

Διπλωματική Εργασία:

Μελέτη λυγισμικής απόκρισης δεξαμενών υπό ανομοιόμορφη θερμική καταπόνηση μέσω μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων



Φοιτήτρια: **Κεφάκη Μαρία-Αλεξάνδρα**

Επιβλέπουσα: **Ο. Παναγούλη**

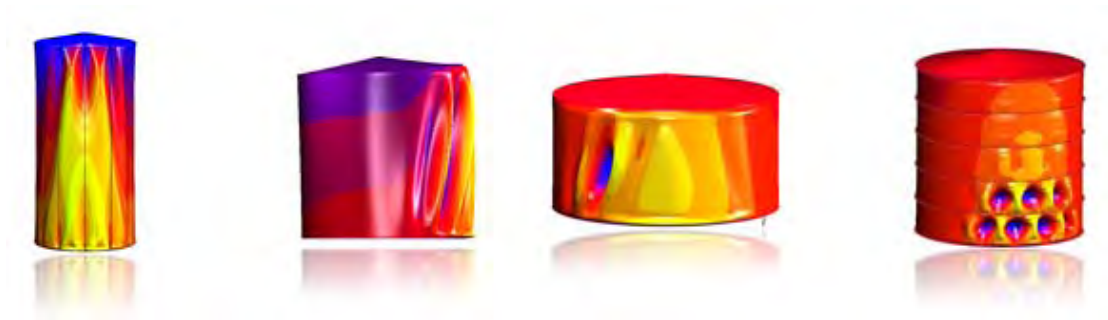




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

Μελέτη λυγισμικής απόκρισης δεξαμενών υπό ανομοιόμορφη θερμική καταπόνηση μέσω μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων



Κεφάκη Μαρία-Αλεξάνδρα

Επιβλέπων: Ε. Μυστακίδης, Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών
Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Συνεπιβλέπουσα: Δ. Παντούσα, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Συνεπιβλέπων: Κ. Τζάρος, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Βόλος, Οκτώβριος 2016

Περιεχόμενα

1° ΚΕΦΑΛΑΙΟ	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ - ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	1
2° ΚΕΦΑΛΑΙΟ	4
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	4
2.1 Προσομοίωση της πυρκαγιάς σε περίπτωση φλεγόμενης δεξαμενής	4
2.2 Μεταφορά θερμότητας	6
Μεταφορά με αγωγή	6
Μεταφορά με συναγωγή	7
Μεταφορά με ακτινοβολία	8
2.3 Λυγισμός κελυφωτών κατασκευών υπό θερμική καταπόνηση (Thermal Buckling of Shell Structures)	10
Ο λυγισμός ως φυσικό φαινόμενο	11
Λυγισμός κατασκευών λόγω θερμικής καταπόνησης (Thermal Buckling)	12
2.4 Βιβλιογραφική Επισκόπηση	17
2.5 Κανονιστικό πλαίσιο	19
3° ΚΕΦΑΛΑΙΟ	20
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	20
4° ΚΕΦΑΛΑΙΟ	24
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	24
4.1 Φυσικό πρόβλημα	24
4.2 Δεξαμενές που εξετάστηκαν	25
4.3 Η θερμική φόρτιση	26
5° ΚΕΦΑΛΑΙΟ	28
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	28
5.1 Εισαγωγή στα πεπερασμένα στοιχεία	28
5.2 Περιγραφή του αριθμητικού προσομοιώματος	29
Διακριτοποίηση	30
Φόρτιση λόγω ιδίου βάρους οροφής	32
Φόρτιση λόγω θερμότητας	33
5.3 Είδη αναλύσεων	35

6° ΚΕΦΑΛΑΙΟ	39
ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ– ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	39
6.1 Δεξαμενή διαστάσεων 20x20.....	40
6.2 Δεξαμενή διαστάσεων 10x20.....	43
6.3 Δεξαμενή διαστάσεων 40x20.....	44
6.4 Δεξαμενή διαστάσεων 20x40.....	45
7°ΚΕΦΑΛΑΙΟ	46
ΛΥΓΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΤΕΛΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΤΕΛΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΥΠΟ ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ.....	46
Εισαγωγή	46
7.1 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΤΕΛΕΙΟΥ ΦΟΡΕΑ- ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 20Χ20.....	47
7.1.1 Αριθμητική διαδικασία και βέλτιστοι αλγόριθμοι επίλυσης	47
7.1.2 Περιγραφή αποτελεσμάτων τυπικής δεξαμενής 20x20.....	49
7.1.3 Μελέτη της επιρροής των συνοριακών συνθηκών της οροφής στην απόκριση της δεξαμενής 20x20.	66
7.2 ΛΥΓΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ (HxD=10x20, 40x20, 20x40)	70
7.2.1 Δεξαμενή 10x20	70
7.2.2 Δεξαμενή 40x20	78
7.2.3 Δεξαμενή 20x40	81
7.3 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΑΤΕΛΟΥΣ ΦΟΡΕΑ	85
7.3.1 Λυγισμική απόκριση της τυπικής ατελούς δεξαμενής 20x20	86
7.3.1 I Δεξαμενή 20x20 με αρχικές ατέλειες της 1ης ιδιομορφής λυγισμού	87
7.3.1 II Δεξαμενή 20x20 με αρχικές ατέλειες της 7 ^{ης} ιδιομορφής λυγισμού	96
8°ΚΕΦΑΛΑΙΟ	99
ΛΥΓΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΤΕΛΕΙΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ (STIFFENED)ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ.....	99
Εισαγωγή	99
8.1 Αριθμητική προσομοίωση τεχνικών ενίσχυσης	100
Οριζόντιοι δακτύλιοι.....	100
Κατακόρυφοι δακτύλιοι	102
Μεταβαλλόμενο πάχος κυλινδρικού κελύφους.....	103
8.2 Ενισχυμένη δεξαμενή διαστάσεων 20x20	104
Ενίσχυση με οριζόντιους δακτυλίους.....	104
Ενίσχυση με κατακόρυφα επίπεδα ελάσματα	109

Ενισχυμένη με μεταβαλλόμενο πάχος κυλινδρικού κελύφους	111
8.3 Ενισχυμένη δεξαμενή διαστάσεων 10x20	113
8.4 Ενισχυμένη δεξαμενή διαστάσεων 40x20	115
8.5 Ενισχυμένη δεξαμενή διαστάσεων 20x40	117
9^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ	119
ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	119
Βιβλιογραφία	121

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ - ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Οι ισχύοντες κανονισμοί (API 650, NFPA 30, ΦΕΚ 846/Β/31-12-90) προβλέπουν ενεργητικά μέτρα πυροπροστασίας ώστε να εξασφαλίσουν την αποφυγή εκδήλωσης και εξάπλωσης της πυρκαγιάς στις εγκαταστάσεις δεξαμενών αποθήκευσης υγρών υδρογονανθράκων που αποτελούν σημαντικό τμήμα των διυλιστηρίων, βιομηχανικών μονάδων και στους τερματικούς σταθμούς αποθήκευσης πετρελαιοειδών. Ο δομικός σχεδιασμός των δεξαμενών για θερμική φόρτιση δεν περιλαμβάνεται στους τρέχοντες κανονισμούς. Παρά τις αυστηρές διατάξεις των κανονισμών τα περιστατικά εμφάνισης πυρκαγιών σε δεξαμενές δεν έχουν εξαλειφθεί. Η πιο καταστροφική πυρκαγιά δεξαμενών έχει καταγραφεί το 2005 στις εγκαταστάσεις δεξαμενών αποθήκευσης καυσίμων στο Buncfield, βόρεια του Λονδίνου (Εικόνα 1.1). Το περιστατικό προκάλεσε παγκόσμια ανησυχία εφόσον ήταν η πιο μεγάλη πυρκαγιά που έχει καταγραφεί στην Ευρώπη και ανέδειξε τους τεράστιους κινδύνους που απορρέουν από πυρκαγιές αυτού του τύπου. Επιπλέον, αποτέλεσε αφορμή για περαιτέρω έρευνα στον πεδίο αυτό ώστε να αποκαλυφθούν οι μηχανισμοί που προκαλούν την έκρηξη και τη μετάδοση της πυρκαγιάς (Johnson 2010, Sengurta 2010, Landucci 2009). Επιπρόσθετα, μια σημαντική πυρκαγιά έλαβε χώρα πρόσφατα σε χώρα εγκατάστασης δεξαμενών στο Κίεβο (Εικόνα 1.2) κατά τη διάρκεια της οποίας σημειώθηκαν πολλαπλοί τραυματισμοί και θάνατοι πυροσβεστών και δόθηκαν στη δημοσιότητα αναφορές για τις τεράστιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 1.1: Πυρκαγιά σε χώρο εγκατάστασης δεξαμενών στο Buncfield



Εικόνα 1.2: Πυρκαγιά που σημειώθηκε στο Κίεβο

Οι δεξαμενές που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση υγρών υδρογονανθράκων κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την πίεση λειτουργίας και το σύστημα της οροφής που εγκαθίσταται. Συγκεκριμένα, οι δεξαμενές που λειτουργούν σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να λειτουργούν ανοιχτές (open roof), με πλωτή οροφή (floating roof) ή και με σταθερή οροφή (fixed roof). Οι δεξαμενές πλωτής οροφής συνιστανται για αποθήκευση προϊόντων με χαμηλότερο της θερμοκρασίας περιβάλλοντος σημείο ανάφλεξης και χρησιμοποιούνται κυρίως για την αποθήκευση ελαφρών κλασμάτων πετρελαίου και βενζινών, αργού πετρελαίου και ελαφρών πολικών χημικών ενώσεων (αλκοόλες, κετόνες κτλ). Οι δεξαμενές σταθερής οροφής χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση βαρύτερων κλασμάτων πετρελαίου (πχ ντίζελ και μαζούτ) με σημείο ανάφλεξης υψηλότερο της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Σύμφωνα με διαθέσιμα στοιχεία της βιβλιογραφίας οι δεξαμενές πλωτής οροφής, περιορίζουν στο ελάχιστο τις απώλειες και τη διαφυγή πτητικών προϊόντων στο περιβάλλον και θεωρούνται ο πιο ασφαλής τρόπος αποθήκευσης όσον αφορά την πυρασφάλεια, όμως η χρήση τους είναι μάλλον περιορισμένη. Γι' αυτό, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στις δεξαμενές σταθερής οροφής.

Η εκδήλωση μιας πυρκαγιάς στον χώρο εγκατάστασης δεξαμενών μπορεί να προκληθεί από διάφορα αίτια όπως λειτουργικά σφάλματα, αστοχία εξοπλισμού, πτώση κεραυνού, ελλιπής συντήρηση, στατικός ηλεκτρισμός κτλ. Η πυρκαγιά μπορεί να περιοριστεί σε μια δεξαμενή αλλά υπάρχει και πιθανότητα να εξαπλωθεί σε γειτονικές δεξαμενές λόγω διαρροής καυσίμων αλλά και λόγω της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Στην περίπτωση αυτή εκδηλώνεται μια πυρκαγιά «τύπου λίμνης» (pool fire) και το φαινόμενο περιορίζεται μόνο μέσω τον αναχωμάτων μέσα στα οποία κατασκευάζονται οι δεξαμενές και αυτό είναι το πιο καταστροφικό σενάριο.

Στην περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς σε δεξαμενή αποθήκευσης υδρογονανθράκων με σταθερή οροφή, μπορεί να σημειωθεί έκρηξη εφόσον συντρέχουν οι κατάλληλες προϋποθέσεις. Σε αυτή την περίπτωση είτε θα εκτιναχθεί η οροφή της δεξαμενής είτε θα αστοχήσει η σύνδεση οροφής με το κέλυφος, και θα συνεχιστεί η καύση όλη της ποσότητας του καυσίμου που είναι αποθηκευμένο. Η πυρκαγιά θα διαρκέσει όσο απαιτείται για να καεί το περιεχόμενο της δεξαμενής (1 έως 3 ημέρες) καθώς η κατάσβεση είναι πολύ δύσκολη. Στην περίπτωση που δεν γίνει διάδοση της πυρκαγιάς (είτε μέσω διαρροής καύσιμης ύλης είτε από επακόλουθη έκρηξη σε μια γειτονική δεξαμενή), η φλεγόμενη αυτή δεξαμενή αποτελεί θερμική πηγή για τις γειτονικές δεξαμενές. Η θερμότητα μεταφέρεται στις γειτονικές δεξαμενές κυρίως μέσω ακτινοβολίας. Στη συνέχεια εξετάζεται τι συμβαίνει σε μια γειτονική δεξαμενή. Η θερμότητα που μεταφέρεται μέσω ακτινοβολίας από τη φλεγόμενη δεξαμενή, θα μεταφερθεί μέσω των τοιχωμάτων τόσο στο υγρό που είναι αποθηκευμένο όσο και στο αέριο που υπάρχει στον κενό χώρο της δεξαμενής. Αρχικά η

θερμότητα που απορροφά το υγρό θα μεταφερθεί μέσω φυσικής συναγωγής (natural convection) σε όλο τον όγκο του υγρού. Η αύξηση της θερμοκρασίας του υγρού προκαλεί την ατμοποίηση του και αυτό οδηγεί στην αύξηση της συγκέντρωσης των προϊόντων ατμοποίησης στον αέρα που βρίσκεται πάνω από το υγρό. Παράλληλα αυξάνεται η θερμοκρασία του αερίου με πιο μεγάλο ρυθμό (λόγω μεγαλύτερου συντελεστή θέρμανσης) με αποτέλεσμα και την αύξηση της πίεσης. Στην περίπτωση που η αναλογία εκρηκτικού μίγματος/αέρα ξεπεράσει το όριο ανάφλεξης (flammability limit) θα σημειωθεί έκρηξη και θα ξεκινήσει η καύση όλου του περιεχομένου της δεξαμενής. Εάν η συγκέντρωση του αερίου είναι μικρή και δεν προκληθεί ανάφλεξη, θα ενεργοποιηθεί η βαλβίδα εκτόνωσης που είναι εγκατεστημένη στη δεξαμενή. Η πιθανότητα της ανάφλεξης εξαρτάται επομένως από το υγρό που είναι αποθηκευμένο αλλά και από την απόσταση της δεξαμενής που εξετάζουμε από την πηγή της θερμότητας.

Πολλοί ερευνητές έως σήμερα έχουν ασχοληθεί με τα φαινόμενα που εμπλέκονται στην εκδήλωση και την επέκταση της πυρκαγιάς με σκοπό να γίνει αναθεώρηση των κανονιστικών διατάξεων σχετικά με τις αποστάσεις ασφαλείας των δεξαμενών και τα ενεργητικά μέτρα πυροπροστασίας (Wang and Sun 2013, Fontenelle 2012, Sengupta 2010). Αντιθέτως, η δομική συμπεριφορά των δεξαμενών έχει ερευνηθεί ελάχιστα (Batista and Godoy, 2012 & Godoy and Batista, 2013).

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το θερμοκρασιακό πεδίο του κελύφους της δεξαμενής που δέχεται την θερμική ακτινοβολία είναι μη-ομοιόμορφο τόσο καθ' ύψος και κατά την περιφέρεια της και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι η θέση της φλεγόμενης δεξαμενής, η μεταξύ τους απόσταση, οι διάμετροι των δεξαμενών, ο τύπος του καυσίμου που φλέγεται, η κατεύθυνση του ανέμου κτλ. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του πιο θερμού και του πιο ψυχρού τμήματος της δεξαμενής, είναι μεγάλη και σημαντικές θλιπτικές δυνάμεις εμφανίζονται στο κέλυφος της δεξαμενής λόγω της παρεμποδιζόμενης θερμικής διαστολής. Οι θλιπτικές αυτές τάσεις που εμφανίζονται σε συνδυασμό με το μειωμένο μέτρο ελαστικότητάς του χάλυβα στις υψηλές θερμοκρασίες, μπορούν να οδηγήσουν σε λυγισμό του κελύφους της δεξαμενής (thermal buckling).

Βασικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να μελετήσει τη θερμομηχανική συμπεριφορά δεξαμενής (δεξαμενή στόχος) που δέχεται ανομοιόμορφη θερμική φόρτιση λόγω ακτινοβολίας από μια πυρκαγιά σε γειτονική δεξαμενή (πηγή). Το πρόβλημα επιλύεται αριθμητικά με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων ,μέσω του κώδικα μη γραμμικής ανάλυσης MSC Marc. Η εργασία επικεντρώνεται στην περίπτωση που η δεξαμενή είναι κενή (χωρίς την παρουσία του υγρού καυσίμου). Στόχος είναι να διερευνηθούν οι μηχανισμοί που οδηγούν στην αστοχία (λυγισμός κυλινδρικού κελύφους) καθώς και να υπολογιστεί η κρίσιμη θερμοκρασία στην οποία εμφανίζεται. Μελετώνται δεξαμενές με διαφορετική λυγηρότητα (λόγος ύψους προς διάμετρο) ώστε να διερευνηθεί ταυτόχρονα και η επιρροή της στα φαινόμενα αστάθειας που εμφανίζονται στο κυλινδρικό κέλυφος. Επιπρόσθετα μελετάται η επιρροή κάποιων σημαντικών παραγόντων στην λυγισμική απόκριση της δεξαμενής που είναι οι συντοριακές συνθήκες του κυλινδρικού κελύφους και οι αρχικές γεωμετρικές ατέλειες. Τέλος, εξετάζεται η συμπεριφορά ενισχυμένων δεξαμενών. Στόχος είναι να μελετηθεί η αποτελεσματικότητα τεχνικών ενίσχυσης που συνήθως χρησιμοποιούνται στην κανονική θερμοκρασία (δακτύλιοι και μεταβλητός πάχος τοιχωμάτων δεξαμενής) για την περίπτωση της δεξαμενής υπό μη-ομοιόμορφη θερμική φόρτιση.

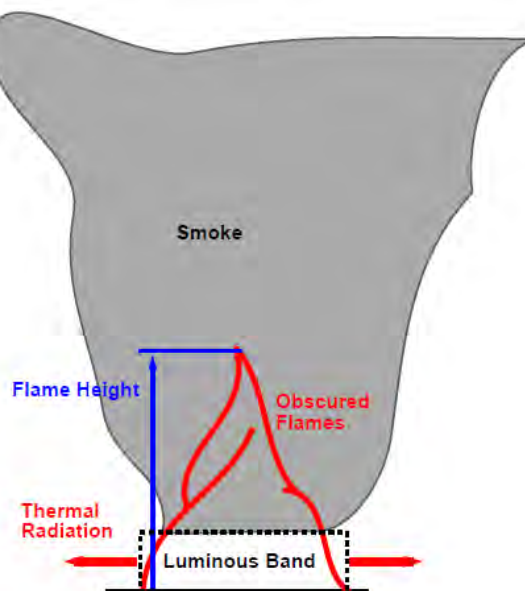
2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Το φυσικό πρόβλημα που εξετάζεται στα πλαίσια αυτής της εργασίας εμπίπτει σε τρεις επιστημονικές περιοχές. Η πρώτη περιλαμβάνει την προσομοίωση της πυρκαγιάς «τύπου λίμνης», η δεύτερη είναι η μετάδοση θερμότητας ενώ η τρίτη είναι ο λυγισμός των λεπτότοιχων χαλύβδινων κελυφών υπό μη-ομοιόμορφη θερμοκρασιακή φόρτιση. Στη συνέχεια δίνεται μια συνοπτική περιγραφή του θεωρητικού υπόβαθρου και για τα τρία επιστημονικά πεδία. Τέλος παρατίθεται μια σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση και το υπάρχον κανονιστικό πλαίσιο

2.1 Προσομοίωση της πυρκαγιάς σε περίπτωση φλεγόμενης δεξαμενής

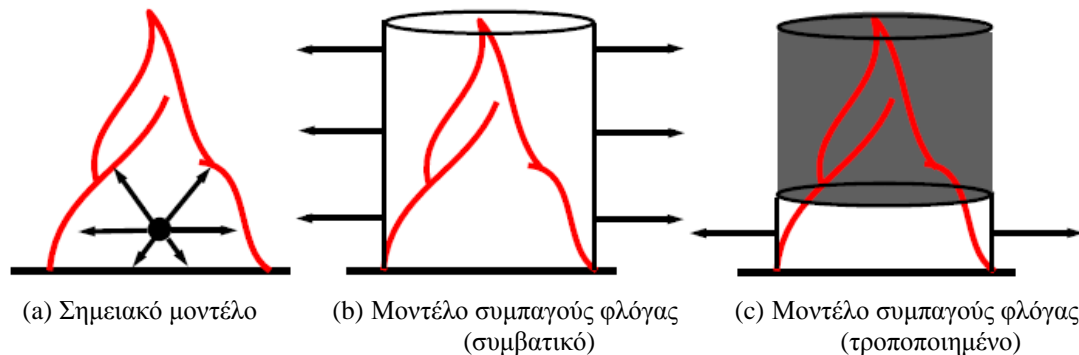
Η πυρκαγιά «τύπου λίμνης» ορίζεται ως μια φλόγα διάχυσης σε συνθήκες άνωσης που δημιουργείται από αέριο ή υγρό ρευστό. Το σώμα της φλόγας είναι τυχαίας γεωμετρίας αλλά για λόγους απλοποίησης πολλοί ερευνητές το θεωρούν κυλινδρικό, κωνικό κτλ. Τα βασικά χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς «τύπου λίμνης» είναι ο ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας, ο ρυθμός επέκτασης της φλόγας και η ενέργεια που ακτινοβολείται. Το φαινόμενο επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, τον άνεμο κτλ. Σε πυρκαγιές μεγάλης διαμέτρου, περίπου το 20% της μάζας του καυσίμου μετατρέπεται σε καπνό το οποίο σκιάζει την φλόγα που ακτινοβολεί. Η Εικόνα 2.1 δίνει μια σχηματική απεικόνιση της πυρκαγιάς «τύπου λίμνης».



Εικόνα 2.1: Σχηματική απεικόνιση πυρκαγιάς «τύπου λίμνης» (McGrattan et al. 2000)

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα μαθηματικά μοντέλα για την προσομοίωση των πυρκαγιών «τύπου λίμνης» με κύρια καύσιμη ύλη υδρογονανθράκων. Τα μοντέλα αυτά ποικίλουν από απλοποιημένα αναλυτικά μέχρι πολυσύνθετα αριθμητικά μοντέλα υπολογιστικής

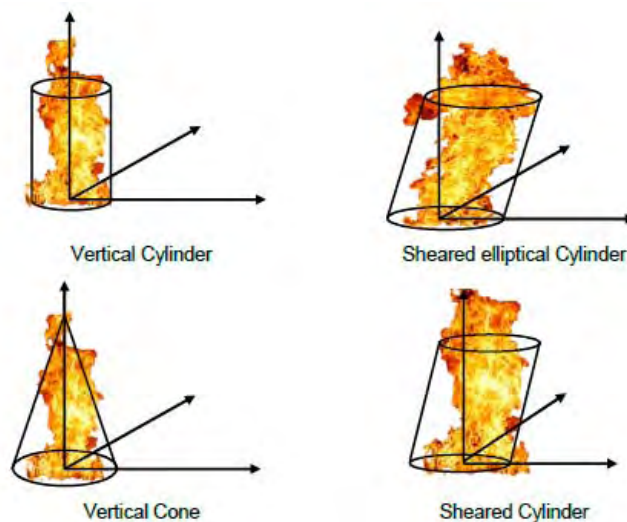
ρευστοδυναμικής. Τα εμπειρικά μοντέλα χαρακτηρίζουν την γεωμετρία της φλόγας χρησιμοποιώντας πειραματικά αποτελέσματα. Αυτά τα μοντέλα διαχωρίζονται σε σημειακά μοντέλα και τα μοντέλα συμπαγούς φλόγας (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2: Σχηματική απεικόνιση εμπειρικών μοντέλων προσομοίωσης πυρκαγιάς «τύπου λίμνης»

Τα σημειακά εμπειρικά μοντέλα είναι ο πιο απλός τρόπος για να υπολογιστεί η ακτινοβολία που εκπέμπεται από μια πυρκαγιά δεξαμενής. Οι Cowley and Johnson (1992) απέδειξαν πως το μοντέλο αυτό μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα σε μέγιστη απόσταση από τη φλεγόμενη δεξαμενή ίση με 5 διαμέτρους.

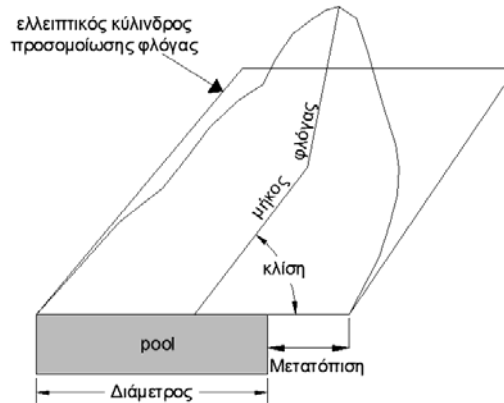
Τα πιο διαδομένο μοντέλο στη βιβλιογραφία είναι το αναλυτικό μοντέλο «συμπαγούς φλόγας» (solid flame models). Η Εικόνα 2.3 απεικονίζει διαφορετικούς τρόπους γεωμετρικής απεικόνισης της φλόγας χρησιμοποιώντας διαφορετικά γεωμετρικά σχήματα πχ κύλινδρος, κώνος. Τα μοντέλα αυτά έχουν βασιστεί σε πειραματικά δεδομένα.



Εικόνα 2.3: Μοντέλα «συμπαγούς φλόγας» (Mansour, 2012)

Οι βασικές παράμετροι που πρέπει να οριστούν είναι σχήμα της φλόγας και η μέση τιμή της θερμικής ροής εκπομπής της φλόγας (average flame surface emissive power). Η γεωμετρία της φλόγας μιας πυρκαγιάς λίμνης (pool fire) περιγράφεται από τέσσερις παραμέτρους: τη διάμετρο, το μήκος της φλόγας, τη γωνία και τη μετατόπιση όπως αυτά διευκρινίζονται στην Εικόνα 2.4. Οι βασικές παράμετροι που εμπλέκονται στον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της φλόγας είναι ο ρυθμός καύσης της

μάζας του ρευστού (mass burning rate) και η ταχύτητα του ανέμου. Στην εργασία των Mudan and Croce (1986) προτείνεται μοντέλο για τον υπολογισμό της μέσης τιμής θερμικής ροής εκπομπής της φλόγας που έχει βασιστεί σε πειραματικά δεδομένα και λαμβάνει υπόψη τον τύπο του υγρού καύσιμου και τη διάμετρο της φλεγόμενης δεξαμενής.



Εικόνα 2.4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά φλόγας

Τα μοντέλα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics) επιλύουν τις μερικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή των ρευστών. Για τη προσομοίωση της πυρκαγιάς πρέπει να ενσωματωθούν και μοντέλα που περιγράφουν φυσικές και χημικές διεργασίες που περιλαμβάνονται στο φαινόμενο. Η μετάδοση της θερμότητας μέσω ακτινοβολίας επιλύεται επίσης μέσω ειδικών αλγορίθμων.

Με τον τρόπο αυτό το πρόβλημα επιλύεται προσεγγιστικά και μπορεί να επιλυθεί μεγάλο εύρος προβλημάτων. Το βασικό μειονέκτημα είναι ο μεγάλος υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την επίλυση.

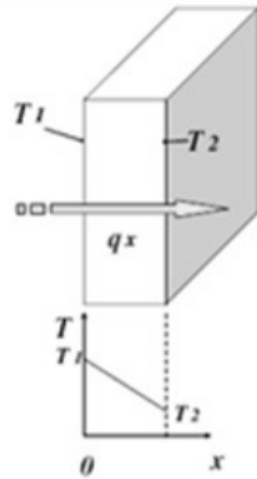
2.2 Μεταφορά θερμότητας

Η θερμότητα είναι η ενέργεια η οποία ανταλλάσσεται μεταξύ ενός συστήματος και του περιβάλλοντος (ή μεταξύ δύο συστημάτων), από τη θερμότερη προς την ψυχρότερη περιοχή, εξαιτίας της μεταξύ τους θερμοκρασιακής διαφοράς. Ως αποτέλεσμα, το σύστημα τείνει σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας, με αποκατάσταση μιας ομοιόμορφης θερμοκρασίας σε όλες τις περιοχές του. Υπάρχουν τρεις βασικοί μηχανισμοί θερμότητας:

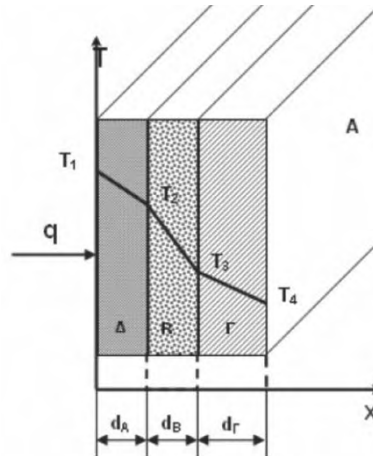
- Μεταφορά με αγωγή
- Μεταφορά με συναγωγή
- Μεταφορά με ακτινοβολία

Μεταφορά με αγωγή

Η μεταφορά θερμότητας οφείλεται στις αλληλεπιδράσεις των μικροσκοπικών σωματιδίων, χωρίς μακροσκοπικά να παρατηρείται μετακίνηση υλικού. Πραγματοποιείται μέσα σε ένα σώμα στερεό, υγρό ή αέριο (εικόνα 2.5) καθώς και στην περίπτωση ομογενών και ισότροπων σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή (εικόνα 2.6). Η μεταφορά αυτή είναι ανάλογη με τη διαφορά θερμοκρασίας τους. Ο μηχανισμός αυτός είναι κυρίαρχος σε στερεά σώματα ή σε μη-κινούμενα ρευστά όπως π.χ. στρώματα ρευστού που βρίσκονται σε επαφή με θερμή επιφάνεια.



Εικόνα 2.5



Εικόνα 2.6

Ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας προς τον άξονα x ανά μονάδα επιφάνειας θα είναι:

$$q_x'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{εξ. 2.1})$$

όπου k : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από το υλικό και έχει μεγάλο εύρος διαφοροποίησης. Η τιμή του για καθαρά μέταλλα είναι ως και 100 φορές μεγαλύτερη από την τιμή των αερίων. Επίσης η τιμή του μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία.

Το αρνητικό πρόσημο στην Εξίσωση 2.1 οφείλεται στο γεγονός ότι η ενέργεια μεταφέρεται από την περιοχή υψηλών θερμοκρασιών στην περιοχή των χαμηλών .

Σε ένα στερεό σώμα ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας είναι μεγαλύτερος από ότι σε αέριο, εφόσον οι αποστάσεις μεταξύ των μορίων είναι μικρότερες και οι μοριακές αλληλεπιδράσεις πιο ισχυρές. Η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται με δύο μηχανισμούς, με την μορφή πλεγματικών κυμάτων και με την κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στην διάχυση (μετάδοση ενέργειας μέσω μοριακών συγκρούσεων) μέσα στο στερεό. Σε ένα αέριο η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται μόνο λόγω της διάχυσης των μορίων κατά την τυχαία κίνηση τους, όπως αντίστοιχα συμβαίνει και σε ένα υγρό.

Μεταφορά με συναγωγή

Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή συμβαίνει μεταξύ της επιφάνειας ενός στερεού σώματος και ενός ρευστού(υγρού ή αερίου) τα οποία έρχονται σε επαφή και έχουν διαφορετική θερμοκρασία. Η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται με δύο μηχανισμούς, ο πρώτος είναι η διάχυση ενέργειας μέσω των μορίων όπως και στην περίπτωση της αγωγής και ο δεύτερος είναι μέσω της μακροσκοπικής κίνησης του ρευστού. Τα στοιχειώδη σωματίδια μεταφέρουν την θερμική ενέργεια μαζί με την μάζα τους μέσω της μεταφορικής και περιστροφικής κίνησης τους και μέσω των ταλαντώσεων τους.

Στα ρευστά η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται πάντα με τον μηχανισμό της συναγωγής λόγω της κίνησης τους. Έτσι η συναγωγή εμφανίζεται όταν ένα ρευστό ρέει λόγω επιβολής εξωτερικών αιτίων (εξαναγκασμένη κυκλοφορία) αλλά και ακόμα όταν ένα

ρευστό θερμαίνεται (ή ψύχεται) «ακίνητο» σε ένα χώρο. Στη δεύτερη περίπτωση, το ρευστό έρχεται σε επαφή με τα θερμά τοιχώματα (ή οτιδήποτε θερμαίνεται) και εμφανίζει άνοδο θερμοκρασίας και κατά συνέπεια διαστέλλεται. Έτσι προκαλείται διαφορά πυκνότητας ανάμεσα στις περιοχές με διαφορετικές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα την κίνηση του υγρού λόγω δυνάμεων άνωσης. Η κίνηση του ρευστού λόγω δυνάμεων βαρύτητας ονομάζεται φυσική κυκλοφορία.

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή εκφράζεται με τον νόμο του Newton,

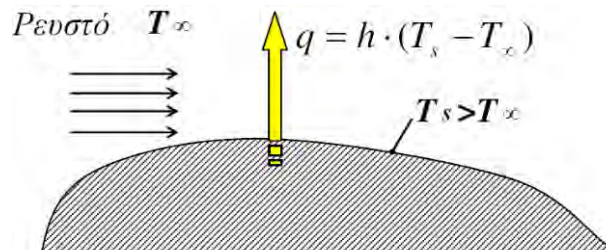
$$q_x'' = h(T_s - T_\infty) \quad (\text{Εξ. 2.2})$$

όπου

h : συντελεστής συναγωγής που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ροής (ελεύθερη, εξαναγκασμένη) και από τις ιδιότητες του υλικού

T_s : θερμοκρασία επιφάνειας

T_∞ : θερμοκρασία αερίου-ρευστού



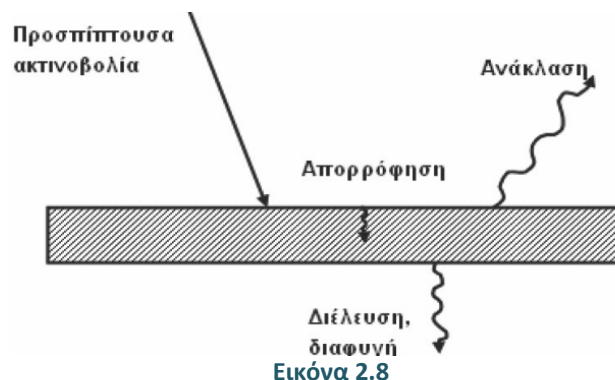
Εικόνα 2.7

Μεταφορά με ακτινοβολία

Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία γίνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Θερμική ακτινοβολία εκπέμπεται και απορροφάται από όλα τα στερεά σώματα σε όποια θερμοκρασία και αν βρίσκονται.

Θερμότητα ακτινοβολούν όλα τα σώματα με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν και σε αντίθεση με τους προαναφερθέντες τρόπους μετάδοσης θερμότητας (αγωγή και συναγωγή) σε αυτή την περίπτωση δεν απαιτείται η ύπαρξη υλικού μέσου για να πραγματοποιηθεί η μετάδοση θερμότητας.

Όταν η ακτινοβολία προσπίπτει σε ένα σώμα μπορεί να το διαπεράσει και να διαφύγει, μπορεί να απορροφηθεί από αυτό ή μπορεί να ανακλαστεί.



Εικόνα 2.8

Ένα ιδανικό σώμα που απορροφά όλη την ποσότητα ακτινοβολίας (για όλα τα μήκη κύματος και για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης) και εκπέμπει την μέγιστη θερμική ισχύ ονομάζεται μέλαν σώμα. Η θερμική ισχύς που ακτινοβολεί μια επιφάνεια είναι μικρότερη από αυτή του μέλανος σώματος και δίνεται από την σχέση:

$$q_{\pi}'' = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (\text{Εξ. 2.5})$$

όπου:

ε : συντελεστής εκπομπής που κυμαίνεται από 0 έως 1 . Για το μέλαν σώμα $\varepsilon=1$.

σ : σταθερά Stefan - Boltzmann ($\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$)

T_s : η απόλυτη θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του σώματος.

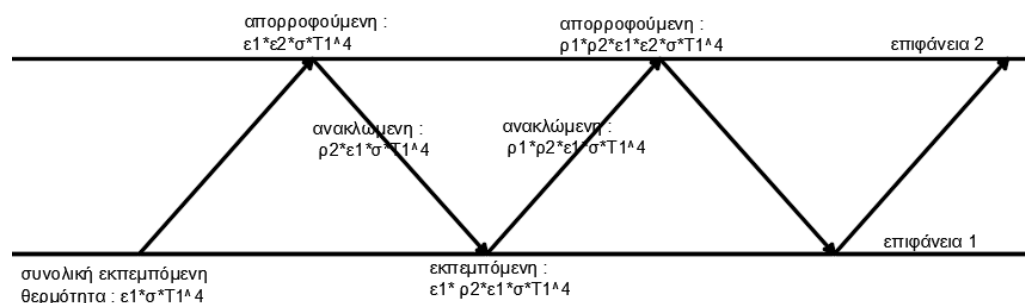
Συνήθως στις εφαρμογές δεν μας ενδιαφέρει ο ρυθμός εκπομπής αλλά ο ρυθμός ανταλλαγής θερμότητας, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα σώμα, με εκείνη που απορροφά. Είναι ένα πρόβλημα περίπλοκο και για τον υπολογισμό του πρέπει να ληφθούν υπόψη:

- οι συντελεστές εκπομπής και απορρόφησης ενέργειας της κάθε επιφάνειας,
- η σχετική απόσταση των δύο επιφανειών και ο προσανατολισμός τους,
- και ο συντελεστής ανάκλασης $\rho=1-\varepsilon$.

Σε μια απλή περίπτωση για να προσεγγίσουμε και την κατάσταση όπου πυρκαγιά περιβάλλει ένα δομικό στοιχείο, θεωρούμε δύο παράλληλες πλάκες (επιφάνειες) με την σχετική τους απόσταση να είναι μικρή εν αντιθέσει με το μήκος και το εμβαδόν τους. Σε αυτήν την περίπτωση η αναλυτική λύση θα είναι σύμφωνα την Εικόνα 2.9. Σε αυτή την περίπτωση, η συνολική θερμική ισχύς μεταξύ της επιφάνειας 1 και 2 θα είναι:

$$q_{\pi}'' = \varepsilon_r \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{Εξ. 2.4})$$

$$\text{όπου: } \varepsilon_r = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2}$$



Εικόνα 2.9

2.3 Λυγισμός κελυφωτών κατασκευών υπό θερμική καταπόνηση (Thermal Buckling of Shell Structures)

Οι δεξαμενές πετρελαίου που μελετούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι κυλινδρικά λεπτότοιχα κελύφη από χάλυβα. Τα λεπτότοιχα κελύφη χρησιμοποιούνται ευρέως σε κατασκευές του πολιτικού, μηχανολόγου, αεροναυπηγού και ναυπηγού μηχανικού. Σε μηχανολογικές κατασκευές χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αγωγών μεταφοράς και δοχείων που λειτουργούν υπό πίεση. Αεροσκάφη, πύραυλοι, πλοία και υποβρύχια είναι μερικές άλλες εφαρμογές αεροναυπηγικής και ναυπηγικής μηχανικής. Τα κελύφη αποτελούν ίσως τις αποδοτικότερες κατασκευές στην επιστήμη του πολιτικού μηχανικού για την ανάληψη και μεταφορά φορτίων γιατί επιδεικνύουν εξαιρετική φέρουσα ικανότητα σε συνδυασμό με το χαμηλό τους βάρος και την υψηλή αρχιτεκτονική αισθητική. Η αποτελεσματικότητά τους αυτή οφείλεται πρακτικά σε 2 γεωμετρικές συνθήκες, στην καμπυλότητα (curvature) και στο λεπτό τους πάχος (thickness). Μέσω αυτών των γεωμετρικών συνθηκών η ανάληψη των επιβαλλόμενων φορτίων (ακόμη και για εγκάρσιες καμπτικού τύπου δράσεις) επιτυγχάνεται κυρίως διαμέσου της μεμβρανικής τους λειτουργίας (membrane state of stress), δηλαδή με την ανάπτυξη θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων των οποίων η διεύθυνση ακολουθεί την καμπυλωμένη γεωμετρία του κελύφους ενώ παράλληλα κατανέμονται στην διεύθυνση του πάχους. Αν και σε ένα κελύφος που φορτίζεται από ένα σύνολο διαφορετικών φορτίσεων δύναται να εμφανιστούν τέμνουσες δυνάμεις (shear forces), καμπτικές ροπές (bending moments) και ροπές συστροφής (twisting moments) ο κύριος μηχανισμός αντίστασης στις επιβαλλόμενες εξωτερικές δράσεις κείται στην προαναφερθείσα μεμβρανική τους λειτουργία. Επιπρόσθετα, η χωρική καμπυλότητα των κελυφών έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη μιας «χωρικού» τύπου δυσκαμψίας (spatial stiffness) προσδίδοντας σε αυτά, συγκριτικά με τα υπόλοιπα κλασσικά στατικά συστήματα (πλαίσια δοκών και στύλων, πλάκες, καμπύλα τόξα κτλ.), υψηλότερη φέρουσα ικανότητα.

Παρόλο που το λεπτό πάχος (thickness) των κελυφών συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό στην εξαιρετική τους αποτελεσματικότητα, είναι ταυτοχρόνως και η πιο σημαντική τους αδυναμία. Η ύπαρξη θλιπτικών τάσεων δύναται να οδηγήσει τα κελύφη σε αστοχία λόγω λυγισμού (buckling failure) μιας και η κρίσιμη τάση λυγισμού (critical buckling stress) είναι συνήθως ιδιαίτερα χαμηλή. Επιπρόσθετα, ο τρόπος κατασκευής τους και το υλικό τους (χάλυβας) έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη σημαντικών αρχικών γεωμετρικών ατελειών (initial geometric imperfections) και παραμενουσών τάσεων (residual stresses) μειώνοντας ακόμη περισσότερο την αρχική κρίσιμη τάση λυγισμού. Για το λόγο αυτό η μελέτη αυτού του είδους των κατασκευών έναντι φαινομένων αστάθειας καθίσταται επιβεβλημένη πριν τον τελικό τους σχεδιασμό.

Ο λυγισμός ως φυσικό φαινόμενο

Οι κατασκευές πολιτικού μηχανικού ή/και τα δομικά μέλη που τις συνθέτουν δύναται να αποκτήσουν είτε λόγω υπέρβασης του ορίου αντοχής του υλικού με το οποίο είναι κατασκευασμένες (material failure) είτε λόγω εμφάνισης φαινομένων αστάθειας-λυγισμού (instability failure-buckling failure) καθώς και με τον συνδυασμό των προηγούμενων δύο μορφών αστοχίας. Πρακτικά συναντώνται 2 ειδών τύποι λυγισμού ή ύπαρξη των οποίων εξαρτάται από την παρουσία θλιπτικών τάσεων:

- Ακαριαίος λυγισμός (Snap or Violent or Bifurcation Bucking)

Ακαριαίος λυγισμός είναι το φαινόμενο εκείνο κατά το οποίο ενώ η κατασκευή(ή κάποιο μέλος ή τμήμα της) παραμορφώνεται σε εργική αντιστοιχία με τα φορτία που προκαλούν την παραμόρφωση, υπάρχει κάποια κρίσιμη τιμή του φορτίου για την οποία η κατασκευή θα εμφανίσει μια απότομη και ακαριαία αλλαγή στο παραμορφωμένο σχήμα της συνοδευόμενη από εμφάνιση μεγάλων μετακινήσεων/παραμορφώσεων. Η κατασκευή ενδέχεται να ισορροπήσει στην νέα της θέση (ευσταθής ισοροπία) ή και να μην ισορροπήσει (μη ευσταθής ισοροπία-εμφάνιση ανεξέλεγκτα μεγάλων μετατοπίσεων /παραμορφώσεων που συνοδεύονται από σημαντική πτώση του φορτίου και αρνητικά μειούμενη δυσκαμψία). Προφανώς, για την κρίσιμη τιμή του φορτίου ισοροπίας υπάρχουν τουλάχιστον 2 πιθανές θέσεις ισοροπίας και για αυτό λέμε ότι υπάρχει διακλαδωση της λύσης (Bifurcation). Ως παράδειγμα αυτής της περίπτωσης λυγισμού στα κελύφη δίνεται ο λυγισμός αξονικά θλιβόμενου λυγηρού κύλινδρου. Η αξονοσυμμετρική παραμόρφωση, απόρροια της θλίψης, μπορεί να παύσει να είναι αξονοσυμμετρική την στιγμή του λυγισμού και για φορτίο ίσο με το κρίσιμο φορτίο να γίνει μη αξονοσυμμετρική. Συνεπώς, την στιγμή του λυγισμού η κατασκευή δύναται να ισορροπήσει σε 2 θέσεις (Bifurcation) - την ευσταθή αξονοσυμμετρική και την μη ευσταθή λύση (μη αξονοσυμμετρική παραμόρφωση).

- Προοδευτικός λυγισμός (Progressive buckling)

Είναι η περίπτωση κατά την οποία δεν παρουσιάζεται κάποια απότομη αλλαγή στην γεωμετρία του φορέα αλλά αναπτύσσεται δυσανάλογα μεγάλη αύξηση στην τιμή των μετατοπίσεων/παραμορφώσεων για μικρή αύξηση του φορτίου. Παράλληλα, εμφανίζεται μείωση της δυσκαμψίας του συστήματος μέχρι ενός οριακού σημείο στο οποίο επέρχεται αστοχία είτε λόγω υπερβολικά μεγάλων μετατοπίσεων είτε λόγω ελαστοπλαστικού λυγισμού. Στα κελύφη συναντάται η ανωτέρω περίπτωση αστοχίας στην αξονική θλίψη ενός σχετικά «χοντρού» κυλίνδρου (moderate thick cylindrical shell). Καθώς αυξάνεται η φόρτιση ο κύλινδρος εμφανίζει ένα φούσκωμα στο συνοριακό σημείο επιβολής της φόρτισης ή στην βάση του (elephant foot buckling) το οποίο σταδιακά μεγαλώνει ενώ παράλληλα διαρρέει το μητρικό υλικό. Η παραμόρφωση αυτή είναι αξονοσυμμετρικού τύπου, συνοδεύεται από θετική μείωση της δυσκαμψίας του συστήματος και εκδηλώνεται μέχρι ένα οριακό φορτίο (maximum or collapse or elastoplastic buckling load). Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτή την περίπτωση περεταίρω αύξηση των αξονοσυμμετρικών

παραμορφώσεων μπορεί να οδηγήσει και σε νέο λυγισμό με μη αξονοσυμμετρική μορφή λυγισμού (Bifurcation buckling).

Η φυσική ανάπτυξη του φαινομένου του λυγισμού στα κελύφη και ειδικότερα η απάντηση στο ερώτημα γιατί τα κελύφη λυγίζουν μπορεί να εξηγηθεί μέσω ενεργειακής θεώρησης. Συγκεκριμένα, τα κελύφη όπως ήδη τονίστηκε επιδεικνύουν σημαντική μεμβρανική δυσκαμψία (membrane stiffness) αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την καμπτική τους δυσκαμψία (bending stiffness). Ως εκ τούτου ένα λεπτότοιχο κέλυφος μπορεί να απορροφήσει σημαντικά ποσά από την ενέργεια παραμόρφωσης που παράγεται από τις εργικά αντίστοιχες μεμβρανικές τάσεις χωρίς να παραμορφώνεται ιδιαίτερα. Εν αντιθέσει, αντίστοιχα ποσά καμπτικής ενέργειας απαιτούν αρκετά υψηλά επίπεδα παραμόρφωσης για να απορροφηθούν. Αν τώρα ένα κέλυφος φορτισθεί με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής ενέργειας παραμόρφωσης (total strain energy) να είναι απόρροια της μεμβρανικής θλίψης και παράλληλα θεωρηθεί ότι υπάρχει κάποιος μηχανισμός εντός του κελύφους που μετατρέπει την μεμβρανική ενέργεια παραμόρφωσης σε καμπτική τότε είναι προφανές ότι θα επέλθει μια «απότομη» και «καταστροφικού» τύπου αστοχία διότι το κέλυφος όπως τονίστηκε δεν έχει ιδιαίτερα σημαντική καμπτική δυσκαμψία. Το πρόβλημα στα κελύφη είναι ότι όταν αναπτύσσονται σημαντικές μετατοπίσεις, αυτές «απαιτούν» την μετατροπή της εισαγόμενης από την φόρτιση μεμβρανικής ενέργειας σε καμπτική με αποτέλεσμα την εκδήλωση του φαινομένου του λυγισμού. Ο λυγισμός των κελυφωτών κατασκευών εξαρτάται από το τρόπο με τον οποίο αυτές φορτίζονται, την γεωμετρία τους και τις ιδιότητες του υλικού.

Λυγισμός κατασκευών λόγω θερμικής καταπόνησης (Thermal Buckling)

Η έκθεση μια κατασκευής σε υψηλές θερμοκρασίες έχει ως συνέπεια δυο ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Όπως θα τονιστεί διεξοδικά στο 3^ο Κεφάλαιο το μητρικό υλικό υφίσταται σημαντική μείωση των τιμών των βασικών του ιδιοτήτων (deterioration of the material), κυρίως της τάσης διαρροής (yield stress), της μέγιστης τάσης αντοχής (ultimate stress), και του μέτρου ελαστικότητας (Elastic moduli). Το δεύτερο ανεπιθύμητο αποτέλεσμα είναι ότι η έκθεση υπερστατικών κατασκευών σε υψηλές θερμοκρασίες (μέσω ομοιόμορφης ή ανομοιόμορφης θερμικής φόρτισης-uniform and non uniform heating) εισάγει στην κατασκευή μια αυτεντατική κατάσταση μέσω της ανάπτυξης θερμικών τάσεων (Thermal stresses). Οι θερμικές αυτές τάσεις είναι αυτοϊσορροπούμενες μιας και δεν προκαλούνται από κάποιο εξωτερικό φορτίο. Αυτό έχει ως συνέπεια, η κατανομή τους πάνω σε μια διατομή ή ένα τμήμα της κατασκευής να αποτελείται τόσο από εφελκυστικές όσο και από θλιπτικές τάσεις (για να μπορέσει να υπάρξει αυτοϊσοροπία). Όπως τονίστηκε στην παραγράφο 2.3 η παρουσία θλιπτικών σε ένα λεπτότοιχο χαλύβδινο κέλυφος μπορεί να προκαλέσει λυγισμό. Στην περίπτωση αυτή η αστοχία του φορέα επέρχεται από λυγισμό λόγω θερμικής καταπόνησης ο οποίος συναντάται στην διεθνή βιβλιογραφία ως Thermal Buckling.

Λυγισμός αμφιαρθρωτού στύλου υπό θερμική καταπόνηση

Ας θεωρηθεί ένας αμφιαρθρωτός λυγηρός στύλος από υλικό με μέτρο ελαστικότητας E , συντελεστή θερμικής διαστολής a , μήκος L και εμβαδό διατομής A . Ο στύλος υπόκειται σε ομοιόμορφη αύξηση της θερμοκρασίας του κατά T . Η αύξηση της θερμοκρασίας των «ινών» που συνθέτουν το στύλο τις οδηγεί στη διαστολή τους με αποτέλεσμα να θέλουν να αυξήσουν το μήκος τους. Όμως λόγω της ύπαρξης των στηρίξεων, αυτού του είδους η παραμόρφωση (thermal expansion) δεν δύναται να γίνει ανεμπόδιστα. Ως εκ τούτου αναπτύσσονται θερμικές θλιπτικές τάσεις (με ομοιόμορφη κατανομή καθ' ύψος της διατομής) των οποίων η συνισταμένη παίρνει την παρακάτω τιμή:

$$\sigma = \frac{P}{A} \Rightarrow \varepsilon E = \frac{P}{A} \Rightarrow \frac{\Delta l}{L} E = \frac{P}{A} \Rightarrow \frac{aTL}{L} E = \frac{P}{A} \Rightarrow aTE = \frac{P}{A} \Rightarrow P = EAaT \quad (\text{Εξ.2.6})$$

όπου, σ η θερμική θλιπτική τάση και ε η ανοιγμένη αξονική παραμόρφωση λόγω της θερμικής διαστολής. Από την θεωρία ελαστικής ευστάθειας είναι γνωστό ότι ένας αξονικά θλιβόμενος ελαστικός λυγηρός και αμφιαρθρωτός στύλος λυγίζει καμπτικά για θλιπτικό φορτίο ίσο με:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (\text{Εξ.2.7})$$

όπου, I η ροπή αδράνειας του στύλου περί τον ασθενή του άξονα. Συνεπώς, η κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού του στύλου είναι:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \Rightarrow EAaT_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \Rightarrow T_{cr} = \frac{\pi^2 I}{aAL^2} \Rightarrow T_{cr} = \frac{\pi^2}{a} \cdot \frac{I}{AL^2} \quad (\text{Εξ.2.8})$$

Για να γίνει αντιληπτή η τάξη μεγέθους της κρίσιμης θερμοκρασίας που μπορεί να προκαλέσει λυγισμό σε ένα πραγματικό πρόβλημα ας θεωρηθεί ένας αμφιαρθρωτός στύλος μήκους $L = 4m$ από μεταλλική διατομή ΙΡΕ300 που θερμαίνεται ομοιόμορφα. Ο χάλυβας έχει συντελεστή θερμικής διαστολής $a = 1.2 \times 10^{-5}$ ανά $^{\circ}C$ ενώ τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης διατομής είναι $A = 53.8 \text{ cm}^2$ και $I_{z-z} = 604 \text{ cm}^4$. Με βάση την Εξ. 3.3, η κρίσιμη θερμοκρασία για την οποία ο στύλος θα λυγίσει καμπτικά περί τον ασθενή άξονα z-z είναι:

$$T_{cr} = \frac{\pi^2}{a} \cdot \frac{I}{AL^2} = \frac{3.14^2}{1.2 \times 10^{-5} / ^{\circ}C} \cdot \frac{604 \text{ cm}^4}{53.8 \text{ cm}^2 (400 \text{ cm})^2} = 57.65 \text{ } ^{\circ}C \quad (\text{Εξ.2.9})$$

Λυγισμός δοκού υπό θερμικά ανομοιόμορφη καταπόνηση (Non uniform heating).

Στην προηγούμενη παράγραφο ο λυγισμός προκλήθηκε πρακτικά από την παρεμπόδιση των στηρίξεων στην θερμική διαστολή του στύλου (restraint thermal expansion). Η δεύτερη περίπτωση στην οποία δύναται να εμφανιστούν σημαντικές θλιπτικές θερμικές τάσεις σε μια κατασκευή και να προκαλέσουν λυγισμό είναι η ανομοιόμορφη θερμική καταπόνηση (Non uniform heating). Στην περίπτωση αυτή η θερμοκρασία μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο του φορέα. Για να διατηρηθεί η συνέχεια της κατασκευής θα πρέπει να αναπτυχθούν εσωτερικές θερμικές τάσεις (εφελκυστικές και θλιπτικές). Το πρόβλημα σε αυτή την περίπτωση είναι ότι ακόμη και μικρές διαφοροποιήσεις στην θερμοκρασία μπορεί να προκαλέσει σημαντική ανάπτυξη εσωτερικών θερμικών τάσεων. Για να γίνει ξανά αντιληπτή η τάξη μεγέθους της θερμοκρασίας που μπορεί να προκαλέσει λυγισμό η ανομοιόμορφη αύξηση της θερμοκρασίας σε ένα πραγματικό πρόβλημα ας θεωρηθεί μια αμφίπακτη δοκός μήκους $L = 4m$ από λεπτότοιχη μεταλλική διατομή τύπου Z. Η διατομή έχει συνολικό ύψος 14.2 cm, πλάτος άνω και κάτω πέλματος 6 cm και 5.5 cm αντίστοιχα, καθώς και ροπή αδρανείας περί τον ισχυρό άξονα $I = 117.4 \text{ cm}^4$. Η δοκός υπόκειται σε ανομοιόμορφη αύξηση θερμοκρασίας ΔT (γραμμική κατανομή καθ' ύψος). Λόγω του καταναγκασμού αυτού η δοκός κάμπτεται και αναπτύσσει καμπτική ροπή που είναι αποτέλεσμα της συνισταμένης της καθ' ύψους γραμμικής κατανομής τάσεων της διατομής. Από την στατική των κατασκευών είναι γνωστό ότι η αναπτυσσόμενη καμπτική ροπή έχει τιμή:

$$M_{\Delta T} = EI \frac{a\Delta T}{h} \quad (\text{Εξ.2.10})$$

όπου, h το ύψος της διατομής και I η ροπή αδρανείας περί τον ισχυρό άξονα (θεωρείται ότι το ΔT είναι καθ' ύψος της διατομής και προκαλεί κάμψη περί τον ισχυρό άξονα). Η μέγιστη θλιπτική τάση που αντιστοιχεί στην παραπάνω καμπτική ροπή είναι:

$$\sigma_{com}^{\max} = \frac{M_{\Delta T}}{w_{y-y}} = \frac{EI \frac{a\Delta T}{h}}{w_{y-y}}$$

(Εξ.2.11)

όπου, w_{y-y} η ροπή αντίστασης της διατομής για κάμψη περί τον ισχυρό άξονα $y-y$.

