# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

# ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη της απόκρισης ενισχυμένων ελασμάτων πυθμένα πλοίου σε δυναμικά φορτία σφυρόκρουσης



Στάνιος Ευάγγελος

Επιβλέπων: Σαμουηλίδης Εμμανουήλ

Αθήνα 2012

# Περιεχόμενα

Σκοπός της εργασίας	σελ. 1
Κεφάλαιο 1° Φορτίσεις της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου.	σελ. 3
Κεφάλαιο 2° Η μοντελοποίηση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς και της ολκιμότητας.	σελ. 13
Κεφάλαιο 3° Μοντελοποίηση ενισχυμένων και απλών ελασμάτων.	σελ. 20
Κεφάλαιο 4° Μελέτη της απόκρισης μεταλλικής τετράγωνης πλάκας σε κρουστικό φορτίο.	σελ. 22
Κεφάλαιο 5° Μελέτη της απόκρισης ναυπηγικού ελάσματος δίχως ενισχυτικά.	σελ. 36
Κεφάλαιο 6° Υπολογισμός στοιχείων πυθμένα με βάση τους κανονισμούς του Αμερικανικού Νηογνώμονα (American Bureau of Shiping).	σελ. 46
Κεφάλαιο 7° Εφαρμογή φορτίσεων στον πυθμένα. Αποτελέσματα και σχολιασμός.	σελ. 54
Κεφάλαιο 8° Τελικά συμπεράσματα.	σελ. 84
Βιβλιογραφία	σελ. 86
Παράρτημα	σελ. 88

### Σκοπός της εργασίας

Το πλοίο, κατά την υπηρεσία του, αντιμετωπίζει ένα περίπλοκο περιβάλλον που δημιουργεί πολλών ειδών φορτίσεις στη μεταλλική κατασκεύη. Η μελέτη και έρευνα των ναυπηγών μηχανικών αλλά και επιστημόνων άλλων κλάδων έχει συμβάλει στην κατανόηση και αντιμετώπιση των περίπλοκων φορτίσεων του πλοίου αλλά και στη μελέτη των μηχανισμών που αποτελούν αίτια των φορτίων που δέχεται το πλοίο. Αποτέλεσμα αυτής της δραστηριότητας οφείλει να είναι η ορθολογική σχεδίαση των πλοίων με ταυτόχρονη ενίσχυση της ασφάλειας, ο περιορισμός των ζημιών της κατασκεύης με αντανάκλαση και στο κόστος συντήρησης.

Η παρούσα εργασία ασχολείται με δυναμικά φορτία των οποίων ο χρόνος φόρτισης είναι πολύ μικρός με αποτέλεσμα η φόρτιση να θεωρείται κρουστική. Στόχος μας είναι να εξετάσουμε την απόκριση τμημάτων της κατασκεύης του πλοίου, το μέγεθος και το είδος των παραμορφώσεων. Επίσης εξετάζουμε κριτικά την επάρκεια των κανονισμών του Αμερικάνικου Νηογνώμονα (ABS) σε σχέση με τέτοια φορτία.

Η ανάλυση του προβλήματος γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στα πλαίσια της εργασίας παραλείπεται η εκτενής περίληψη της μεθόδου καθώς υπάρχει πλούσια βιβλιογραφία για την μελέτη της. Για τους υπολογισμούς στον Ηλεκτρονικό Υπολογιστή χρησιμοποιείται το υπολογιστικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων Abaqus Explicit. Το πακέτο επιλέχθηκε με κριτήριο τη δυνατότητα που έχει στην επίλυση δυναμικών προβλημάτων.

Στο 1° κεφάλαιο γίνεται γενική αναφορά στα δυναμικά φορτία που καταπονούν τη μεταλλική κατασκεύη του πλοίου, ενώ γίνεται πιο συγκεκριμένη και εκτενής αναφορά στις φορτίσεις λόγω σφυρόκρουσης και εκρήξεων.

Στο 2° κεφάλαιο αναφέρουμε τη μέθοδο που επιλέξαμε ώστε να μοντελοποιήσουμε την ελαστοπλαστική συμπεριφορά και την ολκιμότητα στο μοντέλο μας κατά την ανάλυση με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.

Στο 3° κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των πεπερασμένων στοιχείων κελύφους που εμπεριέχονται στην βιβλιοθήκη του Abaqus και εξηγείται η δική μας επιλογή.

Στο 4° κεφάλαιο εφαρμόζουμε την αναλυσή μας σε παράδειγμα απλής τετράγωνης πλάκας. Δεδομένου ότι για τη συγκεκριμένη περίπτωση υπάρχουν πειραματικά δεδομένα τα οποία παρουσιάζονται στο ίδιο κεφάλαιο, επιβεβαιώνεται η ορθότητα της μεθόδου. Δικαιούμαστε έτσι να επεκτείνουμε την εφαρμογή της μεθόδου, πράγμα που κάνουμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Στο 5° κεφάλαιο προχωράμε στην μελέτη της απόκρισης ενός απλού (μη ενισχυμένου) ελάσματος διαστάσεων 2400mm\*800mm και πάχους 16mm σε κρουστικά φορτία με τη μορφή παλμού. Ο στόχος της ανάλυσής μας, εκτός από αυτή καθεαυτή τη μελέτη είναι να εξετάσουμε και απαραίτητα στοιχεία ώστε να τα χρησιμοποιήσουμε και σε περαιτέρω ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα εξετάζουμε την επίδραση των διαστάσεων των στοιχείων που χρησιμοποιούνται ώστε να επιλέξουμε

το οικονομικότερο που είναι ταυτόχρονα και ακριβές. Οι διαστάσεις του ελάσματος έχουν επιλεχθεί σε μεγέθος παρόμοιο με αυτό ένος τυπικού ναυπηγικού ελάσματος για αυτόν ακριβώς το λόγο.

Στο 6° κεφάλαιο προχωράμε στην διαμόρφωση και διαστασιολόγηση του μοντέλου μας (ενός τμήματος του εξωτερικού πυθμένα του πλοίου) με βάση τα στοιχεία ενός τυπικού Bulk Carrier τύπου Panamax και ακολουθώντας τους κανονισμούς του Αμερικανικού Νηογνώμονα (ABS).

Στο 7° κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή στο παραπάνω μοντέλο μια σειρά από φορτίσεις που περιγράφονται στο ίδιο κεφάλαιο. Συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή στατικής φόρτισης σφυρόκρουσης που προβλέπει ο Αμερικάνικος Νηογνώμονας σε σχέση με τα άλλα είδη φόρτισης που εφαρμόσαμε.

Τέλος στο 8° κεφάλαιο αναπτύσονται τα βασικά συμπεράσματα από τα δεδομένα που προέκυψαν από την ανάλυσή μας. Ταυτόχρονα γίνονται και προτάσεις για τη συνέχεια της μελέτης στον ίδιο αντικείμενο.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>0</sup>**

### Φορτίσεις της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου

Στο περίπλοκο θαλλάσιο περιβάλλον, τα στοιχεία της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου δέχονται φορτίσεις διαφόρων ειδών, οι οποίες επιφέρουν διάφορα αποτελέσματα στη συμπεριφορά της κατασκευής. Στη συνέχεια επιχειρούμε μια στοιχειώδη διάκριση των ειδών φορτίσεων. Πιο εκτενώς θα συζητηθούν ορισμένα μόνο είδη δυναμικών φορτίσεων.

### Είδη φορτίσεων

Οι φορτίσεις διακρίνονται ανάλογα με τη φύση τους – δηλαδή τα διάρκεια και τη μεταβλητότητά τους στο χρόνο – όπως και ανάλογα με την απόκριση της κατασκευής που τις παραλαμβάνει. Εξετάζοντας την απόκριση της κατασκευής, οι εξωτερικές φορτίσεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε στατικές (Static loading) που παραμένουν σταθερές στο χρόνο και σε δυναμικές (dynamic loading). Οι στατικές φορτίσεις επιφέρουν αλλαγές που δεν μεταβάλλονται με το χρόνο και δεν αναπτύσουν αδρανειακές δυνάμεις στα στοιχεία της κατασκευής. Από την άλλη, οι δυναμικές φορτίσεις προκαλούν τοπικές μορφές απόκρισης, που μεταβάλλονται στο χρόνο, καθώς επίσης και αδρανειακές δυνάμεις που καταπονούν την κατασκευή [1]. Ένα χαρακτηριστικό λοιπόν της δυναμικής φόρτισης είναι ότι οι παραμορφώσεις των κατασκευαστικών στοιχείων που προκύπτουν μπορεί να είναι μεγάλες και αισθητές. Όπως θα αναφερθεί σε επόμενο κεφάλαιο, κατά το σχεδιασμό οι δυναμικές φορτίσεις λαμβάνονται υπόψην κατά κύριο λόγο μέσω της χρήσης «ισοδύναμων» στατικών φορτίσεων από τις οποίες προκύπτουν οι τιμές διαστασιολόγησης των στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου. Αποτελεί ζήτημα προς διερεύνηση κατά πόσο μια «ισοδύναμη» στατική φόρτιση είναι αρκετή για να υπολογισθεί η απόκριση του πλοίου που καταπονείται από ένα συνδιασμό στατικών και δυναμικών φορτίων.

Παρακάτω απαριθμούνται τα σημαντικότερα είδη φορτίσεων:

### Στατική Φόρτιση

- Καμπτικές ροπές σε ήρεμο νερό.
- Τέμνουσες δυνάμεις σε ήρεμο νερό.
- Διαμήκης κάμψη σε χαμηλόσυχνο (ψευδοστατικό) κύμα.

- Τέμνουσες δυνάμεις σε χαμηλόσυχνο (ψευδοστατικό) κύμα.
- Συγκεντρωμένες φορτίσεις σε καταστρώματα.
- Υδροστατικές μέσες φορτίσεις.

#### Δυναμική φόρτιση

- Φορτίσεις προσάραξης.
- Φορτίσεις λόγω δυνάμεων κατά την πλεύση σε υψίσυχνο κυματισμό.
- Δράση ανέμου (σε υπερκατασκευές).
- Πλεύση σε πάγο.
- Συγκρούσεις.
- Σφυρόκρουση (Slamming).
- Διαβροχή καταστρώματος (Green water loading).
- ➢ (Sloshing).
- Υποθαλάσσιες και ατμοσφαιρικές εκρήξεις.
- Φορτίσεις οφειλόμενες στα μηχανήματα πρόωσης.

Στη συνέχεια θα γίνει μια εκτενέστερη περιγραφή για δύο είδη δυναμικών φορτίων:

- Σφυρόκρουση (Slamming).
- Υποθαλάσσιες και ατμοσφαιρικές εκρήξεις (Blasts).

### Σφυρόκρουση

Η σφυρόκρουση είναι αποτέλεσμα της κρούσης της πρωραίας περιοχής του πυθμένα στην επιφάνεια της θάλασσας και προκύπτει εφόσον η σχετική ταχύτητα της πλώρης του σκάφους ως προς την επιφάνεια της θάλασσας υπερβαίνει ένα ελάχιστο όριο. Το φαινόμενο επηρεάζεται και από την γωνία ανύψωσης του πυθμένα σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο (deadrise angle). Γενικά, όσο μειώνεται η εν λόγο γωνία, τόσο αυξάνεται η μέγιστη τιμή τάσης που προκύπτει λόγω σφυρόκρουσης καθώς ενισχύονται τα υδροελαστικά φαινόμενα [3]. Η σφυρόκρουση γίνεται συνήθως αντιληπτή λόγω του μεγάλου κρότου που την συνοδεύει. Τις περισσότερες φορές η φόρτιση λόγω σφυρόκρουσης πάνω στα ελάσματα του πυθμένα είναι της τάζης μερικών MPa και είναι πολύ μεγαλλύτερη από αυτήν που προκύπτει από τους συνηθισμένους κυματισμούς [3]. Σε ορισμένες περιπτώσεις, πλοία έχουν υποστεί τοπικές ζημιές λόγω των φορτίων σφυρόκρουσης καθώς και μεγάλης κλίμακας λυγισμό στο κατάστρωμα [9]. Έντονος είναι ο κίνδυνος και σε πλοία μεγάλου μήκους στα οποία πολλές φορές ο κρότος λόγω της σφυρόκρουσης δεν γίνεται αντιληπτός στη γέφυρα και δεν παίρνονται μέτρα αποφυγής του φαινομένου. Σε μια τέτοια περίπτωση, η σφυρόκρουση γίνεται αντιληπτή λόγω της μεγάλης απώλειας ταχύτητας ή εξαιτίας των υψηλών τάσεων στη γάστρα, εφόσον είναι εγκατεστημένο το αντίστοιχο μετρητικό όργανο.

Από τις θεωρητικές και πειραματικές μελέτες καθώς και από στατιστικά δεδομένα από πλοία σε υπηρεσία, έχουν εξαχθεί ορισμένα βασικά συμπεράσματα για τους παράγοντες που ευνοούν το φαινόμενο και τα οποία εν συντομία είναι τα εξής [3]:

- Οι ζημιές είναι πιο συχνό φαινόμενο σε πλοία με μικρό λόγο μήκους/πλάτους και συμβαίνουν συχνότερα σε καταστάσεις μικρού βυθίσματος.
- Το μήκος του πλοίου σε σχέση με το μήκος των κυμάτων και η μορφή των νομέων επιδρούν σημαντικά.
- Πλοία που έχουν την τάση να δείχνουν μεγάλο εύρος προνευτασμού στα κύματα είναι επιρρεπή στη σφυρόκρουση.
- Η περιοχή της κατασκευής όπου γίνονται γενικά ζημιές είναι κοντά στο τέλος του πρωραίου τμήματος (περίπου 0,1L πίσω από την πρωραία κάθετο) για πλοία με «γεμάτη μορφή» (δηλαδή υψηλό συντελεστή γάστρας C<sub>B</sub> και πρισματικό συντελεστή γάστρας C<sub>P</sub>), ενώ η περιοχή αυτή μετατοπίζεται πρυμναία και παρουσιάζει μικρότερη ζημιά καθώς αυζάνεται η «λεπτότητα» της γάστρας (με τη μείωση δηλαδή του C<sub>B</sub> και C<sub>P</sub>).
- Οι ζημιές παρουσιάζονται συνήθως σε καταστάσεις μικρού βυθίσματος (περίπου σε αυτό που αντιστοιχεί στο 1/3 της πλήρους φόρτωσης) ενώ πάνω από ένα οριακό βύθισμα η σφυρόκρουση δεν υφίσταται.

Τα παραπάνω ισχύουν κύρια σε μονόγαστρα σκάφη.

Οι φορτίσεις λόγω σφυρόκρουσης έχουν έντονα δυναμικά χαρακτηριστικά, καθώς έχουν πολύ μικρή διάρκεια, συνήθως 10-20 msec με την κορύφωση να συμβαίνει συντομότερα και ταχύτατα, μπορούμε να πούμε ακαριαία [3, 9]. Πιο συγκεκριμένα το φορτίο λόγω σφυρόκρουσης περιγράφεται από τα εξής χαρακτηριστικά:

- Χρόνος μέχρι την κορυφή (t<sub>o</sub>).
- Μέγιστη τιμή του φορτίου (Po).
- Η διάρκεια και η μορφή (γενικά λογαριθμική) της μείωσης της τάσης μετά την κορυφή.
- Η συνολική διάρκεια της φόρτισης  $(t_{tot})$ .

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν πιθανοθεωρητικές μελέτες που παρουσιάζουν την πιθανότητα ένα πλοίο να υποστεί σφυρόκρουση σε μια χρονική περίοδο σε σχέση και με τις διάφορες παραμέτρους (βασικά μεγέθη πλοίου, κατάσταση θάλασσας, ταχύτητα πλοίου κοκ). Ωστόσο, στην παρούσα εργασία δεν θα μας απασχολήσει αυτό το ζήτημα αλλά μας ενδιαφέρει το ζήτημα του υπολογισμού της πίεσης που καταπονεί το πλοίο λόγω της σφυρόκρουσης. Οι μέθοδοι που αξιοποιούνται για αυτό το σκοπό είναι:

- Η υδροδυναμική ανάλυση.
- Οι απευθείας μετρήσεις (κυρίως από πειράματα).
- Η χρήση εμπειρικών τιμών όπως αυτοί που δίνονται από τους νηογνώμονες.

Πριν συνεχίσουμε πρέπει να αναφερθεί ότι μέχρι και την παρούσα, δεν έχει γίνει δυνατόν να αναπτυχθεί μια πλήρως ικανοποιητική θεωρητική προσέγγιση εξαιτίας της πολυπλοκότητας του προβλήματος [3]:

Α. Η σφυρόκρουση είναι ένα έντονα μη-γραμμικό φαινόμενο το οποίο είναι πολύ ευαίσθητο στη σχετική κίνηση και τη γωνία επαφής μεταξύ του σώματος και της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας.

Β. Οι προβλέψεις σε φυσική κατάσταση θάλασσας είναι αναγκαστικά στοχαστικές (μη-ντετερμινιστικές) αφού η σφυρόκρουση είναι στην πραγματικότητα μια τυχαία διαδικασία.

Γ. Εφόσον η διάρκεια της φόρτισης είναι πολύ σύντομη, οι υδροελαστικές επιδράσεις είναι έντονες. Δ. Η «παγίδευση» του αέρα κατά τη σφυρόκρουση οδηγεί πολλές φορές σε κύματα με πολύ υψηλή ταχύτητα εκεί όπου η ροή του νερού αλληλεπιδρά με τη ροή του αέρα.

