ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Μελέτη της Αντοχής Γάστρας Πλοίου με τη Μέθοδο των Κύριων Τάσεων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ Κ. ΧΡΗΣΤΟΥ

Επιβλέπων: Πέτρος Καρύδης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιανουάριος 2017

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Μελέτη της Αντοχής Γάστρας Πλοίου με τη Μέθοδο των Κύριων Τάσεων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ Κ. ΧΡΗΣΤΟΥ

Επιβλέπων: Πέτρος Καρύδης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .... 2017.

(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)
....	....	....
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιανουάριος 2017

(Υπογραφή)

....

ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ Κ. ΧΡΗΣΤΟΣ

Διπλωματούχος Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη προγράμματος σε περιβάλλον MATLAB, το οποίο να υπολογίζει τις κύριες τάσεις στη γάστρα ενός πλοίου και τις ισοτασικές τους καμπύλες με βάση την θεωρία κάμψης Euler-Bernoulli για δεδομένη φόρτωση σε ήρεμο νερό.

Πιο συγκεκριμένα ο κώδικας έχοντας ως είσοδο μόνο τη γεωμετρία της γάστρας και την φόρτωση του πλοίου δύναται να υπολογίσει την άντωση, τις διατμητικές δυνάμεις και καμπτικές ροπές. Αναπτύχθηκε ώστε να αναγνωρίζει διάφορα κατασκευαστικά στοιχεία ως γεωμετρικές οντότητες και να υπολογίζει τις ορθές, τις διατμητικές τάσεις και στη συνέχεια τις κύριες τάσεις και τις τάσεις Von Mises. Ο κώδικας έχει τη δυνατότητα, σε αντίθεση με άλλες παρόμοιες μελέτες, να κάνει αυτούς τους υπολογισμούς για οποιαδήποτε γεωμετρία συμβατικής γάστρας ή ακόμα και για την ίδια γάστρα με προσθαφαίρεση κατασκευαστικών στοιχείων.

Το πρόγραμμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να λαμβάνονται γρήγορες εκτιμήσεις του μεγέθους των τάσεων και των κρίσιμων περιοχών πριν γίνει μια λεπτομερέστερη μελέτη με πεπερασμένα στοιχεία.

Λέξεις Κλειδιά: τάσεις, κύριες τάσεις, Euler-Benoulli, προγραμματισμός, αντοχή γάστρας, κάμψη, ήρεμο νερό

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Abstract

The scope of this thesis is the development of a program in MATLAB suite, which computes the principal stresses of a ship's hull and their isocurves using Euler-Bernoulli bending theory for still water bending.

Specifically the code can calculate the buoyancy, the shear forces and bending moments of the ship's hull using the weight curve and hull geometry as inputs only. It was developed so as to recognize several structural components represented by geometric entities and calculate the normal stresses, the shear stresses, the principal stresses and the Von Mises stresses. The code is able to perform these calculations for any regular hull geometry or even for the same hull using modifications, in contrast to other similar research.

The program can be used in order to obtain quick estimates of the stresses' magnitude and of the danger zones before a more precise FEM calculation.

Keywords: stresses, principal stresses, Euler-Bernoulli, programming, hull strength, bending, still water

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Καρύδη για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και για την στήριξή του στην προσπάθεια που κατέβαλα. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη μητέρα μου για την καθοδήγησή της και τη φροντίδα της όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη σύντροφό μου Στέλλα για την έμπνευση και την ηθική συμπαράσταση που μου προσέφερε.

στην Καρολίνα

Πίνακας περιεχομένων

1

Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο διπλωματικής

Η διπλωματική αυτή ασχολείται με τη διαδικασία υπολογισμού των τάσεων και των κύριων τάσεων στη γάστρα των πλοίων. Χρησιμοποιώντας τη βασική θεωρία της κάμψης δοκών και της υδροστατικής θεωρίας των μικρών μεταβολών αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα σε περιβάλλον MATLAB που α) αναγνωρίζει τη γεωμετρία της γάστρας β) υπολογίζει από το βάρος τις καμπύλες των διατμητικών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών γ) υπολογίζει τις τάσεις, τις κύριες τάσεις και τις τάσεις Von Mises και τέλος δ) τις παρουσιάζει σε τριδιάστατα έγχρωμα διαγράμματα, σε διαγράμματα ισοτασικών καμπυλών και σε διδιάστατες απεικονίσεις των νομέων.

Στη συνέχεια έγινε εφαρμογή του κώδικα για τη μελέτη ενός πλοίου με κατάστρωμα και χωρίς. Επιπλέον, μελετήθηκε η ύπαρξη των εγκάρσιων φρακτών στην κατανομή των ορθών και των διατμητικών τάσεων.

1.1.1 Συνεισφορά

Η συνεισφορά της διπλωματικής συνοψίζεται ως εξής:

1. Αναπτύξαμε μεθόδους αναγνώρισης της γεωμετρίας της γάστρας
2. Αναπτύξαμε μεθόδους απεικόνισης των τάσεων σε MATLAB
3. Εκτιμήσαμε την προσφορά του καταστρώματος στη διαμήκη αντοχή
4. Εκτιμήσαμε την επίδραση των εγκαρσίων φρακτών στις διατμητικές τάσεις

1.2 Πακέτα MATLAB και ABAQUS

Το λογισμικό **MATLAB**, που παίρνει το όνομά του από τις λέξεις MATrix LABoratory, είναι ένα σύγχρονο ολοκληρωμένο μαθηματικό πακέτο που χρησιμοποιείται εκτενώς στα πανεπιστήμια και στη βιομηχανία. Είναι ένα διαδραστικό (interactive) πρόγραμμα για αριθμητικούς υπολογισμούς και για κατασκευή γραφημάτων, αλλά παρέχει επίσης και τη δυνατότητα προγραμματισμού, κάτι που το καθιστά ένα χρησιμότατο εργαλείο για όλους όσους ασχολούνται με τις θετικές επιστήμες (και όχι μόνο). Σε αντίθεση με τα λογισμικά MAPLE και MATHEMATICA, το MATLAB στις αρχικές του εκδοχές δεν έκανε συμβολικούς υπολογισμούς. Στις νεότερες εκδοχές του, το πακέτο περιλαμβάνει εργαλειοθήκες που επιτρέπουν συμβολικούς υπολογισμούς.

Όπως υποδηλώνεται και από το όνομα του, το MATLAB είναι ειδικά σχεδιασμένο για υπολογισμούς με πίνακες, όπως η επίλυση γραμμικών συστημάτων, η εύρεση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων, η αντιστροφή τετραγωνικού πίνακα κλπ. Επιπλέον το πακέτο αυτό είναι εφοδιασμένο με πολλές επιλογές για γραφικά (δηλ. την κατασκευή γραφικών παραστάσεων) και προγράμματα γραμμένα στη δική του γλώσσα προγραμματισμού για την επίλυση άλλων προβλημάτων όπως η εύρεση των ριζών μη γραμμικής εξίσωσης, η επίλυση μη γραμμικών συστημάτων, η επίλυση προβλημάτων αρχικών τιμών με συνήθεις διαφορικές εξισώσεις κ.α. Η γλώσσα προγραμματισμού του MATLAB δίνει την ευχέρεια στον χρήστη να το επεκτείνει με δικά του προγράμματα. Συχνά θα λέμε η MATLAB (εννοώντας τη γλώσσα προγραμματισμού) και όχι το (πακέτο) MATLAB.

Το MATLAB είναι σχεδιασμένο για την αριθμητική επίλυση προβλημάτων σε αριθμητική πεπερασμένης ακρίβειας (finite-precision arithmetic). Με άλλα λόγια, δεν βρίσκει την ακριβή λύση αλλά μια προσεγγιστική λύση ενός προβλήματος. Αυτή είναι και η βασική του διαφορά από τα συστήματα συμβολικών υπολογισμών όπως το Maple και το Mathematica.[10]

Το **Abaqus** είναι γενικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των τάσεων και των θερμοκρασιακών πεδίων σε κατασκευές. Το παρόν κεφαλαίο αποτελεί έναν σύντομο οδηγό χρήσης του προγράμματος. Κάθε νέος χρήστης έχοντας μελετήσει το εγχειρίδιο αυτό θα είναι σε θέση να αναλύσει αρκετά πιο πολύπλοκα προβλήματα.

Αρχικά, ο αντικειμενικός σκοπός είναι η σύνταξη ενός αρχείου όπου περιγράφονται τα δεδομένα και τα ζητούμενα του προβλήματος. Το αρχείο αυτό αναφέρεται στο εξής ως input file. Είναι προφανές πως πολύπλοκα προβλήματα απαιτούν ένα εκτεταμένο input file, το οποίο δεν είναι δύσκολο να συνταχθεί αν ακολουθηθεί η κατάλληλη μέθοδος κάθε φορά.[11]

1.3 Οργάνωση κειμένου

Ας δούμε περιληπτικά τι περιέχει η παρούσα διπλωματική. Στο 2ο κεφάλαιο θα δούμε το γενικό θεωρητικό πλαίσιο στο οποίο στηριχτήκαμε, στο 3ο κεφάλαιο θα σχολιάσουμε διάφορα προβλήματα που αντιμετωπίσαμε στην ανάπτυξη του κώδικα, στο 4ο κεφάλαιο θα μελετήσουμε την εφαρμογή του κώδικα σε ένα πλοίο, στο 5ο κεφάλαιο θα αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα του κώδικα, στο 6ο κεφάλαιο θα προτείνουμε ζητήματα προς επίλυση για μελλοντική έρευνα και στο παράρτημα παρουσιάζουμε αναλυτικά τον κώδικα.

2

Θεωρητικό υπόβαθρο

Στη μελέτη μας το πλοίο θεωρήθηκε ως μία δοκός με λεπτόπαχα τοιχώματα η οποία βρίσκεται σε κάμψη εξαιτίας τους βάρους στο οποίο αντιστέκεται η άνωση του πλοίου σε ήρεμο νερό. Για τον υπολογισμό των τάσεων χρησιμοποιήθηκε εξιδανικευτικά η θεωρία κάμψης δοκού Euler-Bernoulli ενώ για τον υπολογισμό της άντωσης η βασική θεωρία της Υδροστατικής Άθικτου Πλοίου. Παρακάτω αναλύονται έννοιες της αντοχής υλικών όπως οι τάσεις και οι παραμορφώσεις (τροπές) με τον τρόπο που ορίζονται στη Θεωρία των Παραμορφωτών Σωμάτων, οι καμπύλες των διατμητικών τάσεων και καμπτικών ροπών, η διατμητική ροή, η διαμήκης κλίση του πλοίου, η καμπύλη άντωσης και οι καμπύλες Bonjean.

2.1 Θεωρία κάμψης

2.1.1 Τάσεις και Τροπές

Τις δυνάμεις τις διακρίνουμε σε *εξωτερικές* που ενεργούν επάνω σε ένα σώμα και σε *εσωτερικές* που αναπτύσσονται μεταξύ δύο τμημάτων του σώματος. Για να εξετάσουμε όμως τη συμπεριφορά ενός τμήματος του σώματος το θεωρούμε αποκομμένο και αποχωρισμένο, σαν ένα νέο ελεύθερο σώμα με εξωτερικές δυνάμεις εφαρμοσμένες στις υποθετικές επιφάνειες τομής ακριβώς ίσες με τις εσωτερικές αντιδράσεις που εξασκούνται εκεί στο άκοπο σώμα.

α) **Εξωτερικές δυνάμεις.** Οι εξωτερικές δυνάμεις που ενεργούν επάνω σε ένα ελεύθερο σώμα διακρίνονται σε **μαζικές** και **επιφανειακές.**

1) Οι **μαζικές δυνάμεις** ενεργούν "εξ αποστάσεως" και είναι κατανεμημένες στον όγκο του σώματος. Προξενούνται από άλλα σώματα ή αίτια και εκφράζονται σαν πεδία δυνάμεων ανά μονάδα μάζας ή όγκου.

2) Οι **επιφανειακές δυνάμεις** ενεργούν επάνω στο σώμα "εξ επαφής" με άλλα σώματα, είναι γενικά κατανεμημένες σε τμήματα της συνοριακής του επιφάνειας και εκφράζονται σαν δυνάμεις ανά μονάδα εμβαδού.

β) **Εσωτερικές αντιδράσεις.** Εξετάζουμε ένα σώμα φορτισμένο με μαζικές και επιφανειακές δυνάμεις, που μπορεί να ισορροπεί ή να έχει οποιαδήποτε κίνηση, και θεωρούμε μια τομή που χωρίζει το σώμα στα δύο τμήματα Ι και ΙΙ, δημιουργώντας δύο νέες επιφάνειες, την E_1 του τμήματος Ι και την E_2 του ΙΙ (Εικ. 2.1α). Το τμήμα ΙΙ ενεργεί επάνω στο Ι με μια συνολική συνισταμένη δύναμη $\mathbf{R}$ και μια ολική ροπή $\mathbf{M}$ ως προς ένα πόλο Π (π.χ. το κέντρο της διατομής). Δεχόμαστε όμως ότι στην επιφάνεια E_1 της τομής δεν ενεργούν ροπές ανά μονάδα εμβαδού (τάσεις ζεύγους), αλλά μόνον επιφανειακές δυνάμεις $\mathbf{S(r)}$ ανά μονάδα εμβαδού, τέτοιες ώστε η κατανομή $\mathbf{S(r)}$ να είναι ισοπολική με τις $\mathbf{R}$, $\mathbf{M}$ σχετικά με το σημείο Π. Αντίστοιχα και το τμήμα Ι ενεργεί επάνω στο ΙΙ με μια συνισταμένη δύναμη και μια ολική ροπή ίσες και αντίθετες στις $\mathbf{R}$, $\mathbf{M}$: είναι τα ζεύγη ίσων και αντίθετων εσωτερικών αντιδράσεων. Η ολική δύναμη και ροπή μεταβιβάζονται από το τμήμα Ι στο ΙΙ σαν επιφανειακές δυνάμεις ανά μονάδα εμβαδού επάνω στην επιφάνεια E_2 του τμήματος ΙΙ, που είναι ίσες και αντίθετες στις $\mathbf{S(r)}$ του τμήματος Ι στα αντίστοιχα σημεία.

