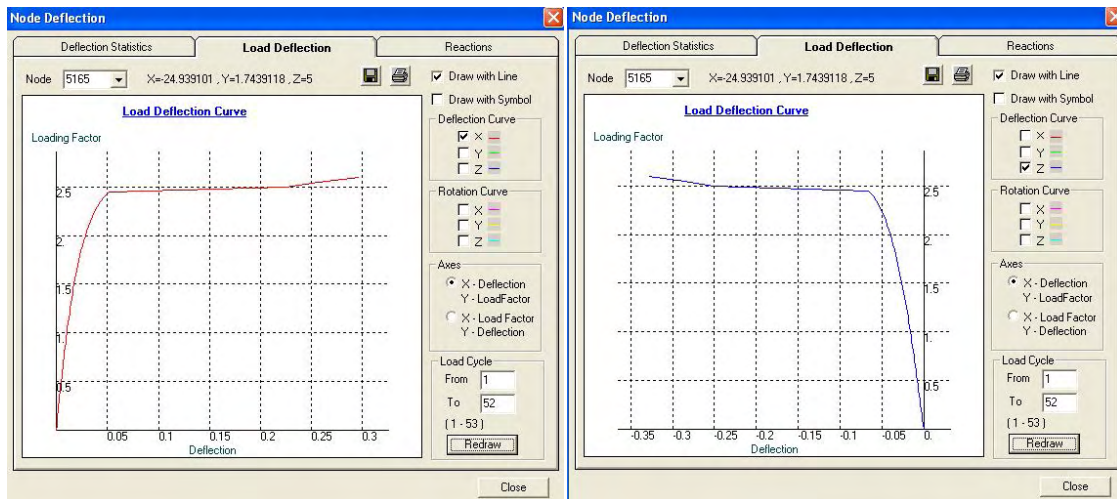
Η συμπεριφορά του κόμβου 5165 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 50

Σε αυτή την κατάσταση παρατηρούνται παρόμοια πράγματα όπως και πιο πάνω (βλέπε κόμβο 5248 σε όλα τα στάδια) με τη μόνη διαφορά ότι η καμπύλη είναι πιο τοξοειδής. Αυτό σημαίνει ότι αλλάζει συνεχώς κλίση με κάθε αύξηση του φορτίου και για αυτό έχει τη μορφή αυτή έως φυσικά τις τιμές κρίσιμου φορτίου όπου έχουμε το ίδιο φαινόμενο οριζόντιας κλίσης και συνεπώς μεγάλες μετατοπίσεις.



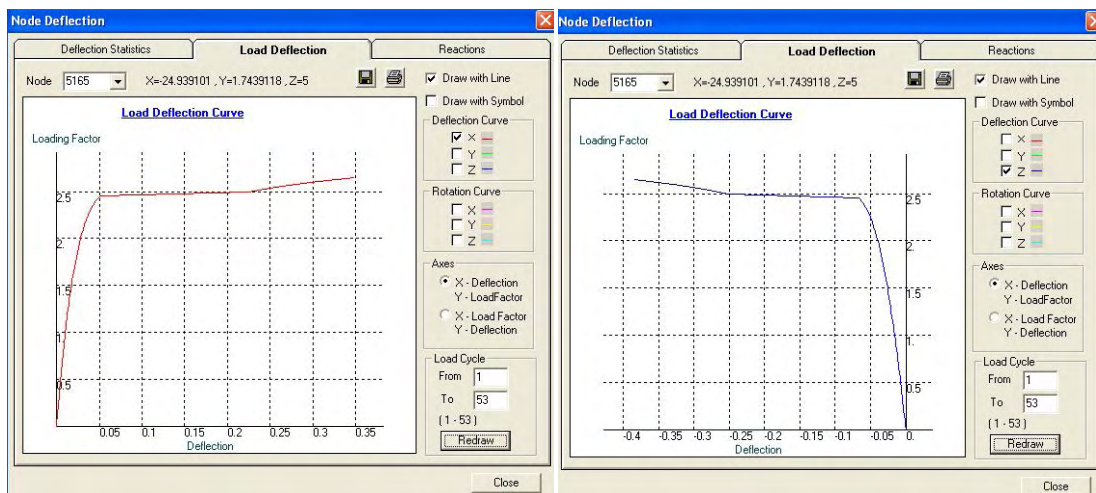
Η συμπεριφορά του κόμβου 5165 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 51

Ομοίως με πριν απλά αλλάζει κλίσει κοντά στην περιοχή κρίσιμου φορτίου.



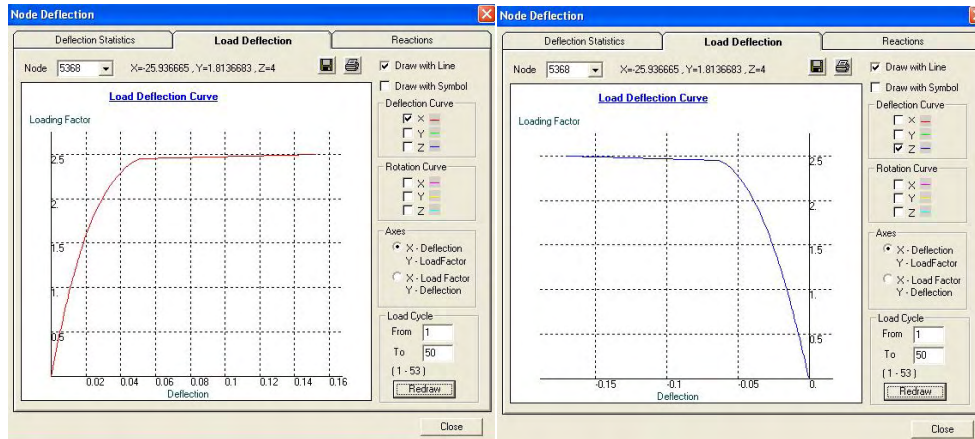
Η συμπεριφορά του κόμβου 5165 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 52

Και εδώ παρομοίως όπως αναφέρθηκε πιο πάνω.



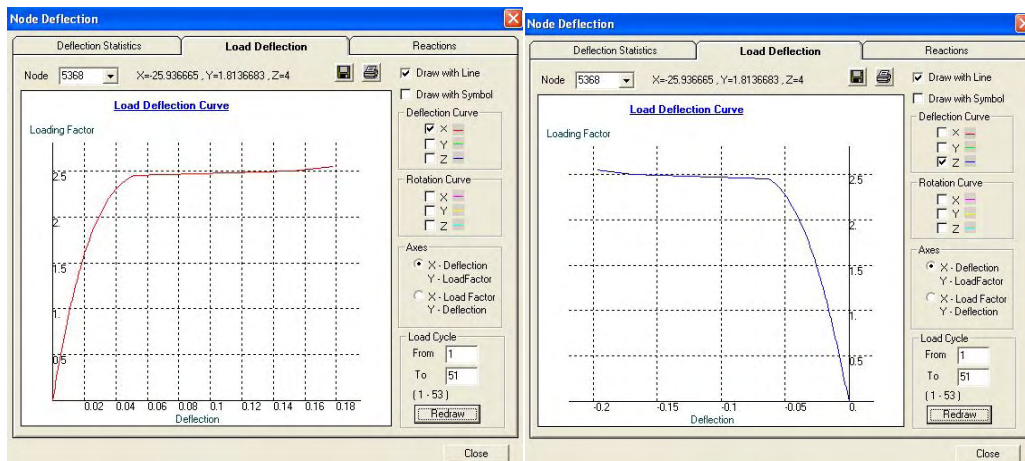
Η συμπεριφορά του κόμβου 5165 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 53

Και εδώ στην κατάρρευση διαπιστώνεται η ίδια συμπεριφορά του κόμβου για την αντίστοιχη κατάσταση όπως στον κόμβο 5248 στον 53 κύκλο.



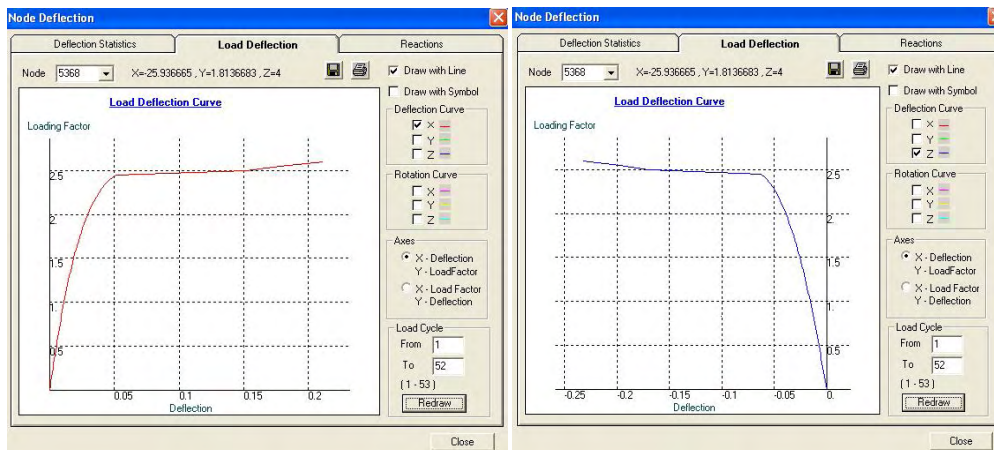
Η συμπεριφορά του κόμβου 5368 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 50

Η ανάλυση είναι πανομοιότυπη με τα παραπάνω όπως τον κόμβο 5165.



