

ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΕΙΣΜΟΥ

Χρύσανθος Μαραβέας

Πολιτικός Μηχανικός, MSc, MSc, DIC

X. ΜΑΡΑΒΕΑΣ & ΣΥΝΕΡΓΑΤΕΣ Ε.Ε.

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: c.maraveas@maraveas.gr

Κωνσταντίνος Μιάμης

Πολιτικός Μηχανικός, MSc, PhD

X. ΜΑΡΑΒΕΑΣ & ΣΥΝΕΡΓΑΤΕΣ Ε.Ε.

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: Kostas.Miamis@hotmail.com

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος του συγκεκριμένου άρθρου είναι η παρουσίαση μελέτης ελέγχου επάρκειας, μέσω προσομοιώσεων και αναλυτικών υπολογισμών, δύο υφιστάμενων κυλινδρικών μεταλλικών δεξαμενών για διάφορες στάθμες πλήρωσης, που πραγματοποιήθηκε για τη ΜΟΤΟΡΟΪΛ ΕΛΛΑΣ, Διυλιστήριο Κορίνθου Α.Ε., με σκοπό τη συνεισφορά ρεαλιστικών δεδομένων στο αντικείμενο της σεισμικής συμπεριφοράς των μεταλλικών δεξαμενών. Για το λόγο αυτό, γίνεται αναφορά στην τωρινά διαμορφωμένη φιλοσοφία σχεδιασμού, ακολουθούμενη από εκτενή περιγραφή των δεξαμενών. Παρουσιάζονται, επίσης, αναλυτικοί υπολογισμοί με βάση διεθνείς και εγχώριους κανονισμούς (Αμερικάνικο Κανονισμό API650, Ευρωκώδικα 8 και τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό ΕΑΚ2000) καθώς και αποτελέσματα προσομοιώσεων πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκαν για την εκπόνηση της εν λόγω μελέτης.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σεισμική απόκριση των μεταλλικών δεξαμενών, αν και έχει απασχολήσει τη διεθνή επιστημονική κοινότητα τις τελευταίες δεκαετίες, εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο έρευνας και πολλές φορές είναι ο καθοριστικός παράγοντας στο σχεδιασμό και στη διαστασιολόγησή τους. Συνήθεις περιπτώσεις αστοχιών μεταλλικών δεξαμενών που έχουν καταπονηθεί από σεισμό είναι οι εξής: i) αποκόλληση των σωληνώσεων που είναι συνδεδεμένες περιμετρικά της δεξαμενής, ii) αστοχία τύπου «elephant's foot» iii) αποκόλληση της βάσης έδρασης από το περιμετρικό κέλυφος, iv) βύθιση της επιπέδουσας

οροφής ν) αστοχία του περιμετρικού κελύφους λόγω της πίεσης του κυματισμού. Κυρίως θέμα του άρθρου αποτελεί η διερεύνηση της συμπεριφοράς δύο μεγάλων μεταλλικών δεξαμενών υποβαλλόμενων σε σεισμική διέγερση, μέσω αναλυτικών μεθόδων υπολογισμού που αναφέρονται σε διάφορους κανονισμούς και αναλύσεων βάσει της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

3. ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Η ιδιαιτερότητα της συμπεριφοράς μεταλλικών δεξαμενών υπό σεισμική διέγερση έγκειται στην αλληλεπίδραση μεταξύ τοιχώματος και περιεχόμενου υγρού, εξαιτίας της ασύζευκτης κίνησης μεταξύ τους. Η σύγχρονη φιλοσοφία σχεδιασμού ορίζει δύο κινήσεις για το περιεχόμενο υγρό στην περίπτωση δεξαμενών με άκαμπτα τοιχώματα. Στην πρώτη, που ονομάζεται «άκαμπτη παλμική», το υγρό ακολουθεί την κίνηση «στερεού σώματος» των τοιχωμάτων (ικανοποίηση των συνοριακών συνθηκών). Στη δεύτερη («μεταφορική» κίνηση), το υγρό κινείται κατακόρυφα εξαιτίας της ασυμβατότητας με το κέλυφος της δεξαμενής (ικανοποίηση συνθηκών ισορροπίας στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού).

