

**ΛΥΓΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΥΠΟ ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΘΕΡΜΙΚΗ
ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΜΕΣΩ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

Μαρία-Αλεξάνδρα Κεφάκη

Πολιτικός Μηχανικός

Εργαστήριο Ανάλυσης και Σχεδιασμού Κατασκευών, Τμήμα Πολ. Μηχ. Π.Θ.
Βόλος, Ελλάδα

marisa93k@gmail.com

Δάφνη Παντούσα

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Msc.

Εργαστήριο Ανάλυσης και Σχεδιασμού Κατασκευών, Τμήμα Πολ. Μηχ. Π.Θ.
Βόλος, Ελλάδα

dpantousa@gmail.com

Κωνσταντίνος Τζάρος

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Msc.

Εργαστήριο Ανάλυσης και Σχεδιασμού Κατασκευών, Τμήμα Πολ. Μηχ. Π.Θ.
Βόλος, Ελλάδα

ktzaros@civ.uth.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάται 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. Στα πλαίσια της εργασίας, υιοθετείται ένα προφίλ θερμοκρασίας που έχει ομοιόμορφη κατανομή καθ' ύψος ενώ μεταβάλλεται περιφερειακά στο κέλυφος με βάση την τετραγωνική συνημιτονοειδή συνάρτηση της γωνίας θ του κυλίνδρου. Στη συνέχεια, επιχειρείται η εύρεση της κρίσιμης θερμοκρασίας λυγισμού καθώς και ο προσδιορισμός της αντίστοιχης μορφής αστοχίας και της ενδεχόμενης μεταλυσισμικής 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.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ισχύοντες κανονισμοί (API 650, NFPA 30, ΦΕΚ 846/B/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 δυλιστηρίων, βιομηχανικών μονάδων και στους τερματικούς σταθμούς αποθήκευσης πετρελαιοειδών. Παρόλα αυτά, 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 Buncefield, βόρεια του Λονδίνου (Φωτ.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



Φωτ. 1: Πυρκαγιά σε χώρο δεξαμενών στο Buncefield.



Φωτ. 2: Πυρκαγιά σε βιομηχανική περιοχή του Κίεβο.

Στην περίπτωση που δεν γίνει διάδοση της πυρκαγιάς (είτε μέσω διαρροής καύσιμης ύλης είτε από επακόλουθη έκρηξη σε μια γειτονική δεξαμενή), η φλεγόμενη δεξαμενή αποτελεί θερμική πηγή για τις γειτονικές δεξαμενές. Η θερμότητα μεταφέρεται στις γειτονικές δεξαμενές κυρίως μέσω ακτινοβολίας.

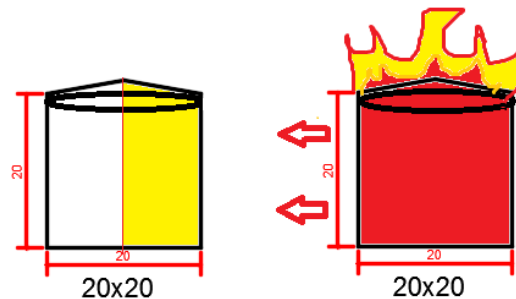
Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το θερμοκρασιακό πεδίο του κελύφους της δεξαμενής που δέχεται την θερμική ακτινοβολία είναι μη-ομοιόμορφο τόσο καθ' ύψος όσο και κατά την περιφέρεια της, και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι η θέση της φλεγόμενης δεξαμενής, η μεταξύ τους απόσταση, οι διαμέτροι 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 [1]. Η εργασία επικεντρώνεται στην περίπτωση που η δεξαμενή είναι κενή (χωρίς την παρουσία του υγρού καυσίμου) με απώτερο σκοπό την διερεύνηση των μηχανισμών που οδηγούν στην αστοχία (λυγισμός κυλινδρικού κελύφους) καθώς και στον προσδιορισμό της κρίσιμης θερμοκρασίας στην οποία εμφανίζεται.

