

3D ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΕΞΕΔΡΩΝ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

Λάζαρος Μαυρίδης

Φοιτ. Πολιτικός Μηχανικός ΑΠΘ

e-mail: lazamavr@civil.auth.gr

Ορέστης Ιωάννου

Φοιτ. Πολιτικός Μηχανικός ΑΠΘ

e-mail: ikoresti@civil.auth.gr

Κωνσταντίνος Νικολάου

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός, Υποψ. Διδάκτορας

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ

54124 Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

e-mail: konnikol@civil.auth.gr

Χρήστος Μπίσμπος

Καθηγητής

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ,

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

54124 Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

e-mail: cbisbos@civil.auth.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την ανάλυση προσαρμογής εξέδρας άντλησης πετρελαίου τύπου jacket υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση εξαιτίας της δράσης του υδάτινου περιβάλλοντος, λαμβάνοντας υπόψη πλαστική αλληλεπίδραση των εντατικών μεγεθών τομής. Αντιμετωπίζονται με πρακτικό τρόπο τα δύο κύρια προβλήματα στην ανάλυση προσαρμογής αυτού του είδους κατασκευών: α) ο ασυνήθιστα μεγάλος αριθμός περιπτώσεων μεταβλητής φόρτισης, καθόσον κάθε στιγμιότυπο κύματος αποτελεί για την ανάλυση προσαρμογής διαφορετική περίπτωση φόρτισης και β) η σχοινοτενής και δύσκολη διαδικασία γένεσης των επιρράβδιων φορτίων λόγω του κυματισμού (δυνάμεις Morrison). Το πρώτο πρόβλημα επιλύεται με την εφαρμογή τεχνικής δύο επιπέδων και το δεύτερο με συνδυασμό καταλλήλων πακέτων εξειδικευμένου λογισμικού. Χρησιμοποιείται το γραμμικοποιημένο κριτήριο $N-V_Y-V_Z-M_T-M_Y-M_Z$ πλαστικής αλληλεπίδρασης των εντατικών μεγεθών τομής οπότε προκύπτει πρόβλημα γραμμικού μαθηματικού προγραμματισμού. Παρουσιάζεται αριθμητικό παράδειγμα από την πράξη.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα της ανάλυσης προσαρμογής (shakedown analysis - SDA) αποτελεί γενίκευση του προβλήματος οριακής ανάλυσης και αποσκοπεί στον προσδιορισμό των περιθωρίων ασφαλείας έναντι πλαστικής κατάρρευσης, όταν η φόρτιση μεταβάλλεται κατά τυχαίο τρόπο εντός δοσμένων ορίων (βλ. π.χ. [1], [2]). Η περιοχή μεταβολής ορίζεται συνήθως ως ένα κλειστό πολύεδρο με δοσμένες κορυφές (κορυφές φόρτισης). Η υπολογιστική υλοποίηση της επιτυγχάνεται με την σύζευξη μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων (FEM) με τεχνικές Μαθηματικής Βελτιστοποίησης (Computational Optimization). Αν τα κριτήρια διαρροής των ελεγχόμενων διατομών είναι πολύεδρα (γραμμικοποιημένες σχέσεις πλαστικής αλληλεπίδρασης), προκύπτει πρόβλημα Γραμμικού Προγραμματισμού (Linear Programming - LP). Συνακόλουθα, η επίλυση του προβλήματος της SDA γίνεται με σύζευξη κατάλληλου λογισμικού FEM με λογισμικό LP. Το προκύπτον πρόβλημα LP χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα μεγάλο πλήθος ανισοτήτων, ευθέως ανάλογο τόσο με το πλήθος των κορυφών φόρτισης όσο και με το πλήθος των επιφανειών που ορίζουν το πολύεδρο πλαστικής αλληλεπίδρασης σε κάθε θέση ελέγχου της έντασης.