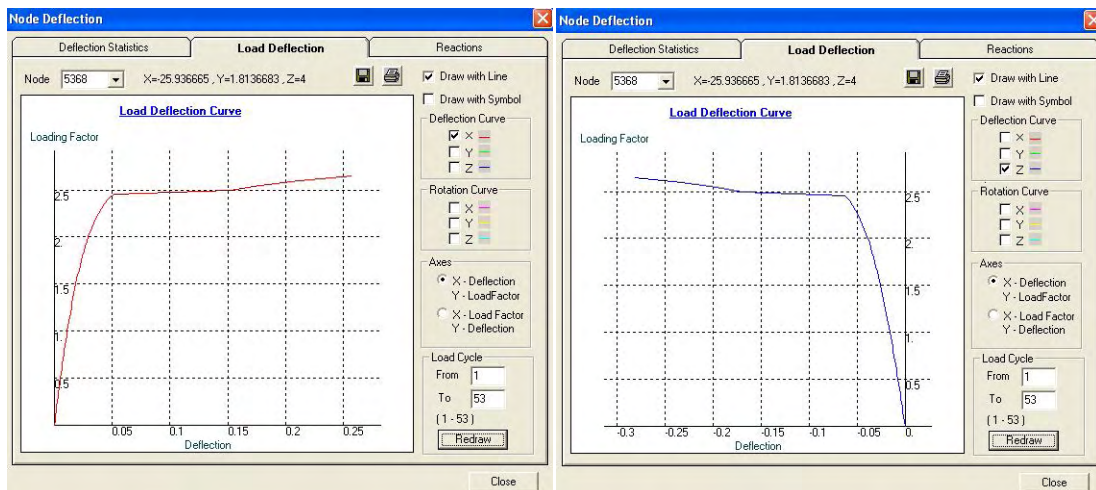
Η συμπεριφορά του κόμβου 5368 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 51

Αντίστοιχα και εδώ εξάγονται τα ίδια συμπεράσματα.



Η συμπεριφορά του κόμβου 5368 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 52

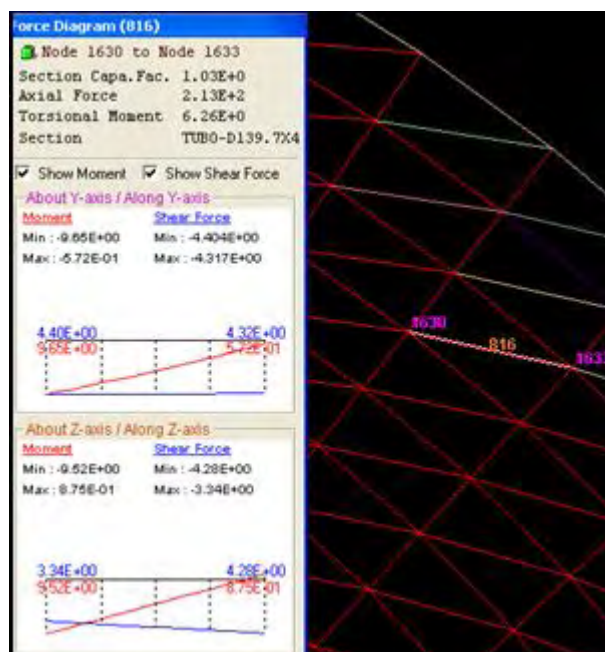
Ομοίως με τα προηγούμενα στην ανάλογη κατάσταση όπως 5165 για 52 κύκλο.



Η συμπεριφορά του κόμβου 5368 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 53

Εδώ παρατηρούνται τα ίδια με τον κύκλο 53 για το 5165 αλλά με πιο έντονη και γρήγορη αλλαγή της κλίσης της καμπύλης. Δηλαδή η αλλαγή έρχεται πιο γρήγορα εδώ, στο στάδιο της αστοχίας και για αυτό το λόγο η οριζόντια κλίση έχει μικρότερο πλάτος και μεγαλύτερη μετατόπιση κατά την αύξηση του φορτίου. Λογικό εάν σκεφτεί κάποιος ότι σε αυτό το στάδιο αναμένεται μετά από τις μέγιστες μετακινήσεις να αστοχήσει ο κόμβος αφού εξαντλήσει την αντοχή του.

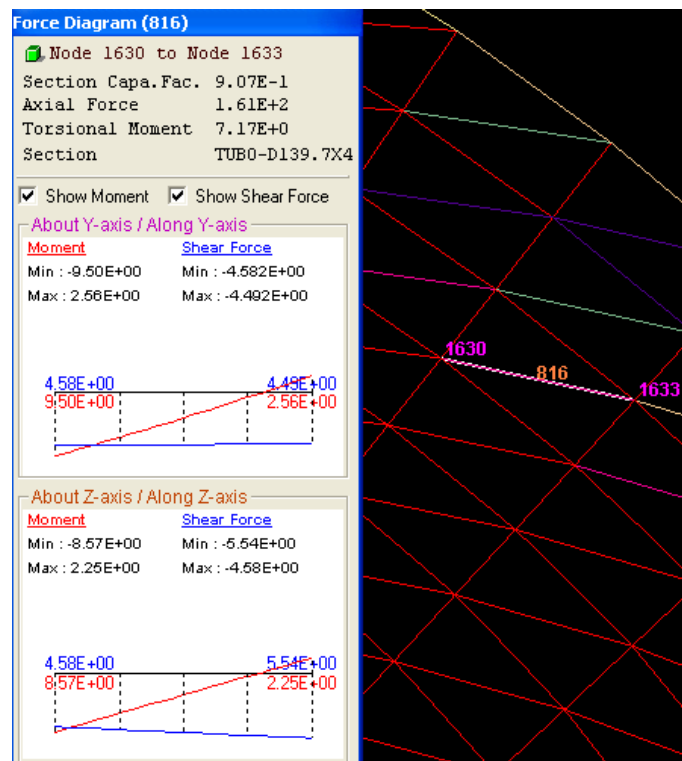
Με τη σειρά λοιπόν τώρα, θα παρουσιαστεί μια άλλη κατηγορία μέλους, στην οποία φαίνεται επίσης η ανακατανομή φόρτισης. Αυτό το στοιχείο είναι το ζεύγος των παρακάτω διαγώνιων.



Μέλος 816, διαγώνιος, κύκλος φόρτισης 50 με load factor 2,50 (κόκκινο)

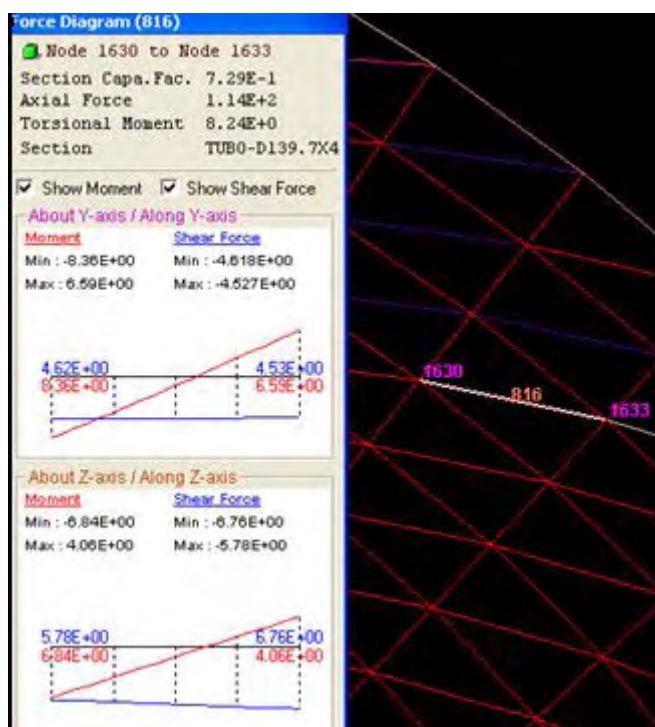
- Το μέλος αυτό ορίζεται από τους κόμβους 1630 και 1633.
- Section Capacity Factor: -1,03
- Axial Force : 213kN

Στα επόμενα σχήματα που θα ακολουθήσουν θα φαίνεται η άσπρη γραμμή του μέλους 816 όπως επελέχθη στο 50° κύκλο για να είναι ορατή η μικρό-μετακίνηση που δέχεται κατά την εξέλιξη της φόρτισης αλλά και η αλλαγή του χρώματος που δεικνύει την μετάβαση της φόρτισης στη αποφόρτιση.



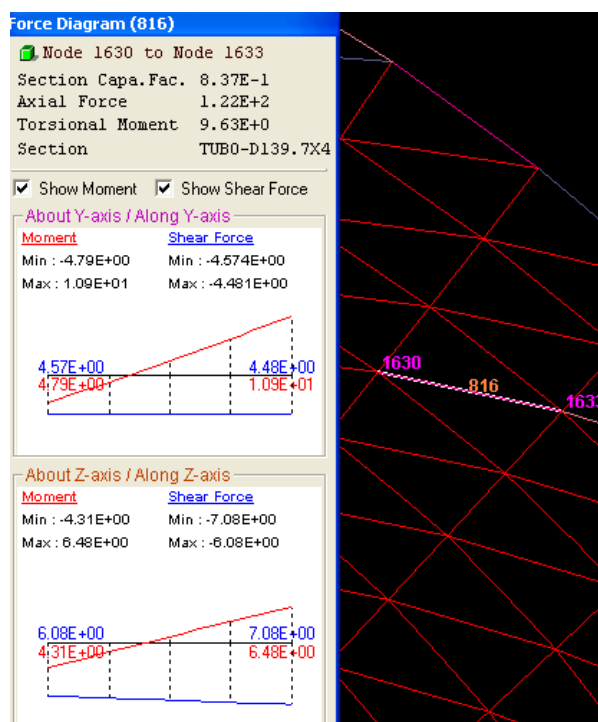
Μέλος 816, διαγώνιος, κύκλος φόρτισης 51 με load factor 2,55 (κοραλί)