Η επιφανειακή δύναμη $\mathbf{S}$ στο σημείο O της επιφάνειας E_1 μπορεί να ορισθεί με τον επόμενο τρόπο. Διαλέγουμε επάνω στην E_1 μια περιοχή με εμβαδόν ΔA και μέγιστη διάσταση Δa, που να περιέχει το O σαν εσωτερικό σημείο (Εικ. 2.1α). Οι κατανεμημένες δυνάμεις που αναπτύσσονται στο τμήμα ΔA της E_1 λόγω ενεργείας του τμήματος ΙΙ επί του Ι, θα έχουν μια συνισταμένη δύναμη $\Delta\mathbf{R}$ (Εικ. 2.1β) ίση με ένα μέρος της ολικής δύναμης $\mathbf{R}$, και θα δίνουν μια ροπή $\Delta\mathbf{M}$ περί τον πόλο *Π* περί τον οποίο νοείται και η ολική ροπή $\mathbf{M}$. Ονομάζουμε **μέση τάση** επί της περιοχής ΔA, το πηλίκον

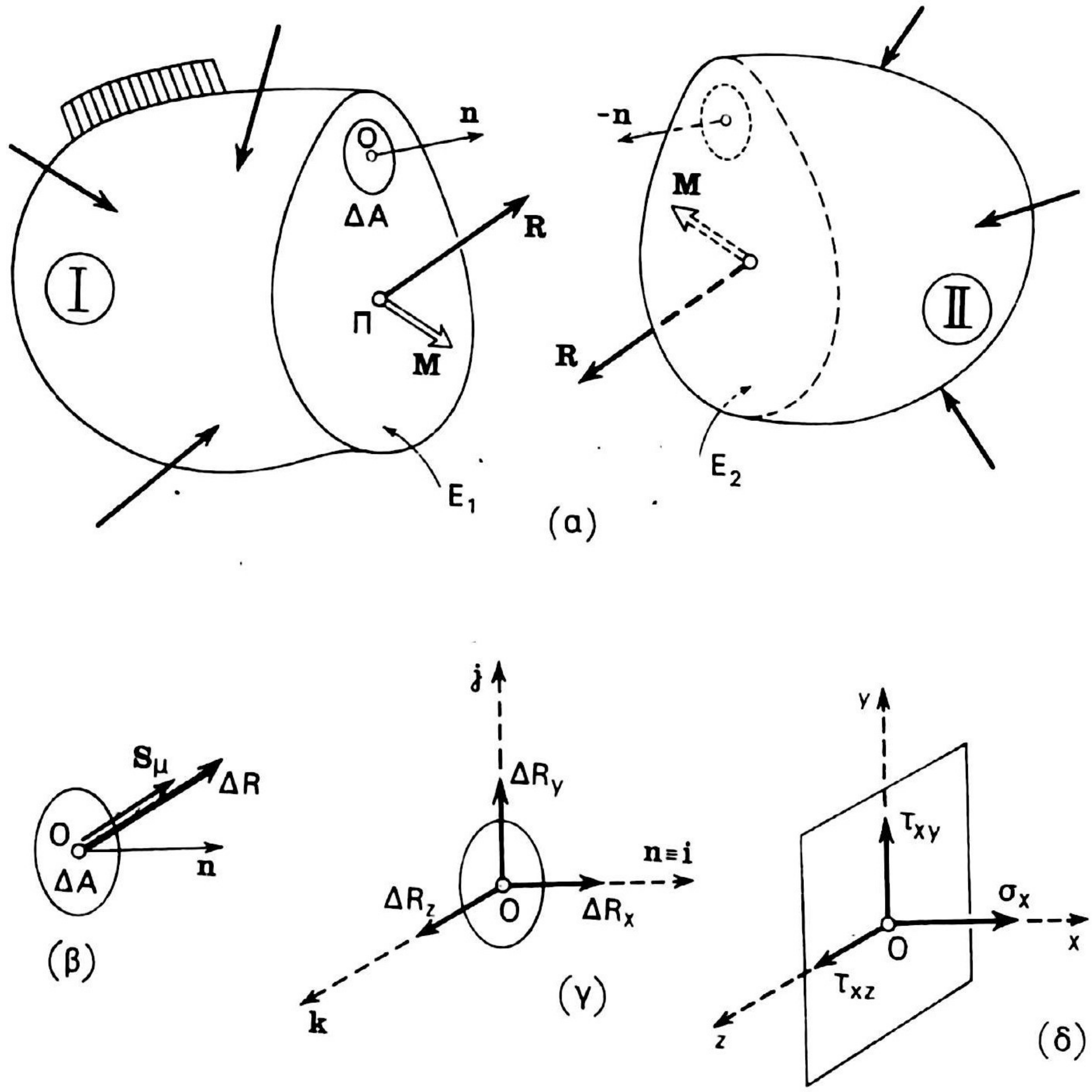
$$\boldsymbol{S}_{\mu}=\frac{\Delta\boldsymbol{R}}{\Delta A} \tag{2.1}$$

και θεωρούμε ότι η περιοχή ΔA μικραίνει με τέτοιο τρόπο ώστε η μέγιστη διάσταση Δa να τείνει στο μηδέν, οπότε και $\Delta A \to 0$. Το όριο $\Delta\mathbf{R}/\Delta A$ που δεχόμαστε ότι υπάρχει, ορίζει την επιφανειακή δύναμη ανά μονάδα εμβαδού ή **ολική τάση** $\mathbf{S}$ επί της επιφάνειας E_1 στο σημείο *O*.

$$\boldsymbol{S}=\lim_{\Delta A\to 0}\frac{\Delta\boldsymbol{R}}{\Delta A} \tag{2.2}$$

Δεχόμαστε ότι η $\mathbf{S}(\mathbf{r})$ είναι συνεχής συνάρτηση της θέσης, εκτός ίσως σε ένα πεπερασμένο αριθμό επιφανειών ασυνέχειας των ιδιοτήτων του υλικού, με ολική συνισταμένη $\mathbf{R}$ στην επιφάνεια της τομής *E*.

$$\int_A \boldsymbol{S}\,dA=\boldsymbol{R} \tag{2.3}$$



Εικόνα 2.1: (a) Ολικές εσωτερικές αντδράσεις στην επιφάνεια τομής φορτωμένου σώματος: δύναμη $\boldsymbol{R}$ *και ροπή* $\boldsymbol{M}$ *(β) Αντίδραση* $\Delta\boldsymbol{R}$ *και τάση* $\boldsymbol{S}$ *σε μια μικρή περιοχή της επιφάνειας (γ), (δ) ορθή και διατμητικές συνιστώσες της τάσης σε ένα σημείο της επιφάνειας τομής.*

Οι τάσεις $\mathbf{S}$ στην περιοχή ΔA προξενούν και τη ροπή $\Delta\mathbf{M}$ περί το κέντρο Π

$$\Delta\boldsymbol{M} \cong \boldsymbol{r}\times\Delta\boldsymbol{R} \cong \boldsymbol{r}\times\boldsymbol{S}\,\Delta A \tag{2.4}$$

και η κατανομή τους στην επιφάνεια τομής δίνει τη ροπή $\mathbf{M}$ περί το Π

$$\int_A \boldsymbol{r}\times\boldsymbol{S}\,dA = \boldsymbol{M} \tag{2.5}$$

Βλέπουμε ότι η κατανομή $\mathbf{S(r)}$ είναι ισοπολική με τις ολικές αντιδράσεις $\mathbf{R}$, $\mathbf{M}$ χωρίς να έχουν χρησιμοποιηθεί κατανεμημένες ροπές ανά μονάδα επιφανείας (τάσεις ζεύγους), ώστε αν στην επιφάνεια ΔA αναπτύσσεται μια ροπή $\Delta\mathbf{M_0}$ *περί το κέντρο Ο της* ΔA, θα είναι

$$\frac{\Delta \boldsymbol{M_0}}{\Delta A} \underset{\Delta A \to 0}{\to} 0 \tag{2.6}$$

Οι τάσεις ζεύγους αποκλείονται στην κλασική μηχανική του συνεχούς μέσου, αλλά γίνονται δεκτές σε άλλες ειδικές θεωρίες.

Είτε αναλύοντας τη $\Delta\mathbf{R}$ στις ορθογώνιες συνιστώσες ΔR_x, παράλληλη στην εξωτερική κάθετο **n** της E_1 στο O, και ΔR_y, ΔR_x συνεπίπεδες με την επιφάνεια ΔA (Εικ. 2.1γ), διαιρώντας δια ΔA και μεταβαίνοντας στο όριο $\Delta A \to 0$, είτε αναλύοντας την **S** σε συνιστώσες κατά τους αντίστοιχους άξονες $Oxyz$ με $Ox \parallel$ **n,** βρίσκουμε την **ορθή τάση** σ_x ή (σ_{xx}) που ενεργεί κάθετα στη ΔA, και τις δύο **διατμητικές τάσεις** τ_{xy}, τ_{xz} που ενεργούν εφαπτομενικά (Εικ. 2.1δ)

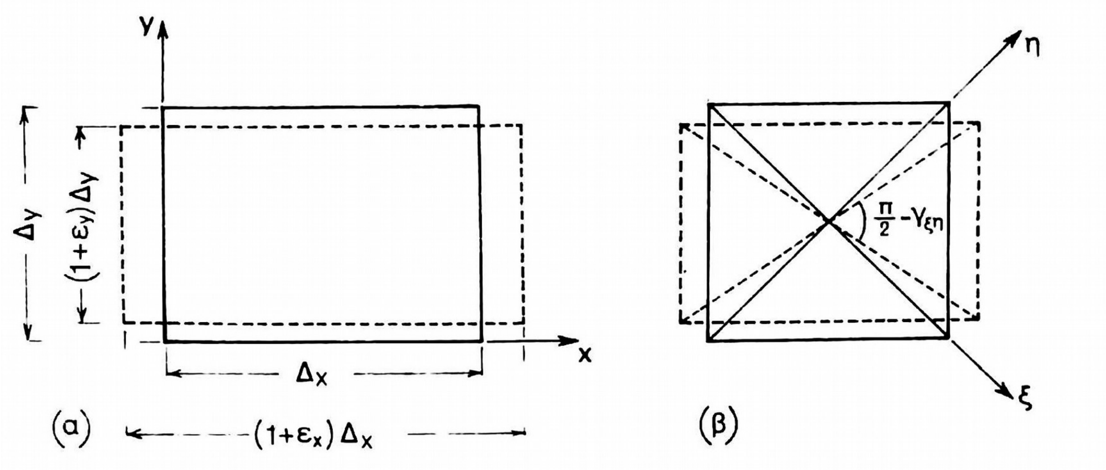
$$\left.\begin{aligned} \sigma_x &= \lim \frac{\Delta R_x}{\Delta A} \\ \tau_{xy} &= \lim \frac{\Delta R_y}{\Delta A} \\ \tau_{xz} &= \lim \frac{\Delta R_z}{\Delta A} \end{aligned}\right\} \quad \text{ή} \quad \left.\begin{aligned} \sigma_x &= \boldsymbol{S}\cdot\boldsymbol{i} = S_x \\ \tau_{xy} &= \boldsymbol{S}\cdot\boldsymbol{j} = S_y \\ \tau_{xz} &= \boldsymbol{S}\cdot\boldsymbol{k} = S_z \end{aligned}\right\} \tag{2.7}$$

Παραμορφώσεις επιβάλλονται στα σώματα ή αναπτύσσονται λόγω φορτίσεως, θερμάνσεως, υγράνσεως ή άλλων αιτίων. Θα εξετάσουμε τώρα την παραμόρφωση ανεξαρτήτως αιτίων, και αργότερα θα την συσχετίσουμε με τις τάσεις που τις προξενούν. Η παραμόρφωση ενός στοιχειώδους ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου $\Delta x \Delta y \Delta z$ νοείται επί πλέον κάθε μετακίνησής του ως στερεού και συνίσταται σε **μεταβολές μήκους** $\delta\Delta x$, $\delta\Delta y$, $\delta\Delta z$ των ακμών, που δεχόμαστε πολύ μικρότερές τους (Εικ. 2.2), και σε μεταβολές γωνιών. Τους λόγους των μεταβολών μήκους προς τα αρχικά μήκη των αντίστοιχων ακμών ονομάζουμε **ορθές τροπές** ε_x, ε_y, ε_z

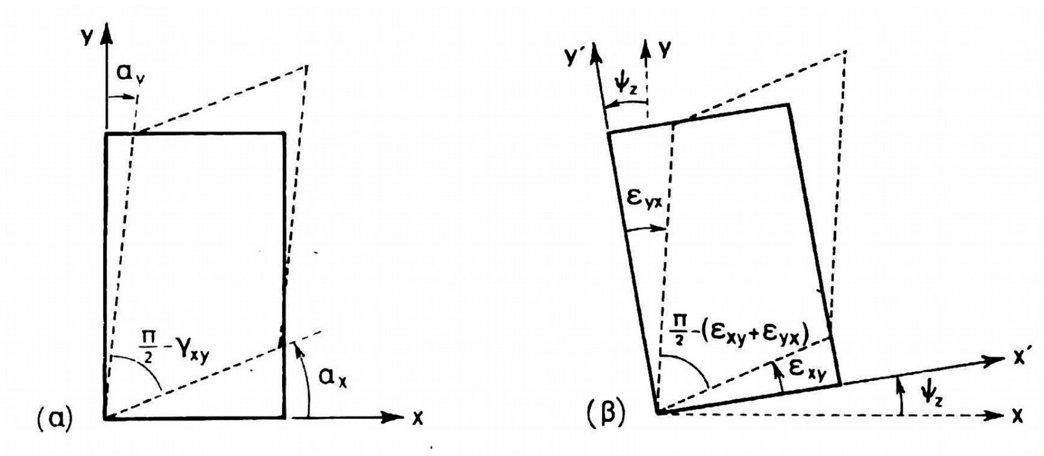
$$\varepsilon_x = \frac{\delta\Delta x}{\Delta x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\delta\Delta y}{\Delta y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\delta\Delta z}{\Delta z} \tag{2.8}$$

Η θετική ορθή τροπή είναι επιμήκυνση και η αρνητική βράχυνση.

Η μεταβολή της ορθής γωνίας των ακμών Δx, Δy *(Εικ.2.3)* λέγεται διατμητική τροπή γ_{xy} μεταξύ των κατευθύνσεων *Ox, Oy* (θετική όταν είναι μείωση). Αντίστοιχα οι μεταβολές των αρχικά ορθών γωνιών των Δy, Δz και των Δz, Δx είναι οι διατμητικές τροπές γ_{yz}, γ_{zx}.[1]



Εικόνα 2.2: Ορθή και διατμητική τροπή



Εικόνα 2.3: Διατμητική τροπή

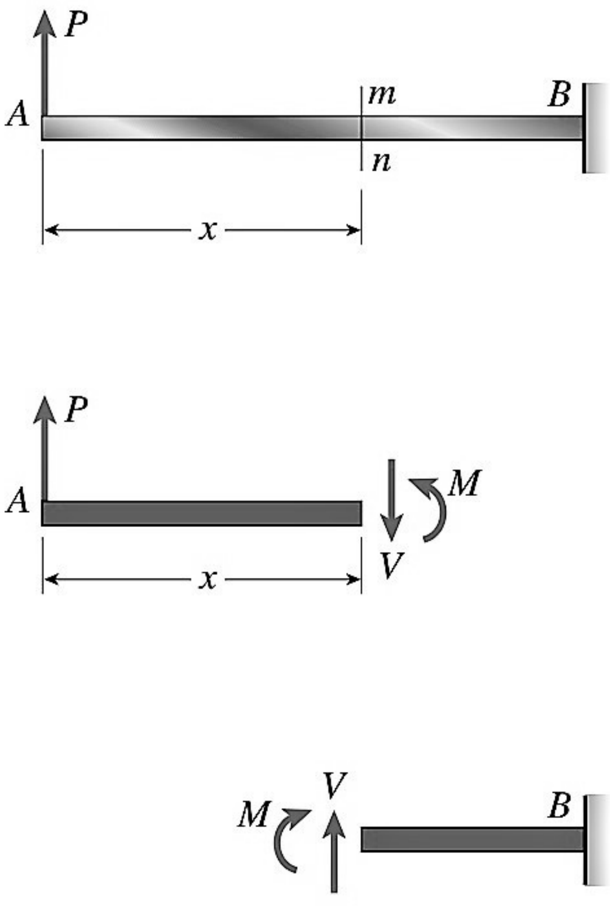
2.1.2 Κάμψη Δοκού Euler-Bernoulli

Δοκός λέγεται μια πρισματική ράβδος που έχει μήκος πολύ μεγαλύτερο από τις εγκάρσιες διαστάσεις της και υποβάλλεται σε κάμψη.

