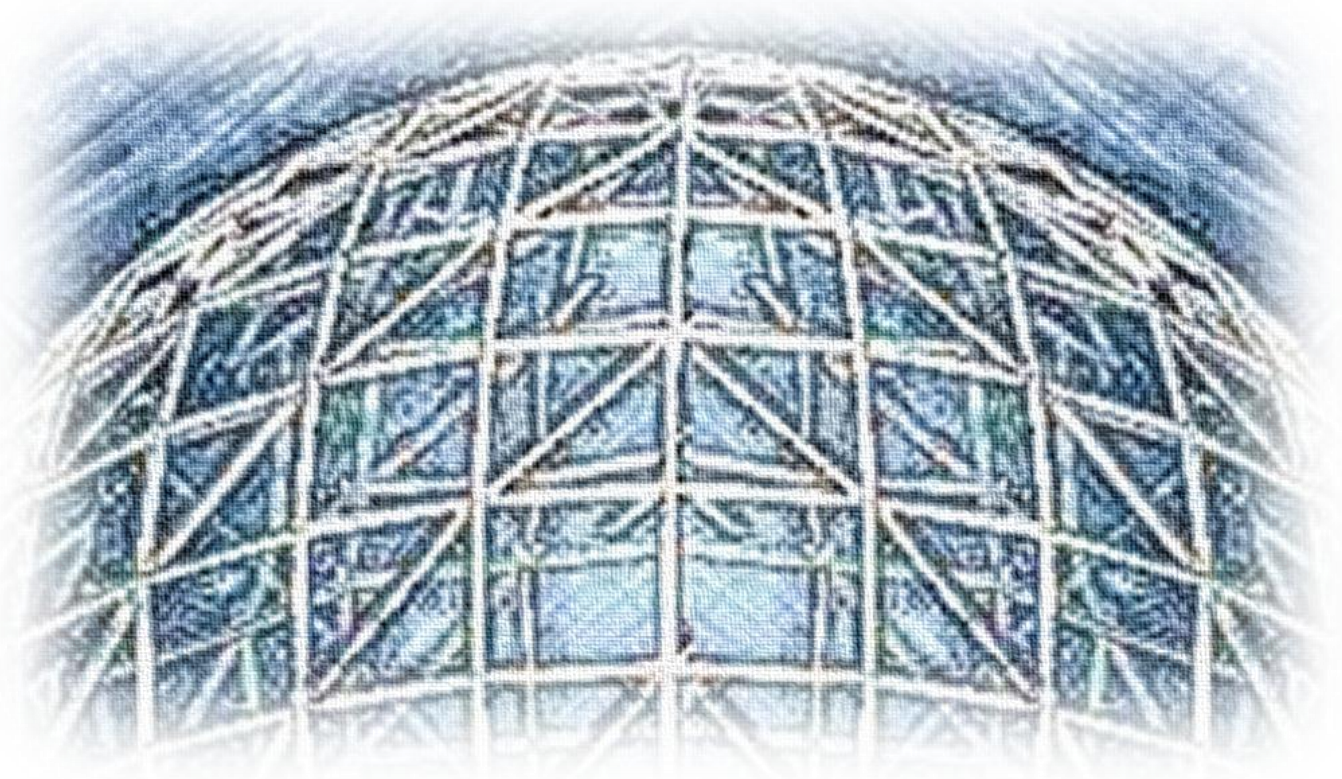




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΜΟΝΟΣΤΡΩΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΤΩΝ ΘΟΛΩΝ



Διπλωματική Εργασία
Στέφανος Κουταλιανός

ΕΜΚ ΔΕ 2015 40

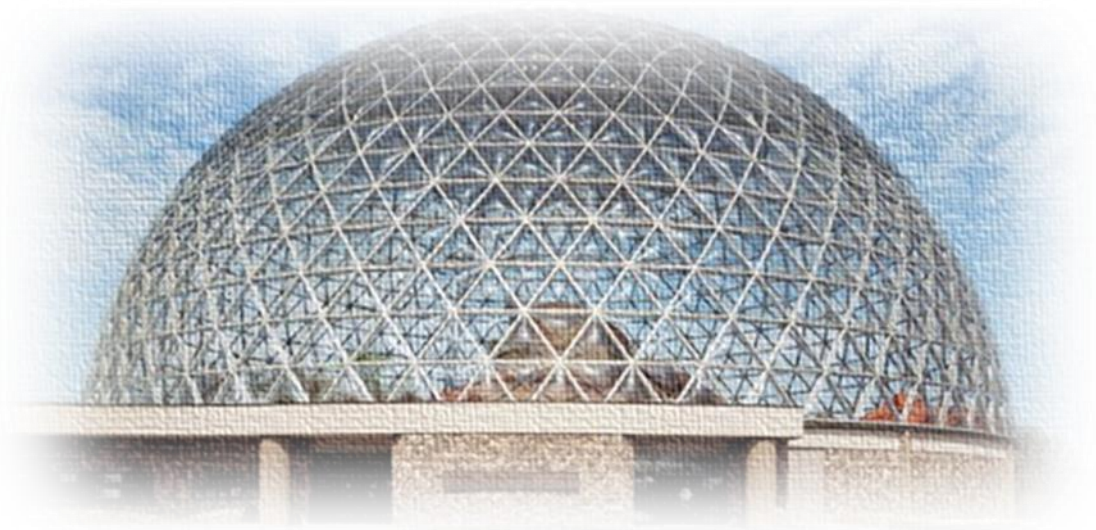
Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ
Συνεπιβλέπουσα: Μαρία Λιβανού, ΥΔ Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΜΟΝΟΣΤΡΩΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΤΩΝ ΘΟΛΩΝ



Διπλωματική Εργασία
Στέφανος Κουταλιανός

ΕΜΚ ΔΕ 2015 40

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ
Συνεπιβλέπουσα: Μαρία Λιβανού, ΥΔ Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

Copyright © Στέφανος Κουταλιανός, 2015
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Stefanos Koutalios, 2015
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Στέφανος Κουταλιανός (2015)
Διερεύνηση προβλημάτων λυγισμού μονόστρωτων δικτυωτών θόλων
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2015 40
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Stefanos Koutalianos (2015)
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2015 40
Research on buckling load of single layer reticulated dome
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά το καθηγητή μου κ. Γαντέ Χάρη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την ευκαιρία που μου έδωσε να μπορέσω να συνεργαστώ μαζί του σε ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα για τις μεταλλικές κατασκευές και το οποίο δεν είχα ασχοληθεί ποτέ στο παρελθόν. Επίσης τον ευχαριστώ διότι κατανόησε πλήρως ότι εργαζόμουν παράλληλα με τη διπλωματική αυτή εργασία και στήριξε με τον τρόπο του τις αποφάσεις μου για τη συνέχεια της ακαδημαϊκής μου πορείας. Ήταν πάντα πρόθυμος να με καθοδηγήσει, μεταφέροντας σε εμένα την εμπειρία και την γνώση του πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο, δίνοντας οπτική και επίπεδο σε αυτή την εργασία. Επιπλέον θέλω να τον ευχαριστήσω διότι ως καθηγητής τα τελευταία δύο χρόνια με ενέπνευσε για να μπορέσω να συλλάβω με τον καλύτερο τρόπο τη γνώση μέσα από τα μαθήματά του, και του εύχομαι να συνεχίσει να παράγει έργο εξίσου υψηλής ποιότητας καθώς και κάθε ακαδημαϊκή και επαγγελματική καταξίωση.

Παράλληλα τον ευχαριστώ για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ με την Μαρία Λιβανού, μία λαμπρή και πανέξυπνη μηχανικό. Θέλω να την ευχαριστήσω γιατί χωρίς τη συμβολή της, η εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη. Την ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθεια της, τις γνώσεις, την καθοδήγηση, τη στήριξη και τις ιδέες της που μου πρόσφερε το χρονικό διάστημα που συνεργαστήκαμε. Δεν ξέρω αν μπορώ να την ευχαριστήσω αρκετά για την πολύτιμη βοήθεια της, η οποία ήταν τεράστια. Της εύχομαι να συνεχίσει με το ίδιο πάθος και ότι καλύτερο στην ακαδημαϊκή και επαγγελματική της σταδιοδρομία.

Ευχαριστώ ακόμη τους καθηγητές κ. Αβραάμ Τάσο και κ. Ραυτογιάννη Ιωάννη για τη συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη στήριξη και την ενθάρρυνση που μου παρείχαν. Τους ευχαριστώ που πάντα με υποστηρίζουν στις επιλογές και τους στόχους μου σε τέτοιες δύσκολες στιγμές που αντιμετωπίζουμε. Τους ευχαριστώ ιδιαίτερα που προσπαθούν συνεχώς και κάνουν ότι μπορούν για να ολοκληρώσω όλα μου τα όνειρα, και επιπλέον με βοηθούν και μου δίνουν δύναμη για να μπορέσω να αντιμετωπίσω όλες τις δυσκολίες.

Τέλος να ευχαριστήσω τους φίλους μου Μαρία, Μιχάλη και Δημήτρη για την υπομονή και την αντοχή σε μία περίοδο με μεγάλη πίεση και άγχους για μένα. Ακόμη ένα μεγάλο ευχαριστώ στον φίλο μου Αντώνη για την βοήθεια του στην εικόνα του εξωφύλλου της διπλωματικής μου.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2015 40

Διερεύνηση προβλημάτων λυγισμού μονόστρωτων δικτυωτών θόλων Στέφανος Κουταλιανός

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ
Συνεπιβλέπουσα: Μαρία Λιβανού, ΥΔ Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένας μελετητής που σχεδιάζει ένα δικτυωτό κέλυφος και στη συνέχεια καλείται να υπολογίσει την αντοχή του βασίζεται σε μία μεθοδολογία βήμα προς βήμα. Στο σχεδιασμό πρέπει να ληφθούν υπόψη σημαντικοί συντελεστές που έχουν να κάνουν με τη γεωμετρία και την εμφάνιση του τελικού αποτελέσματος. Για παράδειγμα, κατά το σχεδιασμό ορίζεται ο τύπος του κελύφους, οι συντοριακές συνθήκες, ο τρόπος κατανομής των φορτίων, ο τρόπος σύνδεσης και άλλοι επιμέρους συντελεστές, ώστε να γίνει σωστά η μοντελοποίηση του φορέα και η ανάλυση που ακολουθεί να μπορεί να παρουσιάσει τα επακριβή αποτελέσματα για το κέλυφος που μελετάται.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ελέγχεται η απόκριση του σφαιρικού δικτυωτού κελύφους για ομοιόμορφη κατανομή της φόρτισης στους κόμβους του κελύφους, χωρίς να γίνεται η τήρηση των ορίων ασφαλείας που θέτει ο Ευρωκώδικας 1 για στατικά (ανομοιόμορφη κατανομή φόρτισης, θερμικά φορτία και φορτία ανέμου) και δυναμικά (σεισμός) φορτία που δρουν στο κέλυφος. Κυρίως γίνεται μία αναλυτική παρουσίαση και επεξήγηση των παραμέτρων που αφορούν τη γεωμετρία του σφαιρικού κελύφους και των σχέσεων που επηρεάζουν το φορτίο λυγισμού. Έτσι, επιλέγονται κατάλληλα οι παράμετροι που είναι απαραίτητοι για την ανάλυση.

Μέσω των αναλύσεων παρατηρείται ότι ο βαθμός επιρροής του μέτρου της καθολικής ατέλειας είναι πιο σημαντικός για κελύφη με άκαμπτες παρά για κελύφη με αρθρωτές συνδέσεις. Επιπλέον διατυπώνεται ξεκάθαρα πως οι άκαμπτες συνδέσεις δημιουργούν ένα πιο δύσκαμπτο φορέα και η δυσκαμψία αυτή απεικονίζεται στα φορτία λυγισμού, καθώς είναι αρκετά μεγαλύτερα σε σχέση με τον άλλο τύπο σύνδεσης. Ο τρόπος σύνδεσης μεταβάλλει και το μηχανισμό αστοχίας, αφού στις δύο περιπτώσεις το σφαιρικό κέλυφος με τα ίδια χαρακτηριστικά, αποκρίνεται διαφορετικά. Στις αναλύσεις φαίνεται ότι για ρηχά αρθρωτά κελύφη, αποτελούμενα από μέλη με μικρή λυγηρότητα, η ποιότητα του χάλυβα δε διαδραματίζει σημαντικό ρόλο γιατί δεν εκδηλώνεται διαρροή του υλικού.

Οι μηχανισμοί αστοχίας που είναι εφικτοί να παρουσιαστούν από ένα μονόστρωτο σφαιρικό κέλυφος είναι ο ακαριαίος λυγισμός (καθολικός ή τοπικός), ο λυγισμός Euler σε ένα μεμονωμένο μέλος του κελύφους και η αστοχία του υλικού. Τέλος, στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας διενεργείται προσπάθεια για να εκδηλωθούν όλοι οι μηχανισμοί αστοχίας για μία διατομή, έτσι ώστε να φανεί η αλληλεπίδρασή τους.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2015 40

**Research on buckling load of single layer reticulated dome
Stefanos Koutalianos**

Supervisor: Charis Gantes, Dr. Civil Engineer, Professor N.T.U.A.
Co-supervisor: Maria Livanou, PhD Civil Engineer N.T.U.A.

ABSTRACT

The calculation of buckling strength of a reticulated shell is based on a step-by-step methodology. In the design process, important factors related to the geometry and the final aesthetic result should be considered. For instance, during the design process, the type of the shell, the boundary conditions, the loads distribution, the connection type and other factors are defined in order to model the structure properly, and so that the following analysis will be able to present the exact results of the shell.

This thesis examines the response of the spherical reticulated shell under uniform loads, without following the safety limits of the Eurocode 1 for static (asymmetric load distribution, thermal loads and wind loads) and dynamic (earthquake) loads acting on the shell. Most importantly, the project includes a detailed presentation and explanation of the parameters related to the geometry of the spherical shell and which affect the critical buckling load. In this way, the parameters are appropriately chosen for the analysis.

Through these analyses, it is observed that the influence of the global geometric imperfection is quite more important for shells with rigid connections rather than for shells with pin connections. Moreover, it is clearly stated that rigid connections create a stiffer structure with higher buckling loads, than the ones derived from other connection types. The way of connection also changes the collapse mechanism, since the spherical shell with the same characteristics responds differently for the two connection types. Through the analyses, it is clearly presented that for shallow reticulated shells consisted of members with small slenderness, the quality of the steel does not play an important role on the buckling strength.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΩΤΑ	1
1.1	ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	1
1.2	ΤΥΠΟΙ ΔΙΚΤΥΩΤΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ	1
1.3	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ	3
1.3.1	Συνοριακές Συνθήκες	3
1.3.1.1	Κυκλικό κέλυφος	3
1.3.1.2	Τετραγωνικό ή ορθογώνιο κέλυφος	4
1.3.1.3	Τριγωνικό κέλυφος	5
1.3.1.4	Ελεύθερο – Ακανόνιστο κέλυφος	5
1.3.2	Κατανομή φορτίων	6
1.3.3	Τύποι συνδέσεων	6
1.3.4	Προεντάσεις	7
1.3.5	Γεωμετρικές ατέλειες	8
1.4	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ – ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΕΛΥΦΩΝ	9
2	ΣΦΑΙΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΩΤΑ ΚΕΛΥΦΗ	13
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
2.2	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΑ ΣΦΑΙΡΙΚΑ ΚΕΛΥΦΗ	14
2.3	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ	16
2.4	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ	20
2.4.1	Μοντελοποίηση του φορέα	22
2.4.2	Ανάλυση του φορέα	22
2.4.3	Συμπεριφορά υλικού	24
2.4.4	Παραμορφώσεις	25
3	ΚΕΛΥΦΟΣ ΜΕ ΑΚΑΜΠΤΕΣ	27
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	27
3.2	ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ – LBA	28
3.3	ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕ ΑΤΕΛΕΙΕΣ – ΓΝΙΑ	30
3.3.1	Επιρροή μεγέθους αρχικής ατέλειας	33
3.3.2	Η επιρροή στην αντοχή του κελύφους	35
3.4	ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕ ΑΤΕΛΕΙΕΣ – ΓΜΝΙΑ	36
3.4.1	Επιρροή μεγέθους αρχικής ατέλειας	41
3.4.2	Η επιρροή στην αντοχή του κελύφους	42
3.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	44
4	ΚΕΛΥΦΟΣ ΜΕ ΑΡΘΡΩΤΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ	47

4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	47
4.2	ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ – LBA	48
4.3	ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕ ΑΤΕΛΕΙΕΣ – GNIA	49
4.3.1	Επιρροή μεγέθους αρχικής ατέλειας	53
4.3.2	Η επιρροή στην αντοχή του κελύφους	54
4.3.3	Επιρροή για μεγαλύτερη αύξηση της αρχικής ατέλειας.....	55
4.4	ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕ ΑΤΕΛΕΙΕΣ – GMNIA	58
4.4.1	Επιρροή μεγέθους αρχικής ατέλειας	60
4.4.2	Επιρροή για μεγαλύτερη αύξηση της αρχικής ατέλειας.....	60
4.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	61
5	ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΥΠΟΥ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ.....	65
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	65
5.2	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΟΥ ΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ.....	67
5.2.1	Τροποποίηση του κελύφους	67
5.2.2	Επιλογή διατομών.....	68
5.3	ΚΡΙΣΙΜΗ Η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ ΜΕ ΑΚΑΡΙΑΙΟ ΛΥΓΙΣΜΟ	69
5.3.1	Γραμμική ανάλυση λυγισμού – LBA.....	69
5.3.2	Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες – GNIA	70
5.3.3	Μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες – GMNIA.....	73
5.3.4	Αλληλεπίδραση των μηχανισμών αστοχίας.....	73
5.4	ΚΡΙΣΙΜΗ EULER ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ ΜΕΛΟΥΣ.....	74
5.4.1	Γραμμική ανάλυση λυγισμού – LBA.....	74
5.4.2	Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες – GNIA	74
5.4.3	Μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες – GMNIA.....	78
5.4.4	Αλληλεπίδραση των μηχανισμών αστοχίας.....	82
5.5	ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ ΑΚΑΡΙΑΙΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΚΑΙ EULER.....	83
5.5.1	Γραμμική ανάλυση λυγισμού – LBA.....	83
5.5.2	Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες – GNIA	84
5.5.3	Μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες – GMNIA.....	87
5.5.4	Αλληλεπίδραση των μηχανισμών αστοχίας.....	90
5.6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	91
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	95
6.1	ΠΕΡΙΛΗΨΗ	95
6.2	ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	96
6.3	ΜΕΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ	98
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	99

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΩΤΑ ΚΕΛΥΦΗ

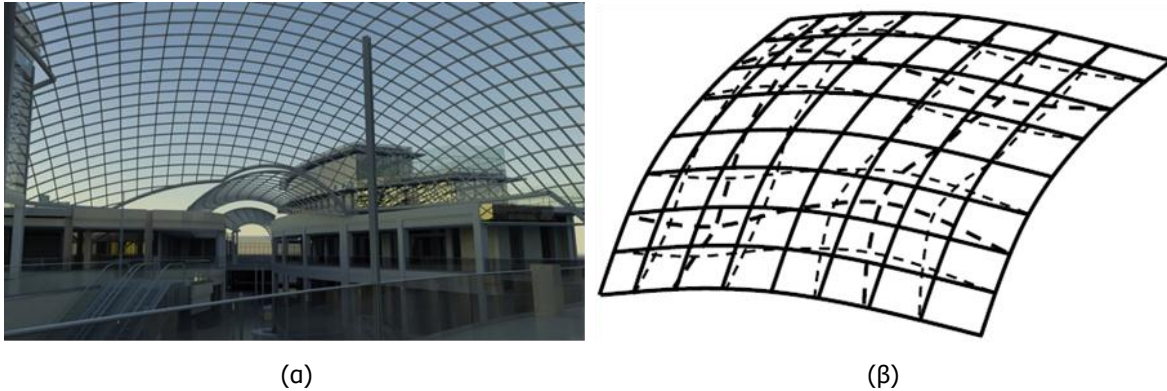
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Καθοριστικό σημείο στην ανάπτυξη των κελυφών διαδραμάτισαν τα μέσα του 20^{ου} αιώνα. Καθώς οι πολιτικοί μηχανικοί και οι αρχιτέκτονες προσπαθούσαν να ανακαλύψουν διαφορετικές ύλες που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη κάλυψη μεγαλύτερων δομημάτων εκτός από το παραδοσιακό υλικό της εποχής, το οποίο ήταν το σκυρόδεμα. Όταν η συμπεριφορά των κελυφών έγινε κατανοητή, υλικά όπως μέταλλα (κυρίως χάλυβας) εφαρμόζονταν για κάλυψη μεγαλύτερης επιφάνειας με λιγότερη χρήση του υλικού. Η ανάπτυξη των μεταλλικών κελυφών, προήλθε γύρω στο 1970 όπου συνέπεσε η πληθώρα χρήση μεταλλικών εργοστασίων με τη βελτίωση των ηλεκτρονικών υπολογιστών με υψηλότερη ταχύτητα και μεγαλύτερη μνήμη. Από το 1965, με γνώμονα την ανάπτυξη της αριθμητικής ανάλυσης για τα διαρθρωτικά διακριτά συστήματα, η δυνατότητα για κάλυψη μεγάλων αποστάσεων έχει αναπτυχθεί αρκετά και αξιοποιούνται πλήρως μέχρι σήμερα.

Γνωρίζοντας την πολυπλοκότητα των δικτυωτών κελυφών, πολλά προβλήματα είναι ακόμη υπό έρευνα, ιδίως όσον αφορά τη μέθοδο υπολογισμού της αντοχής λυγισμού. Αυτό επειδή υπάρχουν αρκετοί μηχανισμοί αστοχίας για τα κελύφη, οι οποίοι επηρεάζονται από πολλούς συντελεστές που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Συντελεστές όπως είναι η ευαισθησία της γεωμετρικής ατέλειας, το πλαστικό όριο αντοχής, η ακαμψία των συνδέσεων, τα σφάλματα κατασκευής στο εργοστάσιο και της τοποθέτησης και πολλούς άλλους παράγοντες, όπως οι διαφορικές καθιζήσεις, μπορούν να αλλάξουν εντελώς την συμπεριφορά του κελύφους.

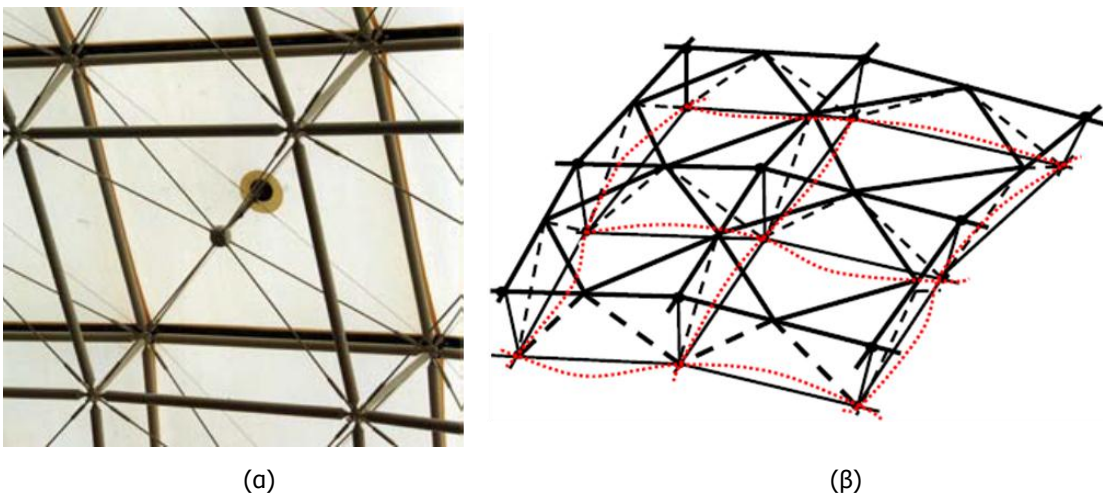
1.2 ΤΥΠΟΙ ΔΙΚΤΥΩΤΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ

Τα δικτυωτά κελύφη ταξινομούνται σε δύο τύπους: 1) μονόστρωτα, και 2) δίστρωτα. Αυτό που χαρακτηρίζει, τα μονόστρωτα δικτυωτά κελύφη (Εικόνα 1.1.α) είναι ότι το πάχος είναι πολύ λεπτό σε σχέση με τις διαστάσεις ανοίγματος. Έτσι λόγω του λεπτού πάχους, τα ενιαία στρώματα είναι αρκετά επιρρεπή ως προς το ακαριαίο λυγισμό (με καθολικές ή τοπικές παραμορφώσεις), και έχει σαν αποτέλεσμα να λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα κατά της αστάθειας. Ο λυγισμός στα μονόστρωτα κελύφη οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στις μετατοπίσεις των κόμβων (Εικόνα 1.1.β για παραμόρφωση κάμψης). Οι συνδέσεις για τα μονόστρωτα δικτυωτά κελύφη είναι συνήθως άκαμπτες, και σε κάποιες περιπτώσεις ημιάκαμπτες, έτσι τα μέλη λαμβάνουν εκτός από αξονικές δυνάμεις και ροπές κάμψης. Τα μέλη και για τους δύο τύπους κελυφών προσομοιώνονται με γραμμικά στοιχεία με καθορισμένη διατομή και έτσι δεν είναι τόσο λεπτά σε σύγκριση με τα κελύφη για σκάφη όπου μπορούν να εξομοιωθούν με συνεχές λεπτό μεταλλικό κέλυφος (επιφανειακά στοιχεία).

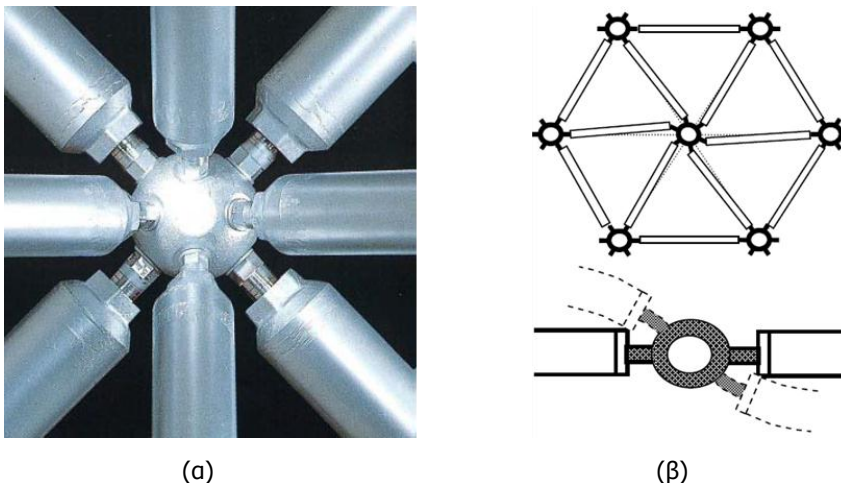


Εικόνα 1.1: Μονόστρωτο κέλυφος (α) Trinity shopping centre, Leeds, HB [48] (β) Καθολικός λυγισμός [1]

Αντίθετα, τα δικτυωτά κελύφη με δύο στρώματα (Εικόνα 1.2.α) έχουν μεγαλύτερη δυσκαμψία από το ενιαίο στρώμα λόγω τις συνδυασμένης δράσης μεταξύ της άνω και κάτω στρώσης. Κατά συνέπεια, η αντιστεκόμενη ικανότητα κατά του καθολικού λυγισμού μπορεί να αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό, εξαιτίας του ύψους. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η αστοχία (Εικόνα 1.2.β) εμφανίζεται ως λυγισμός μέλους (Euler). Γενικά, οι μετατοπίσεις των κόμβων είναι μηδενικές γι' αυτό ο λυγισμός μέλους εμφανίζεται πρώτα πριν εκδηλωθεί ο καθολικός. Ένα πρόβλημα που συναντάται κυρίως στα δίστρωτα δικτυωτά κελύφη είναι η περιστροφή κόμβου η οποία οφείλεται κυρίως στη χαμηλή αντοχή σε κάμψη των κόμβων λόγω λεπτών συνδετικών στοιχείων μεταξύ κόμβων και μελών όπως στην Εικόνα 1.3.β.



Εικόνα 1.2: Δίστρωτο δικτυωτό κέλυφος [1] (α) Οροφής με διαγώνιους συνδέσμους (β) Λυγισμός μέλους



Εικόνα 1.3: Αρθρωτές συνδέσεις [1] (α) Κοχλιωτή ένωση (β) Περιστροφή κόμβου

Οι διαφορές μεταξύ του μονού και του διπλού στρώματος είναι επίσης και στον τρόπο σύνδεσης που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση. Οι άκαμπτες ή ημιάκαμπτες συνδέσεις (Εικόνα 1.4) υιοθετήθηκαν για συστήματα μονού στρώματος, ενώ οι αρθρωτές συνδέσεις (Εικόνα 1.3.α) για συστήματα διπλού στρώματος, παρά το γεγονός ότι στην πραγματικότητα οι συνδέσεις αυτές είναι ημιάκαμπτες (με σχετικά μικρή ακαμψία). Έτσι στα δίστρωτα δικτυωτά κελύφη αναπτύσσονται μόνο αξονικές δυνάμεις στα μέλη, με τη ροπή κάμψης να είναι μηδαμινή. Ακόμη μια διαφορά μεταξύ των δύο κελυφών είναι ότι οι μέθοδοι για τον υπολογισμό των κρίσιμων φορτίων λυγισμού έχουν αναπτυχθεί κυρίως για μονόστρωτα δικτυωτά κελύφη.



Εικόνα 1.4: Συνδέσεις για μονόστρωτο κέλυφος [1] (α) Άκαμπτη σύνδεση (β) Ημιάκαμπτη σύνδεση

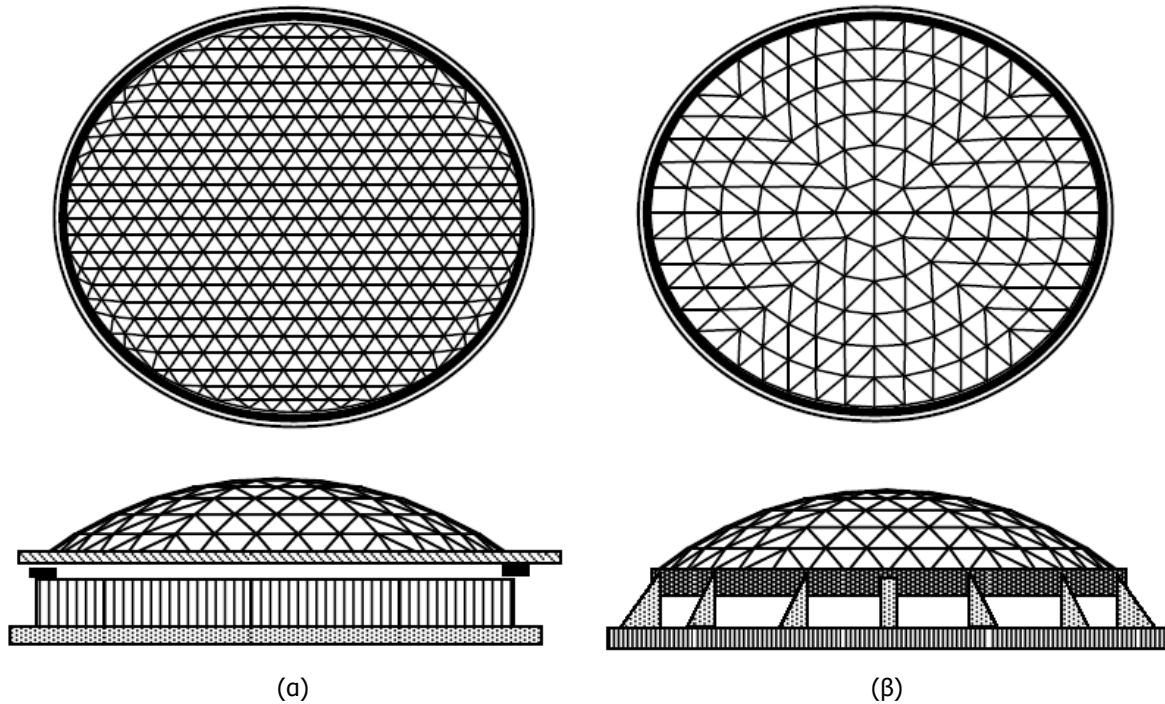
1.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ

1.3.1 Συνοριακές Συνθήκες

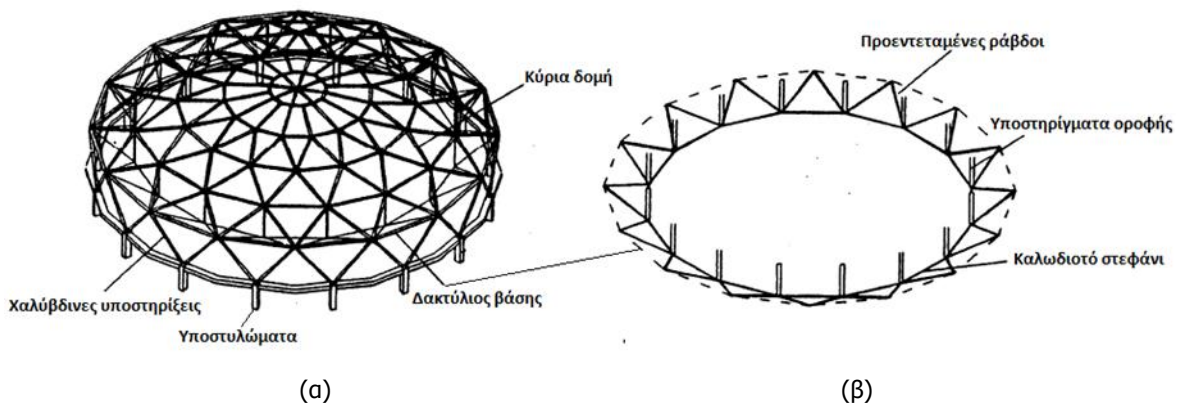
Οι συνοριακές συνθήκες έχουν σημαντική επίδραση στην αντοχή σε λυγισμό. Ο τρόπος στηρίξεις διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του δικτυωτού κελύφους. Τα κελύφη σύμφωνα με την εικόνα του αλλά κυρίως με την κάτοψη του κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες: (1) κυκλικό (2) τετραγωνικό (ή ορθογώνιο) (3) τριγωνικό και (4) ελεύθερο. Κάθε κατηγορία έχει τις ιδιαιτερότητες τις και τις διαφορές στο τρόπο σύνδεσης του κελύφους με το υπάρχον κτίριο το οποίο στεγάζει ή με το έδαφος αν ολόκληρο το έργο αποτελείται από το κέλυφος.

1.3.1.1 Κυκλικό κέλυφος

Η κατηγορία αυτή αποτελείται από τα σφαιρικά δικτυωτά κελύφη (θόλους), τα όποια έχουν κυκλική κάτοψη και για την στήριξη τους χρησιμοποιούνται αρκετοί τρόποι. Ο πρώτος είναι η περίπτωση της Εικόνα 1.5.α όπου το δικτυωτό κέλυφος στηρίζεται κατά μήκος της βάσης τους σε ένα δακτύλιο προέντασης όπως ονομάζεται, με αποτέλεσμα να μην αναπτύσσονται οριζόντιες δυνάμεις στις στηρίξεις από τα κατακόρυφα φορτία. Ένας άλλος τύπος είναι η περίπτωση της Εικόνα 1.5.β όπου ο θόλος είναι αρθρωμένος στην βάση του, ούτως ώστε να στηρίζεται άμεσα στο κτίριο και να του παρέχεται η δυνατότητα μεταφορά των οριζόντιων δυνάμεων από της άρθρωσης στο υπόλοιπο κτίριο. Αυτή είναι και η πιο απλή μορφή, όμως η βάση η οποία συνδέει το κέλυφος με το υπόλοιπο κτίριο πρέπει να είναι με οπλισμένο σκυρόδεμα μεγάλης αντοχής. Ένα καινούργιο σύστημα που ονομάζεται *Suspen-dome* (Εικόνα 1.6), όπου ένα σύστημα καλωδίων στην κυκλική βάση του κελύφους εισάγει αρχικές τάσεις στο κέλυφος έτσι ώστε να μειώνεται η ένταση του δακτυλίου αλλά και ταυτόχρονα αυξάνεται και το φορτίο λυγισμού καθώς μειώνεται η μη γραμμικότητα της γεωμετρίας. Και στη συνέχεια αυτά τα καλώδια στηρίζονται πάνω σε μία σειρά από υποστυλώματα για να εξασφαλίζουν στην ομαλή σύνδεση με το κτίριο.



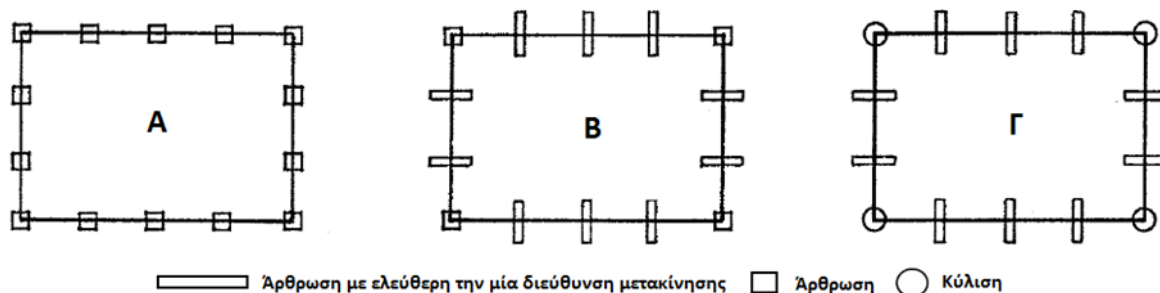
Εικόνα 1.5: Κυκλικά κελύφη [1] (α) Στήριξη με δακτύλιο προέντασης (β) Στήριξη με αντέρεισμα



Εικόνα 1.6: Suspen-dome από Hikarigaoka, Τόκυο, Ιαπωνία [1] (α) Στατικό σύστημα κελύφους (β) Σύστημα καλωδίων

1.3.1.2 Τετραγωνικό ή ορθογώνιο κέλυφος

Οι συνοριακές στηρίξεις υλοποιούνται με τρεις τρόπους, όπως φαίνονται στην Εικόνα 1.7. Σε όλους του τύπους στηριγμάτων που χρησιμοποιούνται η κάθετη μετακίνηση είναι δεσμευμένη. Στην Α περίπτωση όλες οι στηρίξεις είναι με αρθρώσεις, έτσι ώστε οι μετακινήσεις να είναι δεσμευμένες σε όλες τις κατευθύνσεις ενώ οι περιστροφές είναι ελεύθερες. Αυτό όμως χρειάζεται πρακτικά μία πολύ άκαμπτη κατασκευή στη βάση για την παραλαβή των δυνάμεων και στις δύο κατευθύνσεις. Στην Β περίπτωση υπάρχουν αρθρώσεις στις τέσσερις γωνίες ενώ οι υπόλοιπες στηρίξεις επιτρέπουν την περιστροφή και τη μετακίνηση στη μία κατεύθυνση (κάθετη στη διαμήκη διεύθυνση του κυλίνδρου) ενώ η άλλη είναι σταθερή. Έτσι σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται σημαντική στήριξη για τις κατακόρυφες δυνάμεις, όπως επίσης και για τις οριζόντιες δυνάμεις στις γωνίες. Για τις τέσσερις γωνίες μπορεί να επιλεγούν και στηρίξεις με ελευθερία των περιστροφών και των οριζόντιων δυνάμεων και στις δύο κατευθύνσεις, με μόνο περιορισμό την κάθετη μετακίνηση. Όπως στην περίπτωση Γ, όπου αυτός ο τρόπος έχει ως αποτέλεσμα να αποφεύγονται οι θερμικές καταπονήσεις στο κέλυφος.



Εικόνα 1.7: Συνδέσεις για τετραγωνικά κελύφη

1.3.1.3 Τριγωνικό κέλυφος

Δύο τύποι τριγωνικού κελύφους φαίνονται στην Εικόνα 1.8. Οι τρεις πλευρές που αποτελούν τους κύριους δοκούς του κελύφους πρέπει να αποτελούνται από μεγάλες διατομές, εξαιτίας του γεγονότος ότι καταπονούνται περισσότερο, και επιπλέον για να μπορούν να οδηγούν τα φορτία στα θεμέλια. Τα θεμέλια πρέπει να είναι μεγάλης ακαμψίας και αντοχής για να αντιστέκονται στις δυνάμεις οριζόντιες και κάθετες.



(a)



(β)

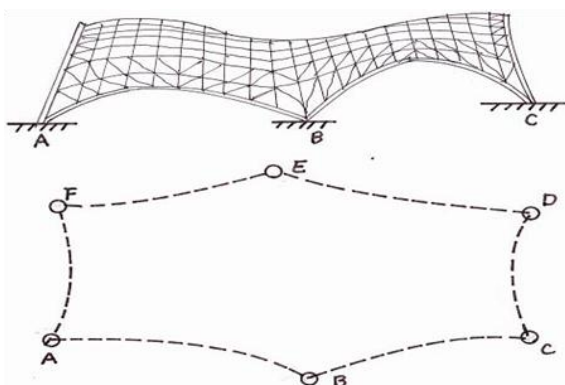
Εικόνα 1.8: Τριγωνικά κελύφη (α) The Florina Aquarium, ΗΠΑ [50] (β) Gumna Insect Museum, Ιαπωνία [49]

1.3.1.4 Ελεύθερο – Ακανόνιστο κέλυφος

Και σε αυτή την περίπτωση (Εικόνα 1.9) οι εξωτερικοί δοκοί περιμετρικά θα πρέπει να έχουν μεγάλες αντοχές, όπως επίσης και τα θεμέλια. Η διαφορά όμως είναι ότι πρέπει να γίνει σημαντική ανάλυση, για το ποιος θα είναι ο μηχανισμός αστοχίας, δηλαδή αν θα καταρρεύσουν πρώτα οι περιμετρικοί δοκοί ή αν θα λυγίσει το εσωτερικό του κελύφους, καθώς είναι πολύ ευαίσθητο. Γενικά σε αυτήν τη μορφή, τα κελύφη χρειάζονται μεγάλη προσοχή γιατί δεν υπάρχει ούτε αρκετή εμπειρία αλλά ούτε και γνώση.



(a)



(β)

Εικόνα 1.9: Ακανόνιστο δικτυωτό κέλυφος (α) Με αρκετά σύνθετο φορέα [52] (β) Με πιο απλό φορέα [1]

1.3.2 Κατανομή φορτίων

Το νεκρό φορτίο και το φορτίο χιονιού είναι τα κύρια φορτία που λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό έναντι λυγισμού. Σε χώρες όπου μεγάλοι σεισμοί, άνεμοι ή μεγάλες μεταβολές της θερμοκρασίας είναι πιθανόν να συμβούν κατά τη διάρκεια ζωής του έργου, πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό και σύμφωνα με τους κανονισμούς της χώρας. Επιπρόσθετα, για το συνδυασμό νεκρών φορτίων και φορτίου χιονιού, πρέπει να καθοριστεί η τιμή σχεδιασμού συντηρητικά λόγο αρκετών αβεβαιοτήτων για τον τρόπο συμπεριφοράς των κελυφών.

Η αντοχή λυγισμού των δικτυωτών κελυφών επηρεάζεται ανάλογα με τη κατανομή των φορτίων δράσης. Ως εκ τούτου, η επίδραση αυτή πρέπει να αναλυθεί κατά την αξιολόγηση του φορτίου λυγισμού. Έτσι εξετάζονται διάφορες πιθανές κατανομές φορτίων για το κέλυφος όπως ομοιόμορφα φορτία, ασύμμετρη συσσώρευση χιονιού, και επίσης συνδυασμένα φορτία ενιαία και συγκεντρωτικά πάνω σε μία τοπική περιοχή. Στην περίπτωση του μονόστρωτου κελύφους, τα αποτελέσματα μιας τοπικής κατανομής φορτίου πρέπει να αξιολογηθούν προσεκτικά, επειδή είναι περισσότερο ευαίσθητα από τα δίστρωτα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των σφαιρικών θόλων κάτω από ένα ενιαίο φορτίο, η κάμψη που αναπτύσσεται πάνω από όλη την επιφάνεια είναι μικρή. Ωστόσο, στην περίπτωση μη ομοιόμορφου φορτίου, καθώς συσσωρεύεται τοπικά κατανεμημένο φορτίο ή ακόμη και συγκεντρωμένα φορτία (Εικόνα 1.10), είναι πιθανόν οι ροπές κάμψεων να είναι αιτία αστοχίας. Σε περίπτωση όπου η κατανομή των φορτίων δεν είναι κατανοητή κατά το σχεδιασμό ή οι πληροφορίες είναι ελλιπείς, επιβάλλεται η πραγματοποίηση πειραμάτων σε κατάλληλη κλίμακα αλλά και επί τόπου έρευνα. Διαφορετικά θα πρέπει να υιοθετηθεί μία προσεκτική και αρκετά συντηρητική κατανομή κατά το σχεδιασμό.



Εικόνα 1.10: Τοπική κατανομή φορτίων [1]

1.3.3 Τύποι συνδέσεων

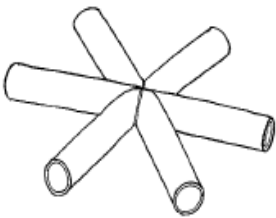
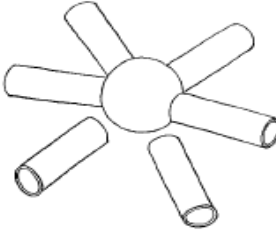
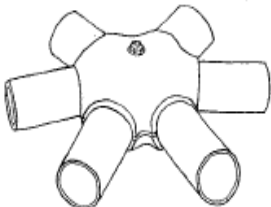
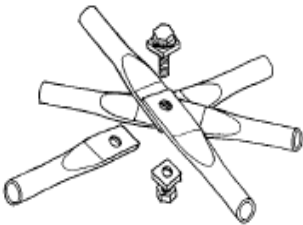
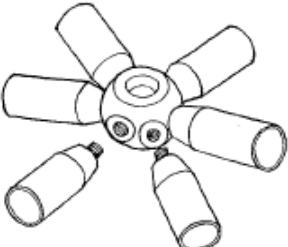
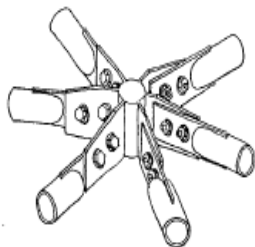
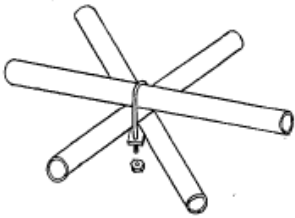
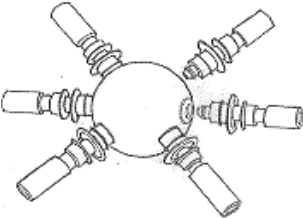
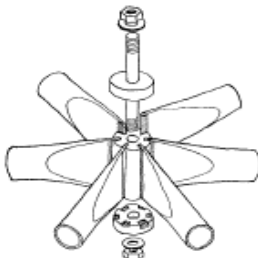
Ο τρόπος σύνδεσης επηρεάζει σημαντικά τη δυσκαμψία του κελύφους και κατά συνέπεια την απόκρισή του στα εξωτερικά φορτία. Οι συνδέσεις όμως μπορούν να σχεδιαστούν και να υλοποιηθούν με πολλούς τρόπους. Στον πιο κάτω

Πίνακας 1.1 φαίνονται μερικές συνδέσεις ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους, όπως αν είναι άμεση η σύνδεση των μελών μεταξύ τους, αν χρησιμοποιείται ενδιάμεσα κάποιο στοιχείο, αν έχει κάποια ειδική μορφή και αν είναι συγκολλητή ή κοχλιωτή. Η σύνδεση μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή θελήσει ο μηχανικός φτάνει να πληροί της προδιαγραφές αντοχής για το κέλυφος.

Στα μονόστρωτα δικτυωτά κελύφη, τα όποια κυρίως συνδέονται με πλήρως άκαμπτες συνδέσεις, χρησιμοποιείται κυρίως η σύνδεση (α) όπου τα μέλη συγκολλώνται μεταξύ τους. Επίσης, για ημιάκαμπτες συνδέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι συνδέσεις (β) και (γ) όπου ανάμεσα στα μέλη συγκολλώνται διάφορα στοιχεία (σφαιρικά ή μη) και σχηματίζονται έτσι οι κόμβοι. Για τα δίστρωτα δικτυωτά κελύφη, που οι συνδέσεις είναι αρθρωτές ή ημιάκαμπτες (με μικρή ακαμψία) χρησιμοποιούνται διάφορα είδη συνδέσεων όπως κοχλιωτά μέλη, με πείρους, με σφήνωση του μέλους

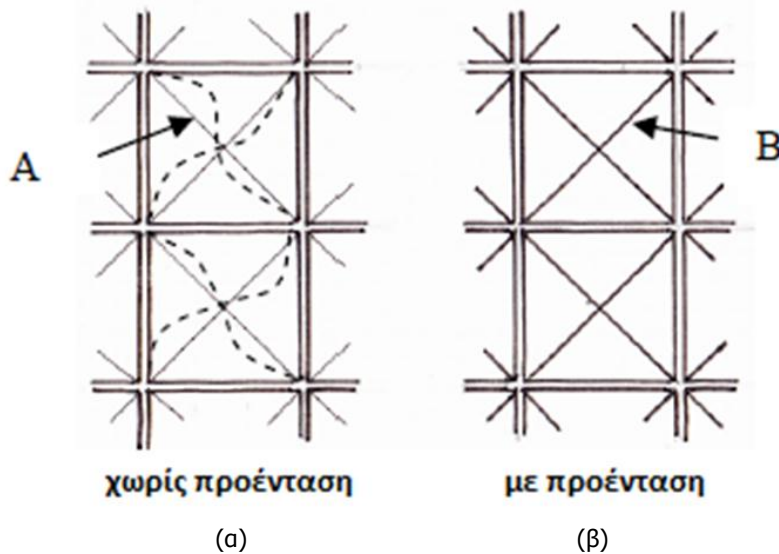
μέσα σε σφαιρικά στοιχεία, με πλάκες ενίσχυσης και άλλα, μερικά από τα οποία φαίνονται στον πίνακα (δ-ε-ζ-η-θ-ι).

Πίνακας 1.1: Τύποι συνδέσεων

	Άμεση σύνδεση	Σύνδεση με στοιχείο	
		Σφαιρικό στοιχείο	Ειδική τύποι
Συγκολλητές συνδέσεις	 (α) επίπεδη ένωση	 (β) ένωση με σφαίρα	 (γ) σύστημα SDC
Βιδωτές συνδέσεις	 (δ) επίπεδος κόμβος	 (ε) ένωση με κοχλιωτή σφαίρα	 (ζ) με πλάκα ενίσχυσης και κοχλίες
Βιδωτές τύπου U, συνδέσεις με σφήνωση	 (η) τύπου U	 (θ) σφήνωση σε σφαίρα	 (ι) σύστημα triodetic

1.3.4 Προεντάσεις

Ένα χαρακτηριστικό που συναντάτε αρκετά στις περιπτώσεις των κελυφών με ενιαίο στρώμα είναι στα μέλη να δίνεται αρχική ένταση. Αυτή η προένταση εισάγεται κυρίως για την αύξηση της αντοχής του κελύφους και για καλύτερη σταθερότητα (αύξηση της δυσκαμψίας). Η αρχική ένταση δίνεται κυρίως σε διαγώνιους συνδέσμους οι οποίοι τεντώνονται (εφελκύνονται) για να αυξήσουν το φορτίο λυγισμού τους και ταυτόχρονα και του κελύφους. Οι διαγώνιοι σύνδεσμοι που αποτελούνται από πολύ λεπτές διατομές και είναι συνδεδεμένοι με αρθρώσεις στους κόμβους, υποβάλλονται σε θλιπτικές δυνάμεις (συμπίεση), λόγω των νεκρών αλλά και των εξωτερικών φορτίων. Αυτό έχει ως συνέπεια να μη λειτουργούν αποτελεσματικά για το κέλυφος, εξαιτίας ότι δεν αντέχουν και λυγίζουν (Εικόνα 1.11.α). Ως αποτέλεσμα να μειώνεται η ακαμψία στο κέλυφος και να έχει πρόβλημα αστάθειας. Ωστόσο, αν οι σύνδεσμοι αυτοί προενταθούν (Εικόνα 1.11.β), αυτοί θα λειτουργούν σωστά ακόμη και υπό φορτία μεγαλύτερα της αξονικής τους αντοχής και θα παρέχουν στο κέλυφος την ακαμψία που χρειάζεται. Κυρίως η προένταση αυτή γίνεται για τα νεκρά φορτία του κελύφους για να μη δημιουργούνται επιπλέον εντάσεις στα άλλα μέλη του κελύφους.



Εικόνα 1.11: Διαγώνια μέλη υπό θλίψη [1]

1.3.5 Γεωμετρικές ατέλειες

Τυπικά οι γεωμετρικές ατέλειες κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες: στην καθολική γεωμετρική ατέλεια που σχετίζεται με κομβικές αποκλίσεις και στην κύρτωση μέλους. Στο μονόστρωτο δικτυωτό κέλυφος, οι καθολικές ατέλειες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό του φορτίου λυγισμού καθώς έχουν σημαντική επιρροή. Όσον αφορά την κατανομή των αρχικών ατελειών που θα πραγματοποιηθεί στο στάδιο του σχεδιασμού, γίνεται ανάμεσα από διάφορους τρόπους:

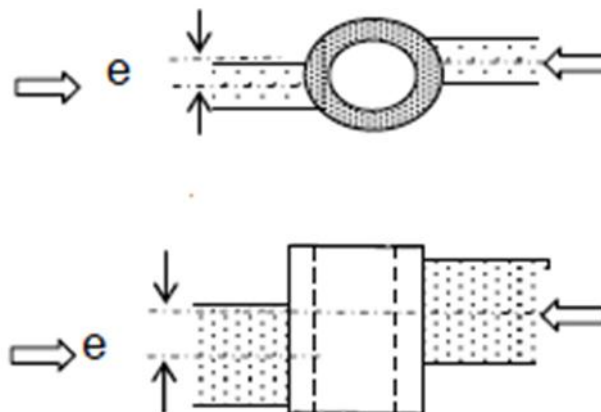
- Μια παραδοσιακή μέθοδο για τη κατανομή πάνω στην επιφάνεια του κελύφους είναι να χρησιμοποιηθεί ένας γραμμικός συνδυασμός των διαφόρων τρόπων λυγισμού (ιδιομορφές), που λαμβάνεται από γραμμική ανάλυση λυγισμού. Συνήθως δύο ή τρεις πρώτες ιδιομορφές, είναι αρκετές αλλά αυτό είναι ανάλογο με το μέγεθος του αντίστοιχου κρίσιμου φορτίου λυγισμού.
- Μία άλλη εναλλακτική μέθοδος, είναι να θεσπιστεί μία κατανομή ανάλογη προς τις μετατοπίσεις που οφείλονται σε ένα φορτίο σχεδιασμού, για παράδειγμα στο νεκρό φορτίο ή και στο συνδυασμό με το φορτίο χιονιού.
- Ένας άλλος τρόπος είναι, αν σε περίπτωση που μία μεγάλη τοπική συσσώρευση χιονιού αναμένεται σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία, τότε ανάλογα ορίζεται και η θέση της ατέλειας.

Επιπλέον, εκτός από την κατανομή, το μέγεθος της ατέλειας είναι ένας παράγοντας κλειδί και θα πρέπει να τεθεί υπόψη ανάλογα με την αιτία που προέρχεται. Μερικοί λόγοι ή αιτίες δημιουργίας ατελειών είναι:

- Η κατασκευή κατά το εργοστάσιο περιλαμβάνει αναπόφευκτα γεωμετρικά λάθη όπως επίσης και οι μέθοδοι συναρμολόγησης μπορεί να προκαλέσουν κάποια λάθη (ύπαρξη κενού ή χαλάρωσης στις συνδέσεις).
- Κατασκευαστικές ατέλειες σε κόμβους όπως εκκεντρότητες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.12, καθώς και οι στρεβλώσεις των μελών.
- Αν η υψηλή θερμοκρασία συγκόλλησης εφαρμόζεται στο χώρο κατασκευής, πιθανό να δημιουργήσει πρόσθετες τάσεις και παραμορφώσεις.
- Επίσης, οι μετατοπίσεις που προκαλούνται χωρίς φόρτωση, αμέσως μετά την αφαίρεση των προσωρινών στηρίξεων.

- Η έλλειψη εμπειρίας του κατασκευαστή ενισχύει τη δυνατότητα μεγάλου μέτρου των γεωμετρικών ατελειών.

Δεδομένου ότι τα αποτελέσματα πολλών παραγόντων, γνωστών και αγνώστων επηρεάζουν το κέλυφος, στο σχεδιασμό πρέπει να χρησιμοποιείται μια συντηρητική θεώρηση. Ωστόσο, το μέγεθος της πραγματικής ατέλειας θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο, προκειμένου να αποφευχθεί μία σημαντική μείωση του φορτίου λυγισμού λόγω ατελειών. Έτσι είναι επιθυμητό η καθολική ακαμψία να μην υπερβαίνει το 20% του ισοδύναμου πάχους του κελύφους και να είναι 0.001 φορές μικρότερο από το άνοιγμα. Αντίθετα, η ατέλεια μέλους ορίζεται κυρίως 0.001 ή 0,002 φορές μικρότερη από το μήκος του μέλους.



Εικόνα 1.12: Εκκεντρότητα μελών στις συνδέσεις [1]

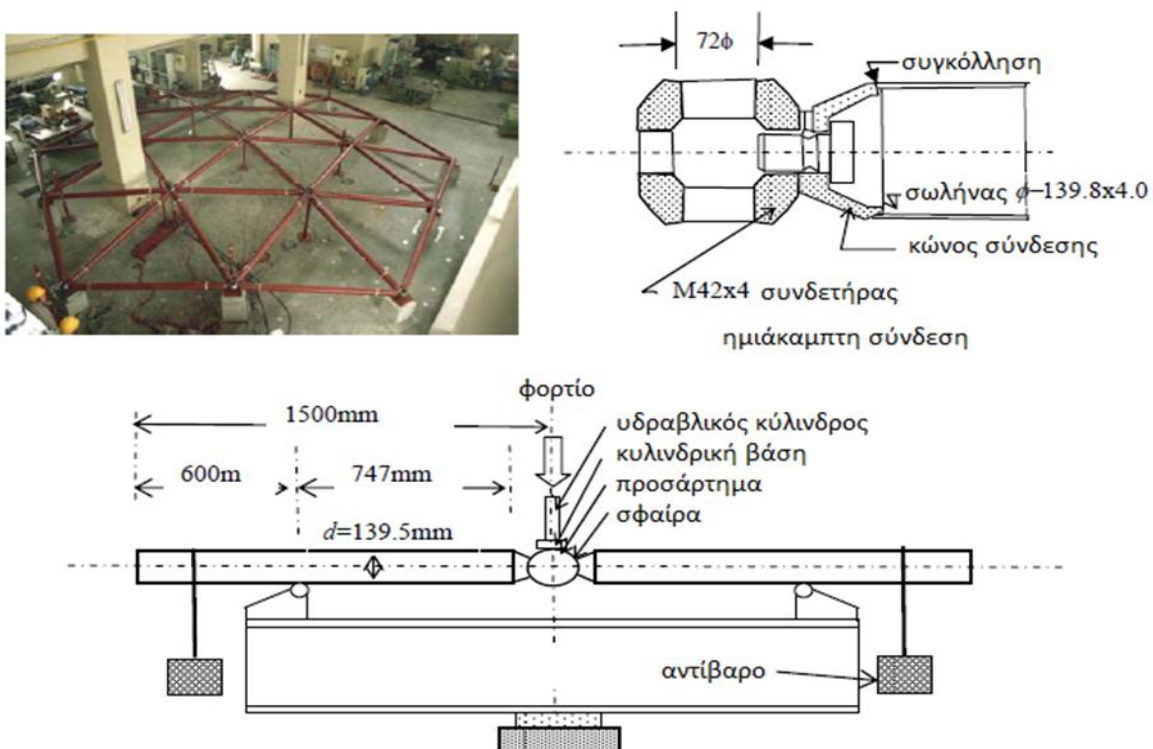
1.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ – ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΕΛΥΦΩΝ

Η διαδικασία για την ανάλυση ενός δικτυωτού κελύφους γίνεται με τη μέθοδο βήμα προς βήμα. Η διαδικασία αυτή είναι αποτελεσματική καθώς παράγει σταθερή ενημέρωση για το ελαστικό φορτίο, το πλαστικό όριο αντοχής και το φορτίο λυγισμού. Με αποτέλεσμα να γίνεται σαφές ποιος μπορεί να είναι ο μηχανισμός αστοχίας για το κέλυφος. Πιο κάτω περιγράφεται η διαδικασία για τον υπολογισμό του φορτίου λυγισμού και της αντοχής για όλα τα κελύφη.

- Μοντελοποίηση του φορέα: Η οποία αποτελείται από μόρφωση του δικτυωμένου κελύφους (γεωμετρία) με τα διάφορα χαρακτηριστικά των μελών και των συνδέσεων στους κόμβους, τις συνοριακές συνθήκες και κατανομές των φορτίων σχεδιασμού. Επίσης γίνεται η κατανομή των ατελειών και άλλων απαραίτητων παραμέτρων σχεδιασμού.
- Αξιολόγηση της θεμελιώδης γραμμικής απόκρισης: Με βάση τη γραμμική ελαστική ανάλυση, αξιολογούνται οι παραμορφώσεις του κελύφους, σύμφωνα με τους παραμέτρους του σχεδιασμού. Επίσης, σημαντική είναι η αξιολόγηση του ελαστικού φορτίου λυγισμού, σύμφωνα με τον τρόπο σύνδεσης και το βαθμό ακαμψίας των συνδέσεων.
- Υπολογισμός των ελαστικών φορτίων λυγισμού λόγω Euler: Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού λόγω Euler μπορεί εύκολα να υπολογιστεί γνωρίζοντας το μήκος και τα χαρακτηριστικά των διατομών. Ειδικά στην περίπτωση του μονού στρώματος, το φορτίο αυτό είναι ένα από τα κλειδιά για τον υπολογισμό της αντοχής λυγισμού.
- Υπολογισμός του πλαστικού οριακού φορτίου: Μια ακριβή τιμή για το πλαστικό οριακό φορτίο προσφέρεται μέσα από τη γεωμετρικά γραμμική και μη γραμμική ανάλυση υλικού (GLMNA), η οποία θα παρέχει πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο (θέση και φορτίο) πλαστικοποίησης του υλικού μέσα από το κέλυφος.

- Υπολογισμός των γραμμικών φορτίων λυγισμού: Με βάση τη γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA) η οποία υπολογίζει το φορτίο λυγισμού, δίνει τη δυνατότητα για πληροφορίες σχετικά με την κατανομή των εξωτερικών φορτίων, την κατανομή των αρχικών ατελειών και άλλους συναφείς παράγοντες. Επίσης, εάν το φορτίο λυγισμού το οποίο αποτελεί άνω όριο, είναι μικρότερο από αυτό που ορίζεται από κανονισμούς, απαιτείται οπωσδήποτε η αλλαγή της γεωμετρίας. Εάν όμως, είναι μεγαλύτερο, ο φορέας είναι ασφαλής έναντι λυγισμού, αλλά χρειάζεται περαιτέρω ανάλυση για ακριβέστερη λύση.
- Υπολογισμός των ελαστικών φορτίων λυγισμού: Βασισμένο σε γεωμετρικά μη γραμμική ανάλυση και με γραμμικό υλικό (GNMILA), χρησιμοποιείται συνήθως για να υπολογιστεί η ευαισθησία της γεωμετρικής ατέλειας. Ειδικά στην περίπτωση που οι επιπτώσεις της μη γραμμικότητας γεωμετρίας (ατέλειας) και της κατανομής του φορτίου είναι μεγάλη, η ανάλυση θα πρέπει να επαναληφθεί για να διερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο το φορτίο λυγισμού μειώνεται εξαιτίας αυτών.
- Υπολογισμός των ελαστοπλαστικών φορτίων λυγισμού (αντοχή): Το φορτίο αντοχής του κελύφους υπολογίζεται μέσω της μη γραμμική ανάλυσης υλικού και γεωμετρίας. Όταν το φορτίο αντοχής είναι αρκετά μεγάλο σε σχέση με την ένταση σχεδιασμού, τότε ο φορέας θεωρείται ασφαλής. Επίσης, ορίζει τελικά και το μηχανισμό αστοχία που μπορεί να ποικίλει.

Όμως, συχνά, για την κατασκευή ενός νέου τύπου δικτυωμένου κελύφους, ειδικά όταν χρησιμοποιείται ένας νέος τύπος σύνδεσης ή ένα νέο είδος διατομής, ακόμη και μία λεπτομερής ανάλυση δεν μπορεί να προσφέρει αποτελεσματικά τις πληροφορίες για το σχεδιασμό. Έτσι σε τέτοιες περιπτώσεις απαιτείται η εκτέλεση πειράματος, είτε υπό κλίμακα είτε σε πραγματικό μέγεθος. Όπως για παράδειγμα στην Εικόνα 1.13 όπου γίνεται πειραματική δοκιμή στο εργαστήριο για μία ημιέκαμπτη σύνδεση σε πραγματικό μέγεθος. Όπου σύμφωνα με το παράδειγμα αναζητείται ο βαθμός δυσκαμψίας της συγκεκριμένης σύνδεσης αλλά και η ευαισθησία του σφαιρικού θόλου, έτσι ώστε να οριστεί το μέγεθος της καθολικής ατέλειας που θα πρέπει να συνυπολογιστεί στη διαδικασία ανάλυσης.



Εικόνα 1.13: Πειραματική δοκιμή ημιέκαμπτης σύνδεσης σε πραγματικό μέγεθος [1]

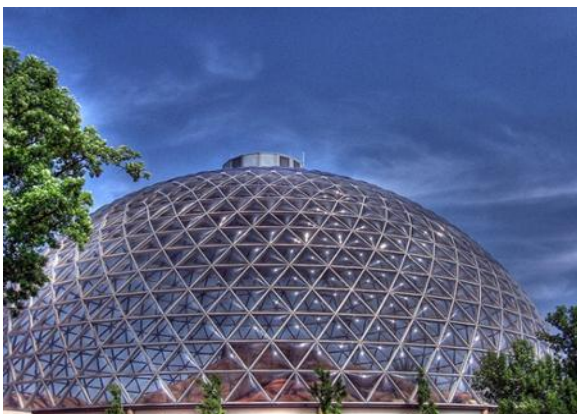
Στη συνέχεια γίνεται λεπτομερής αναφορά για τα μονόστρωτα σφαιρικά δικτυωτά κελύφη (με κυκλική βάση). Γίνεται αναφορά στους τύπους των συγκεκριμένων κελυφών, στα διάφορα χαρακτηριστικά και παράγοντες που επηρεάζουν το φορτίο λυγισμού και στον τρόπο απόκρισης του σφαιρικού δικτυωτού κελύφους. Επίσης, ακολουθεί και ένα παράδειγμα σφαιρικού κελύφους όπου γίνεται εκτεταμένη αναφορά πως όλοι οι παράγοντες και σε τι βαθμό επηρεάζουν το συγκεκριμένο μονόστρωτο σφαιρικό κέλυφος. Στο τέλος, γίνεται μία απεικόνιση όλων των μηχανισμών αστοχίας που μπορεί να παρουσιάσει το κέλυφος, και πως αυτοί οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί μπορούν να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους.