Οι εξέδρες άντλησης πετρελαίου τύπου jacket αποτελούν χωρικά πλαίσια. Υπόκεινται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση λόγω δράσεων από το υδάτινο περιβάλλον (βλ. [3]-[5]) και η σχετική σημασία της SDA επισημάνθηκε από τους ειδικούς [6] ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του '90. Όμως, στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν μόνον σποραδικές εργασίες που αφορούν ακαδημαϊκές 2D αναλύσεις [7]. Ανελαστικές βηματικές αναλύσεις υλοποιούνται με κατάλληλο λογισμικό προσομοίωσης της φόρτισης - βλ. π.χ. [8], όπου χρησιμοποιείται το πρόγραμμα SAP [9], ένα από τα λίγα πακέτα διεθνώς που περιλαμβάνει αυτόματη γένεση του ανωτέρω τύπου φορτίου.

Κατά την αντίληψη των συγγραφέων, η μέχρι σήμερα ιδιαίτερα περιορισμένη εφαρμογή της SDA στην μελέτη των εξεδρών οφείλεται σε δύο λόγους: α) στην δυσκολία απλού ορισμού των κορυφών φόρτισης μια και η φόρτιση από το υδάτινο περιβάλλον εξαρτάται κατά μη-γραμμικό τρόπο από διάφορες παραμέτρους, β) στην έλλειψη ενιαίου πακέτου λογισμικού που να ενσωματώνει όλα τα στάδια υπολογισμού των απαραίτητων δεδομένων για την SDA και ιδιαίτερα την γένεση των φορτίων περιβάλλοντος.

Στην παρούσα εργασία το δεύτερο πρόβλημα λύθηκε με τον κατάλληλο συνδυασμό εξειδικευμένων πακέτων λογισμικού, των οποίων η διαχείριση έγινε βασικά σε περιβάλλον MATLAB. Το πρώτο πρόβλημα λύνεται με την θεώρηση κάθε στιγμιότυπου κύματος ως ξεχωριστή κορυφή φόρτισης με αποτέλεσμα μεγάλο αριθμό ανισοτήτων στο πρόβλημα LP. Το προκύπτον υπολογιστικό θέμα μεγέθους για το LP αντιμετωπίζεται με την τεχνική των δύο επιπέδων που παρουσιάστηκε στο [10].

Χρησιμοποιήθηκε ως κριτήριο πλαστικής αλληλεπίδρασης $N-V_Y-V_Z-M_T-M_Y-M_Z$, το απλό ρομβικό κριτήριο του Ευρωκώδικα 3 (συμμετρικό πολύεδρο στον εξαδιάστατο χώρο με σύνορο αποτελούμενο από 64 υπερεπίπεδα).

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΕΞΕΔΡΑΣ

Έστω η FEM-διακριτοποιημένη εξέδρα με NU ελεύθερους βαθμούς ελευθερίας, στην οποία ορίζονται $j=1,2,\dots,NG$ σημεία ελέγχου των τάσεων. Η εξέδρα υποβάλλεται σε μια μόνιμη φόρτιση και μια ανακυκλιζόμενη, που προκαλούν στο j -σημείο ελέγχου τα

αντίστοιχα ελαστικά εντατικά μεγέθη τομής N-V_Y-V_Z-M_T-M_Y-M_Z. Τα τελευταία συλλέγονται αντίστοιχα στα διανύσματα \mathbf{p}_j και $\mathbf{v}_j(t)$, όπου ο χρόνος t είναι παράμετρος του δρόμου επιβολής του φορτίου. Η ελαστική μεταβλητή ένταση κινείται εντός ορισμένου συνόλου V_j , δηλαδή $\mathbf{v}_j(t) \in V_j$ για όλες τις στιγμές t .