- Section Capacity Factor: 0,907
- Axial Force : 161kN



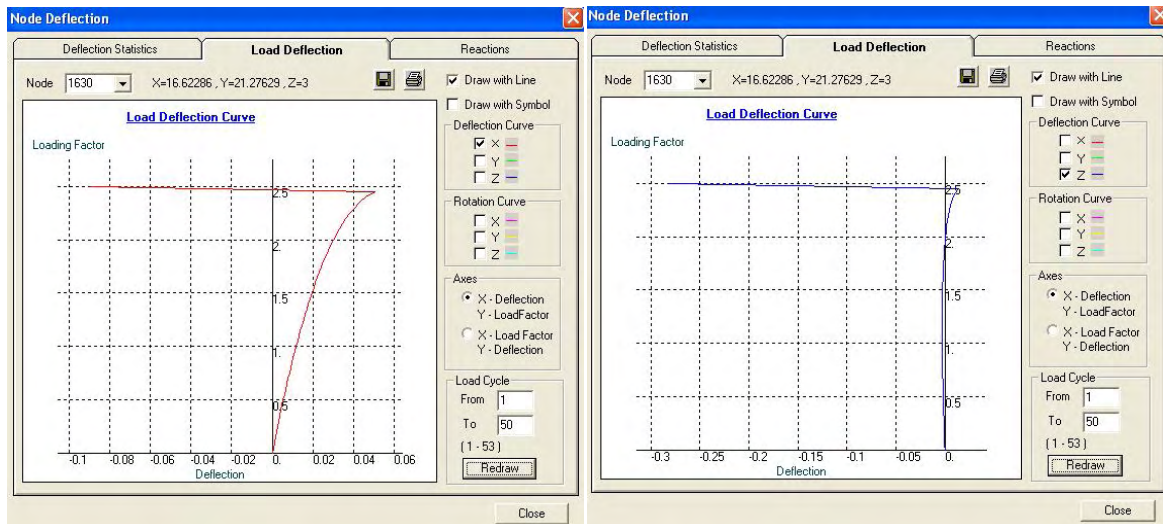
Μέλος 816, διαγώνιος, κύκλος φόρτισης 52 με load factor 2,60 (ροζ)

- Section Capacity Factor: 0,729
- Axial Force : 114kN



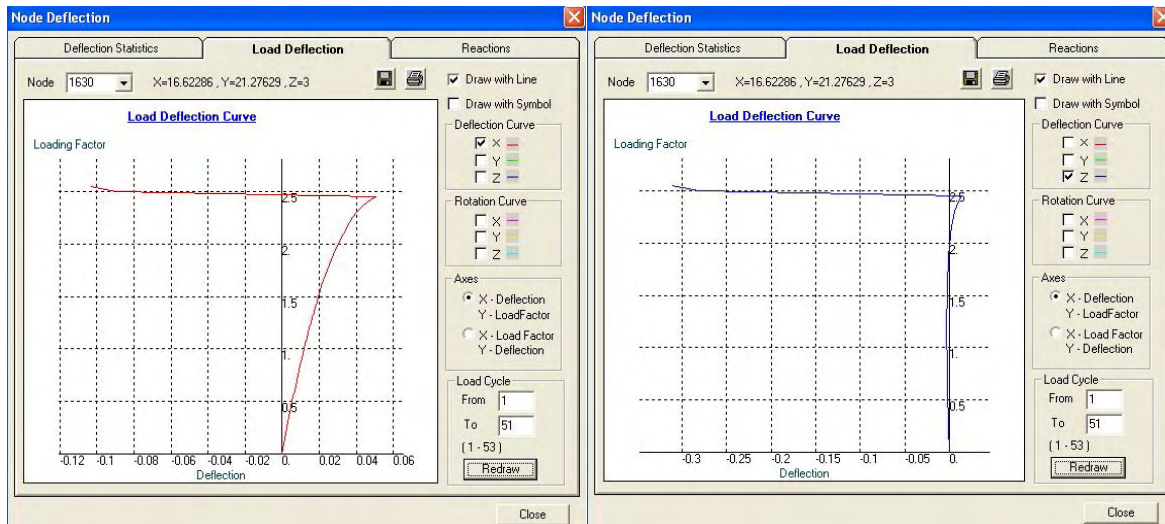
Μέλος 816, διαγώνιος, κύκλος φόρτισης 53 με load factor 2,65 (ροζ)

- Section Capacity Factor: 0,837
- Axial Force : 122kN



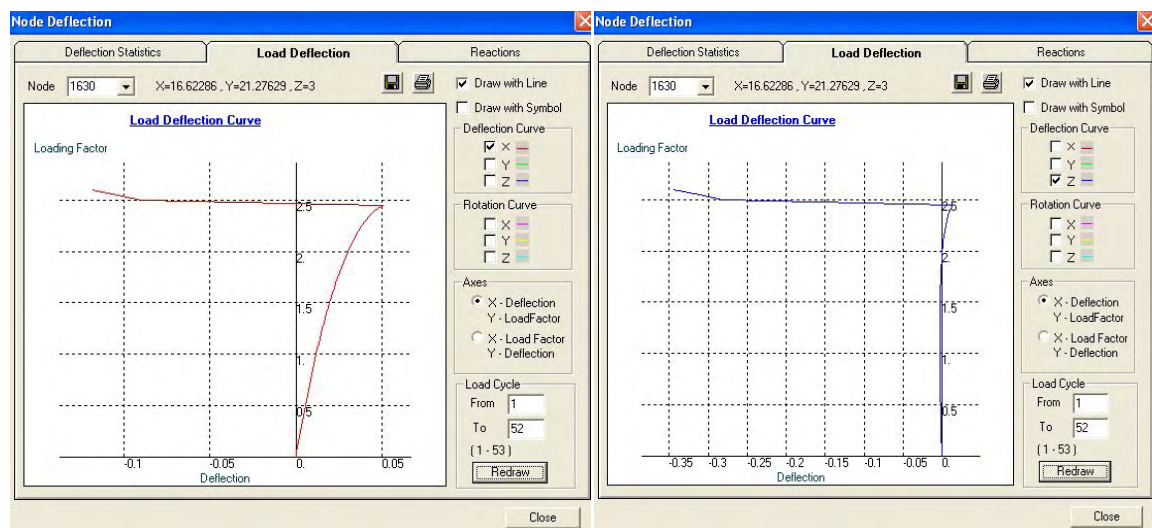
Η συμπεριφορά του κόμβου 1630 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 50

Σε αυτό το στάδιο φόρτισης παρατηρείται η συμπεριφορά του κόμβου με βάση τις μετακινήσεις του σε σχέση πάντα με την ένταση του φορτίου, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις με λίγο διαφορετικό τρόπο. Είναι φανερό ότι για τις τιμές πριν την περιοχή της παραμόρφωσης, ο κόμβος μετακινείται γραμμικά σε σχέση με την ένταση της φόρτισης και μάλιστα με καμπύλη μορφή και με πιο ομαλό τρόπο στη διεύθυνση x. Σε αυτό τον άξονα έχουμε την αύξηση της μετακίνησης προς μια φορά και κοντά στην τιμή κρίσιμου φορτίου περίπου στο 2,48 αρχίζει η μετατόπισή του κόμβου προς την αρχική του θέση. Περνάει την αρχική αμετακίνητη θέση του και συνεχίζει προς την αντίθετη πλευρά της μετατόπισής του με σχεδόν οριζόντια κλίση. Αυτό δεικνύει την τάση του να έχει μεγάλες μετακινήσεις για τις τιμές εκείνες κοντά στο κρίσιμο φορτίο. Στην άλλη διεύθυνση z, παρατηρείται η ίδια κατάσταση μόνο που εδώ μετατοπίζεται, για μικρές τιμές φορτίου, προς τα αριστερά με καμπύλη μορφή, για την τιμή φορτίου περίπου 0,50, στη συνέχεια με την ίδια ποιότητα διαγράμματος περνάει από την αρχική του θέση περίπου για τιμή φορτίου 2,00, συνεχίζει δεξιά και ενώ δείχνει πως θα καταλήξει προς εκείνη την μεριά, ξαφνικά γύρω στο 2,48 αλλάζει και πάλι φορά και με απότομη και σχεδόν οριζόντια κλίση στρέφεται προς την αριστερή και πάλι μεριά. Περνάει την αρχική του θέση και συνεχίζει αριστερά για μεγάλες τιμές μετακίνησης, κάτι που δηλώνει ολοφάνερα την έντονη σταδιακή φόρτιση και αποφόρτιση του κόμβου. Έτσι και το φαινόμενο της ανακατανομής έντασης γίνεται αντιληπτό μέσα από αυτή την συμπεριφορά του κόμβου στο συγκεκριμένο κύκλο φόρτισης.