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ

Οι δύο δεξαμενές (T-776 και T-761) που παρουσιάζονται βρίσκονται στις εγκαταστάσεις διυλιστηρίων της ΜΟΤΟΡ ΟΪΛ ΕΛΛΑΣ ΑΕ, στους Αγ. Θεοδώρους Κορινθίας. Οι δεξαμενές είναι κυλινδρικής μορφής, με διαμέτρους 47m (T-776) και 88,5m (T-761), ενώ τα ύψη τους είναι 20m (T-776) και 20,35m (T-761) αντίστοιχα και εδράζονται επί κυκλικών άκαμπτων θεμελίων. Η δεξαμενή T-776 έχει κλειστή οροφή κωνικής μορφής στην κορυφή της. Για την καλύτερη κατανόηση και μελέτη της σεισμικής απόκρισης των δεξαμενών, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για διάφορες στάθμες πλήρωσής τους. Για τη δεξαμενή T-776 εξετάστηκαν τέσσερις διαφορετικές στάθμες, ενώ για τη δεξαμενή T-761 δύο. Οι παραπάνω πληροφορίες συνοψίζονται στον Πίνακα 1.

Όνομασία Δεξαμενής	Εξεταζόμενη περίπτωση	Στάθμη πλήρωσης (m)	Ύψος δεξαμενής (mm)	Διάμετρος δεξαμενής (mm)	Οροφή
T-776	I	18,83	20032	46950	Ναι
T-776	II	14,12	20032	46950	Ναι
T-776	III	9,42	20032	46950	Ναι
T-776	IV	4,70	20032	46950	Ναι
T-761	I	16,38	20350	88556	Όχι
T-761	II	11,40	20350	88556	Όχι

Πίν. 1- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δεξαμενών

Μια ρεαλιστική παρουσίαση των δεξαμενών γίνεται μέσω φωτογραφιών που λήφθηκαν στις εγκαταστάσεις της ΜΟΤΟΡΟΪΛ ΕΛΛΑΣ, Διυλιστήρια Κορίνθου Α.Ε. Στη Φωτογραφία 1 παρουσιάζεται η δεξαμενή T-776, ενώ η δεξαμενή T-761 διακρίνεται στη Φωτογραφία 2.



Φωτ. 1- Φωτογραφική λήψη δεξαμενής T-776



Φωτ. 2- Φωτογραφική λήψη δεξαμενής T-761

5. ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟ ΑΡΙ650

Ο Αμερικάνικος κανονισμός API650 [1], εμπεριέχει μια τυποποιημένη μέθοδο (μέσω ορισμού συγκεκριμένων παραμέτρων) σχεδιασμού κυλινδρικών μεταλλικών δεξαμενών με βάση τη γεωμετρία τους. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στον περιορισμό των μέγιστων αναπτυσσόμενων τάσεων (που οφείλονται σε υδροστατικές πιέσεις) κάτω από καθορισμένα επιτρεπτά όρια. Ο συγκεκριμένος κανονισμός προβλέπει επίσης και διαδικασία αντισεισμικού σχεδιασμού των εν λόγω δεξαμενών. Σε αυτή ορίζονται δύο «ισοδύναμες» μάζες για το περιεχόμενο υγρό, έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη οι δύο συνιστώσες πίεσης του υγρού («άκαμπτη παλμική»-«μεταφορική») που αναπτύσσονται λόγω σεισμού. Με βάση αυτές γίνεται υπολογισμός της ροπής ανατροπής. Για τον έλεγχο σε ανατροπή ορίζεται μια «ενεργή» μάζα του περιεχόμενου υγρού της δεξαμενής. Αν και εμπεριέχει υπολογισμό των θλιπτικών τάσεων που αναπτύσσονται στο κέλυφος, η συγκεκριμένη μέθοδος δε λαμβάνει υπόψη πιθανή αστοχία από εφελκυστικές τάσεις ούτε και προβλέπει τον υπολογισμό του μέγιστου ύψους κυματισμού.

Ακολουθούν ο έλεγχος επάρκειας του πάχους των ελασμάτων για τη δεξαμενή T-776 (Πίνακας 2) και για τη δεξαμενή T-761 (Πίνακας 3) με βάση τον εν λόγω κανονισμό. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε για τη μέγιστη επιτρεπτή στάθμη πληρώσεως κάθε δεξαμενής.