Αν η μεταβλητή φόρτιση πολλαπλασιαστεί με ένα συντελεστή α (τον προς υπολογισμό συντελεστή ασφάλειας), τότε η συνολική ελαστική ένταση είναι $\mathbf{s}_j^{el}(t) = \alpha \mathbf{v}_j(t) + \mathbf{p}_j$ (επαλληλία). Όταν η εξέδρα πλαστικοποιηθεί, η ελαστοπλαστική ένταση διαφέρει από την ελαστική κατά ένα διάνυσμα διόρθωσης \mathbf{p}_j : $\mathbf{s}_j^{ep}(t) = \alpha \mathbf{v}_j(t) + \mathbf{p}_j + \mathbf{p}_j$. Επειδή τόσο η ελαστική όσο και η ελαστοπλαστική ένταση ικανοποιούν τις συνθήκες ισορροπίας του φορέα για την ίδια φόρτιση, η διόρθωση \mathbf{p}_j αποτελεί αυτένταση, ικανοποιεί δηλαδή τις συνθήκες ισορροπίας για μηδενικό φορτίο (συνθήκη μηδενικού υπόχωρου). Σε αντίθεση με την $\mathbf{s}_j^{el}(t)$, η $\mathbf{s}_j^{ep}(t)$ οφείλει να παραμένει εντός της περιοχής που ορίζει το κριτήριο διαρροής. Λαμβάνοντας το τελευταίο ως γραμμικοποιημένο, η περιοχή αυτή είναι ένα κλειστό πολύεδρο που ορίζεται από ένα σύστημα ανισοτήτων $\mathbf{N}_j^T \mathbf{s}_j^{(i)} \leq \mathbf{r}_j$. Με τα στοιχεία αυτά, το πρόβλημα της ελαστικής προσαρμογής της εξέδρας παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\begin{aligned}
 P_{ESD} \quad & \max \alpha, \\
 & s.t.: \sum \mathbf{H}_j \mathbf{p}_j = \mathbf{0} \\
 & \mathbf{s}_j(t) = \alpha \mathbf{v}_j(t) + \mathbf{p}_j + \mathbf{p}_j \\
 & \mathbf{v}_j(t) \in V_j \\
 & \mathbf{N}_j^T \mathbf{s}_j(t) \leq \mathbf{r}_j \quad j = 1, 2, \dots, NG
 \end{aligned} \tag{1}$$

Τα σύνολα V_j λαμβάνονται συνήθως ως πολύεδρα που το καθένα περιγράφεται μέσω των NV κορυφών του $\mathbf{v}_j^{(i)}$, $i=1, \dots, NV$. Τότε - λόγω κυρτότητας των κριτηρίων διαρροής - αρκεί να ελεγχθούν οι ελαστοπλαστικές τάσεις στις κορυφές αυτές. Προκύπτει η εξής μορφή:

$$\begin{aligned}
 P_{ESD} \quad & \max \alpha, \\
 & s.t.: \sum \mathbf{H}_j \mathbf{p}_j = \mathbf{0} \\
 & \mathbf{s}_j^{(i)} = \alpha \mathbf{v}_j^{(i)} + \mathbf{p}_j + \mathbf{p}_j \\
 & \mathbf{N}_j^T \mathbf{s}_j^{(i)} \leq \mathbf{r}_j \quad j = 1, 2, \dots, NG \ \& \ i = 1, 2, \dots, NV
 \end{aligned} \tag{2}$$

Όμως η φόρτιση κυματισμού που αποτελεί την μεταβλητή φόρτιση της εξέδρας δεν έχει τις συνήθεις διακριτές κορυφές. Στην παρούσα εργασία εργασία περιγράφουμε τα σύνολα V_j παίρνοντας υπόψη επαρκή αριθμό σημείων τους, που αντιστοιχούν σε διαφορετικά στιγμιότυπα κύματος. Αρκετές από τις κορυφές αυτές δεν είναι βέβαια σημεία του συνόρου του V_j , με αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση του μεγέθους του μαθηματικού προβλήματος και του αντίστοιχου υπολογιστικού φόρτου. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με την εφαρμογή της τεχνικής των δύο επιπέδων που αναπτύχθηκε στο [10]. Τέλος, ως κριτήριο διαρροής ελήφθη το απλό γενικό κριτήριο του EC3 που αντιστοιχεί γεωμετρικά