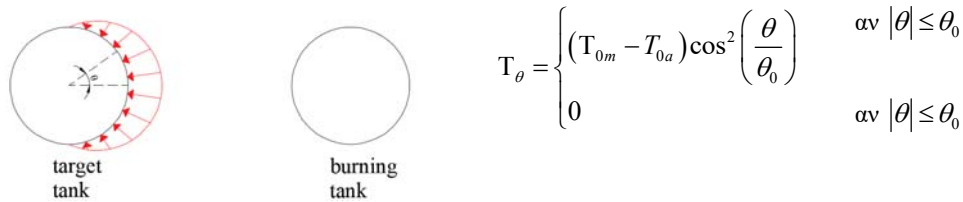
3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Έστω δύο γειτονικές κυλινδρικές μεταλλικές δεξαμενές της ίδιας διαμέτρου των οποίων η μεταξύ τους απόσταση είναι ίση με την διάμετρο τους. Η μία από τις δύο δεξαμενές φλέγεται χωρίς όμως να υπάρχει μετάδοση της πυρκαγιάς στις παρακείμενες δεξαμενές. Η δεξαμενή που φλέγεται (πηγή) μεταδίδει μέσω ακτινοβολίας θερμότητα στην δεξαμενή στόχο (Σχ. 1). 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. Σημειώνεται ότι στα πλαίσια της εργασίας η δεξαμενή στόχος θεωρείται κενή, δηλαδή δεν περιέχει καύσιμη ύλη, περίπτωση που αντιστοιχεί στην δυσμενέστερη κατάσταση μιας και η παρουσία του υγρού δρα ευνοϊκά στα τοιχώματα που είναι σε επαφή με αυτό.



Σχ. 1: Μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας από την δεξαμενή πηγή στη δεξαμενή στόχο.

Ο υπολογισμός του θερμοκρασιακού πεδίου της δεξαμενής περιλαμβάνει την επίλυση του προβλήματος μεταφοράς θερμότητας και τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα είναι ιδιαίτερα 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 [2] και περιγράφεται από την εξίσωση του Σχ. 2. Πρόκειται για μια τετραγωνική συνημιτονοειδή συνάρτηση της γωνίας θ . Το προφίλ αυτό προέκυψε από αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων, με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, για την επίλυση του προβλήματος μετάδοσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας από τη φλεγόμενη δεξαμενή στη δεξαμενή στόχο. Το συγκεκριμένο προφίλ αν και βασίζεται σε παραδοχές είναι αρκετά ακριβές και υιοθετείται και από άλλους ερευνητές [3]. Στο θερμοκρασιακό προφίλ του Σχ.1, θ_0 είναι η κρίσιμη γωνία που καθορίζει την θερμαινόμενη ζώνη, T_{0m} είναι η θερμοκρασία του πιο θερμαινόμενου μεσημβρινού και T_{0a} είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Σχ. 2: Το θερμοκρασιακό προφίλ και η εξίσωση που το περιγράφει.

Η εργασία επικεντρώνεται στην μελέτη 4 διαφορετικών δεξαμενών σύμφωνα με τον Πίν. 1. Πρόκειται για λεπτότοιχες χαλύβδινες δεξαμενές αποθήκευσης πετρελαιοειδών με σταθερή οροφή. Για διάμετρο ίση με 20 m εξετάζονται 3 διαφορεικά ύψη (H= 10 m, 20 m και 40 m) και επιπρόσθετα μελετάται και η περίπτωση της δεξαμενής με διάμετρο D= 40 m και ύψος H = 20 m. Αρχικά η εργασία επικεντρώνεται στη δεξαμενή με H=D=20 m και στη συνέχεια εξετάζονται οι υπόλοιπες δεξαμενές με σκοπό να διερευνηθεί η επιρροή της λυγηρότητας στην απόκριση των κυλινδρικών κελυφών υπό ανομοιόμορφη θερμική φόρτιση.

