

Η μελέτη ναυπηγικών κατασκευών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

1. Εισαγωγή

1.1 Οι πρώτες μελέτες

Έχουμε δει ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί εξέλιξη και επέκταση της μητρωικής ανάλυσης, η οποία αναπτύχθηκε κατά την περίοδο 1950-60. Τη δεκαετία αυτή η εκτενέστερη χρήση αριθμητικών μεθόδων έγινε στο πεδίο της αεροναυπηγικής, υπάρχουν όμως και ορισμένες μελέτες που έγιναν για να δοθούν απαντήσεις σε ναυπηγικά προβλήματα. Η πρώτη τέτοια εκπονήθηκε από τους Yuille και Wilson (1960) για να εξετασθεί η εγκάρσια αντοχή πολεμικού πλοίου. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η μητρωική ανάλυση και εξετάστηκε η συμπεριφορά ενός τμήματος της κατασκευής μεταξύ εγκάρσιων φρακτών σε τρεις διαστάσεις. Σκοπός της μελέτης αυτής ήταν να προσδιορισθούν με ακρίβεια τα εντατικά πεδία και να γίνει σε συνέχεια διαστασιολόγηση της κατασκευής. Παράλληλα με τη θεωρητική μελέτη εκπονήθηκε και μία σειρά πειραμάτων σε πρότυπο κλίμακας 1 προς 3.

Μία από τις πιο σημαντικές πρώτες μελέτες που βασίστηκε αποκλειστικά στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ήταν αυτή του Kendrick, που έγινε το 1970. Ο Kendrick μελέτησε την αντοχή των νέων τότε υπερδεξαμενόπλοιων (χωρητικότητας >200.000 τόνων) τα οποία είχαν κατασκευασθεί με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς των νηογνομόνων. Επειδή στα πλοία που κατασκευάστηκαν παρατηρήθηκαν προβλήματα αστοχιών στους εγκάρσιους νομείς, αποφασίστηκε να γίνουν αναλύσεις της κατασκευής με πρόγραμμα ΠΣ. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι διαστάσεις που απαιτούσαν οι κανονισμοί, οι οποίοι μέχρι τότε βασίζονταν σε ημι-εμπειρικές σχέσεις που έβρισκαν εφαρμογή σε πλοία αρκετά μικρότερων διαστάσεων, (χωρητικότητας έως 20.000 τόνους) ήσαν ανεπαρκείς. Όπως και στην προηγούμενη μελέτη έτσι και σε αυτή τα αποτελέσματα βαθμονομήθηκαν με πειραματικές συγκρίσεις.

Από την πρώτη αυτή περίοδο κατά την οποία τα προγράμματα ήσαν λίγα και δύσχρηστα, ιδίως για ναυπηγικά προβλήματα, πολλά έχουν αλλάξει μέχρι σήμερα.

Πρώτα απ' όλα, η τεχνολογία των υπολογιστών έχει δώσει τη δυνατότητα εκπόνησης μελετών πολύ μεγαλύτερης κλίμακας σε πολύ μικρότερο χρόνο. Οι υπο-

λογιστικοί κώδικες έχουν ταυτόχρονα εξελιχθεί σε τέτοιο σημείο που σήμερα μπορεί να γίνει ένα μεγάλο μέρος της μελέτης με αυτόματες διαδικασίες. Η προετοιμασία των δεδομένων και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων που ήσαν οι πλέον χρονοβόρες φάσεις μίας μελέτης σήμερα δεν προβάλλουν απαγορευτικούς περιορισμούς από πλευράς χρόνου.

Έχουμε φθάσει λοιπόν στο σημείο που ένας μελετητής που διαθέτει ένα προσωπικό υπολογιστή με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων να είναι σε θέση να εκπονήσει μία μελέτη που να περιλαμβάνει αρκετές χιλιάδες βαθμούς ελευθερίας σε πολύ λογικά πλαίσια κόστους και χρόνου. Το θέμα που προκύπτει δεν είναι πλέον η διαθεσιμότητα των αναγκαίων εργαλείων (υπολογιστής, λογισμικό) αλλά η κατάρτιση του μελετητή και η ικανότητά του στη σωστή προσομοίωση, στην επιλογή των στοιχείων και άλλων παραμέτρων της μελέτης και στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι η σχετική καθυστέρηση της εφαρμογής προηγμένων αριθμητικών μεθόδων σε ναυπηγικά προβλήματα οφείλεται σε ένα βαθμό σε ορισμένες ιδιαιτερότητες των ναυπηγικών κατασκευών. Αυτές είναι:

- Το μέγεθος και η πολυπλοκότητά τους
- Η αβεβαιότητα που περιβάλλει τις εξωτερικές φορτίσεις και
- Η μη-γραμμικότητα της απόκρισης της μεταλλικής κατασκευής

Η πολυπλοκότητα της μορφολογίας και η αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει τις εξωτερικές φορτίσεις υποχρεώνουν τον μελετητή να προσδιορίσει με σαφήνεια και σε ορισμένες περιπτώσεις να υιοθετήσει απλουστευτικές παραδοχές για το συγκεκριμένο πρόβλημα που θα επιχειρήσει να εξετάσει. Ο ακριβής προσδιορισμός των παραμέτρων μίας ανάλυσης οδηγεί σε μία απλούστευση και εξειδίκευση του γενικού προβλήματος έτσι ώστε η μελέτη να εκπονείται στα πλαίσια των δυνατοτήτων των χρησιμοποιούμενων προγραμμάτων και του διαθέσιμου χρόνου και κόστους.

Όσον αφορά τη μη-γραμμικότητα της απόκρισης είναι δυνατόν να εξετασθεί η συμπεριφορά μόνο στη γραμμική περιοχή χωρίς να προχωρήσει η μελέτη στον προσδιορισμό φορτίων ελαστο-πλαστικού λυγισμού και τελικής κατάρρευσης. Μία τέτοια μελέτη αποδίδει στοιχεία σχετικά με τις κατανομές των τάσεων και τις αντίστοιχες μετατοπίσεις, πληροφορίες που είναι πολύ χρήσιμες για την αξιολόγηση της κατασκευής υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιασθούν αποτελέσματα γραμμικών αναλύσεων για συγκεκριμένες μελέτες πλοίων.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες διαδικασίες σχεδιασμού ναυπηγικών κατασκευών στις οποίες τα προγράμματα ΠΣ παίζουν κυρίαρχο ρόλο. Δύο από αυτές είναι του Hughes (*MAESTRO*) στις Η.Π.Α. και του βρετανικού πολεμικού ναυτικού (*GODDESS*). Επειδή δε στις δύο αυτές διαδικασίες ο αριθμητικός αλγόριθμος έχει χρησιμοποιηθεί κατά διαφορετικό τρόπο, θα γίνει μία σύντομη περιγραφή τους και θα αναφερθούν οι βασικότερες διαφορές τους. Σημειώνεται ότι το *MAESTRO* περιγράφεται εκτενώς στο Κεφάλαιο 9 και το Παράρτημα

Δ. Χρήση ενός άλλου προγράμματος γενικής εφαρμογής, του *ALGOR*, περιγράφεται στο Κεφάλαιο 10 και το Παράρτημα Γ.

1.2 Η χρήση προγραμμάτων ΠΣ

Πριν περιγράψουμε τις τεχνικές που αναφέραμε προηγουμένως πρέπει να δώσουμε απαντήσεις σε ένα αριθμό ερωτημάτων που προκύπτουν. Αυτά συνοψίζονται στα παρακάτω:

- Πότε επιβάλλεται να γίνεται χρήση προγραμμάτων ΠΣ
- Τι είδους ανάλυση πρέπει να γίνεται
- Τι λογισμικό μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε
- Πως εξασφαλίζεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων

Μία γενική απάντηση στο πρώτο ερώτημα είναι ότι αριθμητική ανάλυση απαιτείται όταν η πολυπλοκότητα του προβλήματος οδηγεί σε αναξιοπιστία των αποτελεσμάτων που δίνουν οι διαθέσιμες χρησιμοποιούμενες αναλυτικές λύσεις ή όταν δεν υπάρχουν αναλυτικές μέθοδοι για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Για να απαιτηθεί όμως αριθμητική λύση θα πρέπει να συντρέχουν και άλλοι πρακτικοί παράγοντες όπως:

1. Να έχει καθορισθεί με επαρκή λεπτομέρεια η μορφολογία της κατασκευής
2. Να υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες σχετικά με τις εξωτερικές φορτίσεις
3. Να μην είναι απαγορευτικό το κόστος και ο χρόνος εκπόνησης
4. Να είναι αξιόπιστα τα προσδοκώμενα αποτελέσματα από πλευράς προγράμματος και μελετητή
5. Να είναι σαφή τα πλεονεκτήματα χρήσης της

Τα τελευταία χρόνια αρχίζει να γίνεται σταδιακά πιο ορατή η απαίτηση για χρήση προγραμμάτων κατά τον *σχεδιασμό ναυπηγικών κατασκευών*. Η πρώτη εκτενής εφαρμογή προγραμμάτων στο σχεδιασμό έχει γίνει από τα γραφεία μελετών των ναυτικών και των βιομηχανιών των περισσότερων προηγμένων βιομηχανικών χωρών και αυτών με ναυτική παράδοση.

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναφορά στη θέση που κατέχει η υπολογιστική διαδικασία στην όλη διαδικασία σχεδιασμού ενός νέου τύπου πολεμικού πλοίου. Όσον αφορά τη μελέτη εμπορικών πλοίων παρατίθενται εκτενή αποτελέσματα μελετών και προτεινόμενοι τρόποι διακριτοποίησης από νηογνώμονες. Περισσότερες πληροφορίες δίνονται στα Κεφάλαια 9 και 10.

Πέραν όμως των απαιτήσεων των νηογνώμωνων στο στάδιο του προκαταρκτικού σχεδιασμού, υπολογιστικά προγράμματα χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται είτε να ελεγχθεί η συμπεριφορά τμήματος της κατασκευής για λογαριασμό του πλοιοκτήτη ή άλλου ενδιαφερόμενου είτε να υποστηριχθεί ένας των αντιδίκων σε δικαστική διένεξη. Στις τελευταίες περιπτώσεις η χρήση γίνεται με σκοπό την ανά-

λυση της κατασκευής και κατά κανόνα εκπονείται από ένα φορέα αναγνωρισμένης πείρας και φερεγγυότητας (νηογνώμονας, μελετητικό γραφείο, κέντρο ερευνών).

Το τελευταίο σημείο έχει πρωτεύουσα πρακτική σημασία διότι αποτελέσματα αμφίβολης ακρίβειας ή χαμηλής αξιοπιστίας είναι χειρότερα από την μη εκπόνηση της μελέτης. Η όλη διαδικασία εκπόνησης των μελετών αυτών μπορεί να γίνει πολύπλοκη και απαιτούνται σε βάθος γνώσεις της συμπεριφοράς των ναυπηγικών κατασκευών, της θεωρίας πεπερασμένων στοιχείων αλλά και πείρα χρήσης των προγραμμάτων. Για να εξασφαλισθεί ένα ελάχιστο επίπεδο αξιοπιστίας των μελετών έχουν συνταχθεί διάφορα κείμενα απευθυνόμενα προς μελετητές-χρήστες προγραμμάτων με γενικές αλλά σαφείς οδηγίες για τον τρόπο χρήσης τους. Ο αναγνώστης του παρόντος κειμένου που θα προχωρήσει στη χρήση προγραμμάτων ΠΣ συνιστάται να συμβουλευθεί κάποια από αυτά^{1,2}. Οι μελέτες που κατά κανόνα γίνονται για ναυπηγικές κατασκευές εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες που θα εξετασθούν αμέσως παρακάτω.

1.2.1 Μελέτη συμπεριφοράς όλης της κατασκευής

Η διαδικασία αυτή συνίσταται στην αναπαράσταση των κυριότερων χαρακτηριστικών της μεταλλικής κατασκευής έτσι ώστε οι κατανομές των τάσεων και μετατοπίσεων να έχουν ακρίβεια σε γενικό επίπεδο όχι όμως σε τοπικό επίπεδο. Η γενική ανάλυση της κατασκευής αποβλέπει στον προσδιορισμό των πεδίων που οφείλονται σε γενική φόρτιση και στην απόκτηση δεδομένων σχετικά με τις οριακές συνθήκες στα σημεία στήριξης τμημάτων της κατασκευής. Για παράδειγμα, λόγω της πολυπλοκότητας της μορφολογίας αλλά και των φορτίων δεν είναι εύκολο να υπολογισθεί η καμπτική ακαμψία κατά μήκος των συνδέσεων των φρακτών, των καταστρωμάτων κ.ά. με τις γειτονικές κατασκευές. Τα αποτελέσματα όμως που προκύπτουν από γενικές αναλύσεις περιλαμβάνουν περιστροφές στα σημεία στήριξης από τις οποίες εύκολα υπολογίζονται οι σχετικές ακαμψίες. Στις μελέτες αυτές τα εξωτερικά φορτία είναι κατά κανόνα στατικά ή ψευδο-στατικά.

1.2.2 Μελέτη τμήματος της μεταλλικής κατασκευής

Η ανάλυση τμήματος της μεταλλικής κατασκευής είτε ακολουθεί μία γενική ανάλυση είτε γίνεται ανεξάρτητα από αυτή, με σκοπό την μελέτη κάποιου τμήματος της κατασκευής η ανάλυση του οποίου δύσκολα γίνεται διαφορετικά. Για παράδειγμα, κατά τον σχεδιασμό των καλυμμάτων των κυτών θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα εντατικά πεδία που οφείλονται σε πρωτεύουσα κάμψη αλλά και σε στρέψη της διατομής του πλοίου. Πιθανόν δεν θα χρειασθεί να ληφθούν υπόψη και οι θερμικές τάσεις, έτσι ώστε το πρόβλημα να μην επιλύεται πλέον με συμβατικές αναλυτικές μεθόδους με γρήγορο και αξιόπιστο τρόπο. Θα μπορούσαμε επίσης να

¹ NAFEMS *Guide to the Use of Finite Element Programs*, Glasgow, Scotland.

² *Guidelines for Evaluation of Ship Structural Finite Element Analysis*. SSC Report, U.S. Coast Guard, Washington, USA.

αναφέρουμε οποιοδήποτε πρόβλημα στο οποίο προκύπτει η ανάγκη υπέρθεσης δυναμικών σε στατικά φορτία ως ένα δεύτερο παράδειγμα ανάγκης για τοπική ανάλυση με τη ΜΠΣ.

Εκτός του προβλήματος της έκτασης της μελέτης ένα άλλο θέμα που ανακύπτει είναι αυτό του επιπέδου στο οποίο θα διεξαχθεί αυτή. Η ποικιλία των διαθέσιμων προγραμμάτων και οι δυνατότητες που παρέχουν δεν συμβάλλουν στην εύκολη λήψη αποφάσεων. Γεγονός όμως είναι ότι το επίπεδο μελέτης θα εξαρτηθεί από τον σκοπό για τον οποίο εκπονείται αυτή. Εάν δηλαδή γίνεται για να ικανοποιηθούν απαιτήσεις νηογνώμονα, τότε είναι ευνόητο ότι θα πρέπει το επίπεδο της μελέτης να είναι τουλάχιστον αυτό που απαιτείται από τους κανονισμούς. Οι νηογνώμονες συνήθως απαιτούν την εκπόνηση γραμμικών ελαστικών μελετών στο στάδιο του προκαταρκτικού σχεδιασμού και σε ορισμένες περιπτώσεις περιγράφουν προτεινόμενες διαδικασίες διακριτοποίησης (εδάφιο 4.3) τα αποτελέσματα των οποίων γίνονται αποδεκτά. Για ειδικά προβλήματα όμως είναι πολύ πιθανόν να χρειασθεί μη-γραμμική θεώρηση η πολυπλοκότητα της οποίας ανέρχεται ραγδαία, όπως επίσης και ο χρόνος και το κόστος εκπόνησής της. Σε γενικές γραμμές οι μη-γραμμικές μελέτες εκπονούνται σε ειδικές περιπτώσεις, όταν δε πληρούνται και οι προαναφερθείσες προϋποθέσεις.

Απάντηση στο τρίτο ερώτημα δεν θα δοθεί στο παρόν κεφάλαιο, ο αναγνώστης όμως παραπέμπεται στο τελευταίο κεφάλαιο του βιβλίου όπου παρατίθενται σχετικές λεπτομέρειες. Τέλος στο τέταρτο ερώτημα έχει ήδη δοθεί μία μερική απάντηση. Επισημαίνεται πάλι ότι αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μπορεί να εξασφαλισθεί εάν γίνουν τα παρακάτω:

- Χρήση προγραμμάτων αναγνωρισμένης αξιοπιστίας,
- Συγκρίσεις με υπάρχοντα αποτελέσματα άλλων προγραμμάτων,
- Συγκρίσεις με αποτελέσματα μελετών με αναλυτικές μεθόδους και
- Με την επαρκή πείρα του μελετητή

1.3 MAESTRO και GODDESS. Δύο διαφορετικές όψεις του προβλήματος

Το πρόγραμμα MAESTRO φιλοδοξεί να προσφέρει μία *ορθολογική μεθοδολογία σχεδιασμού*³ της μεταλλικής κατασκευής ναυπηγικών κατασκευών. Η αρχική ώθηση των μελετητών και των ερευνητών στην κατεύθυνση του ορθολογικού σχεδιασμού προέκυψε κατά το πρώτο συνέδριο του ISSC (International Ship and Offshore Structures Congress), που έγινε το 1961. Ο ορθολογικός σχεδιασμός των ναυπηγικών κατασκευών εκπονείται σε μία σειρά σταδίων, τα οποία βασίζονται στη μαθηματική διατύπωση της συμπεριφοράς της κατασκευής και σε ορθολογικά διατυπωμένα κριτήρια αποδοχής της συμπεριφοράς. Η διαδικασία περιγράφεται συνοπτικά στο Σχήμα 1.

Το πρόγραμμα MAESTRO μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γραμμική αλλά και για μη-γραμμική ανάλυση, για την οποία έχουν αναπτυχθεί και άλλες εξειδικευμέ-

³ ορθολογικός σχεδιασμός = rational design

νες αριθμητικές διαδικασίες. Τέτοιες είναι μεταξύ άλλων ο κώδικας *ISUM* στη Ιαπωνία και ο κώδικας *ASAS-NL* στη Βρετανία (ειδικά για ναυπηγικές κατασκευές). Δεν θα σχολιασθούν περαιτέρω οι δυνατότητες αυτών των προγραμμάτων διότι αυτό είναι πέραν των προθέσεων του παρόντος κειμένου. Θα επικεντρώσουμε λοιπόν το ενδιαφέρον μας στα *γραμμικά προβλήματα* που αποτελούν το πρώτο αλλά και το βασικότερο στάδιο μιας επιτυχούς προσέγγισης στο γενικό πρόβλημα της συμπεριφοράς των ναυπηγικών κατασκευών.

Το ακρόνυμο *MAESTRO* υποδηλώνει τη βελτιστοποίηση της μεταλλικής κατασκευής, και επομένως το πρόγραμμα συνιστά ένα εργαλείο σχεδιασμού. Με τη δυνατότητα βελτιστοποίησης προβάλλει όμως ένας αριθμός ερωτημάτων στα οποία θα πρέπει να δοθούν απαντήσεις πριν αρχίσει η διαδικασία του σχεδιασμού. Αυτά αφορούν τη μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς την οποία θα γίνει η βελτιστοποίηση, και η οποία θα εξαρτηθεί από το είδος του πλοίου, τον φορέα που εκπονεί τη συγκεκριμένη μελέτη κ.ο.κ. Το πρόγραμμα *MAESTRO* κάνει χρήση τεσσάρων ειδικά συνταγμένων γι' αυτό το σκοπό πεπερασμένων στοιχείων:

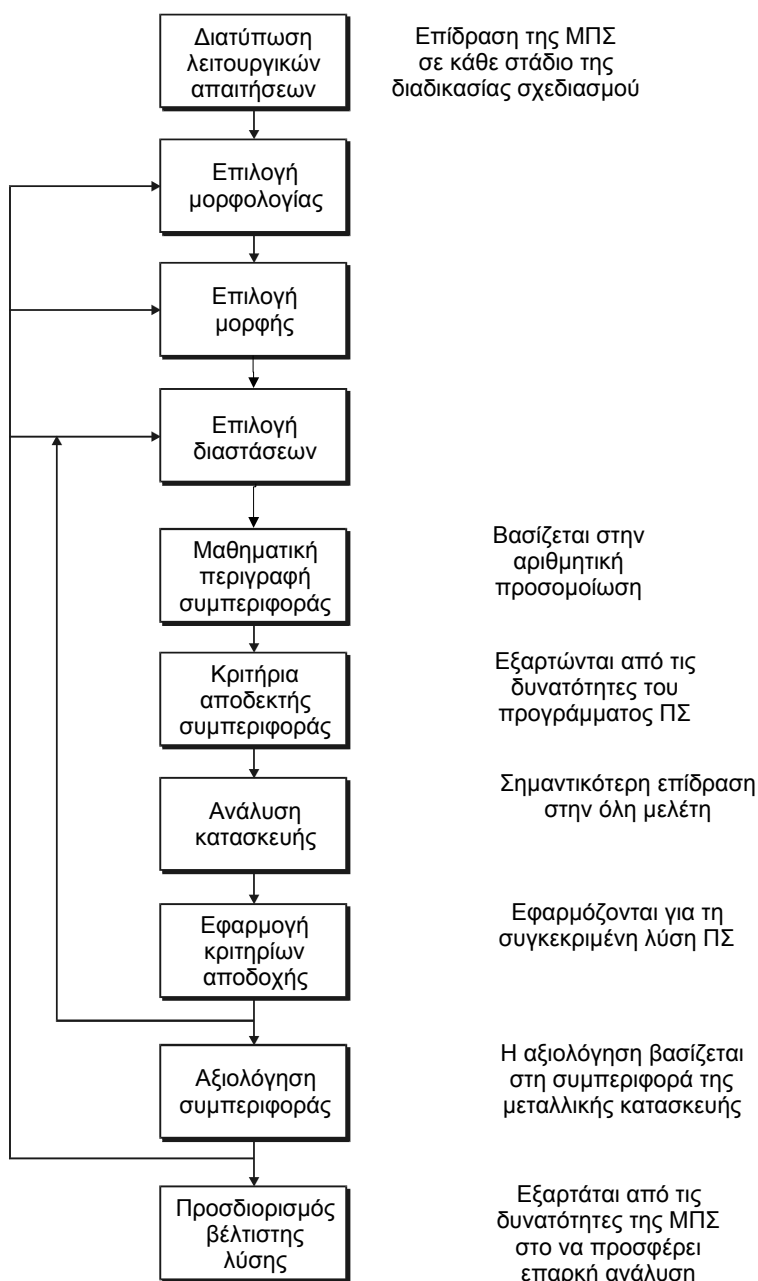
- Στοιχεία ενισχυμένων ελασμάτων που μπορούν να αναπαραστήσουν ενισχυμένα ελάσματα μεγάλων διαστάσεων με ένα στοιχείο
- Σύνθετα στοιχεία-δοκοί για την προσομοίωση δοκών με πέλμα
- Στοιχεία-ράβδοι για την προσομοίωση στύλων
- Στοιχεία διπυθμένου η προσομοίωση των οποίων γίνεται ως επίπεδα πλαίσια αποτελούμενα από πλατύπελμες δοκούς

Στο Κεφάλαιο 9 περιγράφεται λεπτομερώς η μεθοδολογία που ακολουθείται για τη μελέτη ναυπηγικών κατασκευών με το πρόγραμμα *MAESTRO* ενώ στο Παράρτημα Ε δίνονται συνοπτικές οδηγίες χρήσης του προγράμματος.

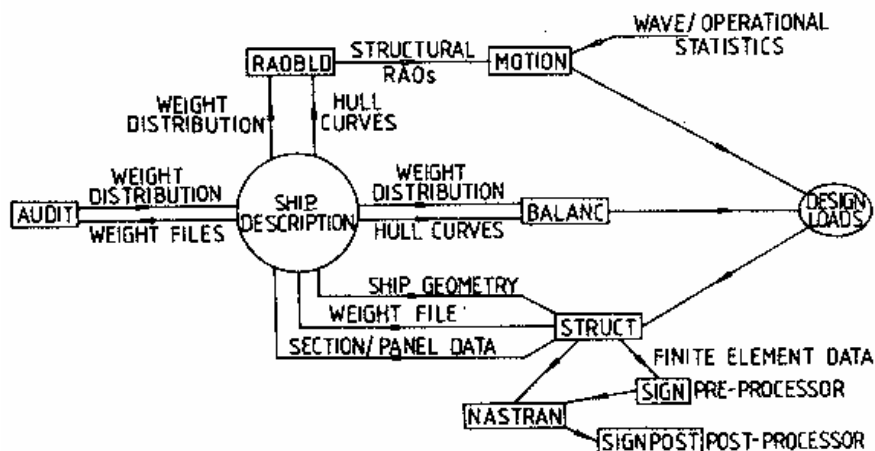
Η αρχική εφαρμογή των προγραμμάτων ΠΣ αφορούσε τον έλεγχο μίας υπάρχουσας κατασκευής και τον προσδιορισμό των εντατικών πεδίων και των αντίστοιχων μετατοπίσεων. Η μέθοδος άλλωστε προϋποθέτει μία επακριβώς καθορισμένη μορφολογία. Δύο όμως μεταγενέστερες εξελίξεις έχουν επιτρέψει την χρήση της μεθόδου και ως εργαλείο σχεδιασμού. Αυτές είναι:

- (α) Η δημιουργία συστημάτων *σχεδιασμού πλοίων με τη βοήθεια H/Y (CASD⁴)* στα οποία περιλαμβάνεται η διαδικασία σχεδιασμού της κατασκευής κατά τρόπο ώστε να αλληλεπιδρά άμεσα με τα άλλα στάδια σχεδιασμού του πλοίου και
- (β) Η ανάπτυξη προ-επεξεργαστών και μετεπεξεργαστών που να επιτρέπουν να ασκείται γρήγορος έλεγχος της συμπεριφοράς της κατασκευής έτσι ώστε να γίνονται τυχόν αλλαγές χωρίς να απαιτηθούν τα αποτελέσματα λεπτομερών και μακροσκελών αναλύσεων.