σε έναν 6D ρόμβο με 64 συνοριακά υπερεπίπεδα και περιγράφεται συνοπτικά από το εξής σύστημα ανισοτήτων (σε αδιάστατη μορφή):

$$|n_x| + |v_y| + |v_z| + |m_x| + |m_y| + |m_z| \leq 1 \quad (3)$$

Ο συντελεστής ασφάλειας σε ελαστική προσαρμογή σημειώνεται με α_{ESD} . Αν η διόρθωση ρ_j τεθεί μηδενική - οπότε ικανοποιεί αυτόματα τις ομογενείς συνθήκες ισορροπίας - προκύπτει το πρόβλημα του ελαστικού ορίου, που υπολογίζει τον συντελεστή ασφάλειας α_{ELM} για την εμφάνιση της πρώτης πλαστικής άρθρωσης στην εξέδρα, χωρίς καμμία περαιτέρω πλαστικοποίηση. Αν πάλι οι ομογενείς συνθήκες ισορροπίας παραλειφθούν εντελώς, προκύπτει το πρόβλημα της πλαστικής προσαρμογής με συντελεστή α_{PSD} . Το πρόβλημα αυτό αφορά εναλλασσόμενη πλαστικοποίηση και συνδέεται με φαινόμενα ολιγοκυκλικής κόπωσης.

4. ΦΟΡΤΙΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΥΔΑΤΙΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Το υδάτινο περιβάλλον ασκεί τόσο υδροστατικές όσο υδροδυναμικές φορτίσεις στις κυκλικές κοιλοδοκούς (CHS) που αποτελούν τον φορέα της εξέδρας άντλησης πετρελαίου, με σηματικότερες τις τελευταίες. Επειδή η διάμετρος D και το μήκος L των ράβδων ικανοποιούν την συνθήκη $D < 0.2L$, δεν αναπτύσσεται το φαινόμενο της περίθλασης και συνεπώς μπορούμε να εφαρμόσουμε την εξίσωση Morison για την εκτίμηση της συνολικής υδροδυναμικής δράσης (βλ. [3-5]). Σύμφωνα με αυτήν, η συνολική δύναμη F αποτελεί άθροισμα της συρτικής δύναμης F_D και της δύναμης αδρανείας F_I :

$$F = F_D + F_I \quad (4)$$

$$F_D = \frac{C_D}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U \cdot |U| \quad (5)$$

$$F_I = (1+k) \cdot \Omega \cdot \rho \cdot \frac{dU}{dt} = C_m \cdot \Omega \cdot \rho \cdot \frac{dU}{dt} \quad (6)$$

Στην Εξ. (5) C_D είναι ο συντελεστής σύρσης (εξαρτώμενος από τον αριθμό Reynolds και από την μορφή και την σχετική τραχύτητα της διατομής), ρ η πυκνότητα του ρευστού, A η εγκάρσια επιφάνεια στη διάδοση του κύματος, U το διάνυσμα της ταχύτητας και $|U|$ η απόλυτη τιμή της. Η F_D εκφράζεται σαν τετραγωνική συνάρτηση της ταχύτητας ροής.