2 ΣΦΑΙΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΩΤΑ ΚΕΛΥΦΗ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σφαιρικό δικτυωτό κέλυφος αποτελεί ίσως την πιο διαδεδομένη μορφή από κελύφη. Ο λόγος που τα κάνει τόσο δημοφιλή είναι εξαιτίας του σχήματος. Σε αντίθεση με τις άλλες μορφές, όπου κυρίως η βάση είναι ακανόνιστη, στα σφαιρικά κελύφη είναι επίπεδη και έτσι είναι πιο εύχρηστη η τοποθέτηση πάνω σε κτίρια. Εξαιτίας και του σχήματος ότι δημιουργείται θόλος δημιουργώντας ένα εντυπωσιακό αποτέλεσμα, το κάνει πιο διαδεδομένο στη χρήση σε μεγάλα κτίρια, όπως εμπορικά, μουσεία, ομίλους εταιριών και αλλά. Τα σφαιρικά δικτυωτά κελύφη είναι μονόστρωτα κατά πλειοψηφία, έχοντας και συσσωρευμένη την περισσότερη εμπειρία και γνώση από τις άλλες μορφές.

Σήμερα, και με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών, οι μηχανικοί μπορούν εύκολα να εκτιμήσουν το φορτίο λυγισμού σε τέτοιου τύπου κελύφη. Εξαιτίας της διευρυμένης γνώσης για τα κελύφη αυτά, μπορεί να γίνει μία σοβαρή προσέγγιση κατά το σχεδιασμό με αξιόπιστα δεδομένα για (1) τη μοντελοποίηση των δομών, (2) τις συνοριακές συνθήκες, (3) τις κατανομές των φορτίων, (4) τη δυσκαμψία, εκκεντρότητα και χαλαρότητα των συνδέσεων και (5) τις γεωμετρικές ατέλειες. Επίσης, μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί ο λόγος της αστοχίας και είναι σε θέση οι μηχανικοί να κρίνουν αν οι απαντήσεις ή τα αποτελέσματα από τον υπολογιστή είναι ή όχι ακριβή και αξιόπιστα.



(α)



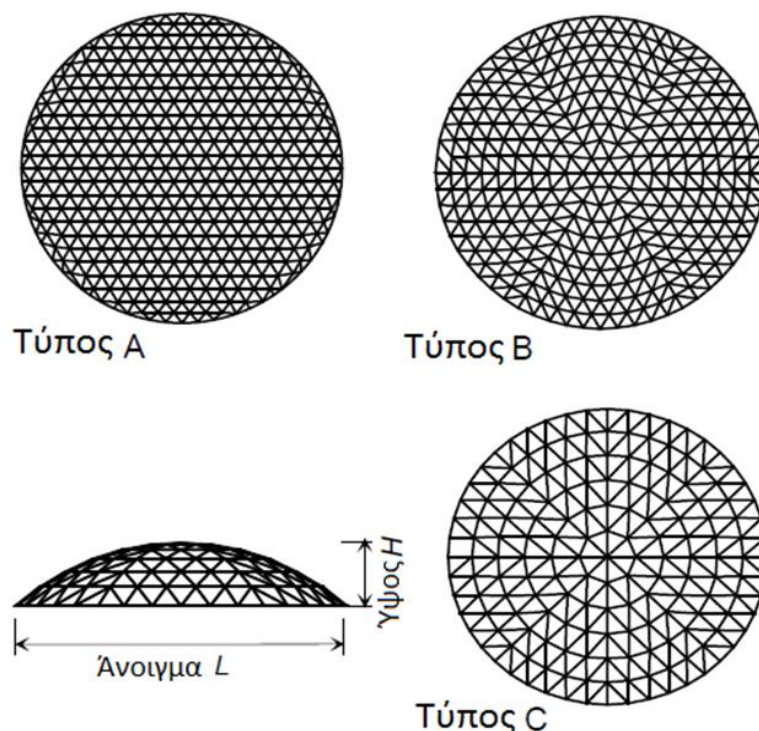
(β)

Εικόνα 2.1: Σφαιρικά κελύφη (α) Henry Doorly Zoo, Νεμπράσκα, ΗΠΑ [51] (β) Cupola Galleria Umberto I, Νάπολη, Ιταλία [49]

Για τα μονόστρωτα σφαιρικά δικτυωτά κελύφη υπάρχει η ελευθέρια για την υλοποίηση οποιασδήποτε δομής και σχήματος, φτάνει να είναι εφικτό και κυρίως να είναι ευσταθές. Ωστόσο υπάρχουν τρεις

βασικοί τύποι για το σχηματισμό του φορέα, οι οποίοι φαίνονται στην Εικόνα 2.2 [13, 14]. Το στατικό σύστημα αποτελείται κυρίως από τρίγωνα που σχηματίζουν τα μέλη μεταξύ τους. Ο τύπος Α έχει το χαρακτηριστικό ότι τα τρίγωνα αυτά είναι ισόπλευρα και τοποθετούνται το ένα αντεστραμμένα δίπλα στο άλλο, δημιουργώντας σειρές στη μία διεύθυνση κατά την κάτοψη. Στον τύπο Β, το κύριο χαρακτηριστικό του είναι ότι στην κορυφή έχει 6 όμοια τρίγωνα σχηματίζοντας εξάγωνο. Γενικά, τα μέλη δεν είναι όλα τα ίδια μεταξύ τους και το κέλυφος σχηματίζεται από έξη ίδια τμήματα, αποτελούμενο από 3 κορυφογραμμές. Ο τύπος C είναι παρόμοιος με το τύπο Β, με τη διαφορά ότι η κορυφή σχηματίζεται από οχτώ τρίγωνα και το κέλυφος αποτελείται από οχτώ ίδια τμήματα.

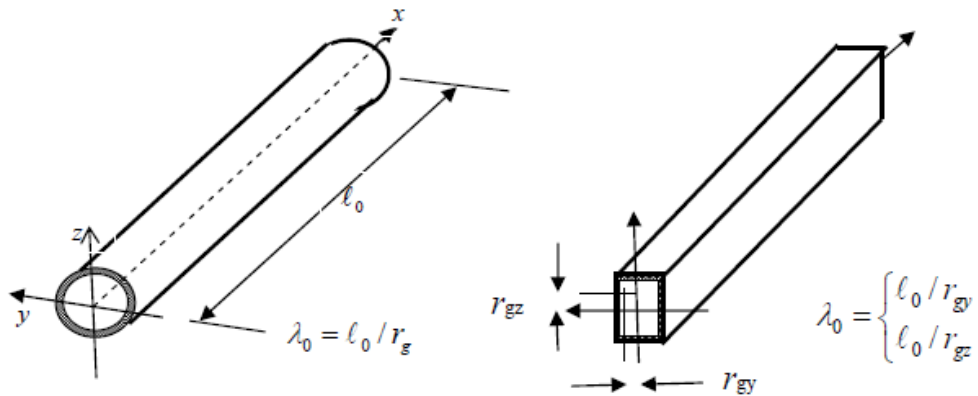
Όλα τα κελύφη έχουν χαρακτηριστικά το μήκος L , όπου είναι η διάμετρος της κυκλικής κάτοψης (άνοιγμα κελύφους), και το ύψος H που είναι το συνολικό ύψος του κελύφους από τη βάση μέχρι την κορυφή. Ο λόγος των χαρακτηριστικών αυτών επηρεάζει σημαντικά την απόκριση του κελύφους σε μία φόρτιση. Ο μεγάλο λόγος ύψους προς το άνοιγμα υποδεικνύει ότι το κέλυφος έχει σημαντική δυσκαμψία και ο τρόπος αστοχίας είναι διαφορετικός από ένα πιο ρηχό κέλυφος με μικρό λόγο.



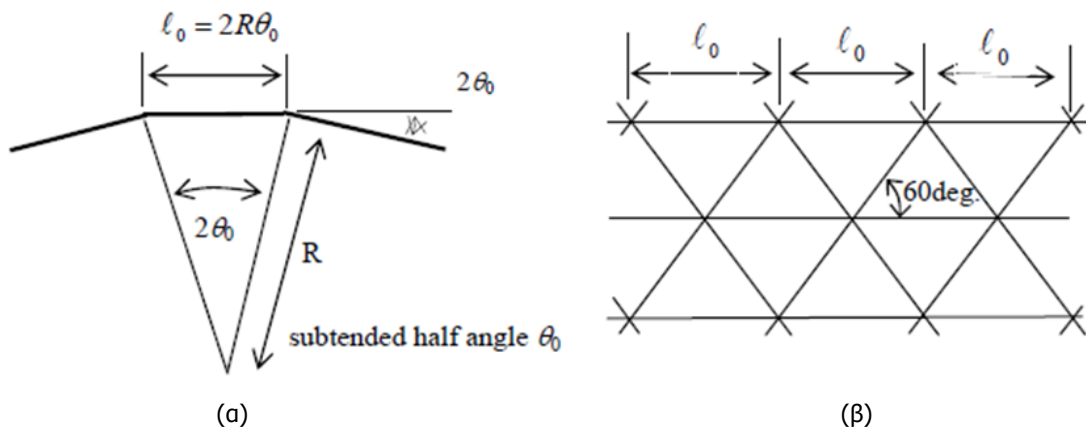
Εικόνα 2.2: Τύποι σφαιρικών δικτυωτών κελυφών [1]

2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΑ ΣΦΑΙΡΙΚΑ ΚΕΛΥΦΗ

Μερικά χαρακτηριστικά έχουν σοβαρή επιρροή στον τρόπο απόκρισης ενός κελύφους και διευκολύνουν στη σωστή αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που παρέχουν οι αναλύσεις μέσω των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Έτσι, στο δικτυωτό κέλυφος με ενιαίο στρώμα, για τον υπολογισμό των φορτίων λυγισμού πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι παράμετροι λ_0 και θ_0 . Η παράμετρος λ_0 συμβολίζει τη λυγηρότητα και υπολογίζεται ως ο λόγος του ισοδύναμου μήκους του μέλους διαιρεμένος με την ακτίνα περιστροφής, κάνοντας την υπόθεση ότι στα άκρα οι συνδέσεις είναι αρθρωμένες (Εικόνα 2.3). Ενώ η παράμετρος θ_0 είναι η μισή υποτεινόμενη γωνία όπου σχηματίζεται από δύο συνεχόμενα μέλη (Εικόνα 2.4.α). Μαζί με τους παραμέτρους αυτούς, η διάταξη των μελών επηρεάζει επίσης σημαντικά την αντοχή και τον τρόπο αστοχίας για ένα κέλυφος, όπου καλύτερη απόδοση έχει το κέλυφος με ισόπλευρα τρίγωνα (Εικόνα 2.4.β). Στη συνέχεια ακολουθεί εκτενής αναφορά των χαρακτηριστικών αυτών, όταν θα γίνει αξιολόγηση του φορτίου λυγισμού.

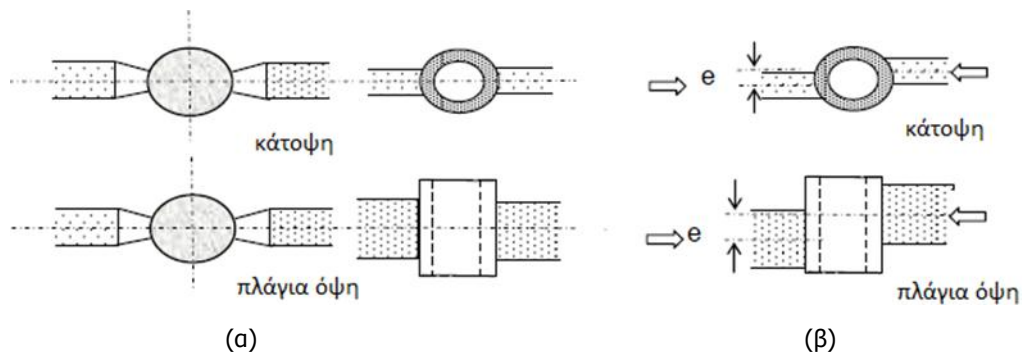


Εικόνα 2.3: Λυγηρότητα μέλους αν οι συνδέσεις είναι αρθρωμένες [1]



Εικόνα 2.4: Χαρακτηριστικά κελύφους [1] (α) Η γωνία θ_0 (β) Η διάταξη μελών

Επίσης, η δυσκαμψία των συνδέσεων θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη για τους υπολογισμούς, για το λόγο ότι ο μηχανισμός αστοχίας ποικίλλει ανάλογα με την ακαμψία και την αντοχή της σύνδεσης των μελών. Έτσι κελύφη με χαμηλή ακαμψία στις συνδέσεις έχουν αρκετά μειωμένο φορτίο σε σχέση με αντίστοιχα κελύφη με αρκετά ισχυρές συνδέσεις. Κυρίως για τις ημιάκαμπτες συνδέσεις (Εικόνα 2.5.α), όπου η δυσκαμψία δύσκολα ορίζεται με βάση μόνο τις αναλύσεις, είναι επιθυμητό να πραγματοποιηθεί πείραμα για τον προσδιορισμό της. Ακόμα στις συνδέσεις, σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την αντοχή του σφαιρικού κελύφους είναι η εκκεντρότητα των κόμβων (Εικόνα 2.5.β), η οποία δημιουργεί μεγάλες καμπτικές ροπές. Αφού αυτές οι ροπές θα έχουν ως αποτέλεσμα την αστοχία σε χαμηλότερα φορτία, θα πρέπει η εκκεντρότητα να είναι όσο το δυνατό μικρότερη. Παρ' όλα αυτά, για περίπλοκους κόμβους με πολλά μέλη να συνδέονται εκεί, είναι δύσκολο να αποφευχθεί, γι' αυτό το λόγο οι συντελεστές ασφαλείας των κελυφών κατά την ανάλυση είναι αρκετά συντηρητικοί για να προλαμβάνονται τέτοιες καταστάσεις.

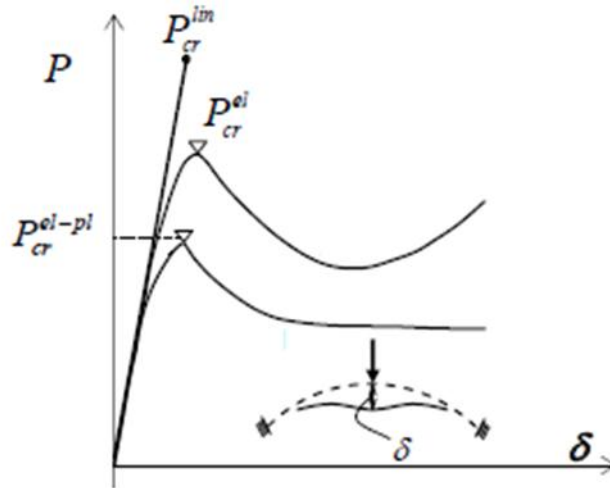


Εικόνα 2.5: Ημιάκαμπτη σύνδεση [1] (α) Χωρίς εκκεντρότητα (β) Με εκκεντρότητα

2.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ

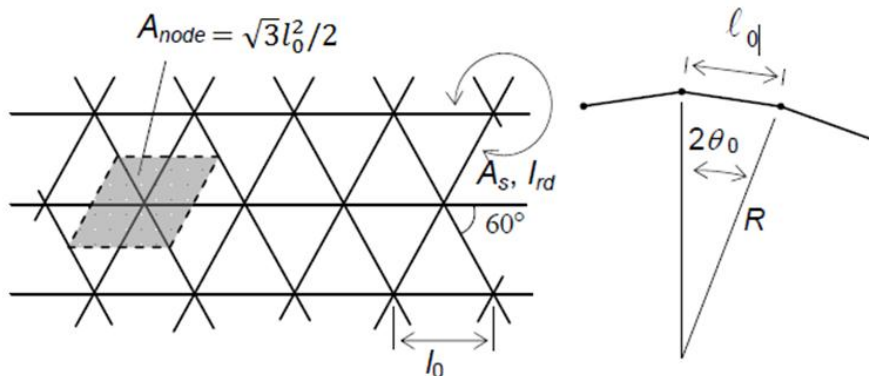
Αρχικά, τα φορτία λυγισμού κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες με βάση την ανάλυση λυγισμού που πραγματοποιείται. Από κάθε ανάλυση που πραγματοποιείται εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα ως προς τον τρόπο που το κέλυφος λυγίζει και ποιος τελικά είναι ο μηχανισμός αστοχίας, γι' αυτό είναι αναγκαίο να γίνουν όλες η αναλύσεις. Το Σχήμα 2.1 παρουσιάζει τον τρόπο που ένα σφαιρικό κέλυφος αποκρίνεται σε μία φόρτιση με τα αντίστοιχα φορτία λυγισμού, όπου διαφαίνεται ξεκάθαρα η επιρροή της αρχικής στέλειας και του υλικού.

- Γραμμικό φορτίο λυγισμού (P_{cr}^{lin}): ορίζεται ως ένα κρίσιμο φορτίο που αντιστοιχεί σε απώλεια της ευστάθειας, λαμβάνοντας υπόψη τις αξονικές τάσεις παραλείποντας τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων και των καμπτικών ροών.
- Ελαστικό φορτίο λυγισμού (P_{cr}^{el}): ορίζεται ως το κρίσιμο φορτίο που βασίζεται σε μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ελαστικό υλικό.
- Ελαστοπλαστικό φορτίο λυγισμού (P_{cr}^{el-pl}): ορίζεται το κρίσιμο φορτίο που βασίζεται σε μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με μη γραμμικό υλικό. Το φορτίο αυτό αποτελεί και το φορτίο αντοχής του κελύφους.



Σχήμα 2.1: Δρόμος ισορροπίας για ρηχό σφαιρικό κέλυφος [1]

Ο τρόπος που μπορεί να γίνει μία ανάλυση ενός σφαιρικού κελύφους μέσω από εξισώσεις για τον υπολογισμό του φορτίου αντοχής παρουσιάζεται πιο κάτω. Τα φορτία που θα υπολογιστούν θα είναι για συγκεντρωμένη δύναμη στους κόμβους. Για κατανεμημένο φορτίο, μπορεί να γίνει η τροποποίηση, εάν διαιρεθεί με το εμβαδόν που αντιστοιχεί σε ένα κόμβο (Εικόνα 2.6) [5,8,9]. Επίσης, δίνονται οι τελικές εξισώσεις για λόγο Poisson 0.3.



Εικόνα 2.6: Εμβαδόν επιφάνειας που αντιστοιχεί για κάθε κόμβο [1]

Συγκεντρωτικά, όλοι οι παράμετροι οι οποίοι συμμετέχουν στις εξισώσεις για τα φορτία λυγισμού που ακολουθούν, και οι οποίοι ανάλογα με το μέγεθός τους επηρεάζουν το μονόστρωτο σφαιρικό κέλυφος, βρίσκονται στην Εξ. (2.1). Οι παράμετροι ή τα χαρακτηριστικά του κελύφους είναι η λυγηρότητα λ_0 , η μισή γωνία θ_0 και το εμβαδόν καταναμεμημένου φορτίου που αντιστοιχεί σε κάθε κόμβο A_{node} .

$$\begin{aligned}\lambda_0 &= \frac{l_0}{r_{g0}} \\ \theta_0 &= \frac{l_0}{2R} \\ A_{node} &= \frac{\sqrt{3}l_0^2}{2}\end{aligned}\quad (2.1)$$

Το γραμμικό φορτίο λυγισμού (P_{cr}^{lin}) ορίζεται από την Εξ. (2.2) [2, 3, 4, 5, 6, 7], όπου υπολογίζει το φορτίο για άκαμπτες ή ημιάκαμπτες συνδέσεις. Ο συντελεστής κ ορίζει τη δυσκαμψία του κόμβου, έτσι σε τελείως άκαμπτες συνδέσεις ο παρονομαστής είναι μονάδα. Όσο μικρότερη είναι η δυσκαμψία των ημιάκαμπτων κόμβων, το γραμμικό φορτίο λυγισμού μειώνεται και αυτό. Εκτός από τη δυσκαμψία, η λυγηρότητα επηρεάζει σημαντικά, καθώς μεγαλύτερη λυγηρότητα μέλους ταυτόχρονα ορίζεται και μείωση του φορτίου. Αντίθετα με τα υπόλοιπα είναι η γωνία θ_0 όπου όσο μεγαλώνει, το φορτίο αυξάνεται κατά μεγάλο βαθμό. Σε περίπτωση αρθρωτών συνδέσεων, ο υπολογισμός του γραμμικού φορτίου υπολογίζεται από την Εξ. (2.3) [10, 11]. Για το συντελεστή C_{pin} χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή, αφού σύμφωνα με μελέτες για πολύ ρηχούς θόλους για $\theta_0=1.5$ έως 4, ο συντελεστής αυτός προτείνεται 1.00 [12]. Επίσης, έχει αποδειχτεί για αυτές τις περιπτώσεις ότι είναι καλύτερα να χρησιμοποιούνται ημιάκαμπτες συνδέσεις οι οποίες είναι πιο αποτελεσματικές έναντι λυγισμού από τις αρθρωτές συνδέσεις [12, 13, 14, 15, 16].

$$\begin{aligned}P_{cr}^{lin} &= E_S A_S \theta_0^3 \xi_0 / \sqrt{1 + 2/\kappa} \\ \xi_0 &= \frac{12\sqrt{2}}{\lambda_0 \theta_0}\end{aligned}\quad (2.2)$$

$$\begin{aligned}P_{cr}^{lin} &= C_{pin} E_S A_S \theta_0^3 \\ C_{pin} &= 3.76\end{aligned}\quad (2.3)$$

Όπως έχει προαναφερθεί, ο τρόπος αστοχίας σε ένα σφαιρικό μονόστρωτο δικτυωτό κέλυφος μεταβάλλεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του. Έτσι, σε περίπτωση που η λυγηρότητα λ_0 είναι μεγαλύτερη από 100, μπορεί να εμφανιστεί λυγισμός Euler για κάποιο μεμονωμένο μέλος, αντί καθολικός λυγισμός, ακόμα και στην περίπτωση των άκαμπτων συνδέσεων (κυρίως για ξ_0 μικρότερο από 3 ή 4) [17,18,19,20,21]. Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού, σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να υπολογιστεί από την Εξ. (2.4). Ενώ, σε περίπτωση που το κέλυφος αποτελείται από αρθρωτές συνδέσεις, είναι επιθυμητό να γίνεται έλεγχος για όλες τις περιπτώσεις λυγηρότητας. Το φορτίο λυγισμού αλλάζει σε αυτή την περίπτωση και υπολογίζεται από την Εξ. (2.5) [17, 19, 20]. Ο συντελεστής γ_m χρησιμοποιείται για να μειώσει το φορτίο λυγισμού λόγω της επίδρασης της μη ομοιόμορφης κατανομής των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στα μέλη του σφαιρικού κελύφους [6, 7, 17, 21].

$$P_{cr(Euler)}^{lin} = \frac{71E_S I_{rd}}{l_0^2} \cdot \theta_0 \cdot \gamma_m \quad (2.4)$$

$\gamma_m = 0.7$ έως 1.0 για άκαμπτες συνδέσεις

$$P_{cr(Euler)}^{lin} = \frac{6\pi^2 E_S I_{rd}}{l_0^2} \cdot \theta_0 \cdot \gamma_m \quad (2.5)$$

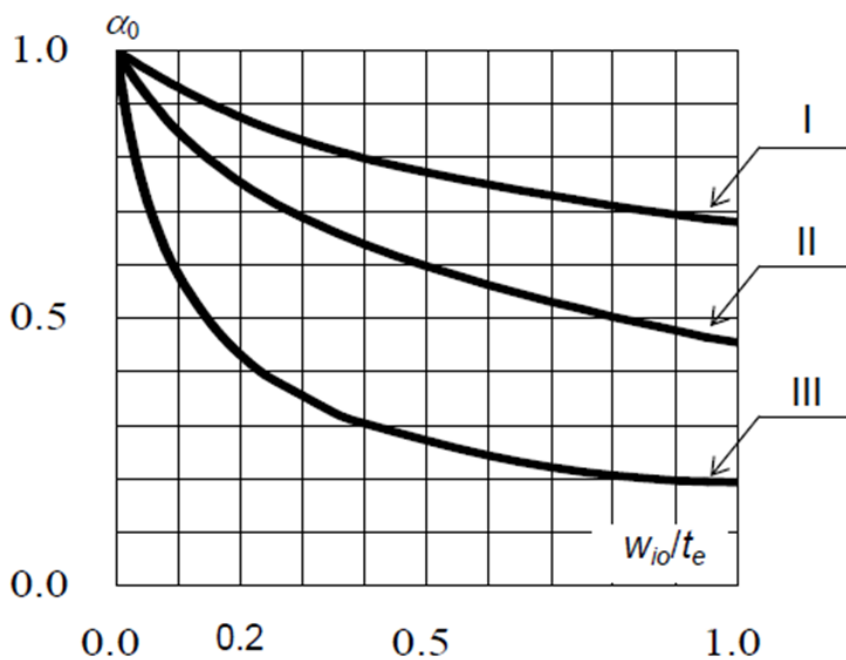
$\gamma_m = 0.7$ έως 1.0 για αρθρωτές συνδέσεις

Καθώς έχει βρεθεί το γραμμικό φορτίου λυγισμού, ακολουθεί η αναζήτηση του ελαστικού φορτίου λυγισμού. Με ελαστικό υλικό αναζητείται το φορτίο λυγισμού, όπου λαμβάνεται υπόψη και η αρχική ατέλεια. Για τον υπολογισμό του φορτίου αυτού χρησιμοποιείται η Εξ. (2.6) [12, 15, 16, 20, 23, 24, 25, 26] για άκαμπτες ή ημιάκαμπτες συνδέσεις. Σε κελύφη με ημιάκαμπτες συνδέσεις εμφανίζεται ξανά ο όρος $\beta(\kappa)$, ο οποίος μειώνει εκ νέου το φορτίο λυγισμού [13, 18, 27, 29]. Ο συντελεστής a_0 λαμβάνεται από την καμπύλη III του Σχήμα 2.2, αλλά χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή για τους θόλους που παρουσιάζουν καθολικό λυγισμό [22]. Αυτό εξαιτίας ότι είναι αρκετά ευαίσθητα στην αρχική ατέλεια, για να μην υπάρχει σημαντική μείωση του φορτίου λυγισμού. Ο καθολικός λυγισμός παρουσιάζεται στα σφαιρικά κελύφη, όταν η λυγηρότητα λ_0 και η γωνία θ_0 είναι πολύ μικρά. Ο συντελεστής a_0 ορίζεται από το πηλίκο w_{i0}/t_{eq} , όπου το w_{i0} συμβολίζει το μέγεθος της αρχικής ατέλειας, ενώ το t_{eq} το πάχος του μονόστρωτου σφαιρικού κελύφους.

$$P_{cr}^{el} = a_0 P_{cr}^{lin} \text{ για άκαμπτες συνδέσεις}$$

$$P_{cr}^{el} = \beta(\kappa) a_0 P_{cr}^{lin} \text{ για ημιάκαμπτες συνδέσεις} \quad (2.6)$$

$$\beta(\kappa) = \frac{1}{\sqrt{1+2/\kappa}}$$



Σχήμα 2.2: Ο συντελεστής a_0 [22]

Ο συντελεστής a_0 μπορεί επίσης να υπολογιστεί για σφαιρικό κέλυφος από την Εξ. (2.7), χρησιμοποιώντας το πάχος του κελύφους και το μέγεθος της αρχικής ατέλειας. Στην περίπτωση όπου το πηλίκιο w_{io}/t_{eq} είναι μεγαλύτερο από 0.75, τότε η τιμή είναι 0.20. Στην περίπτωση με αρθρωτές συνδέσεις, δεν υπάρχει κάποια εξίσωση υπολογισμού, αφού τα κελύφη δεν είναι πολύ ευαίσθητα στην αρχική καθολική ατέλεια. Κυρίως τα σφαιρικά κελύφη δεν επηρεάζονται καθόλου, εκτός από πολύ μεγάλες τιμές αρχικής ατέλειας, οι οποίες στην πραγματικότητα δεν μπορούν να είναι υπαρκτές. Έτσι, δεν έχει οριστεί κάποια συγκεκριμένη εξίσωση για τη συγκεκριμένη μορφή σύνδεσης.

$$a_0 = \begin{cases} 0.65 \exp(-1.57 w_{io} / t_{eq}) & \text{για } w_{io} / t_{eq} \leq 0.75 \\ 0.20 & \text{για } w_{io} / t_{eq} \geq 0.75 \end{cases} \quad (2.7)$$

Για τον υπολογισμό του ελαστικού φορτίου όταν παρατηρείται λυγισμός μέλους (Euler) χρησιμοποιείται η Εξ. (2.8) [28, 31, 32]. Μέσα από μελέτες ορίστηκε ότι η μέγιστη ατέλεια για ένα σφαιρικό κέλυφος πρέπει να είναι $2l_0/1000$. Αυτό όμως οδηγούσε το πολύ 10% μείωση του γραμμικού φορτίου λυγισμού [33, 36]. Εξαιτίας αυτού, ο συντελεστής γ_{pc} είναι 0.9 έως 1, αποδεικνύοντας ότι ο λυγισμός μέλους δεν είναι και τόσο ευαίσθητος στις ατέλειες, σε αντίθεση με τον καθολικό λυγισμό.

$$P_{cr(Euler)}^{el} = \gamma_{pc} P_{cr(Euler)}^{lin} \quad (2.8)$$

$$\gamma_{pc} = 0,9 \leftrightarrow 1.0$$

Για την αντοχή του κελύφους μέχρι στιγμής, στις εξισώσεις που δόθηκαν δεν έχει ληφθεί υπόψη η απόδοση του υλικού. Στις περισσότερες όμως των περιπτώσεων, ο μηχανισμός αστοχίας για τα κελύφη είναι η αλληλεπίδραση ενός λυγισμού με τη διαρροή του υλικού. Αυτό ενισχύεται στην περίπτωση όπου η λυγηρότητα λ_0 είναι μικρή και η γωνία θ_0 είναι μεγάλη. Τότε, ο μηχανισμός αστοχίας θα καθοριστεί από τις αξονικές δυνάμεις. Έτσι αφού τα μέλη δεν μπορούν να αστοχήσουν λόγω Euler, θα υπάρξει διαρροή του υλικού. Σε αυτή την περίπτωση, το φορτίο λυγισμού (squash load) υπολογίζεται από την Εξ. (2.9) [6, 21, 37]. Όπου $N_{cr(col)}$ η μέγιστη αξονική δύναμη που μπορεί να παραλάβει ένα μέλος στο οριακό σημείο πριν να υπάρξει διαρροή. Συνήθως επιλέγονται μέλη σε κόμβους που είναι τα πιο αδύνατα από τα υπόλοιπα.

$$P_{SQ} = 6N_{cr(col)}\theta_0\gamma_m \quad (2.9)$$

Αφού υπολογιστεί και το φορτίο διαρροής του κελύφους, στη συνέχεια θα πρέπει να υπολογιστεί η παράμετρος Λ_S (Εξ. (2.10)) [4, 6] για να βρεθεί το φορτίο αστοχίας. Το φορτίο αντοχής θα υπολογιστεί στη συνέχεια μέσα από την Εξ. (2.11) [38]. Με αυτό τον τρόπο γίνεται η αλληλεπίδραση της διαρροής του υλικού με τους προηγούμενους λυγισμούς με ελαστικό υλικό. Ο συντελεστής k_{SB} εφαρμόζεται για να χαρακτηρίσει την επιδείνωση μετά την αστοχία που συμβαίνει στον ελαστικό λυγισμό για μεταλλικές κατασκευές. Έχει προσδιοριστεί ως ο λόγος των παραγόντων F_B προς F_M (συντελεστές ασφαλείας) που χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για μεταλλικά δικτυώματα, όπου έχουν συνιστώμενες τιμές 2.50 και 1.75 αντίστοιχα. Στην περίπτωση του F_M , η τιμή αυτή ήταν ο συντελεστής ασφαλείας για την πλαστική δύναμη. Το k_{SB} λαμβάνει τιμές από 1.14 έως 1.44 [38].

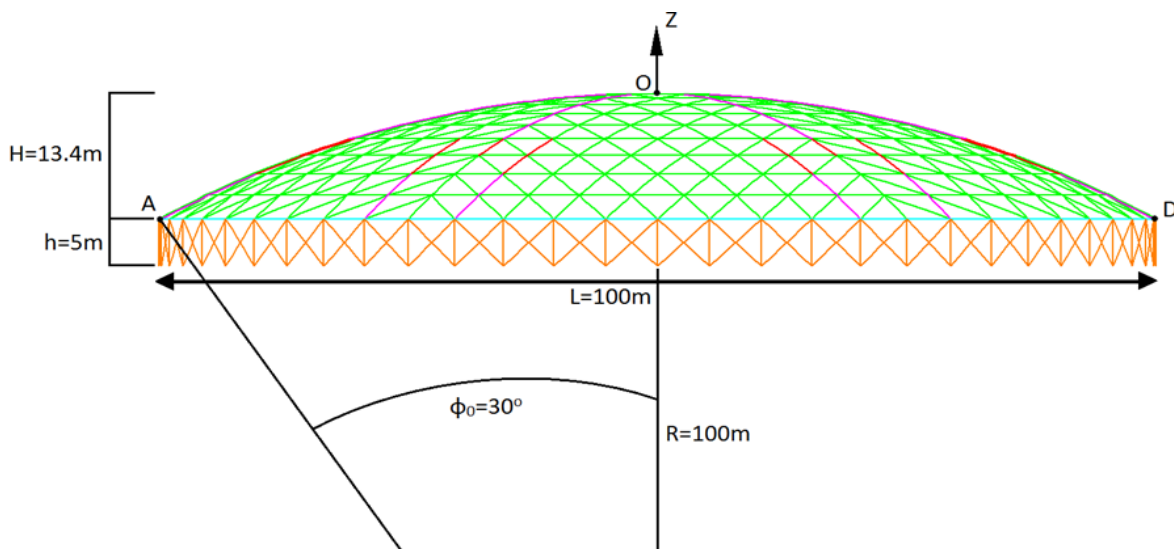
$$\Lambda_S = \sqrt{\frac{P_{SQ}}{P_{cr}^{el}}} \quad (2.10)$$

$$\frac{P_{cr}^{el-pl}}{P_{SQ}} = \frac{2}{\sqrt{k_{SB}^2 \Lambda_S^4 + 4 + k_{SB} \Lambda_S^2}} \quad (2.11)$$

Γενικά, πιο πάνω παρουσιάστηκαν οι εξισώσεις υπολογισμού των φορτίων λυγισμού. Υπάρχουν πάρα πολλοί παράμετροι οι οποίοι δε συμπεριλήφθηκαν και μπορεί να χρειαστεί να ληφθούν υπόψη καθώς επηρεάζουν την αντοχή του κελύφους, ανάλογα με τι χαρακτηριστικά έχει. Η διαδικασία εξεύρεσης του φορτίου αντοχής είναι περίπλοκη και χρονοβόρα καθώς υπάρχουν σημεία όπου πραγματοποιούνται αρκετές επαναλήψεις. Χωρίς τη χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή, η ανεύρεση του φορτίου αντοχής είναι σχεδόν αδύνατη. Έτσι, στη συνέχεια θα παρουσιαστεί ένα παράδειγμα μονόστρωτου σφαιρικού κελύφους, το οποίο η ανάλυση θα βασίζεται εξολοκλήρου σε πρόγραμμα με πεπερασμένα στοιχεία.

2.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Το παρόν κεφάλαιο ασχολείται με τα χαρακτηριστικά ενός σφαιρικού δικτυωτού κελύφους και στην συνέχεια, μέσα από αναλύσεις αναζητείται το φορτίο αστοχίας. Το κέλυφος αποτελεί παράδειγμα του βιβλίου «Guide to Buckling Load Evaluation Of Metal Reticulated Roof Structures» [1]. Το στατικό σύστημα παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.7 όπως αυτή ορίστηκε από το παράδειγμα του βιβλίου. Ωστόσο, υφίσταται κάποιες τροποποιήσεις για να γίνει πιο κατανοητή η απόκριση του σε κάθε φόρτιση. Όπως φαίνεται και στην εν λόγω εικόνα το κέλυφος στηρίζεται πάνω σε υποστυλώματα τα οποία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους και ταυτόχρονα είναι συνδεδεμένα και με χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας. Όλο αυτό συμβάλει έτσι ώστε η οριζόντια αντίσταση στη μετακίνηση να εξασφαλίζεται από το κυκλικό περιμετρικό δακτύλιο, ο οποίος ονομάζεται και δακτύλιος προέντασης. Με αυτό τον τρόπο σύνδεσης δεν αναπτύσσονται οριζόντιες δυνάμεις στις στηρίξεις από τα κατακόρυφα φορτία. Επίσης, τα κατακόρυφα υποστυλώματα λειτουργούν και για την ομαλή σύνδεση του κελύφους με το κτίριο αλλά και την ομοιόμορφη μεταφορά των κατακόρυφων φορτίων.

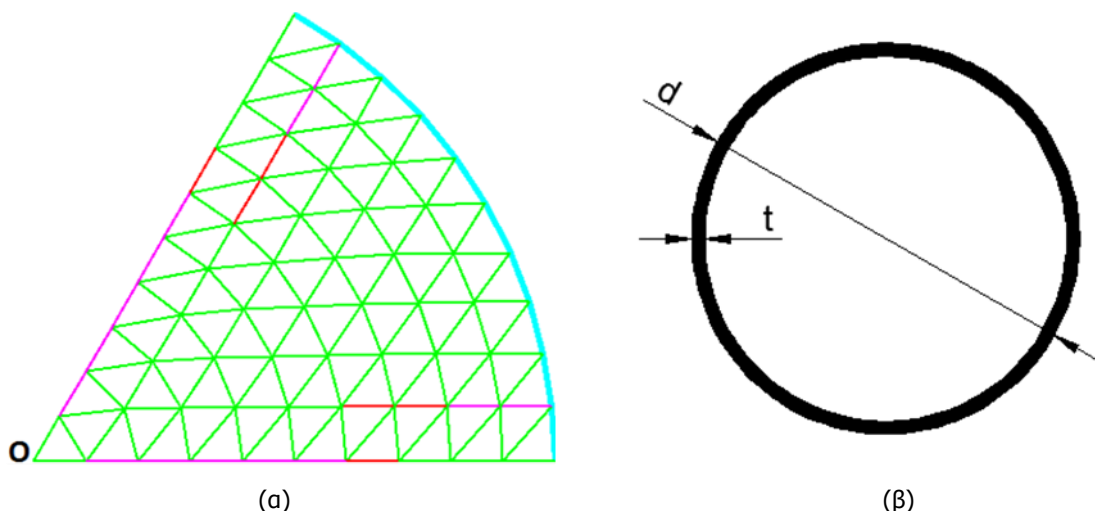


Εικόνα 2.7: Στατικό σύστημα του κελύφους σύμφωνα με το παράδειγμα

Το σφαιρικό δικτυωτό κέλυφος αποτελείται από 6 όμοιους τομείς όπως στην Εικόνα 2.8.α, και επαναλαμβάνεται για όλη τη δομή συμμετρικά. Το κέλυφος έχει κυκλική κάτοψη με διάμετρο $L=100\text{m}$, η γωνία ϕ_0 είναι 30° και η ακτίνα καμπυλότητας $R=100\text{m}$. Η κορυφογραμμή AOD αποτελείται από 20 μέλη και το κάθε μέλος έχει μήκος $l_0=523.6\text{cm}$. Η μισή υποτεινόμενη γωνία θ_0 (Εικόνα 2.4.α), όπου σχηματίζεται από δύο συνεχόμενα μέλη, είναι 1.5° και μπορεί να υπολογιστεί από $\theta_0=[\phi_0/(\text{ο αριθμός των μελών της κορυφογραμμής AOD})]$.

Το κέλυφος αποτελείται από τρεις διατομές στο εσωτερικό του και ακόμη μία διατομή για τον κυκλικό δακτύλιο της βάσης. Οι τρεις εσωτερικές διατομές έχουν μέση διάμετρο (η διάμετρος από το μέσο του πάχους της διατομής) $d_m=296.6\text{mm}$, και έχουν πάχος t από 5mm μέχρι 6mm . Η τελική διάμετρος d

όπως αναφέρεται και στη συνέχεια, παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.8.β, και έχει τιμές από 301mm έως 302mm. Η διατομή του δακτυλίου προέντασης έχει οριστεί με μέση διάμετρο $d_m=592\text{mm}$ ($d_t=629\text{mm}$) και πάχος $t=37\text{mm}$. Οι διατομές των υποστυλωμάτων και των χιαστί δεν ορίζονται στο βιβλίο, απλώς γίνεται αναφορά ότι έχουν πολύ μεγάλη διατομή σε σχέση με τις άλλες διατομές του κελύφους για να μην επηρεάζονται από την οποιαδήποτε φόρτιση υπάρχει. Οι διατομές φαίνονται στον Πίνακα 2.1 και στην Εικόνα 2.8.α όπως έχουν οριστεί στο παράδειγμα του βιβλίου «Guide to Buckling Load Evaluation Of Metal Reticulated Roof Structures». Όλα τα μέλη έχουν μέτρο ελαστικότητας $E_s=20500\text{kN/cm}^2$ και όριο διαρροής $\sigma_y=235\text{N/mm}^2$ στο κέλυφος, ενώ όλες οι συνδέσεις μεταξύ τους είναι άκαμπτες σε όλο το σφαιρικό κέλυφος.

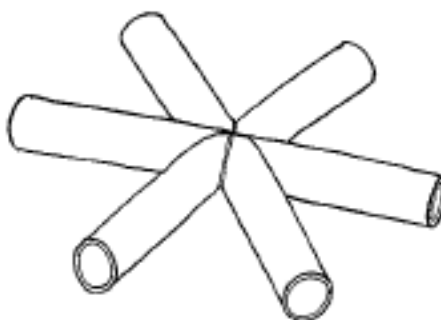


Εικόνα 2.8: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά (α) Το 1/6 της δομής του κελύφους (β) Χαρακτηριστικά διατομής

Πίνακας 2.1: Διατομές κελύφους

	Διάμετρος (mm)	Πάχος (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (kPa)	Λόγος Poisson	Όριο διαρροής (kPa)
	301	5	205000000	0.3	235000
	301,5	5,5			
	302	6			
	629	37			
	Δεν ορίστηκαν	Δεν ορίστηκαν			

Τα μέλη συνδέονται μεταξύ τους με άκαμπτες συνδέσεις. Οι συνδέσεις αυτές υλοποιούνται με τη συγκόλληση των μελών μεταξύ τους, χωρίς να υπάρχει οποιοδήποτε στοιχείο ανάμεσα στα μέλη. Η σύνδεση δηλαδή των μελών, είναι άμεση όπως και η μεταβίβαση των φορτίων μεταξύ των μελών. Η σύνδεση είναι επίπεδη και είναι σύμφωνα με την Εικόνα 2.9. Οι συνδέσεις αυτές επιτρέπουν τη δημιουργία ροπών στα μέλη και κάνουν αρκετά δύσκαμπτο το κέλυφος.

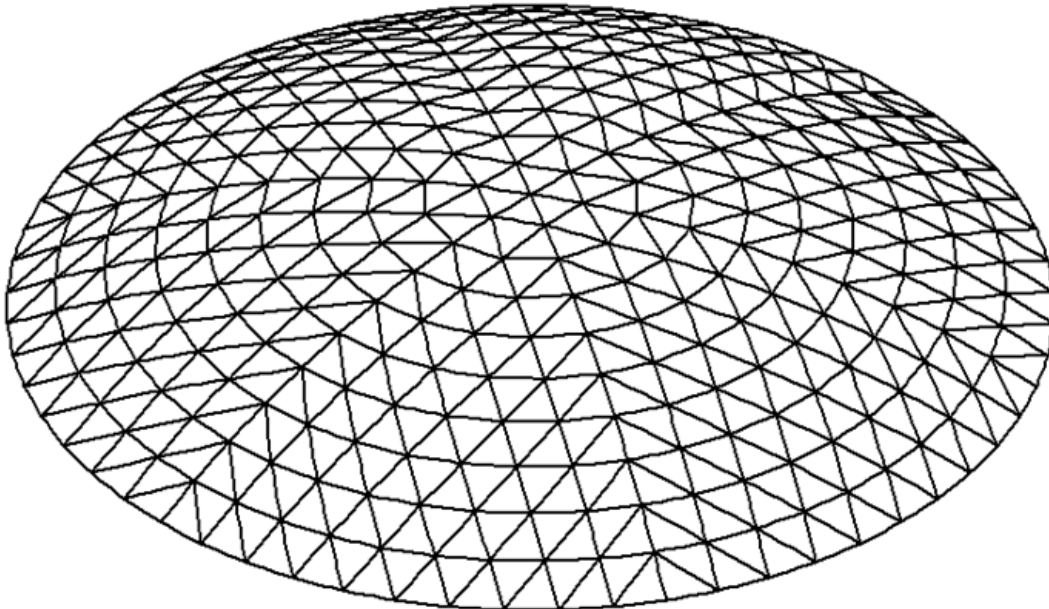


Εικόνα 2.9: Άκαμπτη σύνδεση [1]

2.4.1 Μοντελοποίηση του φορέα

Λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας του κελύφους και με την πληθώρα των διατομών θα ήταν αδύνατο να γίνουν αναλύσεις και να παρουσιαστούν οι πραγματικοί λόγοι αστοχίας. Έτσι, αποφασίστηκε όλες οι διατομές να μετατραπούν σε μία και μόνο διατομή για όλο το κέλυφος. Με αυτό τον τρόπο θα μπορεί να γίνει κατανοητός καλύτερα ο τρόπος που αποκρίνεται το κέλυφος στις διάφορες αναλύσεις που θα πραγματοποιηθούν, αφού η αστοχία δεν θα οφείλεται από το μέγεθος της διατομής (κυρίως τις μικρότερες διατομές όπου είναι πιο ευαίσθητες στα αξονικά φορτία) σε κάποιο σημείο του κελύφους. Επίσης, με την ενιαία διατομή γίνεται και πιο εύχρηστος ο τρόπος λειτουργίας του προγράμματος.

Επιπλέον, αφαιρέθηκαν και τα υποστυλώματα και οι διαγώνιοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας τα οποία στήριζαν το κέλυφος. Εξαιτίας του τεράστιου μεγέθους σε σχέση με τις άλλες διατομές, δεν πρόσφεραν καμία αλλαγή στα αποτελέσματα των αναλύσεων. Λόγο ότι αυτά δεν αποτελούν μέρος του κελύφους, δεν χρήζουν περαιτέρω μελέτη και ανάλυση. Έτσι, μετά από αυτή την τροποποίηση, το κέλυφος στηρίχτηκε στο δακτύλιο προέντασης με εξωτερικές αρθρώσεις. Μετά από τις πιο πάνω αλλαγές, το στατικό σύστημα του κελύφους έγινε όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.10, με μία πιο απλοποιημένη σύνθεση από την αρχική.



Εικόνα 2.10: Τελικό στατικό σύστημα του κελύφους

Για την πραγματοποίηση των αναλύσεων, η μοντελοποίηση του συγκεκριμένου σφαιρικού κελύφους ακολούθησε κάποια διαδικασία. Αρχικά, το κέλυφος σχεδιάστηκε εξολοκλήρου στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD. Λόγο της πολυπλοκότητας, δεν μπορούσε να καταστεί δυνατή η σχεδίαση στο πρόγραμμα αναλύσεων. Στη συνέχεια, το κέλυφος εισήχθη στο πρόγραμμα αναλύσεων Femap, όπου εκεί πραγματοποιήθηκε η διακριτοποίηση του φορέα σε πεπερασμένα στοιχεία. Κάθε μέλος του κελύφους διακριτοποιήθηκε σε 5 στοιχεία και επιλέγηκε τα αποτελέσματα της ανάλυσης να έχουν τα επικόμβια εντατικά μεγέθη. Έτσι, έγινε η εισαγωγή στο λογισμικό πρόγραμμα ADINA όπου εκεί πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις.

2.4.2 Ανάλυση του φορέα

Αφού ολοκληρώθηκε η μοντελοποίηση του φορέα, ακολουθεί η ανάλυση μέσω των πεπερασμένων στοιχείων. Πραγματοποιήθηκαν τρεις μορφές αναλύσεων για να υπολογιστούν τα αντίστοιχα φορτία λυγισμού:

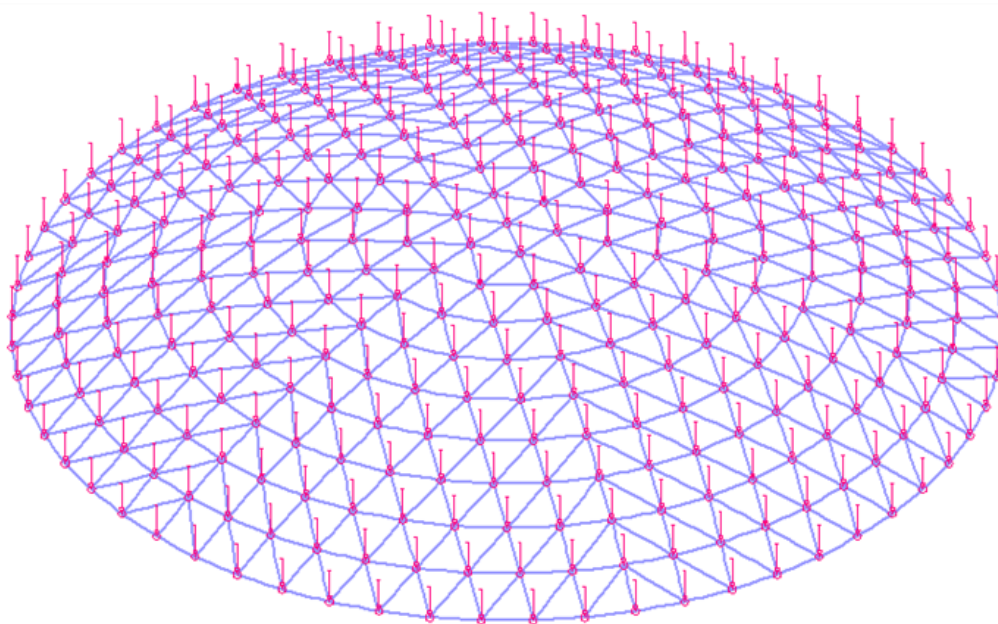
- Η γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA) για το γραμμικό φορτίο λυγισμού, όπου χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος ανάλυσης Linearized Buckling.
- Η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες (GNIA) για το ελαστικό φορτίο λυγισμού, όπου χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος collapse.
- Η μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες (GMNIA) για το ελαστοπλαστικό φορτίο λυγισμού, όπου χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος collapse.

Μερικά από τα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις είναι από το παράδειγμα του βιβλίου «Guide to Buckling Load Evaluation Of Metal Reticulated Roof Structures», ενώ κάποια άλλα είναι υποθετικά για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Με το πέρας κάθε ανάλυσης, το οριακό κρίσιμο φορτίο που προκύπτει δεν είναι κατ' ανάγκη μεγαλύτερο από εξωτερικό φορτίο, όπως ορίζεται από τον κανονισμό γιατί απώτερος σκοπός είναι να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων και του τρόπου συμπεριφοράς του σφαιρικού κελύφους.

Η φόρτιση του κελύφους που ορίζεται γίνεται από ένα νεκρό φορτίο και από το χιόνι. Το νεκρό φορτίο αποτελεί όλα τα φορτία από την ίδια κατασκευή, δηλαδή μεταλλικά μέλη και το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένα τα πλαίσια του κελύφους (συνήθως γυαλί). Όλα αυτά τα φορτία σύμφωνα με το συγγραφέα του παραδείγματος ανέρχονται στο 1.5kN/m^2 . Η φόρτιση αυτή μεταφέρεται εξολοκλήρου στο μεταλλικό σκελετό και πιο συγκεκριμένα στους κόμβους. Σε κάθε κόμβο ανάγεται ένα φορτίο σύμφωνα Εξ. (2.12), το οποίο υπολογίζεται 35.61kN .

$$\begin{aligned} P_{node} &= 1.5\text{kN/m}^2 \times A_{node} \\ A_{node} &= \sqrt{3}l_0^2 / 2 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Παρόλο που το εξωτερικό φορτίο ανέρχεται στο 35.61kN για λόγους ασφαλείας, το φορτίο αυτό αυξάνεται με ένα συντελεστή ασφαλείας F_M ίσο με 1.75, έτσι η εξωτερική φόρτιση γίνεται $1.75 \times 35,61\text{kN} = 62.32\text{kN}$. Η φόρτιση παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.11 και για να θεωρείται ο φορέας ασφαλής πρέπει να μπορεί να αντέχει πέρα από αυτό το φορτίο. Λόγω αβεβαιοτήτων και μη επαρκούς γνώσης για τα μεταλλικά κελύφη, υπάρχουν παρά πολλοί συντελεστές ασφαλείας οι οποίοι αυξάνουν το φορτίο δράσης ή μειώνουν την αντοχή του κελύφους (οι οποίοι δεν λαμβάνονται υπόψη για της αναλύσεις και τα τελικά αποτελέσματα).



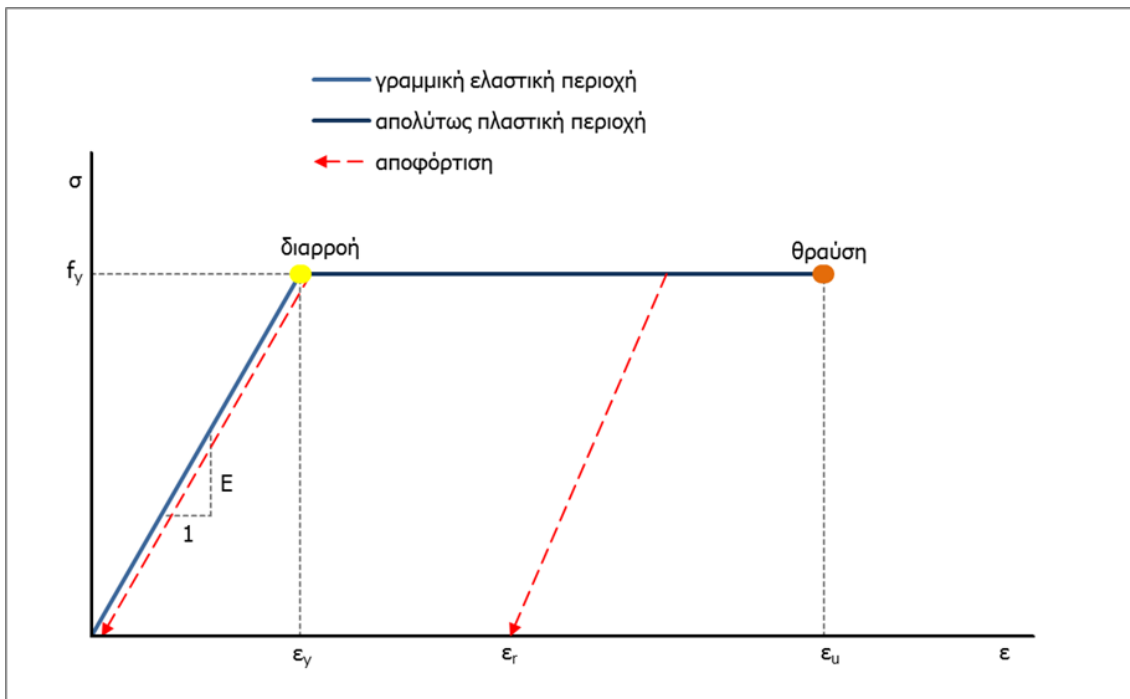
Εικόνα 2.11: Εξωτερική φόρτιση κελύφους

Η κατανομή της αρχικής ατέλειας στις μη γραμμικές αναλύσεις λυγισμού γίνεται σύμφωνα με τη μέθοδο, που χρησιμοποιεί τη γραμμική ανάλυση λυγισμού και σύμφωνα με τα αποτελέσματα (ιδιομορφές) που λαμβάνονται τοποθετείται η αρχική ατέλεια. Γενικά, χρησιμοποιούνται οι δύο πρώτες πρώτες ιδιομορφές, και στις οποίες οι μέγιστες μετατοπίσεις στους κόμβους ορίζουν το σημείο με την αρχική ατέλεια. Πραγματοποιούνται αρκετές δοκιμές, για να βρεθεί εάν εκτός από την πρώτη ιδιομορφή, οι υπόλοιπες επηρεάζουν τον τρόπο αστοχίας και τα φορτία αντοχής. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η αρχική ατέλεια σύμφωνα με μεγαλύτερες ιδιομορφές από την 1^η να μην επηρεάζει το φορέα και να αστοχεί συνεχώς ακολουθώντας τη μορφή αστοχίας της 1^{ης} ιδιομορφής. Αυτό κυρίως εξαρτάται από τα γραμμικά φορτία λυγισμού κάθε ιδιομορφής και αν υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ τους.

2.4.3 Συμπεριφορά υλικού

Ο δομικός χάλυβας, στην περίπτωση του σφαιρικού κελύφους που αναλύεται, είναι στα υλικά που λέγονται γραμμικά ελαστικά – απολύτως πλαστικά, λόγω του ότι χαρακτηρίζεται από γραμμική ελαστική συμπεριφορά μέχρι κάποια τιμή των αναπτυσσόμενων τάσεων και ανηγμένων παραμορφώσεων, ο οποίος μπορεί να καταπονηθεί εντονότερα και να υπερβεί το όριο διαρροής μέχρι τη θραύση. Η παραμόρφωση από το όριο διαρροής και μετά αυξάνεται, ενώ η τάση παραμένει σταθερή μέχρι να αστοχήσει.

Στην αρχική γραμμική περιοχή οι κλάδοι φόρτισης και αποφόρτισης συμπίπτουν, και μετά από πλήρη αποφόρτιση δεν υπάρχουν παραμένουσες παραμορφώσεις, έτσι η συμπεριφορά είναι ελαστική. Στην πλαστική περιοχή η συμπεριφορά είναι ανελαστική και κατά την αποφόρτιση ακολουθείται μια ευθεία γραμμή, παράλληλη με τον αρχικό ελαστικό κλάδο. Ενώ σε περίπτωση πλήρους αποφόρτισης παραμένουν στο δοκίμιο κάποιες παραμορφώσεις, οι λεγόμενες πλαστικές ή μόνιμες ή παραμένουσες παραμορφώσεις. Όλα όσα περιγράφηκαν για τη συμπεριφορά του υλικού φαίνονται ξεκάθαρα στο Σχήμα 2.3. Ο χάλυβα που αποτελεί το σφαιρικό κέλυφος που είναι προς εξέταση έχει μέτρο ελαστικότητας $E_s=20500\text{kN/cm}^2$ και όριο διαρροής $\sigma_y=235\text{N/mm}^2$.

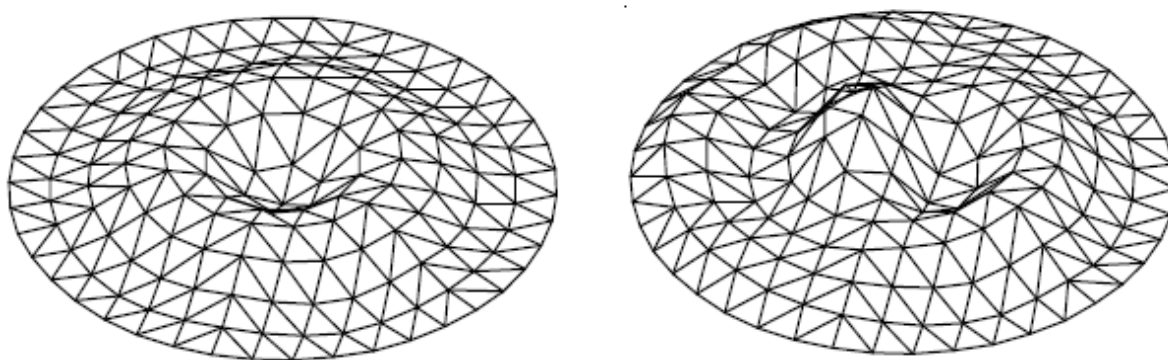


Σχήμα 2.3: Γραμμικά ελαστική – απολύτως πλαστική συμπεριφορά

2.4.4 Παραμορφώσεις

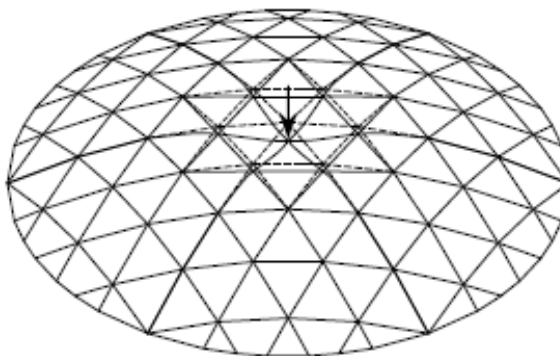
Το μονόστρωτο σφαιρικό κέλυφος που περιγράφεται πιο πάνω, στη συνέχεια αφού αναλύθηκε παρουσίασε μερικά είδη παραμορφώσεων. Οι παραμορφώσεις αυτές εμφανίζονταν είτε στη γραμμική ανάλυση λυγισμού ως ιδιομορφές, είτε στις μη γραμμικές αναλύσεις όπου σε αρκετές περιπτώσεις αποτελούσε και το μηχανισμό αστοχίας.

Συγκεκριμένα, όταν η λυγηρότητα λ_0 ήταν μικρή, όπως στην περίπτωση με άκαμπτες συνδέσεις (αφού το l_0 είναι το μισό περίπου από το πραγματικό), και επειδή η γωνία θ_0 είναι επίσης μικρή, τότε παρουσιαζόταν καθολική παραμόρφωση του κελύφους (Εικόνα 2.12). Η παραμόρφωση είχε μεγάλες μετακινήσεις σε όλους τους κόμβους του κελύφους σε σχέση με την απαραμόρφωτη κατάσταση. Γενικά, επικρατούσε μία ολική μετακίνηση προς τη φορά των κατακόρυφων δυνάμεων, με κάποια σημεία να παρουσιάζουν μεγαλύτερες μετακινήσεις. Ο τρόπος αστοχίας είναι ο καθολικός ακαριαίος λυγισμός του κελύφους και ο φορέας αυτός είναι αρκετά ευαίσθητος στην αρχική ατέλεια. Επίσης, με το πέρασ όλων των μορφών αναλύσεων, παρατηρείται αλληλεπίδραση του καθολικού ακαριαίου λυγισμού με την αστοχία του υλικού.



Εικόνα 2.12: Καθολικές μορφές αστοχίας [1]

Στην περίπτωση όμως, όπου οι συνδέσεις είχαν μικρή ακαμψία (αρθρώσεις) με αποτέλεσμα η λυγηρότητα λ_0 να αυξάνεται αφού το ισοδύναμο μήκος ήταν το πραγματικό μήκος των μελών και εξαιτίας ότι η γωνία θ_0 ήταν μικρότερη από 4 ή 5, τότε ο φορέας συμπεριφερόταν με τη μορφή dimple (Εικόνα 2.13). Η συμπεριφορά αυτή αποτελεί μια τοπική αστοχία και μπορεί να παρουσιαστεί μέσα στο κέλυφος σε οποιοδήποτε σημείο της γεωμετρίας. Αποτελεί κυρίως ένα ακαριαίο τοπικό λυγισμό, όπου δημιουργείται αυτό το λακκάκι ή εξόγκωμα σε μία μικρή περιοχή με μεγάλες μετατοπίσεις, ενώ οι μετατοπίσεις του άλλου φορέα είναι μικρές έως και μηδενικές. Σε αυτή την περίπτωση, ο φορέας δεν είναι ευαίσθητος στην αρχική ατέλεια, εκτός από πολύ υπερβολικά μεγάλα μεγέθη που μπορεί να τροποποιήσουν το μηχανισμό αστοχίας.



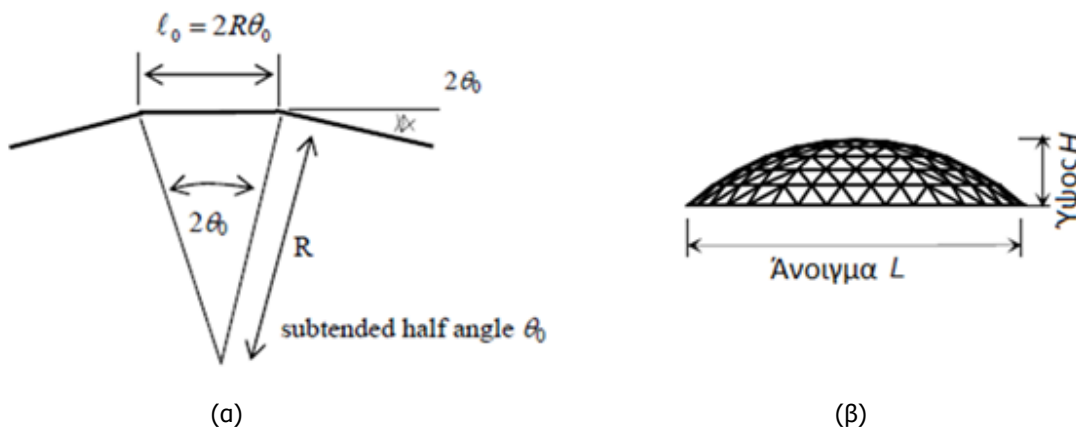
Εικόνα 2.13: Τοπική ή dimple αστοχία [1]

Μετά από όλες αυτές τις τροποποιήσεις που έχουν γίνει στο μεταλλικό κέλυφος είναι έτιμο να αρχίσουν οι αναλύσεις όπου παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια. Έτσι μέσα από τα κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζεται ο τρόπος συμπεριφοράς του κελύφους στην αλλαγή του μέτρου της αρχικής ατέλειας, σύμφωνα με την υπάρχουσα σύνδεση. Επίσης πραγματοποιείται και αλλαγή στο τρόπο σύνδεσης σε αρθρωτές συνδέσεις ώστε να διαφανεί και πάλι η επιρροή του μέτρου της αρχικής ατέλειας αλλά και η επιρροή του τρόπου σύνδεσης. Στην συνέχεια θα αναζητηθούν όλοι οι μηχανισμοί αστοχίας που μπορούν να υπάρξουν σε ένα σφαιρικό κέλυφος και πως μπορεί η αλληλεπίδραση αυτή των μηχανισμών αστοχίας να επηρεάσει τον φορέα και τα φορτία αντοχής.