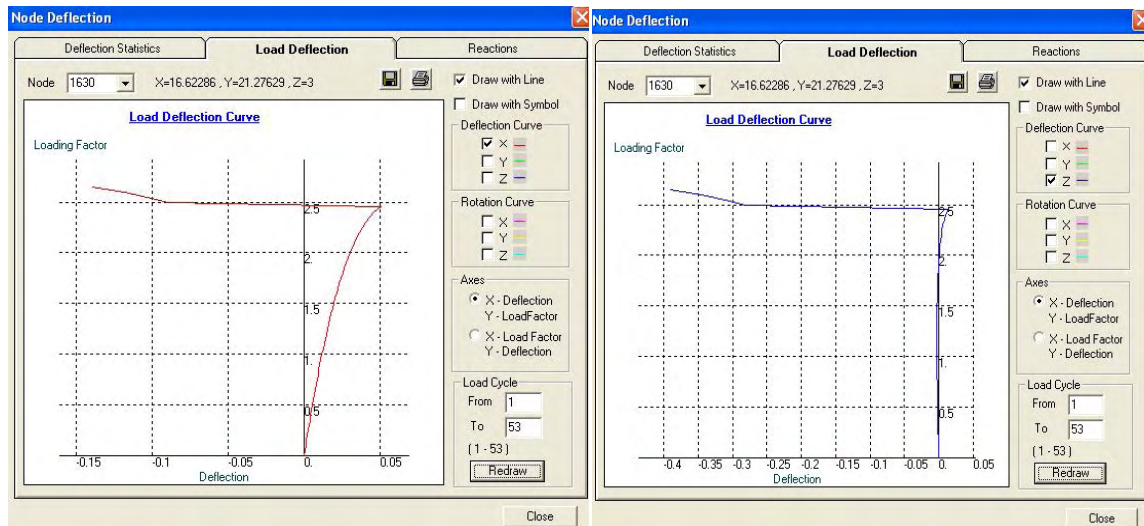
Η συμπεριφορά του κόμβου 1630 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 51

Ομοίως και σε αυτό το στάδιο παρατηρούνται τα ίδια πράγματα μόνο που και στις δυο διευθύνσεις, προς το τέλος της καμπύλης περίπου στην τιμή φόρτισης 2,53 συντελείται μια αλλαγή κλίσης προς τα πάνω που δηλώνει μικρή μετακίνηση σε σχέση με την αύξηση φορτίου.



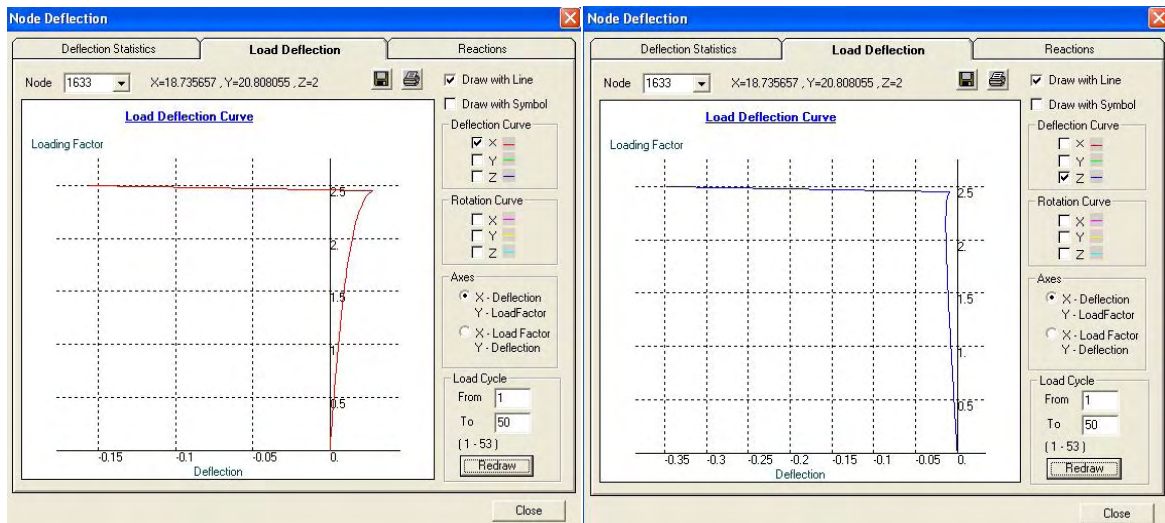
Η συμπεριφορά του κόμβου 1630 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 52

Με την ίδια λογική και παρατήρηση όπως ακριβώς πιο πάνω, προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα, ακόμα και με την ίδια εντόπιση διαφοράς στην κλίση της καμπύλης στο τέλος, που στην προκειμένη περίπτωση είναι ελάχιστα αυξημένη.



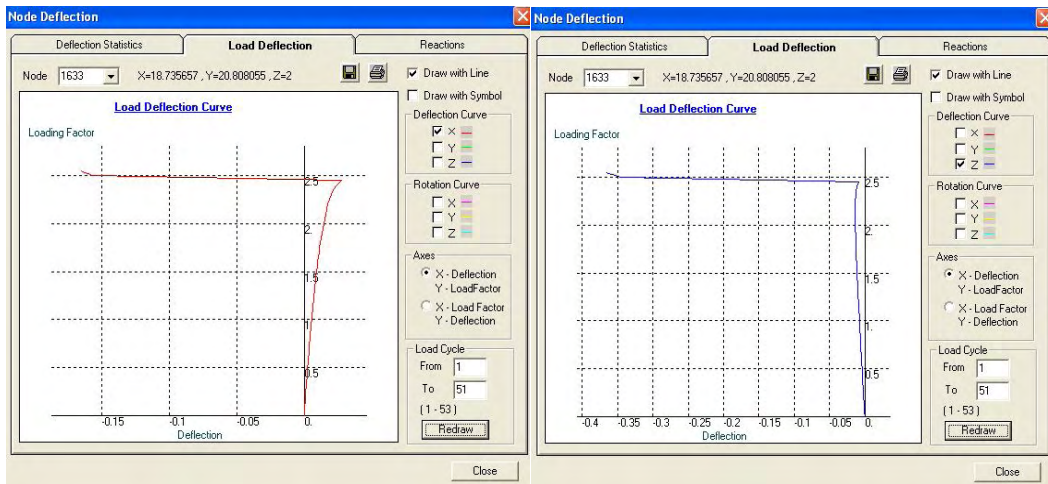
Η συμπεριφορά του κόμβου 1630 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 53

Και εδώ ισχύει η ίδια θεώρηση, απλά επιβεβαιώνεται η επιδίωξη ότι με την πάροδο της φόρτισης θα γίνεται όλο και πιο έντονη κλίση στο τέλος, δηλαδή μικρή μετακίνηση για την αύξηση φορτίου.



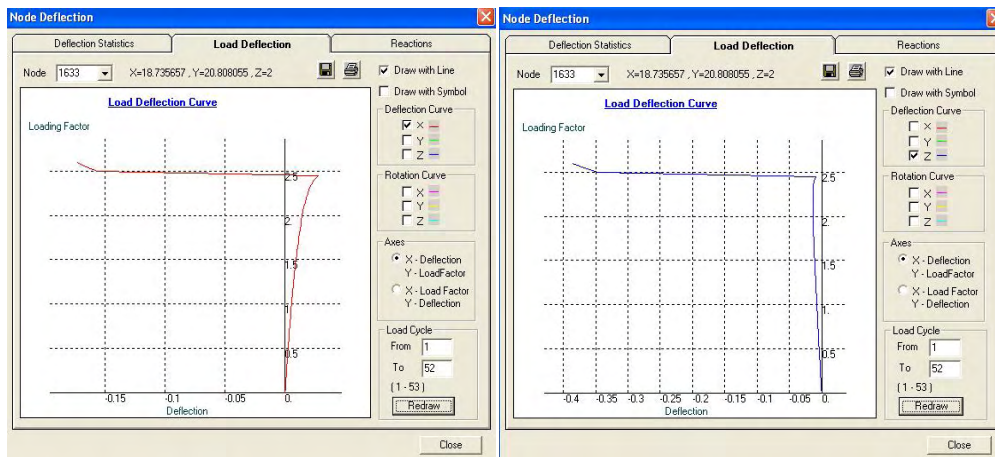
Η συμπεριφορά του κόμβου 1633 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 50

Η ανάλυση των συμπερασμάτων από την παρατήρηση του συγκεκριμένου διαγράμματος είναι παρόμοια με τα παραπάνω στην αντίστοιχη κάθε φορά φόρτιση (βλέπε κόμβο 1630 κύκλο 50).



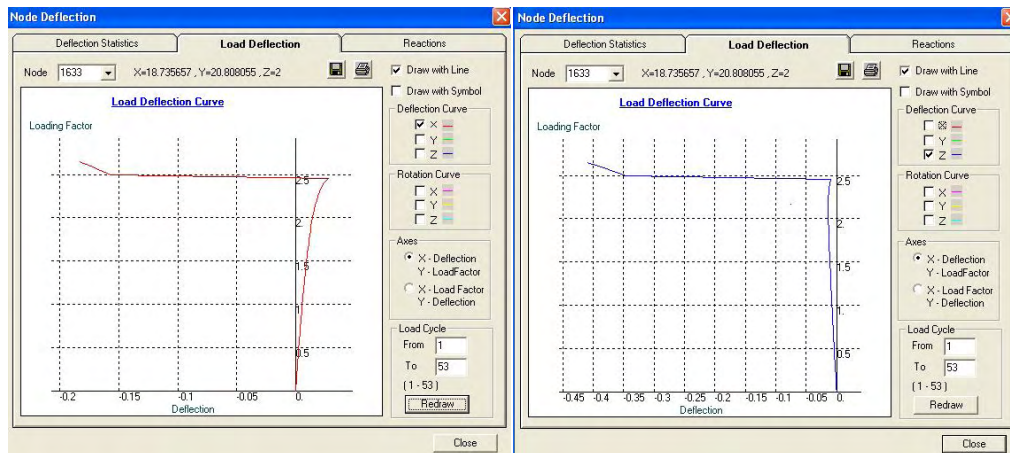
Η συμπεριφορά του κόμβου 1633 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 51

Όπως ακριβώς προηγήθηκε η ανάλυση και πιο πάνω.