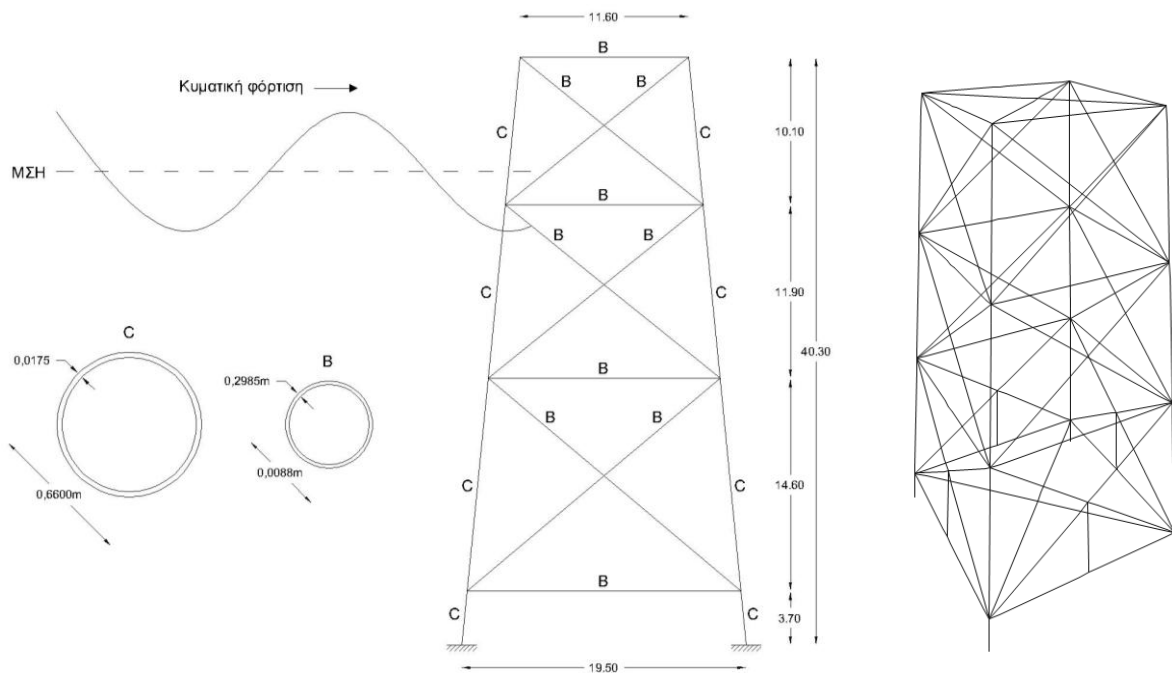
Στην (6) το Ω εκφράζει τον όγκο του σώματος (για διατομές CHS υπολογίζεται σύμφωνα με την μετωπική επιφάνεια A) και C_m είναι ο συντελεστής αδρανείας. Ο όρος $(1+k)$ περιγράφει την υδροδυναμική μάζα του σώματος με $k=1$ για κύλινδρο. Η F_I αποτελεί το αδρανειακό τμήμα της φόρτισης, λόγω επιταχυνόμενης κίνησης.

Επιπλέον, τα στοιχεία της εξέδρας (ή μέρος αυτών) που βρίσκονται κάτω από τη στάθμη του κύματος και πάνω από τον πυθμένα δέχονται επιπρόσθετες δυνάμεις λόγω της άνωσης. Οι δυνάμεις αυτές αποτελούνται:

- α) από ένα ομοιόμορφο φορτίο ασκούμενο στην οριζόντια προβολή μη κατακόρυφων στοιχείων, το οποίο είναι ανάλογο του εκτοπιζόμενου όγκου ανά μονάδα μήκους,
- β) από συγκεντρωμένα αξονικά φορτία συμπίεσης τα οποία εφαρμόζονται στα άκρα όλων των στοιχείων και εξαρτώνται από ένα χαρακτηριστικό εμβαδόν A_C , το οποίο είναι ίσο με το εμβαδό της CHS, στην περίπτωση που το στοιχείο δεν έχει πλημμυρίσει. Στην αντίθετη περίπτωση, ως A_C λαμβάνεται το εμβαδό της συμπαγούς διατομής.

