

“ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΥΓΡΩΝ ΧΩΡΙΣ ΑΓΚΥΡΩΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ & ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ”

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο του παρόντος ερευνητικού έργου είναι η ανάπτυξη του απαραίτητου υπόβαθρου (υπολογιστικού και πειραματικού) για την ανάλυση δεξαμενών υγρών, με στόχο την κατανόηση της επιρροής διαφόρων φαινομένων στη σεισμική συμπεριφορά τους. Οι εργασίες που διεξήχθησαν, κατά φάσεις και στάδια είναι οι παρακάτω :

1η φάση: Μόρφωση πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό δεξαμενών.

Ένας από τους στόχους του προγράμματος ήταν η *μόρφωση απλών αλλά αξιόπιστων πεπερασμένων στοιχείων* για τον αποτελεσματικό υπολογισμό δεξαμενών. Για τον σκοπό αυτόν αναπτύχθηκαν τετράπλευρα και τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία για επιφανειακούς φορείς, καθώς και κατάλληλα στοιχεία δοκού. Τα στοιχεία αυτά συνδυάζουν την απλότητα που απαιτείται για τη μείωση του υπολογιστικού όγκου με έναν ικανοποιητικό βαθμό ακρίβειας. Η γενικευμένη εργική πρόταση που χρησιμοποιήθηκε ως αφετηρία για την διακριτοποίηση επιτρέπει την βελτιστοποίηση του έργου παραμόρφωσης, ενώ το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα θετικά ορισμένο μητρώο δυσκαμψίας που μπορεί να ενσωματωθεί χωρίς προβλήματα σε υπάρχοντα προγράμματα. Με την εισαγωγή κατάλληλων παραδοχών, τόσο για τις μετατοπίσεις και στροφές, όσο και για τις τάσεις και παραμορφώσεις, αποφεύγονται εγγενείς δυσκολίες αντιστοίχων πεπερασμένων στοιχείων που βασίζονται στην κλασική παραδοχή της αρχής των δυνατών έργων και σε θεωρίες που λαμβάνουν υπόψη την επιρροή των διατμητικών παραμορφώσεων (π.χ. φαινόμενα εμπλοκής και μηδενικής ενέργειας).

Το *τετράπλευρο C^0 πεπερασμένο στοιχείο* για κελύφη που αναπτύχθηκε, διαθέτει τέσσερις κόμβους και χρησιμοποιεί γραμμικές συναρτήσεις παρεμβολής για τις μετατοπίσεις και στροφές. Οι κατάλληλες παραδοχές για τις παραμορφώσεις (ιδίως για τις εγκάρσιες διατμητικές παραμορφώσεις) οδηγούν σε στοιχεία που δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο εμπλοκής. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε ένα *απλό τριγωνικό στοιχείο* με γενικευμένη έκφραση διατμητικής ενέργειας που δεν επιτρέπει τη σύζευξη καμπτικών και διατμητικών παραμορφώσεων. Το απλό αυτό στοιχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί, εκτός των άλλων, και για την καλύτερη περιγραφή πολύπλοκων γεωμετριών. Με σκοπό τη μόνωση ακόμη απλούστερων στοιχείων με λιγότερους βαθμούς ελευθερίας και ευρύ πεδίο εφαρμογών, αναπτύχθηκε ένα *τριγωνικό στοιχείο με επιβολή διακριτών παραδοχών Kirchhoff*. Το στοιχείο αυτό είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για πολύ λεπτά κελύφη, καθώς και για σύνθετες κατασκευές. Επίσης αναπτύσσεται ένα *στοιχείο δοκού* συμβατό με τα προτεινόμενα τριγωνικά στοιχεία κελύφους για τον *υπολογισμό δεξαμενών με δοκούς ενίσχυσης*. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση διαφόρων φορέων καταδεικνύουν την καταλληλότητα των απλών προτεινόμενων στοιχείων για την ικανοποιητική περιγραφή διαφόρων χαρακτηριστικών εντατικών καταστάσεων.