### Υδροδυναμική ανάλυση

Στην βιβλιογραφία γίνεται εκτενέστερη αναφορά στις δυσδιάστατες γραμμικές και μη γραμμικές θεωρίες για τη σφυρόκρουση. Μια απλή σχέση αλλά αρκετά ακριβής αναπτύχθηκε από τον Ochi το 1973 [9]. Η πίεση σφυρόκρουσης που προκαλείται από την πρόσκρουση με ένα κύμα λόγω της σχετικής οριζόντιας ταχύτητας μεταξύ πλώρης και κύματος υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$P_{Slam} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot k \cdot v^2$$

Όπου:

- $\rho$ , η πυκνότητα του νερού.
- ν, η σχετική οριζόντια ταχύτητα μεταξύ της επιφάνειας της πλώρης και των κυμάτων η οποία υπολογίζεται από το άθροισμα της ταχύτητας του πλοίου με τη συνισταμένη της ταχύτητας του κύματος η οποία έχει την ίδια διεύθυνση με το διάνυσμα της ταχύτητας του πλοίου. Το πρόσημο της συνισταμένης του κύματος είναι θετικό αν η φορά είναι αντίστροφη από τη φορά του διανύσματος της ταχύτητας του πλοίου και αρνητικό αν ισχύει το αντίστροφο.
- k, Ο τοπικός συντελεστής πίεσης ο οποίος σχετίζεται με το σχήμα του εγκάρσιου νομέα που εξετάζεται.

Για τον υπολογισμό της σχετικής ταχύτητας χρησιμοποιείται συμπληρωματικά η κινητική θεωρία απαραμόρφωτου σώματος για ένα πλοίο σε κυματισμούς, η οποία μας δίνει μια μέση τιμή για τη σχετική ταχύτητα, ενώ οι μέγιστες τιμές της σχετικής ταχύτητας υπολογίζονται από στατιστικά στοιχεία.

### Πειραματικές μετρήσεις

Στην βιβλιογραφία που παρουσιάζεται στο τέλος της εργασίας υπάρχουν δεδομένα από πειράματα με στόχο τη μελέτη των πιέσεων λόγω σφυρόκρουσης. Τα περισσότερα είναι σε μεγάλη κλίμακα αλλά απλώς προσεγγίζουν τη φυσική κλίμακα, δηλαδή είναι αρκετά μικρότερα από τμήμα της κατασκευής του πλοίου. Η μέθοδος που ακολουθείται σε όλα είναι η ελεύθερη πτώση απλών και ενισχυμένων ελασμάτων μέσα σε μια δεξαμενή με νερό. Στο έλασμα που εξετάζεται είναι ενσωματωμένες μετρητικές διατάξεις (επικυνσιόμετρα, επιταχυνσιόμετρα κοκ) που δίνουν τις απαραίτητες μετρήσεις ώστε να υπολογισθεί η καμπύλη πίεσης προς το χρόνο. Επιπλέον σε ορισμένα πειράματα εξετάζονται και τα αποτελέσματα πάνω στην κατασκευή. Μειονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι απέχουν αρκετά από τη φυσική κλίμακα (άρα περιέχουν μεγάλο ποσοστό αβεβαιότητας) ενώ η κύρια παράμετρος του πειράματος (το ύψος της ελεύθερης πτώσης) επιλέγεται μάλλον αυθαίρετα αφού δεν είναι εύκολο να συσχετισθεί με την κίνηση της πλώρης του πλοίου.

### Εμπειρικές σχέσεις

Ορισμένοι νηογνώμονες και άλλοι οργανισμοί, στην προσπάθεια τους να δόσουν ορισμένα εργαλεία για τη μελέτη των συνεπειών που μπορεί να έχει το φαινόμενο της σφυρόκρουσης για ένα πλοίο και γενικότερα για μια πλωτή κατασκευή, έχουν αναπτύξει μια σειρά από σχέσεις οι οποίες βασίζονται στη θεωρία και στην εμπειρία οι οποίες υπολογίζουν το στατικό «ισοδύναμο» φορτίο από σφυρόκρουση. Δίνουν τη δυνατότητα έτσι στο μελετητή εύκολα να υπολογίσει τις ελαστικές και τυχόν πλαστικές παραμορφώσεις της κατασκευής. Ωστόσο όταν χρησιμοποιούμε «ισοδύναμα» στατικάν φορτία αντί για τα πραγματικά δυναμικά δεν είναι δυνατόν να μελετηθούν με ακρίβεια

Α) Η επίδραση του χρόνου φόρτισης του δυναμικού φορτίου, το οποίο μπορεί να ποικίλει.

B) Η φυσική συχνότητα της κατασκεύης και ο τρόπος με τον οποίο επιδρά, ειδικά όταν ο χρόνος φόρτισης προσεγγίζει τη φυσική περίοδο της κατασκεύης.

8

Σε επόμενο κεφάλαιο περιγράφεται και εφαρμόζεται η σχέση που προτείνει ο Αμερικάνικος Νηογνώμονας.

### Υποθαλάσσιες και ατμοσφαιρικές εκρήξεις

Είναι δυνατόν το πλοίο κατά την υπηρεσία του να υποστεί ζημιές από ατμοσφαιρικές ή υποθαλλάσιες εκρήξεις οι οποίες να είναι αποτέλεσμα ατυχήματος ή άλλου παράγοντα. Παρόμοιος κίνδυνος υπάρχει και για τις προβλήτες επιφανείας και τις υποθαλλάσιες προβλήτες. Στην περίπτωση που εξετάζουμε στην παρούσα εργασία υπάρχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Η έκρηξη δεν συνοδεύεται με σύγκρουση με άλλο σώμα, δηλαδή δεν έχουμε πρόβλημα προσκρουσης.
- Επιπλέον δεν εξετάζουμε την περίπτωση έκρηξης σαν αποτέλεσμα παρατεταμένης πυρκαγιάς. Σε αυτήν την περίπτωση οι ιδιότητες του μετάλλου αλλάζουν σημαντικά, δηλαδή μειώνεται η τάση διαρροής λόγω της έκθεσης για μεγάλο διάστημα σε υψηλή θερμοκρασία. Αυτό φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Για αυτό το λόγο η μελέτη της απόκρισης της κατασκευής σε μια τέτοια περίπτωση απαιτεί τον προσδιορισμό πολλών παραγόντων, ορισμένων που ανήκουν στην μεταλλουργία.



Το διπλανό σχήμα παρουσιάζει την μεταβολή του ορίου διαρροής σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για δύο τύπους ανοξείδωτου χάλυβα

Από τα είδη φορτίσεων που εξετάζουμε σε αυτή την εργασία, το συγκεκριμένο έχει το μικρότερο χρόνο φόρτισης, για τις περισσότερες εκρηκτικές ύλες είναι 15 μsec και σχετίζεται με την ταχύτητα καύσης. Επιπλέον η μέγιστη πίεση μπορεί να είναι αρκετά μεγαλλύτερη από τα άλλα είδη δυναμικής φόρτισης και εξαρτάται:

- Από το είδος του εκρηκτικού υλικού.
- Από την ποσότητά του.
- Καθώς και από το επίκεντρο της έκρηξης και την απόστασή του από την επιφάνεια της κατασκευής.

Γενικά, λόγω της συνήθως υψηλής πίεσης έχουμε πολύ μεγάλες παραμορφώσεις και τάσεις στην κατασκευή.

Για την περιγραφή της πίεσης λόγω έκρηξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω εμπειρική σχέση [13]:

$$P(t) = P_o \cdot e^{\frac{-t-t_d}{\theta}}, 0 \le t \le \theta$$

Όπου

P(t): Η πίεση σε ένα σημείο του ελάσματος του πλοίου συναρτήσει του χρόνου

*P*<sub>o</sub>: Η μέγιστη πίεση

t<sub>d</sub>: Ο χρόνος καθυστέρησης, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται ώστε το ωστικό
κύμα να φτάσει στην επιφάνεια του πλοίου

*θ*: Ο χρόνος κατά τον οποίο ασκείται πίεση στην κατασκευή λόγω της έκρηξης (προσοχή απαιτεί το γεγονός ότι είναι αρκετά μεγαλύτερος από το χρόνο καύσης)

Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι για την τρινυτογλυκερίνη (TNT) η μέγιστη πίεση είναι[13]

$$P_o = 52.16 \cdot 10^6 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R}\right)^{1.13}$$

#### Όπου

#### W : Το βάρος του εκρηκτικου

*R*: Ελάχιστη (κάθετη) απόσταση του επίκεντρου από την επιφάνεια της κατασκευής.

Env to  $\theta$  upologizetai we

$$\theta = 92.5 \cdot W^{\frac{1}{3}} \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R}\right)^{-0.22}$$

Τέλος ο χρόνος καθυστερήσεως υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση

$$t_d = \frac{R - R_o}{c}$$

Όπου

#### $R_o$ : Η ελάχιστη ακτινική απόσταση

c: Η ταχύτητα του ήχου στο αντίστοιχο ρευστό (στον α<br/>έρα ή στο νερό)

Αν θεωρήσουμε ότι το μοντέλο, δηλαδή η κατασκευή μας είναι συμμετρική και ότι το φορτίο λόγω της έκρηξης κατανέμεται συμμετρικά, τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω σχέση για τη συνολική πίεση που ασκείται σε μια πλάκα, σχέση που εξάγεται με βάση τη θεωρία πλακών του Taylor.

$$P_t = 2 \cdot P(t) - \frac{\rho c u(t)}{\sin \phi}$$

Όπου

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{R_o}{R}\right)$$

$$u(t) = \frac{2 \cdot P_o}{\rho c} \cdot \frac{1}{z - 1} \left( e^{-\frac{t}{z\theta}} - e^{-\frac{t}{\theta}} \right)$$
Η ταχύτητά της πλάκας

 $\rho$ : Η πυκνότητα του ρευστού

$$z$$
: Ο λόγος μάζας ίσος με  $z = \frac{m}{\rho c \theta}$ 

*m* : Η μάζα ανά μονάδα επιφανείας

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>0</sup>**

## Η ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΟΛΚΙΜΟΤΗΤΑΣ

Ο ναυπηγικός χάλυβας συγκαταλέγεται στα όλκιμα υλικά. Δηλαδή, σε περίπτωση φόρτισης, έχει την ιδιότητα να παραμορφώνεται πλαστικά πριν από τη θραύση του. Αν πραγματοποιήσουμε μια δοκιμή εφελκυσμού τότε το διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης θα είναι παρόμοιο με το παρακάτω[2]:



Οι βασικές περιοχές του διαγράμματος είναι οι εξής:

 ΟΑ είναι η περιοχή της γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς όπου η τάση και η παραμόρφωση συνδέονται γραμμικά μέσω της σχέσης του Hooke
σ = Ε · ε

Όπου:

E: το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young

Σε αυτή την περιοχή, αν σταματήσουμε την επιβολή φορτίου, το υλικό θα επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση, δηλαδή δεν θα υπάρχει παραμένουσα παραμόρφωση.

- Ακολουθεί η περιοχή μη γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς. Η τάση και η παραμόρφωση συνδέονται με μη-γραμμική σχέση.
- Μετά το σημείο διαρροής που αντιστοιχεί στην τάση διαρροής (yielding stress, σ<sub>y</sub>) τελειώνει η περιοχή της ελαστικής συμπεριφοράς. Ξεκινά η περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης. Πλεον, αν πάψουμε να επιβάλουμε φορτίο, το υλικό δεν θα επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση αλλά θα έχουμε μια μόνιμη παραμένουσα παραμόρφωση.
- Σε κάποια όλκιμα υλικά έχουμε δημιουργία «λαιμού», δηλαδή ενός σημείου στο οποίο η διατομή μειώνεται έντονα και στο οποίο συνήθως σημειώνεται και η θραύση.
- Το εμβαδόν του χωρίου ΟΑΕΛ<sub>1</sub>Λ<sub>2</sub>ΣΜθe<sub>θ</sub>Ο αποτελεί τη στερότητα του υλικού, δηλαδή τη συνολική ενέργεια που απαιτείται για τη θραύση του υλικού.

Σημειώνεται ότι το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει τις συμβατικές (engineering) τάσεις και συμβατικές (engineering) παραμορφώσεις οι οποίες διαφέρουν από τις πραγματικές τάσεις και παραμορφώσεις. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην αλλαγή της διατομής του δοκιμίου που εξετάζεται.

Κατά την μελέτη των ναυπηγικών κατασκευών γίνονται ορισμένες παραδοχές οι οποίες έχουν απλουστευτικό χαρακτήρα για λόγους εύκολης χρήσης των μεθόδων της ανάλυσης της αντοχής των κατασκευών καθώς και για ευκολότερη μοντελοποίηση. Ωστόσο, αυτές οι παραδοχές πρέπει να διατηρούν τα βασικά χαρακτηριστικά των θεωρούμενων υλικών.

Χρησιμοποιούμε μια μοντελοποίηση που βασίζεται στη γραμμικοποίηση της συμπεριφοράς μετά το σημείο διαρροής. Το μοντέλο που χρησιμοποιούμε είναι αυτό ενός γραμμικού ελαστικού-πλαστικού υλικού με σκλήρυνση και παρουσιάζεται παρακάτω [1].



Μέχρι το σημείο διαρροής, κατά το πρώτο στάδιο της φόρτισης ισχύει ο νόμος του Hooke, δηλαδή η παραμόρφωση ισούται με:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Για το υλικό μας, το ναυπηγικό χάλυβα, το μέτρο ελαστικότητας ισούται με E = 207 GPa ενώ η τάση διαρροής είναι ίση με  $\sigma_v = 235 MPa$ .

Μετά το σημείο διαρροής η τάση συνεχίζει να αυξάνει με την αύξηση της παραμόρφωσης με κλίση που ισούται με το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας  $E_h = 10 MPa$ .

Σε περίπτωση αποφόρτισης του υλικού ενώ έχει επιβληθεί μια δεδομένη παραμόρφωση  $ε_0$  η παραμένουσα παραμόρφωση θα είναι ίση με τη διαφορά της παραμόρφωσης  $ε_0$  και της μέγιστης ελαστικής παραμόρφωσης:

$$\mathcal{E}_{\pi\alpha\rho\alpha\mu.} = \mathcal{E}_o - \mathcal{E}_{elastic}$$

Όπου η μέγιστη ελαστική παραμόρφωση θα είναι

$$\varepsilon_{elastic} = \frac{\sigma_y}{E}$$

Στο Abaqus ένας εύχρηστος τρόπος για να ορίσουμε τα χαρακτηριστικά του υλικού μας είναι να εισάγουμε ξεχωριστά τα στοιχεία της ελαστικής και της πλαστικής συμπεριφοράς. Έτσι με την εντολή \*ELASTIC ορίζουμε την πυκνότητα του υλικου (7800Kg/m<sup>3</sup> για το μαλακό χάλυβα), το λόγο του Poison (v=0,3) και το

μέτρο ελαστικότητας. Με την εντολή \*PLASTIC ορίζουμε την τάση διαρροής καθώς και την καμπύλη τάσης-παραμένουσας παραμόρφωσης εισάγοντας ζεύγη τιμών. Προσοχή απαιτείται στο γεγονός ότι το Abaqus απαιτεί να εισάγουμε τις πραγματικές τιμές της τάσης και της παραμόρφωσης[4].

Συνεπώς απαιτούμε να κάνουμε την μετατροπή από τις συμβατικές τιμές της τάσης και της παραμόρφωσης, στις πραγματικές τιμές. Για να το κάνουμε αυτό χρησιμοποιούμε τις σχέσεις που παρουσιάζονται παρακάτω:

Η συμβατική παραμόρφωση εκφράζεται ως:

$$\varepsilon_{nom} = \frac{l - l_o}{l_o} = \frac{l}{l_o} - \frac{l_o}{l_o} = \frac{l}{l_o} - 1$$

Όπου

*l* : τελικό μήκος δοκιμίου

*l*<sub>o</sub>: αρχικό μήκος δοκιμίου

Η πραγματική παραμόρφωση ορίζεται ως:

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_o}$$

Και από τις δύο παραπάνω σχέσεις συνεπάγεται ότι

$$\varepsilon = \ln(\varepsilon_{nom} + 1)$$

Επιπλέον για την τάση ισχύει

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Όπου

F: το φορτίο που καταπονεί τη διατομή.

Α: Το εμβαδόν της διατομής.

Αν συμβολίσουμε με  $A_o$  το εμβαδόν της αρχικής διατομής και με A το εμβαδόν της τελικής διατομής και θεωρόντας ότι μετά την πλαστική παραμόρφωση έχουμε σταθερό όγκο σε σχέση με τον αρχικό τότε ισχύει:

$$l_o \cdot A_o = l \cdot A \Longrightarrow A = A_o \cdot \frac{l_o}{l}$$

Και από τον ορισμό της τάσης θα έχουμε

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_o} \cdot \frac{l}{l_o} = \sigma_{nom} \cdot \frac{l}{l_o} = \sigma_{nom} \left(1 + \varepsilon_{nom}\right)$$

Από τα στοιχεία που έχουμε παρουσιάσει ως τώρα μπορούμε να παρουσιάσουμε το διάγραμμα πραγματικών τάσεων και παραμένουσων παραμορφώσεων σε σύγκριση με τις συμβατικές τιμές τους με βάση τις σχέσεις:

$$\varepsilon = \ln(\varepsilon_{nom} + 1)$$
$$\sigma = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom})$$



Τα ζεύγη τιμών που προέρχονται από το παραπάνω διάγραμμα είναι αυτά που εισάγονται στην ανάλυση του Abaqus μέσω του κώδικα (input deck) και παρουσιάζονται παρακάτω.