Με βάση την γραμμική καθ' ύψος κατανομή των τάσεων λυγισμό δύναται να πάθει το θλιβόμενο πέλμα που βρίσκεται σε ομοιόμορφη θλίψη (δυσμενέστερη περίπτωση) και ο κορμός που βρίσκεται υπό καθεστώς θλίψης και κάμψης. Πρόκειται για λυγισμό πλακιδίων απείρου μήκους με ιδιαίτερες συντοιακές συνθήκες στα άκρα τους. Για την περίπτωση που διερευνάται δύναται να βρεθεί προσεγγιστική αναλυτική λύση μέσω νομογραφήματος από την βιβλιογραφία (Ventsel and Krauthammer, 2001) η οποία συγκρίνεται έμμεσα και με τις διατάξεις που δίνει το τμήμα 1.3 του Ευρωκώδικα 3. Η λύση που ακολουθεί υπολογίζει την κρίσιμη τάση λυγισμού πλακιδίου απείρου μήκους σε ομοιόμορφη θλίψη με συντοιακές συνθήκες τις ακόλουθες: Το τμήμα κατά το μήκος L της δοκού που στηρίζεται στον κορμό

βρίσκεται σε καθεστώς απλής έδρασης. Το αντικριστό του είναι πλήρως ελεύθερο, ενώ οι 2 μικρές πλευρές πλάτους 6 cm θεωρούνται πακτωμένες.

$$\sigma_{cr} = K \frac{\pi^2 D}{b^2 t} \quad (\text{Εξ.2.12})$$

όπου, $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$ η καμπτική δυσκαμψία του πλακιδίου, b και t το πλάτος και

πάχος του αντίστοιχα, ενώ K μια τιμή που σχετίζεται με τον λόγο των διαστάσεων του πλακιδίου (εδώ θεωρείται άπειρος) και τις συνοριακές συνθήκες. Στην περίπτωση που μελετάται θεωρείται $K = 4$. Από την εφαρμογή της Εξ. 3.7 προκύπτει η κρίσιμη τάση λυγισμού του άνω πέλματος της διατομής Z, ίση με:

$$\sigma_{cr} = K \frac{\pi^2 D}{b^2 t} = 2.5 \cdot \frac{3.14^2 Et^2}{12 \cdot b^2 (1-\nu^2)} = 4 \cdot \frac{3.14^2 \cdot 21000 \cdot 0.13^2}{12 \cdot 6^2 (1-0.3^2)} = 35.59 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{Εξ.2.13})$$

Οπότε, η μεταβολή της θερμοκρασίας για την οποία προκύπτει η παραπάνω τάση προκύπτει απο την συνδυαστική εφαρμογή των Εξ. 3.6 και 3.8. Προκύπτει,

$$\sigma_{com}^{\max} = \frac{M_{\Delta T}}{w_{y-y}} = \frac{EI \frac{a\Delta T}{h}}{w_{y-y}} = \sigma_{cr} = 35.59 \text{ kN/cm}^2 \Rightarrow \quad (\text{Εξ.2.14})$$

$$\frac{21000 \text{ kN/cm}^2 \times 117.4 \text{ cm}^4 \times \frac{1.2 \times 10^{-5} \Delta T}{14.2 \text{ cm}}}{16.54 \text{ cm}^3} = 35.59 \text{ kN/cm}^2 \Rightarrow \Delta T = 282.54 \text{ }^\circ\text{C}$$

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η ανάπτυξη των θερμικών τάσεων εντός των κελυφωτών κυλινδρικών δεξαμενών που μελετούνται προκαλείται τόσο από την παρεμπόδιση της θερμικής διαστολής του κελύφους από την οροφή όσο και απο μη ομοιόμορφη θερμική καταπόνηση. Προφανώς επειδή η εύρεση του εντατικού πεδίου των θερμικών τάσεων καθώς και η λυγισμική απόκριση των εξεταζόμενων δεξαμενών δεν δύναται να γίνει αναλυτικά, εφαρμόζεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων με την χρήση μη γραμμικής θερμομηχανικής ανάλυσης διαμέσου κατάλληλου λογισμικού.

Λυγισμός κυλινδρικών κελυφών υπό θερμική καταπόνηση (Non uniform heating)

Στη συνέχεια εξετάζεται η περίπτωση θερμικής φόρτισης κυλινδρικών κελυφών. Η αναλυτική λύση του προβλήματος δίνεται στην εργασία Eslami et al. 1996.

Το πρόβλημα επιλύεται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις ισορροπίας του Donel. Συγκεκριμένα οι εξισώσεις του Donel, οι οποίες στην αρχική τους μορφή βασίζονται στην υπόθεση των Love-Kirchhoff και στις μη-γραμμικές καταστατικές εξισώσεις του Sander, έχουν τροποποιηθεί και λαμβάνουν υπόψη την τέμνουσα κατά την περιφερειακή διεύθυνση και τις στροφές β_x and β_θ περί της αξονικής και της περιφερειακής διεύθυνσης αντίστοιχα. Οι αναλυτικές λύσεις για τρεις διαφορετικούς τύπους θερμικής φόρτισης, παρατίθενται στην συνέχεια.

- Ομοιόμορφη αύξηση θερμοκρασίας

Η κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού για ένα κυλινδρικό κέλυφος, που η μετακινήσεις παρεμποδίζονται και στις δύο βάσεις του, δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta T_{crit} = \frac{h}{Ra} \left[\frac{1-\nu}{3(1+\nu)} \right]^{1/2} \quad (\text{Εξ. 2.15})$$

Όπου:

h το πάχος του κυλίνδρου, R η ακτίνα του κυλίνδρου, α ο συντελεστής θερμικής διαστολής και ν ο λόγος Poisson

Αν λάβουμε τιμή $\nu=0.3$, η κρίσιμη θερμοκρασία θα είναι:

$$\Delta T_{crit} = 0.424h / Ra \quad (\text{Εξ.2.16})$$

Επομένως αν εξετάσουμε έναν χαλύβδινο κύλινδρο ($\alpha=10^{-5}$) με διαστάσεις $h=0.01$ m και $R=20$ m, η κρίσιμη θερμοκρασία στην οποία θα λυγίσει είναι: $\Delta T_{crit} = 21.2^\circ C$. Παρατηρούμε πως η λύση δεν εξαρτάται από το μήκος του κυλίνδρου.

- Γραμμική ακτινική θερμοκρασιακή διαφορά κατά το πάχος του κελύφους.

Η κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού για ένα κυλινδρικό κέλυφος, που οι μετακινήσεις παρεμποδίζονται και στις δύο βάσεις του, δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta T_{crit} = \frac{h}{Ra} \left[\frac{4(1-\nu)}{3(1+\nu)} \right]^{1/2} \quad (\text{Εξ. 2.17})$$

Αν λάβουμε τιμή $\nu=0.3$, η κρίσιμη θερμοκρασία θα είναι:

$$\Delta T_{crit} = 0.848h / Ra \quad (\text{Εξ. 2.18})$$

Επομένως αν εξετάσουμε έναν τον χαλύβδινο κύλινδρο του προηγούμενου παραδείγματος, κρίσιμη θερμοκρασία στην οποία θα λυγίσει είναι: $\Delta T_{crit} = 42.4^\circ C$.

Τέλος, σημειώνεται πως η εργασία των Eslami and Shahsiah (2001) δίνει αντίστοιχες αναλυτικές λύσεις λαμβάνοντας υπόψη και την ύπαρξη αρχικών ατελειών.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η ανάπτυξη των θερμικών τάσεων εντός των κελυφωτών κυλινδρικών δεξαμενών που μελετούνται προκαλείται τόσο από την παρεμπόδιση της θερμικής διαστολής του κελύφους από την οροφή όσο και από μη-ομοιόμορφη θερμική καταπόνηση. Προφανώς επειδή η εύρεση του εντατικού πεδίου των θερμικών τάσεων καθώς και η λυγισμική απόκριση των εξεταζόμενων δεξαμενών δεν δύναται να γίνει αναλυτικά, εφαρμόζεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων με την χρήση μη γραμμικής θερμομηχανικής ανάλυσης διαμέσου κατάλληλου λογισμικού [Marc].

2.4 Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Η μελέτη του προβλήματος θερμικού λυγισμού των λεπτότοιχων κελυφών ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1950 με αφορμή των σχεδιασμό αεροσκαφών και πυραύλων. Η δημοσιευμένες εργασίες που είναι διαθέσιμες σήμερα περιλαμβάνουν πειραματικές, αναλυτικές αλλά και αριθμητικές προσεγγίσεις του προβλήματος. Στη συνέχεια παρατίθεται μια σύντομη επισκόπηση των πιο βασικών ευρημάτων.

Η συμπεριφορά των κυλινδρικών κελυφών υπό αξονοσυμμετρική θερμική φόρτιση αποτελεί το αντικείμενο λίγων μελετών (e.g., Hoff 1957; Anderson 1962; Johns 1962; Sunakawa 1962; Johns 1965). Ένα βασικό συμπέρασμα των εργασιών αυτών είναι πως οι περιφερειακές θερμικές τάσεις λόγω της ομοιόμορφης αύξησης της θερμοκρασίας δεν είναι σημαντικές ώστε να οδηγήσουν σε ελαστικό λυγισμό εκτός από την περίπτωση που ο λόγος πάχος/διάμετρο είναι πολύ μεγάλος.

Στις εργασίες των Hill (1959) και Ross et al. (1965) είναι διαθέσιμα τόσο αναλυτικά όσο και πειραματικά αποτελέσματα σχετικά με τον θερμικό λυγισμό κυλινδρικών κελυφών υπό ομοιόμορφη θερμική φόρτιση σε τμήμα της περιφέρειάς τους. Τα πειράματα διεξήχθησαν για μια σειρά κυλίνδρων με πλήρη κινηματική δέσμευση στις βάσεις τους και το εύρος της θερμαινόμενης ζώνης διαφοροποιήθηκε από 1.5% έως 18% της περιφέρειας των κυλίνδρων. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν δυο διαφορετικές μορφές αστοχίας ανάλογα με το πάχος του κελύφους. Συγκεκριμένα, σε λεπτότοιχα κυλινδρικά κελύφη παρατηρήθηκε τοπικός ακαριαίος λυγισμός μέσα στο εύρος της θερμαινόμενης ζώνης. Για περιπτώσεις κυλινδρικών κελυφών που δεν εμπίπτουν στα όρια των λεπτότοιχων (δηλαδή με μεγαλύτερο πάχος τοιχωμάτων) εμφανίστηκε αστοχία λόγω πλαστικοποίησης κοντά στις βάσεις του κυλίνδρου. Ένα άλλο σημαντικό συμπέρασμα ήταν πως η δυσμενέστερες τιμές κρίσιμης θερμοκρασίας λυγισμού προκύπτουν όσο μικρότερο είναι το εύρος της θερμαινόμενης ζώνης.

Οι Hoff and Ross (1967) διεξήγαγαν ένα πειραματικό πρόγραμμα για να μελετήσουν τον θερμικό λυγισμό λεπτότοιχων κελυφών υπό ομοιόμορφη θερμική φόρτιση και παρατήρησαν πως οι κρίσιμες θερμοκρασίες λυγισμού που υπολογίζονται πειραματικά είναι πιο υψηλές από αυτές που εξάγονται από τις αναλυτικές λύσεις. Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε αντίθεση με την κλασική περίπτωση του λυγισμού των κελυφών υπό μηχανική φόρτιση που τα κρίσιμα φορτία λυγισμού που προκύπτουν από τα πειράματα είναι μικρότερα από τις αναλυτικές εκτιμήσεις. Η ασυνέπεια αυτή δικαιολογήθηκε στην εργασία των Ross et al. (1966) μέσω περαιτέρω πειραμάτων. Το συμπέρασμα ήταν πως καθώς επιβάλλεται η θερμική φόρτιση και πριν την εμφάνιση του λυγισμού η συμπεριφορά του κελύφους είναι μη-γραμμική. Συγκεκριμένα εμφανίζονται αξονικές θλιπτικές δυνάμεις καθώς ο κύλινδρος διαστέλλεται (barrel out) και λόγω αυτής της μη-γραμμικής συμπεριφοράς η κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού προκύπτει μεγαλύτερη από αυτή που προβλέπεται από τα αποτελέσματα μιας θεωρητικής λύσης ή μέσω μιας γραμμικής ανάλυσης λυγισμού.

Στην πειραματική εργασία που δημοσιεύτηκε από τους Frum and Baruch (1976), εξετάζεται το πρόβλημα του λυγισμού κυλινδρικών κελυφών, με πλήρη κινηματική δέσμευση στις βάσεις τους, για θερμική φόρτιση σε δύο γενέτειρες που βρίσκονται σε αντι-

διαμετρικές θέσεις. Το συμπέρασμα είναι πως η δέσμευση της ακτινικής μετατόπισης έχει σημαντική επιρροή στην συμπεριφορά των κελυφών και στον υπολογισμό της κρίσιμης θερμοκρασίας λυγισμού.

Τα τελευταία χρόνια το ερευνητικό ενδιαφέρον έχει στραφεί στη μελέτη λεπτότοιχων κελυφών που χρησιμοποιούν ανισότροπα υλικά (Eslami and Javaheri 1999; Shahsiah and Eslami 2003; Panda and Singh 2011) όπως συνέθετα υλικά με στρωματοειδή διαμόρφωση (laminated composite cylindrical shells). Οι μελέτες αυτές στοχεύουν στο να διατυπώσουν θεωρητικές λύσεις για συνήθεις γεωμετρικές κελυφών υπό ομοιόμορφη θερμική φόρτιση. Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν εμπίπτει σε αυτή τη θεματική περιοχή και για το λόγο αυτό δεν γίνεται περαιτέρω αναφορά σε τέτοιες μελέτες.

Παρατηρείται πως η ερευνητική δραστηριότητα που έχει διεξαχθεί ως σήμερα σχετικά με τον θερμικό λυγισμό λεπτότοιχων κελυφών περιορίζεται σε σχετικά απλές θερμικές φορτίσεις όπως ομοιόμορφη θερμοκρασιακή μεταβολή, γραμμική μεταβολή κατά την ακτινική διεύθυνση και κατά την αξονική διεύθυνση και δεν εξετάζουν την επιρροή των συνοριακών συνθηκών που εισάγονται στο πρόβλημα λόγω της ύπαρξης της οροφής όπως συμβαίνει στις δεξαμενές. Η περίπτωση της μη-ομοιόμορφης θερμικής φόρτισης κατά την περιφερειακή διεύθυνση, που εμφανίζεται στην περίπτωση που εξετάζεται σε αυτή την διπλωματική εργασία, έχει μελετηθεί ελάχιστα.

Η διδακτορική διατριβή του Liu (2012) είναι η πρώτη προσπάθεια διερεύνησης του θερμικού λυγισμού λεπτότοιχων δεξαμενών σταθερής οροφής που δέχονται θερμική φόρτιση από γειτονική φλεγόμενη δεξαμενή. Η διατριβή αυτή αρχικά διερευνά το προφίλ της θερμικής φόρτισης (θερμοκρασιακό πεδίο) που δέχεται η δεξαμενή. Το πρόβλημα της μεταφοράς της θερμότητας (μέσω ακτινοβολίας από τη γειτονική φλεγόμενη δεξαμενή) λύνεται αριθμητικά μέσω του λογισμικού Abaqus. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων καταλήγουν σε μια μη-ομοιόμορφη κατανομή χωρικού πεδίου θερμοκρασιών η οποία και εκφράζεται μέσω αναλυτικών σχέσεων. Στη συνέχεια ακολουθεί η θερμομηχανική ανάλυση δεξαμενών υπό το μη-ομοιόμορφο θερμοκρασιακό πεδίο και γίνεται λεπτομερής περιγραφή των μηχανισμών που οδηγούν στον λυγισμό του κελύφους της δεξαμενής. Εξετάζονται δεξαμενές με διαφορετικές στάθμες πλήρωσης καθώς και η περίπτωση της κενής δεξαμενής. Το πρόβλημα επιλύεται αριθμητικά μέσω γεωμετρικής μη-γραμμικής ανάλυσης και λαμβάνεται υπόψη και η μη-γραμμικότητα του υλικού στις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, παραμετρικές αναλύσεις διεξάγονται με σκοπό να αποκαλυφθούν οι πιο σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν το πρόβλημα.

Οι εργασίες των Godoy and Batista, 2012 και Batista and Godoy (2013), εξετάζουν το ίδιο πρόβλημα ακριβώς που αντιμετωπίζεται στα πλαίσια της διατριβής του Liu (2012). Συγκεκριμένα υιοθετούν το προφίλ θερμοκρασιακής φόρτισης που προτείνεται στην διατριβή του Liu (2012) και μελετούν τη συμπεριφορά δεξαμενών σταθερής οροφής και ανοιχτών δεξαμενών αντίστοιχα. Η μελέτη διεξάγεται αριθμητικά και εξετάζεται η επιρροή παραμέτρων όπως το πάχος κελύφους, το εύρος της θερμαινόμενης ζώνης της δεξαμενής, η επιρροή της απαγόρευσης που υπεισέρχεται μέσω από την οροφή (μέσω της δυσκαμψίας της), η επιρροή των αρχικών γεωμετρικών ατελειών, η γεωμετρία της δεξαμενής κ.α.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων όλων των παραπάνω μελετών αποδεικνύουν πως οι συνοριακές συνθήκες που εισάγονται λόγω της οροφής της δεξαμενής επηρεάζουν σημαντικά την συμπεριφορά του κελύφους και συγκεκριμένα όσο πιο δύσκαμπτη είναι η οροφή τόσο μειώνεται η κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού. Επιπρόσθετα, αποδεικνύουν πως

το πρόβλημα παρουσιάζει μικρή ευαισθησία σε αρχικές ατέλειες. Επίσης συμπεραίνεται πως ένας σημαντικός παράγοντας που διαφοροποιεί τη συμπεριφορά του κελύφους της δεξαμενής είναι η διάμετρος της φλεγόμενης δεξαμενής. Μάλιστα όσο αυξάνεται η διάμετρος της, τόσο αυξάνεται και η θερμαινόμενη ζώνη της υπό-μελέτη δεξαμενής και ταυτόχρονα μειώνεται η κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού. Επομένως η δυσμενέστερη περίπτωση είναι όταν η φλεγόμενη δεξαμενή έχει μικρότερη διάμετρο από την γειτονική δεξαμενή που δέχεται τη θερμική φόρτιση. Η επιρροή της θερμοκρασιακής διαφοράς κατά το πάχος του κελύφους δεν είναι σημαντική και η θεώρηση της ομοιόμορφης θερμοκρασίας είναι ρεαλιστική. Επίσης εξάγεται το συμπέρασμα πως το δυσμενέστερο σενάριο είναι η περίπτωση που η δεξαμενή είναι κενή εφόσον όσο αυξάνεται ο βαθμός πλήρωσης της αυξάνεται και η κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού. Τέλος, επισημαίνεται πως η επιρροή της τάσης διαρροής του χάλυβα είναι μικρή για χάλυβες υψηλής αντοχής.

2.5 Κανονιστικό πλαίσιο

Οι παρακάτω κανονισμοί αφορούν την τον σχεδιασμό των δεξαμενών αποθήκευσης υδρογονανθράκων σε κανονική θερμοκρασία και προδιαγράφουν διατάξεις για τα υλικά κατασκευής, την διάταξη των δεξαμενών, τις ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας που πρέπει να τηρούνται κ.α.

1) American standards

Flammable and Combustible Liquids Code NFPA 30 (2015), the National Fire Protection Association (NFPA)

Welded Steel Tanks for Oil Storage, API 650 (2007), the American Petroleum Institute (API).

2) British standards

BS EN 14015:2004 Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above (BS EN14015:2004).

3) European standards

EN 1993-1-6 Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-6: General rules - Strength and stability of shell structures (EN1993 1-6, 2007).

EN 1993-4-2 Eurocode 3- Design of steel structures, Part 4-2: Tanks (EN1993 4-2, 2007).

prEN 14015-1: Specification for the Design and Manufacture of Site Built Vertical Cylindrical Flat-Bottomed Above Ground Welded Metallic Tanks for the Storage of Liquids at Ambient Temperature and Above - Part 1: Steel Tanks EN 14015, draft issued for public comment in 2000 (prEN 14015-1 2000).

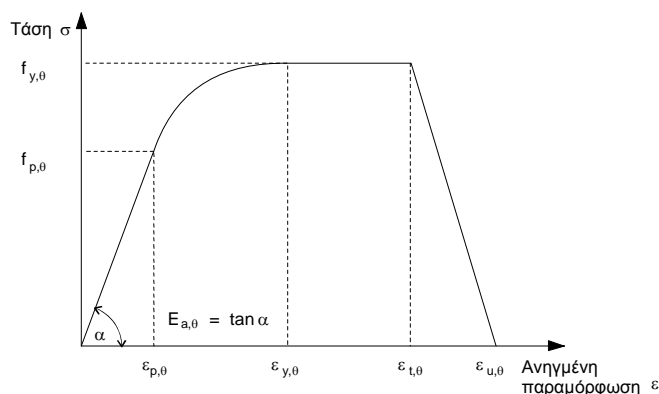
3° ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

Η εξάρτηση των μηχανικών αλλά και των θερμικών χαρακτηριστικών του χάλυβα από την θερμοκρασία είναι σημαντική και δεν μπορεί να αγνοηθεί κατά την προσομοίωση της συμπεριφοράς των κατασκευών που δέχονται θερμική φόρτιση. Η ενσωμάτωση τους στην αριθμητική προσομοίωση οδηγεί σε πιο σύνθετες αναλύσεις λόγω των μη γραμμικών νόμων που εισάγονται στην συμπεριφορά του χάλυβα στις υψηλές θερμοκρασίες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ιδιότητες του χάλυβα στις υψηλές θερμοκρασίες σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα EN 1993-1-2.

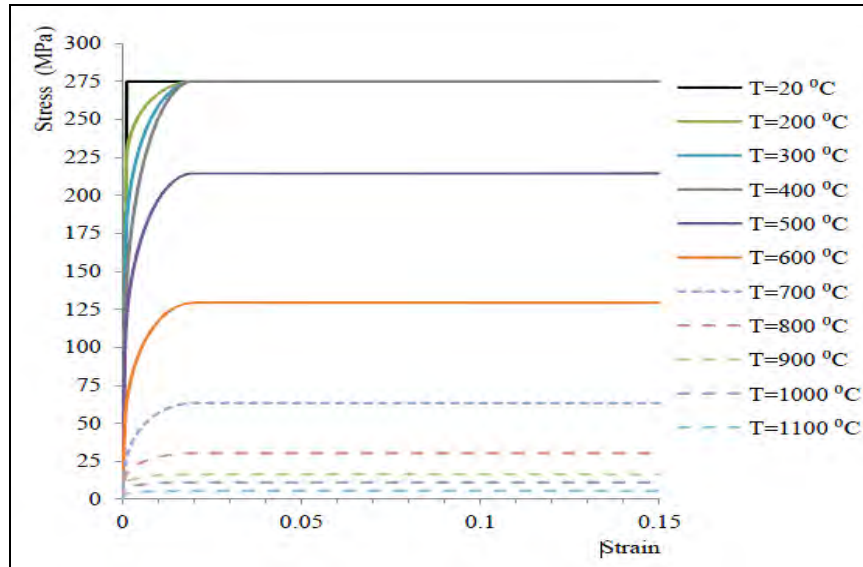
Για ρυθμούς θέρμανσης μεταξύ 2 και 50 K/min, η σχέση τάσεων παραμορφώσεων του χάλυβα δίνεται από την καμπύλη που απεικονίζεται στο Διάγραμμα 3.1. Όπως φαίνεται το διάγραμμα μεταβάλλεται σε σχέση με την κανονική θερμοκρασία. Ο ελαστικός κλάδος τερματίζεται όταν η τάση γίνει ίση με το όριο αναλογίας. Στη συνέχεια ακολουθεί ένας μη γραμμικός ελαστικός κλάδος μέχρι που η παραμόρφωση θα πάρει την τιμή $\varepsilon_{y,\theta}=2\%$. Στο σημείο αυτό η τάση γίνεται ίση με την τάση διαρροής και εμφανίζεται ο πλαστικός κλάδος. Το πλατό διαρροής μπορεί να θεωρηθεί έως και για όριο παραμόρφωσης $\varepsilon_{t,\theta}=15\%$.

Η διαφοροποίηση της τάσεων- παραμορφώσεων με την αύξηση της θερμοκρασίας φαίνεται στο Διάγραμμα 3.2 για δομικό χάλυβα S275. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα αυτό, η τάση διαρροής του χάλυβα αρχίζει να μειώνεται πάνω από τους 400°C. Περίπου στους 800°C η τάση διαρροής έχει περίπου το 11% της αρχικής τιμής της. Στους 1200°C θεωρείται πως ο χάλυβας φτάνει το σημείο ρευστοποίησης και το διάγραμμα τάσεων- παραμορφώσεων μηδενίζεται.



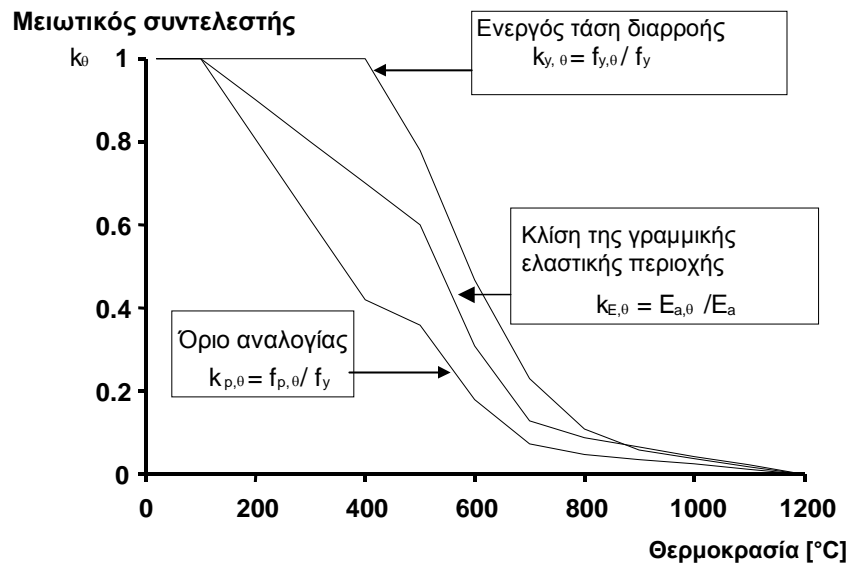
- $f_{y,\theta}$ ενεργός τάση διαρροής,
- $f_{p,\theta}$ όριο αναλογίας,
- $E_{a,\theta}$ κλίση της γραμμικής ελαστικής περιοχής,
- $\varepsilon_{p,\theta}$ παραμόρφωση αντιστοιχούσα στο όριο αναλογίας,
- $\varepsilon_{y,\theta}$ παραμόρφωση διαρροής,
- $\varepsilon_{t,\theta}$ μέγιστη παραμόρφωση στη στάθμη διαρροής,
- $\varepsilon_{u,\theta}$ οριακή παραμόρφωση.

Διάγραμμα 3.1 Σχέση τάσεων - παραμορφώσεων χάλυβα στις υψηλές θερμοκρασίες



Διάγραμμα 3. 2 Σχέση τάσης-παραμόρφωσης, για δομικό χάλυβα S275, συναρτήσει της θερμοκρασίας

Στις υψηλές θερμοκρασίες το **μέτρο ελαστικότητας**, το **όριο αναλογίας** και η **τάση διαρροής** μειώνονται. Το διάγραμμα 3.3 απεικονίζει την απομείωση των ιδιοτήτων αυτών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα EN 1993-1-2.



Διάγραμμα 3. 3 Μέτρο ελαστικότητας δομικού χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας

Η θερμική διαστολή του χάλυβα θα ορίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\text{Για } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} \leq 750^{\circ}\text{C} \quad : \frac{\Delta l}{l} = 1.2 \cdot 10^{-5} \theta_{\alpha} + 0.4 \cdot 10^{-5} \theta_{\alpha}^2 - 2.416 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Για } 750^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} \leq 860^{\circ}\text{C} \quad : \frac{\Delta l}{l} = 1.1 \cdot 10^{-2}$$

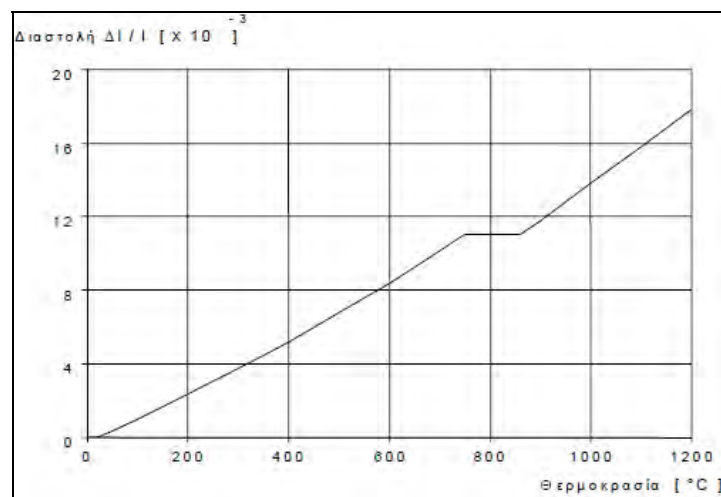
$$\text{Για } 860^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad : \frac{\Delta l}{l} = 2 \cdot 10^{-5} \theta_{\alpha} - 6.2 \cdot 10^{-3}$$

Όπου:

l το μήκος στους 20°C

Δl η μεταβολή του μήκους λόγω της θερμοκρασίας

θ_{α} η θερμοκρασία του χάλυβα ($^{\circ}\text{C}$)



Διάγραμμα 3.4 Θερμική διαστολή συνήθους χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας

Η **ειδική θερμότητα** εκφράζει το ποσό της θερμότητας που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας της μονάδας μάζας του υλικού κατά ένα βαθμό (στο S.I. $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$).

Παρατηρούμε πως η ειδική θερμότητα αυξάνεται σημαντικά στους 700°C λόγω της λανθάνουσας θερμότητας που απελευθερώνεται (Διάγραμμα 3.5)

Ο EN 1993-1-2 [1] δίνει τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\text{Για } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} \leq 600^{\circ}\text{C} \quad : c_{\alpha} = 425 + 0.773\theta_{\alpha} - 1.69 \cdot 10^{-3} \theta_{\alpha}^2 + 2.22 \cdot 10^{-6} \theta_{\alpha}^3 \quad \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

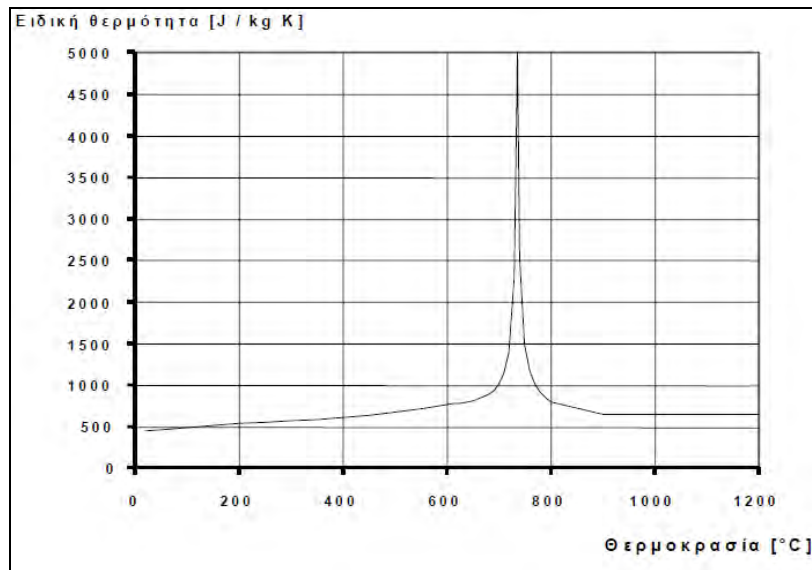
$$\text{Για } 600^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} \leq 735^{\circ}\text{C} \quad : c_{\alpha} = 666 - \frac{1302}{\theta_{\alpha} - 738} \quad \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\text{Για } 735^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} \leq 900^{\circ}\text{C} \quad : c_{\alpha} = 545 - \frac{17820}{\theta_{\alpha} - 731} \quad \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\text{Για } 900^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad : c_{\alpha} = 650 \quad \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Όπου:

θ_{α} η θερμοκρασία του χάλυβα ($^{\circ}\text{C}$)



Διάγραμμα 3.5 Ειδική θερμότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας

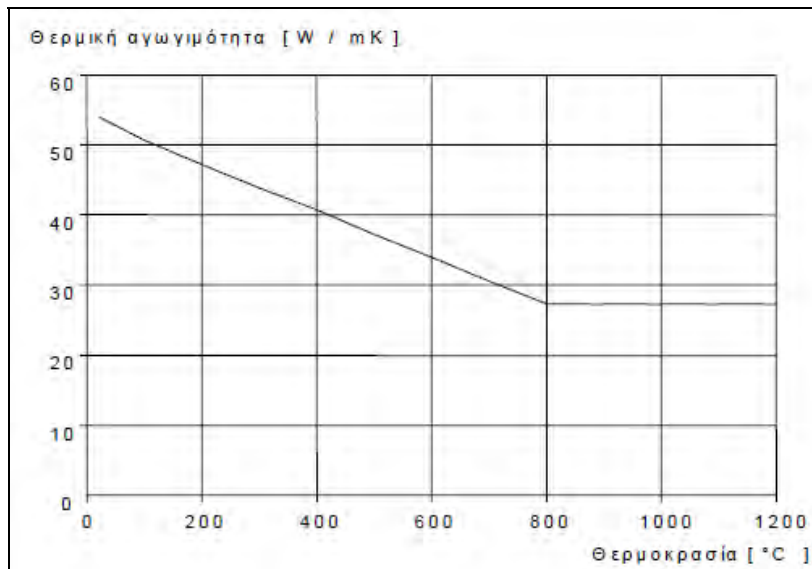
Η **θερμική αγωγιμότητα** λ_{α} μειώνεται γραμμικά μέχρι τους 800°C και μετά παραμένει σταθερή σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις κατά EN 1993-1-2 (Διάγραμμα 3.6):

$$\text{Για } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} \leq 800^{\circ}\text{C} \quad : \lambda_{\alpha} = 54 - 33.3 \cdot 10^{-3} \theta_{\alpha} \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\text{Για } 800^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} \quad : \lambda_{\alpha} = 27.3 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

Όπου:

θ_{α} η θερμοκρασία του χάλυβα ($^{\circ}\text{C}$)



Διάγραμμα 3.6 Θερμική αγωγιμότητα συνήθους χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας

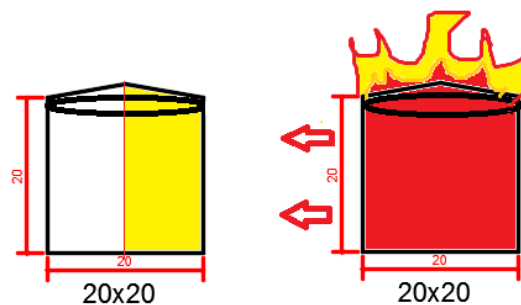
4° ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο ορίζεται η το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, παρουσιάζονται οι δεξαμενές σταθερής οροφής που εξετάζονται, ο τύπος της θερμικής φόρτισης που χρησιμοποιείται και αναλύονται οι βασικές παραδοχές που υιοθετούνται κατά τη μελέτη του προβλήματος.

4.1 Φυσικό πρόβλημα

Το πρόβλημα που μελετάται σε αυτή την εργασία είναι η διερεύνηση της θερμομηχανικής απόκρισης λεπτότοιχων κυλινδρικών δεξαμενών σταθερής οροφής υπό μη-ομοιόμορφη θερμική φόρτιση που δέχονται μέσω ακτινοβολίας από γειτονική φλεγόμενη δεξαμενή η οποία αποτελεί την πηγή θερμότητας. Το πρόβλημα επιλύεται αριθμητικά, έσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Γίνεται η θεώρηση πως οι δύο δεξαμενές έχουν την ίδια διάμετρο και πως η απόσταση μεταξύ τους είναι ίση με τη διάμετρο αυτή. Σημειώνεται πως το πρόβλημα διαφοροποιείται στην περίπτωση που εξεταστεί φλεγόμενη δεξαμενή με διαφορετική διάμετρο και μεταβάλλοντας την απόσταση μεταξύ των δεξαμενών. Πρέπει επίσης να τονιστεί πως στη εργασία αυτή εξετάζεται η περίπτωση που η δεξαμενή είναι κενή δηλαδή δεν περιέχει καύσιμη ύλη. Σύμφωνα με αποτελέσματα δημοσιευμένων εργασιών που είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία, η παρουσία υγρού στην δεξαμενή λειτουργεί ευεργετικά στην θερμομηχανική απόκριση της δεξαμενής. Επομένως η εργασία αυτή επικεντρώνεται στη δυσμενέστερη περίπτωση που είναι η κενή δεξαμενή. Η Εικόνα 4.1 δίνει μια σχηματική απεικόνιση του προβλήματος.



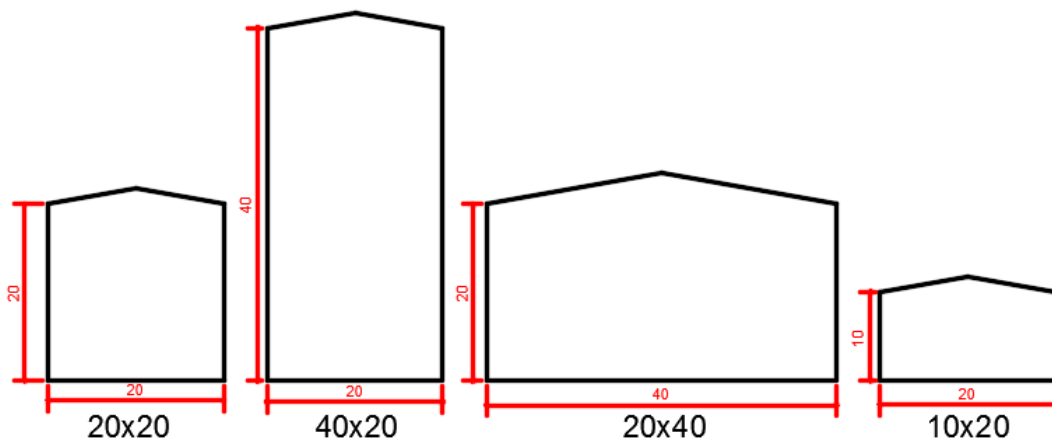
Εικόνα 4. 1 Μετάδοση θερμότητας στην μελετώμενη δεξαμενή

4.2 Δεξαμενές που εξετάστηκαν

Η εικόνα 4.2 παρουσιάζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δεξαμενών που εξετάζονται σε αυτή τη διπλωματική εργασία. Πρόκειται για λεπτότοιχες χαλύβδινες δεξαμενές αποθήκευσης πετρελαιοειδών με σταθερή οροφή. Για διάμετρο ίση με 20 m εξετάζονται 3 διαφορεικά ύψη ($H=10\text{ m}$, 20 m και 40 m) και επιπρόσθετα μελετάται και η περίπτωση της δεξαμενής με διάμετρο $D=40\text{ m}$ και ύψος $H=20\text{ m}$. Αρχικά η εργασία επικεντρώνεται στη δεξαμενή με $H=D=20\text{ m}$ και στη συνέχεια εξετάζονται οι υπόλοιπες δεξαμενές με σκοπό να διερευνηθεί η επιρροή της λυγηρότητας στην απόκριση των κυλινδρικών κελυφών υπό μη-ομοιόμορφη θερμική φόρτιση.

Όλες οι δεξαμενές διαθέτουν κωνική οροφή λεπτότοιχου κελύφους με κλίση 10° . Σημειώνεται πως για κάποιες τις διαμέτρους που εξετάζονται σε αυτή την εργασία θα ήταν πιο ρεαλιστικό να θεωρηθεί το στατικό σύστημα της οροφής ως ένας δικτυωτός δίσκος. Η επιλογή του λεπτότοιχου κωνικού κελύφους έγινε για λόγους απλοποίησης της μελέτης. Η θεώρηση ενός δικτυωτού συστήματος οροφής θα οδηγούσε σε δυσκολίες στην προσομοίωση του προβλήματος και στην παραμετροποίηση του χωρίς να αποδώσει κάποιο όφελος, εφόσον θα αποδειχτεί και στη συνέχεια πως τα φαινόμενα αστάθειας που εμφανίζονται κατά την θέρμανση τη δεξαμενής, εντοπίζονται στο κυλινδρικό κέλυφος. Το συμπέρασμα αυτό δεν αληθεύει μόνο για την περίπτωση πολύ ευκάμπτων οροφών η οποία δεν εξετάζεται σε αυτή την εργασία.

Το πάχος του κυλινδρικού κελύφους (t_c) είναι 1 cm , ενώ το πάχος οροφής (t_r) διαφοροποιείται μέσω παραμετρικών αναλύσεων για να εξεταστεί η επιρροή του βαθμού δέσμευσης που εισάγεται στην άνω βάση της δεξαμενής λόγω της ύπαρξης της οροφής. Η διαφοροποίηση εισάγεται μέσω της αλλαγής του πάχους του κελύφους της οροφής με αποτέλεσμα τη κλιμάκωση της δυσκαμψίας της και την αλλαγή των συνοριακών συνθήκων στην άνω βάση του κυλινδρικού κελύφους. Το πάχος της οροφής κλιμακώνεται σε εύρος τιμών $2t_c \leq t_r \leq 60t_c$.



Εικόνα 4. 2 Δεξαμενές οι οποίες μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική

4.3 Η θερμική φόρτιση

Στο πρόβλημα που εξετάζεται σε αυτή την εργασία, η θερμική φόρτιση που δέχεται η δεξαμενή μεταδίδεται μέσω ακτινοβολίας από μια γειτονική δεξαμενή που φλέγεται. Όπως αναμένεται η κατανομή της θερμότητας δεν θα είναι ομοιόμορφη κατά την περιφέρεια του κελύφους. Το τμήμα της δεξαμενής που βρίσκεται πιο κοντά στην πηγή θερμότητας θα είναι πιο θερμό σχετικά με το υπόλοιπο τμήμα από το ποιο δεν υπάρχει οπτική γωνία θέασης από την πηγή θερμότητας. Η υψηλότερη θερμοκρασία θα αναπτύσσεται στη γενέτειρα του κυλίνδρου, της οποίας τα σημεία είναι σε μικρότερη απόσταση από την φλεγόμενη δεξαμενή. Μάλιστα η θερμοκρασία μειώνεται κατά την περιφέρεια όσο αυξάνεται η απόσταση της δεξαμενής, από την πηγή θερμότητας. Επιπρόσθετα, η παρουσία και η στάθμη του αποθηκεμένου υγρού επηρεάζει την κατανομή των θερμοκρασιών καθ' ύψος της δεξαμενής. Συγκεκριμένα το άνω μέρος της δεξαμενής που δεν είναι σε επαφή με το υγρό είναι πιο θερμό σε σχέση με το κατώτερο τμήμα. Αυτό οφείλεται στον χαμηλό συντελεστή θερμικής συναγωγής του αέρα στο άνω τμήμα και στην μεγάλη θερμική αδράνεια του αποθηκεμένου υγρού στο κατώτερο τμήμα.

Ο υπολογισμός του θερμοκρασιακού πεδίου της δεξαμενής περιλαμβάνει την επίλυση του προβλήματος μεταφοράς θερμότητας και τα φαινόμενα που εμπλέκονται είναι περιπλοκά. Ο πιο ακριβής τρόπος υπολογισμού είναι η επίλυση του προβλήματος μέσω ρευστοδυναμικής ανάλυσης, Μια τέτοια είδους επίλυση είναι πέρα των στόχων αυτής της εργασίας. Για το λόγο αυτό υιοθετείται ένα θερμικό προφίλ που είναι διαθέσιμο στη βιβλιογραφία (Liu) και περιγράφεται από την εξίσωση 5.1. Πρόκειται για μια τετραγωνική συνημιτονοειδή συνάρτηση της γωνίας θ . Το προφίλ αυτό προέκυψε από τα αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων, με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, για τη επίλυση του προβλήματος μετάδοσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας από τη φλεγόμενη δεξαμενή στη δεξαμενή στόχο. Το προφίλ αυτό αν και βασίζεται σε παραδοχές είναι αρκετά ακριβές και υιοθετείται και από άλλους ερευνητές (Godoy and Batista, Batista and Godoy)

$$T_{\theta} = \begin{cases} (T_{0m} - T_{0a}) \cos^2 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \frac{\pi}{2} \right) & \text{if } |\theta| \leq \theta_0 \\ 0 & \text{if } |\theta| > \theta_0 \end{cases} \quad (5.1)$$

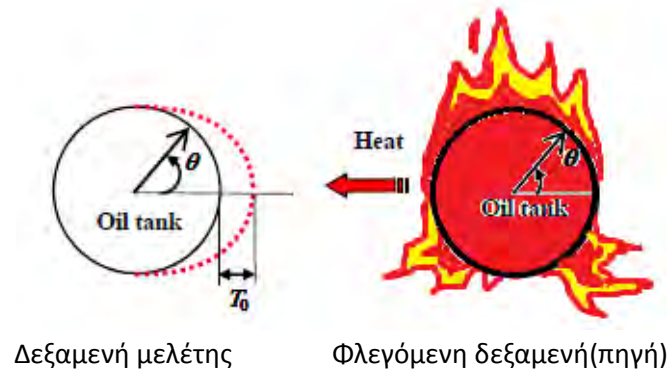
όπου: θ_0 είναι η κρίσιμη γωνία που καθορίζει την θερμαινόμενη ζώνη

T_{0m} είναι η θερμοκρασία του πιο θερμαινόμενου μεσημβρινού

T_{0a} είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος

Σύμφωνα με την εργασία του Liu, η θερμαινόμενη ζώνη (δηλαδή η ζώνη που επηρεάζεται από την θερμική ακτινοβολία) καθορίζεται μέσω της παραμέτρου θ_0 . Όταν η φλεγόμενη δεξαμενή έχει την ίδια διάμετρο με την γειτονική δεξαμενή και η απόσταση μεταξύ τους είναι ίση με την διάμετρο τους, η παράμετρος αυτή παίρνει την τιμή $\theta_0 = 90^\circ$. Σε αυτή την περίπτωση θερμαίνεται μόνο το μισό τμήμα της δεξαμενής όπως περιγράφεται στην Εικόνα 4.3. Όσο αυξάνεται η διάμετρος της φλεγόμενης δεξαμενής αυτή η

Θερμαινόμενη ζώνη αυξάνεται και στην αντίθετη περίπτωση μειώνεται. Σημειώνεται ότι, η καθ' ύψος κατανομή της θερμοκρασίας λαμβάνεται σταθερή διότι στην παρούσα εργασία η δεξαμενή θεωρείται κενή. Η παρουσία του υγρού θα διαφοροποιούσε την κατανομή της θερμοκρασίας κατά την μεσημβρινή διεύθυνση.



Εικόνα 4. 3 Κατανομή θερμοκρασίας περιφερειακά της δεξαμενής σύμφωνα με τον Liu

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

5.1 Εισαγωγή στα πεπερασμένα στοιχεία

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων σε προβλήματα της μηχανικής. Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, αν και είναι μία αριθμητική προσεγγιστική μέθοδος, μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα σε οποιοδήποτε είδους προβλήματα, πολύπλοκα ή μη στα οποία έχει δημιουργηθεί η ανάγκη επίλυσης τους. Αυτή η μέθοδος στην ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ελαστικό πεδίο (θεωρία μικρών μετατοπίσεων) αλλά και για μη γραμμικά προβλήματα όπως λυγισμό, δυναμικά προβλήματα κ.τ.λ.

Χρησιμοποιείται, γενικότερα σε προβλήματα που επιδέχονται μεταβολική διατύπωση στην μηχανική των συνεχών μέσων. Συνεπώς με βάση αυτά είναι ικανή να ανταποκριθεί σε όλα τα προβλήματα, ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα τους, γι αυτό και καθίσταται μια πολύ χρήσιμη και διαδεδομένη μέθοδος. Το μειονέκτημα της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου είναι τόσο μεγάλη, που σήμερα αποτελεί την πρώτη επιλογή στην έρευνα και στην βιομηχανία για τον υπολογισμό και τη μελέτη διάφορων κατασκευών.

Πρακτικά η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προσομοιώνει την κατασκευή με πεπερασμένα στοιχεία τα οποία συνδέονται με έναν πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Πραγματοποιείται δηλαδή διακριτοποίηση σε τετράπλευρα ή τριγωνικά μικρότερα στοιχεία, όπου συνήθως οι κόμβοι βρίσκονται στα άκρα τους. Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί φυσιολογική προσομοίωση σε πλαισιωτούς φορείς, καθώς απαρτίζονται από δοκούς οι οποίες είναι συνδεδεμένες στα άκρα τους. Στην περίπτωση όμως που η κατασκευή είναι συνεχές μέσο όπως τα κελύφη το πρόβλημα γίνεται πολύ πιο δύσκολο. Γίνεται τεχνητός διαχωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία τα οποία συνδέονται κατά μήκος των άκρων τους. Με σωστή επιλογή των ιδιοτήτων των στοιχείων και όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διακριτοποίηση, είναι δυνατόν να περιοριστεί το αριθμητικό σφάλμα και να έχουμε καλύτερη προσέγγιση του αποτελέσματος. Οι μεταβλητές του προβλήματος είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων οι οποίες είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των στοιχείων και το πρόβλημα εκφράζεται ως ένα σύνολο γραμμικών εξισώσεων που επιλύεται με αριθμητικές μεθόδους (1.Bathe 2.Hughes)

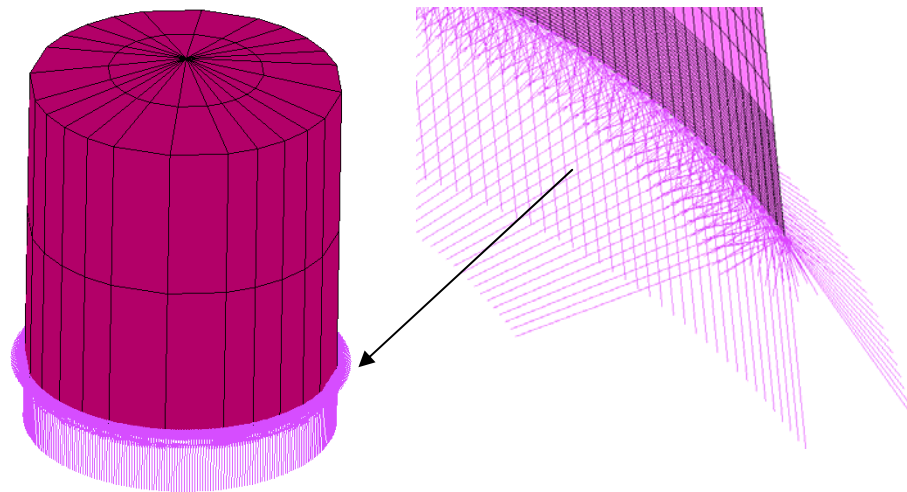
Ο τρόπος διακριτοποίησης του μοντέλου πρέπει να βασίζεται στην εμπειρία συμπεριφοράς και προσομοίωσης παρόμοιων κατασκευών. Εάν αυτό δεν είναι εφικτό πρέπει να γίνει μία σειρά επιλύσεων της κατασκευής με διαφορετικές διακριτοποιήσεις ώστε να υπολογιστεί ο βαθμός σύγκλισης στην ακριβή λύση.

5.2 Περιγραφή του αριθμητικού προσομοιώματος

Τα αριθμητικά προσομοιώματα των δεξαμενών αναπτύχθηκαν με χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων MSC Marc. Επιλέχτηκε η χρήση των κελυφωτών επιφανειακών τετράπλευρων στοιχείων τύπου 75 με πεπερασμένη δυσκαμψία, από την βιβλιοθήκη του λογισμικού Msc Marc. Τα στοιχεία αυτά όπως περιγράφεται και στο κεφάλαιο 4, έχουν πάχος 1 εκατοστό για τυπικές αναλύσεις, ενώ τα στοιχεία της οροφής ανάλογα με την κάθε ανάλυση κυμαίνονται από πάχος 2 έως 60 εκατοστά.

Χρησιμοποιήθηκε χάλυβας με μέτρο ελαστικότητας (στην κανονική θερμοκρασία) $E=210\text{GPa}$. Η απομείωση της τιμής του μέτρου ελαστικότητας στις υψηλές θερμοκρασίες έγινε σύμφωνα με τις διατάξεις του EN 1993-1-2, όπως περιγράφεται και στο Κεφάλαιο 3. Επιπρόσθετα, ο συντελεστής θερμικής διαστολής επιλέχθηκε να έχει σταθερή τιμή και ίση με $0.000012\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

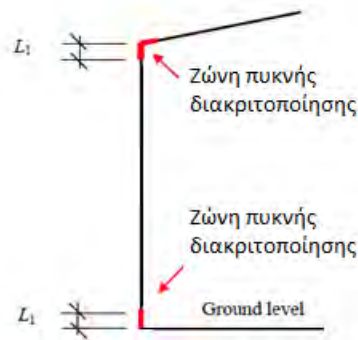
Στη βάση της δεξαμενής δεσμευτήκαν όλοι οι βαθμοί ελευθέριας των κόμβων με χρήση κυλινδρικού συστήματος συντεταγμένων για την προσομοίωση της πλήρους πάκτωσης (Εικόνα 5.1). Στην άνω βάση της δεξαμενής, η σύνδεση του κωνικού κελύφους της οροφής με το κυλινδρικό κέλυφος γίνεται μέσω κοινών κόμβων. Σημειώνεται πως στα πλαίσια αυτής της εργασίας λαμβάνονται υπόψη οι συνοριακές συνθήκες (περιορισμοί) που εισάγονται στην άνω βάση του κυλινδρικού κελύφους λόγω της κελυφωτής οροφής. Ενδεχομένως η ύπαρξη ενός δικτυωτού δίσκου ως σύστημα οροφής θα διαφοροποιούσε τις συνοριακές συνθήκες και θα οδηγούσε σε άλλα αποτελέσματα.