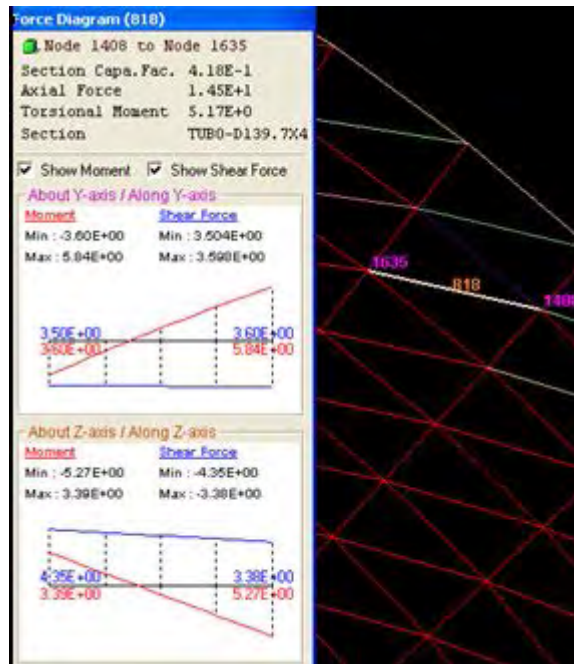
Η συμπεριφορά του κόμβου 1633 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 52

Ομοίως εξάγονται τα ίδια συμπεράσματα όπως ήδη αναφέρθηκαν πιο πάνω.



Η συμπεριφορά του κόμβου 1633 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 53

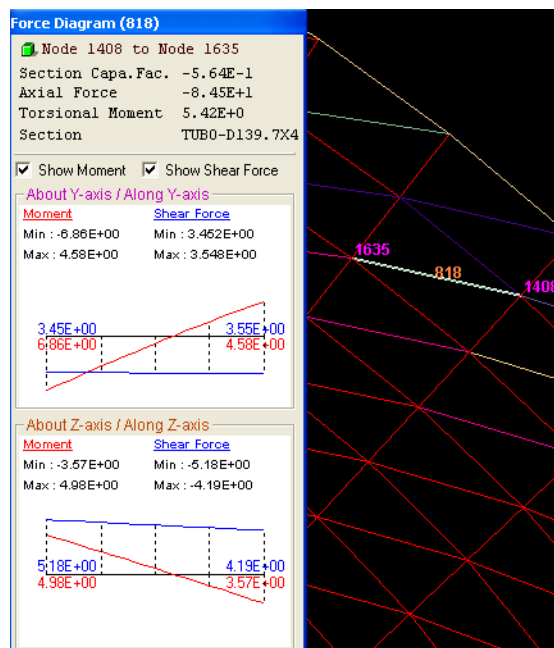
Παρομοίως με την περιγραφή του κόμβου 1630 στον ανάλογο κύκλο φόρτισης 53.



Μέλος 818, διαγώνιος, κύκλος φόρτισης 50 με load factor 2,50 (κίτρινο)

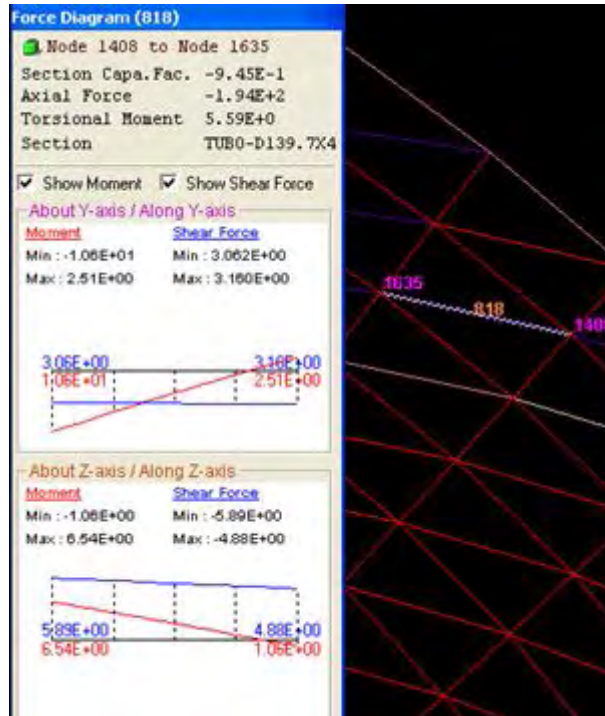
- Το μέλος αυτό ορίζεται από τους κόμβους 1408 και 1635.
- Section Capacity Factor: 0,418
- Axial Force : 145kN

Στα επόμενα σχήματα που θα ακολουθήσουν θα φαίνεται η άσπρη γραμμή του μέλους 818 όπως επελέγη στο 50^ο κύκλο για να είναι ορατή η μικρό-μετακίνηση που δέχεται κατά την εξέλιξη της φόρτισης αλλά και η αλλαγή του χρώματος που δεικνύει την μετάβαση της φόρτισης στη αποφόρτιση.



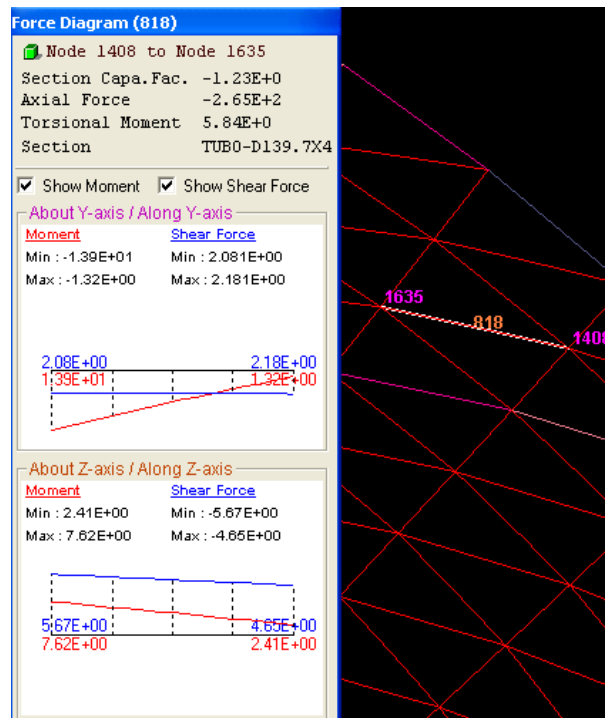
Μέλος 818, διαγώνιος, κύκλος φόρτισης 51 με load factor 2,55 (πράσινο)

- Section Capacity Factor: - 0,564
- Axial Force : - 84,5kN



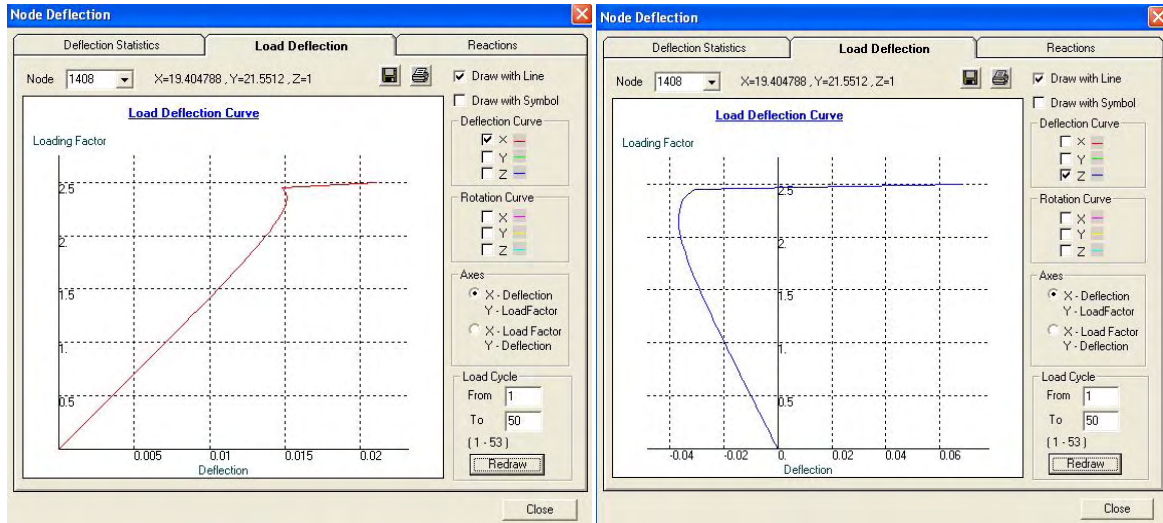
Μέλος 818, διαγώνιος, κύκλος φόρτισης 52 με load factor 2,60 (μωβ)

- Section Capacity Factor: - 0,945
- Axial Force : - 194kN



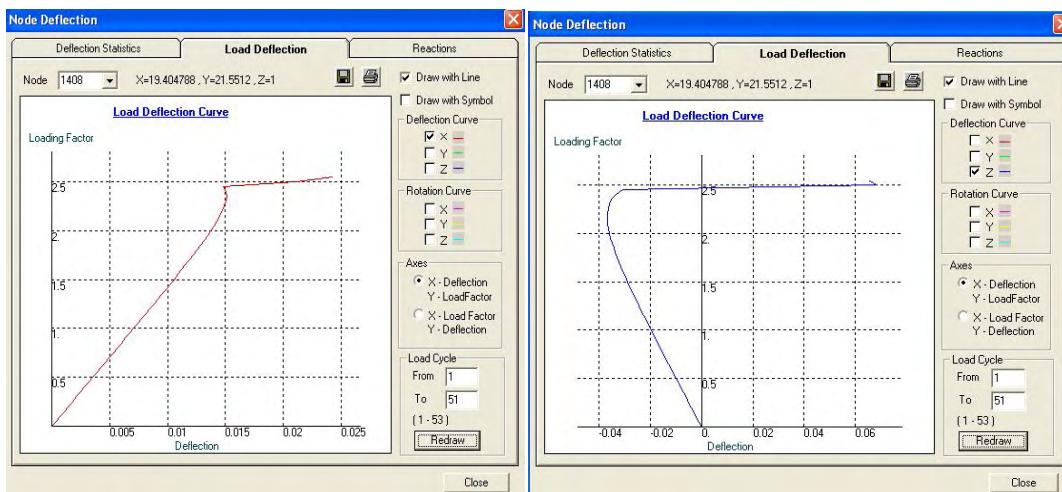
Μέλος 818, διαγώνιος, κύκλος φόρτισης 53 με load factor 2,65 (κόκκινο)