⁴ *CASD* = Computer-aided Ship Design



Σχήμα 1 Ορθολογικός σχεδιασμός της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου και ο ρόλος της ΜΠΣ



Σχήμα 2 Το σύστημα GODDESS και ο ρόλος των προγραμμάτων σχεδιασμού κατασκευών

Ένα τέτοιο σύστημα *CASD* είναι το *GODDESS* που χρησιμοποιεί το βρετανικό ναυτικό. Η θέση που καταλαμβάνουν στο σύστημα αυτό οι υπολογισμοί κατασκευαστικού σχεδιασμού φαίνονται στο Σχήμα 2. Το σκέλος της διαδικασίας που αφορά τον προσδιορισμό των κατασκευαστικών λεπτομερειών περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- (α) Υπολογισμός φορτίων, με βάση ψευδο-στατική ανάλυση και με θεωρία λωρίδας (προγράμματα *BALANC* και *RAOBLD*, *MOTION*).
- (β) Μορφολογία κατασκευής και υπολογισμός βαρών (πρόγραμμα *STRUCT*)
- (γ) Ανάλυση συμπεριφοράς της κατασκευής (πρόγραμμα *MSC-NASTRAN*)

Το πρόγραμμα *STRUCT* χρησιμοποιείται επίσης για την ανάπτυξη αρχείων δεδομένων για το πρόγραμμα ΠΣ τα οποία μπορούν να αναλυθούν και μέσω του προ-επεξεργαστού *SIGN* και του μετεπεξεργαστού *SIGNPOST* που έχουν αναπτυχθεί από τον Lloyd's Register of Shipping.

Βλέπουμε λοιπόν ότι τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων βρίσκουν άμεση εφαρμογή σε σύγχρονες διαδικασίες σχεδιασμού ναυπηγικών κατασκευών. Οι μελλοντικές εξελίξεις θα βασισθούν στην ευκολότερη και ταχύτερη χρήση των διαδικασιών αυτών με ταυτόχρονη θεώρηση πιθανοθεωρητικών μοντέλων των φορτίσεων αλλά και της συμπεριφοράς της κατασκευής. Όταν δε υπάρχουν ακριβή διαθέσιμα στοιχεία σχετικά με τις παραμέτρους της αντικειμενικής συνάρτησης βελτιστοποίησης θα έχει επιτευχθεί ένα σημαντικό βήμα προς τον πραγματικά ορθολογικό σχεδιασμό των ναυπηγικών κατασκευών.

2. Πεπερασμένα στοιχεία για ναυπηγικές κατασκευές

Η γάστρα του πλοίου είναι μία τρισδιάστατη λεπτότοιχη κατασκευή το κύριο τμήμα της οποίας αποτελείται από ενισχυμένα ελάσματα που συνθέτουν το εξωτερικό κέλυφος, τα καταστρώματα και τις φρακτές. Εκτός των ομοεπίπεδων φορτίσεων, οι κύριες φορτίσεις περιλαμβάνουν τις πιέσεις που ασκούνται κάθετα στις επιφάνειες της κατασκευής. Οι πιέσεις αυτές παραλαμβάνονται σε πρώτο στάδιο από τα εξωτερικά ελάσματα της γάστρας. Τα ελάσματα στηρίζονται σε συστήματα παράλληλων (*πρωτευουσών*) ενισχύσεων που παραλαμβάνουν τις φορτίσεις αυτές και που εκτείνονται στη διαμήκη κατεύθυνση. Με τη σειρά τους, οι πρωτεύουσες ενισχύσεις στηρίζονται στο *δευτερεύον σύστημα ενίσχυσης*. Το δευτερεύον σύστημα ενίσχυσης συνίσταται σε ζυγά, οι ισαποστάσεις των οποίων είναι μεγαλύτερες από αυτές των ενισχύσεων και που μπορούν να είναι διαμήκη ή εγκάρσια. Τέλος, τα ζυγά στηρίζονται και αυτά με τη σειρά τους σε μεγάλα τμήματα της κατασκευής όπως οι φρακτές, η πλευρική κατασκευή, ο πυθμένας κλπ. Με τον τρόπο αυτό διαχέονται οι εξωτερικές φορτίσεις στα διάφορα στοιχεία που απαρτίζουν την κατασκευή έτσι ώστε να μην προκύψει αστοχία.

Η πίεση που ασκείται κάθετα στην επιφάνεια των ελασμάτων έχει ως αποτέλεσμα την κάμψη τους. Εκτός όμως της φόρτισης που ασκείται κάθετα στις επιφάνειες της κατασκευής, στα πλοία με μήκος που υπερβαίνει τα 60-80 μέτρα, προκύπτει και κάμψη της γάστρας στη διαμήκη κατεύθυνση, η οποία οφείλεται α) στη διαφορά βάρους-άντωσης και β) στη δράση των κυμάτων. Το αποτέλεσμα αυτής είναι η ανάπτυξη τάσεων στο επίπεδο των στοιχείων της κατασκευής, έτσι ώστε να προκύψει εφελκυσμός και θλίψη στη διαμήκη κατεύθυνση.

2.1 Τα συνήθη στοιχεία

Οι παραπάνω φορτίσεις της κατασκευής του πλοίου έχουν ως αποτέλεσμα α) την κάμψη και β) την ομοεπίπεδη φόρτιση των ελασμάτων της κατασκευής, καθώς επίσης και αυτή των ενισχύσεών της. Τα είδη των πεπερασμένων στοιχείων που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν περιλαμβάνουν συνεπώς:

- Στοιχεία ελάσματα, καμπτικά και μεμβρανικά
- Στοιχεία-κελύφη
- Στοιχεία-δοκοί (Κεφ. 2)
- Στοιχεία ράβδοι (Κεφ. 2)

Τα παραπάνω στοιχεία έχουν ήδη περιγραφεί σε προηγούμενα κεφάλαια του βιβλίου. Το *μεμβρανικό στοιχείο-έλασμα* αναπαριστά τη συμπεριφορά του ελάσματος στο επίπεδό του, εξαιρείται δηλαδή η καμπτική συμπεριφορά και συνεπώς το στοιχείο δεν μπορεί να παραλάβει κάθετη (υδροστατική) φόρτιση. Κατά κανόνα έχει δύο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο, στις κατευθύνσεις x και y στο επίπεδό του. Αντιθέτως, το *καμπτικό στοιχείο-έλασμα* αναπαριστά την καμπτική συμπεριφορά του ελάσματος, χωρίς όμως να μπορεί να παραλάβει ομοεπίπεδες φορτίσεις.

Έτσι, χρησιμεύει σε περιπτώσεις που ασκείται μόνο κάθετη (υδροστατική) φόρτιση στην επιφάνεια της κατασκευής. Έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο, (κλίσεις σε δύο ορθογώνιες κατευθύνσεις και κάθετη μετατόπιση).

Τα *στοιχεία-κελύφη* είναι στοιχεία-ελάσματα που είναι σε θέση να επιδείξουν καμπτική και μεμβρανική συμπεριφορά. Ο κάθε κόμβος τους διαθέτει πέντε βαθμούς ελευθερίας (δύο μετατοπίσεις και τρεις περιστροφές).

Τα παραπάνω είδη στοιχείων μπορούν να έχουν τριγωνικό, κανονικό ορθογώνιο ή τετράπλευρο σχήμα.

2.2 Η χρήση των διαφόρων στοιχείων

2.2.1 Στοιχεία-δοκοί

Μια συνήθης προσέγγιση στη συμπεριφορά της κατασκευής, κάνοντας χρήση των εξισώσεων της μηχανικής, βασίζεται στην παραδοχή ότι η κατασκευή αποτελείται από σειρές δοκών. Έτσι, είναι δυνατό να αποφευχθεί η χρήση της θεωρίας λεπτότοιχων ελασμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται θεωρώντας ξεχωριστά κάθε ενίσχυση η οποία εξετάζεται με το (συνεργαζόμενο) πλάτος ελάσματος με το οποίο είναι συνδεδεμένη. Έτσι, ένα έλασμα που φέρει παράλληλες ενισχύσεις αντικαθίσταται από σειρά *πλατύτελων δοκών*. Βλέπουμε λοιπόν ότι είναι εφικτή η αριθμητική αναπαράσταση της κατασκευής του πλοίου με στοιχεία-δοκούς. Η θεώρηση αυτή δεν μπορεί παρά να είναι μια προσέγγιση, καθότι δε λαμβάνεται υπόψη η κάμψη του ελάσματος μεταξύ των ενισχύσεων. Αμελούνται δηλαδή οι τριτεύουσες τάσεις.

Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να εξετάζεται αν είναι εφικτή η χρήση στοιχείων-δοκών, διότι οι ενισχύσεις μπορεί να μην έχουν την κατάλληλη γεωμετρία. Θα πρέπει δηλαδή να εξετάζεται ο βαθμός λυγηρότητάς τους, λ ,⁵ και η στήριξή τους. Το άνοιγμα (μήκος) θα πρέπει να μετράται μεταξύ των στηρίξεων στα άκρα (μπρακέτων) που επιφέρουν μεταβολές στο εντατικό πεδίο.

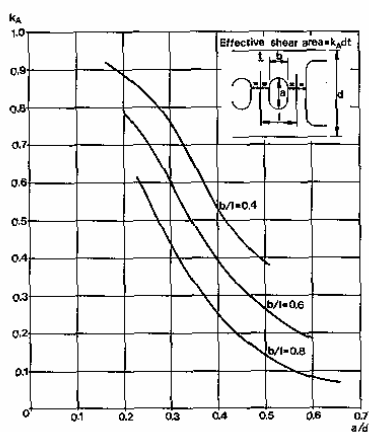
Στα πλαίσια (*πλαισιωτούς φορείς*⁶) με κάθετη φόρτιση οι τομές των δοκών δεν μεταβάλλουν σε σημαντικό βαθμό το εντατικό πεδίο και έτσι το μήκος λαμβάνεται ως η ολική απόσταση μεταξύ των άκρων. Τμήματα της κατασκευής όπως τα διπύθμενα μπορούν συνεπώς να αναπαρασταθούν σε ικανοποιητικό βαθμό με στοιχεία-δοκούς. Για άλλα τμήματα της κατασκευής όπως οι φρακτές και η πλευρική κατασκευή μπορούν να χρησιμοποιηθούν στοιχεία-δοκοί εφόσον το ζητούμενο είναι οι μετατοπίσεις και μια πρώτη προσέγγιση των εντατικών πεδίων.

Αντιθέτως, στις περιοχές της κατασκευής που το εντατικό πεδίο επηρεάζεται από τη στήριξη των άκρων δε μπορεί να γίνει χρήση στοιχείων-δοκών. Επίσης, θα πρέπει $L/h > 2$, όπου L είναι το μήκος και h το πλάτος του πέλματος της διατομής.

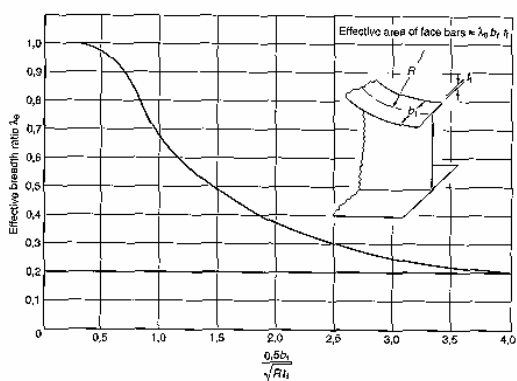
Μια άλλη δυσκολία που προκύπτει κατά τη χρήση στοιχείων-δοκών αφορά την ακαμψία των στηρίξεων. Μπορούμε να κάνουμε απλουστευτικές παραδοχές λαμ

⁵ $\lambda = \frac{L}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_0}{E}}$ όπου L = άνοιγμα και r = ακτίνα αδράνειας

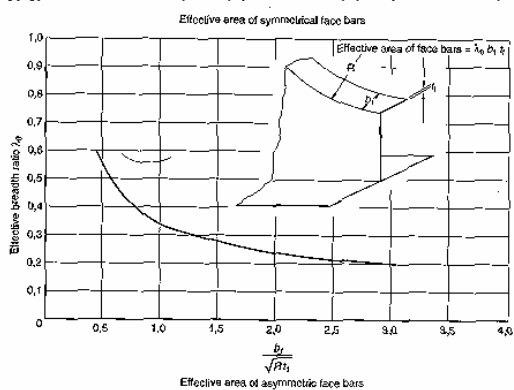
⁶ πλαισιωτός φορέας = grillage



Σχήμα 3 Υπολογισμός εμβαδού διατομής σε διάτμηση



Σχήμα 4 Ισοδύναμο εμβαδόν συμμετρικού πέλματος



Σχήμα 5 Ισοδύναμο εμβαδόν ασύμμετρου πέλματος

βάνοντας ως απόλυτα άκαμπτο ένα ποσοστό του μήκους της κάθε δοκού, χωρίς όμως να είναι πάντοτε ικανοποιητικά τα αποτελέσματα. Οι αποκλίσεις που προκύπτουν επηρεάζουν την γωνία περιστροφής της κατασκευής και την ροπή στήριξης στο κάθε άκρο. Για το λόγο αυτό συνιστάται η χρήση στοιχείων-δοκών μόνο για κατασκευές με $L/h > 2$ και με αμελητέα επίδραση των άκρων.

Κατά τη χρήση στοιχείων-δοκών σε κατασκευές με μικρό λόγο μήκους προς το πλάτος του κορμού, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της διάτμησης. Το μητρώο ακαμψίας του αντίστοιχου στοιχείου δίνεται στο Κεφάλαιο 3. Η μετατόπιση λόγω διάτμησης εξετάζεται προσεγγιστικά θεωρώντας ένα ισοδύναμο εμβαδόν που φέρει διατμητική φόρτιση, που αντικαθιστά την παραβολική κατανομή κατά το ύψος του κορμού. Λαμβάνεται μόνο το εμβαδόν του κορμού, όταν δε υπάρχουν οπές ή ανοίγματα, μπορεί να γίνει χρήση της σχέσης:

$$A_{sh} = \frac{dt(l_1 + l_2 + \dots)}{\frac{l_1}{k_{A_1}} + \frac{l_2}{k_{A_2}} + \dots} \quad (1)$$

και των Σχημάτων 3-5 για να υπολογισθεί το εμβαδόν της διατομής σε διάτμηση, A_{sh} .

Όταν χρησιμοποιούνται στοιχεία-δοκοί για την αναπαράσταση τμημάτων της κατασκευής που επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό από την υστέρηση διάτμησης, θα πρέπει να υπολογισθεί το ισοδύναμο πλάτος του πέλματος και να χρησιμοποιηθεί αυτό για το στοιχείο. Ο υπολογισμός του ισοδύναμου πλάτους γίνεται με βάση μεθόδους που προτείνουν οι νηογνώμονες και η βιβλιογραφία. Για παράδειγμα, ο Lloyd's Register of Shipping περιλαμβάνει τα Σχήματα 3-5 [2].

Στην περίπτωση στοιχείων-δοκών που σχηματίζουν κλειστές διατομές (κυψέλες) η σταθερά στρέψης μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$I_t = s(t_1 y_1^2 + t_2 y_2^2) \quad (2)$$

όπου s είναι η ισαπόσταση των δοκών, t_1, t_2 είναι τα πάχη των πελμάτων και y_1, y_2 είναι οι αποστάσεις μεταξύ των πελμάτων και των αντίστοιχων ουδετέρων αξόνων των διατομών.

2.2.2 Μεμβρανικά στοιχεία-ελάσματα

Τα μεμβρανικά στοιχεία-ελάσματα αποτελούν το συνηθέστερο τρόπο αναπαράστασης της συμπεριφοράς της κατασκευής του πλοίου, και συνδυάζονται με στοιχεία-δοκούς που διαθέτουν καμπτική συμπεριφορά. Κατ' αυτό τον τρόπο μπορεί να αναπαρασταθεί η κατασκευή με σχετικά μικρό αριθμό στοιχείων. Στις περιοχές της κατασκευής που έχουν καμπυλότητα (εξωτερική γάστρα) η κυριαρχεί η μεμβρανική συμπεριφορά και έτσι μπορούμε και πάλι να χρησιμοποιήσουμε μεμβρανικά στοιχεία-ελάσματα.

Όταν όμως πρέπει να ληφθεί υπόψη η καμπτική συμπεριφορά των ελασμάτων της γάστρας (μελέτες λυγισμού, ταλαντώσεων), θα πρέπει να καταφύγουμε στη χρήση καμπτικών στοιχείων-ελασμάτων ή στοιχείων-κελυφών.

2.3 Η συνδυασμένη χρήση διαφόρων στοιχείων

Στα Κεφάλαια 6 και 7 έχει γίνει αναφορά στα σφάλματα που μπορούν να προκύψουν λόγω κακής κατάστασης του μητρώου ακαμψίας της κατασκευής. Στην πράξη, για να αποφευχθούν τέτοια προβλήματα θα πρέπει τα στοιχεία που συνδυάζονται σε κάποια συγκεκριμένη εφαρμογή να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα από πλευράς τύπου, διαστάσεων και ακαμψίας. Τα στοιχεία που έχουν μικρές διαστάσεις είναι πιο άκαμπτα από τα πιο μεγάλα στοιχεία, τα στοιχεία-δοκοί είναι πιο άκαμπτα σε θλίψη απ' ότι σε κάμψη, κλπ. Οι περιοχές της κατασκευής με μεγάλη ακαμψία θα πρέπει να αναπαριστώνται με ειδικές τεχνικές και όχι με στοιχεία με μεγάλη ακαμψία.

3. Η αριθμητική αναπαράσταση των ναυπηγικών κατασκευών

Θα εξετάσουμε τα διάφορα είδη αριθμητικών μοντέλων των ναυπηγικών κατασκευών με έμφαση στη γραμμική ελαστική ανάλυση και περιοριζόμενοι σε αυτά που κάνουν χρήση στοιχείων-ράβδων, στοιχείων-δοκών και μεμβρανικών στοιχείων-ελασμάτων. Τα μονοδιάστατα στοιχεία αναπαριστούν ράβδους και δοκούς ενώ τα διδιάστατα στοιχεία είναι απλούστερα στη χρήση και αντιστοιχούν καλύτερα στη μορφολογία των ναυπηγικών κατασκευών. Επίσης, απαιτούν λιγότερους βαθμούς ελευθερίας από τα στοιχεία-κελύφη που χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις.

Υπό ορισμένες προϋποθέσεις, μπορούμε να μετατρέψουμε ένα τρισδιάστατο μοντέλο σε διδιάστατο.

3.1 Αναπαράσταση της κατασκευής σε δύο διαστάσεις

3.1.1 Στοιχεία-δοκοί

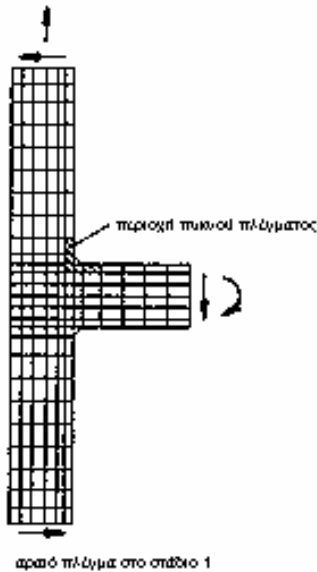
Η χρήση στοιχείων-δοκών είναι μια οικονομική και προσεγγιστική λύση στη συμπεριφορά της κατασκευής. Τα αποτελέσματα δεν είναι ακριβή στις περιοχές με διαταραχές των εντατικών πεδίων. Τα μοντέλα μπορούν να υποδιαιρεθούν ανάλογα με τη φορά του εξωτερικού φορτίου σε πλαίσια με ομοεπίπεδη φόρτιση⁷ και σε πλαίσια με κάθετη φόρτιση.

Τα πρώτα χρησιμοποιούνται κατά τον υπολογισμό των ενισχυμένων νομέων ενώ τα δεύτερα για κατασκευές όπως τα διπύθμενα.

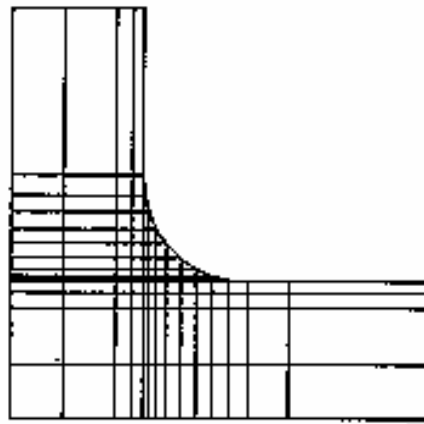
⁷ πλαίσιο με ομοεπίπεδη φόρτιση = plane frame

3.1.2 Μεμβρανικά στοιχεία-ελάσματα

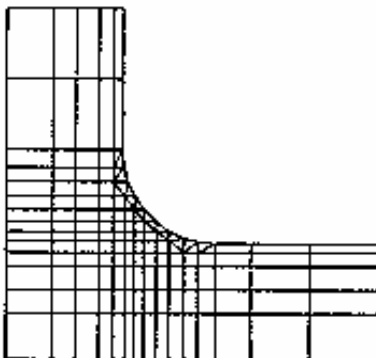
Όταν επιδιώκεται η ακριβής αναπαράσταση του εντατικού πεδίου, χρησιμοποιούνται μεμβρανικά στοιχεία-ελάσματα. Επιπρόσθετα, η χρήση πυκνού πλέγματος επιτρέπει τη μελέτη συγκέντρωσης τάσεων σε κάποιο τμήμα της κατασκευής. Μια τυπική μελέτη με μεμβρανικά στοιχεία-ελάσματα αφορά ενισχυμένο νομέα. Η κατανόηση των εντατικών πεδίων σε τοπικό επίπεδο μπορεί να βοηθήσει στην κατάλληλη διαμόρφωση της κατασκευής για την αποφυγή κοπωτικών φαινομένων και άλλων αστοχιών (λυγισμός). Σε αυτές τις μελέτες απαιτούνται δύο στάδια (Σχήμα 6).