\*MATERIAL, NAME=STEEL \*ELASTIC 207.0E9, 0.3 \*PLASTIC 235.0E6, 0.0 258.61E6, 0.09531018 282.24E6, 0.182321557 305.89E6, 0.262364264 329.56E6, 0.336472237 353.25E6, 0.405465108 376.96E6, 0.470003629

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι φυσικά τα στοιχεία της κατασκευής δεν μπορούν να παραμορφώνονται πλαστικά πέρα από ένα σημείο αφού τελικά επέρχεται η αστοχία (θραύση) τους. Ωστόσο δεν κρίνεται αναγκαίο να καθορίσουμε το κριτήριο θραύσης για το μοντέλο μας αφού όπως θα δούμε στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση δεν ξεπερνάει το 0.16.

#### Επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης

Οι φορτίσεις οι οποίες εξετάζουμε σε αυτή την εργασία χαρακτηρίζονται ως κρουστικές, δηλαδή έχουν πολύ μικρό χρόνο επιβολής. Πιο συγκεκριμένα, ο χρόνος διάδοσης των τασικών κυμάτων στο υλικό (ο οποίος χρόνος σχετίζεται με το ρυθμό φόρτισης) είναι συγκρίσιμος με την ιδιοπερίοδο της κατασκευής. Αλλά και η μεγάλη ταχύτητα παραμόρφωσης του υλικού χαρακτηρίζει μια φόρτιση ως κρουστική.

Λόγω της απόκρισης που δημιουργεί αυτό το είδος της φόρτισης, η πραγματική τάση διαρροής του υλικού διαφέρει από αυτή που υπολογίζεται στο εργαστήριο όπου τα τυποποιημένα δοκίμια καταπονούνται στατικά. Γενικά η τάση διαρροής σε μια κρουστική φόρτιση αυζάνει και η τιμή της σχετίζεται με το ρυθμό παραμόρφωσης αλλά και με άλλα χαρακτηριστικά του υλικού[10].

Στην ανάλυσή μας είναι απαραίτητο να λάβουμε υπόψην το φαινόμενο της επίδρασης του ρυθμού παραμόρφωσης καθώς όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο, η παράλειψη του οδηγεί σε πολύ έντονες παραμορφώσεις, μεγαλλύτερες από αυτές που μετρούνται πειραματικά.

Δύο σχετικά απλά μοντέλα που συνδέουν την τάση διαρροής με το ρυθμό παραμόρφωσης είναι το μοντέλο των Johnson-Cook και αυτό των Cowper-Symonds. Η σχέση των Cowper-Symonds απαιτεί λιγότερες παραμέτρους από το μοντέλο των Johnson-Cook και είναι αρκετά απλή. Αν και εμπειρική και παρά την απλότητά της δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα που συμφωνούν με την πειραματική εμπειρία με αρκετά καλή ακρίβεια. Για αυτόυς τους λόγους την χρησιμοποιούμε στην ανάλυσή μας. Η σχέση είναι η εξής [4, 10]:

$$\frac{\sigma_{y}^{*}}{\sigma_{y}} = 1 + \left(\frac{\varepsilon}{C}\right)^{\frac{1}{p}}$$



- $\sigma_y^*$ , η τάση διαρροής για την εξεταζόμενη φόρτιση
- $\sigma_{\rm y}$ , η τάση διαρροής σε στατική φόρτιση
- ε, ο ρυθμός παραμόρφωσης
- *C*, p , σταθερές που σχετίζονται με το υλικό. Για το μαλακό χάλυβα συνήθεις τιμές είναι:  $C = 40s^{-1}$ , p = 5.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>0</sup> Μοντελοποίηση ενισχυμένων και απλών ελασμάτων

Επιλογή των στοιχείων του μοντέλου για επίλυση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

Βασικό ζήτημα ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων με επιτυχία είναι ακριβώς η σωστή επιλογή των στοιχείων που θα μοντελοποιήσουν την κατασκευή. Από την πληθώρα των διδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων που παρέχει το Abaqus καθώς και άλλα αντίστοιχα υπολογιστικά πακέτα, θα πρέπει να επιλεχθούν αυτά που ταιριάζουν στο αντίστοιχο πρόβλημα, δηλαδή τη γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά της κατασκευής, και είναι και τα πιο «οικονομικά». Λέγοντας «οικονομικά» ενοούμε να μας εξοικονομούν πολύτιμο υπολογιστικό χρόνο. Ωστόσο, δεν θα πρέπει στο όνομα της ταχύτητας να θυσιάζουμε την ακρίβεια του αποτελέσματος.

Το γεγονός ότι τα ελάσματα του πλοίου αλλά και τα ενισχυτικά έχουν πολύ μικρό πάχος σε σχέση με τις άλλες διαστάσεις μας δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε στοιχεία κελύφους (shell elements), τα οποία είναι τετρακομβικά διδιάστατα στοιχεία.

Γενικότερα, τα διδιάστατα στοιχεία διακρίνονται κυρίως σε plain stress elements και σε plain strain elements. Τα plain stress elements ικανοποιούν την θεωρία της επίπεδης εντατικής κατάστασης. Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις φορτίσεως λεπτών επίπεδων πλακών, όταν δηλαδή το πάχος είναι μικρό σε σχέση με τις υπόπλοιπες διαστάσεις στο επίπεδο του στοιχείου. Οι τάσεις και η παραμόρφωση σε άξονα κάθετο στο επίπεδο του στοιχείου υπολογίζονται συναρτήσει των επίπεδων συντεταγμένων μόνο. Οι διατμητικές τάσεις είναι μηδενικές.

Τα plane strain elements χαρακτηρίζονται από την πολύ μεγαλύτερη z-διαστασή του σώματος σε σχέση με τις x,y διαστάσεις του. Έχουν εφαρμογή σε μεγάλου πάχους πλάκες και «υποθέτουν» ότι οι παραμορφώσεις μπορούν να υπολογισθούν μόνο συναρτήσει των συντεταγμένων του επιπέδου. Στην παρούσα εργασία για την μοντελοποίηση χρησιμοποιούνται τα στοιχεία κελύφους S4 και S4R από την βιβλιοθήκη στοιχείων του Abaqus.

Τα στοιχεία S4 παρουσιάζουν μεγάλη ευελιξία στη χρήση τους καθώς μπορούν να μοντελοποιήσουν plane stress και plane strain elements. Επίσης όταν το πάχος τους είναι μικρότερο από το 1/15 του μήκους, συμπεριφέρονται ως επίπεδες λεπτές πλάκες σε κάμψη με μεγάλες μετατοπίσεις. Για μεγαλλύτερο πάχος παραλαμβάνουν διατμητικές δυνάμεις και εγκάρσιες φορτίσεις αλλάζοντας ακόμη και το πάχος τους εφόσον έχει ορισθεί ο λόγος Poisson στη διατομή [4].

Τα στοιχεία S4R έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τα στοιχεία S4 με μόνη διαφορά ότι τα στοιχεία S4R έχουν ένα μόνο σημείο ολοκλήρωσης σε αντίθεση με τα 4 σημεία των στοιχείων S4 και συνεπώς είναι πιο οικονομικά [4]. Σε επόμενο κεφάλαιο εξετάζεται η παραμόρφωση επίπεδης τετράγωνης πλάκας λόγω ομοιόμορφης κρουστικής φόρτισης μοντελοποιούμενη αρχικά με στοιχεία S4 και στη συνέχεια S4R. Εκεί εξετάζεται αν η χρησιμοποίηση των πιο οικονομικών στοιχείων S4R εισάγει σημαντικό σφάλμα.

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>0</sup>**

# Μελέτη της απόκρισης μεταλλικής τετράγωνης πλάκας σε κρουστικό φορτίο

Αρχικά, μας απασχολεί το ζήτημα της ακρίβειας της μεθόδου, των παραδοχών και των δεδομένων που χρησιμοποιούμε. Δεδομένου ότι η πράξη είναι αυτή που επαληθεύει ή καταρίπτει κάθε αναλυτική ή αριθμητική επίλυση, καταφεύγουμε στη βιβλιογραφία για πειραματικά δεδομένα.

Οι S. Chung Kim Yuen και G. N. Nurick πραγματοποίησαν μια σειρά από πειράματα των οποίων τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα δημοσίευσαν το 2003 [10]. Αντικείμενα του πειράματος του πειράματος ήταν τετράγωνες πλάκες από μαλακό χάλυβα με μήκος πλευράς 126 mm και πάχοι 1,6 mm και 1,63mm. Κάποιες πλάκες είχαν ενισχυτικά, ενώ έγιναν και δύο πειράματα με απλές πλάκες χωρίς ενίσχυση. Τα τελευταία πειράματα είναι που θα μας απασχολήσουν.

Η πειραματική διάταξη προέβλεπε την εφαρμογή κρουστικού φορτίου ομοιόμορφα στην πλάκα με τη χρήση πλαστικού εκρηκτικού. Η ομοιομορφία της φόρτισης επιτυγχάνεται με την κατάλληλη κατανομή του εκρηκτικού καθώς και με την παρεμβολή ενός στρώματος πολυστυρενίου ανάμεσα στην πλάκα και το εκρηκτικό. Η όλη διάταξη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Με τη χρήση διαφορετικής ποσότητας εκρηκτικής ύλης, ρυθμίζεται η ένταση του κρουστικού παλμού. Επίσης, η διάρκεια του παλμού σχετίζεται με το χρόνο καύσης, άρα με το είδος της εκρηκτικής ύλης. Η μέγιστη πίεση συνδέεται με την ένταση του παλμού και τη διάρκειά του με βάση τη σχέση:

$$P_{\max} = \frac{I}{A \cdot \tau}$$

Όπου:

- I: Η ένταση του παλμού σε  $N \cdot s$
- Α : Η επιφάνεια της πλάκας
- τ : Η διάρκεια του παλμού

Σε κάθε πείραμα καταγράφεται η μετατόπιση του κέντρου της πλάκας από την αρχική θέση/κατάσταση. Αυτό το στοιχείο είναι ένα μέτρο για την παραμόρφωση της πλάκας. Τα στοιχεία και τα αποτελέσματα για τα δύο πειράματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Κωδικός	Πάχος	Impulse	Διάρκεια	Όριο	Μέτρο	Μετατόπιση
πειράματος	πλάκας	$(N \cdot s)$	παλμού	διαρροής	ελαστικότητας	κέντρου
	(mm)		(µsec)	(MPa)	(GPa)	(mm)
S56	1.6	31	14.5	242	210	25.6
S01	1.63	43.4				35.5

Δημιουργούμε ένα μοντέλο με Shell elements και με πλέγμα 20\*20. Το μέγεθος του πλέγματος επιλέχθηκε ύστερα από δοκιμές. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε όσον το δυνατόν μικρότερος αριθμός στοιχείων που όμως να μην οδηγεί σε μεγάλη απόκλιση από ότι ένα μοντέλο με μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων. Πιο ειδικά τα αποτελέσματα με τη χρήση πλέγματος 20\*20 δεν διέφεραν πρακτικά από τα αποτελέσματα με χρήση πλέγματος 40\*40 και 60\*60 ενώ διέφεραν σημαντικά από τα αποτελέσματα με χρή πλέγματος 10\*10. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι τα S4 που περιγράφτηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Τα φαινόμενα της επίδρασης του ρυθμού παραμόρφωσης αλλά και της σκλήρυνσης του υλικού παίρνονται υπόψην και με βάση τις σχέσεις που έχουν παρουσιασθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Επιπλέον, η φόρτιση μοντελοποιείται με τετραγωνικό παλμό.

#### Παρουσίαση αποτελεσμάτων - Σχολιασμός

Παρακάτω παρουσιάζονται σε διαγράμματα η μετατόπιση του κεντρικού κόμβου στο χρόνο.





Το πρώτο που παρατηρούμε είναι ότι τα υπολογιστικά αποτελέσματα προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις πειραματικές μετρήσεις, κάτι που επιβεβαιώνει τις επιλογές μας κατά τον καθορισμό του μοντέλου και των διάφορων παραμέτρων. Σύμφωνα με τα υπολογιστικά αποτελέσματα, για το μοντέλο S56 θα έχουμε τελική μόνιμη μετατόπιση του κέντρου κατά 24,8mm (ενώ η πειραματική μέτρηση είναι 25,6mm), ενώ για το μοντέλο S01 θα έχουμε τελική μόνιμη μετατόπιση του κέντρου κατά 33,1mm (ενώ η πειραματική μέτρηση είναι 35.5mm). Συνεπώς θα έχουμε μια απόκλιση κατά 2,7% για το μοντέλο S56 και 6,8% για το μοντέλο S01.

Επιπλέον, παρατηρούμε τα εξής:

- Βλέπυμε ότι η μέγιστη μετατόπιση δεν ταυτίζεται με την μόνιμη. Για το μοντέλο S56 η μέγιστη μετατόπιση είναι 25,3mm ενώ για το S01 είναι 33,5mm. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο (και θα το δείξουμε αυτό στη συνέχεια της εργασίας) σε ελάσματα με μεγαλλύτερη επιφάνεια.
- Επίσης, ενώ το κέντρο της πλάκας φτάνει στη μέγιστη μετατόπιση σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα (περίπου 180-190 μsec), ωστόσο στη συνέχεια η πλάκα ταλαντώνεται μέχρι την απόσβεση της ταλάντωσης η οποία συμβαίνει πολύ αργότερα σε σχέση με τον χρόνο που επιτυγχάνεται η μέγιστη μετατόπιση.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η μετατόπιση κατά τα πρώτα 300 μsec. Εκεί βλέπουμε ότι και στα δύο μοντέλα η μέγιστη μετατόπιση γίνεται σε ουσιαστικά όμοια χρονικά διαστήματα (στα 190msec).





Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η εξέλιξη της παραμόρφωσης της πλάκας. Βλέπουμε ότι η παραμόρφωση ξεκινά από την περιοχή των πλευρών της πλάκας και συνεχίζεται προς το κέντρο. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι αρχικά όλη η πλάκα, εκτός από τις πλευρές που στηρίζονται με πάκτωση, μετατοπίζεται προς τον άξονα του πάχους της, ενώ στη συνέχεια μετατοπίζονται όλο και λιγότερες περιοχές της πλάκας με τελευταία την κεντρική περιοχή. Οι εικόνες παρουσιάζουν τις μετατοπίσεις των κόμβων σε άξονα κάθετο στην πλάκα. Προέρχονται από το μοντέλο S01.









Μετά από 140µsec



Επιπλέον, στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η μέγιστη κύρια παραμόρφωση των στοιχείων της πλάκας, από όπου βγαίνει το συμπέρασμα ότι οι μέγιστες παραμορφώσεις εμφανίζονται στα μεσαία τμήματα των πλευρών. Συνεπώς, σε περίπτωση που έχουμε υψηλότερη φόρτιση που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του υλικού, αυτή η αστοχία θα ξεκινήσει από αυτές τις περιοχές.





Αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο ότι τα στοιχεία S4R από τη βιβλιοθήκη στοιχείων του Abaqus είναι πιο «οικονομικά», δηλαδή μας εξοικονομούν πολύτιμο υπολογιστικό χρόνο, από τα στοιχεία S4 και εξηγήσαμε το λόγο. Για να δούμε τις διαφορές που μπορεί να υπάρξουν στο αποτέλεσμα επαναλαμβάνουμε την επίλυση των μοντέλων S56 και S01 χρησιμοποιώντας τα στοιχεία S4R. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι δεν υπάρχουν ουσιώδεις διαφορές καθώς για το S56 βρίσκουμε τελική κεντρική μετατόπιση 24,9mm (ενώ με τα στοιχεία S4 υπολογίσαμε 24,8mm) ενώ για το S01 υπολογίζουμε 33,1mm (δηλαδή όσα και πριν).

Παρακάτω παρουσιάζεται η διαφορά που οδηγεί στο αποτέλεσμα η παράβλεψη του φαινομένου του υψηλού ρυθμού παραμόρφωσης και για τα δύο μοντέλα.