5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

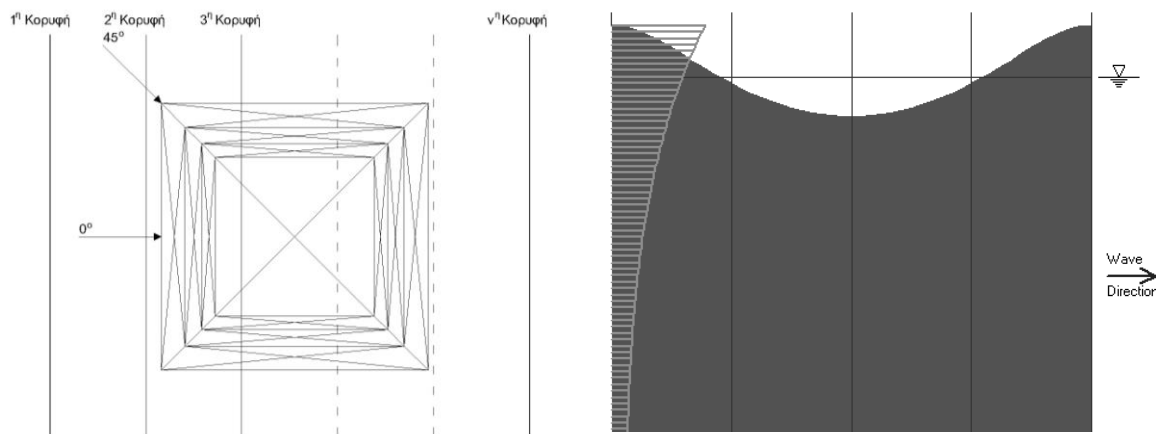
Η αριθμητική εφαρμογή αφορά τρισδιάστατη χαλύβδινη εξέδρα άντλησης πετρελαίου, η οποία έχει σχήμα συμμετρικής κολούρης τετραγωνικής πυραμίδας με ύψος 40,10 m, κάτω βάση ακμής 19,50 m και άνω βάση ακμής 11,60 m.



Σχήμα 1: Φορέας και φόρτιση της εξέδρας

Ο φορέας σχηματίζεται από α) τέσσερα κύρια σκέλη-στύλους C κατά τις λοξές ακμές της πυραμίδας διατομής CHS 600X17,5 mm και β) από τις ράβδους πλήρωσης B διατομής CHS 298,5X8,8 mm. Ο χάλυβας είναι ποιότητας S235 με $E = 210 \text{ GPa}$, και $\nu = 0,3$.

Η εξέδρα φορτίζεται με τα μόνιμα φορτία και τις μεταβλητές φορτίσεις από το υδάτινο περιβάλλον (καθορίζονται από τα στιγμιότυπα κύματος κατά την φόρτιση κυματισμού σε μια ορισμένη κατεύθυνση). Τα μόνιμα φορτία αποτελούνται από τα ίδια βάρη των ράβδων της εξέδρας και φορτίο κυκλοφορίας 9 kN/m^2 στο κατάστρωμα εκμετάλλευσης. Επειδή το τελευταίο - διαστάσεων $23 \times 23 \text{ m}$ - αποτελεί δευτερεύουσα κατασκευή και δεν συμμετέχει στον φορέα, το συνολικό φορτίο κυκλοφορίας των 4761 kN ισοκατανεμήθηκε στις κορυφές των τεσσάρων στύλων C.



Σχήμα 2: Διευθύνσεις με στιγμιότυπα κύματος και καθ' ύψος μεταβολή της φόρτισης

Μελετήθηκαν 2 διευθύνσεις κυματισμού, μία κατά 0° και μία κατά 45° , με 10 διαδοχικές κορυφές διακριτοποίησης (στιγμιότυπα κύματος) σε κάθε κατεύθυνση. Τα δεδομένα γένεσης της φόρτισης κυματισμού για καθεμιά από τις δύο κατευθύνσεις έχουν ως εξής:

- Μέση στάθμη ηρεμίας: +35,0m & Ύψος κύματος: 8,0m
- Περίοδος κύματος: 8,0s & Μήκος κύματος: 103,3m
- Βασική Θεωρία: Θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης
- Συντελεστές εξίσωσης Morison: $C_D=0,65$ & $C_m=1,6$