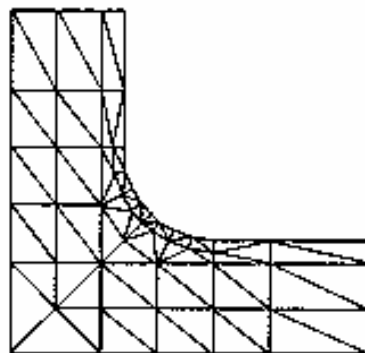
(α) Στάδιο 1: αραιό πλέγμα



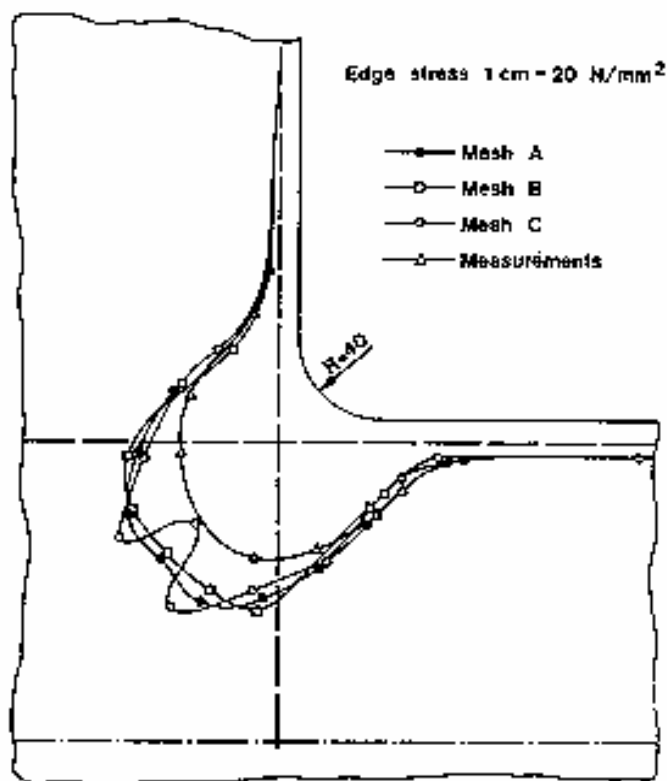
(β) Στάδιο 2: πυκνό πλέγμα 1



(γ) Στάδιο 2: πυκνό πλέγμα 2



(δ) Στάδιο 2: πυκνό πλέγμα 3



(ε) Σύγκριση κατανομών τάσεων για τα παραπάνω πλέγματα με μετρήσεις

Σχήμα 6 Μελέτη γωνίας ανοίγματος αμπαριού σε δύο στάδια

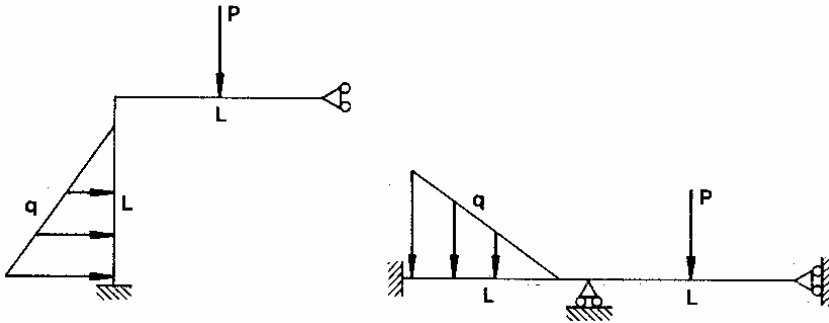
3.1.3 Επιβολή οριακών συνθηκών σε διδιάστατα μοντέλα

Σε ορισμένες περιπτώσεις προκύπτουν δυσκολίες στον ορισμό των οριακών συνθηκών, ιδίως όταν τα τμήματα της πραγματικής κατασκευής αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σε τρισδιάστατο επίπεδο. Απαιτείται η χρήση επιβαλλόμενων μετατοπίσεων και δυνάμεων ως οριακές συνθήκες. Αυτές οι μετατοπίσεις και δυνάμεις θα πρέπει να υπολογίζονται για κάθε περίπτωση φόρτισης ξεχωριστά.

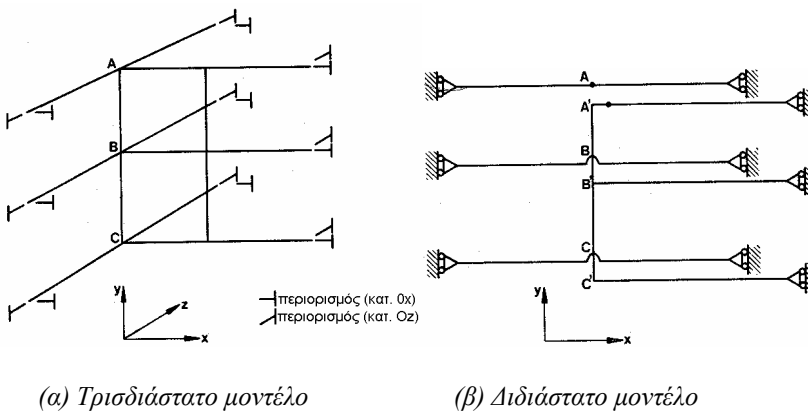
Εάν χρησιμοποιούνται διάφορα διδιάστατα μοντέλα που συνδέονται μεταξύ τους και αλληλεπιδρούν στην πραγματική κατασκευή, θα πρέπει να γίνουν ορισμένες αρχικές παραδοχές όσον αφορά τις μετατοπίσεις στα σύνορα και τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης. Για να καταλήξουμε σε συμβατά αποτελέσματα για κάθε μοντέλο, θα πρέπει να επαναλάβουμε τους υπολογισμούς με τις νέες οριακές συνθήκες μέχρις ότου καταλήξουμε σε κατάσταση πραγματικής ισορροπίας για όλα τα μοντέλα που απαρτίζουν την κατασκευή.

Η αλληλεπίδραση με τη γειτονική κατασκευή επιτυγχάνεται με χρήση ελατηρίων ή δοκών που θα πρέπει να αλληλεπιδρούν με το διδιάστατο μοντέλο όπως ακριβώς και στο πραγματικό επίπεδο.

3.2 Διακριτοποίηση της κατασκευής σε τρεις διαστάσεις



Σχήμα 7 Αναγωγή διδιάστατου μοντέλου σε μονοδιάστατο μοντέλο



Σχήμα 8 Αναγωγή τρισδιάστατου μοντέλου σε διδιάστατο μοντέλο (πλαίσιο)

Η χρήση τρισδιάστατων μοντέλων επιτρέπει την επιλογή των συνόρων που θα επιβληθούν οι οριακές συνθήκες. Αποφεύγεται επίσης η εξέταση των συνθηκών αλληλεπίδρασης που απαιτείται στα διδιάστατα μοντέλα.

Η επιλογή των στοιχείων γίνεται κατά τον ίδιο τρόπο με τη μελέτη διδιάστατων μοντέλων της κατασκευής. Έτσι, αν ενδιαφερόμαστε για τις μετατοπίσεις και τις τάσεις σε στοιχεία που συμπεριφέρονται ως πρισματικές δοκούς, μπορούμε να κάνουμε χρήση στοιχείων-δοκών.

Εάν θέλουμε να καθορίσουμε τα εντατικά πεδία με ακρίβεια, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μεμβρανικά στοιχεία ελάσματα. Τέλος, η χρήση και των δύο τύπων στοιχείων επιτρέπει τον καθορισμό των μετατοπίσεων σε όλο το μοντέλο αλλά και τις τάσεις στις περιοχές που χρησιμοποιούνται τα μεμβρανικά στοιχεία.

Ένα τέτοιο μικτό μοντέλο έχει λιγότερους βαθμούς ελευθερίας από ένα αντίστοιχο μεμβρανικό.

Θα πρέπει να αναφέρουμε τέλος ότι είναι δυνατόν να αναπαραστήσουμε την πραγματική τρισδιάστατη κατασκευή σε δύο διαστάσεις με *αναδιπλωμένο* μοντέλο⁸ (Σχήμα 8).

4. Οι απαιτήσεις των νηογνώμωνων

Σε αρκετές περιπτώσεις οι νηογνώμονες απαιτούν, μαζί με τα σχέδια της κατασκευής, να υποβάλλονται και τα αποτελέσματα υπολογισμών μελετών με μητρωική ανάλυση ή προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων. Η έκταση και το αντικείμενο των απαιτούμενων υπολογισμών εξαρτώνται από το είδος του πλοίου και τις διαστάσεις του. Σκοπός των μελετών αυτών είναι να δειχθεί ότι οι τάσεις σε όλα τα σημεία της κατασκευής κυμαίνονται σε αποδεκτά επίπεδα για συγκεκριμένες καταστάσεις φόρτισης. Για την διευκόλυνση των μελετητών πολλοί νηογνώμονες τώρα διαθέτουν προγράμματα τα οποία καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα υπολογισμών. Τα προγράμματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να υποβληθούν τα αποκτηθέντα αποτελέσματα κατά την έγκριση των σχεδίων της κατασκευής.

Παρακάτω θα δούμε πως ορισμένοι νηογνώμονες συνιστούν να γίνονται οι μελέτες αυτές. Θα επικεντρώσουμε την προσοχή μας σε τρεις από αυτούς και θα επισημάνουμε κοινά σημεία και διαφορές.

4.1 Η μελέτη των bulk carriers και containerships με βάση τις απαιτήσεις των νηογνώμωνων

Όλες οι διαδικασίες που ακολουθούν ή που προτείνουν οι νηογνώμονες συνιστούν ολοκληρωμένες μεθοδολογίες που καλύπτουν τις τυπικές συνθήκες λειτουργίας του κάθε τύπου πλοίου. Στο εδάφιο αυτό θα επικεντρώσουμε το ενδιαφέρον μας στις απαιτήσεις ορισμένων από αυτούς και θα παραθέσουμε αποσπάσματα διατάξεων και κανονισμών για να καταστεί αντιληπτός ο τρόπος μελέτης που θα πρέπει να ακολουθηθεί.

Ο νορβηγικός νηογνώμονας είναι ο πρώτος που εισήγαγε τη συστηματική χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για την αξιολόγηση συμβατικών εμπορικών πλοίων. Η μεγάλη προσπάθεια που καταβλήθηκε την δεκαετία 1970-80 για την αντιμετώπιση των τεχνολογικών καινοτομιών των νέων τότε πλωτών και μόνιμων δεξαμενών άντλησης πετρελαίου στη Βόρεια Θάλασσα έδωσε τη δυνατότητα στο νηογνώμονα να εδραιώσει μεθόδους και τεχνολογία που βρήκαν εφαρμογή και στην αξιολόγηση των συμβατικών εμπορικών πλοίων. Ο νηογνώμονας έχει εκδώσει, εκτός του κειμένου των Κανονισμών Κατάταξης και Κατασκευής μία σειρά εγχειριδίων στα οποία περιγράφεται με λεπτομέρεια η όλη διαδικασία μελέτης ναυπηγικών κατασκευών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα

⁸ αναδιπλωμένο μοντέλο = folded model

εγχειρίδια αυτά αναφέρονται σε διάφορες κατηγορίες πλοίων και περιλαμβάνουν στοιχεία όπως:

- Καταστάσεις φόρτισης
- Διακριτοποίηση
- Γενικές μελέτες αντοχής
- Ειδικές μελέτες αντοχής

Σε κάθε περίπτωση δίνονται σχέσεις υπολογισμού των φορτίων (πιέσεων) σχεδιασμού σε κάθε περίπτωση ενώ στο κείμενο που περιγράφεται η διακριτοποίηση δίνονται λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο διακριτοποίησης, τις οριακές συνθήκες, την αποτελεσματικότητα των συνεργαζομένων ελασμάτων κλπ. Δεν τίθεται περιορισμός ως προς το υπολογιστικό εργαλείο διευκρινίζεται όμως ότι η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα κάμψης, διάτμησης, και αξονικών και στρεπτικών μετατοπίσεων.

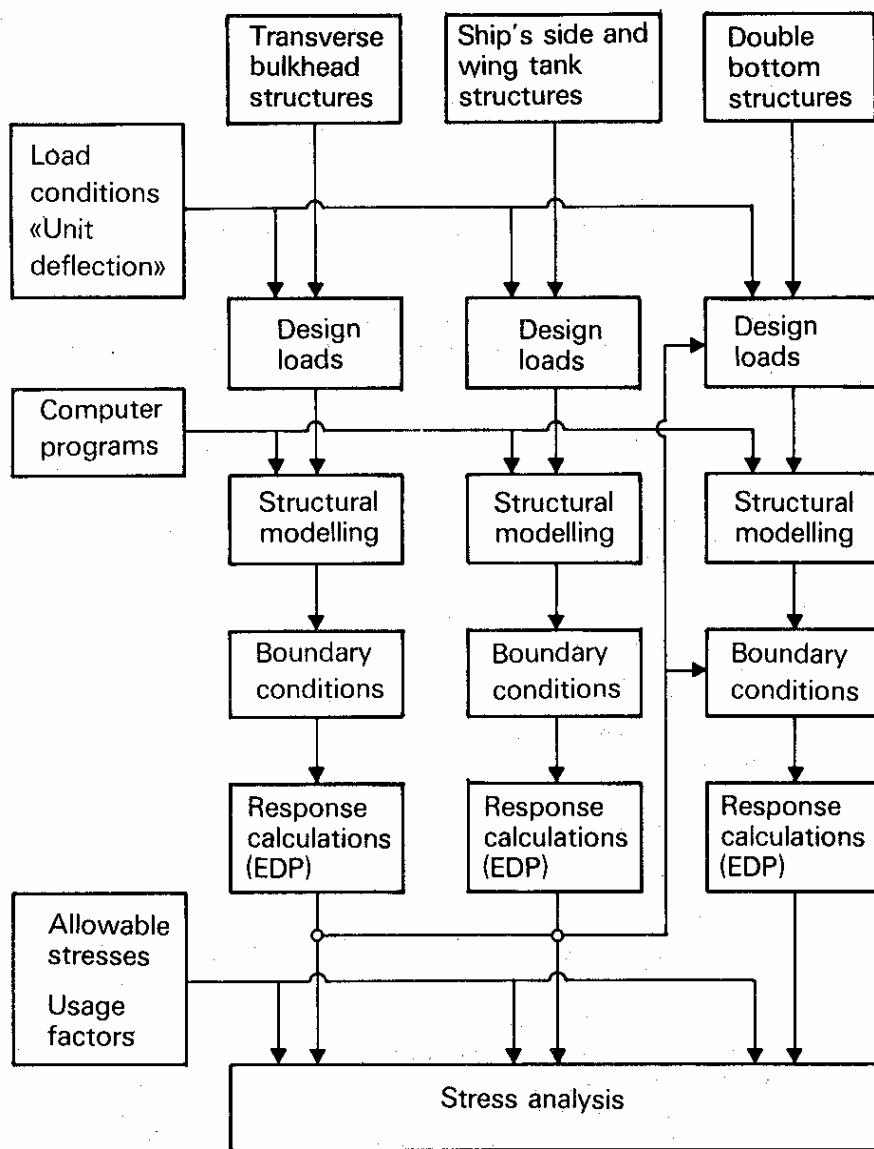
Στην περίπτωση πλοίων μεταφοράς χύδην φορτίου το ενδιαφέρον των μελετών αυτών επικεντρώνεται στα πρωτεύοντα κατασκευαστικά στοιχεία στην περιοχή της μέσης τομής.

Η γενική διαδικασία μελέτης που προτείνει ο Det Norske Veritas περιγράφεται στο Σχήμα 9, για δε πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην, μεταξύ άλλων απαιτούνται η μελέτη του διπυθμένου ως πλαίσιο, η μελέτη ενός εγκάρσιου νομέα και η μελέτη λωρίδας φρακτής.

Παρακάτω θα περιγραφεί το κάθε στάδιο μελέτης των ναυπηγικών κατασκευών με αναφορά στις απαιτήσεις διαφόρων νηογνωμόνων. Έτσι είναι δυνατόν να αποκτηθεί μια πρώτη εικόνα των διαφόρων διαδικασιών που προτείνονται, ο ενδιαφερόμενος όμως μελετητής θα πρέπει να συμβουλευθεί τον εκάστοτε εν ισχύει κανονισμό που παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες.

4.2 Καταστάσεις φόρτισης

Οι καταστάσεις φόρτισης που θα πρέπει να εξετασθούν κατά τη μελέτη της κατασκευής των bulk carriers και των containerships, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του DNV, αναφέρονται στον Πίνακα 1.



Σχήμα 9 Μελέτη αντοχής ναυπηγικών κατασκευών κατά Det Norske Veritas

Πίνακας 1 Καταστάσεις φόρτισης bulk carriers και containerships (DNV)

LC1	Θαλάσσιο έρμα ή αργό πετρέλαιο σε δεξαμενή, με γειτονικές δεξαμενές κενές
LC2	Θαλάσσιο έρμα ή αργό πετρέλαιο σε δεξαμενή, με πλοίο υπό εγκάρσια κλίση (διατοιχισμός)
LC2	Θαλάσσιο έρμα στις πλευρικές δεξαμενές
LC4	Βαρύ φορτίο (μετάλλευμα) με γειτονικές δεξαμενές κενές
LC5	Ελαφρύ φορτίο με γειτονικές δεξαμενές κενές
LC6	Βαρύ φορτίο (μετάλλευμα) με γειτονικές δεξαμενές κενές σε κατάσταση αναχώρησης
LC7	Βαρύ φορτίο (μετάλλευμα) με γειτονικές δεξαμενές κενές σε κατάσταση άφιξης
LC8	Βαρύ φορτίο (μετάλλευμα) σε δύο γειτονικές δεξαμενές σε κατάσταση άφιξης
LC9	Αργό πετρέλαιο, γειτονικές δεξαμενές κενές, ελάχιστο υπόλοιπο φορτίο
LC10	Πλήρης κατάσταση φόρτωσης με εμπορευματοκιβώτια (containers)
LC11	Πλήρης κατάσταση φόρτωσης με εμπορευματοκιβώτια (containers). Πλοίο υπό εγκάρσια κλίση (διατοιχισμός).

Σε κάθε περίπτωση δίνονται επαρκείς πληροφορίες σχετικά με την τυπική διάταξη του φορτίου και σχέσεις υπολογισμού των πιέσεων που ασκούνται στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου. Για παράδειγμα, η κατανομή του φορτίου που αντιστοιχεί στην περίπτωση LC4 δείχνεται στο Σχήμα 10, ενώ η πίεση που ασκείται λόγω του μεταφερόμενου φορτίου ισούται με:

$$p_i = \rho(g_0 + 0,5a_v)Kh_s \quad (\text{kN/m}^2) \quad (3)$$

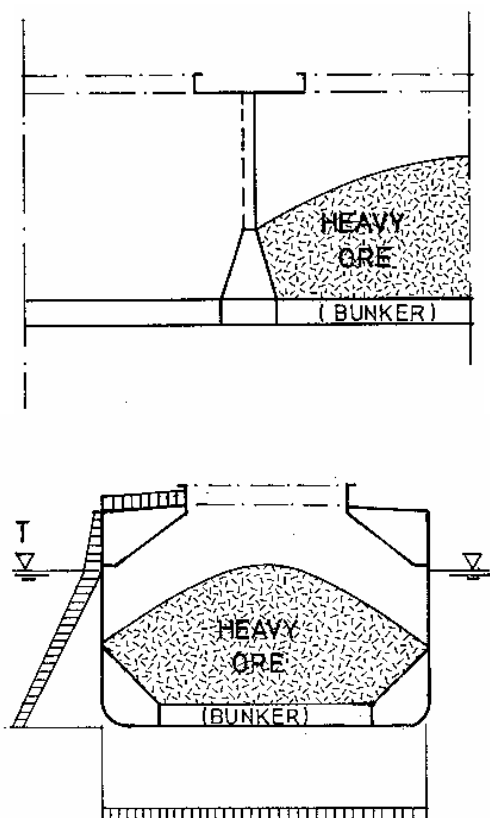
$$\text{όπου } K = \sin^2(\alpha - \beta)\tan^2(45 - 0,5\delta) + \cos^2(\alpha - \beta) \quad (4)$$

Στην παραπάνω σχέση,

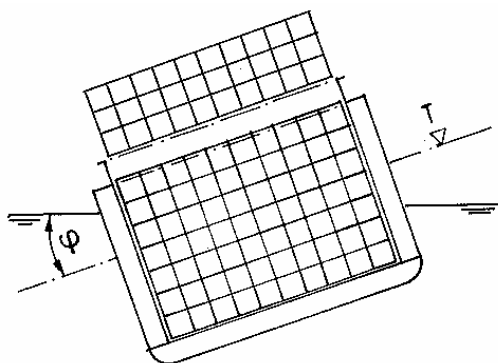
α = η γωνία του κάθε ελάσματος με το οριζόντιο επίπεδο (σε μοίρες)

β = $(90/\pi)\varphi$ (μοίρες) για διαμήκη ελάσματα
 = $(90/\pi)\theta$ (μοίρες) για εγκάρσια ελάσματα

Θα πρέπει $(\alpha - \beta) \geq 0$



Σχήμα 10 Βαρύ φορτίο (μετάλλευμα) με γειτονικές δεξαμενές κενές (LC4)



Σχήμα 11 Κατάσταση φόρτισης containership υπό εγκάρσια κλίση (LC11)

h_s = η απόσταση (ύψος φορτίου) που μετράται από την οροφή του αμπαριού (συμπεριλαμβανομένου και του κουβουσιού) εντός του 60% του μήκους και πλάτους του αμπαριού που μειώνεται

γραμμικά στην τιμή $0,3(D-h_{db})$ άνωθεν του επιπέδου τμήματος του εσωτερικού πυθμένα στις πλευρές του πλοίου και στις εγκάρσιες φρακτές.

Η υδροστατική πίεση σχεδιασμού αντιστοιχεί σε βύθισμα T ενώ λαμβάνεται υπόψη και η δυναμική φόρτιση της κατασκευής (κρούση κυμάτων). Συνεπώς, στην τρόπιδα,

$$p_e = 10T + 1,5C_w \quad (\text{kN/m}^2) \quad (5)$$

στην ίσαλο επιφάνεια,

$$p_e = 3C_w \quad (\text{kN/m}^2) \quad (6)$$

στο ύψος του καταστρώματος,

$$p_e = 3a[C_w - 0,67(D - T)] \quad (\text{kN/m}^2) \quad (7)$$

και $a = 1,0$ για τις πλευρές του πλοίου
 $= 0,8$ στο ύψος του καταστρώματος

Η πίεση p_e μεταβάλλεται γραμμικά στο πεδίο $10 > p_e > 5$ (kN/m²).

Στην περίπτωση *LCII* εξάλλου, η κατάσταση αφορά containership υπό εγκάρσια κλίση (Σχήμα 11). Οι δυνάμεις που ασκούνται λόγω του φορτίου, στην κατακόρυφη και την οριζόντια κατεύθυνση είναι:

$$P_v = g_0 M \quad (\text{κατακόρυφη κατεύθυνση}) \quad (\text{kN}) \quad (8\alpha)$$

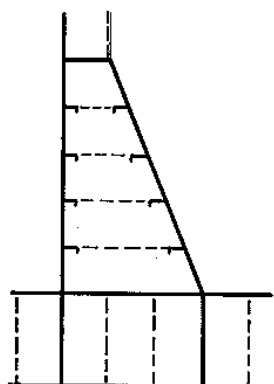
$$P_t = 0,67a_t M \quad (\text{οριζόντια κατεύθυνση}) \quad (\text{kN}) \quad (8\beta)$$

Στις παραπάνω σχέσεις M είναι η μάζα του φορτίου σε τόνους.