Τα παραπάνω πεπερασμένα στοιχεία αναπτύχθηκαν κατά το πρώτο στάδιο της 1^{ης} φάσης. Στο δεύτερο στάδιο της 1^{ης} φάσης δόθηκε έμφαση σε γεωμετρικά μη γραμμικά προβλήματα. Για τον σκοπό αυτό διατυπώνεται μία μικροαυξητική τροποποιημένη μορφή της εργικής πρότασης των Hu-Washizu. Για την περιγραφή του προβλήματος προτείνεται μία διαφορετική από τις συνήθως χρησιμοποιούμενες μεθοδολογία. Απόρροια της προτεινόμενης προσέγγισης είναι η δυνατότητα διάσπασης της όλης παραμόρφωσης σε κίνηση στερεού σώματος και σε “καθαρή” παραμόρφωση του στοιχείου. Διατυπώνονται οι σχετικές εξισώσεις του προβλήματος, με την κάθε είδους γεωμετρική μη γραμμικότητα να λαμβάνεται υπόψη αποκλειστικά στους μετασχηματισμούς που σχετίζονται με την κίνηση στερεού σώματος. Για τη διε-

ξαγωγή των υπολογισμών χρησιμοποιείται ο “τροποποιημένος θαμισμός τύπου Newton-Raphson” (modified Newton-Raphson iteration). Περιγράφονται επίσης οι κυριότερες στρατηγικές για την παρακολούθηση της μη γραμμικής απόκρισης κοντά σε οριακά σημεία. Το αριθμητικό παράδειγμα στο τέλος του κεφαλαίου καταδεικνύει την ικανότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας να περιγράψει τη γεωμετρικά μη γραμμική συμπεριφορά επιφανειακών φορέων.

2η φάση: Διατύπωση μεθοδολογίας για τη μελέτη του προβλήματος επαφής (ανασηκώμα βάσης).

Κατά τη διάρκεια της 2^{ης} φάσης (*πρώτο στάδιο*) αναπτύχθηκε μία ορθολογιστική μέθοδος αντιμετώπισης του προβλήματος ανασηκώματος της βάσης της δεξαμενής και αποκόλλησής της από το έδαφος. Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται σε θεωρήματα που εφαρμόζονται σε προβλήματα τετραγωνικής βελτιστοποίησης. Με τη βοήθεια των θεωρημάτων αυτών, το μονόπλευρο πρόβλημα που χαρακτηρίζει το φαινόμενο του ανασηκώματος της βάσης αντικαθίσταται από μία σειρά κλασσικών αμφίπλευρων προβλημάτων. Η προτεινόμενη μέθοδος παρουσιάζει μία σειρά από πλεονεκτήματα, όπως ενδεικτικά: Η μέθοδος εγγυάται σύγκλιση, δεν υπάρχει ανάγκη εισαγωγής αρχικών παραδοχών σχετικά με την ενεργό ζώνη, υπάρχουν κριτήρια για τον έλεγχο τόσο των επιμέρους λύσεων όσο και της επαναληπτικής διαδικασίας υπολογισμού και, τέλος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν υφιστάμενα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων μετά από μικρές τροποποιήσεις.

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας της μεθόδου, αναλύθηκε μία σειρά χαρακτηριστικών προβλημάτων και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με γνωστές λύσεις. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόστηκε κατά τη διάρκεια της 6^{ης} φάσης για τη συγκριτική μελέτη της συμπεριφοράς χαρακτηριστικών δεξαμενών με τη βοήθεια αριθμητικών και πειραματικών μεθόδων.