Βλέπουμε εδώ τις μεγάλες διαφορές που προκύπτουν αν δεν πάρουμε υπόψην μας το φαινόμενο του υψηλού ρυθμού παραμόρφωσης. Σε αυτήν την περίπτωση οδηγούμαστε σε υπερβολικά μεγάλες παραμορφώσεις, πολύ πιο έντονες από αυτές που προκύπτουν από την πειραματική εμπειρία. Την αιτία για αυτό το φαινόμενο (δηλαδή του περιορισμού των παραμορφώσεων όταν ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι πολύ υψηλός) τον αναφέρουμε σε προηγούμενο οικείο κεφάλαιο. Το ίδιο παρατηρείται και για το μοντέλο S01 όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Τέλος, μας απασχολεί το ζήτημα της μοντελοποίησης της φόρτισης. Είδαμε παραπάνω ότι το μοντέλο του τετραγωνικού παλμού οδηγεί σε αρκετα καλά αποτελέσματα. Ωστόσο, είναι ζήτημα προς διερεύνηση το ζήτημα του σχήματος του παλμού και κατά πόσο αυτό επιδρά. Για να το διερευνήσουμε θα εξετάσουμε τρεις εναλλακτικές μορφές του παλμού φροντίζοντας έτσι ώστε να έχουμε πάντα την ίδια τιμή του ολοκληρώματος:

$$\int_{0}^{\tau} P(t) dt$$

Όπου:

P(t): Η ασκούμενη πίεση πάνω στην πλάκα

au : Η συνολική διάρκεια εφαρμογής της πίεσης

Δηλαδή, διατηρούμε το ίδιο εμβαδόν στο διάγραμμα πίεσης προς το χρόνο. Οι μορφές του παλμού που θα εξετάσουμε παρουσιάζονται παρακάτω.



Παρακάτω έχουμε τα διαγράμματα κεντρικής μετατόπισης προς το χρόνο για κάθε μορφή φόρτισης για το μοντέλο S01.



Τετραγωνικός παλμός «Quad1». Δεξιά φαίνονται οι τελικές μετατοπίσεις των κόμβων στο μοντέλο της πλάκας.







Τριγωνικός παλμός «Tria1».


Βλέπουμε από τα διαγράμματα ότι δεν υπάρχει σημαίνουσα διαφορά στα αποτελέσματα. Από αυτό συμπαιρένουμε ότι τουλάχιστον για την περίπτωση της τετράγωνης πλάκας το σχήμα του παλμού δεν επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα αρκεί να διατηρείται σταθερό το ολοκλήρωμα που έχουμε παρουσιάσει παραπάνω.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>0</sup>**

# Μελέτη της απόκρισης ναυπηγικού ελάσματος δίχως ενισχυτικά

Γνωρίζουμε ότι η μεθοδολογία που επιλέξαμε παρέχει αρκετά ακριβή αποτελέσματα αφού συγκρίναμε τα αποτελέσματα που μας παρέχει σε πλάκες μικρού μεγέθους, με ορισμένα πειραματικά αποτελέσματα. Στο συμπέρασμα αυτό καταλήξαμε μετά την μελέτη που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στη συνέχεια επεκτείνουμε τη μέθοδο σε ορθογωνικές πλάκες με λόγο πλευρών 3:1. Σημειώνεται ότι για αυτή την κλίμακα δεν διαθέτουμε πειραματικά αποτελέσματα.

Εξετάζουμε έλασμα από μαλακό χάλυβα με διαστάσεις 800mm\*2400mm και με πάχος 16mm. Οι διαστάσεις του ελάσματος είναι οι τυπικές ενός ναυπηγηθέντος ελάσματος και για αυτό τις επιλέγουμε. Τα στοιχεία του υλικού είναι:

- Μέτρο ελαστικότητας Ε= 207Gpa
- Όριο διαρροής  $\sigma_y = 235 Mpa$
- Λόγος Poisson v=0,3

Το έλασμα θεωρείται πακτωμένο στις πλευρές, δηλαδή οι πλευρές είναι περιορισμένες και για τους 6 βαθμούς ελευθερίας (δεν επιτρέπονται κινήσεις και περιστροφές και για τους τρεις άξονες). Πάνω στην επιφάνεια του ελάσματος ασκείται ομοιόμορφη φόρτιση με την μορφή τετραγωνικού παλμού με Pmax = 10MPa και για χρόνο τ=500μsec.

Ένα ζήτημα που μας απασχολεί είναι να υιοθετήσουμε ένα πλέγμα που να δίνει ακριβή αποτελέσματα άλλα να είναι όσο το δυνατόν πιο «οικονομικό», δηλαδή με όσο το δυνατόν λιγότερα στοιχεία έτσι ώστε να απαιτείται ο ελάχιστος υπολογιστικός χρόνος και ισχύς για τον υπολογισμό του αποτελέσματος. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πλέγματα που εξετάστηκαν και επιλέγουμε για τη συνέχεια το πιο «αραιό» πλέγμα που προσεγγίζει αρκετά τα αποτελέσματα που δίνουν τα πιο «πυκνά» πλέγματα. Το εξαγόμενο αποτέλεσμα που εξετάζουμε είναι η μέγιστη μόνιμη μετατόπιση κόμβου.

Μέγεθος της πλευράς του	Πλέγμα	Μέγιστη μόνιμη
στοιχείου		μετατόπιση
200mm	12*4	41,8mm
100mm	24*8	44,2mm
80mm	30*10	44,9mm
50mm	48*16	45,4mm
40mm	60*20	45,7mm
20mm	120*40	46,1mm
10mm	240*80	46.6mm

Συνεπώς για τη μελέτη μας επιλέγουμε πλέγμα 60\*20 (δηλαδή μέγεθος στοιχείου ίσο με 40mm) καθώς φαίνεται ότι προσεγγίζει τα αποτελέσματα που παρέχουν τα πιο «πυκνά» πλέγματα.

Η τελική μορφή του παραμορφωμένου ελάσματος διαφέρει από αυτή της τετράγωνης πλάκας καθώς η μέγιστη μετατόπιση δεν εμφανίζεται μόνο στο κέντρο του ελάσματος αλλά σε μια πιο ευρύ περιοχή γύρω από μια κεντρική οριζόντια γραμμή όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η μετατόπιση του κεντρικού κόμβου σε σχέση με το χρόνο. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη μετατόπιση είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την τελική μόνιμη μετατόπιση, φαινόμενο που είχε παρατηρηθεί και στην τετράγωνη πλάκα πλευράς 126mm αλλά λιγότερο έντονο. Μεγαλύτερης σημασίας είναι και η ταλάντωση που παρατηρείται η οποία διαρκεί για πολύ

μεγαλλύτερο χρόνο από αυτόν που ασκείται πίεση πάνω στην επιφάνεια του ελάσματος και η οποία έχει και σημαντικά μεγάλο εύρος.





Επιπλέον, από το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι η μέγιστη μετατόπιση συμβαίνει στα πρώτα 1,8msec.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η εξέλιξη της παραμόρφωσης του ελάσματος. Βλέπουμε ότι υπάρχει ομοιότητα με το παράδειγμα της πλάκας που εξετάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, δηλαδή παρατηρείται ότι η παραμόρφωση ξεκινά από την περιοχή των πλευρών και καθώς περνάει ο χρόνος, όλο και μικρότερο τμήμα του ελάσματος συνεχίζει να μετατοπίζεται. Η διαφορά με την τετράγωνη πλάκα συνίσταται στο ότι το κέντρο δεν είναι το μόνο τμήμα στο οποίο έχουμε τη μέγιστη μόνιμη μετατόπιση αλλά η μέγιστη μετατόπιση παρουσιάζεται σε μια ευρύτερη περιοχή του ελάσματος γύρω από την κεντρική οριζόντια γραμμή.







Στη συνέχεια, όπως κάναμε και με την τετράγωνη πλάκα, θε εξετάσουμε την επίδραση του σχήματος του διαγράμματος φόρτισης προς το χρόνο. Οι διαφορετικές μορφές που εξετάζουμε έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτές που εφαρμόσαμε στην τετράγωνη πλάκα. Δηλαδή:



Τα διαγράμματα παρακάτω παρουσιάζουν την κεντρική μετατόπιση του ελάσματος συναρτήση του χρόνου.



Μορφή Quad1. Η τελική μόνιμη μετατόπιση είναι ίση με 46,8mm.





Μορφή Tria1. Η κεντρική μόνιμη μετατόπιση είναι 44,1 mm.



Μορφή Tria2. Η κεντρική μόνιμη μετατόπιση είναι 46,4 mm.

Βλέπουμε ότι οδηγούμαστε γενική σε διαφορετικά αποτελέσματα που όμως η απόκλιση μεταξύ τους είναι αρκετά μικρή σε σχέση με τα δεδομένα του προβλήματος και άρα χωρίς ιδιαίτερη σημασία. Βλέπουμε επίσης ότι μεγάλη σημασία έχει ο χρόνος φόρτισης. Επιπλέον η μεγαλύτερη παραμόρφωση προκύπτει για την αρχική μορφή την οποία εξάλου την είχαμε επιλέξει και αρχικά.

Τέλος στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα σημεία της κατασκευής στα οποία εμφανίζεται η μέγιστη παραμόρφωση.



PEEQ Stitls, (fvact (Avar, 1754) + 1.033 + 0.055 + 0.553 + 0.555 + 0.5	<pre>90 = -1.0) +-01 +-01 +-01 +-02 +-02 +-02 +-02 +-02 +-02 +-02 +-02</pre>		Step: Step:	$ \begin{array}{l} \hline Q \\ \hline G \\ G \\ (f'a (tim = -10) \\ \phi (756.) \\$		Step: Step-1	Frane:	1500
	ABAQUS job created on 10-Se OD8: MESH60_20.edb Abaq	00 at 15:27:36 s/Enplicit Version 6.7-1 Wed Sep 10 13:36:39 GTB Da	sylight Time 2008	ABAQUS jab cre OD8: MESH60_3	ted on 10-5ep-00 at 15:27:36 0.adb Abaqus/Englicit Version 6.7-1 Wed Sep 10 15:36:39 GT	8 Daylight Time 2008		
۲×۲ ۲	Step: Step-1 Increment 705: Step Time - Primary Var: PEEQ Deformed Van U Deformation	4.0027E-03 Scale Factor: +1.000a+00	٣ <sub>3</sub>	Step: Step-1 Increment 256 Primary Var: PEE Deformed Van U	64: Step Time = 0.1500 Q Deformation Scale Factor: +1.000++00			
	Ye	στερα από 4 msec	2		Τελική μορφή			

Βλέπουμε από τα παραπάνω ότι παραμορφώνονται κυρίως τα στοιχεία στην μεγαλύτερη πλευρά του ελάσματος όπως και ήταν αναμενόμενο.

Συμπερασματικά και σε συνάρτηση με τους στόχους που βάλαμε για αυτό το κεφάλαιο στην αρχή της εργασίας, μπορούμε να σημειώσουμε τα παρακάτω:

- Η μοντελοποίηση χρησιμοποιώντας πλέγμα με στοιχεία μεγέθους 40mm αποδεικνύεται η όσο το δυνατόν πιο οικονομική (με όρους υπολογιστικού χρόνου) για την επίτευξη μιας αρκετά καλής ακρίβειας. Παρουσιάσαμε πως καταλήξαμε σε αυτό το συμπέρασμα στο κεφάλαιο χρησιμοποιώντας διαφορετικά μεγέθη στοιχείων. Συνεπώς αυτό το μέγεθος στοιχείου θα χρησιμοποιηθεί και στο επόμενο μοντέλο.
- Και όπως στο προηγούμενο κεφάλαιο, έτσι και σε αυτό επιβεβαιώθηκε ότι η μοντελοποίηση με τετραγωνικό ή τριγωνικό παλμό οδηγούν σε παρόμοια αποτελέσματα εφόσον η ένταση του παλμού παραμένει ίδια και ο χρόνος επιβολής δεν μεταβάλλεται πάρα πολύ (σε σχέση με τη φυσική ιδιοπερίοδο της κατασκευής). Συνεπώς στο επόμενο μοντέλο θα μοντελοποιήσουμε μια σειρά φορτίσεις με χρήση τετραγωνικού παλμού.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**<sup>0</sup>

# Υπολογισμός στοιχείων πυθμένα με βάση τους κανονισμούς του Αμερικανικού Νηογνώμονα (American Bureau of Shipping)

Θα υπολογήσουμε τα βασικά κατασκευαστικά στοιχεία, δηλαδή το πάχος ελάσματος και το εμβαδόν των ενισχυτικών για το Bulk Carrier ALPHA CENTURY. Τα αποτελέσματα θα αποτελέσουν βάση για τη σχεδίαση μοντέλου τμήματος του πυθμένα για την ανάλυση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Παρακάτω καταγράφονται τα βασικά στοιχεία του πλοίου:

$$L_{BP} = 279m$$
  
 $L_{OA} = 289m$   
 $B = 44.98m$   
 $D = 24.4m$   
 $T = 17.95m$   
 $\Delta = 194985t$   
 $DWT = 170415t$   
 $C_B = 0.844$ 

### Υπολογισμός πάχους ελάσματος

Καταρχήν, οι κανονισμοί του ABS προβλέπουν ένα ελάχιστο πάχος ελάσματος το οποίο πρέπει να επιλέγεται αν το υπολογισθέν πάχος είναι μικρότερο από την ελάχιστη τιμή. Για τον πυθμένα το ελάχιστο πάχος είναι:

Minimum Net Thickness (mm) = 5.5 + 0.03 \* L = 13.9 mm

Όπου L είναι το μήκος για τους κανονισμούς που στην προκειμένη περίπτωση ταυτίζεται με το μήκος μεταξύ καθέτων. Επίσης, η σχέση για τον υπολογισμό του απαιτούμενου πάχους υπολογίζεται από τη σχέση:

$$t = 15.8 \cdot C_a \cdot C_r \cdot s \cdot \sqrt{\frac{P_s + P_w}{\lambda_P \cdot R_Y}}$$

Όπου:

 $C_a$ : Συντελεστής μορφής του τμήματος ελάσματος χωρίς ενισχυτικά (elementary plate panel) ίσος με

$$C_a = 1.21 \cdot \sqrt{1 + 0.33 \cdot \left(\frac{s}{l}\right)^2} - 0.69 \frac{s}{l}$$

S : Το μήκος της μικρότερης πλευράς του τμήματος του ελάσματος ανάμεσα στις ενισχύσεις ίσο με 900 mm= 0.9m για το υπό μελέτη πλοίο.

*l* : Το μήκος της μεγαλλύτερης πλευράς του τμήματος του ελάσματος ανάμεσα στις ενισχύσεις ίσο με 1300 mm=1.3m για το πλοίο ύπο μελέτη.

Άρα  $C_a = 0.841$ 

 $C_{\rm r}$ : Συντελεστής καμπυλότητας του ελάσματος. Δίνεται από τη σχέση

 $C_r = 1 - 0.5 \cdot \frac{s}{r},$ δεδομένου ότι δεν έχουμε καμπυλότητα στον πυθμένα θα έχουμε  $C_r = 1$ 

 $R_{\rm y}$ : Συμβατική τάση διαρροής κοινού ναυπηγικού χάλυβα ίση με 235 N/mm<sup>2</sup> ή 235 MPa.

 $\lambda_p$ : Συντελεστής σχετιζόμενος με το συντελεστή ασφάλειας. Δίνεται από τη σχέση  $\lambda_p = 0.95 - 0.45 \cdot \left| \frac{\sigma_x}{R_y} \right|$ . Η τάση  $\sigma_x$ επιλέγεται ως η μέγιστη επιτρεπόμενη από τη σχέση  $\sigma_{1,ALL} = \frac{130}{k} (N/mm^2)$ , (σε αυτή τη σχέση οι κανονισμοί του ABS προβλέπουν τη χρήση δύο τάσεων στον αριθμητή 130 και 190 MPa αντίστοιχα για τον πυθμένα και το κατάστρωμα. Ωστόσο, αφού επιλέγουμε τα κατασκευαστικά στοιχεία για τον πυθμένα δικαιούμαστε να επιλέξουμε τάση). Ο συντελεστής k σχετίζεται με το υλικό και για το κοινό ναυπηγικό χάλυβα ισούται με 1. Άρα  $\lambda_p = 0.7$ 

*P<sub>s</sub>* : Η υδροστατική πίεση σε ήρεμο νερό. Για την κατάσταση πλήρους φόρτωσης, δηλαδή στο βύθισμα σχεδίασης, η υδροστατική πίεση στον πυθμένα θα είναι ίση με

$$P_{s} = \rho \cdot g \cdot T = 1025 \frac{Kg}{m^{3}} \cdot 9.81 \frac{m}{\sec^{2}} \cdot 17.95m = 180.49kN / m^{2}$$

 $P_{W}$ : Η υδροδυναμική πίεση. Δίνεται από τη σχέση

$$\begin{split} P_{\scriptscriptstyle W} &= -k_{\scriptscriptstyle l} \cdot k_{\scriptscriptstyle p} \cdot p_{\scriptscriptstyle HF} \text{ , για την κατάσταση Sagging και} \\ P_{\scriptscriptstyle W} &= k_{\scriptscriptstyle l} \cdot k_{\scriptscriptstyle p} \cdot p_{\scriptscriptstyle HF} \text{ , για την κατάσταση Hogging} \end{split}$$

 $k_{\rm p}$ : Για την κατάσταση πλήρους φόρτωσης δίνεται ίσο με -1.

k<sub>i</sub>: Σχετίζεται με τη μορφή της γάστρας και το σημείο του πυθμένα. Θα το υπολογίσουμε για την περιοχή 25-30 μέτρων από την πρωραία κάθετο, δηλαδή για τη θέση x=0.9 L. Οπότε:

$$k_l = 1 + \frac{6}{C_B} \cdot \left| \frac{x}{L} - 0.5 \right|^3 = 1.455$$

$$p_{HF} = 6 \cdot f_p \cdot f_{nl} \cdot C \cdot \left(\frac{L + \lambda - 125}{L}\right)$$

C : Συντελεστής κύματος. Δίνεται από τη σχέση:

$$C = 10.75 - \left(\frac{300 - L}{100}\right) = 10.54$$

 $\lambda$ : Μήκος κύματος, θεωρούμε ίσο με 1,2 L.