- Section Capacity Factor: - 1,23
- Axial Force : - 265kN



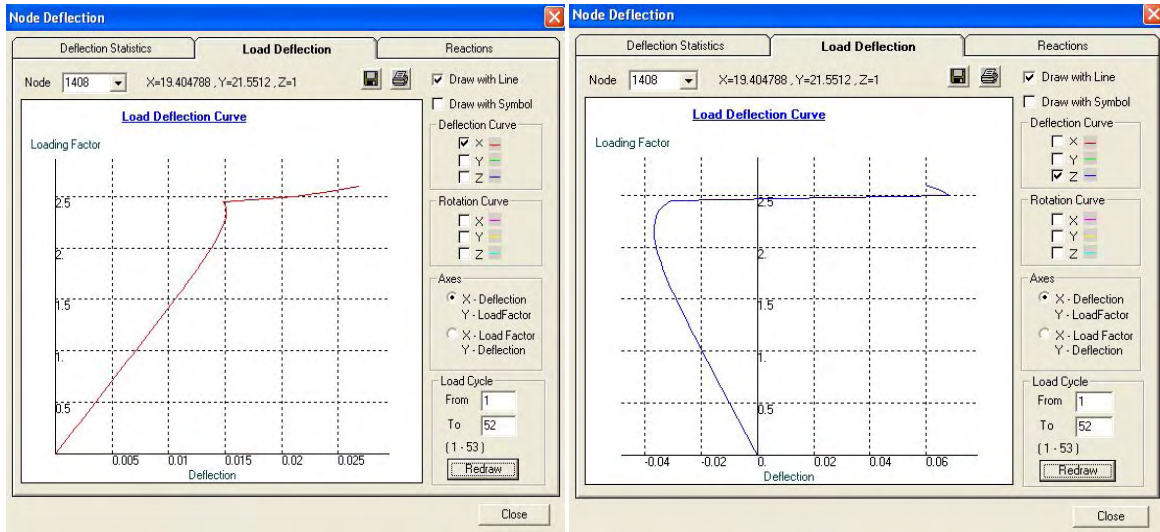
Η συμπεριφορά του κόμβου 1408 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 50

Για τον κόμβο 1408 στην διεύθυνση x, παρατηρείται ότι μετακινείται αρκετά σε σχέση με την φόρτιση και μάλιστα με μια γραμμική συμπεριφορά της καμπύλης. Κοντά στην τιμή του φορτίου περίπου 2,48 παρατηρείται μια τάση του κόμβου να επιστρέψει στην αρχική του θέση, όμως ξαφνικά η μετατόπιση έχει αντίθετη φορά με αποτέλεσμα να κινείται στην αρχική του κατεύθυνση. Στον άξονα z παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά για τις αρνητικές τιμές μετατόπισης με κορύφωση της καμπύλης μετατοπίσεων στο φορτίο 2,48 όπου και αλλάζει φορά, περνάει όπως αναμενόταν από την αρχική του θέση και συνεχίζει προς την αντίθετη φορά. Οι μετατοπίσεις από εκείνο το σημείο και ύστερα είναι πολύ έντονες για την αύξηση της φόρτισης και για αυτό η καμπύλη είναι σχεδόν οριζόντια, πράγμα που σημαίνει ότι συνεχίζει να μετατοπίζεται ο κόμβος με μεγάλη ένταση μέχρι να φτάσει την αστοχία του.



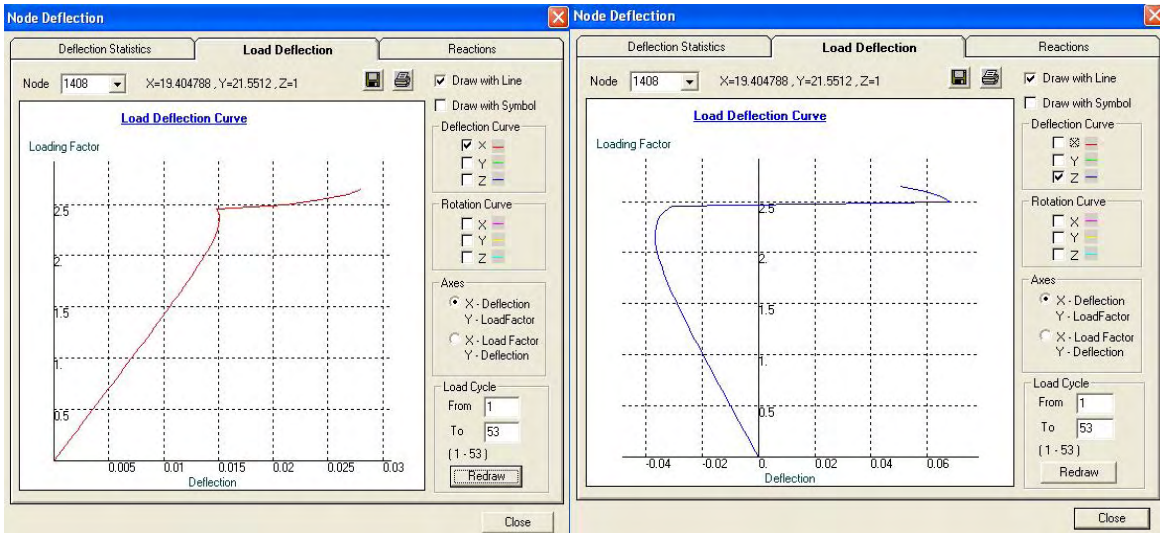
Η συμπεριφορά του κόμβου 1408 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 51

Εδώ παρατηρούνται σχεδόν τα ίδια πράγματα με τη μόνη διαφορά στην z διεύθυνση όπου φαίνεται η αρχή μιας αλλαγής κλίσης στο τέλος της καμπύλης που θα φανεί στον επόμενο κύκλο φόρτισης και θα αναλυθεί ακριβώς παρακάτω.



Η συμπεριφορά του κόμβου 1408 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 52

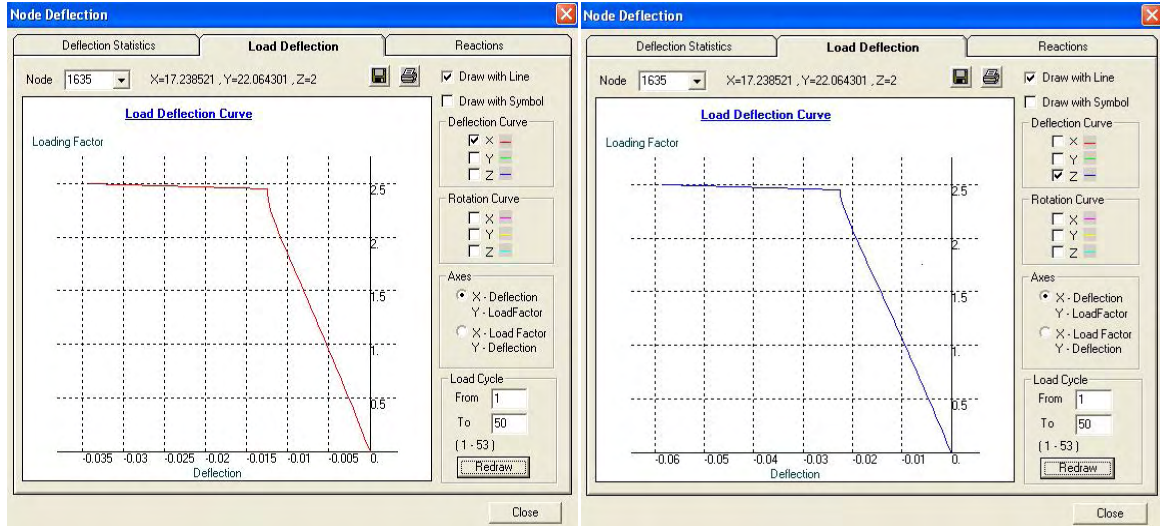
Όπως ειπώθηκε παραπάνω προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα αλλά με πιο έντονο το φαινόμενο της αλλαγής κλίσης της καμπύλης στο τέλος. Δηλαδή ο κόμβος προσπαθεί να επανέλθει στην αρχική του θέση και για αυτό αλλάζει φορά η μετακίνησή του, αλλά λόγω του κρίσιμου φορτίου κατάρρευσης όπως θα δούμε στον επόμενο κύκλο δεν προλαβαίνει να το κάνει.