Στο *δεύτερο στάδιο της 2^{ης} φάσης* μελετήθηκε το δυναμικό πρόβλημα επαφής εδάφους-δεξαμενής, με στόχο τη θεωρητική και αριθμητική διερεύνηση μιας κατηγορίας δυναμικών μονόπλευρων προβλημάτων που εμφανίζεται συχνά σε πρακτικές εφαρμογές. Θεωρήθηκαν δύο περιπτώσεις μονόπλευρης στήριξης: ανυποχώρητη έδραση σε μια απόσταση από το σώμα και μονόπλευρη ελαστική στήριξη. Επικαλούμενοι ανισωτικές σχέσεις και θεωρώντας κατάλληλες μεταβολές, αποδεικνύεται ότι η τοπική διατύπωση του προβλήματος μπορεί να εκφράζεται ισοδύναμα σαν ένα δυναμικό πρόβλημα, του οποίου η εργική πρόταση εκφράζεται με τη μορφή ανισότητας. Ακόμη, εξετάζονται οι ειδικές περιπτώσεις του ψευδοστατικού (quasistatic) και του στατικού προβλήματος και η ανισότητα παρουσιάζεται σε μία μορφή κατάλληλη για προβλήματα βελτιστοποίησης. Διακριτοποιώντας την εργική πρόταση ως προς τον χρόνο και χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η επίλυση του δυναμικού μονόπλευρου προβλήματος επιτυγχάνεται λύνοντας ένα στατικό πρόβλημα βελτιστοποίησης σε κάθε χρονικό βήμα. Το μη γραμμικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης αντιμετωπίζεται με μία μέθοδο που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των αλγόριθμων βελτιστοποίησης με τα πλεονεκτήματα των μεθόδων “δοκιμής και λάθους”. Τέλος παρατίθεται ένα παράδειγμα, με σκοπό, τόσο τη βαθύτερη κατανόηση της προτεινόμενης μεθόδου, όσο και τη διασαφήνιση της επιρροής ορισμένων παραμέτρων στη λύση, όπως το μέγεθος του βήματος και ο ακριβής προσδιορισμός του χρονικού βήματος.

3η φάση: Πειραματική μελέτη του ανασηκώματος της βάσης μέσα από τη μελέτη του στατικού προβλήματος.

Για το θέμα αυτό, διεξήχθη μία σειρά πειραμάτων στην “Διάταξη κεκλιμένης βάσης” που έχει κατασκευαστεί στο Εργαστήριο. Το πλεονέκτημα της διάταξης αυτής έγκειται στο γεγονός ότι μπορεί να μελετηθεί μία σειρά βασικών φαινομένων με σχετικά απλό και οικονομικό τρόπο.

Μελετήθηκαν δύο κυλινδρικές μεταλλικές δεξαμενές με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και πάχη τοιχωμάτων. Οι δεξαμενές αυτές φορτίστηκαν μέσα από τη διαδικασία της

διάταξης κεκλιμένης βάσης και η απόκρισή τους (παραμορφώσεις-μετατοπίσεις) κατεγράφη τόσο για το κέλυφος όσο και για τη βάση.

Η επεξεργασία και μελέτη των αποτελεσμάτων οδήγησε σε μια σειρά συμπερασμάτων, σχετικά με την επιρροή βασικών παραμέτρων (γεωμετρικές διαστάσεις, πάχος κελύφους, ύψος υγρού, και ένταση φόρτισης) στη συμπεριφορά δεξαμενών υγρών.

4η φάση: Πειραματική μελέτη δυναμικών χαρακτηριστικών της δεξαμενής.