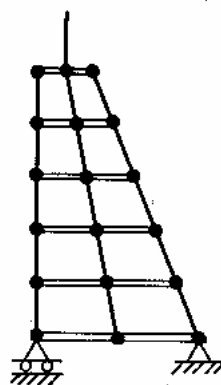
Η υδροστατική πίεση θεωρείται ότι αντιστοιχεί στο μέγιστο βύθισμα με διόρθωση για μορφή κύματος και εγκάρσια κλίση. Η πίεση στο παρατροπίδιο της πλευράς με το μικρότερο βύθισμα δίνεται από τη σχέση:

$$p_e = 10T - 5B \tan \phi \quad (\text{kN/m}^2) \quad (9)$$

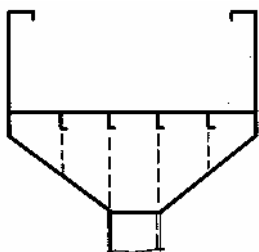
Σε απόσταση $T - 0,5B \tan \phi$ (μέτρα) από την τρόπιδα η πίεση είναι μηδενική. Η πίεση στο παρατροπίδιο της πλευράς με το μέγιστο βύθισμα είναι:



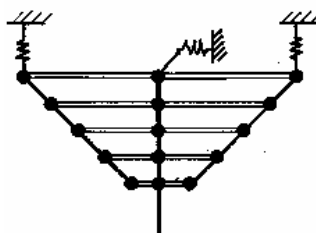
(α) Κάτω έδραση



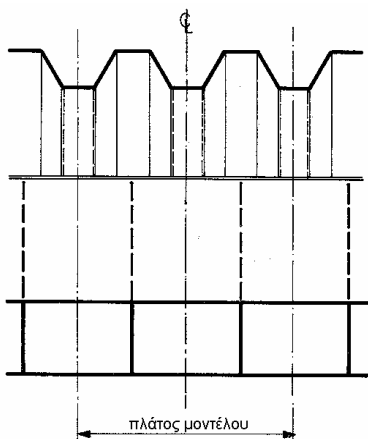
(β) Μοντέλο κάτω έδρασης



(γ) Άνω έδραση

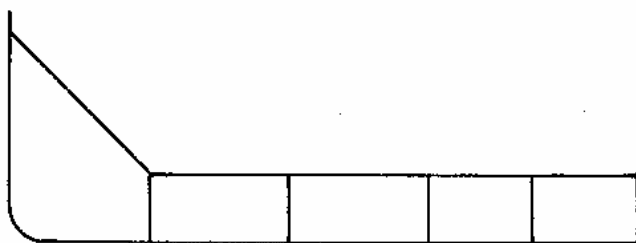


(δ) Μοντέλο άνω έδρασης

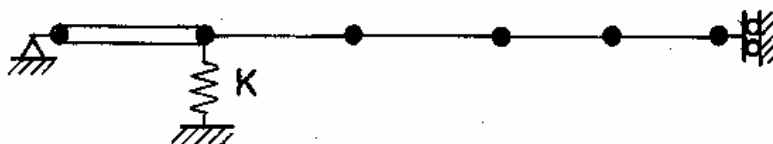


(ε) Όψη κάτω έδρασης εγκάρσιας φρακτής

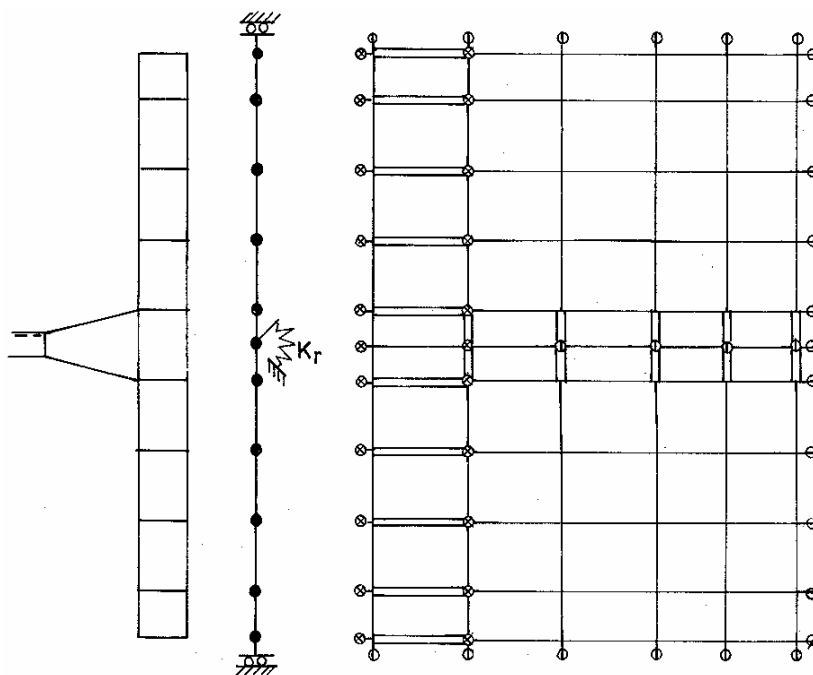
Σχήμα 12 Διατάξεις τμημάτων εγκαρσίων φρακτών



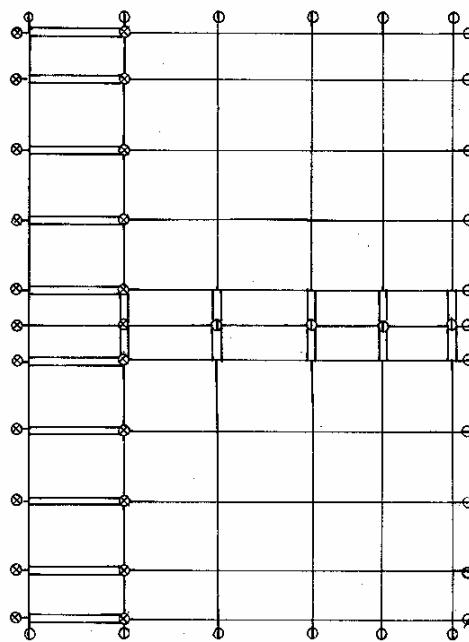
(α) Τομή μοντέλου



(β) Στήριξη μοντέλου

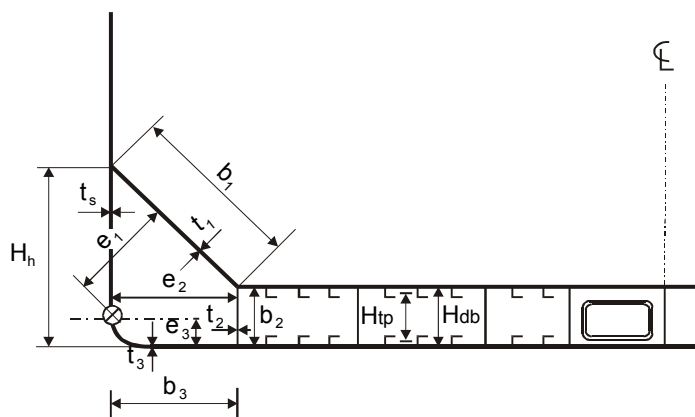


(γ) Διαμήκης τομή

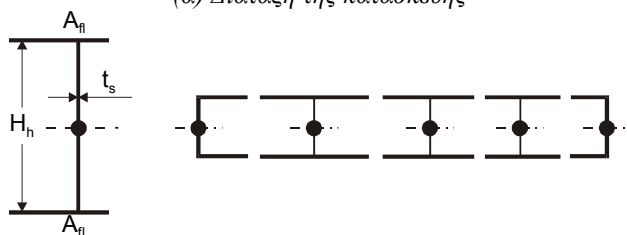


(δ) Κόμβοι

Σχήμα 13 Διακριτοποίηση διπτυγμένου

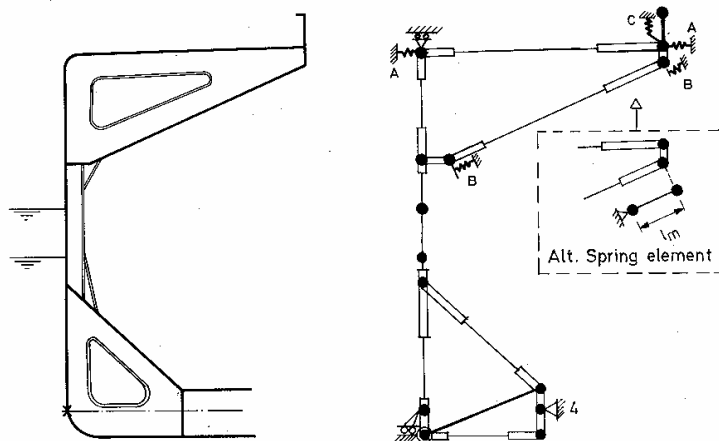


(α) Διάταξη της κατασκευής



(β) Μοντέλο

Σχήμα 14 Διαμήκη στοιχεία του διπυθμένου



Σχήμα 15 Διακριτοποίηση νομέα με πλαίσιο αποτελούμενο από στοιχεία-δοκούς και με στήριξη σε ελατήρια

$$p_e = 10T + 5B \tan \phi \quad (\text{kN/m}^2) \quad (10)$$

Σε απόσταση $T+0,33B \tan \phi$ (μέτρα) από την τρόπιδα η πίεση είναι μηδενική. Η πίεση p_e μεταβάλλεται γραμμικά μεταξύ των δοθέντων σημείων.

4.3 Διακριτοποίηση της μεταλλικής κατασκευής

Στην περιοχή των αμπαριών των συμβατικών bulk carriers, ο DNV απαιτεί να αναπτυχθούν τα παρακάτω διδιάστατα μοντέλα, το καθένα ανεξάρτητο του άλλου, κάνοντας χρήση στοιχείων-δοκών:

- α) Κατασκευή της εγκάρσιας φρακτής (ομοεπίπεδη φόρτιση)
- β) Πλευρική κατασκευή και πλευρικές δεξαμενές (ομοεπίπεδη φόρτιση)
- γ) Κατασκευή διπύθμενου (πλαίσιο με κάθετη φόρτιση)

Στα Σχήματα 12-16 δίνονται ενδεικτικά στοιχεία για τον τρόπο προσομοίωσης της κατασκευής των πλοίων αυτών. Στο Σχήμα 15 περιγράφεται επίσης και ο τρόπος στήριξης της κατασκευής με ελατήρια, η ακαμψία των οποίων λαμβάνεται από πίνακες.

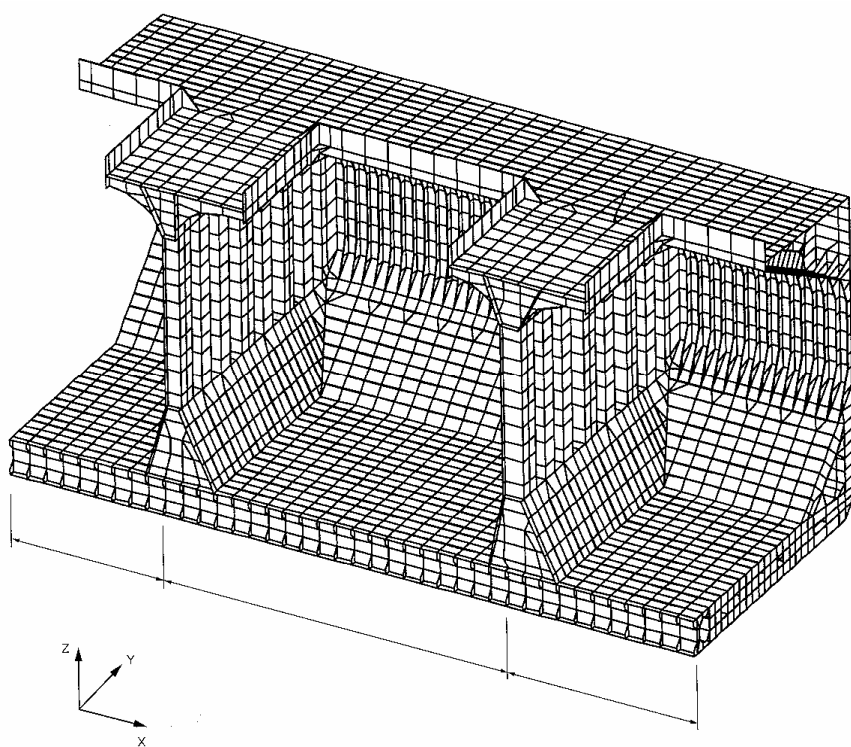
Στα Σχήματα 13 και 16 δείχνεται μια αποδεκτή διακριτοποίηση της κατασκευής του διπυθμένου και των ενισχύσεων του με στοιχεία-δοκούς. Η διαμήκης τομή του διπυθμένου δείχνεται στο Σχήμα 16α.

Στο Σχήμα 15 περιγράφεται η διακριτοποίηση των εγκάρσιων στοιχείων της κατασκευής του πλοίου, που περιλαμβάνουν την (πτυχωτή) φρακτή, το διπύθμενο και το τουνέλι.

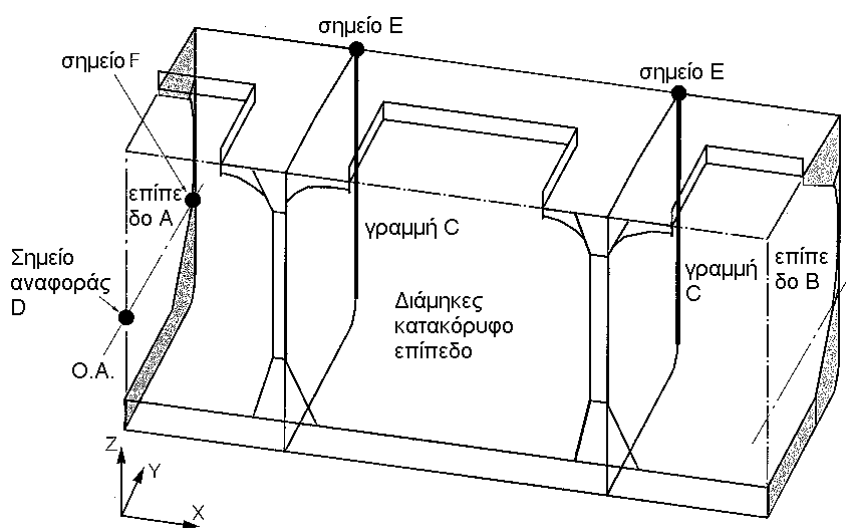
Η ανάλυση των εγκάρσιων φρακτών γίνεται με τριδιάστατο και σε συνέχεια με διδιάστατο μοντέλο ενός τουλάχιστον ενισχυτικού και των μπρακέτων του. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τους νομείς. Οι δυνάμεις στήριξης χρησιμοποιούνται ως δεδομένα (ακαμψίες ελατηρίων) για την ανάλυση σε δύο διαστάσεις.

Ο *Lloyd's Register of Shipping* απαιτεί να διακριτοποιηθεί μια περιοχή της κατασκευής των χώρων φορτίου που να περιλαμβάνει ένα ολόκληρο αμπάρι και δύο μισά εκατέρωθεν του υπό μελέτη αμπαριού, έτσι ώστε να μην επηρεάζουν οι οριακές συνθήκες το εντατικό πεδίο του συγκεκριμένου αμπαριού (Σχήμα 17).

Οι οριακές συνθήκες που πρέπει να επιβάλλονται, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του *Lloyd's Register of Shipping*, σε μοντέλο της κατασκευής bulk carrier που περιλαμβάνει δύο αμπάρια και που διαθέτει συμμετρία στη διαμήκη και στην εγκάρσια κατεύθυνση περιλαμβάνονται στους Πίνακες 1, 2 και δείχνονται στο Σχήμα 18.



Σχήμα 17 Διακριτοποίηση αμπαριού bulk carrier κατά *Lloyd's Register of Shipping*



Σχήμα 18 Οριακές συνθήκες σε υποκατασκευή πλοίου τύπου bulk carrier (LRS)

Πίνακας 2 Οριακές συνθήκες για την επιβολή τοπικών φορτίσεων

Περιοχή της κατασκευής	Μετατόπιση			Περιστροφή		
	δx	δy	δz	θx	θy	θz
Διάμηκες κατακόρυφο επίπεδο	-	0	-	0	-	0
Επίπεδο <i>A</i>	0	-	-	-	0	0
Επίπεδο <i>B</i>	0	-	-	-	0	0
Άξονας <i>C</i>	-	-	Δυνάμεις	-	-	-
Ανεξάρτητο σημείο <i>D</i> στον <i>OA</i> , επίπεδο <i>A</i>	-	-	-	-	-	-
Σημείο <i>E</i>	-	-	0	-	-	-
Σημείο <i>F</i>	-	-	-	-	-	-

Πίνακας 3 Οριακές συνθήκες για την επιβολή φορτίσεων γάστρας

Περιοχή της κατασκευής	Μετατόπιση			Περιστροφή		
	δx	δy	δz	θx	θy	θz
Διάμηκες κατακόρυφο επίπεδο	-	0	-	0	-	0
Επίπεδο <i>A</i>	Σύνδ	-	-	-	Σύνδ	Σύνδ
Επίπεδο <i>B</i>	0	-	-	-	0	0
Άξονας <i>C</i>	-	-	-	-	-	-
Ανεξάρτητο σημείο <i>D</i> στον <i>O.A.</i> , επίπεδο <i>A</i>	-	0	0	0	Ροπή	0
Σημείο <i>E</i>	-	-	0	-	-	-
Σημείο <i>F</i>	-	-	0	-	-	-

4.4 Κριτήρια αποδοχής της κατασκευής

Όλοι γενικά οι νηογνώμονες καθορίζουν κριτήρια αποδοχής υπό τη μορφή επιτρεπόμενων τάσεων, που ανάλογα με τη φορά της εξωτερικής φόρτισης και τις συνέπειές της συνοδεύονται και από αντίστοιχο συντελεστή ασφάλειας, σε σχέση με την τάση διαρροής του υλικού.

Ο *LRS* παραθέτει τον Πίνακα 4 που δίνει τις μέγιστες επιτρεπόμενες μεμβρανικές τάσεις στην κατασκευή των bulk carriers. Γενικά, δεν θα πρέπει να προκύπτει υπέρβαση των τιμών αυτών για τις καταστάσεις φόρτισης που θα πρέπει να εξετασθούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του νηογνώμονα.

Στον Πίνακα 4 *k* είναι ο συντελεστής υλικού (=1,0 για κοινό χάλυβα) ενώ:

σ = συνολική καμπτική τάση στην κατασκευή

τ = μέση διατμητική τάση

σ_e = ισοδύναμη τάση κατά von Mises

$$= \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$$

όπου:

Πίνακας 4 Επιτρεπόμενες μεμβρανικές τάσεις στην κατασκευή bulk carriers (κατά LRS)

Στοιχείο κατασκευής	Τάση ή κατάσταση φόρτισης	Επιτρεπόμενες τάσεις		
		σ (N/mm ²)	τ (N/mm ²)	σ_e (N/mm ²)
Κατάστρωμα και ελάσματα οροφής δεξαμενών	Τοπική τάση και λόγω κάμψης της γάστρας	216/k	-	-
Εξωτερικός πυθμένας, εσωτερικός πυθμένας και κεκλιμένο έλασμα κάτω πλευρικής δεξαμενής	«	216/k	-	235/k
	Τοπική τάση: α) διαμήκης β) εγκάρσια	α) 108/k β) 147/k	- -	177/k -
Σταθμίδα διπυθμένου	Τοπική τάση και λόγω κάμψης της γάστρας	-	108/k	235/k
	Τοπική τάση	-	83/k	177/k
Έδρες διπυθμένου και ενισχυμένοι νομείς σε πλευρικές δεξαμενές	Όλες οι καταστάσεις φόρτισης	-	83/k	177/k
Εγκάρσιες στεγανές φρακτές και εδράσεις τους	«	147/k	83/k	177/k
Εγκάρσιες φρακτές ενδιάμεσων δεξαμενών και εδράσεις τους	«	147/k	83/k	177/k

σ_x = συνολική ορθή τάση στην κατεύθυνση x

σ_y = συνολική ορθή τάση στην κατεύθυνση y

τ_{xy} = διατμητική τάση στο επίπεδο xy

Στην περίπτωση των δεξαμενόπλοιων οι απαιτούμενοι υπολογισμοί είναι εκτενέστεροι. Απαιτούνται αναλύσεις σε τρεις και σε συνέχεια σε δύο διαστάσεις.

5. Μελέτες ναυπηγικών κατασκευών με προγράμματα ΠΣ

Στο υπόλοιπο του κεφαλαίου αυτού θα περιγραφούν ορισμένες επιλεγμένες μελέτες ναυπηγικών κατασκευών που έχουν εκπονηθεί σε διάφορες χώρες και τα αποτελέσματα των οποίων είναι διαθέσιμα.

Σε επόμενα κεφάλαια του βιβλίου περιγράφονται σε περισσότερο βάθος δύο μελέτες που έχουν εκπονηθεί στο Τμήμα Ναυπηγών του Ε.Μ.Π. υπό την επίβλεψη

του συγγραφέα. Οι μελέτες αυτές αφορούν τη συνολική κατασκευή συγκεκριμένων πλοίων κάνοντας χρήση τρισδιάστατων μοντέλων με διαφορετικά προγράμματα σε κάθε περίπτωση. Στη πρώτη περίπτωση εξετάσθηκε μια υπάρχουσα κατασκευή (ανάλυση) ενώ στη δεύτερη έγινε σχεδιασμός της κατασκευής με το πρόγραμμα *MAESTRO*.

5.1 Διακριτοποίηση σε δύο διαστάσεις

Τα παραδείγματα που παρατίθενται εδώ περιλαμβάνονται στο [1], όπου και προτείνονται ως πρότυπες μελέτες. Από το σύνολο των παραδειγμάτων που περιλαμβάνονται στο [1] έχουν επιλεγεί εκείνα που διατηρούν και σήμερα ενδιαφέρον από μελετητικής πλευράς και που αφορούν κατασκευές που αφορούν την ελληνική εμπορική ναυτιλία (δεξαμενόπλοια, bulk carriers, containerships). Οι διατάξεις που έχουν μελετηθεί αφορούν κατασκευές της περιόδου 1975-78 και έτσι σε ορισμένες περιπτώσεις δεν ανταποκρίνονται στις σημερινές διατάξεις (δεξαμενόπλοια). Διατηρούν πάντως το ενδιαφέρον τους από μελετητικής πλευράς.

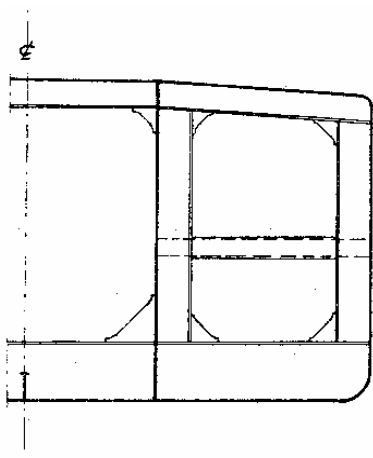
Οι μελέτες αυτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: αυτές που αφορούν μεγάλα τμήματα ή περιοχές της κατασκευής (χώροι φορτίου, νομείς, φρακτές κλπ) και αυτές που αφορούν καθαρά την τοπική απόκριση της κατασκευής (ενισχυμένο έλασμα, σύνδεση ενισχυτικού με νομέα κλπ). Εκτός της διερεύνησης της απόκρισης της κατασκευής, σε πολλές από αυτές τις μελέτες εξετάσθηκαν διάφοροι τρόποι διακριτοποίησης της κατασκευής (επιλογή στοιχείων, τρόπων στήριξης, κ.ά.).

5.1.1 Ενισχυμένος νομέας δεξαμενόπλοιου (στοιχεία-δοκοί)

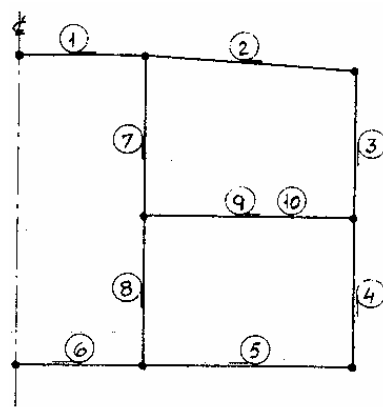
Στο στάδιο του προκαταρκτικού σχεδιασμού πρέπει να γίνει μια πρώτη εκτίμηση των παχών των στοιχείων της κατασκευής των δεξαμενών. Επειδή η εγκάρσια τομή (ενισχυμένος νομέας) αποτελεί αντιπροσωπευτικό τμήμα της κατασκευής, έχει ενδιαφέρον η μελέτη της. Σκοπός της μελέτης είναι ο υπολογισμός των μετατοπίσεων, των δυνάμεων, των ροπών και των εντατικών κατανομών στον τυπικό ενισχυμένο νομέα, υπό διάφορες καταστάσεις φόρτισης.

Παρ' όλο που η πρώτη επιλογή είναι να επιλεγούν κομβικές γραμμές που να συμπίπτουν με τον ουδέτερο άξονα της κάθε διατομής, στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε να συμπίπτουν με το έλασμα. Η διακριτοποίηση γίνεται με στοιχεία-δοκούς που κάμπτονται στο ίδιο επίπεδο με το νομέα. Οι δυνάμεις που ασκούνται κάθετα στο εξωτερικό κέλυφος και στην επιφάνεια της φρακτής λαμβάνονται υπόψη με κατάλληλο ορισμό των οριακών συνθηκών στους σχετικούς κόμβους (Σχήμα 21).

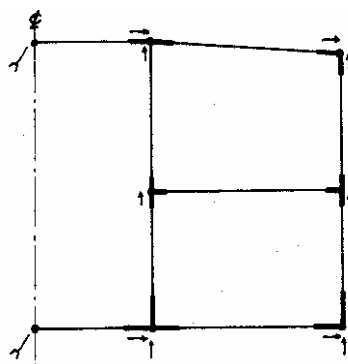
Επειδή στη συγκεκριμένη μελέτη έχουν χρησιμοποιηθεί στοιχεία-δοκοί, δεν μπορούμε να έχουμε επαρκή ακρίβεια στις περιοχές κοντά στις συνδέσεις που οι εντατικές καταστάσεις επηρεάζονται από τοις στηρίξεις (μπρακέτα). Για να βελτιωθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων στην περιοχή αυτή μπορούμε να χρησιμο



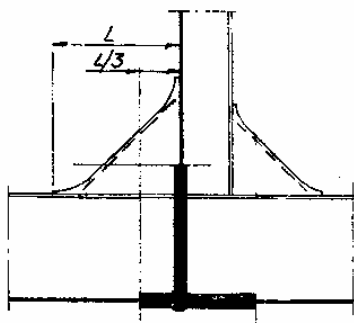
Σχήμα 19 Ενισχυμένος νομέας δεξαμενόπλοιου



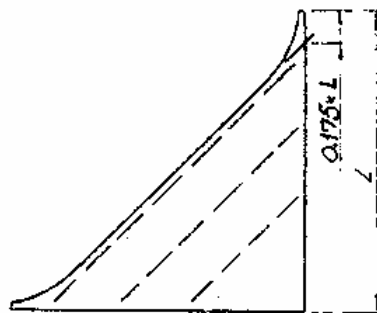
Σχήμα 20 Διακριτοποίηση ενισχυμένου νομέα



Σχήμα 21 Περιορισμένοι βαθμοί ελευθερίας



Σχήμα 22 Προσδιορισμός άκαμπτου μήκους στοιχείου-δοκού



Σχήμα 23 Μπρακέτο κατασκευής Kockums

ποιήσουμε στοιχεία-δοκούς με άκαμπτα άκρα που υποκαθιστούν σε ένα βαθμό την ακαμψία των μπρακέτων.

Το τελικό αποτέλεσμα μιας τέτοιας μελέτης μπορεί να είναι μια ικανοποιητική εκτίμηση:

- α) Του πλάτους του κορμού του νομέα στις διάφορες περιοχές
- β) Του εμβαδού του πέλματος του νομέα
- γ) Των διαστάσεων των μπρακέτων

Το μειονέκτημα μιας τέτοιας μελέτης, που κάνει αποκλειστικά χρήση στοιχείων-δοκών είναι η πτωχή αναπαράσταση της συμπεριφοράς (ακαμψίας) των μπρακέτων.