3 ΚΕΛΥΦΟΣ ΜΕ ΑΚΑΜΠΤΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ

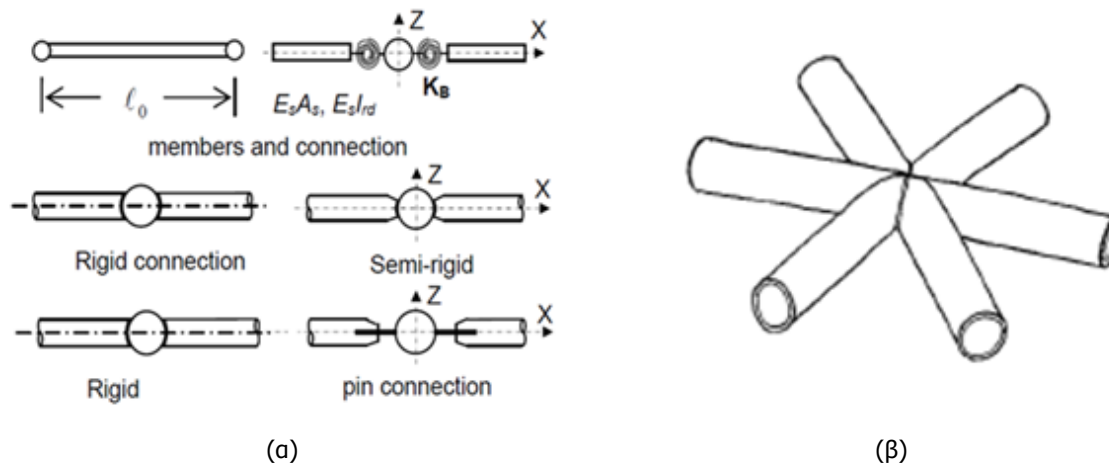
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο, το σφαιρικό δικτυωτό κέλυφος αποτελείται από άκαμπτες συνδέσεις. Οι άκαμπτες συνδέσεις απαρτίζουν την πλειοψηφία σε μονόστρωτα κελύφη λόγω της μεγαλύτερης δυσκαμψία που προσφέρουν. Το σφαιρικό κέλυφος, εξαιτίας του μικρού λόγου ύψους προς το άνοιγμα (πολύ ρηχό κέλυφος, H/L), της μικρής γωνίας θ_0 του κελύφους και του μικρού ισοδύναμου πάχους, είναι πολύ εύκαμπτο (Εικόνα 3.1). Έτσι, ο τύπος της άκαμπτης σύνδεσης δημιουργεί ένα πιο συμπαγές φορέα με αυξημένη αντοχή στα εξωτερικά φορτία.



Εικόνα 3.1: Χαρακτηριστικά κελύφους [1] (α) Γωνία $\theta_0=1.5^\circ$ (β) Λόγος ύψους προς άνοιγμα

Οι συνδέσεις όλων των μορφών εύκολα μπορούν να προσομοιωθούν με ελατήρια στα άκρα των μελών [18, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45]. Αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 3.2.α, όπου ανάλογα με το τύπο της σύνδεσης το ελατήριο αυτό έχει ανάλογη δυσκαμψία. Για παράδειγμα στις άκαμπτες συνδέσεις, η δυσκαμψία είναι πολύ μεγάλη (άπειρη), ενώ για τις αρθρωτές συνδέσεις, η δυσκαμψία είναι μηδενική. Όπως έχει προαναφερθεί, ο φορέας αποτελείται από άκαμπτες συνδέσεις, έτσι το ελατήριο αυτό θα έχει ένα πολύ μεγάλο μέτρο δυσκαμψίας. Οι άκαμπτες συνδέσεις πραγματοποιούνται από συγκολλήσεις των μελών μεταξύ τους (όπως φαίνονται στην Εικόνα 3.2.β) και με αυτό τον τρόπο τα μέλη δεν μπορούν να περιστραφούν μεταξύ τους. Συνεπώς, δημιουργούνται ροπές στην περιοχή των συνδέσεων - που στην περίπτωση αρθρώσεων, δεν εμφανίζονται. Οι ροπές αυτές αυξάνουν την εντατική κατάσταση των μελών και υπάρχει μεγαλύτερος κίνδυνος διαρροής του υλικού και αστοχίας του κελύφους γρηγορότερα.



Εικόνα 3.2: Συνδέσεις [1] (α) Προσομοίωση με ελατήριο (β) Άκαμπτη συγκολλητή σύνδεση

Καθώς προηγήθηκε η τροποποίηση του σφαιρικού κελύφους και η προσομοίωσή του, στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση του φορέα για τον προσδιορισμό της επιρροής του μέτρου της αρχικής ατέλειας. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν τρεις περιπτώσεις - στην πρώτη παρουσιάζεται η αρχική ατέλεια όπως αναλύθηκε στο βιβλίο «Guide to Buckling Load Evaluation of Metal Reticulated Roof Structures», και στις υπόλοιπες υποδιπλασιάστηκε και υπερδιπλασιάστηκε η ατέλεια. Το βιβλίο καθόρισε την αρχική ατέλεια ως 60mm. Έτσι, για την πραγματοποίηση των τριών περιπτώσεων, ορίστηκε αρχική ατέλεια 30mm, 60mm και 120mm.

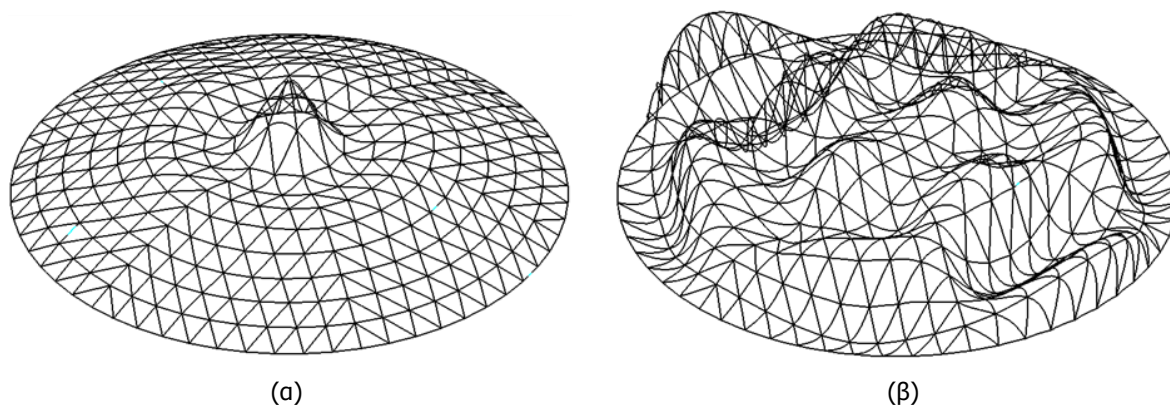
Η πρώτη ανάλυση είναι η γραμμική ανάλυση λυγισμού με απώτερο σκοπό να βρεθούν οι ιδιομορφές λυγισμού του κελύφους. Αυτές οι ιδιομορφές θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια στις αναλύσεις για την εύρεση του κρίσιμου φορτίου δράσης. Σε κάθε περίπτωση αρχικής ατέλειας έγιναν ξεχωριστά οι εξής αναλύσεις: 1) μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες, 2) μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες. Στο τέλος, παρουσιάζεται η επιρροή του μεγέθους της αρχικής ατέλειας στο τρόπο που αποκρίνεται ο φορέας.

3.2 ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ – LBA

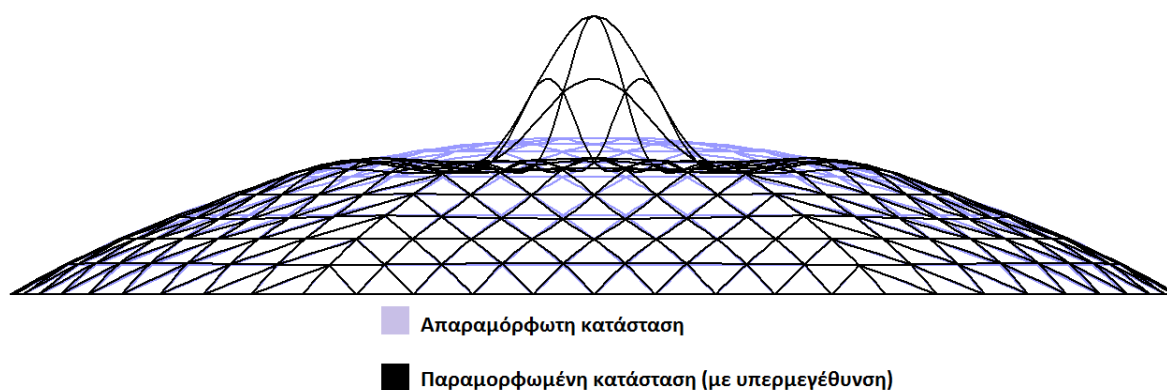
Η γραμμική ανάλυση λυγισμού είναι στην πραγματικότητα στατική 2ας τάξης, όπου οι εξισώσεις ισορροπίας του φορέα μορφώνονται στην παραμορφωμένη θέση, χωρίς οι παραμορφώσεις να είναι πολύ μεγάλες. Όπως ειπώθηκε πιο πάνω, ο σκοπός της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού είναι ο προσδιορισμός των ιδιομορφών λυγισμού του φορέα και των αντίστοιχων φορτίων λυγισμού κάθε ιδιομορφής για να προσδιοριστεί η θέση της αρχικής ατέλειας.

Για την εκτέλεση της παρούσας ανάλυσης στο ADINA χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος ανάλυσης Linearized Buckling, και ο τύπος της ανάλυσης ενεργοποιείται για μεγάλες μετακινήσεις. Η ανάλυση αυτή πραγματοποιείται με την άσκηση εξωτερικού φορτίου σε κάθε κόμβο από μία μικρή τιμή, και αυξάνεται σταδιακά μέχρι ο φορέας να αστοχήσει. Το πρόγραμμα εξάγει όσες ιδιομορφές του ορίσουμε, ξεκινώντας από την 1^η ιδιομορφή με το μικρότερο φορτίο, και συνεχίζοντας με τις μεγαλύτερες ιδιομορφές.

Η πρώτη ιδιομορφή του φορέα είναι και η πιο σημαντική για το λόγο ότι είναι ο πιθανότερος τρόπος που ο φορέας θα αστοχήσει. Οι δυο πρώτες ιδιομορφές του σφαιρικού κελύφους παρατίθενται στην Εικόνα 3.3. Όπως φαίνεται στις δύο περιπτώσεις, η αστοχία είναι καθολικής μορφής για το κέλυφος αλλά με διαφορετικό τρόπο. Λόγω της διατομής που υπάρχει, ο συντελεστής ξ_0 είναι ίσος με 12.9 - πολύ μεγαλύτερος από το όριο 3 ή 4 - για να υπάρχει Euler ιδιομορφή ενός μέλους [6, 17, 18, 19, 20, 21]. Ακόμη, λόγω των άκαμπτων συνδέσεων και της μεγάλης ακτίνας περιστροφής, η λυγνότητα των μελών είναι πολύ μικρή και είναι δύσκολο κάποιο μέλος να λυγίσει σε τόσο ρηχό κέλυφος.



Εικόνα 3.3: Ιδιομορφές λυγισμού του σφαιρικού κελύφους (α) 1^η ιδιομορφή (β) 2^η ιδιομορφή



Εικόνα 3.4: 1^η ιδιομορφή λυγισμού

Καθώς οι ιδιομορφές παρουσιάζουν τον πιθανό τρόπο αστοχίας, είναι σύνηθες φαινόμενο οι μετακινήσεις των μελών να έχουν αντίθετη φορά με αυτή που πράγματι συμβαίνει. Αυτό φαίνεται και στην 1^η ιδιομορφή, όπου το κεντρικό σημείο του κελύφους κινείται προς τα πάνω, έχοντας την μεγαλύτερη μετατόπιση. Αντίθετα, η βάση στη συγκεκριμένη υπερύψωση, καθώς επίσης και ο υπόλοιπος φορέας, κινείται προς τα πάνω με μικρότερες μετατοπίσεις, σε σχέση με τον αρχικό απαραμόρφωτο φορέα (Εικόνα 3.4). Σύμφωνα με το βιβλίο «Guide to Buckling Load Evaluation Of Metal Reticulated Roof Structures», ο τρόπος που συμπεριφέρεται η 1^η ιδιομορφή είναι τοπικός ακαριαίος λυγισμός (dimple). Η αστοχία αυτή του φορέα είναι ένα εξόγκωμα στην αρχική γεωμετρία (υποπαράγραφος 2.4.4), ενώ οι μετακινήσεις στα υπόλοιπα σημεία είναι πολύ μικρές. Όπως διαπιστώνεται στη συνέχεια, ο τρόπος που ανταποκρίνεται ο φορέας (εκτός από το κεντρικό σημείο) στις άλλες δύο μη γραμμικές αναλύσεις θα είναι διαφορετικός ως προς το μέγεθος των μετακινήσεων με αυτόν της παρούσας ιδιομορφής. Η 1^η ιδιομορφή έχει μέγιστο ασκούμενο φορτίο 226.8kN που είναι και το μικρότερο από τις επόμενες ιδιομορφές.

Στην περίπτωση των ακόλουθων ιδιομορφών, ο φορέας παρουσιάζει καθολικό τρόπο αστοχίας. Πιο συγκεκριμένα, οι ιδιομορφές αυτές συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο όπως και στην 2^η ιδιομορφή. Στην 2^η ιδιομορφή το μέγιστο ασκούμενο φορτίο ανέρχεται στο 247.7kN, όπου θεωρείται αρκετά μεγαλύτερο από την πρώτη. Με την ολοκλήρωση της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού, ακολουθεί η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες, όπου εξασφαλίζεται περισσότερο ο τρόπος που συμπεριφέρεται ο φορέας (σύμφωνα με τη μικρότερη ιδιομορφή) με την αρχική ατέλεια που δίνεται στην 1^η ιδιομορφή.

Πραγματοποιήθηκαν ακόμη και οι μη γραμμικές αναλύσεις με αρχική ατέλεια σύμφωνα με ιδιομορφές μεγαλύτερες από την πρώτη αλλά στα αποτελέσματα αυτά δεν υπήρξε καμία μεταβολή στην απόκριση

του φορέα. Λόγω του μεγάλου χάσματος μεταξύ των φορτίων λυγισμού της πρώτης με τις υπόλοιπες ιδιομορφές, η επιρροή αυτών των μηχανισμών αστοχίας είναι αδύνατη.

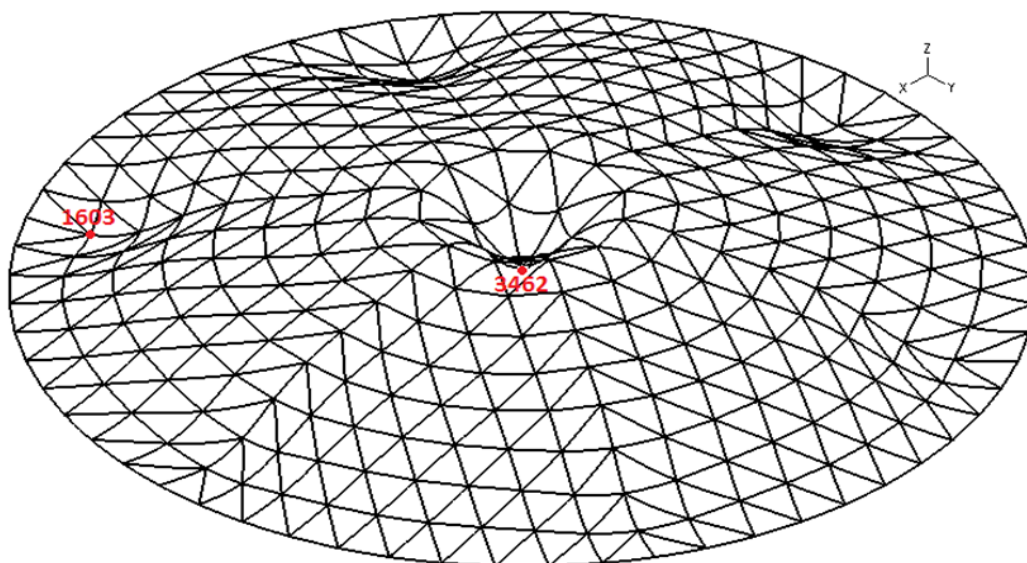
3.3 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕ ΑΤΕΛΕΙΕΣ – ΓΝΙΑ

Στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες, οι εξισώσεις ισορροπίας θεωρούνται ξανά στην παραμορφωμένη του κατάσταση του φορέα. Η μόνη διαφορά με τη γραμμική ανάλυση είναι ότι διαφέρει έντονα από την απαραμόρφωτη, έτσι ώστε να μην επιτρέπεται στους υπολογισμούς να λαμβάνονται υπόψη περιορισμοί στο μέγεθος των μετατοπίσεων.

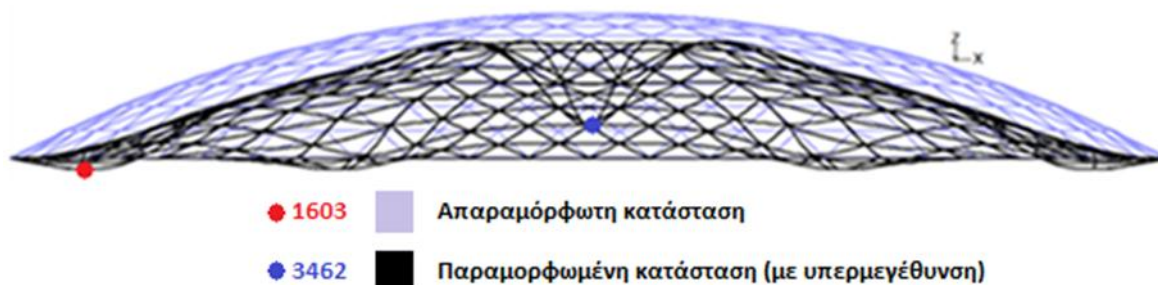
Στο ADINA για την εκτέλεση της ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος collapse για την επίλυση έντονων μη γραμμικών προβλημάτων. Η ανάλυση ολοκληρώνεται είτε στην περίπτωση όπου ολοκληρώνονται τα βήματα που έχουν οριστεί, ή όταν φτάσει στη μέγιστη μετακίνηση το σημείο που έχουμε ορίσει στις παραμέτρους της ανάλυσης. Αυτή η ανάλυση ενεργοποιείται με μία πολύ μικρή αρχική διέγερση, και το εξωτερικό αρχικό φορτίο που ορίστηκε αυξάνεται μέχρι να φτάσει στην κρίσιμη τιμή που ο φορέας αστοχεί.

Στην περίπτωση του σφαιρικού κελύφους, η αρχική διέγερση ορίστηκε σε ένα κόμβο πλησίον του κεντρικού κόμβου O (3462), με φορά τα αρνητικά του άξονα Z και δόθηκε ως μέγιστη μετακίνηση του κεντρικού αυτού κόμβου το 1m. Η αρχική ατέλεια δίνεται στη μέγιστη μετατόπιση της 1^{ης} ιδιομορφής και συγκεκριμένα στον κεντρικό κόμβο O (3462). Οι τρεις περιπτώσεις που θα πραγματοποιηθούν είναι για αρχική ατέλεια 30mm, 60mm και 120mm.

Αφού ολοκληρώθηκε η πρώτη περίπτωση με αρχική ατέλεια 30mm, ο φορέας συμπεριφέρεται όπως στις Εικόνα 3.5 και Εικόνα 3.6. Όπως φαίνεται, όλος ο φορέας μετακινήθηκε προς τα κάτω με τον κεντρικό κόμβο να έχει τη μέγιστη μετακίνηση και τη δημιουργείται τοπικού εξογκώματος. Παρόμοια περίπτωση γίνεται και σε κόμβους που βρίσκονται πάνω στην κορυφογραμμή AOD και πολύ κοντά στη βάση του κελύφους. Οι κόμβοι αυτοί παρουσιάζουν πάλι την ίδια συμπεριφορά dimple, όπως για παράδειγμα ο κόμβος 1603. Ο φορέας στο κέντρο συμπεριφέρθηκε κατά ανάλογο τρόπο με την 1^η ιδιομορφή, αλλά στα υπόλοιπα σημεία η συμπεριφορά αλλάζει. Η κύρια όμως διαφορά είναι ότι εδώ, ο τρόπος παραμόρφωσης είναι καθολικός καθώς οι μετακινήσεις στον υπόλοιπο φορέα είναι αξιοσημείωτες.



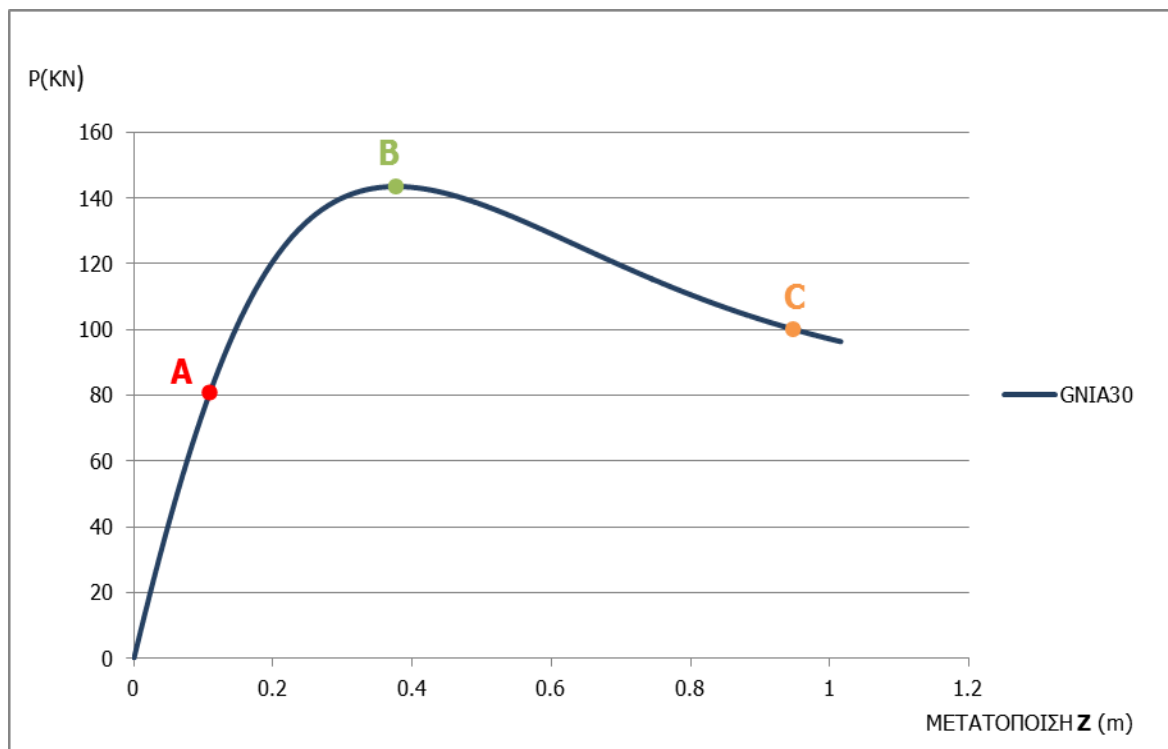
Εικόνα 3.5: Παραμορφωμένη κατάσταση του σφαιρικού κελύφους στο οριακό σημείο πριν την αστοχία



Εικόνα 3.6: Το σφαιρικό κέλυφος στο οριακό σημείο πριν την αστοχία

Στο συγκεκριμένο φορέα με αρχική ατέλεια 30mm, με την ολοκλήρωση της ανάλυσης ένας δρόμος ισορροπίας που απεικονίζει τη συμπεριφορά του κελύφους είναι του κεντρικού κόμβου (3462) με ανοδικό και καθοδικό κλάδο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, που ακολουθεί. Η ανάλυση ολοκληρώθηκε όταν η μετατόπιση του κεντρικού κόμβου έφθασε τη μέγιστη τιμή που ορίστηκε (1m). Το μέγιστο εξωτερικό φορτίο (στο σημείο B) έχει μέτρο 143.54kN και η μετατόπιση στο κεντρικό κόμβο σε αυτό το φορτίο είναι 0.377mm. Το ελαστικό φορτίο δράσης είναι όπως αναμενόταν, πιο μικρό από το αντίστοιχο γραμμικό φορτίο ανάλυσης καθώς ο φορέας λόγω άκαμπτων συνδέσεων είναι αρκετά ευαίσθητος στις ατέλειες.

Παρατηρείται, επίσης, ότι στην αρχή του δρόμου ισορροπίας, ο φορέας λειτουργεί με γραμμική συμπεριφορά. Μετά το σημείο A και καθώς πλησιάζουμε σε φορτίο κοντά στο οριακό σημείο B, παρατηρείται σημαντική αύξηση των μετατοπίσεων σε σχέση με το φορτίο που υποδηλώνει τη μείωση της δυσκαμψίας. Αυτή η μείωση της δυσκαμψίας είναι ο τρόπος με τον οποίο εκδηλώνεται ο λυγισμός του σφαιρικού κελύφους. Ο λυγισμός αυτός είναι τοπικός ακαριαίος στον κεντρικό σημείο του κελύφους, αφού μετά την εκδήλωση αυτή, ο φορέας στα υπόλοιπα σημεία κινείται και πάλι στην απαραμόρφωτη κατάσταση. Ο φορέας δεν έχει τη δυνατότητα να παραλάβει φορτίο μεγαλύτερο από το 143.54kN, επομένως δεν έχει ούτε μεταλυγισμική αντοχή.

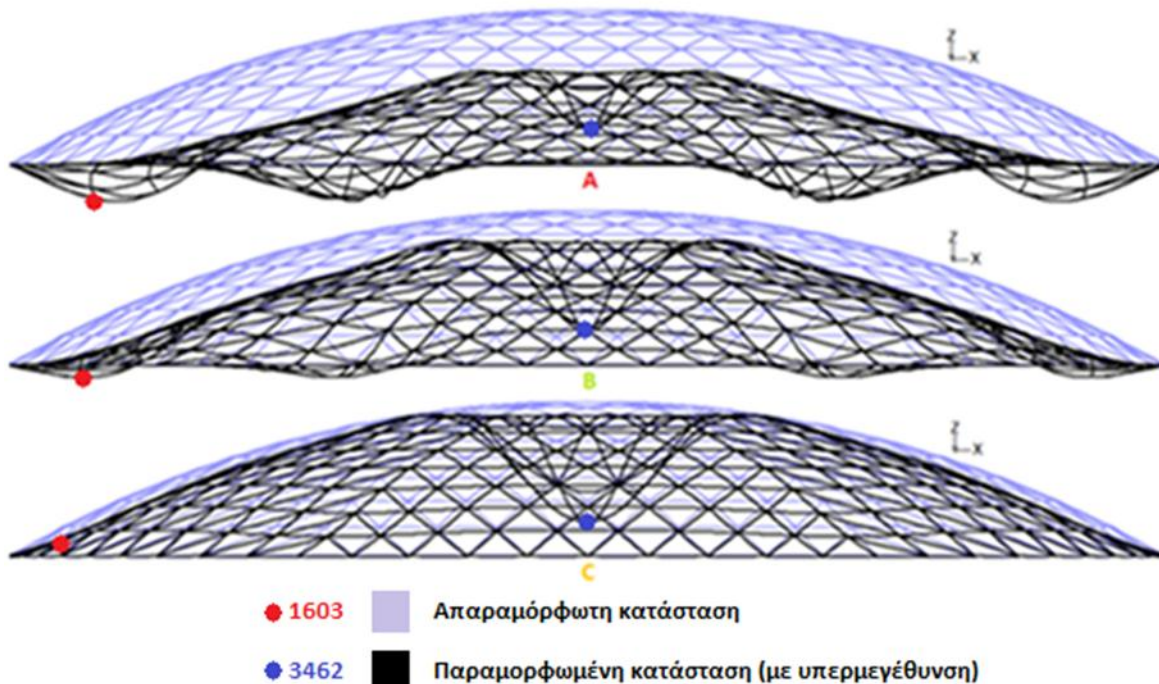


Σχήμα 3.1: Δρόμος ισορροπίας του κεντρικού κόμβου O (3462)

Ο τρόπος με τον οποίο αποκρίνεται το σφαιρικό κέλυφος στη συγκεκριμένη φόρτιση, προβάλλεται στην Εικόνα 3.7. Η συγκεκριμένη εικόνα δείχνει το κέλυφος στην παραμορφωμένη του κατάσταση στα τρία σημεία που είναι στο δρόμο ισορροπίας του κεντρικού κόμβου Ο στο Σχήμα 3.1. Όταν το φορτίο είναι 80kN στο σημείο Α, όλα τα μέλη του φορέα κινούνται προς τα κάτω (κατά την διεύθυνση Ζ), με τον κεντρικό κόμβο να μετακινείται περισσότερο και να δημιουργεί τοπικό εξόγκωμα. Παρόμοιο, ωστόσο γεγονός συμβαίνει και στην περιοχή του κόμβου 1603.

Στο οριακό σημείο Β, όπως εμφανίζεται και στο δρόμο ισορροπίας του κεντρικού κόμβου Ο, η μετατόπιση του κόμβου αυξάνεται ακόμα περισσότερο μέχρι τη τιμή 0.377mm. Οι μετακινήσεις των υπόλοιπων κόμβων επίσης αυξάνονται, έτσι ολόκληρο το κέλυφος κατεβαίνει προς τα κάτω (στην Εικόνα 3.7 φαίνεται ότι οι μετακινήσεις του σημείου Β είναι μικρότερες από το Α, εξαιτίας του γεγονότος ότι το πρόγραμμα υπεργεμεθύνει αναλογικά όλες τις μετατοπίσεις στην παρούσα στιγμή). Επίσης, στα σημεία όπως ο κόμβος 1603, οι μετακινήσεις αυξάνονται σημαντικά.

Καθώς το σφαιρικό κέλυφος έχει αστοχήσει στο σημείο C που η δύναμη είναι 100kN και η μετατόπιση του κόμβου Ο κοντά στο 1m, τότε μόνο στα σημεία κοντά στον κεντρικό κόμβο αυξάνεται η μετατόπιση. Τα σημεία, όπως ο κόμβος 1603, που βρίσκονται πάνω στην κορυφογραμμή AOD, λειτουργούν αντίθετα με τα σημεία κοντά στο κεντρικό κόμβο. Σε αυτά τα σημεία, η μετακίνηση γίνεται μικρότερη και πλησιάζει τη μηδενική τιμή, άρα η αστοχία δεν προέρχεται από τον τοπικό ακαριαίο λυγισμό αυτών των σημείων.

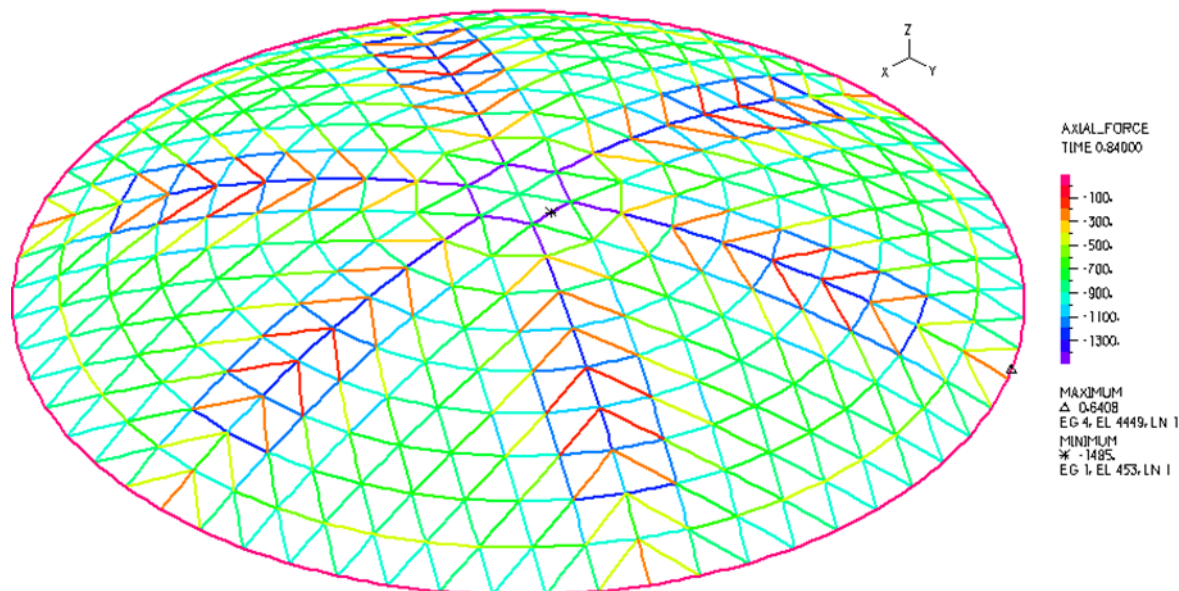


Εικόνα 3.7: Ο φορέας στις αντίστοιχες χρονικές περιπτώσεις του δρόμου ισορροπίας του κεντρικού κόμβου Ο

Στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες του σφαιρικού κελύφους, με τη χρήση του αλγόριθμου collapse, οι δρόμοι ισορροπίας στα σημεία που είναι κοντά στον κεντρικό κόμβο Ο (3462), έχουν ανοδικό και καθοδικό κλάδο απεικονίζοντας πλήρως την απόκριση του φορέα. Τα σημεία δηλαδή όπου παρατηρείται ο ακαριαίος λυγισμός στο κέντρο του κελύφους. Οι δρόμοι ισορροπίας στα υπόλοιπα σημεία του σφαιρικού κελύφους δεν προσφέρονται για μελέτη. Συγκεκριμένα σε αυτούς τους δρόμους, ο ανοδικός κλάδος συμπίπτει με το καθοδικό κλάδο.

Στην οριακή στιγμή πριν από την αστοχία, λόγω της συμμετρίας του σχήματος, η αξονική φόρτιση παρουσιάζεται συμμετρική. Όπως διαπιστώνεται και στην Εικόνα 3.8, τα μέλη που βρίσκονται πάνω στο κεντρικό εξάγωνο έχουν τις μεγαλύτερες τιμές. Η μεγαλύτερη τιμή της θλιπτικής αξονικής δύναμης

είναι σε ένα μέλος πάνω σε αυτό το εξάγωνο και έχει τιμή 1485kN. Στην κορυφογραμμή AOD, τα μέλη (εκτός από τα τρία πρώτα κοντά στην βάση), όπως και μερικά μέλη δεξιά και αριστερά της κορυφογραμμής, έχουν μεγάλη αξονική τιμή σε σχέση με τα υπόλοιπα μέλη. Πιο συγκεκριμένα, τα μέλη με θλιπτική αξονική δύναμη μεγαλύτερη από 1100kN, όπως φαίνονται και από την Εικόνα 3.8, είναι περίπου τα ίδια με αυτά που ο συγγραφέας του παραδείγματος του σφαιρικού κελύφους έχει δώσει μεγαλύτερη διατομή, είτε 5.5mm ή 6mm (Εικόνα 2.7). Άρα, αυτό επεξηγεί το λόγο των διαφορετικών διατομών στο παράδειγμα.



Εικόνα 3.8: Αξονική φόρτιση του κελύφους στο οριακό σημείο πριν την αστοχία για ατέλεια 30mm

Πιο πάνω παρουσιάστηκε η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες για το σφαιρικό κέλυφος με αρχική ατέλεια 30mm στον κεντρικό κόμβο O (3462). Οι δύο περιπτώσεις με μέτρο αρχικής ατέλειας 60mm και 120mm που πραγματοποιήθηκαν, εξέδωσαν παραπλήσια αποτελέσματα με την αρχική ατέλεια 30mm. Και στις τρεις περιπτώσεις, η αστοχία προήλθε λόγω καθολικού ακαριαίου λυγισμού, με το λυγισμό να εκδηλώνεται στην περιοχή του κόμβου 3462. Η αστοχία είναι καθολική εξαιτίας ότι το υπόλοιπο κέλυφος παρουσιάζει σημαντική παραμόρφωση σε όλη τη δομή του. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συγκριτικά και οι τρεις περιπτώσεις όπου διαφάνεται η επιρροή του μέτρου της αρχικής ατέλειας.

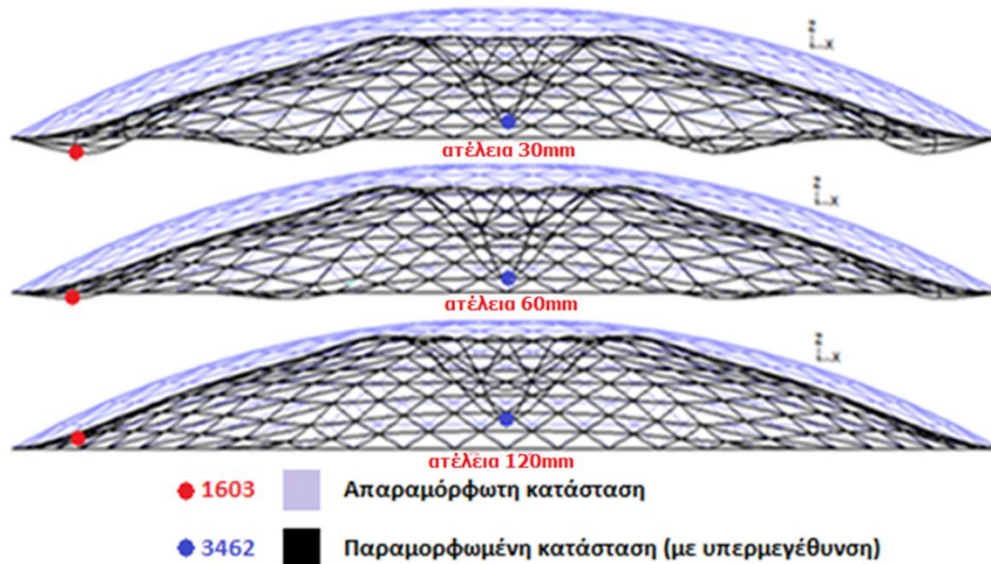
3.3.1 Επιρροή μεγέθους αρχικής ατέλειας

Για την εκτέλεση των αναλύσεων με αρχική ατέλεια 60mm και 120mm χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι ακριβώς παράμετροι με την προηγούμενη περίπτωση. Η μόνη διαφορά είναι το μέτρο της αρχικής ατέλειας, με σκοπό να φανεί η επιρροή της στην απόκριση του φορέα.

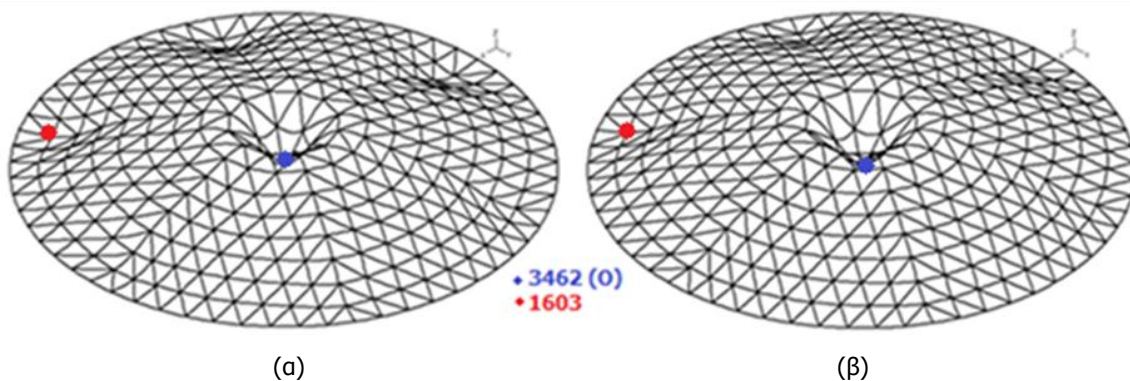
Όπως φαίνεται στις τρεις περιπτώσεις (Εικόνα 3.5, Εικόνα 3.9 και Εικόνα 3.10), ο φορέας έχει περίπου ίδια ανταπόκριση, με μερικές διαφορές ως προς το μέγεθος των μετατοπίσεων. Δηλαδή, το σφαιρικό κέλυφος έχει καθολική μετακίνηση προς τα κάτω, αλλά καθώς η ατέλεια αυξάνεται, η μετατόπιση αυτή μειώνεται. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι ο φορέας αστοχεί πιο γρήγορα με την αύξηση της ατέλειας.

Η μείωση στη μετατόπιση κατά τον άξονα Z είναι σε όλους τους κόμβους, και είναι της τάξης κυρίως από 2-4cm σε όλο τον φορέα για κάθε διπλασιασμό της αρχικής ατέλειας. Μια υποθετική μέση μετακίνηση όλου του φορέα στην οριακή φάση πριν την αστοχία, για αρχική ατέλεια 30mm, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι 9-11cm (εκτός βέβαια από την περιοχή του κεντρικού κόμβου που εξαιρείται). Άρα, αυτή η μείωση είναι περίπου 20-30% σε κάθε περίπτωση. Για παράδειγμα, η μετατόπιση του κόμβου

1603 στην οριακή φάση πριν ο φορέας αστοχήσει είναι 0.130m, 0.107m και 0.082m για τις περιπτώσεις της αρχικής ατέλειας 30mm, 60mm και 120mm αντίστοιχα. Σε αντίθετη περίπτωση, η μετακίνηση του κεντρικού κόμβου στην οριακή φάση πριν την αστοχία αυξάνεται καθώς η αρχική ατέλεια αυξάνεται. Αναλυτικά, η μετατόπιση αυτή για αρχική ατέλεια 30mm, 60mm και 120mm είναι 0.377m, 0.407m και 0.467m αντίστοιχα.



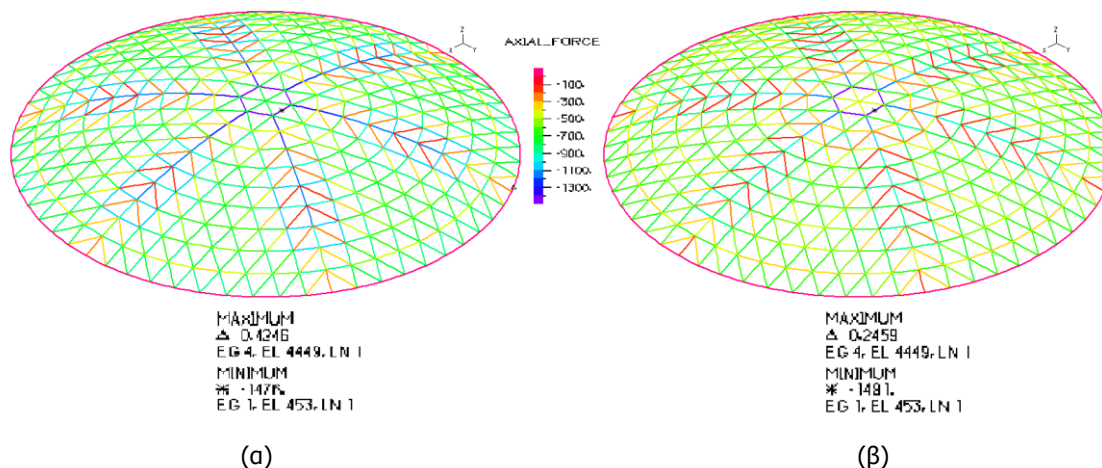
Εικόνα 3.9: Το σφαιρικό κέλυφος στο οριακό σημείο πριν την αστοχία και στις τρεις περιπτώσεις



Εικόνα 3.10: Το σφαιρικό κέλυφος στο οριακό σημείο πριν την αστοχία (α) ατέλεια 60mm (β) ατέλεια 120mm

Η αξονική φόρτιση του σφαιρικού κελύφους επηρεάζεται επίσης από την αρχική ατέλεια που δίνεται σε κάθε περίπτωση. Σύμφωνα με τις Εικόνα 3.8 και Εικόνα 3.11, η ένταση της αξονικής φόρτισης μειώνεται σε όλο το φορέα, καθώς η ατέλεια αυξάνεται. Αυτό παρατηρείται κυρίως στην κορυφογραμμή AOD, όπου οι θλιπτικές δυνάμεις είναι περίπου 1300kN για ατέλεια 30mm, αλλά μέχρι την ανάλυση για ατέλεια 120mm, οι θλιπτικές δυνάμεις γίνονται κάτω από 1100kN. Πιθανότατα, αυτό να οφείλεται στο γεγονός ότι ο φορέας αστοχεί πιο γρήγορα από ακαριαίο λυγισμό με την αύξηση της ατέλειας.

Οι αξονικές δυνάμεις στην ανάλυση αυτή με ελαστικό υλικό είναι μεγαλύτερες από την αξονική αντοχή ($N_{cr(coll)}$) των διατομών πριν αυτές διαρρεύσουν. Συμπερασματικά, θεωρείται ότι σίγουρα θα υπάρχει επιρροή του μηχανισμού αστοχίας από τη διαρροή του υλικού. Το σημείο με τη μέγιστη αξονική δύναμη (είναι το ίδιο και στις τρεις περιπτώσεις) έχει πολύ μεγάλη διαφορά από την αντοχή του και έτσι η επιρροή του μηχανισμού αστοχίας του υλικού θα είναι πολύ μεγάλη στο σφαιρικό κέλυφος με άκαμπτες συνδέσεις.



Εικόνα 3.11: Αξονική φόρτιση του κελύφους στο οριακό σημείο (α) στέλεια 60mm(β) στέλεια 120mm

3.3.2 Η επιρροή στην αντοχή του κελύφους

Μέχρι στιγμής ειπώθηκε η επιρροή του μέτρου της αρχικής ατέλειας, όσον αφορά τις μετακινήσεις και τις αξονικές φορτίσεις. Σε αυτό το σημείο θα αναφερθεί η αντοχή του κελύφους, καθώς και κατά πόσο αυτή επηρεάζεται. Μετά την ολοκλήρωση της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες και για τις τρεις περιπτώσεις, το Σχήμα 3.2 δείχνει τους δρόμους ισορροπίας για το κεντρικό κόμβο O.

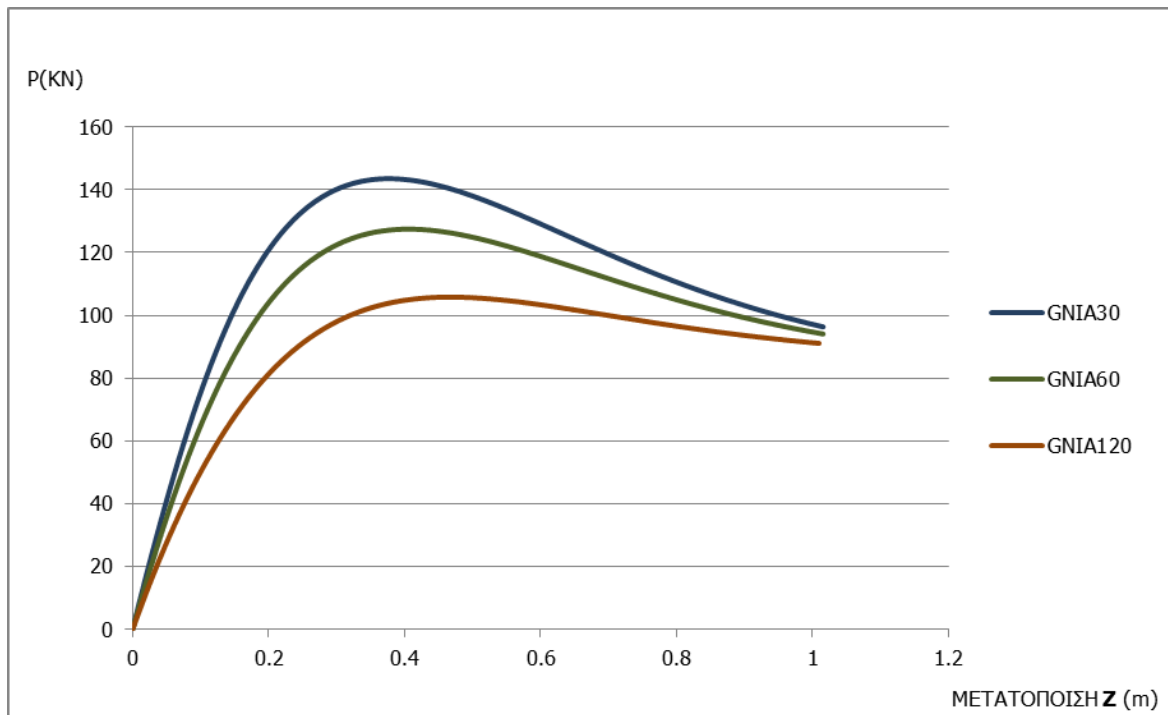
Αυτό που πραγματικά συμπεραίνεται είναι ότι το μέτρο της αρχικής ατέλειας έχει μεγάλη επιρροή στην ανταπόκριση του κελύφους από την εξωτερική φόρτιση, αφού η μείωση της αντοχής του κελύφους καθώς αυξάνεται το μέτρο της αρχικής ατέλειας, είναι πολύ μεγάλη. Η μέγιστη δύναμη που μπορεί να αντέξει το σφαιρικό κέλυφος για αρχική ατέλεια 30mm, 60mm και 120mm είναι 143.55kN, 127.47kN και 105.83kN αντίστοιχα. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα ποσοστά μείωσης κάθε περίπτωσης, σε σχέση με την αρχική ατέλεια που δόθηκε στην αρχή κάθε ανάλυσης. Τα ποσοστά αυτά είναι πολύ σημαντικά ως προς τα εξωτερικά φορτία. Έτσι, η αρχική ατέλεια έχει μεγάλη επίδραση στο σφαιρικό κέλυφος με άκαμπτες συνδέσεις.

Πίνακας 3.1: Ποσοστά μείωσης της αντοχής του κελύφους

Αρχική ατέλεια (mm)	Αντοχή κελύφους (kN)	Ποσοστό Μείωσης (%)
30	143.55	11
60	127.47	
60	127.47	17
120	105.83	
30	143.55	26
120	105.83	

Όσον αφορά τους δρόμους ισορροπίας, σε όλες τις περιπτώσεις, η συμπεριφορά του φορέα μοιάζει αρκετά. Η αρχική δυσκαμψία του φορέα όμως μειώνεται λίγο με την αύξηση της ατέλειας. Ο φορέας δεν παρουσιάζει σε καμία περίπτωση μεταλυγισμική συμπεριφορά καθώς μετά τον ακαριαίο λυγισμό υπάρχει αυξημένη παραμόρφωση της περιοχής όπου αστοχεί.

Η λυγηρότητα λ_0 και η γωνία θ_0 στο σφαιρικό κέλυφος που αναλύθηκε πιο πάνω είναι πολύ μικρά. Στο κεφάλαιο 2 αναφέρθηκε ότι τέτοια κέλυφη είναι πολύ ευαίσθητα στην αρχική ατέλεια, το οποίο επιβεβαιώθηκε και από τις τρεις περιπτώσεις που ολοκληρώθηκαν. Αφού για κάθε διπλασιασμό υπάρχει αύξηση μεγαλύτερη από 10%.



Σχήμα 3.2: Δρόμοι ισορροπίας του κεντρικού κόμβου O (3462) και για τις τρεις περιπτώσεις

Τελειώνοντας με τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες, η μελέτη θα συνεχιστεί με τη μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες. Ανώτερος σκοπός είναι η διαπίστωση της επιρροής της αρχικής ατέλειας που θα δοθεί στο φορέα σε συνδυασμό με το υλικό που είναι κατασκευασμένο το κέλυφος.

3.4 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕ ΑΤΕΛΕΙΕΣ – ΓΜΝΙΑ

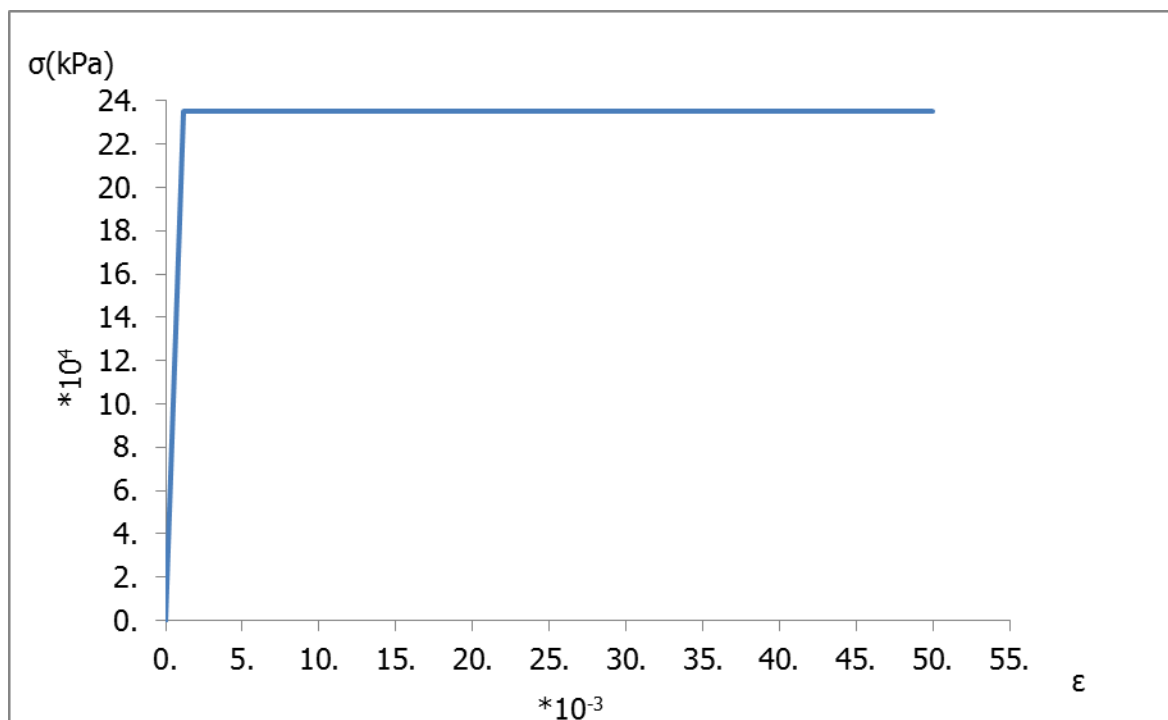
Συνοψίζοντας, προηγήθηκαν οι αναλύσεις για γραμμική και μη γραμμική γεωμετρία του σφαιρικού κελύφους με ελαστικό υλικό. Είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη και η συμπεριφορά του δομικού υλικού που αποτελεί το φορέα και να γίνει αντιληπτό το πως αυτό επηρεάζει την απόκριση του φορέα, ανάλογα με τη φόρτιση που υπάρχει. Στη μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες ισχύει επίσης, και η μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού.

Αυτή η κατάσταση εξυπακούεται πως το υλικό μπορεί να διαρρεύσει σε κάποια τιμή των τάσεων και να παρουσιάσει μετελαστική συμπεριφορά. Διαφορετικά, αυτό ονομάζεται και μέθοδος συνολικής αντοχής. Πιο αναλυτικά, για ακραίες περιπτώσεις φόρτισης επιτρέπεται η μετελαστική συμπεριφορά των υλικών, σε προκαθορισμένες θέσεις και υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, με στόχο να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή οικονομία στις κατασκευές. Αυτή η τοπική υπέρβαση του ορίου διαρροής του δομικού υλικού οδηγεί σε κατάργηση της αναλογίας μεταξύ επιβαλλόμενων φορτίων – αναπτυσσόμενης έντασης και παραμόρφωσης.

Για την εκτέλεση της μη γραμμικής ανάλυσης υλικού γεωμετρίας με ατέλειες στο ADINA απαιτείται η χρήση του αλγόριθμου collapse, προκειμένου να προσδιοριστεί ο πλήρης δρόμος ισορροπίας μετά την επίδραση του υλικού. Η ανάλυση ολοκληρώνεται σε μία από τις τρεις περιπτώσεις: (1) όταν ολοκληρωθούν τα βήματα που έχουν οριστεί, (2) όταν φθάσει στη μέγιστη μετακίνηση το σημείο που έχουμε ορίσει στις παραμέτρους της ανάλυσης, και (3) όταν αστοχήσει το μη γραμμικό υλικό. Η ανάλυση ενεργοποιείται με μία πολύ μικρή αρχική διέγερση και το εξωτερικό αρχικό φορτίο που ορίστηκε αυξάνεται μέχρι να φτάσει στην κρίσιμη τιμή που ο φορέας αστοχεί.

Η μη γραμμικότητα υλικού δε συμπεριλαμβανόταν στις δύο προηγούμενες αναλύσεις, καθώς ήταν γραμμικές για το υλικό, και δόθηκε μόνο το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson (γιατί χρησιμοποιήθηκε μόνο η δυσκαμψία του ελαστικού (γραμμικού) κλάδου του διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων του υλικού). Σε αυτή την ανάλυση υλοποιείται η μη γραμμικότητα του υλικού και έτσι δίνεται το όριο διαρροής.

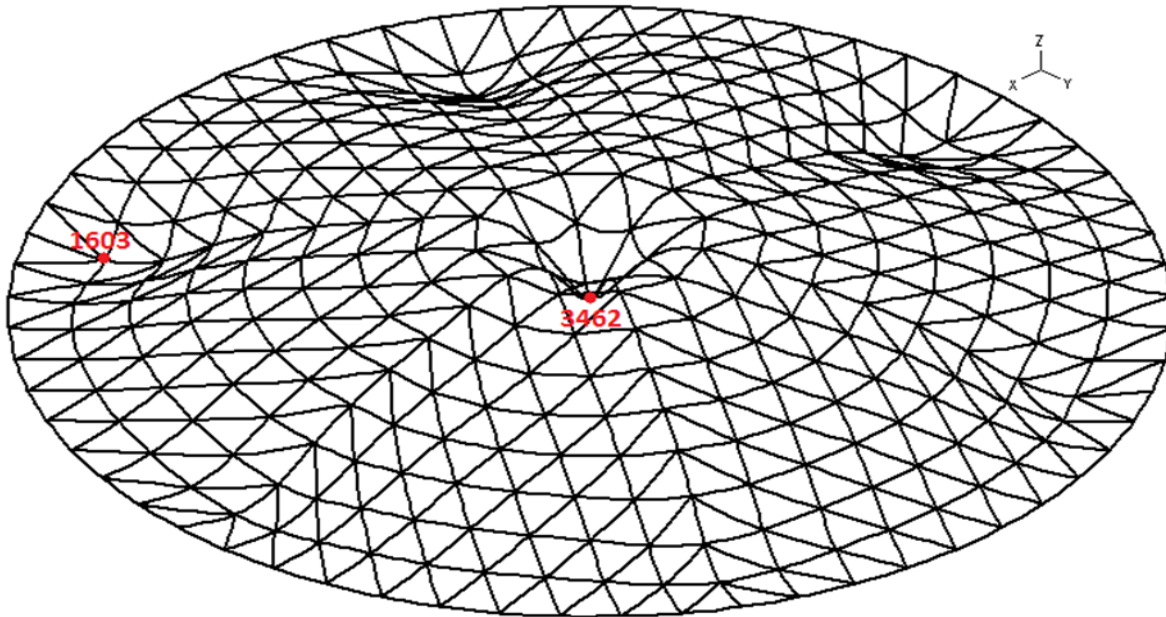
Τα χαρακτηριστικά που δόθηκαν μέχρι στιγμής στο πρόγραμμα είναι κοινά με την παρούσα ανάλυση του σφαιρικού κελύφους για τις τρεις περιπτώσεις που θα πραγματοποιηθούν για αρχική ατέλεια του κεντρικού κόμβου (3462) 30mm,60mm και 120mm. Επιπλέον, το όριο διαρροής του χάλυβα είναι ίσο με 235000kPa, έτσι στο Σχήμα 3.3 παρατηρείται η συμπεριφορά του δομικού χάλυβα.



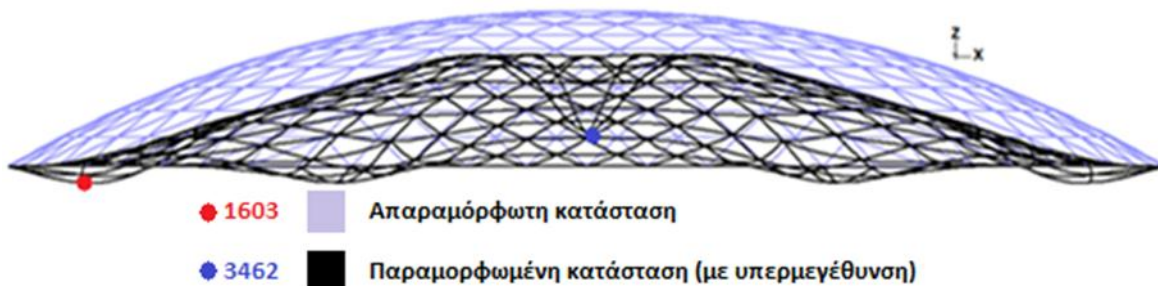
Σχήμα 3.3: Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του υλικού

Μετά τον καθορισμό του υλικού, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση για την πρώτη περίπτωση με αρχική ατέλεια 30mm, όπου ο φορέας συμπεριφέρεται όπως φαίνεται στις Εικόνα 3.12 και Εικόνα 3.13. Παρόμοια αντίδραση με την 1^η ιδιομορφή, υπάρχει και σε αυτή την ανάλυση για το φορέα. Όλο το σφαιρικό κέλυφος μετακινείται προς τα κάτω, με τον κόμβο 3462 να έχει τη μέγιστη μετατόπιση και να δημιουργείται τοπικό εξόγκωμα. Επιπλέον, οι κόμβοι που βρίσκονται χαμηλά δίπλα από τον κυκλικό δακτύλιο προέντασης, και πάνω στην κορυφογραμμή AOD, παρουσιάζουν το ίδιο φαινόμενο (όπως φαίνεται για παράδειγμα ο κόμβος 1603). Η κύρια όμως διαφορά με την 1^η ιδιομορφή είναι ότι εδώ, ο τρόπος παραμόρφωσης είναι καθολικός, καθώς οι μετακινήσεις στον υπόλοιπο φορέα είναι αρκετά μεγάλες. Η συμπεριφορά του κελύφους είναι κατά ανάλογο τρόπο όπως παρουσιάστηκε και στην προηγούμενη παράγραφο 3.3 για τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες.

Η αστοχία όπως φαίνεται από τα σχήματα είναι καθολική με μεγάλες παραμορφώσεις σε όλους τους κόμβους, άρα το υλικό δεν επηρέασε τον τρόπο αστοχίας. Ωστόσο ο λυγισμός που κατά κύριο λόγο οφείλεται στον ακαριαίο λυγισμό της κορυφής του κελύφους, εμφανίζεται σε μικρότερο φορτίο λόγω της διαρροής του υλικού.



Εικόνα 3.12: Παραμορφωμένη κατάσταση του σφαιρικού κελύφους στην οριακή σημείο πριν την αστοχία

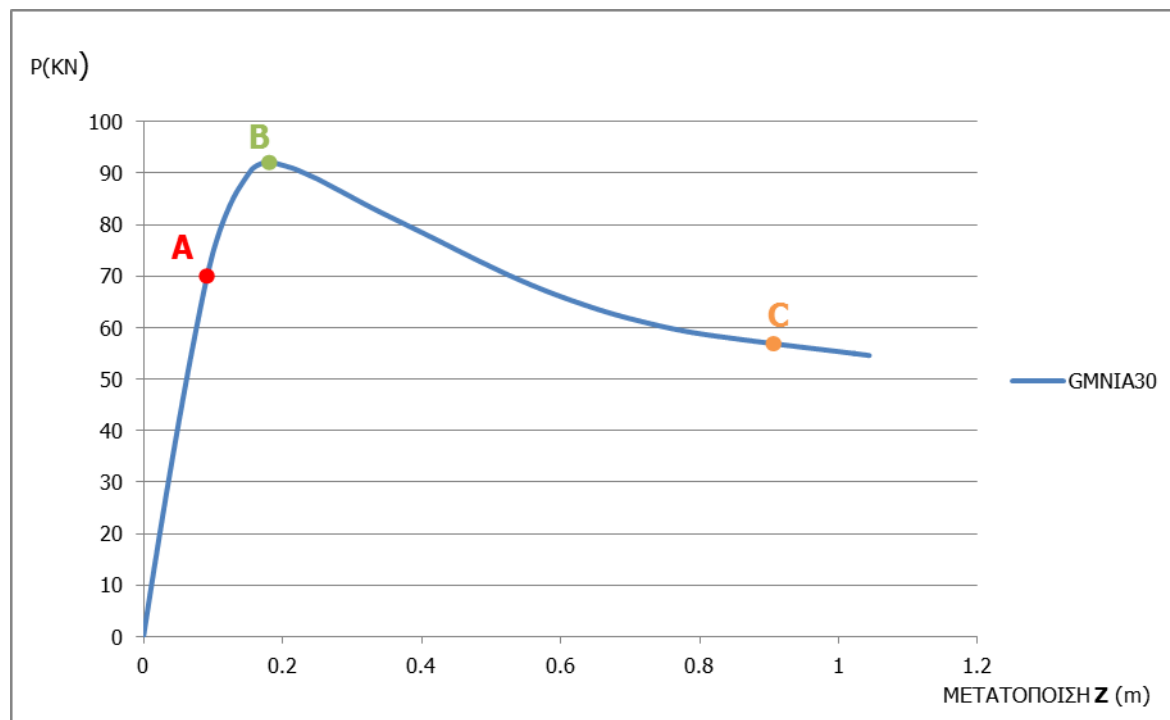


Εικόνα 3.13: Το σφαιρικό κέλυφος στο οριακό σημείο πριν την αστοχία

Για μέτρο αρχικής ατέλειας 30mm, ο κεντρικός κόμβος 3462 αποτυπώνει ένα δρόμο ισορροπίας με ανοδικό και καθοδικό κλάδο (Σχήμα 3.4). Το σφαιρικό κέλυφος στην αρχή και μέχρι το σημείο A, παρουσιάζει μια γραμμική συμπεριφορά. Στη συνέχεια, ο δρόμος ισορροπίας του κελύφους εμφανίζει αξιοσημείωτη μείωση της δυσκαμψίας, και επομένως μεγάλη αύξηση μετατοπίσεων. Για περαιτέρω αύξηση του φορτίου, η δυσκαμψία τελικά μηδενίζεται και ο δρόμος ισορροπίας παρουσιάζει ένα μέγιστο (το σημείο B). Αυτή η απότομη μεταβολή της δυσκαμψίας συνάρτησης του φορτίου είναι αποτέλεσμα της μη γραμμικότητας του προβλήματος, όπου το υλικό διαρρέει κοντά στο σημείο A και ο φορέας γίνεται πιο ευάλωτος και παρουσιάζει τον ακαριαίο λυγισμό.