Στη φάση αυτή διερευνήθηκαν στη Διάταξη Τεχνητών Σεισμών του Τμήματος Πολιτ. Μηχ/κών του Α.Π.Θ., τα δυναμικά χαρακτηριστικά δύο κυλινδρικών μεταλλικών δεξαμενών. Η πρώτη από αυτές (δεξαμενή Α) είχε διάμετρο βάσης 50cm και ύψος κελύφους 60cm, ενώ κατά τη διάρκεια της πειραματικής ακολουθίας ήταν πλήρης με νερό μέχρι ύψους 50cm. Η δεύτερη δεξαμενή (δεξαμενή Β2) είχε διάμετρο βάσης 1.0m και ύψος κελύφους 1.10m, ενώ κατά τη διάρκεια της πειραματικής ακολουθίας ήταν πλήρης με νερό μέχρι ύψους 1.0m. Και οι δύο δεξαμενές εξετάστηκαν για συνθήκες ελεύθερης έδρασης στην κινητή πλατφόρμα της σεισμικής τράπεζας, προσομοιώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο συνθήκες έδρασης πραγματικών δεξαμενών. Η πειραματική ακολουθία περιελάμβανε ημιτονοειδείς διεγέρσεις χαμηλού σχετικά εύρους και διεγέρσεις λευκού θορύβου για διάφορα επίπεδα έντασης και για τις δύο δεξαμενές. Η δεύτερη δεξαμενή (δεξαμενή Β2) υποβλήθηκε επιπλέον σε μια ακολουθία σεισμικών διεγέρσεων, με προοδευτική αύξηση της έντασης της διέγερσης, με βάση την πρωτότυπη καταγραφή της εδαφικής κίνησης από τον γνωστό σεισμό TAFT (1952). Η καταγραφή και εν συνεχεία μελέτη της απόκρισης των δεξαμενών, υπό τις πιο πάνω συνθήκες, επιτεύχθηκε με τη βοήθεια ηλεκτρονικών οργάνων (επιταχυνσιομέτρων, μηκυνσιομέτρων και ταινιών παραμόρφωσης) που προσαρμόστηκαν σε κατάλληλες θέσεις. Μέσα από κατάλληλη επεξεργασία αυτών των καταγραφών στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο των συχνοτήτων, καθώς και μέσα από τη σχετική συσχέτιση μετρήσεων της απόκρισης με αυτή της επιτάχυνσης της διέγερσης, έγινε δυνατή η εξεύρεση των δυναμικών χαρακτηριστικών των δεξαμενών σε κάθε περίπτωση. Η εξέταση αυτή επικεντρώθηκε στην απόκριση των επιταχύνσεων του μεταλλικού κελύφους σε διάφορες θέσεις, του ανασηκώματος της βάσης στη διεύθυνση κίνησης της σεισμικής τράπεζας και των κυματισμών στην ελεύθερη επιφάνεια του περιεχομένου υγρού, επίσης σε διάφορες θέσεις. Από τη διέγερση αυτή διαπιστώθηκε η μεταβολή των κυρίαρχων δυναμικών χαρακτηριστικών και των δύο δεξαμενών, συναρτήσει του επιπέδου έντασης της διέγερσης. Η μεταβολή αυτή είναι πολύ σημαντική και ενδεικτική συστημάτων με ισχυρά μη γραμμικούς μηχανισμούς απόκρισης.

5η φάση: Μόρφωση κατάλληλου λογισμικού.

Στα πλαίσια του ερευνητικού έργου, *επεκτάθηκε η υπάρχουσα υλοδομή λογισμικού και μορφώθηκε σχετικό λογισμικό*, με σκοπό την εύχρηστη και πρακτική εφαρμογή των στοιχείων και μεθόδων που αναπτύχθηκαν. Το λογισμικό αυτό πληροί προϋποθέσεις όπως: Δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων με πολλούς αγνώστους, δυνατότητα γρήγορης μεταφοράς πληροφοριών μεταξύ κεντρικής και περιφερειακής μνήμης κλπ. Στο λογισμικό συμπεριλήφθηκαν όλα τα στοιχεία που διατυπώθηκαν στην πρώτη φάση (C⁰ τριγωνικό στοιχείο, τριγωνικό στοιχείο με διακριτή επιβολή της παραδοχής KIRCHHOFF, στοιχείο δοκού, τετράπλευρο στοιχείο) καθώς και η μεθοδολογία για το πρόβλημα επαφής και τη μη γραμμική ανάλυση.