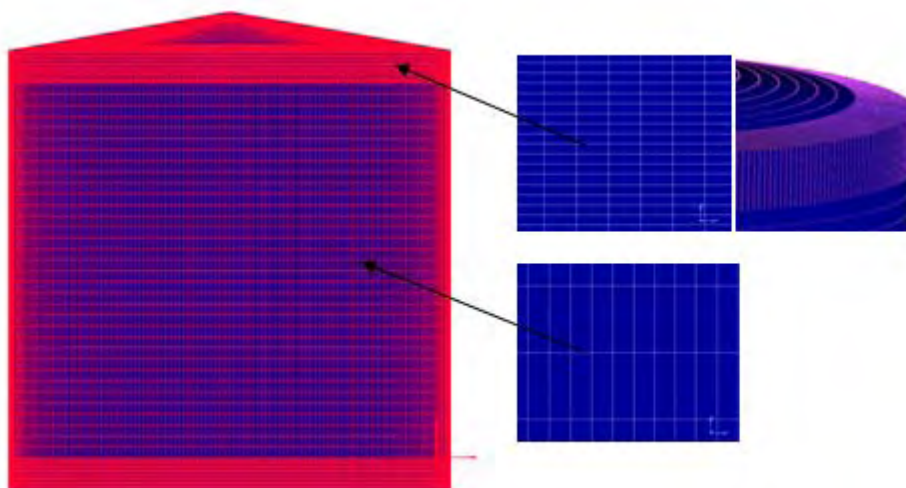
Εικόνα 5. 1 Απεικόνιση στήριξης της βάσης της δεξαμενής

Διακριτοποίηση

Η διακριτοποίηση των μοντέλων της παρούσας διπλωματικής βασίστηκε στα συμπεράσματα της παραμετρικής μελέτης σχετικά με την διακριτοποίηση των κυλινδρικών κελυφών υπό μη-ομοιόμορφη θερμική φόρτιση που διεξήγαγε ο Liu (2011). Στην περιφερειακή διεύθυνση επιλέχθηκε διακριτοποίηση ανά 1° ενώ στην κατακόρυφη διεύθυνση ανά 0.5 m στο μεγαλύτερο μέρος του κυλίνδρου. Συγκεκριμένα στα άκρα του κυλίνδρου έγινε πιο πυκνή διακριτοποίηση (ανά 0,05 m) σε ζώνη πλάτους 1,5 m, όπως φαίνεται και στις Εικόνες 5.2 και 5.3. Η πιο πυκνή διακριτοποίηση οφείλεται στις μεγάλες αξονικές δυνάμεις που εμφανίζονται στις περιοχές αυτές λόγω των δεσμεύσεων που εισάγονται από τη στήριξη και την οροφή. Έτσι για την προσομοίωση της τυπικής δεξαμενής με ύψος 20 m και διάμετρο 20 m χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 50760 πεπερασμένα στοιχεία. Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει το συνολικό αριθμό πεπερασμένων στοιχείων για όλες τις δεξαμενές που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 5. 2 Κρίσιμες περιοχές δεξαμενής με πυκνότερη διακριτοποίηση

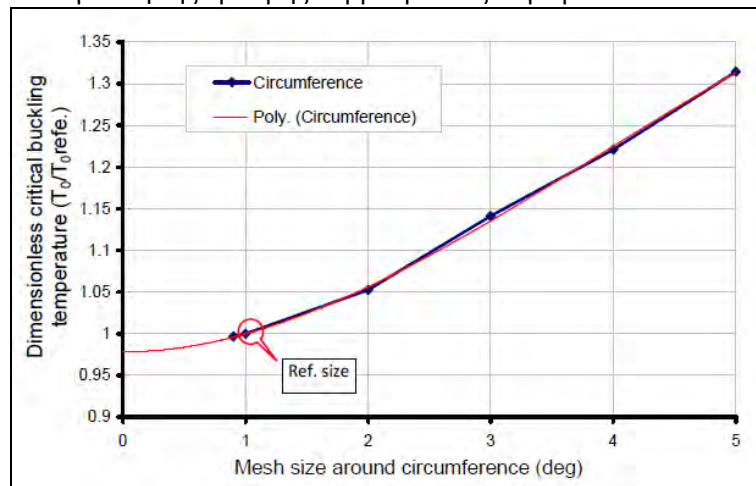


Εικόνα 5. 3 Διακριτοποίηση δεξαμενής 20x20

Δεξαμενή	Συνολικός αριθμός πεπερασμένων στοιχείων
20x20	50760
10x20	43560
40x20	65160
20x40	48600

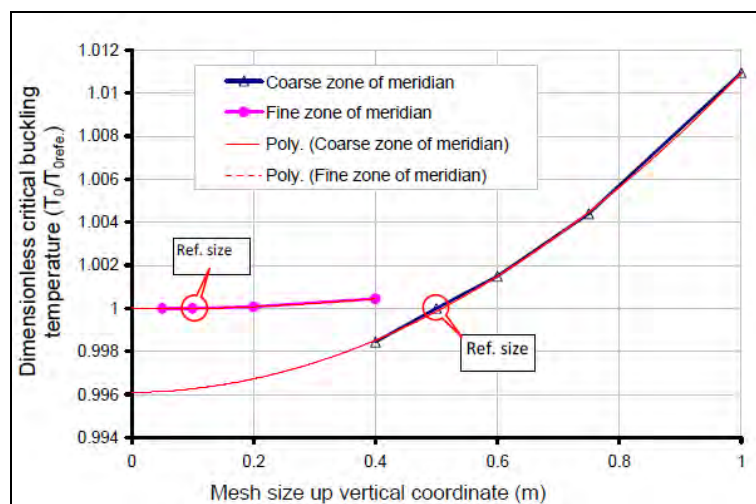
Πίνακας 5. 1 Αριθμός πεπερασμένων στοιχείων για όλες τις τυπικές δεξαμενές

Στα επόμενα διαγράμματα (Διαγράμματα 5.1 και 5.2) παρουσιάζεται η μελέτη ευαισθησίας που διεξήγαγε ο Liu [3]. Τα διαγράμματα αυτά συγκρίνουν την κρίσιμη θερμοκρασία λογισμού που προκύπτει από τα αποτελέσματα ιδιομορφικών αναλύσεων λυγισμού για διαφορετική πύκνωση κανάβου στην περιφερειακή και την κατακόρυφη διεύθυνση αντίστοιχα. Αρχικά έγινε η επιλογή μιας διακριτοποίησης αναφοράς (reference mesh) από την οποία προκύπτει και η κρίσιμη θερμοκρασία αναφοράς (T_{ref}). Στη συνέχεια έγιναν παραμετρικές αναλύσεις για το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων για να βρεθεί που παρατηρείται σύγκλιση της κρίσιμης θερμοκρασίας λυγισμού.



Διάγραμμα 5. 1 Μελέτη ευαισθησίας κατά τη περιφερειακή διεύθυνση (Liu)

$$\text{όπου: } \frac{T_0}{T_{0ref}} = \frac{\text{θερμοκρασία λυγισμού δεξαμενής με κάποια διακριτοποίηση}}{\text{πραγματική θερμοκρασία λυγισμού}}$$



Διάγραμμα 5. 2 Μελέτη ευαισθησίας κατά τη κατακόρυφη διεύθυνση (Liu)

Φόρτιση λόγω ιδίου βάρους οροφής

Το βάρος της οροφής της δεξαμενής αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παράγοντα για την απόκριση της δεξαμενής και συντελεί στην εμφάνιση των λυγισμικών φαινομένων υπό μη-ομοιόμορφη θερμική φόρτιση. Επομένως πρέπει να εκτιμηθεί με ακρίβεια ώστε να γίνει ακριβής πρόβλεψη της λυγισμικής απόκρισης της δεξαμενής. Το βάρος της οροφής εξαρτάται από την επιλογή του στατικού συστήματος και μπορεί να διαφέρει για δεξαμενές ίδιας διαμέτρου.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνήσει την επιρροή της δυσκαμψίας της οροφής στην συμπεριφορά της δεξαμενής που δέχεται την θερμική φόρτιση. Επομένως, έγινε απλά μια εμπειρική εκτίμηση μιας μέσης τιμής του βάρους της οροφής ανάλογα με τη διάμετρό της. Συγκεκριμένα, μετά από έρευνα της βιβλιογραφίας (Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι. και Ιωαννίδης Γ., 1997) βρέθηκε πως για μια δεξαμενή με διάμετρο 10 m το βάρος επιστέγασης μπορεί να ληφθεί ίσο με $20 \frac{kg}{m^2}$. Επιπρόσθετα, από

μελέτη υπάρχουσας δεξαμενής διαμέτρου 30 m, στην οποία η οροφή είναι ένας δικτυωτός δίσκος, υπολογίστηκε πως το βάρος της οροφής προκύπτει να είναι ίσο με $60 \frac{kg}{m^2}$. Με

βάση τα στοιχεία αυτά προκύπτει μια αναλογία μεταξύ της διαμέτρου και του βάρους της οροφής και τελικά συντάσσεται από Πίνακας 5.2. Η παραπάνω θεώρηση λαμβάνει υπόψη τόσο δεξαμενές που η οροφή τους είναι ένα λεπτότοιχο κέλυφος όσο και δεξαμενές με δικτυωτή οροφή και κρίνεται ικανοποιητική για την παραμετρική διερεύνηση που διεξάγεται σε αυτή την εργασία.

Διάμετρος δεξαμενής (m)	Μάζα οροφής ανά m ² κάτοψης (kg/m ²)
10	20
20	40
30	60
40	80

Πίνακας 5. 2 Μάζα οροφής για διαφορετικές διαμέτρους δεξαμενών

Το ίδιο βάρος της οροφής επιβλήθηκε ως συγκεντρωμένο σημειακό φορτίο στους περιφερειακούς κόμβους της άνω βάσης του κυλινδρικού κελύφους όπως περιγράφεται στην Εικόνα 5.3 (για την δεξαμενή 20x20). Είναι σημαντικό να τονιστεί πως στις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιηθήκαν σχετικά με την επιρροή της δυσκαμψίας της οροφής, διαφοροποιείται μόνο το πάχος του κωνικού κελύφους της οροφής και όχι το βάρος του.



Εικόνα 5. 3 Απεικόνιση της φόρτισης της δεξαμενής 20x20 λόγω ιδίου βάρους της οροφής

Φόρτιση λόγω θερμότητας

Όπως περιγράφεται αναλυτικά στο 4° κεφάλαιο η κατανομή θερμοκρασίας της μελετώμενης δεξαμενής περιγράφεται από την τετραγωνική συνημιτονοειδή καμπύλη (Εξίσωση 5.1) και επιβάλλεται στους κόμβους της μισής περιφέρειας της δεξαμενής μοιόμορφα καθ' ύψος.

$$T_{\theta} = \begin{cases} (T_{0m} - T_{0a}) \cos^2 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \cdot \frac{\pi}{2} \right) & \text{if } |\theta| \leq \theta_0 \\ 0 & \text{if } |\theta| > \theta_0 \end{cases} \quad (5.1)$$

όπου: θ_0 είναι η κρίσιμη γωνία που καθορίζει την θερμαινόμενη ζώνη

T_{0m} είναι η θερμοκρασία του πιο θερμαινόμενου μεσημβρινού

T_{0a} είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος

Για την επιβολή της θερμοκρασίας ως συνοριακή συνθήκη στο MSC Marc, απαιτείται να δημιουργηθεί συνάρτηση θερμοκρασίας που να μεταβάλλεται με τον χρόνο αλλά και με την γωνία ϕ .

Εφόσον χρησιμοποιούνται κυλινδρικές συντεταγμένες:

$$\begin{aligned} x &= \rho \cdot \cos\phi, \text{ με } \rho = \sqrt{x^2 + y^2} \\ y &= \rho \cdot \sin\phi, \\ z &= z \end{aligned}$$

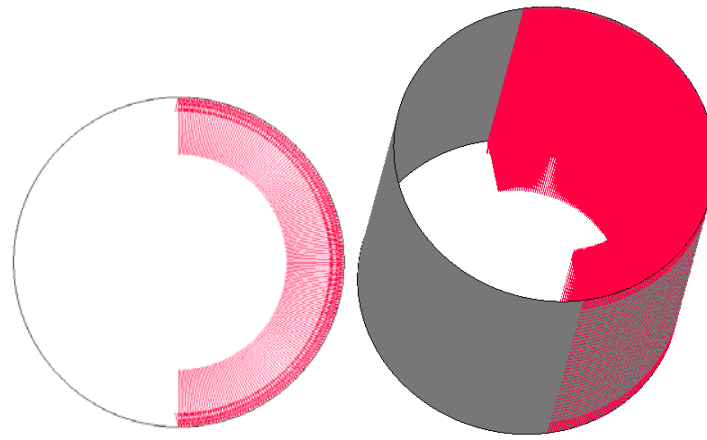
Άρα

$$\begin{aligned} x &= \rho \cdot \cos\phi \rightarrow \cos\phi = \frac{x}{\rho} \rightarrow \cos^2\phi = \frac{x^2}{\rho^2} \rightarrow \cos^2\phi = \frac{x^2}{(\sqrt{x^2 + y^2})^2} \rightarrow \\ \cos^2\phi &= \frac{x^2}{x^2 + y^2} \end{aligned}$$

Οπότε τελικά:

$$\begin{aligned} T_{\theta} &= (T_{0m} - T_{0a}) \cdot \cos^2 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \cdot \frac{\pi}{2} \right) = (T_{0m} - 0) \cdot \cos^2 \phi = T_{0m} \cdot \cos^2\phi = T_{0m} \cdot \frac{x^2}{x^2 + y^2} \rightarrow \\ T_{\theta} &= T_{0m} \cdot \frac{x^2}{x^2 + y^2} \end{aligned}$$

Αυτή είναι η τελική συνάρτηση την οποία εισάγεται για τον ορισμό της συνοριακής συνθήκης της θερμοκρασίας στην θερμαινόμενη ζώνη της δεξαμενής. Το υπόλοιπο τμήμα της δεξαμενής θεωρείται σε κανονική θερμοκρασία.



Εικόνα 5. 4 Η θερμική φόρτιση της δεξαμενής.

5.3 Είδη αναλύσεων

Το είδος της ανάλυσης που απαιτείται κάθε φορά σε ένα πρόβλημα της μηχανικής για την εύρεση του εντατικού και παραμορφωσιακού πεδίου ενός σώματος που υπόκειται σε διάφορες δράσεις εξαρτάται από τον τύπο της φόρτισης (πχ. στατική ή δυναμική), το υλικό (ελαστική ή ελαστοπλαστική απόκριση, απόκριση εξαρτώμενη από τον χρόνο-ερπυσμός κτλ.), τις συνοριακές συνθήκες καθώς και από τον τρόπο με τον οποίο αναμένεται να συμπεριφερθεί και να αστοχήσει ο φορέας. Στα πλαίσια στατικών προβλημάτων υπάρχουν 2 κατηγορίες αναλύσεων. Η γραμμική ελαστική ανάλυση και η μη γραμμική ανάλυση. Η γραμμική στατική ανάλυση εφαρμόζεται σε φορείς στους οποίους το υλικό επιδεικνύει ελαστική συμπεριφορά ενώ αναμένονται σχετικά μικρές μετατοπίσεις και παραμορφώσεις. Η μη γραμμική ανάλυση εφαρμόζεται στις περιπτώσεις όπου υφίστανται στο φορέα μια από τις παρακάτω μη γραμμικότητες ή και ο συνδυασμός τους.

- Μη γραμμικότητα του υλικού (material nonlinearity).
- Γεωμετρική μη γραμμικότητα (Geometric nonlinearity). Θεώρηση μεγάλων μετατοπίσεων και μόρφωση των εξισώσεων ισορροπίας του φορέα στην παραμορφωμένη του κατάσταση.
- Μη γραμμικές συνοριακές συνθήκες (Boundary Conditions nonlinearity-Contact Analysis).

Στα πλαίσια αυτό δύναται να εφαρμοστούν τα παρακάτω είδη μη γραμμικών αναλύσεων:

- Μη γραμμική ελαστοπλαστική ανάλυση (Non linear elastoplastic analysis).
- Γεωμετρική μη γραμμική ανάλυση (Geometric non linear analysis). Ανάλογα με το είδος των κινηματικών συνθηκών συναντώνται δυο υποκατηγορίες:
- Γεωμετρική μη γραμμική ανάλυση μικρών παραμορφώσεων (small strains)
- Γεωμετρική μη γραμμική ανάλυση μεγάλων παραμορφώσεων (large strains)
- Συνδυασμός των παραπάνω αναλύσεων.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η απόκριση κελυφωτών λεπτότοιχων μεταλλικών δεξαμενών υπό θερμική φόρτιση. Λόγω του τύπου της φόρτισης (ανάπτυξη θλιπτικών μεμβρανικών τάσεων) σε συνδυασμό με την μεγάλη λυγηρότητα των τοιχωμάτων δύναται να εμφανισθούν στον φορέα φαινόμενα αστάθειας και διάφορες μορφές λυγισμού (Thermal Buckling of Shells). Ως εκ τούτου τα είδη των αναλύσεων που θα εφαρμοσθούν θα πρέπει να είναι σε θέση να λάβουν υπόψη τα μη γραμμικά φαινόμενα που μπορούν να αναπτυχθούν κατά την προοδευτική παραμόρφωση της δεξαμενής λόγω της θερμικής καταπόνησης καθώς και να αναδείξουν τα λυγισμικά φαινόμενα και την τελική μορφή αστοχίας. Στο πλαίσιο αυτό υλοποιούνται οι παρακάτω αναλύσεις:

- **Γραμμική ιδιομορφική ανάλυση λυγισμού (Linear Buckling Analysis)**

Εφαρμόζοντας την ανωτέρω ανάλυση είναι δυνατό να προσδιορισθεί η κρίσιμη θερμοκρασία για την οποία εκδηλώνεται αστάθεια (instability) στον φορέα καθώς και το είδος της αστάθειας (μορφή λυγισμού-buckling mode). Η γραμμική ιδιομορφική ανάλυση μορφώνει το πρόβλημα ιδιοτιμών (eigenvalue problem) του φορέα λαμβάνοντας υπόψη γραμμικές κινηματικές συνθήκες και γραμμικό ελαστικό καταστατικό νόμο. Το πρόβλημα ιδιοτιμών, αναζητεί εκείνες τις πιθανές τιμές της θερμοκρασίας για τις οποίες είναι δυνατό οι αναπτυσσόμενες από την θερμοκρασία μεμβρανικές θλιπτικές τάσεις του κελύφους (που για τιμές μικρότερες από κάποια χαρακτηριστική τιμή απλά προκαλούν βράχυνση του κελύφους) να κάμψουν ξαφνικά τα τοιχώματα του. Δηλαδή είναι τα κρίσιμα μεγέθη (κρίσιμα φορτία, κρίσιμες τάσεις λυγισμού κλπ) για τα οποία λαμβάνει χώρα απόκλιση της ισορροπίας. Το γραμμικό πρόβλημα ιδιοτιμών έχει άπειρες λύσεις (ιδιοτιμές-eigenvalues) που αντιστοιχούν σε άπειρες μορφές λυγισμού (eigenmodes-buckle shapes). Σημειώνεται ότι μέσω της επίλυσης του ιδιοπροβλήματος δεν είναι δυνατή η εύρεση του εύρους των μετατοπίσεων των μορφών λυγισμού καθώς ούτε και η μεταλυγισμική απόκριση.

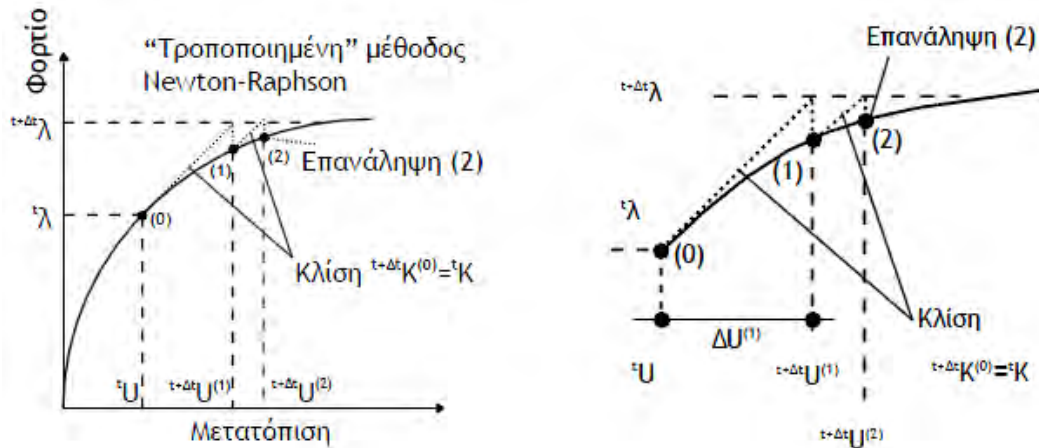
Στην παρούσα διπλωματική εργασία το ανωτέρω πρόβλημα επιλύεται αριθμητικά με την μέθοδο Lanczos (MSC Software Corporation, Bathe K.J. (1996)).

- **Γεωμετρική μη γραμμική ανάλυση του τέλει φορέα (GMNA)**

Όπως τονίστηκε παραπάνω η γραμμική ιδιομορφική ανάλυση λυγισμού υιοθετεί ένα πλαίσιο προσεγγιστικών παραδοχών στην μόρφωση του προβλήματος ενώ παράλληλα δεν είναι σε θέση να περιγράψει τον πραγματικό δρόμο ισορροπίας του φορέα πριν και μετά τον λυγισμό. Συγκεκριμένα, γίνεται η σιωπηλή παραδοχή ότι η συμπεριφορά του φορέα πριν την εκδήλωση των φαινομένων αστάθειας είναι εξολοκλήρου γραμμική ενώ δεν δύναται να προσδιορίσει τι συμβαίνει για θερμικά φορτία μεγαλύτερα από το κρίσιμο φορτίο. Συνεπώς, η πρώτη αδυναμία της μεθόδου μπορεί να οδηγήσει σε λάθος εκτίμηση του κρίσιμου θερμικού φορτίου μιας και για μικρότερα θερμικά φορτία ο φορέας ενδέχεται να αναπτύξει σημαντικές μετακινήσεις και παραμορφώσεις.

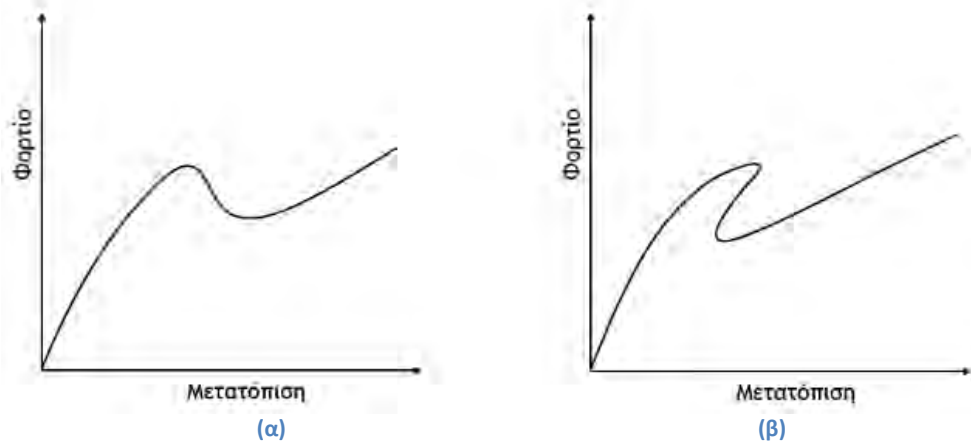
Συνεπώς, για την ρεαλιστικότερη εύρεση της απόκρισης των δεξαμενών σε θερμική καταπόνηση επιχειρείται η εφαρμογή γεωμετρικών μη γραμμικών αναλύσεων με μεγάλες παραμορφώσεις (Geometric non linear analysis with large strains). Αρχικώς, επιλύονται οι γεωμετρικά τέλει δεξαμενές λαμβάνοντας υπόψη ελαστοπλαστικό νόμο για την συμπεριφορά του χάλυβα. Στην περίπτωση αυτή μορφώνεται η διακριτοποιημένη μορφή εξίσωσης ισορροπίας του φορέα σε κάποια τυχαία παραμορφωμένη θέση του (deformed configuration) λαμβάνοντας υπόψη μη γραμμικές κινηματικές συνθήκες (large strains). Για την επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος υιοθετείται μια επαυξητική μορφή επίλυσης (incremental solution) με την οποία δύναται να γραμμικοποιηθεί (linearization) το αρχικό μη γραμμικό πρόβλημα ενώ παράλληλα προσεγγίζεται το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας (tangential stiffness matrix) του φορέα με ένα ολικό διαφορικό (Total differential approximation). Η αρχική αυτή προσέγγιση εξαρτάται από το βήμα επίλυσης και ενδέχεται να μην είναι καλή. Ως εκ τούτου για την βελτίωση της λύσης ο αλγόριθμος επίλυσης βελτιώνεται με την χρήση ενός επαναληπτικού σχήματος επίλυσης εξισώσεων όπως η μέθοδος Newton Raphson, η Modified Newton Raphson κτλ. Για εκτενή μελέτη της

μόρφωσης και επίλυσης μη γραμμικών προβλημάτων της μηχανικής ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο κλασικό σύγγραμμα του Bathe K.J. (1996). Η μέθοδος αρχικής τάσης (initial stress method) και η τροποποιημένη μέθοδος Newton-Raphson (modified Newton Raphson) παρουσιάζονται στην εικόνα 5.5. Με την μέθοδο modified Newton Raphson πραγματοποιούνται επαναληπτικές διαδικασίες στις οποίες γίνεται σταδιακή αύξηση του φορτίου ή σταδιακή προσαύξηση των μετατοπίσεων. Η τελευταία τεχνική δεν χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις διότι πρέπει να είναι από αρχής γνωστό, το σχήμα παραμόρφωσης του φορέα.



Εικόνα 5. 5 Η μέθοδος Modified Newton-Raphson και η μεγέθυνση της στο τρέχον βήμα

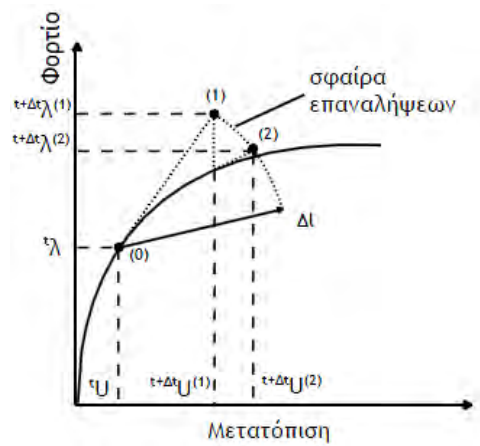
Επιπλέον θέσεις ισορροπίας τύπου snap-through και στη συνέχεια snap-back (Εικόνα 5.5) δεν μπορούν να υπερπηδηθούν με επαναληπτικές μεθόδους στις οποίες προσαυξάνεται σταδιακά το φορτίο ή οι μετατοπίσεις.



Εικόνα 5. 6 Τυπικοί μη γραμμικοί δρόμοι ισορροπίας τύπου snap-through (α) και snap-through με snap-back (β)

Τα κελύφη, όπως οι δεξαμενές που μελετούνται στο παρόν τεύχος, δύναται να αστοχήσουν από φαινόμενα αστάθειας που αναπτύσσονται όταν το διαφορικό που προσεγγίζει το εφαιπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας γίνεται ίσο με μηδέν. Στην περίπτωση

αυτή η καμπύλη του δρόμου ισορροπίας στην θέση που εκδηλώνεται το φαινόμενο αστάθειας προσεγγίζεται από μια οριζόντια εφαπτομένη και είναι προφανές ότι ο επαναληπτικός αλγόριθμος επίλυσης δυσκολεύεται να συγκλίνει. Για το λόγο αυτό στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση ενός εξελιγμένου επαναληπτικού αλγορίθμου επίλυσης (Μέθοδος μήκους τόξου-Arc-length method) που δύναται να διαχειριστεί ευκολότερα τα κρίσιμα σημεία (Criesfield M.A., (1991)). Συνεπώς τα φαινόμενα τοπικού λυγισμού είναι συνηθισμένα και ακολουθούνται από ασταθείς μεταλυγισμικούς κλάδους στις περιπτώσεις των κελυφών αυτή η μέθοδος μπορεί να προσεγγίσει και περιπτώσεις με snap-back. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η προαναφερθείσα μέθοδος και είναι εφικτό να παρατηρηθεί η ικανότητα της να εντοπίζει τέτοιου είδους δρόμους ισορροπίας ενός φορέα.



Εικόνα 5. 7 Η μέθοδος μήκους- τόξου (arc length) για μη γραμμικά προβλήματα

- Γεωμετρική μη γραμμική ανάλυση του γεωμετρικά ατελούς φορέα (GMNA)

Επειδή γενικότερα οι λεπτότοιχες μεταλλικές κατασκευές είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στην παρουσία αρχικών γεωμετρικών ατελειών διενεργήθηκε μια σειρά μη γραμμικών αναλύσεων στις οποίες επιλύθηκαν οι υπό μελέτη δεξαμενές ενσωματώνοντας αρχικές γεωμετρικές ατέλειες. Ως αρχική ατέλεια θεωρήθηκαν κάποιες από τις ιδιομορφές του ιδιοπροβλήματος που επιλύθηκε αρχικώς, κλιμακώνοντας το μέγιστο εύρος. Ως μέγιστο εύρος λογίζεται η μεγαλύτερη μετατόπιση που εμφανίζεται στο γεωμετρικά ατελές σχήμα συγκριτικά με τον γεωμετρικά τέλειο φορέα. Στόχος αυτών των αναλύσεων είναι να εξετάσει το βαθμό επιρροής τόσο του σχήματος της ατέλειας όσο και του μεγέθους της (μέγιστο εύρος) στην τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας καθώς και στη λυγισμική μορφή αστοχίας (buckling failure mode). Στην παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκαν μη γραμμικές αναλύσεις με αρχικές ατέλειες, μέγιστου εύρους 2mm, 5mm, 10mm.

6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ- ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Εισαγωγή

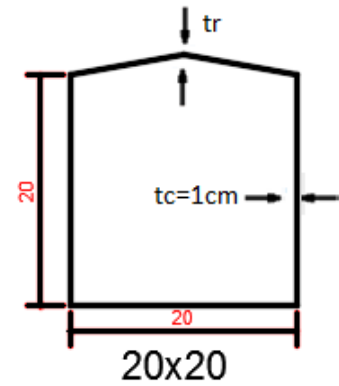
Στο παρόν κεφάλαιο επιλύεται το γραμμικό πρόβλημα ιδιοτιμών λυγισμού (Linear Eigenvalue Problem) που ονομάζεται και γραμμική ανάλυση λυγισμού (Linear Buckling Analysis-LBA) για τις δεξαμενές που περιγράφηκαν και προσομοιώθηκαν αριθμητικά με πεπερασμένα στοιχεία στα προηγούμενα κεφάλαια. Η συγκεκριμένη ανάλυση βασίζεται στις παραδοχές της γραμμικής θεωρίας ελαστικής ευστάθειας και ψάχνει να βρει εκείνες τις τιμές του θερμικού φορτίου για τις οποίες παρουσιάζεται αστάθεια (instability) στον φορέα. Ως εκ τούτου η γραμμική ανάλυση λυγισμού δύναται να προσδιορίσει μόνο τις κρίσιμες τιμές του φορτίου για τις οποίες ο φορέας γίνεται ασταθής (ιδιοτιμές-eigenvalues) καθώς και τις μορφές παραμόρφωσης που αντιστοιχούν σε αυτές τις τιμές (ιδιομορφές-eigenmodes, buckling failure modes). Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη ανάλυση λυγισμού δεν είναι σε θέση να προσδιορίσει το μέγεθος των παραμορφώσεων που λαμβάνουν χώρα κατά τον λυγισμό παρά μόνο την μορφή τους.

Η επίλυση του ανωτέρω προβλήματος στις κατασκευές παράγει γενικά απειρία λύσεων. Ειδικότερα, υπάρχουν άπειρες τιμές (σε ένα συνεχές σύστημα) ή όσοι είναι οι βαθμοί ελευθερίας της κατασκευής (σε ένα διακριτοποιημένο σύστημα) που δύναται να προκαλέσουν αστάθεια σε ένα φορέα. Επιπλέον, η αδυναμία εύρεσης του μεγέθους των παραμορφώσεων που αντιστοιχούν σε κάθε κρίσιμο φορτίο οδηγεί σε απειρία λύσεων για την συγκεκριμένη ιδιομορφή. Στα κελύφη και τις πλάκες το πρόβλημα είναι ακόμη πιο περίπλοκο μιας και για την ίδια ιδιοτιμή υφίστανται άπειρες διαφορετικές λύσεις-ιδιοσυναρτήσεις.

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας η επίλυση του ανωτέρου προβλήματος γίνεται με την αριθμητική μέθοδο Lanczos. Οι ιδιομορφές που παράγονται δύναται να χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια ως αρχικά γεωμετρικά ατελή σχήματα για την εφαρμογή της γεωμετρικής μη γραμμικής ανάλυσης. Σημειώνεται, ότι η επίλυση παρήγαγε για την ίδια ιδιοτιμή αρκετές διαφορετικές ιδιοσυναρτήσεις που αντιστοιχούν σε συμμετρικές ή και μη συμμετρικές μορφές λυγισμού. Παρακάτω παρουσιάζονται οι 8 πρώτες ιδιοτιμές της κάθε δεξαμενής που επιλύθηκε αριθμητικά και κάποιες από τις παραγόμενες ιδιομορφές. Σε κάθε ιδιοτιμή αντιστοιχούν δύο τουλάχιστον διαφορετικές ιδιομορφές εκ των οποίων η μια έχει συμμετρικό σχήμα ως προς τον μεσημβρινό με την υψηλότερη τιμή της επιβαλλομένης θερμοκρασίας (T_0) ενώ η άλλη είναι αντισυμμετρική ως προς τον ίδιο άξονα.

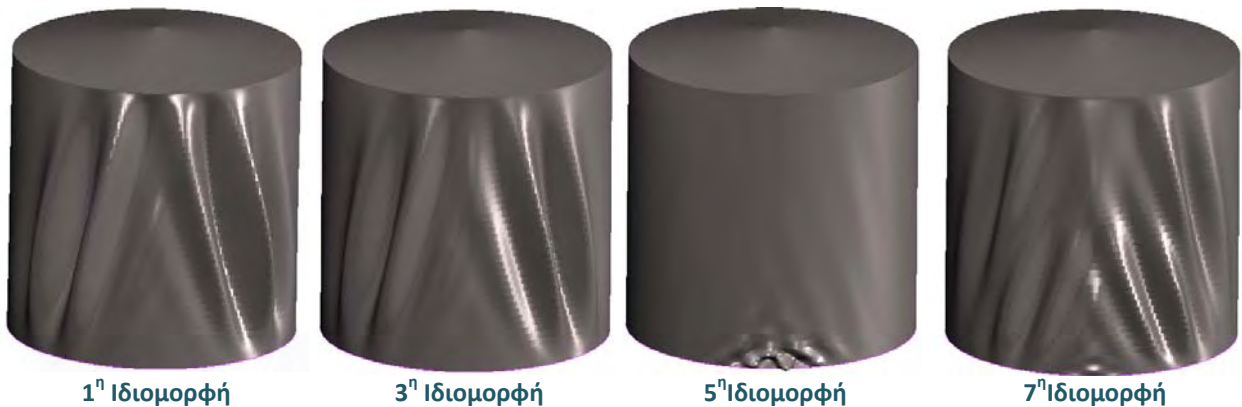
6.1 Δεξαμενή διαστάσεων 20x20

Δεξαμενή 20x20					
Ιδιομορφή	$t_r=2t_c$	$t_r=5t_c$	$t_r=10t_c$	$t_r=30t_c$	$t_r=60t_c$
1	119.2	112.2	110	112.2	120.8
2	119.2	112.2	110	112.2	120.8
3	121.6	114.4	111.9	113.3	121.1
4	121.6	114.4	111.9	113.3	121.1
5	129	123.8	121.5	120.5	122
6	129	123.8	121.5	120.5	122
7	134.1	126.4	123.7	124.9	127.1
8	134.8	127.1	124.4	125.3	128.7

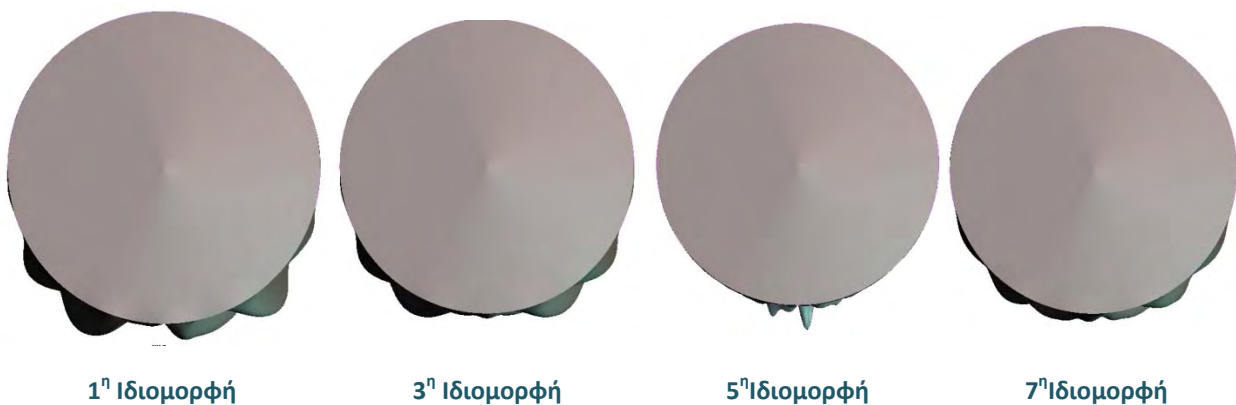


Πίνακας 6. 1 Κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού σε °C για την δεξαμενή με $h \times D = 20 \times 20$ (m) για διαφορετικά πάχη κελύφους της οροφής

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι 4 από τις 8 ιδιομορφές του παραπάνω πίνακα με πάχος οροφής $t_r=10t_c$. Σημειώνεται ότι οι ιδιομορφές των δεξαμενών με διαφορετικό πάχος οροφής ήταν ίδιας μορφής, οπότε επιλέχτηκε να παρουσιαστούν μόνο οι ιδιομορφές που αντιστοιχούν σε αυτή την οροφή:



Εικόνα 6. 1 Εμπρόσθια όψη ιδιομορφών δεξαμενής 20x20 (10 t_c) γραμμικής ανάλυσης λυγισμού



Εικόνα 6. 2 Κάτοψη ιδιομορφών δεξαμενής 20x20 (10 t_c) γραμμικής ανάλυσης λυγισμού

Όπως ήδη προαναφέρθηκε οι ιδιομορφές παρουσιάστηκαν ανά ζεύγη, όπου η μία ιδιομορφή είναι συμμετρική ως προς τον μεσημβρινό με την υψηλότερη θερμοκρασία ενώ η άλλη αντισυμμετρική. Στις δύο παρακάτω εικόνες διακρίνονται κάποια ζεύγη αυτών:



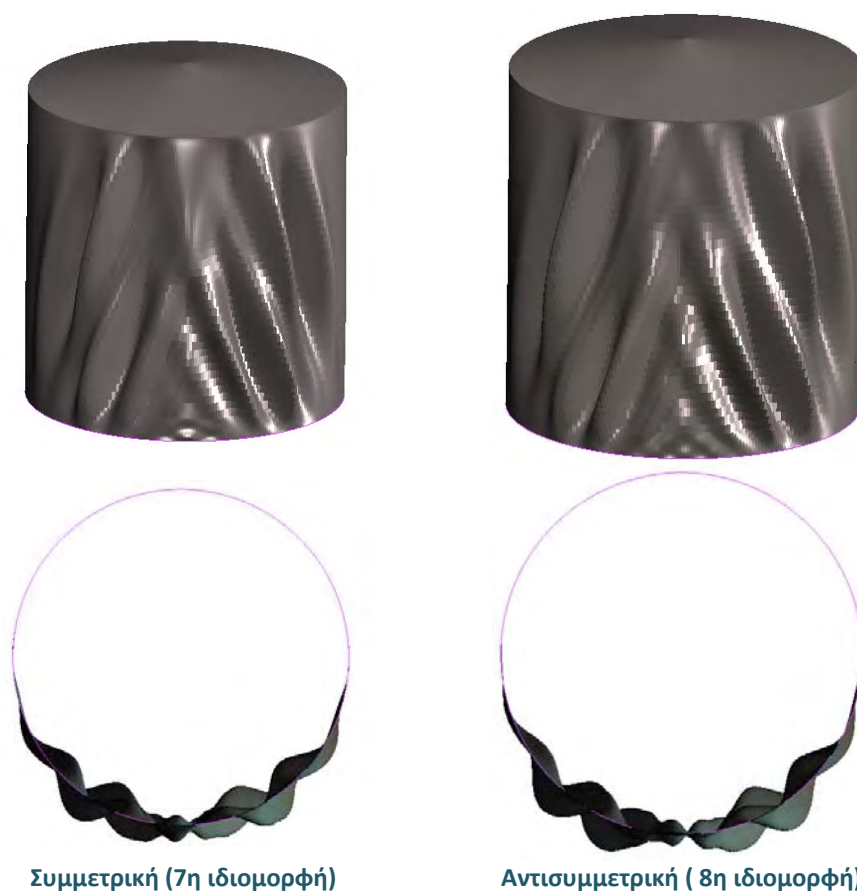
Συμμετρική (2η ιδιομορφή)



Αντισυμμετρική (1η ιδιομορφή)

Εικόνα 6. 3 1^ο ζεύγος ιδιομορφών δεξαμενής 20x20 (10tc) γραμμικής ανάλυσης λυγισμού

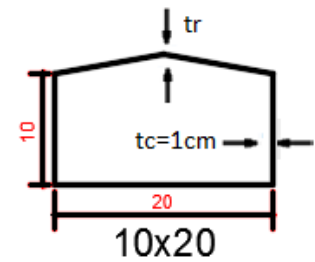
Σημειώνεται ότι η 1^η και η 7^η ιδιομορφή χρησιμοποιήθηκαν για την εισαγωγή γεωμετρικών ατελειών στην μη γραμμική γεωμετρική ανάλυση.



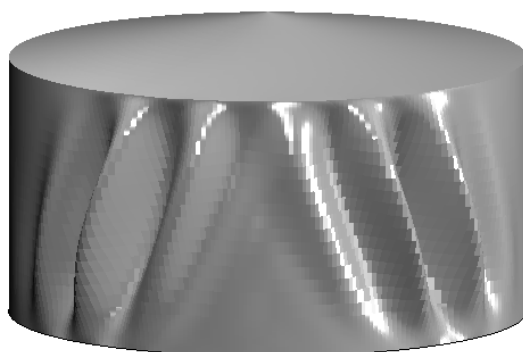
Εικόνα 6. 4 4ο ζεύγος ιδιομορφών δεξαμενής 20x20 (10tc) γραμμικής ανάλυσης λυγισμού

6.2 Δεξαμενή διαστάσεων 10x20

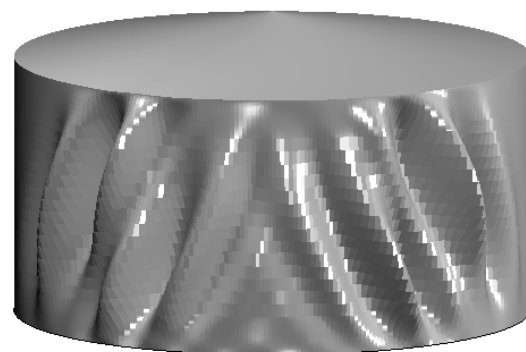
Δεξαμενή 10x20					
Ιδιομορφή	$t_r=2t_c$	$t_r=5t_c$	$t_r=10t_c$	$t_r=30t_c$	$t_r=60t_c$
1	185.3	152.9	141.2	139.6	139.6
2	185.3	152.9	141.2	139.6	139.6
3	186.1	153.5	141.8	139.9	139.9
4	186.1	153.5	141.8	139.9	139.9
5	212.1	176.4	163.3	161	161
6	212.1	176.4	163.3	161	161
7	213.2	177.3	164	161.4	161.4
8	213.6	177.3	164	161.4	161.4



Πίνακας 6. 2 Κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού σε °C για την δεξαμενή με $h \times D = 10 \times 20$ (m) για διαφορετικά πάχη κελύφους της οροφής



1^η ιδιομορφή

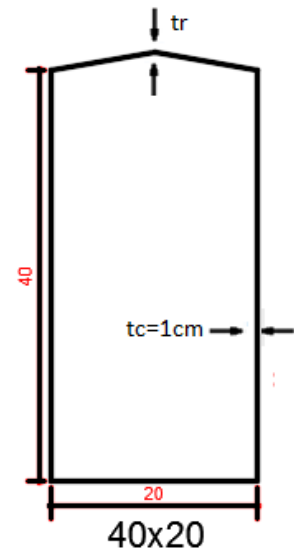


7^η ιδιομορφή

Εικόνα 6. 5 Ιδιομορφές δεξαμενής 10x20 (10t_c) γραμμικής ανάλυσης λυγισμού

6.3 Δεξαμενή διαστάσεων 40x20

Δεξαμενή 40x20					
Ιδιομορφή	$t_r=2t_c$	$t_r=5t_c$	$t_r=10t_c$	$t_r=30t_c$	$t_r=60t_c$
1	100.8	99.8	99.4	99.7	102.5
2	100.9	99.8	99.4	99.7	102.5
3	104.3	103.1	102.7	103.1	106
4	106.2	105.1	104.7	105	107.9
5	109	107.9	107.5	107.8	110.8
6	112.2	111	110.6	111	114.1
7	113	111.8	111.3	111.7	115
8	113.5	112.2	111.8	112.2	115.5



Πίνακας 6. 3 Κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού σε °C για την δεξαμενή με $h \times D=40 \times 20$ (m) για διαφορετικά πάχη κελύφους της οροφής



1^η ιδιομορφή

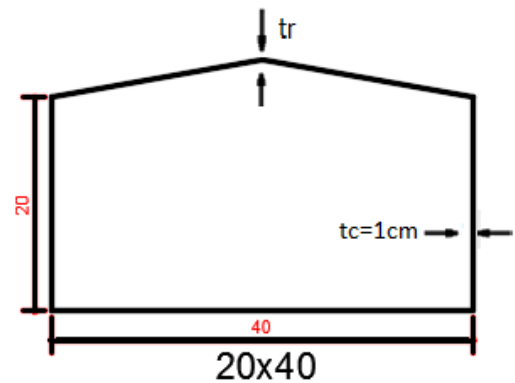


7^η ιδιομορφή

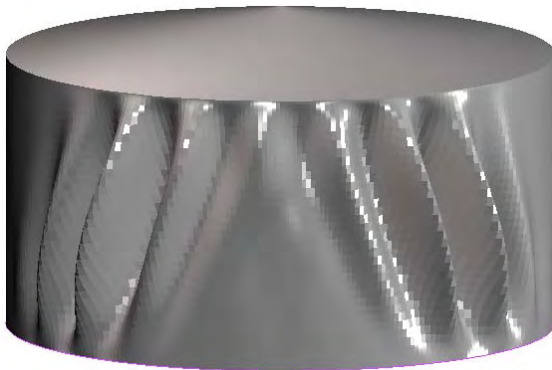
Εικόνα 6. 6 Ιδιομορφές δεξαμενής 40x20 (10 t_c) γραμμικής ανάλυσης λυγισμού

6.4 Δεξαμενή διαστάσεων 20x40

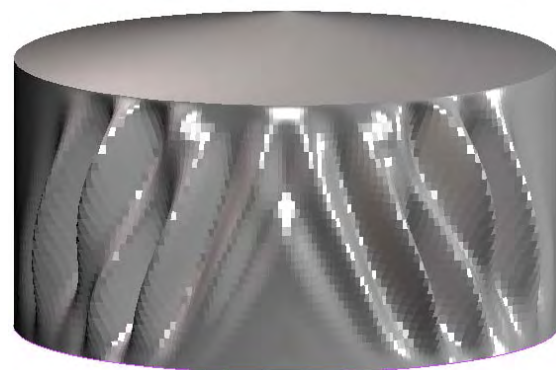
Δεξαμενή 20x40					
Ιδιομορφή	$t_r=2t_c$	$t_r=5t_c$	$t_r=10t_c$	$t_r=30t_c$	$t_r=60t_c$
1	53.3	46.1	42.9	41.9	42.57
2	53.3	46.1	42.9	41.9	42.5
3	53.5	46.2	43	42	42.6
4	53.5	46.2	43	42	42.6
5	57	49.9	46.7	45.7	46.3
6	57	49.9	46.7	45.7	46.3
7	57.2	50.1	46.9	45.8	46.3
8	57.2	50.1	46.9	45.8	46.3



Πίνακας 6. 4 Κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού σε °C για την δεξαμενή με $h \times D = 40 \times 20$ (m) για διαφορετικά πάχη κελύφους της οροφής



1^η ιδιομορφή



7^η ιδιομορφή

Εικόνα 6. 7 Ιδιομορφές δεξαμενής 20x40 (10 t_c) γραμμικής ανάλυσης λυγισμού

Άξιο σχολιασμού είναι το γεγονός ότι η δεξαμενή 20x40 ήταν η μοναδική από τις προαναφερθείσες δεξαμενές, η οποία δεν παρουσίασε καθόλου ιδιομορφές τοπικού λυγισμού στο κάτω μέρος της (βάση).

7^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΛΥΓΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΤΕΛΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΤΕΛΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΥΠΟ ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η λυγισμική απόκριση των κυλινδρικών δεξαμενών που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4 και οι οποίες υπόκεινται σε ανομοιόμορφη θερμική καταπόνηση. Αρχικώς, διερευνάται αναλυτικά το θερμομηχανικό πρόβλημα της δεξαμενής διαστάσεων 20x20(HxD) μέσω γεωμετρικής και ελαστοπλαστικής μη γραμμικής ανάλυσης θεωρώντας τον γεωμετρικά τέλειο φορέα. Η ανάπτυξη θερμικών τάσεων στις δεξαμενές, το θλιπτικό μέρος των οποίων ευθύνεται για την λυγισμική τους απόκριση, είναι αποτέλεσμα τόσο του ανομοιόμορφου τρόπου θέρμανσης τους όσο και της πλευρικής παρεμπόδισης που προκαλεί η ύπαρξη της οροφής. Ως εκ τούτου, για την πλήρη κατανόηση της εκδήλωσης του φυσικού φαινομένου παρουσιάζονται για την δεξαμενή διαστάσεων 20x20 μια σειρά αποτελεσμάτων που σχετίζονται, με την κατανομή των τάσεων και των ανοιγμένων παραμορφώσεων περιφερειακά και καθ' ύψος του κελύφους καθώς και πλήρη περιγραφή του δρόμου ισορροπίας για το προλυγισμικό και μεταλυγισμικό στάδιο απόκρισης (αποτελέσματα τα οποία δεν διεξάγει η γραμμική ανάλυση λυγισμού-LBA). Εν συνεχεία, στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου υλοποιείται μια εκτενής παραμετρική ανάλυση για την εύρεση του μεγέθους επιρροής συγκεκριμένων παραγόντων στο θερμικό πρόβλημα λυγισμού των δεξαμενών. Συγκεκριμένα, μελετάται η επιρροή της δυσκαμψίας της οροφής (ως συνοριακή συνθήκη), της λυγηρότητας της δεξαμενής (λόγος H/D), και της παρουσίας αρχικών γεωμετρικών ατελειών.

7.1 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΤΕΛΕΙΟΥ ΦΟΡΕΑ-ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 20Χ20

Για την πλήρη μόρφωση και επίλυση του φυσικού προβλήματος που πραγματεύεται η παρούσα εργασία, όπως αυτό παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4, δημιουργήθηκαν αριθμητικά προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους σύμφωνα με τα όσα ελέχθησαν στο Κεφάλαιο 5. Εν συνεχεία, για την ρεαλιστικό προσδιορισμό των θερμικών τάσεων και παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στις υπό μελέτη δεξαμενές και την εύρεση της λυγισμικής τους απόκρισης διενεργήθηκαν γεωμετρικές μη γραμμικές θερμομηχανικές αναλύσεις οι οποίες λαμβάνουν υπόψη την ανάπτυξη μεγάλων παραμορφώσεων καθώς και ελαστοπλαστικό καταστατικό νόμο για την συμπεριφορά του μητρικού υλικού. Στο παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται αναλυτικά οι βασικές παράμετροι που σχετίζονται με την αριθμητική επίλυση του προβλήματος καθώς και τα παραγόμενα αποτελέσματα για την τυπική δεξαμενή διαστάσεων 20x20.

7.1.1 Αριθμητική διαδικασία και βέλτιστοι αλγόριθμοι επίλυσης

Όπως τονίστηκε και στο 5^ο Κεφάλαιο αυτού του είδους οι αναλύσεις απαιτούν την χρήση ενός επαυξητικού σχήματος φόρτισης σε συνδυασμό με ένα επαναληπτικό αλγόριθμο επίλυσης των μη γραμμικών διακριτοποιημένων εξισώσεων που περιγράφουν το πρόβλημα. Για τις κυλινδρικές κελυφωτές δεξαμενές που επιλύθηκαν η θερμική φόρτιση που ασκείται στη μισή επιφάνεια τους (εξ.5.1) μεταβάλλεται γραμμικά και αυξητικά με τον χρόνο (ψευδοχρόνος). Αυτό επιτυγχάνεται στο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση (Marc MSC. Software), μέσω της χρήσης ενός πίνακα που συσχετίζει τα βήματα φόρτισης (χρονικά βήματα Δt) με την τιμή του θερμικού φορτίου. Η ανωτέρω διαδικασία πρακτικά γραμμικοποιεί της διαφορικές εξισώσεις του προβλήματος για την επίλυση των οποίων υιοθετείται ένα επαναληπτικό σχήμα επίλυσης. Στην περίπτωση των κελυφών τα πλέον κατάλληλα αριθμητικά σχήματα επίλυσης των εξισώσεων είναι εκείνα τα οποία δεν κάνουν χρήση ενός σταθερού βήματος επίλυσης αλλά το προσαρμόζουν κατάλληλα κατά την επίλυση. Με αυτό τον τρόπο δύναται να περιγραφούν δρόμοι ισορροπίας με φθίνοντες κλάδους (αρνητική δυσκαμψία συστήματος), φαινόμενο το οποίο συναντάται κατά κόρον στον λυγισμό των κελυφών. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι επίλυσης αυτού του τύπου είναι οι μέθοδοι μήκος-τόξου (Arc-Length methods). Οι μέθοδοι αυτοί δουλεύουν άκρως ικανοποιητικά και αποτελεσματικά στις περιπτώσεις όπου εκδηλώνονται καθολικές μορφές λυγισμού (Global Buckling) ενώ πιθανώς να μην ανταποκριθούν σωστά όταν αναπτύσσονται τοπικά λυγισμικά φαινόμενα (Local Instabilities) σε ένα φορέα (Kobayashi T.), (Yu C.)

. Στην περίπτωση τοπικών ασταθειών σε ένα φορέα η ενέργεια παραμόρφωσης που παράγεται για την διατήρηση της ισορροπίας δεν είναι καθολικού χαρακτήρα όπως στην περίπτωση του καθολικού λυγισμού αλλά εκλύεται και μετατοπίζεται τοπικά, στην γειτονιά μιας περιοχής του φορέα. Ως εκ τούτου οι κλασσικές μέθοδοι παρουσιάζουν αδυναμίες στην διαχείριση τοπικών ασταθειών. Στην παρούσα μελέτη κυριαρχούν τα φαινόμενα τοπικού λυγισμού και επιπρόσθετα υπάρχει η ανάγκη για τον ακριβή εντοπισμό της κρίσιμης θερμοκρασίας για την οποία εμφανίζεται η πρώτη τοπικού ενδεχομένως χαρακτήρα αστάθεια. Για το λόγο αυτό γίνεται χρήση ενός εξελιγμένου αλγόριθμου

επίλυσης που κάνει χρήση προσαρμοσμένου (κατάλληλα κάθε φορά) βήματος φόρτισης (Adaptive Stepping Procedure Scheme) και συμπληρώνεται από την τεχνική της τεχνικής απόσβεσης (Artificial Damping Technique).

Η τεχνική αυτή πρακτικά σταθεροποιεί την επαναληπτική διαδικασία επίλυσης βοηθώντας την να συγκλίνει πιο εύκολα μιας και είναι σε θέση να εντοπίσει και να διαχειριστεί φαινόμενα τοπικού λυγισμού τα οποία γενικά τείνουν να αποσταθεροποιήσουν τα κλασσικά σχήματα επίλυσης. Η δυνατότητα αυτή επιτυγχάνεται με την εισαγωγή «τεχνητών» δυνάμεων απόσβεσης στις εξισώσεις ισορροπίας του φορέα [12] οι οποίες μπορούν να δράσουν σταθεροποιητικά αποσβένοντας την παραγόμενη ενέργεια. Ειδικότερα, στην γενική περίπτωση φόρτισης ενός φορέα με συνολικό εξωτερικό φορτίο P , που εξισορροπείται από τις παραγόμενες εσωτερικές δυνάμεις Q , στην γενική εξίσωση που περιγράφει την ισορροπία του συστήματος προστίθεται η «τεχνητή» δύναμη απόσβεσης F_D ούτως ώστε να ισχύει:

$$P - Q - F_D = 0 \quad \text{Εξ. 7.1}$$

όπου,

$$F_D = c \cdot M \cdot v \quad \text{Εξ. 7.2}$$

Στην παραπάνω εξίσωση c είναι ο συντελεστής απόσβεσης (που συναντάται και ως λόγος απόσβεσης-damping ratio), M ένα τεχνητό μητρώο μάζας υπολογισμένο για μοναδιαία πυκνότητα, και $\tilde{v} = \Delta \tilde{u} / \Delta t$ το διάνυσμα επικόμβιων ταχυτήτων όταν $\Delta \tilde{u}$ είναι το διάνυσμα επικόμβιων μετατοπίσεων. Ο συντελεστής απόσβεσης c πρακτικά επιλέγεται έτσι ώστε στο πρώτο βήμα επίλυσης η ενέργεια απόσβεσης να είναι ένα πολύ μικρό μέρος της συνολικής ενέργειας παραμόρφωσης. Δηλαδή,

$$c = \frac{\text{Dissipated Energy}}{\text{Total Strain Energy}} \quad \text{Εξ. 7.3}$$

Συνήθως λαμβάνεται αρχική τιμή $c = 2 \times 10^{-4}$ (default value) η οποία μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της επίλυσης.