Οι συντελεστές  $f_p$  και  $f_{nl}$  σχετίζονται με την πιθανότητα. Για μια πιθανότητα της τάξης του  $10^{-8}$  οι τιμές τους είναι:

$$f_p = 1$$
$$f_{nl} = 0.9$$

Από τα παραπάνω υπολογίζουμε

$$p_{HF} = 99.715 KN / m^2$$

 $P_w = -145 kN \, / \, m^2 \quad \text{, για την κατάσταση Sagging}$   $P_w = 145 kN \, / \, m^2 \quad \text{, για την κατάσταση Hogging}$ 

Και τελικά πάχος ελάσματος

$$t = 15.8 \cdot C_a \cdot C_r \cdot s \cdot \sqrt{\frac{P_s + P_w}{\lambda_P \cdot R_Y}} =$$
  
= 15.8 \cdot 0.841 \cdot 1 \cdot (0.9m) \cdot \sqrt{\frac{180.49kN / m^2 + 145kN / m^2}{0.7 \cdot 235N / mm^2}} = 15.88mm

Για λόγους τυποποίησης επιλέγεται πάχος ίσο με 16mm.

### Υπολογισμός εμβαδού επιφάνειας ενισχυτικών

Το εμβαδόν της κάθετης διατομής του διαμήκους ενισχυτικού υπολογίζεται από τη σχέση

$$A_{sh} = \frac{5 \cdot (P_s + P_w) \cdot s \cdot l}{\tau_a}, \text{ se } cm^2$$

 $\tau_a$ : Επιτρεπόμενη τάση ίση με  $\frac{R_Y}{\sqrt{3}} = 135.8N / mm^2 = 135.8MPa$ 

Οπότε υπολογίζουμε

$$A_{sh} = \frac{5 \cdot (P_s + P_w) \cdot s \cdot l}{\tau_a} = \frac{5 \cdot (180.49 kN / m^2 + 145 kN / m^2) \cdot (0.85m) \cdot (1.3m)}{135.8N / mm^2} = 13.24 cm^2$$

Επίσης υπολογίζουμε τη  $1^{\eta}$  ροπή αδράνειας (ή ροπή αντίστασης) του ενισχυτικού με συνδεδεμένο με έλασμα πλάτους  $b_p$  βάσει της σχέσης

$$w = \frac{\left(P_{S} + P_{W}\right) \cdot s \cdot l^{2}}{m \cdot \lambda_{S} \cdot R_{Y}} \cdot 10^{3}, \text{ se } cm^{3}$$

Όπου:

 $\lambda_{s}:$ Συντελεστής σχετιζόμενος με την ασφάλεια. Υπολογίζεται από τη σχέση  $\lambda_{s} = 1.2 \cdot \left(1 - 0.85 \cdot \left|\frac{\sigma_{x}}{R_{y}}\right|\right).$ Η τάση  $\sigma_{x}$  έχει υπολογιστεί παραπάνω ίση με

130N /  $mm^2$  . Ara  $\,\lambda_{\scriptscriptstyle S}=0.636$  .

*m* : Συντελεστής ίσος με 12 για τα διαμήκη ενισχυτικά.

 $b_p: \min\{s, 0.2 \cdot l\} = \min\{0.85, 0.26\} = 0.26m$ 

Άρα η ροπή αδράνειας της διατομής του ενισχυτικού συνδεδεμένο με έλασμα πλάτους 0,26m θα είναι

$$w = \frac{(P_s + P_w) \cdot s \cdot l^2}{m \cdot \lambda_s \cdot R_y} \cdot 10^3 =$$
  
=  $\frac{(180.49kN / m^2 + 145kN / m^2) \cdot (0.85m) \cdot (1.3m)^2}{12 \cdot 0.636 \cdot (235N / mm^2)} \cdot 10^3 = 260.69cm^3$ 

Επίσης η επιφάνεια της διατομής του συνδεδεμένου ελάσματος θα είναι $b_P \cdot t = 26 cm \cdot 1.6 cm = 41.6 cm^2$ 

### Μοντέλο με διαμήκη ενισχυτικά

Με βάση ότι σημειώσαμε παραπάνω καταλήγουμε στη σχεδίαση μοντέλου με τα εξής χαρακτηριστικά:

Απόσταση μεταξύ νομέων: 1.3m

Απόσταση μεταξύ διαμήκων ενισχυτικών: 0.9m

Τύπος ενισχυτικού: Αγκώνας

Πάχος ελάσματος: 16 mm

Ελάχιστο Εμβαδόν επιφάνειας ενισχυτικού: 13.24  $\rm cm^2$ 

Ελάχιστη ροπή αντίστασης της διατομής του ενισχυτικού συνδεδεμένου με έλασμα διατομής 26cm \* 1.6cm: 260,69cm<sup>3</sup>

Παρακάτω παρουσιάζονται τα τυποποιημένα μεγέθη του ενισχυτικού που επιλέχτηκε.

HT: 180mm B: 90mm T1: 11mm T2: 11mm A: 28,6cm<sup>2</sup> EX: 6,34cm Οι συμβολισμοί επεξηγούνται στο παρακάτω σχήμα. Με ΕΧ αναφερόμαστε στο κέντρο επιφανείας.



Παρακάτω παρουσιάζονται τα στοιχεία στην πορεία υπολογισμού της ροπής αντίστασης της διατομής ενισχυτικού και ελάσματος.

- Ροπή Αδράνειας (I<sub>x</sub>) διατομής ενισχυτικού: 958cm<sup>4</sup>
- Ροπή Αδράνειας (I<sub>x</sub>) διατομής ελάσματος: 8,67cm<sup>4</sup>
- Απόσταση κέντρου επιφανείας διατομής
   ενισχυτικού από την κάτω πλευράτου ελάσματος: 13,248cm
- Απόσταση κέντρου επιφανείας διατομής
   ενισχυτικού και ελάσματος από την κάτω πλευρά του ελάσματος: 5,8905cm
- Ροπή Αδράνειας (I<sub>x</sub>) ενισχυτικου και ελάσματος
   ως προς άξονα που περνάει από το κέντρο επιφανείας: 3587,2957cm<sup>4</sup>
- Ελάχιστη ροπή Αντίστασης: 261,89425cm<sup>3</sup>

Το μοντέλο αποτελείται από επίπεδο έλασμα πάχους 16 mm με διαστάσεις 4,5m (την απόσταση δηλαδή μεταξύ δύο διαδοχικών κύριων διαμήκων ενισχυτικών) επί 1,3m (την απόσταση ενάμεσα σε δυο διαδοχικές έδρες νομέων) και με συνδεδεμένα ενισχυτικά με ισαπόσταση 0,9m.

Το μοντέλο παρουσιάζεται παρακάτω. Οι πλευρές του ελάσματος, όπως και οι άκρες των ενισχυτικών είναι περιορίζονται στις δοκιμές μας με πάκτωση και με άρθρωση.



ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: a1pinned.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Thu Oct 23 16:20:02 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 33248: Step Time = 0.2000

## KΕΦΑΛΑΙΟ $7^{0}$

# Εφαρμογή Φορτίσεων στο πυθμένα Αποτελέσματα και σχολιασμός

Θα διαμορφώσουμε 3 ομάδες φορτίσεων που καταπονούν το μοντέλο μας. Και οι 3 ομάδες αναφέρονται σε φαινόμενα σφυρόκρουσης. Στόχος μας είναι α) να ελέγξουμε αν τα κριτήρια διαστασιοποίησης του Αμερικάνικου Νηογνώμονα (ABS) είναι επαρκή για αυτό το είδος φόρτισης και β) στην περίπτωση ζημιάς (αστοχίας) να δούμε την έκταση και τον τρόπο παραμόρφωσης του πυθμένα.

Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει φορτίσεις με την μορφή τετραγωνικού παλμού που αποτελούν διάφορους συνδιασμούς που επιλέχθηκαν ώστε να δούμε με τι συνδιασμό πίεσης και χρόνου φόρτισης, έχουμε παραμόρφωση της κατασκευής και σε τι έκταση. Το εύρος των φορτίσεων επιλέχθηκαν μεταξύ φορτίσεων που δεν οδηγούν τελικά σε μόνιμη παραμόρφωση της κατασκευής και φορτίσεων που οδηγούν σε πολύ μεγάλες μετατοπίσεις.

Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει φορτίσεις με βάση τη σχέση υπολογισμού του Αμερικάνικου Νηογνώμονα. Σημειώνεται ότι η σχέση υπολογίζει την ισοδύναμη στατική φόρτιση σχεδίασης για τα φορτία σφυρόκρουσης. Δεν πρόκειται δηλαδή για δυναμική φόρτιση.

Τέλος η Τρίτη ομάδα αποτελείται από φορτίσεις οι οποίες είναι αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων[6, 15].

### 1<sup>η</sup> Ομάδα

Οι φορτίσεις που επιλέγονται παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

Ονομασία	Εμβαδόν	Ένταση	Μέγιστη πίεση	Χρόνος	
Φόρτισης	επιφάνειας	παλμού	Pmax (MPa)	φόρτισης	$\tau_{o}$
	εφαρμογής	Impulse		(msec)	
	φόρτισης (m <sup>2</sup> )	(N*sec)			

A1	5.25	2460	0.05	9.38
A2	5.25	2460	0.1	4.69
B1	5.25	3940	0.05	15
B2	5.25	3940	0.1	7.5
B3	5.25	3940	0.2	3.75
C1	5.25	4925	0.1	9.38
C2	5.25	4925	0.5	1.876
C3	5.25	4925	1	0.938
C4	5.25	4925	3	0.312
D1	5.25	14780	0.5	5.63
D2	5.25	14780	1	2.81
D3	5.25	14780	2	1.41
D4	5.25	14780	3	0.94
E1	5.25	24620	0.25	18.76
E2	5.25	24620	0.5	9.38
E3	5.25	24620	1	4.69
E4	5.25	24620	3	1.56
E5	5.25	24620	5	0.938
F1	5.25	39400	0.4	18.76
F2	5.25	39400	1	7.5
F3	5.25	39400	3	2.5
F4	5.25	39400	5	1.5
F5	5.25	39400	8	0.9375
G1	5.25	49245	1	9.38
G2	5.25	49245	3	3.13
G3	5.25	49245	5	1.876
G4	5.25	49245	8	1.1725
G5	5.25	49245	10	0.938

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται η μέγιστη μόνιμη μετατόπιση και η μημόνιμη μετατόπιση του ελάσματος για τις παραπάνω φορτίσεις και για δύο είδη στηρίξεων. Με το ένα είδος στήριξης θεωρούμε τις πλευρές του ελάσματος καθώς και τις άκρες των ενισχυτικών πακτωμένες (δηλαδή περιορίζουμε την κίνηση και την περιστροφή των ακριανών κόμβων και ως προς τις τρεις διευθύνσεις) ενώ με το δεύτερο είδος στήριξης θεωρούμε ότι οι πλευρές του ελάσματος και οι άκρες των ενισχυτικών είναι στηριγμένες με άρθρωση (δηλαδή περιορίζουμε μόνο την μετατόπιση των ακριανών κόμβων και όχι την περιστροφή).

Ονομασία	Πάκτωση		Άρθρωση	
φόρτισης	Μέγιστη	Μέγιστη μη	Μέγιστη	Μέγιστη μη
	μόνιμη	μόνιμη	μόνιμη	μόνιμη
	μετατόπιση	μετατόπιση	μετατόπιση	μετατόπιση
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
A1	0	1.72	0	2.95

A2	0	3.42	0	5.65
B1	0	1.73	0	2.95
B2	0	3.45	0	5.66
B3	0.07	6.70	0.45	10.4
C1	0	3.42	0	5.7
C2	0.9	12.6	1.9	15.7
C3	2	15.1	2.7	16.3
C4	2.7	16.15	3.6	16.8
D1	4.6	15.9	8.94	21.6
D2	14.3	29.15	19.3	32.8
D3	25.5	37.2	26.3	38.8
D4	28.7	39.75	28.5	40.6
E1	0.5	8.3	1.9	12.6
E2	4.4	15.97	9.2	21.5
E3	19.7	30.5	23.7	34.3
E4	48	56.5	49.9	58.7
E5	53.3	61.7	53.2	61.6
F1	3.6	13.1	6.8	18.2
F2	21.4	30.8	24.9	35.4
F3	71	77.5	75.6	81.8
F4	85.4	90.7	88.8	94.5
F5	91.4	96.7	94.2	99.6
G1	22	31.5	25.1	35.4
G2	83.2	89.5	88.1	93.8
G3	104.3	109.5	109.2	114.1
G4	115.5	120.3	119.6	124.5
G5	118.8	123.4	122.6	127.5

Παρατηρούμε ότι η ένταση του παλμού (Impulse) δεν αποτελεί από μόνη της ικανό κριτήριο για να περιγράψει τα αποτελέσματα της φόρτισης στην κατασκευή. Βλέπουμε ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην παραμόρφωση της κατασκευής πάρα την εφαρμογή φορτίσεων ίσης έντασης (Impulse). Εξετάζουμε αν αυτό οφείλεται στη σχέση του χρόνου φόρτισης με την ιδιοπερίοδο της κατασκεύης. Η ιδιοσυχνότητα (πιο συγκεκριμένα η πρώτη φυσική συχνότητα) για ένα χαλύβδινο έλασμα χωρίς ενισχύσεις και με πακτωμένες πλευρές υπολογίζεται από τη σχέση [9]:

$$f = 5.544 \cdot 10^6 \cdot \frac{t}{a \cdot b} \cdot \sqrt{\left(\frac{a}{b}\right)^2 + \left(\frac{b}{a}\right)^2 + 0.6045}$$

Όπου:

- f ,  $\eta$  idiosuccóthta se Hz.
- t, το πάχος ελάσματος σε mm.

#### • a, b, οι διαστάσεις των πλευρών του ελάσματος σε mm.

Για τις διαστάσεις του ελάσματος του μοντέλου μας (αγνοώντας τα ενισχυτικά) η ιδιοσυχνότητα είναι:

$$f = 5.544 \cdot 10^6 \cdot \frac{15.88}{850 \cdot 1300} \cdot \sqrt{\left(\frac{850}{1300}\right)^2 + \left(\frac{1300}{850}\right)^2 + 0.6045} = 146284.474 Hz$$

Και η ιδιοπερίοδος θα είναι

$$T = \frac{1}{f} = 6.836 \,\mu \sec$$

Παρακάτω παρουσιάζουμε ενδεικτικά τα αποτελέσματα από την εφαρμογή μιας φόρτισης (της A1). Στο παράρτημα στο τέλος του κειμένου γίνεται εκτενή παρουσίαση των εικόνων και των διαγραμμάτων που προκύπτουν από τις υπόλοιπες φορτίσεις. Προσοχή απαιτείται στα διαγράμματα που παρουσιάζουν τις κεντρικές κομβικές μετατοπίσεις. Υπενθυμίζεται ότι η κατασκευή μας αποτελείται από ένα επίπεδο έλασμα ενισχυμένο με 4 διαμήκη ενισχυτικά. Τα τμήματα του ελάσματος ανάμεσα στα ενισχυτικά θα τα ονομάζουμε στοιχειώδη ελάσματα (Elementary Plate Panel). Ο κόμβος 1749 είναι ο κεντρικός κόμβος του μεσαίου (κεντρικού) στοιχειώδους ελάσματος. Οι κόμβοι 1708 και 1791 είναι οι κεντρικοί κόμβοι των δύο ακραίων στοιχειωδών ελασμάτων και οι κόμβοι 1728 και 1770 είναι οι κεντρικοί κόμβοι των δυο ενδιάμεσων (ανάμεσα στο κεντρικό στοιχειώδες έλασμα και τα δύο ακραία στοιχειώδη ελάσματα) στοιχειωδών ελασμάτων.

#### Φόρτιση Α1

Im *pulse* = 2460*N* · sec,  $P_{max} = 0.05MPa$ ,  $\tau_o = 9.38m \sec \Sigma$ τήριξη με πάκτωση







### Φόρτιση Α1

Im  $pulse = 2460N \cdot \sec$ ,  $P_{max} = 0.05MPa$ ,  $\tau_o = 9.38m \sec \Sigma$ τήριξη με άρθρωση





Παρατηρούμε ότι ο τρόπος στήριξης οδηγεί σε αρκετά διαφορετικά αποτελέσματα. Καταρχήν η επιλογή της άρθρωσης ως στήριξη οδηγεί πάντα σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις και μετατοπίσεις. Από την άλλη και η ταλάντωση της κατασκευής επηρεάζεται. Βλέπουμε ότι σε περίπτωση πάκτωσης η ταλάντωση έιναι μεγαλλύτερης διάρκειας και με σχετικά σταθερό συντελεστή απόσβεσης ενώ με την επιλογή της άρθρωσης έχουμε ταλάντωση με μη σταθερή απόσβεση και με μεγάλο πλάτος αρχικά.