Διαμήκης άξονας ή απλώς άξονας της δοκού είναι ο γεωμετρικός τόπος των κέντρων των διατομών της.

Όταν μία δοκός είναι φορτισμένη από δυνάμεις ή ζεύγη δυνάμεων, δημιουργούνται τάσεις και τροπές στο εσωτερικό της. Για να προσδιορίσουμε αυτές τις τάσεις και τροπές, πρέπει πρώτα τις εσωτερικές δυνάμεις και ροπές που δρουν στις εγκάρσιες διατομές της δοκού.

Προκειμένου να καταλάβουμε πως αυτές οι εσωτερικές αντιδράσεις μπορούν να υπολογιστούν, ας θεωρήσουμε μια πακτωμένη δοκό AB φορτισμένη με δύναμη P στο ελεύθερο άκρο. Τέμνουμε τη δοκό σε μία διατομή mn που βρίσκεται σε απόσταση x από το ελεύθερο άκρο και απομονώνουμε το αριστερό τμήμα της δοκού ως ελεύθερο σώμα. Το ελεύθερο σώμα παραμένει σε ισορροπία από τη δύναμη P και από τις τάσεις που δρουν πάνω στη διατομή. Σε αυτό το στάδιο δε γνωρίζουμε τη κατανομή των τάσεων που δρουν στη διατομή. Γνωρίζουμε μόνο ότι το αποτέλεσμα αυτών των τάσεων πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να παραμένει το ελεύθερο σώμα σε ισορροπία.



Εικόνα 2.4: Τομή mn, διατμητικές δυνάμεις V και καμπτικες ροπές M

Από τη στατική, γνωρίζουμε ότι το αποτέλεσμα αυτών των τάσεων που δρουν στη διατομή μπορεί αφαιρετικά να αναπαρασταθεί από μία διατμητική δύναμη V και μια καμπτική ροπή M (Εικ. 2.4). Επειδή το φορτίο P είναι κάθετο στον άξονα της δοκού, δεν υπάρχει αξονική δύναμη στη διατομή. Τόσο η διατμητική δύναμη όσο και η καμπτική ροπή δρουν στο επίπεδο της δοκού, δηλαδή, το διάνυσμα της διατμητικής δύναμης βρίσκεται στο επίπεδο του διαγράμματος και το διάνυσμα της ροπής είναι κάθετο στο επίπεδο του διαγράμματος.

Οι διατμητικές δυνάμεις και οι καμπτικές ροπές, όπως και οι αξονικές δυνάμεις στις ράβδους και οι εσωτερικές στρεπτικές ροπές στους άξονες, είναι οι συνισταμένες των τάσεων που κατανέμονται στη διατομή. Επομένως, αυτές οι ποσότητες είναι γενικά γνωστές ως **συνισταμένες των τάσεων**.

Οι συνισταμένες των τάσεων σε ισοστατικούς φορείς μπορούν να υπολογιστούν από τις εξισώσεις ισορροπίας.

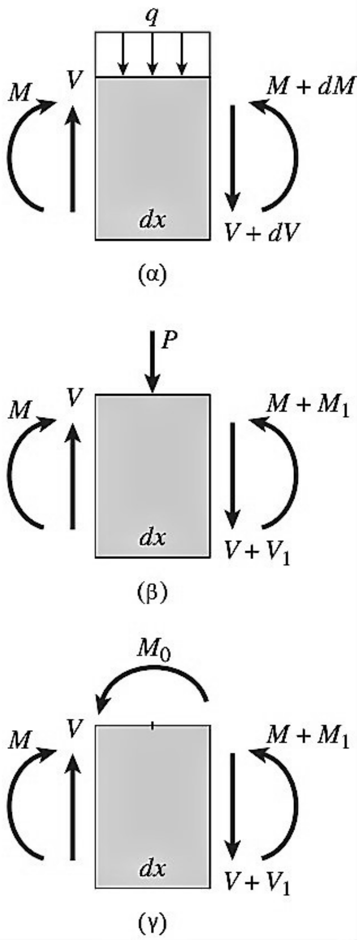
Τώρα μπορούμε να εξάγουμε κάποιες σημαντικές σχέσεις μεταξύ των φορτίων, των διατμητικών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών σε δοκούς. Αυτές οι σχέσεις είναι ιδιαίτερα σημαντικές όταν θέλουμε να υπολογίσουμε τα διαγράμματα των διατμητικών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών σε όλο το μήκος της δοκού.

Προκειμένου να εξάγουμε αυτές τις σχέσεις θεωρούμε ένα στοιχειώδες τμήμα της δοκού που έχει αποκοπεί μεταξύ δύο διατομών σε απόσταση dx. Το φορτίο που εφαρμόζεται στην πάνω επιφάνεια του στοιχειώδους τμήματος μπορεί να είναι ένα κατανεμημένο φορτίο, ένα συγκεντρωμένο φορτίο ή μια ροπή ζεύγους.

Οι διατμητικές δυνάμεις και οι καμπτικές ροπές που δρουν στις πλευρές του στοιχειώδους τμήματος παρουσιάζονται με τις θετικές τους φορές. γενικά οι διατμητικές δυνάμεις και οι καμπτικές ροπές αλλάζουν κατά μήκος του άξονα της δοκού. Επομένως, οι τιμές στη δεξιά πλευρά τους στοιχειώδους τμήματος μπορεί να διαφέρουν από τις τιμές στην αριστερή.

Στην περίπτωση ενός κατανεμημένου φορτίου (Εικ. 2.5α) οι προσαυξήσεις των V, M είναι απειροελάχιστες, κι άρα τις συμβολίζουμε με dV και dM. Οι αντίστοιχες συνισταμένες των τάσεων στη δεξιά πλευρά είναι $V+dV$ και $M+dM$.

Στην περίπτωση ενός συγκεντρωμένου φορτίου ή μίας ροπής ζεύγους (Εικ. 2.5β, 2.5γ) οι προσαυξήσεις μπορεί να είναι πεπερασμένες, και έτσι συμβολίζονται V_1 και M_1. Οι αντίστοιχες συνισταμένες των τάσεων στη δεξιά πλευρά είναι $V+V_1$ και $M+M_1$.



Εικόνα 2.5: Στοιχείο μίας δοκού που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των σχέσεων μεταξύ των φορτίων, των διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών. (Όλα τα φορτία και οι συνισταμένες των τάσεων φαίνονται στις θετικές τους κατευθύνσεις)

Για κάθε τύπο φόρτισης μπορούμε να γράψουμε δύο εξισώσεις ισορροπίας για το στοιχείο -μια εξίσωση για την ισορροπία των δυνάμεων κατά την κάθετη κατεύθυνση και μία για την ισορροπία των ροπών. Η πρώτη από αυτές τις εξισώσεις δίνει τη σχέση μεταξύ του φορτίου και της διατμητικής δύναμης, και η δεύτερη δίνει τη σχέση μεταξύ της διατμητικής δύναμης και της καμπτικής ροπής.

Για ένα κατανεμημένο φορτίο μεγέθους q, θα ορίσουμε τη σχέση του με τη διατμητική δύναμη κι έπειτα με τη καμπτική ροπή.

Διατμητική Δύναμη. Η ισορροπία των δυνάμεων κατά την κάθετη διεύθυνση (οι δυνάμεις προς τα πάνω είναι θετικές) δίνει (Εικ. 2.5α)

$$\sum F_{vert}=0$$
$$V-q\,dx-(V+dV)=0$$

ή

$$\frac{dV}{dx}=-q \tag{2.9}$$

Ροπή κάμψης. Ας εξετάσουμε τώρα την ισορροπία των ροπών του στοιχειώδους τμήματος της δοκού που φαίνεται στην εικόνα 2.5α. Αθροίζοντας τις ροπές γύρω από έναν άξονα στην αριστερή πλευρά του στοιχείου (ο άξονας είναι κάθετος προς το επίπεδο του σχήματος), και λαμβάνοντας αριστερόστροφα τις ροπές ως θετικές, παίρνουμε

$$\sum M=0$$
$$-M-qdx(dx/2)-(V+dV)\,dx+M+dM=0$$

Αγνοώντας τα γινόμενα των διαφορικών (επειδή είναι απειροελάχιστα σε σύγκριση με άλλους όρους), παίρνουμε την παρακάτω σχέση

$$\frac{dM}{dx}=V \tag{2.10}$$

Ροπές επιφανείας. Προκειμένου να είμαστε ικανοί να υπολογίσουμε τις τάσεις που προκαλούνται από την κάμψη μιας δοκού πρέπει να ορίσουμε τη σχέση που προσδιορίζει τον διαμήκη ή ουδέτερο άξονα της διατομής και τη ροπή αδρανείας της

$$OA=\frac{\int y\,dA}{\int dA} \tag{2.11}$$

$$I=\int\int y^2\,dA \tag{2.12}$$

Αν θεωρήσουμε ότι η απόσταση y, που είναι η απόσταση κάθε στοιχειώδους επιφάνειας της διατομής λαμβάνεται από τυχαίο σύστημα συντεταγμένων και όχι πάνω στον ουδέτερο άξονα τότε

$$I=\int\int y^2\,dA-OA^2\cdot A \qquad (2.13)$$

Η σχέση 2.13 ονομάζεται αντίστροφο θεώρημα Steiner και αφαιρεί από τη ροπή αδρανείας ως προς τυχαίο σύστημα αναφοράς το γινόμενο του τετραγώνου της απόστασης αυτού από τον ουδέτερο άξονα και της συνολικής επιφάνειας της διατομής.[2]

2.2 Η Διαμήκης Αντοχή του Πλοίου

Το Πλοίο-δοκός. Ένα πλοίο μπορεί να θεωρηθεί ως μία κοίλη δοκός, το "πλοίο-δοκός", όπου οι φλάντζες σχηματίζονται από τα καταστρώματα και την κατασκευή του πυθμένα, ο κορμός από τις δύο πλευρές, συχνά υποβοηθούμενος από τις διαμήκεις φρακτές. Ένα πλοίο είναι, σαν μια γέφυρα, που υφίσταται τα αποτελέσματα των φορτίσεων του ταξιδιού στη θάλασσα αλλά διαφέρει στο ότι οι δυνάμεις του φορτίου και της στήριξης, και ως εκ τούτου οι τάσεις και παραμορφώσεις, είναι πιο μεταβλητές σε ένταση και κατεύθυνση και πιο δύσκολο να εκτιμηθούν.

Προέλευση και Γενική Κατανομή των παραμορφώσεων. Η κάμψη προέρχεται από την κατασκευή του πυθμένα, λόγω της άνισης κατανομής του βάρους και της άνωσης. Ο πυθμένας από μόνος του, ακόμη και αν είναι διπλός, δεν μπορεί να προσφέρει παρά μόνο μικρή αντοχή στην κάμψη αλλά, όντας άκαμπτα συνδεδεμένος με τις πλευρές (και τις διαμήκεις φρακτές), δεν μπορεί να λυγίσει χωρίς τα μέλη αυτά -δηλαδή, ο κορμός της δοκού- να ακολουθούν την κίνησή του. Ας εξετάσουμε ένα πλοίο με ένα κατάστρωμα σε hogging κατάσταση. Αν, σε αυτή την περίπτωση, οι πλευρές δεν είχαν ενισχυθεί από ένα κατάστρωμα, το πάνω άκρο τους θα ήταν ευάλωτο για να σχιστεί στο μέσο. Το κατάστρωμα το αποτρέπει αυτό, αλλά με τον τρόπο αυτό, κάνει τις πλευρές να παραμορφωθούν. Έτσι, οι δύο πλευρές υπόκεινται σε διάτμηση, ενώ το κατάστρωμα και ο πυθμένας θα είναι αντίστοιχα σε εφελκυσμό και θλίψη, που προκαλείται από τις πλευρές και μεταδίδεται μέσω των ελασμάτων ζωστήρα και κυρτού γάστρας. Αυτή η ροή, επομένως, λαμβάνει χώρα κατά στα όρια ανάμεσα στο κορμό και τις φλάντζες, και είναι ισχυρότερη περίπου στο ένα τέταρτο του μήκους του πλοίου, όπου η διάτμηση είναι μέγιστη.

2.2.1 Σε κάμψη

Θεμελιώδης Σχέση. Οι εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις που παράγονται σε ένα πλοίο με απλή διαμήκη κάμψη καθορίζονται σύμφωνα με τη θεωρία της ελαστικής κάμψης από τον τύπο

$$\sigma_x = \frac{M}{I} \cdot z \tag{2.14}$$

όπου

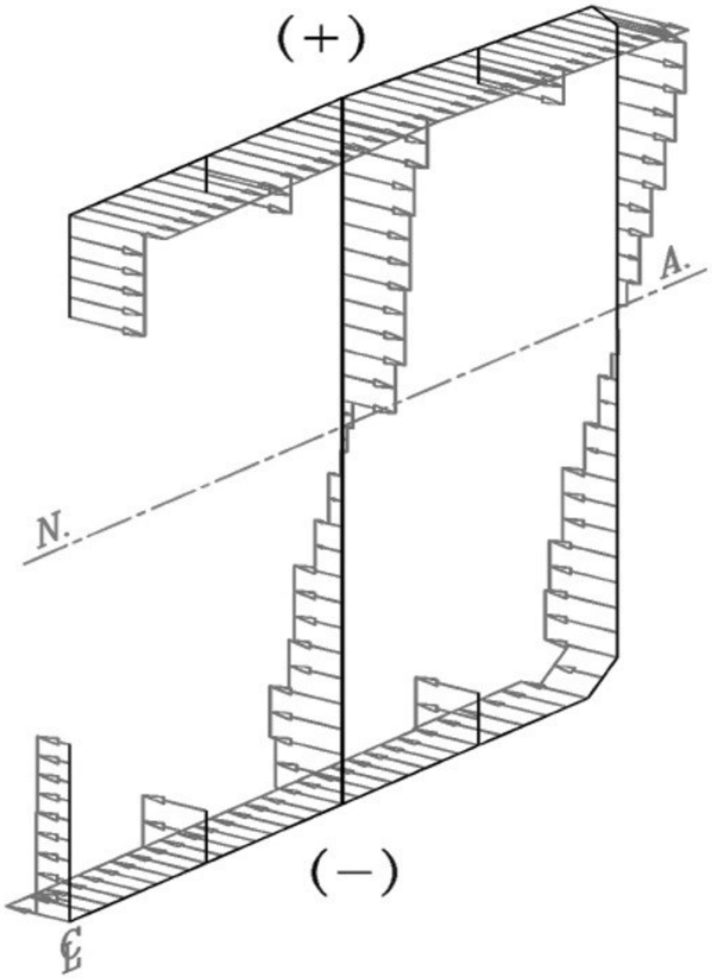
M: η καμπτική ροπή στη θέση της διατομής

I: η ροπή αδρανείας της διατομής

z: η απόσταση από τον ουδέτερο άξονα της διατομής

Αποτελεσματικότητα των διαμήκων μελών. Στον υπολογισμό της ροπής αδρανείας πρέπει να περιλαμβάνονται όλα τα ενεργά διαμήκη κατασκευαστικά στοιχεία που περνούν μέσα από το νομέα και τα οποία είναι συνεχή για ένα σημαντικό μέρος του μήκους του πλοίου -γενικά τουλάχιστον στο μισό αυτού του μήκους- αλλά ο προσδιορισμός αυτών των στοιχείων είναι ένα σημείο το οποίο απαιτεί ειδική μνεία. Είναι ίσως η πιο δύσκολη ερώτηση στον υπολογισμό της αντοχής, και αυτή πάνω στην οποία οι απόψεις είναι οι περισσότερο αντικρουόμενες.