Αρχικά, καθώς παραμορφώνεται σταδιακά ο φορέας η ισορροπία του συστήματος είναι ευσταθής και ως εκ τούτου η τεχνητή δύναμη απόσβεσης και κατά συνέπεια η ενέργεια απόσβεσης είναι αρκετά μικρές συγκριτικά με τις εσωτερικές δυνάμεις Q και την συνολική ενέργεια του συστήματος αντίστοιχα. Συνεπώς, ο όρος της «τεχνητής» απόσβεσης δεν παίζει κανένα ρόλο και δεν επηρεάζει την συμπεριφορά του συστήματος. Αν τώρα σε κάποια περιοχή του φορέα εκδηλωθεί τοπικός λυγισμός-αστάθεια, οι μετατοπίσεις των κόμβων του φορέα στην γειτονιά της περιοχής που εκδηλώνεται η αστάθεια μεγαλώνουν δυσανάλογα σε σχέση με την αύξηση του φορτίου με αποτέλεσμα να αυξάνονται και οι αντίστοιχες ταχύτητες. Πρακτικά η απότομη αύξηση των μετατοπίσεων οδηγεί σε αύξηση της συνολικής ενέργειας του συστήματος (για την ανάγκη διατήρησης της ισορροπίας) η οποία αποσβένεται από την αντίστοιχη αύξηση της ενέργειας απόσβεσης που απορρέει από την αύξηση των ταχυτήτων. Σε αριθμητικό επίπεδο αυτό μεταφράζεται ως εξής: η

ιδιάζουσα μορφή που μπορεί να πάρει ο όρος των εσωτερικών δυνάμεων Q (που είναι συνάρτηση του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας) και η οποία θα δυσκολεύει την σύγκλιση με το εξωτερικό φορτίο P εξισορροπείται πρακτικά από τον πρόσθετο όρο που εισάγει η δύναμη F_D . Συνεπώς, την στιγμή που θα εκδηλωθούν φαινόμενα αστάθειας κατά την διάρκεια της επίλυσης ο αλγόριθμος της τεχνητής απόσβεσης (artificial damping) θα αυξήσει αυτόματα τον συντελεστή απόσβεσης ενώ τον μειώνει όταν δεν εκδηλώνονται. Με αυτό τον τρόπο (εντοπίζοντας τα άλματα στα διαγράμματα του λόγου απόσβεσης ως προς την επιβαλλόμενη θερμοκρασία) δύναται να εντοπιστεί επακριβώς η κρίσιμη θερμοκρασία στην οποία εκδηλώνεται τοπική αστάθεια στον φορέα.

Στα πλαίσια της εργασίας αποδείχθηκε ότι η τεχνική της «τεχνητής απόσβεσης» είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στην αρχική τιμή του λόγου απόσβεσης επηρεάζοντας την ανάλυση και τα παραγόμενα αποτελέσματα. Ως εκ τούτου παίζει σημαντικό ρόλο η επιλογή της κατάλληλης τιμής της παραμέτρου c . Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε μια σειρά από διαδοχικές αναλύσεις που είχαν ως στόχο την σύγκλιση του λόγου απόσβεσης c σε εκείνη την τιμή πέραν της οποίας δεν παρατηρούνταν καμία αλλαγή στα αποτελέσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή αυτή δεν μπορεί να είναι υπερβολικά μικρή διότι μπορεί να εμφανισθούν αριθμητικού τύπου αστάθειες και παύση της επίλυσης. Στην παρούσα μελέτη αποδείχθηκε ότι επιτυγχάνεται σύγκλιση των αποτελεσμάτων για τιμές του λόγου c μεταξύ των τιμών $10^{-6} \div 10^{-10}$ ανάλογα με τον τύπο της δεξαμενής που επιλύθηκε.

7.1.2 Περιγραφή αποτελεσμάτων τυπικής δεξαμενής 20x20

Αρχικώς, θεωρείται το θερμομηχανικό πρόβλημα της γεωμετρικά τέλει δεξαμενής διαστάσεων 20x20 (m). Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια η δεξαμενή καταπονείται από θερμικό φορτίο που ασκείται στην ημιπεριφέρεια της δεξαμενής. Η θερμική φόρτιση κατανέμεται ακτινικά στο κέλυφος σύμφωνα με την τετραγωνική συνημιτονοειδή καμπύλη ενώ παραμένει σταθερή καθ' ύψος. Τα σημεία της οροφής και του υπόλοιπου κελύφους βρίσκονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η συγκεκριμένη δεξαμενή έχει σταθερό πάχος κελύφους ίσο με $t_c = 1 \text{ cm}$ ενώ λαμβάνεται υπόψη ότι οι συνοριακές συνθήκες που εισάγονται με χρήση μιας κελυφωτής επιφάνειας κωνικής μορφής πάχους $t_r = 10t_c = 10 \text{ cm}$. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι, στη συνέχεια του κεφαλαίου υλοποιείται μια παραμετρική ανάλυση που σχετίζεται με την επιρροή των συνοριακών συνθηκών (σε όρους μετακινήσεων μόνο) που εισάγουν διαφορετικοί τύποι οροφής μέσω του ανωτέρω τρόπου προσομοίωσης. Η μελέτη λαμβάνει υπόψη πάχη για την θεωρούμενη κελυφωτή επιφάνεια κωνικής μορφής, που κυμαίνονται από $t_r = 2t_c$ ως $t_r = 60t_c$. Προς αποφυγή λανθασμένων συμπερασμάτων τονίζεται ότι η ανωτέρω θεώρηση αφορά μόνο τις συνθήκες στήριξης του άνω μέρους της δεξαμενής από την εκάστοτε οροφή και δεν αλλοιώνει την τιμή του βάρους της οροφής που μεταβιβάζεται στο κέλυφος της δεξαμενής. Δηλαδή, π.χ. οροφή που προσομοιώνεται με λαμαρίνα πάχους $t_r = 60t_c$ δεν σημαίνει ότι μεταβιβάζει και το αντίστοιχο βάρος που προκύπτει από αυτό το πάχος. Το βάρος της οροφής επηρεάζει άμεσα την κρίσιμη τιμή της θερμοκρασίας λυγισμού μιας και εισάγει σημαντικές θλιπτικές τάσεις και ως εκ τούτου θα ήταν λανθασμένη μια παρόμοια θεώρηση

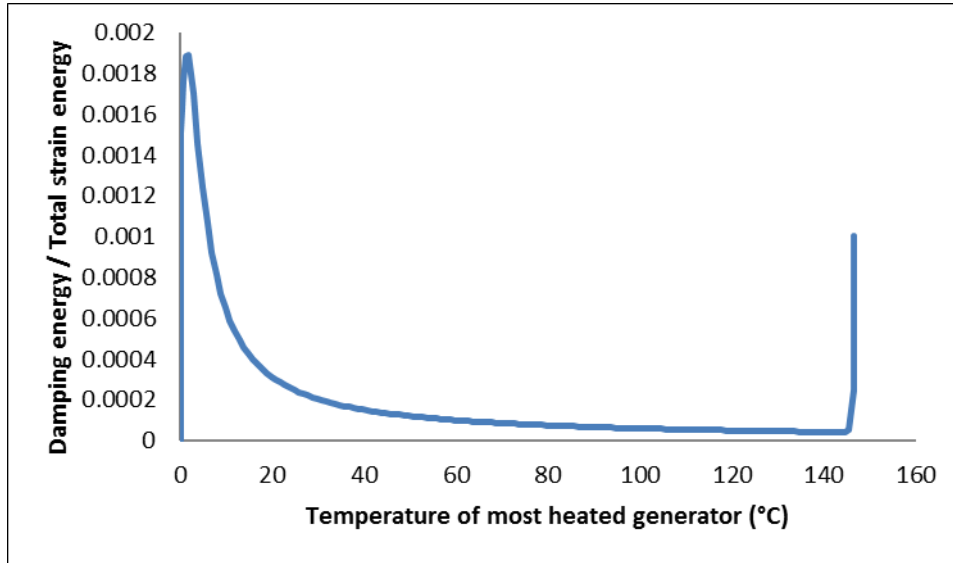
που θα αντιστοιχούσε ενδεχομένως σε μη πραγματικές συνθήκες. Ο προσδιορισμός της τιμής του βάρους για την εκάστοτε δεξαμενή εξαρτάται από τις διαστάσεις της και υπολογίστηκε στην παράγραφο 5.2.

Στο πρώτο στάδιο της μελέτης πραγματοποιείται μια δοκιμαστική σειρά γεωμετρικών μη γραμμικών αναλύσεων ούτως ώστε να εντοπιστεί η κατάλληλη τιμή του λόγου απόσβεσης (damping ratio). Οι αναλύσεις αυτές διεξάγονται κάθε φορά για δεξαμενές διαφορετικών διαστάσεων αλλά για συγκεκριμένο πάχος οροφής μιας και θα αποδειχθεί και στη συνέχεια πως η διαφορετική τιμή του πάχους της οροφής δεν επηρεάζει την τιμή του λόγου απόσβεσης. Ως κατάλληλη τιμή θεωρείται εκείνη για την οποία η κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού συγκλίνει σε ακρίβεια πρώτου δεκαδικού. Για την δεξαμενή διαστάσεων 20x20 η εύρεση της τιμής του λόγου απόσβεσης βασίστηκε στην δοκιμαστική ανάλυση της δεξαμενής με πάχος οροφής $t_r = 5t_c$. Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας με τις θερμοκρασίες λυγισμού συναρτήσει των συντελεστών απόσβεσης. Με βάση τον παρακάτω πίνακα επιλέγεται η τιμή, damping ratio = 10^{-7} . Η τιμή αυτή διατηρείται σταθερή για όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν σε δεξαμενές γεωμετρίας hxD=20x20 χωρίς ατέλειες. $T_{cr,GMNA}$ ($^{\circ}C$).

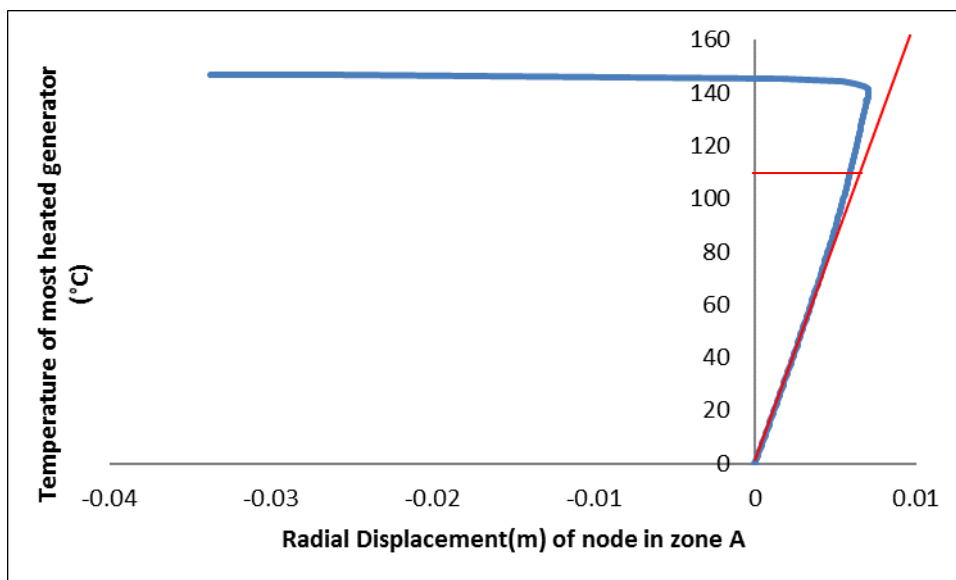
Δεξαμενή 20x20 (5tc)	
Λόγος απόσβεσης (damping ratio)	Κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού $T_{cr,GMNA}$ ($^{\circ}C$)
10^{-4}	133.3
10^{-6}	142.327
10^{-7}	143.27
10^{-10}	143.27

Πίνακας 7.1. 1 Σύγκλιση του λόγου απόσβεσης (damping ratio) ως προς την θερμοκρασία λυγισμού για την δεξαμενή διαστάσεων 20x20 με οροφή πάχους $t_r=5t_c$.

Στο διάγραμμα 7.1 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου απόσβεσης σε σχέση με την προοδευτική αύξηση του θερμικού φορτίου. Από το διάγραμμα αυτό γίνεται αντιληπτό ότι παρουσιάζεται αστάθεια στον φορέα όταν η θερμοκρασία γίνει ίση με $143,5^{\circ}C$ αποτέλεσμα που επιβεβαιώνεται και από τα στιγμιότυπα παραμόρφωσης της δεξαμενής της Εικόνας 7.2, καθώς και από τον δρόμο ισορροπίας ενός κόμβου που βρίσκεται στην περιοχή της δεξαμενής που υπόκειται σε λυγισμό (Διάγραμμα 7.2). Ειδικότερα, η δεξαμενή συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά μέχρι η θερμοκρασία να γίνει ίση με $T=143.5^{\circ}C$ (προλυγισμικό στάδιο - pre-buckling state). Στο στάδιο αυτό η παραμόρφωση (διόγκωση) της δεξαμενής εκδηλώνεται κατά κύριο λόγο στην ημιπεριφέρεια που φορτίζεται με το θερμικό φορτίο και είναι αποτέλεσμα της σύνθεσης μιας αξονικού τύπου παραμόρφωσης (που παρεμποδίζεται από την ύπαρξη της οροφής) και της περιφερειακής-ακτινικής διόγκωσης που δημιουργεί η ανομοιόμορφη κατανομή στην ημιπεριφέρεια του κελύφους. Οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις εμφανίζονται στον μεσημβρινό με την υψηλότερη θερμοκρασία και είναι της τάξης των 3 cm. Για $T=143.5^{\circ}C$ η δεξαμενή εμφανίζει απότομη αλλαγή στην παραμορφωμένη της εικόνα μιας και κυρτώνουν τα τοιχώματα της ημιπεριφέρειας που φορτίζεται.



Διάγραμμα 7. 1 Λόγος ενέργειας απόσβεσης προς την συνολική ενέργεια παραμόρφωσης του συστήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας για την τυπική δεξαμενή 20x20, 10tc.

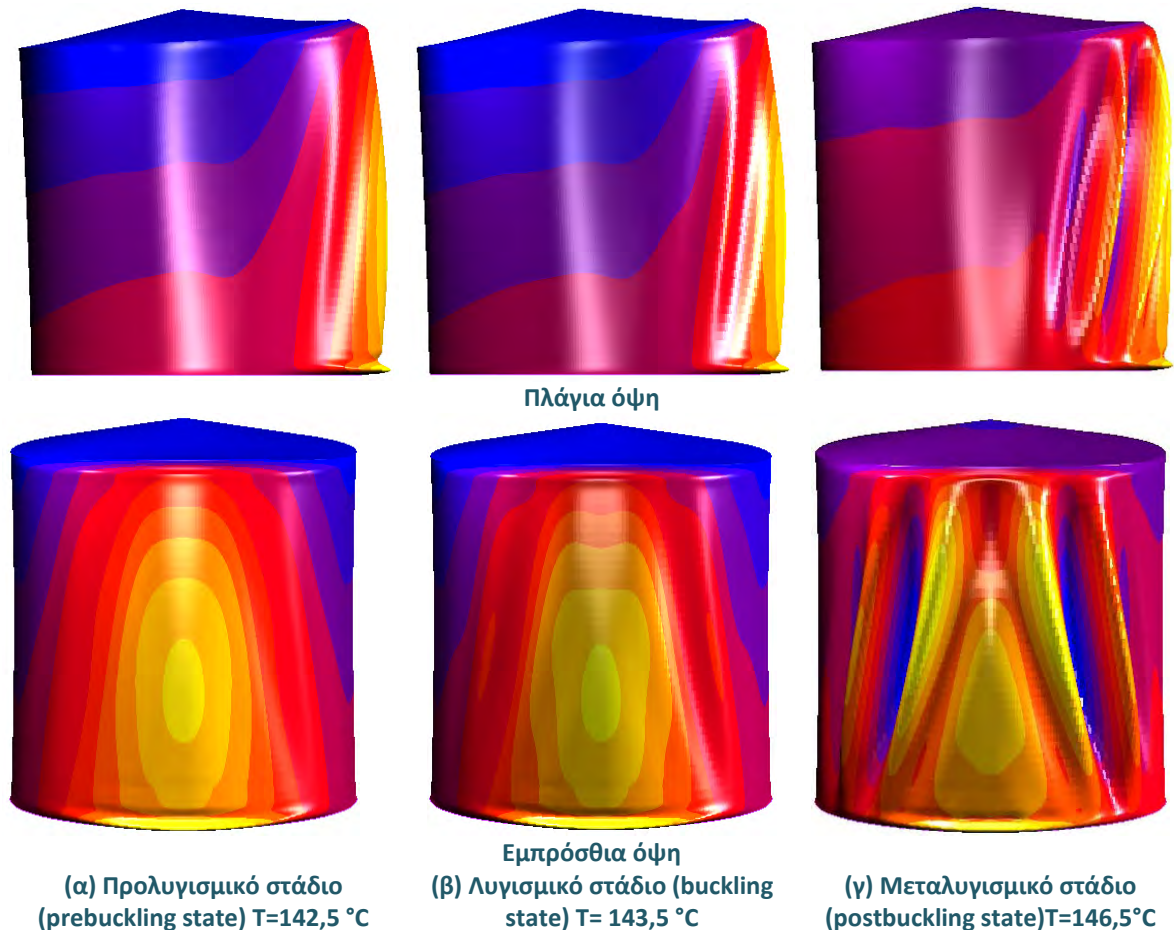


Διάγραμμα 7. 2 Οριζόντια μετατόπιση ενός κόμβου εσωτερικά της ζώνης A (Εικ. 7.2) συναρτήσει της υψηλότερης επιβαλλόμενης θερμοκρασίας στην δεξαμενή 20x20, 10tc.

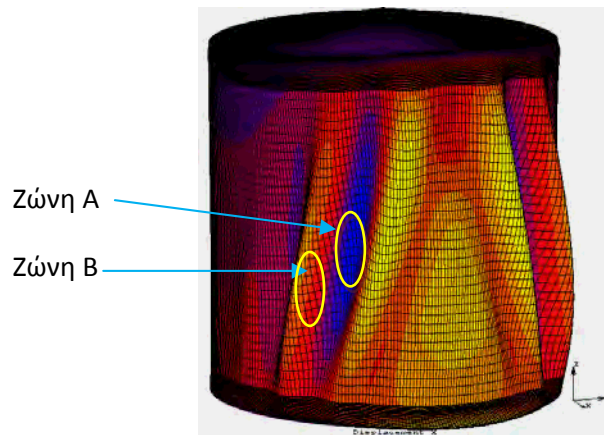
Η μορφή της λυγισμικής παραμόρφωσης είναι συμμετρική ως προς τον μεσημβρινό άξονα με την υψηλότερη επιβαλλόμενη θερμοκρασία, αναπτύσσεται καθ' ύψος της δεξαμενής και είναι όμοια με την 1^η ιδιομορφή λυγισμού που προσδιορίζεται από την γραμμική ανάλυση λυγισμού. Σημειώνεται ότι η αντίστοιχη κρίσιμη τιμή της θερμοκρασίας, όπως προσδιορίστηκε από την ιδιομορφική ανάλυση λυγισμού στο 6° Κεφάλαιο είναι $T_{cr,LBA} = 110 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Η διαφορά αυτή στην τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας που παρουσιάζεται στις 2 διαφορετικού τύπου αναλύσεις, δύναται να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η μη γραμμική γεωμετρική ανάλυση έχει την δυνατότητα να λάβει υπόψη τις μεταβολές που μπορούν να εμφανιστούν στην δυσκαμψία του φορέα κατά την προοδευτική του παραμόρφωση συγκριτικά με την γραμμική ανάλυση λυγισμού, στην οποία η δυσκαμψία

του φορέα είναι σταθερή και ίση με την αρχική. Το παραπάνω γεγονός αποτυπώνεται στο διάγραμμα 7.2 στο οποίο διακρίνεται μια μικρή αύξηση της δυσκαμψίας του φορέα για θερμοκρασίες άνω των 80 °C, με αποτέλεσμα τα τοιχώματα της δεξαμενής να λυγίζουν τοπικά για θερμοκρασία μεγαλύτερη από την θερμοκρασία που υπολογίζει η γραμμική ανάλυση λυγισμού.

Η αστάθεια που εκδηλώνεται στην δεξαμενή για θερμοκρασία ίση με $T_{cr,GMNA} = 143.5$ °C είναι αποτέλεσμα της δράσης των θλιπτικών μεσημβρινών μεμβρανικών τάσεων. Σημειώνεται όμως, ότι δεν πρόκειται για λυγισμό που οφείλεται αποκλειστικά σε καθαρή θλίψη των τοιχωμάτων της δεξαμενής μιας και τα υπόψη τοιχώματα διογκώνονται από την αρχή της φόρτισης καθώς επιδρούν σε αυτά περιφερειακές τάσεις που προέρχονται από την ανομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας στην ημιπεριφέρεια του κελύφους. Πρακτικά, η περίπτωση είναι ανάλογη με την κάμψη μεμβράνης υπό εγκάρσια φόρτιση παρουσία αυξανόμενης θλιπτικής δύναμης. Για το λόγο αυτό παρατηρείται στα επόμενα διαγράμματα μια ομοιότητα μεταξύ της κατανομής των ακτινικών μετατοπίσεων των τοιχωμάτων της δεξαμενής (σε οποιαδήποτε οριζόντια τομή της) με την αντίστοιχη κατανομή των περιφερειακών τάσεων.

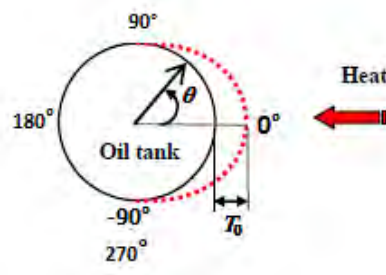


Εικόνα 7. 1 Παραμορφωμένη δεξαμενή 20×20 με $t_r=10t_c$ πριν τον λυγισμό (α), την στιγμή του λυγισμού (β), μετά τον λυγισμό (γ)

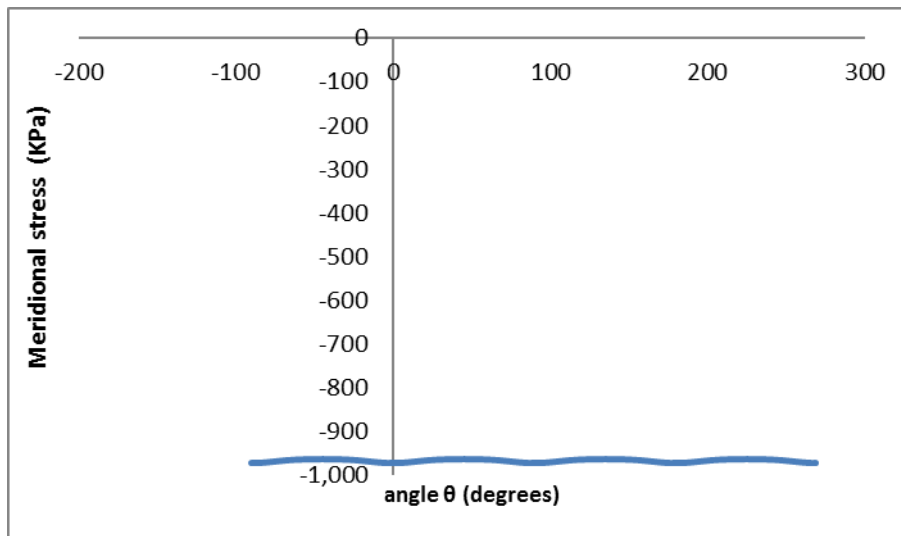


Εικόνα 7. 2 Λυγισμική μορφή αστοχίας (buckling failure mode) της δεξαμενής (Ζώνη ελέγχου Α και Ζώνη ελέγχου Β-περιοχές με τα κοίλα προς τα μέσα και έξω αντίστοιχα).

Για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου που λαμβάνει χώρα στην δεξαμενή που υπόκειται σε ανομοιόμορφη θερμική καταπόνηση, παρατίθενται παρακάτω μια σειρά διαγραμμάτων που αφορούν τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται κατά την προοδευτική παραμόρφωση της. Συγκεκριμένα, δίνονται οι μετατοπίσεις, οι μεσημβρινές και οι περιφερειακές τάσεις συναρτήσει της γωνίας θ που διαγράφει την περιφέρεια της δεξαμενής και απεικονίζεται στην Εικόνα 7.3. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται εξήχθησαν για μια οριζόντια τομή της δεξαμενής σε ύψος $z=10\text{m}$. Κάθε διάγραμμα περιλαμβάνει αποτελέσματα για το προλυγισμικό στάδιο, το στάδιο στο οποίο συμβαίνει ο λυγισμός και το μεταλυγισμικό στάδιο.



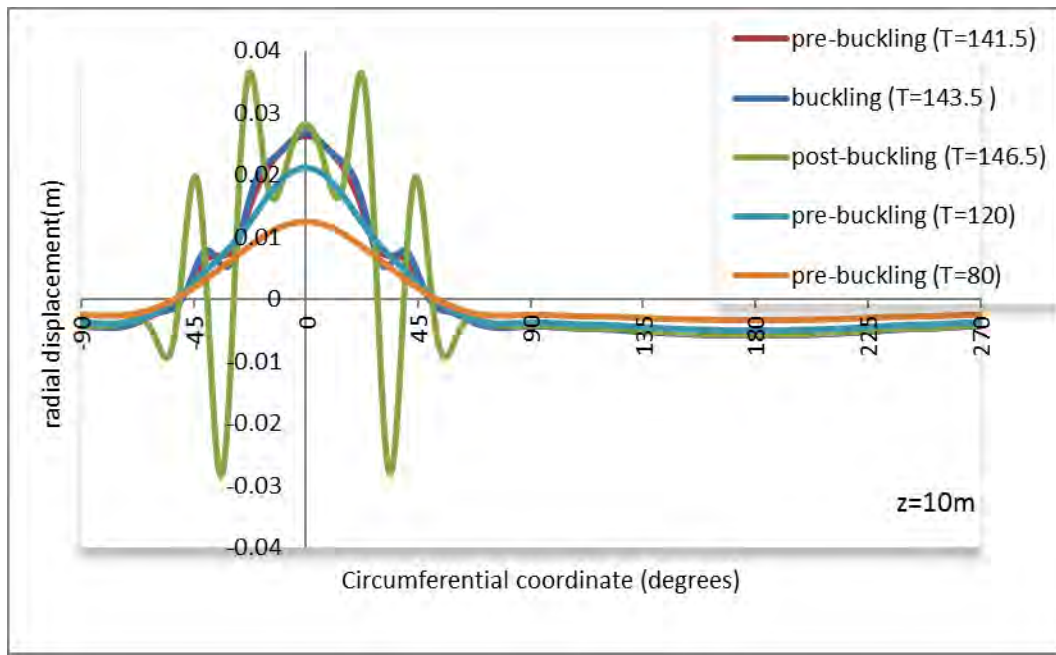
Εικόνα 7. 3 Θεώρηση γωνιών (για την κατανόηση των επόμενων διαγραμμάτων)



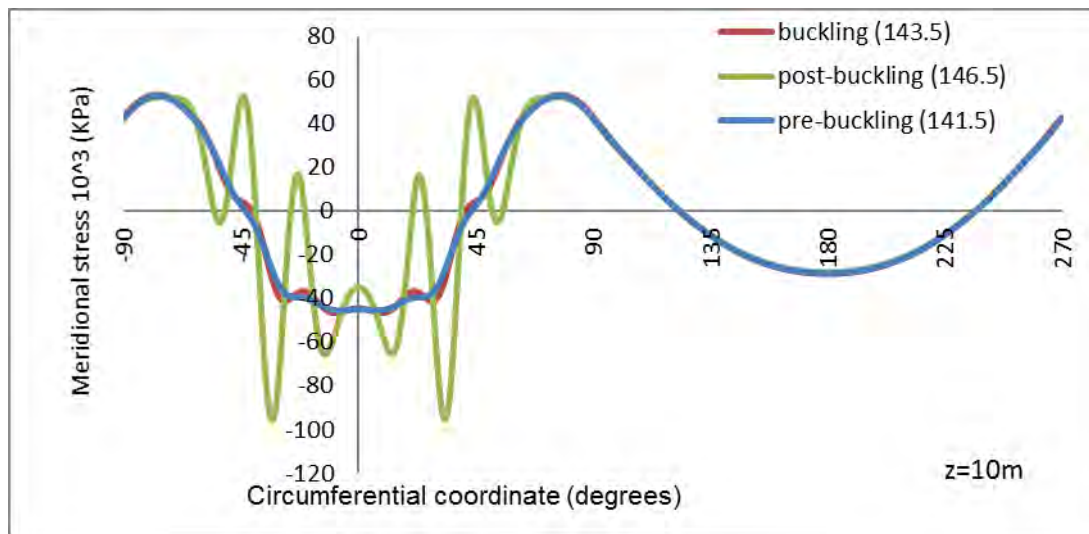
Διάγραμμα 7. 3 Μεσημβρινές τάσεις δεξαμενής 20x20 με $t_r=10t_c$ μόνο λόγω του ιδίου βάρους της, συναρτήσει της γωνίας θ .

Μέγιστες τάσεις (kPa) $z=10m$	Περιφερειακές τάσεις	Μεσημβρινές τάσεις
Χωρίς θερμοκρασία (μόνο ίδιο βάρος)	0.95	-960
Προλυγισμικό στάδιο (141.5 °C)	5943	52659
Στάδιο λυγισμού (143.5 °C)	12421	53218
Μεταλυγισμικό στάδιο (146.5 °C)	84040	95490

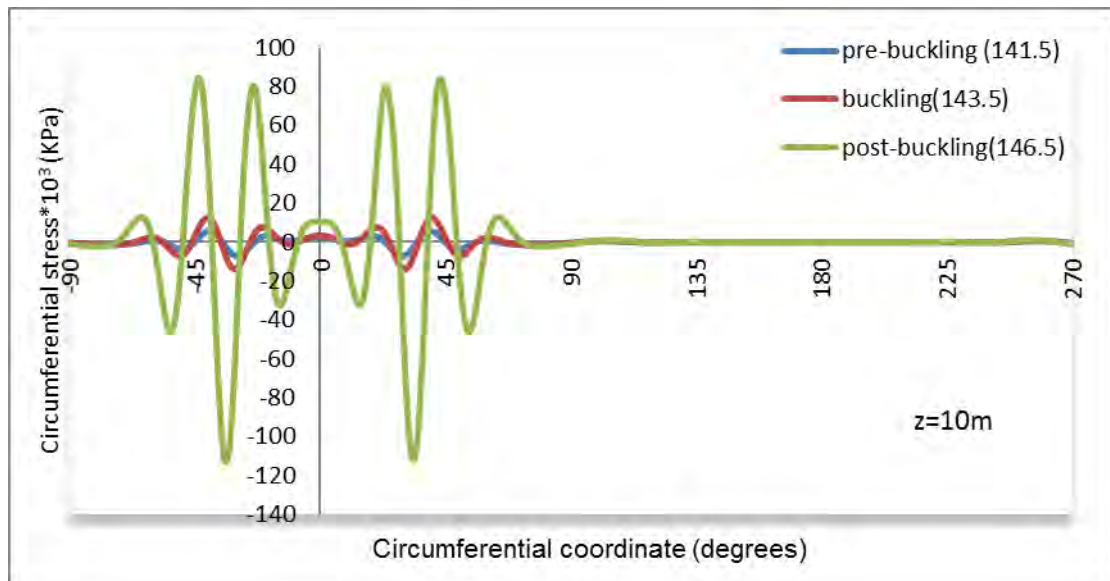
Πίνακας 7.1. 1Μέγιστες τιμές περιφερειακών και μεσημβρινών τάσεων στα στάδια του λυγισμού.



Διάγραμμα 7. 4 Μετατοπίσεις της δεξαμενής σε προλυγισμικό στάδιο, στον λυγισμό και στο μεταλυγισμικό στάδιο συναρτήσει των γωνιών της κυλινδρικής περιφέρειας σε ύψος $z=10\text{m}$.

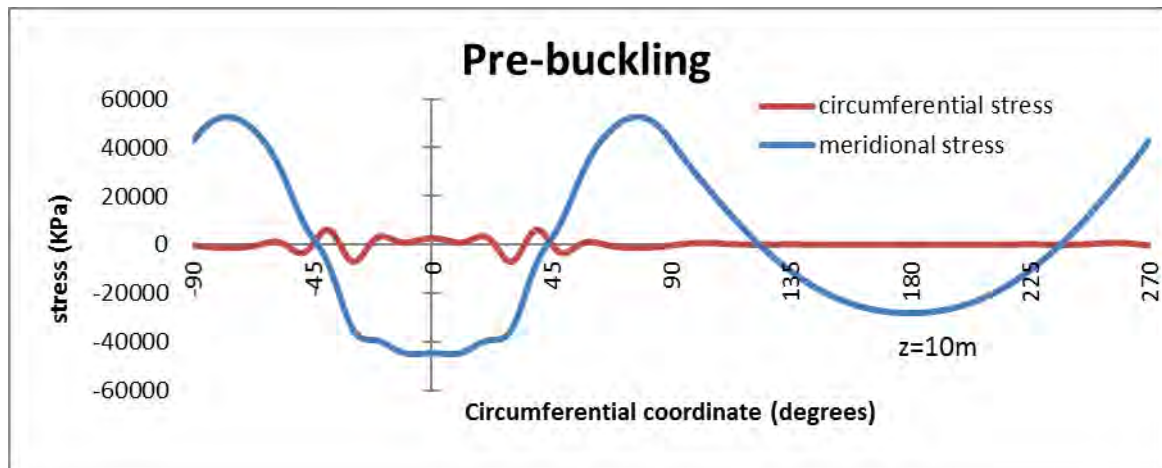


Διάγραμμα 7. 5 Μεσημβρινές (meridional) τάσεις της δεξαμενής σε προλυγισμικό στάδιο, στον λυγισμό και στο μεταλυγισμικό στάδιο συναρτήσει των γωνιών της κυλινδρικής περιφέρειας σε ύψος $z=10\text{m}$.

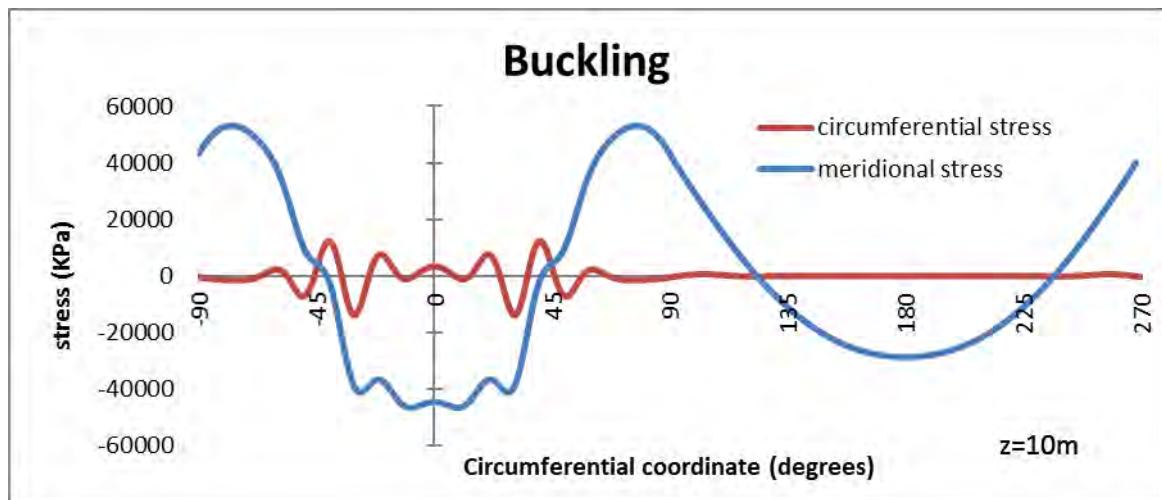


Διάγραμμα 7. 6 Περιφερειακές (circumferential) τάσεις της δεξαμενής σε προλυγισμικό στάδιο, στον λυγισμό και στο μεταλυγισμικό στάδιο συναρτήσει των γωνιών που διαγράφουν την κυλινδρική περιφέρεια σε ύψος $z=10\text{m}$.

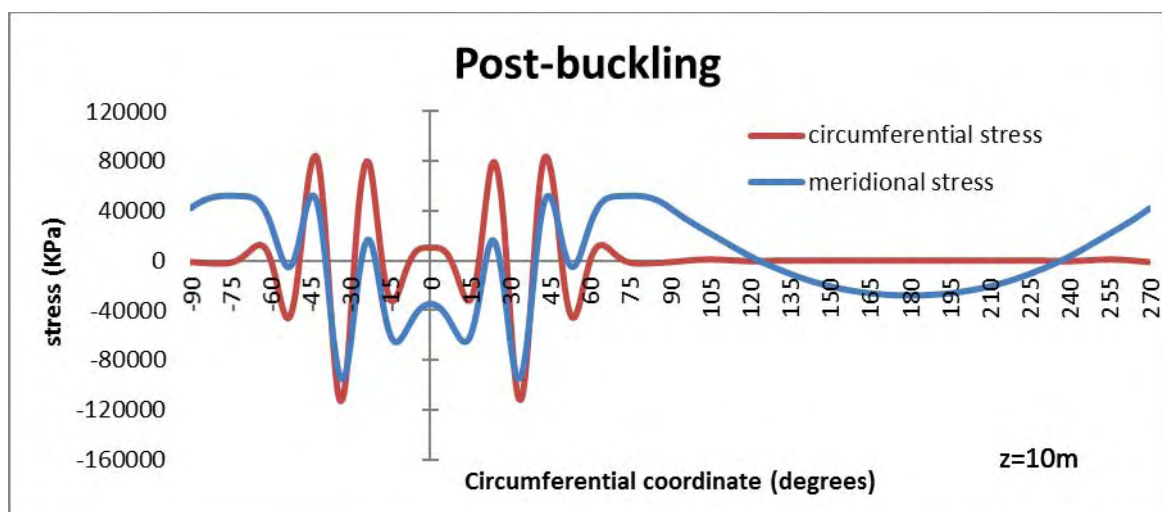
Από την μελέτη των διαγραμμάτων 7.5, 7.6 και των διαγραμμάτων 7.7, 7.8, 7.9 που ακολουθούν συμπεραίνεται ότι η ομοιόμορφη καθ' ύψος και στην διεύθυνση του πάχους του κελύφους κατανομή της θερμοκρασίας, είναι υπεύθυνη για την δημιουργία των μεσημβρινών μεμβρανικών τάσεων, ενώ η ανομοιομορφία των τιμών που παρατηρείται κατά την περιφερειακή διεύθυνση με την μορφή συνημιτονοειδούς καμπύλης είναι υπεύθυνη για την δημιουργία των περιφερειακών τάσεων. Η τάξη μεγέθους των τιμών των μεσημβρινών τάσεων είναι περίπου 10 φορές μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες τιμές των περιφερειακών τάσεων κατά το προλυγισμικό στάδιο φόρτισης. Προφανώς, αναπτύσσονται τόσο θλιπτικές όσο και εφελκυστικές τάσεις, η κατανομή των οποίων είναι τέτοια ούτως ώστε να υπάρχει αυτοίσορροπία. Με βάση το είδος και την κατανομή των τάσεων συμπεραίνεται όπως τονίστηκε και ανωτέρω, ότι εντατική κατάσταση που επικρατεί, κυρίως στα τοιχώματα της δεξαμενής που θα υποστούν λυγισμό, είναι η έντονη παρουσία θλιπτικής τάσης στην μεσημβρινή διεύθυνση με ταυτόχρονη δράση ακτινικής περιφερειακής τάσης. Η εντατική αυτή κατάσταση ευθύνεται για την απώλεια της ευστάθειας των τοιχωμάτων της δεξαμενής και την αστοχία και είναι ανάλογη του προβλήματος κάμψης επίπεδης μεμβράνης υπό εγκάρσιο φορτίο παρουσία θλιπτικής δύναμης. Καθώς η μεσημβρινή θλιπτική τάση αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας οι ακτινικές μετακινήσεις των τοιχωμάτων επίσης αυξάνονται σημαντικά, ενώ η αύξηση αυτή γίνεται δυσανάλογη όταν η επιβαλλόμενη θερμοκρασία πλησιάζει την κρίσιμη θερμοκρασία των $T_{cr,GMNA} = 143.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Διάγραμμα 7.4). Για θερμοκρασία ίση με την κρίσιμη (λυγισμικό στάδιο), ο φορέας αναπτύσσει ακαριαία μια πρόσθετη μετακίνηση της τάξης του 1.5 cm στις θέσεις με τη μέγιστη κύρτωση. Για θερμοκρασία ελαφρώς μεγαλύτερη από την κρίσιμη (μεταλυγισμικό στάδιο), η τιμή των μεσημβρινών τάσεων μειώνεται στις κρίσιμες περιοχές λόγω της απώλειας ευστάθειας στην αξονική διεύθυνση, ενώ παράλληλα αυξάνεται σημαντικά (έως και 8 φορές περίπου-Διαγράμματα 7.7 και 7.8) η τιμή των περιφερειακών τάσεων εξαιτίας της σημαντικής κύρτωσης που υπόκεινται τα τοιχώματα που λυγίζουν (catenary membrane action).



Διάγραμμα 7. 7 Περιφερειακές και μεσημβρινές τάσεις συναρτήσει των γωνιών της περιφέρειας της δεξαμενής στο **προλυγισμικό στάδιο** σε ύψος $z=10\text{m}$

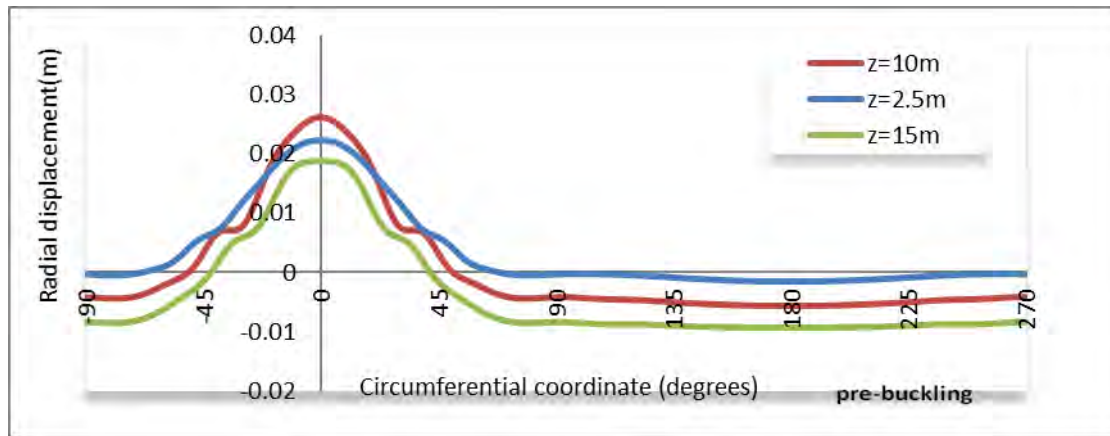


Διάγραμμα 7. 8 Περιφερειακές και μεσημβρινές τάσεις συναρτήσει των γωνιών της περιφέρειας της δεξαμενής στο **λυγισμό** σε ύψος $z=10\text{m}$

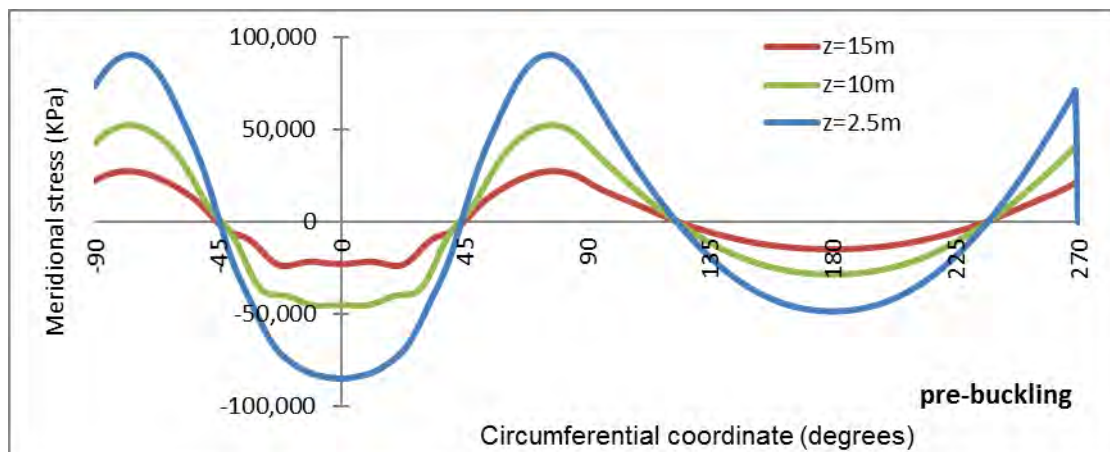


Διάγραμμα 7. 9 Περιφερειακές και μεσημβρινές τάσεις συναρτήσει των γωνιών της περιφέρειας της δεξαμενής στο **μεταλυγισμικό στάδιο** σε ύψος $z=10\text{m}$.

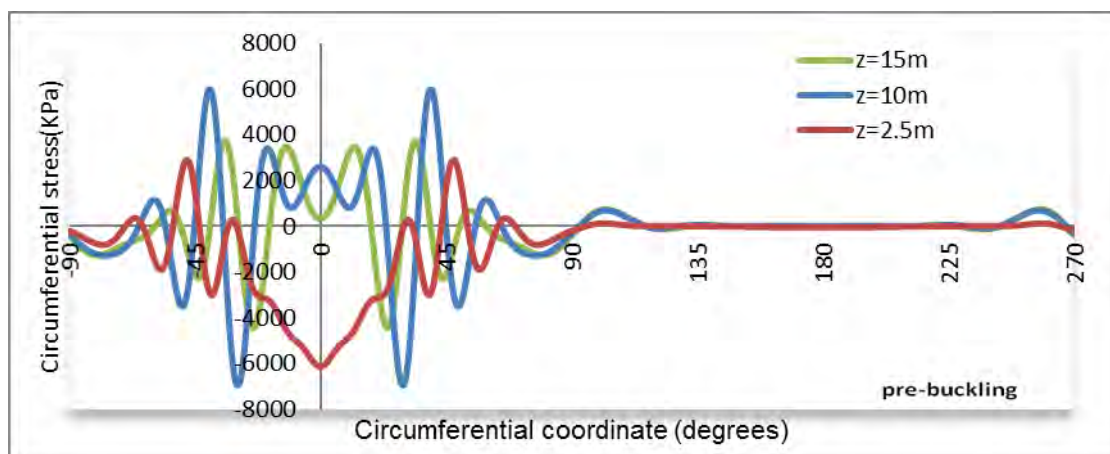
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται ενδεικτικά τα εντατικά μεγέθη των ακτινικών μετατοπίσεων και τάσεων της δεξαμενής σε διάφορες καθ' ύψος τομές και για τα διάφορα στάδια απόκρισης. Τα αποτελέσματα και συμπεράσματα είναι ανάλογα με τα προαναφερθέντα. Στο προλυγισμικό στάδιο:



Διάγραμμα 7. 10 Ακτινικές μετατοπίσεις δεξαμενής 20x20x,10tc κατά μήκος της περιφέρειας της σε προλυγισμικό στάδιο για ύψος 2.5m, 10m, 15m.

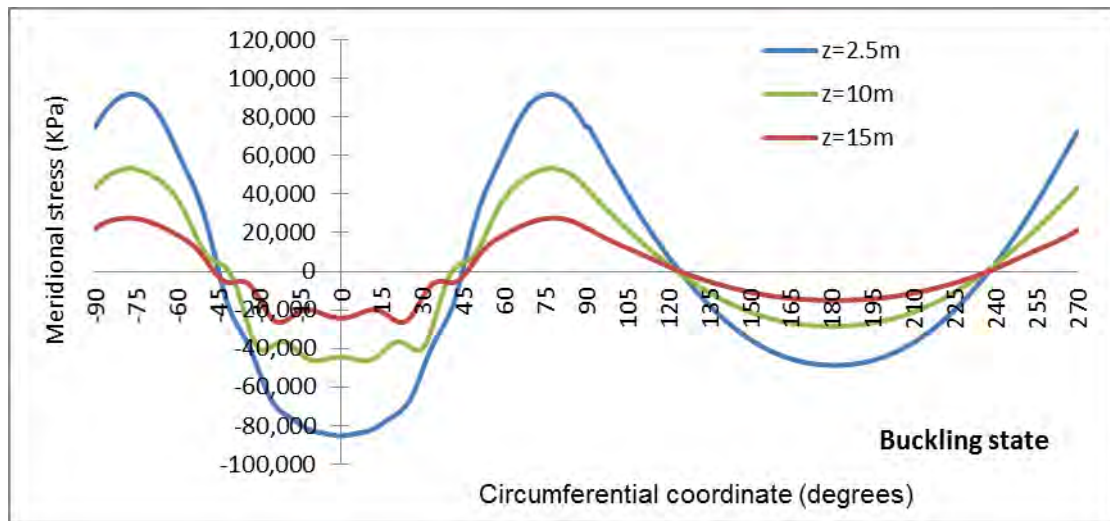


Διάγραμμα 7. 11 Μεσημβρινές τάσεις δεξαμενής 20x20x,10tc κατά μήκος της περιφέρειας της σε προλυγισμικό στάδιο για ύψος 2.5m, 10m, 15m.

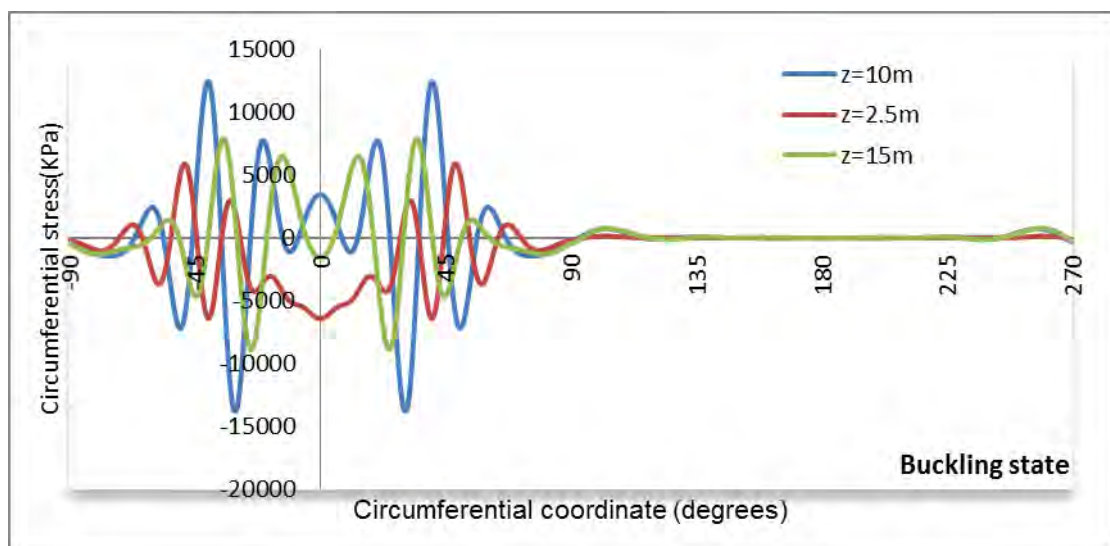


Διάγραμμα 7. 12 Περιφερειακές τάσεις δεξαμενής 20x20x,10tc κατά μήκος της περιφέρειας της σε προλυγισμικό στάδιο για ύψος 2.5m, 10m, 15m.

Στο στάδιο λυγισμού:

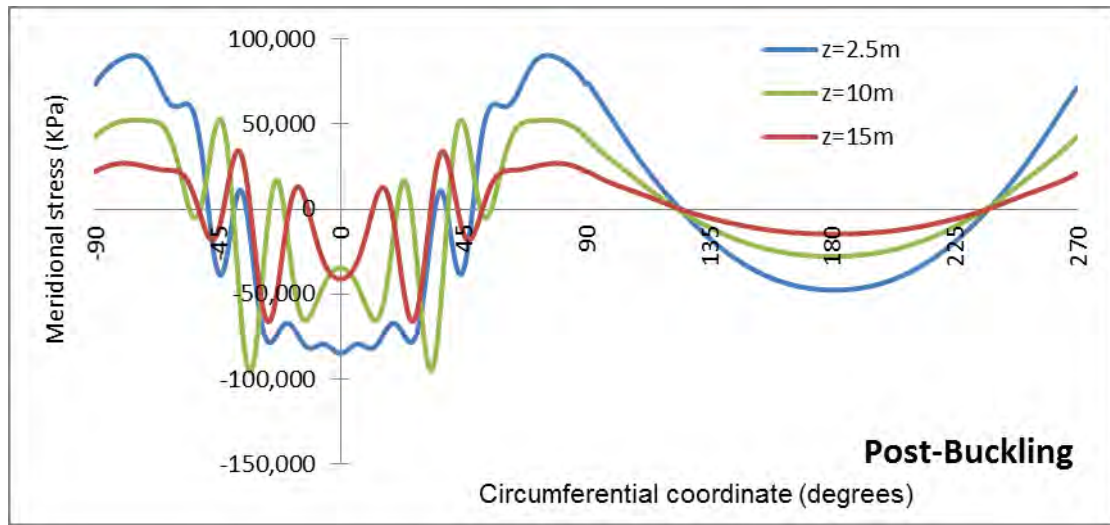


Διάγραμμα 7. 13 **Μεσημβρινές τάσεις** δεξαμενής 20x20x,10tc κατά μήκος της περιφέρειας της στον λυγισμό για ύψος 2.5m, 10m, 15m

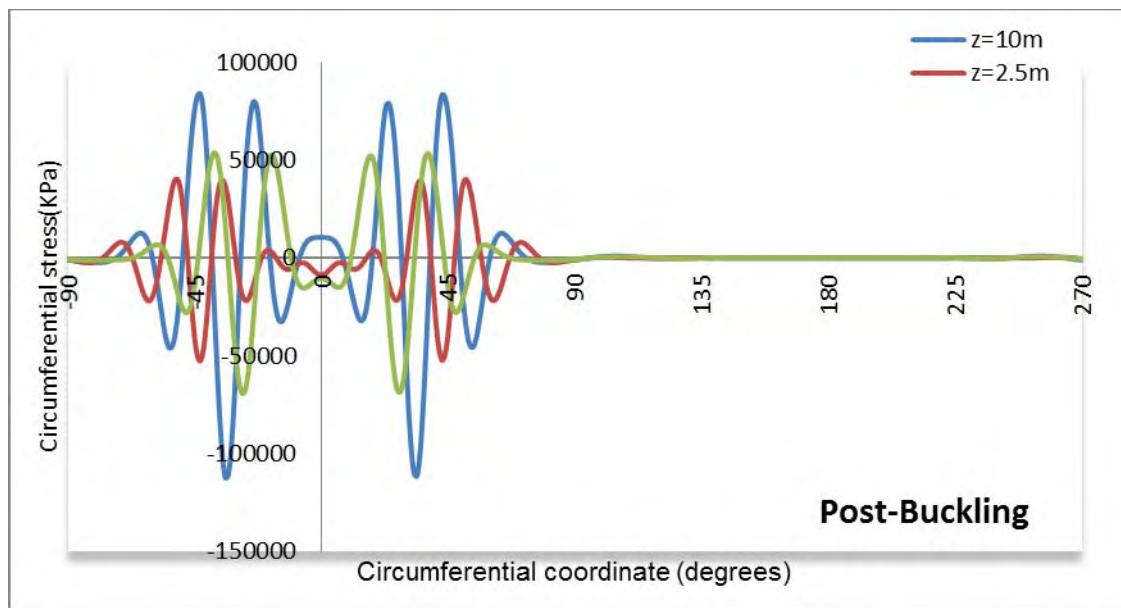


Διάγραμμα 7. 14 **Περιφερειακές τάσεις** δεξαμενής 20x20x,10tc κατά μήκος της περιφέρειας της στον λυγισμό για ύψος 2.5m, 10m, 15m.