Τα αποτελέσματα των πλαστικών αναλύσεων συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Διεύθυνση κύματος	0°	45°
Ανάλυση ελαστικού ορίου	$\alpha_{ELM} = 2,818$	$\alpha_{ELM} = 2,964$
Ελαστική ανάλυση προσαρμογής	$\alpha_{ESD} = 3,211$	$\alpha_{ESD} = 3,809$
Πλαστική ανάλυση προσαρμογής	$\alpha_{PSD} = 4,070$	$\alpha_{PSD} = 4,544$

Πιν. 1: Συντελεστές ασφαλείας

Όσον αφορά στην διακριτοποίηση του χωρικού πλαισίου, σημειώνεται πως χρησιμοποιήθηκαν 276 κλασικά δίκωμα στοιχεία. Η κάθε φυσική ράβδος (τύπου B είτε τύπου C) χωρίστηκε σε 3 επιμέρους στοιχεία με μήκη 10%, 80% και 10% του μήκους της. Τα τέσσερα σκέλη C πακτώνονται στο έδαφος και οι ελεύθεροι DOFs ανέρχονται σε 1332.

Η επίλυση έγινε με συνδυασμό διαφόρων πακέτων λογισμικού με διαχείριση σε περιβάλλον MATLAB [11], όπου ορίζονται και τα πολυέδρα πλαστικής αλληλεπίδρασης και γίνεται η αξιοποίηση της τεχνικής των δύο επιπέδων. Η γένεση των εντατικών μεγεθών για όλα τα στιγμιότυπα κύματος γίνεται με χρήση του προγράμματος SAP. Για τον ίδιο φορέα, τα απαιτούμενα για την SDA μητρώα ισορροπίας \mathbf{H}_j παράγονται με ερευνητικό κώδικα. Η τελική επίλυση του προβλήματος LP γίνεται με το λογισμικό MOSEK [12], ένα από τα πλέον διαδεδομένα πακέτα μαθηματικής βελτιστοποίησης.

Σημειώνεται πως το LP της κλασικής ελαστικής ανάλυσης προσαρμογής χωρίς την τεχνική των δύο επιπέδων έχει για κάθε διεύθυνση κύματος με 10 στιγμιότυπα-κορυφές 18.217 αγνώστους, 17.892 γραμμικές εξισώσεις και 176.6400 γραμμικές ανισότητες. Με την τεχνική των δύο επιπέδων, το τελικό LP έχει 1.657 αγνώστους, 1.332 γραμμικές εξισώσεις και 17.664 γραμμικές ανισότητες. Για την επίλυση, το MOSEK χρειάστηκε λιγότερο από 1 sec τρέχοντας σε κοινό laptop σε Windows 7.

6. ΣΧΟΛΙΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάστηκε αποτελεσματικός τρόπος επίλυσης τριδιάστατων προβλημάτων προσαρμογής πραγματικών εξεδρών άντλησης πετρελαίου. Η περίπλοκη φόρτιση από το υδάτινο περιβάλλον υπολογίστηκε με το πρόγραμμα SAP ενώ ερευνητικός κώδικας παρήγαγε το μητρώο ισορροπίας του φορέα (δεν παρέχεται από το SAP). Υπολογίστηκε η εντατική κατάσταση για αρκετά στιγμιότυπα κύματος, ώστε να καλυφθούν οι όποιες ασάφειες αναφορικά με τον προσδιορισμό μεταβλητών κορυφών φόρτισης. Επειδή το μέγεθος του προβλήματος γραμμικού μαθηματικού προγραμματισμού (LP) αυξάνει κατά πολύ - όταν αυξάνουν οι κορυφές φόρτισης - χρησιμοποιήθηκε τεχνική δύο επιπέδων. Ως κριτήριο πλαστικής αλληλεπίδρασης χρησιμοποιήθηκε το γενικό κριτήριο του EC3 με 64 υπερέπιεδα. Στο αριθμητικό παράδειγμα προσδιορίστηκαν οι συντελεστές ασφαλείας ελαστικού ορίου, ελαστικής προσαρμογής και πλαστικής προσαρμογής για δύο κατευθύνσεις διάδοσης του κυματισμού (υπό γωνία 0° και 45° αντίστοιχα). Παρατηρήθηκε ελαφρά αύξηση των συντελεστών ασφαλείας για την λοξή κατεύθυνση των 45° .