### 2η Ομάδα φόρτισης

Η εμπειρική σχέση υπολογισμού του ισοδύναμου στατικού φορτίου για την περίπτωση σφυρόκρουσης παρουσίαζεται παρακάτω:

$$P_{SL}(KN/m^2) = 1984 \cdot C_1 \cdot C_{SL} \cdot (1.3 - 0.002 \cdot L)$$

Ο συντελεστής  $C_1$  σχετίζεται με το λόγο L/T στην κατάσταση ερματισμού και δίνεται με τη σχέση

 $C_1 = 3.6 - 6.5 \cdot \left(\frac{T_{BFP}}{L}\right)^{0.2}$ , όπου ο συντελεστής δεν μπορεί να εκτιμάται μεγαλλύτερος της μονάδας.  $T_{BFP}$ : πρόκειται το μικρότερο σχεδιασμένο βύθισμα στην πρωραία κάθετο σε κατάσταση ερματισμού το οποίο για το πλοίο ALPHA

CENTURY είναι ίσο με 5.98m .

Άρα

$$C_1 = 3.6 - 6.5 \cdot \left(\frac{5.98m}{279m}\right)^{0.2} = 0.586073$$

Ο συντελεστής C<sub>sl</sub> είναι συντελεστής κατανομής του φορτίου σφυρόκρουσης για τις διάφορες περιοχές κατά μήκους του πλοίου. Πιο συγκεκριμένα

$$C_{\scriptscriptstyle SL} = 0, \; \gamma \iota \alpha \; \frac{x}{L} \le 0.5$$

$$C_{SL} = \frac{\frac{x}{L} - 0.5}{0.35}, \text{ yia } 0.5 \le \frac{x}{L} \le 0.85$$

$$C_{SL} = 1$$
, yia  $0.85 \le \frac{x}{L} \le 1.0$ 

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή του  $C_{SL}$  συναρτήσει της περιοχής του μήκους.



Η αλλιώς σε διαστατοποιημένη μορφή



Αντικαθιστώντας τους συντελεστές και το μήκος στη σχέση που παρουσιάσαμε παραπάνω υπολογίζουμε την πίεση συναρτήσει της περιοχής του μήκους του πλοίου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Δηλαδή το μέγιστο φορτίο σφυρόκρουσης σύμφωνα με τις σχέσεις του Αμερικάνικου Νηογνώμονα είναι 862.8 *KN / m<sup>2</sup>* και καταπονεί τον πυθμένα στην περιοχή μεταξύ 237.15 και 279 μέτρων μπροστά από την πρυμναία κάθετο.

Στόχος μας είναι να υπολογίσουμε την μέγιστη μετατόπιση στον πυθμένα καθώς και τυχόν παραμένουσα μόνιμη μετατόπιση. Η ανάλυση σε αυτήν την περίπτωση θα διαφέρει από τις προηγούμενες αφού θα είναι στατική. Δηλαδή ορίζουμε στο αρχείο εισόδου δεδομένων του Abaqus ότι το φορτίο και η ανάλυση είναι στατική.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα θεωρώντας την στήριξη ως πάκτωση ενώ σημειώνονται και οι αντίστοιχες μέγιστες, μη μόνιμες μετατοπίσεις από ορισμένες από τις φορτίσεις που εφαρμόσαμε στην Α ομάδα. Στο διάγραμμα σημειώνονται και το κάτω και άνω όριο του φορτίου κατάρευσης για έλασμα χωρίς ενισχυτικά και με πακτωμένες τις πλευρές του. Σημειώνεται ότι το όριο του φορτίου κατάρευσης υπολογίσθηκε για το τμήμα του ελάσματος ανάμεσα στα ενισχυτικά, δηλαδή για έλασμα μήκους 1,3m και πλάτος 0,9m.

Avω όριο: 
$$p_{upp} = \frac{8 \cdot M_0}{B^2} \cdot \frac{6}{\left(\sqrt{3 + \beta^2} - \beta\right)^2}$$
  
Κάτω όριο:  $p_{low} = \frac{8 \cdot M_0}{B^2} \cdot 2 \cdot \left(1 + \beta^2\right)$ 

Όπου

$$M_{0} = \frac{h^{2}}{4}\sigma_{y} = \frac{(16mm)^{2}}{4} \cdot 235 N/mm^{2} = 15040N$$

B: Το μισό του πλάτους του ελάσματος ίσο με 0,45m

β: Ο λόγος πλάτους προς μήκους του ελάσματος ίσος με $0{,}6923$ 

Άρα:

 $p_{upp} = 2591,08kPa$ 

$$p_{low} = 1757,895 kPa$$



Μετατοπίσεις των κεντρικών κόμβων των στοιχειωδών ελασμάτων κατά την φόρτιση και μετά την αποφόρτιση











ned Var: U Deformation Scale Factor: +1,UUUe+UU

### Ισοδύναμη παραμένουσα τάση κατά Mises



Στοδύναμη πλαστική παραμόρφωση των στοιχείων της κατασκευής

Βλέπουμε ότι έχουμε και πλαστικές παραμορφώσεις αρκετά μεγάλες ώστε να έχουμε μια μόνιμη μετατόπιση του ελάσματος της οποίας η μέγιστη τιμή είναι 14.7 mm ενώ η μέγιστη μη μόνιμη μετατόπιση είναι 22.8 mm. Για να κάνουμε μια συσχέτιση με τις προηγούμενες φορτίσεις που εφαρμόσαμε μπορούμε να πούμε ότι τα αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα με αυτά που βρήκαμε με την εφαρμογή παλμού (D2) έντασης 14780 N\*sec με μέγιστη τάση 1 MPa και χρόνο εφαρμογής 2,81 msec. Επίσης οι μετατοπίσεις που προκλήθηκαν από τα δυναμικά φορτία που είχαν μέγιστη τάση παρόμοιας τιμής με αυτή που εφαρμόσαμε στατικά (1MPa) είναι σαφώς μεγαλύτερες από αυτές που προκαλούνται λόγω της στατικής φόρτισης κάτι που είναι λογικό με βάση ότι τα δυναμικά φορτία οδηγούν σε δυναμική απόκριση και άρα σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Τα δύο σημεία στο διάγραμμα που αποτελούν εξαίρεση αντιπροσωπεύουν φορτία που είναι χαμηλότερα από το φορτίο κατάρευσης και συνεπώς η έντονη ταλάντωση που υπάρχει σε αυτή την περιοχή οδηγεί στο να είναι οι μετατοπίσεις μικρότερες από αυτές που έχουμε με στατική φόρτιση. Τέλος βλέπουμε ότι σε στατικά φορτία δεν έχουμε πλαστική παραμόρφωση μόνο στις πλευρές του ελάσματος και στις ενώσεις με τις ενισχύσεις αλλά και στην κεντρική περιοχή των στοιχειωδών ελασμάτων.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα θεωρώντας αρθρωμένες τις πλευρές του ελάσματος και τις ακρες των ενισχυτικών. Και σε αυτό το διάγραμμα παρουσιάζουμε τις μέγιστες, μη μόνιμες μετατοπίσεις από ορισμένες από τις δυναμικές φορτίσεις της Α ομάδας φορτίσεων. Στο διάγραμμα σημειώνονται το κάτω και άνω όριο του φορτίου κατάρευσης για έλασμα χωρίς ενισχυτικά και με αρθρωμένες τις πλευρές του, τα οποία υπολογίζονται από τις σχέσεις:

Avω όριο: 
$$p_{upp} = \frac{2 \cdot M_0}{B^2} \cdot \frac{3}{\left(\sqrt{3 + \beta^2} - \beta\right)^2}$$
  
Κάτω όριο:  $p_{low} = \frac{2 \cdot M_0}{B^2} \cdot \left(1 + \beta + \beta^2\right)$ 

Όπου

$$M_{0} = \frac{h^{2}}{4}\sigma_{y} = \frac{(16mm)^{2}}{4} \cdot 235 N/mm^{2} = 15040$$

B: Το μισό του πλάτους του ελάσματος ίσο με 0,45m
β: Ο λόγος πλάτους προς μήκους του ελάσματος ίσος με 0,6923
Άρα:

 $p_{upp} = 323,885 kPa$ 

 $p_{low} = 322,573kPa$ 



Μετατοπίσεις των κεντρικών κόμβων των στοιχειωδών ελασμάτων κατά την φόρτιση και μετά την αποφόρτιση



ODB: ABSSTATICPINNED.odb Abaqus/Standard Version 6.7-1 Tue Nov 04 18:50:12 GTB Standard Time 2008



Step: END Increment 0: Step Time = 0.000 Primary Var U, U2 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

### Κομβικές μετατοπίσεις κατά την εφαρμογή του φορτίου



ODB: ABSSTATICPINNED.odb Abaqus/Standard Version 6.7-1 Tue Nov 04 18:50:12 GTB Standard Time 2008











Step: END Increment 1: Step Time = 20.00 Primary Var: S, Mises Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

ODB: ABSSTATICPINNED.odb Abaqus/Standard Version 6.7-1 Tue Nov 04 18:50:12 GTB Standard Time 2008


Σε αυτό το σημείο παρατηρούμε ότι οι μετατοπίσεις που προέκυψαν από τη δυναμική ανάλυση που κάναμε μελετώντας τις φορτίσεις της 1<sup>ης</sup> ομάδας είναι σημαντικά υψηλότερες από αυτές που προκύπτουν κατά τη στατική ανάλυση με αντίστοιχες φορτίσεις. Η διαπίστωση αυτή συμφωνεί με τη θεωρία αφού γενικότερα τα κρουστικά (που είναι δυναμικά) οδηγούν σε μεγαλλύτερες παραμορφώσεις από ανάλογα στατικά φορτία αφού οδηγούν σε δυναμική απόκριση της κατασκευής.

#### 3η Ομάδα φορτίσεων

Σε αυτήν την ομάδα παρουσιάζουμε φορτίσεις οι οποίες είναι αποτελέσματα πειραματικών φορτίσεων. Όλα τα αναφερόμενα πειράματα έχουν γίνει με ρίξεις απλών και ενισχυμένων ελασμάτων από ορισμένα ύψη μέσα σε δεξαμενές νερού. Με διάφορες μετρητικές διατάξεις υπολογίζονται οι πιέσεις συναρτήσει του χρόνου καθώς και άλλα μεγέθη. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε πειραματικά αποτελέσματα από ένα τέτοιο πείραμα που υπάρχει στη βιβλιογραφία [9]. Μοντελοποιούμε τις φορτίσεις που παρουσιάζονται με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι να αποικονίσουμε τις καμπύλες φόρτισεις όσο το δυνατόν πιο πιστά χρησιμοποιώντας ευθείες, δηλαδή ένα σύνολο γραμμικών σχέσεων. Ο δεύτερος είναι να μοντελοποιήσουμε τη φόρτιση με ένα ισοδύναμο τετραγωνικό παλμό που σύμφωνα με τη σχέση:

$$\int_{REAL} P \cdot dt = \int_{PULSE} P \cdot dt$$

Προσοχή χρειάζεται και στο γεγονός ότι η διάρκεια του τετραγωνικού παλμού πρέπει να είναι προσεγγιστικά κοντά στη χρονική διάρκεια κατά την οποία έχουμε τη μέγιστη πίεση στην πραγματική καμπύλη της φόρτισης.

Παρακάτω παρουσιάζεται η πρώτη πειραματική φόρτιση. Θα ονομάζεται ΕΧΡ1.



Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η πρώτη μοντελοποίηση της φόρτισης όπως και τα ζεύγη τιμών που αντιστοιχούν σε αυτή.



A/α	1	2	3		4		5		6		7	
Time	0	5.48	7.42		12.2	26	14.	5	2	0	24.5	
(msec)												
Pressure	0	0	207		56		74		5	8	62	
(kPa)												
A/α	8	9	10	11		12		13		14	15	

Time	30.3	34.2	45.2	51	70.3	81.3	83.9	119.3
(msec)								
Pressure	44	51	29	40	24	9	13	0
(kPa)								

Εφαρμόζοντας την παραπάνω μοντελοποίηση για την φόρτιση λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα από την ανάλυση του Abaqus.

## Θεωρώντας ότι η στήριξη είναι πάκτωση



## Μετατοπίσεις των κεντρικών κόμβων των στοιχειωδών ελασμάτων





ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: exp1encastre.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Tue Nov 04 14:35:36 GTB Standard Time 2008



×

Step: Step-1 Increment 49859: Step Time = 0.3000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

#### Τελικές κομβικές μετατοπίσεις



Step: Step-1 Increment 49859: Step Time = 0.3000 Primary Var: S. Mises Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

### Ισοδύναμη παραμένουσα τάση κατά Mises



Βλέπουμε ότι η μόνιμη μετατόπιση είναι ουσιαστική μηδενική (περίπου ένα δέκατο του χιλιοστού). Ωστόσο η μέγιστη μετατόπιση δεν είναι αμελητέα 5.8 mm, δηλαδή περίπου το 1/3 του πάχους του ελάσματος του πυθμένα. Το βασικό είναι ότι αν και μια φόρτιση λόγω σφυρόκρουσης αυτού του μεγέθους δεν είναι αρκετή για να οδηγήσει παραμόρφωση σε σημαντική της κατασκευής, ωστόσο η επαναλαμβανόμενη φόρτιση ή γενικά παρόμοια φορτία που μπορεί να καταπονήσουν τον πυθμένα ανάμεσα σε δύο δεξαμενισμούς, μπορεί να οδηγήσουν αθροιστικά σε σημαντικές ζημιές και παραμορφώσεις της κατασκευής (shake down), άρα και σε υψηλότερο κόστος επισκευών και σε μεγαλλύτερο κίνδυνο αστοχίας.

Μεγαλύτερες παραμορφώσεις προβλέπονται στην περίπτωση της άρθρωσης των πλευρών του ελάσματος και των άκρων των ενισχυτικών όπως φαίνεται από τα παρακάτω αποτελέσματα.









Βλέπουμε ότι σε αυτήν την περίπτωση η μέγιστη κομβική μετατόπιση φτάνει τα 9 mm ενώ η μόνιμη μετατόπιση είναι 0.3 mm.

Για να διαπιστώσουμε κατά πόσο είναι δυνατόν να μοντελοποιηθεί χωρίς μεγάλες αποκλίσεις η παραπάνω φόρτιση θα την μετατρέψουμε σε «ισοδύναμο» τετραγωνικό παλμό.

Καταρχήν υπολογίζουμε το ολοκλήρωμα  $\int_{REAL} P \cdot dt$  με τη μέθοδο του τραπεζίου

οπότε και βρίσκουμε

$$\int_{0}^{119.3m \sec} P \cdot dt = 3806.4 \left(\frac{kN}{m^2}\right) m \sec = 3806.4 \left(\frac{N}{m^2}\right) \sec = 3806.4 Pa \cdot \sec dt$$

Επιλέγουμε την πίεση κοντά στην μέγιστη πίεση από την πειραματικά μετρούμενη

Επιλέγουμε το χρόνο εφαρμογής του παλμού ίσο με 15 msec δηλαδή κοντά σε σχέση με το χρόνο στον οποίο έχουμε τη μεγαλλύτερη πίεση ώστε να έχουμε το φορτίο να παραμένει κρουστικό. Άρα η πίεση του παλμού θα είναι 253.76 kPa. Αυτό το φορτίο είναι παρόμοιο με μια μέτρια φόρτιση της 1<sup>ης</sup> ομάδας αφού τα αντίστοιχα εμβαδά για τα φορτία της 1<sup>ης</sup> ομάδας είναι:

А	938 Pa*sec
В	750 Pa*sec
С	938 Pa*sec
D	2810 Pa*sec
E	4690 Pa*sec
F	7500 Pa*sec
G	9380 Pa*sec

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα για πάκτωση:









Ισοδύναμη παραμένουσα τάση κατά Mises

Step: Step-1 Increment 49861: Step Time = 0.3000 Primary Var: S. Mises Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

προηγούμενο παράδειγμα, ωστόσο η μόνιμη μετατόπιση υπολογίζεται πολύ

μεγαλύτερη (0.7 mm αντί για 0.1 mm). Όμως παραμένει η υπολογιζόμενη μόνιμη

Βλέπουμε ότι αν και η μέγιστη μετατόπιση του ελάσματος είναι ίδια με το

μετατόπιση ίδιας τάξης μεγέθους και συνεπώς η απόκλιση δεν είναι τόσο μεγάλη. Η απόκλιση οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο γεγονός ότι σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις ασκούνται πιέσεις της τάξης των περίπου 50 kPa στο έλασμα για αρκετό χρόνο μετά την μέγιστη πίεση. Αυτού του είδους τα φορτία δεν έχουν τόσο έντονα κρουστικά χαρακτηριστικά και συνεπώς οδηγούν σε μικρότερες παραμορφώσεις. Ωστόσο, υπολογίζονται και αυτά στην εκτίμηση του ολοκληρώματος  $\int_{REAL} P \cdot dt$ .

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον ίδιο παλμό αλλά με άρθρωση στις πλευρές του ελάσματος και τις άκρες των ενισχυτικών.