Δεξαμενή	A	B	Γ	Δ
Διάμετρος D (m)	20	20	20	40
Ύψος H (m)	20	10	40	20

Πίν. 1. Οι δεξαμενές που μελετήθηκαν.

Όλες οι δεξαμενές διαθέτουν κωνική οροφή λεπτότοιχου μεταλλικού κελύφους με κλίση 10°. Σημειώνεται εδώ, ότι το στατικό σύστημα της οροφής (ζευκτά, διαδοκίδωση κτλ.) παίζει σημαντικό ρόλο στην λυγισμική απόκριση της δεξαμενής μιας και καθορίζει τις συνοριακές συνθήκες στην στέγη του κελύφους. Επιπρόσθετα, και το βάρος της οροφής επηρεάζει την γενικότερη συμπεριφορά της κατασκευής. Στην παρούσα εργασία δεν μελετάται κάποιο συγκεκριμένο στατικό σύστημα οροφής αλλά θεωρείται κωνική οροφή από μεταλλική λαμαρίνα μεταβλητού πάχους. Μέσω της μεταβολής ενός «ισοδύναμου πάχους (t_r)» επιτυγχάνεται η προσομοίωση των συνοριακών συνθηκών στην στέγη του κελύφους για διάφορα στατικά συστήματα. Η παραμετροποίηση του πάχους προφανώς δεν συνοδεύεται και από μεταβολή του ίδιου βάρους της οροφής. Το βάρος της οροφής, για την εκάστοτε δεξαμενή λαμβάνεται εμπειρικά από τεύχη μελετών διαφόρων δεξαμενών της πράξης. Το πάχος του κυλινδρικού κελύφους (t_c) είναι 1 cm, ενώ το πάχος της οροφής κλιμακώνεται σε εύρος τιμών $2t_c \leq t_r \leq 60t_c$.

4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Για την αριθμητική προσομοίωση και επίλυση του φυσικού προβλήματος του προηγούμενου κεφαλαίου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων MSC-MARC. Οι δεξαμενές του Πίν. 1 προσομοιώθηκαν με ισοπαραμετρικά στοιχεία κελύφους τεσσάρων κόμβων που λαμβάνουν υπόψη διατμητικές παραμορφώσεις (το στοιχείο 75 της βιβλιοθήκης του MARC). Στους κόμβους της βάσης της δεξαμενής δεσμεύθηκαν οι χωρικές μετατοπίσεις x,y,z ενώ τα στοιχεία της οροφής συνδέθηκαν με κοινούς κόμβους με τα στοιχεία της στέγης του κελύφους. Η προσομοίωση του υλικού λαμβάνει υπόψη της την μεταβολή των ιδιοτήτων του χάλυβα στις υψηλές θερμοκρασίες σύμφωνα με τις διατάξεις του EN 1993-1-2 [4]. Η θερμική φόρτιση ασκείται σαν επικόμβια θερμοκρασία στους κόμβους του κελύφους σύμφωνα με

το προφίλ του Σχ.2. Στη συνέχεια για την εύρεση των κρίσιμων θερμοκρασιών και των αντίστοιχων μορφών αστοχίας εφαρμόζονται 2 ειδών αναλύσεις. Γραμμική ελαστική ανάλυση λυγισμού (LBA) και γεωμετρική μη γραμμική θερμομηχανική ανάλυση (GNA). Στην περίπτωση της (GNA) η αριθμητική επίλυση βασίζεται στην χρήση ενός προχωρημένου επαναληπτικού αλγορίθμου επίλυσης των μη γραμμικών εξισώσεων τύπου μήκους-τόξου σε συνδυασμό με την χρήση της τεχνικής της τεχνητής απόσβεσης (Artificial Damping technique). Η προαναφερθείσα τεχνική επιτρέπει τον ακριβή εντοπισμό των κρίσιμων θερμοκρασιών είτε αυτές είναι απόρροια καθολικού είτε τοπικού λυγισμού.

5. ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ (LBA)-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η ιδιομορφική επίλυση του προβλήματος γίνεται με την αριθμητική μέθοδο Lanczos. Παρακάτω παρουσιάζονται οι 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 επιβαλλόμενης θερμοκρασίας (T_0) ενώ η άλλη είναι αντισυμμετρική ως προς τον ίδιο άξονα.

Δεξαμενή A (HxD=20m x 20m)					Δεξαμενή B (HxD=10m x 20m)				
Ιδιομορφή	$t_r=5t_c$	$t_r=10t_c$	$t_r=30t_c$	$t_r=60t_c$	Ιδιομορφή	$t_r=5t_c$	$t_r=10t_c$	$t_r=30t_c$	$t_r=60t_c$
1	112.2	110	112.2	120.8	1	141.2	139.6	139.6	185.3
3	114.4	111.9	113.3	121.1	3	141.8	139.9	139.9	186.1
5	123.8	121.5	120.5	122	5	163.3	161	161	212.1
Δεξαμενή C (HxD=40m x 20m)					Δεξαμενή D (HxD=20m x 40m)				
Ιδιομορφή	$t_r=5t_c$	$t_r=10t_c$	$t_r=30t_c$	$t_r=60t_c$	Ιδιομορφή	$t_r=5t_c$	$t_r=10t_c$	$t_r=30t_c$	$t_r=60t_c$
1	99.8	99.4	99.7	102.5	1	46.1	42.9	41.9	42.57
3	103.1	102.7	103.1	106	3	46.2	43	42	42.6
5	107.9	107.5	107.8	110.8	5	49.9	46.7	45.7	46.3

Πίν. 2. Κρίσιμες θερμοκρασίες λυγισμού σε °C.

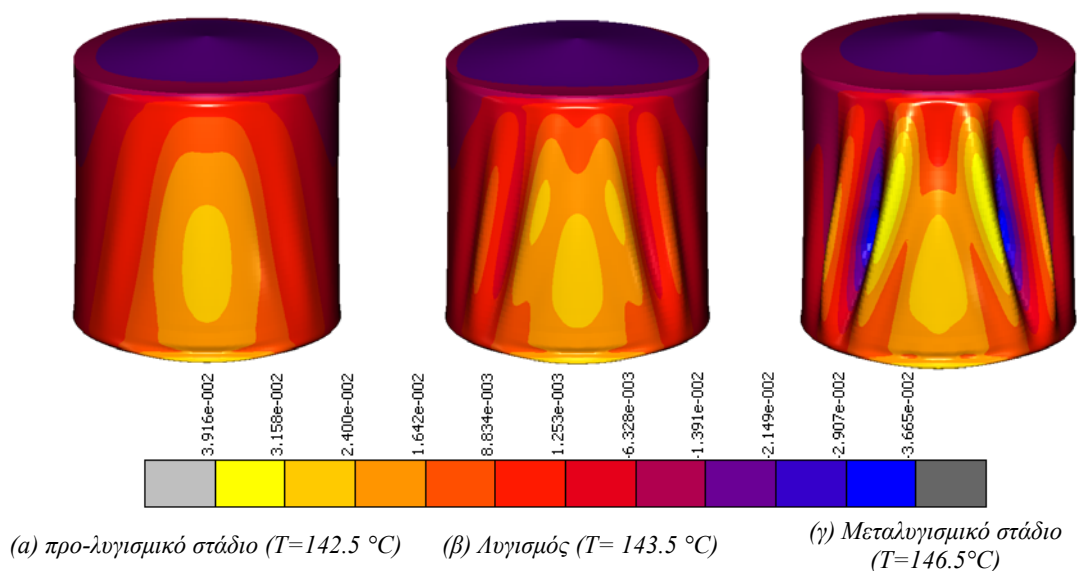


Σχ. 3: Τυπικές ιδιομορφές θερμικού λυγισμού για την δεξαμενή A (1^η, 3^η, 5^η και 7^η αντίστοιχα).

6. ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (GNA) -ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο Σχ. 4 παρουσιάζεται η προοδευτική προλυγισμική, λυγισμική και μεταλυγισμική συμπεριφορά της δεξαμενής τύπου Α. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσίασαν και οι δεξαμενές τύπου Β,Γ και Δ. Στον Πίν. 3 παρουσιάζονται οι κρίσιμες θερμοκρασίες για τους διάφορους τύπους δεξαμενών που εξετάστηκαν, ενώ ακολούθως αναλύεται η λυγισμική συμπεριφορά της δεξαμενής τύπου Α. Παρόμοια σχόλια ισχύουν και για τις άλλες δεξαμενές.

Στο διάγραμμα του Σχ. 5 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 $143,5^{\circ}\text{C}$ αποτέλεσμα που επιβεβαιώνεται και από τα στιγμιότυπα παραμόρφωσης της δεξαμενής του Σχ. 4, καθώς και από τον δρόμο ισορροπίας ενός κόμβου που βρίσκεται στην περιοχή της δεξαμενής που υπόκειται σε λυγισμό (Σχ. 6). Ειδικότερα, η δεξαμενή συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά μέχρι η θερμοκρασία να γίνει ίση με $T = 143.5^{\circ}\text{C}$). 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.

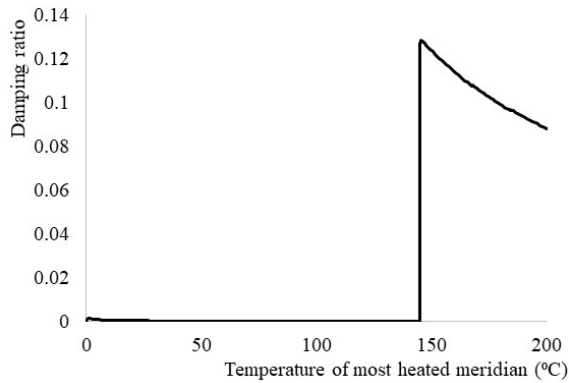


Σχ. 4: Προοδευτική παραμόρφωση της δεξαμενής τύπου Α πριν και μετά τον λυγισμό.

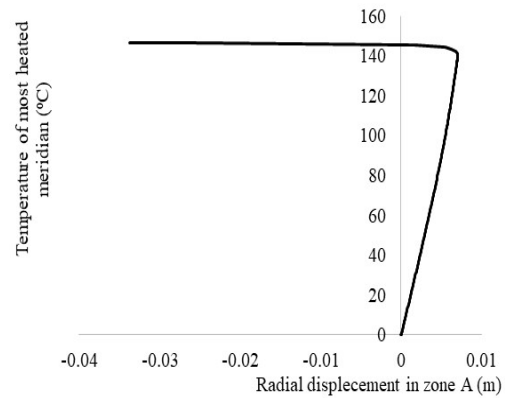
	Λυγηρότητα	$t_r=5t_c$	$t_r=10t_c$	$t_r=15t_c$	$t_r=30t_c$	$t_r=50t_c$	$t_r=60t_c$
Δεξαμενή Α	1	143.0	143.5	138.8	147.8	138.0	139.4
Δεξαμενή Β	0.5	224.7	202.2	196.2	197.7	214.2	227.7
Δεξαμενή Γ	2	100.0	99.0	89.0	99.3	130.4	115.8
Δεξαμενή Δ	0.5	109.8	94.8	91.8	91.3	90.3	93.3

Πίν. 3. Κρίσιμες θερμοκρασίες λυγισμού (σε $^{\circ}\text{C}$) για τις διάφορες δεξαμενές με χρήση GNA.