Στο μεταλυγισμικό στάδιο:



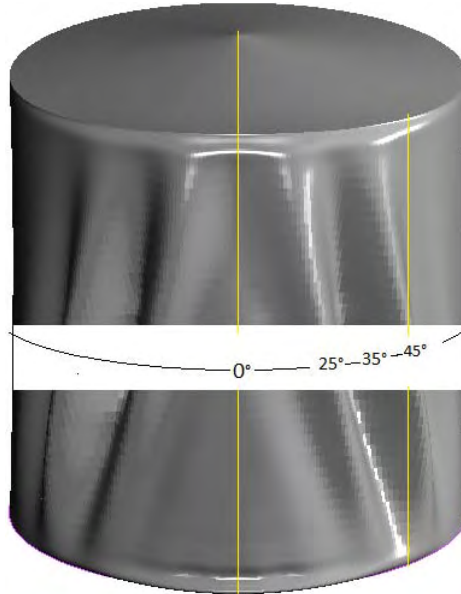
Διάγραμμα 7. 15 **Μεσημβρινές τάσεις** δεξαμενής 20x20x,10tc κατά μήκος της περιφέρειας της στο μεταλυγισμικό στάδιο για ύψος 2.5m, 10m, 15m.



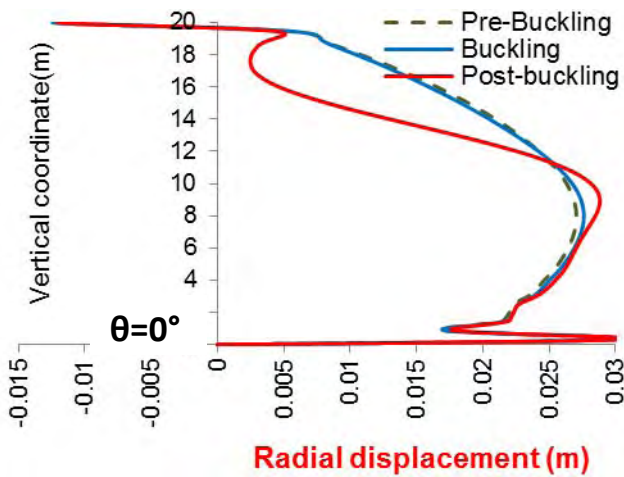
Διάγραμμα 7. 16 **Περιφερειακές τάσεις** δεξαμενής 20x20x,10tc κατά μήκος της περιφέρειας της στο μεταλυγισμικό στάδιο για ύψος 2.5m, 10m, 15m.

Από τα διαγράμματα 7.13 και 7.15 στο προλυγισμικό στάδιο και στο στάδιο λυγισμού παρατηρείται ότι οι μεσημβρινές τάσεις αλλάζουν πρόσημο σε ίδια γωνία γύρω από την περιφέρεια, ανεξάρτητα από το ύψος της δεξαμενής για το οποίο διεξήχθησαν αποτελέσματα ($z=2.5m, z=10m, z=15m$). Δηλαδή ο μηδενισμός των τάσεων γίνεται στις γωνίες $(-45^\circ, 45^\circ, 120^\circ, 140^\circ)$ και αυτό που μεταβάλλεται ανάλογα με το ύψος είναι μονάχα το μέγεθος, το οποίο επίσης δεν αλλάζει πρόσημο.

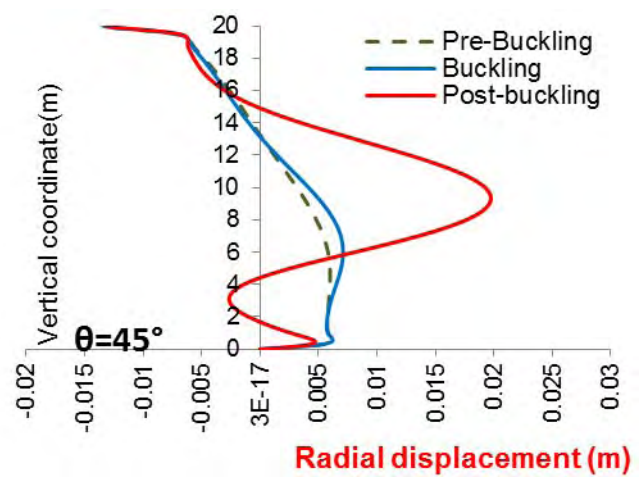
Στην συνέχεια παρατίθενται επιπλέον αποτελέσματα για τις καθ' ύψος τομές στις γωνίες $\theta=0^\circ$ και $\theta=45^\circ$, σύμφωνα με την Εικόνα 7.4, ώστε να δημιουργηθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα για την κατανομή των τάσεων και στην κατακόρυφη διεύθυνση.



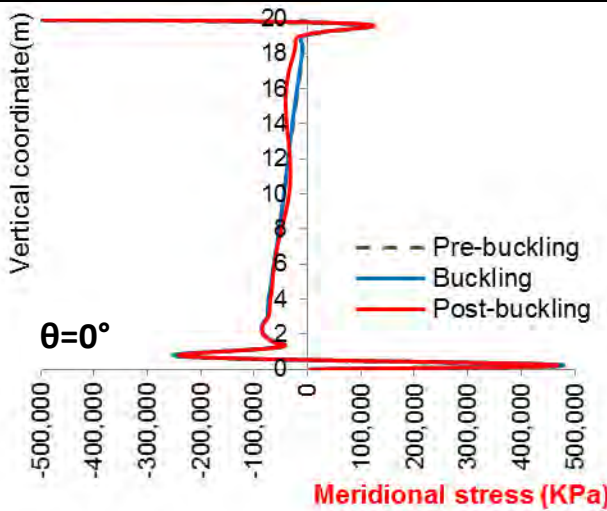
Εικόνα 7. 4 Λεπτομέρεια γωνιών στην παραμορφωμένη δεξαμενή 20x20 10tc.



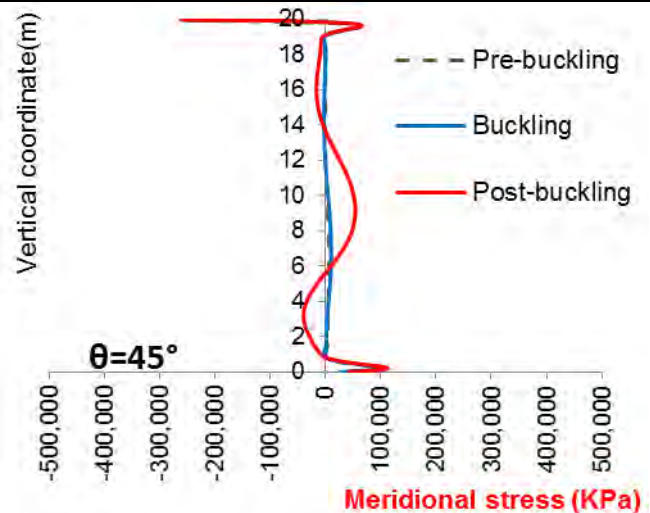
Διάγραμμα 7. 17 Παραμορφώσεις καθ' ύψος της δεξαμενής 20x20 ,10tc στον μεσημβρινό με την μεγαλύτερη θερμοκρασία($\theta=0^\circ$)



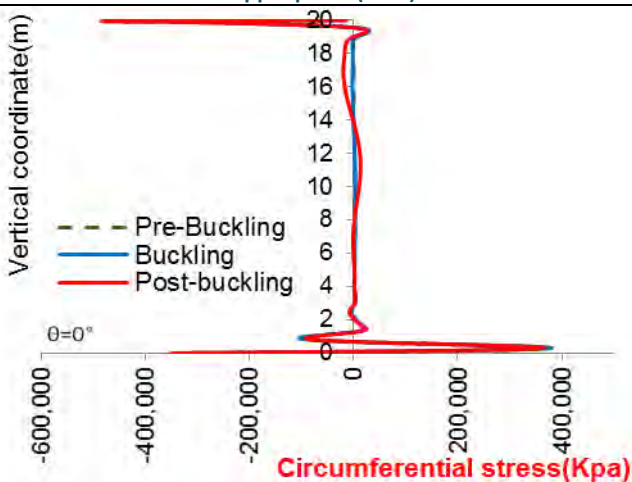
Διάγραμμα 7. 18 Παραμορφώσεις καθ' ύψος της δεξαμενής 20x20 ,10tc σε γωνία $\theta=45^\circ$



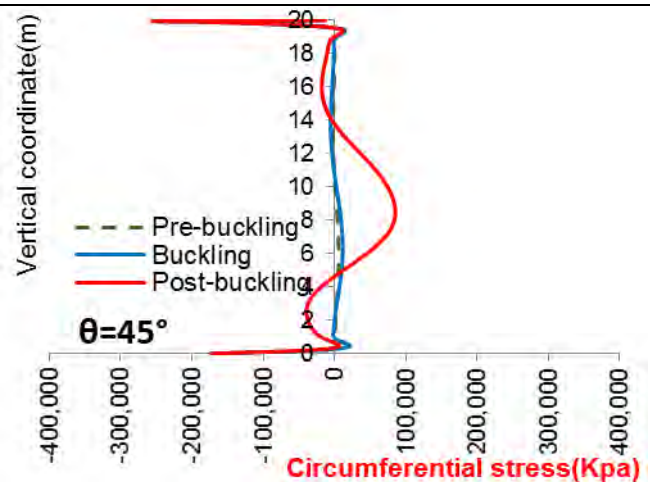
Διάγραμμα 7. 19 Μεσημβρινές τάσεις καθ' ύψος της δεξαμενής 20x20 ,10tc στον μεσημβρινό με την μεγαλύτερη θερμοκρασία($\theta=0^\circ$)



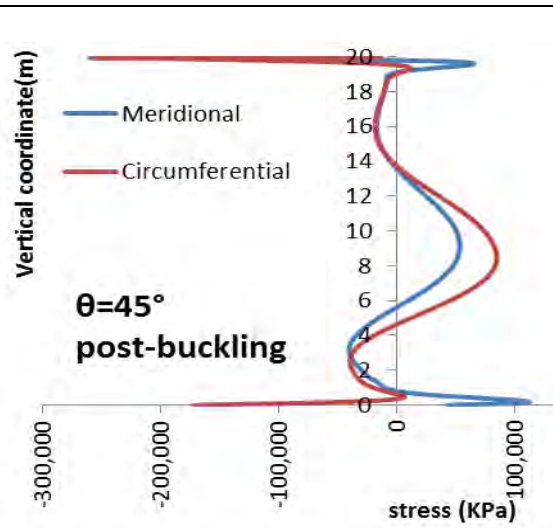
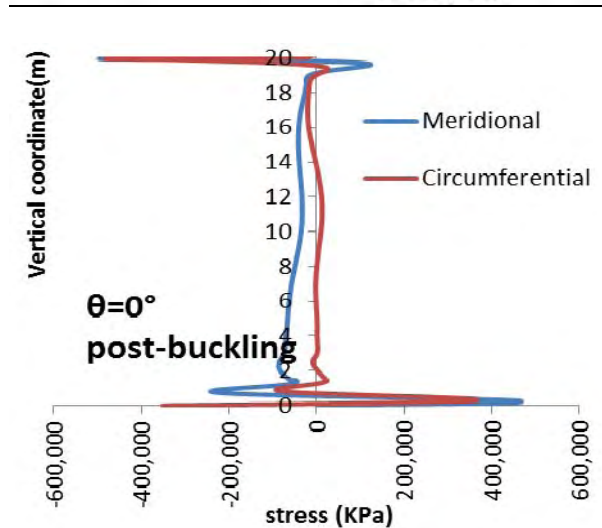
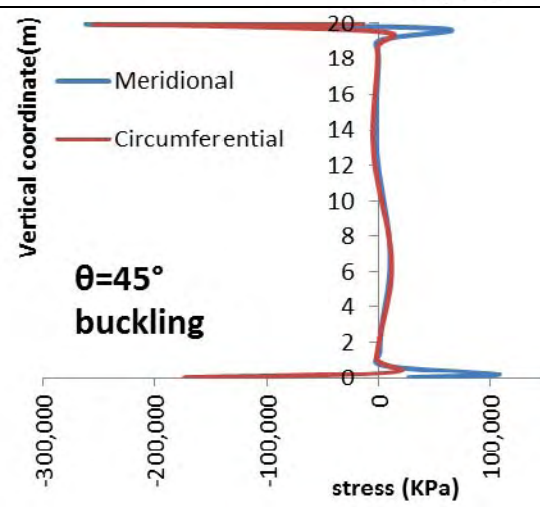
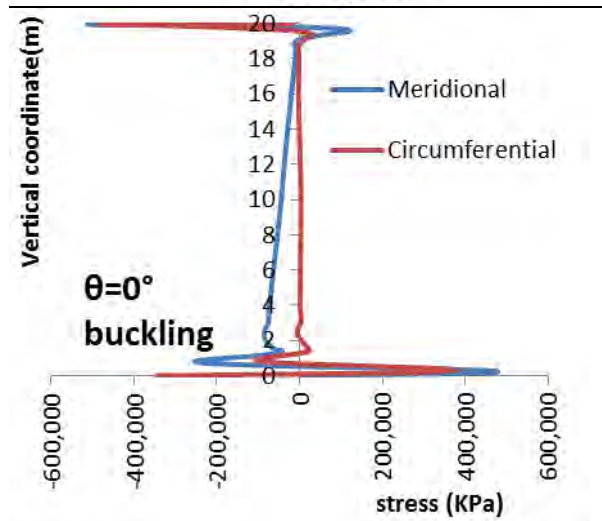
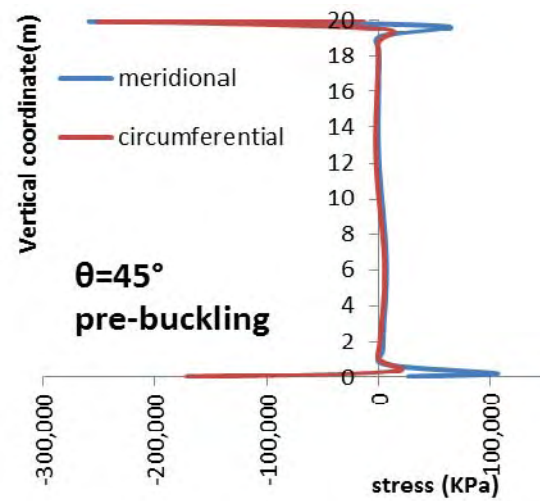
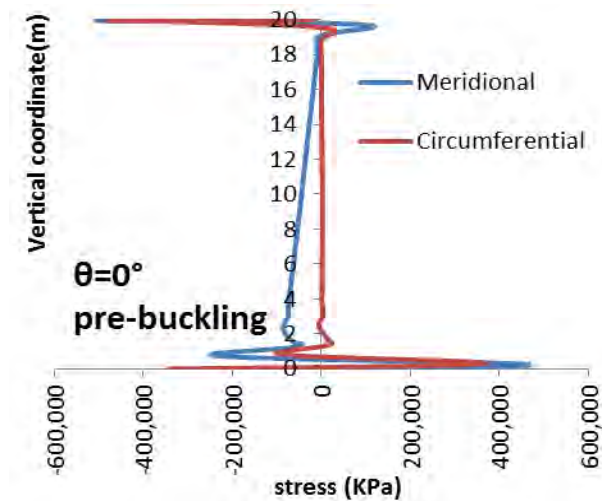
Διάγραμμα 7. 20 Μεσημβρινές τάσεις δεξαμενής 20x20 ,10tc καθ' ύψος της δεξαμενής σε γωνία $\theta=45^\circ$



Διάγραμμα 7. 21 Περιφερειακές τάσεις καθ' ύψος της δεξαμενής 20x20 ,10tc στον μεσημβρινό με την μεγαλύτερη θερμοκρασία($\theta=0^\circ$)



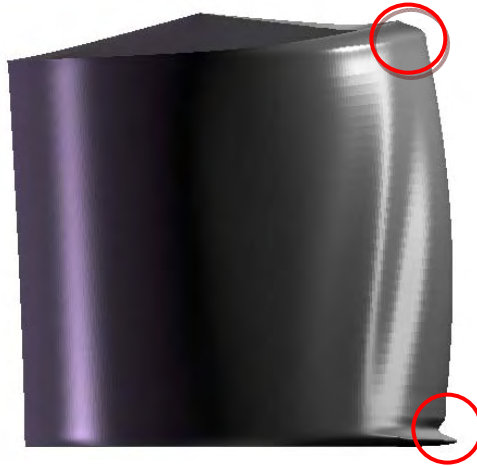
Διάγραμμα 7. 22 Περιφερειακές τάσεις δεξαμενής 20x20 ,10tc καθ' ύψος της δεξαμενής σε γωνία $\theta=45^\circ$



Διάγραμμα 7. 23 Διαγράμματα μεσημβρινών και περιφερειακών τάσεων καθ' ύψος της δεξαμενής 20x20 10τς σε προλυγισμικό στάδιο , στο λυγισμό και σε μεταλυγισμικό στάδιο για $\theta=0^\circ$.

Διάγραμμα 7. 24 Διαγράμματα μεσημβρινών και περιφερειακών τάσεων καθ' ύψος της δεξαμενής 20x20 10τς σε προλυγισμικό στάδιο , στο λυγισμό και σε μεταλυγισμικό στάδιο για $\theta=45^\circ$

Αξιοσημείωτες είναι επίσης οι συγκεντρώσεις των τάσεων που πραγματοποιούνται στο πάνω και το κάτω όριο της δεξαμενής λόγω των συνοριακών συνθηκών που επικρατούν σε εκείνες τις περιοχές οι οποίες ομαλοποιούνται καθώς το τασικό πεδίο απομακρύνεται από τα σύνορα.



Εικόνα 7. 5 Παραμορφώσεις που δημιουργούνται στο άνω και κάτω όριο της δεξαμενής λόγω των συνοριακών συνθηκών.

7.1.3 Μελέτη της επιρροής των συνοριακών συνθηκών της οροφής στην απόκριση της δεξαμενής 20x20.

Οι δεξαμενές παρόμοιου τύπου με την τυπική δεξαμενή που μελετήθηκε στην παράγραφο 7.1.2 αστοχούν κυρίως λόγω εμφάνισης φαινομένων αστάθειας (λυγισμός των τοιχωμάτων της δεξαμενής) που αναπτύσσονται στην κυλινδρική επιφάνεια της (θερμαινόμενη ζώνη) ενώ παράλληλα η οροφή παραμένει άθικτη. Παρόλα αυτά, στα πλαίσια της εργασίας, επιχειρείται μια παραμετρική μελέτη για τον προσδιορισμό της επιρροής της δυσκαμψίας της οροφής στην απόκριση της δεξαμενής, μιας και η οροφή αποτελεί την άνω συνοριακή συνθήκη στήριξης του κελύφους. Επειδή στη συνήθη πρακτική δύναται να κατασκευαστούν δεξαμενές με οροφές διαφόρων τύπων η παρούσα μελέτη προσπαθεί να προσεγγίσει την επιρροή αυτών με έμμεσο τρόπο θεωρώντας ότι η οροφή αποτελείται από μια κωνικής μορφής λαμαρίνα της οποίας μεταβάλλεται το πάχος. Ειδικότερα, το πάχος της οροφής κυμαίνεται μεταξύ των αρκετά ακραίων τιμών $2t_c \leq t_r \leq 60t_c$, ούτως ώστε να καλύπτεται μέσα στο εύρος αυτό μια αρκετά μεγάλη γκάμα διαφορετικών στατικών συστημάτων στέγασης των δεξαμενών. Στην παραμετρική μελέτη που διεξήχθη λήφθηκαν υπόψη τα πάχη, $t_r = 2t_c, t_r = 5t_c, t_r = 10t_c, t_r = 15t_c, t_r = 30t_c, t_r = 50t_c$ και $t_r = 60t_c$. Επισημαίνεται, όπως έχει επεξηγηθεί αναλυτικά στην παράγραφο 5.2, ότι η οροφή έχει προσομοιωθεί έτσι ώστε το μόνιμο στατικό βάρος της επιστέγασης που εξαρτάται κάθε φορά από την διάμετρο της δεξαμενής να διατηρείται σταθερό παρά την αλλαγή του πάχους της, ώστε να είναι ρεαλιστικά τα αποτελέσματα.

Δεξαμενή διαστάσεων 20x20 με πάχος οροφής $t_r = 5t_c$.

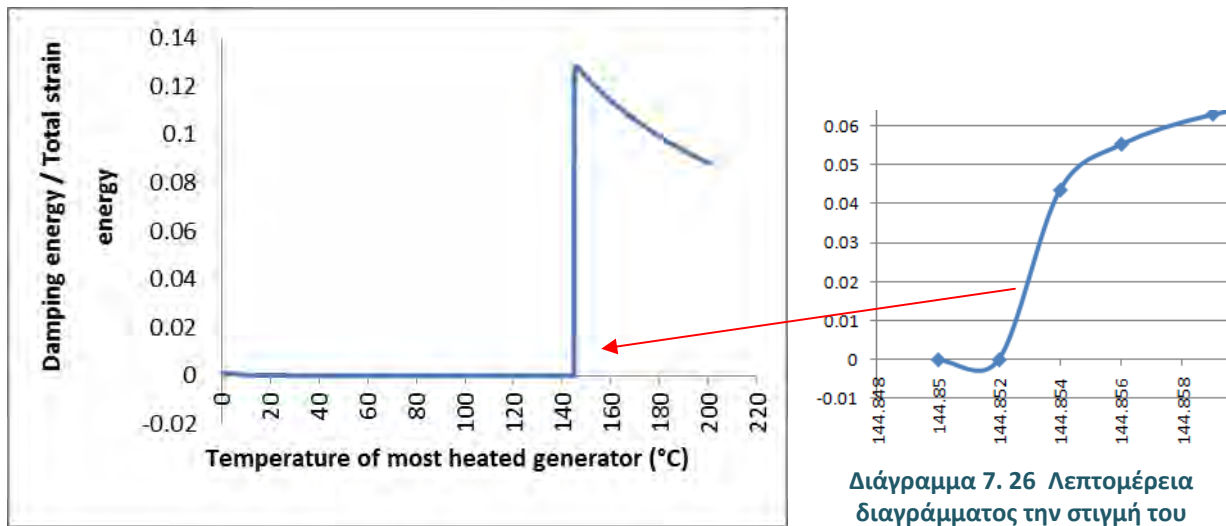
Η συγκεκριμένη περίπτωση είναι όμοια με την δεξαμενή που εξετάστηκε αναλυτικά στην προηγούμενη παράγραφο με την διαφορά ότι το πάχος της οροφής είναι μειωμένο κατά το ήμισυ. Η δεξαμενή παραμορφώνεται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που παραμορφώνεται και η δεξαμενή με το διπλάσιο πάχος οροφής, με την διαφορά ότι καθώς η μέγιστη τιμή της επιβαλλόμενης θερμοκρασίας πλησιάζει την κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού εκτός από την εμφάνιση κύρτωσης στα τοιχώματα της θερμαινόμενης ζώνης όμοιας με της δεξαμενής της (Εικ. 7.1 α) αναπτύσσεται σημαντική κύρτωση και σε τμήμα της επιφάνειας στην βάση (Εικ.7.6 β). Για θερμοκρασία ίση με $T_{cr,GMNA} = 144.85 \text{ } ^\circ\text{C}$ αναπτύσσεται ακαριαία μεταβολή του σχήματος της δεξαμενής στη βάση της (τοπικός λυγισμός). Η μορφή αστοχίας είναι όμοια με την 5^η ιδιομορφή λυγισμού όπως αυτή προέκυψε από την γραμμική ανάλυση λυγισμού.



Εικόνα 7. 6 Στιγμιότυπα δεξαμενής 20x20 5 t_c την στιγμή του λυγισμού

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση ενώ η κατασκευή τείνει ενδεχομένως να λυγίσει σύμφωνα με το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής, οι εκτεταμένες παραμορφώσεις της βάσης την οδηγούν τελικά να αναπτύξει τοπική αστάθεια σε εκείνη την περιοχή. Αυτού του είδους ο τοπικός λυγισμός θα ήταν δύσκολο έως αδύνατο να αποτυπωθεί χωρίς την εφαρμογή της τεχνικής της «τεχνητής απόσβεσης» ως αριθμητικό επαναληπτικό σχήμα για την προσέγγιση του δρόμου ισορροπίας της κατασκευής. Οι κλασικές μέθοδοι μήκους-τόξου, που είναι οι πλέον κατάλληλες για την εύρεση δρόμων ισορροπίας με αρνητική δυσκαμψία, θα οδηγούσαν κατά πάσα πιθανότητα την δεξαμενή να λυγίσει με βάση το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής (καθολικού τύπου λυγισμός), μιας και δυσκολεύονται να εντοπίσουν τοπικές αστάθειες που μπορούν να αναπτυχθούν σε ένα φορέα.

Σύμφωνα με το διάγραμμα του λόγου της ενέργειας απόσβεσης προς την συνολική ενέργεια παραμόρφωσης, το οποίο δύναται να αναδείξει με ακρίβεια την στιγμή πραγματοποίησης του λυγισμού, αποδεικνύεται ότι η έναρξη του ακαριαίου τοπικού λυγισμού λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασία ίση με $T_{cr,GMNA} = 144.85 \text{ }^{\circ}\text{C}$.



Διάγραμμα 7. 25 Λόγος ενέργειας απόσβεσης προς την συνολική ενέργεια παραμόρφωσης του συστήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας για την τυπική δεξαμενή 20x20, με πάχος οροφής 5tc.

Διάγραμμα 7. 26 Λεπτομέρεια διαγράμματος την στιγμή του άλματος

Δεξαμενή διαστάσεων 20x20 με πάχος οροφής $t_r=2t_c$ και $t_r<2t_c$

Στην περίπτωση της δεξαμενής με πάχος οροφής $t_r=2t_c$ ή και μικρότερο, ο λυγισμός αναπτύσσεται αρχικά στην οροφή της δεξαμενής. Αυτό δύναται να συμβεί πρακτικά ακόμη και από την φόρτιση του ίδιου βάρους κάτι το οποίο όμως δεν δύναται να συμβεί στην πράξη μιας και επιλέγονται τα κατάλληλα στατικά συστήματα επιστήγασης με βάση τον σχεδιασμό σε μόνιμα κατακόρυφα φορτία. Για δεξαμενές μεγάλης διαμέτρου η οροφή συνήθως αποτελείται από ένα σύμπλεγμα δικτυωμάτων το οποίο προσδίδει την απαραίτητη δυσκαμψία στην κατασκευή ώστε να μην είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί απώλεια ευστάθειας της οροφής. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα αυτής της παραγράφου

έχουν καθαρά θεωρητικό χαρακτήρα και διεξήχθησαν για να αποτελέσουν ένα κάτω όριο στην παραμετρική μελέτη προσδιορισμού της επιρροής των συνοριακών συνθηκών.

Από την μελέτη των αντίστοιχων δεξαμενών παρατηρείται στις περισσότερες περιπτώσεις μια ελαφριά κύρτωση της οροφής λόγω του ιδίου βάρους της επιστέγασης, η οποία γίνεται εντονότερη καθώς αυξάνεται η επιβαλλόμενη θερμοκρασία. Με περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας δύναται να λυγίσει στην συνέχεια και το περιμετρικό κέλυφος ενώ παράλληλα μεγθύνονται αρκετά και οι παραμορφώσεις της οροφής. Ενδεικτικές είναι οι εικόνες παραμόρφωσης 7.4, 7.5 και 7.6. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της δεξαμενής διαστάσεων 20x20 με πάχος οροφής $t_r=1t_c$, την στιγμή που αρχίζουν να αναπτύσσονται σημαντικές κυρτώσεις στα τοιχώματα του κελύφους της η μέγιστη μετατόπιση της οροφής είναι της τάξης των 5 cm.

Σημειώνεται ότι για τις δεξαμενές διαφορετικής γεωμετρίας που θα παρουσιαστούν στις επόμενες παραγράφους, δεν μελετώνται περιπτώσεις που αντιστοιχούν σε πάχη οροφής μικρότερα από $t_r=5t_c$ μιας και δεν έχει πρακτικό χαρακτήρα.



Εικόνα 7. 7 Παραμορφώσεις οροφής σε δεξαμενή 20x20 , $1t_c$ (πριν το λυγισμό της κυλινδρικής επιφάνειας)



Εικόνα 7. 8 Παραμορφώσεις οροφής σε δεξαμενή 20x20 , $2t_c$ (πριν το λυγισμό της κυλινδρικής επιφάνειας)



Εικόνα 7. 9 Δεξαμενή 20x20 , $1t_c$ την στιγμή που παθαίνει λυγισμό η κυλινδρική επιφάνεια του κελύφους (σε θερμοκρασία 165°C, με μέγιστες παραμορφώσεις οροφής = 5cm)

Δεξαμενή διαστάσεων 20x20 με πάχος οροφής $t_r > 10t_c$

Οι δεξαμενές οι οποίες έχουν πάχος οροφής $t_r > 10t_c$ παρουσιάζουν την ίδια μορφή λυγισμού με την περίπτωση της τυπικής δεξαμενής που μελετήθηκε στην παράγραφο 7.1.2 και η οποία αντιστοιχεί σε πάχος οροφής ίσο με το δεκαπλάσιο του πάχους του κελύφους. Η συγκεκριμένη μορφή αστοχίας είναι συμμετρική ως προς τον κατακόρυφο μεσημβρινό άξονα με την υψηλότερη επιβαλλόμενη θερμοκρασία και είναι παρόμοια με την 1^η ιδιομορφή λυγισμού που προκύπτει από την γραμμική ανάλυση λυγισμού LBA. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται είναι μια μικρή διακύμανση στην τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας λυγισμού ή οποία κυμαίνεται από 138C° έως 148C°. Στον ακόλουθο Πίνακα 7.1.7 παρουσιάζονται οι κρίσιμες θερμοκρασίες λυγισμού της δεξαμενής διαστάσεων 20x20, για τα διάφορα πάχη οροφής.

Δεξαμενή 20x20 (γεωμετρικά τέλειος φορέας)	
Πάχος οροφής	Θερμοκρασία λυγισμού (C°)
$t_r=5t_c$	143
$t_r=10t_c$	143.5
$t_r=15t_c$	138.83
$t_r=30t_c$	147.82
$t_r=50t_c$	138
$t_r=60t_c$	139.4

Πίνακας 7.1. 2 Θερμοκρασίες λυγισμού της δεξαμενής 20x20 για την μεταβολή του πάχους της οροφής.

7.2 ΛΥΓΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ (HxD=10x20, 40x20, 20x40)

Στην παράγραφο αυτού του κεφαλαίου υλοποιείται μια εκτενής παραμετρική ανάλυση για την εύρεση του μεγέθους επιρροής της λυγηρότητας (λόγος H/D) στην δομική ευστάθεια της δεξαμενής μέσω μιας σειράς αναλύσεων η οποία αποτελείται από την επίλυση τριών δεξαμενών με διαφορετική γεωμετρία (10x20, 40x20 και 20x40). Επιπρόσθετα, για κάθε διαφορετικό τύπο δεξαμενής πραγματοποιείται παράλληλα μελέτη για τον προσδιορισμό της επιρροής της οροφής (ως συνοριακή συνθήκη) όπως υλοποιήθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο για την δεξαμενή διαστάσεων 20x20.

7.2.1 Δεξαμενή 10x20

Η δεξαμενή διαστάσεων 10x20 έχει διάμετρο 20m και ύψος 10m, δηλαδή το μισό ύψος συγκριτικά με την δεξαμενή 20x20. Για την υλοποίηση των γεωμετρικών μη γραμμικών αναλύσεων επιλέχθηκε αρχικώς ο κατάλληλος λόγος απόσβεσης (damping ratio). Ως κατάλληλη τιμή του συντελεστή θεωρείται η πρώτη τιμή του με ακρίβεια δεκαδικού. Για την εύρεση του χρησιμοποιήθηκε η δεξαμενή 10x20 με πάχος οροφής 5cm ($t_r=5t_c$). Σημειώνεται εδώ ότι στα προχωρημένα σχήματα επίλυσης (adaptive stepping solution schemes) όπως αυτό που χρησιμοποιείται εδώ, σημαντικό ρόλο στην ποιότητα της λύσης παίζει η επιλογή του χρονικού βήματος (fraction of loadcase time), το οποίο όμως με την σειρά του ενδέχεται να επιβαρύνει την ανάλυση σε υπολογιστικό κόστος. Με δεδομένο το πλήθος των επιλύσεων που έπρεπε να διεξαχθούν επιχειρήθηκε να βρεθεί μια ισορροπία ανάμεσα στην τιμή του λόγου απόσβεσης και στο χρονικό βήμα των αναλύσεων ούτως ώστε να μην επηρεάζεται η ποιότητα της λύσης. Προς επίρρωση των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν για το λόγο αυτό παρατίθεται ο Πίνακας 7.2 1.

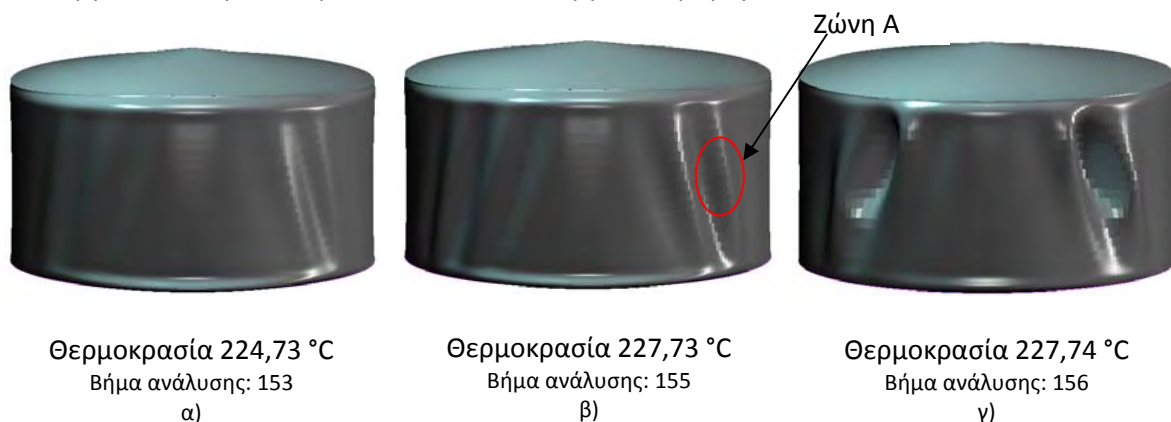
Δεξαμενή 10x20 (5tc)		
Χρονικό βήμα/Ταχύτητα ανάλυσης	Συντελεστής απόσβεσης (Damping ratio)	Κρίσιμη Θερμοκρασία Λυγισμού(°C)
Μικρό/Αργή	10^{-4}	376.063
Μεγάλο/Γρήγορη	10^{-6}	245.62
Μικρό/Αργή	10^{-6}	232.81
Μεγάλο/Γρήγορη	10^{-7}	245.62
Μικρό/Αργή	10^{-7}	227.063
Μικρό/Αργή	10^{-8}	224.73
Μικρό/Αργή	10^{-9}	224.73
Μικρό/Αργή	10^{-10}	224.73

Πίνακας 7.2. 1 Σύγκλιση του συντελεστή απόσβεσης και της ταχύτητας αναλύσεως του προγράμματος για την δεξαμενή 10x20.

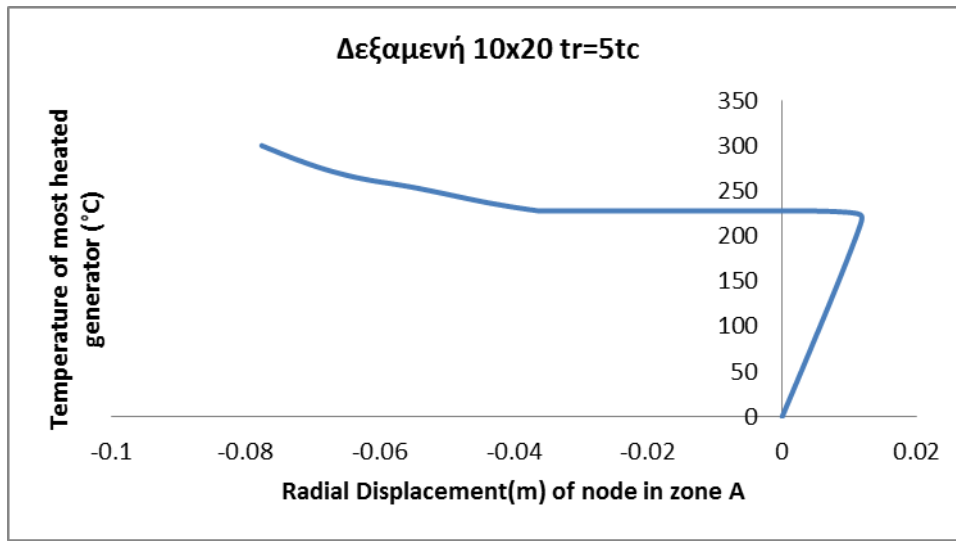
Στον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι χρησιμοποιώντας ένα αρκετά μικρό χρονικό βήμα η κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού είναι μικρότερη σε σχέση με θερμοκρασία που υπολογίζει η ανάλυση που κάνει χρήση αραιότερης χρονικής διακριτοποίησης. Όπως παρατηρήθηκε από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, είναι πιθανό να εμφανιστούν αρκετές τοπικές μικροαστάθειες κατά την προοδευτική παραμόρφωση του φορέα που δεν δύναται να εντοπιστούν μέσα από μια αραιή χρονική διακριτοποίηση. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε τελικά μια πυκνή χρονική διακριτοποίηση της τάξης του 10^{-5} (minimum fraction of loadcase time). Ταυτοχρόνως, η τιμή του λόγου απόσβεσης πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με 10^{-8} . Παρόλα αυτά, επιλέχθηκε η τιμή 10^{-10} μιας και δεν υπήρχαν προβλήματα σύγκλισης αμέσως μετά την εμφάνιση λυγισμού και την εισαγωγή του φορέα στο μεταλυγισμικό του στάδιο. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για τις δεξαμενές διαστάσεων 10x20, και για διαφορετικά πάχη οροφής.

Δεξαμενή 10x20 , $tr = 5tc$

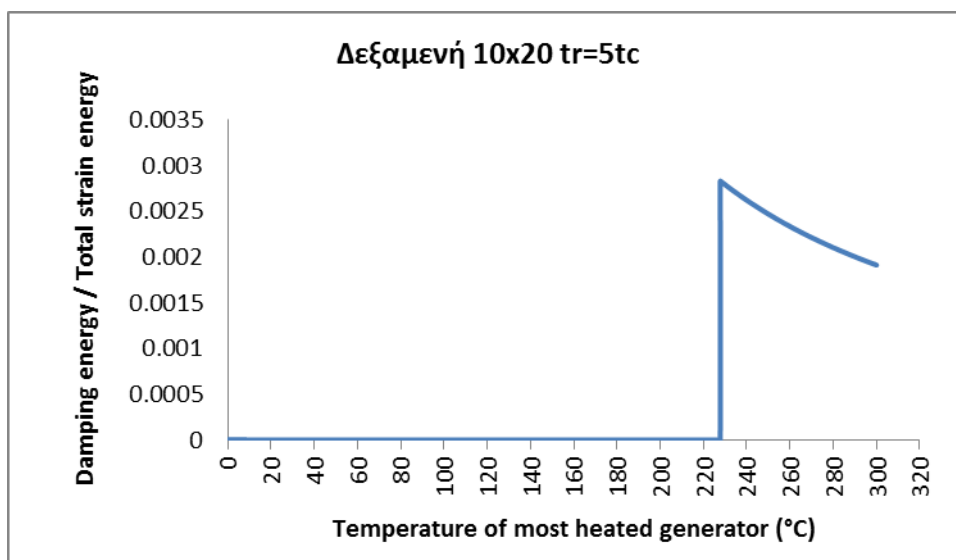
Η λυγισμική απόκριση της δεξαμενής διαστάσεων 10x20, με πάχος οροφής, $=5t_c$ παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον μιας και στην κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού αντιστοιχούν πρακτικά δυο μορφές ισορροπίας εκ των οποίων όπως αποδεικνύεται η πρώτη είναι ασταθής ενώ η δεύτερη είναι ευσταθής (Bifurcation-διακλάδωση της λύσης). Συγκεκριμένα, καθώς η δεξαμενή θερμαίνεται, αναπτύσσονται στην ημιπεριφέρεια της παραμορφώσεις που διογκώνουν το κέλυφος. Για θερμοκρασία $T = 224.73 \text{ }^\circ\text{C}$ το τμήμα της δεξαμενής που θερμαίνεται παρουσιάζει κύρτωση (Εικ. 7.2.1α)). Για $T = 227.73 \text{ }^\circ\text{C}$ η δεξαμενή λυγίζει με μια συμμετρική μορφή λυγισμού περί τον μεσημβρινό άξονα με την μεγαλύτερη θερμοκρασία (Εικ. 7.2.1 β)). Η λυγισμική αυτή μορφή είναι όμοια με την μορφή λυγισμού της δεξαμενής διαστάσεων 20x20 όμως είναι ασταθής και ως εκ τούτου η δεξαμενή δεν μπορεί να ισορροπήσει στην νέα παραμορφωμένη θέση της. Ακαριαία και για την ίδια τιμή της επιβαλλόμενης θερμοκρασίας, τμήμα της επιφάνειας που έχει κυρτώσει εμφανίζει μεγάλες μετατοπίσεις (Διάγραμμα 7.2 1, Εικ. 7.2.1 γ)). Η κατασκευή αναπτύσσει τότε μια νέα συμμετρική μορφή λυγισμού για $T_{cr,GNA} = 227.73 \text{ }^\circ\text{C}$. Η κρίσιμη τιμή της θερμοκρασίας λυγισμού επιβεβαιώνεται επακριβώς από το διάγραμμα του λόγου της ενέργειας απόσβεσης προς την συνολική ενέργεια παραμόρφωσης.



Εικόνα 7.2. 1 Μορφές παραμορφώσεων της δεξαμενής 10x20 , $tr = 5tc$ που δημιουργήθηκαν κατά την αύξηση θερμοκρασίας στο στάδιο του λυγισμού.



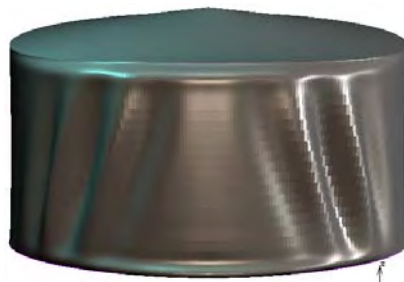
Διάγραμμα 7.2. 1 Οριζόντια μετατόπιση ενός σημείου στην ζώνη Α για την δεξαμενή 10x20, tr=5tc συναρτήσει της θερμοκρασίας



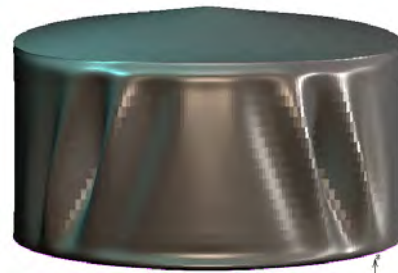
Διάγραμμα 7.2.2 Λόγος ενέργειας απόσβεσης προς την συνολική ενέργεια παραμόρφωσης του συστήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας για την τυπική δεξαμενή 10x20 5tc

Δεξαμενή 10x20 , $t_r = 10t_c$

Η δεξαμενή διαστάσεων 10x20 με πάχος οροφής $t_r = 10t_c$ λύγισε για μικρότερη θερμοκρασία συγκριτικά με την προηγούμενη δεξαμενή. Από το διάγραμμα 7.2 3 και τις παρακάτω εικόνες φαίνεται ότι η συγκεκριμένη δεξαμενή παρουσιάζει έντονη δομική αστάθεια για θερμοκρασία ίση με $T_{cr,GNA} = 202.2 \text{ }^\circ\text{C}$. Η μορφή των παραμορφώσεων είναι όμοια με την αρχική μορφή παραμόρφωσης της δεξαμενής με πάχος οροφής $t_r = 5t_c$ χωρίς όμως να εμφανίζεται διακλάδωση της λύσης. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η λυγισμική μορφή αστοχίας καθώς και οι έντονες παραμορφώσεις που εμφανίζονται στο μεταλυγισμικό στάδιο, για θερμοκρασία ελαφρώς μεγαλύτερη ($T = 204.3 \text{ }^\circ\text{C}$).

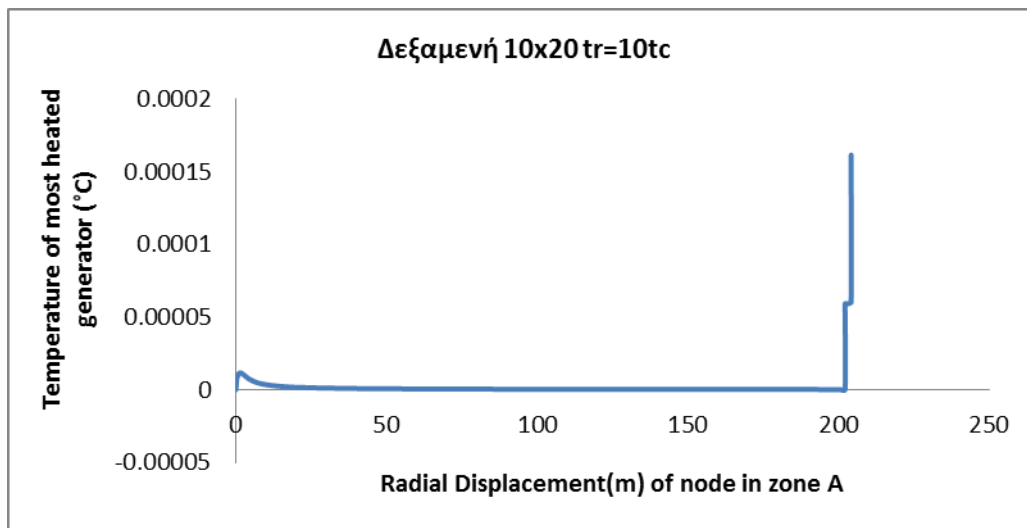


Θερμοκρασία 202,2 °C
Βήμα ανάλυσης: 138 (Στάδιο λυγισμού)
α)



Θερμοκρασία 204,3 °C
Βήμα ανάλυσης: 159 (Μεταλυγισμικό στάδιο)
β)

Εικόνα 7.2. 2 Μορφές παραμορφώσεων της δεξαμενής 10x20 , $t_r = 10t_c$ που δημιουργήθηκαν κατά την αύξηση θερμοκρασίας στο στάδιο του λυγισμού.

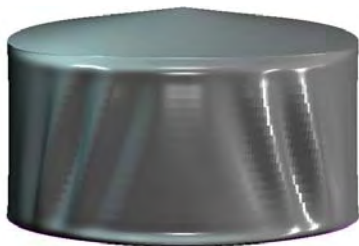


Διάγραμμα 7.2. 3 Λόγος ενέργειας απόσβεσης προς την συνολική ενέργεια παραμόρφωσης του συστήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας για την τυπική δεξαμενή 10x20 10 t_c

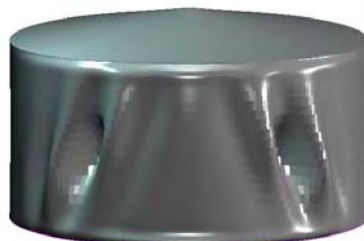
Σημειώνεται, ότι την ίδια λυγισμική συμπεριφορά με παραπλήσια κρίσιμη τιμή θερμοκρασίας παρουσιάζουν και οι δεξαμενές 10x20 με πάχη οροφής $t_r = 15t_c$ και $t_r = 60t_c$ αντίστοιχα.

Δεξαμενή 10x20, $t_r=30t_c$

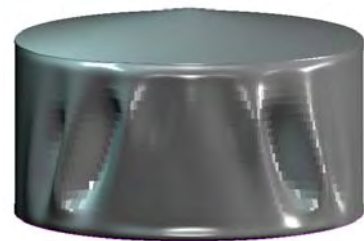
Η λυγισμική απόκριση της συγκεκριμένης δεξαμενής έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον μιας και αναδεικνύει το φαινόμενο της διακλάδωσης (Bifurcation) τόσο την στιγμή του λυγισμού όσο και στο μεταλυγισμικό στάδιο. Ειδικότερα, για επιβαλλόμενη θερμοκρασία ίση με $T_{cr,GMA} = 197.7 \text{ } ^\circ\text{C}$ η δεξαμενή λυγίζει με βάση την 1^η συμμετρική μορφή λυγισμού. Η συγκεκριμένη μορφή λυγισμού είναι ασταθής οπότε, για ελαφρώς μεγαλύτερη θερμοκρασία ($T = 201.1 \text{ } ^\circ\text{C}$) η δεξαμενή λυγίζει σύμφωνα με την παραμορφωμένη μορφή της Εικόνας 7.2 3 β, στην οποία αναπτύσσονται σημαντικές μετατοπίσεις σε τμήματα που είχαν υποστεί κύρτωση κατά τον αρχικό λυγισμό. Ακριβώς το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και στην δεξαμενή 10x20, $t_r = 5t_c$. Η λύση αυτή είναι ευσταθής και η δεξαμενή επιδεικνύει σημαντική λυγισμική συμπεριφορά μέχρι και για τιμή θερμοκρασίας ίση με $T = 290 \text{ } ^\circ\text{C}$, στην οποία η δεξαμενή ξαναλυγίζει με βάση την μορφή αστοχίας της Εικόνας 7.2 3 γ. Σημειώνεται, ότι όλες οι μορφές λυγισμού που αναπτύσσονται κατά την προοδευτική παραμόρφωση είναι συμμετρικές ως προς μεσημβρινό άξονα με την μεγαλύτερη τιμή της θερμοκρασίας. Όπως θα αποδειχθεί ακολούθως υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες από μια ασταθή συμμετρική μορφή λυγισμού η δεξαμενή καταλήγει να ισορροπήσει σε μια ευσταθή μη συμμετρική μορφή λυγισμού, φαινόμενο το εμφανίζεται αρκετές φορές στα κελύφη για τις συνήθεις φορτίσεις. Τα αποτελέσματα της απόκρισης της συγκεκριμένης δεξαμενής παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.2 3 και στα διαγράμματα 7.2. 4 και 7.2. 5. Όπως διακρίνεται στο διάγραμμα 7.2. 5, η τεχνητή ενέργεια απόσβεσης είναι πολύ μεγαλύτερη την στιγμή που η δεξαμενή μεταβαίνει στην 3 μορφή λυγισμού (Εικόνα 7.2 3γ).



Θερμοκρασία: 197.7 °C
Βήμα ανάλυσης: 138
α)

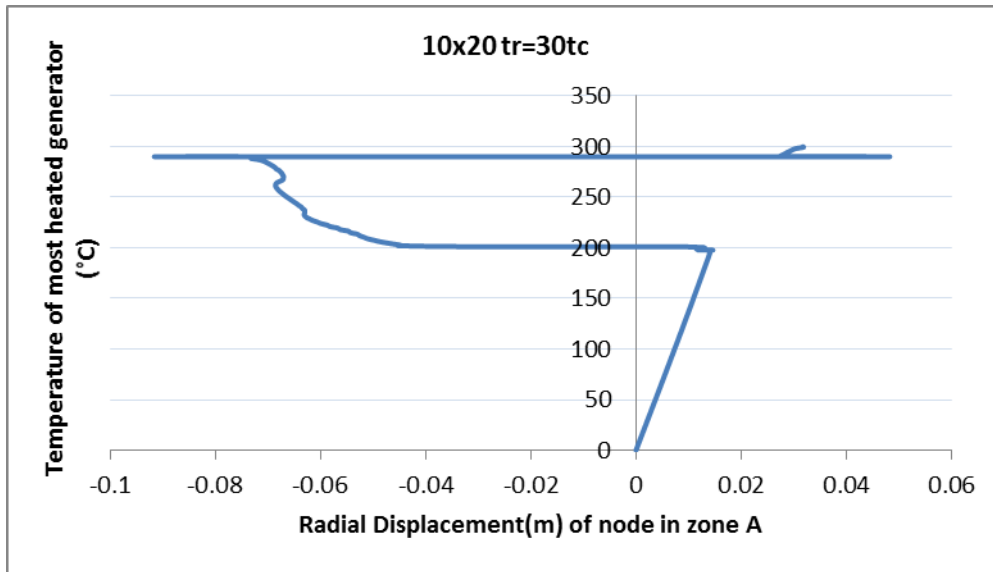


Θερμοκρασία: 201,1 °C
Βήμα ανάλυσης: 157
β)

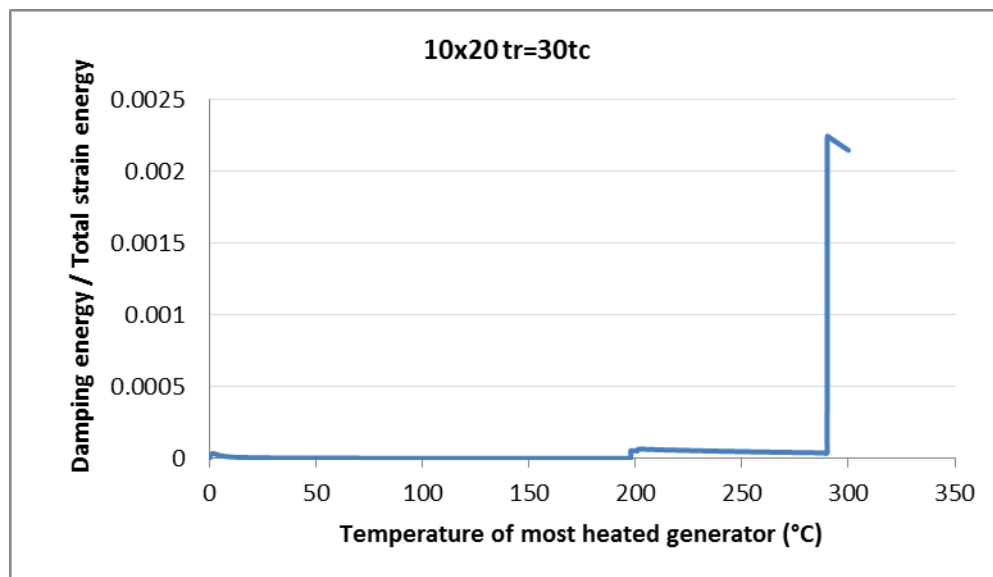


Θερμοκρασία: 290 °C
Βήμα ανάλυσης: 221
γ)

Εικόνα 7.2. 3 Στάδιο λυγισμού (α) και μεταλυγισμικού σταδίου (β και γ) της δεξαμενής 10x20, $t_r=30t_c$.



Διάγραμμα 7.2. 4 Οριζόντια μετατόπιση ενός σημείου στην ζώνη A για την δεξαμενή 10x20, $tr=30tc$ συναρτήσεως της θερμοκρασίας



Διάγραμμα 7.2. 5 Λόγος ενέργειας απόσβεσης προς την συνολική ενέργεια παραμόρφωσης του συστήματος συναρτήσεως της θερμοκρασίας για την τυπική δεξαμενή 10x20 30tc

Δεξαμενή 10x20 , $t_r=50t_c$

Στην περίπτωση της δεξαμενής διαστάσεων 10x20 με πάχος οροφής $t_r = 50t_c$ η δεξαμενή λυγίζει σύμφωνα με την 1^η ιδιομορφή λυγισμού για θερμοκρασία ίση με $T_{cr,GNA} = 214 \text{ }^\circ\text{C}$ (Εικόνα 7.2. 4 α). Ο λυγισμός αποτυπώνεται εμφανώς στο σημείο α του διαγράμματος που παριστάνει τον λόγο τεχνητής απόσβεσης ως προς την μέγιστη επιβαλλόμενη θερμοκρασία. Η συγκεκριμένη μορφή λυγισμού είναι ασταθής διότι για ελαφρώς μεγαλύτερη θερμοκρασία $T = 216 \text{ }^\circ\text{C}$ η δεξαμενή λυγίζει εκ νέου και ισορροπεί σε μια νέα μη συμμετρική μορφή λυγισμού (Εικόνα 7.2. 4β). Εν συνεχεία, η νέα παραμορφωμένη θέση ισορροπίας δείχνει να είναι ευσταθής με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται μια μικρή μεταλυγισμική αντοχή μέχρι και για τιμή θερμικής καταπόνησης ίση με $T = 237 \text{ }^\circ\text{C}$. Για την θερμοκρασία αυτή η δεξαμενή ξαναλυγίζει (Εικόνα 7.2 5β, Διάγραμμα 7.2.6-σημείο β).