Κατασκευαστικά στοιχεία σε εφελκυσμό. Το άνω πέλμα του πλοίου-δοκού υπόκειται σε εφελκυσμό σε hogging ενώ η κάτω φλάντζα υπόκειται σε εφελκυσμό σε sagging (Εικ. 2.6). Τώρα, έχει τεθεί το ερώτημα κατά πόσον τα εσωτερικά μέρη αυτών των φλαντζών, ιδίως των ελασμάτων, είναι πραγματικά ικανά να κάνουν τη δουλειά τους αποτελεσματικά. Υποστηρίζεται ότι ο κορμός -δηλαδή, οι πλευρές- μπορεί να προκαλέσει μόνο διαμήκεις δυνάμεις σε εκείνα τα μέρη των φλαντζών -δηλαδή, στα καταστρώματα και τον πυθμένα- στα οποία συνδέεται άμεσα, ενώ τα μέρη που είναι πιο κοντά στην αξονική γραμμή θα το αποφύγουν. Αυτό δεν φαίνεται, ωστόσο, να ισχύει, γιατί, η εκλεπτυνόμενη μορφή του πλοίου προς τα άκρα και η οριζόντια μετάδοση των δυνάμεων μέσω διάτμησης θα προκαλέσουν τη μετάδοση της έλξης των ορίων στα εσωτερικά, καθώς και στα εξωτερικά τμήματα των φλατζών. Μπορούμε, επομένως, στον εφελκυσμό να θεωρήσουμε την πλήρη ανέπαφη περιοχή της τομής των συνεχών διαμήκων κατασκευαστικών στοιχείων ως ενεργή.



Εικόνα 2.6: Τυπικό παράδειγμα της κατανομής της καμπτικής ορθής τάσης στην διατομή ενός πλοίου.

Κατασκευαστικά στοιχεία σε θλίψη. Το πιο σημαντικό σημείο που πρέπει να εξεταστεί εδώ είναι η πιθανότητα αποτυχίας από λυγισμό των ελασμάτων. Πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ του γενικού λυγισμού των μεγαλύτερων περιοχών της επιφάνειας, η οποία περιλαμβάνει κάμψη των ενισχυτικών μελών, και του τοπικού λυγισμού των ελασμάτων μεταξύ δοκών ή πλαισίων. Εδώ θα ασχοληθούμε με τη τελευταία μορφή μόνο.

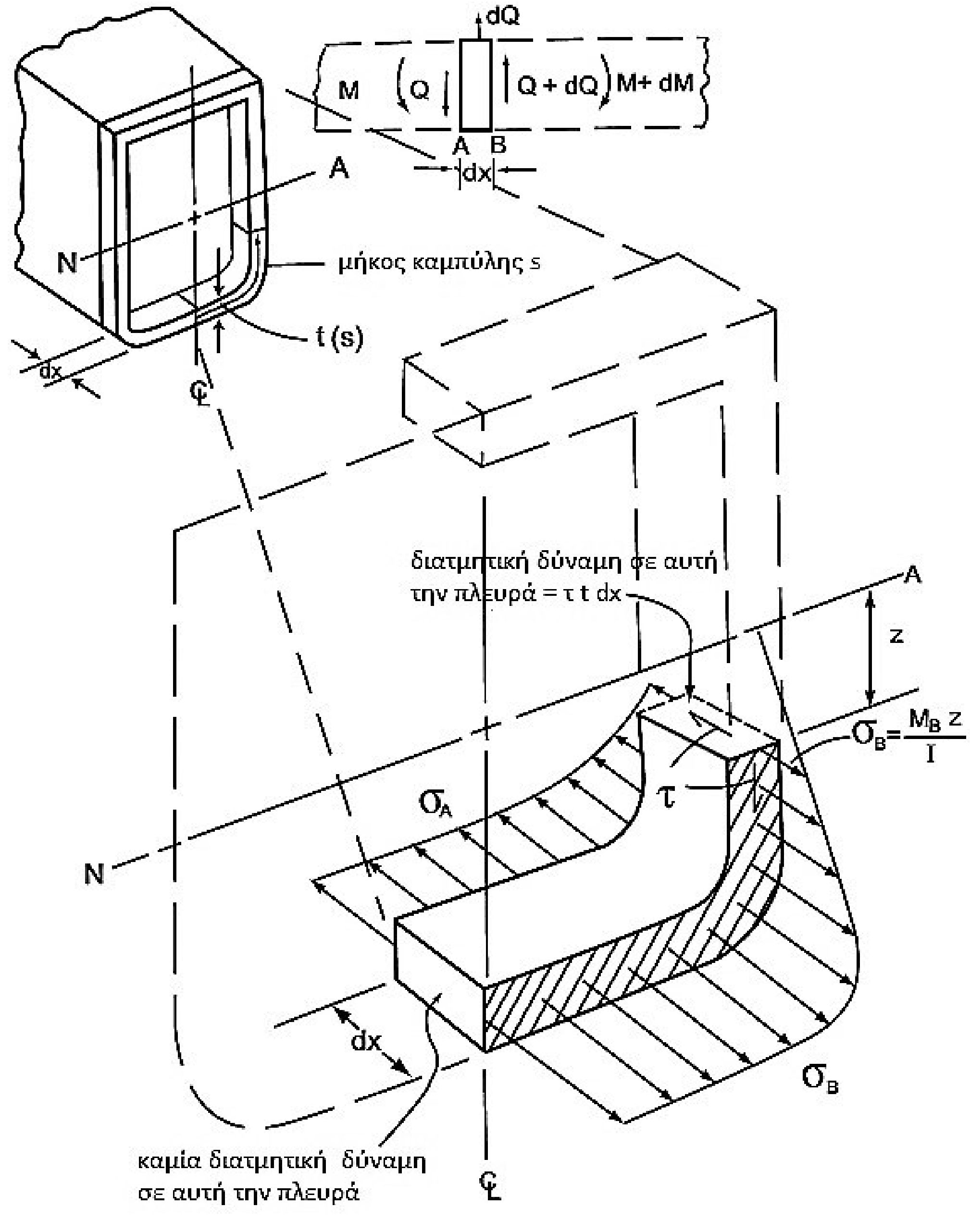
Όταν η τάση είναι μικρή, όπως και στην γειτονιά του ουδέτερου άξονα του πλοίου, δεν υπάρχει κίνδυνος κατάρρευσης και η πλήρης διατομή του υλικού είναι ενεργή, αλλά ήδη σε μικρή απόσταση από το ουδέτερο άξονα σημαντικές τάσεις μπορεί να αναπτυχθούν όταν το πλοίο παίρνει κλίση σε ένα θαλάσσιο ταξίδι. Αν η τάση φθάσει σε ένα ορισμένο σημείο, θα λάβει χώρα λυγισμός και τα ελάσματα θα στερηθούν εξ ολοκλήρου της αντοχής τους. Οι καθοριστικοί παράγοντες είναι

1) Ο λόγος της ισαπόστασης των εγκάρσιων ενισχυτικών, πλαισίων ή δοκών και του πάχους του ελάσματος

2) Η παρουσία διαμήκων ενισχυτικών. Αυτά δρουν με δύο διαφορετικούς τρόπους. Πρώτον, αποτρέπουν το λυγισμό μιας ζώνης ελάσματος ενός συγκεκριμένου πλάτους στην περιοχή άμεσης γειτνίασης εξαιτίας της υποστήριξης που του παρέχουν άμεσα. Δεύτερον, ενεργούν σε συνδυασμό με τα παρακείμενα ενισχυτικά, δίνοντας στο παρεμβαλλόμενο έλασμα μια υποστήριξη, η οποία εξαρτάται κυρίως από το λόγο της ισαπόστασης των διαμήκων ενισχυτικών προς το πάχος του ελάσματος.[5]

2.2.2 Σε διάτμηση

Στο πλοίο-δοκός, όπως και σε κάθε δοκό που είναι φορτισμένη από εγκάρσιες κατακόρυφες δυνάμεις, υπάρχει μια κατακόρυφη διατμητική δύναμη Q που δρα στη διατομή. Σε μια λεπτότοιχη διατομή όπως μια διατομή I ή σε μια ορθογώνια δοκό, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε πως η συνολική διατμητική δύναμη Q είναι κατανεμημένη πάνω στη διατομή έτσι ώστε τα πάχη των κατασκευαστικών στοιχείων να μπορέσουν να διαστασιολογηθούν σωστά. Δηλαδή, είναι απαραίτητο να προσδιορίσουμε την κατανομή της διατμητικής τάσης τ σε ολόκληρη τη διατομή.



Εικόνα 2.7: Διάγραμμα ελεύθερου σώματος για εγκάρσια διάτμηση

Η εικόνα δείχνει μια λεπτότοιχη συμμετρική ορθογώνια δοκό που υποβάλλεται σε μια κατακόρυφη διατμητική δύναμη Q. Από τη βασική θεωρία δοκού είναι γνωστό ότι σε ένα διαφορικό στοιχειώδες τμήμα μήκους dx, η Q προκαλεί μια αλλαγή στη καμπτική ροπή που δίνεται από

$$dM = Q\,dx \tag{2.15}$$

Εξαιτίας αυτής της αλλαγής στην καμπτική ροπή οι ορθές τάσεις σ_A και σ_B στις δύο πλευρές του στοιχειώδους τμήματος δεν είναι ίσες. Επομένως αν απομονώσουμε ένα κομμάτι του στοιχειώδους τμήματος κάνοντας δύο τομές, μία στην αξονική γραμμή και μία σε ένα μήκος καμπύλης s από την κεντρική αξονική γραμμή, η ανισορροπία στις διαμήκεις ορθές δυνάμεις πρέπει να αντισταθμιστεί από διαμήκεις διατμητικές τασικές δυνάμεις πάνω στους νομείς. Ωστόσο, εξαιτίας της συμμετρίας, δεν μπορεί να υπάρξει διατμητική δύναμη στο επίπεδο συμμετρίας και άρα η εξισορροπητική δύναμη πρέπει να προέρχεται εξ ολοκλήρου από τη διατμητική τάση τ στην άλλη τομή. Η διαμήκης ισορροπία επιβάλλει επομένως

$$\tau\, t\, dx = \int_0^s \sigma_B\, t\, ds - \int_0^s \sigma_A\, t\, ds \tag{2.16}$$

Αντικαθιστώντας την (2.14) και στα δύο μέλη

$$\begin{aligned} \tau\, t\, dx &= \frac{M_B - M_A}{I} \int_0^s z\, t\, ds \\ &= \frac{dM}{I} \int_0^s z\, t\, ds \end{aligned} \tag{2.17}$$

και αντικαθιστώντας $dM = Qdx$

$$\tau t = \frac{Q}{I} \int_0^s z\, t\, ds \tag{2.18}$$

Το ολοκλήρωμα στο δεξί μέλος είναι μια συνάρτηση της γεωμετρίας του νομέα και της θέσης του s πάνω στη διατομή. Για ευκολία θέτουμε το σύμβολο m σε αυτή την ποσότητα

$$m(s) = \int_0^s z\, t\, ds \tag{2.19}$$

και σημειώνουμε ότι το m είναι η πρώτη ροπή γύρω από τον ουδέτερο άξονα της διατομής αρχίζοντας από το "ελεύθερο" άκρο (άκρο χωρίς διατμητική τάση) του νομέα. Αντικαθιστώντας τη m στην (2.18) και λύνοντας ως προς τ

$$\tau = \frac{Q\, m}{t\, I} \tag{2.20}$$

Το γινόμενο τt έχει ειδική σημασία στην στρέψη των λεπτότοιχων διατομών, και έχει μια αναλογία με τη ροή ενός ιδανικού ρευστού μέσα σε έναν κλειστό αγωγό. Αυτό το γινόμενο το καλούμε "διατμητική ροή" και τη συμβολίζουμε με q

$$q = \tau\, t \tag{2.21}$$

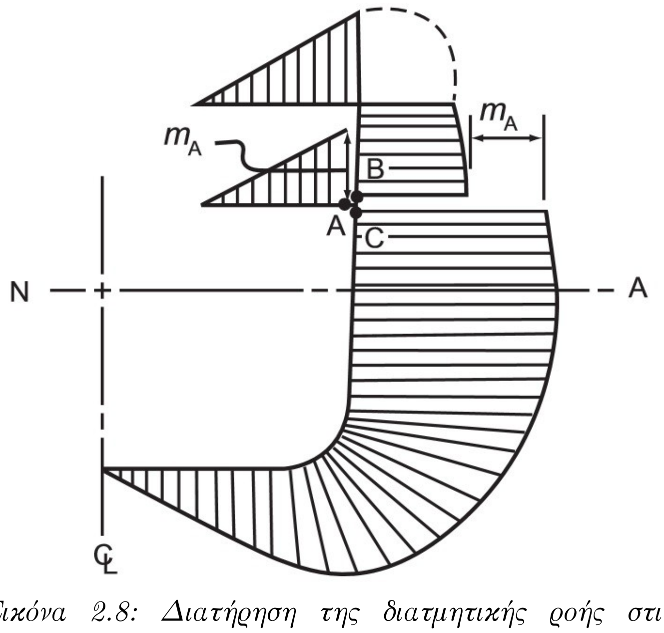
Η διατμητική ροή είναι επίσης μια χρήσιμη ποσότητα στην περίπτωσή μας, στην οποία η διατμητική τάση οφείλεται σε εγκάρσιο φορτίο. Από την (2.20) παρατηρούμε ότι η διατμητική ροή δίνεται από

$$q = \frac{Q\, m}{I} \tag{2.22}$$

Εφόσον η Q και I είναι σταθερές για ολόκληρη τη διατομή, η διατμητική ροή είναι άμεσα ανάλογη της m. Στην πραγματικότητα, ο λόγος Q/I μπορεί να θεωρηθεί ως ένας παράγοντας κλίμακας, και μιας κι εφόσον η κατανομή της m έχει γίνει, η κατανομή της διατμητικής ροής είναι ίδια αλλά με διαφορετικές μονάδες. Επιπλέον, ένα άλλο πλεονέκτημα της q είναι ότι η τιμή της δεν διακυμαίνεται απότομα με τοπικές αλλαγές του πάχους όπως η τ.