6η φάση: Συγκριτική μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς χαρακτηριστικών δεξαμενών με τη βοήθεια αριθμητικών και πειραματικών μεθόδων.

Το *α' στάδιο της 6^{ης} φάσης* περιλαμβάνει μια γενική αξιολόγηση των πειραματικών μετρήσεων. Παρουσιάζονται βασικά συμπεράσματα και παρατηρήσεις σχετικά με τη συμπεριφορά δεξαμενών χωρίς αγκυρώσεις, που εξήχθησαν από τις μέχρι τώρα πειραματικές μελέτες.

Για τη *συγκριτική μελέτη του φαινομένου του ανασηκώματος της βάσης* διεξήχθη μια σειρά αριθμητικών υπολογισμών, που βασίζονται στη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο δεύτερο κεφάλαιο. Μετά από επιλογή ενός κατάλληλου προσομοιώματος για τη δεξαμενή και τον έλεγχο της αξιοπιστίας του, επιλύθηκε το *στατικό πρόβλημα του ανασηκώματος της βάσης* για κλίσεις της δεξαμενής 2, 3 και 4 μοιρών. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις μετατοπίσεις και τις τάσεις κρίνονται ικανοποιητικά, σε σχέση με εκείνα που προκύπτουν από τα αντίστοιχα πειράματα. Χαρακτηριστικά, παρουσιάζεται η σύγκλιση των αποτελεσμάτων πειράματος-μοντέλου για τις τιμές εύρους ανασηκώματος και του ύψους ανασηκώματος. Κατά την αναλυτική μελέτη, λόγω της μικρότερης δυσκαμψίας του μοντέλου, παρατηρήθηκε μία ελαστική συμπεριφορά της δεξαμενής μέχρι μία κλίση 4 μοιρών, ενώ στο μοντέλο του πειράματος η γραμμική συμπεριφορά συνεχίστηκε μέχρι τις 6 μοίρες. Παρουσιάζεται επίσης η κατανομή των εντατικών μεγεθών για διάφορες περιπτώσεις.

Σε δεύτερη φάση έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της πειραματικής μελέτης στη Διάταξη Τεχνικών Σεισμών με αντίστοιχες αριθμητικές προσεγγίσεις που περιγράφουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά του μοντέλου. Για την προσομοίωση του υγρού της δεξαμενής εφαρμόστηκε η μέθοδος της δυνατής μάζας, που συνδυάζει την απλότητα με την αποτελεσματικότητα. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος μεγάλης μάζας στην ανάλυση απόκρισης συχνότητας.

Η πειραματική μελέτη της απόκρισης των επιταχύνσεων του κελύφους της δεξαμενής σε διεγέρσεις της βάσης έδρασης σε τυχαίο λευκό θόρυβο (Random White Noise), προσομοιώθηκε με τη χρησιμοποίηση τυχαίας ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Η *συγκριτική μελέτη* των δυναμικών χαρακτηριστικών της δεξαμενής έγινε για την πρώτη περίπτωση της πειραματικής ακολουθίας με την χαμηλότερη ένταση διέγερσης (SPAN: 0,05). Όπως έδειξαν τα αποτελέσματα της αριθμητικής μελέτης, η ενίσχυση της απόκρισης της δεξαμενής γίνεται σε δύο περιοχές συχνοτήτων, με μία κορυφή στη συχνότητα 33 Hz και τη δεύτερη κορυφή σε σχετικά χαμηλές συχνότητες με κορυφή τα 11 Hz. Οι δύο αυτές κορυφές συμπίπτουν με εκείνες του πειράματος, που εμφανίστηκαν στις συχνότητες 37,6 Hz και 10,75 Hz, γεγονός που πιστοποιεί την ορθότητα της ανάλυσης, των παραδοχών και προσεγγίσεων.

7η φάση: Εμβάθυνση στην κατανομή των τάσεων στη βάση του κελύφους με τη βοήθεια πειραματικών διατάξεων.