Η συμπεριφορά του κόμβου 1408 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 53

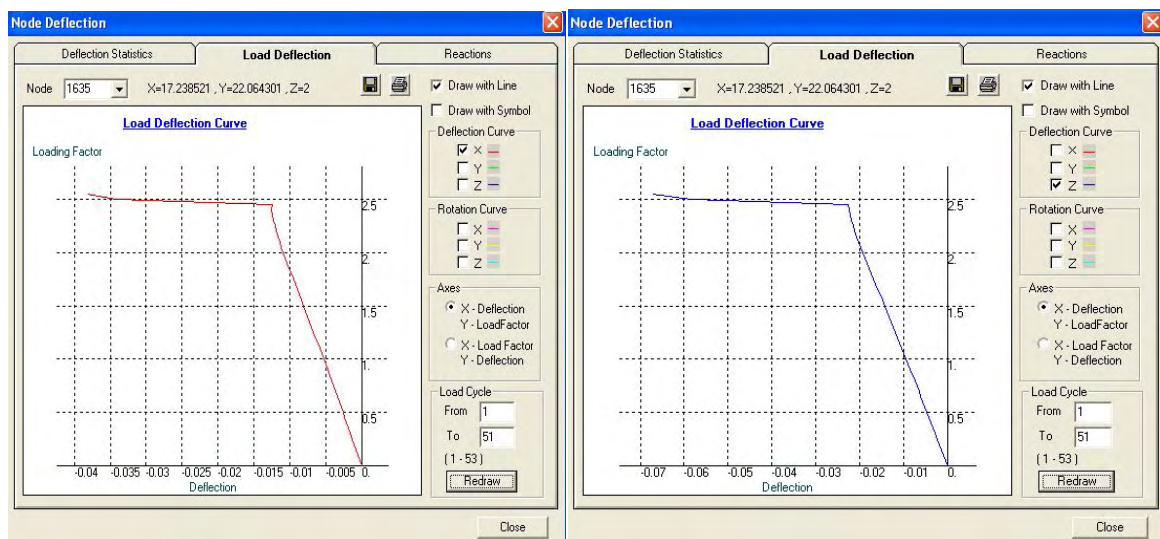
Σε αυτό το κύκλο επιβεβαιώνεται η παραπάνω θεώρηση, ότι τα συμπεράσματα είναι ίδια όπως και στον 50,51,52 κύκλο αλλά με τη διαφορά στην z διεύθυνση να συμβαίνει αλλαγή κλίσης της καμπύλης που δηλώνει την συμπεριφορά του κόμβου να προσπαθεί

να επανέλθει στην αρχική του αμετακίνητη θέση. Όμως επειδή επέρχεται πρώτα η κατάρρευση του φορέα δεν καταφέρνει να περάσει από την αρχική του κατάσταση και για αυτό η καμπύλη διακόπτεται στο σημείο της τιμής του φορτίου 2,58 περίπου, όπως και αναμενόταν.



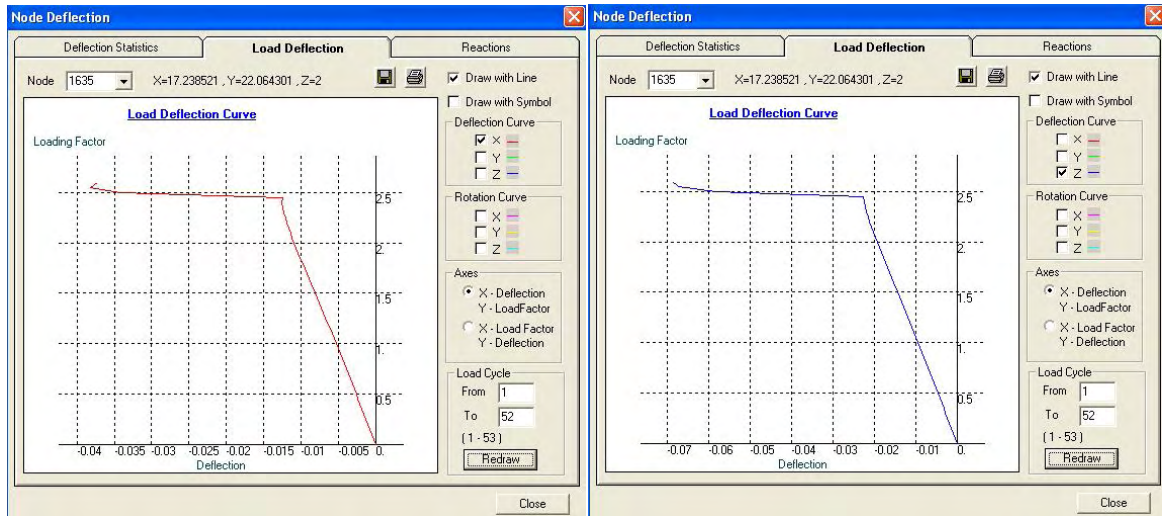
Η συμπεριφορά του κόμβου 1635 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 50

Για το διάγραμμα του κόμβου που φαίνεται, παρατηρείται ότι η μετατόπισή του είναι γραμμική προς τη μια κατεύθυνση και όπως και σε ανάλογες περιπτώσεις που ήδη αναφέρθηκαν κοντά στην περιοχή παραμορφώσεων γίνεται αλλαγή της κλίσης με οριζόντια μάλιστα μορφή. Αυτό σημαίνει ότι για τιμές φορτίου κοντά στην αστοχία, παρουσιάζει ο κόμβος την ίδια συμπεριφορά, δηλαδή μεγάλες μετακινήσεις μέχρι να έρθει η κατάρρευση του φορέα.



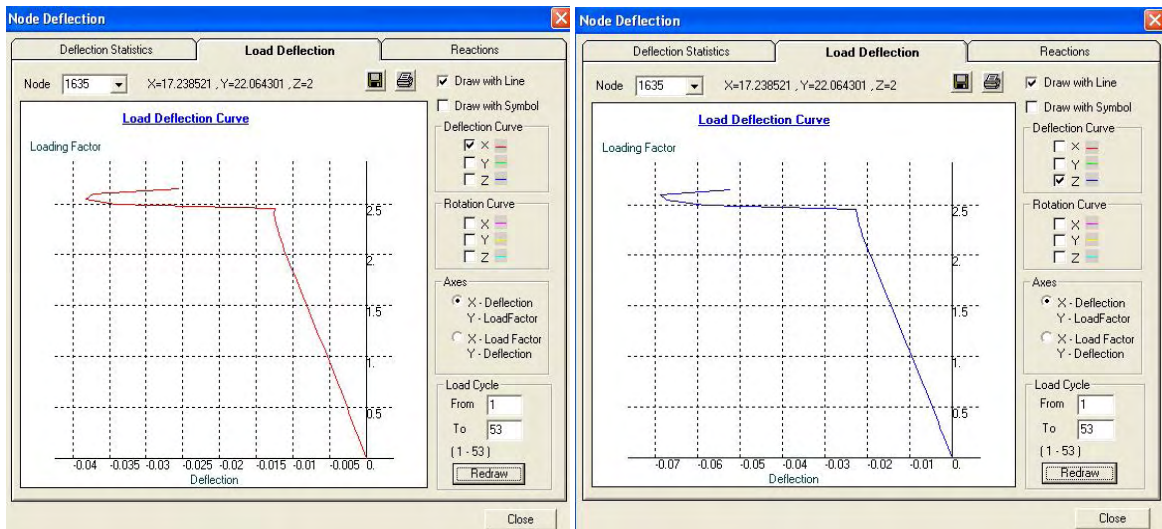
Η συμπεριφορά του κόμβου 1635 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 51

Ομοίως και εδώ φαίνεται η αντίστοιχη κατάσταση της μετακίνησης του κόμβου με τη διαφοροποίηση στην περιοχή τιμών φορτίου πάνω από 2,50 όπου παρατηρείται αλλαγή κλίσης κάτι που θα φανεί πιο έντονα στο παρακάτω στάδιο.



Η συμπεριφορά του κόμβου 1635 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 52

Είναι φανερό όπως ειπώθηκε πριν ότι μετά την τιμή φορτίου 2,50 η καμπύλη αλλάζει κλίση και μάλιστα πάει να αλλάξει φορά μετακίνησης προς την αντίθετη. Δηλαδή με την πάροδο της φόρτισης στο συγκεκριμένο κύκλο 52 έχουμε την πορεία της μετακίνησης του κόμβου προς την αρχική του κατάσταση, κάτι που θα δούμε ακριβώς στο κύκλο 53 όπου παρουσιάζεται παρακάτω.



Η συμπεριφορά του κόμβου 1635 (κατά x, κατά z) στο κύκλο 53

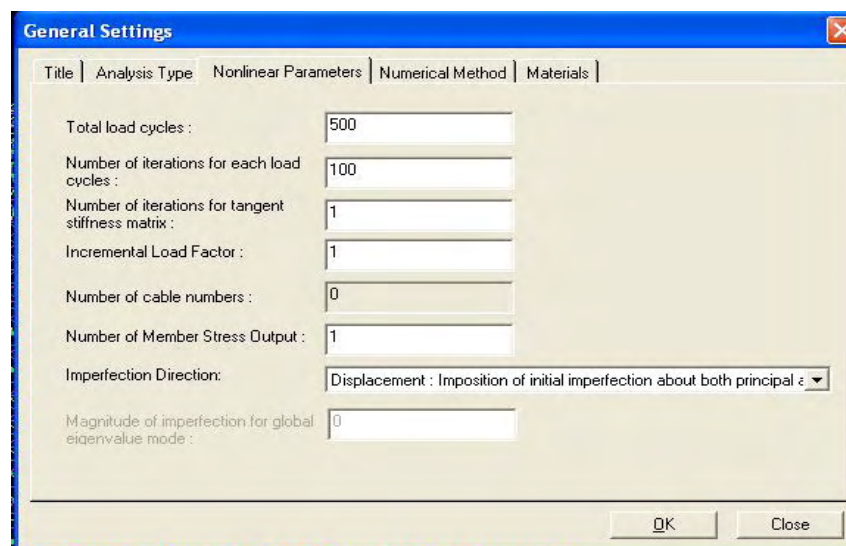
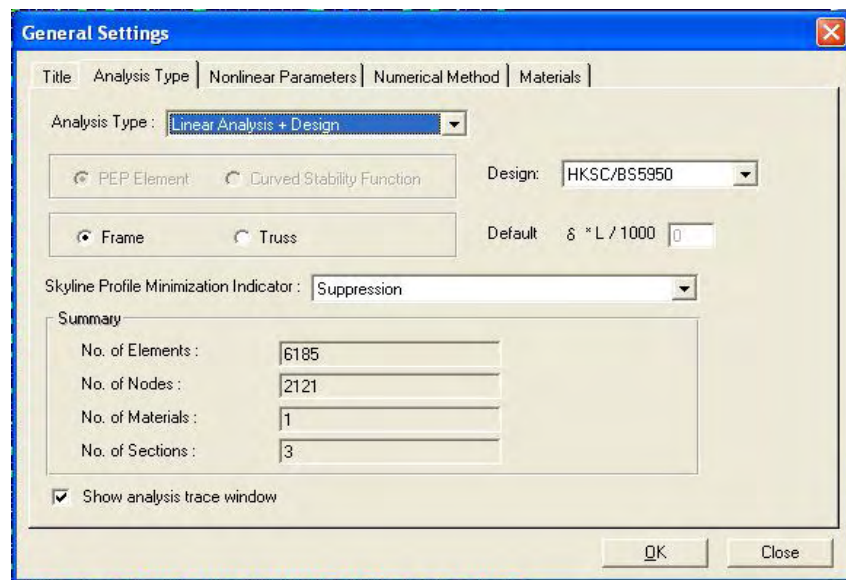
Τελικώς αποδεικνύεται από το διάγραμμα ο ισχυρισμός, ότι ο κόμβος έχει μετακίνηση προς την αρχική του θέση και μάλιστα με έντονη αλλαγή της κλίσης προς τα δεξιά. Για μικρές αλλαγές φορτίου παρατηρούνται μεγάλες μετατοπίσεις προς την αρχική του θέση, κάτι που τελικά δεν πραγματοποιείται λόγω της κατάρρευσης του φορέα. Δηλαδή