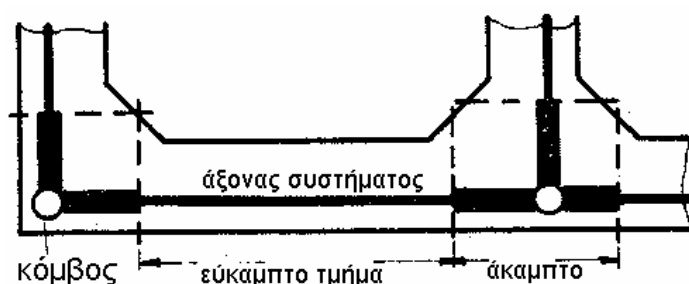
5.1.2 Ενισχυμένος νομέας δεξαμενόπλοιου με διαφορετικά στοιχεία

Σκοπός της μελέτης αυτής υπήρξε η σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου πλαισίου (στοιχεία-δοκούς) με μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (μεμβρανικά στοιχεία). Η μελέτη είχε ως αντικείμενο τη συμπεριφορά ενός πλήρους ενισχυμένου νομέα δεξαμενόπλοιου, στον οποίο ασκούνται διάφοροι συνδυασμοί φορτίσεων που οφείλονται σε εξωτερική υδροστατική φόρτιση και εσωτερικές φορτίσεις της κεντρικής και πλευρικής δεξαμενής.

Το συγκεκριμένο πλοίο ήταν σουηδικής κατασκευής και είχε χωρητικότητα 200.000 τόνων (VLCC). Οι βασικές πληροφορίες που αφορούν την κατασκευή του τυπικού εγκάρσιου νομέα δίνονται στον Πίνακα 5 ενώ η διάταξη της κατασκευής δείχνεται στο Σχήμα 24.

Πίνακας 5 Ιδιότητες διατομών ενισχυμένου νομέα VLCC

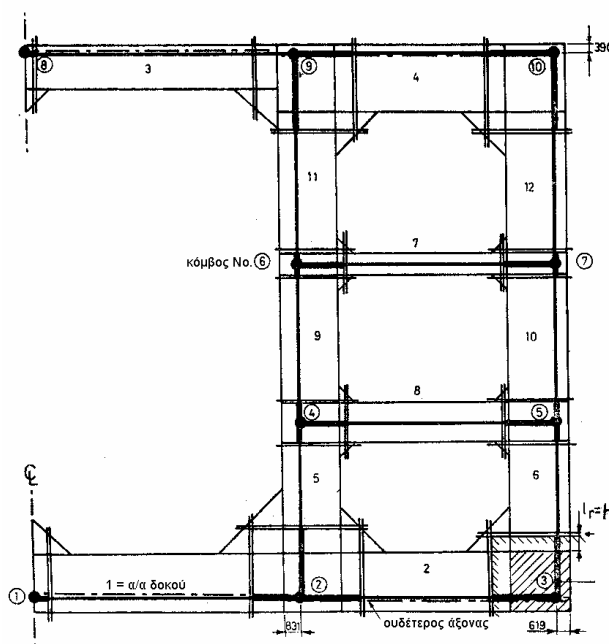
α/α διατομής	H (mm)	t_w (mm)	A_1 (mm ²)	A_2 (mm ²)	A (mm ²)	y_{NA} (mm)	I_{CG} (mm ⁴)	W (mm ³)
1	2.700	14	90.000	27.000	154.800	801	$1,90 \cdot 10^{11}$	$2,37 \cdot 10^8$
2	2.700	14	90.000	7.500	135.300	527	$1,09 \cdot 10^{11}$	$2,07 \cdot 10^8$
3	2.000	12	90.000	4.000	118.000	271	$0,39 \cdot 10^{11}$	$1,45 \cdot 10^8$
4	3.000	12	90.000	4.000	130.000	508	$1,10 \cdot 10^{11}$	$2,18 \cdot 10^8$
5, 9, 11	2.700	14	54.000	13.500	105.300	831	$1,18 \cdot 10^{11}$	$1,42 \cdot 10^8$
6, 10, 12	2.700	14	90.000	13.500	141.300	619	$1,36 \cdot 10^{11}$	$2,20 \cdot 10^8$
7	1.000	14	6.000	6.000	26.000	300	$4,17 \cdot 10^9$	$8,33 \cdot 10^8$
8	1.800	14	6.000	6.000	37.200	900	$,65 \cdot 10^{10}$	$1,84 \cdot 10^8$



Σχήμα 25 Τυπικό στοιχείο-δοκός και συνδέσεις στα άκρα

Πίνακας 6 Μελέτες ενισχυμένου νομέα με στοιχεία-δοκούς

α/α	Περιγραφή
FA NA 0	Άξονες στοιχείων συμπίπτουν με ουδέτερους άξονες διατομών. Μήκος άκαμπτου τμήματος $l_r = b \left(1 - \frac{H}{H+b} \right)$
FA NA 1	Άξονες στοιχείων συμπίπτουν με ουδέτερους άξονες διατομών. Μήκος άκαμπτου τμήματος $l_r = 0$
FA P 0	Άξονες στοιχείων συμπίπτουν με ελάσματα. Μήκος άκαμπτου τμήματος l_r όπως στην περίπτωση FA NA 0.
FA P 1	Άξονες στοιχείων συμπίπτουν με ελάσματα. Μήκος άκαμπτου τμήματος $l_r = 0$.
FA P 2	Όπως η περίπτωση FA P 0 αλλά με αυξημένο εμβαδόν διάτμησης κατά 20%.
FA P 3	Άξονες στοιχείων συμπίπτουν με ελάσματα. Μήκος άκαμπτου τμήματος l_r στην πλευρική δεξαμενή όπως στην περίπτωση FA P 1 ενώ στην κεντρική δεξαμενή όπως στην περίπτωση FA P 0.



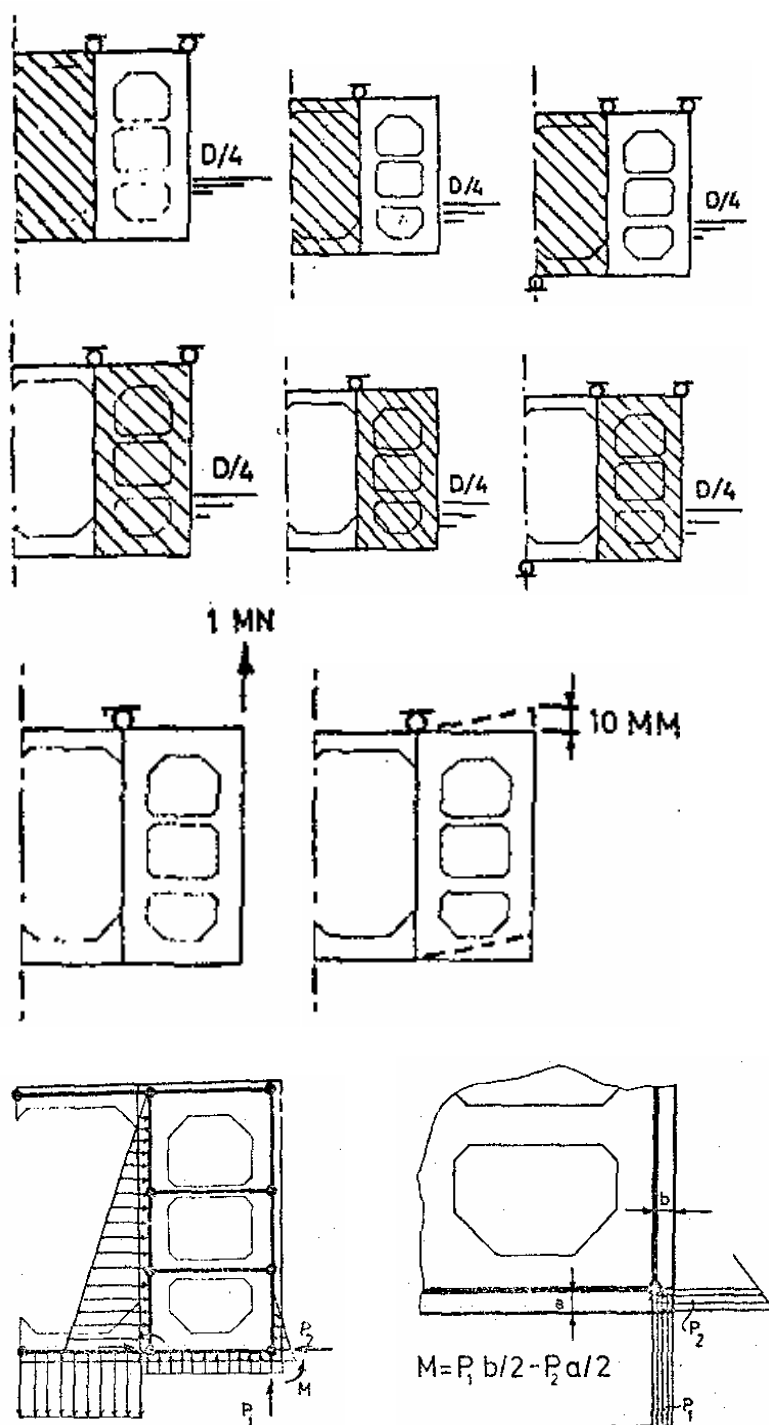
Σχήμα 26 Διακριτοποίηση ενισχυμένου νομέα με στοιχεία-δοκούς

Η μελέτη με στοιχεία-δοκούς εκπονήθηκε κάνοντας χρήση στοιχείων-δοκών με άκαμπτα τμήματα στα άκρα τους (Σχήμα 25). Πληροφορίες σχετικά με τις διαφορετικές περιπτώσεις που εξετάστηκαν δίνονται στον Πίνακα 6.

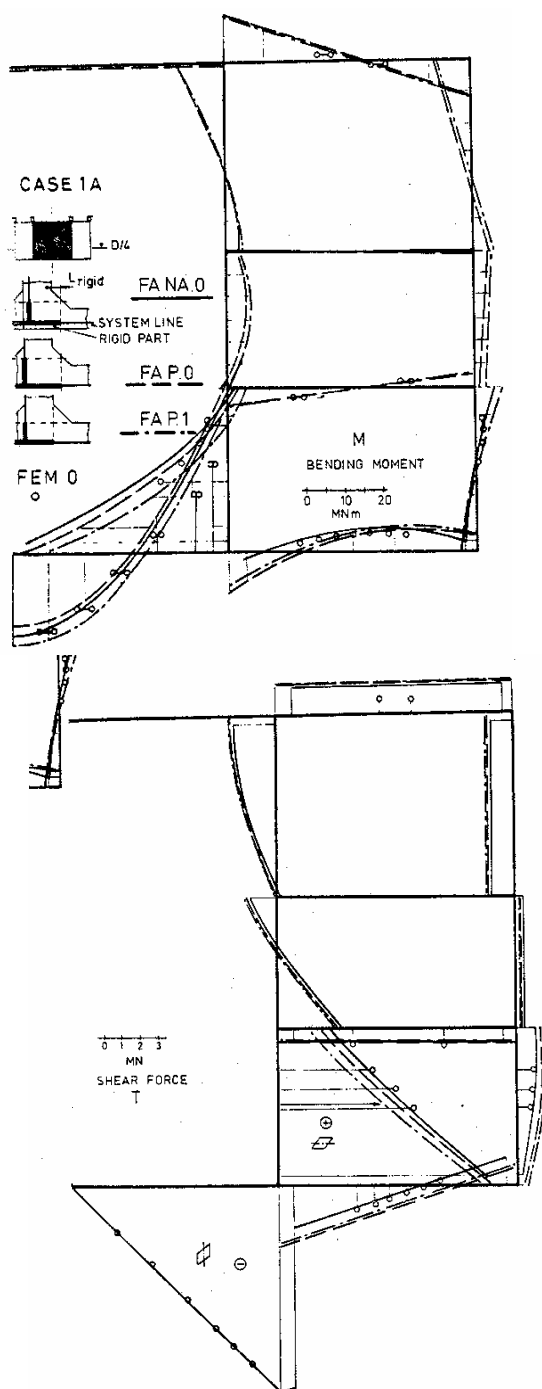
Στο μοντέλο με στοιχεία-δοκούς εξετάστηκαν διαφορετικές θέσεις των αξόνων των στοιχείων, δηλαδή α) στο επίπεδο του ελάσματος και β) στον ουδέτερο άξονα της κάθε διατομής. Επίσης εξετάστηκε η επίδραση του μήκους του άκαμπτου τμήματος. Το μοντέλο που αποκτήθηκε με στοιχεία-δοκούς δείχνεται στο παρακάτω σχήμα.

Οι διάφοροι συνδυασμοί φόρτισης που εξετάστηκαν δείχνονται στα σκαριφήματα της επόμενης σελίδας.

Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η ακριβής θέση των αξόνων αναφοράς στο μοντέλο-πλαίσιο δεν ασκεί κάποια σημαντική επίδραση στις κατανομές των καμπτικών ροπών και των τεμνουσών δυνάμεων. Το μήκος των άκαμπτων συνδέσεων επηρεάζει πρωτίστως την ακαμψία της κατασκευής, δηλαδή τα βέλη κάμψης του κάθε στοιχείου και δευτερευόντως τις τάσεις. Η περίπτωση FA NA 0 έδωσε ακριβέστερα αποτελέσματα με αποκλίσεις από τη λύση με μεμβρανικά στοιχεία της τάξης του 10-20% για τις καμπτικές ροπές, τέμνουσες δυνάμεις και ονομαστικές τάσεις στις περιοχές με τις υψηλότερες τάσεις. Τα σφάλματα που προκύπτουν (αποκλίσεις) οφείλονται στο μέγεθος των μπρακέτων



Σχήμα 27 Περιπτώσεις φόρτισης



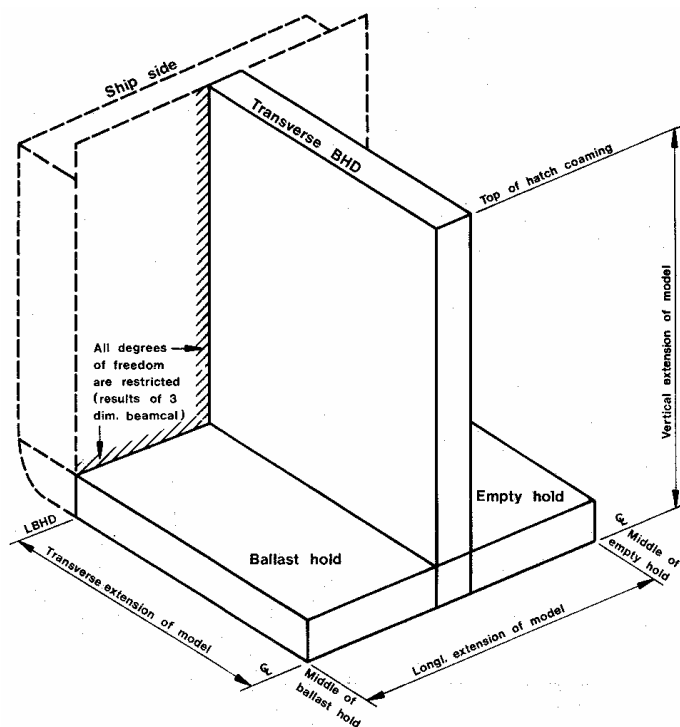
Σχήμα 28 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου με στοιχεία-δοκούς και μεμβρανικά πεπερασμένα στοιχεία (α) καμπ. ροπές (β) τέμν, δυνάμεις

και το είδος της φόρτισης. Όταν ελαττώνονται οι διαστάσεις των μπρακέτων αυξάνεται το σφάλμα.

Οι αντιδράσεις στήριξης του μοντέλου πλαισίου συμφωνούν με τα αποτελέσματα του προγράμματος ΠΣ. Τα βέλη κάμψης έχουν επαρκή ακρίβεια μόνο όταν οι εσωτερικές περιοχές θεωρούνται άκαμπτες (περιπτώσεις FA NA1, FA P 1).

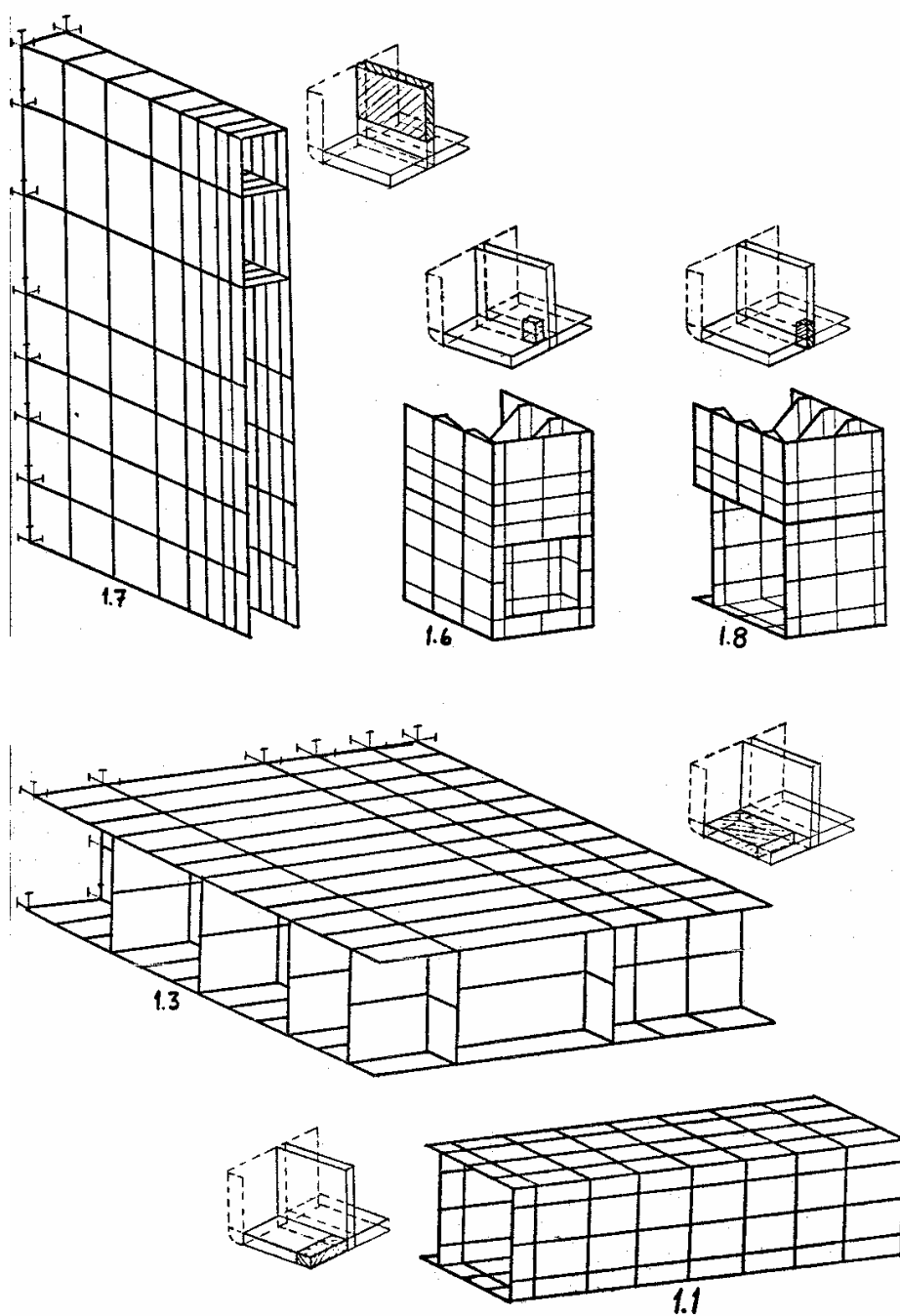
Ανακεφαλαιώνοντας, συμπεραίνουμε ότι η χρήση στοιχείων-δοκών δίνει μια πρώτη εκτίμηση των μετατοπίσεων και των τάσεων, ενώ η κύρια πηγή σφαλμάτων έγκειται στην ανεπάρκεια της διακριτοποίησης των μπρακέτων.

5.1.3 Μελέτη διαμήκους φρακτής και σταθμίδας bulk carrier

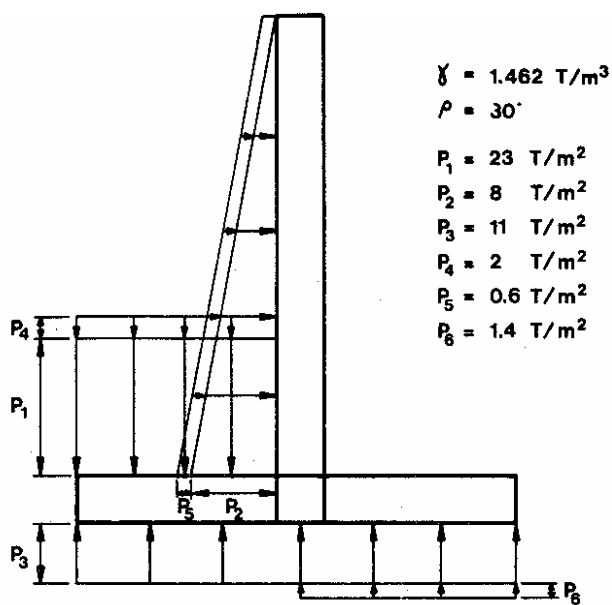


Σχήμα 29 Περιοχή κατασκευής και οριακές συνθήκες

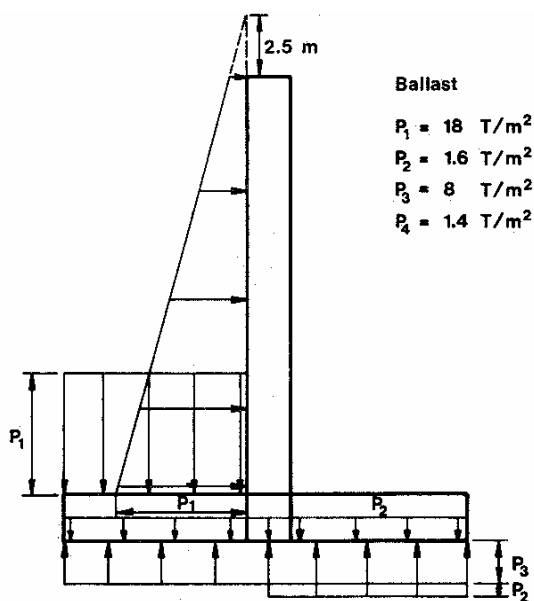
Αντικείμενο της μελέτης υπήρξε η διερεύνηση των εντατικών κατανομών στο διπύθμενο ενός συμβατικού bulk carrier, στην περιοχή των χώρων φορτίου με κατασκευή που έχει ομοιότητες με αυτή των containerships. Έγινε επίσης σύγκριση των διαφόρων τρόπων διακριτοποίησης της κατασκευής.



Σχήμα 30 Υπερστοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνθεση του μοντέλου



(α) Αμπάρι με φορτίο (μετάλλευμα)



(β) Αμπάρι με θαλάσσιο έρμα

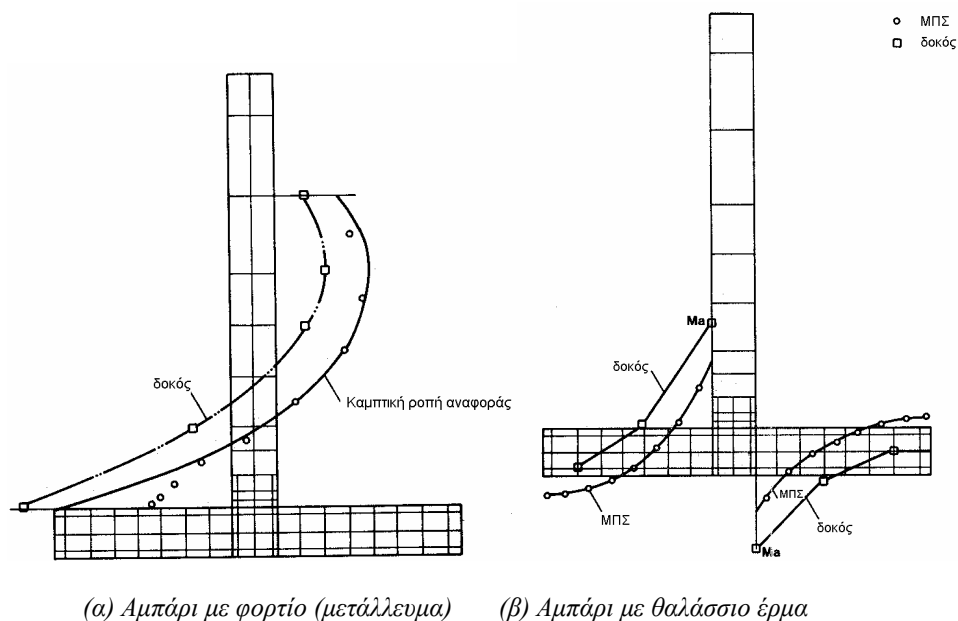
Σχήμα 31 Περιπτώσεις φόρτισης της κατασκευής

Η περιοχή της κατασκευής που διακριτοποιήθηκε περιελάμβανε την κατώτερη περιοχή της φρακτής και το διπύθμενο. Στα σύνορα του μοντέλου θεωρήθηκε ότι οι βαθμοί ελευθερίας περιορίζονται απόλυτα, όπως δείχνει το Σχήμα 29. Η παραδοχή αυτή κρίνεται ότι έχει μηδαμινή επίδραση στα αποτελέσματα της μελέτης.