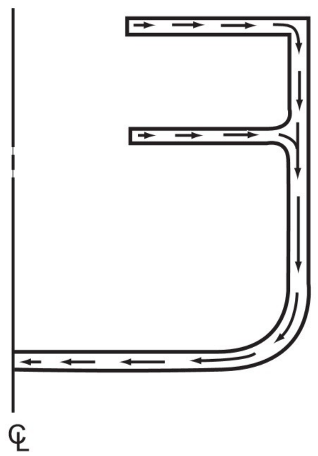
Μπορούμε να δούμε από την εξαγωγή της (2.20) ότι οι τιμές της Q και I είναι κανονικά για ολόκληρη τη διατομή ενώ ο υπολογισμός της m γίνεται για τη μισή.

Εξαιτίας αλλαγών στον προσανατολισμό και στο πάχος των πλακών που απαρτίζουν το νομέα του πλοίου-δοκού, η ολοκλήρωση της m πραγματοποιείται συνήθως σε τμήματα. Η ολοκλήρωση πάντα ξεκινά στο "ελεύθερο" άκρο του κάθε κλάδου. Όπως φαίνεται στην Εικ. 2.8, αυτό δεν είναι αναγκαίο να βρίσκεται στην κεντρική αξονική γραμμή. Μπορεί να είναι στην άκρη μιας καταπακτής ή άλλου ανοίγματος.

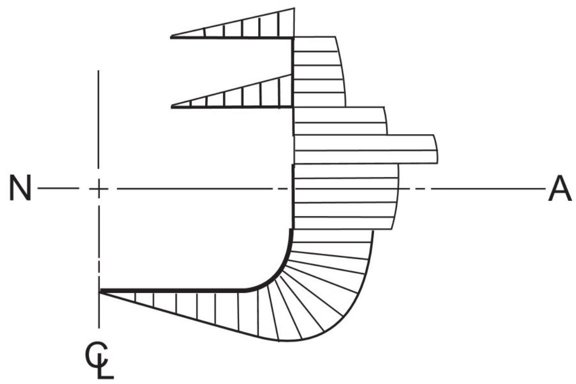


Εικόνα 2.8: Διατήρηση της διατμητικής ροής στις γωνίες και τις διακλαδώσεις

Η Εικ. 2.8 δείχνει επίσης την επίδραση των πολλαπλών κλάδων -για παράδειγμα, επιπλέον καταστρωμάτων. Εάν μία φανταστική τομή γινόταν στο σημείο C, η διατμητική δύναμη σε εκείνο το σημείο, θα έπρεπε να ισορροπήσει την ανισορροπία των δυνάμεων της ορθής τάσης στο δεύτερο κατάστρωμα και σε όλα τα ελάσματα πάνω από αυτό. Ως εκ τούτου, το σύνολο της επιφάνειας θα πρέπει να περιλαμβάνεται στον υπολογισμό της m στο σημείο C. Η νέα περιοχή που υφίσταται τη διάβαση από το B στο C είναι η περιοχή του δεύτερου καταστρώματος, και ως εκ τούτου η αύξηση της m είναι ίση με τη συνολική τιμή της m για το δεύτερο κατάστρωμα. Δηλαδή, $m_C = m_A + m_B$ και, αφού η q είναι ευθέως ανάλογη προς την m, $q_c = q_A + q_B$. Αυτό απεικονίζει έναν από τους λόγους για τη χρήση του όρου "ροή διάτμησης": σε οποιαδήποτε διασταύρωση ή διακλάδωση, η αύξηση στη διατμητική ροή είναι ίση με τη ροή που συμβάλλει ή αφαιρείται από τον κλάδο, όπως φαίνεται στην Εικ 2.9. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι εφόσον το κατάστρωμα και τα πλευρικά τοιχώματα μπορεί να είναι διαφορετικού πάχους, αυτός ο κανόνας της συνέχειας της διατμητικής ροής δεν ισχύει για την τ. Η Εικ. 2.10 απεικονίζει πώς η τ μεταβάλλεται με τις αλλαγές στο πάχος.

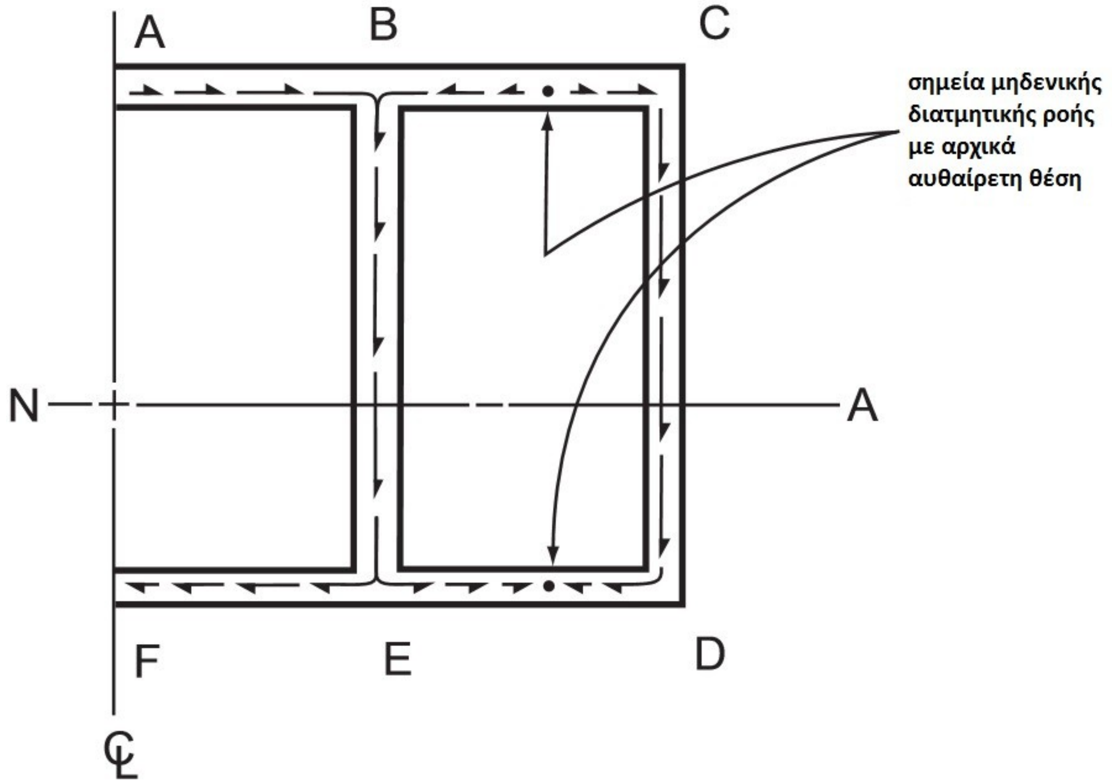


Εικόνα 2.9: Διάγραμμα που δείχνει την κατεύθυνση της διατμητικής ροής



Εικόνα 2.10: Αλλαγή της τ εξαιτίας της αλλαγής του πάχους

Στον ορισμό της m (2.19), θεωρήθηκε ότι η γραμμική ολοκλήρωση πάντα ξεκινούσε σε ένα σημείο της διατμητικής ροής που ήταν μηδέν. Έτσι, όπως σημειώθηκε νωρίτερα, αν υπάρχουν σημεία διακλαδώσεως (όπως ένα δεύτερο κατάστρωμα με ένωση με τα πλευρικά τοιχώματα), τότε κάθε κλάδος πρέπει να έχει μηδενική ροή διάτμησης στο άκρο του. Αυτό είναι ισοδύναμο με την απαίτηση ότι δεν πρέπει να υπάρχουν κλειστοί βρόχοι ή κελιά σε όλη συνολικά την ημι-τομή του πλοίου-δοκού. Κατά συνέπεια, για το πλοίο της Εικ. η τιμή της m μπορεί να υπολογιστεί μόνο κατά μήκος του AB και FE. Δεν μπορεί να υπολογιστεί οπουδήποτε στην περίμετρο της πλευρικής δεξαμενής BCDEB. Η δυσκολία αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι η ροή διάτμησης χωρίζεται στο σημείο B (και επανασυνδέεται στο σημείο E) και τα ξεχωριστά τμήματα δεν μπορούν να προσδιοριστούν από την απλή στατική. Το πρόβλημα είναι στατικά αόριστο και, όπως συνηθίζεται σε τέτοια προβλήματα, επιπλέον πληροφορίες θα πρέπει να ληφθούν από μία εξέταση της γεωμετρικής συμβατότητας.



Εικόνα 2.11: Ροή διάτμησης σε πολυκυψελική διατομή

Για το λόγο αυτό θεωρείται ότι η κατανομή της διατμητικής ροής προκύπτει από την επαλληλία δύο κατανομών,

$$q = q_S + q_C \tag{2.23}$$

όπου q η τελική κατανομή και q_S, q_C οι συνιστώσες της. Η πρώτη εξ' αυτών ικανοποιεί τις εξισώσεις ισορροπίας αλλά όπου απαιτείται μία τιμή της ροής για τη χρήση της (2.22) θεωρείται αυθαίρετα. Ως εκ τούτου το ολοκλήρωμα των διατμητικών τάσεων της κατανομής αυτής, αντιστοιχεί στη διατμητική δύναμη που εφαρμόζεται στη διατομή, αλλά η θέση εφαρμογής της δεν συμπίπτει κατ' ανάγκη με το κέντρο διάτμησης. Μία τέτοια κατανομή τάσεων θα προκαλούσε στρέψη του δοκαριού και σχετική αξονική μετατόπιση σε σημεία εκατέρωθεν ενός μοναδικού σημείου της διατομής, κάτι που είναι αδύνατον, αφού η διατομή σχηματίζει μία κλειστή κυψέλη. Για το λόγο αυτό εισάγεται η δεύτερη συνιστώσα της διατμητικής ροής q_C. Αυτή υπολογίζεται με βάση τις εξής συνθήκες:

- ικανοποιεί τις εξισώσεις ισορροπίας,
- η διατμητική δύναμη που προκαλεί είναι μηδενική,
- η στρεπτική ροπή που προκαλεί είναι ίση κατά μέτρο και αντίθετη με τη ροπή που προκαλεί η κατανομή q_S.

Από τις δύο πρώτες συνθήκες προκύπτει ότι η q_C είναι σταθερή όταν η διατομή είναι μία μοναδική κλειστή κυψέλη. Η σταθερή διατμητική ροή υπολογίζεται βάσει της τρίτης συνθήκης που ικανοποιείται αν

$$q_C = -\frac{\oint q_S \frac{ds}{t(s)}}{\oint \frac{ds}{t(s)}} \tag{2.24}$$

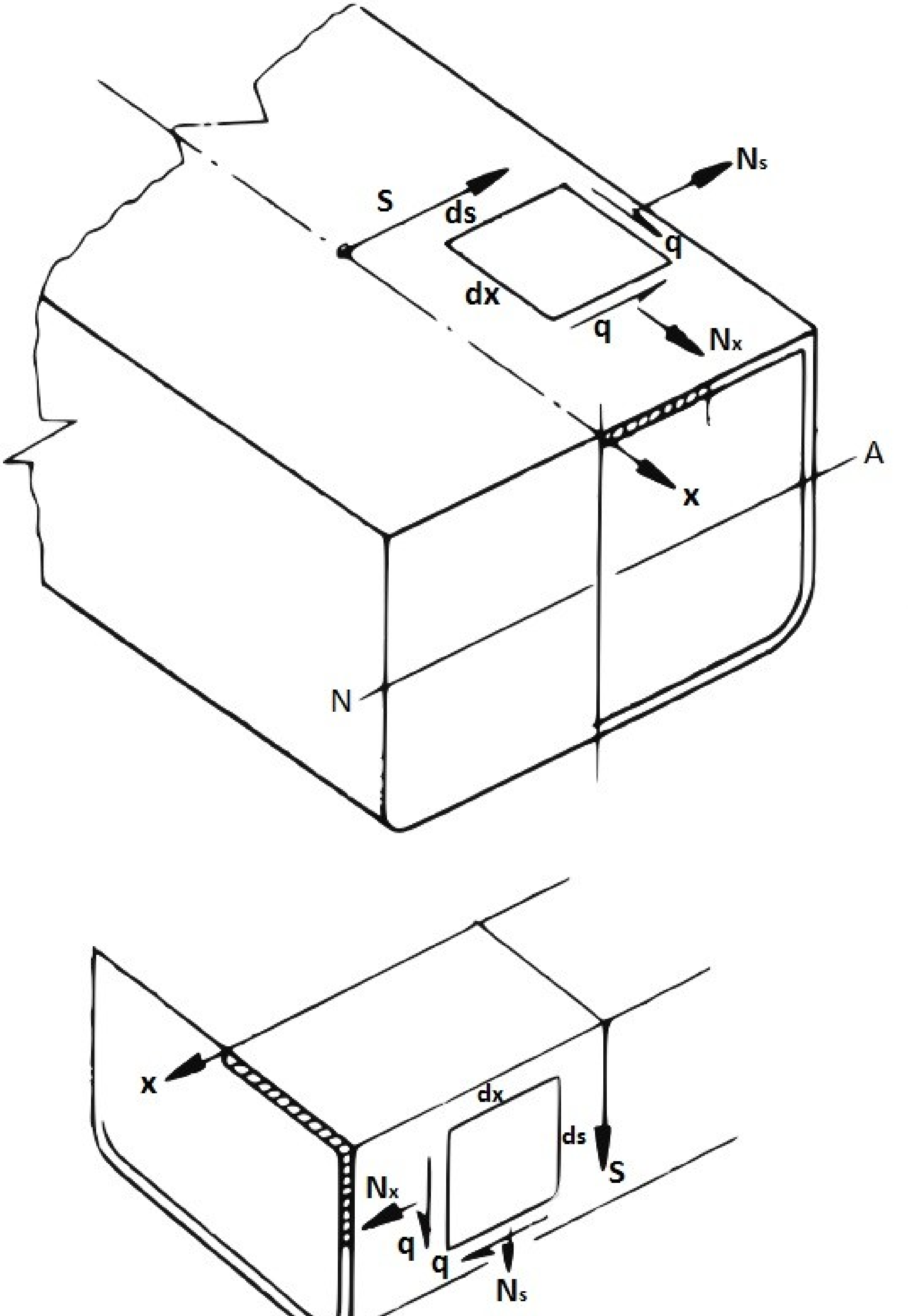
[4]

2.2.3 Κύριες Τάσεις και Μέγιστες Διατμητικές Τάσεις

Οι σχέσεις της απλής θεωρίας δοκού μας επιτρέπουν να υπολογίσουμε τις ορθές και τις διατμητικές τάσεις στο εσωτερικό της διατομής του πλοίου. Στην εικόνα βλέπουμε ότι ένα στοιχείο του κελύφους ή του καταστρώματος μπορεί, γενικά, να υφίσταται και μια επιπλέον ορθή τάση εγκάρσια στο διαμήκη άξονα του πλοίου. Η εικόνα παρουσιάζει αυτές τις συνισταμένες των τάσεων, που ορίζονται ως το γινόμενο της τάσης με το πάχος του ελάσματος. Οι συνιστώσες της τάσης έχουν διαστάσεις δύναμης ανά μονάδα μήκους και δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις

$$N_x = t\,\sigma_x \tag{2.25}$$

$$N_s = t\,\sigma_s \tag{2.26}$$



Εικόνα 2.12: Επιφανειακό στοιχείο ελάσματος στο κατάστρωμα ή στο πλευρικό κέλυφος

Μετά από υπολογισμούς πάνω στη στατική ισορροπία ενός τριγωνικού στοιχείου του ελάσματος, μπορούμε να δείξουμε ότι η επίπεδη κατανομή των τάσεων που περιγράφεται από τις τρεις συνιστώσες της τάσης σ_x, σ_y, τ μπορεί να συνοψιστεί σε τρεις άλλες τάσεις

σ_{max}, σ_{min} και τ_{max}, που είναι οι μέγιστες ορθές, οι ελάχιστες ορθές και οι μέγιστες διατμητικές τάσεις. Οι μέγιστες κι ελάχιστες ορθές τάσεις βρίσκονται σε επίπεδα που οι διατμητικές τάσεις μηδενίζονται. Περισσότερα στον Timosenko (1955).[3] Σημειώνουμε πως οι κύριες τάσεις είναι ιδιαίτερα σημαντικές εφόσον σε επίπεδα κάθετα σε αυτές γίνεται η διάδοση των ρωγμών στη γάστρα.

$$\sigma_{max}=\frac{\sigma_x+\sigma_s}{2}+\sqrt{\left(\frac{\sigma_x-\sigma_s}{2}\right)^2+\tau^2} \tag{2.27}$$

$$\sigma_{min}=\frac{\sigma_x+\sigma_s}{2}-\sqrt{\left(\frac{\sigma_x-\sigma_s}{2}\right)^2+\tau^2} \tag{2.28}$$

$$\tau_{max}=\sqrt{\left(\frac{\sigma_x-\sigma_s}{2}\right)^2+\tau^2} \tag{2.29}$$

Από τον ορισμό του κριτηρίου Von Mises λαμβάνουμε τις αντίστοιχες τάσεις ως

$$\sigma_{VM}=\sqrt{\sigma_{max}^2-\sigma_{max}\sigma_{min}+\sigma_{min}^2} \tag{2.30}$$

[6][8]

Οι τάσεις σ_S εξαιτίας τις αντίθεσης του βάρους και της άντωσης σε ένα πλοίο πιθανώς να είναι πολύ μικρές σε τόσο καλά κατανεμημένα φορτία, κυρίως σε μακριές δοκούς. Αυτό είναι αυταπόδεικτο στις δοκούς πλοία.[15] Επομένως, τις αγνοούμε.