Αυτό το οριακό σημείο έχει τιμή 92.08kN, εκφράζοντας την αντοχή του σφαιρικού κελύφους που μπορεί να παραλάβει. Η μετατόπιση του κεντρικού κόμβου σε αυτό το σημείο είναι 0.181mm. Πέρα από αυτό το σημείο B, ο δρόμος ισορροπίας γίνεται καθοδικός και έτσι το κέλυφος χαρακτηρίζεται από αστάθεια, με αποτέλεσμα να μην έχει μεταλυσιμική αντοχή. Το φορτίο και οι συγκεκριμένες μετακινήσεις είναι πολύ μικρότερες από τη μη γραμμική ανάλυση με ελαστικό υλικό, αποδεικνύοντας τη σπουδαιότητα της ποιότητας του χάλυβα που θα επιλεχτεί για την κατασκευή του σφαιρικού κελύφους.

Αν ο χάλυβας είχε μεγαλύτερο όριο διαρροής, τότε οι διατομές θα μπορούσαν να παραλάβουν μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις και το σφαιρικό δικτυωτό κέλυφος θα αστοχούσε σε μεγαλύτερα φορτία. Η μείωση του φορτίου αντοχής από την προηγούμενη ανάλυση έχει ποσοστό 35% και έτσι η επιρροή του υλικού είναι σημαντική.



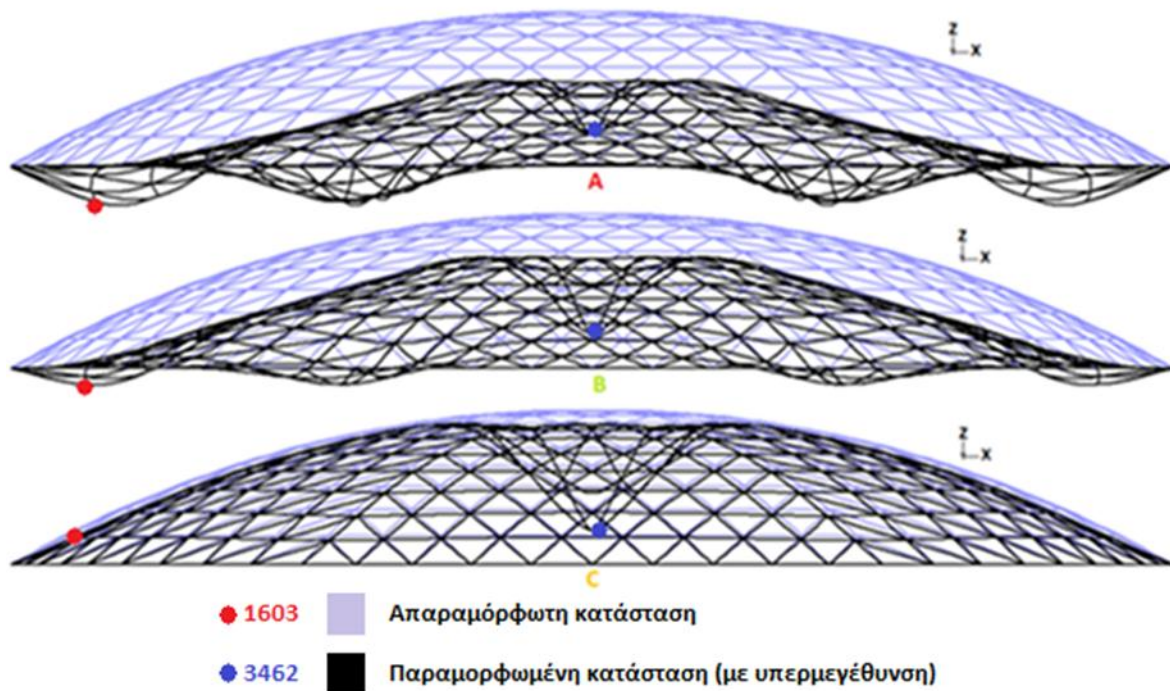
Σχήμα 3.4: Δρόμος ισορροπίας του κεντρικού κόμβου O (3462)

Ο τρόπος με τον οποίο ανταποκρίνεται το κέλυφος στη συγκεκριμένη φόρτιση παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.14, όπου στα τρία σημεία που δείχνει ο δρόμος ισορροπίας του κεντρικού κόμβου O, το κέλυφος είναι στην παραμορφωμένη του κατάσταση. Όπως απεικονίζεται, όταν το φορτίο είναι 70kN στο σημείο A, όλα τα μέλη του φορέα κινούνται προς τα κάτω (κατά την διεύθυνση Z) με τον κεντρικό κόμβο να μετακινείται περισσότερο και να έχει τη μορφή dimple, ενώ το ίδιο συμβαίνει και στην περιοχή του κόμβου 1603.

Στο οριακό σημείο B, όπως φαίνεται και στο δρόμο ισορροπίας του κεντρικού κόμβου O, η μετατόπιση του κόμβου αυτού αυξάνεται ακόμα περισσότερο και φτάνει τη τιμή 0.377mm. Οι μετακινήσεις και στα υπόλοιπα σημεία αυξάνονται και έχουν τη μέγιστη τιμή από όλη τη φόρτιση (στην εικόνα φαίνεται ότι οι μετακινήσεις του σημείου B είναι μικρότερες από το A, εξαιτίας του γεγονότος ότι το πρόγραμμα υπεργεμθύνει αναλογικά όλες τις μετατοπίσεις στην παρούσα στιγμή).

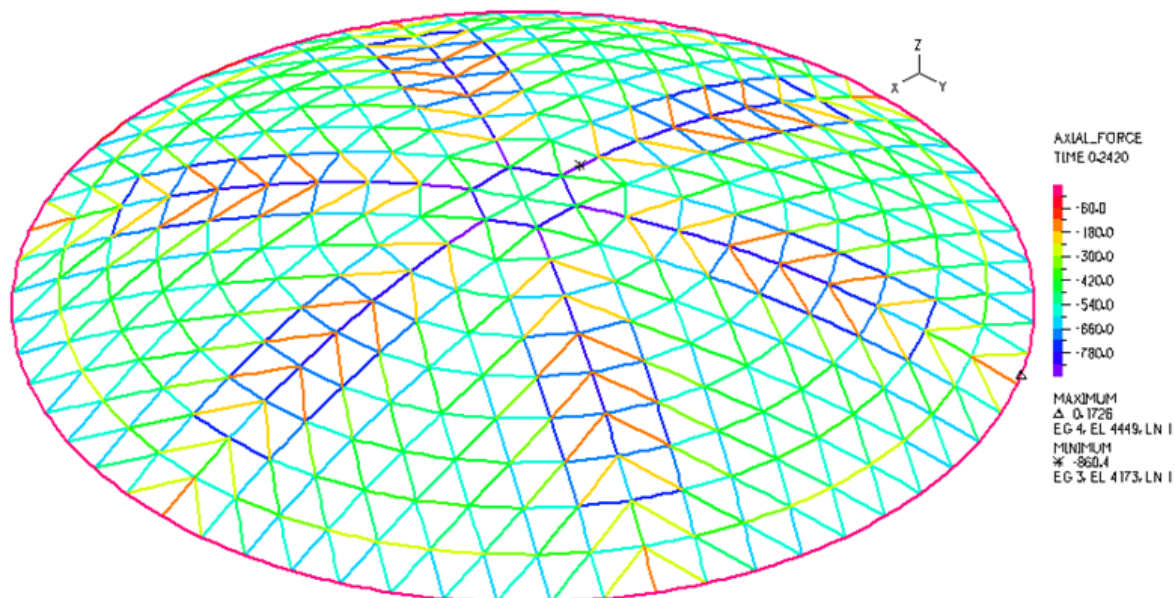
Καθώς το σφαιρικό κέλυφος έχει αστοχήσει, η δύναμη του σημείου C είναι 100kN και η μετατόπιση του κόμβου O κοντά στο 1m, τότε η μετατόπιση αυξάνεται μόνο στα σημεία κοντά στον κεντρικό κόμβο. Τα σημεία, όπως ο κόμβος 1603, που βρίσκονται πάνω στην κορυφογραμμή AOD, και είναι κοντά στον δακτύλιο προέντασης, λειτουργούν αντίθετα με τα σημεία κοντά στο κεντρικό κόμβο. Σε αυτά τα σημεία, η μετακίνηση γίνεται μικρότερη και πλησιάζει τη μηδενική τιμή. Αυτό προδίδει και τον ακριβή μηχανισμό αστοχίας του κελύφους που είναι στην κορυφή του κελύφους με ακαριαίο λυγισμό της περιοχής όπου δημιουργείται το εξόγκωμα.

Για τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες του σφαιρικού κελύφους και για τον αλγόριθμο collapse που χρησιμοποιήθηκε, τα σημεία που δίνουν δρόμους ισορροπίας που μπορούν να περιγράψουν τη συμπεριφορά του κελύφους (με ακριβή τρόπο) είναι αυτά κοντά στον κεντρικό κόμβο O (3462). Δηλαδή τα σημεία που δημιουργούν το λακκάκι (dimple) στο κέντρο του κελύφους. Οι δρόμοι ισορροπίας στα υπόλοιπα σημεία του σφαιρικού κελύφους δεν προσφέρονται για διερεύνηση. Συγκεκριμένα σε αυτούς τους δρόμους, ο ανοδικός κλάδος συμπίπτει με το καθοδικό κλάδο.



Εικόνα 3.14: Ο φορέας στις αντίστοιχες χρονικές περιπτώσεις του δρόμου ισορροπίας του κεντρικού κόμβου Ο

Η αξονική φόρτιση στο οριακό σημείο (Εικόνα 3.15) είναι ανάλογη με τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες. Δηλαδή, τα μέλη που βρίσκονται πάνω στη κορυφογραμμή AOD, εκτός από τα αρχικά μέλη κοντά στο δακτύλιο προέντασης, έχουν τις μεγαλύτερες θλιπτικές τιμές, με τη μέγιστη τιμή 860.4kN. Επίσης, τα μέλη δεξιά και αριστερά της κορυφογραμμής AOD, παρατηρείται να έχουν μεγαλύτερη θλιπτική τιμή από τα υπόλοιπα. Μεγάλες τιμές θλιπτικής αξονικής έχουν και τα μέλη του κεντρικού εξάγωνου. Έτσι αποδεικνύεται ξανά ο λόγος που ο συγγραφέας του εν λόγω παραδείγματος χρησιμοποιούσε διαφορετικές τιμές πάχους για τις διατομές, εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς της αξονικής φόρτισης που έχουν τα μέλη του σφαιρικού κελύφους. Στην παράγραφο 3.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων και των τριών περιπτώσεων, έτσι ώστε η σύγκριση να προσδιορίσει το βαθμό επιρροής της ποιότητα του υλικού (χάλυβα) στην αξονική φόρτιση.



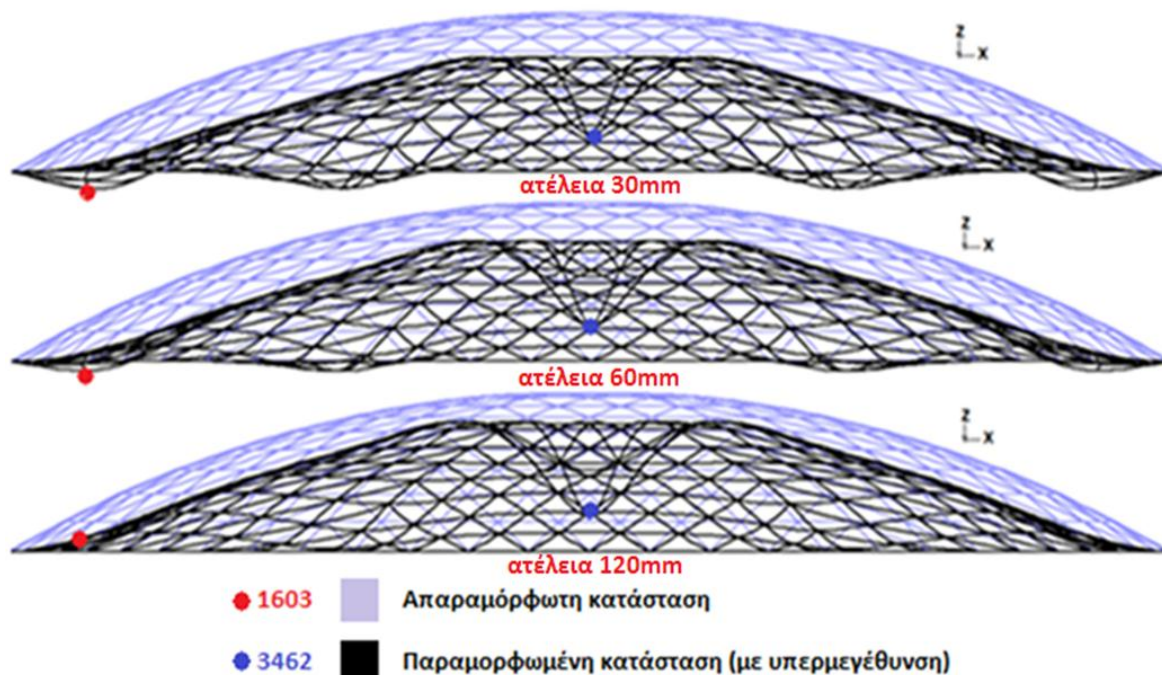
Εικόνα 3.15: Αξονική φόρτιση του κελύφους στο οριακό σημείο πριν την αστοχία για ατέλεια 30mm

Όπως προαναφέρθηκε, η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες για το σφαιρικό κέλυφος θα πραγματοποιηθεί επίσης και με αρχική ατέλεια 60mm και 120mm. Οι δύο αυτές αναλύσεις που έγιναν, θα παρουσιαστούν στη συνέχεια συγκριτικά με την αρχική ατέλεια 30mm. Τα αποτελέσματα που έδωσαν είναι παραπλήσια μεταξύ τους και ο τρόπος που πραγματοποιήθηκαν είναι ο ίδιος, εκτός του μέτρου της αρχικής ατέλειας. Η αστοχία και στις τρεις περιπτώσεις είναι καθολική εξαιτίας ότι όλο κέλυφος παρουσιάζει σημαντική παραμόρφωση με πιο έντονη την περιοχή της κορυφής όπου η παραμόρφωση έχει τη μορφή εξογκώματος.

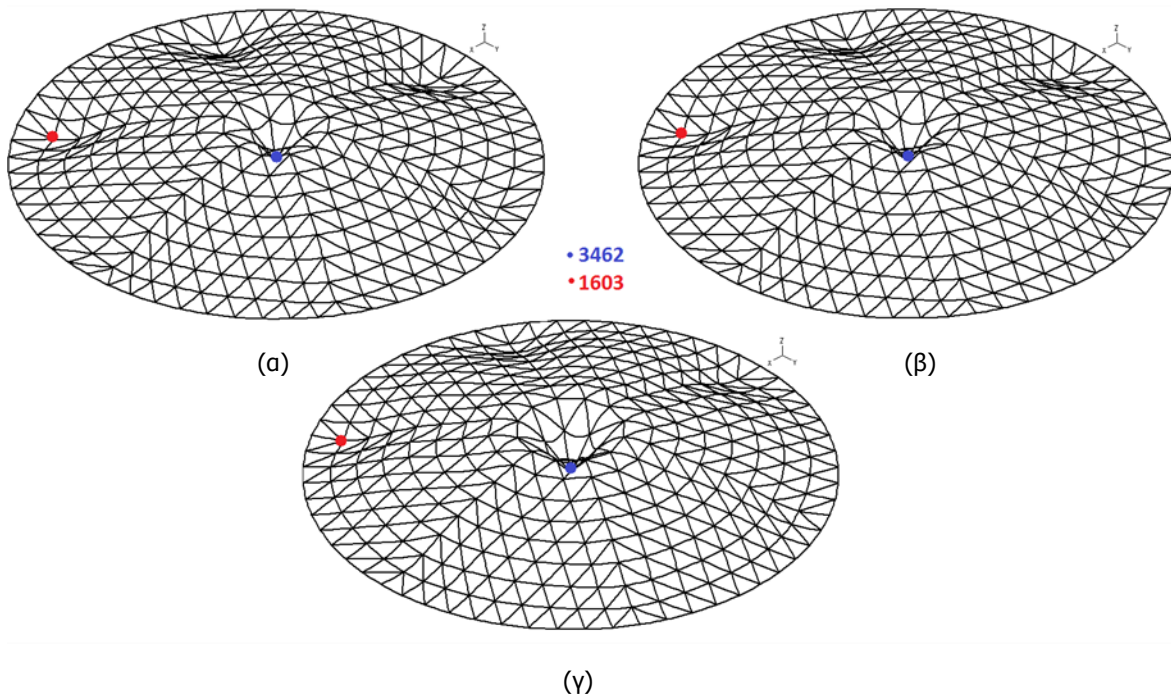
3.4.1 Επιρροή μεγέθους αρχικής ατέλειας

Οι Εικόνα 3.16 και Εικόνα 3.17 αποδεικνύουν ότι ο φορέας έχει την ίδια απόκριση και στις τρεις περιπτώσεις, με μερικές διαφορές ως προς το μέγεθος των μετατοπίσεων. Το σφαιρικό κέλυφος έχει μια καθολική μετακίνηση προς τα κάτω, αλλά καθώς η ατέλεια αυξάνεται, η μετατόπιση μειώνεται. Αυτό οφείλεται κυρίως ότι ο φορέας αστοχεί πιο γρήγορα με την αύξηση της αρχικής ατέλειας. Η μείωση στη μετατόπιση είναι για όλους τους κόμβους του κελύφους, εκτός από το κεντρικό κόμβο 3462, όπου αυξάνεται και πιο συγκεκριμένα είναι 0.181m, 0.191m και 0.225m. Η μείωση της μετακίνησης για όλους τους κόμβους του κελύφους ανέρχεται περίπου 10-20% σε κάθε υπερδιπλασιασμό του μέτρου της αρχικής ατέλειας. Πιο συγκεκριμένα, ο κόμβος 1603 στην οριακή φάση πριν ο φορέας αστοχίσει, η μετατόπισή του είναι 0.068m, 0.061m και 0.050m για τις περιπτώσεις της αρχικής ατέλειας 30mm, 60mm και 120mm αντίστοιχα.

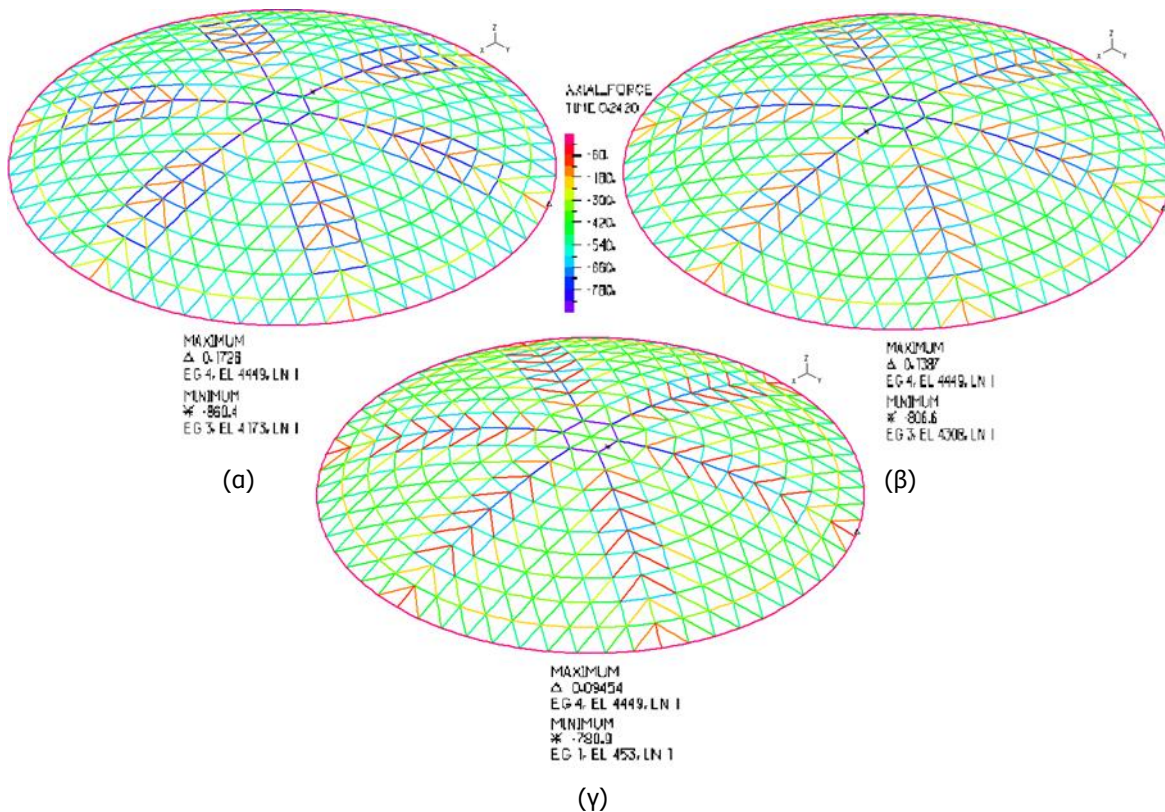
Καθώς το μέτρο της αρχικής ατέλειας επηρεάζει τη γενική συμπεριφορά του φορέα, έτσι επηρεάζεται και η αξονική του φόρτιση σε κάθε περίπτωση. Η ένταση της αξονικής φόρτισης (θλιπτική δύναμη) μειώνεται σε όλο το φορέα, καθώς το μέτρο της ατέλειας αυξάνεται. Στην Εικόνα 3.18 φαίνονται οι αξονικές δυνάμεις για κάθε μέλος. Διαπιστώνεται ότι από θλιπτικές δυνάμεις πάνω από 700kN που έχουν τα μέλη της κορυφογραμμής AOD για αρχική ατέλεια 30mm, μέχρι την ανάλυση για ατέλεια 120mm, τα μέλη έχουν θλιπτική αξονική δύναμη κάτω από 600kN. Αξιοπρόσεκτο είναι ότι τα μέλη που έχουν τη μέγιστη θλιπτική αξονική δύναμη και στις τρεις αναλύσεις, είναι διαφορετικά, κάτι που δε συνέβηκε στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες, όπου το μέλος με τη μέγιστη θλιπτική δύναμη ήταν το ίδιο.



Εικόνα 3.16: Το σφαιρικό κέλυφος στο οριακό σημείο πριν την αστοχία και στις τρεις περιπτώσεις



Εικόνα 3.17: Το σφαιρικό κέλυφος στο οριακό σημείο πριν την αστοχία (α) ατέλεια 30mm (β) ατέλεια 60mm (γ) ατέλεια 120mm



Εικόνα 3.18: Αξονική φόρτιση του κελύφους στο οριακό σημείο (α) ατέλεια 30mm (β) ατέλεια 60mm (γ) ατέλεια 120mm

3.4.2 Η επιρροή στην αντοχή του κελύφους

Η αντοχή του κελύφους αποτελεί τον πιο σημαντικό παράγοντα για τη διεξαγωγή των αναλύσεων. Για το λόγο αυτό, η υποπαράγραφος αυτή παρουσιάζει κατά πόσο η αντοχή επηρεάζεται από το μέτρο της

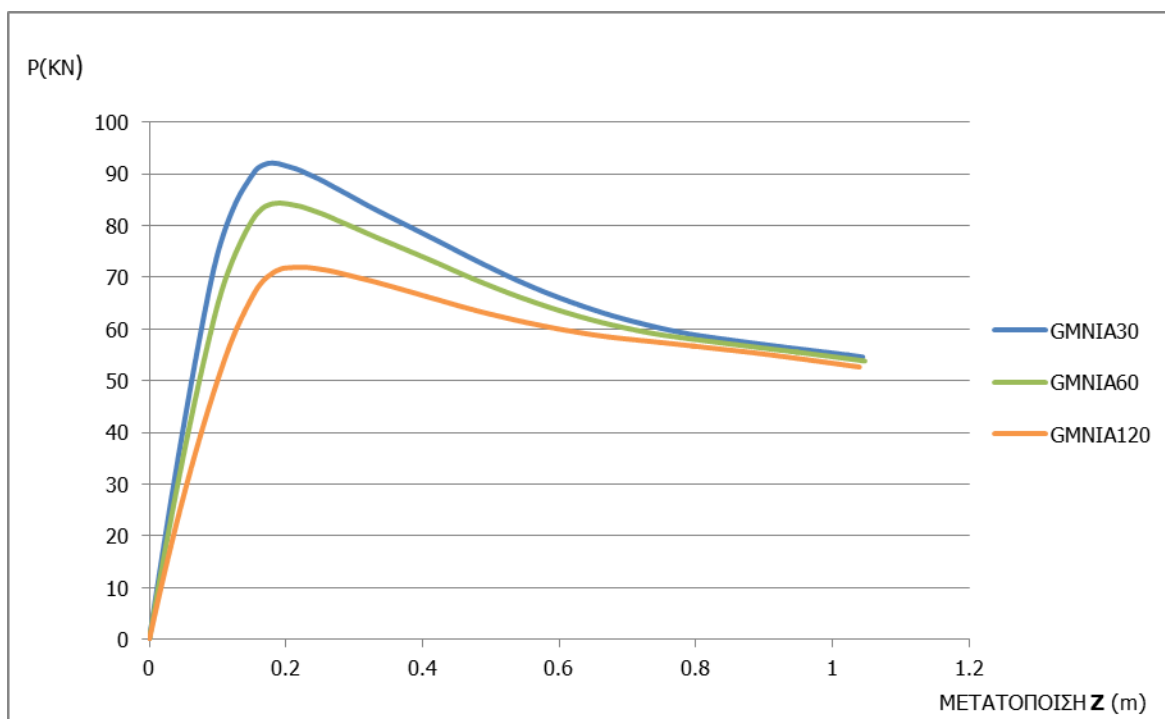
αρχικής ατέλειας. Το Σχήμα 3.5 παρουσιάζει τους δρόμους ισορροπίας για τον κεντρικό κόμβο Ο, όπως προέκυψαν από τη μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες. Οι τρεις δρόμοι ισορροπίας υποδηλώνουν ότι το μέτρο της αρχικής ατέλειας επηρεάζει σημαντικά την αντοχή του σφαιρικού κελύφους.

Με κάθε αύξηση του μέτρου της αρχικής ατέλειας (υπερδιπλασιασμό) πραγματοποιείται και μείωση της αντοχής του φορέα. Η μέγιστη δύναμη που μπορεί να αντέξει το σφαιρικό κέλυφος για αρχική ατέλεια 30mm, 60mm και 120mm είναι 92.08kN, 84.37kN και 71.92kN αντίστοιχα. Τα ποσοστά μείωσης μετά από κάθε αύξηση της αρχικής ατέλειας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2, όπου φαίνεται η σημαντική μείωση της αντοχής του σφαιρικού κελύφους, υποδεικνύοντας τη μεγάλη επιρροή που έχει η αρχική ατέλεια για το συγκεκριμένο φορέα.

Πίνακας 3.2: Ποσοστά μείωσης της αντοχής του κελύφους

Αρχική ατέλεια (mm)	Αντοχή κελύφους (kN)	Ποσοστό Μείωσης (%)
30	92.08	8
60	84.37	
60	84.37	15
120	71.92	
30	92.08	22
120	71.92	

Η συμπεριφορά του δρόμου ισορροπίας έχει σχολιαστεί στην παράγραφο 3.4. Στο Σχήμα 3.5, ο φορέας συμπεριφέρεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο και για τις τρεις περιπτώσεις, με τη μόνη διαφορά ότι το οριακό σημείο μειώνεται με την αύξηση της ατέλειας. Οι δρόμοι ισορροπίας όμως φανερώνουν ότι η υπερβολική αύξηση της αρχικής ατέλειας καταργεί τη γραμμική συμπεριφορά του φορέα στο αρχικό στάδιο της ανάλυσης. Ως αποτέλεσμα, η γεωμετρική δυσκαμψία του φορέα να επηρεάζεται (μειώνεται) από την υπερβολική αύξηση του μέτρου της αρχικής ατέλειας.



Σχήμα 3.5: Δρόμοι ισορροπίας του κεντρικού κόμβου Ο (3462) και για τις τρεις περιπτώσεις

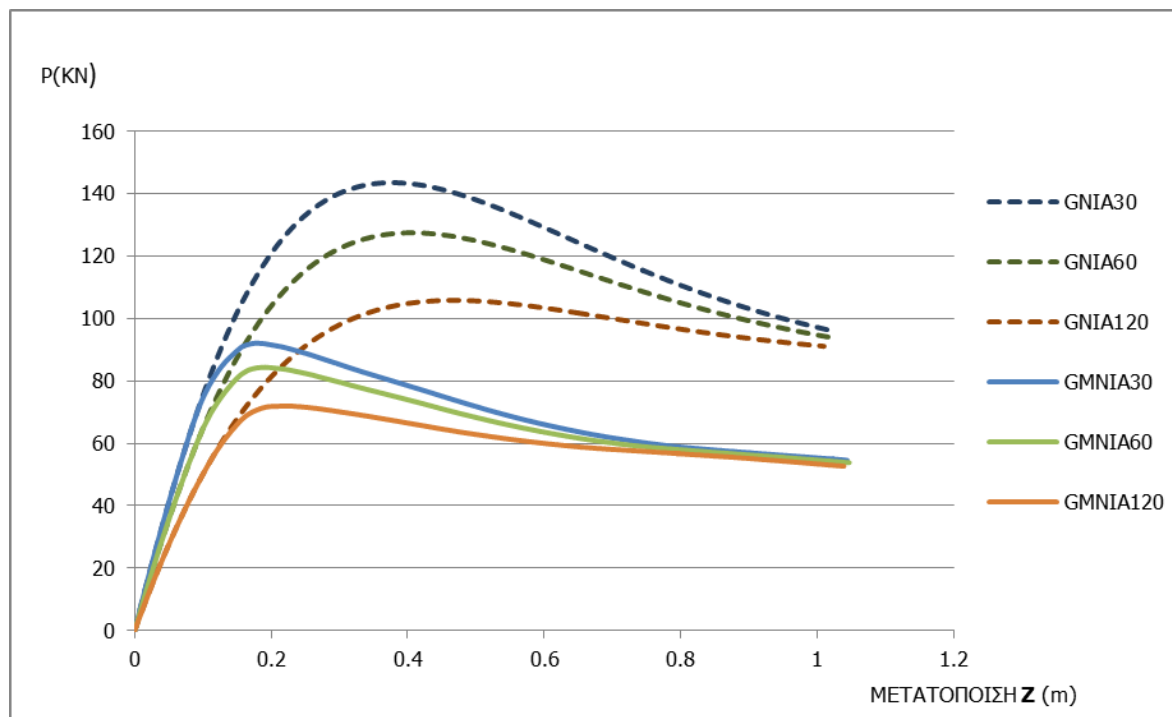
Οι τρεις μορφές αναλύσεων ολοκληρώθηκαν με την πραγματοποίηση και των μη γραμμικών αναλύσεων υλικού γεωμετρίας με ατέλειες. Όλα τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν και συγκρίθηκαν μεταξύ τους και διαπιστώθηκε η επιρροή της αρχικής ατέλειας. Στο παρόν στάδιο, ακολουθεί η

σύγκριση των τριών αναλύσεων, για να διαφανεί κατά πόσο η πραγματοποίηση της κάθε ανάλυσης είναι χρήσιμη, καθώς και τι μορφή λυγισμού παρουσιάζει στο τέλος το σφαιρικό κέλυφος.

3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο κεντρικός κόμβος O (3462) δίνει τη δυνατότητα εξαγωγής συμπερασμάτων για την επιρροή της αρχικής ατέλειας και το τρόπο αστοχίας. Στο Σχήμα 3.6 συγκεντρώθηκαν όλοι οι δρόμοι ισορροπίας για το ίδιο σημείο του σφαιρικό κέλυφος. Η μορφή αστοχίας είναι ξεκάθαρα η διαρροή του υλικού και για τις τρεις περιπτώσεις αρχικής ατέλειας. Στις δύο αναλύσεις (GNIA – GMNIA) συμπίπτουν οι δρόμοι ισορροπίας μέχρι το σημείο που το υλικό αρχίζει να διαρρέει. Η διαρροή του υλικού πραγματοποιείται σε μέλη κοντά στην κορυφή του κελύφους, τα οποία αφού διαρρεύσουν επηρεάζουν την περιοχή που δημιουργείται το τοπικό εξόγκωμα και εκδηλώνεται γρηγορότερα ο ακαριαίος λυγισμός του κελύφους. Συμπερασματικά, η ποιότητα του χάλυβα (υλικού) διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του κελύφους.

Η επιρροή του υλικού στην αστοχία του κελύφους δίνεται μέσα σε από της δύο μη γραμμικές αναλύσεις με ελαστικό και ανελαστικό υλικό. Έτσι, τα ποσοστά μείωσης για την ίδια αρχική ατέλεια 30mm,60mm και 120mm είναι για το μονόστρωτο σφαιρικό κέλυφος 35%,34% και 32% αντίστοιχα.



Σχήμα 3.6: Δρόμοι ισορροπίας του κεντρικού κόμβου O (3462) για όλες τις αναλύσεις

Σε φορείς που αστοχούν λόγω μη γραμμικότητας υλικού, η παρουσία αρχικών ατελειών έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της φέρουσας ικανότητας λόγω ταχύτερης τοπικής πλαστικοποίησης των μελών των κρίσιμων διατομών από την εισαγωγή δευτερευουσών τάσεων. Δεν παρουσιάζεται ποιοτική μεταβολή της συμπεριφοράς, του τρόπου αστοχίας και της μορφής του δρόμου ισορροπίας με ελαστικό και ανελαστικό υλικό.

Σε όλες τις περιπτώσεις, ο φορέας έχει τον ίδιο τρόπο αποκρίσεως στη φόρτιση. Η φόρτιση που επιβλήθηκε στους κόμβους, είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία των μορφών dimple στο κέντρο του κελύφους. Επιπρόσθετα, η μορφή dimple παρουσιάστηκε και σε περιοχές κοντά στο δακτύλιο προέντασης, σε σημεία που βρισκόταν πάνω στην κορυφογραμμή AOD, κάθε φορά όμως με

διαφορετικά μεγέθη μετακινήσεων. Η αστοχία όμως, ήταν καθολική, αφού ανεξάρτητα της δημιουργίας των εξογκωμάτων υπήρχε μία μεγάλη παραμόρφωση σε όλο το φορέα.

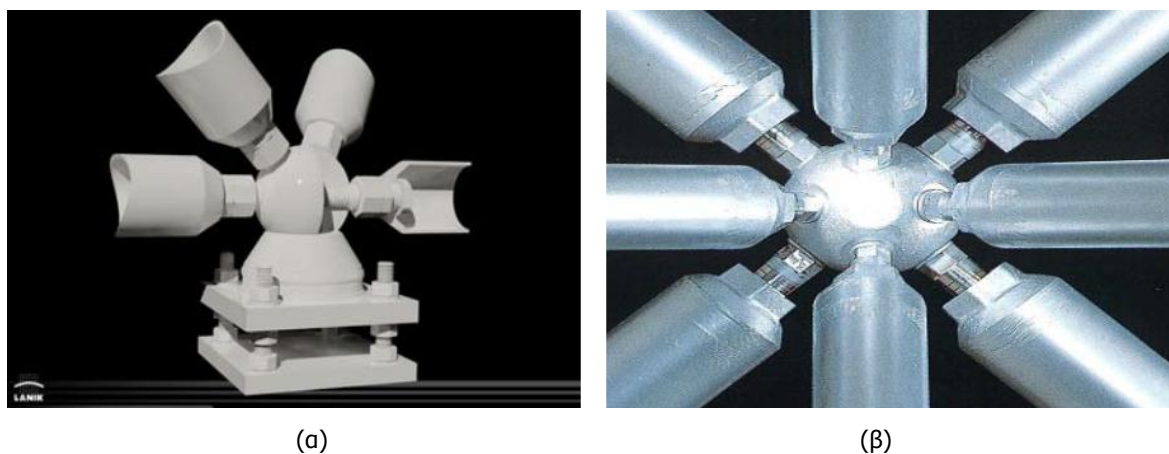
Τέλος αποδείχτηκε ότι με την υπάρχουσα γεωμετρία του φορέα, με τις διατομές αυτές και με το τρόπο συνδέσεις των μελών (πολύ μικρή λυγηρότητα), δεν είναι πιθανόν να προηγηθεί άλλος τύπος αστοχίας εκτός από αστοχία λόγω υλικού. Επίσης, επιβεβαιώνοντας το σύνηθες φαινόμενο ότι σε μέλη με μικρή λυγηρότητα λ_0 και ταυτόχρονα κέλυφος με μικρή γωνία θ_0 δεν μπορεί να παρουσιαστεί η αστοχία μέλους Euler.

Αφού ολοκληρώθηκαν οι αναλύσεις για το φορέα με άκαμπτες συνδέσεις, η μελέτη συνεχίστηκε με την αλλαγή του τρόπου σύνδεσης σε αρθρώσεις. Ακολουθεί η ανάλυση για αυτή την περίπτωση, η οποία εξετάζεται κατά πόσο το μέτρο της αρχικής ατέλειας επιδρά στο σφαιρικό κέλυφος με τις αρθρωτές συνδέσεις. Με την αλλαγή αυτή, αφού τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά είναι τα ίδια θα παρουσιαστεί και η επιρροή του τρόπου σύνδεσης.

4 ΚΕΛΥΦΟΣ ΜΕ ΑΡΘΡΩΤΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αρθρωτές συνδέσεις χρησιμοποιούνται κυρίως σε δίστρωτα δικτυωτά κελύφη. Οι συνδέσεις αυτές που πραγματοποιούνται με εργοστασιακά κοχλιωτά μέλη, δεν επιτρέπουν τη δημιουργία ροπών κοντά στις ενώσεις. Συνεπώς, επιτρέπεται η σχετική περιστροφή των μελών μεταξύ τους (η δυσκαμψία σύνδεσης είναι μηδενική). Στην περίπτωση του σφαιρικού κελύφους, αν και μονόστρωτο, πραγματοποιήθηκε η αλλαγή αυτή έτσι ώστε να διαφανεί σε τι βαθμό ο τύπος αυτής της σύνδεσης επηρεάζει την όλη απόκριση του φορέα. Δύο τύποι συνδέσεων που είναι ικανοί για την τροποποίηση του κελύφους παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.1. Όπου η μία σύνδεση χρησιμοποιείται στη βάση για τη στήριξη του κελύφους και η άλλη για το εσωτερικό.



Εικόνα 4.1: Αρθρωτές συνδέσεις [1] (α) Σύνδεση βάσης κελύφους (β) Σύνδεση στο κυρίως σώμα του κελύφους

Στο πρόγραμμα ADINA, τα μέλη είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους, έχοντας όμως ελευθερώσει την περιστροφή των μελών, για τη δημιουργία της άρθρωσης. Έτσι ο φορέας εκτός της μικρής γωνίας θ_0 , σε αυτή την περίπτωση και με αρθρωμένες συνδέσεις, θα έχει σαφές μικρότερη δυσκαμψία. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα αναμενόμενα φορτία λυγισμού θα είναι σίγουρα μικρότερα. Επιπλέον, σε αυτή την περίπτωση με αρθρωμένες τις συνδέσεις, ίσως εμφανιστεί και λυγισμός μέλους (Euler), αν και είναι πολύ δύσκολο γιατί η λυγηρότητα λ_0 των μελών αν και μεγαλύτερη από πριν, είναι και πάλι αρκετά μικρή.

Σημαντικό στην περίπτωση των αρθρωτών συνδέσεων είναι ότι στα μέλη του φορέα δεν αναπτύσσονται καμπτικές ροπές. Οι τάσεις που αναπτύσσονται στα μέλη είναι μόνο από αξονικές

δυνάμεις. Επίσης σε περίπτωση που μία διατομή διαρρεύσει, το κέλυφος ταυτόχρονα θα αστοχήσει, αφού με αυτό τον τρόπο πλαστικοποιείται η διατομή και δημιουργείται μηχανισμός με τρεις αρθρώσεις στο ίδιο μέλος.

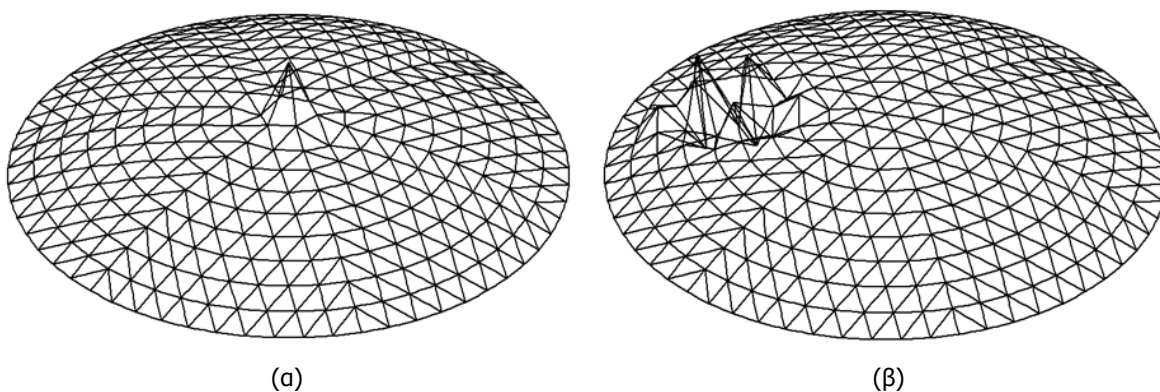
Οι αναλύσεις που έγιναν στο ADINA είναι ίδιες με τον άκαμπτο τρόπο σύνδεσης. Η αρχική ατέλεια που δόθηκε για έναρξη των αναλύσεων είναι 60mm. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις για αρχική ατέλεια 30mm και 120mm. Σε αυτόν τον τρόπο στήριξης χρειάστηκε η πραγματοποίηση περισσότερων περιπτώσεων για να διαφανεί η επιρροή του μέτρου της αρχικής ατέλειας. Κατά συνέπεια, η αρχική ατέλεια για 60mm αυξάνεται αναλογικά και για ακόμα τρεις περιπτώσεις για 180mm, 240mm και 300mm. Όταν ολοκληρωθούν αυτές οι αναλύσεις, θα γίνει αντιληπτό εάν το μέτρο της αρχικής ατέλειας επηρεάζει το κέλυφος με αρθρωτές συνδέσεις, αλλά και σε τι βαθμό, καθώς και αν ο τρόπος σύνδεσης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στα σφαιρικά κελύφη.

4.2 ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ – LBA

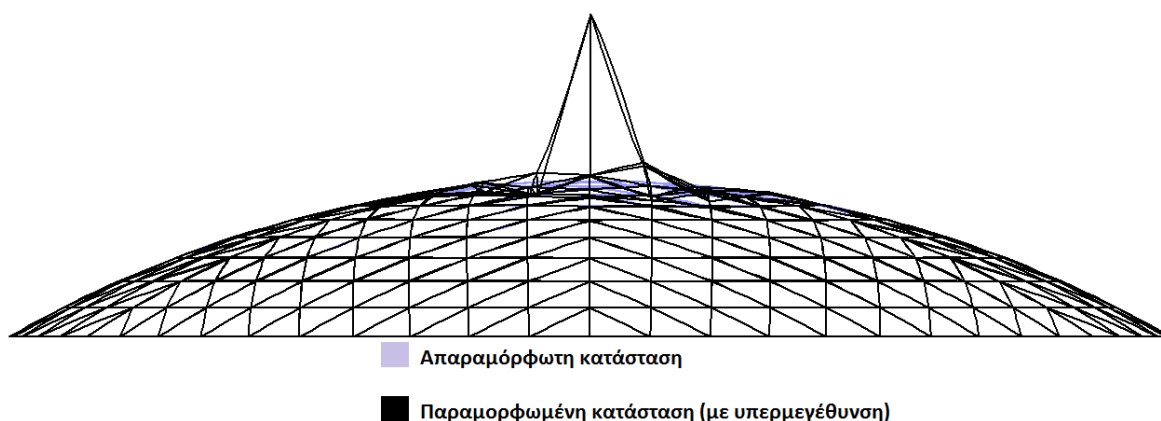
Με την πραγματοποίηση της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού, στο σφαιρικό κέλυφος με αρθρωτές συνδέσεις προσδιορίστηκαν οι ιδιομορφές λυγισμού, όπως και τα αντίστοιχα φορτία λυγισμού. Οι δύο πρώτες ιδιομορφές φαίνονται στην Εικόνα 4.2. Η δημιουργία αιχμηρών γωνιών στις συνδέσεις οφείλεται στο γεγονός ότι τα μέλη και στις δύο ιδιομορφές έχουν την ικανότητα να περιστρέφονται λόγω των αρθρώσεων. Χρειάζεται, επίσης, να σημειωθεί ότι τα μέλη παραμένουν ευθύγραμμα και μετά την ανάλυση – κάτι που δε συνέβαινε με άκαμπτες συνδέσεις όπου υπήρχαν σημεία στο κέλυφος που τα μέλη γίνονται καμπύλα.

Η 1^η και η πιο σημαντική ιδιομορφή, έχει μία τοπική αστοχία στο κέντρο του κελύφους (dimple). Στον υπόλοιπο φορέα, οι μετακινήσεις είναι μηδενικές (ο φορέας παραμένει όπως στην απαραμόρφωτη κατάσταση). Σε αντίθεση με τις άκαμπτες συνδέσεις όπου υπήρχε μια μικρή καθολική μετακίνηση του φορέα προς τα κάτω. Στην 2^η ιδιομορφή, η τοπική ανωμαλία της γεωμετρίας εμφανίζεται στο μέσο των σημείων ΑΟ (ή ΟΔ) και ο υπόλοιπος φορέας παραμένει αμετακίνητος. Στις υπόλοιπες ιδιομορφές, η τοπική αυτή αστοχία της 2^{ης} ιδιομορφής μετακινείται σε διάφορα σημεία του κελύφους, έχοντας το υπόλοιπο σφαιρικό κέλυφος σταθερό.

Στην 1^η ιδιομορφή, το ασκούμενο φορτίο έχει τιμή 40.1kN. Το φορτίο αυτό είναι πολύ μικρότερο από το αντίστοιχο του προηγούμενου κεφαλαίου, 226.8kN. Η μείωση φτάνει στο ποσοστό 82%. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η μείωση αυτή ξεκαθαρίζει από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού πως ο τύπος σύνδεσης επηρεάζει σημαντικά την αντοχή του κελύφους, αλλά και τη συμπεριφορά του. Στην 2^η ιδιομορφή, το ασκούμενο φορτίο είναι 52.4kN, το οποίο είναι 30% μεγαλύτερο από αυτό της 1^η ιδιομορφής.



Εικόνα 4.2: Ιδιομορφές λυγισμού του σφαιρικού κελύφους (α) 1^η ιδιομορφή (β) 2^η ιδιομορφή

Εικόνα 4.3: 1^η ιδιομορφή του κελύφους

Εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς στα φορτία της 1^{ης} και των υπόλοιπων ιδιομορφών, ο τρόπος αστοχίας του φορέα δεν επηρεάζεται από καμία κατανομής αρχική ατέλεια εκτός από την 1^η ιδιομορφή. Αυτό αποδεικνύεται στις επόμενες μη γραμμικές αναλύσεις, αφού χρησιμοποιώντας αρχική ατέλεια ανάλογα με την κατανομή της 2^{ης} ιδιομορφής ο φορέας αποκρίνεται όπως και την 1^η ιδιομορφή. Έτσι ο τρόπος αστοχίας του φορέα είναι ξεκάθαρος (σύμφωνα με την 1^η ιδιομορφή). Και σε αυτήν την περίπτωση, η αρχική ατέλεια είναι στον κεντρικό κόμβο O, ο οποίος έχει τη μεγαλύτερη μετατόπιση από τα άλλα σημεία.

Αφού η γραμμική ανάλυση λυγισμού αποτελεί το άνω όριο για τις υπόλοιπες αναλύσεις, η αισθητή μείωση της αντοχής οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπάρχει πιθανότητα ο φορέας να μην αντέχει στα επιτρεπτά φορτία που οι κανονισμοί ορίζουν. Σε αυτή την περίπτωση είχε οριστεί 62.32kN (υποπαράγραφος 2.4.2). Για να μπορεί ο φορέας να είναι ασφαλής θα πρέπει να προηγηθεί η αλλαγή της διατομής των μελών. Αυτό δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί στην παρούσα έρευνα, αφού ο στόχος είναι να βρεθεί ο βαθμός που επηρεάζει ο τρόπος σύνδεσης του σφαιρικού κελύφους την αντοχή του. Ακολουθεί η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες όπου η διατομή είναι ίδια με προηγουμένως (διάμετρο 301mm και πάχος 5mm).

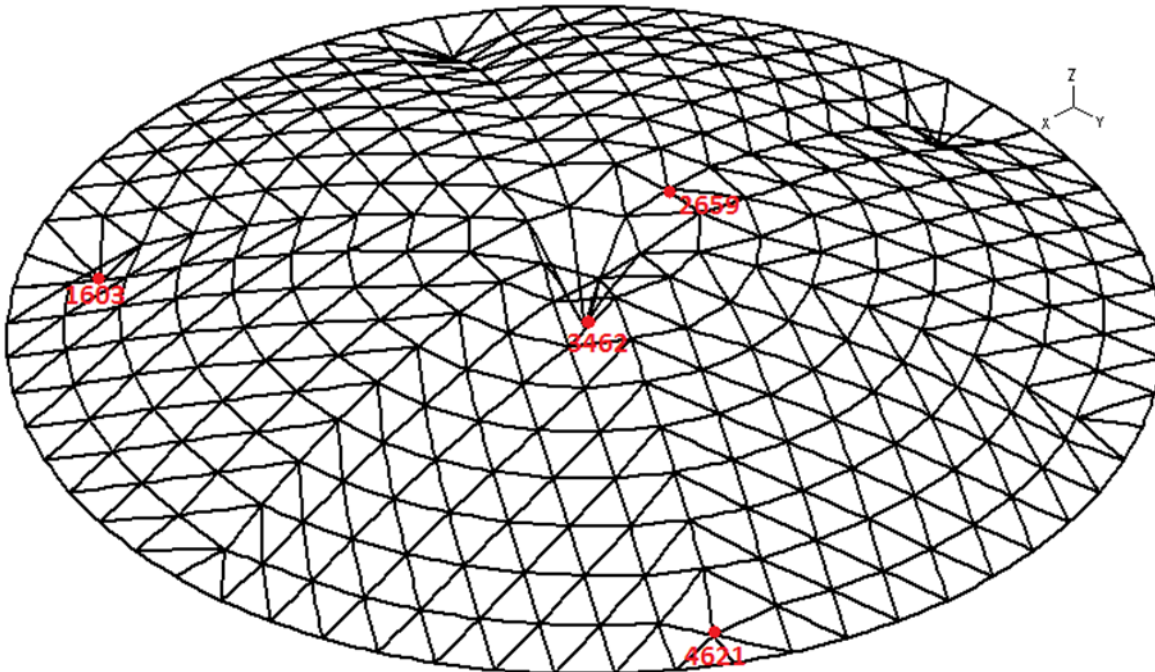
4.3 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕ ΑΤΕΛΕΙΕΣ – ΓΝΙΑ

Στην περίπτωση με αρθρωμένες τις συνδέσεις, η αρχική ατέλεια στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες, δόθηκε σύμφωνα με την 1^η ιδιομορφή στο κεντρικό κόμβο O. Το μέτρο της αρχικής ατέλειας έχει τιμή 30mm και φορά τα αρνητικά του άξονα Z. Για την ενεργοποίηση της ανάλυσης στο πρόγραμμα ADINA ορίστηκε αρχική διέγερση σε κόμβο κοντά στο κεντρικό και 1m ως μέγιστη μετακίνηση. Στο ADINA για την εκτέλεση της ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος collapse για την επίλυση έντονων μη γραμμικών προβλημάτων.

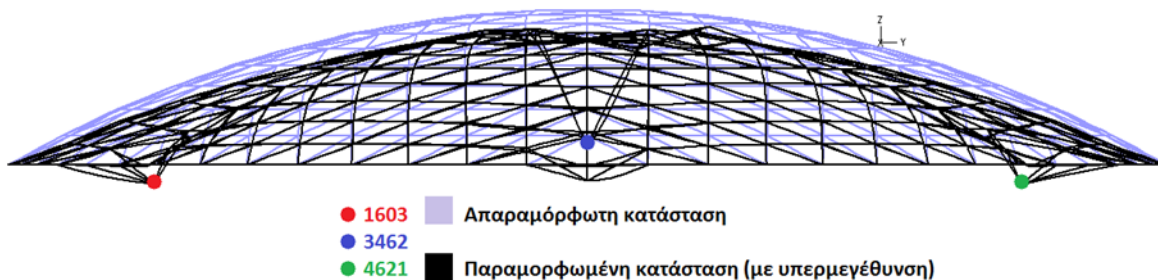
Με την ολοκλήρωση της ανάλυσης, το σφαιρικό κέλυφος στην οριακή κατάσταση πριν την αστοχία, έχει τη μορφή των Εικόνα 4.4 και Εικόνα 4.5. Ο φορέας συμπεριφέρεται κατά ανάλογο τρόπο με την 1^η ιδιομορφή. Φαίνεται ότι, όλος ο φορέας μετακινήθηκε προς τα κάτω και στο σημείο κοντά στο κεντρικό κόμβο δημιουργείται η τοπική ανωμαλία της γεωμετρίας (dimple). Η διαφορά από την 1^η ιδιομορφή είναι στα σημεία κοντά στη βάση, όπου εμφανίζεται η τοπική αυτή παραμόρφωση (όπως για παράδειγμα ο κόμβος 1603 και 4621). Ο τρόπος που συμπεριφέρεται το σφαιρικό κέλυφος με τις αρθρωτές συνδέσεις είναι ο ίδιος όταν οι συνδέσεις ήταν άκαμπτες, με μόνη όμως διαφορά τις μικρές παραμορφώσεις του φορέα.

Ο κόμβος 2659 που βρίσκεται κοντά στο κεντρικό κόμβο σε σημείο εκτός από τη τοπική παραμόρφωση της κορυφής και πάνω στην κορυφογραμμή AOD, παρουσιάζει μία τοπική βύθιση που

δε φαίνεται σε άλλα σημεία του σφαιρικού κελύφους. Η τοπική βύθιση του κόμβου 2659, δεν εμφανίστηκε σε καμία από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν μέχρι τώρα. Η μετακίνηση για το κόμβο 2659 είναι 0.029m, ενώ οι μετακινήσεις στους υπόλοιπους κόμβους του σφαιρικού κελύφους έχουν τιμές κάτω από 0.001m (εκτός βέβαια από τα σημεία με τις τοπικές παραμορφώσεις). Στο κεντρικό κόμβο, η μετακίνηση τη στιγμή της αστοχίας είναι η μέγιστη από όλους τους κόμβους με τιμή 0.165m. Αντιθέτως, στα σημεία κοντά στη βάση, η μετακίνηση είναι περίπου 0.050m με 0.060m (ο κόμβος 1603 έχει μετακίνηση 0.056m, και ο κόμβος 4621 έχει τιμή 0.058m).



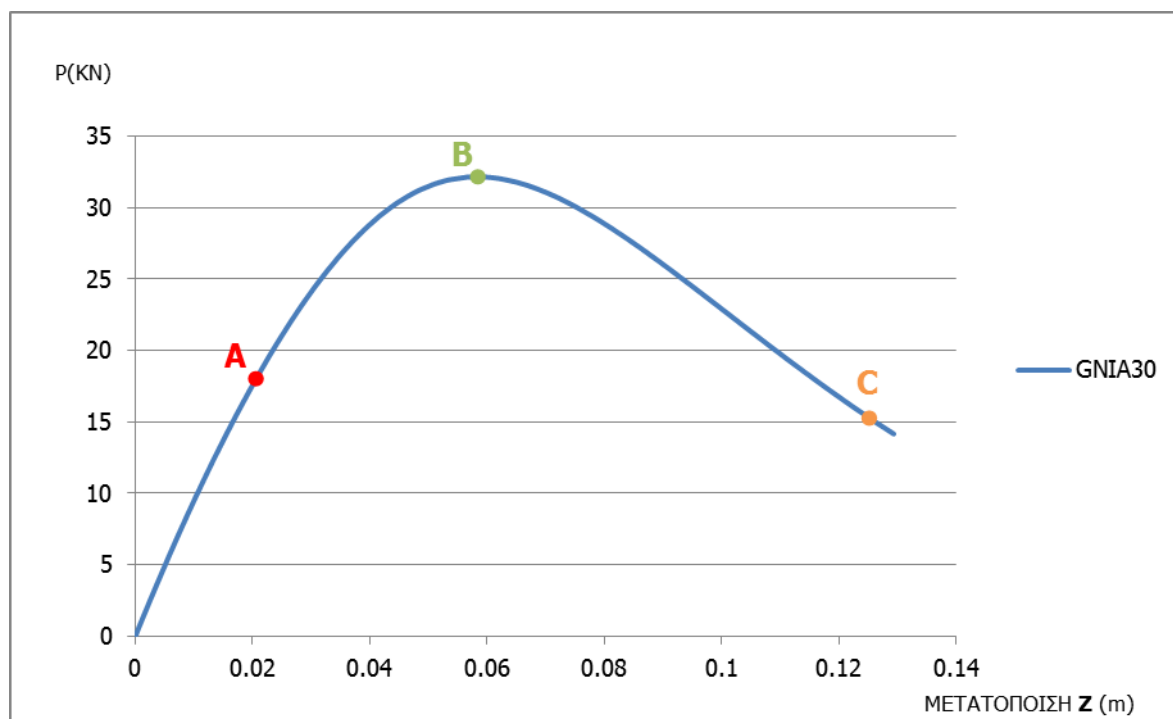
Εικόνα 4.4: Παραμορφωμένη κατάσταση του σφαιρικού κελύφους στο οριακό σημείο πριν την αστοχία



Εικόνα 4.5: Το σφαιρικό κέλυφος στο οριακό σημείο πριν την αστοχία

Για τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με αρχική ατέλεια 30mm, ο δρόμος ισορροπίας του κόμβου 4621, φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Το μέγιστο εξωτερικό φορτίο (στο σημείο B) είναι 32.15kN. Το φορτίο αυτό, είναι πολύ μικρότερο από το αντίστοιχο για άκαμπτες συνδέσεις που ήταν 143.54kN. Η μείωση έχει ποσοστό 78% και αποδεικνύει τη σημαντικότητα που διαδραματίζει ο τρόπος σύνδεσης για το σφαιρικό κέλυφος.

Ο δρόμος ισορροπίας του συγκεκριμένου σημείου δείχνει ακόμη και το τρόπο που συμπεριφέρεται το κέλυφος στη συγκεκριμένη φόρτιση. Στο αρχικό στάδιο της φόρτισης και καθώς τα φορτία είναι κάτω από 20kN, ο φορέας συμπεριφέρεται γραμμικά. Μετά το σημείο A και καθώς πλησιάζει το οριακό σημείο B, παρατηρείται σημαντική αύξηση των μετατοπίσεων σε σχέση με το φορτίο (μείωση της δυσκαμψίας). Ο φορέας δεν παρουσιάζει μεταλυγισμική αντοχή, αφού μετά το σημείο B αρχίζει ο καθοδικός κλάδος.



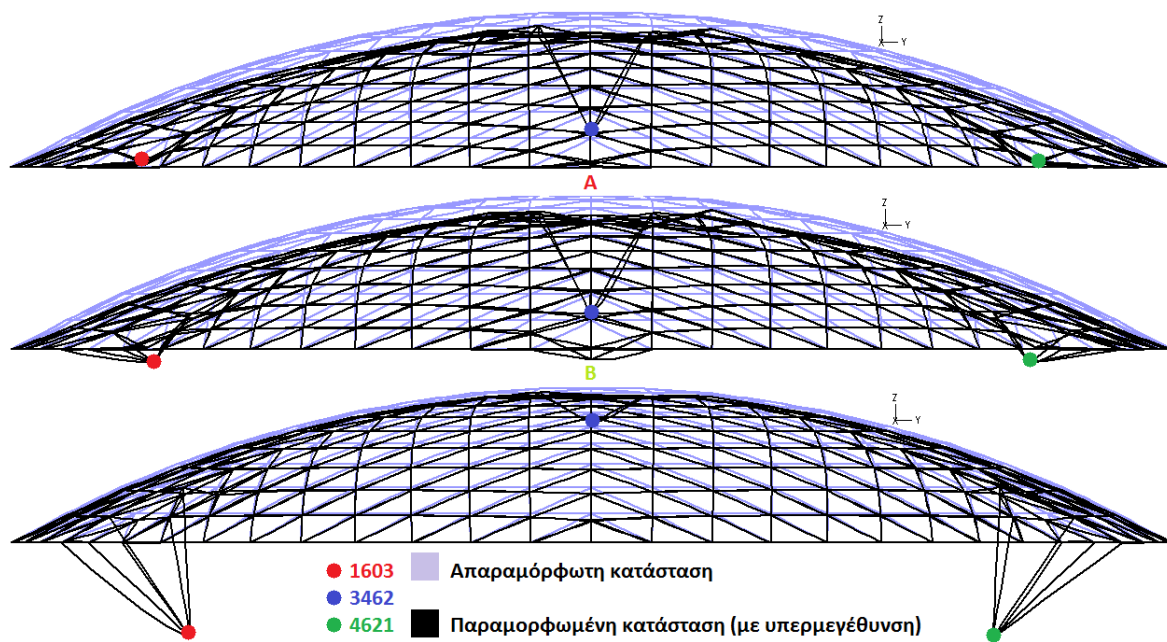
Σχήμα 4.1: Δρόμος ισορροπίας του κόμβου 4621

Κυρίως η αστοχία έχει τη μορφή οριακού σημείου αφού, ο δρόμος ισορροπίας είναι από την αρχή καμπύλος με συνεχής αύξηση της καμπυλότητας μέχρι που η δυσκαμψία του κελύφους μηδενίζεται και αστοχεί. Η αστοχία στο κέλυφος προήλθε από τοπικό ακαριαίο λυγισμό στις περιοχές κοντά στη βάση όπου δημιουργείται η αστοχία dimple. Σε αυτή την περίπτωση σε αντίθεση με την προηγούμενη με άκαμπτες συνδέσεις, οι παραμορφώσεις είναι τοπικές ή της μορφής dimple, όπως περιγράφηκαν στην υποπαράγραφο 2.4.4, και δεν εμφανίζονται καθολικές μετακινήσεις σε άλλους κόμβους του σφαιρικού κελύφους.

Η Εικόνα 4.6 προβάλλει το τρόπο με τον οποίο το σφαιρικό κέλυφος αποκρίνεται στη φόρτιση στις τρεις περιπτώσεις, σύμφωνα με το δρόμο ισορροπίας του κόμβου 4621. Όταν το φορτίο είναι 18.03kN (σημείο A), το σφαιρικό κέλυφος μετακινείται όλο προς τα κάτω με μικρότερες μετακινήσεις από 1mm. Σε αυτό το σημείο, ο κεντρικός κόμβος έχει μετατόπιση 0.097m, και είναι η μέγιστη μετατόπιση σε όλο το φορέα. Οι κόμβοι 1603 και 4621 (καθώς και οι αντίστοιχοι κόμβοι περιμετρικά και πάνω στην κορυφογραμμή AOD) σε αυτό το σημείο έχουν μετακίνηση 0.021m, ενώ στο κόμβο 2659, η μετατόπιση είναι 0.015m.

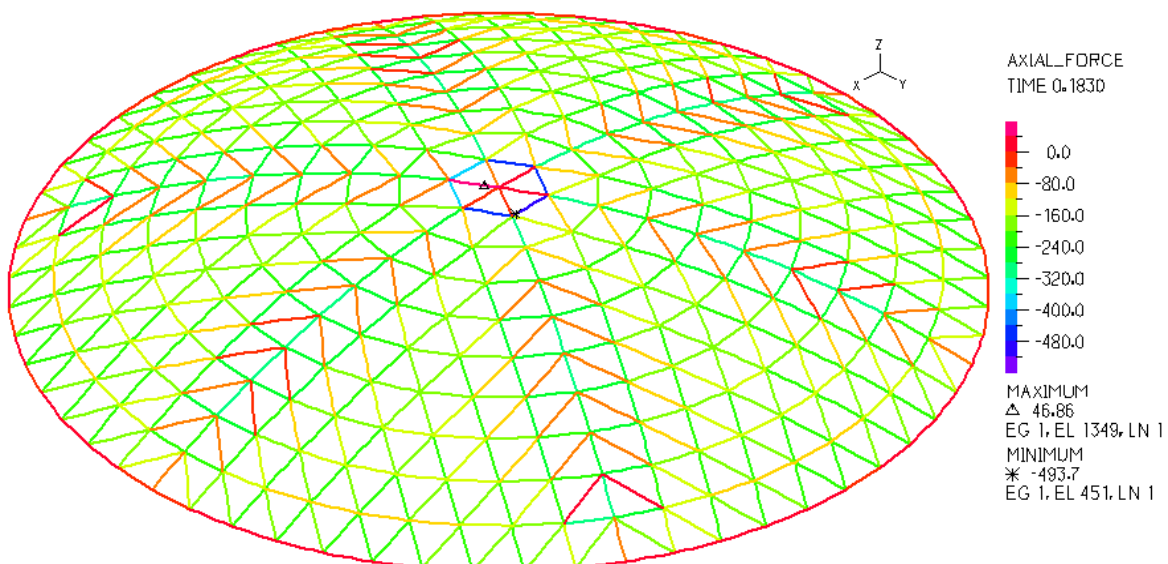
Στο οριακό σημείο B, οι μετατοπίσεις σε όλα τα σημεία αυξάνονται και διαμορφώνονται οι τοπικές παραμορφώσεις (dimple). Συγκεκριμένα για το κεντρικό κόμβο 3462, γίνεται 0.165m, και για τα σημεία 1603 και 4621, γίνεται 0.058m. Για το κόμβο 2659, αυξάνετε σε 0.029m και για τα υπόλοιπα σημεία η μετακίνηση παραμένει μικρότερη από 1mm. Μετά την αστοχία, στο σημείο C με εξωτερικό φορτίο 15.27kN, όλος ο φορέας κινείται προς τα πάνω, πλησιάζοντας την αρχική απαραμόρφωτη κατάσταση, εκτός από τους κόμβους 1603 και 4621. Στους κόμβους αυτούς, οι μετακινήσεις αυξάνονται και γίνονται 0.125m. Επίσης στους κόμβους αυτούς, η απόκρισή είναι η ίδια και αυτό πιθανόν να οφείλεται στη συμμετρία του φορέα.