Θερμοκρασία 214 °C
Βήμα ανάλυσης: 146
α)



Θερμοκρασία 216 °C
Βήμα ανάλυσης: 153
β)

Εικόνα 7.2. 4 Στάδιο λυγισμού της δεξαμενής 10x20 , $t_r = 50t_c$

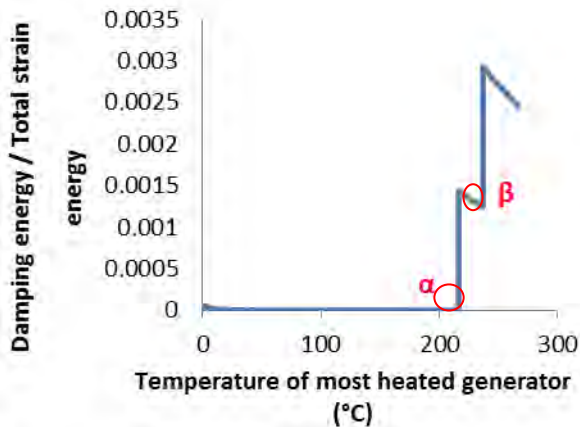


Θερμοκρασία 216 °C
Βήμα ανάλυσης: 153
α)

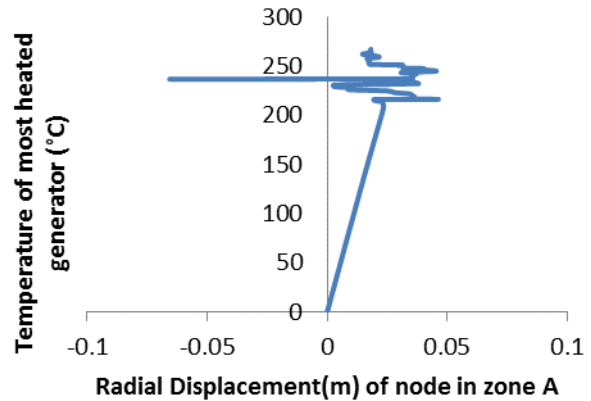


Θερμοκρασία 237 °C
Βήμα ανάλυσης: 186
β)

Εικόνα 7.2. 5 Στάδιο λυγισμού και μεταλυγισμικό στάδιο της δεξαμενής 10x20 , $t_r = 50t_c$



Διάγραμμα 7.2. 6 Λόγος ενέργειας απόσβεσης προς την συνολική ενέργεια παραμόρφωσης του συστήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας για την τυπική δεξαμενή 10x20 50tc



Διάγραμμα 7.2. 7 Οριζόντια μετατόπιση ενός σημείου στην ζώνη A για την δεξαμενή 10x20, $t_r=50t_c$ συναρτήσει της θερμοκρασίας

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται συνολικά οι κρίσιμες τιμές της θερμοκρασίας για την δεξαμενή διαστάσεων 10x20 συναρτήσει του πάχους της οροφής και το οποίο πρακτικά προσομοιώνει άνω την συνοριακή συνθήκη του προβλήματος.

Δεξαμενή 10x20 (γεωμετρικά τέλειος φορέας)	
Πάχος οροφής	Θερμοκρασία λυγισμού (C°)
$t_r=5t_c$	224.73
$t_r=10t_c$	202.238
$t_r=15t_c$	196.23
$t_r=30t_c$	197.7
$t_r=50t_c$	214.238
$t_r=60t_c$	227.738

Πίνακας 7.2. 2 Θερμοκρασίες λυγισμού της δεξαμενής 10x20 συναρτήσει της συνοριακής συνθήκης της οροφής.

Όπως διακρίνεται από τον ανωτέρω πίνακα και σε μια πρώτη ανάγνωση, η λυγισμική αντοχή της δεξαμενής 10x20 έναντι της ανομοιόμορφης θερμικής καταπόνησης είναι σημαντικά μεγαλύτερη συγκριτικά με την δεξαμενή διαστάσεων 20x20. Επιπρόσθετα, και σε αυτή την περίπτωση η μεταβολή της συνοριακής συνθήκης της οροφής φαίνεται να μην επηρεάζει ιδιαίτερα την κρίσιμη τιμή της θερμοκρασίας αλλά επηρεάζει έντονα την λυγισμική μορφή αστοχίας. Είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον το γεγονός ότι αισθητές μεταβολές της άνω συνοριακής συνθήκης της οροφής δύναται να οδηγήσουν σε πολλαπλές διακλαδώσεις της λύσης κατά την προοδευτική παραμόρφωση της δεξαμενής, τόσο στο λυγισμικό όσο και στο μεταλυγισμικό στάδιο. Από την στιγμή που στο δομικό πρόβλημα ευστάθειας των δεξαμενών υπό θερμική καταπόνηση υφίστανται πολλαπλές λύσεις

(ευσταθείς ή ασταθείς) στην γειτονιά μιας κρίσιμης θερμοκρασίας η μεταβολή κάποιων παραμέτρων που επηρεάζουν το πρόβλημα ενδέχεται να ενεργοποιούν κάθε φορά κάποιες από τις συγκεκριμένες λύσεις. Ως εκ τούτου φαίνεται ότι η δυσκαμψία της οροφής είναι μάλλον μια τέτοια ευαίσθητη παράμετρος.

7.2.2 Δεξαμενή 40x20

Η δεξαμενή διαστάσεων 40x20 έχει διπλάσια λυγηρότητα συγκριτικά με την δεξαμενή αναφοράς, διαστάσεων 20x20. Στόχος της παρακάτω διερεύνησης είναι αν όντως η διπλάσια λυγηρότητα οδηγεί και σε μικρότερα κρίσιμα θερμικά φορτία. Αρχικά, υπολογίστηκε εκ νέου ο λόγος της τεχνητής ενέργειας απόσβεσης (damping ratio) όπως αναφέρεται αναλυτικά στην εισαγωγή του 7ου κεφαλαίου. Ως κατάλληλη τιμή του λόγου απόσβεσης θεωρείται η πρώτη τιμή του, για την οποία η θερμοκρασία λυγισμού ξεκινάει να συγκλίνει σε μία τιμή με ακρίβεια δεκαδικού. Για την εύρεση της τιμής αυτής χρησιμοποιήθηκε η δεξαμενή 40x20 με πάχος οροφής 10cm ($t_r=10t_c$). Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται οι θερμοκρασίες λυγισμού συναρτήσει των συντελεστών απόσβεσης :

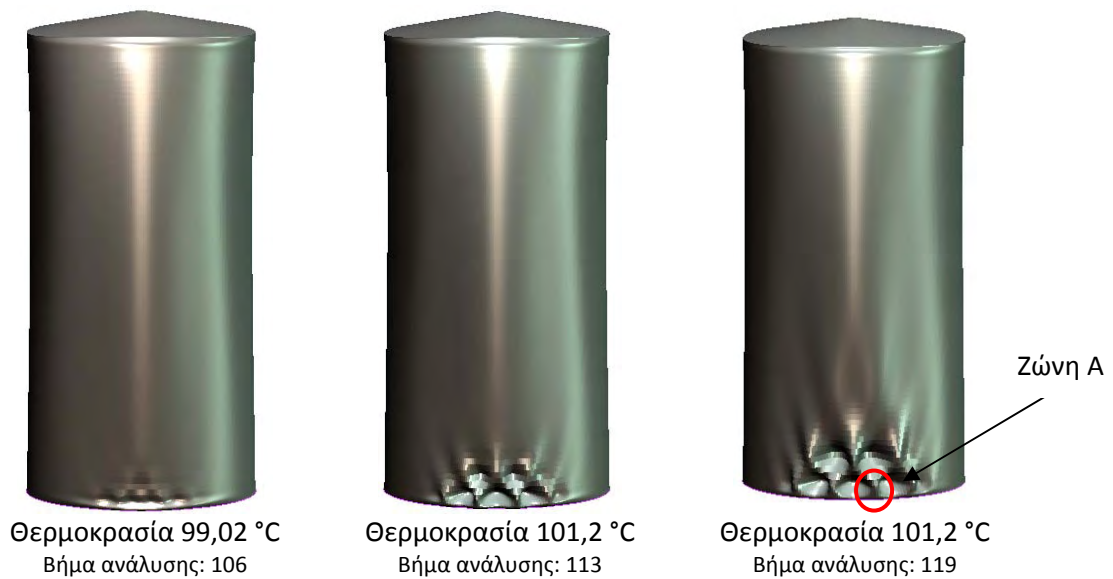
Δεξαμενή 40x20 (10 t_c)	
Συντελεστής απόσβεσης (Damping ratio)	Κρίσιμη Θερμοκρασία Λυγισμού(°C)
10^{-3}	88.1
10^{-4}	91.1
10^{-5}	101.1
10^{-7}	99.027
10^{-8}	99.02
10^{-9}	99.02
10^{-10}	99.02

Πίνακας 7.2. 3 Σύγκλιση του συντελεστή απόσβεσης και της ταχύτητας αναλύσεως του προγράμματος για την δεξαμενή 10x20

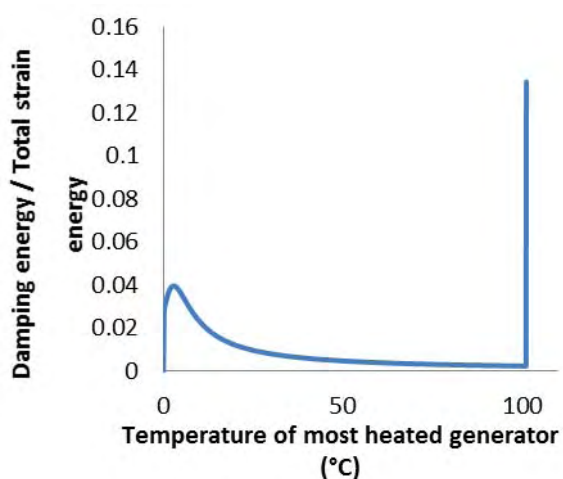
Για την συγκεκριμένη δεξαμενή επιλέχθηκε η τιμή 10^{-10} . Η μελέτη ανέδειξε μια παρόμοια λυγισμική συμπεριφορά για όλα τα διαφορετικά πάχη οροφής. Ειδικότερα, όλες οι δεξαμενές λυγίζουν σύμφωνα με την μορφή λυγισμού που αποτυπώνεται στον Εικόνα 7.2.6, στην οποία αναπτύσσεται τοπικός λυγισμός στην βάση της δεξαμενής. Η μορφή αστοχίας που εκδηλώνεται είναι παρόμοια με την 6^η ιδιομορφή του γραμμικού προβλήματος ευστάθειας. Τα διαγράμματα 7.2. 8 και 7.2. 9 αποτυπώνουν την απόκριση της δεξαμενής διαστάσεων 40x20 με πάχος οροφής $t_r=10t_c$ και είναι ενδεικτικά της συμπεριφοράς που εμφανίζεται στις περιπτώσεις με διαφορετικά πάχη οροφής. Τέλος, στον Πίνακα 7.2. 4 παρατίθενται συνολικά για όλα τα πάχη οροφής οι κρίσιμες τιμές της επιβαλλόμενης θερμοκρασίας.

Δεξαμενή 40x20 (γεωμετρικά τέλειος φορέας)	
Πάχος οροφής	Θερμοκρασία λυγισμού (C°)
$t_r=5t_c$	100.027
$t_r=10t_c$	99.027
$t_r=15t_c$	89.02
$t_r=30t_c$	99.25
$t_r=50t_c$	130.425
$t_r=60t_c$	115.8

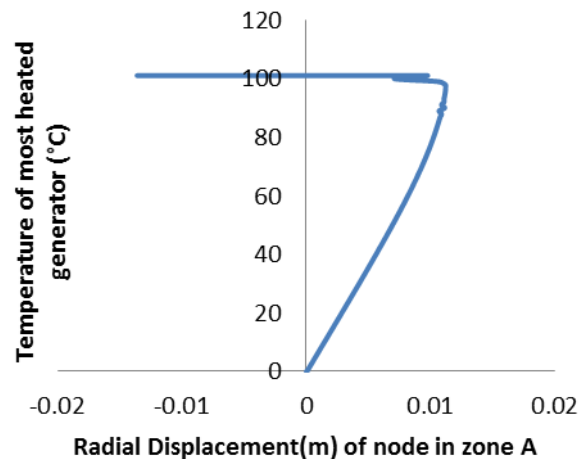
Πίνακας 7.2. 4 Θερμοκρασίες λυγισμού της δεξαμενής 40x20 για την μεταβολή του πάχους της οροφής.



Εικόνα 7.2. 6 Στάδιο λυγισμού και μεταλυγισμικό στάδιο της δεξαμενής 40x20 , $t_r=10t_c$.



Διάγραμμα 7.2. 8 Λόγος ενέργειας απόσβεσης προς την συνολική ενέργεια παραμόρφωσης του συστήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας για την τυπική δεξαμενή 40x20, $t_r=10t_c$.

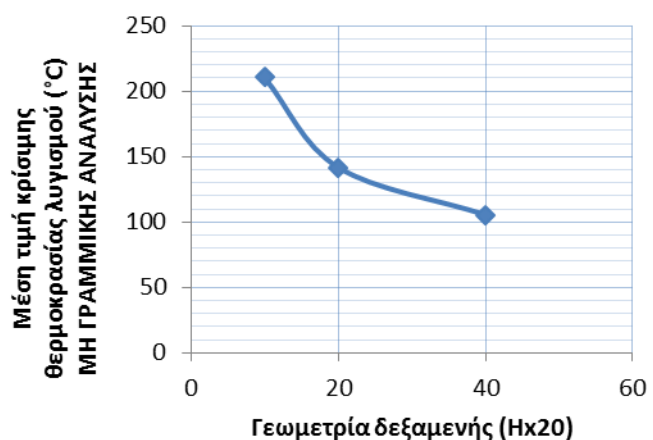


Διάγραμμα 7.2. 9 Οριζόντια μετατόπιση ενός σημείου στην ζώνη Α για την δεξαμενή 40x20, $t_r=10t_c$ συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Συνοψίζοντας, συμπεραίνεται ότι όντως υφίσταται διαφοροποίηση της κρίσιμης θερμοκρασίας λυγισμού καθώς αυξομειώνεται ο λόγος H/D . Δεξαμενές της ίδιας διαμέτρου D αλλά με διαφορετικό ύψος H , λυγίζουν σε διαφορετική κρίσιμη θερμοκρασία και ενδεχομένως εμφανίζουν και διαφορετική λυγισμική μορφή αστοχίας. Όσο μεγαλώνει το ύψος της δεξαμενής η κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού μειώνεται ενώ δύναται να αναπτυχθούν ανάλογα και με την οριακή συνθήκη της οροφής συμμετρικές και μη συμμετρικές μορφές λυγισμού τόσο σε όλη την θερμαινόμενη επιφάνεια του κελύφους όσο και τοπικά στην βάση του. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συνολικά τα ανωτέρω ευρήματα.

Δεξαμενές	ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ Μέση θερμοκρασία λυγισμού	LBA Μέση θερμοκρασία λυγισμού από 1η ιδιομορφή
10x20	210.5	151.7
20x20	141.8	115
40x20	105.6	100.5

Πίνακας 7.2. 5 Μέση θερμοκρασία λυγισμού (για όλα τα πάχη οροφής) μη γραμμικής ανάλυσης και μέση θερμοκρασία λυγισμού 1^{ης} ιδιομορφής γραμμικής ανάλυσης λυγισμού, για τις δεξαμενές με διαφορετικό ύψος H και ίδια διάμετρο D .



Διάγραμμα 7.2. 10 Μέση θερμοκρασία λυγισμού (για όλα τα πάχη οροφής που μελετήθηκαν) της μη γραμμικής ανάλυσης, συναρτήσει του ύψους της δεξαμενής.

7.2.3 Δεξαμενή 20x40

Οι δεξαμενές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους (10x20, 20x20, 40x20) είχαν όλες την ίδια διάμετρο D και μεταβάλλονταν απλά το ύψος. Σημειώνεται επίσης ότι όλες οι δεξαμενές φέρανε το ίδιο μόνιμο φορτίο της επιστέγασης, ένας παράγοντας που δημιουργεί πρόσθετη θλίψη και ενδεχομένως να επηρεάζει τα αποτελέσματα. Είναι προφανές εύλογο το ερώτημα του κατά πόσο τα παραπάνω ευρήματα ενδέχεται να ισχύουν και σε δεξαμενές ίδιου σχήματος και μορφής αλλά διαφορετικού συνολικού μεγέθους. Για την διερεύνηση αυτού, μελετήθηκε η δεξαμενή διαστάσεων 20x40 η οποία έχει διπλάσιο συνολικό όγκο από την δεξαμενή διαστάσεων 10x20 (παράγραφος 7.2.1). Πρακτικά πρόκειται για δύο δεξαμενές ακριβώς ίδιου σχήματος αλλά η μια (20x40) είναι μια μεγέθυνση(x2) της άλλης (10x20).

Η αύξηση της διαμέτρου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του συνολικού βάρους της επιστέγασης. Σύμφωνα λοιπόν με την παράγραφο 5.2 και τον πίνακα 5.1 η μάζα της οροφής θα είναι περί τα 80kg/m² (της επιφάνειας του εμβαδού του κύκλου με διάμετρο 40m). Επίσης η διακριτοποίηση των στοιχείων για την σωστή προσομοίωση του φορέα, πραγματοποιήθηκε με τον ίδιο τρόπο και συνολικά κατά την περίμετρο του κυλινδρικού κελύφους δημιουργήθηκαν 360 κόμβοι. Επομένως το συνολικό φορτίο οροφής το οποίο φέρει η δεξαμενή είναι:

$$w = \frac{m \cdot g}{360} = \frac{80 \left(\frac{kg}{m^2} \right) \cdot E (m^2) \cdot 9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right)}{360} = \frac{40 \cdot 3.14 \cdot 20^2 \cdot 9.81}{360} = 2738N \rightarrow 2.74kN \text{ ανά κόμβο}$$

Στην συνέχεια, εφόσον πρόκειται για δεξαμενή με μία νέα γεωμετρία, διεξάγεται σειρά αναλύσεων για τον προσδιορισμό του λόγου απόσβεσης (damping ratio) με βάση την σύγκλιση της κρίσιμης θερμοκρασίας λυγισμού.

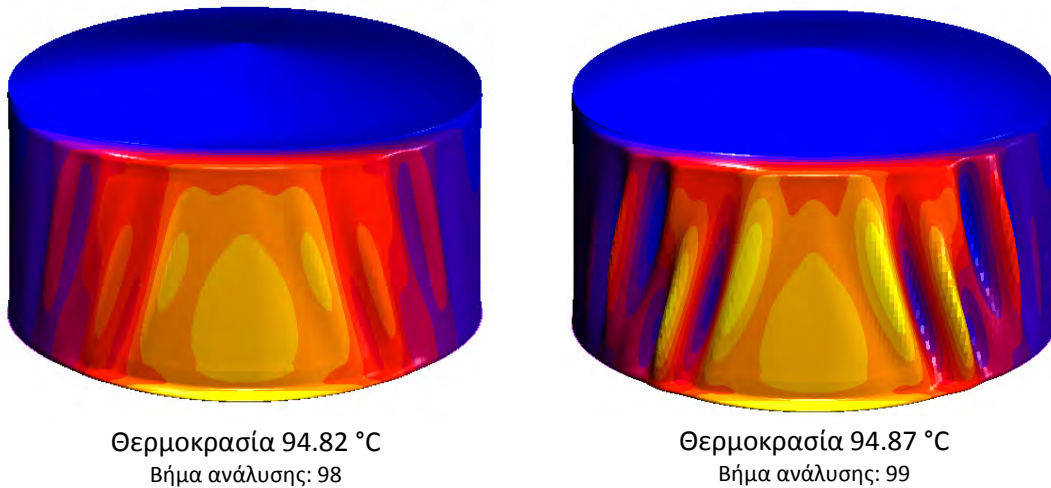
Δεξαμενή 20x40 (5tc)	
Συντελεστής απόσβεσης (Damping ratio)	Κρίσιμη Θερμοκρασία Λυγισμού(°C)
10 ⁻⁷	110.3
10 ⁻⁸	109.8
10 ⁻⁹	109.8
10 ⁻¹⁰	109.8

Πίνακας 7.2. 6 Σύγκλιση του συντελεστή απόσβεσης και της ταχύτητας αναλύσεως του προγράμματος για την δεξαμενή 20x40

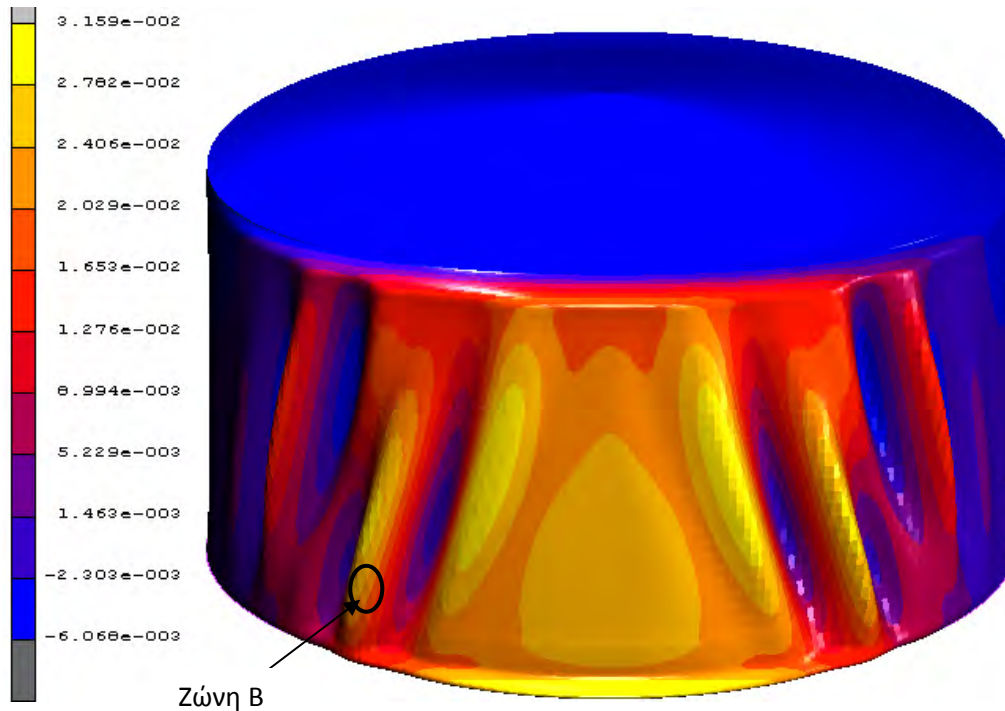
Επιλέγεται η τιμή 10⁻⁸η οποία είναι η κατάλληλη ούτως ώστε να μην τερματίζεται η ανάλυση κατά το μεταλυγισμικό στάδιο. Από την σειρά γεωμετρικών μη γραμμικών αναλύσεων που διεξήχθη παρατηρήθηκε ότι σε όλες τις δεξαμενές, με διαφορετικά πάχη

οροφής, παρουσιάστηκε στην κρίσιμη θερμοκρασία, η ίδια συμμετρική μορφή λυγισμού ως προς τον μεσημβρινό με την μεγαλύτερη θερμοκρασία και η οποία είναι παρόμοια με την μορφή λυγισμού που εμφανίστηκε στην πλειονότητα των περιπτώσεων που μελετήθηκαν (κυρτώσεις διαγώνιας μορφής καθ' όλο το ύψος της δεξαμενής). Η μορφή αυτή λυγισμού αντιστοιχεί στην 1^η ιδιομορφή που παράγεται από την γραμμική ανάλυση λυγισμού. (Εικόνα 6.7). Η κρίσιμη θερμοκρασία δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από το πάχος της οροφής και οι τιμές της κυμαίνονται μεταξύ των τιμών που δίνονται στον Πίνακα 7.2 8.

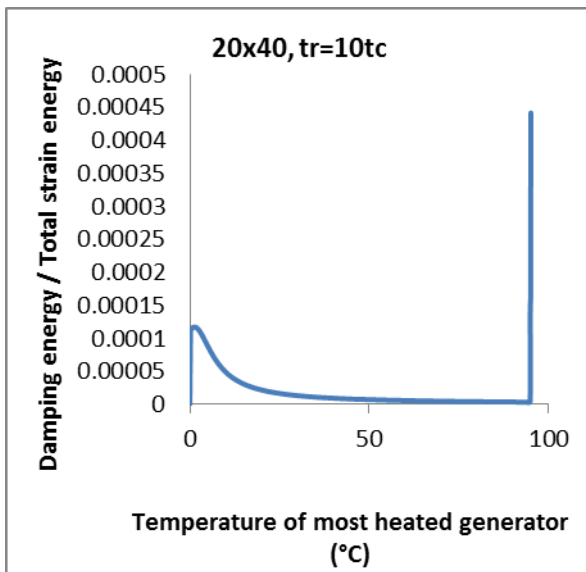
Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται ενδεικτικά οι παραμορφώσεις και οι τιμές της επιβαλλόμενης θερμοκρασίας κατά το λυγισμικό και μεταλυγισμικό στάδιο της δεξαμενής διαστάσεων 20x40, με πάχος οροφής $t_r=10t_c$, καθώς και ο δρόμος ισορροπίας ενός σημείου της λυγισμικής ζώνης B. Επίσης, δίνεται το διάγραμμα του λόγου απόσβεσης συναρτήσει της θερμοκρασίας που χρησιμοποιείται για τον ακριβή προσδιορισμό της κρίσιμης θερμοκρασίας λυγισμού.



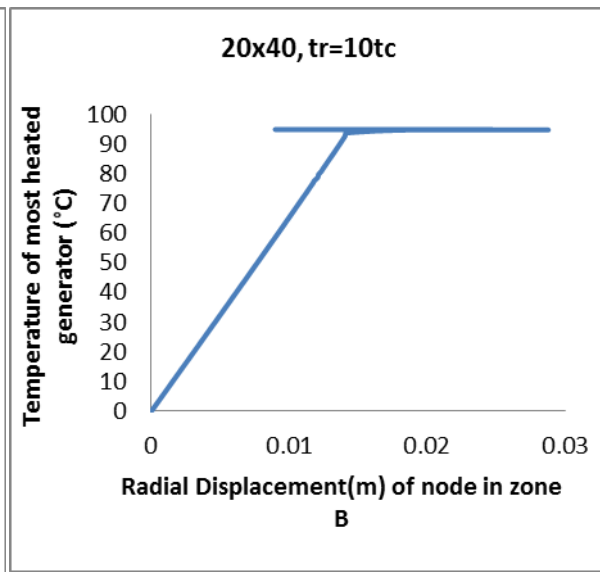
Εικόνα 7.2. 7 Στάδιο λυγισμού και μεταλυγισμικό στάδιο της δεξαμενής 20x40 , $t_r = 10t_c$.



Εικόνα 7.2. 8 Λεπτομέρεια των παραμορφώσεων της δεξαμενής 20x40 , $t_r = 10t_c$ την στιγμή του λυγισμού με κρίσιμη θερμοκρασία 94.8 °C .



Διάγραμμα 7.2. 11 Λόγος ενέργειας απόσβεσης προς την συνολική ενέργεια παραμόρφωσης του συστήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας για την τυπική δεξαμενή 20x40 10 t_c



Διάγραμμα 7.2. 12 Οριζόντια μετατόπιση ενός σημείου στην ζώνη A για την δεξαμενή 20x40, $t_r = 10t_c$ συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Δεξαμενή 20x40 (γεωμετρικά τέλειος φορέας)	
Πάχος οροφής	Θερμοκρασία λυγισμού (C°)
$t_r=5t_c$	109.825
$t_r=10t_c$	94.825
$t_r=15t_c$	91.825
$t_r=30t_c$	91.275
$t_r=50t_c$	90.275
$t_r=60t_c$	93.275
$t_r=100t_c$	86.82

Πίνακας 7.2. 7 Θερμοκρασίες λυγισμού της δεξαμενής 20x40 για την μεταβολή του πάχους της οροφής.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που αφορούν τις δεξαμενές διαστάσεων 10x20 και 20x40 διαπιστώνεται ότι οι κρίσιμες θερμοκρασίες λυγισμού για την μεγαλύτερη σε μέγεθος δεξαμενή είναι σχεδόν υπερδιπλάσιες της άλλης.

Δεξαμενή	Βάρος οροφής ανά κόμβο:	Θερμοκρασία λυγισμού	
20x40 $t_r=10t_c$	2.74kN	94.825 (C°)	113% αύξηση
10x20 $t_r=10t_c$	0.34kN	202.238 (C°)	

Οι παραπάνω τιμές αντιστοιχούν σε πάχος οροφής $t_r=10t_c$ και είναι αντιπροσωπευτικές μιας και το πάχος της οροφής δεν επηρεάζει αισθητά την κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού όπου οι τιμές κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 25 C°. Επιπλέον η δεξαμενή διαστάσεων 20x40 μπορεί να συγκριθεί ως προς την φέρουσα ικανότητα της στις υψηλές θερμοκρασίες και με την τυπική δεξαμενή διαστάσεων 20x20. Από την σύγκριση τους προσδιορίζεται μια ένδειξη του ποσοστού επιρροής της διαμέτρου στην κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού.

Δεξαμενή	Βάρος οροφής ανά κόμβο:	Θερμοκρασία λυγισμού	
20x40 $t_r=10t_c$	2.74kN	94,825 (C°)	51% αύξηση
20x20 $t_r=10t_c$	0.34kN	143.5(C°)	

7.3 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΑΤΕΛΟΥΣ ΦΟΡΕΑ

Είναι γεγονός ότι μια δεξαμενή της πράξης θα εμφανίσει μικρότερη κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού από τη θερμοκρασία που υπολογίστηκε στις προηγούμενες παραγράφους λόγω της αναπόφευκτης ύπαρξης αρχικών γεωμετρικών ατελειών. Το πόσο μικρότερη θα είναι η κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού εξαρτάται κυρίως από τη μορφή και το μέγιστο εύρος των αρχικών γεωμετρικών ατελειών. Οι ατέλειες που δύναται να προκύψουν σε μια μεταλλική δεξαμενή της πράξης οφείλονται κυρίως σε κατασκευαστικούς λόγους που σχετίζονται με την μηχανική διαμόρφωση της κελυφωτής λαμαρίνας στο εργοστάσιο, την μεταφορά της στο πεδίο του έργου, την τοποθέτηση και στήριξη της στη θεμελίωση, την ποιότητα και το είδος των συγκολλήσεων κτλ. Είναι προφανές ότι ακριβής θεώρηση γεωμετρικών ατελειών σε ένα αριθμητικό προσομοίωμα μπορεί να γίνει μόνο εάν μετρηθούν οι πραγματικές ατέλειες στο πεδίο μετά την κατασκευή της δεξαμενής. Επιπλέον, η διαχείριση των μετρήσεων και η ενσωμάτωση τους στο αριθμητικό προσομοίωμα είναι αναμφίβολα μια πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί εξειδικευμένο λογισμικό και αυξημένες μαθηματικές γνώσεις από τους εκάστοτε μελετητές.

Για το λόγο αυτό, στην συνήθη πρακτική η διαχείριση των ατελειών βασίζεται σε κανονιστικές οδηγίες οι οποίες έχουν προκύψει από εκτεταμένη πειραματική, αναλυτική και υπολογιστική έρευνα. Στην περίπτωση όμως της μελέτης δεξαμενών υπό ανομοιόμορφη θερμοκρασία δεν υπάρχει αυτήν την στιγμή συγκεκριμένο κανονιστικό πλαίσιο που να ικανοποιεί τον σχεδιασμό, μιας και πρόκειται για νέο πεδίο έρευνας που άρχισε να αναπτύσσεται τα τελευταία χρόνια λόγω κάποιων ατυχημάτων που συνέβησαν σε πετρελαϊκές εγκαταστάσεις. Ενδεχομένως, η αριθμητική μελέτη θα μπορούσε να βασιστεί στην χρήση αρχικών γεωμετρικών ατελειών που χρησιμοποιούνται από τον Ευρωκώδικα 3-Μερος 1.6, που είναι ο αρμόδιος κανονισμός για την μελέτη χαλύβδινων κελυφών. Παρόλα αυτά, η χρήση των διατάξεων αυτών για την περίπτωση της ανομοιόμορφης θερμικής καταπόνησης θα πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή μιας και απαιτείται εκτεταμένη αριθμητική και πειραματική έρευνα σχετικά με το είδος και το εύρος των αρχικών γεωμετρικών ατελειών που θα πρέπει να θεωρηθούν ώστε να καλύπτεται με ασφάλεια ο σχεδιασμός. Τέτοιου είδους έρευνα δεν είναι διαθέσιμη αυτή την στιγμή στην βιβλιογραφία και προφανώς είναι εκτός των στόχων της παρούσας διπλωματικής.

Στην εργασία επιχειρείται μονάχα μια μελέτη που σχετίζεται με τον προσδιορισμό του μεγέθους της ευαισθησίας των δεξαμενών στην παρουσία αρχικών γεωμετρικών ατελειών και την επιρροή τους στο δομικό πρόβλημα της ευστάθειας. Η προσπάθεια αυτή επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση αρχικών γεωμετρικών ατελειών που αποτελούν ιδιομορφές του γραμμικού προβλήματος λυγισμού (LBA) και οι οποίες κλιμακώνονται με βάση το μέγιστο εύρος τους. Η χρήση των ιδιομορφών ως σχημάτων αρχικών ατελειών χρησιμοποιείται πλειστάκις στην διεθνή βιβλιογραφία. Επειδή όπως προαναφέρθηκε, το σχήμα και το μέγεθος των ατελειών δεν είναι εκ των προτέρων γνωστά, απαιτείται η διενέργεια μιας σειράς παραμετρικών αναλύσεων για την αναζήτηση εκείνου του συνδυασμού ιδιομορφών που θα επιφέρει στην κατασκευή το δυσμενέστερο αποτέλεσμα. Γενικά με βάση την βιβλιογραφία προτείνεται, ο γραμμικός συνδυασμός να περιλαμβάνει ισοβαρώς όλες τις ιδιομορφές με κρίσιμα φορτία μικρότερα από το διπλάσιο του φορτίου της πρώτης. Για παράδειγμα, η επιλογή μιας ιδιομορφής που οδηγεί σε ασταθή δρόμο

ισορροπίας μπορεί να αποδειχθεί πιο κρίσιμη για την αντοχή του φορέα σε σχέση με κάποια άλλη ιδιομορφή με μικρότερο κρίσιμο φορτίο που δύναται να οδηγήσει σε ευσταθή ισορροπία. Στην παρούσα εργασία δεν επιχειρείται μια τέτοια διαδικασία διερεύνησης διότι ξεφεύγει από τους σκοπούς της. Η ενδεδειγμένη μελέτη της επιρροής των γεωμετρικών ατελειών στην δομική ευστάθεια δεξαμενών υπό θερμική καταπόνηση προτείνεται ως μελλοντική έρευνα.

7.3.1 Λυγισμική απόκριση της τυπικής ατελούς δεξαμενής 20x20

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ενσωματώνονται ως αρχικές ατέλειες η 1^η και η 7^η ιδιομορφή της δεξαμενής 20x20 που επιλύθηκε στο 6^ο Κεφάλαιο. Πρόκειται για 2 συμμετρικού τύπου ιδιομορφές που αντιστοιχούν σε διαφορετική κρίσιμη θερμοκρασία και στις οποίες αναπτύσσονται διαφορετικοί σε πλήθος κυματισμοί. Η κλιμάκωση τους έγινε αντίστοιχα για τα εύρη των 2mm, 5mm και 10mm. Ως μέγιστο εύρος λογίζεται η μεγαλύτερη μετατόπιση που εμφανίζεται στο γεωμετρικά ατελές σχήμα συγκριτικά με τον γεωμετρικά τέλειο φορέα. Στόχος των αναλύσεων είναι να εξετάσει το βαθμό επιρροής τόσο του σχήματος της ατέλειας όσο και του μεγέθους της (μέγιστο εύρος) στην τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας καθώς και στη λυγισμική μορφή αστοχίας (buckling failure mode). Η μορφή των αρχικών ατελειών που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στις εικόνες 6.1, 6.2 του 6^{ου} κεφαλαίου. Πιο συγκεκριμένα, η παραμετρική μελέτη που διεξήχθη περιλαμβάνει:

- I. Δεξαμενή 20x20 με αρχικές ατέλειες της 1^{ης} ιδιομορφής :
 - 20x20 με εύρος ατέλειας **2 mm**→για διάφορα πάχη οροφής(από 5 έως 60cm)
 - 20x20 με εύρος ατέλειας **5 mm**→για διάφορα πάχη οροφής(από 5 έως 60cm)
 - 20x20 με εύρος ατέλειας **10 mm**→για διάφορα πάχη οροφής(από 5 έως 60cm)
- II. Δεξαμενή 20x20 με αρχικές ατέλειες της 7^{ης} ιδιομορφής :
 - 20x20 με εύρος ατέλειας **2 mm**→για διάφορα πάχη οροφής(από 5 έως 60cm)
 - 20x20 με εύρος ατέλειας **5 mm**→για διάφορα πάχη οροφής(από 5 έως 60cm)
 - 20x20 με εύρος ατέλειας **10 mm**→για διάφορα πάχη οροφής(από 5 έως 60cm)

Εφόσον πρόκειται για δεξαμενή με μία νέα στην ουσία γεωμετρία, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του κατάλληλου συντελεστής απόσβεσης (damping ratio) με βάση την σύγκλιση της κρίσιμης θερμοκρασίας λυγισμού. Ενδεικτικά, επιλύεται η δεξαμενή 20x20 με $t_r=30t_c$ και ατέλειες 5mm.

Δεξαμενή 20x20 (με γεωμετρικές αρχικές ατέλειες)	
Συντελεστής απόσβεσης (Damping ratio)	Κρίσιμη Θερμοκρασία Λυγισμού(°C)
10^{-7}	96.7
10^{-9}	118.73
10^{-10}	118.775
10^{-11}	118.775

Πίνακας 7.3. 1 Κρίσιμες θερμοκρασίες λυγισμού για την δεξαμενή 20x20 με ατέλειες.

Από τα παραπάνω επιλέγεται η τιμή 10^{-10} για τον συντελεστή απόσβεσης για την οποία η κρίσιμη θερμοκρασία συγκλίνει σε ακρίβεια εκατοστού. Σημειώνεται ότι τα γεωμετρικά ατελή αριθμητικά προσομοιώματα είναι αρκετά ευαίσθητα στις πολύ μεγάλες τιμές του λόγου απόσβεσης, με αποτέλεσμα την στιγμή εμφάνισης του λυγισμού να τερματίζεται η ανάλυση λόγω αδυναμίας αριθμητικής σύγκλισης. Για το λόγο αυτό, σε αρκετές περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν και μικρότερες τιμές του συντελεστή (συγκεκριμένα 10^{-7} και 10^{-8}) ούτως ώστε να δύναται να προσδιοριστεί το μεταλυγισμικό στάδιο της απόκρισης καθώς και οι μορφές των παραμορφώσεων που αντιστοιχούν σε αυτό.

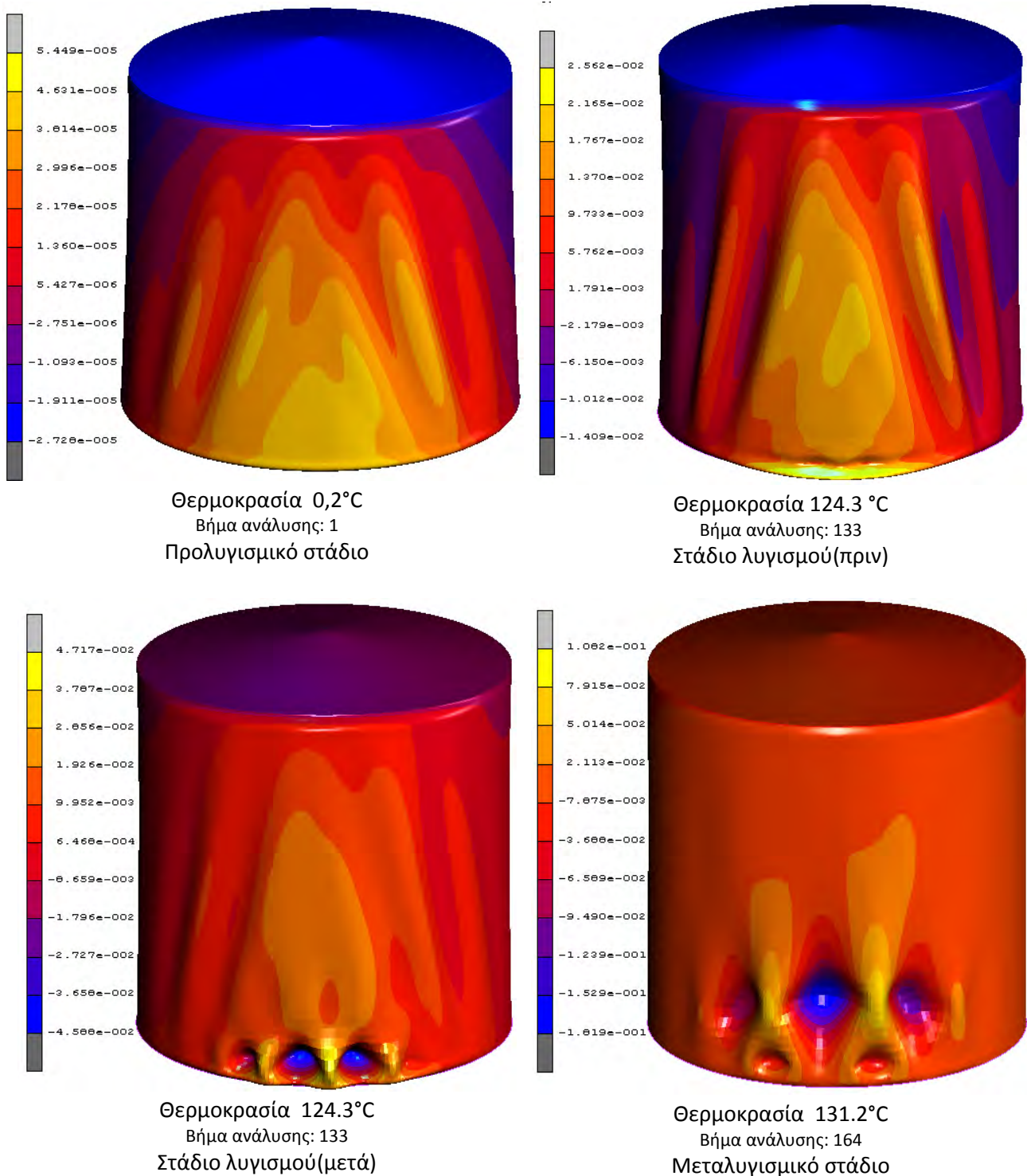
7.3.1 I Δεξαμενή 20x20 με αρχικές ατέλειες της 1ης ιδιομορφής λυγισμού



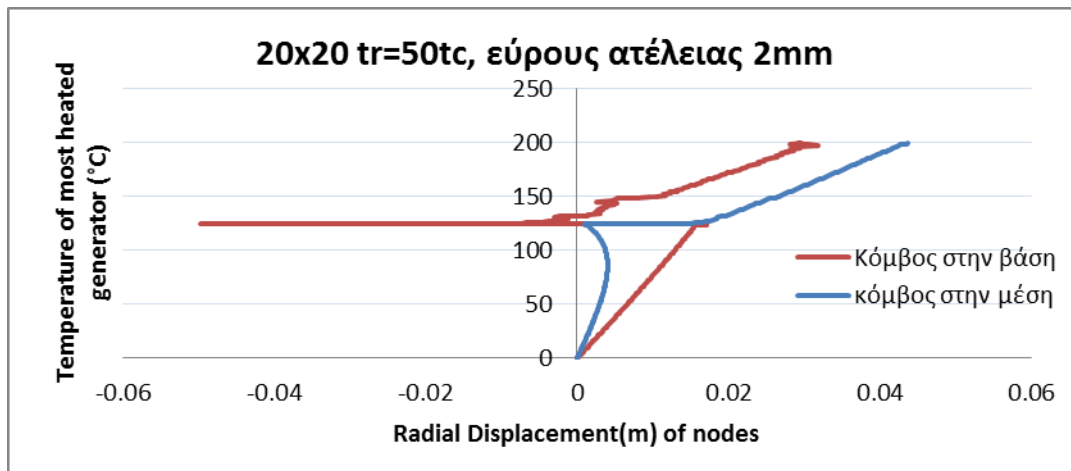
ο Μέγιστο Εύρος 2mm

Στην περίπτωση αυτή η παραμόρφωση και αστοχία της δεξαμενής γίνεται σύμφωνα με την εικόνα 7.2.9 και είναι παρόμοια για όλα τα διαφορετικά πάχη οροφής. Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία η δεξαμενή διογκώνεται ενώ παράλληλα οι παραμορφώσεις γίνονται όλο και πιο έντονες χωρίς να ακολουθούν απόλυτα το αρχικό γεωμετρικά ατελές σχήμα. Για $T_{cr,GMNIA} = 124.3 \text{ } ^\circ\text{C}$ εμφανίζεται μια ακαριαία αλλαγή στην παραμορφωμένη γεωμετρία της δεξαμενής, η οποία κυριαρχείται από έντονη κύρτωση ενός μικρού τμήματος της επιφάνειας του κελύφους στην βάση. Πρακτικά εμφανίζεται το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού στην βάση της δεξαμενής. Η μορφή αστοχίας που εμφανίζεται είναι παρόμοια με την 5^η και 6^η ιδιομορφή που παράγεται από την γραμμική ανάλυση λυγισμού LBA. Παρόλο, που ως αρχική ατέλεια χρησιμοποιείται μια συμμετρική μορφή λυγισμού που αναπτύσσεται σε όλη την θερμαινόμενη ζώνη τόσο η προοδευτική παραμόρφωση όσο και η τελική μορφή αστοχίας είναι διαφορετικού τύπου. Η ιδιαιτερότητα αυτή δείχνει πόσο σημαντικό ρόλο παίζει η φόρτιση που ασκείται σε ένα γεωμετρικά ατελές φορέα σε συνδυασμό με το είδος της ατέλειας μιας και δύναται να ενεργοποιηθούν διαφορετικού τύπου αστάθειες σε σχέση με τον γεωμετρικά τέλειο φορέα. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι η γεωμετρική ατέλεια μείωσε ουσιαστικά την κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού περί τους 20 $^\circ\text{C}$. Επιπλέον, η κατασκευή παρουσιάζει σημαντική μεταλυγισμική αντοχή όπως διακρίνεται και στο Διάγραμμα 7.3 1, παρόλο που στον μεταλυγισμικό δρόμο ισορροπίας δύναται να λυγίσει εκ νέου η δεξαμενή σε μεγαλύτερη θερμοκρασία. Στην συνέχεια παρουσιάζεται ενδεικτικά η απόκριση (σε όρους μετατοπίσεων) της δεξαμενής διαστάσεων 20x20 με πάχος οροφής $t_r=50t_c$ και για αρχικές ατέλειες εύρους 2mm για το προλυγισμικό στάδιο, το στάδιο του λυγισμού και το μεταλυγισμικό στάδιο (σε m). Επίσης,

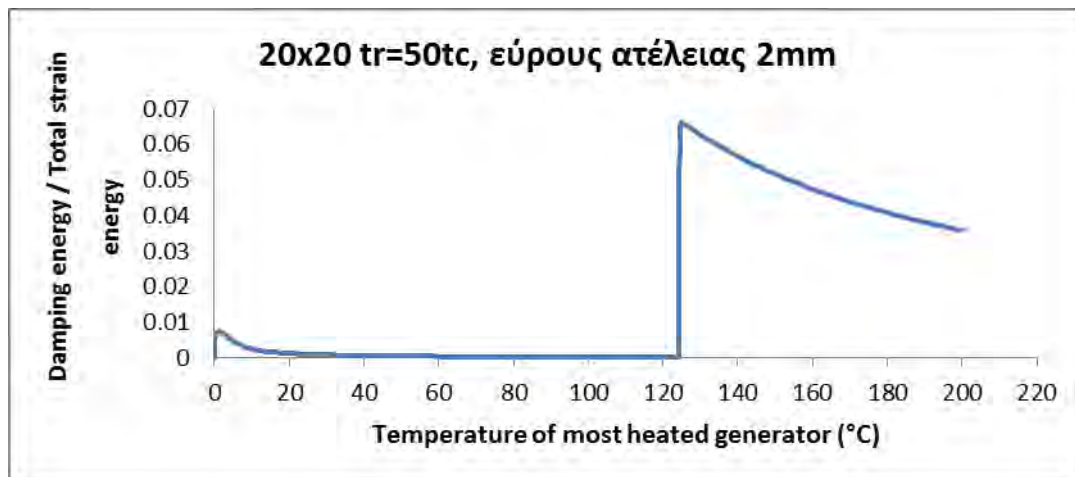
στον Πίνακα 7.3 2 δίνονται οι κρίσιμες θερμοκρασίες λυγισμού για τα διαφορετικά πάχη οροφής. Όπως τονίστηκε και παραπάνω η μορφή των παραμορφώσεων που δημιουργούνται στην δεξαμενή διαστάσεων 20x20, με αρχική ατέλεια του σχήματος της 1^{ης} ιδιομορφής και μέγιστου εύρους 2mm είναι ανεξάρτητη των συνοριακών συνθηκών της οροφής.



Εικόνα 7.3. 1 Προλυγισμικό στάδιο , στάδιο λυγισμού και μεταλυγισμικό στάδιο της δεξαμενής 20x20 με αρχικές ατέλειες 1^{ης} ιδιομορφής εύρους 2mm $t_r=50t_c$ (η οποία αντιπροσωπεύει όλες τις ίδιες δεξαμενές με διαφορετικά πάχη οροφής).



Διάγραμμα 7.3. 1 Οριζόντια μετατόπιση η σημείων για την δεξαμενή 20x20, $t_r=50t_c$ με ατέλειες εύρους 2mm συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Διάγραμμα 7.3. 2 Λόγος ενέργειας απόσβεσης προς την συνολική ενέργεια παραμόρφωσης του συστήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας για την τυπική δεξαμενή 20x20 50 t_c με ατέλειες εύρους 2mm.

Δεξαμενή 20x20 (με γεωμετρικές ατέλειες 1 ^{ης} ιδιομορφής, εύρους 2mm)		
Πάχος οροφής	Θερμοκρασία λυγισμού (C°)	Μορφή λυγισμού
$t_r=5t_c$	92.54	Τοπικός στην βάση
$t_r=10t_c$	124.64	Τοπικός στην βάση
$t_r=15t_c$	123.952	Τοπικός στην βάση
$t_r=30t_c$	122.83	Τοπικός στην βάση
$t_r=50t_c$	124.275	τοπικός στην βάση
$t_r=60t_c$	122.83	τοπικός στην βάση

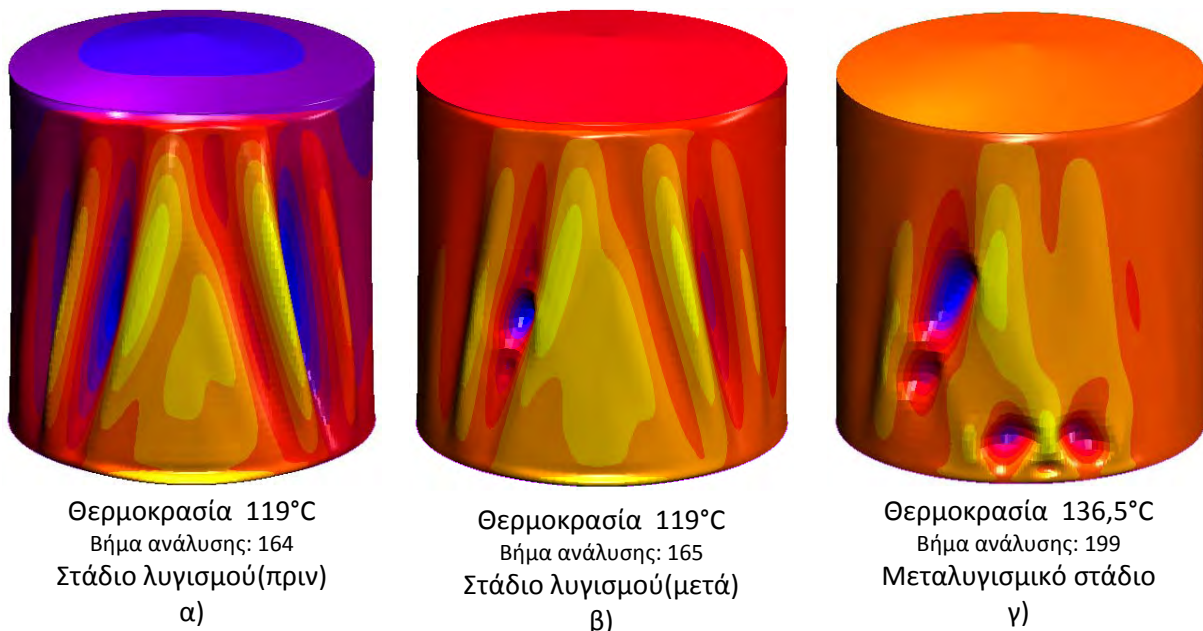
Πίνακας 7.3. 1 Θερμοκρασίες λυγισμού των δεξαμενών για την μεταβολή του πάχους της οροφής.

ο Εύρους 5mm

Στην περίπτωση αυτή κλιμακώνεται η προηγούμενη αρχική ατέλεια της 1ης ιδιομορφής λυγισμού στα 5mm και ενσωματώνεται στην δεξαμενή διαστάσεων 20x20. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που διεξήχθησαν έδειξαν ότι η μορφή λυγισμού είναι ευαίσθητη στην συνοριακή συνθήκη της οροφής. Συγκεκριμένα, για τις δεξαμενές με μικρότερα πάχη οροφής (από $t_r=5t_c$ έως $t_r=30t_c$) η αστάθεια που εμφανίσθηκε είναι αποτέλεσμα δημιουργίας τοπικού λυγισμού στην περιοχή όπου αναπτύσσονταν το μέγιστο εύρος της ατέλειας, ενώ οι δύο δεξαμενές με τα μεγαλύτερα πάχη οροφής παρουσίασαν τοπικό λυγισμό στην βάση της δεξαμενής, ακριβώς ίδιας μορφής με αυτήν που παρουσίασαν οι δεξαμενές εύρους 2mm.

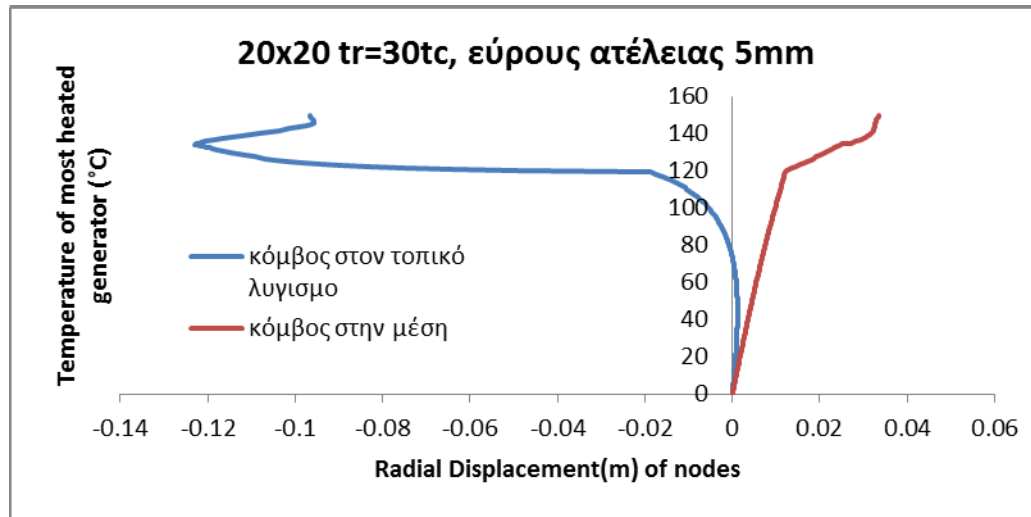
Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων μόνο για τις περιπτώσεις με $t_r=30t_c$ και $t_r=60t_c$, μιας και τα αποτελέσματα των δεξαμενών με $t_r=5t_c, t_r=10t_c, t_r=15t_c$ είναι όμοια με την πρώτη περίπτωση ενώ τα αποτελέσματα της δεξαμενής με $t_r=50t_c$ είναι όμοια με την δεύτερη περίπτωση αντίστοιχα. Τέλος, στον Πίνακα 7.3. 3 παρατίθενται συγκεντρωτικά οι κρίσιμες τιμές της θερμοκρασίας λυγισμού.