Αριθμός Δακτυλίου	Ποιότητα Χάλυβα	Πλάτος Ελασμάτων (m)	Ύψος (m)	Απαιτούμενο Πάχος (mm)	Υφιστάμενο Πάχος (mm)
1	BS4360 GR50C	2438	18,83	22,24	22,25
2	BS4360 GR50C	2438	16,39	18,30	18,93
3	BS4360 GR50B	2438	13,95	15,51	16,24
4	BS4360 GR50B	2438	11,52	12,73	13,57
5	BS4360 GR50B	2438	9,08	9,96	10,90
6	BS4360 GR50B	1940	6,64	7,20	8,22
7	BS4360 GR43A	1940	4,70	5,75	8,00
8	BS4360 GR43A	1940	2,76	3,24	8,00
9 (κορυφή)	BS4360 GR43A	1940	0,82	0,86	8,00

Πίν. 2- Έλεγχος επάρκειας ελασμάτων δεξαμενής T-776 κατά API650

Αριθμός Δακτυλίου	Ποιότητα Χάλυβα	Πλάτος Ελασμάτων (m)	Ύψος (m)	Απαιτούμενο Πάχος (mm)	Υφιστάμενο Πάχος (mm)
1	ASTM A36M	2436	16,38	37,40	37,40
2	ASTM A36M	2436	13,95	34,51	37,40
3	ASTM A36M	2436	11,51	27,84	37,40
4	ASTM A36M	2436	9,08	22,03	37,40
5	ASTM A36M	2436	6,64	15,58	37,40
6	ASTM A36M	2436	4,21	9,35	37,40
7	ASTM A36M	2436	1,77	3,49	37,40
8	ASTM A36M	2436			37,40
9 (κορυφή)	ASTM A36M	862			37,40

Πίν. 3- Έλεγχος επάρκειας ελασμάτων δεξαμενής T-761 κατά API650

Εφαρμόζοντας τον αντισεισμικό σχεδιασμό του API650 [1], για οριζόντια επιτάχυνση εδάφους 0.24g (Κόρινθος) και για τιμή εδαφικής παραμέτρου $S_3 = 1.5$ (κατά API650 [1]), πραγματοποιήθηκε έλεγχος σε ανατροπή και υπολογισμός των μέγιστων διαμήκων θλιπτικών τάσεων για τις δύο δεξαμενές. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.

Όνομασία Δεξαμενής	Στάθμη πλήρωσης (m)	Ροπή Ανατροπής (kNm)	«Ενεργό» Βάρος (kN)	Συντελεστής Ασφάλειας	Μέγιστη θλιπτική τάση (MPa)
T-776	18,83	243649	14809	1,43	0,60
T-776	14,12	117182	13231	2,65	0,33
T-776	9,42	34759	11357	7,67	0,15
T-776	4,70	7481	8924	28,00	0,11
T-761	16,38	299731	82572	12,20	0,24
T-761	11,40	137996	71638	22,99	0,18

Πίν. 4- Αποτελέσματα ελέγχου δεξαμενών σε σεισμό κατά API650

6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 8 ΚΑΙ ΤΟΝ ΕΑΚ2000

Ο Ευρωκώδικας 8 [2] αναπτύσσει μια διαδικασία υπολογισμού των δύο τύπων πιέσεων που προκύπτουν από τις κινήσεις του περιεχόμενου υγρού, δηλαδή την «άκαμπτη παλμική» και τη «μεταφορική», μέσω πολύπλοκων αναλυτικών τύπων. Παρέχει, επίσης, τη δυνατότητα υπολογισμού της τέμνουσας και της ροπής βάσης για τις δύο προαναφερθείσες κινήσεις. Πέραν αυτού, προβλέπει τρόπους επαλληλίας των πιέσεων και των εντατικών μεγεθών των δύο κινήσεων. Παρέχει, ακόμη, αναλυτικό τύπο για τον υπολογισμό του μέγιστου ύψους κυματισμού. Ο ΕΑΚ2000 [3] δεν περιέχει μεθοδολογία αντισεισμικού σχεδιασμού δεξαμενών. Παρόλα αυτά περιέχει φάσμα σχεδιασμού προσαρμοσμένο στα σεισμικά δεδομένα του ελλαδικού χώρου.