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] COHN M.Z. and MAIER G. (Eds) “*Engineering plasticity by mathematical programming*”, Pergamon Press, 1977, New York.
- [2] KOENIG J.A. “*Shakedown of elastic-plastic structures*”, Elsevier, 1987.
- [3] SKALLERUD, B. AMDAHL, J. “*Nonlinear Analysis of Offshore Structures*”, Research Studies Press, 2002.
- [4] EL-REEDY, M.A. “*Offshore Structures: Design, Construction and Management*”, Golf Professional Publishing, 2012.
- [5] SAPKAYA, T. “*Wave forces on offshore structures*”, Cambridge Univ. Press, 2010.
- [6] HELLAN, O., SKALLERUD, B., AMDAHL J., MOAN, T. “Reassessment of offshore steel structures: Shakedown and cyclic nonlinear FEM analyses”, *Proc. Of the 1st IOPE Conference*, Edinburgh, 1991, pp. 34-43.
- [7] FADAEI M.J., SAFFARI H., TABATABAEI R. “Mathematical modelling for shakedown analysis of offshore structures”, *American Journal of Applied Sciences*, Vol. 4(7), 2007, pp. 449-455.
- [8] ABDEL RAHEEM, S.E. “Nonlinear response of fixed jacket offshore platform under structural and wave loads”, *Coupled System Mechanics*, Vol. 2(1), , 2013, pp.11-126.
- [9] COMPUTERS & STRUCTURES Inc. *SAP2000, Version 14*, California, 1995.
- [10] BISBOS C.D., AMPATZIS A.T. “Shakedown analysis of spatial frames with parameterized load domain”, *Engineering Structures*, Vol. 30(11), 2008, pp. 3119-3128.
- [11] MATHWORKS Inc, MATLAB 2008(b), 2012.
- [12] MOSEK ApS, MOSEK v5, 2008 (<http://www.mosek.com>).

3D SHAKEDOWN ANALYSIS OF OFFSHORE JACKET PLATFORMS

Lazaros Mavridis

Student, Dept. of Civil Eng., Aristotle University
e-mail: lazamavr@civil.auth.gr

Orestis Ioannou

Student, Dept. of Civil Eng., Aristotle University
e-mail: ikoresti@civil.auth.gr

Konstantinos Nikolaou

Civil Engineer, PhD student
Institute of Metal Structures, Dept. of Civil Eng., Aristotle University
54124 Thessaloniki, Greece
e-mail: konnikol@civil.auth.gr

Christos Bisbos

Professor
Institute of Metal Structures, Dept. of Civil Eng., Aristotle University
54124 Thessaloniki, Greece
e-mail: cbisbos@civil.auth.gr

SUMMARY

In this paper shakedown analysis of 3D offshore jacket platforms subjected to cyclic wave loads is presented. Full plastic interaction of axial, shear forces and moments is taken into account. Two major problems concerning this type of structure are solved: a) the unusually large number of the variable load domain corners and b) the tedious procedure to define the equivalent nodal loads due to the waves (Morison equations). The first one is solved using a bi-level technique for the optimization problem and the second one using combinations of specialized software. A linearized $N-V_Y-V_Z-M_T-M_Y-M_Z$ plastic interaction criterion is used leading to linear programming problems. A real-world numerical example is presented.