Δεξαμενή 20x20, $t_r=30t_c$ (με γεωμετρικές ατέλειες 1ης ιδιομορφής εύρους 5mm)

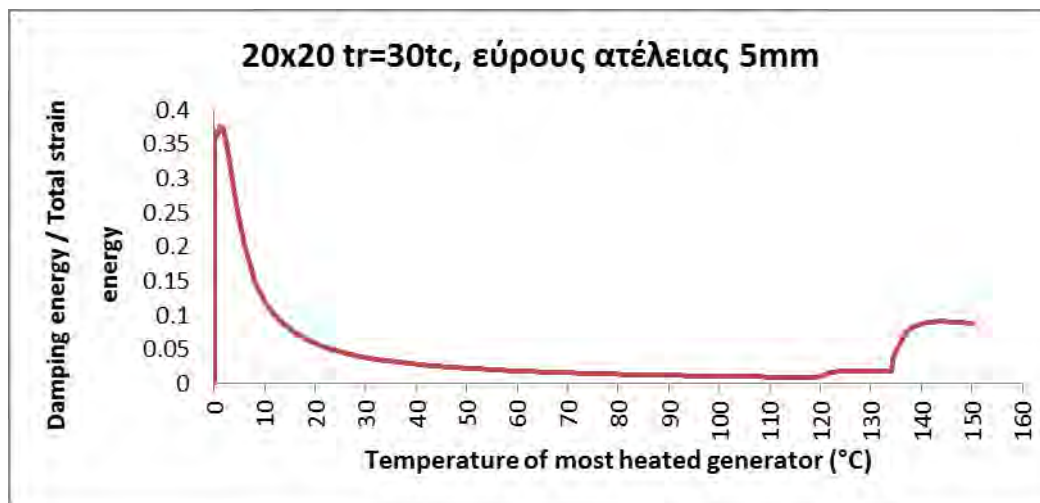


Εικόνα 7.3. 2 Στάδιο λυγισμού και μεταλυγισμικό στάδιο της δεξαμενής 20x20 με αρχικές ατέλειες 1ης ιδιομορφής εύρους 5mm ($t_r=30t_c$ η οποία αντιπροσωπεύει τις ίδιες δεξαμενές με $t_r=5t_c$, $t_r=10t_c$, $t_r=15t_c$, $t_r=30t_c$).

Παρόλο που η αρχική ατέλεια της δεξαμενής έχει συμμετρική μορφή ως προς τον μεσημβρινό άξονα με την μέγιστη επιβαλλόμενη θερμοκρασία, και παράλληλα αποτελεί την 1^η ιδιομορφή του γραμμικού προβλήματος ιδιοτιμών, η κατασκευή λυγίζει για θερμοκρασία $T_{cr,GNA} = 119 \text{ }^{\circ}\text{C}$ με μια μη συμμετρική μορφή λυγισμού (Εικόνα 7.3. 2 β). Η συγκεκριμένη μορφή λυγισμού δεν είναι ιδιαίτερα ευσταθής και για αυτό το λόγο η δεξαμενή μεταπίπτει σε μια άλλη μορφή λυγισμού, στην οποία εκδηλώνεται έντονος τοπικός λυγισμός στην βάση της, για λίγο μεγαλύτερη τιμή θερμοκρασίας ($T = 136.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Η συγκεκριμένη συμπεριφορά αποτυπώνεται πλήρως και στα παρακάτω διαγράμματα.



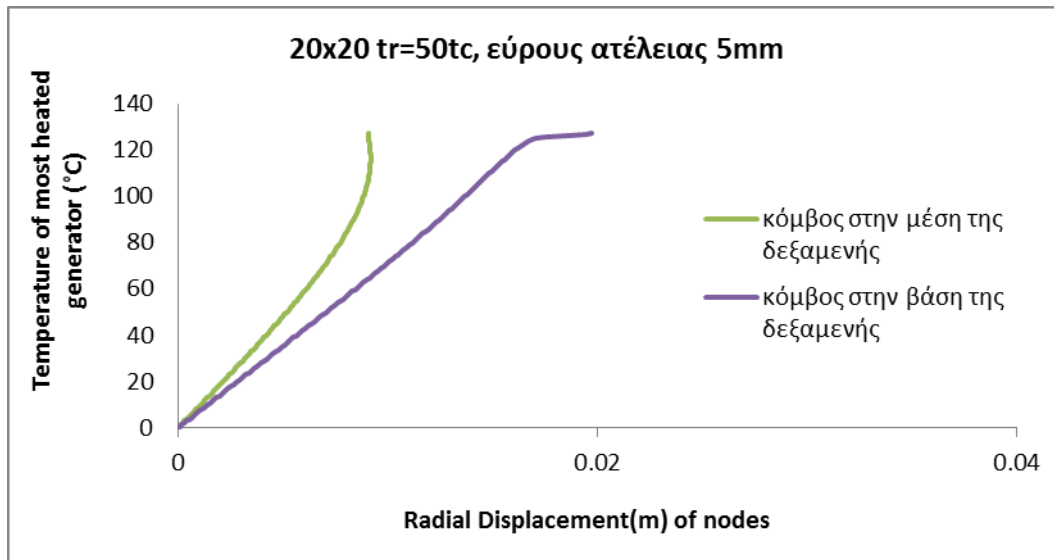
Διάγραμμα 7.3. 3 Οριζόντια μετατόπιση ενός σημείου της δεξαμενής 20x20, tr=30tc με ατέλειες εύρους 5mm συναρτήσει της θερμοκρασίας.



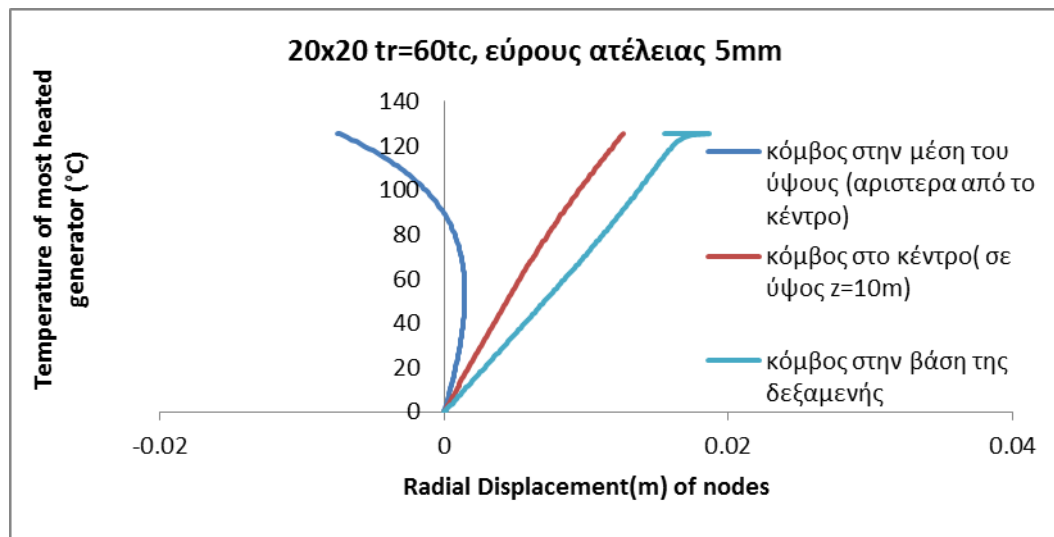
Διάγραμμα 7.3. 4 Λόγος ενέργειας απόσβεσης προς την συνολική ενέργεια παραμόρφωσης του συστήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας για την τυπική δεξαμενή 20x20 30tc με ατέλειες εύρους 5mm.

Δεξαμενή 20x20 , $t_r = 60t_c$ (με γεωμετρικές ατέλειες 1^{ης} ιδιομορφής εύρους 5mm)

Στην περίπτωση αυτή, ο λυγισμός εμφανίζεται στην βάση της δεξαμενής. Οι αναλύσεις σε αυτή την περίπτωση ήταν αριθμητικά ιδιαίτερα ασταθείς και υπήρξε αδυναμία προσδιορισμού του πλήρη δρόμου ισορροπίας. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται τα παρακάτω αποτελέσματα στα οποία είναι φανερός ο τερματισμός της ανάλυσης την στιγμή του λυγισμού.



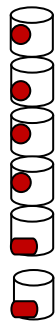
Διάγραμμα 7.3. 5 Οριζόντια μετατόπιση κόμβων της δεξαμενής 20x20, $t_r=50t_c$ με ατέλειες εύρους 5mm συναρτήσεϊ της θερμοκρασίας.



Διάγραμμα 7.3. 6 Οριζόντια μετατόπιση κόμβων της δεξαμενής 20x20, $t_r=60t_c$ με ατέλειες εύρους 5mm συναρτήσεϊ της θερμοκρασίας.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κρίσιμες τιμές της θερμοκρασίας λυγισμού για την γεωμετρικά ατελή δεξαμενή με μέγιστο εύρος αρχικής ατέλειας 5mm.

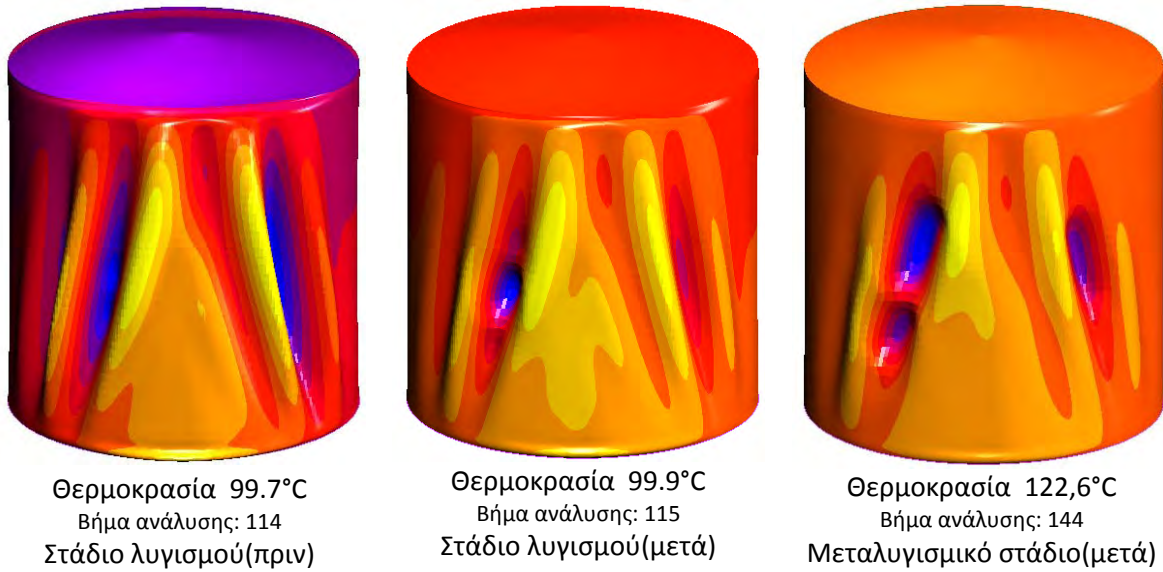
Δεξαμενή 20x20 (με γεωμετρικές ατέλειες 1^{ης} ιδιομορφής, εύρους 5mm)		
Πάχος οροφής	Θερμοκρασία λυγισμού (C°)	Μορφή λυγισμού
$t_r=5t_c$	116.825	Τοπικός στην μέση
$t_r=10t_c$	116.916	Τοπικός στην μέση
$t_r=15t_c$	117.916	Τοπικός στην μέση
$t_r=30t_c$	118.775	Τοπικός στην μέση
$t_r=50t_c$	127.275	τοπικός στην βάση
$t_r=60t_c$	125.725	τοπικός στην βάση



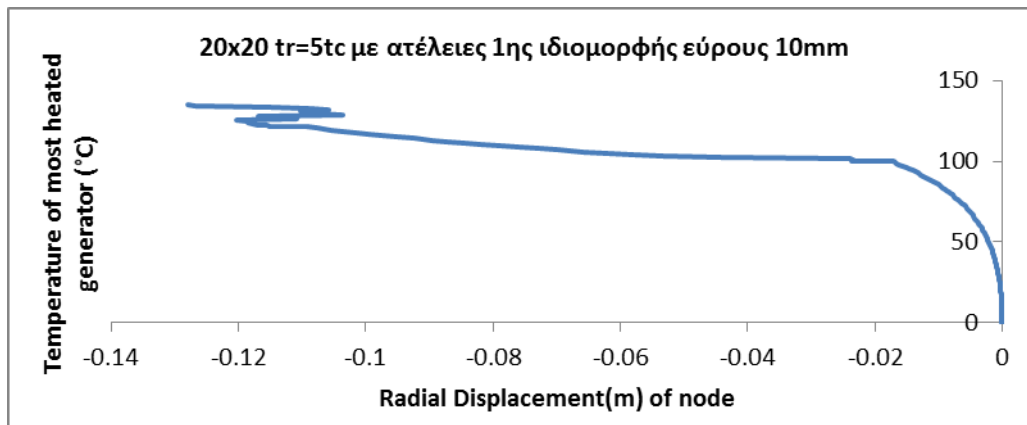
Πίνακας 7.3.3 Θερμοκρασίες λυγισμού των δεξαμενών για την μεταβολή του πάχους της οροφής.

ο **Εύρους 10mm**

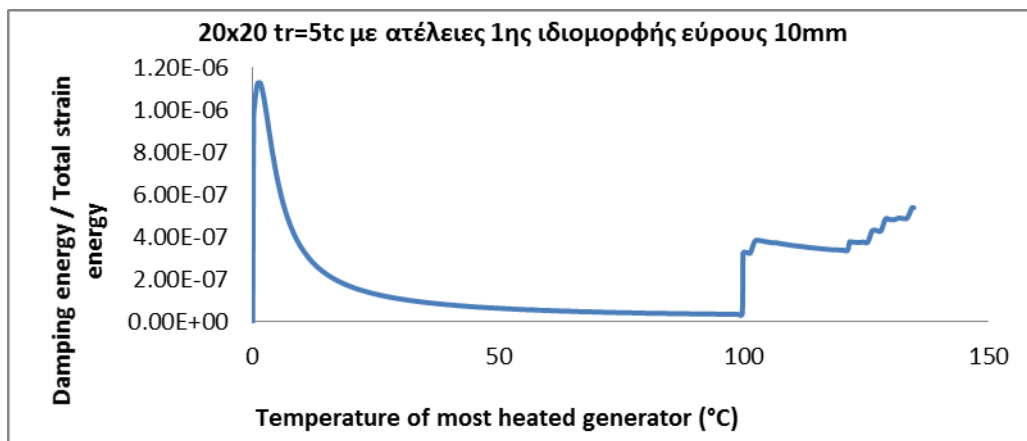
Στην περίπτωση που ενσωματωθεί αρχική ατέλεια εύρους 10mm ενεργοποιείται μια μορφή αστοχίας που δεν είχε παρατηρηθεί μέχρι στιγμής για την δεξαμενή διαστάσεων 20x20 που μελετάται. Συγκεκριμένα, η μορφή λυγισμού που αναπτύσσεται είναι όμοια με την μορφή λυγισμού που ανέπτυξε η γεωμετρικά τέλεια δεξαμενή διαστάσεων 10x20, κατά την οποία η συμμετρική παραμόρφωση που έχει πριν το λυγισμό η κατασκευή δεν μπορεί να διατηρηθεί μεταπίπτοντας σε μια μη συμμετρική πιο ευσταθή μορφή ισορροπίας (Εικόνα 7.3.3 β). Διακλάδωση της λύσης παρατηρείται επίσης και στον μεταλυγισμικό δρόμο ισορροπίας όπου εκδηλώνονται ακαριαία επιπλέον σημαντικές μετατοπίσεις, τοπικά, σε τμήματα που ήδη έχουν υποστεί κύρτωση (Εικόνα 7.3.3 γ). Η ιδιαίτερη αυτή συμπεριφορά αποτυπώνεται και στα διαγράμματα απόκρισης 7.3. 7 και 7.3. 8, όπου απεικονίζονται τα άλματα των καμπυλών στις κρίσιμες θερμοκρασίες. Σημειώνεται ότι την ίδια απόκριση ανέπτυξαν και οι δεξαμενές με διαφορετικά πάχη οροφής, οπότε δεν παρατίθενται για λόγους οικονομίας χώρου τα αποτελέσματά τους.



Εικόνα 7.3. 3 Στάδιο λυγισμού και μεταλυγισμικό στάδιο της δεξαμενής 20x20 με αρχικές ατέλειες 1ης ιδιομορφής εύρους 10mm ($tr=5tc$) η οποία αντιπροσωπεύει όλες τις ίδιες δεξαμενές με διαφορετικά πάχη οροφής.



Διάγραμμα 7.3. 7 Οριζόντια μετατόπιση ενός σημείου της δεξαμενής 20x20, $tr=5tc$ με ατέλειες εύρους 10mm συναρτήσει της θερμοκρασίας.

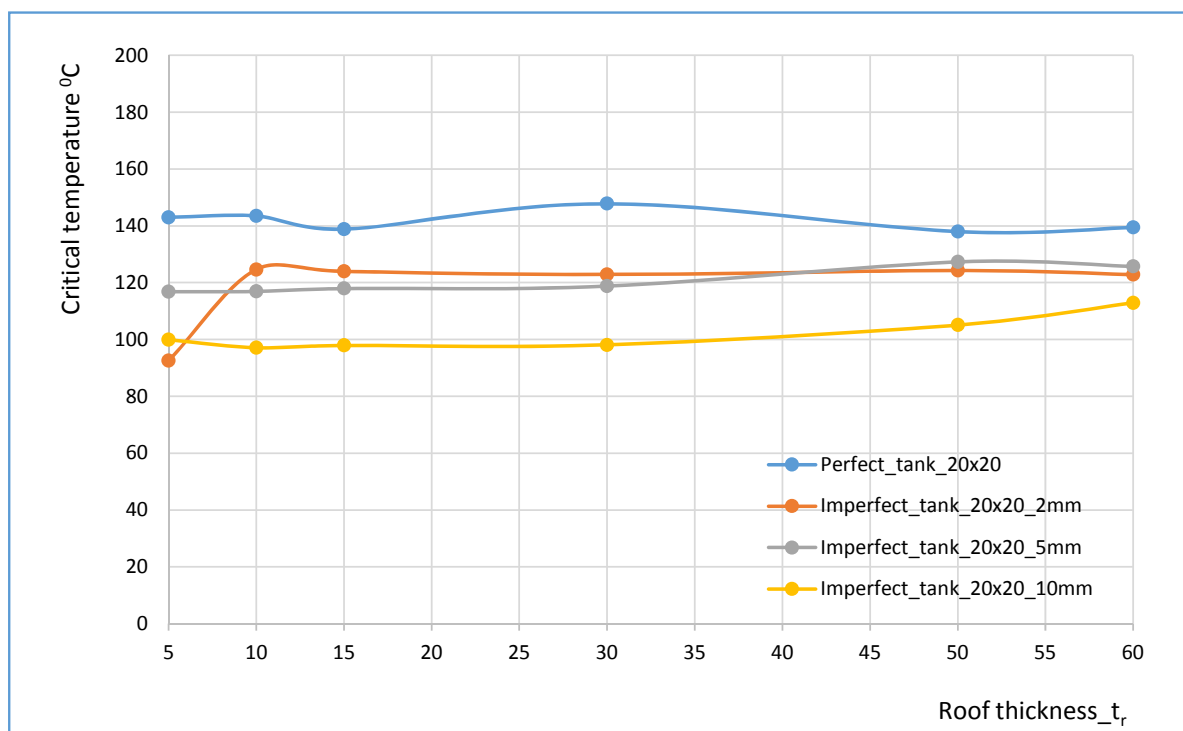


Διάγραμμα 7.3. 8 Λόγος ενέργειας απόσβεσης προς την συνολική ενέργεια παραμόρφωσης του συστήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας για την τυπική δεξαμενή 20x20 5tc με ατέλειες εύρους 10mm.

Δεξαμενή 20x20 (με γεωμετρικές ατέλειες 1 ^{ης} ιδιομορφής, εύρους 10mm)		
Πάχος οροφής	Θερμοκρασία λυγισμού (C°)	Μορφή λυγισμού
$t_r=5t_c$	99.9	Τοπικός στην μέση
$t_r=10t_c$	97.1	Τοπικός στην μέση
$t_r=15t_c$	97.9	Τοπικός στην μέση
$t_r=30t_c$	98.1	Τοπικός στην μέση
$t_r=50t_c$	105.1	Τοπικός στην μέση
$t_r=60t_c$	112.9	Τοπικός στην μέση

Πίνακας 7.3. 4 Θερμοκρασίες λυγισμού των δεξαμενών 20x20 με γεωμετρικές ατέλειες 1^{ης} ιδιομορφής, εύρους 10mm για την μεταβολή του πάχους της οροφής.

Στον διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η επιρροή της γεωμετρικής ατέλειας 1^{ης} ιδιομορφής στην φέρουσα ικανότητα της δεξαμενής στις υψηλές θερμοκρασίες. Όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα 7.3. 9 μια ατέλεια με μέγιστο εύρος της τάξης των 10mm δύναται να μειώσει την κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού περί τους 40 °C.



Διάγραμμα 7.3. 9 Επιρροή του εύρους της γεωμετρικής ατέλειας της 1^{ης} ιδιομορφής, στην θερμική φέρουσα ικανότητα της δεξαμενής διαστάσεων 20x20, για τα διάφορα πάχη οροφής.

7.3.1 Η Δεξαμενή 20x20 με αρχικές ατέλειες της 7^{ης} ιδιομορφής λυγισμού



Η 7^η ιδιομορφή του γραμμικού προβλήματος ευστάθειας είναι συμμετρική ως προς τον μεσημβρινό άξονα με την μεγαλύτερη επιβαλλόμενη θερμοκρασία και επιλέχθηκε ως αρχική ατέλεια διότι αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη κρίσιμη θερμοκρασία ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσει περισσότερους κυματισμούς στην θερμαινόμενη ζώνη. Παρ' όλα αυτά, κατάφερε να οδηγήσει, στις περισσότερες δεξαμενές που ενσωματώθηκε, να λυγίσουν σε ελαφρώς μικρότερη κρίσιμη θερμοκρασία. Η μορφή αστοχίας τόσο στο λυγισμικό όσο και στο μεταλυγισμικό στάδιο είναι παρόμοια και σε αντιστοιχία με τις μορφές αστοχίας που παρατηρήθηκαν για την αρχική ατέλεια με βάση το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής και για αυτό το λόγο παραλείπεται να παρουσιαστούν. Παρακάτω, παρατίθενται οι κρίσιμες θερμοκρασίες λυγισμού για την κλιμάκωση του μέγιστου εύρους που υλοποιήθηκε.

ο Εύρους 2mm

Δεξαμενή 20x20 (με γεωμετρικές ατέλειες 7 ^{ης} ιδιομορφής, εύρους 2mm)		
Πάχος οροφής	Θερμοκρασία λυγισμού (C°)	Μορφή λυγισμού
$t_r=5t_c$	125.82	Τοπικός στην βάση
$t_r=10t_c$	123.916	Τοπικός στην βάση
$t_r=15t_c$	120.82	Τοπικός στην βάση
$t_r=30t_c$	122.82	Τοπικός στην βάση
$t_r=50t_c$	121.23	τοπικός στην βάση
$t_r=60t_c$	122.027	τοπικός στην βάση

Πίνακας 7.3.5 Θερμοκρασίες λυγισμού των δεξαμενών 20x20 με γεωμετρικές ατέλειες 7^{ης} ιδιομορφής, εύρους 2mm για την μεταβολή του πάχους της οροφής.

ο **Εύρους 5mm**

Δεξαμενή 20x20 (με γεωμετρικές ατέλειες 7^{ης} ιδιομορφής, εύρους 5mm)		
Πάχος οροφής	Θερμοκρασία λυγισμού (C°)	Μορφή λυγισμού
$t_r=5t_c$	114.82	Τοπικός στην μέση
$t_r=10t_c$	111.84	Τοπικός στην μέση
$t_r=15t_c$	111.68	Τοπικός στην μέση
$t_r=30t_c$	112.82	Τοπικός στην μέση
$t_r=50t_c$	118.84	τοπικός στην βάση
$t_r=60t_c$	122.4	τοπικός στην βάση

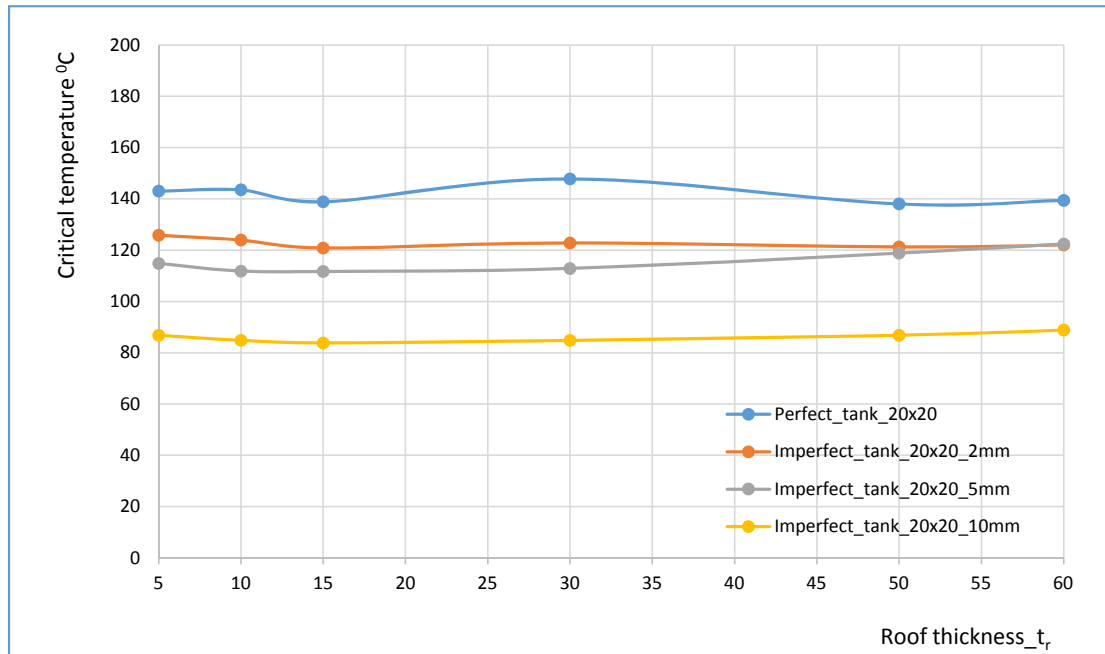
Πίνακας 7.3. 6 Θερμοκρασίες λυγισμού των δεξαμενών 20x20 με γεωμετρικές ατέλειες 7ης ιδιομορφής, εύρους 5mm για την μεταβολή του πάχους της οροφής.

ο **Εύρους 10mm**

Δεξαμενή 20x20 (με γεωμετρικές ατέλειες 7^{ης} ιδιομορφής, εύρους 10mm)		
Πάχος οροφής	Θερμοκρασία λυγισμού (C°)	Μορφή λυγισμού
$t_r=5t_c$	86.82	Τοπικός στην μέση
$t_r=10t_c$	84.82	Τοπικός στην μέση
$t_r=15t_c$	83.82	Τοπικός στην μέση
$t_r=30t_c$	84.82	Τοπικός στην μέση
$t_r=50t_c$	86.82	Τοπικός στην μέση
$t_r=60t_c$	88.82	Τοπικός στην μέση

Πίνακας 7.3. 7 Θερμοκρασίες λυγισμού των δεξαμενών 20x20 με γεωμετρικές ατέλειες 7ης ιδιομορφής, εύρους 10mm για την μεταβολή του πάχους της οροφής.

Στον διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η επιρροή της γεωμετρικής ατέλειας σχήματος της 7^{ης} ιδιομορφής στην φέρουσα ικανότητα της δεξαμενής στις υψηλές θερμοκρασίες. Όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα 7.3. 10, μια ατέλεια με μέγιστο εύρος της τάξης των 10mm δύναται να μειώσει την κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού περί τους 50^οC.



Διάγραμμα 7.3. 10 Επιρροή του εύρους της γεωμετρικής ατέλειας της 7^{ης} ιδιομορφής, στην θερμική φέρουσα ικανότητα της δεξαμενής διαστάσεων 20x20, για τα διάφορα πάχη οροφής.

Συνοψίζοντας, όσον αφορά την παραμετρική μελέτη που υλοποιήθηκε ανωτέρω, για την διερεύνηση του κατά πόσο επηρεάζει η παρουσία αρχικών γεωμετρικών ατελειών το δομικό πρόβλημα ευστάθειας των δεξαμενών που υπόκεινται σε ανομοιομορφη θερμική καταπόνηση, συμπεραίνεται ότι παρουσιάζεται, όπως αναμενόταν, μείωση της θερμικής φέρουσας ικανότητας η οποία δύναται να γίνει σημαντική καθώς αυξάνεται το εύρος της ατέλειας (πχ. 39% για μέγιστο εύρος 10mm). Κυρίως όμως παρατηρήθηκε ότι, τόσο η παρουσία αρχικών γεωμετρικών ατελειών όσο και το μέγιστο εύρος τους είναι από εκείνες τις παραμέτρους που μια μικρή ενδεχομένως μεταβολή τους δύναται να οδηγήσει σε διακλάδωση της λύσης τόσο στο λυγισμικό όσο και στο μεταλυγισμικό στάδιο απόκρισης. Ως εκ τούτου δεν είναι δυνατό να εκτιμηθεί η μορφή με την οποία μπορεί να λυγίσει η δεξαμενή, αλλά ούτε και να προσδιορισθεί εάν αυτή η μορφή ισορροπίας δύναται να είναι ευσταθής ή ασταθής μιας και το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο τόσο στο σχήμα όσο και στο μέγεθος της ατέλειας.

8^οΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΛΥΓΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΤΕΛΕΙΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ (STIFFENED)ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ

Εισαγωγή

Στα προηγούμενα δύο κεφάλαια πραγματοποιήθηκε και παρουσιάστηκε η μελέτη για την λυγισμική απόκριση γεωμετρικά τέλειων και ατελών δεξαμενών υπό ανομοιόμορφη θερμική καταπόνηση, μέσω της διενέργειας γραμμικών και μη γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων. Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι οι κρίσιμες θερμοκρασίες λυγισμού στην πλειονότητα των περιπτώσεων δεν ξεπερνούν τους 200 °C και μάλιστα κυμαίνονται ως επί το πλείστον μεταξύ 100 °C και 200 °C. Επιπλέον, για όλες τις ποιότητες χάλυβα (πλην του χάλυβα S235) η αστάθεια και αστοχία οφείλεται αποκλειστικά σε ελαστικό λυγισμό μιας και για τις παραπάνω χαμηλές θερμοκρασίες οι τάσεις που αναπτύσσονται είναι αρκετά μικρότερες της τάσης διαρροής του εκάστοτε υλικού. Σημειώνεται δε ότι οι ιδιότητες του χάλυβα αρχίζουν και μειώνονται μετά τους 100 °C και μάλιστα, μέχρι τους 200 °C τόσο η μείωση του μέτρου ελαστικότητας όσο και της τάσης διαρροής είναι αισθητά μικρή και δεν επηρεάζει το πρόβλημα.

Για το λόγο αυτό, στο παρόν κεφάλαιο διερευνάται το κατά πόσο οι συνήθεις τεχνικές αποφυγής φαινομένων λυγισμού που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στα κυλινδρικά κελύφη, δύναται να έχουν θετική επίδραση και στην περίπτωση όπου η δεξαμενή θα θερμανθεί ανομοιόμορφα λόγω της καύσης μιας γειτονικής της δεξαμενής. Μια συνήθη τεχνική αύξησης της φέρουσας ικανότητας μιας κελυφωτής κυλινδρικής δεξαμενής έναντι λυγισμικών φαινομένων αποτελεί η ενίσχυση, μέσω της συγκόλλησης οριζόντιων μεταλλικών δακτυλίων ή/και κατακόρυφων ελασμάτων ανά συγκεκριμένες αποστάσεις. Τόσο οι δακτύλιοι όσο και τα κατακόρυφα ελάσματα μπορούν να έχουν οποιαδήποτε τυποποιημένη ή συγκολλητή διατομή. Στην πράξη συνήθως χρησιμοποιούνται είτε απλά επίπεδα ελάσματα είτε διατομές τύπου U, Z, T κτλ. Επίσης, για την αποφυγή φαινομένων αστάθειας λόγω φορτίων βαρύτητας ή/και υδροστατικών πιέσεων, χρησιμοποιείται συχνά και η τεχνική του μεταβλητού πάχους (πιο παχιά στην βάση, πιο λεπτή στο άνω τμήμα της) καθ' ύψος της δεξαμενής, μιας και οι μεγαλύτερες θλιπτικές τάσεις που δύναται να προκαλέσουν λυγισμό συγκεντρώνονται στην βάση της δεξαμενής.

Ως εκ τούτου, επιχειρείται στην συνέχεια η αριθμητική διερεύνηση της φέρουσας ικανότητας έναντι λυγισμού των δεξαμενών που εξετάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και οι οποίες ενισχύθηκαν είτε με οριζόντια ή κατακόρυφα επίπεδα χαλύβδινα ελάσματα είτε με τη χρήση της τεχνικής του μεταβλητού πάχους. Στα πλαίσια της εργασίας, υλοποιήθηκαν οι προαναφερθείσες τεχνικές σε όλες τις γεωμετρικά τέλειες δεξαμενές θεωρώντας μια συγκεκριμένη συνοριακή συνθήκη για την οροφή ($t_r=10t_c$). Ειδικότερα, μελετήθηκαν οι παρακάτω περιπτώσεις:

- Δεξαμενή διαστάσεων 20x20 με , $t_r=10t_c$ χωρίς γεωμετρικές ατέλειες.
- Δεξαμενή διαστάσεων 10x20 με , $t_r=10t_c$ χωρίς γεωμετρικές ατέλειες.
- Δεξαμενή διαστάσεων 40x20 με , $t_r=10t_c$ χωρίς γεωμετρικές ατέλειες.
- Δεξαμενή διαστάσεων 20x40 με , $t_r=10t_c$ χωρίς γεωμετρικές ατέλειες.

8.1 Αριθμητική προσομοίωση τεχνικών ενίσχυσης

Οριζόντιοι δακτύλιοι



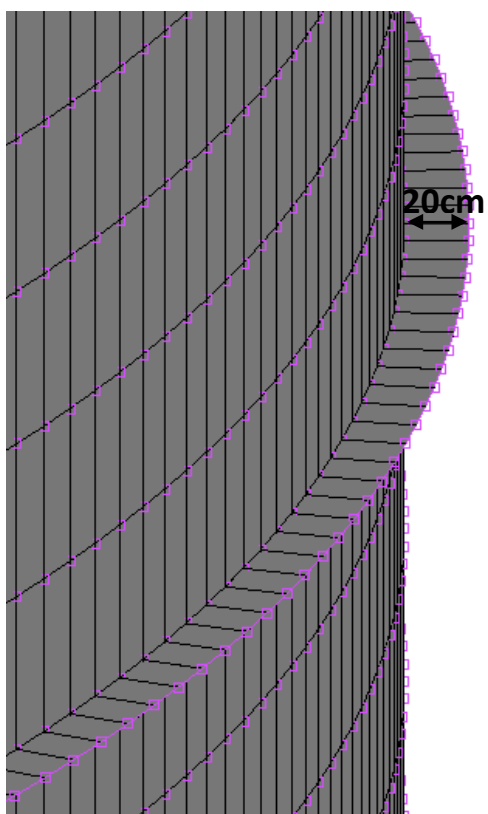
Εικόνα 8.1. 1 Δεξαμενές πετρελαίου με οριζόντιους δακτυλίους



Εικόνα 8.1. 2 Δεξαμενές πετρελαίου με οριζόντιους δακτυλίους στην Φουκουσίμα

Στις Εικόνες 8.1. 1 και 8.1. 2 απεικονίζονται δεξαμενές πετρελαίου ενισχυμένες με οριζόντιους δακτυλίους οι οποίοι μπορεί να έχουν διαφορετικό σχήμα και μέγεθος και να είναι τοποθετημένοι σε διαφορετικά υψόμετρα της δεξαμενής ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θεωρήθηκαν οριζόντιοι δακτύλιοι επίπεδων ελασμάτων πλάτους 20cm και πάχους 15mm. Οι συγκεκριμένοι δακτύλιοι ενσωματώθηκαν ανά ίσα τμήματα υψών της δεξαμενής. Στην μελέτη πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για τις περιπτώσεις των δεξαμενών που αναφέρθηκαν στην εισαγωγή, ανά 4m , 2m και 1m.

Οι οριζόντιοι δακτύλιοι διακριτοποιήθηκαν σε πεπερασμένα στοιχεία στην περιφερειακή διεύθυνση (around circumferential) ανά 1° , άρα συνολικά δημιουργήθηκαν 360 νέοι κόμβοι (κυκλική περιφέρεια) εξωτερικά από τα ήδη υπάρχοντα στοιχεία της δεξαμενής, σε απόσταση 20cm. Για τις αναλύσεις επιλέχτηκε η χρήση των κελυφωτών επιφανειακών τετράπλευρων στοιχείων τύπου 75, από την βιβλιοθήκη του λογισμικού Msc Marc software. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η συγκεκριμένη προσομοίωση.



Εικόνα 8.1. 3 Λεπτομέρεια διακριτοποίησης δακτυλίου



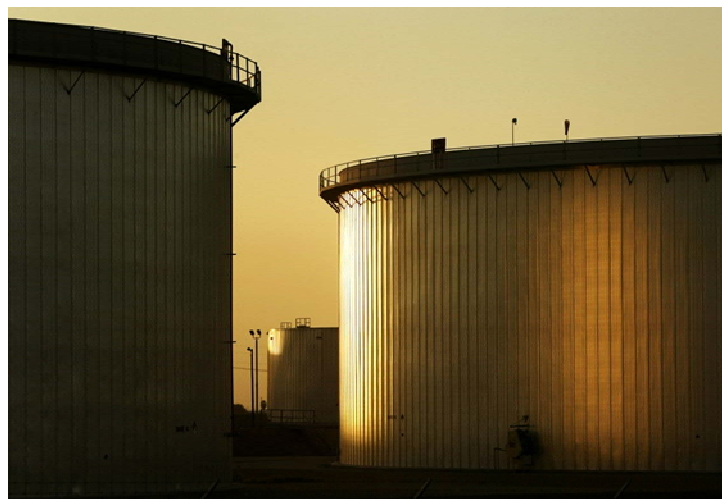
Εικόνα 8.1. 4 Δεξαμενή 20x20 tr=10tc με οριζόντιους δακτυλίους ανά 4m

Κατακόρυφοι δακτύλιοι

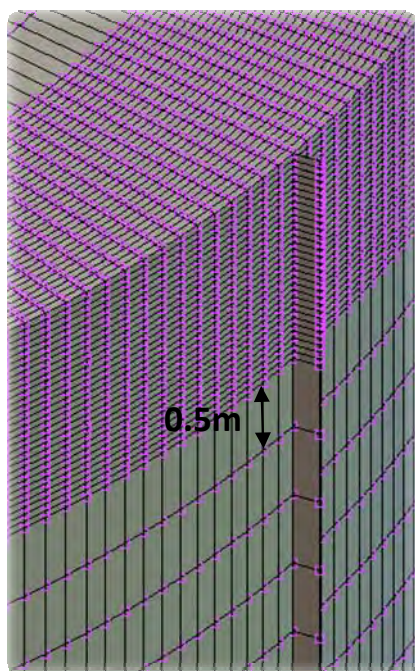
Οι κατακόρυφοι δακτύλιοι που προστέθηκαν για την ενίσχυση των δεξαμενών έχουν πάχος 15mm και πλάτος 20cm (κάθετη απόσταση από το κυλινδρικό κέλυφος). Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για όλες τις δεξαμενές που αναφέρθηκαν στην εισαγωγή για ακτινική απόσταση των ελασμάτων μεταξύ τους ανά 15° και 30° γωνία (σε σχέση με το κέντρο της δεξαμενής).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι κατακόρυφοι δακτύλιοι έφταναν μέχρι το άνω μέρος της κυλινδρικής περιφέρειας και δεν συνεχίζονταν στην οροφή, διότι όπως έχει αναφερθεί και έχει διαπιστωθεί σε παραπάνω κεφάλαια, η οροφή παραμένει άθικτη από την επιβολή της συγκεκριμένης φόρτισης.

Η διακριτοποίηση των στοιχείων των δακτυλίων κατά την κατακόρυφη διεύθυνση έγινε ανά 0.5m. Στις δύο κρίσιμες περιοχές (στην κορυφή για 1.5m και στην βάση για 1.5m) η διακριτοποίηση έγινε πιο πυκνή, ανά 0.05m, όπως δηλαδή ακριβώς είναι και η διακριτοποίηση του κυλινδρικού κελύφους κατά την κατακόρυφη διεύθυνση που περιγράφεται στην παράγραφο 5.1. Επιπλέον επιλέχτηκε η χρήση των κελυφωτών επιφανειακών τετράπλευρων στοιχείων τύπου 75 με πεπερασμένη δυσκαμψία, από την βιβλιοθήκη του λογισμικού Msc Marc software. Στις επόμενες εικόνες διακρίνεται η προσομοίωση και διακριτοποίηση των κατακόρυφων δακτυλίων.



Εικόνα 8.1. 5 Δεξαμενές πετρελαίου με κατακόρυφους δακτυλίδες



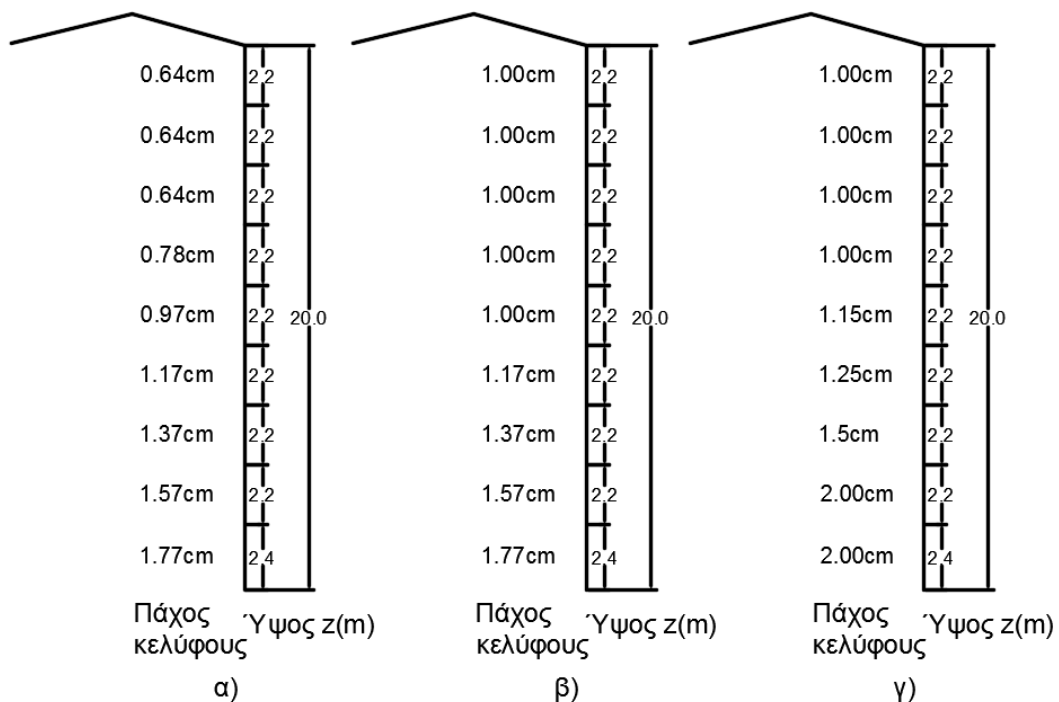
Εικόνα 8.1. 6 Λεπτομέρεια διακριτοποίησης δακτυλίου



Εικόνα 8.1. 7 Δεξαμενή 20x20 $t_r=10t_c$ με κατακόρυφους δακτυλίδες ανά 30°

Μεταβαλλόμενο πάχος κυλινδρικού κελύφους

Όπως παρατηρήθηκε στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο 7^ο κεφάλαιο, οι λυγισμικές και μεταλυγισμικές μορφές αστοχίας ήταν διαφόρων τύπων ανάλογα με την περίπτωση. Ειδικότερα, η αστάθεια εκδηλώνονταν είτε σε όλη την θερμαινόμενη επιφάνεια, είτε τοπικά σε κάποια τμήματα της στο μέσο ύψος ή στη βάση του κυλίνδρου. Ιδιαίτερα για τις πιο λυγνές δεξαμενές αποδείχτηκε ότι ήταν πιο πιθανό να αστοχήσουν λόγω τοπικού λυγισμού που αναπτύσσεται στην βάση της δεξαμενής. Συνεπώς η τεχνική του μεταβλητού καθ' ύψους πάχους ενδεχομένως να ενίσχυε σημαντικά την δεξαμενή έναντι αυτών των φαινομένων και να αύξανε την φέρουσα ικανότητα της στις υψηλές θερμοκρασίες. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκαν 3^{ων} διαφορετικών ειδών περιπτώσεις μεταβαλλόμενου πάχους ώστε να επιλεχτεί η αποδοτικότερη για την αύξηση της κρίσιμης θερμοκρασίας λυγισμού. Η περιγραφή αυτών των 3^{ων} τύπων διακρίνεται στην Εικόνα 8.1. 8 που ακολουθεί:



Εικόνα 8.1. 8 Διαφορετικοί τύποι αυξανόμενου πάχους που χρησιμοποιήθηκαν

Σημειώνεται ότι η α) και γ) περίπτωση οι οποίες εφαρμόστηκαν στην δεξαμενή 20x20 δεν είχαν θετική επίδραση στην αύξηση της κρίσιμης θερμοκρασίας λυγισμού όπως παρουσιάζεται στην συνέχεια και έτσι δεν εφαρμόστηκαν στις άλλες δεξαμενές.

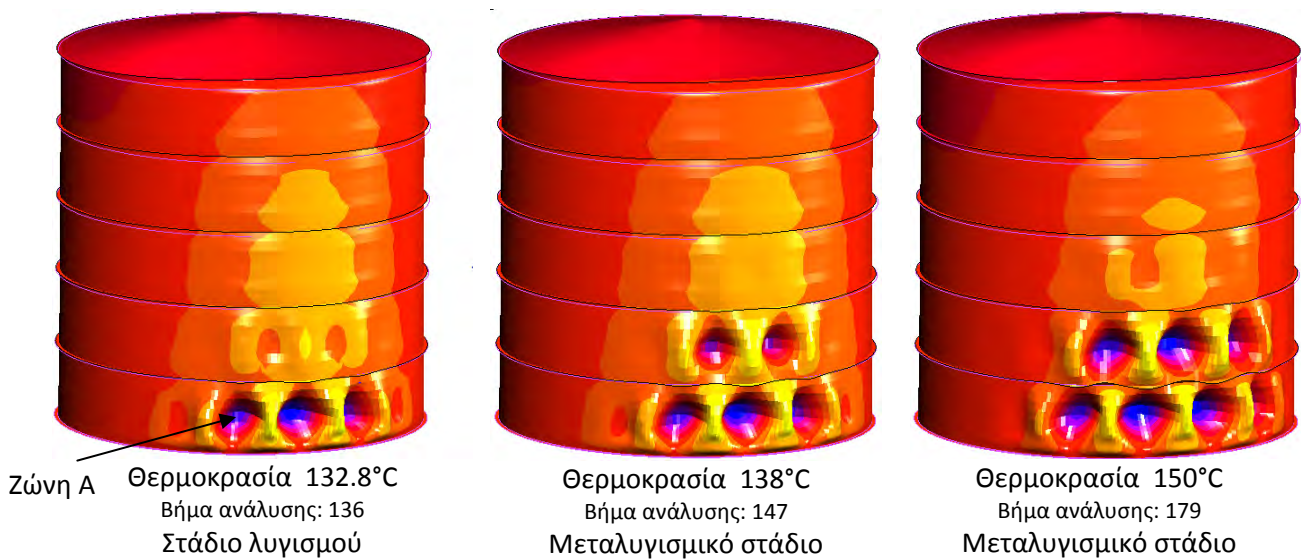
8.2 Ενισχυμένη δεξαμενή διαστάσεων 20x20

Με τη ενσωμάτωση των οριζόντιων δακτυλίων στην δεξαμενή ουσιαστικά δημιουργείται μια νέα γεωμετρία αυτής συνεπώς, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 7, πρέπει να προσδιορισθεί η κατάλληλη τιμή του λόγου απόσβεσης (damping ratio) για την επιτυχή σύγκλιση του αλγορίθμου επίλυσης. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για τιμές του λόγου απόσβεσης 10^{-7} , 10^{-8} , 10^{-9} και όλες παρουσίασαν ακριβώς την ίδια κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η τιμή 10^{-7} ως η κατάλληλη τιμή του λόγου απόσβεσης για την μη γραμμική ανάλυση της δεξαμενής 20x20. Η ίδια τιμή χρησιμοποιήθηκε και για τις υπόλοιπες δεξαμενές διαστάσεων 10x20, 40x20, 20x40.

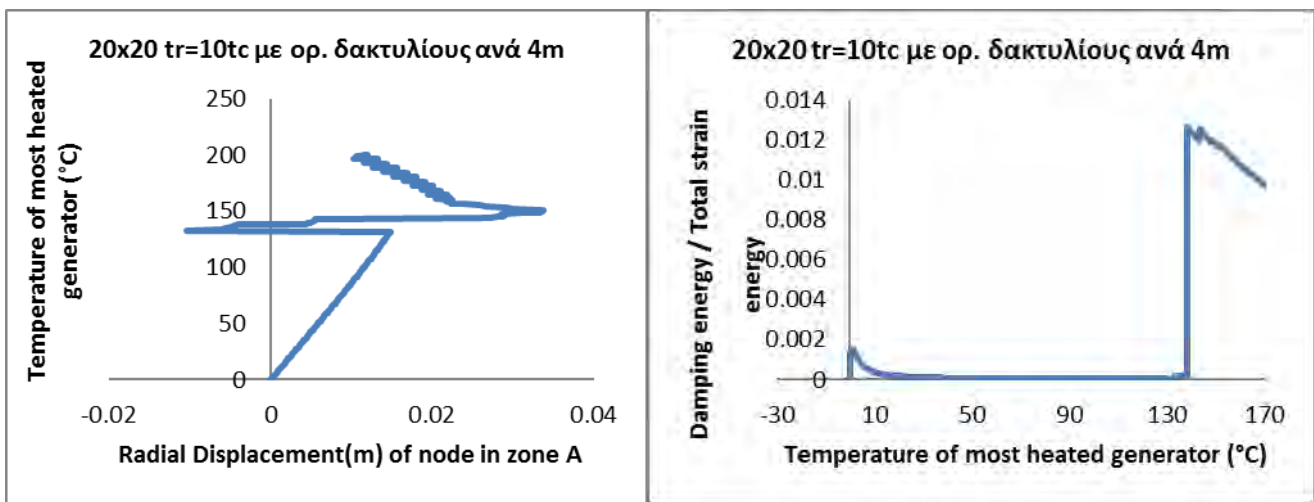
Ενίσχυση με οριζόντιους δακτυλίους

Στην Εικόνα 8.2.1 παρουσιάζεται η απόκριση της ενισχυμένης με οριζόντιους δακτυλίους, τοποθετημένους ανά 4m, δεξαμενής διαστάσεων 20x20. Η λυγισμική συμπεριφορά που επιδεικνύει η δεξαμενή αποτυπώνεται και στα διαγράμματα 8.2. 1 και 8.2. 2. Ειδικότερα, η κατασκευή συμπεριφέρεται γραμμικά μέχρι η θερμοκρασία να γίνει ίση με $T = 132.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Για $T_{cr,GNA} = 132.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ η δεξαμενή λυγίζει ακαριαία στην βάση της σύμφωνα με την μορφή λυγισμού της Εικόνας 8.1 1α. Η λυγισμική αυτή μορφή ισορροπίας είναι ασταθής και καθώς αυξάνεται ελαφρώς η επιβαλλόμενη θερμοκρασία ο λυγισμός επεκτείνεται προς τα άνω και σε μεγαλύτερη επιφάνεια.

- Ανά 4m



Εικόνα 8.2. 1 Στιγμιότυπα της δεξαμενής 20x20, $t_r=10t_c$ με δακτυλίους ανά 4m στο στάδιο λυγισμού και στο μεταλυγισμικό στάδιο.

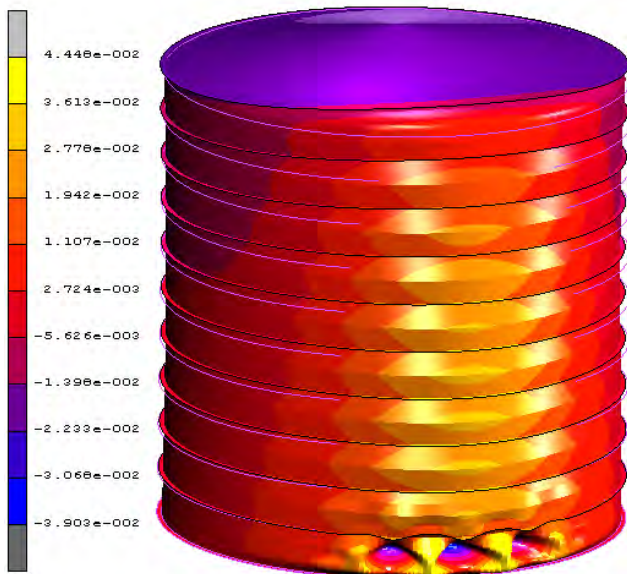


Διάγραμμα 8.2. 1 Οριζόντια μετατόπιση ενός σημείου στην ζώνη Α για την δεξαμενή 20x20, $t_r=10t_c$ με οριζόντιους δακτυλίους συναρτήσει της θερμοκρασίας.

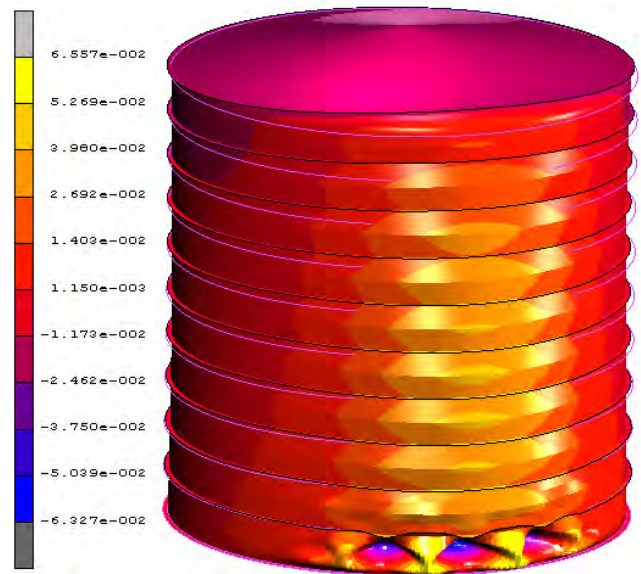
Διάγραμμα 8.2. 2 Λόγος ενέργειας απόσβεσης προς την συνολική ενέργεια παραμόρφωσης του συστήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας για την τυπική δεξαμενή 20x20, $t_r=10t_c$ με οριζόντιους δακτυλίους.

Στην συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για την περίπτωση όπου τοποθετήθηκε πιο πυκνό δίκτυο δακτυλίων, δηλαδή ανά 2m και 1m αντίστοιχα.

- Ανά 2m και ανά 1 m

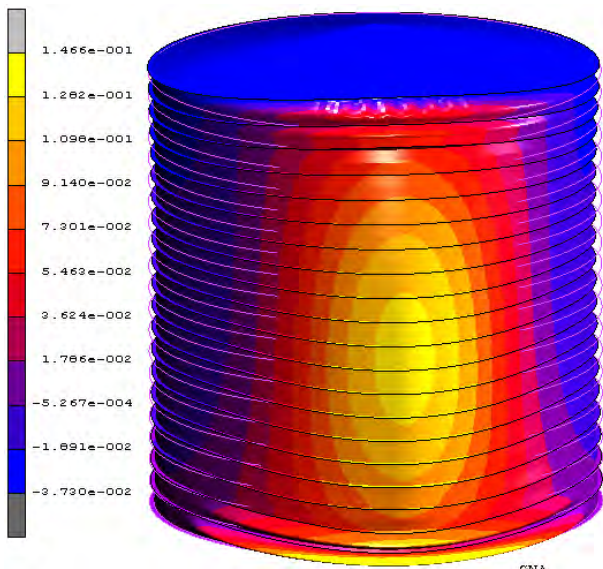


Θερμοκρασία 152.8°C
 Βήμα ανάλυσης: 156
 Στάδιο λυγισμού

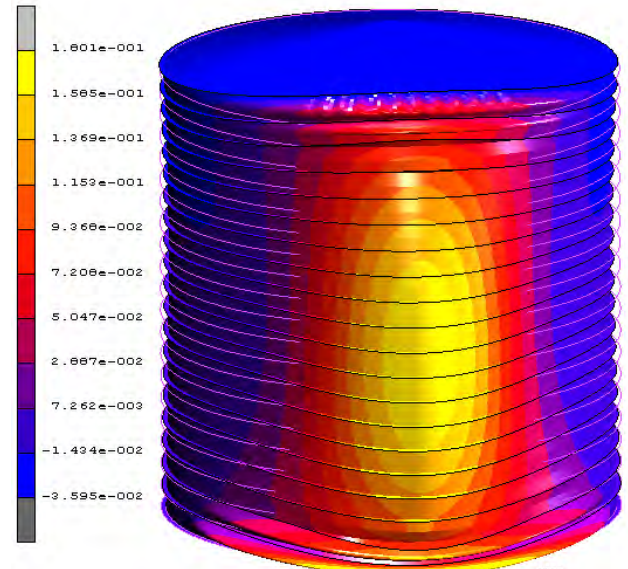


Θερμοκρασία 200°C
 Βήμα ανάλυσης: 204
 Μεταλυγισμικό στάδιο

Εικόνα 8.2. 2 Στιγμιότυπα της δεξαμενής 20x20, $t_r=10t_c$ με δακτυλίου ανά 2m στο στάδιο λυγισμού και στο μεταλυγισμικό στάδιο.