Η τοπική παραμόρφωση dimple που δημιουργείται στο κεντρικό κόμβο έχει μεγαλύτερη μετακίνηση από τους κόμβους 1603 ή 4621, όπου συμβαίνει το ίδιο φαινόμενο. Η αστοχία, όμως, δεν οφείλεται στον ακαριαίο λυγισμό της κεντρικής περιοχής, αλλά στα περιμετρικά σημεία. Άρα, η περιοχή η οποία θα εκδηλωθεί ο τοπικός ακαριαίος δεν πρέπει να έχει κατ' ανάγκη και την μέγιστη μετακίνηση, αφού σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η γεωμετρία της θέσης που θα εκδηλωθεί.



Εικόνα 4.6: Ο φορέας στις αντίστοιχες χρονικές περιπτώσεις του δρόμου ισορροπίας του κόμβου 4621

Λόγω της συμμετρίας του σχήματος, η αξονική φόρτιση στην οριακή στιγμή πριν από την αστοχία παρουσιάζεται συμμετρική, εκτός από το κεντρικό εξάγωνο. Όπως διαπιστώνεται και από την Εικόνα 4.7, τα μέλη που βρίσκονται πάνω στο κεντρικό εξάγωνο έχουν τις μεγαλύτερες τιμές. Η μεγαλύτερη τιμή της θλιπτικής αξονικής δύναμης είναι σε ένα μέλος πάνω σε αυτό το εξάγωνο, και έχει τιμή 493.7kN. Τα υπόλοιπα μέλη του σφαιρικού κελύφους έχουν αξονική δύναμη μικρότερη από 320kN. Οι αξονικές δυνάμεις που επικρατούν σε όλο το κέλυφος είναι πολύ μικρότερες από αυτές στην αντίστοιχη φόρτιση όταν το κέλυφος ήταν με άκαμπτες συνδέσεις. Αυτό κατεξοχήν οφείλεται στο γεγονός ότι ο φορέας αστοχεί προτού να παραλάβει μεγαλύτερα φορτία.



Εικόνα 4.7: Αξονική φόρτιση του κελύφους στο οριακό σημείο πριν την αστοχία για στέλεια 30mm

Λόγω των μικρών μετατοπίσεων που επικρατούν σε όλο το σφαιρικό κέλυφος, η αιτία που αστοχεί σε τόσο μικρά φορτία είναι ο ακαριαίος λυγισμός σε περιοχές κοντά στην βάση. Επιβεβαιώνοντας αυτό που ειπώθηκε προηγούμενος, ότι ο πιθανότερος μηχανισμός αστοχίας είναι ο τοπικός ακαριαίος λυγισμός σε κελύφη με αρθρωτές συνδέσεις, όταν η λυγηρότητα των μελών είναι πολύ μικρή. Με την

ολοκλήρωση της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες για το σφαιρικό κέλυφος με αρχική ατέλεια 30mm στον κεντρικό κόμβο O (3462), θα παρουσιαστούν στη συνέχεια τα αποτελέσματα για τις υπόλοιπες περιπτώσεις με μεγαλύτερη σε μέτρο αρχική ατέλεια.

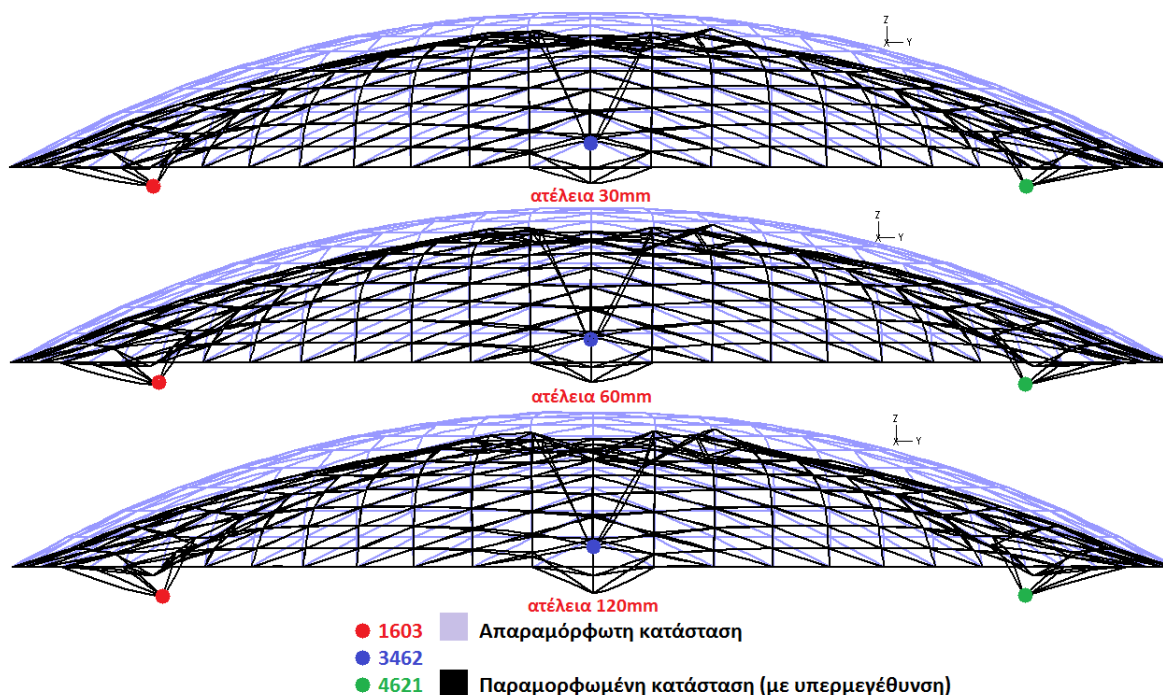
4.3.1 Επιρροή μεγέθους αρχικής ατέλειας

Όπως και στην περίπτωση των άκαμπτων συνδέσεων, πραγματοποιήθηκαν ακόμα δύο περιπτώσεις με αρχική ατέλεια 60mm και 120mm. Για την εκτέλεση αυτών των αναλύσεων χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι παράμετροι της περίπτωσης για 30mm.

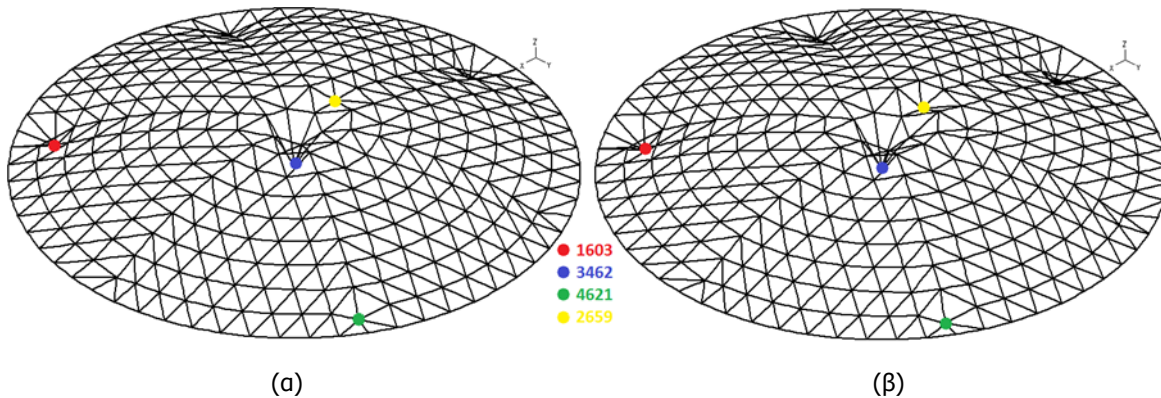
Όπως προβάλλεται και στις Εικόνα 4.8, Εικόνα 4.4 και Εικόνα 4.9, το κέλυφος έχει την ίδια απόκριση και στις τρεις περιπτώσεις. Η καθολική μετακίνηση που παρατηρείται είναι της ίδιας τάξης και στις τρεις περιπτώσεις, με πολύ μικρή διαφορά στο μέγεθος. Με την αύξηση της αρχικής ατέλειας, η καθολική μετακίνηση έχει αύξηση μικρότερη από 1mm για όλους του κόμβους. Οι παραμορφώσεις των κόμβων, εκτός των τοπικών εξογκωμάτων, είναι σχεδόν μηδενική.

Η διαφορά εμφανίζεται κυρίως στον κεντρικό κόμβο 3462, όπου με την αύξηση της ατέλειας παρατηρείται μείωση στη μετακίνηση του κόμβου. Πιο αναλυτικά, για τις αρχικές ατέλειες 30mm, 60mm και 120mm, η μετακίνηση είναι 0.165m, 0.154m και 0.134m αντίστοιχα. Για τους περιμετρικούς κόμβους, η μετακίνηση είναι η ίδια, άρα όταν σε εκείνες τις περιοχές η μετακίνηση φτάσει σε μία οριακή τιμή 60mm, τότε εκδηλώνεται ο ακαριαίος λυγισμός. Το μέτρο της αρχικής ατέλειας σε αυτή την περίπτωση δεν διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο, αφού η αστοχία είναι η ίδια και στην ίδια τιμή των μετατοπίσεων και στις τρεις περιπτώσεις.

Στον κόμβο 2659 με τη τοπική βύθιση που εμφανίζεται μόνο σε αυτή την περίπτωση με αρθρωμένες συνδέσεις, η μετακίνησή του αυξάνεται με την αύξηση της αρχικής τοπικής ατέλειας. Όπου από 0.029m για αρχική ατέλεια 30mm, γίνεται 0.041m για αρχική ατέλεια 120mm. Το μέτρο της αρχικής ατέλειας μετά από την ολοκλήρωση των τριών αναλύσεων φαίνεται ότι δεν επηρεάζει σημαντικά το σφαιρικό κέλυφος με αρθρωτές συνδέσεις, όσον αφορά το θέμα των μετακινήσεων, εκτός βέβαια από τον κεντρικό κόμβο 3462, και τον κόμβο 2659.

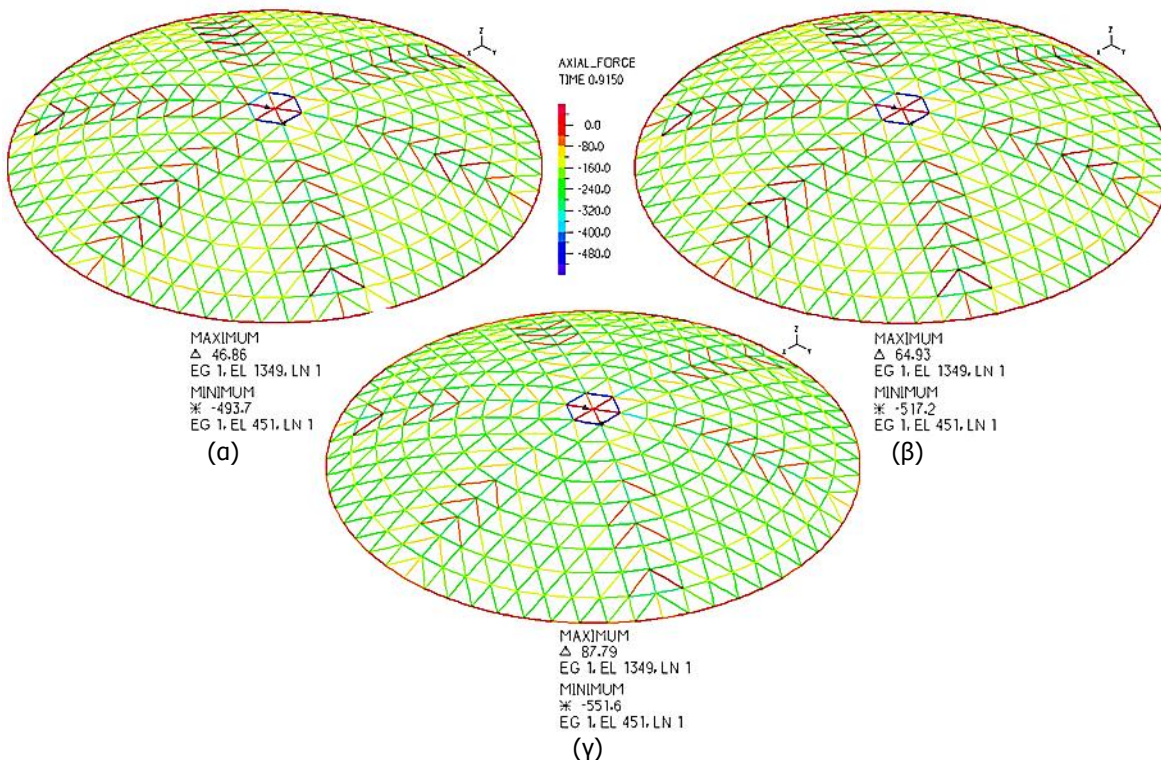


Εικόνα 4.8: Το σφαιρικό κέλυφος στο οριακό σημείο πριν την αστοχία και στις τρεις περιπτώσεις



Εικόνα 4.9: Το σφαιρικό κέλυφος στο οριακό σημείο πριν την αστοχία (α) ατέλεια 60mm (β) ατέλεια 120mm

Η αξονική φόρτιση του κελύφους στο οριακό σημείο πριν την αστοχία και για τις τρεις περιπτώσεις παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.10. Σε κάθε αύξηση της ατέλειας παρατηρείται μία μικρή μεταβολή στην αξονική δύναμη των μελών. Οι αξονικές δυνάμεις είναι πολύ πιο μικρές από τις αντίστοιχες, καθώς ο φορέας ήταν με άκαμπτες τις συνδέσεις. Η μέγιστη αξονική δύναμη για αρχική ατέλεια 30mm είναι στο ίδιο μέλος και για τους δύο τύπους σύνδεσης όπου για άκαμπτες συνδέσεις έχει τιμή 1485kN, ενώ για τις αρθρωτές είναι 493.7kN. Αυτό οφείλεται στο ότι ο φορέας αστοχεί σε μικρότερα φορτία και τα μέλη δε φορτίζονται με μεγαλύτερες δυνάμεις. Συμπερασματικά, το μέτρο της αρχικής ατέλεια δεν επηρεάζει σοβαρά την αξονική φόρτιση για το σφαιρικό κέλυφος.



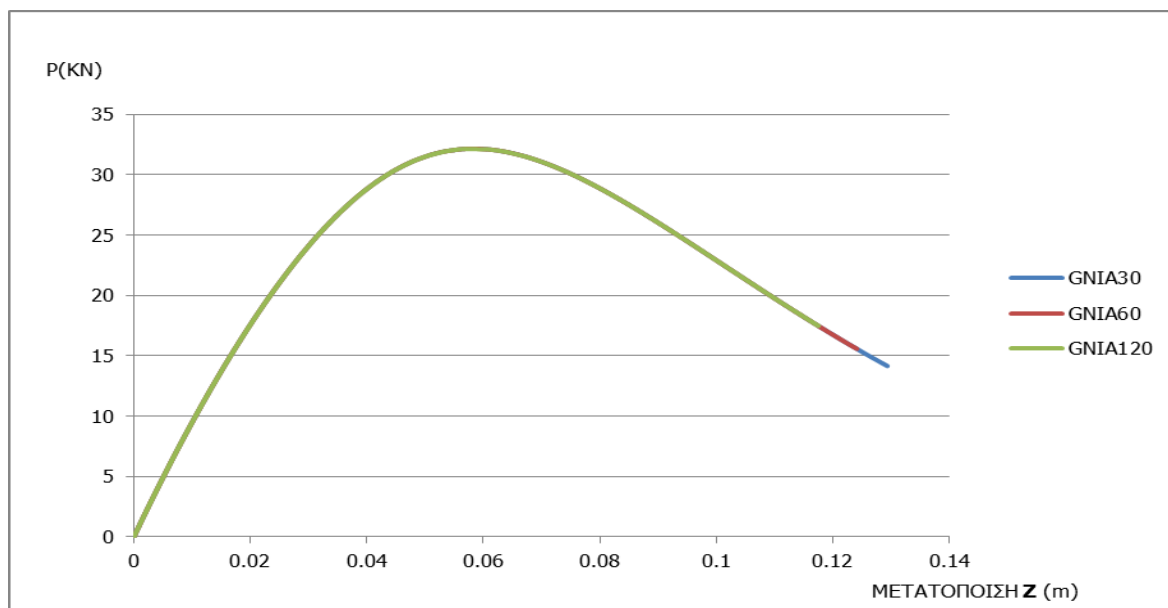
Εικόνα 4.10: Αξονική φόρτιση του κελύφους στο οριακό σημείο (α) ατέλεια 30mm (β) ατέλεια 60mm (γ) ατέλεια 120mm

4.3.2 Η επιρροή στην αντοχή του κελύφους

Η επιρροή της αρχικής ατέλειας όσον αφορά την αξονική φόρτιση και τις μετακινήσεις στο σφαιρικό κέλυφος ήταν ελάχιστη και σε μερικές περιπτώσεις ανύπαρκτη. Ο κόμβος 4621 παρέχει τη δυνατότητα

να διαπιστωθεί κατά πόσο υπάρχει επιρροή στην αντοχή του φορέα μετά από κάθε αύξηση της ατέλειας.

Οι δρόμοι ισορροπίας που φαίνονται στο Σχήμα 4.2 είναι και για τις τρεις περιπτώσεις αρχικής ατέλειας. Είναι φανερό ότι οι τρεις δρόμοι ισορροπίας είναι οι ίδιοι (ταυτίζονται). Άρα, με την αύξηση της αρχικής ατέλειας από 30mm σε 60mm και 120mm, η συμπεριφορά του κελύφους και η αντοχή του δε μεταβάλλεται. Με δεδομένα τα πιο πάνω, είναι ξεκάθαρο το γεγονός ότι στο σφαιρικό κέλυφος με αρθρωτές συνδέσεις, η επιρροή της αρχικής ατέλειας είναι πολύ μικρή και αυτή κυρίως όσον αφορά τις μετακινήσεις. Για την αντοχή του κελύφους δεν υπάρχει καμία διαφορά, καθώς το εξωτερικό φορτίο είναι το ίδιο και για τις τρεις περιπτώσεις με τιμή 32.15kN.



Σχήμα 4.2: Δρόμοι ισορροπίας του κόμβου 4621 και για τις τρεις περιπτώσεις

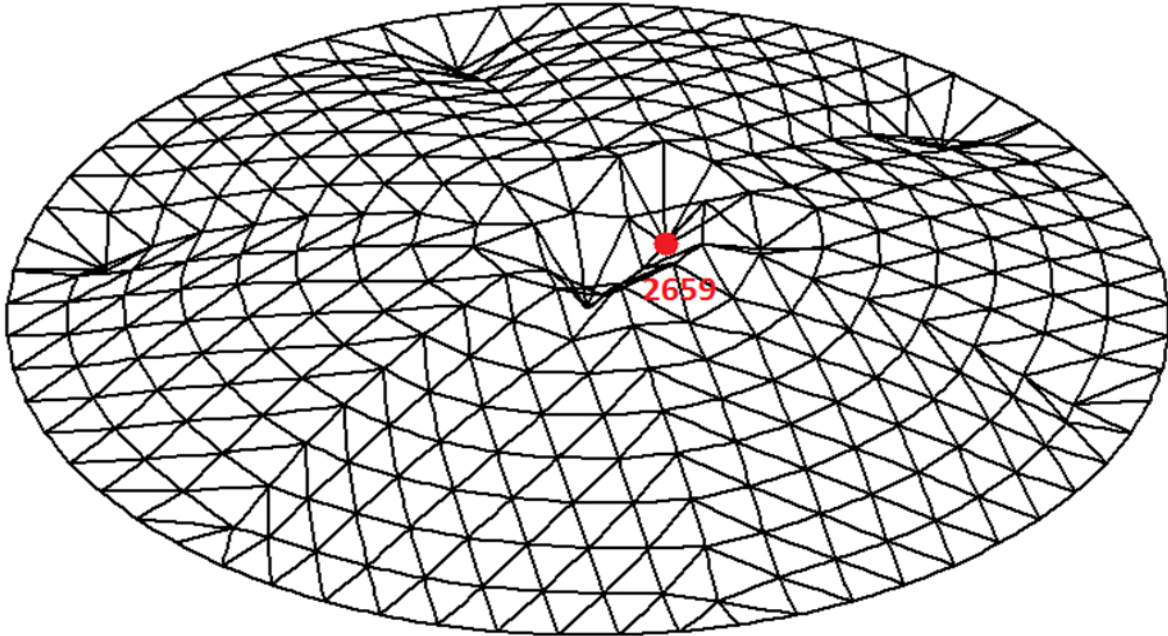
Για το λόγο ότι η αλλαγή του μέτρου της αρχικής ατέλειας για τις τιμές 60mm και 120mm δεν παρουσίασε κάποια μεταβολή στην αντοχή, στη συνέχεια ακολουθούν ακόμα τρεις περιπτώσεις για τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες. Με την ολοκλήρωση των αναλύσεων, θα γίνει αντιληπτό αν με αυτή την υπερβολική αύξηση της αρχικής ατέλειας παρουσιάζεται κάποια ουσιαστική αλλαγή ως προς την απόκριση του σφαιρικού κελύφους.

4.3.3 Επιρροή για μεγαλύτερη αύξηση της αρχικής ατέλειας

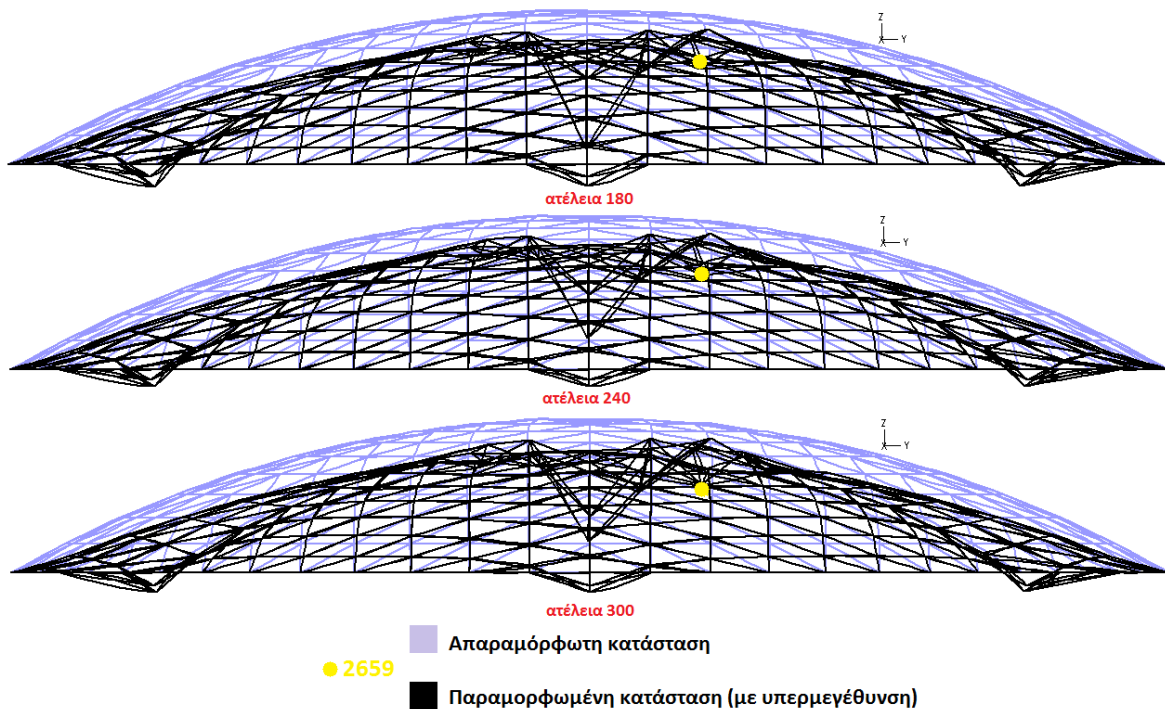
Η μη γραμμική ανάλυση λυγισμού με αρχικές ατέλειες πραγματοποιείται για ακόμα τρεις περιπτώσεις. Με σημείο αναφοράς το μέτρο της ατέλειας 60mm, αυξάνεται αναλογικά και μετατρέπεται σε 180mm, 240mm και 300mm. Έχοντας τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με τις προηγούμενες αναλύσεις, το πρόγραμμα ADINA δίνει τα πιο κάτω αποτελέσματα. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί μόνο η περίπτωση για 300mm, όπου οι διαφορές είναι εντονότερες, ενώ και για τις τρεις περιπτώσεις ισχύουν τα ίδια με πάρα πολύ λίγες διαφοροποιήσεις οι οποίες αναφέρονται.

Το σφαιρικό κέλυφος συμπεριφέρεται και στις τρεις περιπτώσεις το ίδιο. Η διαφορά εμφανίζεται κυρίως στον κεντρικό κόμβο 3462, όπου με την αύξηση της ατέλειας παρατηρείται μείωση στη μετακίνηση του κόμβου. Συγκεκριμένα, για τις αρχικές ατέλειες 180mm, 240mm και 300mm, η μετακίνηση είναι 0.105m, 0.081m, και 0.064m αντίστοιχα. Στα υπόλοιπα σημεία υπάρχουν μικρές διαφορές στο μέτρο της μετακίνησης, όπου δεν ξεπερνά τα 10mm. Σε σύγκριση με τις προηγούμενες περιπτώσεις, το φαινόμενο της τοπικής βύθισης στο κόμβο 2659 γίνεται πιο έντονο (Εικόνα 4.11 και Εικόνα 4.12). Και στις τρεις περιπτώσεις, η βύθιση έχει μέτρο κοντά στο 0.050m, αρκετά μεγαλύτερο από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Συνεπώς, η υπερβολική αύξηση στο μέτρο της αρχικής ατέλειας,

δεν επέφερε σημαντικές αλλαγές στο τρόπο με τον οποίο αποκρίνεται ο φορέας (εκτός βέβαια από τον κόμβο 2659).



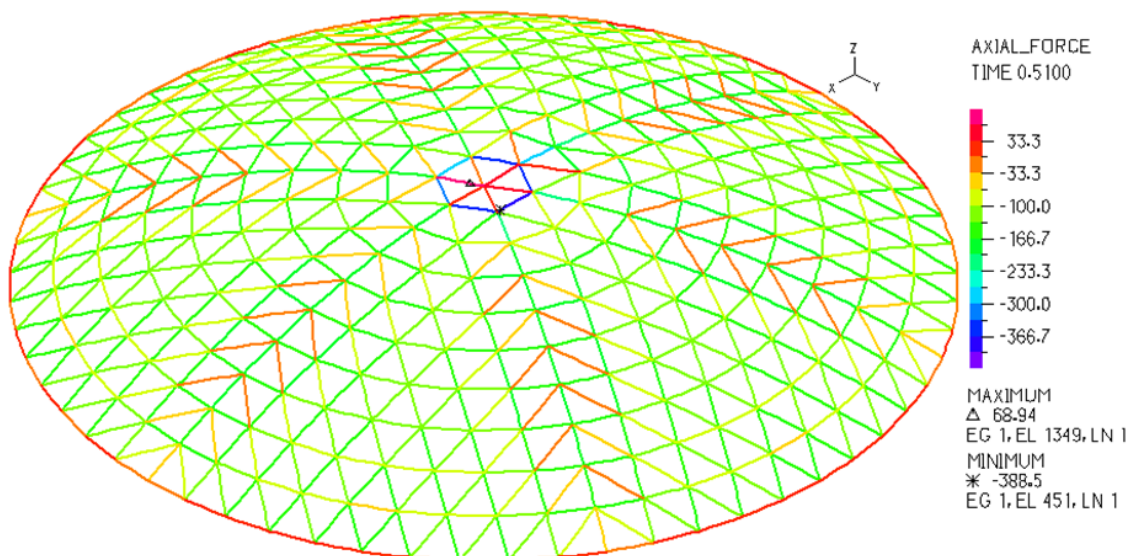
Εικόνα 4.11: Παραμορφωμένη κατάσταση του φορέα για ατέλεια 300mm, στο οριακό σημείο πριν την αστοχία



Εικόνα 4.12: Το σφαιρικό κέλυφος στο οριακό σημείο πριν την αστοχία και στις τρεις περιπτώσεις

Οι αξονικές δυνάμεις συμπεριφέρονται αναλογικά και στις τρεις περιπτώσεις. Εμφανίζεται μια διαφορά ως προς το μέτρο των δυνάμεων, αφού με την αύξηση της ατέλειας παρατηρείται μείωση των αξονικών. Για παράδειγμα, για τη μέγιστη θλιπτική δύναμη, η οποία παρουσιάζεται στο ίδιο σημείο και στις τρεις περιπτώσεις, από 501.3kN για αρχική ατέλεια 180mm γίνεται για αρχική ατέλεια 300mm, 388.5kN (Εικόνα 4.13). Αυτή η μείωση οφείλεται στο ότι, καθώς η αρχική ατέλεια αυξάνεται σε τιμές

μεγαλύτερες από 180mm, ο φορέας αρχίζει να επηρεάζεται και να αστοχεί γρηγορότερα. Συγκρίνοντας με τις περιπτώσεις για πιο μικρό μέτρο αρχικής ατέλειας (30mm, 60mm και 120mm), η κατανομή των αξονικών δυνάμεων δεν έχει επηρεαστεί ούτε σε αυτές τις περιπτώσεις. Η συμπεριφορά, λόγω και της συμμετρίας του σχήματος, παραμένει συμμετρική με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στο κεντρικό εξάγωνο, όπου δημιουργείται η τοπική παραμόρφωση.



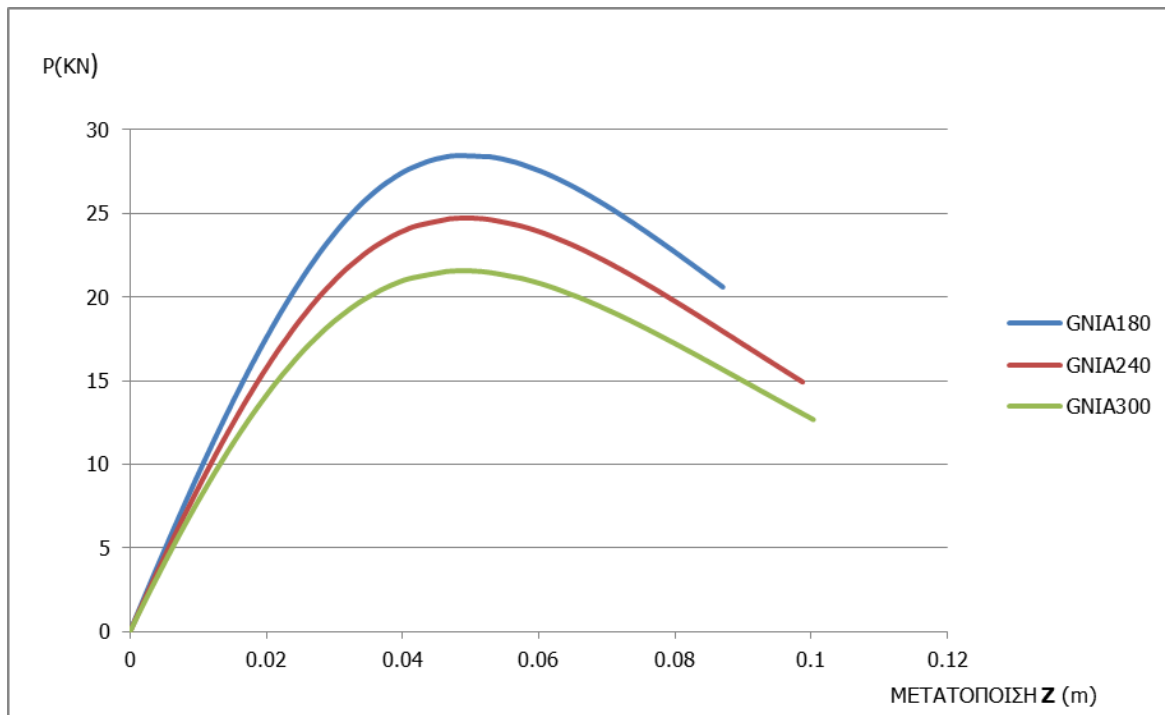
Εικόνα 4.13: Αξονική φόρτιση του κελύφους στο οριακό σημείο πριν την αστοχία για ατέλεια 300mm

Με την αύξηση της αρχικής ατέλειες σε τιμές μεγαλύτερες από 180mm, ο φορέας αρχίζει να επηρεάζεται. Αυτό, αποδεικνύεται επίσης και από τους δρόμους ισορροπίας του Σχήμα 4.3. Όπως παρατηρείται, με την αύξηση της αρχικής ατέλειας υπάρχει σημαντική μείωση της αντοχής. Στον πίνακα που ακολουθεί, φαίνονται τα ποσοστά μείωσης που παρουσιάζουν αυτές οι περιπτώσεις. Με κάθε αύξηση της αρχικής ατέλειας παρουσιάζεται μείωση της αντοχής 12-13%. Ακόμη, όπως δείχνουν οι δρόμοι ισορροπίας, υπάρχει και μικρή επιρροή στη δυσκαμψία του κελύφους με την αύξηση της αρχικής ατέλειας.

Ο κόμβος 2659 επιλέχθηκε επειδή μόνο σε αυτό τον κόμβο παρουσιάζεται ένας ομαλός δρόμος ισορροπίας με ανοδικό και καθοδικό κλάδο για αυτές τις περιπτώσεις. Έτσι, εκτός από το μέτρο αντοχής, δεν είναι εφικτό να συγκριθούν οι δρόμοι ισορροπίας για όλες τις περιπτώσεις που έγιναν στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες. Σχετικά με την αντοχή που και στις τρεις πρώτες περιπτώσεις ήταν ίδια μέχρι την ανάλυση για ατέλεια 300mm, φαίνεται ένα αξιοσημείωτο ποσοστό μείωσης 33%.

Πίνακας 4.1: Ποσοστά μείωσης της αντοχής του κελύφους

Αρχική ατέλεια (mm)	Αντοχή κελύφους (kN)	Ποσοστό Μείωσης (%)
30,60,120	32.15	12
180	28.46	
180	28.46	13
240	24.73	
240	24.73	12
300	21.57	
30,60,120	32.15	33
300	21.57	



Σχήμα 4.3: Δρόμοι ισορροπίας του κόμβου 2659 και για τις τρεις περιπτώσεις

Το συμπέρασμα με την ολοκλήρωση της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες είναι ότι η αλλαγή του τρόπου σύνδεσης επηρεάζει σημαντικά την απόκριση του φορέα. Το μέτρο της αρχικής ατέλειας παρουσίασε επιρροή για τις αναλύσεις που έγιναν για τιμές μεγαλύτερες από 180mm. Για τις πρώτες αναλύσεις που έγιναν για αρχική ατέλεια 30mm, 60mm και 120mm, δεν παρουσιάστηκε καμία μεταβολή στην αντοχή του σφαιρικού κελύφους.

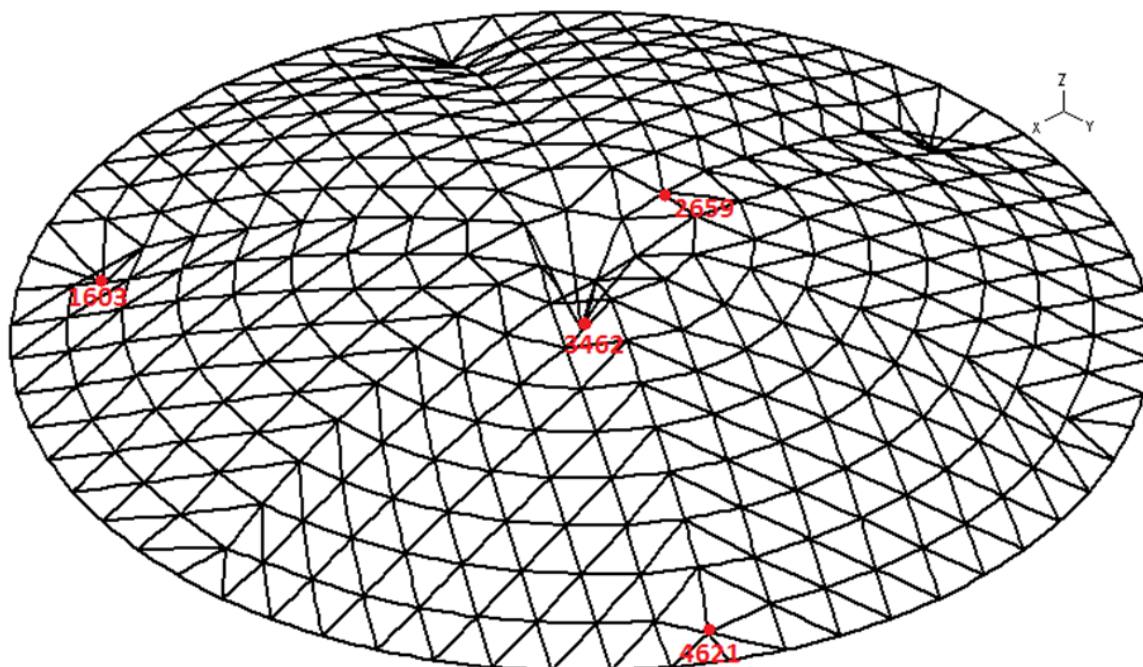
Η αστοχία στις τρεις πρώτες περιπτώσεις με αρχική ατέλεια 30mm, 60mm και 120mm ήταν λόγω τοπικού ακαριαίου λυγισμού στις περιοχές κοντά στην βάση. Στη συνέχεια, για μεγαλύτερες τιμές αρχικής ατέλειας (180mm, 240mm και 300mm), ο τρόπος αστοχίας δεν είναι ο ίδιος. Αν και ο μηχανισμός αστοχίας είναι ο τοπικός ακαριαίος λυγισμός, σε αυτές τις περιπτώσεις συμβαίνει στην περιοχή του κόμβου 2659. Λόγω της υπερβολικής αύξησης της αρχικής ατέλειας, επηρεάζεται η περιοχή του κόμβου 2659 που είναι δίπλα και προκαλεί ταχύτερα το λυγισμό σε εκείνο το σημείο. Η παραμόρφωση αυτή στο κόμβο 2659 εμφανίστηκε και για χαμηλότερες τιμές αρχικής ατέλειας αλλά ποτέ δεν αστόχησε γιατί συνέβαινε τοπικός ακαριαίος λυγισμός κοντά στη βάση.

Στη συνέχεια ακολουθεί η γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες, έτσι ώστε να διαπιστωθεί η επιρροή του υλικού στην όλη συμπεριφορά του κελύφους.

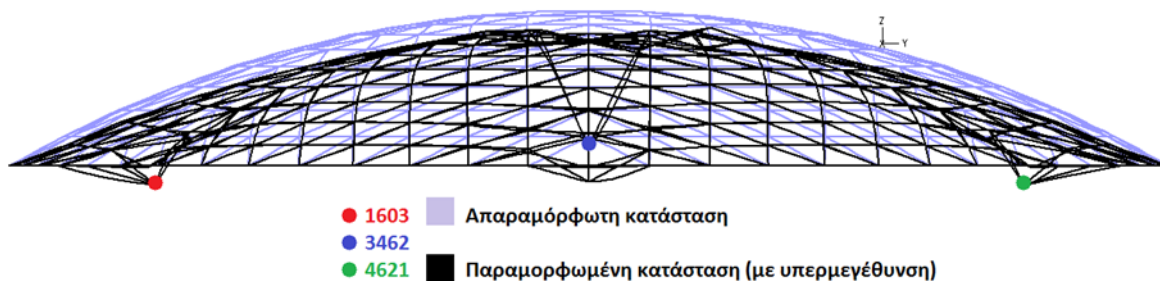
4.4 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕ ΑΤΕΛΕΙΕΣ – GMNIA

Για την εκτέλεση της μη γραμμικής ανάλυσης υλικού γεωμετρίας με ατέλειες λαμβάνεται υπόψη το υλικό που αποτελεί το φορέα. Για το συγκεκριμένο σφαιρικό κέλυφος, όπως και για την προηγούμενη περίπτωση για άκαμπτες συνδέσεις, το όριο διαρροής είναι 235000kPa (Σχήμα 3.3) για το χάλυβα που αποτελείται το κέλυφος. Για την εκτέλεση της μη γραμμικής ανάλυσης υλικού γεωμετρίας με ατέλειες στο ADINA, τα χαρακτηριστικά παραμένουν ως έχουν από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις με μέτρο αρχικής ατέλειας για 30mm, 60mm και 120mm, όπως επίσης και για μεγαλύτερες τιμές 180mm, 240mm και 300mm. Αναλύεται πιο κάτω η περίπτωση για αρχική ατέλεια 30mm, και στη συνέχεια συνοπτικά οι άλλες περιπτώσεις.

Για αρχική ατέλεια 30mm, ο φορέας συμπεριφέρεται όπως και στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες. Μετά την εισαγωγή του υλικού στις αναλύσεις, δεν υπάρχει καμιά αλλαγή σε ότι αφορά το φορέα. Οι Εικόνα 4.14 και Εικόνα 4.15, όπου δείχνουν τα αποτελέσματα για τη μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες, δε διαφέρουν από τις αντίστοιχες στην προηγούμενη ανάλυση. Το υλικό δεν έχει επηρεάσει το φορέα σε σχέση με τις μετακινήσεις, αφού καμιά αλλαγή δε συνέβηκε.



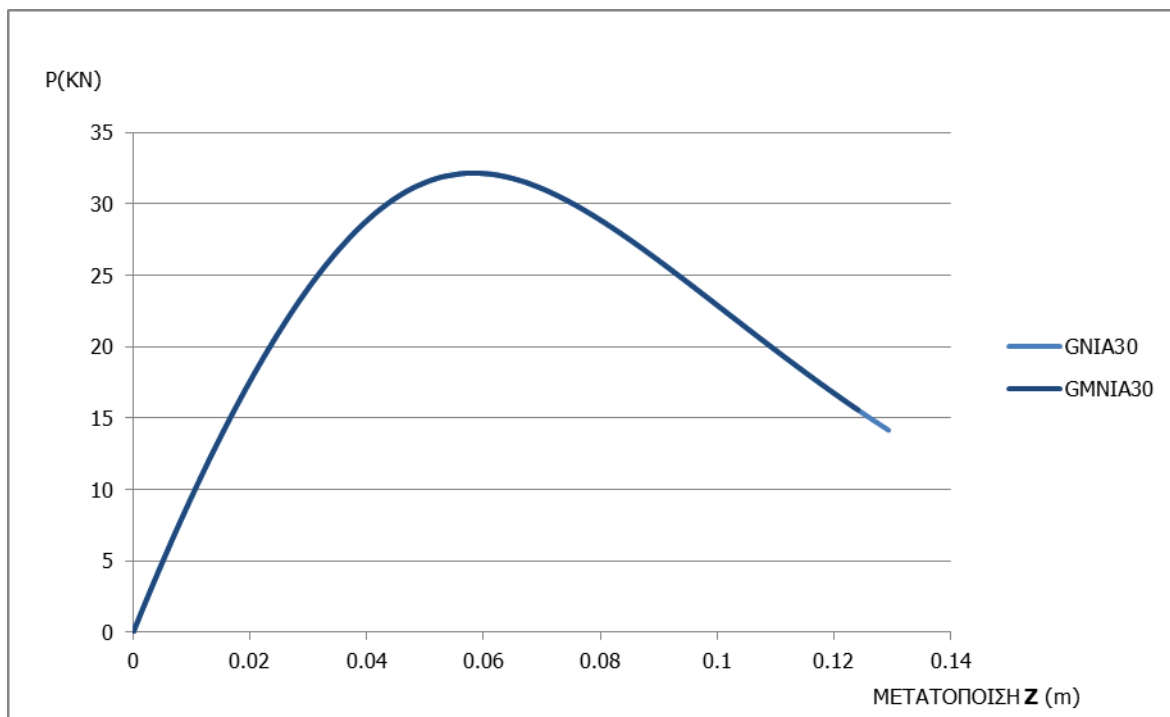
Εικόνα 4.14: Παραμορφωμένη κατάσταση του σφαιρικού κελύφους στο οριακό σημείο πριν την αστοχία



Εικόνα 4.15: Το σφαιρικό κέλυφος στο οριακό σημείο πριν την αστοχία

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας για το κόμβο 4621 στις δύο αναλύσεις που έγιναν (στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες και στη μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες). Όπως φαίνεται και στο σχήμα, οι δυο δρόμοι ταυτίζονται, ενισχύοντας την άποψη που διατυπώθηκε για τη μη επιρροή του υλικού. Ούτε και οι αξονικές δυνάμεις δεν παρουσιάζουν καμιά μεταβολή ανάμεσα στις δύο αναλύσεις, καθώς και για αυτή την ανάλυση, τα αποτελέσματα είναι όπως στην Εικόνα 4.7.

Το γεγονός ότι μεταξύ των δύο τύπων αναλύσεων για αρχική ατέλεια 30mm δεν παρουσιάζει κάποια αλλαγή στα αποτελέσματα, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για αυτή την περίπτωση, το υλικό έχει τιμές τάσεις μικρότερες από το όριο διαρροής. Οι τάσεις του υλικού είναι ακόμη στη γραμμική περιοχή και δεν έχουν περάσει στο ανελαστικό κλάδο. Η αστοχία οφείλεται από το τοπικό ακαριαίο λυγισμό του κελύφους και δεν οφείλεται σε διαρροή του υλικού.



Σχήμα 4.4: Δρόμοι ισορροπίας του κόμβου 4621 για τις δυο αναλύσεις

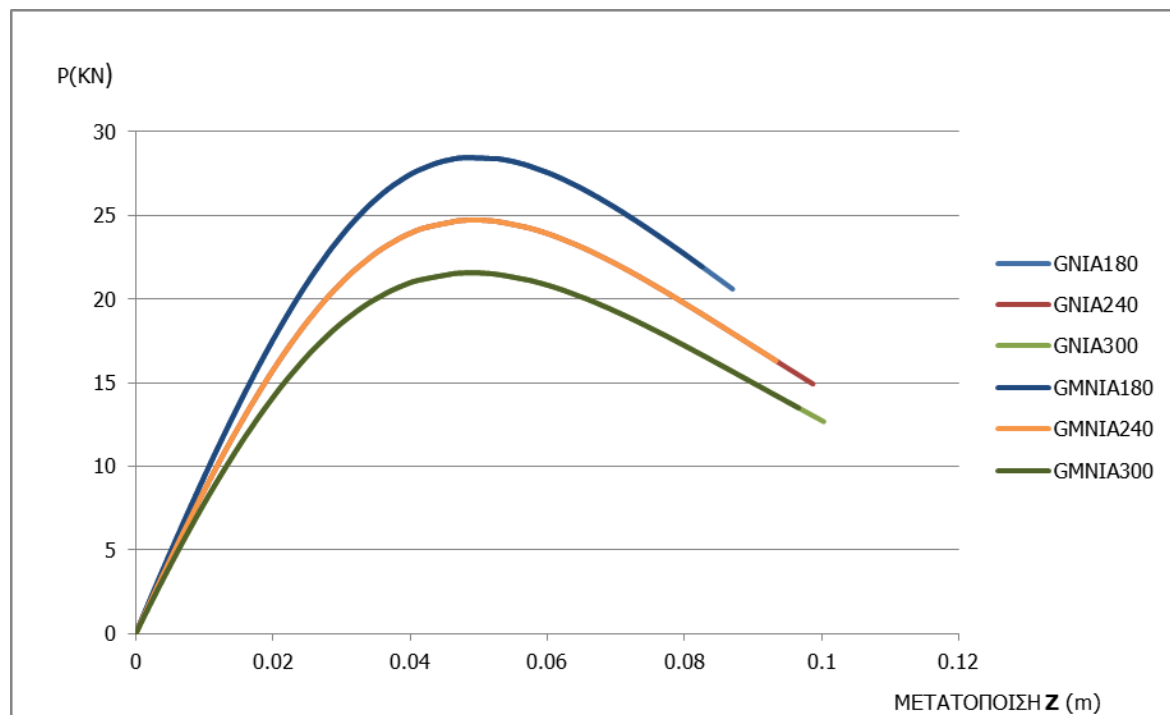
4.4.1 Επιρροή μεγέθους αρχικής ατέλειας

Η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες για το σφαιρικό κέλυφος πραγματοποιείται και με αρχική ατέλεια 60mm και 120mm. Και για αυτές τις αναλύσεις, το υλικό και πιο συγκεκριμένα ο χάλυβας, έχει όριο διαρροής 235000kPa. Σε σύγκριση με την πιο πάνω περίπτωση για αρχική ατέλεια 30mm, παρουσιάζεται μια μικρή μεταβολή στο μέτρο των μετατοπίσεων, αλλά και στις αξονικές δυνάμεις των μελών και στις δύο περιπτώσεις (για 60mm και 120mm). Αυτές οι αλλαγές είναι οι ίδιες που υπήρχαν και για την προηγούμενη ανάλυση, όταν το υλικό ήταν μόνο γραμμικό. Όλες αυτές οι αλλαγές έχουν σχολιαστεί στις υποπαραγράφους 4.3.1 και 4.3.2.

Εξαιτίας ότι δεν υπάρχει καμία περαιτέρω αλλαγή στις αναλύσεις εκτός από αυτές που παρουσιάστηκαν στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες (οι όποιες αλλαγές ήταν πολύ μικρές έως και ανύπαρκτες), συμπεραίνεται ότι το υλικό δε διαρρέει και δε δημιουργούνται πλαστικές διατομές. Λόγω των αρθρωτών συνδέσεων, ο τρόπος αστοχίας επιβεβαιώνεται ότι είναι τοπικός ακαριαίος λυγισμός στο κέλυφος και σε αυτές τις περιπτώσεις.

4.4.2 Επιρροή για μεγαλύτερη αύξηση της αρχικής ατέλειας

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, πραγματοποιήθηκαν ακόμα τρεις περιπτώσεις με μέτρο αρχικής ατέλειας 180mm, 240mm και 300mm. Στη μη γραμμική ανάλυση λυγισμού με ελαστικό υλικό και οι τρεις περιπτώσεις παρουσίασαν αρκετά μεγάλη επιρροή από το μέτρο της αρχικής ατέλειας. Καθώς υπήρχε αύξηση της αρχικής ατέλειας, η αντοχή του φορέα μειωνόταν σημαντικά, όπως επίσης και ο τρόπος αστοχίας μεταφερόταν σε άλλο σημείο επάνω στη γεωμετρία του κελύφους. Παρ' όλα αυτά, η επιρροή και στη μη γραμμικότητα γεωμετρίας με ανελαστικό υλικό είναι η ίδια με τον προηγούμενο τύπο ανάλυσης. Δεν υπάρχει καμία περαιτέρω αλλαγή που να οφείλεται από το υλικό. Αποδεικνύεται έμπρακτα και στο πιο κάτω Σχήμα 4.5, όπου φαίνονται οι δρόμοι ισορροπίας για όλες τις περιπτώσεις. Όπου οι δύο δρόμοι ισορροπίας ταυτίζονται μεταξύ τους και για τις δύο μορφές ανάλυσης.



Σχήμα 4.5: Δρόμοι ισορροπίας του κόμβου 2659 για όλες τις αναλύσεις

Η επιρροή της αρχικής ατέλειας για περιπτώσεις που πραγματοποιήθηκαν για τιμές μεγαλύτερες από 180mm είναι μεγάλη. Η επιρροή, όπως εμφανίστηκε και στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες, παρουσιάζεται και για τη μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες. Το γεγονός ότι δεν υπάρχει κάποια άλλη αλλαγή, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το υλικό δεν εισέρχεται στο μετελαστικό του κλάδο. Το υλικό δεν μπορεί να διαρρέυσει και να επηρεάσει ούτε και για πιο μεγάλες τιμές αρχικές της ατέλειας.

4.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

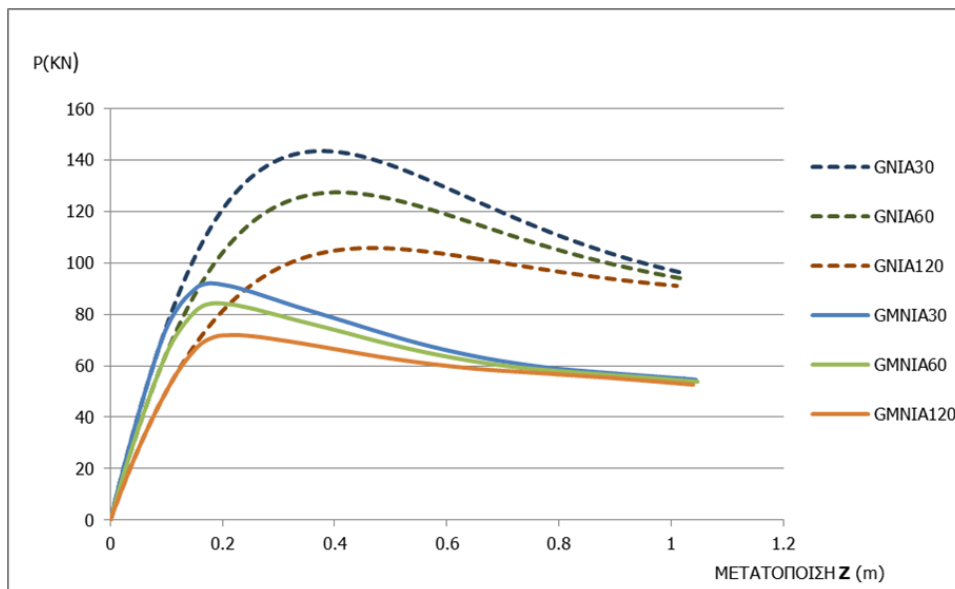
Με την ολοκλήρωση των αναλύσεων με τους δύο τρόπους σύνδεσης (άκαμπτες και αρθρωτές συνδέσεις), έχουμε τη δυνατότητα εξαγωγής συμπερασμάτων σχετικά με την επιρροή της αρχικής ατέλειας και τον τρόπο αστοχίας, καθώς και το ρόλο που διαδραματίζει ο τρόπος σύνδεσης. Με τις μη γραμμικές αναλύσεις με μη γραμμικό υλικό είναι ξεκάθαρο εάν η ποιότητα του χάλυβα (υλικού) συμβάλλει στην απόκριση του κελύφους. Απαραίτητα για τη διεξαγωγή των συμπερασμάτων είναι τα ακόλουθα Σχήμα 4.6, Σχήμα 4.7 και Σχήμα 4.8, όπου δείχνουν τους δρόμους ισορροπίας σε διάφορους κόμβους του σφαιρικού δικτυωτού κελύφους για όλες τις αναλύσεις, αλλά επίσης και ο Πίνακας 4.2 με τα διάφορα ποσοστά μείωσης.

Ο τρόπος σύνδεσης σε όλες τις αναλύσεις επηρεάζει αρκετά τη συμπεριφορά του φορέα. Συγκεκριμένα, με την αλλαγή από άκαμπτες σε αρθρωτές συνδέσεις στο φορέα, η όλη απόκρισή του αλλάζει, με κύρια την αντοχή. Η αντοχή μειώνεται αισθητά σε ποσοστά μεγαλύτερα από 50%. Η μείωση οδηγεί σε φορτία μικρότερα από το επιτρεπόμενο όριο, δημιουργώντας έτσι το πρόβλημα αλλαγών, είτε στις διατομές ή στη γεωμετρία του φορέα για να μπορεί να είναι ευσταθές σε φορτία που ορίζουν οι κανονισμοί.

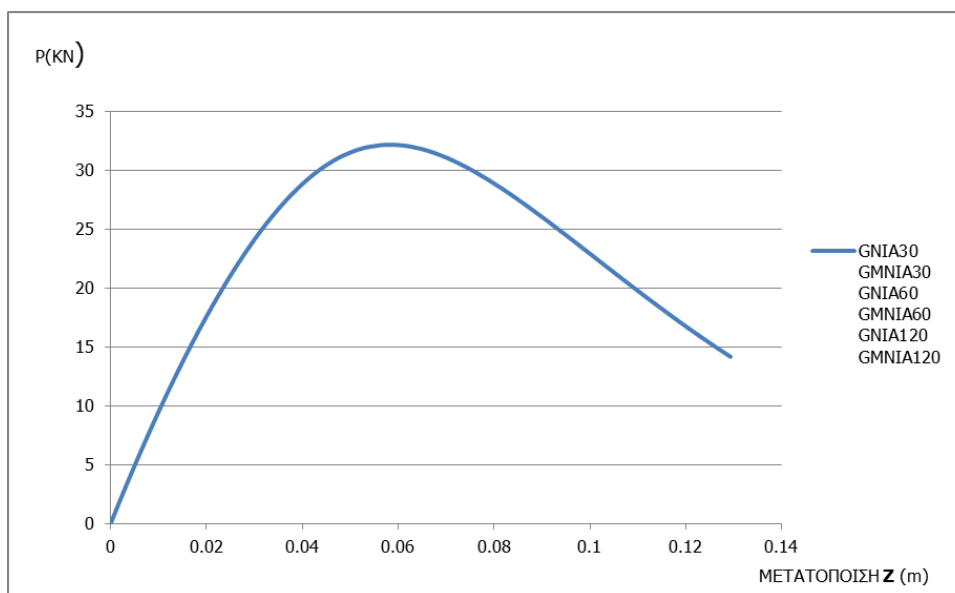
Μία ακόμη δραστική αλλαγή που επέφεραν οι αρθρωτές συνδέσεις είναι ο τρόπος που αστοχεί το κέλυφος, καθώς αλλάζει ο μηχανισμός αστοχίας. Όταν οι συνδέσεις στο κέλυφος είναι άκαμπτες, ο τρόπος αστοχίας είναι η διαρροή του χάλυβα. Εξαιτίας αυτού, στη συνέχεια εκδηλώνεται ο τοπικός ακαριαίος λυγισμός στην κορυφή του κελύφους. Γενικά, λόγω ότι οι άκαμπτες συνδέσεις δημιουργούσαν πιο δύσκαμπτο φορέα παρουσιάζονται και μεγαλύτερες μετακινήσεις σε όλους τους

κόμβους και υπήρχε καθολική παραμόρφωση στο κέλυφος. Στην περίπτωση με τις αρθρωμένες συνδέσεις μεταξύ των μελών αλλάζει, καθώς το κέλυφος αστοχεί από τοπικό ακαριαίο λυγισμό, χωρίς ο χάλυβας να φτάνει το όριο διαρροής και να παρουσιαστούν πλαστικές περιοχές. Η αστοχία είναι τοπική και ο υπόλοιπος φορέας έχει σχεδόν μηδενική παραμόρφωση εκτός των τοπικών εξογκωμάτων (dimple).

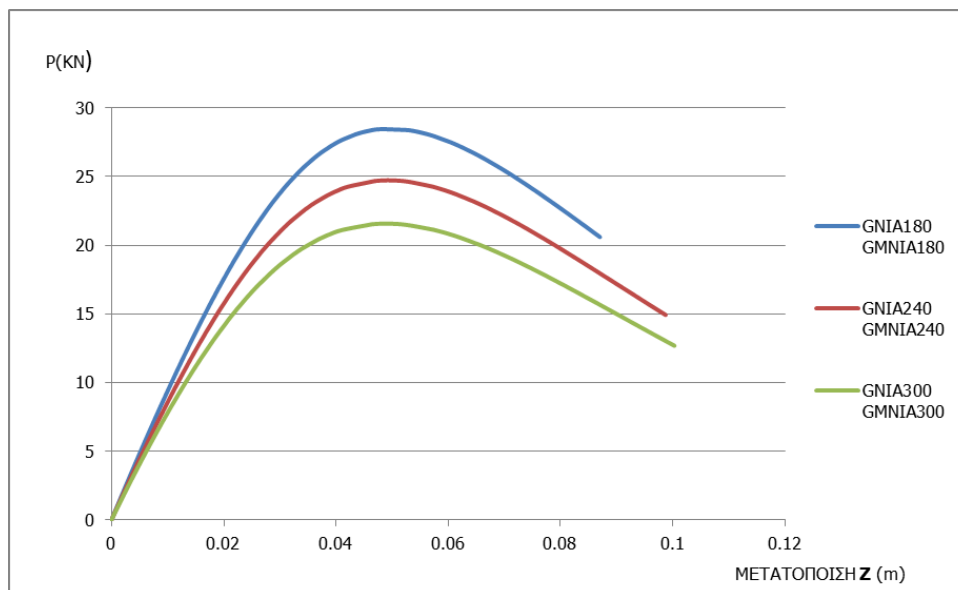
Όπως αποδείχθηκε, όταν οι συνδέσεις του κελύφους είναι άκαμπτες, το μέτρο της αρχικής ατέλειας επηρεάζει σημαντικά την αντοχή του φορέα. Με την αύξηση (διπλασιασμό) της αρχικής ατέλειας, η αντοχή του φορέα μειωνόταν αρκετά. Στην περίπτωση των αρθρωμένων συνδέσεων, καθώς η αύξηση της αρχικής ατέλειας ήταν μικρή (για τιμές από 30-120mm), δεν παρατηρείται καμιά αλλαγή από το φορέα. Στην περίπτωση όπου υπήρχε υπερβολική αύξηση για τιμές μεγαλύτερες από 180mm, τότε ο φορέας επηρεάζεται, με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής του κελύφους. Σε κάθε τρόπο σύνδεσης, η ατέλεια έχει καθοριστικό ρόλο για τις μετακινήσεις του φορέα και για τις αξονικές δυνάμεις. Στις αρθρωτές συνδέσεις υπάρχει όμως λιγότερη επιρροή, σε σύγκριση με την περίπτωση των άκαμπτων συνδέσεων.



Σχήμα 4.6: Δρόμοι ισορροπίας του κεντρικού κόμβου O (3462) για άκαμπτες συνδέσεις



Σχήμα 4.7: Δρόμοι ισορροπίας του κόμβου 4621 για αρθρωμένες συνδέσεις



Σχήμα 4.8: Δρόμοι ισορροπίας του κόμβου 2659 για αρθρωμένες συνδέσεις

Στην περίπτωση με άκαμπτες συνδέσεις, ο δομικός χάλυβας που είναι κατασκευασμένο το σφαιρικό κέλυφος με όριο διαρροής 235000kPa, αποτελεί αιτία αστοχίας. Καθώς αυξάνεται το φορτίο, ο χάλυβας υπερβαίνει το όριο διαρροής, και ακολούθως, πλαστικοποιείται μέχρι την αστοχία. Η επιρροή αυτή είναι αρκετά σημαντική γιατί λόγω αυτής της συμπεριφοράς του υλικού παρατηρούνται μειώσεις μεγαλύτερες από 30% για το κέλυφος. Έτσι, μία αλλαγή στην ποιότητα του χάλυβα σε πιο μεγάλες τιμές του ορίου διαρροής, θα βοηθούσε αισθητά την αντοχή του φορέα. Όσον αφορά την περίπτωση με τις αρθρωμένες συνδέσεις, η ποιότητα του χάλυβα δε διαδραματίζει κάποιο ρόλο στο τρόπο συμπεριφοράς του φορέα. Αφού οι τάσεις που αναπτύσσει είναι μικρότερες από του ορίου διαρροής, το υλικό συμπεριφέρεται συνεχώς ελαστικά. Ως αποτέλεσμα, κάποια αλλαγή στην ποιότητα του χάλυβα σε μεγαλύτερες τιμές του ορίου διαρροής να μη μεταβάλλει την αντοχή του σφαιρικού κελύφους.

Ο Πίνακας 4.2 παρουσιάζει τα ποσοστά μειώσεων για όλες τις περιπτώσεις που πραγματοποιήθηκαν μέχρι τώρα. Το σύμβολο • που φαίνεται στον πίνακα δηλώνει ότι τα ποσοστά που είναι από κάτω είναι συνάρτηση της ανάλυσης που έχει το σύμβολο αυτό. Έτσι τα ποσοστά που οφείλονται στην αρχική ατέλεια, η σύγκριση γίνεται ανάμεσα στις ίδιες μορφές αναλύσεων με τον ίδιο τύπο σύνδεσης, αλλά με διαφορετικό μέτρο ατέλειας. Τα ποσοστά που οφείλονται στην ποιότητα του χάλυβα, η σύγκριση γίνεται ανάμεσα στον ίδιο τύπο σύνδεσης και με το ίδιο μέτρο αρχικής ατέλειας, αλλά σε διαφορετική είδος ανάλυσης. Και τέλος, τα ποσοστά που οφείλονται στον τρόπο σύνδεσης, η σύγκριση γίνεται ανάμεσα στην ίδια μορφή ανάλυσης με το ίδιο μέτρο αρχικής ατέλειας, αλλά με διαφορετικό τύπο σύνδεσης. Το σύμβολο – δείχνει ότι οι συγκεκριμένες αναλύσεις δεν έχουν πραγματοποιηθεί και έτσι δεν υπάρχει τρόπος σύγκρισης.

Πίνακας 4.2: Ποσοστά μείωσης της αντοχής του σφαιρικού κελύφους

Τύπος σύνδεσης	Είδος ανάλυσης	Αρχική ατέλεια (mm)	Αντοχή κελύφους (kN)	Ποσοστό μείωσης (%) λόγω:		
				Αρχικής ατέλειας	Ποιότητας υλικού	Τύπου σύνδεσης
Άκαμπτη	GNIA	30	144	•	•	•
		60	127	12	•	•
		120	106	26	•	•
	GMNIA	30	92	•	36	•
		60	84	9	34	•
		120	72	22	32	•
Αρθρωτή	GNIA	30	32	•	•	78
		60	32	0	•	75
		120	32	0	•	70
		180	28	13	•	–
		120	25	22	•	–
		300	22	31	•	–
	GMNIA	30	32	•		65
		60	32	0	0	62
		120	32	0	0	56
		180	28	13	0	–
		240	25	22	0	–
		300	22	31	0	–

Στο επόμενο κεφάλαιο ακολουθούν αναλύσεις για τη διαπίστωση της επιρροής του τύπου της κρίσιμης ιδιόμορφης λυγισμού στην απόκριση του φορέα, αλλά και την αλληλεπίδραση (εάν υπάρχει) των μορφών αστοχίας. Οι δύο τύποι ιδιομορφών που θα χρειαστούν είναι η καθολική ή τοπική ιδιόμορφη (όπου παρουσιάστηκε και στις προηγούμενες αναλύσεις που έγιναν), αλλά και την Euler ιδιόμορφη. Μέχρι στιγμής, παρουσιάστηκε η αλληλεπίδραση δύο μηχανισμών αστοχία, του καθολικού ακαριαίου λυγισμού και του υλικού στην περίπτωση με άκαμπτες συνδέσεις. Στην περίπτωση με αρθρωτές συνδέσεις δεν παρουσιάστηκε καμία αλληλεπίδραση γιατί ο μηχανισμός αστοχίας, που ήταν ο τοπικός ακαριαίος λυγισμός, εκδηλωνόταν πριν υπάρξει άλλη μορφή αστοχίας.