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. Η αστάθεια που εκδηλώνεται στην δεξαμενή για θερμοκρασία ίση με $T_{cr,GMNA} = 143.5 \text{ }^\circ\text{C}$ είναι αποτέλεσμα της δράσης των θλιπτικών μεσημβρινών μεμβρανικών τάσεων.



Σχ.5: Εξέλιξη του λόγου απόσβεσης ως προς τη θερμοκρασία.



Σχ. 6: Διάγραμμα ακτινικών μετατοπίσεων στη λυγισμική περιοχή ως προς τη θερμοκρασία.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν άρθρο μελετήθηκε η λυγισμική απόκριση κυλινδρικών λεπτότοιχων μεταλλικών δεξαμενών σταθερής οροφής υπό ανομοιόμορφη θερμική καταπόνηση. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων η αστοχία είναι αποτέλεσμα εμφάνισης καθολικού λυγισμού συμμετρικής ή αντισυμμετρικής μορφής που εκδηλώνεται στην περιοχή που η δεξαμενή καταπονείται θερμικά. Ανάλογα με τις διαστάσεις της δεξαμενής ή κρίσιμη θερμοκρασία λυγισμού είναι της τάξης των 100-230 $^\circ\text{C}$. Οι δεξαμενές παρουσιάζουν μεταλυγισμική αντοχή στην οποία δύναται να υπάρξει ακαριαία μεταβολή της λυγισμικής μορφής (διακλάδωση της λύσης).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Godoy L. A. and Batista-Abreu J.C., “Buckling of fixed-roof aboveground oil storage tanks under heat induced by an external fire”, *Thin-Walled Structures*, 52, 90-101, 2012.
- [2] Liu Y., “Thermal buckling of metal oil tanks subjected to an adjacent fire”, PhD Dissertation, Univeristy of Edinburgh.
- [3] MSC Software Corporation, *MSC Marc, Volume A: Theory and User Information*, Version 2010.
- [4] EN1993 1-2, “Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-2: General rules-Structural fire design”, Brussels, CEN 2007

NONLINEAR THERMAL BUCKLING RESPONSE OF FIXED-ROOF TANKS UNDER NON-UNIFORM HEATING

Alexandra-Maria Kefaki

Civil Engineer,
Lab. Structural Analysis and Design, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Thessaly,
Volos, Greece
marisa93k@gmail.com

Daphne Pantousa

Dr. Civil Engineer, Msc,
Lab. Structural Analysis and Design, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Thessaly,
Volos, Greece
dpantousa@gmail.com

Konstantinos Tzaros

Dr. Civil Engineer, Msc,
Lab. Structural Analysis and Design, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Thessaly,
Volos, Greece
ktzaros@civ.uth.gr

SUMMARY

The problem addressed in this paper is the thermal buckling behavior of thin-walled steel cylindrical fixed-roof tanks under non-uniform loading induced by an adjacent tank. The specific type of thermal loading can be triggered in case of a neighbour tank fire where the heat is transferred mainly through radiation. Since the calculation of the temperature field of the heated tank lies in other scientific fields (e.g. Computational Fluid Dynamic), a thermal pattern, proposed in literature, is used for the simulation of the fire-induced load. The study is conducted numerically through the Finite Element method, using coupled thermo-mechanical analysis. The general purpose Finite Element code MSC Marc, is used for the simulation. Three-dimensional models are developed using shell elements and two different types of analyses are conducted. Through Linear Buckling Analysis the critical buckling temperatures and the corresponding eigenmodes are obtained. In order to predict the full equilibrium path as well as the possible post-buckling behaviour a thermomechanical Geometric Non Linear Analysis is also conducted. The latter shows that the failure of the tanks, due to non-uniform heating, is happened for critical temperatures which lie in the range of 100-230 °C depended on the dimensions of the tanks. The failure buckling mode is a symmetrical or unsymmetrical and is similar to the one obtained by the LBA.