Για τον έλεγχο των δεξαμενών έγινε υπολογισμός των ανωτέρω πιέσεων για τις διάφορες στάθμες πλήρωσης που εξετάστηκαν. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε τόσο το φάσμα του Ευρωκώδικα 8 (EN 1998-1 [4]) όσο και το αντίστοιχο του ΕΑΚ2000 [3]. Εκτενής παρουσίαση των εν λόγω αποτελεσμάτων γίνεται στη βιβλιογραφική αναφορά [5]. Στον Πίνακα 5 γίνεται σύγκριση του μέγιστου ύψους κυματισμού ανάλογα με το φάσμα σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκε.

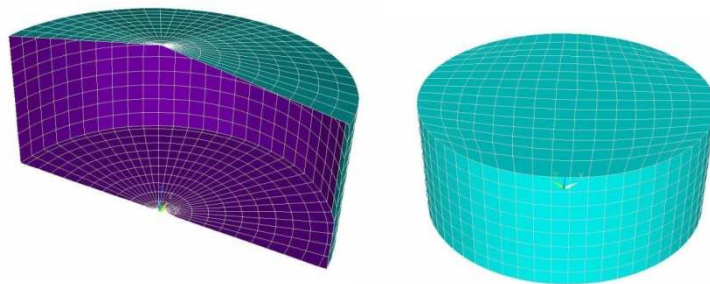
Όνομασία Δεξαμενής	Στάθμη πλήρωσης (m)	Μέγιστο Ύψος Κυματισμού EN1998-4 (m)	Μέγιστο Ύψος Κυματισμού ΕΑΚ2000 (m)
T-776	18,83	1,13	3,24
T-776	14,12	0,64	2,73

T-776	9,42	0,20	2,42
T-776	4,70	0,10	2,08
T-761	16,38	0,18	3,93
T-761	11,40	0,18	3,39

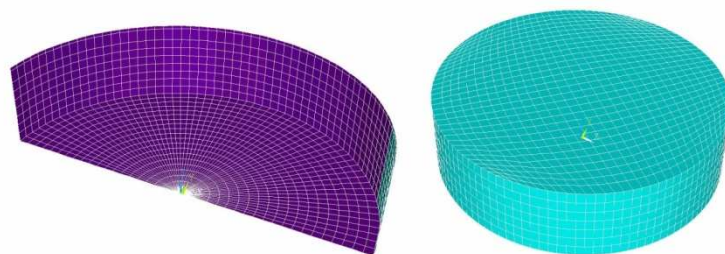
Πίν. 5- Μέγιστο ύψος κυματισμού κατά Ευρωκώδικα 8 και ΕΑΚ2000

7. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Εκτός των αναλυτικών μεθόδων, για τον έλεγχο των δεξαμενών πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις μέσω προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε δεξαμενή και στάθμη πλήρωσης δημιουργήθηκε ξεχωριστό προσομοίωμα (έξι συνολικά). Για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ANSYS [6]. Η προσομοίωση του κελύφους, της πλάκας έδρασης και της οροφής (όπου υφίσταται) των δεξαμενών πραγματοποιήθηκε μέσω ισοπαραμετρικών στοιχείων κελύφους τριών κόμβων (τριγωνικά στοιχεία) και τεσσάρων κόμβων, που συνδυάζουν καμπτική και μεμβρανική λειτουργία. Το περιεχόμενο υγρό προσομοιώθηκε με τη χρήση στοιχείων όγκου τύπου «Solid» με τρεις μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο στα οποία προσδόθηκαν οι ιδιότητες ασυμπίεστου υγρού. Η διακριτοποίηση των δεξαμενών παρουσιάζεται στο Σχήμα 1 (δεξαμενή T-776) και στο Σχήμα 2 (δεξαμενή T-761).