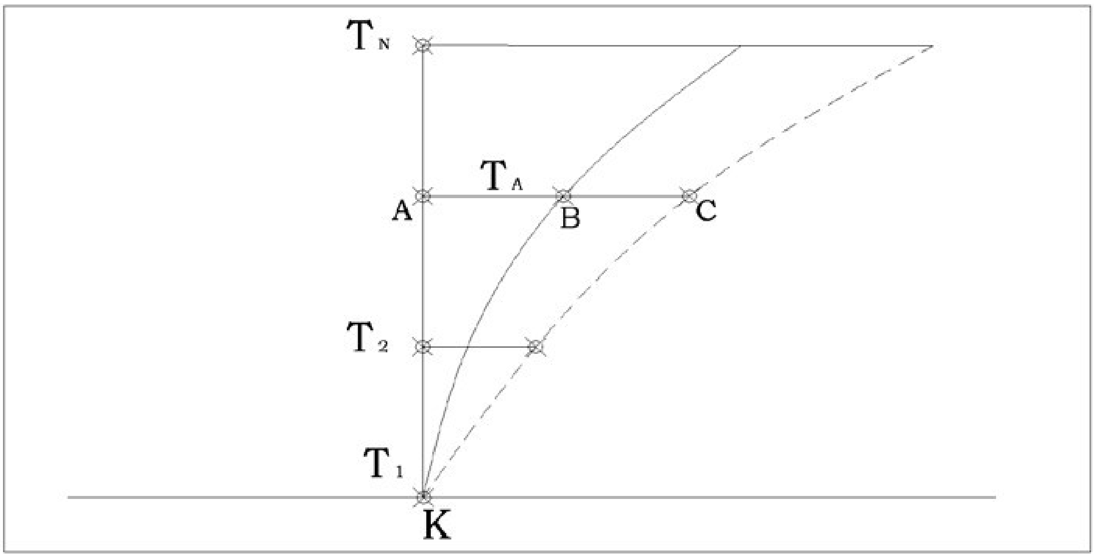
2.3 Υδροστατική του Πλοίου

Οι υπολογισμοί της διαμήκους κλίσης αφορούν κυρίως τα βυθίσματα για συγκεκριμένη φόρτωση, όπως επίσης το εκτόπισμα και τη διαμήκη θέση του κέντρου βάρους όταν τα βυθίσματα είναι γνωστά. Το βασικό εργαλείο που χρησιμοποιείται κατά την επίλυση αυτών των προβλημάτων είναι οι καμπύλες εμβαδών και ροπών εγκάρσιων επιφανειών (καμπύλες Bonjean), που είναι αντίστοιχες σε σπουδαιότητα με τις καμπύλες ευστάθειας. Ο καμπύλες Bonjean είναι και αυτές συναρτήσεις της εξωτερικής γεωμετρίας του πλοίου.

Όπως οι καμπύλες ευστάθειας, έτσι και καμπύλες των εμβαδών των εγκάρσιων τομών (curves o transverse areas, Bonjean Curves) εξαρτώνται αποκλειστικά από τη γεωμετρία του πλοίου και χρησιμοποιούνται ευρύτατα στους υπολογισμούς της διαμήκους ισορροπίας (Biran, 2003, Rawson and Tupper, 2001). Από τις καμπύλες Bonjean, μπορούν να βρεθούν κάτω από οποιαδήποτε ίσαλο με μηδενική εγκάρσια κλίση:

- το εκτόπισμα του πλοίου και
- οι συντεταγμένες του κέντρου άντωσης KB (VCB) και x_B (LCB).

Για κάθε εγκάρσια τομή (νομέα) ενός πλοίου, υπολογίζεται το εμβαδόν της ως συνάρτηση του βυθίσματος $T_i(i = 1 ,..., N)$ μέχρι το ανώτατο στεγανό κατάστρωμα. Παράλληλα, υπολογίζεται και η ροπή της επιφάνειας που αντιστοιχεί στο βύθισμα T_i ως προς το βασικό επίπεδο. Στην Εικ. 2.13 απεικονίζονται οι δύο καμπύλες (η διακεκομμένη αντιστοιχεί στις ροπές επιφανειών) που περιέχουν τα σημεία B και C των αντίστοιχων βυθισμάτων. Οι τετμημένες AB είναι υπό κλίμακα ίσες με το εμβαδόν της τομής AX μέχρι τα βυθίσματα T_A και οι τετμημένες AC ίσες με την αντίστοιχη ροπή M_{Vx}.



Εικόνα 2.13: Καμπύλες εμβαδών (AB) και ροπών (AC) ως προς το βύθισμα σε μια εγκάρσια τομή.

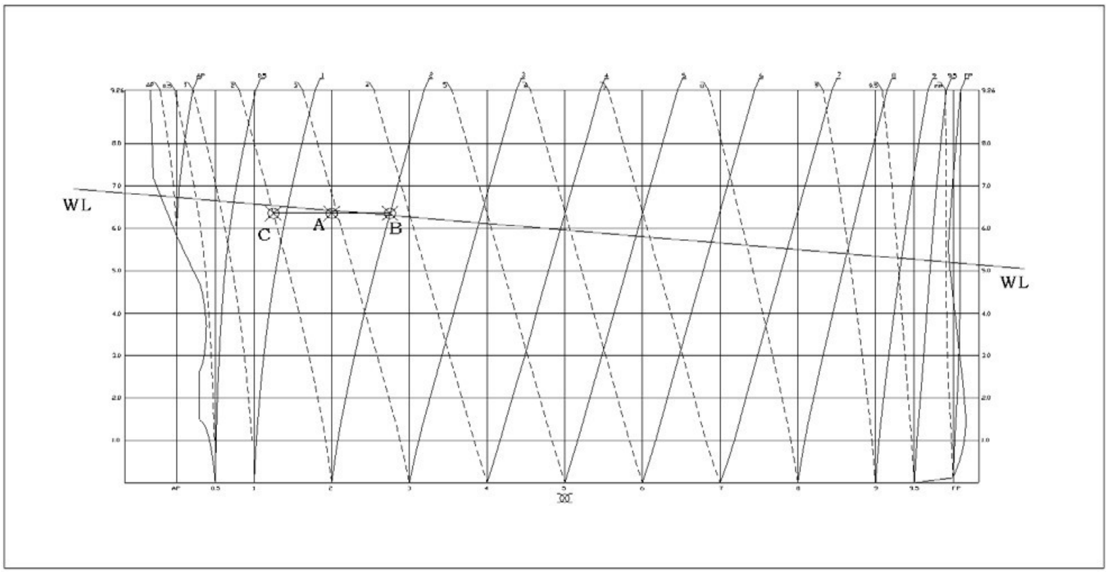
Αν υποθέσουμε ότι ζητούνται τα στοιχεία της άντωσης κάτω από μια οποιαδήποτε κεκλιμένη ίσαλο WL, τότε απαιτούνται οι υπολογισμοί για τα ολοκληρώματα:

$$\nabla = \int_L A_x \, dx \,, \quad M_y = \int_L M_{Vx} \, dx \,, \quad M_{mid} = \int_L x \, A_x \, dx \tag{2.31}$$

όπου τώρα A_x και M_{Vx} είναι οι τιμές του εμβαδού και της πρώτης ροπής της εγκάρσιας τομής στη θέση (x), η οποία ορίζεται κάτω από το σημείο A της τομής της WL με την κατακόρυφη που ορίζει το νομέα στο σχέδιο του περιγράμματος του πλοίου, δηλαδή στο βύθισμα T_x. Αν έχουν χαραχτεί οι καμπύλες Bonjean σε κάθε νομέα, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικ. 2.14, τότε οι αποστάσεις (AB) και (AC) θα δίνουν υπό κλίμακα το εμβαδόν A_x και τη ροπή M_{Vx}.

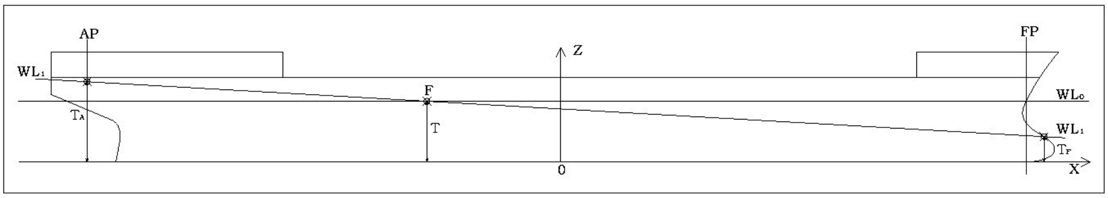
Επομένως, υπολογίζουμε τις συντεταγμένες του κέντρου άντωσης από τις σχέσεις:

$$KB = \frac{M_V}{\nabla} \,, \quad LCB = \frac{M_{mid}}{\nabla} \tag{2.32}$$



Εικόνα 2.14: Καμπύλες Bonjean εμβαδών και ροπών εγκάρσιων τομών κατά μήκος του πλοίου.

Υπολογισμός ισάλου και βυθισμάτων. Εάν είναι γνωστό το βάρος του πλοίου και το κέντρο βάρους του, τότε υπολογίζεται, αρχικά, από το υδροστατικό διάγραμμα η θέση του κέντρου άντωσης κάτω από την ισοβύθιστη ίσαλο εκτοπίσματος $\Delta = W$ και βυθίσματος (Εικ. 2.15). Τότε, η αρχική διαμήκης θέση x_B ή LCB του B στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων του πλοίου δεν συμπίπτει, εν γένει, με τη διαμήκη θέση x_G ή LCG του κέντρου βάρους του πλοίου.



Εικόνα 2.15: Υδροστατική ισορροπία πλοίου σε κεκλιμένη ίσαλο.

Όταν ισχύουν οι υποθέσεις της θεωρίας των μικρών μεταβολών για ένα συμβατικό πλοίο με $L >> B$, τότε η γωνία διαγωγής (ή διαμήκους κλίσης) είναι

$$\tan\vartheta = \frac{\Delta(x_G - X_B)}{\gamma I_{yy}^F} \tag{2.33}$$

Από την Εικ. 2.15, προκύπτει ότι τα δύο βυθίσματα του πλοίου υπολογίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} T_F &= T_{LCF} + \left(\frac{L}{2} - x_F\right)\cdot\tan\vartheta \\ T_A &= T_{LCF} + \left(-\frac{L}{2} - x_F\right)\cdot\tan\vartheta \end{aligned} \tag{2.34}$$

όπου $t = T_F - T_A$ είναι η διαγωγή του πλοίου.

Όταν δεν ισχύει η υπόθεση των μικρών μεταβολών, γίνεται χρήση του διαγράμματος των καμπυλών Bonjean σε συνδυασμό με μία επαναληπτική μέθοδο, η οποία απαιτεί την χρήση Η/Υ. Αρχικά, σε πρώτη προσέγγιση, βρίσκονται τα βυθίσματα από τις σχέσεις (2.33) και, στη συνέχεια, σχεδιάζεται η ίσαλος WL_1 στο σχέδιο των καμπυλών Bonjean.

Με τη βοήθεια των Bonjean, υπολογίζονται από τις γενικές σχέσεις (2.30) το εκτόπισμα Δ_1 και η θέση του κέντρου άντωσης (x_{B1}, KB_1) στο σωματοπαγές σύστημα.

Αν $\Delta_1 \neq \Delta$ ή/και $x_{B1} \neq x_B$, τότε η ίσαλος WL_1 μεταβάλλεται, εφαρμόζοντας μια παράλληλη μεταφορά δT και μια στροφή $\delta\vartheta$ (προσημασμένη, κατά τα ισχύοντα), που ορίζονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} \delta T &= \frac{\Delta - \Delta_1}{\gamma\cdot A_w} \\ \delta\vartheta &= \frac{\delta M}{\gamma\cdot I_{yy}^F} \end{aligned} \tag{2.35}$$

όπου

$$\delta M \cong \Delta\cdot(x_B - x_{B1}) \tag{2.36}$$

Η στροφή πραγματοποιείται πάντοτε γύρω από το σημείο τομής της εκάστοτε ισάλου με την WL_O . Υπολογίζεται η νέα ίσαλος και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να συγκλίνουν οι τιμές του Δ_1 και x_{B1}. Συνήθως, οι σχέσεις (2.34) πολλαπλασιάζονται με συντελεστές υποχαλάρωσης (<1), ώστε να επιταχυνθεί ο ρυθμός και να επιτευχθεί σύγκλιση της μεθόδου.[9]

3

Μεθοδολογικό Πλαίσιο

Προκειμένου να αξιολογήσουμε την αντοχή ενός οποιοδήποτε πλοίου έπρεπε να μπορέσουμε να επιλύσουμε πρώτον διάφορα ζητήματα γεωμετρίας, όσο αφορά τις διατομές του και κυρίως για τον υπολογισμό της κατανομής της πρώτης ροπής επιφανείας. Δεύτερον, υπολογιστικά προβλήματα που έπρεπε να επιλυθούν εμφανίστηκαν κυρίως στο κομμάτι της υδροστατικής όπου η ανοχές για αριθμητικά λάθη είναι εξαιρετικά περιορισμένες. Παρακάτω θα αναλύσουμε τη μεθοδολογία που αναπτύξαμε για να τα ξεπεράσουμε.