5 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΥΠΟΥ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

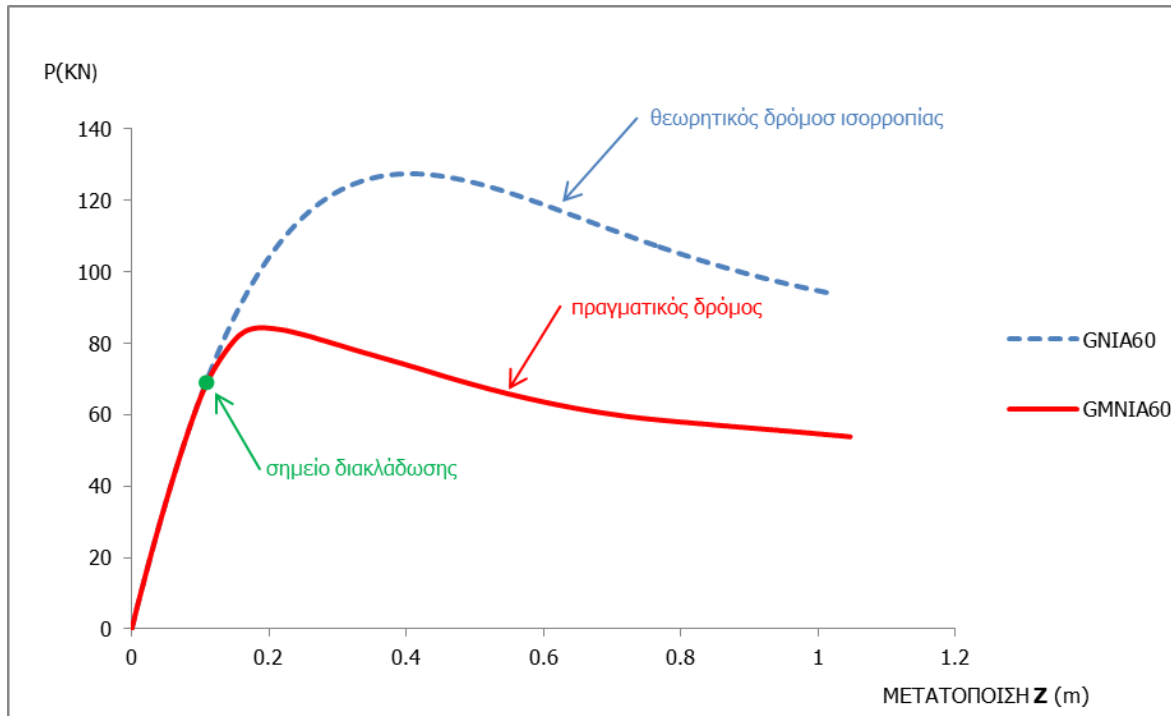
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε ένα σφαιρικό κέλυφος με ραβδωτά μέλη διαπιστώνονται τέσσερις διαφορετικοί τρόποι αστοχίας, γνωστοί και ως «μηχανισμοί αστοχίας». Οι μηχανισμοί αυτοί είναι: (1) ο καθολικός ακαριαίος λυγισμός με έντονες παραμορφώσεις σε όλο το σφαιρικό κέλυφος, (2) ο τοπικός ακαριαίος λυγισμός σε μία περιοχή του κελύφους με τον υπόλοιπο φορέα να μην αναπτύσσει παραμορφώσεις (dimple), (3) ο λυγισμός τύπου Euler μεμονωμένων ράβδων του κελύφους, και (4) η αστοχία υλικού. Στην πραγματικότητα όμως, είναι πολύ πιθανόν να υπάρξει αλληλεπίδραση δύο ή περισσότερων από αυτούς τους μηχανισμούς αστοχίας.

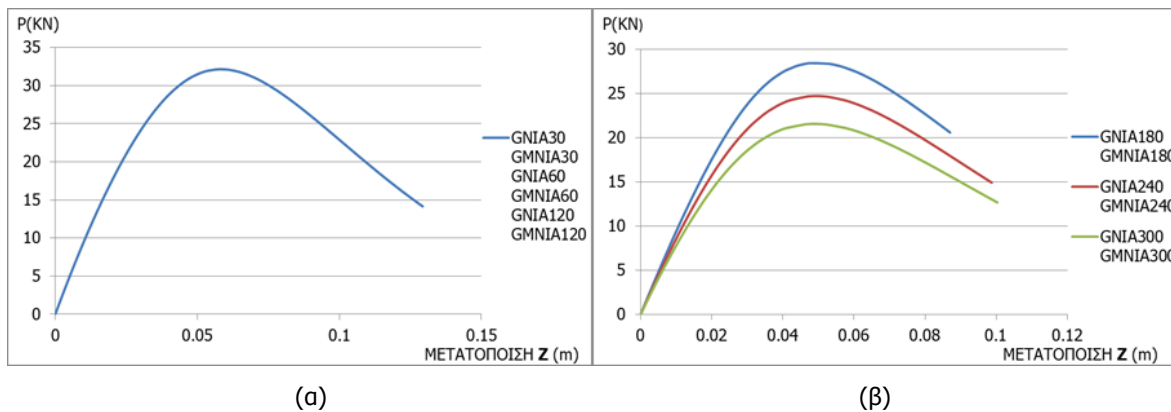
Μέχρι στιγμής, στο σφαιρικό κέλυφος παρατηρήθηκαν όλοι οι μηχανισμοί αστοχίας εκτός από το λυγισμό τύπου Euler σε μεμονωμένους ράβδους του κελύφους. Στην περίπτωση με αρθρωμένες τις συνδέσεις προέκυψε μόνο ένας τύπος αστοχίας, ο τοπικός ακαριαίος λυγισμός. Αντιθέτως, στην περίπτωση με άκαμπτες συνδέσεις, παρουσιάστηκε αρχικά ο καθολικός ακαριαίος λυγισμός στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες, και στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες ενεργοποιείται πρώτα ο μηχανισμός αστοχίας υλικού και στην συνέχεια εκδηλώνεται ο ακαριαίος λυγισμός.

Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1, όπου καταγράφεται ο δρόμος ισορροπίας του σφαιρικού κελύφους με άκαμπτες συνδέσεις, όπως έχει προκύψει από τη μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες (θεωρώντας γραμμικό ελαστικό – απολύτως πλαστικό υλικό), και συγκρίνεται με τον αντίστοιχο δρόμο ισορροπίας της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες (θεωρώντας ελαστικό υλικό). Καθώς το εξωτερικό φορτίο αυξάνεται σταδιακά, το σφαιρικό κέλυφος ακολουθεί το θεωρητικό δρόμο ισορροπίας (με διακεκομμένη μπλε γραμμή). Παράλληλα, αυξάνονται οι θλιπτικές εντάσεις των μελών. Ως αποτέλεσμα, σε ένα σημείο κατά μήκος του δρόμου ισορροπίας (σημείο διακλάδωσης), η θλιπτική ένταση σε ένα μία ράβδο να αποκτήσει τέτοια τιμή που να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός αστοχίας του υλικού.

Στην αντίθετη περίπτωση όταν το σφαιρικό κέλυφος είναι με αρθρωτές συνδέσεις (Σχήμα 5.2), ο δρόμος ισορροπίας είναι από την αρχή καμπύλος με συνεχώς μειούμενη δυσκαμψία που τελικά μηδενίζεται (στο λεγόμενο οριακό σημείο), πριν εκδηλωθεί η μη γραμμικότητα υλικού. Έτσι, δεν παρουσιάζεται η αλληλεπίδραση των δύο μηχανισμών αστοχίας και γι' αυτό οι δύο δρόμοι ισορροπίας των αναλύσεων αυτών ταυτίζονται, με το σφαιρικό κέλυφος να αστοχεί με τοπικό ακαριαίο λυγισμό.



Σχήμα 5.1: Δρόμος ισορροπίας σφαιρικού κελύφους με άκαμπτες συνδέσεις, με αλληλεπίδραση μηχανισμών αστοχίας



Σχήμα 5.2: Δρόμοι ισορροπίας σφαιρικού κελύφους με αρθρωτές συνδέσεις όπου δεν παρατηρείται αλληλεπίδραση μηχανισμών αστοχίας (α) κόμβος 4621 (β) κόμβος 2659

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί με ποιο τρόπο είναι δυνατόν να εμφανιστεί ο λυγισμός τύπου Euler σε μεμονωμένες ράβδους του κελύφους. Όταν επιτευχθεί αυτό, θα διαπιστωθεί εάν αυτός ο μηχανισμός αστοχίας μπορεί να αλληλεπιδράσει με τους άλλους μηχανισμούς αστοχίας. Η δυσκολία στην παρούσα περίπτωση είναι να διαπιστωθεί αν η αστοχία οφείλεται σε λυγισμό τύπου Euler ή είναι ακαριαίος λυγισμός. Το πρόγραμμα δεν ξεκαθαρίζει το μηχανισμό αστοχίας, έτσι για την αναζήτηση του μηχανισμού αστοχίας γίνεται σύγκριση των θλιπτικών αξονικών δυνάμεων με το P_{cr} , Εξ. (5.1), το οποίο ονομάζεται κρίσιμο φορτίο λυγισμού πρώτης τάξης (ή απλώς κρίσιμο φορτίο λυγισμού ή φορτίο Euler P_E , από το όνομα του επιστήμονα που το υπολόγισε πρώτος).

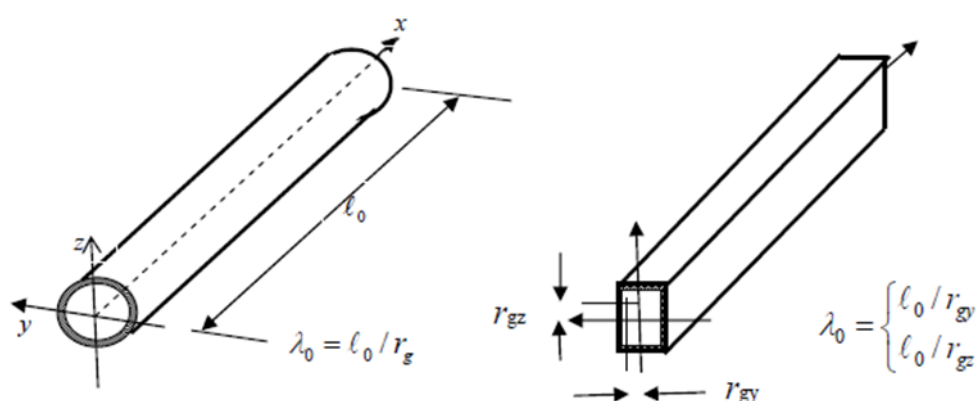
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_0^2} \quad (5.1)$$

Για την εμφάνιση του μηχανισμού αστοχίας πραγματοποιήθηκαν αλλαγές στο σφαιρικό κέλυφος. Οι αλλαγές αφορούσαν κυρίως τις διατομές, αλλά και τον τρόπο σύνδεσης. Ο φορέας θα έχει αρχική

γεωμετρία σύμφωνα με τα όσα ειπώθηκαν στο κεφάλαιο 2. Έπειτα, ακολούθησαν αρκετές αναλύσεις μέχρι να βρεθεί η κατάλληλη διατομή.

5.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΟΥ ΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Το σφαιρικό κέλυφος αρχικά έχει τη γεωμετρία σύμφωνα με το βιβλίο «Guide to Buckling Load Evaluation Of Metal Reticulated Roof Structures». Όλες διατομές έχουν διάμετρο $d=301\text{mm}$ και πάχος $t=5\text{mm}$ και οι συνδέσεις μεταξύ των μελών είναι άκαμπτες. Η ανάλυση στο κεφάλαιο 3 δεν παρουσίασε σε καμία ιδιομορφή μέλη που να έχουν λυγισμό Euler. Για την ύπαρξη της πιθανότητας να είναι κρίσιμος αυτός ο μηχανισμός αστοχίας, πρέπει οι ράβδοι που χρησιμοποιούνται να έχουν σχετικά μικρή ροπή αδράνειας και επομένως μεγαλύτερη λυγηρότητα. Για να μπορεί όμως να εμφανιστεί ο λυγισμός μέλους στο κέλυφος με άκαμπτες τις συνδέσεις, η λυγηρότητα λ_0 (Εικόνα 5.1) θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 100.



Εικόνα 5.1: Υπολογισμός λυγηρότητας μέλους [1]

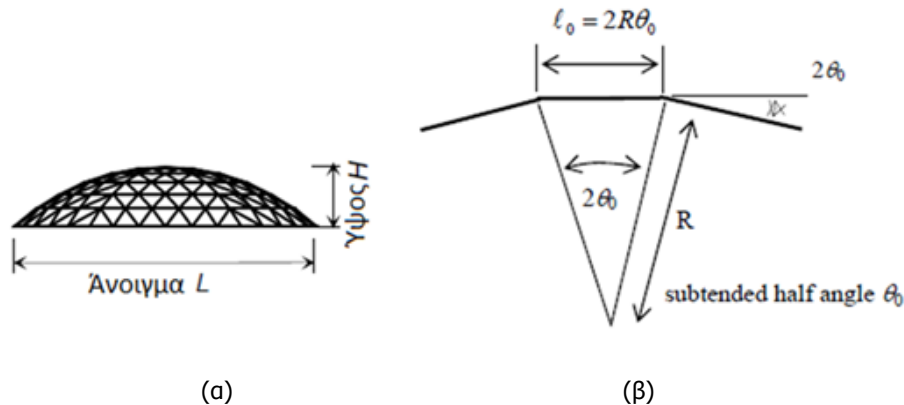
Αρχικά, η βάση ορίστηκε ως το εμβαδόν να είναι το ίδιο για τις διατομές που επιλέχθηκαν με τιμή 46.5cm^2 . Για να μειωθεί η ροπή αδράνειας και το εμβαδόν να παραμένει το ίδιο, πρέπει η καινούργια διατομή να έχει μικρότερη διάμετρο και μεγαλύτερο πάχος. Μετά από πολλαπλές δοκιμές για διάφορες διατομές, δεν κατέστη δυνατόν να βρεθεί κάποια διατομή που να παρουσιάζει Euler ιδιομορφή σε κάποιο μέλος. Ακόμη και στην ακραία περίπτωση, όπου η διατομή ήταν σχεδόν συμπαγείς με το ελάχιστο κενό.

Αποφασίστηκε, λοιπόν, να αναζητηθούν διατομές ανεξαρτήτως εμβαδού με την αρχική διατομή. Θέτοντας ως βάση το 100 για την λυγηρότητα, αναζητήθηκε μία διατομή που να παρουσιάζει λυγισμό μέλους. Όμως, η κατάσταση ήταν ίδια και σε περιπτώσεις ακόμη όπου η λυγηρότητα ήταν πολύ μεγάλη σε πρακτικά αδύνατες διατομές, όταν η διάμετρος της ράβδου ήταν μικρότερη από 10cm . Συνεχώς ο μηχανισμός αστοχίας ήταν ο ακαριαίος λυγισμός και σε καμία περίπτωση δεν εμφανίστηκε λυγισμός Euler. Καθώς οι προσπάθειες για ανεύρεση των επιθυμητών ιδιομορφών αποδείχθηκαν άκαρπες, ο μόνος τρόπος ήταν να τροποποιηθεί ο φορέας. Έτσι, οι αλλαγές αυτές μπορούσαν να υλοποιηθούν με τροποποίηση της γεωμετρίας του κελύφους.

5.2.1 Τροποποίηση του κελύφους

Για την εκδήλωση ιδιομορφής με λυγισμό Euler σε κάποιο μέλος του σφαιρικού κελύφους υπάρχουν δύο τρόποι: (1) αλλαγή της δυσκαμψίας του φορέα, και (2) αλλαγή του τρόπου σύνδεσης. Στην πρώτη περίπτωση, με την αύξηση της δυσκαμψίας του κελύφους γίνεται επιτρεπτή η ανάπτυξη περισσότερης θλιπτικής δύναμης στα μελή. Καθώς γίνεται αυτό και με τη ταυτόχρονη αύξηση της λυγηρότητας των μελών, ο φορέας θα λυγίσει λόγο Euler, πριν εκδηλωθεί η μη γραμμικότητα υλικού ή ο ακαριαίος λυγισμός. Για να γίνει εφικτό αυτό, πρέπει να αλλάξει η γεωμετρία του κελύφους, ώστε ο λόγος ύψους προς άνοιγμα να γίνει σχετικά μεγάλος και η γωνία θ_0 να μεγαλώσει αρκετά (Εικόνα 5.2).

Αυτό φυσικά δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί εύκολα, έτσι επιλέγεται ο δεύτερος τρόπος με την αλλαγή του τρόπου σύνδεσης. Με την αλλαγή των άκαμπτων συνδέσεων σε αρθρωτές, το ισοδύναμο μήκος λυγισμού l_0 αυξάνεται και είναι ίδιο με το μήκος των μελών, με αποτέλεσμα το κρίσιμο φορτίο λυγισμού των μελών να μειωθεί - Εξ. (5.1) και αντίθετα η λυγηρότητα να αυξηθεί. Έτσι, είναι πολύ πιθανόν να εκδηλωθεί λυγισμός τύπου Euler για κάποια τιμή της επιβαλλόμενης φόρτισης πριν εκδηλωθεί άλλη μορφή αστοχίας.



Εικόνα 5.2: Χαρακτηριστικά γεωμετρίας [1] (α) Λόγος ύψους προς το άνοιγμα (β) Γωνία θ_0

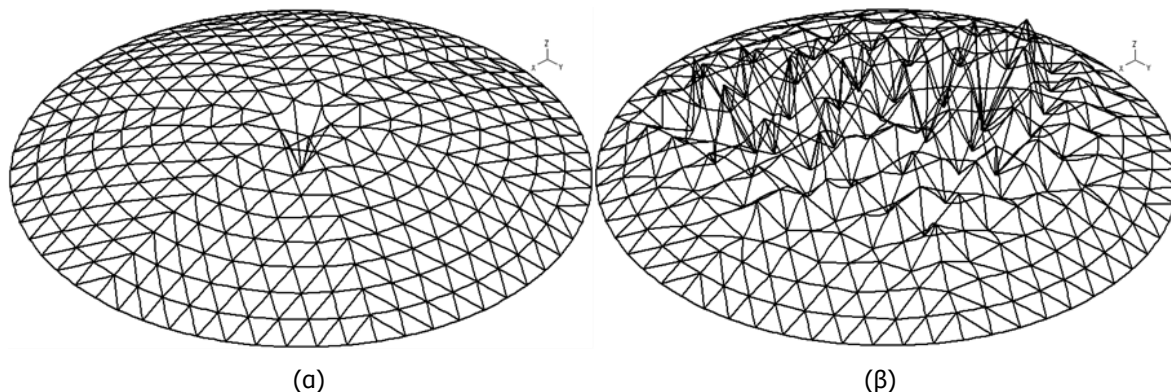
Με την αλλαγή του τρόπου σύνδεσης χρησιμοποιήθηκε πάλι η ίδια διατομή για το κέλυφος ($d=301\text{mm}$, $t=5\text{mm}$). Αυτή η διατομή δε μπόρεσε να δώσει το επιθυμητό τύπο αστοχίας. Με σημείο αναφοράς το αρχικό εμβαδόν 46.5cm^2 , αναζητείται διατομή με μικρότερη ροπή αδρανείας. Στην προκειμένη περίπτωση, χρειάστηκε διατομή με διάμετρο κάτω από 10cm , όπου είναι πρακτικά αδύνατη για 5m άνοιγμα. Αφού η διατομή είχε ένα επιβαλλόμενο φορτίο πολύ μικρό και η ίδια διατομή στην πραγματικότητα για άνοιγμα 5m θα παρουσίαζε μόνο από το βάρος καμπτικό λυγισμό, και αναζητήθηκαν διατομές ανεξαρτήτως του εμβαδού. Μετά από όλες αυτές τις αλλαγές, αρκετές διατομές παρουσίασαν το λυγισμό Euler σε μεμονωμένα μέλη.

5.2.2 Επιλογή διατομών

Οι διατομές που στη περίπτωση της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού παρουσίασαν κρίσιμο λυγισμό τύπου Euler σε μεμονωμένα μέλη του κελύφους είναι αρκετές. Στα μέλη με αυτές τις διατομές, ο συντελεστής ξ_0 προκύπτει για τιμές μικρότερες από 5 ή 4, επαληθεύοντας την αναφορά από το βιβλίο «Guide to Buckling Load Evaluation Of Metal Reticulated Roof Structures», επιπρόσθετα η λυγηρότητα ήταν μεγαλύτερη από 50. Οι διατομές είχαν διάμετρο κυρίως μικρότερη από 0.200m , αρκετά μικρότερες από τη μέχρι στιγμής διατομής και πάχος πολύ μεγαλύτερο, με τιμές από 20mm .

Προϋπόθεση επίσης για την επιλογή της διατομής ήταν να μπορεί να υπάρξει αλληλεπίδραση μεταξύ του ακαριαίου τοπικού λυγισμού και του λυγισμού τύπου Euler. Για την επίτευξη αυτή, το κέλυφος κατά τη γραμμική ανάλυση λυγισμού έπρεπε να παρέχει και τους δύο μηχανισμούς αστοχίας και στα φορτία λυγισμού να μην υπάρχει μεγάλη διαφορά. Επίσης, όταν ο τύπος της ιδιομορφής ήταν ακαριαίος λυγισμός, η ιδιομορφή έπρεπε να αστοχεί λόγω dimple (τοπικά) στην κορυφή του σφαιρικού κελύφους (Εικόνα 5.3.α). Όταν η ιδιομορφή είχε τη μορφή της Εικόνα 5.3.β, δεν παρουσιάζονταν αλληλεπίδραση στις επόμενες αναλύσεις γιατί επικρατούσε ο ακαριαίος λυγισμός, σε όλες τις αναλύσεις.

Η διατομή με διάμετρο $d=160\text{mm}$ και $t=70\text{mm}$ πληροί τα πιο πάνω κριτήρια και τελικά επιλέχθηκε για να απεικονίσει την επιρροή που μπορεί να επιφέρει ο τύπος της κρίσιμης ιδιομορφής λυγισμού στην απόκριση του φορέα. Όπως παρατηρείται, είναι ένας πολύ συμπαγής σωλήνας, όπως και όλες οι διατομές που μπόρεσαν να δώσουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Επιπλέον, φαίνεται ότι το εμβαδόν αυξήθηκε υπερβολικά σε σχέση με το αρχικό.



Εικόνα 5.3: Ιδιομορφές λυγισμού του σφαιρικού κελύφους (α) Ιδιομορφή Dimple (β) Καθολική ιδιομορφή
 Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για την επιλεγόμενη διατομή. Για τη διατομή αυτή ($d=160\text{mm}$, $t=70\text{mm}$) πραγματοποιήθηκαν τρεις περιπτώσεις:

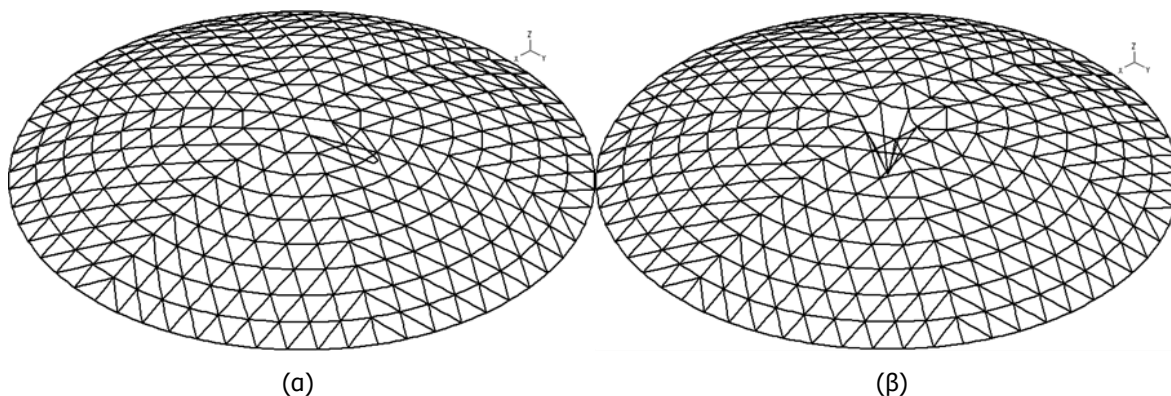
- Με κρίσιμη την ιδιομορφή με ακαριαίο λυγισμό.
- Με κρίσιμη την Euler ιδιομορφή ενός μέλους
- Με συνδυασμό και των δύο πιο πάνω ιδιομορφών.

Για τις παρούσες περιπτώσεις έγιναν και οι δύο τύποι αναλύσεων (GNIA-GMNIA), απεικονίζοντας πλήρως την αλληλεπίδραση όλων των μηχανισμών αστοχίας.

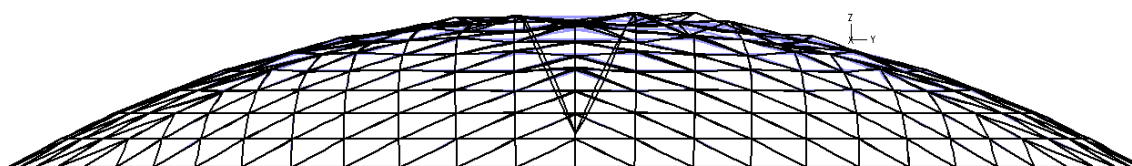
5.3 ΚΡΙΣΙΜΗ Η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ ΜΕ ΑΚΑΡΙΑΙΟ ΛΥΓΙΣΜΟ

5.3.1 Γραμμική ανάλυση λυγισμού – LBA

Με την αλλαγή του τρόπου σύνδεσης σε αρθρώσεις και την επιλογή της διατομής για την εκδήλωση της αλληλεπίδρασης των μηχανισμών αστοχίας, πραγματοποιείται η γραμμική ανάλυση λυγισμού. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται και οι δυο τύποι ιδιομορφών που προέκυψαν από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού.



Εικόνα 5.4: Ιδιομορφές λυγισμού του σφαιρικού κελύφους (α) 1^η ιδιομορφή (β) 9^η ιδιομορφή



■ Απαραμόρφωτη κατάσταση

■ Παραμορφωμένη κατάσταση (με υπερμεγέθυνση)

Εικόνα 5.5: 9^η ιδιομορφή λυγισμού του κελύφους

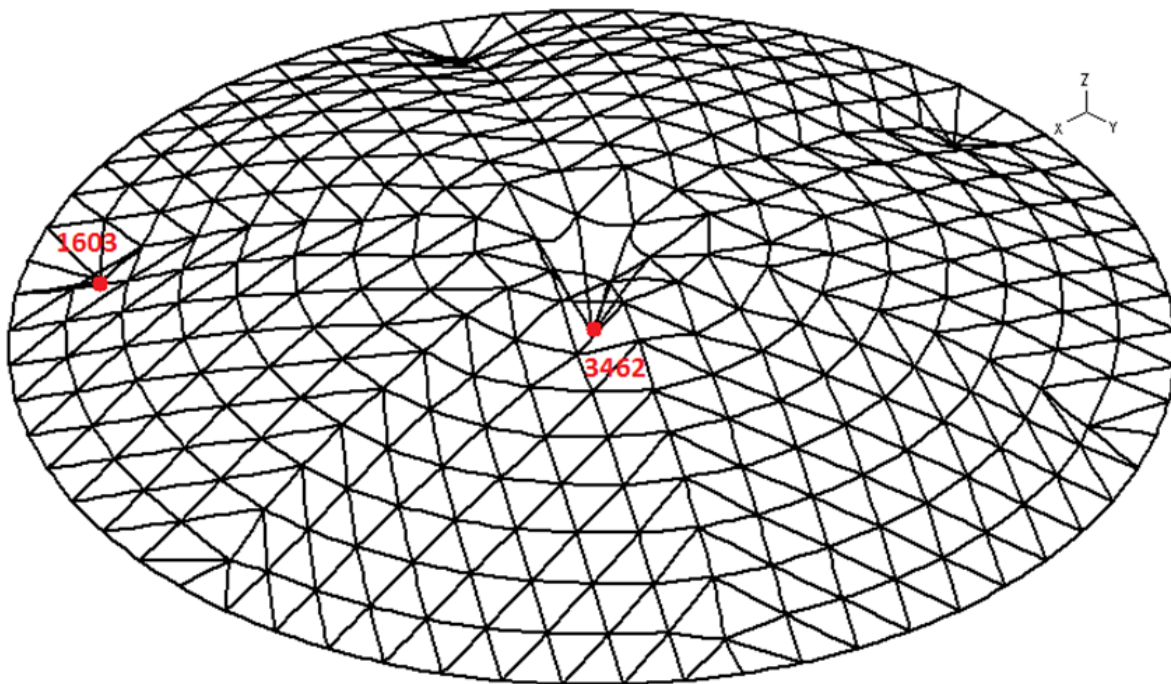
Όπως φαίνεται, η συγκεκριμένη διατομή έχει τις οχτώ πρώτες ιδιομορφές ως μορφή λυγισμού Euler σε κάποιο μέλος του σφαιρικού κελύφους (Εικόνα 5.4.α) και μετά εμφανίζονται οι άλλες μορφές αστοχίας. Η 9η ιδιομορφή (Εικόνα 5.4.β) έχει τη μορφή μηχανισμού αστοχίας του τοπικού ακαριαίου λυγισμού στην κορυφή του κελύφους. Ο μηχανισμός αστοχίας ονομάζεται και *dimple*, ο οποίος παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2.

Το φορτίο λυγισμού της 9^{ης} ιδιομορφής είναι 193.6kN, παραπλήσιο με το φορτίο λυγισμού της 1^{ης} ιδιομορφής που έχει τιμή 176.1kN. Για τις επόμενες μη γραμμικές αναλύσεις, η αρχική ατέλεια θα ορίζεται στο κεντρικό κόμβο έχοντας τη μεγαλύτερη μετατόπιση σύμφωνα με την 9^η ιδιομορφή. Το μέτρο της αρχικής ατέλειας είναι 60mm, σύμφωνα με αυτή που ορίστηκε στο κεφάλαιο 2.

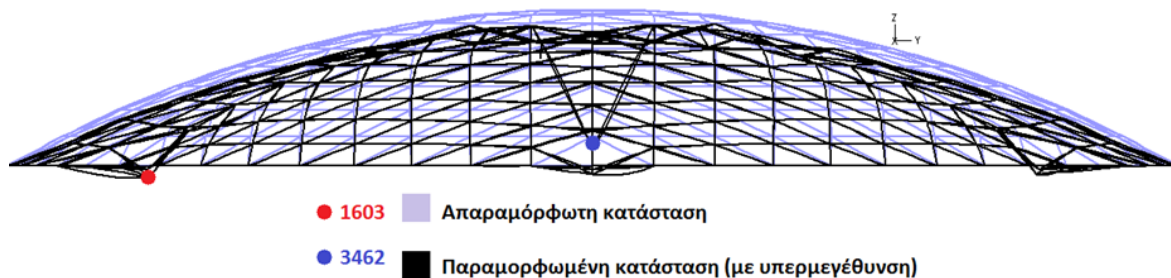
Ακολουθώντας, πραγματοποιείται η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες, προσδιορίζοντας το δρόμο ισορροπίας για το σφαιρικό κέλυφος (θεωρώντας ελαστικό υλικό), για να συγκριθεί με τον αντίστοιχο δρόμο ισορροπίας στη μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες. Με αυτό τον τρόπο, γίνεται κατανοητή η αλληλεπίδραση (εάν υπάρχει) του ακαριαίου λυγισμού με τη διαρροή του υλικού. Πραγματοποιήθηκαν και οι μη γραμμικές αναλύσεις για μεγαλύτερη από την 9^η ιδιομορφή αλλά αυτοί οι μηχανισμοί στη συνέχεια επικρατούσαν έναντι της Euler ιδιομορφής και δεν μπορούσε να υπάρξει αλληλεπίδραση μεταξύ τους.

5.3.2 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες – GNIA

Η μη γραμμική ανάλυση λυγισμού με αρχική ατέλεια 60mm στον κεντρικό κόμβο στην οριακή κατάσταση πριν την αστοχία έχει τη μορφή των Εικόνα 5.6 και Εικόνα 5.7. Όπως απεικονίζεται, όλος ο φορέας μετακινήθηκε προς τα κάτω αλλά με πολύ μικρές μετατοπίσεις και στο σημείο κοντά στο κεντρικό κόμβο δημιουργείται η τοπική ανωμαλία της γεωμετρίας (*dimple*), όπως και σε σημεία περιμετρικά κοντά στο δακτύλιο προέντασης (για παράδειγμα ο κόμβος 1603). Η μετακίνηση των κόμβων του φορέα είναι περίπου 1-2cm στο οριακό σημείο. Αντιθέτως, στο κεντρικό κόμβο, η μετακίνηση τη στιγμή της αστοχίας είναι η μέγιστη από όλους τους κόμβους και έχει τιμή 0.186m. Επίσης, μικρή αύξηση στις μετακινήσεις (σε σχέση με τους υπόλοιπους κόμβους) παρουσιάζονται και στα σημεία όπως ο κόμβος 1603, όπου η μετατόπιση αυτή έχει τιμή 0.054m.

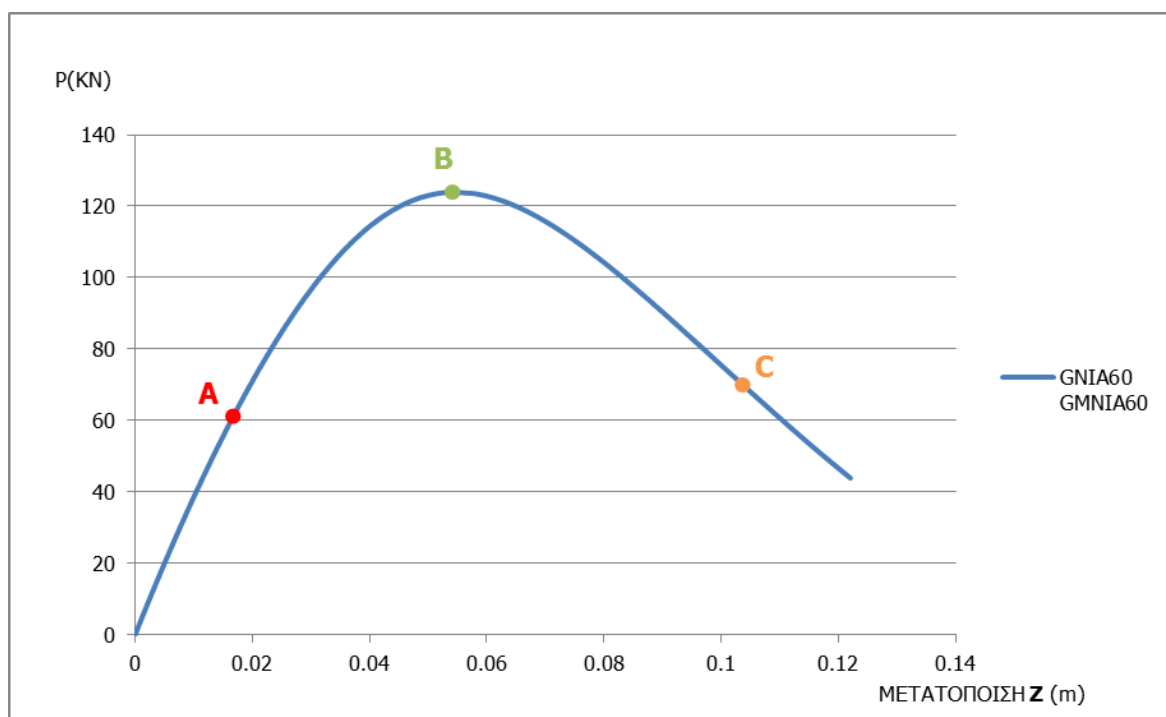


Εικόνα 5.6: Παραμορφωμένη κατάσταση του σφαιρικού κελύφους στο οριακό σημείο πριν την αστοχία



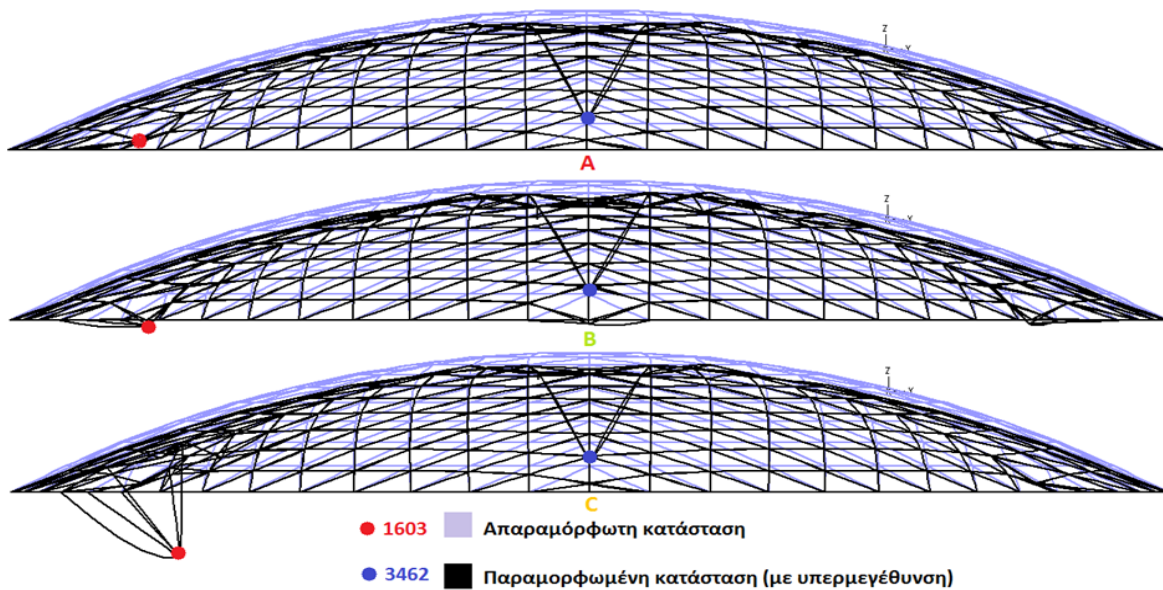
Εικόνα 5.7: Το σφαιρικό κέλυφος στο οριακό σημείο πριν την αστοχία

Ο δρόμος ισορροπίας του κόμβου 1603 παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3 και έχει μέγιστο φορτίο 123.93kN. Ο δρόμος ισορροπίας είναι από την αρχή καμπύλος και καθώς αυξάνεται το φορτίο, η δυσκαμψία μειώνεται. Η δυσκαμψία τελικά μηδενίζεται στο οριακό σημείο όπου και εκδηλώνεται ο τοπικός λυγισμός. Μετά το οριακό σημείο, η παραμόρφωση αυξάνεται έντονα για το συγκεκριμένο σημείο. Η συμπεριφορά του φορέα παρουσιάστηκε και στο κεφάλαιο 4, όπου εκεί το κέλυφος ήταν με αρθρωτές συνδέσεις. Γενικά, αυτή η συμπεριφορά στο κέλυφος παρατηρείται κυρίως με αρθρωτές συνδέσεις, όπου η δυσκαμψία του φορέα μειώνεται σημαντικά. Ο τοπικός ακαριαίος λυγισμός εκδηλώθηκε πρώτα σε αυτή την περιοχή του κόμβου 1603 πριν παρουσιαστεί ακαριαίος λυγισμός στο μέσο.



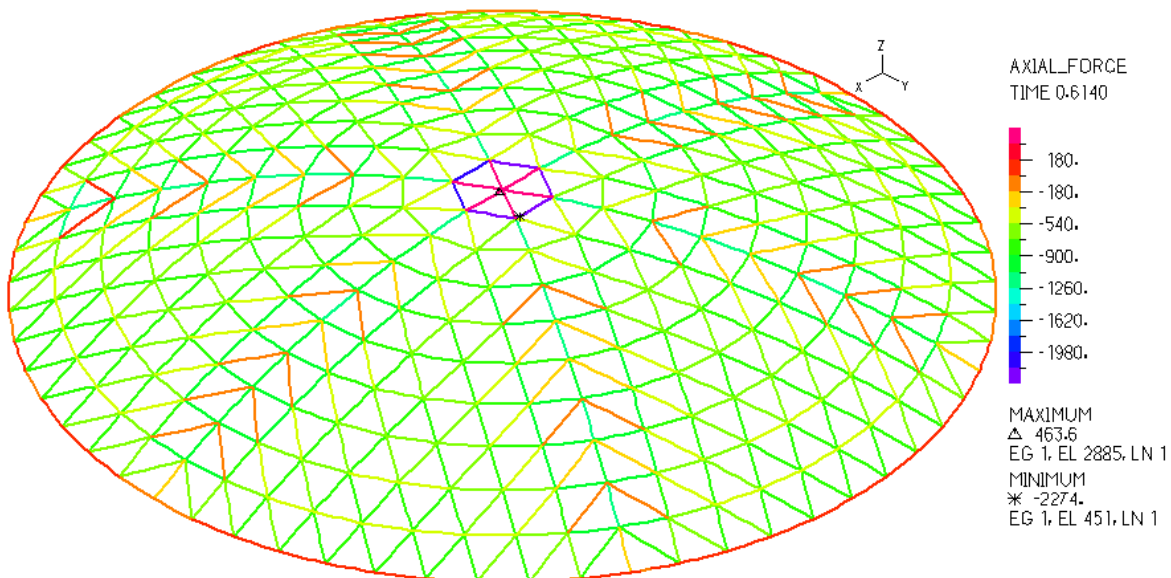
Σχήμα 5.3: Δρόμος ισορροπίας του κόμβου 1603, με κρίσιμη ιδιομορφή τον ακαριαίο λυγισμό

Η Εικόνα 5.8 προβάλλει το τρόπο με τον οποίο το σφαιρικό κέλυφος αποκρίνεται στη φόρτιση. Στο σημείο A, οι μετακινήσεις των κόμβων 1603 και 3462 είναι 0.017m και 0.111m. Καθώς το φορτίο αυξάνεται και φτάνει το οριακό σημείο, οι μετακινήσεις αυξάνονται από 0.017m σε 0.054m και από 0.111m σε 0.186m. Μετά την αστοχία (σημείο C), ο κόμβος 1603 συνεχίζει να κατεβαίνει προς τα κάτω και φτάνει την τιμή 0.104m, ενώ στο κόμβο 3462 μειώνεται η μετακίνηση με την αποφόρτιση και έχει τιμή 0.122m. Αυτό υποδηλώνει ότι ο τοπικός ακαριαίος λυγισμός παρουσιάζεται στην περιοχή του κόμβου 1603. Την ίδια συμπεριφορά με το κόμβο 1603 έχουν οι αντίστοιχοι περιμετρικοί κόμβοι με τη μόνη διαφορά ότι δεν προλαβαίνουν να αστοχήσουν.



Εικόνα 5.8: Ο φορέας στις αντίστοιχες χρονικές περιπτώσεις του δρόμου ισορροπίας του κόμβου 1603

Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.9, η αξονική θλιπτική δύναμη στα μέλη είναι κυρίως κάτω από 1200kN, εκτός βέβαια από το κεντρικό εξάγωνο της κορυφής, όπου παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές. Συγκεκριμένα, σε αυτά τα σημεία οι θλιπτικές δυνάμεις είναι κυρίως πάνω από 2000kN. Η μέγιστη τιμή είναι 2274kN στο σημείο, όπου στις επόμενες αναλύσεις θα παρουσιαστεί ο Euler λυγισμός. Σε αυτό το μέλος, η αξονική φόρτιση είναι αρκετά μεγάλη και πλησιάζει το κρίσιμο φορτίο λυγισμού του μέλους, αλλά τελικά δεν εκδηλώνεται εξαιτίας του ακαριαίου λυγισμού που προηγείται. Γενικά, στο φορέα επικρατούν θλιπτικές δυνάμεις με κατ' εξαίρεση το κυκλικό δακτύλιο προέντασης με τα 6 μέλη της κορυφής του κελύφους, τα οποία εφελκύνονται.



Εικόνα 5.9: Αξονική φόρτιση του φορέα στο οριακό σημείο πριν την αστοχία, με κρίσιμη τη καθολική ιδιομορφή. Ακολούθως, χρησιμοποιώντας και τη μη γραμμικότητα του υλικού, θα παρουσιαστεί κατά πόσο υπάρχει αλληλεπίδραση του τοπικού ακαριαίου λυγισμού με τη διαρροή του υλικού. Αυτό απεικονίζεται πλήρως στη μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες.

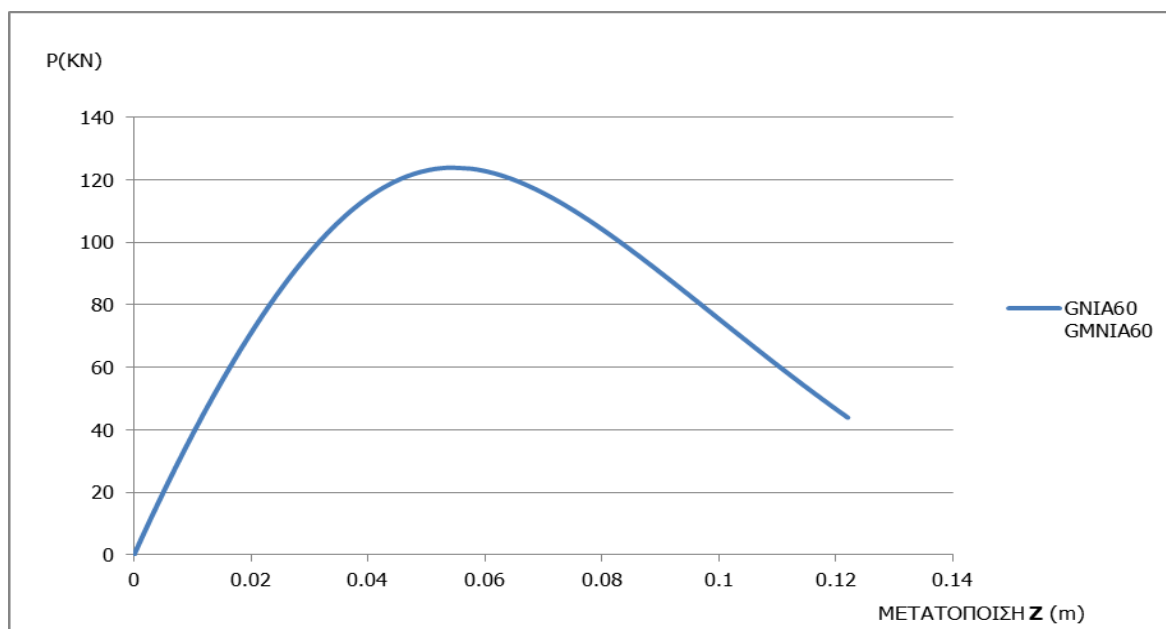
5.3.3 Μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες – GMNIA

Ο χάλυβας για το συγκεκριμένο σφαιρικό κέλυφος έχει όριο διαρροής 235000kPa. Έτσι, αν το υλικό φτάσει σε αυτές τις τάσεις, πλαστικοποιείται, και λόγω των αρθρωτών συνδέσεων θα αστοχήσει αφού δημιουργείται μηχανισμός. Με την ολοκλήρωση της μη γραμμικής ανάλυσης λυγισμού με το γραμμικά ελαστικό-απολύτως πλαστικό υλικό (όπως είναι ο χάλυβας σε αυτή την περίπτωση), δεν παρατηρείται καμία αλλαγή στη συμπεριφορά του φορέα. Όπως εξήγαγε τα αποτελέσματα η προηγούμενη ανάλυση, είναι τα ίδια και σε αυτή την περίπτωση.

Καμία διαφορά δεν υπήρξε στο φορέα όσον αφορά τις μετακινήσεις, την αντοχή και την αξονική φόρτιση. Το σφαιρικό κέλυφος έχει μέγιστο φορτίο αντοχής το 123.93kN, όπως και στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες. Αυτό είχε γίνει ξανά και στο κεφάλαιο 4, όπου έγινε η αλλαγή από άκαμπτες σε αρθρωτές συνδέσεις, έχοντας όμως διαφορετική διατομή. Το υλικό δεν επηρέασε καθόλου την απόκριση του φορέα και δε συνέβαλε καθόλου στη μείωση της αντοχής για το σφαιρικό κέλυφος.

5.3.4 Αλληλεπίδραση των μηχανισμών αστοχίας

Ο μηχανισμός αστοχίας που εκδηλώθηκε στην εν λόγω περίπτωση με κρίσιμη τη καθολική ιδιομορφή είναι ο τοπικός ακαριαίος λυγισμός (στην περιοχή του κόμβου 1603). Μετά την εκτέλεση της μη γραμμικής ανάλυσης υλικού γεωμετρίας με ατέλειες, δεν προέκυψε κάποιος άλλος μηχανισμός (διαρροή υλικού). Έτσι, σε αυτή την περίπτωση δεν παρατηρείται αλληλεπίδραση διαφορετικών μορφών αστοχίας. Στο σφαιρικό κέλυφος με κρίσιμη ιδιομορφή τον ακαριαίο τοπικό λυγισμό έχει μορφή αστοχίας μέσω οριακού σημείου (Σχήμα 5.4). Στη μορφή αστοχίας, ο δρόμος ισορροπίας είναι από την αρχή καμπύλος και συνεπώς συνεχώς μειούμενη δυσκαμψία, όπου τελικά μηδενίζεται στο οριακό σημείο ($P_0=123.93\text{kN}$) πριν εκδηλωθεί η μη γραμμικότητα υλικού. Η συγκεκριμένη μορφή αστοχίας χαρακτηρίζει φορείς με μικρή δυσκαμψία, για παράδειγμα θόλους με μικρό λόγο ύψους προς άνοιγμα και με μικρή γωνία θ_0 . Στο σφαιρικό κέλυφος ο λόγος αυτός είναι $H/L=13.4/100=0.134$ και η γωνία $\theta_0=1.5^\circ$.



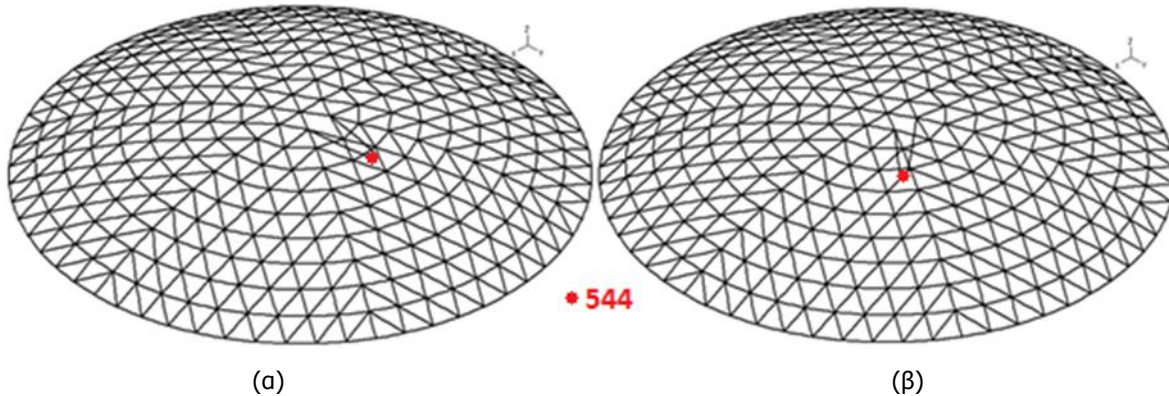
Σχήμα 5.4: Δρόμος ισορροπίας του κόμβου 1603, με κρίσιμη ιδιομορφή τον ακαριαίο λυγισμό

Καθώς ολοκληρώθηκε η περίπτωση με κρίσιμη ιδιομορφή τον ακαριαίο λυγισμό, ακολουθούν οι αναλύσεις με κρίσιμη την Euler ιδιομορφή σε ένα μέλος του κελύφους. Με την ολοκλήρωση των αναλύσεων θα διαπιστωθεί εάν σε αυτή την περίπτωση, εκτός από αστοχία λόγω Euler, παρουσιάζεται και αλληλεπίδραση των μηχανισμών αστοχίας.

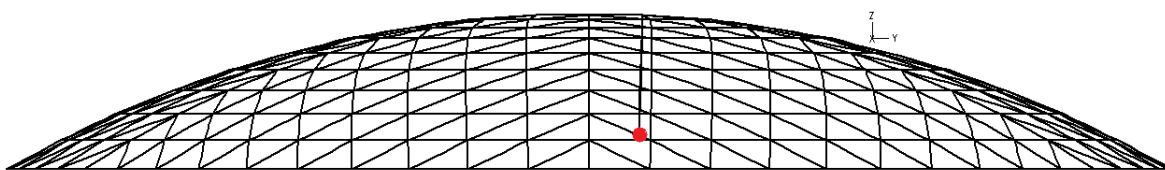
5.4 ΚΡΙΣΙΜΗ EULER ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ ΜΕΛΟΥΣ

5.4.1 Γραμμική ανάλυση λυγισμού – LBA

Ως κρίσιμη ιδιομορφή για την πραγματοποίηση των μη γραμμικών αναλύσεων, επιλέχθηκε η 2^η ιδιομορφή. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 5.10, η 1^η και η 2^η ιδιομορφή απεικονίζουν λυγισμό Euler στο ίδιο μέλος του κελύφους με διαφορετική φορά λυγισμού. Το εξωτερικό φορτίο και για τις δύο ιδιομορφές είναι 176.1kN. Τελικά επιλέχθηκε η 2^η ιδιομορφή, γιατί ο λυγισμός είναι κατά τον άξονα Z (Εικόνα 5.11) και έτσι δίνεται αρχική ατέλεια στο συγκεκριμένο μέλος με την ίδια φορά, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση για κρίσιμη την ιδιομορφή με ακαριαίο τοπικό λυγισμό.



Εικόνα 5.10: Ιδιομορφές λυγισμού του σφαιρικού κελύφους (α) 1^η ιδιομορφή (β) 2^η ιδιομορφή



■ Απαραμόρφωτη κατάσταση
 ■ Παραμορφωμένη κατάσταση (με υπερμεγέθυνση)

Εικόνα 5.11: 2^η ιδιομορφή λυγισμού του κελύφους

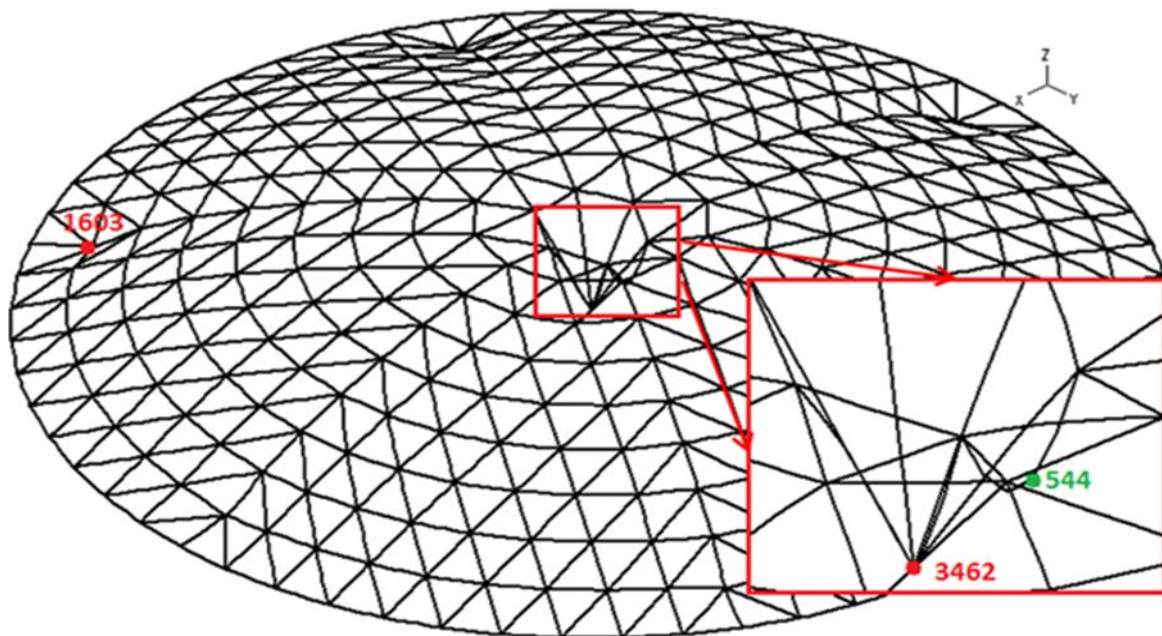
Σε αυτή την περίπτωση, το μέτρο της αρχικής ατέλειας αλλάζει σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Το μέτρο ορίζεται ως $l_0/500=5.236/500\approx 0.010\text{m}$. Η αρχική ατέλεια είναι σύμφωνα με την 2^η ιδιομορφή και έχει μέτρο 10mm, με φορά τα αρνητικά του άξονα Z. Με την ολοκλήρωση της γραμμική ανάλυσης, ακολουθεί η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας για να προσδιορίσει το μηχανισμό αστοχίας, με το υλικό να θεωρείται γραμμικό.

5.4.2 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες – GNIA

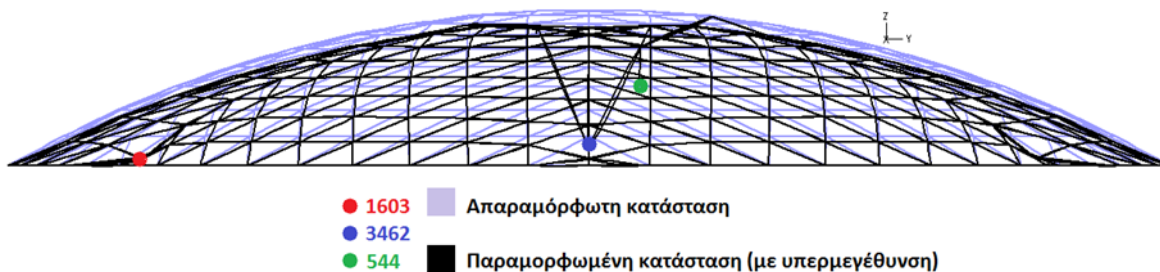
Η αρχική ατέλεια ορίστηκε ως 10mm και είναι σε ένα μέλος πάνω στο κεντρικό εξάγωνο, στο σημείο 544. Για την ενεργοποίηση της ανάλυσης στο πρόγραμμα ADINA ορίστηκε αρχική διέγερση σε κόμβο κοντά στο σημείο 544 και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά είναι τα ίδια που ίσχυαν και στις προηγούμενες αναλύσεις.

Στο τέλος της ανάλυσης, ο φορέας στο οριακό σημείο πριν την αστοχία έχει την μορφή που απεικονίζεται στις Εικόνα 5.12 και Εικόνα 5.13. Όπως φαίνεται, όλος ο φορέας μετακινήθηκε προς τα κάτω και στο σημείο κοντά στο κεντρικό κόμβο, όπως και περιμετρικά, δημιουργείται η τοπική ανωμαλία της γεωμετρίας (dimple). Η μετακίνηση των κόμβων του φορέα είναι περίπου 1-2cm στο οριακό σημείο. Αντιθέτως, στο κεντρικό κόμβο, η μετακίνηση τη στιγμή της αστοχίας είναι η μέγιστη από όλους τους κόμβους και έχει τιμή 0.230m.

Το σημείο 544 όπου τέθηκε η αρχική ατέλεια έχει βύθιση 0.122m, ενώ οι κόμβοι που στηρίζεται το μέλος που ανήκει στο σημείο 544, έχουν μετακίνηση 0.060m. Η διαφορά αυτή υποδηλώνει ότι το μέλος έχει λυγίσει. Ο λυγισμός Euler μέλους επιβεβαιώνεται στη συνέχεια από τις θλιπτικές δυνάμεις του μέλους αυτού, αφού η αξονική φόρτιση είναι αρκετά κοντά στο κρίσιμο φορτίο Euler για τη συγκεκριμένη διατομή.



Εικόνα 5.12: Παραμορφωμένη κατάσταση του σφαιρικού κελύφους στο οριακό σημείο πριν την αστοχία

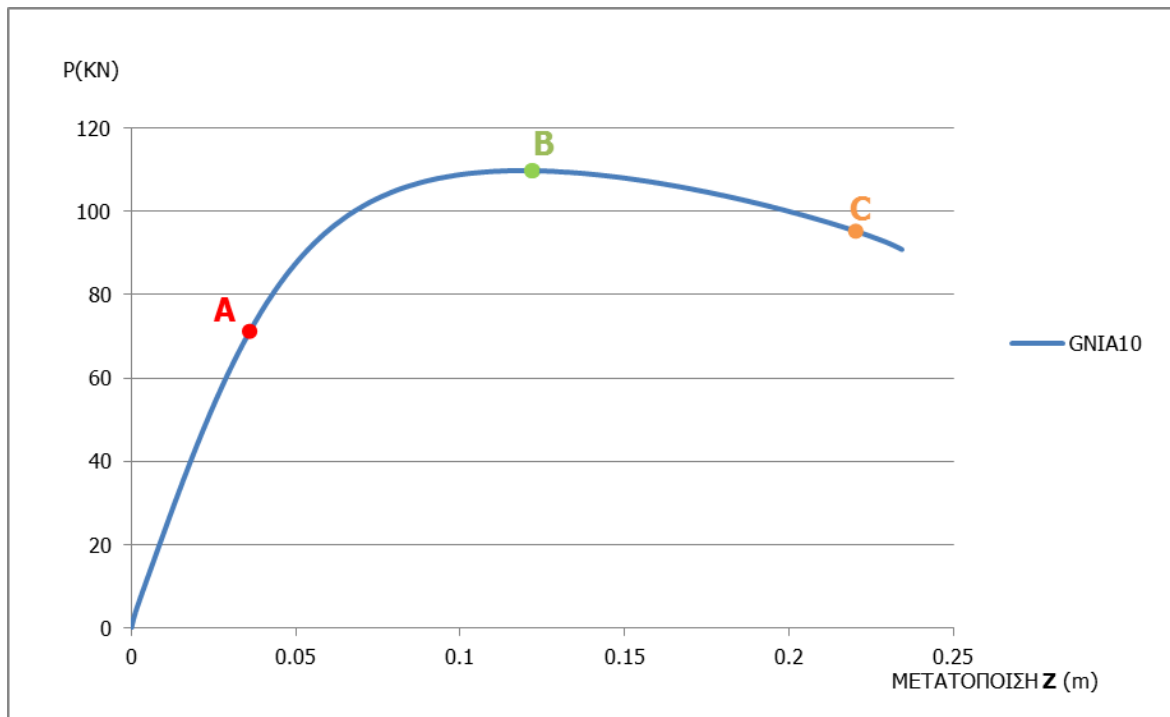


Εικόνα 5.13: Το σφαιρικό κέλυφος στο οριακό σημείο πριν την αστοχία

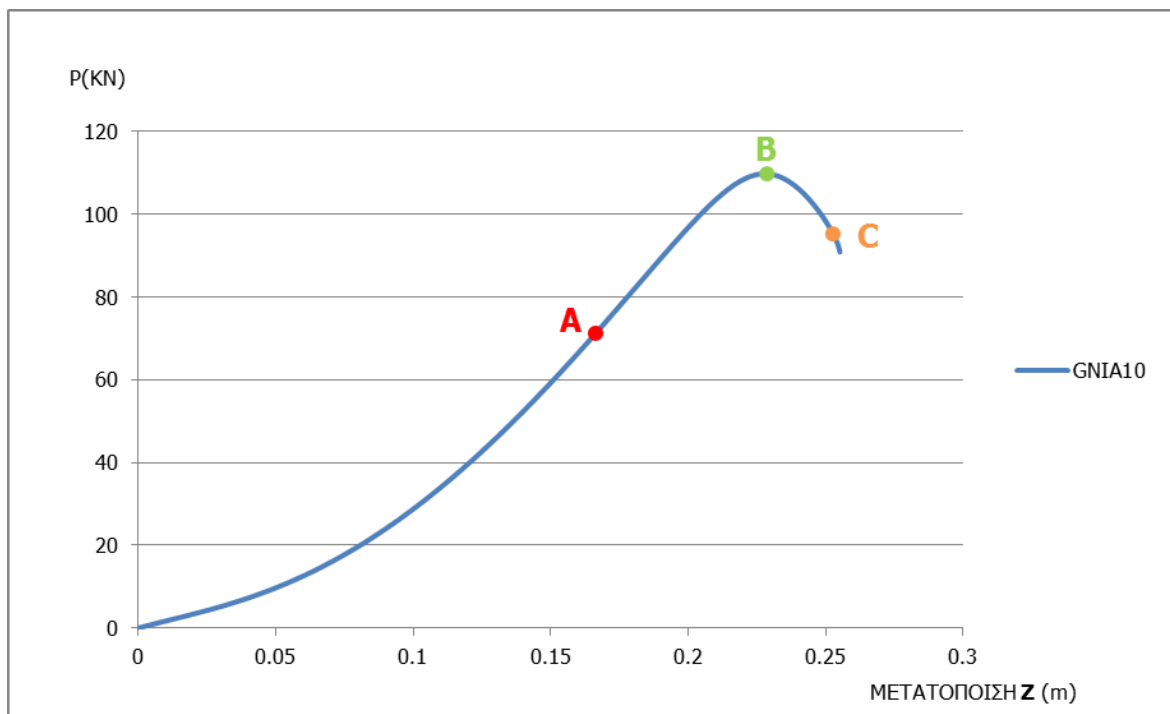
Ο δρόμος ισορροπίας του σημείου 544, όπου δόθηκε η αρχική ατέλεια, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.5. Το μέγιστο φορτίο αντοχής (σημείο Β) έχει τιμή 109.77kN, αρκετά μικρότερη από την περίπτωση με κρίσιμη τη καθολική ιδιομορφή, προδίδοντας ότι ο μηχανισμός αστοχίας οφείλεται λόγο λυγισμού του μέλους. Ο δρόμος ισορροπίας για φορτία μικρότερα από 60kN απεικονίζονται με μικρή καμπυλότητα. Για φορτία μεγαλύτερα από 100kN, η καμπυλότητα είναι αρκετά έντονη, υποδηλώνοντας ότι η δυσκαμψία έχει σχεδόν μηδενιστεί, με αποτέλεσμα να παρατηρείται υπερβολική αύξηση της μετακίνησης σε σχέση με το φορτίο. Έτσι, στο σημείο Β, το μέλος έχει λυγίσει, με το φορέα να αστοχεί. Μετά το οριακό σημείο, καθώς το μέλος έχει λυγίσει λόγω Euler, η παραμόρφωση για το συγκεκριμένο σημείο αυξάνεται έντονα.

Στο κεντρικό κόμβο (3462), η συμπεριφορά είναι διαφορετική όπως δείχνει και το Σχήμα 5.6. Την ίδια συμπεριφορά με αυτή έχουν και τα σημεία στο εσωτερικό του κεντρικού εξάγωνου της κορυφής, όπου παρουσιάζεται το εξόγκωμα (dimple). Παρατηρείται μία μειωμένη δυσκαμψία της περιοχής εκεί και αυτό οφείλεται στ' ότι η αρχική ατέλεια που δόθηκε είναι σε μέλος του εξάγωνου. Το μέλος είναι από την αρχή λυγισμένο και έτσι η περιοχή της κορυφής αναπτύσσει υπερβολικές παραμορφώσεις. Όταν

φτάσει η φόρτιση στο οριακό σημείο, το μέλος έχει λυγίσει τελείως, και δεν μπορεί να παραλάβει μεγαλύτερη δύναμη. Εν συνεχεία, το τοπικό εξόγκωμα της κορυφής παρουσιάζει και αυτό τον τοπικό ακαριαίο λυγισμό.