Στη φάση αυτή διερευνήθηκε η εντατική κατάσταση στη βάση του κελύφους δύο μεταλλικών δεξαμενών ίδιων διαστάσεων, με διάμετρο βάσης 1,0m, ύψους κελύφους 1,10m και πάχους 0,17mm. Η εξέταση αυτή έγινε με τη βοήθεια ταινιών επιμήκυνσης που είχαν προσαρμοστεί σε κατάλληλες θέσεις (3,0cm από τη βάση) τόσο στην εξωτερική όσο και στην εσωτερική πλευρά του κελύφους, που στη φάση της πειραματικής ακολουθίας ήταν καλυμμένη με νερό. Σε κάθε θέση μέτρησης προσαρμόστηκαν δύο ταινίες. Η μία μετρούσε την οριζόντια περιφερειακή παραμόρφωση του κελύφους (hoop) και η άλλη την κατακόρυφη αξονική παραμόρφωση (axial). Η πρώτη δεξαμενή (δεξαμενή B1) μελετήθηκε στη φάση πλήρωσης και αδειασματός της με νερό για υδροστατικές φορτίσεις και σε διάφορα ύψη νερού όταν ήταν τοποθετημένη σε οριζόντια βάση. Επιπλέον, η εντατική κατάσταση αυτής της δεξαμενής μελετήθηκε στην κεκλιμένη βάση για 2, 4 και 6 μοίρες γωνίας κλίσης της κεκλιμένης βάσης και για συνθήκες ελεύθερης έδρασης της δεξαμενής. Η δεύτερη δεξαμενή (δεξαμενή B2) μελετήθηκε όπως και η πρώτη σε υδροστατικές φορτίσεις. Επιπλέον, έγινε δυνατή η καταγραφή της απόκρισης των παραμορφώσεων στη βάση του κελύφους, κατά τη διάρκεια της επιβολής δυναμικών διεγέρσεων στη Διάταξη Τεχνητών Σεισμών, επίσης για συνθήκες ελεύθερης έδρασης. Για τον υπολογισμό των τάσεων στις θέσεις προσαρμογής των ταινιών επιμήκυνσης, οι μετρήσεις των παραμορφώσεων του κελύφους εισήχθησαν στη συνέχεια στις σχέσεις τάσεων - παραμορφώσεων που ισχύουν για τα κελύφη. Στις σχέσεις αυτές απαιτείται να είναι γνωστό το μέτρο ελαστικότητας και ο δείκτης Poisson του υλικού του κελύφους. Για τον σκοπό

αυτόν, έγινε σχετικό πείραμα σε ειδικό δοκίμιο, όπου επίσης προσαρμόστηκαν ταινίες επιμήκυνσης για τον προσδιορισμό αυτών των παραμέτρων. Από την πειραματική αυτή μελέτη διαπιστώθηκε ότι η εντατική κατάσταση στη βάση του κελύφους συναρτάται, αφενός από το επίπεδο των φορτιστικών όρων και της έντασης της διέγερσης και αφετέρου συσχετίζεται με τη συμπεριφορά της δεξαμενής, όπως αυτή μελετήθηκε στην 3^η και 4^η φάση.

Αξιοποίηση των αποτελεσμάτων του προγράμματος.

Οι εργασίες που έγιναν στα πλαίσια του ερευνητικού έργου και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν, συνέβαλαν στο να δοθούν λύσεις σε μια σειρά προβλημάτων, η αντιμετώπιση των οποίων παρουσιάζει γενικότερο ενδιαφέρον. Τα αποτελέσματα συμβάλλουν στην απόκτηση τεχνογνωσίας στην αριθμητική και πειραματική μελέτη φαινομένων που επηρεάζουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά δεξαμενών υγρών, στην κάλυψη υφισταμένων κενών της κατανόησης διαφόρων μηχανισμών αστοχίας τους και συνολικά στον επιτυχέστερο αντισεισμικό σχεδιασμό τους.