3.1 Γεωμετρική Προσέγγιση

Από την αρχή κιόλας που ξεκίνησε η εκπόνηση αυτής της διπλωματικής προέκυψε η βασική ανάγκη για την περιγραφή της γεωμετρίας του πλοίου. Η χρήση αρχείων γεωμετρίας CAD τύπου .stl φάνηκε η πιο αποτελεσματική εφόσον, ο εκάστοτε μελετητής θα μπορούσε μετά την αρχική σχεδίαση της γεωμετρίας της γάστρας σε ένα πρόγραμμα CAD (π.χ. Rhinoceros, Tribon) κι έχοντας εκπονήσει τη βασική προμελέτη των βαρών, να εισάγει το αρχείο γεωμετρίας με ένα μέσο πάχος ελασμάτων και την καμπύλη βάρους και έτσι να έχει μια προεκτίμηση των τάσεων σε όλη τη γάστρα.

Για να εισαχθούν τα αρχεία στο περιβάλλον MATLAB χρησιμοποιήθηκε μια ρουτίνα εισόδου (STL_Import)[12] η οποία αναπτύχθηκε στην κοινότητα του MATLAB και δίνει ως έξοδο τα σημεία της γάστρας, τις συντεταγμένες των τριγώνων και τα κάθετα διανύσματά τους, δηλαδή την περιγραφή της τριγωνοποιημένης επιφάνειας.

Αυτό, ωστόσο, δεν φάνηκε πλήρως λειτουργικό καθώς τόσο οι υδροστατικοί υπολογισμοί όσο και οι υπολογισμοί αντοχής χρειάζονται τις συντεταγμένες των σημείων της γάστρας στις ισάλους (waterlines) και στις εγκάρσιες τομές (sections). Προκειμένου να το επιτύχουμε αυτό χρησιμοποιήθηκε μια άλλη ρουτίνα της κοινότητας (intersectPlaneSurf)[13] που δεδομένων ενός σημείου και ενός κάθετου διανύσματος βρίσκει την τομή μιας τριγωνοποιημένης επιφάνειας με το αντίστοιχο επίπεδο. Επειδή όμως τα σημεία των καμπυλών δεν ήταν ισοκατανεμημένα ούτε είχαν σταθερό πλήθος κι αυτό προκαλούσε πρόβλημα στους υπολογισμούς αντοχής που είχαν μεγάλο σφάλμα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η ρουτίνα (interparc)[14] από την κοινότητα του MATLAB, η οποία ισοκατανέμει τα σημεία πάνω στην καμπύλη.

Κατά τις δοκιμές του προγράμματος παρατηρήθηκε πως κάποιες από τις εγκάρσιες τομές περιγράφονταν με αντίστροφη σειρά. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να υπολογίζεται λάθος η στατική ροπή αυτών των τομών. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα προσθέσαμε ελέγχους της φοράς της καμπύλης ώστε αυτή να περιγράφεται με αντιωρολογιακή φορά. Διάφορα προβλήματα παρουσιάστηκαν σε αυτό το σημείο, κυρίως λόγω της διαφορετικής περιγραφής μιας κλειστής και μιας ανοικτής καμπύλης. Αναφέρουμε ενδεικτικά ότι ο έλεγχος μιας ανοικτής καμπύλης μπορεί να γίνει εύκολα συγκρίνοντας τις συντεταγμένες του πρώτου και του τελευταίου σημείου, πολλές φορές μάλιστα μόνο όσο αφορά τις κατακόρυφες συντεταγμένες. Από την άλλη αυτό δεν είναι ασφαλές κριτήριο σε μια κλειστή καμπύλη που το τελευταίο σημείο ταυτίζεται με το πρώτο. Επίσης, τμήματα καμπυλών που είναι οριζόντια δεν μπορούν να ελεγθούν με τις κατακόρυφες συντεταγμένες.

Ένα άλλο κομμάτι της γεωμετρίας που μας απασχόλησε ήταν το ζήτημα των κλειστών καμπυλών. Κλειστές καμπύλες εμφανίζονται μόνες τους στις άνω πλευρικές δεξαμενές και διαφοροποιούν την κατανομή της διατμητικής ροής. Ήταν, άρα, απαραίτητο να αναγνωρίζει σωστά ο κώδικας τις γεωμετρίες αυτές. Για να το επιτύχει πρέπει το εξωτερικό κέλυφος της γάστρας να έχει κατασκευαστεί ως μια επιφάνεια και το έλασμα της πάνω πλευρικής δεξαμενής ξεχωριστά. Ο κώδικας αναγνωρίζει το κέλυφος μετρώντας το εμβαδό της περιγεγραμμένης επιφάνειας και το συγκρίνει με το αντίστοιχο των υπόλοιπων καμπυλών ώστε να είναι το μεγαλύτερο. Στη συνέχεια συγκρίνει τα όρια των περιγεγραμμένων ορθογωνίων για μπορέσει να ορίσει ποιες καμπύλες βρίσκονται εντός του κελύφους και βρίσκει για όλες τα κοινά σημεία. Σε περίπτωση που μια εσωτερική καμπύλη έχει δύο κοινά σημεία με το κέλυφος, δεν μπορεί παρά να σχηματίζει μια κλειστή καμπύλη που πρέπει να τη διαχειριστεί διαφορετικά, όσο αφορά την πρώτη ροπή επιφανείας της. Καμπύλες με ένα κοινό σημείο αντιμετωπίζονται ως διακλαδώσεις. Εξωτερικές καμπύλες εμφανίζονται στις τομές των βολβών στην πρύμνη και την πλώρη και χρειάζονται μια ειδική διαχείριση για τον υπολογισμό των τάσεων, χωρίς ωστόσο αυτό να γίνεται για λόγους ακρίβειας, εφόσον η βασική θεωρία της δοκού δεν συνίσταται να εφαρμόζεται αλλού εκτός από το παράλληλο τμήμα του πλοίου.

Να σημειώσουμε πως η αναγνώριση των εσωτερικών καμπυλών χρησιμεύει και για τον ορισμό της διαβρεχόμενης επιφάνειας ώστε να γίνουν σωστά οι υδροστατικοί υπολογισμοί.

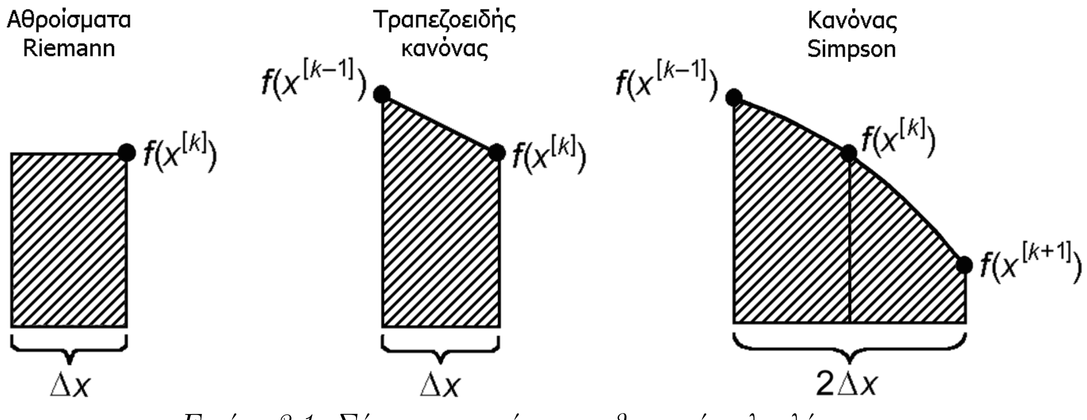
Για τους υδροστατικούς υπολογισμούς χρειάστηκε να εφαρμόσουμε γραμμική παρεμβολή μεταξύ των σημείων των καμπυλών που βρισκόταν η εκάστοτε ίσαλος επιφάνεια ώστε να μπορούμε να υπολογίσουμε τα χαρακτηριστικά της.

3.2 Υπολογιστική Προσέγγιση

3.2.1 Πραγματική Ίσαλος Επιφάνεια - Εκτόπισμα

Κρίσιμο για τους υπολογισμούς διαγωγής του πλοίου είναι ο ακριβής προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της ισάλου, δηλαδή του εμβαδού της, της ροπής αδρανείας της ως προς τον άξονα y και της διαμήκους απόστασης του κέντρου βάρους της από το πρωραίο άκρο του πλοίου. Εξίσου κρίσιμα είναι και τα χαρακτηριστικά του βυθισμένου όγκου, δηλαδή η τιμή του και η διαμήκης απόσταση του κέντρου βάρους του από το πρωραίο άκρο.

Ουσιαστικά τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κομμάτι αφορούσαν τις διαδικασίες ολοκλήρωσης. Αρχικά, για λόγους ταχύτητας, τα ολοκληρώματα υπολογίζονταν ως αθροίσματα των στοιχειωδών ορθογωνίων των συναρτήσεων (Riemann). Ενώ αυτό φαίνεται σαν ένας ανορθόδοξος τρόπος αριθμητικής ολοκλήρωσης σε απλές γεωμετρίες όπως π.χ. μια ορθογώνια δοκό έδινε καλά αποτελέσματα. Με τη συνεχή διαδικασία των δοκιμών αυτός ο τρόπος αποδείχτηκε ανεπαρκής και οι αριθμητικές ολοκληρώσεις αντικαταστάθηκαν με την τραπεζοειδή μέθοδο (εντολή trapz). Αυτή η αντικατάσταση προκάλεσε πρόβλημα σε διατομές με μόνο ένα σημείο, στην πλώρη κατά κύριο λόγο εφόσον η τραπεζοειδής ολοκλήρωση απαιτεί τουλάχιστον δύο. Αυτό λύθηκε εύκολα προσθέτοντας έναν απλό έλεγχο και μηδενίζοντας τα αντίστοιχα ολοκληρώματα. Τέλος, και η μέθοδος αυτή αντικαταστάθηκε παντού εκτός από τον υπολογισμό των καμπυλών Bonjean (για λόγους ταχύτητας) με τη μέθοδο Simpson.



Εικόνα 3.1: Σύγκριση κανόνων αριθμητικής ολοκλήρωσης

3.2.2 Καμπύλες V, M - Τάσεις

Προκειμένου να εξηγήσουμε τη σημασία της ακρίβειας των υπολογισμών των διατμητικών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών είναι αναγκαίο να περιγράψουμε αναλυτικά το πρόβλημα.

Αν με $b(x)$ και $w(x)$ συμβολιστούν αντίστοιχα οι κατανομές άντωσης και βάρους (θετική είναι η φορά του βάρους) τότε η συνολική φόρτιση που υφίσταται το πλοίο-δοκός στη θέση x ισούται με $p(x)=w(x)-b(x)$.

Για τον υπολογισμό των $V(x)$, $M(x)$ από τις σχέσεις (2.9, 2.10) είναι απαραίτητη η γνώση της τιμής της διατμητικής δύναμης και καμπτικής ροπής σε ένα σημείο. Αν σε κανένα άκρο του πλοίου δεν ασκούνται συγκεντρωμένες δυνάμεις τότε στα άκρα η διατμητική δύναμη είναι μηδέν. Το ίδιο ισχύει και για τις καμπτικές ροπές.

Εφαρμόζοντας τη μία από τις δύο οριακές συνθήκες για τη διατμητική δύναμη και την καμπτική ροπή, έστω αυτή που αναφέρεται στο πρυμναίο άκρο, είναι δυνατός ο υπολογισμός των κατανομών των δυνάμεων και ροπών από τις σχέσεις

$$V(x)=V_{AE}+\int_{AE}^{x} p(x')\,dx'=0+\int_{AE}^{x} p(x')\,dx'=\int_{AE}^{x} p(x')\,dx' \tag{3.1}$$

$$M(x)=M_{AE}+\int_{AE}^{x} V(x')\,dx'=0+\int_{AE}^{x} V(x')\,dx'=\int_{AE}^{x} V(x')\,dx' \tag{3.2}$$

θεωρώντας ότι οι δυνάμεις στο πρυμναίο άκρο είναι μηδενικές. Αν τεθεί στις προηγούμενες σχέσεις $x=L$ τότε προκύπτουν τα μεγέθη στο πρωραίο άκρο, από τις

$$V(L)=V_{FE}=\int_{AE}^{FE} p(x)\,dx \tag{3.3}$$

$$M(L)=M_{FE}=\int_{AE}^{FE} V(x)\,dx \tag{3.4}$$

Οι Q_{FE} και M_{FE} πρέπει να μηδενίζονται εφόσον το απαιτούν οι οριακές συνθήκες. Αν αυτό δε συμβαίνει τότε, εκτός από την περίπτωση λάθους στους υπολογισμούς, υπάρχουν δύο πιθανές αιτίες: α) συνεχείς αριθμητικές προσεγγίσεις και β) δεν ισχύουν οι σχέσεις ισορροπίας του πλοίου.

Στην πρώτη των περιπτώσεων γίνεται μια κατανομή του σφάλματος κατά μήκος του πλοίου. Είναι γενικά αποδεκτό, ότι σφάλμα λόγω διαδοχικών αριθμητικών προσεγγίσεων μπορεί να προκαλέσει διατμητική δύναμη στο άκρο, η απόλυτη τιμή της οποίας δεν υπερβαίνει το 3% της μέγιστης απόλυτης τιμής της διατμητικής δύναμης κατά μήκος του πλοίου. Το αντίστοιχο όριο για την καμπτική ροπή είναι 6%.[7]

Στη διαδικασία που ακολουθήσαμε στη παρούσα διπλωματική τα σφάλματα για τις μεθόδους Riemann και τραπεζοειδούς κανόνα ήταν όλα μη αποδεκτά. Συνεπώς και σε αυτό το κομμάτι χρησιμοποιώντας ολοκλήρωση κατά Simpson τα σφάλματα έγιναν αμελητέα. Παρόλα αυτά στον κώδικα ενσωματώθηκε γραμμική διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών για σφάλματα που κινούνται μέσα στα παραπάνω αποδεκτά όρια.

Όσο αφορά τα χαρακτηριστικά τις διατομής και τις παραγόμενες τάσεις, αυτή θεωρήθηκε σαν ένα σύνολο ευθύγραμμων ορθογωνίων τμημάτων με πάχος t και μήκος ανάλογο της διαμέρισης της καμπύλης. Η συνολική ροπή αδρανείας της διατομής υπολογίστηκε σαν άθροισμα των ροπών αδρανείας κεκλιμένων ορθογωνίων ως προς τον ουδέτερο άξονα του καθενός με προσθήκη του όρου steiner ως προς τον ουδέτερο άξονα της διατομής.

Η στατική ροπή υπολογίστηκε με τους κανόνες που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο αλλά θεωρώντας την καμπύλη ως άθροισμα ορθογωνίων τμημάτων όπως πριν.