Σχήμα 5.5: Δρόμος ισορροπίας του σημείου 544, με κρίσιμη Euler ιδιομορφή



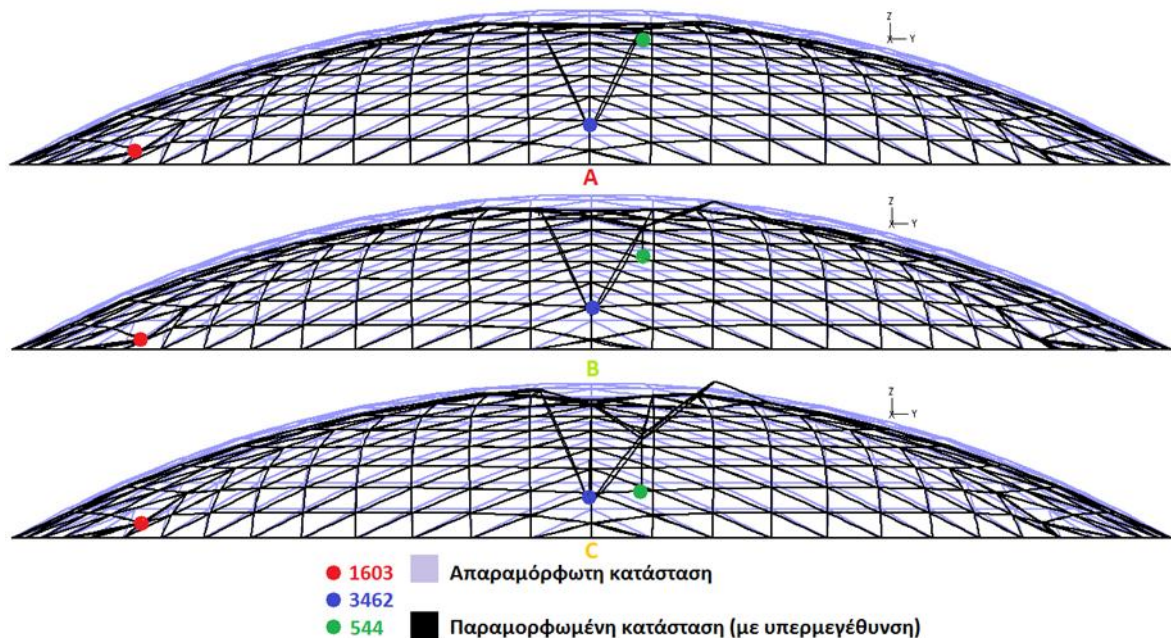
Σχήμα 5.6: Δρόμος ισορροπίας του κόμβου 3462, με κρίσιμη Euler ιδιομορφή

Η Εικόνα 5.14 προβάλλει το τρόπο με τον οποίο το σφαιρικό κέλυφος αποκρίνεται στη φόρτιση και στις τρεις περιπτώσεις, σύμφωνα με τους δρόμους ισορροπίας του σημείου 544 και του κόμβου 3462. Όταν το φορτίο είναι 71.23kN (σημείο A), το σφαιρικό κέλυφος μετακινείται όλο προς τα κάτω με

πολύ μικρές μετατοπίσεις. Σε αυτό το σημείο, ο κεντρικός κόμβος έχει μετατόπιση 0.166m. Ο κόμβος 1603 που εκδηλώθηκε ο τοπικός λυγισμός, στην περίπτωση με κρίσιμη την καθολική ιδιομορφή, έχει μετατόπιση 0.021. Αντιθέτως, στο σημείο 544, η μετατόπιση είναι 0.27, όπου είναι και η μέγιστη.

Στο οριακό σημείο B, οι μετατοπίσεις σε όλα τα σημεία αυξάνονται. Συγκεκριμένα, για το κεντρικό κόμβο 3462, γίνεται 0.229m, για το σημείο 544 γίνεται 0.440m, και για το κόμβο 1603 αυξάνεται σε 0.021m. Μετά την αστοχία, στο σημείο C με εξωτερικό φορτίο 95.24kN, όλος ο φορέας κινείται προς τα πάνω, πλησιάζοντας την αρχική απαραμόρφωτη κατάσταση, εκτός από τους κόμβους 3462 και 544. Στο κόμβο 3462, η μετατόπιση αυξάνεται ελάχιστα σε 0.252m, ενώ στο σημείο 544 αυξάνεται αρκετά και φτάνει τη τιμή 0.586m.

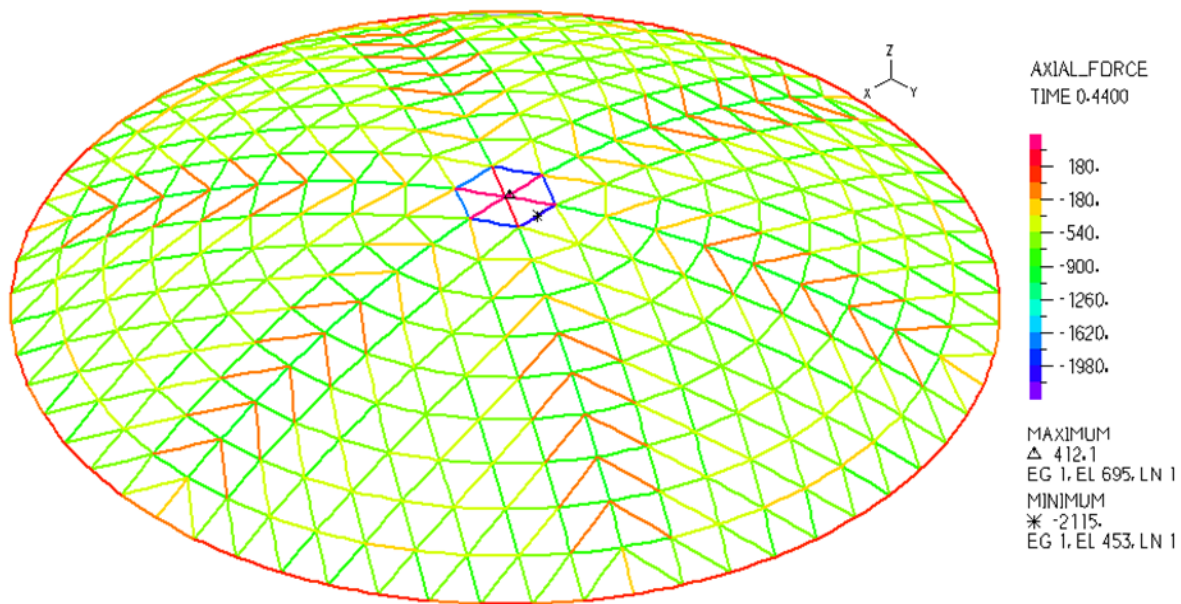
Ο κόμβος 3462 δεν αρχίζει να μετακινείται προς την αρχική απαραμόρφωτη κατάσταση μετά την αστοχία και αυτό οφείλεται στην αλληλεπίδραση του λυγισμού Euler με τον τοπικό ακαριαίο λυγισμό. Εξαιτίας ότι ο λυγισμός Euler παρουσιάστηκε στο μέλος πάνω στο κεντρικό εξάγωνο όπου είναι η βάση της τοπικής βύθισης dimple, επηρεάζει την περιοχή εκεί και εκδηλώνεται ταυτόχρονα τοπικός ακαριαίος λυγισμός.



Εικόνα 5.14: Ο φορέας στις αντίστοιχες χρονικές περιπτώσεις των δρόμων ισορροπίας

Ο λυγισμός Euler στο μέλος όπου ορίστηκε η αρχική ατέλεια επιβεβαιώνεται στην Εικόνα 5.15. Σε αυτό το μέλος, η αξονική θλιπτική δύναμη είναι 2115kN, όπου είναι και η μεγαλύτερη σε όλο το σφαιρικό κέλυφος, ενώ το κρίσιμο φορτίο λυγισμού του μέλους είναι 2300kN. Η συγκεκριμένη διαφορά οφείλεται ίσως στην αρχική ατέλεια που δόθηκε κατά μήκος της ράβδου. Με αυτό τον τρόπο, το μέλος είναι ήδη λυγισμένο και έτσι το φορτίο λυγισμού του μέλους μειώνεται.

Ένας άλλος πιθανώς λόγος που επηρεάζει το φορτίο λυγισμού είναι ο τρόπος που η ράβδος είναι συνδεδεμένη, καθώς οι κόμβοι μπορούν να κινηθούν, τα άκρα της ράβδου είναι μεταθετά. Έτσι, αυτή η μεταθετότητα επηρεάζει και το φορτίο λυγισμού του μέλους. Γενικά, στο φορέα επικρατούν θλιπτικές δυνάμεις, με το κεντρικό εξάγωνο της κορυφής να παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές όπου αποτελεί και τη βάση του τοπικού εξογκώματος. Εξαιρεση είναι ο κυκλικός δακτύλιος προέντασης και τα 6 μέλη της κορυφής του κελύφους, τα οποία εφελκύνονται.



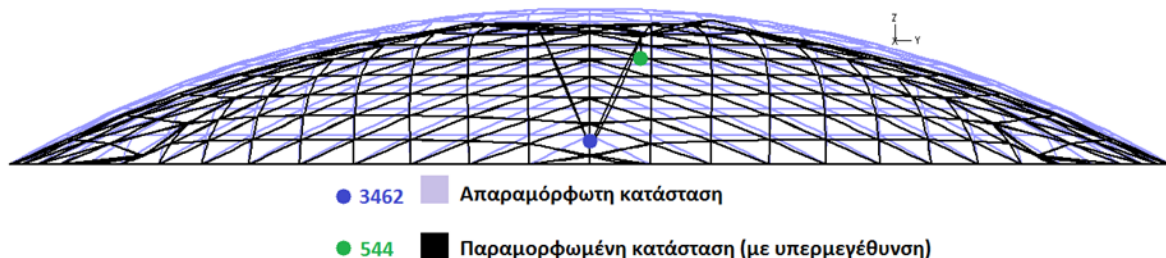
Εικόνα 5.15: Αξονική φόρτιση του φορέα στο οριακό σημείο πριν την αστοχία με κρίσιμη την Euler ιδιομορφή

Στη συνέχεια, υλοποιείται η γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες για να διαπιστωθεί η επιρροή της ποιότητας του χάλυβα με κρίσιμη την Euler ιδιομορφή μεμονωμένου μέλους του σφαιρικού κελύφους.

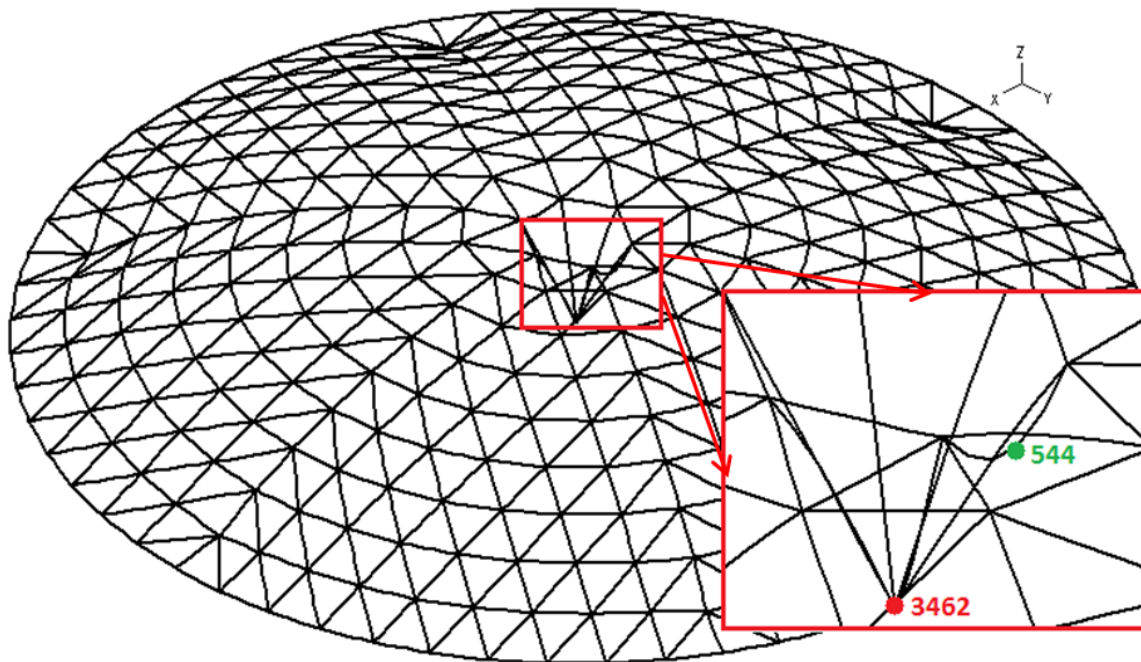
5.4.3 Μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες – GMNIA

Για την υλοποίηση της μη γραμμικής ανάλυσης υλικού γεωμετρίας με ατέλειες ορίζεται και το όριο διαρροής του χάλυβα ως 235000kPa. Με την ολοκλήρωση της ανάλυσης, ο φορέας στο οριακό σημείο πριν την αστοχία έχει την μορφή που απεικονίζεται στις Εικόνα 5.16 και Εικόνα 5.17. Η συμπεριφορά του φορέα είναι ίδια με την προηγούμενη μορφή ανάλυσης. Όπως φαίνεται, όλος ο φορέας μετακινήθηκε ελαφρώς προς τα κάτω. Στο σημείο κοντά στο κεντρικό κόμβο δημιουργείται η τοπική ανωμαλία της γεωμετρίας (dimple). Η μετακίνηση των κόμβων του φορέα είναι μικρότερη σε όλα τα σημεία σε σχέση με τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες.

Στο μέλος όπου δόθηκε η αρχική ατέλεια, η απομάκρυνση του σημείου 544 από τα άκρα όπου είναι συνδεδεμένο, υπάρχει διαφορά 0.030m. Στην προηγούμενη ανάλυση, η διαφορά ήταν διπλάσια, με αποτέλεσμα το μέλος να λυγίσει λόγω Euler. Άρα σε αυτή την ανάλυση, η αστοχία δεν οφείλεται κυρίως από λυγισμό Euler του μέλους αυτού.

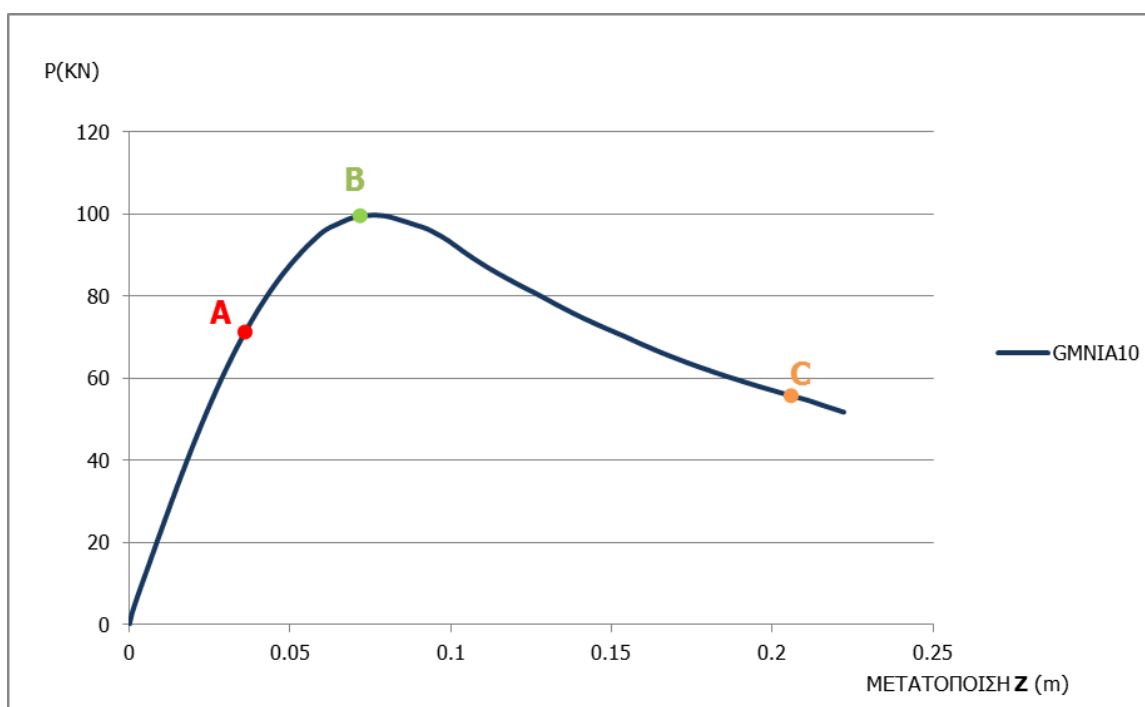


Εικόνα 5.16: Το σφαιρικό κέλυφος στο οριακό σημείο πριν την αστοχία



Εικόνα 5.17: Παραμορφωμένη κατάσταση του σφαιρικού κελύφους στο οριακό σημείο πριν την αστοχία

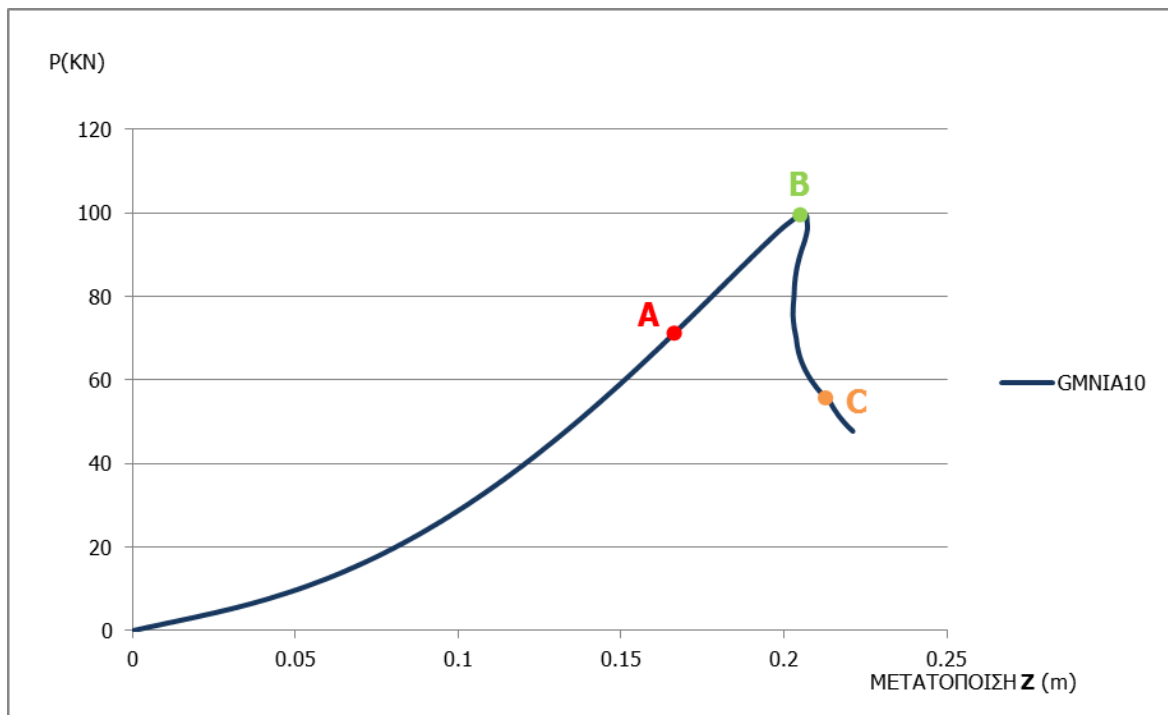
Σύμφωνα με το δρόμο ισορροπίας του σημείου 544 (Σχήμα 5.7), το μέγιστο φορτίο έχει τιμή 99.54kN, σαφώς μικρότερη από τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες. Η μείωση του φορτίου αντοχής ξεκαθαρίζει ότι η αστοχία οφείλεται λόγω διαρροής του υλικού. Ο δρόμος ισορροπίας παρουσιάζει έντονη μη γραμμική συμπεριφορά κοντά στο οριακό σημείο και για φορτία μεγαλύτερα από 70kN. Η διαφορά μεταξύ των δύο μορφών αναλύσεων είναι η απότομη αλλαγή στη συμπεριφορά του φορέα, όπου στην προηγούμενη περίπτωση η καμπυλότητα του δρόμου ισορροπίας αυξάνεται ομαλά καθώς πλησιάζει το οριακό σημείο. Σε αυτή την ανάλυση παρατηρείται έντονη αύξηση της καμπυλότητας κοντά στο οριακό σημείο. Μετά το οριακό σημείο και καθώς το κέλυφος έχει αστοχήσει, η παραμόρφωση του φορέα αυξάνεται αναλογικά και όχι πολύ έντονα.



Σχήμα 5.7: Δρόμος ισορροπίας του σημείου 544, με κρίσιμη Euler ιδιομορφή

Ο δρόμος ισορροπίας του κόμβου 3462 φαίνεται στο Σχήμα 5.8. Όπως και στην προηγούμενη ανάλυση με ελαστικό υλικό, η δυσκαμψία του κόμβου είναι μειωμένη στα αρχικά στάδια, αλλά με την αύξηση του φορτίου πάνω 50kN φαίνεται ότι αυξάνεται και η συμπεριφορά του γίνεται περίπου γραμμική. Η αστοχία σε αυτή την περίπτωση είναι πολύ διαφορετική γιατί γίνεται ακαριαία μέσα στον ανοδικό κλάδο.

Η αστοχία μπορεί να χαρακτηριστεί ότι γίνεται μέσω σημείου διακλάδωσης (λόγο απότομης αστοχίας), όπου το σημείο αυτό ορίζεται και ασταθές, γιατί μετά από αυτό το σημείο ο δρόμος ισορροπίας έχει καθοδικό κλάδο, όπου σε αυτή την περίπτωση το ασταθές σημείο είναι το B. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στη διαρροή του υλικού και τη δημιουργία πλαστικής άρθρωσης στο σημείο 544. Μετά τη διαρροή, η τοπική παραμόρφωση της κορυφής δεν παρουσιάζει κάποια σημαντική αλλαγή, αφού καθώς γίνεται η αποφόρτιση, η παραμόρφωση παραμένει η ίδια με λίγη απόκλιση από τη στιγμή της αστοχίας. Ο τοπικός ακαριαίος λυγισμός δεν εκδηλώνεται ταυτόχρονα σε αυτή την ανάλυση, αλλά παρατηρείται πρώτα παραμένονσα παραμόρφωση στο φορέα (μέχρι το C) και στην συνέχεια εκδηλώνεται ο ακαριαίος λυγισμός.



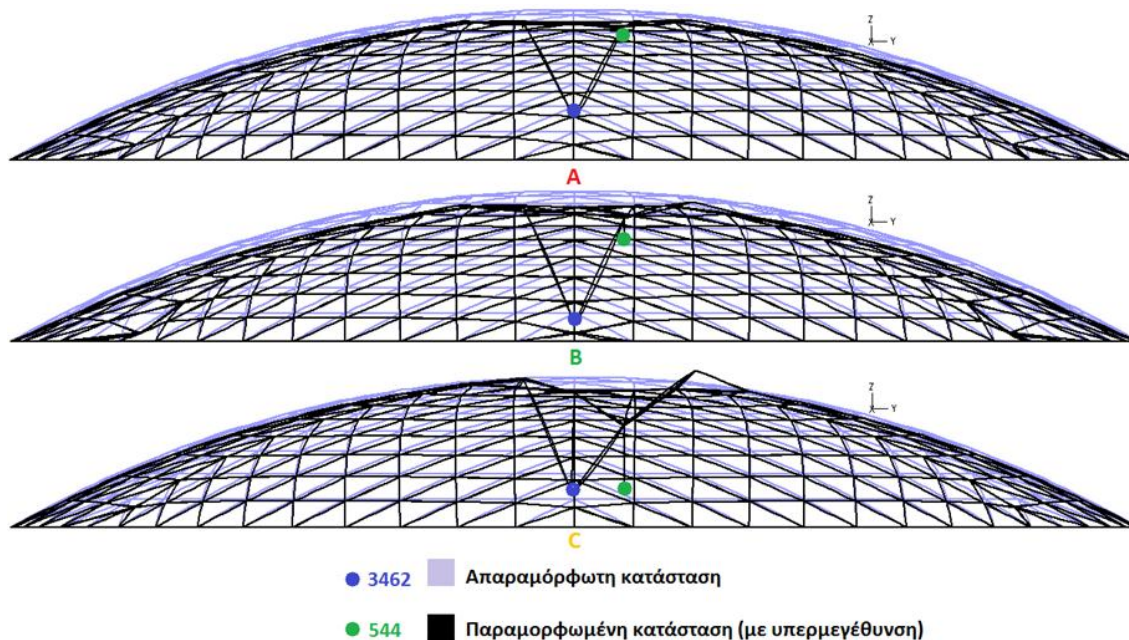
Σχήμα 5.8: Δρόμος ισορροπίας του κόμβου 3462, με κρίσιμη Euler ιδιομορφή

Στην Εικόνα 5.18 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο εκδηλώνονται οι μετακινήσεις του φορέα στη φόρτιση. Στο σημείο A, καθώς το φορτίο είναι 71.23kN, οι μετατοπίσεις είναι πολύ μικρές σε όλο το φορέα, εκτός βέβαια από το κεντρικό κόμβο που έχει τιμή 0.166m. Αφού αυξηθεί το φορτίο και φτάσει το οριακό σημείο, όλες οι μετακινήσεις αυξάνονται πιο έντονα. Το σημείο 544 όπου από 0.036m για φορτίο 71.23kN γίνεται 0.072m και στο κεντρικό κόμβο αυξάνεται σε 0.205m από 0.166m.

Μετά την αστοχία στο σημείο C με εξωτερικό φορτίο 95.24kN, όλος ο φορέας κινείται προς τα πάνω, πλησιάζοντας την αρχική απαραμόρφωτη κατάσταση, εκτός από τους κόμβους 3462 και 544. Στο κόμβο 3462, η μετατόπιση αυξάνεται ελάχιστα σε 0.213m, ενώ το σημείο 544 αυξάνεται αρκετά και φτάνει την τιμή 0.206m. Οι μετακινήσεις που παρατηρούνται είναι μικρότερες από όταν το υλικό ήταν ελαστικό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο φορέας αστοχεί γρηγορότερα σε μικρότερα φορτία και δεν μπορούν να εκδηλωθούν πλήρως οι μετακινήσεις.

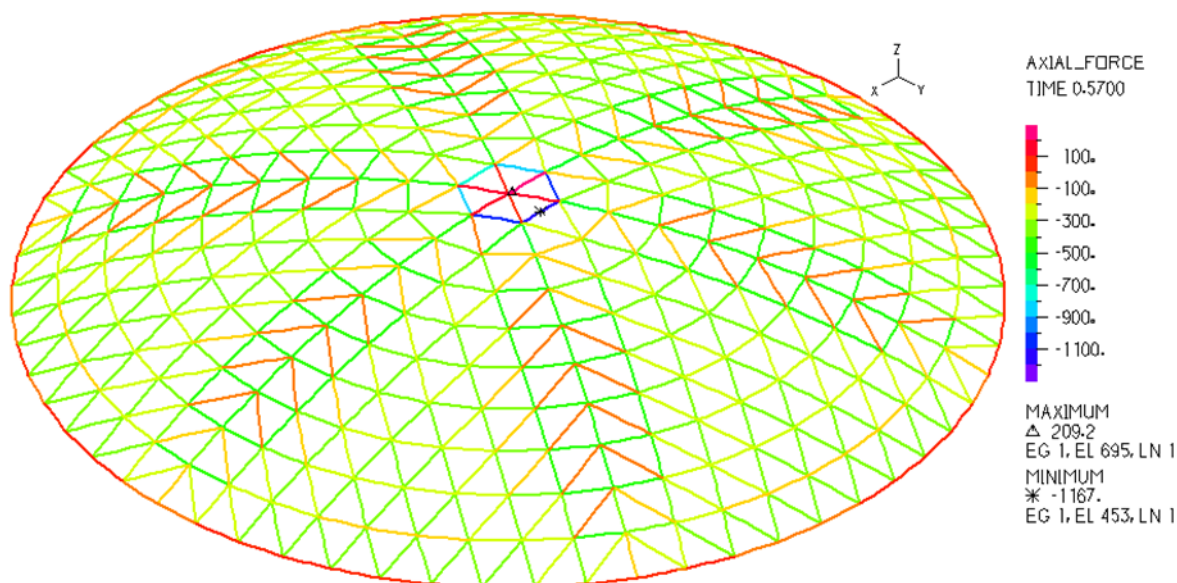
Εξαιτίας ότι οι μετακινήσεις είναι μικρότερες από πριν, όπως και το φορτίο, μπορεί να ειπωθεί με βεβαιότητα ότι η αστοχία προήλθε από το υλικό. Αφού ο φορέας έχει στο σημείο A τις ίδιες

μετακινήσεις με τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, στην περιοχή του δρόμου ισορροπίας πριν εκδηλωθεί η σημαντική μείωση της δυσκαμψίας και η έντονη παραμόρφωση (καμπυλότητα). Αυτό απεικονίζεται και στη συνέχεια, όπου θα συγκριθούν και οι δύο δρόμοι ισορροπίας από τις δύο μορφές αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν.



Εικόνα 5.18: Ο φορέας στις αντίστοιχες χρονικές περιπτώσεις των δρόμων ισορροπίας

Στο μέλος όπου οριστική η αρχική ατέλεια, ο μηχανισμός αστοχίας είναι διαρροή του υλικού και όχι λυγισμού Euler, αυτό επιβεβαιώνει στην Εικόνα 5.19. Σε αυτό το μέλος, η θλιπτική αξονική δύναμη έχει τιμή 1167kN, αρκετά μικρότερη από το κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Η διαφορά είναι πολύ μεγάλη και εξαιτίας αυτού, δεν υπάρχει πιθανότητα το μέλος να λυγίσει λόγω Euler. Γενικότερα, στο φορέα επικρατούν μικρότερες θλιπτικές δυνάμεις σε σχέση με τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στ' ότι ο φορέας αστοχεί σε μικρότερα φορτία λόγω διαρροής. Καμία άλλη αλλαγή δεν παρουσιάζει η κατανομή των δυνάμεων στο σφαιρικό κέλυφος σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις.



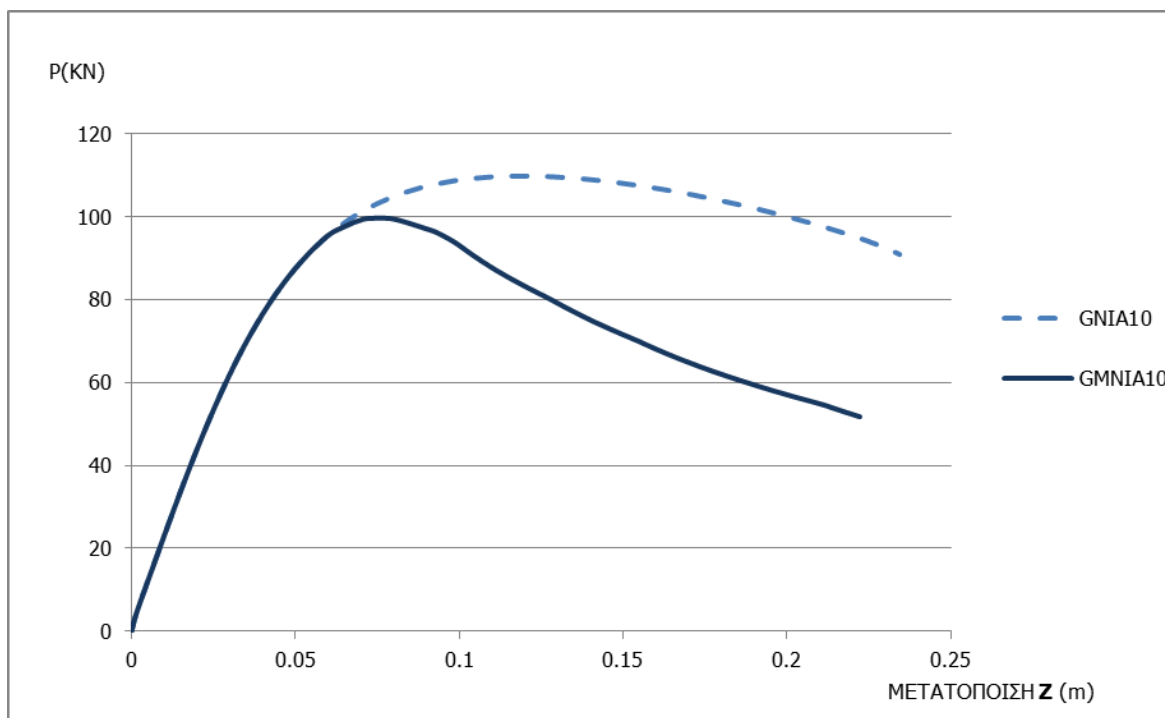
Εικόνα 5.19: Αξονική φόρτιση του φορέα στο οριακό σημείο πριν την αστοχία με κρίσιμη την Euler ιδιομορφή

5.4.4 Αλληλεπίδραση των μηχανισμών αστοχίας

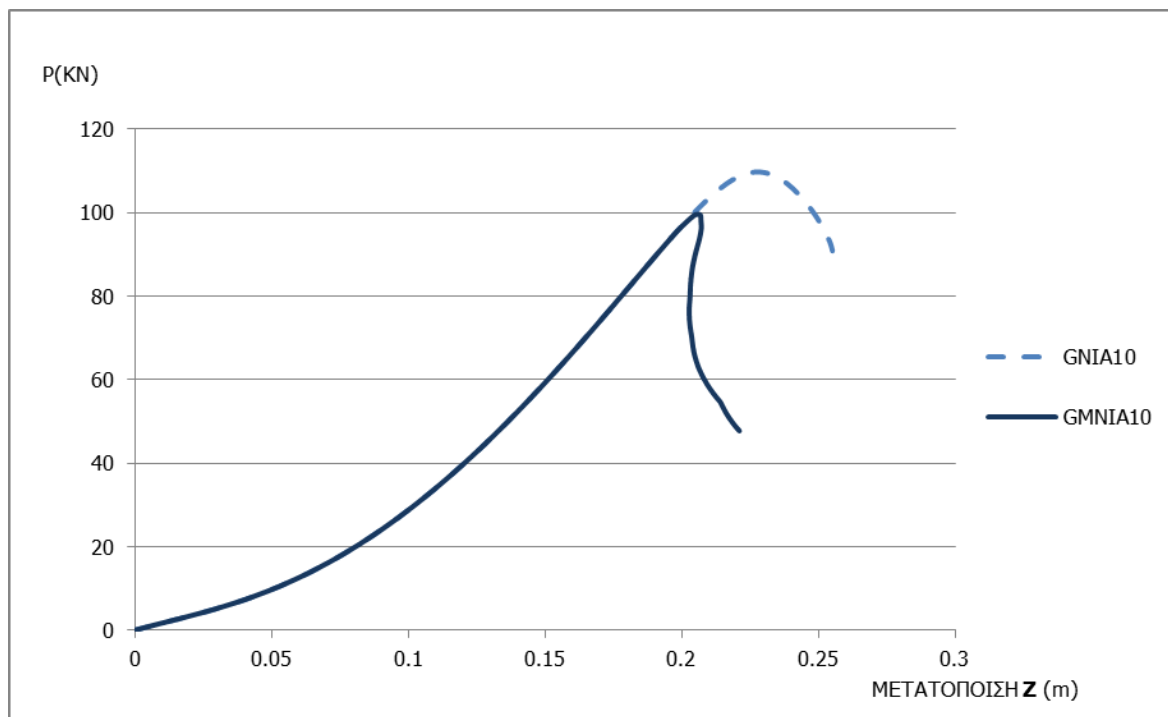
Με κρίσιμη την Euler ιδιομορφή και την αρχική ατέλεια που δόθηκε στο σημείο 544, ο φορέας συμπεριφέρεται διαφορετικά στις δύο μη γραμμικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν. Τα Σχήμα 5.9 και Σχήμα 5.10 απεικονίζουν τους δύο δρόμους ισορροπίας για τις δύο αναλύσεις. Σε αυτή την περίπτωση, σαφώς παρουσιάζεται αλληλεπίδραση μεταξύ των μηχανισμών αστοχίας. Οι δύο δρόμοι ισορροπίας ταυτίζονται μέχρι τη τιμή 95kN, όπου το μέλος με ατέλεια έχει αρχίσει να παρουσιάζει ήδη μεγάλη μετατόπιση στο μέσο από ότι στα άκρα. Έτσι, μέχρι αυτό το φορτίο παρουσιάζεται να δημιουργείται λυγισμός Euler, ο οποίος στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας θα ολοκληρωθεί για τιμή φορτίου 109.77kN. Στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με μη γραμμικό υλικό, ο λυγισμός Euler δεν προλαβαίνει να υλοποιηθεί, γιατί για τιμή 99.54kN εκδηλώνεται η διαρροή του υλικού στο σημείο όπου τέθηκε η αρχική ατέλεια. Μετά τη διαρροή του σημείου 544, ο φορέας αστοχεί, αφού στο σημείο αυτό δημιουργείται πλαστική άρθρωση και καθώς το μέλος στηρίζεται σε αρθρώσεις στους δύο κόμβους, δημιουργείται μηχανισμός.

Η διαφορά στις δύο αναλύσεις παρατηρείται το εξής γεγονός: ότι στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες καθώς το μέλος όπου τέθηκε η αρχική ατέλεια αστοχεί, συμβαίνει ταυτόχρονα και ακαριαίος λυγισμός (dimple) στο κεντρικό εξάγωνο. Ενώ, στη μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες μετά που το σημείο 544 διαρρέει, δεν παρουσιάζεται ταυτόχρονα ακαριαίος λυγισμός στην κορυφή, αν και οι παραμορφώσεις παραμένουν και μετά την αποφόρτιση.

Σε όλες τις αναλύσεις για αρθρωτές συνδέσεις που έγιναν μέχρι στιγμής, στην κορυφή υπήρχε πάντα ο σχηματισμός εξογκώματος (dimple), όπου τελικά δεν ολοκληρωνόταν γιατί αστοχούσε σε άλλο σημείο ο φορέας. Με την υπάρχουσα διατομή πραγματοποιήθηκαν κι' άλλες αναλύσεις με μόνο καθολική αρχική ατέλεια για να αναζητηθεί αν με μεγαλύτερη τιμή θα μπορούσε τελικά να παρουσιαστεί ακαριαίος λυγισμός στην κορυφή του κελύφους. Σε όλες τις περιπτώσεις όμως, ο φορέας αστοχούσε με ακαριαίο λυγισμό είτε στο κόμβο 1603, είτε σε κάποιο άλλο κόμβο, αλλά ποτέ στο κεντρικό εξάγωνο. Έτσι, μπορεί να ειπωθεί με βεβαιότητα ότι η αστοχία στο μέλος αυτό λόγω Euler (στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας) επιδρά στο να παρουσιαστεί και τοπικός ακαριαίος λυγισμός στο κεντρικό εξάγωνο με τη μορφή dimple.



Σχήμα 5.9: Δρόμοι ισορροπίας του σημείου 544, με κρίσιμη την Euler ιδιομορφή



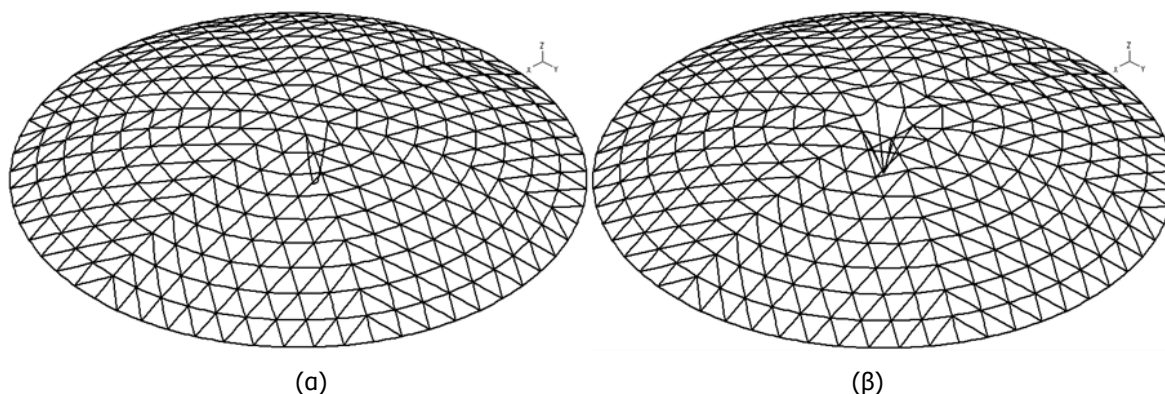
Σχήμα 5.10: Δρόμος ισορροπίας του κόμβου 3462, με κρίσιμη Euler ιδιομορφή

Ακολουθεί η περίπτωση όπου γίνεται ο συνδυασμός των δύο μορφών αστοχίας για να διαπιστωθεί εάν γίνεται εντονότερη η αλληλεπίδραση του λυγισμού Euler με τον τοπικό ακαριαίο λυγισμό του κελύφους. Επίσης, θα διαφανεί κατά πόσο αυτή η αλληλεπίδραση μπορεί να εκδηλωθεί προτού να υπάρξει αστοχία λόγω διαρροής του υλικού.

5.5 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ ΑΚΑΡΙΑΙΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΚΑΙ EULER

5.5.1 Γραμμική ανάλυση λυγισμού – LBA

Σε αυτή την περίπτωση, οι δύο μορφές αστοχίας θα συνυπάρξουν στις επόμενες μη γραμμικές αναλύσεις. Για το ακαριαίο λυγισμό χρησιμοποιείται η 9^η ιδιομορφή, με το σφαιρικό κέλυφος να παρουσιάζει τοπικό ακαριαίο λυγισμό στην κορυφή του, σχηματίζοντας την αστοχία dimple με φορτίο λυγισμού 193.6kN. Για το λυγισμό Euler θα χρησιμοποιηθεί η 2^η ιδιομορφή, με το λυγισμό να παρουσιάζεται σε ένα από τα μέλη του κεντρικού εξαγώνου, με φορτίο λυγισμού 176.1kN. Ως προϋπόθεση για να υπάρχει αλληλεπίδραση, πρέπει τα φορτία λυγισμού να είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους.



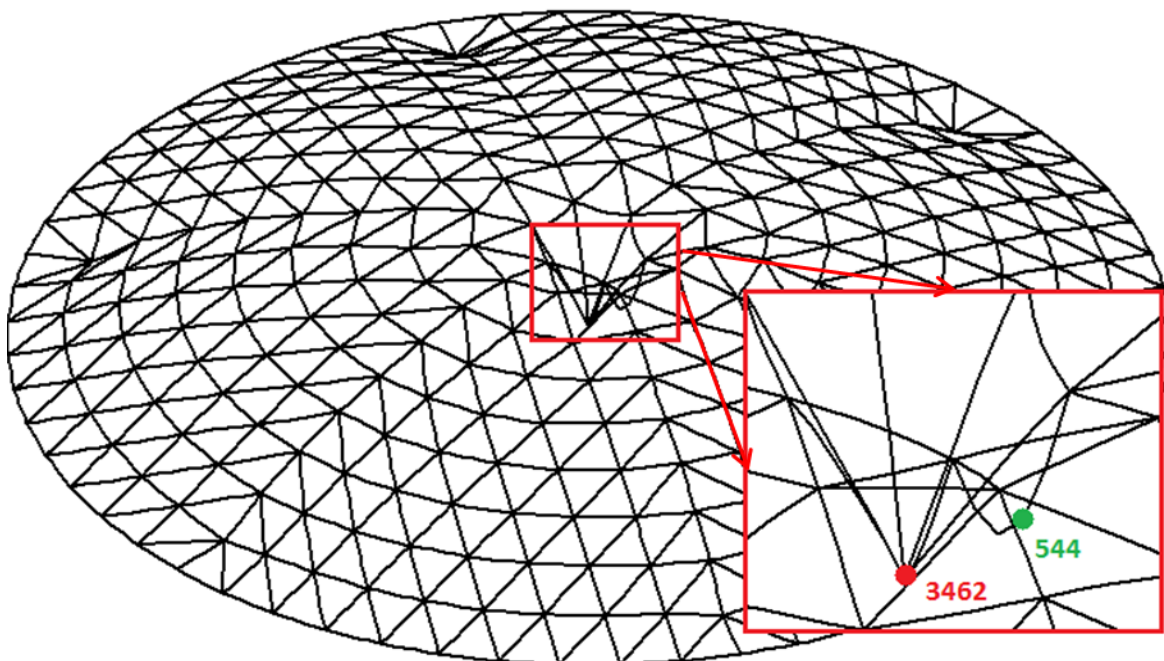
Εικόνα 5.20: Ιδιομορφές λυγισμού του σφαιρικού κελύφους (α) 1^η ιδιομορφή (β) 9^η ιδιομορφή

Ακολουθούν οι μη γραμμικές αναλύσεις με ελαστικό ή με μη γραμμικό υλικό. Το μέτρο της αρχικής ατέλειας, όσο και η φορά, είναι το ίδιο όπως και στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις. Η αρχική ατέλεια για τη καθολική ιδιομορφή είναι 0.060m στο κεντρικό κόμβο και για την Euler ιδιομορφή 0.010m στο σημείο 544.

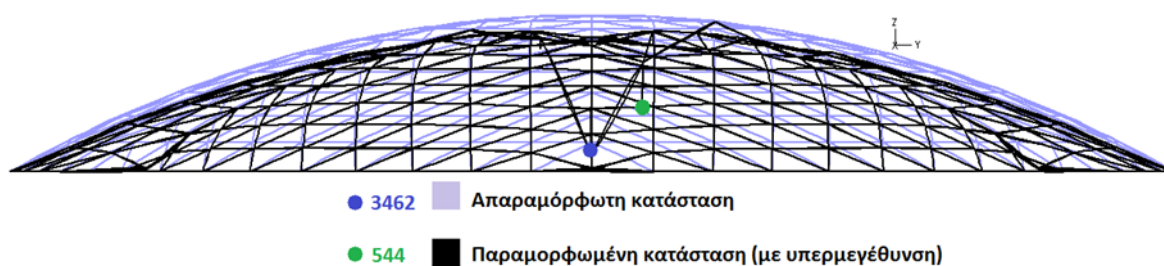
5.5.2 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες – GNIA

Η μη γραμμική ανάλυση λυγισμού στην οριακή κατάσταση πριν την αστοχία έχει τη μορφή των Εικόνα 5.21 και Εικόνα 5.22. Φαίνεται ότι στο οριακό σημείο πριν την αστοχία, όλος ο φορέας μετακινήθηκε προς τα κάτω με πολύ μικρή μετακίνηση και στο σημείο κοντά στο κεντρικό κόμβο δημιουργείται η τοπική ανωμαλία της γεωμετρίας (dimple). Η μετακίνηση όλων των κόμβων του φορέα είναι περίπου 1-2cm σε αυτό το σημείο. Αντιθέτως, στο κεντρικό κόμβο, η μετακίνηση τη στιγμή της αστοχίας είναι η μέγιστη από όλους τους κόμβους και έχει τιμή 0.180m. Η μετακίνηση του κεντρικού κόμβου 3452 στο οριακό σημείο πριν την αστοχία είναι πολύ πιο μικρή από την περίπτωση με Euler ιδιομορφή, αλλά και λίγο πιο μικρή από την περίπτωση με καθολική ιδιομορφή.

Το σημείο 544 όπου τέθηκε η αρχική ατέλεια με μέτρο 0.010m έχει βύθιση 0.117m, ενώ οι κόμβοι όπου στηρίζεται το μέλος που ανήκει στο σημείο 544 έχουν μετακίνηση 0.059m. Η διαφορά είναι ίση με την προηγούμενη περίπτωση που υπήρχε μόνο Euler ιδιομορφή. Υποδηλώνεται άμεσα ότι το μέλος λυγίζει και αστοχεί για μετακίνηση 6cm του σημείου 544 σε σχέση με τα άκρα. Έτσι και σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται λυγισμός Euler του μέλους αυτού για τη μη γραμμική ανάλυση με ελαστικό το υλικό.

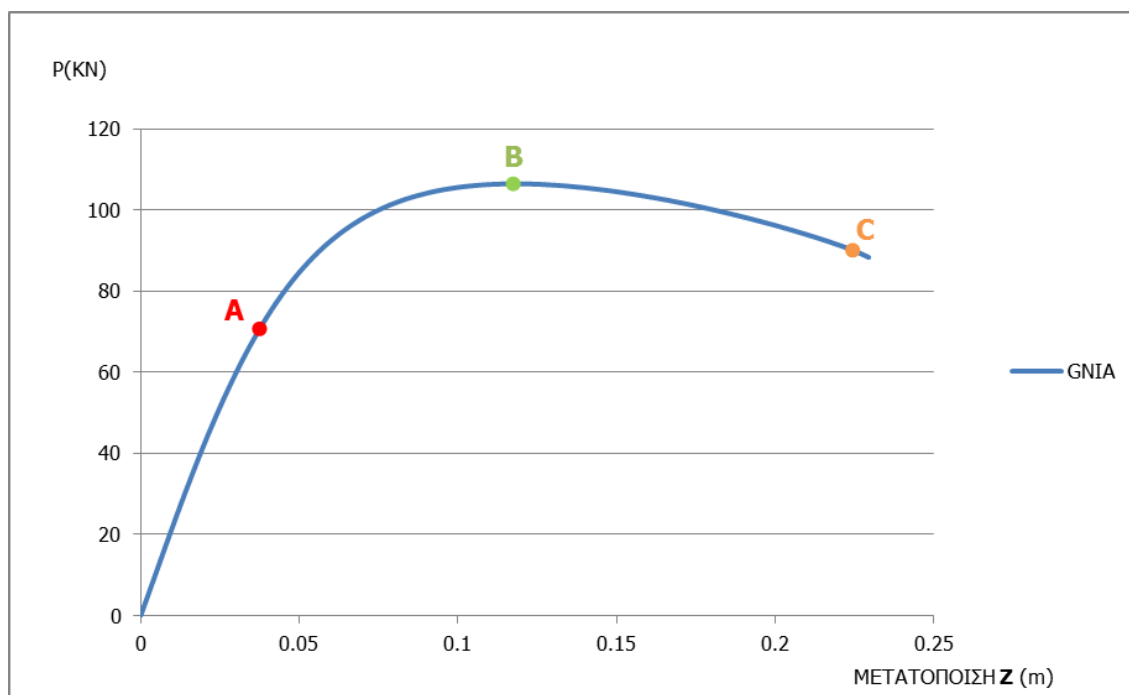


Εικόνα 5.21: Παραμορφωμένη κατάσταση του σφαιρικού κελύφους στο οριακό σημείο πριν την αστοχία



Εικόνα 5.22: Το σφαιρικό κέλυφος στο οριακό σημείο πριν την αστοχία

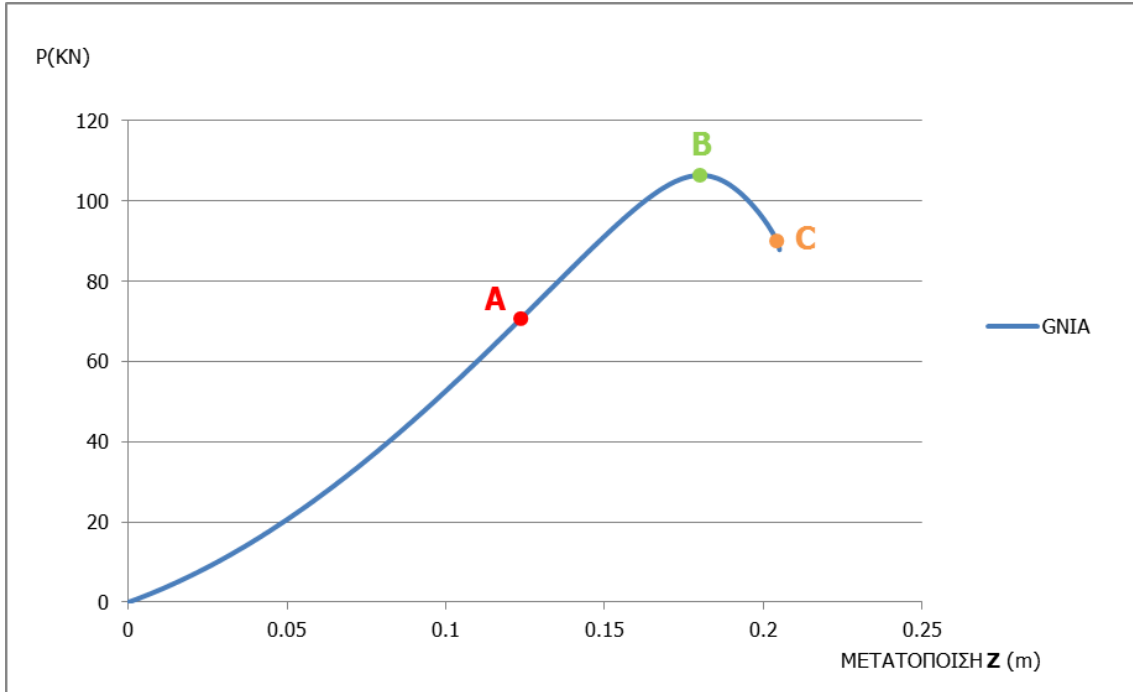
Ο δρόμος ισορροπίας του σημείου 544 παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.11 και έχει ως μέγιστο φορτίο 106.4kN. Η δύναμη είναι μικρότερη από τις άλλες δύο περιπτώσεις, άρα η προϋπόθεση για αλληλεπίδραση των μορφών αστοχίας έχει επιτύχει. Η συμπεριφορά του συγκεκριμένου σημείου είναι η ίδια με την προηγούμενη περίπτωση που είχε κρίσιμη την Euler ιδιομορφή. Με ένα καμπύλο δρόμο με συνεχώς μειούμενη δυσκαμψία και καθώς πλησιάζει το οριακό φορτίο, τελικά μηδενίζεται. Μετά το οριακό σημείο, καθώς το μέλος έχει λυγίσει λόγω Euler, η παραμόρφωση για το συγκεκριμένο σημείο αυξάνεται έντονα. Η συμπεριφορά του σημείου 544 έχει την μορφή αστοχίας μέσω οριακού σημείου, όπως παρατηρείται σε όλες της περιπτώσεις με αρθρωμένες τις συνδέσεις, εκτός από την περιοχή της κορυφής του κελύφους.



Σχήμα 5.11: Δρόμος ισορροπίας του κόμβου 544, με συνδυασμό των ιδιομορφών

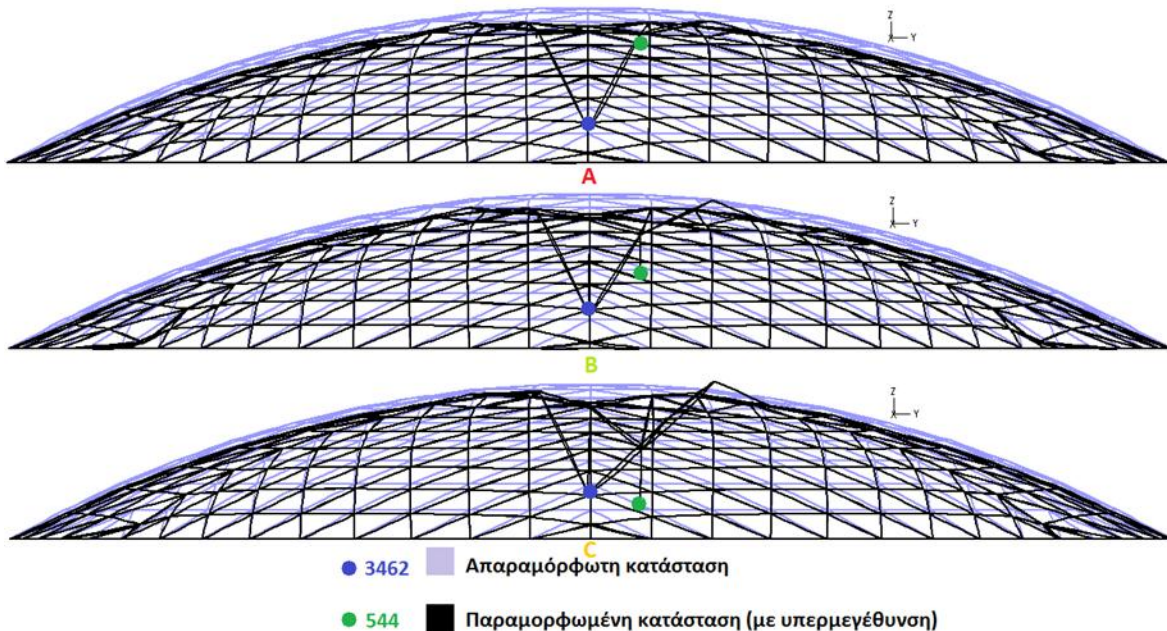
Η συμπεριφορά του κεντρικού κόμβου είναι διαφορετική, όπως και στην προηγούμενη ανάλυση. Όπως φαίνεται στο δρόμο ισορροπίας του Σχήμα 5.12, στην περιοχή της τοπικής παραμόρφωσης παρατηρείται μειωμένη δυσκαμψία. Αυτό φαίνεται από το ότι ο δρόμος ισορροπίας στο αρχικό στάδιο έχει τα κοίλα προς τα πάνω, καθώς δόθηκε αρχική ατέλεια Euler σε μέλος του κεντρικού εξάγωνου. Επίσης, στη συνέχεια η δυσκαμψία παραμένει μειωμένη καθώς αναπτύσσονται μεγάλες μετακινήσεις, αλλά με γραμμική συμπεριφορά σε σχέση με το εξωτερικό φορτίο.

Όταν η τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου είναι στο οριακό σημείο Β, τότε παρατηρείται τοπικός ακαριαίος λυγισμός. Ο τοπικός ακαριαίος λυγισμός εκδηλώθηκε αμέσως μετά που το μέλος λύγισε λόγω Euler. Αυτό γιατί στην αντίστοιχη ανάλυση λυγισμού με κρίσιμη την ιδιομορφή του τοπικού ακαριαίου λυγισμού, αν και ο κεντρικός κόμβος έφτασε σε μεγαλύτερη μετακίνηση στο οριακό σημείο, η αστοχία δε συνέβηκε εκεί αλλά περιμετρικά κοντά στη βάση (στον κόμβο 1603). Έτσι, για ακόμα μια φορά, η αλληλεπίδραση των μορφών αστοχίας του λυγισμού Euler και του τοπικού ακαριαίου λυγισμού φαίνεται ξεκάθαρα. Μετά την αστοχία και καθώς πλησιάζουμε το σημείο C, το τοπικό εξόγκωμα αναπτύσσει μεγαλύτερες παραμορφώσεις, εκδηλώνοντας και μετά την αποφόρτιση τον τοπικό ακαριαίο λυγισμό της κορυφής. Στην περιοχή κοντά στη βάση όπου στην περίπτωση με κρίσιμο τον τοπικό λυγισμό εμφανίστηκε ο μηχανισμός αστοχίας, η συμπεριφορά είναι η ίδια και σε αυτή την ανάλυση, μέχρι το σημείο αστοχίας. Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο λυγισμός του μέλους και ο τοπικός ακαριαίος λυγισμός της κορυφής προηγούνται του τοπικού ακαριαίου λυγισμού της περιοχής του κόμβου 1603.



Σχήμα 5.12: Δρόμος ισορροπίας του κόμβου 3462, με συνδυασμό των ιδιομορφών

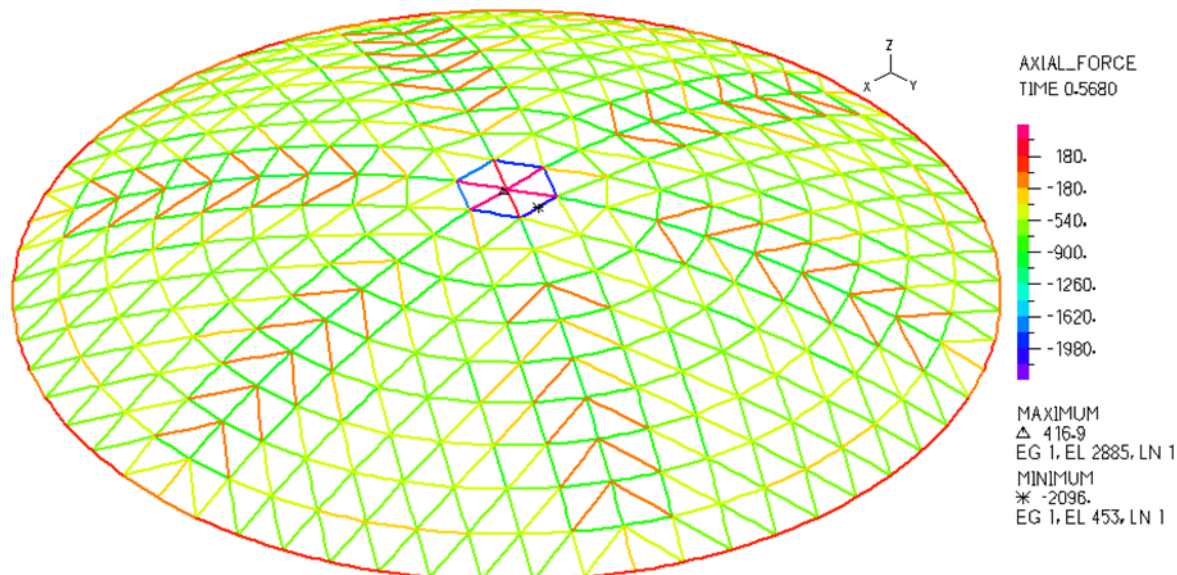
Η συμπεριφορά του κελύφους στη φόρτιση (Εικόνα 5.23) είναι πανομοιότυπη με την περίπτωση όταν υπήρχαν μόνο Euler ιδιομορφή. Οι μετακινήσεις στα τρία σημεία του δρόμου ισορροπίας είναι περίπου οι ίδιες σε όλο το σφαιρικό κέλυφος με πολύ μικρές διαφορές. Η μόνη κυρίως διαφορά παρατηρείται στο κεντρικό κόμβο, όπου σε αυτή την περίπτωση ορίστηκε αρχική ατέλεια. Έτσι και εδώ, η αστοχία οφείλεται σε λυγισμό Euler στο μέλος του κεντρικού εξάγωνου και στη συνέχεια δημιουργείται ο τοπικός ακαριαίος λυγισμός στην περιοχή της κορυφής.



Εικόνα 5.23: Ο φορέας στις αντίστοιχες χρονικές περιπτώσεις των δρόμων ισορροπίας

Η αξονική φόρτιση είναι όμοια με την προηγούμενη περίπτωση. Σε αυτή την περίπτωση όμως, η μέγιστη θλιπτική δύναμη είναι 2096kN, αρκετά κοντά στο κρίσιμο οριακό σημείο της ράβδου. Αυτή η μικρή διαφορά οφείλεται είτε στην αρχική ατέλεια του μέλους επειδή λόγω της ατέλειας το μέλος είναι

είδη λυγισμένο, ή στο τρόπο σύνδεσης καθώς τα άκρα της ράβδου είναι μεταθετά. Σε αυτό το παράδειγμα είναι ελάχιστα πιο μικρή η θλιπτική δύναμη από πριν, εξαιτίας της αρχικής ατέλειας που δόθηκε στο κεντρικό κόμβο. Όπως φαίνεται από όλες τις αναλύσεις, η αρχική καθολική ατέλεια επηρεάζει τη θλιπτική φόρτιση των ράβδων. Αυτό αποδεικνύεται στο κεφάλαιο 4, όπου το μέτρο της αρχικής ατέλειας για 30mm, 60mm και 120mm δεν επέφεραν καμία αλλαγή στο φορτίο αντοχής, αλλά επηρέασαν αρκετά τα θλιπτικά φορτία αντοχής.

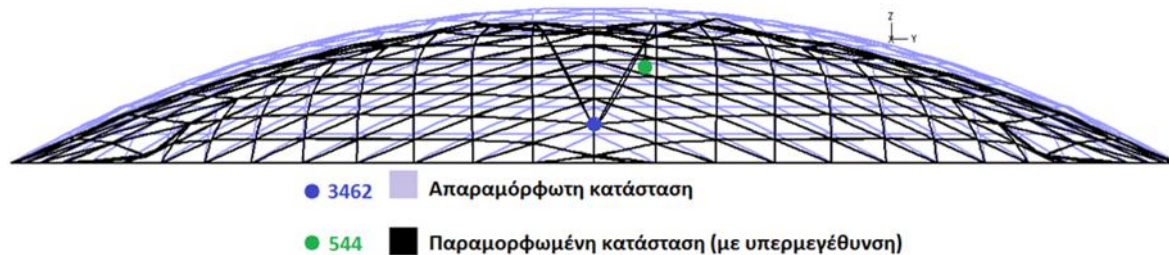


Εικόνα 5.24: Αξονική φόρτιση του φορέα στο οριακό σημείο πριν την αστοχία με συνδυασμό των ιδιομορφών

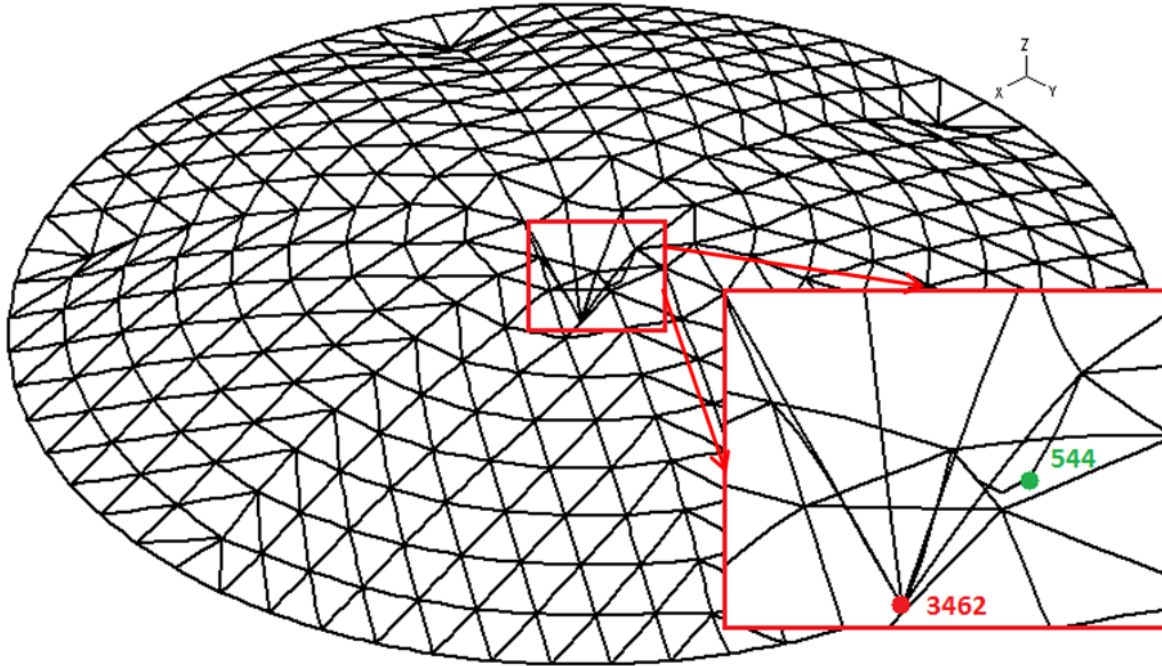
Στη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες παρατηρείται αλληλεπίδραση μεταξύ των μορφών αστοχίας και αυτό κυρίως της μικρής διαφοράς στο φορτίο αντοχής από τις άλλες περιπτώσεις. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η μη γραμμική ανάλυση με μη γραμμικό το υλικό για να προβληθεί και ο μηχανισμός αστοχίας λόγω του υλικού.