παρατηρείται ότι σε άλλες συνθήκες ή καλύτερα για άλλες τιμές αύξησης φορτίου, ο κόμβος θα πέρναγε από την αρχική του απαραμόρφωτη θέση και θα συνέχιζε την μετακίνησή του προς εκείνη την κατεύθυνση. Αντιθέτως τώρα σταματά στο φορτίο κατάρρευσης του φορέα περίπου στο 2,60 όπως και φαίνεται από την μορφή του διαγράμματος.

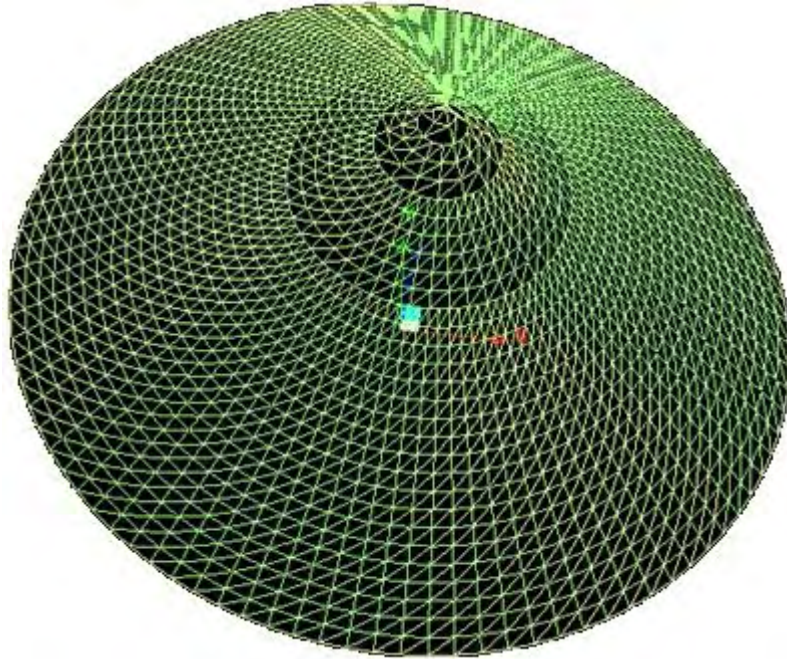
7. Γραμμική ανάλυση του θόλου Schwedler

7.1. Η διαδικασία της ανάλυσης, linear analysis

Όπως και στην ανελαστική διαδικασία, έτσι και εδώ παρουσιάζονται πολύ επιγραμματικά τα βασικά βήματα της ελαστικής ανάλυσης.



7.2. Αποτελέσματα στατικότητας του θόλου



Σχήμα 7.1 : Τρισδιάστατη απεικόνιση θόλου για linear analysis

Παρατηρείται ότι η κατασκευή είναι σε θέση να παραλάβει άνετα τα φορτία και να μην καταρρεύσει, με βάση την ελαστική ανάλυση, όπως εξήχθησαν από το πρόγραμμα ύστερα από τις ανάλογες διαδικασίες. Είναι φανερό ότι όλα τα μέλη του φορέα αντέχουν τις φορτίσεις που επεβλήθησαν με την μέθοδο της γραμμικής ανάλυσης. Ειδικότερα, μεγάλο πλήθος διαγωνίων έχουν περάσει στην επόμενη φάση αντοχής τους, εξού και το κίτρινο χρώμα, όπως φαίνεται στο σχήμα. Αυτό είναι λογικό καθώς η ομάδα με την λεπτότερη διατομή θα έχει και την μεγαλύτερη καταπόνηση. Αλλά και οι δακτύλιοι στη βάση του θόλου είναι στην ίδια κατάσταση παραμόρφωσης (κίτρινο χρώμα), εφόσον είναι και οι στηρίξεις σε απευθείας σύνδεση μαζί τους. Γενικά μικρός αριθμός μελών έχει υποστεί παραμόρφωση, άρα και τα κρίσιμα στοιχεία που αποτελούν το φορέα είναι της ίδιας κλίμακας παραμόρφωσης. Οπότε μπορεί κανείς να πει πως δεν συμβάλλουν όλα τα μέλη με τον ίδιο αποτελεσματικό τρόπο στην στατική συμπεριφορά του θόλου, πράγμα που μάλλον αποφεύγεται εφόσον είναι θεμιτό μια συνοχή στα αποτελούμενα μέλη, με πλήρη συνεργασία τους στην κατάσταση παραμόρφωσης, δηλαδή επιδιώκεται ανακατανομή των αναπτυσσόμενων τάσεών τους.

7.3. Συγκεντρωτικά στοιχεία σύγκρισης, ελαστικής και ανελαστικής ανάλυσης.

Προφανώς λοιπόν επιδιώκεται να διενεργείται ανάλυση με ανελαστική συμπεριφορά, λόγω των μεγαλύτερων παραμορφώσεων που παρατηρούνται στους αντίστοιχους συνδυασμούς φορτίσεων με αυξημένο αριθμό βημάτων, έως την τελική κατάσταση κατάρρευσης. Παρουσιάζεται το φαινόμενο της ανακατανομής τάσεων που βοηθάει και ενισχύει την κατασκευή στα διάφορα στάδια παραμόρφωσης του φορέα. Επιπλέον φαίνεται με πιο κατανοητό τρόπο ποια μέλη είναι εκείνα, τα οποία αναμένεται να αστοχήσουν πρώτα και με ποιο τρόπο. Έτσι προλαμβάνονται οι οριακές καταστάσεις αστοχίας και ελέγχονται, οριοθετώντας την αντοχή η οποία επιδιώκεται στην κατασκευή.

8. Βιβλιογραφία

An American National Standard ANSIAISC 360-05., (2005) , “Specification for Structural Steel Buildings”.

R .Shankar Nair.,(2005), “Stability Analysis and the 2005 AISC Specification”, Modern Steel Construction.

R .Shankar Nair ., (2009), “A Model Specification for Stability Design by Direct Analysis”, Engineering Journal, First Quarter.

R .Shankar Nair ., (2005) , “Stability and Analysis”, Modern Steel Construction.

John D .Holmes.,(2001), “Wind Loading of structures”, Taylor and Francis e-Library.

Z.Y. Shen, G.Q.LI and S.L Chan, (2005), School of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering.

Saka MP, Kameshki ES.Optimum design of nonlinear elastic framed domes.

Advances in Engineering Software 1998;29(7_9):519_28.

Makowshi ZS. Analysis, design and construction of braced domes. Granada

Publishing Ltd.; 1984.

Coates RC, Coutie MG, Kong FK. Structural analysis. UK: Thomas Nelson & Sons

Ltd.; 1972.

Saka MP. Optimum geometry design of geodesic domes using harmony search

algorithm. Advances in Structural Engineering 2007;10:595_606.

Saka MP. Optimum topological design of geometrically nonlinear single layer

latticed domes using coupled genetic algorithm. Computers and Structures

2007;85:1635_46.

Task Committee on Latticed Structures of the Committee on Special Structures of the Committee on Metals of the Structural Division. Latticed structures:

state-of-the-art report; *ASCE J. Structural/Div.* Vol 102, No ST11 11976)

Çarbaş S, Saka MP. A harmony search algorithm for optimum topology design of single

layer lamella domes, *Proceedings of the Ninth International Conference on*

Computational Structures Technology, Ed BHV Topping, Athens-Greece, 2-5

September, Civil-Comp Press , 2008.

Kameshki EK, Saka MP. Genetic algorithms steel frames with various semi-rigid computers and structures, *Journal of Constructional Steel Research*, **59**(2003)109-34.

Saka MP, Hayalioglu MS. Optimum design of geometrically nonlinear elastic plastic steel frames, *Journal of Computers and Structures*, **38**(1991)329-44.

Saka MP. Optimum Geometry Design of Geodesic Domes Using Harmony Search Algorithm, *Advances in Structural Engineering*, **10**(2007) 595-606.

Saka MP. Optimum topological design of geometrically nonlinear single layer latticed domes using coupled genetic algorithm, *Computers and Structures*, **85**(2007)1635-46.

112 S. Çarbaş and M.P. Saka

LRFD-AISC, Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design, Metric Conversion of the Second Edition, AISC, Vol.I and II, 1999.

Geem ZW. Optimal cost design of water distribution networks using harmony search, *Journal of Engineering Optimization*, **38**(2006) 259-280.

MP Saka. Optimum design of steel sway frames to BS5950 using harmony search algorithm, *Journal of Constructional Steel Research*, (Accepted for publication), 2008.

Majid KI. Nonlinear Structures, *Butterworth*, 1972.