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: exp1PINNEDpulse.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Tue Nov 04 18:20:32 GTB Standard Time 2008



Step: Step-1 Increment 49986: Step Time = 0.3000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

#### Τελικές κομβικές μετατοπίσεις





#### Ισοδύναμη παραμένουσα τάση κατά Mises



Κλείνωντας το κεφάλαιο και συμπληρωματικά σε όσα είπαμε παραπάνω μπορούμε να προσθέσουμε ότι παραμένει το βασικό πρόβλημα και δεν μπορεί να επιτευχθεί στα πλαίσια της παρούσης εργασίας ο στόχος που βάλαμε για αυτό το κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα:

- Ενώ είδαμε μια σειρά φορτίσεις που οδηγούν σε μόνιμες και σημαντικές παραμορφώσεις στην κατασκευή, ωστόσο δεν μπορούμε να γνωρίζουμε αν προσεγγίζουν τις πραγματικές φορτίσεις σφυρόκρουσης που επιβάλλονται στο πλοίο κατά την υπηρεσία του ή αν είναι αρκετά μεγαλλύτερες και πόσο.
- Οι φορτίσεις που αποτελούν αποτελέσματα πειραμάτων αναφέρονται σε μικρή κλίμακα (πτώση ελάσματος σε δεξαμενή) και δεν είναι δυνατόν να ταυτιστούν με την κλίμακα του πλοίου, ενώ δεν υπάρχει η θεωρητική επεξεργασία που να οδηγεί σε απλές σχέσεις για το μέγεθος του πλοίου.
- Συνεπώς μπορούμε να συσχετίσουμε το στατικό φορτίο σφυρόκρουσης που δίνεται από τον ABS με τα δυναμικά φορτία που εφαρμόσαμε αλλά δεν είναι δυνατόν να τον συσχετίσουμε με πραγματικές φορτίες στο πλοίο ώστε να ελέγξουμε την επάρκεια των κανονισμών.

## Κεφάλαιο 8° Τελικά Συμπεράσματα

Η συνεχής αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των Η/Υ δίνει συνεχώς νέες δυνατότητες να χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων στην επίλυση προβλημάτων που είναι είναι πολύ δύσκολο έως αδύνατον να επιλυθούν αναλυτικά. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε αρκετές δεκαετίες πριν, πλέον ευρέως για μεγάλης κλίμακας μη-γραμμικά προβλήματα, αφού όσο αυξάνει το μέγεθος και η πολυπλοκότητα της κατασκευής που αναλύεται, τόσο απαιτούνται ισχυρότεροι υπολογιστές. Ακόμα περισσότερη ισχύ απαιτείται για δυναμικά προβλήματα που εμπλέκουν μη γραμμικότητες λόγω γεωμετρίας και υλικού, ως αυτό που εξετάζεται σε αυτή την εργασία.

Μας απασχόλησε η απόκριση του πυθμένα του πλοίου σε φορτία σφυρόκρουσης, οι ενδεχόμενες παραμορφώσεις της κατασκεύης σε τέτοια φορτία καθώς και η εκτίμηση και σύγκριση με το φορτίο σφυρόκρουσης που προτείνουν οι κανονισμοί του ABS κατά την μελέτη πλοίου. Η μελέτη της απόκρισης της κατασκεύης στις φορτίσεις έγινε με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.

Είδαμε ότι κατά την επίλυση προβλημάτων με το πρόγραμμα Abaqus Explicit, η αύξηση του αριθμού των στοιχείων που απαρτίζουν το μοντέλο, δηλαδή η μείωση του μεγέθους ενός τυπικού στοιχείου, οδηγεί σε μεγάλες αυξήσεις του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου αφού αυξάνεται και ο αριθμός των εξισώσεων προς επίλυση. Εξετάστηκε η επίδραση του μεγέθους των στοιχείων στα αποτελέσματα για μοντέλο ελάσματος με λόγο 3:1 και παρατηρήθηκε ότι επετεύθει σύγκλιση για μέγεθος στοιχείων 40mm. Εδώ αναφέρουμε ότι γενικά η αύξηση του αριθμού των στοιχείων που μοντελοποιούν μια κατασκευή οδηγεί σε μοντέλο με μικρότερη ακαμψία και άρα σε μεγαλλύτερες μετατοπίσεις των κόμβων για δεδομένες φορτίσεις.

Μας απασχόλησαν τα χαρακτηριστικά και η μορφή της φόρτισης που έπρεπε να εφαρμόσουμε στα μοντέλα μας. Η επιλογή να μοντελοποιήσουμε το φορτίο σφυρόκρουσης με ένα τετραγωνικό παλμό επιβεβαιώθηκε για την ορθότητά της αφού συγκρίναμε τα αποτελέσματά μας με πειραματικά στην περίπτωση εκρήξεων με ομοιόμορφη φόρτιση. Η χρήση και διαφορετικών χαρακτηριστικών για τη μορφή και το χρόνο φόρτισης έδειξαν ότι βασικό στοιχείο αποτελεί η ένταση του παλμού (το

μέγεθος  $\int P dt$ , όπου P η πίεση πάνω στην επιφάνεια), αφού η μεταβολή της μορφής του παλμού, όπως η επιλογή τριγωνικής μορφής, καθώς και η επιλογή διαφορετικών χρόνων φόρτισης, μέσα σε ένα περιορισμένο εύρος, δεν οδήγησε σε σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα, πιο συγκεκριμένα δεν εμφανίζονται σημαντικές διαφορές μέχρι και το διπλασιασμό του χρόνου φόρτισης. Ωστόσο το ίδιο παύει να ισχύει όταν επιλέγουμε χρόνους φόρτισης σε μεγαλύτερο εύρος, όταν ξεπερνάει το διπλάσιο του αρχικού χρόνου.

Από τη μελέτη που κάναμε εδώ φάνηκε η σημασία που έχουν για το πλοίο τα φορτία σφυρόκρουσης αφού είδαμε ότι σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να οδηγήσουν σε μόνιμη (πλαστική) παραμόρφωση της κατασκευής. Το ζήτημα αποκτάει μεγαλύτερη σημασία αν λάβουμε υπόψην ότι ανάμεσα σε δύο δεξαμενισμούς, το πλοίο θα δεχτεί ένα εύρος φορτίων, ανάμεσα τους και φορτία λόγω σφυρόκρουσης.

Η απόκριση του μοντέλου μας στις φορτίσεις έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά. Η τελική μετατόπιση των κόμβων είναι μικρότερη από τη μέγιστη, γεγονός που είναι

λογικό για κρουστικό φορτίο. Η κατασκευή ταλαντώνεται για αρκετό χρόνο μετά την εφαρμογή του φορτίου, η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται στις πλευρές που είναι στηριγμένες και φυσικά η μέγιστη μετατόπιση παρουσιάζεται στο μέσον των περιοχών του ελάσματος ανάμεσα στα ενισχυτικά.

Όταν εφαρμόσαμε φορτίσεις που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια πειραμάτων σφυρόκρουσης, είδαμε ότι δεν οδήγησαν σε μόνιμη παραμόρφωση της κατασκευής. Ωστόσο, δεν μπορούμε να πούμε ότι οι πειραματικές μετρήσεις αντανακλούν με ακρίβεια πραγματικές φορτίσεις. Αυτό γιατί ο ίδιος ο τρόπος διεξαγωγής των πειραμάτων (ελεύθερη πτώση ελάσματος μέσα σε δεξαμενή) δεν μπορεί να συσχετισθεί άμεσα με το πραγματικό φαινόμενο της σφυρόκρουσης. Ο λόγος είναι ότι κατά τα πειράματα με την παραπάνω μέθοδο (της ελεύθερης πτώσης), η ταχύτητα εισχώρησης του ελάσματος στη δεξαμενή μειώνεται σημαντικά λόγω της αντίστασης από το νερό. Αντίθετα, στο πλοίο και λόγω της μεγάλης του μάζας, η εμφάνιση σφυρόκρουσης δεν οδηγεί σε τόσο σημαντική μεταβολή της κινητικής του κατάστασης, δηλαδή της ταχύτητας με την οποία ο πυθμένας στην περιοχή της πλώρης εισχωρεί στο νερό, λόγω της μεγάλης αδράνειας. Αυτό το πρόβλημα θα μπορούσε να ξεπεραστεί αν σε μια σειρά πειραμάτων επιβάλονταν στο έλασμα, χρησιμαποιώντας για παράδειγμα μια μηχανική διάταξη τύπου πρέσσας, η πτώση στη δεξαμενή με σταθερή ταχύτητα.

Βλέπουμε λοιπόν ότι σοβαρό εμπόδιο είναι η αδυναμία θεωρητικής πρόβλεψης για τα φορτία σφυρόκρουσης (σαν αποτέλεσμα της πολυπλοκότητας του φαινομένου) αλλά και η δυσκολία να σχεδιαστούν πειράματα που θα προσεγγίζουν τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης. Ώσο αυτές οι δυσκολίες παραμένουν θα είναι δύσκολο να εκτιμηθούν οι πιθανές ζημιές που μπορεί να προκληθούν λόγω σφυρόκρουσης. Στο βαθμό όμως που υπάρξει πρόοδος σε αυτούς τους τομείς θα μπορούσαμε και να δοκιμάσουμε εναλλακτικές διατάξεις των ενισχυτικων του πυθμένα για να εξαλείψουμε τις παραμορφώσεις λόγω σφυρόκρουσης. Μια εναλλακτική επιλογή θα μπορούσε να είναι και η εγκατάσταση μετρητικών οργάνων πάνω σε πλοία που να μετρούν την πίεση που ασκείται πάνω στον πυθμένα.

Όσον αφορά τον τρόπο υπολογισμού του φορτίου μέσω των σχέσεων που προτείνουν οι Νηογνώμονες και με βάση την εφαρμογή του φορτίου που προτείνει ο ABS διαπιστώνουμε ότι τελικά η εφαρμογή ενός τέτοιου φορτίου οδηγεί σε σηματική παραμόρφωση της κατασκευής. Το προτεινόμενο φορτίο δεν είναι δυναμικό αλλά στατικό. Επίσης βλέπουμε ότι οδηγούμαστε σε πλαστικές παραμορφώσεις παρά το γεγονός ότι η κατασκευή σχεδιάστηκε βάσει των ίδιων κανονισμών. Σημειώνουμε επίσης ότι ενώ στην περίπτωση της πάκτωσης το στατικό φορτίο σφυρόκρουσης είναι αρκετά χαμηλότερο από το κάτω όριο κατάρευσης, περίπου 50%, ωστόσο θεωρώντας τη στήριξη ως άρθρωση, το φορτίο είναι πολύ μεγαλύτερο από το άνω όριο κατάρευσης, περίπου 270%. Ωστόσο, δεν είναι δυνατόν να καθοριστεί με ακρίβεια ένα στατικό φορτίο σχεδιασμού από τη στιγμή που υπάρχουν οι δυσκολίες που αναφέρονται παραπάνω. Στο βαθμό που θα μπορέσουμε να υπολογίσουμε τα πραγματικά δυναμικά φορτία σφυρόκρουσης που ασκούνται πάνω στο πλοίο, θα είναι δυνατόν να καθορίσουμε ένα ισοδύναμο στατικό φορτίο σχεδίασης.

Επιμέρους παρατηρήσεις και συμπεράσματα παρουσιάζονται σε όλη την έκταση της εργασίας. Εδώ τελικά ανακεφαλαιώνουμε ότι η συνέχεια της μελέτης θα πρέπει να στοχεύει:

 Στην μελέτη των αποτελεσμάτων της επιβολής όχι απλώς μια φόρτισης αλλά ενός εύρους φορτίων με διαφορετική ένταση και χρόνο εφαρμογής μέσα σε μια ευρύτερη χρονική περίοδο π.χ. ανάμεσα σε δυο ελλιμενισμούς ή κατά τη διάρκεια μιας θαλασσοταραχής. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να παρθεί υπόψην και η σκλήρυνση του χάλυβα λόγω των μόνιμων παραμορφώσεων.

Στη συνέχεια της θεωρητικής και πειραματικής μελέτης για τον υπολογισμό του φορτίου σφυρόκρουσης στην κατεύθυνση του ακριβούς υπολογισμού των φορτίων σφυρόκρουσης σε πραγματικές συνθήκες. Σε αυτά τα πλαίσια προτείνεται η πραγματοποίηση πειραμάτων σφυρόκρουσης, με πτώση ελασμάτων σε δεξαμενή νερού, όπου όμως θα επιβάλλεται σταθερή ταχύτητα στο έλασμα και μετά την εισχώρησή του στο νερό.

# Βιβλιογραφία

### Συγγράμματα:

- 1. Η μεταλλική κατασκεύη του πλοίου. Π. Καρύδης.
- Πειραματική αντοχή των υλικών. Ν. Ανδριανόπουλος, Ε. Κυριαζή, Κ. Λιακόπουλος.
- 3. Practical Ship Hydrodynamics. Volker Bertram.
- 4. Abaqus Analysis Manual.

#### Δημοσιεύσεις:

- 5. M.S. Samuelides, D. Daliakopoulos, J.K. Paik. Simulation of response of plates under pressure pulses.
- 6. R. HOUL.STON, C. G. DESROCHERS. Nonlinear structural response of ships panels subjected to air blast loading. Computers and structures, Vol 26, No <sup>1</sup>/<sub>2</sub>, pp.1-15, 1987.
- N.S. Rudrapatna, R. Vaziri, M.D. Olson. Deformation and failure of blastloaded stiffened plates. International Journal of Impact Engineering, Vol24 (2000), pp. 457-474.
- 8. G. N. Nurick, M. D. Olson, J. R. Fagnan, A. Levin. Deformation and tearing of blast-loaded stiffened square plates. International Journal of Impact Engineering, Vol 16, No 2, (1995), pp. 273-291.
- Satyaranjan Sinha, Suman Kar, D.G. Sarangdhar. Development of simplified structural design formulation for slamming loads. Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE2008 June 15-20, 2008, Estoril, Portugal.
- 10. S.Chung Kim Yuen, G.N.Nurick. Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened plates. Part I: subjected to uniform blast load. International Journal of Impact Engineering, Vol 31, (2005), pp. 55-83.
- 11. S.Chung Kim Yuen, G.N.Nurick. Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened plates. Part II: localised blast loading. International Journal of Impact Engineering, Vol 31, (2005), pp. 85-111.
- Youguang Pan, Luke A. Louca. Experimental and numerical studies on the response of stiffened plates subjected to gas explosions. Journal of Constructional Steel Research, Vol 52, (1999), pp. 171–193.
- 13. Satyaranjan Sinha, D.G. Sarangdhar. FE analysis of ship structures under blast loads. Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE2008 June 15-20, 2008, Estoril, Portugal.
- Gordon R. Johnson, William H. Cook. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. Engineering Fracture Mechanics Vol. 21, No. I, pp. 3148-1985.
- 15. R. Houlston, J. E. Slater, N. Pegg, C. G. DesRochers. On analysis of structural response of ship panels subjected to air blast loading. Computer and structures, Vol. 21, No. 112, pp. 273-289, 1985.
- G.K. Schleyer, S.S. Hsu, M.D. White, R.S. Birch. Pulse pressure loading of clamped mild steel plates. International Journal of Impact Engineering, Vol 28, (2003), pp. 223-247.

- 17. R.L. Veldman, J. Ari-Gur, C. Clum. Response of pre-pressurized reinforced plates under blast loading. International Journal of Impact Engineering, Vol 35, (2008), pp. 240-250.
- L.A. Louca, Y.G. Pan, J.E. Harding. Response of stiffened and unstiffened plates subjected to blast loading. International Journal of Impact Engineering, Vol 20, No 12, (1998), pp. 1079-1086.
- 19. J. K. Paik, Y. S. Shin. Structural damage and strength criteria for ship stiffened panels under impact pressure actions arising from sloshing, slamming and green water loading. Ships and Offshore Structures.

## ПАРАРТНМА

Στο παράρτημα παρουσιάζονται όπως αναφέρθηκε στο 7° Κεφάλαιο εκτενώς τα διαγράμματα και οι εικόνες που παράχθηκαν μέσω του προγράμματος Abaqus Explicit και παρουσιάζουν τις παραμορφώσεις, μετατοπίσεις και τάσεις της κατασκευής για τις διάφορες φορτίσεις. Υπενθυμίζουμε εδώ τους δύο πίνακες που παρουσιάστηκαν στο 7° Κεφάλαιο στους οποίους αναφέρονται τα χαρακτηριστικά της καθεμιάς φόρτισης και οι μέγιστες μόνιμες και μη-μόνιμες μετατοπίσεις αντίστοιχα.