Το κάθε υπερστοιχείο αποτελείται από μεμβρανικά στοιχεία-ελάσματα, ενώ για τα διαμήκη ενισχυτικά του εσωτερικού και του εξωτερικού πυθμένα χρησιμοποιούνται στοιχεία-ράβδοι. Τα πρόσθετα ενισχυτικά που είναι συγκολλημένα στον εγκάρσιο νομέα καθώς και οι μικρές οπές δεν έχουν μοντελοποιηθεί.

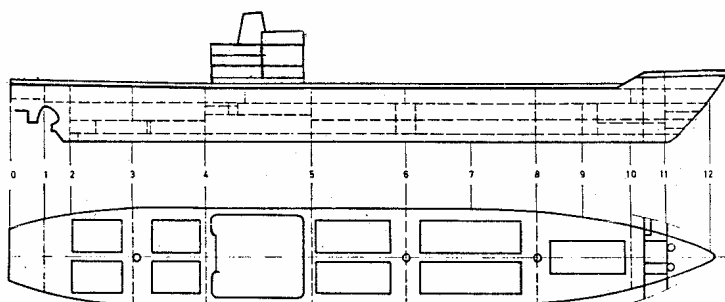
Οι καταστάσεις φόρτισης που εξετάστηκαν αφορούν α) αμπάρι που φέρει μετάλλευμα και β) ερματισμένο αμπάρι με γειτονικά αμπάρια κενά (Σχήμα 32).

Ενδεικτικά αποτελέσματα περιλαμβάνονται στο Σχήμα 32 στο οποίο δείχνονται οι κατανομές των ροπών για τις δύο περιπτώσεις φόρτισης με στοιχεία-δοκούς και μεμβρανικά στοιχεία.

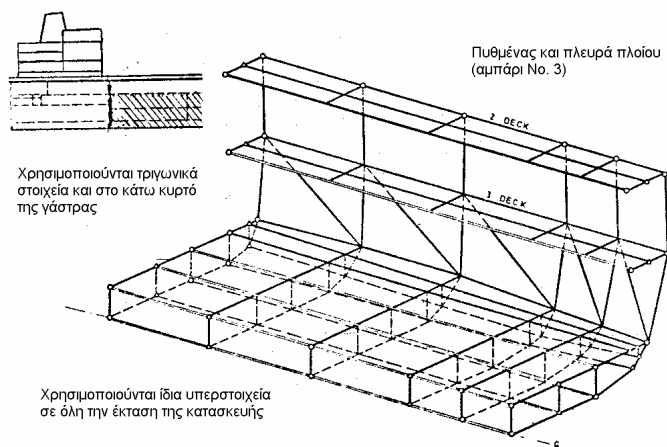
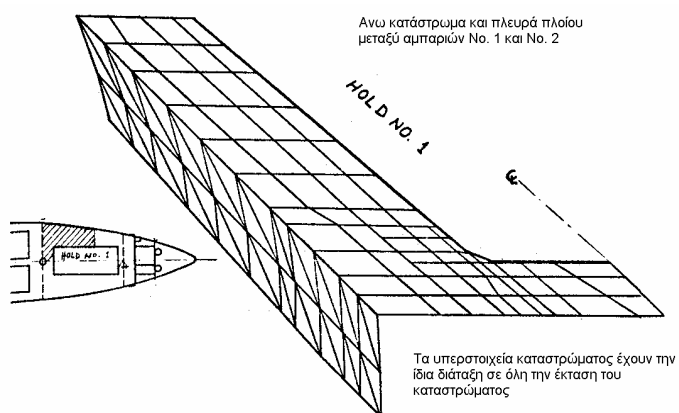


Σχήμα 32 Κατανομές καμπτικών ροπών με στοιχεία-δοκούς και μεμβρανικά στοιχεία

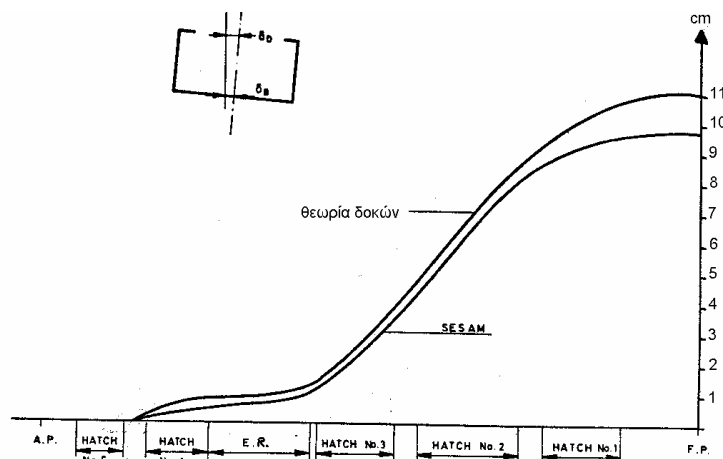
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων διακριτοποίησης, η οποία αποδίδεται στις παραδοχές της θεωρίας δοκών. Παρ' όλο που η στρεπτική ακαμψία της κατασκευής είναι ακριβής η ακαμψία σε διάτμηση καθώς και η ακαμψία των συνδέσεων είναι άπειρη, σύμφωνα με τα στοιχεία-δοκούς.



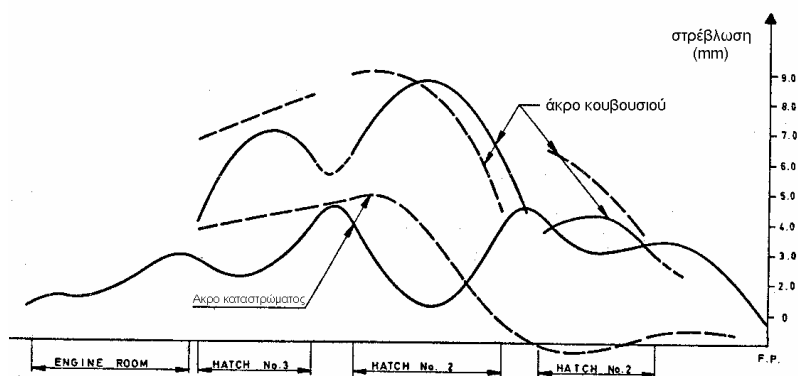
Σχήμα 33 Περιοχή που διακριτοποιήθηκε



Σχήμα 34 Χρήση υπερστοιχείων



(α) Στροφή διατομής (θεωρία δοκών και πρόγραμμα SESAM)

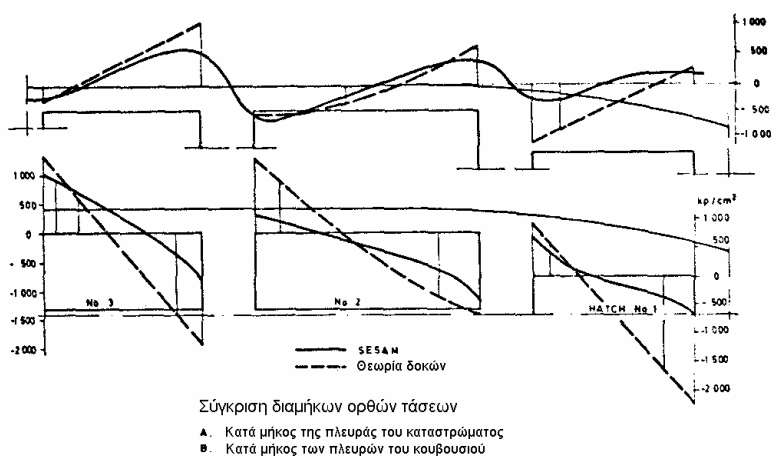


(β) Στρέβλωση διατομής σε κρίσιμα σημεία της

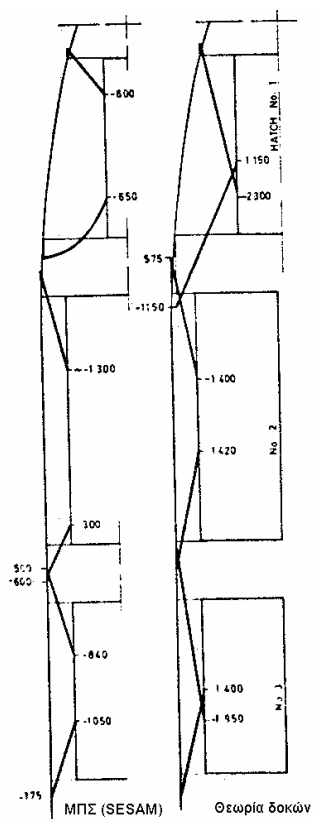
Σχήμα 35 Παραμόρφωση της διατομής στη διαμήκη κατεύθυνση

5.1.4 Μελέτη στρεπτικής συμπεριφοράς containership

Σκοπός της μελέτης αυτής υπήρξε η καταγραφή των κατανομών των μετατοπίσεων και των τάσεων στο κατάστρωμα αντοχής ενός containership. Για το λόγο αυτό, απαιτείται πυκνό πλέγμα στο κατάστρωμα, ενώ στις περιοχές που γειτονεύουν με αυτό επαρκεί μια πιο αραιή διάταξη, η οποία αποδίδει τη ζητούμενη ακαμψία. Το μοντέλο αναπτύχθηκε με συστηματική χρήση υπερστοιχείων, για να μειωθεί ο χρόνος και το κόστος ανάπτυξής του. Χρησιμοποιήθηκαν τετράπλευρα, τριγωνικά μεμβρανικά στοιχεία καθώς και στοιχεία-ράβδοι σε όλη την κατασκευή. Τα αποτε



(α) Διαμήκειες ορθές τάσεις στο άκρο του καταστρώματος

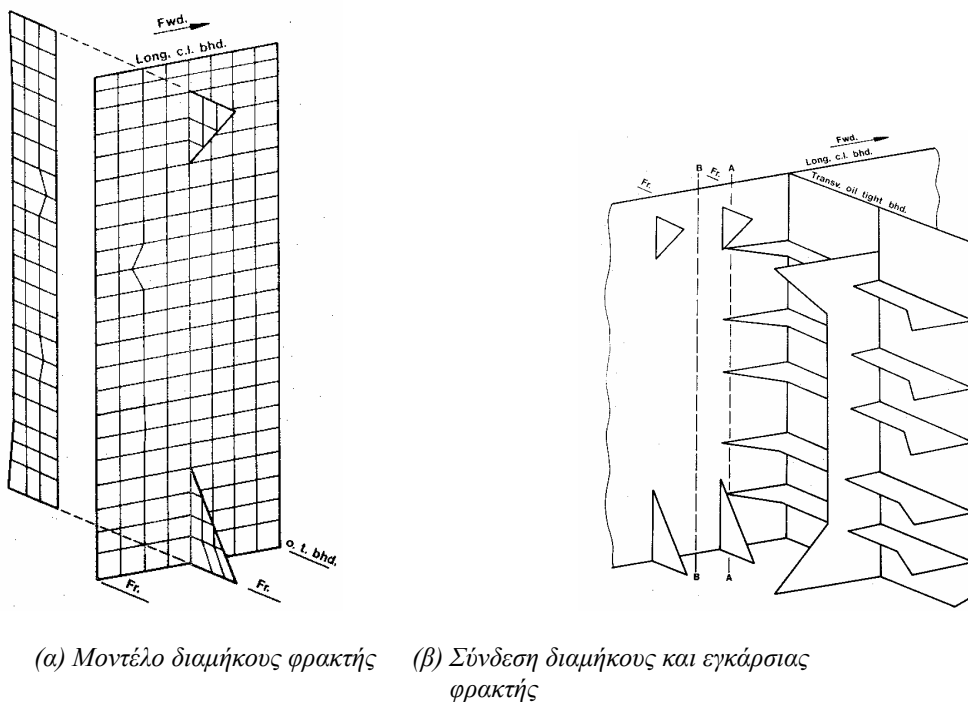


(β) Διαμήκειες ορθές τάσεις κατά μήκος του άκρου του ανοίγματος

Σχήμα 36 Στρέψη του καταστρώματος

λέσματα συγκρίθηκαν με αυτά από μοντέλο με στοιχεία-δοκούς. Η διάταξη του μοντέλου δείχνεται στο Σχήμα 34.

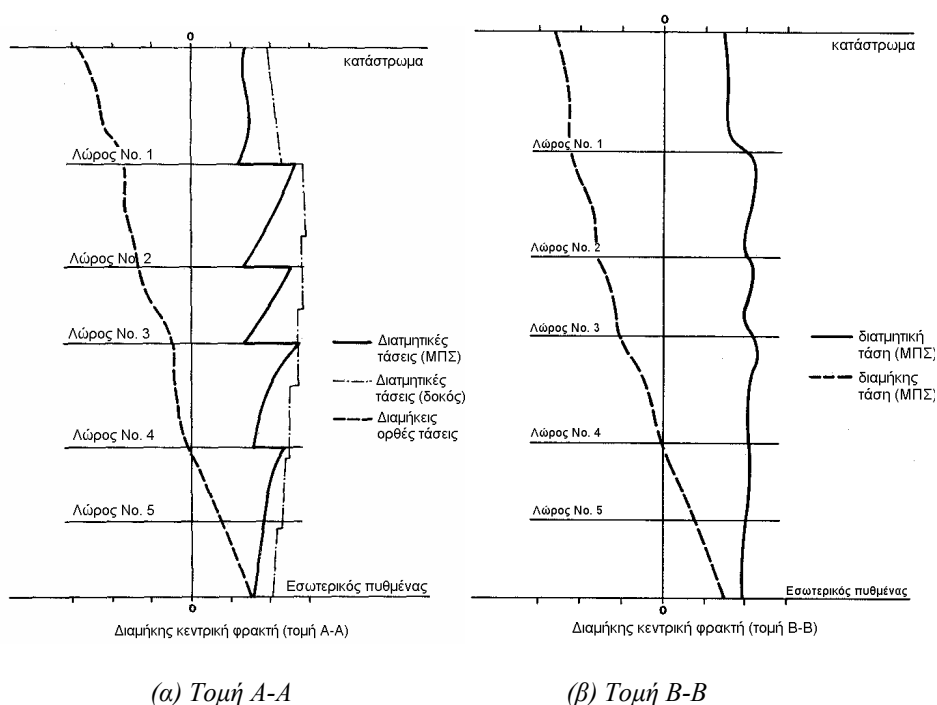
5.1.5 Μελέτη διατμητικών τάσεων σε διαμήκη φρακτή



Σχήμα 37 Διακριτοποίηση διαμήκους και εγκάρσιας στεγανής φρακτής

Η μελέτη αυτή αφορά δεξαμενόπλοιο που στην περιοχή των δεξαμενών έχει μια διαμήκη φρακτή, κατά μήκος του διαμήκους κατακόρυφου επιπέδου του. Στο εσωτερικό κάθε δεξαμενής υπήρχε μία εγκάρσια διάτρητη φρακτή. Το τμήμα της φρακτής που διακριτοποιήθηκε εκτείνεται από τη διάτρητη φρακτή της δεξαμενής No. 5 έως τη διάτρητη φρακτή της δεξαμενής No. 2, σε όλο το πλάτος του πλοίου (Σχήμα 37). Η διακριτοποίηση συμπεριέλαβε τα παρακάτω στοιχεία της κατασκευής:

- Διαμήκη κατασκευή (πλευρική κατασκευή, διαμήκης φρακτή, σταθμίδες και διαμήκη ζυγά)
- Ενισχυμένους νομείς
- Μια εγκάρσια φρακτή
- Μια εγκάρσια φρακτή ως πλαίσιο



Σχήμα 38 Διατμητικές και ορθές διαμήκειες τάσεις σε διαμήκη φρακτή

Η διακριτοποίηση του καταστρώματος, της πλευράς και της κατασκευής του πυθμένα έγινε με αραιό πλέγμα αλλά για να αποδοθεί η ακριβής διάταξη σε τοπικό επίπεδο, επιλεκτικά χρησιμοποιήθηκε πυκνό πλέγμα. Συνολικά έγινε χρήση 215.000 στοιχείων με 355.000 βαθμούς ελευθερίας (158.000 κόμβοι).

Οι φορτίσεις που ελήφθησαν υπόψη είναι:

- Εξωτερική φόρτιση (υδροστατική πίεση και άντωση)
- Βάρος μεταφερόμενου φορτίου (ή έρματος) και αντίστοιχες πιέσεις στα εσωτερικά τοιχώματα των δεξαμενών
- Βάρος του πλοίου σε άφορτη κατάσταση
- Τέμνουσα δύναμη στο ελεύθερο άκρο του μοντέλου
- Κατακόρυφη καμπτική ροπή στο ελεύθερο άκρο του μοντέλου

Οι οριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν ήταν:

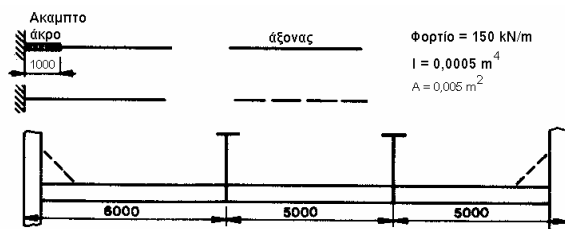
1. Καμπτική ροπή και τέμνουσα δύναμη στο πρυμναίο άκρο
2. Πάκτωση στο πρωραίο άκρο

Ενδεικτικά αποτελέσματα περιλαμβάνονται στο Σχήμα 38, και αφορούν τις διατμητικές τάσεις στη διαμήκη φρακτή. Βρέθηκε ότι το 30% της συνολικής διατμη-

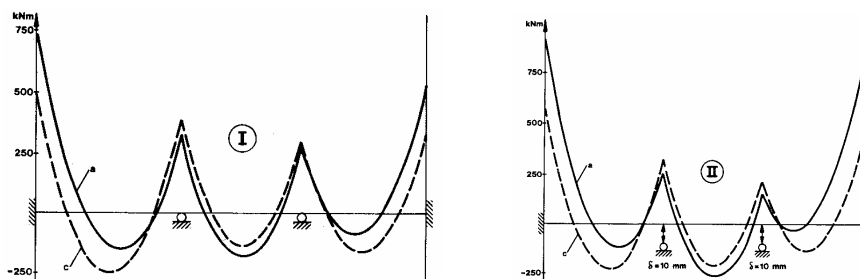
τικής δύναμης παραλαμβάνεται από την κεντρική διαμήκη φρακτή. Στο Σχήμα 38 (τομή $A-A$) δείχνεται η κατανομή των διατμητικών τάσεων, όπου είναι εμφανής και η επίδραση των λώρων, ενώ στην τομή $B-B$ η επίδρασή τους είναι περιορισμένη.

5.1.6 Μελέτη μπρακέτων ενισχυμένων νομέων

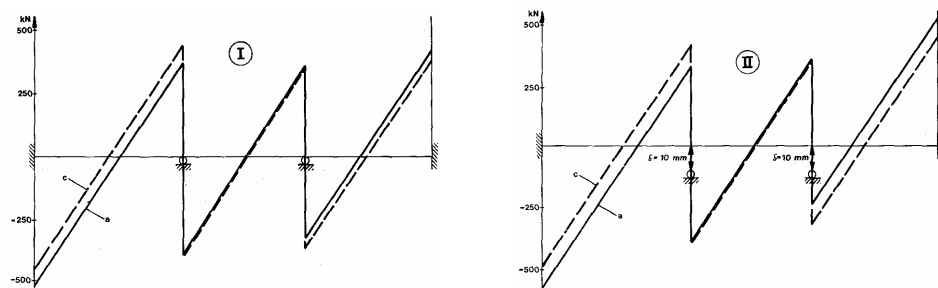
Η μελέτη αυτή εκπονήθηκε για να διερευνηθεί η επίδραση της διάταξης διαφόρων τύπων μπρακέτων και της πυκνότητας του πλέγματος. Οι διατάξεις της υπό μελέτη κατασκευής δείχνονται στο παρακάτω σχήμα.



(α) Διάταξη κατασκευής

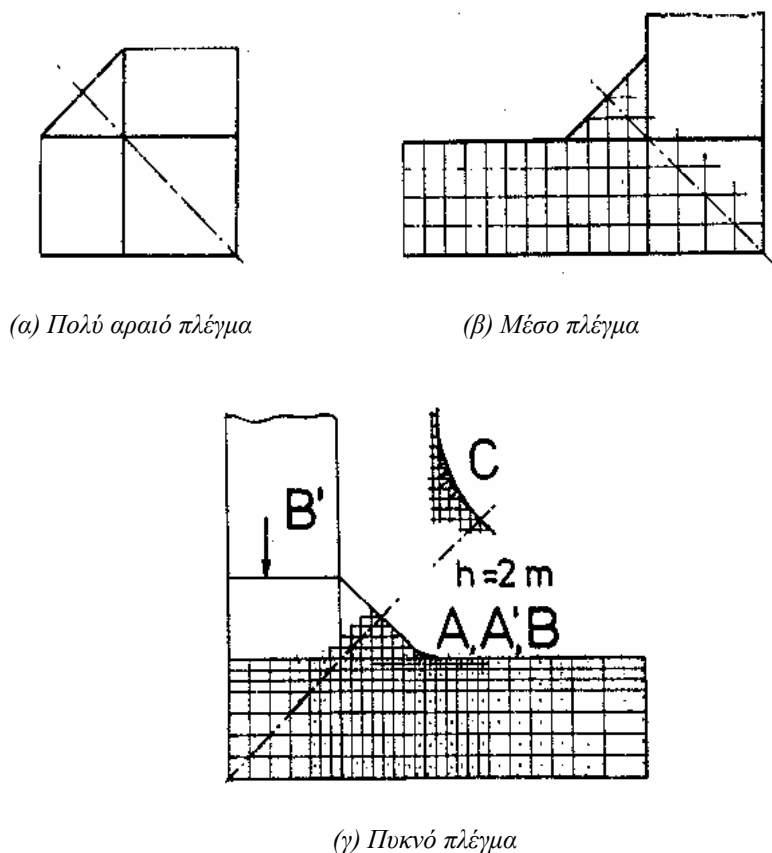


(β) Καμπτικές ροπές



(γ) Τέμνουσες δυνάμεις

Σχήμα 39 Μοντέλα κατασκευής και αποτελέσματα
(I: μηδενική μετατόπιση II: με υποχώρηση 10 mm στα σημεία στήριξης)



Σχήμα 40 Πλέγματα

Εξετάσθηκαν δύο διατάξεις της κατασκευής, (I και II), και χρησιμοποιήθηκαν τρία πλέγματα σε κάθε περίπτωση. Τα αποτελέσματα δείχνονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7 Επίδραση πυκνότητας πλέγματος στη μετατόπιση και τη μέγιστη τάση

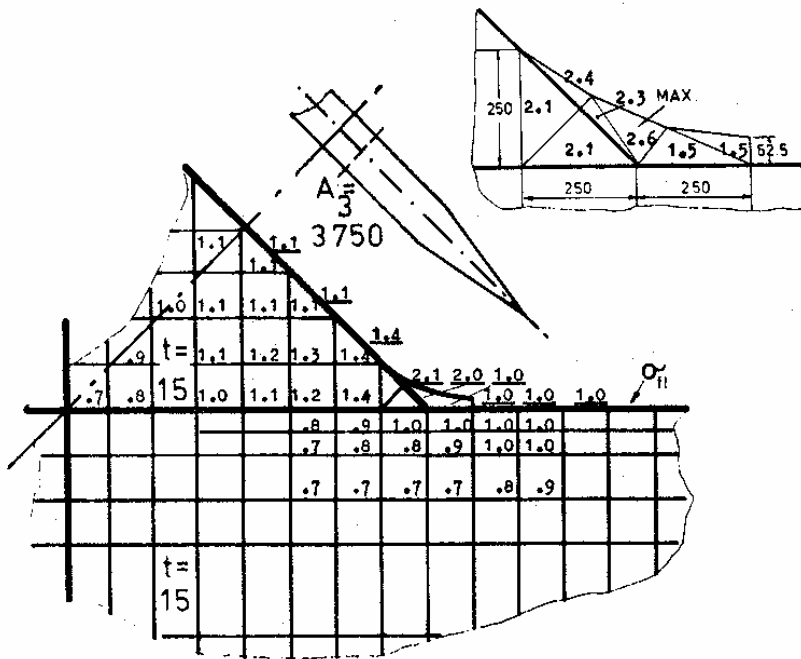
Πολύ αραιό πλέγμα (χωρίς βαθμούς ελευθερίας στην περιοχή της σύνδεσης) (16 βαθμοί ελευθερίας)			Αραιό πλέγμα (150 βαθμοί ελευθερίας)		Πυκνό πλέγμα (500 βαθμοί ελευθερίας)	
Τύπος	I	II	I	II	I	II
θ	0,95	0,78	0,99	0,93	1,0	1,0
δ	0,94	0,75	0,99	0,93	1,0	1,0
σ (άνω πέλμα)	0,84	0,84	0,99	0,97	1,0	1,0
σ (ισοδ. έλασμα)	0,50	0,22	0,48	0,48	1,0	1,0

Στον παραπάνω πίνακα,

- θ = γωνία στροφής της τομής I-II
 δ = μετατόπιση του σημείου I
 σ (άνω πέλμα) = τάση στο πέλμα του μπρακέτου στο σημείο I
 σ (ισοδ. έλασμα) = συνδυασμένη τάση στο σημείο I

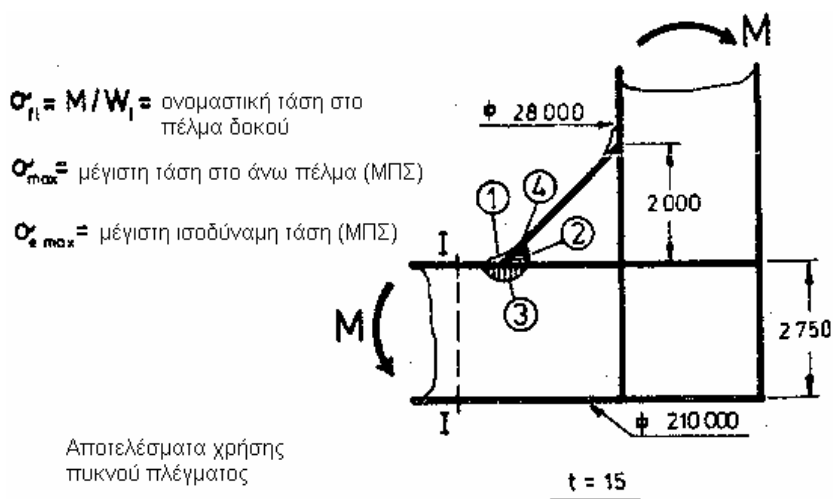
Βρέθηκε ότι για να αποκτηθούν ακριβείς μέγιστες τιμές των τάσεων στα άκρα των μπρακέτων πρέπει να χρησιμοποιηθεί πολύ πυκνό πλέγμα. Οι τάσεις στο πέλμα του μπρακέτου δεν είναι τόσο ευαίσθητες. Εξάλλου, αραιά πλέγματα επαρκούν για την κατανομή των μετατοπίσεων της κατασκευής. Στα σημεία με ασυνέχειες απαιτείται πυκνό πλέγμα.