5.5.3 Μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες – GMNIA

Αφού ορίστηκε και το όριο διαρροής του υλικού, πραγματοποιήθηκε και αυτή η ανάλυση. Η συμπεριφορά του φορέα (Εικόνας Εικόνα 5.25 και Εικόνα 5.26) είναι ίδια με την προηγούμενη ανάλυση με λίγες μικρές μειώσεις, όσον αφορά τις μετακινήσεις. Οι διαφορές δεν ξεπερνούν τα 2-3cm στο κόμβο 3462. Στα υπόλοιπα σημεία, οι μειώσεις είναι μικρότερες από 1-2mm. Σχετικά με το σημείο 544, η μετακίνηση είναι 0.075, ενώ η μετακίνηση των άκρων του μέλους είναι 0,042. Αυτή η διαφορά είναι μικρότερη από την προηγούμενη ανάλυση, όπου εκδηλωνόταν ο λυγισμός Euler, κάτι που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αστοχία προήλθε από διαρροή του υλικού και όχι από λυγισμό μέλους.

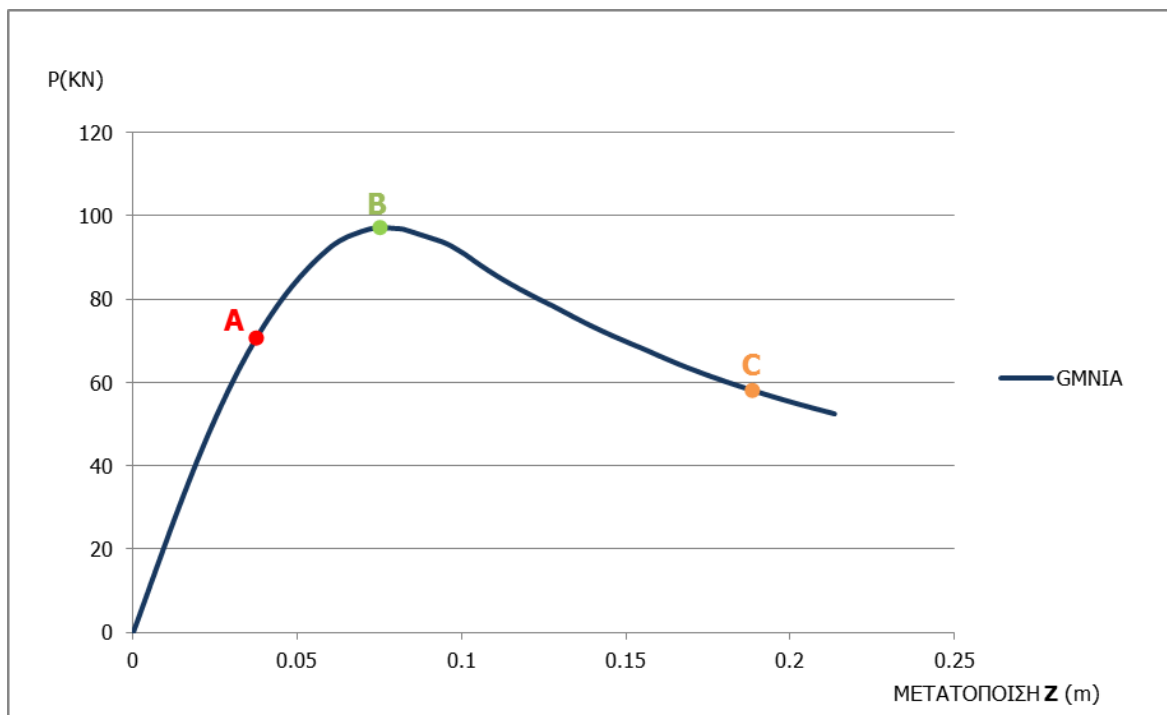


Εικόνα 5.25: Το σφαιρικό κέλυφος στο οριακό σημείο πριν την αστοχία

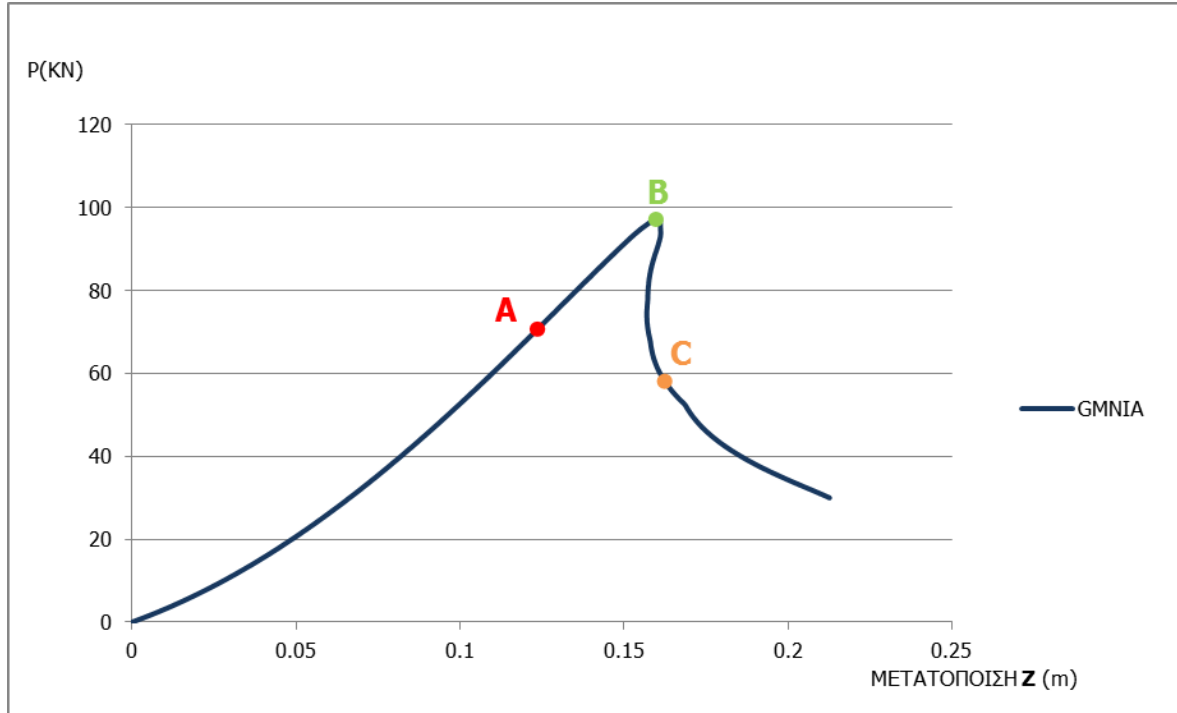


Εικόνα 5.26: Παραμορφωμένη κατάσταση του σφαιρικού κελύφους στο οριακό σημείο πριν την αστοχία

Ο δρόμος ισορροπίας των Σχήμα 5.13 και Σχήμα 5.14 αποδεικνύει ότι η αστοχία προήλθε από διαρροή του υλικού. Σε αυτή την ανάλυση, το φορτίο αντοχής από 106.4kN είναι 97.18kN. Η διαφορά μεταξύ των δύο μορφών αναλύσεων είναι η απότομη αλλαγή στη συμπεριφορά του φορέα καθώς πλησιάζει το οριακό σημείο. Σε αυτή την περίπτωση, παρατηρείται έντονη αύξηση της καμπυλότητας κοντά στο οριακό σημείο για το σημείο 544, ενώ για τον κόμβο 3462 η αστοχία είναι απότομη. Η αστοχία για τον κόμβο 3462 μπορεί να χαρακτηριστεί ότι γίνεται μέσω ασταθές σημείου διακλάδωσης, γιατί μετά το σημείο B, ο δρόμος ισορροπίας έχει καθοδικό κλάδο. Γενικά, η συμπεριφορά είναι η ίδια και στα δύο σημεία με την περίπτωση με κρίσιμη την Euler ιδιομορφή μέλους.

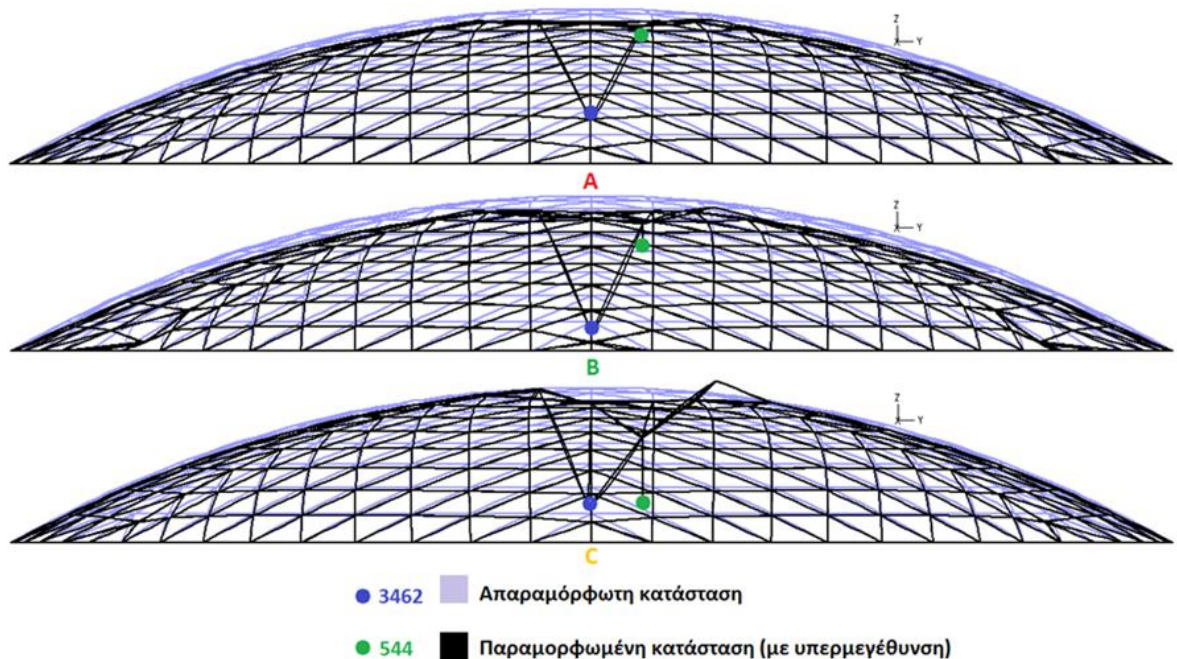


Σχήμα 5.13: Δρόμος ισορροπίας του σημείου 544, με συνδυασμό των ιδιομορφών



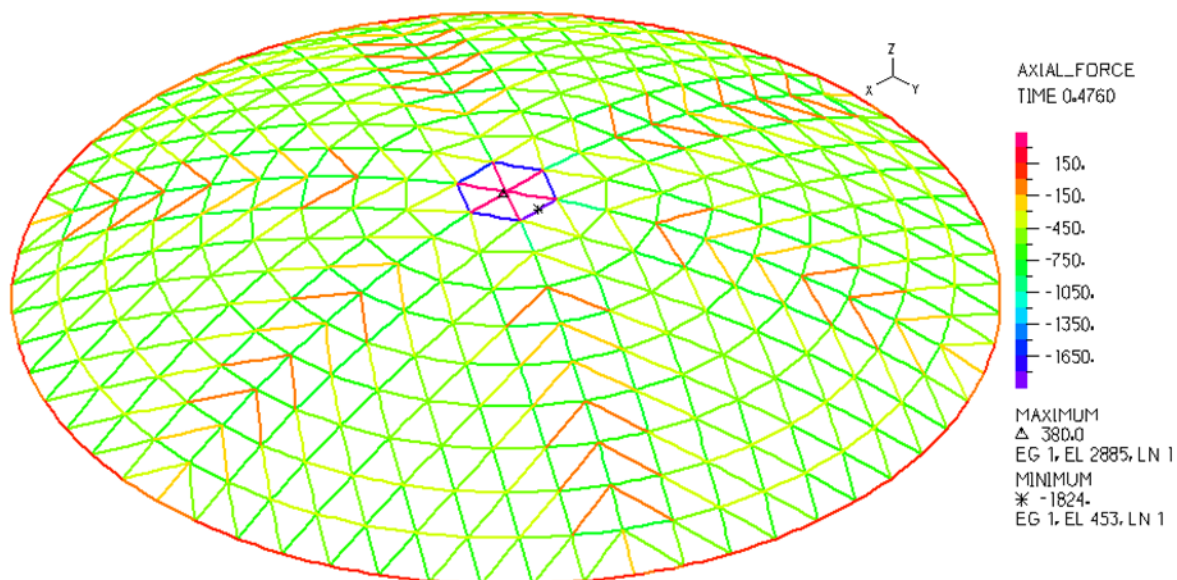
Σχήμα 5.14: Δρόμος ισορροπίας του κόμβου 3462, με συνδυασμό των ιδιομορφών

Ο τρόπος συμπεριφοράς του σφαιρικού κελύφους (Εικόνα 5.27) δε διαφέρει σε τίποτα από τη μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες για την περίπτωση με κρίσιμη την Euler ιδιομορφή. Καθώς αυξάνεται το φορτίο, οι μετακινήσεις μεγαλώνουν μέχρι το οριακό φορτίο, όπου το κέλυφος αστοχεί. Γενικά όμως, οι μετακινήσεις σε όλο το φορέα είναι πολύ μικρές και σε μερικά σημεία μηδενικές, εκτός βέβαια από τη κορυφή που δημιουργείται το τοπικό εξόγκωμα. Μετά την αστοχία, όλο το κέλυφος κινείται προς τον απαραμόρφωτο φορέα εκτός του σημείο 544, όπου εκδηλώνεται διαρροή του υλικού, αλλά και στο κεντρικό κόμβο όπου οι μετακινήσεις παραμένουν οι ίδιες με λίγες αποκλίσεις από αυτές του οριακού σημείου.



Εικόνα 5.27: Ο φορέας στις αντίστοιχες χρονικές περιπτώσεις των δρόμων ισορροπίας

Η μέγιστη θλιπτική δύναμη στο σημείο 544 είναι 1824kN, μικρότερη από το κρίσιμο φορτίο λυγισμού για τα μέλη του σφαιρικού κελύφους. Εξαιτίας αυτού, η διαρροή είναι η αιτία για την αστοχία του φορέα. Στο σφαιρικό κέλυφος επικρατούν μικρότερες δυνάμεις από τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, καθώς η αστοχία πραγματοποιείται γρηγορότερα. Η φόρτιση (Εικόνα 5.28) είναι γενικά συμμετρική με κυρίως θλιπτικές δυνάμεις, εκτός από τα μέλη του κεντρικού εξάγωνου, το δακτύλιο προέντασης και μερικά διαγώνια μέλη δεξιά και αριστερά της κορυφογραμμής AOD τα οποία εφελκύνονται με μικρές δυνάμεις.



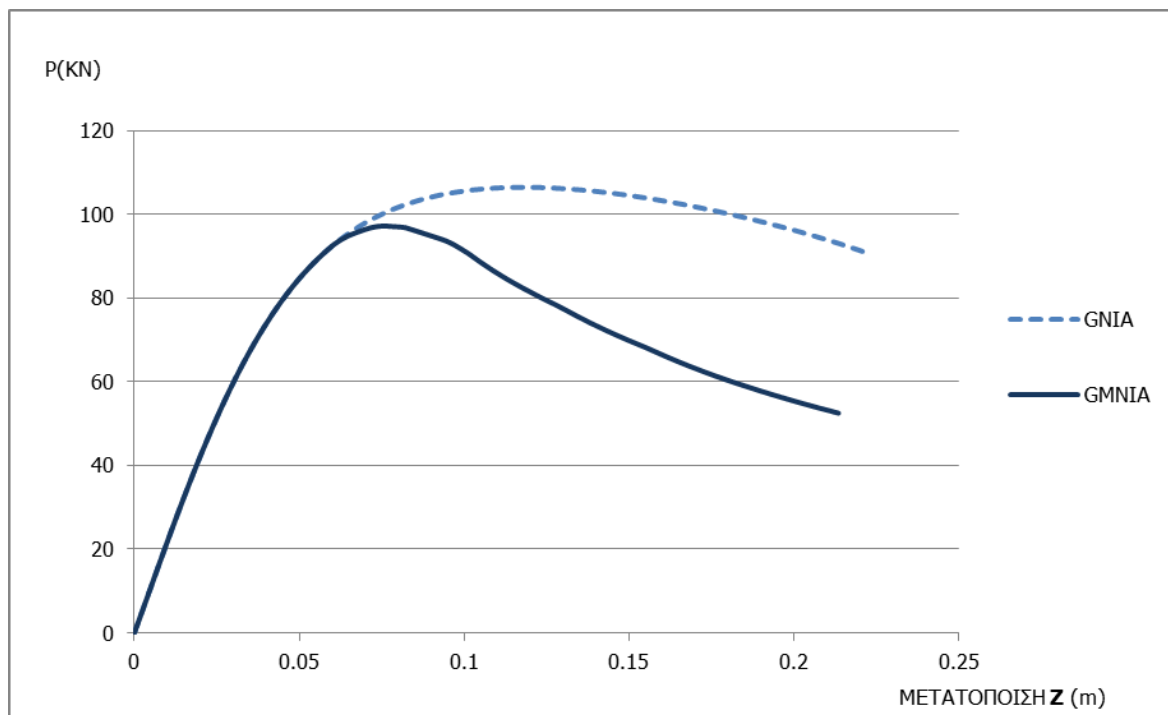
Εικόνα 5.28: Αξονική φόρτιση του φορέα στο οριακό σημείο πριν την αστοχία με συνδυασμό των ιδιομορφών

5.5.4 Αλληλεπίδραση των μηχανισμών αστοχίας

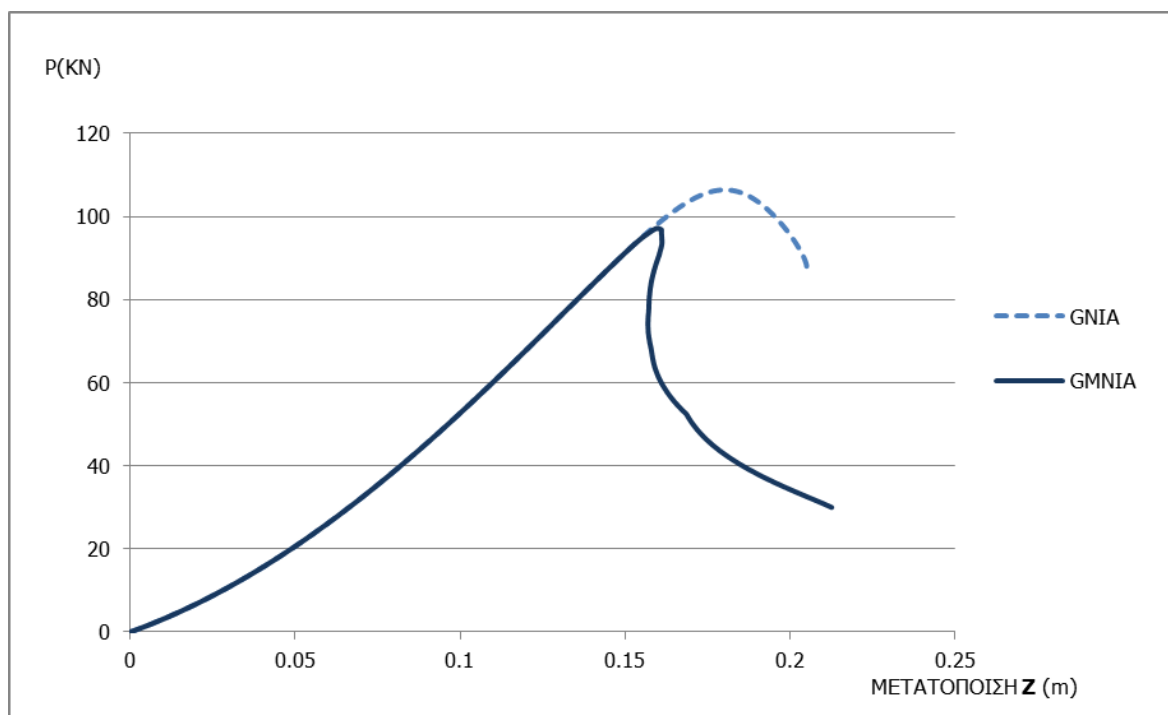
Μετά την ολοκλήρωση και των δύο μορφών αναλύσεων με συνδυασμό του τοπικού ακαριαίου λυγισμού και της Euler ιδιομορφής είναι σαφές κατά πόσο υπάρχει αλληλεπίδραση των μορφών αστοχίας. Καταρχάς, η αλληλεπίδραση παρουσιάζεται και στις δύο αναλύσεις, αφού το φορτίο αντοχής είναι μικρότερο από τις αντίστοιχες περιπτώσεις. Το ποσοστό μείωσης και ο βαθμός επιρροής του συνδυασμού με τις υπόλοιπες περιπτώσεις αναλύεται στην παράγραφο 5.6. Στο παρόν στάδιο, γίνεται αναφορά των μορφών αστοχίας που παρουσιάζει ο συνδυασμός των ιδιομορφών, αλλά και πώς αυτές οι αστοχίες μεταξύ τους επηρεάζουν την απόκριση του σφαιρικού κελύφους.

Τα Σχήμα 5.15 και Σχήμα 5.16 βοηθούν στη κατανόηση της αλληλεπίδρασης των μορφών αστοχίας. Στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες εκδηλώνεται λυγισμός Euler σε μια ράβδο περιμετρικά του κεντρικού εξάγωνου όπου δόθηκε η ατέλεια μέλους. Στη συνέχεια, μετά την αστοχία της ράβδου εξαιτίας του λυγισμού Euler, δημιουργείται ακαριαίος τοπικός λυγισμός στο κεντρικό εξάγωνο. Αυτή η αστοχία (dimple του κεντρικού εξάγωνου) δεν παρουσιάστηκε στην περίπτωση με κρίσιμη ιδιομορφή τον ακαριαίο λυγισμό, γιατί πριν να εκδηλωθεί ο φορέας αστοχούσε διαφορετικά. Έτσι, ο λυγισμός Euler είναι άμεσα συνδεδεμένος με το τοπικό ακαριαίο λυγισμό.

Στη μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες δεν πραγματοποιείται λυγισμός Euler. Αφού αρχίζει να λυγίζει το μέλος, προτού να λυγίσει τελείως, πραγματοποιείται διαρροή υλικού στο ίδιο σημείο. Η συνέχεια σε αυτή τη μορφή ανάλυσης αλλάζει, αφού με την πλαστικοποίηση του συγκεκριμένου σημείου δεν πραγματοποιείται ταυτόχρονα ο τοπικός ακαριαίος λυγισμός του κεντρικού εξάγωνου αλλά στην συνέχεια. Σε αυτή την περίπτωση, το κεντρικό εξάγωνο, μετά που ο φορέας αστόχησε και άρχισε η αποφόρτιση, δεν κινείται όπως τα υπόλοιπα σημεία προς την απαραμόρφωτη κατάσταση, αλλά υπάρχει παραμένουσα παραμόρφωση μέχρι κάποιο φορτίο όπου τελικά εκδηλώνεται και ο ακαριαίος λυγισμός.



Σχήμα 5.15: Δρόμοι ισορροπίας του σημείου 544, με συνδυασμό των αναλύσεων



Σχήμα 5.16: Δρόμος ισορροπίας του κόμβου 3462, με συνδυασμό των ιδιομορφών

5.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

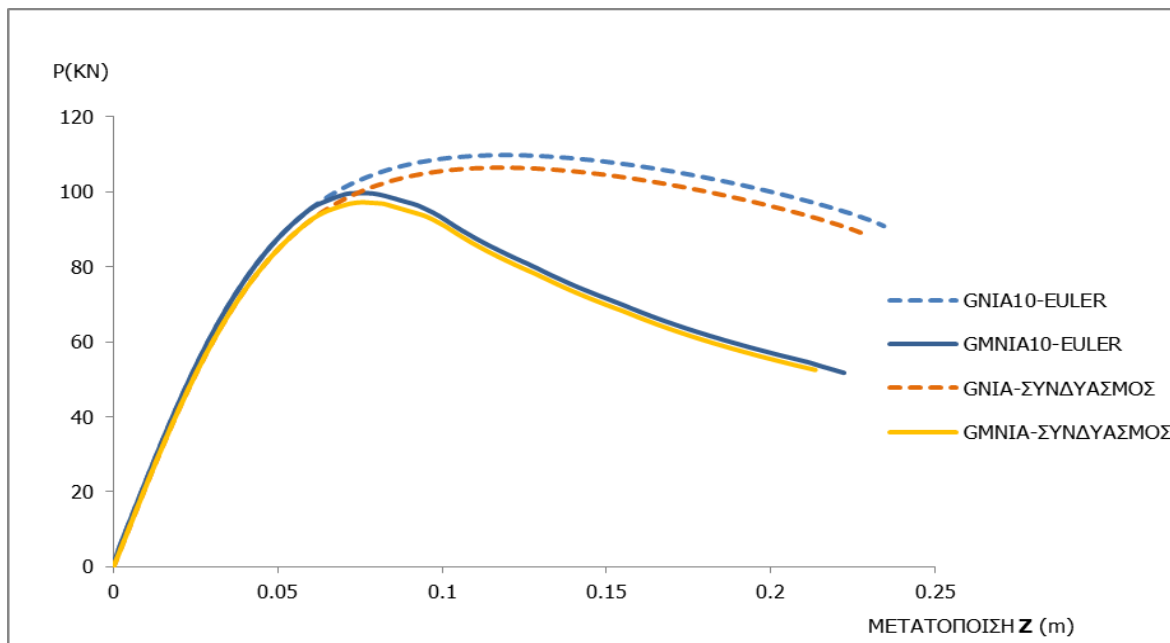
Στην αρχή του κεφαλαίου, στόχος ήταν να παρουσιαστούν μέσα από τις αναλύσεις όλες οι μορφές αστοχίας για το σφαιρικό κέλυφος. Εκτός αυτού, έπρεπε να προσδιοριστεί και ο βαθμός αλληλεπίδρασης των μορφών αυτών. Όπως απεικονίζεται από τα Σχήμα 5.17, Σχήμα 5.18 και Σχήμα

5.19, η αλληλεπίδραση είναι εμφανής, καθώς το φορτίο αντοχής έχει μειωθεί στην περίπτωση του συνδυασμού σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις.

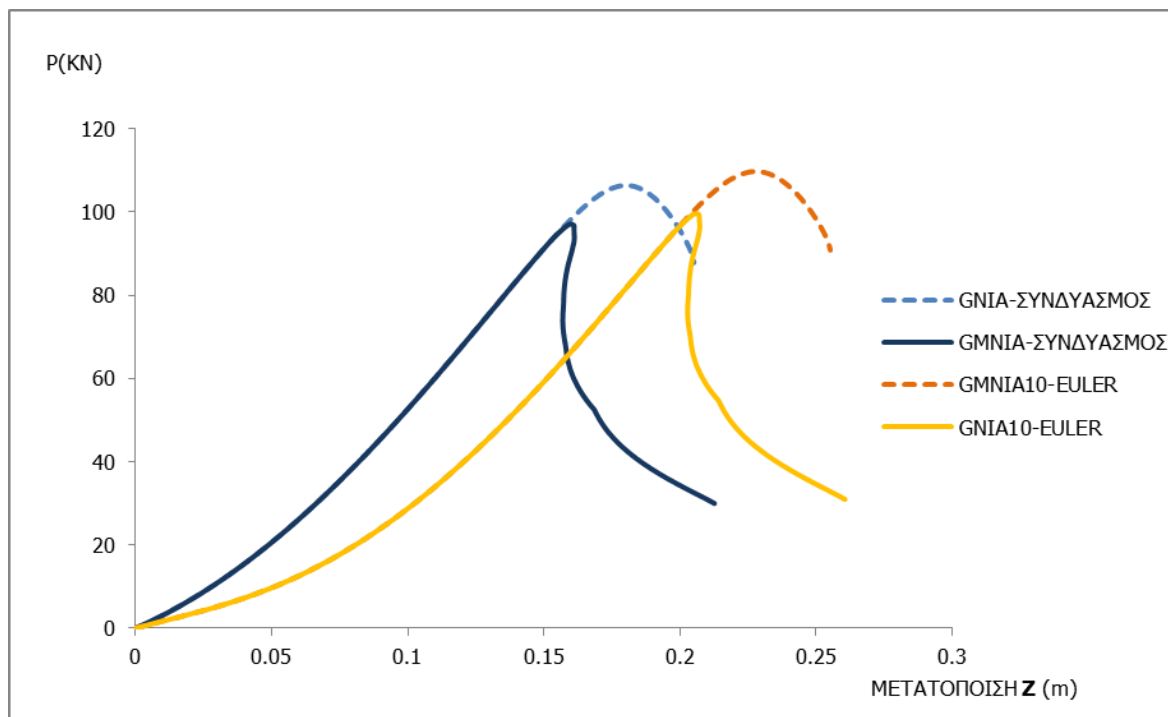
Στην περίπτωση με κρίσιμη ιδιομορφή τον ακαριαίο λυγισμό, η μορφή αστοχίας είναι από ακαριαίο λυγισμό στην περιοχή του κόμβου 1603. Σε αυτή την περίπτωση, δεν παρουσιάζεται άλλη μορφή αστοχίας και το φορτίο αντοχής είναι 123.92kN. Στην περίπτωση με Euler ιδιομορφή, όπως και στο συνδυασμό, η αστοχία στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες προήλθε από λυγισμό Euler που προκαλούσε και τον ακαριαίο λυγισμό (dimple) στη κορυφή. Ενώ, με μη γραμμικό υλικό, η αστοχία προέρχεται από τη διαρροή του υλικού.

Η διαφορά της περίπτωσης με κρίσιμη ιδιομορφή τον τοπικό ακαριαίο λυγισμό από το συνδυασμό είναι εμφανείς (η διαφορά είναι 24kN). Η διαφορά όμως για τη περίπτωση με κρίσιμη την Euler ιδιομορφή με το συνδυασμό είναι πολύ μικρή. Έτσι, η αλληλεπίδραση μπορεί να χαρακτηριστεί και μηδαμινή για αυτές της περιπτώσεις, γιατί το φορτίο από 109.77kN γίνεται 106.43kN. Αυτή η αλληλεπίδραση, όπως φαίνεται, δεν επηρεάζει κατά πολύ την αντοχή του κελύφους. Η επιρροή, όμως, μπορεί να μην έχει και τόση σημασία για την ομοιόμορφη φόρτιση του κελύφους. Μπορεί όμως να είναι σημαντική σε μία μη συμμετρική φόρτιση του σφαιρικού κελύφους με περιοχές με συσσώρευση κατανεμημένων ή συγκεντρωμένων δυνάμεων.

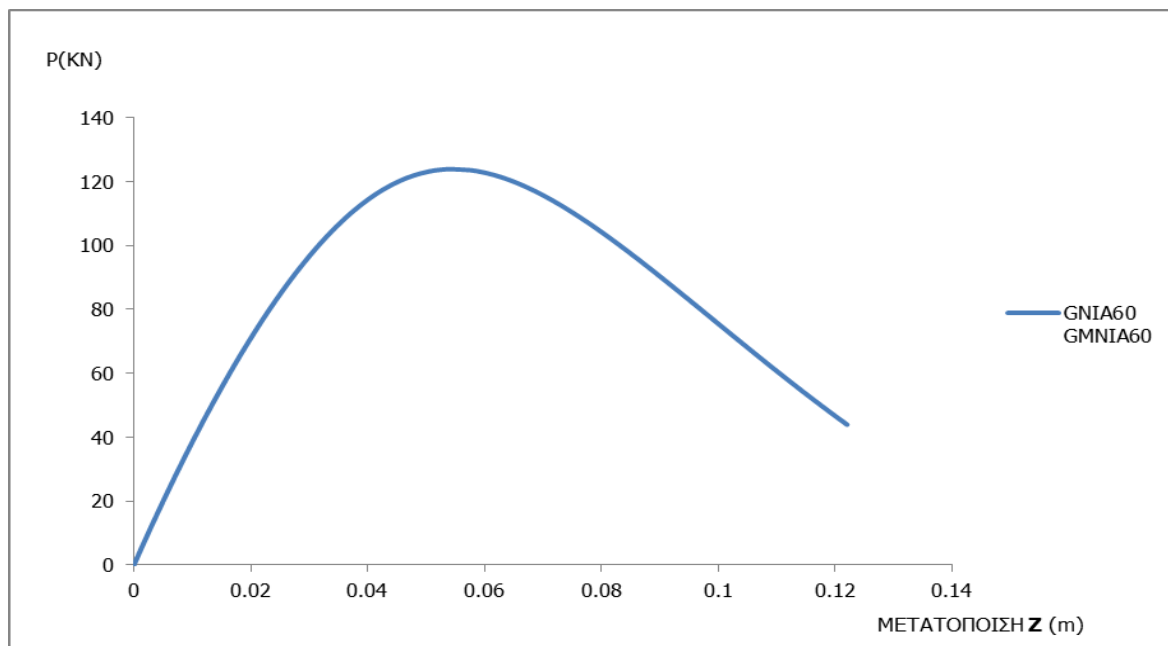
Μέσα από παραδείγματα για μεγαλύτερες τιμές αρχικής καθολικής ατέλειας διαπιστώθηκε ότι η αλληλεπίδραση γίνεται εντονότερη (αλλά όχι πάρα πολύ) με την αύξηση της αρχικής ατέλειας στο κεντρικό κόμβο (Πίνακας 5.2). Αυτή η μεταβολή αυξάνει περισσότερο την αξονική φόρτιση στο σημείο 544 και πραγματοποιείται ταχύτερα η διαρροή του υλικού. Έτσι, το σφαιρικό κέλυφος αστοχεί σε πολύ μικρότερα φορτία από την περίπτωση με Euler ιδιομορφή. Ωστόσο, για μεγαλύτερες τιμές από 120mm, το φορτίο αντοχής με κρίσιμη ιδιομορφή τον ακαριαίο λυγισμό είναι μικρότερο από αυτό με κρίσιμη ιδιομορφή Euler. Με αποτέλεσμα, ο μηχανισμός αστοχίας του συνδυασμού να είναι ίδιος με αυτόν στα ίδια φορτία αντοχής.



Σχήμα 5.17: Δρόμοι ισορροπίας του σημείου 544



Σχήμα 5.18: Δρόμοι ισορροπίας του κόμβου 3462



Σχήμα 5.19: Δρόμος ισορροπίας του κόμβου 1603, με κρίσιμη την καθολική ιδιομορφή

Οι Πίνακες Πίνακας 5.1 και Πίνακας 5.2 διευκολύνουν την κατανόηση όσον έχουν ειπωθεί μέχρι στιγμής. Παρουσιάζουν τα ποσοστά αύξησης ή μείωσης για όλες τις περιπτώσεις που πραγματοποιήθηκαν μέχρι τώρα. Το σύμβολο • που φαίνεται στους πίνακες δηλώνει ότι τα ποσοστά που είναι από κάτω είναι συνάρτηση της ανάλυσης αυτής. Έτσι οι πίνακες έχουν ως βάση την περίπτωση με το συνδυασμό των ιδιομορφών και παρουσιάζουν με ποσοστά τη διαφορά, τόσο στα φορτία αντοχής όσο και τις μέγιστες αξονικές δυνάμεις που παρουσιάζονται στο ίδιο μέλος.

Πίνακας 5.1: Ποσοστά διαφορά για τους τρεις τύπους κρίσιμων ιδιομορφών του σφαιρικού κελύφους με καθολική ατέλεια 60mm

Τύπος σύνδεσης	Είδος ανάλυσης	Κρίσιμη ιδιομορφή	Αντοχή κελύφους (kN)	Ποσοστό διαφοράς (%)	Μέγιστη αξονική φόρτιση (kN)	Ποσοστό διαφοράς (%)
Αρθρωτή	GNIA	Συνδυασμός	106.4	•	2096	•
		Με ακαριαίο λυγισμό	123.93	+17	2274	+8
		Euler	109.77	+3	2115	+1
	GMNIA	Συνδυασμός	97.18	•	1824	•
		Με ακαριαίο λυγισμό	123.93	+28	2274	+25
		Euler	99.54	+2	1167	-36

Πίνακας 5.2: Ποσοστά διαφορά για τους τρεις τύπους κρίσιμων ιδιομορφών του σφαιρικού κελύφους με καθολική ατέλεια 120mm

Τύπος σύνδεσης	Είδος ανάλυσης	Κρίσιμη ιδιομορφή	Αντοχή κελύφους (kN)	Ποσοστό διαφοράς (%)	Μέγιστη αξονική φόρτιση (kN)	Ποσοστό διαφοράς (%)
Αρθρωτή	GNIA	Συνδυασμός	104.32	•	2072	•
		Με ακαριαίο λυγισμό	111.4	+7	2068	-0.2
		Euler	109.77	+5	2115	+2
	GMNIA	Συνδυασμός	96.44	•	1824	•
		Με ακαριαίο λυγισμό	111.4	+15	2068	+13
		Euler	99.54	+3	1167	-36

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σχεδιασμός και η ανάλυση ενός δικτυωτού κελύφους βασίζεται σε μία μεθοδολογία βήμα προς βήμα. Στο σχεδιασμό πρέπει να ληφθούν υπόψη σημαντικοί συντελεστές που έχουν να κάνουν με τη γεωμετρία και την εμφάνιση του τελικού αποτελέσματος. Για παράδειγμα, κατά το σχεδιασμό ορίζεται ο τύπος του κελύφους, οι συντοριακές συνθήκες, ο τρόπος κατανομής των φορτίων, ο τρόπος σύνδεσης και άλλοι επιμέρους συντελεστές, ώστε να γίνει σωστά η μοντελοποίηση του φορέα. Ως αποτέλεσμα, η ανάλυση που ακολουθεί να μπορεί να παρουσιάσει τα επακριβείς αποτελέσματα για το κέλυφος που μελετάτε.

Σήμερα και με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών, οι μηχανικοί μπορούν εύκολα να εκτιμήσουν τα φορτία λυγισμού. Ωστόσο, οι αναλύσεις έχουν συγκεκριμένη πορεία (ακολουθείται μία σειρά αναλύσεων) ώστε να γίνει σωστή αξιολόγηση όλων των παραγόντων που επηρεάζουν την αντοχή. Εντούτοις, λόγω της πολυπλοκότητας των δικτυωτών κελυφών, πολλά προβλήματα είναι ακόμη υπό έρευνα, ιδίως όσον αφορά τη μέθοδο υπολογισμού της αντοχής λυγισμού των κελυφών, με αποτέλεσμα στο τέλος, η υλοποίηση του κελύφους να γίνεται πολύ συντηρητικά σε σχέση με τα φορτία δράσης.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αρχικά, γίνεται αναφορά σχετικά με όλους τους τύπους κελυφών. Στη συνέχεια, παρατίθεται αναλυτικότερα η διαδικασία υπολογισμού για τα μονόστρωτα σφαιρικά κελύφη και παρουσιάζεται μια αναλυτική εφαρμογή της σε ένα κέλυφος. Το μονόστρωτο κέλυφος που μελετάται έχει κυκλική βάση διαμέτρου 100m και ύψος 13.4m και συνδέεται στο υπόλοιπο δόμημα με αρθρωτές συνδέσεις. Αποτελείται από 6 όμοιους τομείς, όπου σχηματίζονται τρεις κορυφογραμμές των 20 μελών με κάθε μέλος να έχει μήκος 5.236m. Η γωνία καμπυλότητας του κελύφους είναι 30° και η ακτίνα καμπυλότητας 100m και έτσι η γωνία που σχηματίζουν δύο συνεχόμενα μέλη πάνω στην κορυφογραμμή είναι 3°. Όλα τα μέλη που αποτελούν το στατικό σύστημα του κελύφους έχουν σωληνωτή διατομή με διάμετρο 301mm και πάχος 5mm και είναι άκαμπτα συνδεδεμένα μεταξύ τους. Στη συνέχεια, η διατομή αυτή μεταβάλλεται, όπως επίσης και ο τρόπος σύνδεσης. Η ποιότητα του χάλυβα έχει μέτρο ελαστικότητας 205000000kPa, λόγο Poisson 0.3 και όριο διαρροής 235000kPa.

Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία ελέγχεται η απόκριση του σφαιρικού δικτυωτού κελύφους για ομοιόμορφη κατανομή της φόρτισης στους κόμβους του κελύφους, χωρίς να γίνεται η τήρηση των ορίων ασφαλείας που θέτει ο Ευρωκώδικας 1 για στατικά (ανομοιόμορφη κατανομή φόρτισης, θερμικά φορτία και φορτία ανέμου) και δυναμικά (σεισμός) φορτία που δρουν στο κέλυφος. Κυρίως, γίνεται μία αναλυτική παρουσίαση και επεξήγηση των παραμέτρων που αφορούν τη γεωμετρία του σφαιρικού

κελύφους και των σχέσεων που επηρεάζουν το φορτίο λυγισμού. Στο τέλος, επιλέγονται κατάλληλα οι παράμετροι που είναι απαραίτητοι για την ανάλυση. Οι παράμετροι αυτοί αφορούν την αρχική ατέλεια, τη κατανομή των φορτίων, το τρόπο σύνδεσης των μελών (άκαμπτες, ημίκαμπτες και αρθρωτές συνδέσεις) και την επιλογή των διατομών. Γενικά παρατηρείται ότι ο βαθμός επιρροής του μέτρου της καθολικής ατέλειας είναι αρκετά σημαντικός για κελύφη με άκαμπτες παρά με αρθρωτές συνδέσεις. Καθώς για την αλλαγή της απόκρισης του κελύφους με αρθρωτές συνδέσεις έπρεπε να αυξηθεί υπερβολικά το μέτρο της αρχικής ατέλειες.

Επιπλέον, διατυπώνεται ξεκάθαρα πως οι άκαμπτες συνδέσεις δημιουργούν ένα πιο δύσκαμπτο φορέα και η δυσκαμψία αυτή απεικονίζεται στα φορτία λυγισμού, καθώς είναι αρκετά μεγαλύτερα σε σχέση με άλλο τύπο σύνδεσης. Ο τρόπος σύνδεσης μεταβάλλει και το μηχανισμό αστοχίας, αφού σε δύο περιπτώσεις το σφαιρικό κέλυφος με ίδια χαρακτηριστικά, αποκρίνεται διαφορετικά. Με άκαμπτες συνδέσεις, η αστοχία προερχόταν από καθολικό ακαριαίο λυγισμό με έντονες παραμορφώσεις σε όλο το κέλυφος. Ενώ, με αρθρωτές συνδέσεις, η αστοχία ήταν τοπικός ακαριαίος λυγισμός σε μια περιοχή της δομής του φορέα, ενώ στο υπόλοιπο κέλυφος οι παραμορφώσεις ήταν ελάχιστες έως και μηδενικές. Στις αναλύσεις φαίνεται ότι για ρηχά αρθρωτά κελύφη, αποτελούμενα από μέλη με μικρή λυγηρότητα, η ποιότητα του χάλυβα δε διαδραματίζει σημαντικό ρόλο γιατί δεν εκδηλώνεται διαρροή του υλικού.

Οι μηχανισμοί αστοχίας που είναι εφικτοί να παρουσιαστούν από ένα μονόστρωτο σφαιρικό κέλυφος είναι ο ακαριαίος λυγισμός (καθολικός ή τοπικός), ο λυγισμός Euler σε ένα μεμονωμένο μέλος του κελύφους και η αστοχία του υλικού. Τέλος, στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας διενεργείται προσπάθεια για να εκδηλωθούν όλοι οι μηχανισμοί αστοχίας για μία διατομή, έτσι ώστε να διαφανεί η αλληλεπίδρασή τους. Συγκεκριμένα, τροποποιείται ο τρόπος σύνδεσης και αλλάζει η διατομή των μελών, έτσι ώστε να αυξηθεί η λυγηρότητα των μελών και να παρουσιαστεί ο λυγισμός Euler μέλους. Σύμφωνα με το λυγισμό αυτό, κατανέμεται και ατέλεια μέλους επιπρόσθετα με τη καθολική ατέλεια. Έτσι, προβάλλεται η επιρροή που έχουν οι δύο ατέλειες ξεχωριστά, αλλά και η αλληλεπίδρασή τους στο σφαιρικό δικτυωτό κέλυφος.

Για την υλοποίηση των αναλύσεων για τη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πρόγραμμα ADINA. Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για να οριστεί το γραμμικό φορτίο είναι η γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA), το ελαστικό φορτίο λυγισμού η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες (GNIA) και για το ελαστοπλαστικό φορτίο λυγισμού η μη γραμμική ανάλυση υλικού γεωμετρίας με ατέλειες (GMNIA). Αξίζει να σημειωθεί ότι η εργασία αυτή είναι κυρίως βασισμένη στο βιβλίο «Guide to Buckling Load Evaluation Of Metal Reticulated Roof Structures», το οποίο εξολοκλήρου ασχολείται με το σχεδιασμό και την ανάλυση δικτυωτών κελυφών.

6.2 ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κύρια αποτελέσματα της έρευνας σχετικά με το σφαιρικό δικτυωτό κέλυφος με ένα στρώμα τα οποία μπορούν να ληφθούν υπόψη για τον σχεδιασμό τέτοιου τύπου κελυφών είναι:

- Σε φορείς που αστοχούν λόγω μη γραμμικότητας υλικού, η παρουσία αρχικών ατελειών έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της φέρουσας ικανότητας λόγω ταχύτερης τοπικής πλαστικοποίησης των μελών των κρίσιμων διατομών από την εισαγωγή δευτερευουσών τάσεων. Δεν παρουσιάζεται πάντως ποιοτική μεταβολή της συμπεριφοράς, του τρόπου αστοχίας και της μορφής του δρόμου ισορροπίας για ελαστικό ή ανελαστικό υλικό.
- Το μέτρο της καθολικής ατέλεια που κατανέμεται πάνω στην επιφάνεια του κελύφους σύμφωνα με τη γραμμική ανάλυση λυγισμού, επηρεάζει σημαντικά την αντοχή του κελύφους μόνο όταν αυτό είναι με άκαμπτες συνδέσεις. Η επιρροή αυτή καθώς αυξάνεται το μέτρο της αρχικής ατέλειας γίνεται ακόμη εντονότερη, καθώς παρουσιαζόταν αυξημένη μείωση του φορτίου λυγισμού του δικτυωτού κελύφους.

- Στην περίπτωση όμως, με αρθρωτές συνδέσεις, η επιρροή ήταν ελάχιστη (κυρίως παρουσιαζόταν μικρή διαφορά στις αξονικές δυνάμεις και στις μετακινήσεις) αφού για τιμές αρχικής ατέλειας 30mm, 60mm και 120mm το φορτίο λυγισμού ήταν το ίδιο. Για να μπορέσει να παρουσιαστεί κάποια μεταβολή στο φορτίο λυγισμού του κέλυφος, έπρεπε η αρχική ατέλεια να αυξηθεί υπερβολικά σε σχέση με τις πιο πάνω τιμές.
- Ο μηχανισμός αστοχίας για το κέλυφος με μικρή λυγηρότητα μελών μεταβάλλεται με την αλλαγή του τρόπου σύνδεσης των μελών. Όταν οι συνδέσεις είναι άκαμπτες, ο μηχανισμός αστοχίας ήταν διαρροή του υλικού και ταυτόχρονα εκδηλωνόταν και ο καθολικός ακαριαίος λυγισμός με έντονες παραμορφώσεις σε όλο το φορέα. Ενώ, όταν οι συνδέσεις ήταν αρθρωτές, ο μηχανισμός αστοχίας ήταν ο τοπικός ακαριαίος λυγισμός με ελάχιστες παραμορφώσεις στο υπόλοιπο κέλυφος. Επίσης, η περιοχή ή το σημείο αστοχίας μεταβαλλόταν, όπου στην πρώτη περίπτωση ήταν στην κορυφή και στη δεύτερη περίπτωση χαμηλά στη βάση.
- Η ποιότητα του χάλυβα δεν είχε καθοριστικό ρόλο στην απόκριση του κελύφους με αρθρωτές συνδέσεις, ακόμη και όταν τα μέλη είχαν μικρή λυγηρότητα, γιατί οι μη γραμμικές αναλύσεις με ελαστικό και ανελαστικό υλικό έδωσαν τα ίδια αποτελέσματα. Οι τάσεις που αναπτύσσονται στο κέλυφος είναι μικρότερες από το όριο διαρροής και δεν αποτέλεσε αιτία αστοχίας.
- Με άκαμπτες συνδέσεις, ο ρόλος του υλικού ήταν καθοριστικός, αφού αποτελούσε ένα από τους μηχανισμούς αστοχίας. Στις αναλύσεις το υλικό με την αύξηση του φορτίου διαρρέει (δημιουργία πλαστικής άρθρωσης), με αποτέλεσμα να αναπτύσσει μεγαλύτερες παραμορφώσεις και να προκαλείται ταχύτερα ο καθολικός ακαριαίος λυγισμός. Έτσι, αν βελτιωνόταν η ποιότητα του χάλυβα στη συγκεκριμένη περίπτωση, θα είχε ως αποτέλεσμα το κέλυφος να μπορεί να παραλάβει μεγαλύτερα φορτία λυγισμού.
- Ο λυγισμός Euler σε ένα μεμονωμένο μέλος του κελύφους δεν μπόρεσε να εμφανιστεί όταν το κέλυφος ήταν με άκαμπτες συνδέσεις, ακόμη και στην περίπτωση που οι διατομές είχαν μικρή ροπή αδρανείας. Για να μπορέσει να εμφανιστεί ο μηχανισμός αυτός, έπρεπε να αλλάξει ο τρόπος σύνδεσης, για να αυξηθεί ο λόγος της λυγηρότητας λ_0 των μελών και επιπλέον ο συντελεστής ξ_0 να είναι μικρότερος από 5.
- Ο λυγισμός μέλους εκδηλωνόταν στις μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας με ελαστικό υλικό (καθώς δινόταν ατέλεια μέλους στον φορέα). Όμως, με ανελαστικό υλικό, η διαρροή του χάλυβα παρουσιαζόταν πριν να εκδηλωθεί ο λυγισμός μέλους. Η διαφορά στα φορτία αστοχίας ανάμεσα στις δύο αναλύσεις ήταν μικρή, έτσι με λίγο βελτιωμένη ποιότητα χάλυβα, ίσως ο λυγισμός Euler μέλους να αποτελούσε τον μηχανισμό αστοχίας για το μονόστρωτο σφαιρικό κέλυφος.
- Τα τρία είδη ιδιομορφών που παρουσιάστηκαν κατά της γραμμικές αναλύσεις είναι (1) με καθολική παραμόρφωση (2) με τοπική ή dimple παραμόρφωση και (3) με λυγισμό μέλους Euler. Ο μηχανισμός αστοχίας με καθολικό ακαριαίο λυγισμό παρουσιαζόταν στις άκαμπτες συνδέσεις, ενώ οι άλλοι μηχανισμοί στις αρθρωτές. Για να μπορέσει να παρουσιαστεί αλληλεπίδραση των δύο μορφών αστοχίας (λυγισμό μέλους και τοπικό ακαριαίο λυγισμό), έπρεπε τα γραμμικά φορτία λυγισμού τους να είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, διαφορετικά υπερίσχυε ο μηχανισμός με το μικρότερο φορτίο.
- Επίσης για να μπορεί να υπάρξει αλληλεπίδραση του λυγισμού μέλους και του τοπικού ακαριαίου λυγισμού, έπρεπε ο τοπικός λυγισμός (dimple) να εκδηλωθεί στην κορυφή του κελύφους. Αν εκδηλωνόταν σε οποιοδήποτε άλλο σημείο, τότε ο τρόπος αστοχίας ήταν σύμφωνα με τον ακαριαίο λυγισμό.
- Η αλληλεπίδραση, όμως, για το φορέα αυτό με ομοιόμορφη φόρτιση δεν ήταν αισθητή. Η διαφορά ανάμεσα στα φορτία για τις δύο περιπτώσεις με ατέλεια μέλους και το συνδυασμό τους ήταν ελάχιστη (εκτός από την περίπτωση με καθολική ατέλεια). Για να αυξηθεί κάπως αυτή η διαφορά

έπρεπε να αυξηθεί το μέτρο της καθολικής ατέλειας, αλλά όχι υπερβολικά, γιατί υπερίσχυε ο τοπικός ακαριαίος λυγισμός.

6.3 ΜΕΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ

Σκοπός της παρούσας έρευνας ήταν να διαπιστωθεί ο βαθμός επιρροής του μέτρου της καθολικής ατέλειας και επιπλέον να διαφανεί η αλληλεπίδραση των δύο τύπων γεωμετρικών ατελειών (καθολική και κύρτωση μέλους) στο μονόστρωτο σφαιρικό κέλυφος. Μέσα από αυτή την έρευνα δημιουργήθηκαν καινούργια ερωτήματα σχετικά με την απόκριση του κελύφους και τις διαφορές που θα παρουσίαζε από τις αναλύσεις που ήδη πραγματοποιήθηκαν, αν κάτι άλλο μεταβαλλόταν για τον φορέα. Έτσι, για μελλοντικές έρευνες προτείνονται μερικές αναλύσεις που θα έχουν σίγουρα ενδιαφέρον για εξεύρεση απαντήσεων και ίσως βοηθήσουν και για την εξαγωγή καλύτερων συμπερασμάτων για την πραγματοποιούσα έρευνα.

Επειδή σε όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν η φόρτιση ήταν ομοιόμορφη κατανομή των συγκεντρωτικών φορτίων στους κόμβους, μια αρκετά ενδιαφέρουσα κατάσταση είναι να αναλυθεί ο φορέας για διάφορες καταστάσεις φόρτισης. Έτσι, με ασύμμετρη κατανομή των φορτίων ή και την προσθήκη ακόμα επιπλέον συγκεντρωμένων φορτίων στα σημεία όπου παρουσιάζονται οι μηχανισμοί αστοχίας, θα μπορεί να διαφανεί ο βαθμός επιρροής στην αντοχή του κελύφους για διάφορες περιπτώσεις φορτίσεων.

Ένας συντελεστής ο οποίος δεν τροποποιήθηκε στην υπάρχουσα εργασία είναι η γωνία θ_0 . Η μεταβολή αυτής της γωνίας πραγματοποιείται με την αλλαγή του φορέα καθώς θα τροποποιηθεί είτε το ύψος και το άνοιγμα του κελύφους είτε αλλάζοντας το μήκος των μελών, δημιουργώντας άλλο φορέα κάθε φορά. Έτσι, θα μπορεί να οριστεί μέσω έρευνας σε τι βαθμό επηρεάζει η γωνία αυτή την αντοχή του κελύφους.

Οι περιπτώσεις που αναλύθηκε ο φορέας στην έρευνα αυτή ήταν για τις ακραίες περιπτώσεις δυσκαμψίας στις συνδέσεις, για άκαμπτες ($\kappa=\infty$) και για αρθρωτές ($\kappa=0$). Για το λόγο αυτό είναι επιθυμητό να γίνουν μελλοντικά, έρευνες για ημιάκαμπτες συνδέσεις, μεταβάλλοντας σε κάθε περίπτωση το βαθμό δυσκαμψίας, έτσι ώστε να μπορεί να προβληθεί η απήχησή του στο μονόστρωτο κέλυφος. Επιπλέον, σε αυτό το κέλυφος, σε περιπτώσεις όπου ο μηχανισμός αστοχίας ήταν λόγω του υλικού, θα μπορούσε να αυξηθεί η ποιότητα για να διαφανεί τελικά τι άλλος μηχανισμός μπορούσε να εκδηλωθεί.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] IASS, "Guide to buckling loads evaluations of metal reticulated roof structures", Editors: S. Kato and co-editors, 2013.
- [2] D. T. Wright, "Membrane Forces and Buckling in Reticulated Shells", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.91, No.ST1, pp.173-201, 1065.
- [3] IASS W.G.8, "Analysis, Design & Construction of Space Frames", Bulletin of IASS XXV, 1/2, 84/85, 1984.
- [4] L. Kollar and E. Dulacska, "Buckling of Shells for Engineers, John Wiley & Sons", 1984.
- [5] S. Z Shen and X Chen, "Stability of Steel Reticulated Shells", "The Science Publisher", Beijing, China, 1999.
- [6] Architectural Institute of Japan, "Buckling and Strength of Latticed Shells", Architectural Institute of Japan, 2010.
- [7] T. Ueki, "Study on the Buckling Behavior and Design Procedure for Single Layer Reticular Domes Utilizing Systematized Trusses", Ph.D Dissertation, Toyohashi University of Technology, 1993.
- [8] T. Ueki, Y. Mukaiyama, I. Kubodera and S. Kato, "Buckling Behavior of Single Layered Domes Composed of Members with Axial and Bending Springs at Both Ends", Proceedings of IASS 1989 Congress, Madrid, Vol.4, 1989.
- [9] I. Mutoh and S. Kato, "Comparison of buckling loads between single-layer lattice domes and spherical shells", Space Structures 4, Editors: G A R. Parke and C M. Howard, Guildford Conf., The Telford London, pp.176-185, 1993.
- [10] N. C. Lind, "Local Instability Analysis of Triangulated Dome Framework", The Structural Engineer, Vol.47, No.8, August 1969.
- [11] S. Kato and K. Ishikawa, "On Elastic-Plastic Buckling of a Reticular Dome of Single Layer on a Hexagonal Plan", Proc. IASS-MSU Symposium, pp.515-526.1988.
- [12] A. Lopez, I. Puente and M. A. Serna, "Buckling Loads of Semi-Rigidly Jointed Single Layer Latticed Domes", Proceedings of IASS-APCS 2003, pp.132-133, 2003.
- [13] S. Kato, I. Mutoh and M. Shomura, "Effect of Joint Rigidity on Buckling Strength of Single

- Layer Lattice Domes”, Proceedings of IASS-ASCE International Symposium, pp.468-477 1994.
- [14] S. Kato, I. Mutoh and M. Shomura, “Collapse of semi-rigidly jointed domes with initial geometric imperfections”, J. of Constructional Steel Research 48, pp.145-168, 1998.
- [15] H. H. Ma, F. Fan and S. Z. Shen, “Numerical Parametric Investigation of Single-layer Latticed Domes with Semi-rigid Joints”, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, Vol.49, No.2, n.158, pp.99-110, 2008.
- [16] H. H. Ma, F. Fan, Z. Cao, M. Cui and S. Z. Shen, “Numerical Simulation of Semi-rigid joints in Single-layer dome structures”, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, Vol.52, No.1, n.167, pp.3-18, 2011.
- [17] S. Kato, M. Fujimoto and T. Ogawa, “Buckling Load of Steel Single-Layer Reticulated Domes of Circular Plan”, Journal of IASS, Vol.46, pp.41-43, 2005.
- [18] S. Kato and M. Shomura, “Effects of Joint Rigidity on Buckling Load of Single Layer Reticular Domes on Circular Plan”, Journal of Struct. Constr. Eng., AIJ, No.465, pp.97-107, 1994.
- [19] M. Murakami and K. Heki, “On the analysis of elastic buckling of single-layer latticed domes with regular hexagonal plan under gravity load”, Proceedings of IASS 1991 Symposium, Copenhagen, Vol.3, pp.101-108, 1991.
- [20] M. Murakami, “Numerical Analysis of Elastic Buckling of Single-Layer Latticed Domes under Gravity Load”, Proceedings of IASS-CSCE on Innovative Large Span Structures, Vol.2, pp.576-586, 1992.
- [21] M. Shomura, “Analytical Study on the Buckling Strength for Single Layer Reticular Dome with Semi-Rigid Joints and Its Application for estimation of the Dome Buckling strength”, Ph.D Dissertation, Toyohashi University of Technology, 1996.
- [22] IASS W.G.5, “Recommendations for Reinforced Concrete Shells and Folded Plates”, IASS, 1979.
- [23] T. Ueki, I. Kubodera and S. Kato, “Single Layer Lattice domes using Systematized Semi-rigid Joints”, Proceedings of IASS 40th Anniversary Congress, Madrid, vol.1, pp.B1.69-76, 1999.
- [24] T. Ueki, Y. Matsue, S. Kato and S. Yamada, “Loading Test and Elasto-Plastic Buckling Load of Unit Single Layer Latticed Domes”, Journal of Struct. Constr. Eng., No.452, pp.67-77, 1993.
- [25] M. Fujimoto, T. Saka, K. Imai and T. Morita, “Experimental and numerical analysis of the buckling of a single-layer latticed domes”, Space Structures 4, Thomas Telford London, Vol.1, pp.396-405, 1993.
- [26] T. Takeuchi, H. Nakamura and T. Ogawa, “Buckling and Seismic Response of Grid Shell with Cylindrical Joints”, Proceedings of IABSE-IASS 2011, CD-ROM, p.59, 2011.
- [27] M. Yamada, H. Yamamoto, W. Li and J. H. Mok, “On the Effect of Joint Flexibility and Loading Conditions on the Buckling Characteristics of Single-Layer Latticed Domes”, Proceedings of IASS 1989 Congress, Madrid, Vol.4, 1989.
- [28] F. Fan, J. Yan and Z. Cao, “Elasto-plastic stability of single-layer reticulated domes with initial curvature of members”, Thin-walled Structures, Vol.60, pp.239-246, 2012.

- [29] T. Ueki, Y. Mukaiyama, M. Shomura and S. Kato, "Loading Test and Elasto-Plastic Buckling Analysis of a Single Layer Latticed Dome", *Journal of Struct. Constr.Engng, AIJ*, No.421, pp.117-128, 1991.
- [30] T. Ueki, I. Kubodera, F. Matsushita and S. Kato, "A new Approach to the Design of a Single Layer Reticulated Dome Testing of Ball-Type Rigid Joints and Construction of a Dome", *Proceedings of IASS 1989 Congress, Madrid, Vol.4*, 1989.
- [31] M. Uros, D. Lazarevic and P. Gidak, "Interaction of member and node instability in the single layer reticulated shell", *Proceedings of IABSE-IASS 2011, CD-ROM* pp.168, 2011
- [32] F. Fan, J. Yan, Z. Cao and Q. Zhou, "Calculation methods of stability of single-layer reticulated domes considering the effect of initial bending of members", *Proceedings of IASS*, pp.339-347, 2010.
- [33] J. Yan, F. Fan, Z. Cao and S. Z. Shen, "Judgment of Member Buckling in the Stability Analysis of Reticulated Shells", *Proceedings of IASS-APCE, CD-ROM* p.426, Paper Number FF620, 2012.
- [34] I. M. Kani and R. E. McConnel, "Collapse and Post-Collapse Analysis of Shallow Lattice Domes", *Proceedings of IASS 1986, Vol.3*, pp.105-112, 1986.
- [35] F. Fan, J. Yan and Z. Cao, "Stability of reticulated shells considering member buckling", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.77, pp.32-42, 2013.
- [36] F. Fan, J. Yan and Z. Cao, "Approach of Stability of Single-Layer Reticulated Domes with Initial Curvature to Members", *Advanced Science Letters*, Vol.4, pp.1-8, 2011.
- [37] T. Ogawa and M. Kuwada, "Elasto-plastic Buckling Behaviour of Rigidly Jointed Single-Layer Latticed Domes", *Proceedings of IASS 1998 International Symposium, Sidney, vol.1*, pp.460-467,1998.
- [38] E Dulacska and L Kollar, "Buckling Analysis of Reticulated Shells", *Space Structures Vol.15, Nos.3 & 4*, pp.195-203, 2000.
- [39] T. Saka and K. Heki, "The Effect of Joints on the Strength of Space Trusses", *Proceedings of the 3rd International Conference on space Structures, Editors: H. Nooshin, Elsevier Applied Science Publishers*, pp.417-422, 1984.
- [40] T. Nishimura, K. Morisako and S. Ishida, "Numerical Analysis of Rotational Buckling in Gusset Plate Type Joint of Timber Lattice Dome under Several Loading Conditions", *Proceedings of IASS Colloquium on Computation of Shell & Spatial Structures*, 1997, pp.426-431, 1997.
- [41] K. Oda and Y. Hangai, "Snap-through Buckling and Torsional Buckling of Joint of Single Layer Lattice Shell", *Proceedings of IASS-CSCE on Innovative Large Span Structures*, 1992, Vol.2, pp.487-496, 1992.
- [42] R. Shibata, S. Kato and S. Yamada, "Experimental study on the ultimate strength of single-layer reticular domes", *Space Structures 4, Thomas Telford London, Vol.1*, pp.387-395 1993.
- [43] T. Takeuchi, H. Nakamura and T. Ogawa, "Buckling and Seismic Response of Grid Shell with Cylindrical Joints", *Proceedings of IABSE-IASS 2011, CD-ROM*, p.59, 2011.
- [44] S. Kato, H. Takashima and R. Shibata, "Effects of geometrical initial imperfections, relaxation at connectors and additional loads on ultimate strength of a semi-rigid jointed

single layer reticular dome”, Proceedings 3dr Summer Coll. On Shell and Spatial Structures, Taegu, pp.481-492, 1990.

- [45] Y. Hangai, K. Kondoh, K. Oda and S. Ohya, “Load Carrying Test of a Wood Lattice Dome for Expo’90 Osaka”, Proceedings of IASS-CSCE on Innovative Large Span Structures, Vol.1, pp.648-656, 1992.
- [46] Ι. Ερμόπουλος, “Ευρωκώδικας 1: Βασικές αρχές σχεδιασμού και δράσεις επί των κατασκευών”, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, Ελλάδα, 2005.
- [47] Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος και Γ. Ιωαννίδης, “Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα με παραδείγματα εφαρμογής”, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, Ελλάδα, 2014.
- [48] <http://www.skyscrapercity.com>
- [49] <http://www.wikipedia.org>
- [50] <http://www.gettyimages.com>
- [51] <http://www.omaha.com>
- [52] <http://www.dreamstime.com>