Ονομασία Φόρτισης	Εμβαδόν επιφάνειας εφαρμογής φόρτισης (m <sup>2</sup> )	Ένταση παλμού Impulse (N*sec)	Μέγιστη πίεση Pmax (MPa)	Χρόνος φόρτισης τ <sub>ο</sub> (msec)
A1	5.25	2460	0.05	9.38
A2	5.25	2460	0.1	4.69
B1	5.25	3940	0.05	15
B2	5.25	3940	0.1	7.5
B3	5.25	3940	0.2	3.75
C1	5.25	4925	0.1	9.38
C2	5.25	4925	0.5	1.876
C3	5.25	4925	1	0.938
C4	5.25	4925	3	0.312
D1	5.25	14780	0.5	5.63
D2	5.25	14780	1	2.81
D3	5.25	14780	2	1.41
D4	5.25	14780	3	0.94
E1	5.25	24620	0.25	18.76
E2	5.25	24620	0.5	9.38
E3	5.25	24620	1	4.69
E4	5.25	24620	3	1.56
E5	5.25	24620	5	0.938
F1	5.25	39400	0.4	18.76
F2	5.25	39400	1	7.5
F3	5.25	39400	3	2.5
F4	5.25	39400	5	1.5
F5	5.25	39400	8	0.9375
G1	5.25	49245	1	9.38
G2	5.25	49245	3	3.13
G3	5.25	49245	5	1.876
G4	5.25	49245	8	1.1725
G5	5.25	49245	10	0.938

	Πάκ	τωση	Άρθρωση		
Ονομασία	Μέγιστη	Μέγιστη μη	Μέγιστη	Μέγιστη μη	
φόρτισης	μόνιμη	μόνιμη	μόνιμη	μόνιμη	
4001015	μετατόπιση	μετατόπιση	μετατόπιση	μετατόπιση	
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
A1	0	1.72	0	2.95	
A2	0	3.42	0	5.65	
B1	0	1.73	0	2.95	
B2	0	3.45	0	5.66	
B3	0.07	6.70	0.45	10.4	
C1	0	3.42	0	5.7	
C2	0.9	12.6	1.9	15.7	
C3	2	15.1	2.7	16.3	
C4	2.7	16.15	3.6	16.8	
D1	4.6	15.9	8.94	21.6	
D2	14.3	29.15	19.3	32.8	
D3	25.5	37.2	26.3	38.8	
D4	28.7	39.75	28.5	40.6	
E1	0.5	8.3	1.9	12.6	
E2	4.4	15.97	9.2	21.5	
E3	19.7	30.5	23.7	34.3	
E4	48	56.5	49.9	58.7	
E5	53.3	61.7	53.2	61.6	
F1	3.6	13.1	6.8	18.2	
F2	21.4	30.8	24.9	35.4	
F3	71	77.5	75.6	81.8	
F4	85.4	90.7	88.8	94.5	
F5	91.4	96.7	94.2	99.6	
G1	22	31.5	25.1	35.4	
G2	83.2	89.5	88.1	93.8	
G3	104.3	109.5	109.2	114.1	
G4	115.5	120.3	119.6	124.5	
G5	118.8	123.4	122.6	127.5	

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εικόνες και τα διαγράμματα. Αναφέρουμε ότι η φόρτιση Α1 παραλείπεται αφού αναφέρεται στο 7° Κεφάλαιο.

## Φόρτιση Α2

Im  $pulse = 2460N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 0.1MPa$ ,  $\tau_o = 4.69m sec$ 

Στήριξη με πάκτωση



Μετατοπίσεις των κεντρικών κόμβων των στοιχειωδών ελασμάτων





## Φόρτιση Α2

Im  $pulse = 2460N \cdot \text{sec}$ ,  $P_{\text{max}} = 0.1MPa$ ,  $\tau_o = 4.69m \sec$ 

#### Στήριξη με άρθρωση



Μετατοπίσεις των κεντρικών κόμβων των στοιχειωδών ελασμάτων







Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση των στοιχείων της κατασκευής

#### Φόρτιση Β1

Im  $pulse = 3940N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 0.05MPa$ ,  $\tau_o = 15m sec$ 

## Στήριξη με πάκτωση







Im  $pulse = 3940N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 0.05MPa$ ,  $\tau_o = 15m sec$ 

Στήριξη με άρθρωση







Im  $pulse = 3940N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 0.1MPa$ ,  $\tau_o = 7.5m sec$ 

Στήριξη με πάκτωση







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: b2encastre.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Thu Oct 23 09:28:29 GTB Daylight Time 2008





Y =



Im  $pulse = 3940N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 0.1MPa$ ,  $\tau_o = 7.5m sec$ 











Im pulse =  $3940N \cdot \sec$ ,  $P_{max} = 0.2MPa$ ,  $\tau_o = 3.75m \sec$ 











Im  $pulse = 3940N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 0.2MPa$ ,  $\tau_o = 3.75m sec$ 













## Φόρτιση C1

Im  $pulse = 4925N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 0.1MPa$ ,  $\tau_o = 9.38m sec$ 

## Στήριξη με πάκτωση







۷ –



ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: clencastre.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Thu Oct 23 10:40:07 GTB Daylight Time 2008 Step: Step-1 Increment 3:3248: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00 Tελικές κομβικές μετατοπίσεις



#### Ισοδύναμη παραμένουσα τάση κατά Mises

#### Φόρτιση C1

Im  $pulse = 4925N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 0.1MPa$ ,  $\tau_o = 9.38m sec$ 

## Στήριξη με άρθρωση












Step: Step-1 Increment 33248: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: c1pinned.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Thu Oct 23 16:51:22 GTB Daylight Time 2008







### Φόρτιση C2

Im  $pulse = 4925N \cdot \text{sec}$ ,  $P_{\text{max}} = 0.5MPa$ ,  $\tau_o = 1.876m \text{sec}$ 







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: c2encastre.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Thu Oct 23 10:54:53 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 33299: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση των στοιχείων της κατασκευής

## Φόρτιση C2

Im  $pulse = 4925N \cdot \text{sec}$ ,  $P_{\text{max}} = 0.5MPa$ ,  $\tau_o = 1.876m \text{sec}$ 

## Στήριξη με άρθρωση











Step: Step-1 Increment 33353: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: c2pinned.odb Abaqus/Explicit Version 6:7-1 Thu Oct 23 16:58:22 GTB Daylight Time 2008







## Φόρτιση C3

Im  $pulse = 4925N \cdot \text{sec}$ ,  $P_{\text{max}} = 1MPa$ ,  $\tau_o = 0.938m \sec$ 







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: c3encastre.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Wed Oct 22 22:01:07 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 34184: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

### Τελικές κομβικές μετατοπίσεις



# Ισοδύναμη παραμένουσα τάση κατά Mises



Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση των στοιχείων της κατασκευής

## Φόρτιση C3

Im  $pulse = 4925N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 1MPa$ ,  $\tau_o = 0.938m sec$ 

## Στήριξη με άρθρωση





d Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00 Τελικές κομβικές μετατοπίσεις





## Φόρτιση C4

Im  $pulse = 4925N \cdot \text{sec}$ ,  $P_{\text{max}} = 3MPa$ ,  $\tau_o = 0.312m \sec$ 





Step: Step-1 Increment 34298: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

٧H





# Φόρτιση C4

Im  $pulse = 4925N \cdot \text{sec}$ ,  $P_{\text{max}} = 3MPa$ ,  $\tau_o = 0.312m \sec$ 

### Στήριξη με άρθρωση



Μετατοπίσεις των κεντρικών κόμβων των στοιχειωδών ελασμάτων





ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: c4pinned.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Thu Oct 23 17:02:55 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 36571: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





## Φόρτιση D1

Im  $pulse = 14780N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 0.5MPa$ ,  $\tau_o = 5.63m sec$ 







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: d1encastre.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Thu Oct 23 11:18:17 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 36506: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





# Φόρτιση D1

Im  $pulse = 14780N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 0.5MPa$ ,  $\tau_o = 5.63m sec$ 

## Στήριξη με άρθρωση



Μετατοπίσεις των κεντρικών κόμβων των στοιχειωδών ελασμάτων













Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση των στοιχείων της κατασκευής

## Φόρτιση D2

Im  $pulse = 14780N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 1MPa$ ,  $\tau_o = 2.81m sec$ 







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: d2encastre.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Thu Oct 23 11:28:59 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 34825: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





## Φόρτιση D2

Im  $pulse = 14780N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 1MPa$ ,  $\tau_o = 2.81m sec$ 





Μετατοπίσεις των κεντρικών κόμβων των στοιχειωδών ελασμάτων





ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: d2pinned.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Fri Oct 24 11:18:19 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 34512: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





### Φόρτιση D3

Im  $pulse = 14780N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 2MPa$ ,  $\tau_o = 1.41m sec$ 







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: d3encastre.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Thu Oct 23 11:38:10 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 36703: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





## Φόρτιση D3

Im  $pulse = 14780N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 2MPa$ ,  $\tau_o = 1.41m sec$ 





Μετατοπίσεις των κεντρικών κόμβων των στοιχειωδών ελασμάτων





ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: d3pinned.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Fri Oct 24 11:26:36 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 34434: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





## Φόρτιση D4

Im  $pulse = 14780N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 3MPa$ ,  $\tau_o = 0.94m sec$ 





Μετατοπίσεις των κεντρικών κόμβων των στοιχειωδών ελασμάτων







Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση των στοιχείων της κατασκευής

### Φόρτιση D4

Im  $pulse = 14780N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 3MPa$ ,  $\tau_o = 0.94m sec$ 









ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: d4pinned.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Fri Oct 24 11:34:46 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 34605: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

### Τελικές κομβικές μετατοπίσεις



#### Ισοδύναμη παραμένουσα τάση κατά Mises



## Φόρτιση Ε1

Im *pulse* = 24620*N* · sec,  $P_{\text{max}} = 0.25MPa$ ,  $\tau_o = 18.76m \sec$ 







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: e1encastre.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Thu Oct 23 11:58:04 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 33250: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

### Τελικές κομβικές μετατοπίσεις



### Ισοδύναμη παραμένουσα τάση κατά Mises



Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση των στοιχείων της κατασκευής

## Φόρτιση Ε1

Im *pulse* =  $24620N \cdot \text{sec}$ ,  $P_{\text{max}} = 0.25MPa$ ,  $\tau_o = 18.76m \text{sec}$ 

## Στήριξη με άρθρωση







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: e1pinned.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Fri Oct 24 11:47:33 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 33293: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

### Τελικές κομβικές μετατοπίσεις



### Ισοδύναμη παραμένουσα τάση κατά Mises



## Φόρτιση Ε2

Im  $pulse = 24620N \cdot \text{sec}$ ,  $P_{\text{max}} = 0.5MPa$ ,  $\tau_o = 9.38m \text{sec}$ 











Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση των στοιχείων της κατασκευής

### Φόρτιση Ε2

Im  $pulse = 24620N \cdot \text{sec}$ ,  $P_{\text{max}} = 0.5MPa$ ,  $\tau_o = 9.38m \text{sec}$ 

## Στήριξη με άρθρωση






ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: e2pinned.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Fri Oct 24 11:57:27 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 34789: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

### Τελικές κομβικές μετατοπίσεις



#### Ισοδύναμη παραμένουσα τάση κατά Mises



# Φόρτιση Ε3

Im  $pulse = 24620N \cdot \text{sec}$ ,  $P_{\text{max}} = 1MPa$ ,  $\tau_o = 4.69m \sec$ 







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: e3encastre.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Thu Oct 23 12:15:51 GTB Daylight Time 2008



٧-

Step: Step-1 Increment 37141: Step Time = 0.2000 Primary Var. U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

### Τελικές κομβικές μετατοπίσεις



ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: e3encastre.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Thu Oct 23 12:15:51 GTB Daylight Time 2008

Step: Step-1 Increment 37141: Step Time = 0.2000 Primary Var: S. Mises Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

#### Ισοδύναμη παραμένουσα τάση κατά Mises



# Φόρτιση Ε3

Im  $pulse = 24620N \cdot \text{sec}$ ,  $P_{\text{max}} = 1MPa$ ,  $\tau_o = 4.69m \sec$ 









# Φόρτιση Ε4

Im  $pulse = 24620N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 3MPa$ ,  $\tau_o = 1.56m sec$ 

# Στήριξη με πάκτωση







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: e4encastre.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Thu Oct 23 12:27:23 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 35097: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

### Τελικές κομβικές μετατοπίσεις



#### Ισοδύναμη παραμένουσα τάση κατά Mises



### Φόρτιση Ε4

Im  $pulse = 24620N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 3MPa$ ,  $\tau_o = 1.56m sec$ 







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: e4pinned.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Fri Oct 24 12:16:40 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 37064: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





# Φόρτιση Ε5

Im  $pulse = 24620N \cdot \text{sec}$ ,  $P_{\text{max}} = 5MPa$ ,  $\tau_o = 0.938m \sec$ 

### Στήριξη με πάκτωση



Μετατοπίσεις των κεντρικών κόμβων των στοιχειωδών ελασμάτων





ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: e5encastre.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Thu Oct 23 12:36:15 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 34260: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





# Φόρτιση Ε5

Im  $pulse = 24620N \cdot \text{sec}$ ,  $P_{\text{max}} = 5MPa$ ,  $\tau_o = 0.938m \,\text{sec}$ 









ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: e5pinned.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Fri Oct 24 12:30:01 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 34260: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





# Φόρτιση F1

Im  $pulse = 39400N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 0.4MPa$ ,  $\tau_o = 18.76m sec$ 

# Στήριξη με πάκτωση







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: F1ENCASTRE.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Wed Oct 22 16:35:19 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 34717: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

### Τελικές κομβικές μετατοπίσεις



#### Ισοδύναμη παραμένουσα τάση κατά Mises



# Φόρτιση F1

Im  $pulse = 39400N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 0.4MPa$ ,  $\tau_o = 18.76m sec$ 











ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: f1pinned.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Fri Oct 24 12:40:00 GTB Daylight Time 2008





# Φόρτιση F2

Im  $pulse = 39400N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 1MPa$ ,  $\tau_o = 7.5m sec$ 









ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: F2ENCASTRE.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Wed Oct 22 16:55:50 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 37644: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





# Φόρτιση F2

Im  $pulse = 39400N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 1MPa$ ,  $\tau_o = 7.5m sec$ 







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: f2pinned.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Fri Oct 24 12:49:29 GTB Daylight Time 2008

Τελικές κομβικές μετατοπίσεις

Step: Step-1 Increment 37012: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



×Ļ

Ισοδύναμη παραμένουσα τάση κατά Mises



### Φόρτιση F3

Im  $pulse = 39400N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 3MPa$ ,  $\tau_o = 2.5m sec$ 

# Στήριξη με πάκτωση









### Φόρτιση F3

Im  $pulse = 39400N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 3MPa$ ,  $\tau_o = 2.5m sec$ 











Step: Step-1 Increment 38212: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: f3pinned.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Fri Oct 24 12:57:56 GTB Daylight Time 2008







# Φόρτιση F4

Im  $pulse = 39400N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 5MPa$ ,  $\tau_o = 1.5m sec$ 

# Στήριξη με πάκτωση







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: F4ENCASTRE.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Wed Oct 22 19:02:58 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 37917: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





# Φόρτιση F4

Im  $pulse = 39400N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 5MPa$ ,  $\tau_o = 1.5m sec$ 









# Φόρτιση F5

Im  $pulse = 39400N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 8MPa$ ,  $\tau_o = 0.9375m sec$ 

# Στήριξη με πάκτωση







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: F5ENCASTRE.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Wed Oct 22 19:55:32 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 37321: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





### Φόρτιση F5

Im  $pulse = 39400N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 8MPa$ ,  $\tau_o = 0.9375m sec$ 







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: f5pinned.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Fri Oct 24 13:17:30 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 35370: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





# Φόρτιση G1

Im  $pulse = 49245N \cdot \text{sec}$ ,  $P_{\text{max}} = 1MPa$ ,  $\tau_o = 9.38m \,\text{sec}$ 

# Στήριξη με πάκτωση







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: g1encastre.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Thu Oct 23 12:36:58 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 37030: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





# Φόρτιση G1

Im  $pulse = 49245N \cdot \text{sec}$ ,  $P_{\text{max}} = 1MPa$ ,  $\tau_o = 9.38m \,\text{sec}$ 






ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: G1pinned.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Fri Oct 24 13:49:07 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 37317: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





Im  $pulse = 49245N \cdot \text{sec}$ ,  $P_{\text{max}} = 3MPa$ ,  $\tau_o = 3.13m \,\text{sec}$ 





ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: g2encastre.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Thu Oct 23 12:41:25 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 37450: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





### Φόρτιση G2

Im  $pulse = 49245N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 3MPa$ ,  $\tau_o = 3.13m sec$ 







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: G2pinned.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Fri Oct 24 14:00:02 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 38055: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





Im  $pulse = 49245N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 5MPa$ ,  $\tau_o = 1.876m sec$ 







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: g3encastre.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Thu Oct 23 13:21:58 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 37700: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

### Τελικές κομβικές μετατοπίσεις



#### Ισοδύναμη παραμένουσα τάση κατά Mises



### Φόρτιση G3

Im  $pulse = 49245N \cdot sec$ ,  $P_{max} = 5MPa$ ,  $\tau_o = 1.876m sec$ 







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: G3pinned.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Fri Oct 24 14:08:55 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 38258: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





Im  $pulse = 49245N \cdot \text{sec}$ ,  $P_{\text{max}} = 8MPa$ ,  $\tau_o = 1.1725m \text{sec}$ 







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: g4encastre.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Thu Oct 23 13:43:57 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 37852: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





### Φόρτιση G4

Im  $pulse = 49245N \cdot \text{sec}$ ,  $P_{\text{max}} = 8MPa$ ,  $\tau_o = 1.1725m \text{sec}$ 







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: G4pinned.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Fri Oct 24 14:20:38 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 35856: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





Im  $pulse = 49245N \cdot \text{sec}$ ,  $P_{\text{max}} = 10MPa$ ,  $\tau_o = 0.938m \text{sec}$ 





ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: g5encastre.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Thu Oct 23 13:55:12 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 37845: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00





### Φόρτιση G5

Im  $pulse = 49245N \cdot \text{sec}$ ,  $P_{\text{max}} = 10MPa$ ,  $\tau_o = 0.938m \text{sec}$ 







ABAQUS job created on 22-Oct-08 at 16:05:43 ODB: G5pinned.odb Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Fri Oct 24 14:42:00 GTB Daylight Time 2008



Step: Step-1 Increment 36060: Step Time = 0.2000 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