Οι μέγιστες τοπικές τιμές των τάσεων εξαρτώνται από τη διάταξη της κατασκευής. Μια τυπική κατανομή δείχνεται στο Σχήμα 41 ενώ στα Σχήματα 42 και 43 δείχνεται η επίδραση της διάταξης της κατασκευής στις μέγιστες τάσεις.

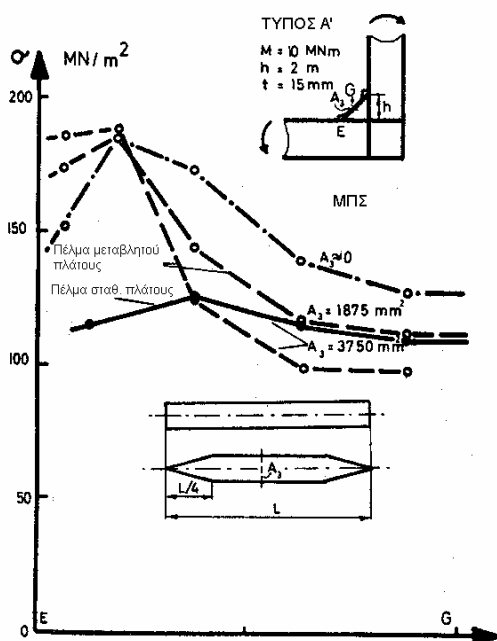


Σχήμα 41 Εντατικό πεδίο στο άκρο μπρακέτου

ΤΥΠΟΣ	$\frac{\sigma_{\tau, \max}}{\sigma_H}$			$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_H}$
	①	②	③	④
B  $A_2 = \text{top flange area (mm}^2\text{)}$ 28 000	—	3.3	4.1	0.8
B'  28 000	—	2.9	2.8	0.9
A  3 750	—	1.4	1.3	1.4
A'  3 750	2.6	2.1	1.0	2.1
 1875	2.4	2.1	1.0	2.1
 0	2.3	2.1	1.0	2.0



Σχήμα 42 Επίδραση της διάταξης της κατασκευής στις μέγιστες τάσεις



Σχήμα 43 Τάσεις στο άνω πέλαμα για διάφορες διατάξεις

5.2 Διακριτοποίηση σε τρεις διαστάσεις

Οι συνθήκες που θα πρέπει να ικανοποιηθούν για να αποφασισθεί η εκπόνηση μελέτης με πρόγραμμα ΠΣ αναφέρθηκαν προηγουμένως. Από αυτές όλες εκτός των πρώτων δύο αφορούν πρακτικούς παράγοντες που κατά κανόνα δεν ελέγχει άμεσα ο μελετητής. Εάν λοιπόν υποθέσουμε ότι έχουν ικανοποιηθεί οι όροι αυτοί ο μελετητής πρέπει να προχωρήσει στη μελέτη καθορίζοντας:

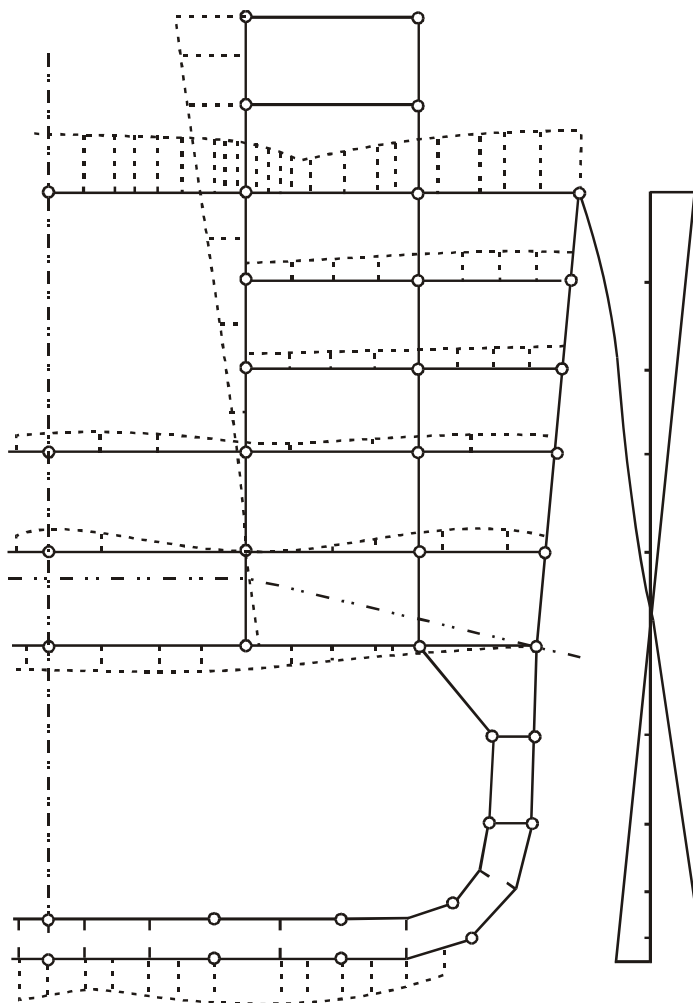
- Τη μορφολογία, εφόσον αυτή δεν έχει ήδη καθορισθεί επαρκώς, και
- Τις φορτίσεις που ασκούνται στην κατασκευή

Τρόποι καθορισμού των εξωτερικών φορτίσεων υπάρχουν πολλοί - επισημαίνεται όμως ότι και οι πλέον προχωρημένοι δεν έχουν πάντοτε την δέουσα ακρίβεια, για να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματά τους ως αρχικά δεδομένα σε πρόγραμμα ΠΣ. Πολλές φορές όμως οι νηογνώμονες ορίζουν τα φορτία σχεδιασμού τα οποία βασίζονται σε θεωρητικές μελέτες, πειραματικά αποτελέσματα, στατιστικές επεξεργασίες, σύγκριση με αποτελέσματα προηγούμενων κατασκευών κ.ά.

Εάν δεν έχουν καθορισθεί οι εξωτερικές φορτίσεις και θα πρέπει να γίνει αυτό από τον μελετητή θα πρέπει να αποφασισθεί ο τρόπος απόκτησής τους. Η πλέον ανεπτυγμένη σήμερα μέθοδος της θεωρίας λωρίδας δίνει αποτελέσματα που μπορεί να διαφέρουν από τα πραγματικά έως και 30%, η δε διασπορά των διαφορών θεωρίας-μετρήσεων είναι μεγάλη. Άλλα προβλήματα είναι η επίδραση μη-γραμμι-

κών φαινομένων, όπως η παρουσία δυναμικών φορτίσεων υψηλότερης τάξης, η αλληλεπίδρασή τους, κ.ά.

5.2.1 Μελέτη του Α/Φ *Invincible*



Σχήμα 44 Α/Φ *Invincible*. Μέση τομή και φορτία σχεδιασμού

Η μελέτη που θα περιγραφεί αναφέρεται στο σχεδιασμό της μεταλλικής κατασκευής του βρετανικού αεροπλανοφόρου *Invincible*. Η μορφολογία του σκάφους αυτού κατέληξε για διάφορους λόγους να έχει σημαντικές διαφορές από αυτές που είχαν υπάρχοντα πλοία του ίδιου τύπου.

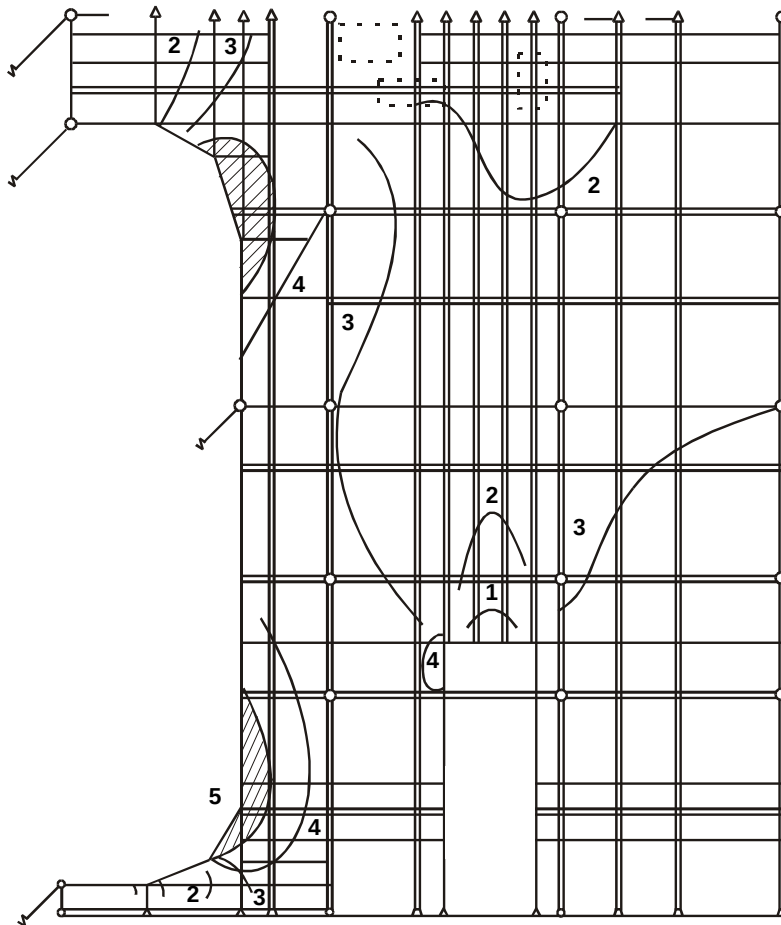
Στο Σχήμα 44 παρατίθεται ένα διάγραμμα εγκάρσιας τομής με τα θεωρούμενα φορτία. Οι σημαντικές διαφορές με τις προηγούμενες κατασκευές οδήγησαν στη δημιουργία ενός σύνθετου προβλήματος κατασκευαστικού σχεδιασμού το οποίο

θεωρήθηκε ότι θα έπρεπε να επιλυθεί με μία πλήρη ανάλυση της κατασκευής με πρόγραμμα ΠΣ. Οι φορτίσεις που εξετάστηκαν περιγράφονται στον Πίνακα 8.

Εκτός αυτών εξετάστηκαν και συγκεκριμένα τοπικές φορτίσεις ενώ η διαστασιολόγηση της κατασκευής βασίστηκε σε επιλεγμένους συνδυασμούς φορτίσεων σε κάθε περίπτωση.

Με βάση προηγούμενη πρακτική, επιλέχθηκαν συντελεστές ασφάλειας για συγκεκριμένες κατηγορίες φορτίσεων, όπως για παράδειγμα:

1. Ορθές τάσεις στο κύριο κατάστρωμα και στον πυθμένα υπό διαμήκη κάμψη.
2. Διατμητικές τάσεις στο κύριο κατάστρωμα και στον πυθμένα υπό διαμήκη κάμψη.
3. Συνδυασμός ορθών και διατμητικών τάσεων σε τμήματα της δευτερεύουσας κατασκευής, όπως π.χ. κορμός ενισχυτικών, τοπικός και γενικός λυγισμός ενισχυμένων ελασμάτων, κ.ά.



Σχήμα 45 Α/Φ *Invincible*. Υποδιαίρεση της κατασκευής σε υπερστοιχεία

Πίνακας 8 Κύριες εξωτερικές φορτίσεις στο Α/Φ *Invincible*

1	Διαμήκης κάμψη	Έγινε χρήση του παραδοσιακού τρόπου δηλαδή εμπειρικής σχέσης και ψευδο-στατικού κύματος τροχοειδούς μορφής, ύψους $L/20$
2	Δυναμικές φορτίσεις κατά την προσγείωση των αεροσκαφών	Το κύριο κατάστρωμα σχεδιάστηκε για τις φορτίσεις αυτές, λήφθηκε επίσης υπόψη η πιθανή χρήση του σκάφους με μεγαλύτερα, ταχύτερα και βαρύτερα αεροσκάφη.
3	Αδρανειακές φορτίσεις	Για τα εκτεθειμένα καταστρώματα λήφθηκε υπόψη η αδρανειακή φόρτιση λόγω της παρουσίας των σταθμευμένων αεροσκαφών ως επίσης και το πρόσθετο φορτίο λόγω στρώματος χιονιού ή πάγου.
4	Φορτίσεις λόγω θαλάσσιου περιβάλλοντος	Υδροστατική φόρτιση, κρούση θαλάσσιου νερού σε καταστρώματα, πλευρές και πυθμένα, σφυρόκρουση

Το πρόγραμμα που επιλέχθηκε για να εκπονηθεί η μελέτη ήταν το *SESAM-69*, που είχε αναπτυχθεί από το νορβηγικό νηογνώμονα. Ο κυριότερος λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα αυτό ήταν η δυνατότητα χρήσης υπερστοιχείων, πράγμα που περιορίσε σημαντικά τους απαιτούμενους υπολογισμούς. Η υποδιαίρεση της διακριτοποιημένης κατασκευής σε υπερστοιχεία περιγράφεται στο Σχήμα 45.

Θεωρήθηκαν οι παρακάτω πέντε καταστάσεις στατικής και ψευδο-στατικής φόρτισης:

- Διαμήκης κάμψη της γάστρας (ήρεμο νερό)
- Παρουσία κατακόρυφης τέμνουσας δύναμης στο πρωραίο άκρο (προσάραξη)
- Πλοίο σε κορυφή κύματος
- Πλοίο σε κοίλο κύματος
- Κατάσταση δεξαμενισμού

Περισσότερες λεπτομέρειες έχουν δημοσιευθεί και δεν θα αναφερθούν εδώ. Ορισμένα από τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη είναι τα εξής:

- Προέκυψε έντονη αλληλεπίδραση των εντατικών πεδίων στα ανοίγματα των καταστρωμάτων στην περιοχή των υπερκατασκευών. Αυτό οδήγησε σε τροποποιήσεις στη διάταξη της κατασκευής στις περιοχές αυτές.
- Προέκυψε σημαντική απόκλιση από τη θεωρία απλών δοκών σε κάμψη.
- Διαφάνηκε ότι δεν απαιτείται να τοποθετηθούν στύλοι στο χώρο του μηχανοστασίου για να εξασφαλισθεί συνέχεια των διαμήκων φρακτών.
- Η κατανομή των διατμητικών τάσεων στην περιοχή των φρακτών των χώρων στάθμευσης των αεροσκαφών ακολουθεί την κατανομή που αντιστοιχεί στη

στατική ισορροπία του πλοίου. Αυτό είναι ενδεικτικό της συμβολής των φρακτών αυτών στην διαμήκη αντοχή του πλοίου.

Συμπεράσματα γενικής φύσεως υπήρξαν τα ακόλουθα:

- Πολλές από τις απλουστευτικές παραδοχές που γίνονται κατά τη συμβατική μελέτη ναυπηγικών κατασκευών δεν ισχύουν στην πράξη.
- Για να γίνει όσο το δυνατόν καλύτερη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων των διαθέσιμων εργαλείων πρέπει να συνδυασθεί το αριθμητικό μοντέλο της κατασκευής με ένα ακριβές μοντέλο των εξωτερικών φορτίσεων.
- Η κλίμακα της μελέτης που έγινε, με περίπου 680.000 διαφορετικές πληροφορίες για την κατασκευή και χωρίς τη χρήση προ- και μετεπεξεργαστών αποτέλεσε ένα μακροσκελές και πολύπλοκο έργο που απαίτησε τη συμβολή ενός μεγάλου αριθμού εξειδικευμένου προσωπικού.

Η συμβολή της ΜΠΣ στην ανάλυση ναυπηγικών κατασκευών μπορεί να συνοψισθεί στα παρακάτω:

1. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαλευκανθούν σημεία που με άλλους τρόπους αυτό δεν είναι δυνατόν να γίνει (π.χ. εντατική κατάσταση στις περιοχές των υπερκατασκευών).
2. Μπορεί να αξιολογηθεί με ακρίβεια η συμβολή φαινομένων όπως η υστέρηση διάτμησης, ή η ακαμψία των συνόρων διαφόρων τμημάτων της κατασκευής
3. Το κυριότερο προτέρημα της μεθόδου είναι η δυνατότητα διεξαγωγής παραμετρικών μελετών έτσι ώστε να μπορεί να γίνει με ορθολογικό τρόπο η επιλογή της μορφολογίας και των διαστάσεων τμημάτων της κατασκευής σε περιοχές που και η μορφολογία αλλά και τα φορτία είναι περίπλοκα. Για παράδειγμα, η δυναμική φόρτιση του καταστρώματος του αεροπλανοφόρου απαιτεί παραμετρική μελέτη για να γίνει σωστή επιλογή των διαστάσεων αλλά και των τύπων των ενισχυτικών που θα συγκολληθούν στο έλασμα.

5.2.2 Μελέτη του Δ/Ξ *Esso Norway*

Το 1972 ο Νορβηγικός νηογνώμονας ανέλαβε να διεκπεραιώσει την λεπτομερειακή ανάλυση τάσεων και μετατοπίσεων σε τρεις δεξαμενές του δεξαμενόπλοιου *Esso Norway*, χωρητικότητας 190.000 τόνων. Κατά την ανάλυση έγινε χρήση 145.000 βασικών στοιχείων με 240.000 αντίστοιχους βαθμούς ελευθερίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ΜΠΣ μπορεί να αποδώσει ακριβείς πληροφορίες σχετικά με τις κατανομές των τάσεων και των μετατοπίσεων σε ναυπηγικές κατασκευές. Στην ανάλυση αυτή έγινε χρήση της τεχνικής των *πολυεπίπεδων υπερστοιχείων*⁹ και με τον τρόπο αυτό επιτεύχθηκε σημαντική ελάττωση του χρόνου και του κόστους τρεξίματος του προγράμματος.

⁹ πολυεπίπεδο υπερστοιχείο = multilevel superelement

Οι πειραματικές μετρήσεις με τις οποίες έγινε σύγκριση των θεωρητικών αποτελεσμάτων έγιναν με μηχανοσυστοιχίες και ακτίνες laser, για 15 διαφορετικές καταστάσεις φόρτισης. Η ανάλυση αυτή έγινε για να:

- α) Ελεγχθεί η χρήση πολλών επιπέδων ανάλυσης του προγράμματος για πρακτικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας
- β) Εξετασθεί σε ποιο βαθμό το πολυεπίπεδο σύστημα ανάλυσης μπορεί να προσεγγίσει τις πραγματικές μετρήσεις κάνοντας χρήση απλών στοιχείων, χωρίς να προηγηθούν αναλύσεις με πλέγματα διαφόρων διατάξεων
- γ) Ελεγχθεί η ακρίβεια της τεχνικής των υπερστοιχείων για δεδομένη αποδεκτή υπολογιστική ακρίβεια

Μια κατάσταση φόρτισης περιγράφεται στο Σχήμα 46. Το φορτίο αποτελείται από την υδροστατική πίεση στον πυθμένα, στα πλευρικά ελάσματα, και στις εγκάρσιες και διαμήκεις φρακτές των δεξαμενών. Οι οριακές συνθήκες στο ένα άκρο δίνονται από τα αποτελέσματα της απλής θεωρίας των δοκών για τις κατανομές των ορθών και των διατμητικών τάσεων. Στο άλλο άκρο η κατασκευή θεωρείται πακτωμένη στη διαμήκη κατεύθυνση σε όλους τους κόμβους κατακόρυφα κατά μήκος των πλευρών του πλοίου, των διαμήκων φρακτών και της κεντρικής σταθμίδας. Η κατασκευή επίσης θεωρείται πακτωμένη στην εγκάρσια κατεύθυνση περί το κεντρικό διάμηκες επίπεδο.

Πίνακας 9 Διακριτοποίηση ενός τετάρτου δεξαμενής

Στοιχείο κατασκευής	Πλέγμα	Κόμβοι	Στοιχεία
Νομέας	92x82x3	3197x3	3944x3
Σταθμίδα	53x59	2053	2788
Πλευρά πλοίου	21x33	693	1220
Πυθμένας	21x50	1050	980
Διαμήκης φρακτή	21x42	882	1400
Στεγανή φρακτή	26x34	1023	1768
Διάτρητη φρακτή	26x19	529	1047
Ενισχυτικά φρακτής	53x13	1916	3230

5.2.2.1 Διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία

Κατά την ανάλυση θεωρείται ότι η απόκριση είναι στατική γραμμική και ελαστική. Περισσότερα από 90% των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ιστροπικά μεμβρανικά με γραμμικά μεταβαλλόμενες τάσεις και σταθερή διατμητική τάση. Τα φαινόμενα κάμψης και μεμβρανικών τάσεων ελήφθησαν υπόψη με τη χρήση στοιχείων-κελυφών μόνο στα πέλματα των νομέων της κεντρικής δεξαμενής και της κεντρικής σταθμίδας.

Για την πρωτεύουσα κατασκευή (εγκάρσιες φρακτές, διαμήκη ενισχυτικά πυθμένα, οριζόντια ενισχυτικά εγκαρσίων φρακτών), έγινε χρήση μεμβρανικών στοιχείων. Για τη δευτερεύουσα κατασκευή όπως τα ενισχυτικά του πυθμένα, των φρακτών, και τα μπρακέτα χρησιμοποιήθηκαν επίσης μεμβρανικά στοιχεία.

Για τα ενισχυτικά των πλευρικών ελασμάτων και του καταστρώματος, τα δευτερεύοντα ενισχυτικά των νομέων και φρακτών χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία-ράβδοι. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην προσομοίωση των εγκαρσίων φρακτών και των συνδέσεών τους με τον πλησιέστερο νομέα, το πλευρικό έλασμα, τη διαμήκη φρακτή και την κεντρική σταθμίδα.

Τα ανοίγματα στους νομείς ελήφθησαν υπόψη χωρίς όμως να γίνει προσπάθεια να προσομοιωθούν με ιδιαίτερη ακρίβεια οι συγκεντρώσεις τάσεων στα σημεία αυτά. Στον Πίνακα 9 δίνονται λεπτομέρειες σχετικά με τη διακριτοποίηση που χρησιμοποιήθηκε για το ένα τέταρτο της μίας δεξαμενής. Περισσότερες πληροφορίες δίνονται στα Σχήματα 47-50.

Πίνακας 10 Κατηγορίες υπερστοιχείων

<i>Επίπεδο</i>	<i>Είδη Υπερστοιχείων</i>
1	42
2	6
3	8
4	1
5	1
6	1
7	κατασκευή

5.2.2.2 Διακριτοποίηση με υπερστοιχεία

Ο κυριότερος λόγος για τον οποίο η κατασκευή υποδιαιρέθηκε σε υπερστοιχεία είναι για να περιορισθεί ο χρόνος και το κόστος τρεξίματος του προγράμματος. Η διαδικασία της διακριτοποίησης περιγράφεται στο Σχήμα 49, και ένα τυπικό υπερστοιχείο υψηλότερου επιπέδου δίνεται στο Σχήμα 50. Το στοιχείο αυτό περιλαμβάνει τα κατώτερα τμήματα τριών νομέων τα οποία συνδέονται με τη διαμήκη φρακτή και με τον πυθμένα της πλευρικής δεξαμενής.