Σχ. 1- Διακριτοποίηση ελασμάτων (αριστερά) και υγρού (δεξιά) δεξαμενής T-776



Σχ. 2- Διακριτοποίηση ελασμάτων (αριστερά) και υγρού (δεξιά) δεξαμενής T-761

Εκτενής αναφορά των φορτίσεων και των συνοριακών συνθηκών μεταξύ της διεπιφάνειας του υγρού γίνεται στη βιβλιογραφική αναφορά [5]. Σχετικά με τη διαδικασία ανάλυσης, αναφέρεται ότι αφού αρχικά πραγματοποιήθηκαν ελαστικές αναλύσεις με επιβολή μόνο

των κατακόρυφων φορτίων και υδροστατικών πιέσεων, προσδιορίστηκαν οι ιδιομορφές των δεξαμενών και εν συνεχεία πραγματοποιήθηκαν δυναμικές φασματικές αναλύσεις (με χρήση του φάσματος σχεδιασμού του Ευρωκώδικα 8 [4]) για τον προσδιορισμό της σεισμικής απόκρισης των δεξαμενών. Συνοπτικά αποτελέσματα αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.

Όνομασία Δεξαμενής	Στάθμη πλήρωσης (m)	Μέγιστη Εφελκυστική τάση (MPa)	Μέγιστη Θλιπτική τάση (MPa)	Μέγιστο Ύψος Κυματισμού (m)
T-776	18,83	262,77	4,80	0,96
T-776	14,12	211,74	11,59	0,81
T-776	9,42	166,93	11,20	0,64
T-776	4,70	97,25	17,26	0,28
T-761	16,38	184,02	16,01	0,32
T-761	11,40	134,92	10,90	0,23

Πίν. 6- Αποτελέσματα προσομοιώσεων δεξαμενών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

8. ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Οι δύο δεξαμενές θεωρούνται επαρκείς έναντι σεισμού σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς. Οι τάσεις που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις των πεπερασμένων στοιχείων δεν αναμένεται να προκαλέσουν αστοχία του υλικού.
2. Ο Αμερικάνικος κανονισμός API 650 [1] προβλέπει μειωμένες θλιπτικές τάσεις σε σχέση με αυτές των προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων.
3. Παρατηρείται ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ του Ευρωκώδικα 8 [2] και των προσομοιώσεων αναφορικά με το μέγιστο ύψος κυματισμού. Αντιθέτως, η χρήση του φάσματος του ΕΑΚ2000 [3] οδηγεί σε αυξημένες τιμές (σε ορισμένες περιπτώσεις άνω του τριπλασίου) για το εν λόγω μέγεθος.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (12 pt, Times new Roman font bold)

- [1] API Standard 650. “Welded Steel Tanks for Oil Storage”, Tenth Edition, 1998.
- [2] EN 1998-4. “Eurocode 8-Design of structures for earthquake resistance - Part 4: Silos, tanks and pipelines”, 2006.
- [3] “Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός ΕΑΚ2000”, 2000.
- [4] EN 1998-1. “Eurocode 8-Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings”, 2004.
- [5] Maraveas, C. “Analysis and structural behavior of cylindrical steel tanks under seismic effects”, 12th International Conference of Metal Structures, Wroclaw, Poland, 2011.
- [6] Swanson Analysis Systems, Inc. “ANSYS Software”, 1992.

ADEQUACY OF CYLINDRICAL STEEL TANKS UNDER THE EFFECT OF SEISMIC ACTION

Chrysanthos Maraveas

Civil Engineer, MSc, MSc, DIC

C. MARAVEAS PARTNERSHIP

Athens, Greece

e-mail: c.maraveas@maraveas.gr

Konstantinos Miamis

Civil Engineer, MSc, PhD

C. MARAVEAS PARTNERSHIP

Athens, Greece

e-mail: Kostas_Miamis@hotmail.com

SUMMARY

The objective of this paper is to present the structural adequacy study, via simulation and analytical methods, of two existing cylindrical steel tanks for various levels of contained liquid, which was carried out for MOTOR OIL HELLAS, Corinth Refineries S.A., with the purpose of contributing realistic data on the topic of seismic response of steel tanks. For this reason, reference is given to the current design philosophy, followed by detailed description of the tanks. Analytical calculations based on international and domestic design Codes (American Code API650, Eurocode 8 and the Greek Seismic Code EAK2000) are also presented, followed by finite element simulation results that were obtained during the preparation of the aforementioned study.