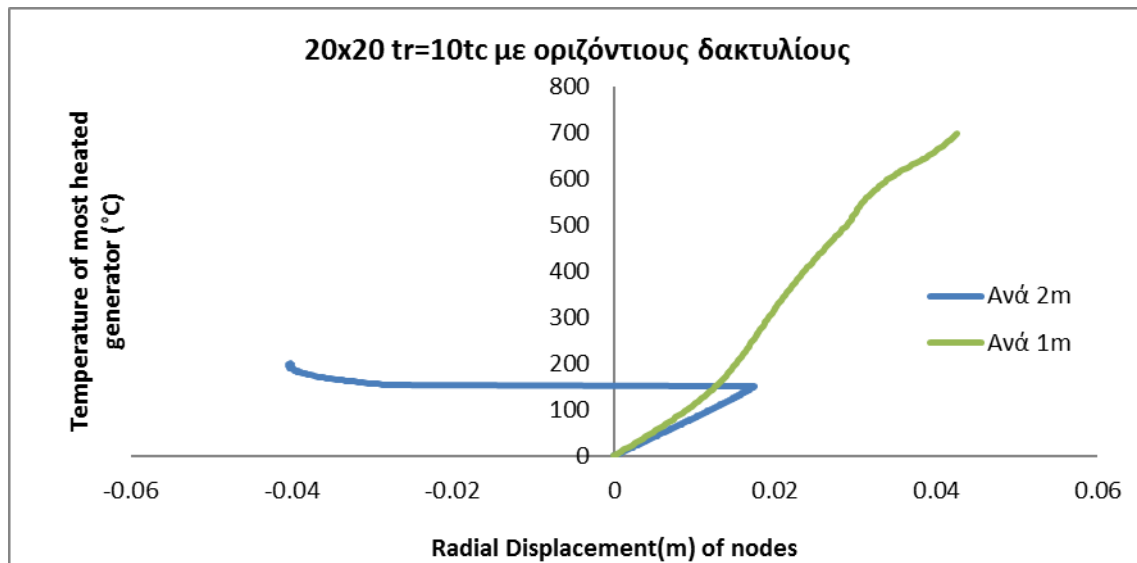


Θερμοκρασία 598 °C
 Βήμα ανάλυσης: 174
 Στάδιο λυγισμού

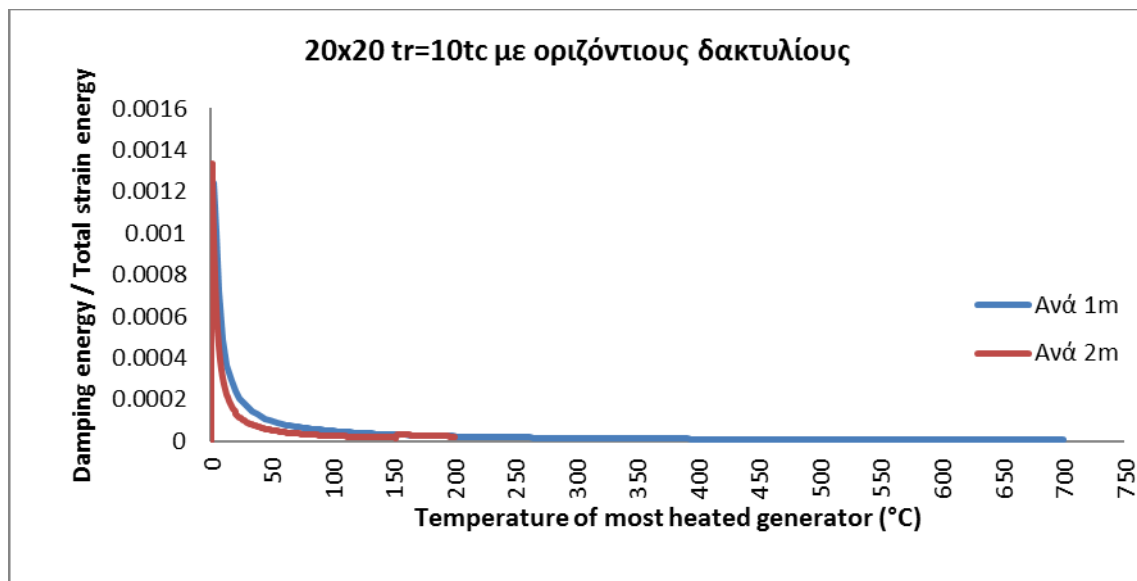


Θερμοκρασία 700°C
 Βήμα ανάλυσης: 208
 Μεταλυγισμικό στάδιο

Εικόνα 8.2. 3 Στιγμιότυπα της δεξαμενής 20x20, $t_r=10t_c$ με δακτυλίου ανά 1m στο στάδιο λυγισμού και στο μεταλυγισμικό στάδιο.



Διάγραμμα 8.2. 3 Οριζόντια μετατόπιση ενός σημείου στην ζώνη Α για την δεξαμενή 20x20, tr=10tc με οριζόντιους δακτυλίους ανά 2m και ανά 1m συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Διάγραμμα 8.2. 4 Λόγος ενέργειας απόσβεσης προς την συνολική ενέργεια παραμόρφωσης του συστήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας για την τυπική δεξαμενή 20x20 , tr=10tc με οριζόντιους δακτυλίους ανά 2m και ανά 1m.

Κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού της	Απλή δεξαμενή (χωρίς δακτυλίους)	Ανά 4m	Ανά 2m	Ανά 1m
20x20 , $t_r=10t_c$	143.5	132.8	152.8	597.88

Πίνακας 8.2. 1 Κρίσιμες θερμοκρασίες λυγισμού(°C) για την δεξαμενή 20x20 , tr=10tc με οριζόντιους δακτυλίους.

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα προκύπτει ότι η τοποθέτηση οριζόντιων δακτυλίων σε αραιή απόσταση δεν δρα ευνοϊκά στο πρόβλημα ευστάθειας της δεξαμενής μιας και μειώνει ελαφρώς την κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού με την οποία λύγιζε χωρίς τις ενισχύσεις. Ειδικότερα, το αραιό δίκτυο οριζόντιων δακτυλίων ενεργοποιεί κατά την αστοχία μια διαφορετική μορφή λυγισμού, στην οποία οι κυρτώσεις είναι τοπικές και εμφανίζονται αποκλειστικά στη βάση της δεξαμενής, σε αντίθεση με την μη ενισχυμένη δεξαμενή στην οποία αναπτύσσονταν κυρτώσεις συμμετρικής μορφής σε όλη την θερμαινόμενη επιφάνεια. Η πιο πυκνή τοποθέτηση οριζόντιων δακτυλίων (ανά 2m) οδηγεί σε παρόμοιου τύπου λυγισμό όμως, η μείωση του «μήκους λυγισμού» που οφείλεται στην πυκνότερη τοποθέτηση των ενισχύσεων έχει ως αποτέλεσμα μια μικρή αύξηση της κρίσιμη θερμοκρασίας λυγισμού. Παρόλα αυτά, η ενίσχυση της δεξαμενής με οριζόντιους δακτυλίους φαίνεται να έχει αποτέλεσμα μόνο όταν η δεξαμενή ενισχύεται με ένα αρκετά πυκνό δίκτυο δακτυλίων. Συγκεκριμένα, για τοποθέτηση δακτυλίων ανά 1m επιτυγχάνεται ιδιαίτερα σημαντική αύξηση της κρίσιμης θερμοκρασίας λυγισμού που φτάνει μέχρι και τους 450 °C. Η διάταξη αυτή ουσιαστικά δεν επιτρέπει τα τοιχώματα της δεξαμενής να λυγίσουν ούτε στην βάση ούτε και στο μέση της θερμαινόμενης επιφάνειας. Η αστοχία επέρχεται για θερμοκρασία $T_{cr,GNA} = 597.88 \text{ } ^\circ\text{C}$ με την εμφάνιση τοπικού λυγισμού στην συμβολή της οροφής με το κέλυφος της δεξαμενής.

Ενίσχυση με κατακόρυφα επίπεδα ελάσματα

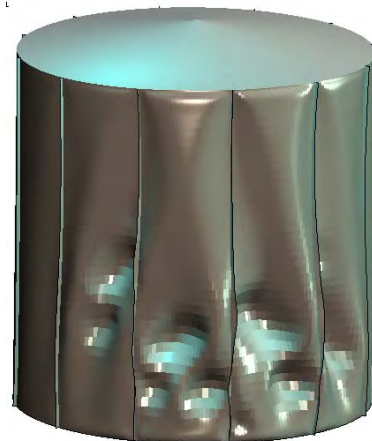
Στην περίπτωση της ενίσχυσης της δεξαμενής διαστάσεων 20x20, $t_r=10t_c$ με κατακόρυφα επίπεδα ελάσματα δημιουργήθηκαν 2 διαφορετικά αριθμητικά προσομοιώματα με την ακτινική τοποθέτηση των ελασμάτων ανά 15° και 30° (γωνία μετρούμενη από το κέντρο της δεξαμενής). Παρακάτω παρουσιάζονται οι εικόνες παραμόρφωσης των δεξαμενών στο λυγισμικό και μεταλυγισμικό στάδιο καθώς και τα αντίστοιχα διαγράμματα που περιγράφουν την απόκριση των.



Θερμοκρασία 121.8 °C
Βήμα ανάλυσης: 125
Στάδιο λυγισμού



Θερμοκρασία 127.7 °C
Βήμα ανάλυσης: 138
Μεταλυγισμικό στάδιο



Θερμοκρασία 188,6 °C
Βήμα ανάλυσης: 244
Μεταλυγισμικό στάδιο

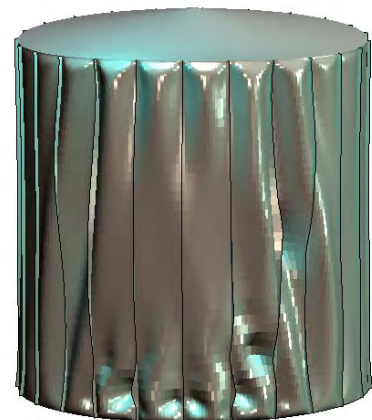
Εικόνα 8.2. 4 Στιγμιότυπα της δεξαμενής 20x20 , $t_r=10t_c$ με δακτυλίους **ανά 30°** στο στάδιο λυγισμού και στο μεταλυγισμικό στάδιο.



Θερμοκρασία 159.3 °C
Βήμα ανάλυσης: 163
Στάδιο λυγισμού

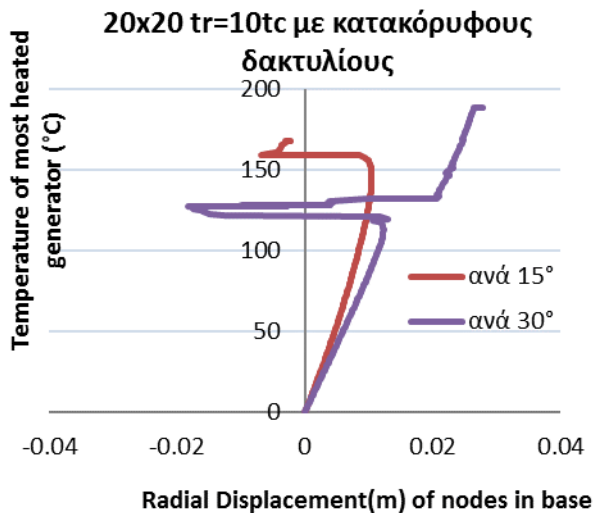


Θερμοκρασία 166.4 °C
Βήμα ανάλυσης: 171
Μεταλυγισμικό στάδιο

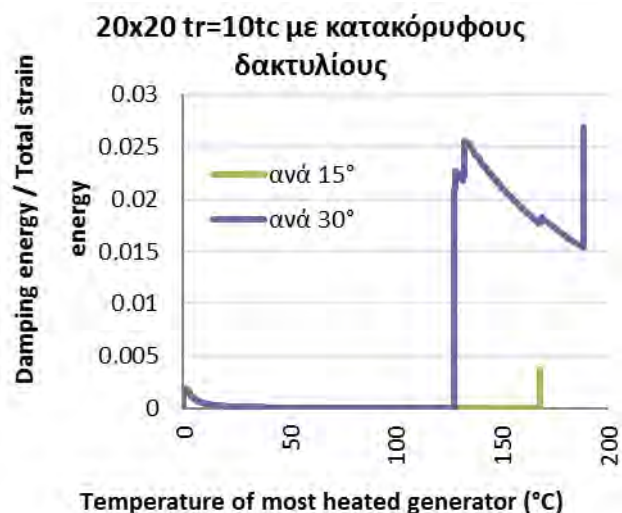


Θερμοκρασία 167.7 °C
Βήμα ανάλυσης: 182
Μεταλυγισμικό στάδιο

Εικόνα 8.2. 5 Στιγμιότυπα της δεξαμενής 20x20 , $t_r=10t_c$ με δακτυλίους **ανά 15°** στο στάδιο λυγισμού και στο μεταλυγισμικό στάδιο.



Διάγραμμα 8.2. 5 Οριζόντια μετατόπιση ενός σημείου στην ζώνη Α για την δεξαμενή 20x20, tr=10tc με κατακόρυφους δακτυλίους ανά 30° και ανά 15° συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Διάγραμμα 8.2. 6 Λόγος ενέργειας απόσβεσης προς την συνολική ενέργεια παραμόρφωσης του συστήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας για την τυπική δεξαμενή 20x20, tr=10tc με κατακόρυφους δακτυλίους ανά 30° και ανά 15°.

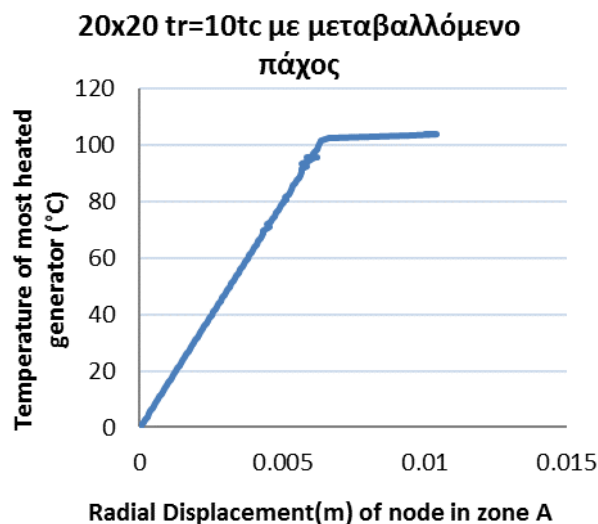
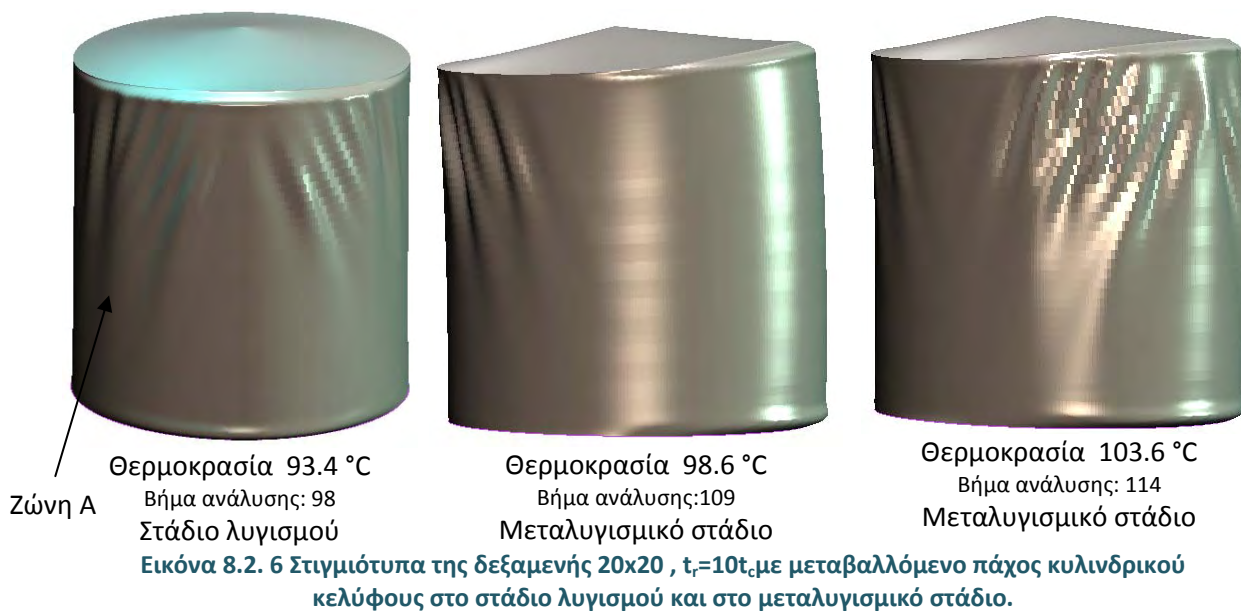
Κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού της	Απλή δεξαμενή	Ανά 30°	Ανά 15°
20x20, tr=10tc	143.5	121.8	159.2

Πίνακας 8.2. 2 Κρίσιμες θερμοκρασίες λυγισμού(°C) για την δεξαμενή 20x20, tr=10tc με κατακόρυφους δακτυλίους.

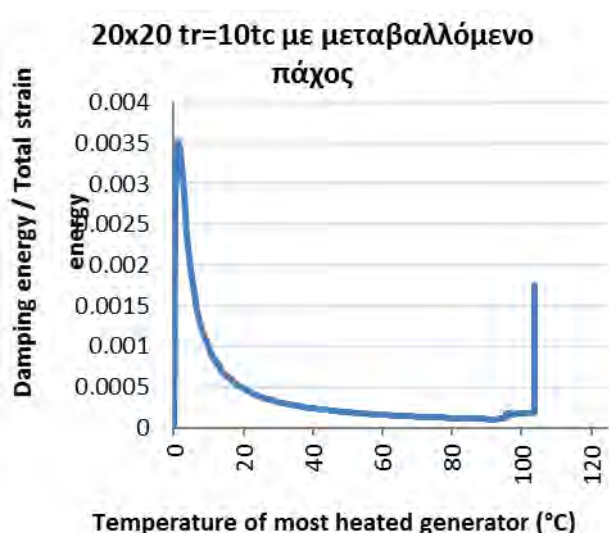
Από την ανωτέρω μελέτη και σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 8.2. 2, παρατηρείται ότι και στην περίπτωση της ενίσχυσης της δεξαμενής που πραγματοποιείται με την συγκόλληση κατακόρυφων επίπεδων ελασμάτων, δεν επιτυγχάνεται κάποια αξιοσημείωτη αύξηση της θερμικής φέρουσας ικανότητας της δεξαμενής. Η πιο αραιή τοποθέτηση ελασμάτων (ανά 30°) οδηγεί σε κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού που είναι μικρότερη από την θερμοκρασία στην οποία λυγίζει η μη ενισχυμένη δεξαμενή ενώ για ένα πιο πυκνό δίκτυο (ανά 15°) επέρχεται μικρή αύξηση της φέρουσας ικανότητας λόγω της μείωσης της επιφάνειας λυγισμού. Η ύπαρξη των κατακόρυφων ενισχύσεων έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση του λυγισμού τοπικά ανάμεσα στα τμήματα που ορίζουν οι ενισχύσεις και κυρίως στην βάση της δεξαμενής σε αντίθεση με την λυγισμική μορφή που αναπτύσσεται στην μη ενισχυμένη δεξαμενή. Αξιοσημείωτο είναι ότι η συγκεκριμένη διάταξη ενισχύσεων τείνει να επιτρέψει την διαγώνια κύρτωση των επιφανειών της θερμαινόμενης ζώνης όπως συμβαίνει και στην μη ενισχυμένη δεξαμενή, σε αντίθεση με την οριζόντια διάταξη που αποκλείει μια τέτοια παραμόρφωση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ακόμη και αν το κατακόρυφο δίκτυο ενισχύσεων γίνει πυκνότερο, να μην βελτιωθεί σημαντικά η φέρουσα ικανότητα της δεξαμενής στις υψηλές θερμοκρασίες συγκριτικά με την οριζόντια διάταξη ενισχύσεων.

Ενισχυμένη με μεταβαλλόμενο πάχος κυλινδρικού κελύφους

Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται εκείνος ο τύπος της ενίσχυσης στην οποία το πάχος του κελύφους μεταβάλλεται καθ' ύψος. Συγκεκριμένα, το πάχος στην βάση της δεξαμενής είναι πιο αρκετά αυξημένο και μειώνεται σταδιακά προς την οροφή. Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου δημιουργήθηκαν 3^{ων} διαφορετικών ειδών περιπτώσεις μεταβαλλόμενου πάχους οι οποίες περιγράφονται στην εικόνα 8.1.8. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων που υλοποιήθηκαν για τις ενισχυμένες με μεταβλητό πάχος δεξαμενές. Ειδικότερα, απεικονίζονται οι παραμορφώσεις στο λυγισμικό και μεταλυγισμικό στάδιο καθώς και τα διαγράμματα που περιγράφουν την απόκριση των δεξαμενών.



Διάγραμμα 8.2. 7 Οριζόντια μετατόπιση ενός σημείου στην ζώνη Α για την δεξαμενή 20x20, $t_r=10t_c$ με μεταβαλλόμενο πάχος α) συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Διάγραμμα 8.2. 8 Λόγος ενέργειας απόσβεσης προς την συνολική ενέργεια παραμόρφωσης του συστήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας για την τυπική δεξαμενή 20x20 , $t_r=10t_c$ με μεταβαλλόμενο πάχος α).

Παρόμοια συμπεριφορά παρουσίασαν και οι δεξαμενές στις δύο επόμενες περιπτώσεις μεταβαλλόμενου πάχους β) και γ) , οπότε δεν παρουσιάζονται για οικονομία χώρου. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι κρίσιμες θερμοκρασίες λυγισμού για την κάθε περίπτωση μεταβλητού πάχους που εξετάστηκε, όπου διακρίνονται σημαντικά χαμηλότερες τιμές συγκριτικά με την δεξαμενή σταθερού πάχους 1cm.

Κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού με μεταβαλλόμενο πάχος κελύφους 20x20 , tr=10tc	Απλή δεξαμενή	α)	β)	γ)
		143.5	93.4	116.82

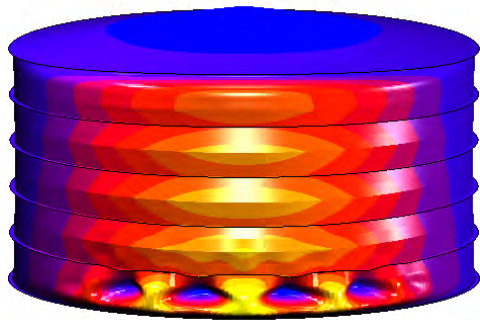
Πίνακας 8.2. 3 Κρίσιμες θερμοκρασίες λυγισμού(°C) για την δεξαμενή 20x20 , tr=10tc με μεταβαλλόμενο πάχος κυλινδρικού κελύφους.

Από την παραπάνω μελέτη φαίνεται ότι, η συγκεκριμένη τεχνική ενίσχυσης αν και είναι κατάλληλη για τις περιπτώσεις στις οποίες η αστάθεια είναι αποτέλεσμα της εσωτερικής πίεσης που ασκεί το υγρό στην δεξαμενή, όχι μόνο δεν λειτουργεί ευνοϊκά για την περίπτωση ανομοιόμορφης θερμικής καταπόνησης αλλά οδηγεί και σε αρκετά μικρότερες τιμές την κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού. Το παραπάνω εύρημα είναι πολύ σημαντικό, απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση για την επιβεβαίωση του και ενδεχομένως πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στον σχεδιασμό των δεξαμενών που δύναται να υποστούν θέρμανση λόγω της καύσης μιας γειτονικής δεξαμενής, μιας και είναι συνήθη πρακτική να κατασκευάζονται οι δεξαμενές με μεταβλητό καθ' ύψος πάχος.

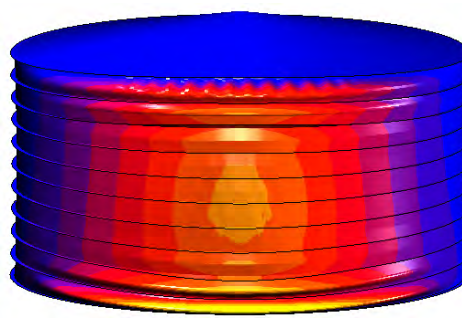
8.3 Ενισχυμένη δεξαμενή διαστάσεων 10x20

Η δεξαμενή διαστάσεων 10x20 έχει εμφανίσει την μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα στις υψηλές θερμοκρασίες έναντι φαινομένων αστάθειας συγκριτικά με τις υπόλοιπες δεξαμενές. Στόχος της παραγράφου είναι να αξιολογήσει αν οι συνήθεις τεχνικές ενίσχυσης θα επιδράσουν ευνοϊκά στην αντοχή της ή όχι, όπως στην περίπτωση της δεξαμενής διαστάσεων 20x20 όπου μόνο η πυκνή πύκνωση έδωσε επαρκώς σημαντική λυγισμική αντοχή. Για την μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε η δεξαμενή 10x20, $t_r=10t_c$ ενώ επίσης διατηρήθηκε η τιμή 10^{-7} για τον λόγο απόσβεσης.

Επισημαίνεται ότι στην συγκεκριμένη δεξαμενή, πραγματοποιήθηκε μια επιπλέον σειρά αναλύσεων στην οποία εκτός από το βασικό πάχος δακτυλίου που χρησιμοποιήθηκε (1.5cm) θεωρήθηκε και το πάχος 1cm. Στις εικόνες που ακολουθούν παρατίθενται τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων αναλύσεων.



Εικόνα 8.3. 1 Δεξαμενή 10x20, $t_r=10t_c$ με δακτυλίου ανά 2m, στο στάδιο λυγισμού(415° C).



Εικόνα 8.3. 2 Δεξαμενή 10x20, $t_r=10t_c$ με δακτυλίου ανά 1m, στο στάδιο λυγισμού(679° C).



Εικόνα 8.3. 3 Δεξαμενή 10x20, $t_r=10t_c$ με κατακόρυφους δακτυλίου ανά 30°, στο στάδιο λυγισμού (190° C).



Εικόνα 8.3. 4 Δεξαμενή 10x20, $t_r=10t_c$ κατακόρυφους δακτυλίου ανά 15°, στο στάδιο λυγισμού (220° C).



Εικόνα 8.3. 5 Δεξαμενή 10x20, $t_r=10t_c$ με μεταβαλλόμενο πάχος κελύφους περίπτωσης β , στο στάδιο λυγισμού(248° C).

Οριζόντιοι Δακτύλιοι	Πάχος δακτυλίου (cm)	Απλή δεξαμενή	Ανά 4m	Ανά 2m	Ανά 1m
			1	265.237	416.1
	1.5	202.238	275.587	415.12	679.3

Κατακόρυφοι Δακτύλιοι	Πάχος δακτυλίου (cm)	Απλή δεξαμενή	Ανά 30°	Ανά 15°
			1.5	190.12

Μεταβαλλόμενο πάχος κυλινδρικού κελύφους	Πάχος δακτυλίου (cm)	Απλή δεξαμενή	β)
			1.5

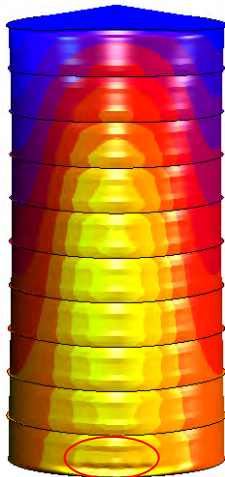
Πίνακας 8.3. 14 Κρίσιμες θερμοκρασίες λυγισμού(°C) της δεξαμενής 10x20 , tr=10tc με οριζόντιους και κατακόρυφους δακτυλίους και μεταβαλλόμενο πάχος κελύφους.

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα φαίνεται ότι στην συγκεκριμένη δεξαμενή η διάταξη οριζόντιων ενισχύσεων με χαλύβδινους δακτυλίους δρα αρκετά ευνοϊκά ακόμη και για την περίπτωση της τοποθέτησης δακτυλίων ανά 2m στην οποία παρατηρείται διπλάσια αύξηση της κρίσιμης θερμοκρασίας λυγισμού. Προφανώς, η μείωση του ύψους της δεξαμενής καθιστά την συγκεκριμένη διάταξη αρκετά πυκνή μειώνοντας σημαντικά το «μήκος λυγισμού». Η φέρουσα ικανότητα στις υψηλές θερμοκρασίες, έναντι λυγισμού, τριπλασιάζεται όταν το δίκτυο των ενισχύσεων γίνει ακόμη πιο πυκνό (ανά 1m). Πιο συγκεκριμένα, η δεξαμενή με οριζόντιους δακτυλίους ανά 4m παρουσίασε περεταίρω αύξηση της κρίσιμης θερμοκρασίας λυγισμού φτάνοντας τους 265°C, ενώ χωρίς αυτούς μόλις προσέγγιζε τους 202°C, ενώ παράλληλα η δεξαμενή διαστάσεων 20x20 όχι μόνο δεν βελτίωνε την λυγισμική της αντοχή αλλά επιπλέον την μείωνε (πίνακας 8.2.1). Η δεξαμενή 10x20 με οριζόντιους δακτυλίους ανά 2m διπλασίασε περίπου την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας λυγισμού (416 °C), ενώ για δακτυλίους ανά 1m η συμπεριφορά της και η κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού ήταν σχεδόν παρόμοια με της 20x20.

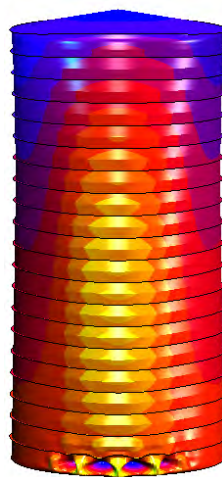
Εν αντιθέσει, η κατακόρυφη τοποθέτηση επίπεδων ελασμάτων λειτούργησε μη ευνοϊκά στην περίπτωση του αραιού δικτύου και ελαχίστως ευνοϊκά στην περίπτωση του πιο πυκνού, όπως και στην περίπτωση της δεξαμενής διαστάσεων 20x20. Επίσης, η διάταξη μεταβολής πάχους (περίπτωση β) απέφερε μια μικρή αύξηση στην κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού.

8.4 Ενισχυμένη δεξαμενή διαστάσεων 40x20

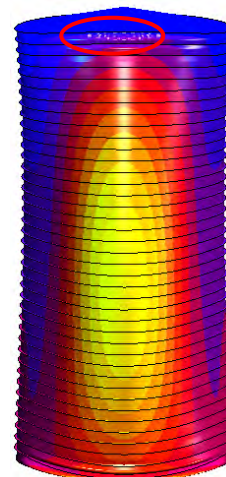
Παρακάτω παρουσιάζεται η παραμορφωμένη κατάσταση του φορέα την στιγμή της αστοχίας (στάδιο λυγισμού) καθώς και ο συγκεντρωτικός πίνακας των κρίσιμων θερμοκρασιών λυγισμού. Σημειώνεται και σε αυτή την περίπτωση τα είδη των μορφών των παραμορφώσεων είναι όμοια με των δύο προηγούμενων ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση.



Εικόνα 8.4 1 Δεξαμενή 40x20 ,
tr=10tc με δακτυλίους **ανά 4m** ,
στο στάδιο λυγισμού
(113.7° C)

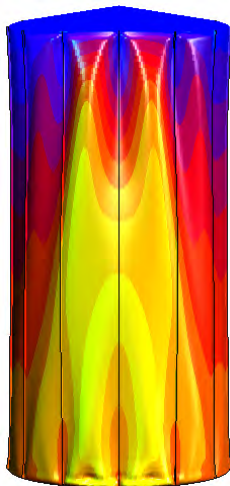


Εικόνα 8.4 2 Δεξαμενή 40x20 ,
tr=10tc με δακτυλίους **ανά 2m** ,
στο στάδιο λυγισμού
(113.7° C)

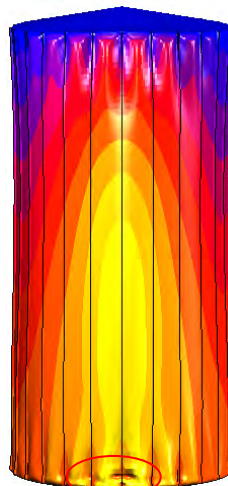


Εικόνα 8.4 3 Δεξαμενή 10x20 ,
tr=10tc με δακτυλίους **ανά 1m** ,
στο στάδιο λυγισμού
(626° C)

Σημείωση: Στην πρώτη εικόνα ολοκληρώθηκε η ανάλυση σε αυτό το βήμα γι' αυτό δεν έχουν σχηματιστεί οι παραμορφώσεις ολοκληρωμένες.



Εικόνα 8.4 4 Δεξαμενή 40x20 ,
tr=10tc με κατακόρυφους
δακτυλίους **ανά 30°** , στο στάδιο
λυγισμού (94° C).



Εικόνα 8.4 5 Δεξαμενή 40x20 ,
tr=10tc κατακόρυφους
δακτυλίους **ανά 15°** , στο στάδιο
λυγισμού (120° C).



Εικόνα 8.4 66 Δεξαμενή 40x20 ,
tr=10tc με μεταβαλλόμενο πάχος
κελύφους περίπτωσης **β** , στο
στάδιο λυγισμού(139° C).

Οριζόντιοι Δακτύλιοι	Απλή δεξαμενή	Ανά 4m	Ανά 2m	Ανά 1m
	99.027	113.65	113.7	626
Κατακόρυφοι Δακτύλιοι	Απλή δεξαμενή	Ανά 30°	Ανά 15°	
	99.027	93.95	119.48	
Μεταβαλλόμενο πάχος κυλινδρικού κελύφους	Απλή δεξαμενή	β)		
	99.027	139.3		

Πίνακας 8.4. 1 Κρίσιμες θερμοκρασίες λυγισμού(°C) της δεξαμενής 40x20 , $t_r=10$ με οριζόντιους και κατακόρυφους δακτυλίους και μεταβαλλόμενο πάχος κελύφους.

Στην δεξαμενή με δακτυλίους ανά 4m και ανά 2m παρατηρήθηκε ελάχιστη αύξηση της κρίσιμης θερμοκρασίας λυγισμού ενώ στην δεξαμενή με δακτυλίους ανά 1m η τιμή της θερμοκρασίας έφτασε τους 626 ° C. Επιβεβαιώνεται και σε αυτή την περίπτωση, η μεγάλη αύξησης της θερμοκρασίας λυγισμού όταν ακολουθείται ιδιαιτέρως αυξημένη πύκνωση στην διάταξη των δακτυλίων.

8.5 Ενισχυμένη δεξαμενή διαστάσεων 20x40

Η δεξαμενή αυτή είναι διπλάσιας διαμέτρου από τις τρεις προηγούμενες $D=40m$, οπότε όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα σχόλια αναμένεται οι παραμορφώσεις που δημιουργούνται στην βάση να είναι και αυτές μεγαλύτερης διαμέτρου από τις προηγούμενες.

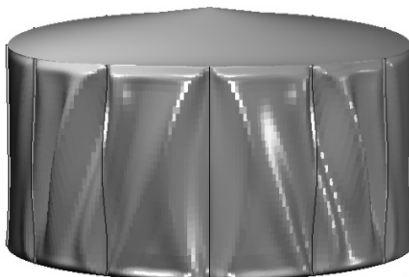


Εικόνα 8.5. 1 Δεξαμενή 40x20 , $tr=10tc$ με δακτυλίους **ανά 4m** , στο στάδιο λυγισμού ($118^{\circ} C$)

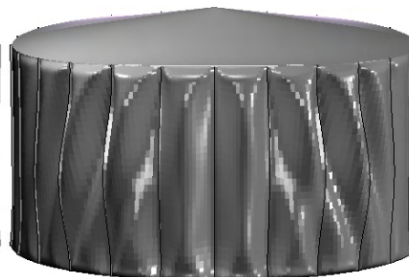


Εικόνα 8.5. 2 Δεξαμενή 40x20 , $tr=10tc$ με δακτυλίους **ανά 2m** , στο στάδιο λυγισμού ($658^{\circ} C$)

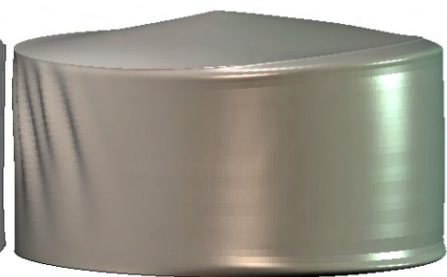
Σημείωση: Στην εικόνα 8.5.1 οι μικροπαραμορφώσεις στην κορυφή του κελύφους οφείλονται στο ίδιο βάρος της οροφής, δεν είναι λόγω της θερμοκρασίας (είναι δηλαδή εμφανείς από το 1^ο βήμα της ανάλυσης).



Εικόνα 8.5. 3 Δεξαμενή 20x40 , $tr=10tc$ με κατακόρυφους δακτυλίους **ανά 30°** , στο στάδιο λυγισμού ($83^{\circ} C$).



Εικόνα 8.5. 47 Δεξαμενή 20x40 , $tr=10tc$ κατακόρυφους δακτυλίους **ανά 15°** , στο στάδιο λυγισμού ($89^{\circ} C$).



Εικόνα 8.5. 5 Δεξαμενή 20x40 , $tr=10tc$ με μεταβαλλόμενο πάχος κελύφους περίπτωσης **β** , στο στάδιο λυγισμού ($133^{\circ} C$).

Σημείωση: Ο λυγισμός πραγματοποιείται στο πίσω μέρος της δεξαμενής όπου η επιβαλλόμενη θερμοκρασία είναι μηδενική.

Οριζόντιοι Δακτύλιοι	Απλή δεξαμενή	Ανά 4m	Ανά 2m
	94.82	118.8	658
Κατακόρυφοι Δακτύλιοι	Απλή δεξαμενή	Ανά 30°	Ανά 15°
	94.82	83.3	89.21
Μεταβαλλόμενο πάχος κυλινδρικού κελύφους	Απλή δεξαμενή	β)	
	94.82	133.23	

Πίνακας 8.5. 1 Κρίσιμες θερμοκρασίες λυγισμού(°C) της δεξαμενής 20x40 , $t_r=10$ με οριζόντιους και κατακόρυφους δακτυλίους και μεταβαλλόμενο πάχος κελύφους.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η ενίσχυση της δεξαμενής με δακτυλίους ανά 4m προκάλεσε μικρή αύξηση της κρίσιμης θερμοκρασίας λυγισμού δημιουργώντας ελλειψοειδής παραμορφώσεις στην βάση(εικόνα 8.5.1) ενώ η τοποθέτηση δακτυλίων ανά 2m απέκλεισε την δημιουργία αντίστοιχων παραμορφώσεων στην βάση και έτσι η θερμοκρασία λυγισμού αυξήθηκε ραγδαία στους 658 °C. Οι υπόλοιπες τεχνικές ενίσχυσης δεν βοήθησαν στην αύξηση της θερμικής ικανότητας της δεξαμενής έναντι των φαινομένων αστάθειας που αναπτύσσονται.

9°ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα της δομικής ευστάθειας λεπτότοιχων μεταλλικών κυλινδρικών δεξαμενών σταθερής οροφής υπό ανομοιόμορφη θερμική καταπόνηση. Η θερμική φόρτιση που δύναται να ασκηθεί σε μια δεξαμενή είναι, αποτέλεσμα της θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπει η καύση μιας γειτονικής φλεγόμενης δεξαμενής η οποία αποτελεί και την πηγή θερμότητας. Όπως αναμένεται, η θερμική φόρτιση που θα ασκηθεί στην επιφάνεια του κελύφους της δεξαμενής θα έχει ανομοιόμορφη κατανομή ενώ η ακριβής εύρεση της αποτελεί ένα πολύπλοκο πρόβλημα που ανήκει στην επιστημονική περιοχή της μεταφοράς θερμότητας και της αλληλεπίδρασης ρευστού-στερεού. Στα πλαίσια της εργασίας, υιοθετήθηκε ένα προφίλ θερμοκρασίας που έχει ομοιόμορφη κατανομή καθ' ύψος ενώ μεταβάλλεται καθώς κινούμαστε περιφερειακά στο κέλυφος με βάση την τετραγωνική συνημιτονοειδή συνάρτηση της γωνίας θ του κυλίνδρου. Το προφίλ αυτό προέκυψε από την αριθμητική επίλυση του ρευστοδυναμικού προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία και διατίθεται στην διεθνή βιβλιογραφία.

Λόγω της θερμικής φόρτισης που ασκείται στην δεξαμενή η κελυφωτή επιφάνεια τείνει να διογκωθεί χωρίς όμως αυτή η παραμόρφωση να δύναται να γίνει ανεμπόδιστα, εξαιτίας των συνοριακών συνθηκών που επικρατούν στην βάση και στην οροφή της. Η παρεμποδιζόμενη παραμόρφωση του κελύφους της δεξαμενής έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μεμβρανικών τάσεων με εφελκυστικό και θλιπτικό μέρος ούτως ώστε να υφίσταται καθεστώς αυτοϊσορροπίας. Προφανώς, το θλιπτικό μέρος των αναπτυσσόμενων τάσεων δύναται να οδηγήσει σε απώλεια ευστάθειας τα λεπτότοιχα τμήματα της επιφάνειας του κελύφους.

Στο πλαίσιο αυτό, ο βασικός στόχος της διπλωματικής εργασίας ήταν η εύρεση της κρίσιμης θερμοκρασίας λυγισμού καθώς και ο προσδιορισμός της αντίστοιχης μορφής αστοχίας και της ενδεχόμενης μεταλυγισμικής αντοχής. Για το σκοπό αυτό, δημιουργήθηκε μια σειρά αριθμητικών προσομοιωμάτων δεξαμενών, πραγματικών διαστάσεων, με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους, που είναι σε θέση να αναπαράγουν όλα τα μη γραμμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την προοδευτική παραμόρφωση των δεξαμενών. Για την ρεαλιστική επίλυση του προβλήματος εφαρμόστηκε γεωμετρική μη γραμμική ανάλυση κάνοντας χρήση προχωρημένων τεχνικών επίλυσης και εντοπισμού των λυγισμικών φαινομένων.

Παράλληλα, εκπονήθηκε παραμετρική μελέτη με σκοπό την αξιολόγηση συγκεκριμένων παραμέτρων στην φέρουσα ικανότητα των δεξαμενών στις υψηλές θερμοκρασίες. Ειδικότερα, μελετήθηκε η επιρροή της συνοριακής συνθήκης της οροφής, των αρχικών γεωμετρικών ατελειών και του λόγου του ύψους προς τη διάμετρο της δεξαμενής (H/D) στην λυγισμική απόκριση. Τέλος, εξετάστηκε το κατά πόσο τεχνικές ενίσχυσης που χρησιμοποιούνται ευρέως για την βελτίωση της λυγισμικής φέρουσας ικανότητας δεξαμενών που υπόκεινται σε κλασσικές φορτίσεις (εσωτερική πίεση υγρού, φορτία βαρύτητας κτλ.), δύναται να έχουν ευνοϊκή επίδραση στην βελτίωση της φέρουσας

ικανότητας έναντι φαινομένων αστάθειας δεξαμενών που καταπονούνται σε ανομοιόμορφη θερμική φόρτιση.

Από την μελέτη που υλοποιήθηκε προσδιορίστηκε ότι η αστοχία δεξαμενών συνήθων διαστάσεων είναι αποτέλεσμα ελαστικού λυγισμού που εκδηλώνεται σε όλη την θερμαινόμενη επιφάνεια ή τοπικά σε κάποια τμήματα της. Οι κρίσιμες θερμοκρασίες λυγισμού κυμαίνονται περίπου μεταξύ 100 °C και 250 °C, ανάλογα με την περίπτωση, και κρίνονται χαμηλές αν αναλογιστεί κανείς ότι η τάση διαρροής του χάλυβα δε μειώνεται για θερμοκρασία μικρότερη των 400°C. Με δεδομένο ότι πρόκειται για πρόβλημα ευστάθειας κυλινδρικών κελυφών, υφίστανται πολλαπλές λύσεις στην γειτονιά μιας κρίσιμης θερμοκρασίας και για το λόγο αυτό δύναται να παρουσιαστούν διάφορες μορφές λυγισμού, συμμετρικές ή μη συμμετρικές, άλλες με ευσταθή και άλλες με ασταθή δρόμο ισορροπίας. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι εμφανίζεται το φαινόμενο της διακλάδωσης (bifurcation) σε αρκετές περιπτώσεις είτε κατά την στιγμή του λυγισμού είτε και κατά το μεταλυγισμικό στάδιο. Επίσης, τονίζεται ότι η γεωμετρική μη γραμμική ανάλυση υπολόγισε μεγαλύτερα φορτία από τα φορτία λυγισμού που προσδιορίστηκαν από την γραμμική ανάλυση λυγισμού (θεωρητικά φορτία λυγισμού) κάτι το οποίο φαινομενικά είναι παράλογο αλλά είναι απόλυτα σύμφωνο με τα ευρήματα άλλων δημοσιευμένων μελετών που είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία και οφείλεται στον μη-γραμμικό ελαστικό κλάδο που εμφανίζεται πριν τον λυγισμό. Ο μηχανισμός αυτός έχει επαληθευτεί και πειραματικά από ερευνητές που έχουν ασχοληθεί με τον θερμικό λυγισμό κελυφών.

Μέσω της παραμετρικής μελέτης που υλοποιήθηκε αποδείχτηκε ότι η συνοριακή συνθήκη της οροφής επηρεάζει ελάχιστα την κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού σε μια συγκεκριμένη δεξαμενή αλλά δύναται να επηρεάσει τον τρόπο με τον οποίο θα λυγίσει η κατασκευή. Η παρουσία αρχικών γεωμετρικών ατελειών μειώνει κατά κάποιο ποσοστό την φέρουσα θερμική ικανότητα της δεξαμενής (ανάλογα με το μέγεθος του εύρους της ατέλειας) ενώ παράλληλα, τόσο το σχήμα όσο και το μέγιστο εύρος επηρεάζουν τον δρόμο της λυγισμικής ισορροπίας, οδηγώντας σε ευσταθείς ή ασταθείς λύσεις. Επιπρόσθετα, αποδεικνύεται ότι ο λόγος του ύψους προς την διάμετρο της δεξαμενής παίζει ρόλο στην λυγισμική απόκριση. Ειδικότερα, δεξαμενές της ίδιας διαμέτρου αλλά με διαφορετικό ύψος επιδεικνύουν διαφορετική λυγισμική αντοχή, με την λυγηρότερη να εμφανίζει μικρότερο θερμικό φορτίο λυγισμού. Επίσης δεξαμενές με το ίδιο ύψος και διαφορετική διάμετρο αναπτύσσουν διαφορετική κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού, με την δεξαμενή με την μικρότερη διάμετρο να εμφανίζει μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα στις υψηλές θερμοκρασίες.

Για την βελτίωση της απόκρισης των δεξαμενών έναντι των φαινομένων αστάθειας προσφορότερη είναι η προσθήκη μιας πυκνής διάταξης οριζόντιων δακτυλίων που λειτουργούν ως ελάσματα ενίσχυσης. Στην περίπτωση ενός αρκετά πυκνού δικτύου δακτυλίων η κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού δύναται ακόμη και να τριπλασιαστεί θεωρώντας παράλληλα ότι δεν υπάρχει αστοχία του υλικού από πλαστικοποίηση. Η χρήση κατακόρυφων επίπεδων ελασμάτων δεν φαίνεται να βελτιώνει ιδιαίτερα την κρίσιμη τιμή της θερμοκρασίας λυγισμού ενώ παράλληλα η τεχνική της ενίσχυσης με μεταβλητό καθ' ύψος πάχος ενδέχεται να μην δρα ευνοϊκά ή ακόμη και να μειώνει την φέρουσα ικανότητα της δεξαμενής στις υψηλές θερμοκρασίες σε κάποιες περιπτώσεις.

Βιβλιογραφία

- Anderson, M. S. (1962). "Combinations of temperature and axial compression required for buckling of a ring-stiffened cylinder." National Aeronautics and Space Administration.
- API 650, (2015), Welded Steel Tanks for Oil Storage, 10th Edition American Petroleum Institute.
- Bathe K.J. (1996) " Finite Element Procedures." Prentice Hall Inc, New Jersey
- Batista-Abreu J.C. and Godoy L.A. (2013), Thermal buckling behavior of open cylindrical oil storage tanks under fire, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, Vol. 27, No.1, pp. 89-97
- BS EN 14015:2004 Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above (BS EN14015:2004).
- Cowley, L. T. and Johnson, A. D., 1992. *Oil and Gas Fires: Characteristics and Impact*. Chester: Shell Research Limited.
- Criesfield, M.A., 1991 " Non linear finite element analysis of solids and structures", John Wiley and Sons Ltd, England.
- EN 1993-1-6 Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-6: General rules - Strength and stability of shell structures (EN1993 1-6, 2007).
- EN 1993-4-2 Eurocode 3- Design of steel structures, Part 4-2: Tanks (EN1993 4-2, 2007).
- EN1993 1-2 (2007). Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels, CEN
- Eslami M. R., Shahsiah R., Thermal buckling of imperfect cylindrical shells, *Journal of Thermal Stresses*, 24:71^89 , 2001
- Eslami M.R., Ziaii A.R., and Ghorbanpour A., Thermoelastic Buckling of Thin Cylindrical Shells Based on Improved Donnell Equations, *J. Thermal Stresses*, vol. 19, pp. 299–316, 1996.
- Eslami, M. R., and Javaheri, R. (1999). "Buckling of composite cylindrical shells under mechanical and thermal loads." *Journal of Thermal Stresses*, 22(6): 527-
- Fontenelle F.M.A. (2012), Thermal Analysis of Ethanol Storage Tanks Under Fire Conditions, Federal University of Rio de Janeiro (COPPE/ UFRJ), Rio de Janeiro, Brazil
- Frum, Y., and Baruch, M. (1976). "Buckling of cylindrical shells heated along two opposite generators combined with axial compression." *Experimental Mechanics*, 16(4): 133-139.
- Godoy L.A. and Batista-Abreu J.C. (2012), Buckling of fixed-roof aboveground oil storage tanks under heat induced by an external fire, *Thin-Walled Structures*, Vol. 52, pp. 90-101.
- Hill, D. W. (1959). "Buckling of a thin circular cylindrical shell heated along an axial strip." Stanford Univ., Calif.

Hoff, N. J. (1957b). "Buckling of thin cylindrical shell under hoop stresses varying in axial direction " American Society of Mechanical Engineers -- Transactions -- Journal of Applied Mechanics, 24 (3): 405-412.

Hoff, N. J., and Ross, B. (1967). "A new solution of the buckling problem of thin circular cylindrical shells heated along an axial strip." *Recent Progress in Applied Mechanics*, The Folke Odqvist Volume: 251-271.

Hughes O. Ship Structural Design: "A rationally-based, computer-aided optimization procedure." SNAME, New York (1996)

Johns, D. J. (1962). "Local circumferential buckling of thin circular cylindrical shells." Collected papers on instability of shell structures: 267-276.

Johns, D. J. (1965). Thermal stress analyses. Pergamon Press.

Johnson, D. M. (2010). The potential for vapour cloud explosions-lessons from the Buncefield accident, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 23(6): 921-927

Kobayashi T., Mihara Y. and Fujii F. (2014) "Artificial damping method for local instability problems in shells", Shell structures: Theory and applications, Vol. 3, Pietraszkiewicz and Gorski (Eds), Taylor and Francis Group, London.

Landucci G., Gubinelli G., Antonioni G. Cozzani V., (2009), The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire, Accident Analysis and Prevention, 41(6): 1206–1215

Liu Ying Doctor of Philosophy in The University of Edinburgh (2011) Thermal buckling of metal oil tanks subject to an adjacent fire

Mansour K.A (2012), Fires in Large Atmospheric Storage Tanks and Their Effect on Adjacent, Doctoral Dissertation, Loughborough University

McGrattan K, Baum ., Hamins A (2000), Thermal Radiation from Large Pool Fires, National Institute of Standards and Technology (NIST)

MSC Software Corporation, MSC Marc, Volume A: Theory and User Information, Version 2015

Mudan K.S. and Croce P.A.. SFPE Handbook, chapter Fire Hazard Calculations for Large Open Hydrocarbon Fires. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2nd edition, 1995.

NFPA 30 (2015), Flammable and Combustible Liquids Code, 2015 Edition

Panda, S. K., and Singh, B. N. (2011). "Large amplitude free vibration analysis of thermally post-buckled composite doubly curved panel using nonlinear FEM." *Finite Elements in Analysis and Design*, 47(4): 378-386.

Pantousa D. Dr. Ing. Civil Engineer (2015) "Numerical simulation of oil steel tank structural behavior under fire conditions" in State-of-the-Art Design and Analysis Methods in Industry''

prEN 14015-1: Specification for the Design and Manufacture of Site Built Vertical Cylindrical Flat-Bottomed Above Ground Welded Metallic Tanks for the Storage of Liquids at Ambient Temperature and Above - Part 1: Steel Tanks EN 14015, draft issued for public comment in 2000 (prEN 14015-1)

Ross, B., Hoff, N. J., and Horton, W. H. (1966). "The buckling behavior of uniformly heated thin circular cylindrical shells." *Experimental Mechanics*, 6(11): 529-537.

Ross, B., Mayers, J., and Jaworski, A. (1965). "Buckling of thin cylindrical shells heated along an axial strip." *Experimental Mechanics*, 5(8): 247-256.

Sengupta A., Gupta A. K., and Mishra I. M. (2010). Engineering layout of fuel tanks in a tank farm, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*

Shahsiah, R., and Eslami, M. R. (2003). "Thermal buckling of functionally graded cylindrical shell." *Journal of thermal stresses*, 26(3): 277-294.

Sunakawa, M. (1962). "Deformation and buckling of cylindrical shells subjected to heating." University Tokyo. Re. Inst.

Tam C.K.W., Webb C. and Dong T.Z. (1993) "A study of short wave components in computational aeroacoustics", *Journal of Computational Acoustics*, Vol.1, pp. 1-30.

Ventsel and Krauthammer, (2001) "Thin plates and shells, Theory, analysis and applications", Marcel Dekker, Inc. New York.

Wang W., Xu Z., Sun B., (2013), Numerical simulation of fire thermal radiation field for large crude oil tank exposed to pool fire, *Procedia Engineering*. 52: 395–400.

Yu C., Schafer B.W. (2007) "Simulation of cold formed steel beams in local and distortional buckling with applications to the direct strength method", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.63, pp. 581-590.

Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι. και Ιωαννίδης Γ., (1997) "Σιδηρές κατασκευές Β' Τόμος", Εκδόσεις Ιανός

Ευρωκώδικας 3 :Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα-Σχεδιασμός δομικών μελών έναντι πυρκαγιάς EN 1993-1-2:2005

Κακάτσιος Ξ. Καθηγητής ΕΜΠ (2006) "ΑΡΧΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΖΗΣ" (αγωγή)

Κάλλυπος 2015 "ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ"

Μυστακίδης Ε. Καθηγητής "ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ" Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών (Εργαστήριο Ανάλυσης και Σχεδιασμού Κατασκευών)

Νικολός Ι. Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός (2007) "ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ" Πολυτεχνείο Κρήτης τμήμα μηχανικών παραγωγής και διοίκησης

ΦΕΚ 846/Β/31-12-90, (1990) Καθορισμός τεχνικών προδιαγραφών, διαμόρφωσης, σχεδίασης, κατασκευής, ασφαλούς λειτουργίας και πυροπροστασίας εγκαταστάσεων διυλιστηρίων και λοιπών βιομηχανιών πετρελαίου