Προσθέτοντας τα υπερστοιχεία του τρίτου επιπέδου λαμβάνεται το υπερστοιχείο του τέταρτου επιπέδου Νο. 1 που περιλαμβάνει το ένα τέταρτο της ανοικτής δεξαμενής (Σχήμα 50).

Στο έκτο επίπεδο το υπερστοιχείο περιλαμβάνει μία ολόκληρη δεξαμενή και την αντίστοιχη φρακτή στο ένα άκρο. Η όλη σύνθεση του μοντέλου από το δεύτερο μέχρι και το έβδομο επίπεδο περιγράφεται στο Σχήμα 49. Σημειώνεται ότι η πλήρης κατασκευή δεν θεωρείται ως υπερστοιχείο διότι δεν έχει εξωτερικούς βαθμούς ελευθερίας. Ο αριθμός των ειδών των υπερστοιχείων σε κάθε επίπεδο δίνεται παρακάτω.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η διακριτοποίηση επιλέχθηκε έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί κατά το δυνατόν ο χρόνος προετοιμασίας των δεδομένων και τρεξίματος του προγράμματος. Η επιλογή των υπερστοιχείων έγινε ώστε να είναι δυνατή η επαναληπτική χρήση τους και ταυτόχρονα να ελαχιστοποιηθεί το εύρος λωρίδας των μητρώων ακαμνίας.

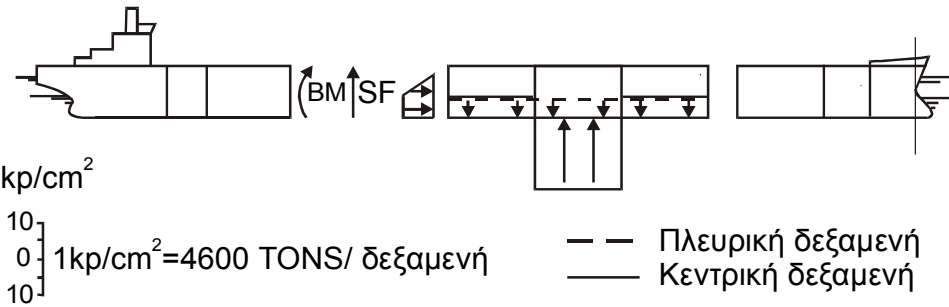
Κατά κανόνα το τμήμα της κατασκευής που προσομοιώνεται πρέπει να επεκτείνεται έτσι ώστε να μην επηρεάζονται σημαντικά τα τελικά αποτελέσματα από τα σφάλματα στις κατανομές των οριακών φορτίσεων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι οριακές συνθήκες προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας εξομαλυσμένες κατανομές των ροπών και των διατμητικών τάσεων που αποκτήθηκαν από μία ανάλυση όλου του πλοίου, θεωρούμενου ως δοκού.

Το μοντέλο αυτό περιέλαβε τρεις δεξαμενές και κατά τη διακριτοποίηση χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία σταθερών διαστάσεων σε σχετικά λεπτομερές επίπεδο ανάλυσης. Αυτό επιτεύχθηκε με την επαναληπτική χρήση υπερστοιχείων μίας μόνο δεξαμενής, με αμελητέα αύξηση κόστους. Η διαδικασία αυτή είναι οικονομικότερη από την εναλλακτική λύση κατά την οποία χρησιμοποιείται αρχικά αραιό πλέγμα για τη διακριτοποίηση όλης της κατασκευής του πλοίου έτσι ώστε να προσδιορισθούν με μεγαλύτερη σχετική ακρίβεια οι οριακές συνθήκες του μοντέλου κατά το επόμενο στάδιο. Το πρόσθετο κόστος επέκτασης του μοντέλου από μία σε τρεις δεξαμενές ήταν περίπου 5%.

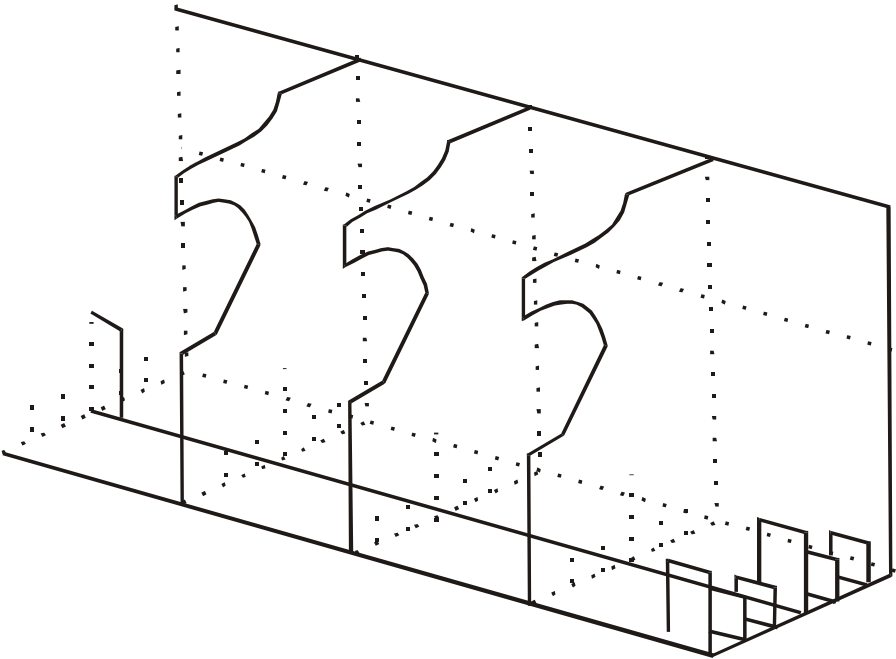
5.2.2.3 Επιλεγμένα αποτελέσματα

Στο Σχήμα 51 δίνονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις των τριών δεξαμενών. Η τοπική κάμψη στην τρίτη δεξαμενή ήταν η αναμενόμενη, διαπιστώθηκε όμως ότι η άντωση επηρεάζει αρκετά τη συμπεριφορά της διαμήκους και της εγκάρσιας φρακτής της κεντρικής δεξαμενής. Αντίθετα, στην πλευρά του πλοίου η συμπεριφορά δεν επηρεάζεται αισθητά (κάμψη ως δοκός).

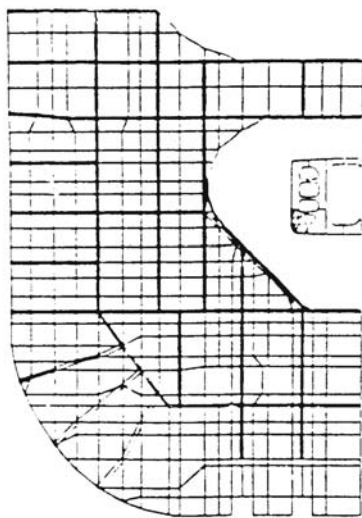
Στο Σχήμα 52 περιλαμβάνονται λεπτομερέστερα αποτελέσματα και διαπιστώνεται ότι και οι στεγανές φρακτές μετατοπίζονται σε σημαντικό βαθμό λόγω διατμητικών φορτίσεων, γεγονός που επισημαίνει ότι η συνήθης παραδοχή της σχετικά μεγάλης ακαμνίας των φρακτών είναι εσφαλμένη. Η κατακόρυφη μετατόπιση των φρακτών φθάνει το ήμισυ των μετατοπίσεων των νομέων, ενώ οι μετατοπίσεις της ενδιάμεσης εγκάρσιας φρακτής φθάνουν το 90% της μέγιστης μετατόπισης. Στο Σχήμα 53 συγκρίνονται τα θεωρητικά αποτελέσματα με πειραματικές μετρήσεις (κάνοντας χρήση ακτινών laser, συρμάτων) των κατακόρυφων μετατοπίσεων.



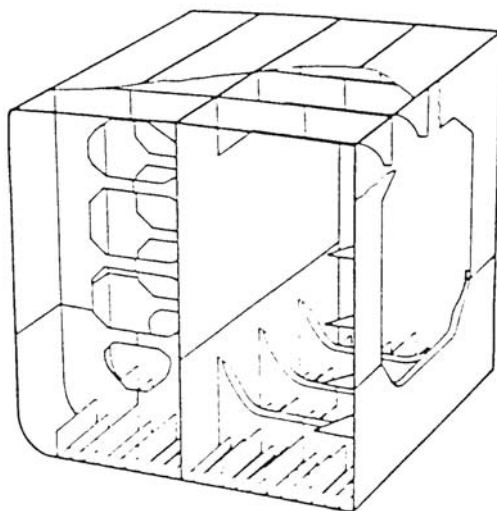
Σχήμα 46 Φόρτιση κεντρικών δεξαμενών του *Esso Norway*



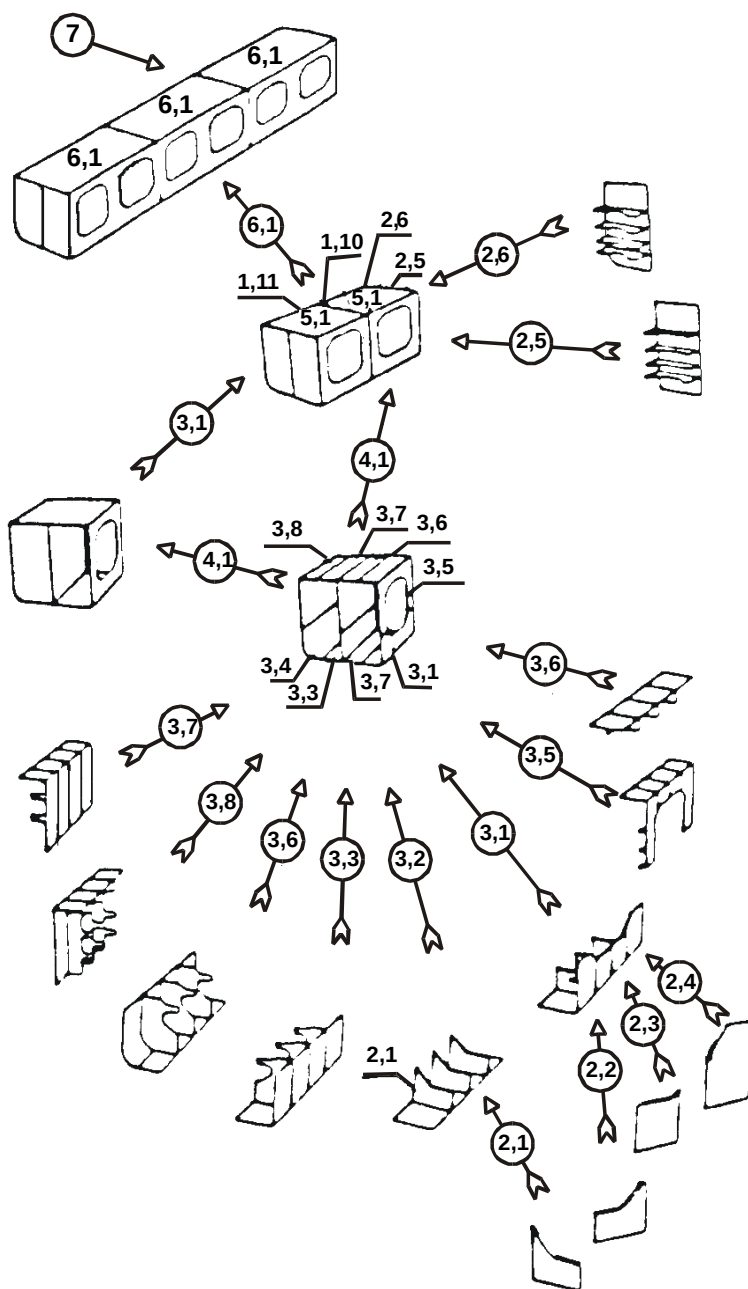
Σχήμα 47 Τυπικό υπερστοιχείο



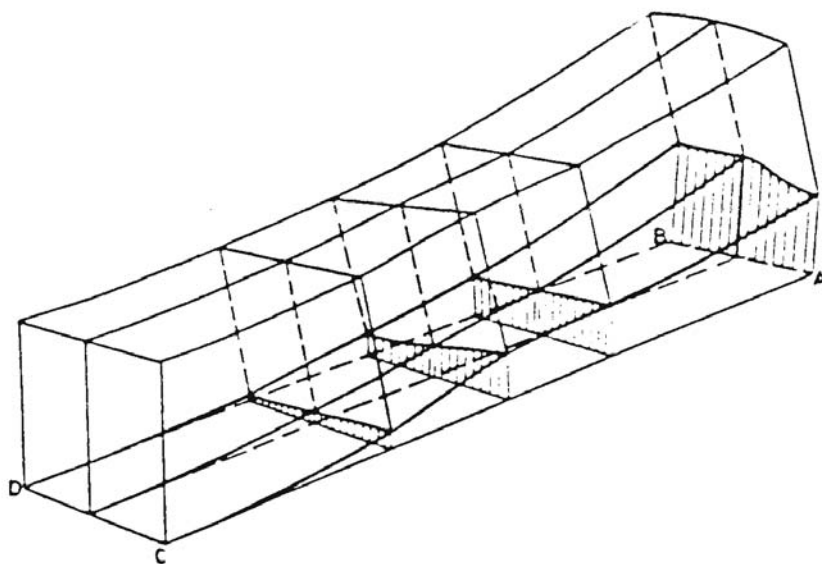
Σχήμα 48 Διακριτοποίηση νομέα



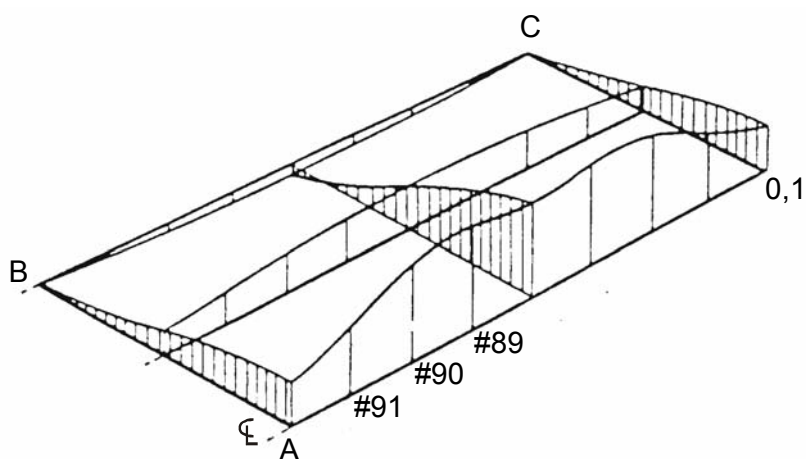
Σχήμα 49 Τμήμα δεξαμενής



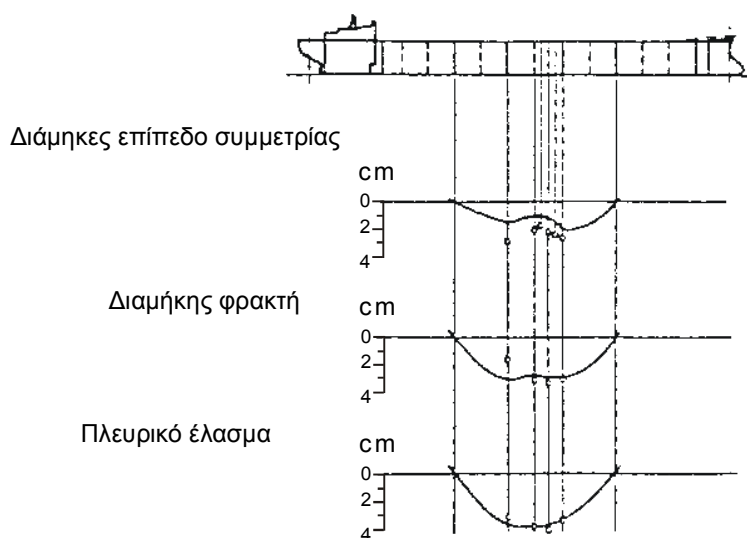
Σχήμα 50 Διακριτοποίηση κατασκευής με υπερστοιχεία



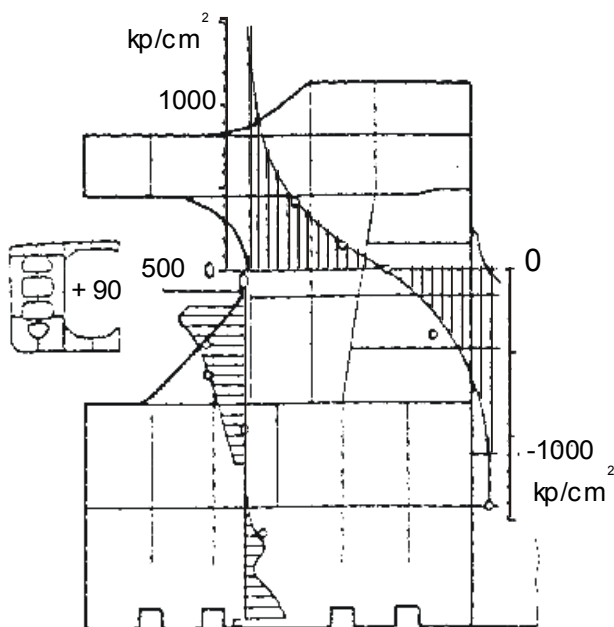
Σχήμα 51 Κατακόρυφη μετατόπιση του πυθμένα



Σχήμα 52 Μετατοπίσεις του πυθμένα της δεξαμενής No. 3



Σχήμα 53 Κατακόρυφες μετατοπίσεις της διατομής
(θεωρητικά αποτελέσματα και πειραματικές μετρήσεις)

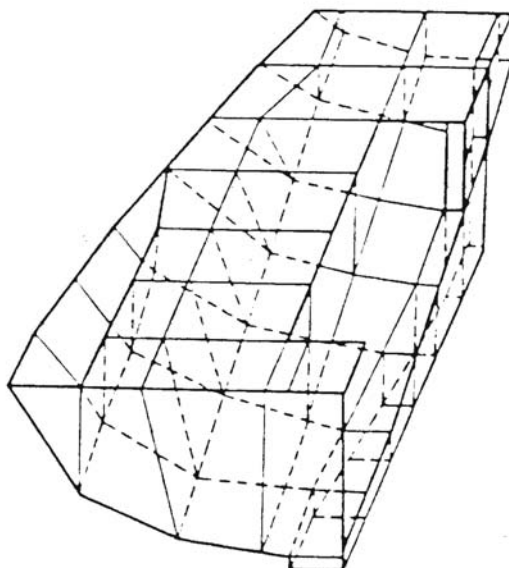


Σχήμα 54 Ορθές τάσεις στον νομέα 90
(θεωρητικά αποτελέσματα και πειραματικές μετρήσεις)

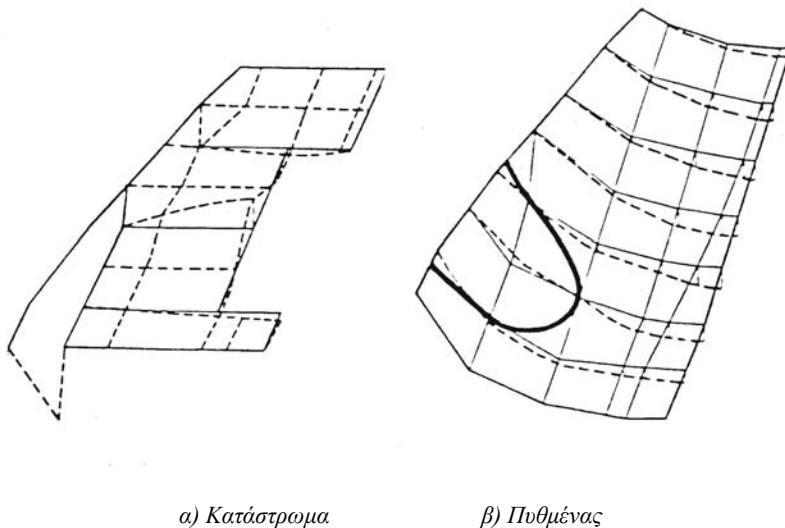
5.2.2.4 Μελέτη κατασκευής υπό δυναμική φόρτιση

Το τελευταίο σχήμα δίνει συγκριτικά αποτελέσματα για τις κατανομές των τάσεων (ορθών και διατμητικών) στον νομέα 90 της δεξαμενής Νο. 3. Στα περισσότερα σημεία τα θεωρητικά αποτελέσματα συμφωνούν με τις μετρήσεις, εκτός όμως από ορισμένες περιπτώσεις στις οποίες παρατηρούνται σημαντικές διαφορές (Σχήμα 54, κατανομές ορθών τάσεων). Άλλες διαφορές παρατηρούνται στην κατανομή των εγκάρσιων ορθών τάσεων στο κατώτερο τμήμα του νομέας 90, κοντά στη σύνδεση με τη διαμήκη φρακτή. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στο ότι το πρόγραμμα εκπονεί γραμμική ελαστική ανάλυση ενώ στην πραγματική κατασκευή οι κατανομές είναι μη-γραμμικές λόγω φαινομένων λυγισμού.

Πριν κλείσει το κεφάλαιο αυτό θεωρείται σκόπιμο να αναφερθεί ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων δε βρίσκει εφαρμογή μόνο στη στατική μελέτη της μεταλλικής κατασκευής. Ένα παράδειγμα μελέτης δυναμικής απόκρισης αποτελεί η συμπεριφορά της κατασκευής στο χώρο του μηχανοστασίου που διεγείρεται από τις ταλαντώσεις (κραδασμοί) της κύριας μηχανής και του αξονικού συστήματος. Η περιγραφή της δυναμικής απόκρισης τμημάτων της κατασκευής του πλοίου είναι ένα πιο σύνθετο πρόβλημα από τη συμβατική στατική μελέτη. Αυτό συμβαίνει διότι, ενώ μεν υπάρχουν λύσεις για τις περιπτώσεις των μεμονωμένων τμημάτων (δοκοί, ορθογώνια ελάσματα κλπ), για την πραγματική κατασκευή του πλοίου η μελέτη καθίσταται πιο περίπλοκη, διότι έχει τρισδιάστατη μορφή και δεν υπάρχουν γνωστά σημεία σύγκρισης και αναφοράς, ιδιαίτερα για την περιοχή της πρύμνης.



Σχήμα 55 Διακριτοποίηση τμήματος μηχανοστασίου



Σχήμα 56 Ιδιοσυχνότητες ταλαντώσεων μηχανοστασίου

Το Σχήμα 55 δείχνει το μοντέλο μηχανοστασίου πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG). Η διακριτοποίηση έχει γίνει με στοιχεία-δοκούς και στοιχεία-ελάσματα για τα ενισχυτικά και τα ελάσματα αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού των ιδιοσυχνοτήτων δεν ήσαν τα αναμενόμενα διότι βρέθηκε ότι το κατάστρωμα είχε τη χαμηλότερη ιδιοσυχνότητα (8,5 Hz) απ' όλες τις περιοχές της κατασκευής του μηχανοστασίου. Το Σχήμα 56 δείχνει ότι η μορφή ταλάντωσης επηρεάζεται σ' αυτή την περίπτωση από τον τρόπο στήριξης των στροβιλογεννητριών στο κατάστρωμα. Η ιδιοσυχνότητα του πυθμένα ήταν 9,6 Hz.

Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει πιθανότητα συντονισμού του καταστρώματος και του πυθμένα διότι η ιδιοσυχνότητα της έλικας (πέντε πτερυγίων) ήταν 8,6 Hz.

Το γεγονός όμως ότι μία κατασκευή διεγείρεται σε συχνότητες κοντά στην ιδιοσυχνότητά της δεν σημαίνει αναγκαστικά ότι θα προκληθούν ζημίες ή ότι δεν είναι αποδεκτή η διάταξη της κατασκευής. Θα πρέπει επίσης να γίνουν και υπολογισμοί των δυνάμεων διέγερσης.

Βιβλιογραφία

- 1 The Swedish Ship Research Association. *Finite element modelling of ship structures. I Handbook*, SSF Report 145, Göteborg, Sweden, 1978.
- 2 Lloyd's Register of Shipping. *ShipRight Structural Design Assessment procedure*. Version 2.0, April 1996, London.
- 3 Det Norske Veritas *Strength Analysis of Hull Structures in Bulk Carriers and Container Ships*. Classification Notes, Note No. 31.1, Høvik, Norway, May 1980.
- 4 Araldsen P.O. "An example of large scale structural analysis. Comparison between finite element calculation and full-scale measurements on oil tanker

Esso Norway”. Πρακτικά συνεδρίου *Application of computerised methods in analysis and design of ship structures, marine structures and machinery*. Det Norske Veritas, Høvik, Norway, 1972.

- 5 Hansen H.P. “Some examples of the application of the finite element method to ship structures”. Πρακτικά συνεδρίου *Application of computerised methods in analysis and design of ship structures, marine structures and machinery*. Det Norske Veritas, Høvik, Norway, 1972.