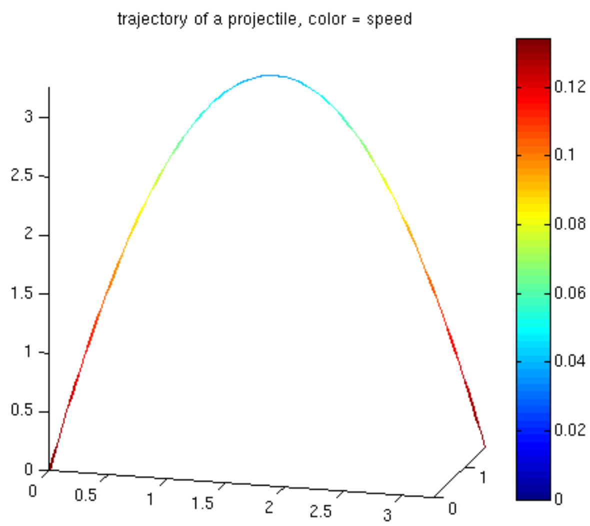
Πρόβλημα παρουσιάστηκε στην κατανομή των τάσεων εξαιτίας του πρυμναίου και πρωραίου βολβού. Εκεί θεωρήθηκε ότι κάθε τμήμα του πλοίου υφίσταται ξεχωριστή κάμψη με φορτίο ανάλογο του εμβαδού του επί της συνολικής επιφάνειας της διατομής. Σε διαφορετική περίπτωση προέκυπταν ασυνέχειες και κυρίως ασύγκριτα μεγάλες τάσεις που εμπόδιζαν την παρουσίαση των τάσεων οπουδήποτε αλλού.

3.3 Μέθοδοι Απεικόνισης

Η διαδικασία της παρουσίασης των αποτελεσμάτων ήταν μια εξαιρετικά δύσκολη περίπτωση καθώς η γεωμετρία που βάλαμε ως είσοδο στο πρόγραμμα χάθηκε στη συνέχεια και τα αποτελέσματα βρίσκονταν σε άλλου είδους γεωμετρική αναπαράσταση.

Αρχικά, η τριδιάστατη απεικόνιση έγινε με την εντολή *patch* του MATLAB, όπου σχηματίζαμε επιφάνειες μεταξύ δύο συνεχόμενων τομών του πλοίου. Παρόλο που αυτή η μέθοδος έχει μεγάλα πλεονεκτήματα, τόσο λόγο της υψηλής συνέχειας των τάσεων όσο και λόγω της ταχύτητας υπολογισμού της απεικόνισης και της συνέχειας της κίνησης σε περιστροφές, τελικά εγκαταλείφθηκε. Αυτό έγινε γιατί δεν μπορεί να απεικονίσει επιφάνειες με πολύπλοκη γεωμετρία. Αυτό δε συμπεριλαμβάνει μόνο τις περιοχές των βολβών αλλά ακόμα και την απλή προσθήκη ενός καταστρώματος, που παρουσιαζόταν με κενά.

Η μέθοδος που εφαρμόστηκε, εν τέλει, ήταν η συνάθροιση τριδιάστατων έγχρωμων καμπυλών (Εικ. 3.2), που αντιστοιχούν στις καμπύλες που δημιουργήσαμε αρχικά, δηλαδή των εγκάρσιων τομών. Παρόλο που η μέθοδος αυτή είναι πιο αργή και στον υπολογισμό και στην απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο και είναι χαμηλότερης ποιότητας, αποδείχτηκε η πιο σταθερή και πιο αξιόπιστη.



Εικόνα 3.2: Παράδειγμα τριδιάστατης έγχρωμης καμπύλης

Όσο αφορά τα διδιάστατα διαγράμματα των ισοτασικών καμπυλών, τα κατασκευάσαμε χρησιμοποιώντας έναν ασπρόμαυρο χρωματικό χάρτη, όπου σε συγκεκριμένο αριθμό τιμών των τάσεων και για συγκεκριμένο εύρος οι τάσεις χρωματίζονται μαύρες ενώ η οπτική γωνία ορίστηκε μηδενική (επίπεδο x-z).

Τα διδιάστατα διαγράμματα των νομέων είναι άθροισμα μια διδιάστατης έγχρωμης καμπύλης της τομής και των κάθετων διανυσμάτων, που χωρίς βέλη αναπαριστούν το μέτρο της τάσης στο αντίστοιχο σημείο.

Τέλος, να σημειώσουμε ότι επειδή όλες οι έγχρωμες καμπύλες δημιουργήθηκαν με την εντολή *patch*, ήταν αναγκαίο να ορίσουμε τις τάσεις και τις συντεταγμένες των άκρων ως *NaN* για να μην παράγονται διδιάστατα επίπεδα αντί για γραμμές.

4

Υλοποίηση

4.1 Περιγραφή του πλοίου και της κατάστασης φόρτισης

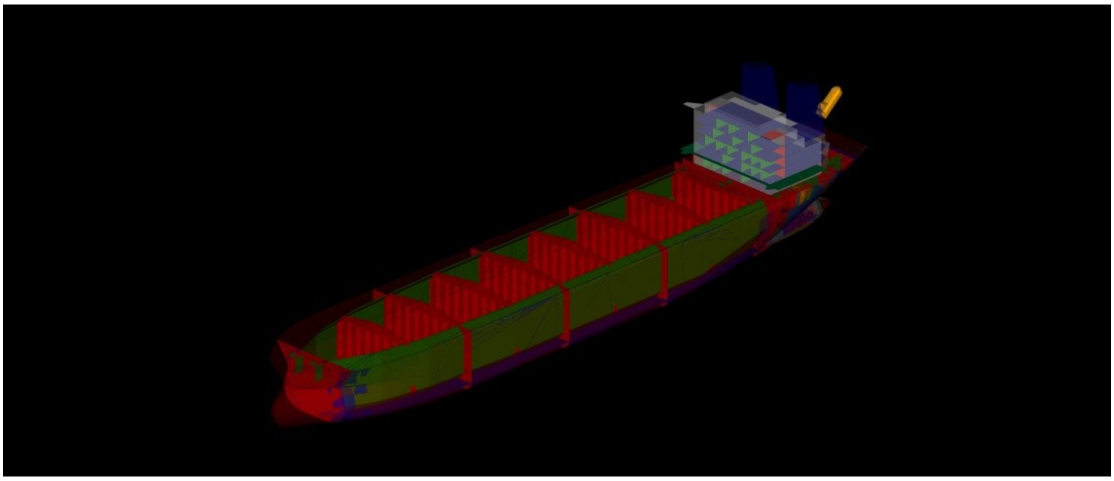
4.1.1 Twinskrew Bulk Carrier

Το πλοίο αποτελεί κομμάτι του εκπαιδευτικού παραδείγματος της ναυπηγικής σουίτας λογισμικού TRIBON M3. Είναι ένα πλοίο μεταφοράς φορτίου χύδην με τα εξής κύρια χαρακτηριστικά που περιλαμβάνουν τις βασικές διαστάσεις του, το εκτόπισμά του, το βάρος του άφορους σκάφους και τα βυθίσματά του

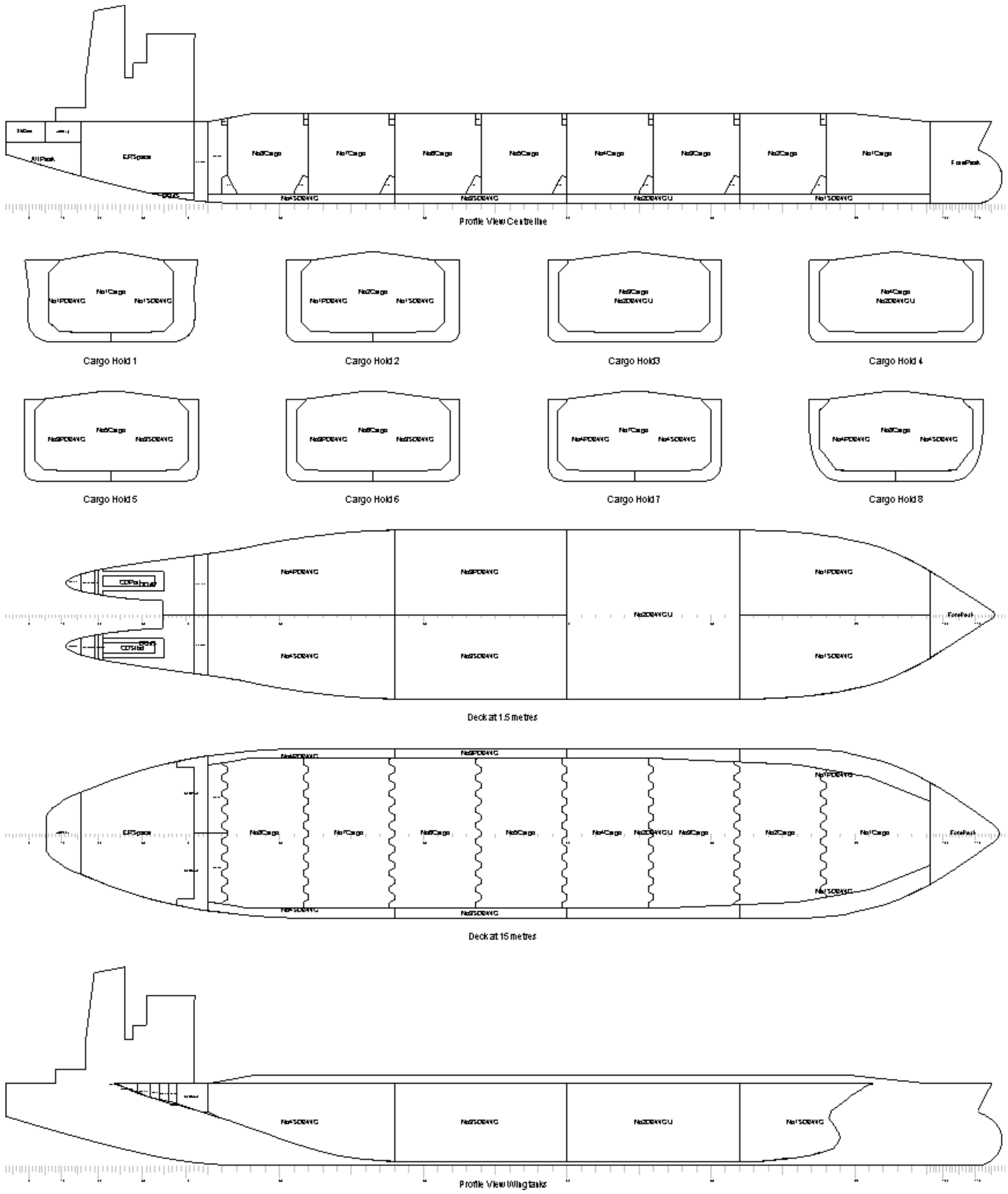
Length Overall	185.000	metres
Length B.P	175.000	metres
Breadth mld.	32.000	metres
Depth mld.	17.000	metres
Design Draft (moulded)	9.500	metres
Summer Load Draft (extreme)	9.500	metres
Displacement at Load Draft	45656	tonnes
Lightship Weight	7400	tonnes
Deadweight at Load Draft	38256	tonnes
Subdivision Length (Ls)	175.000	metres
Aft end of Ls aft of AP	4.500	metres
Subdivision Load Line (ds)	9.500	metres
Lightest Service Draft (d0)	6.650	metres

Πίνακας 4.1: Κύρια Χαρακτηριστικά

Παρακάτω παρουσιάζονται η Γενική τριδιάστατη Μορφή του πλοίου και η εσωτερική διαρρύθμιση των χώρων φορτίου, έρματος, δεξαμενών, μηχανοστασίου κ.ά.



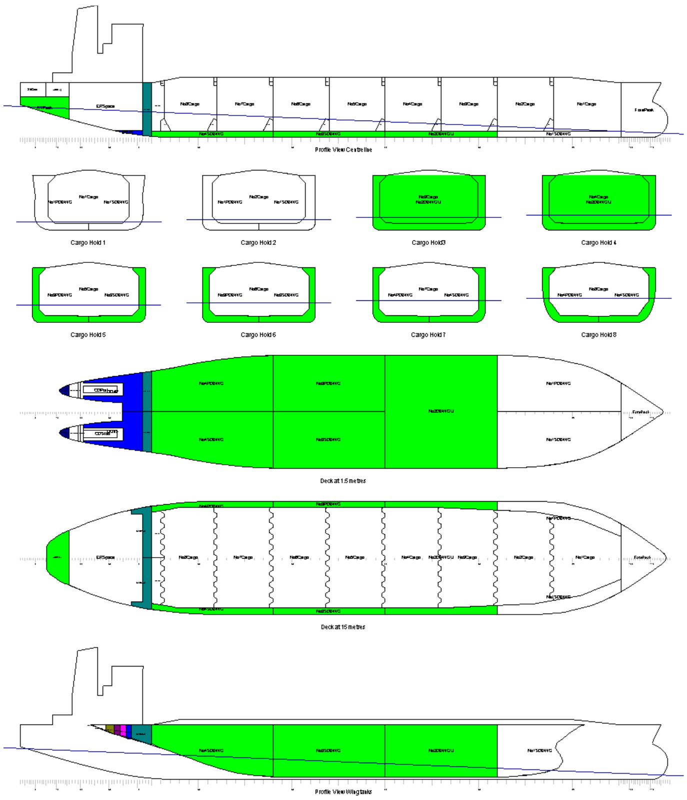
Εικόνα 4.1: Γενική Μορφή του υπό μελέτη πλοίου



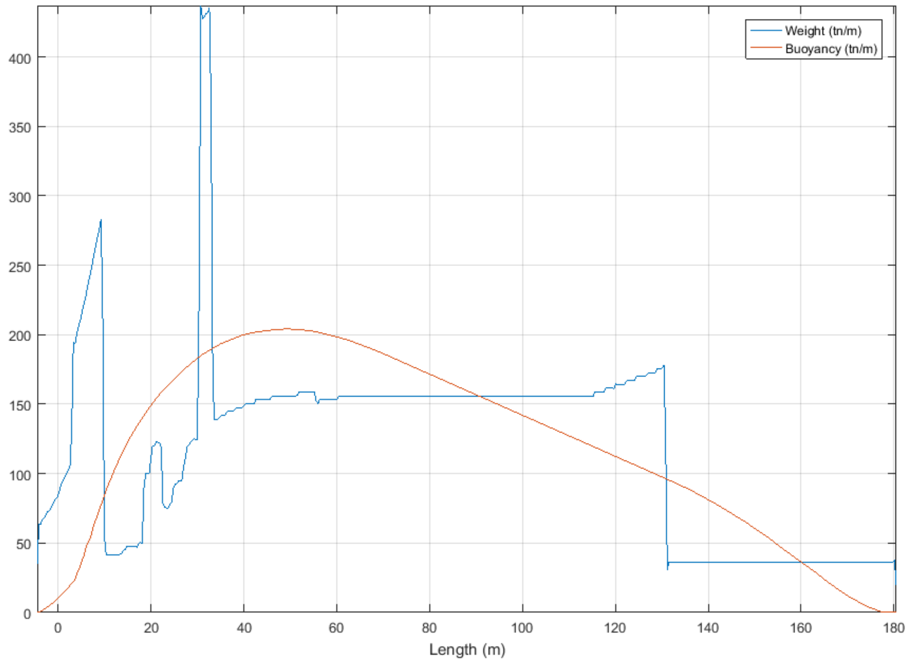
Εικόνα 4.2: Διαμερισματοποίηση του υπό μελέτη πλοίου

4.1.2 Καταστάσεις φόρτωσης

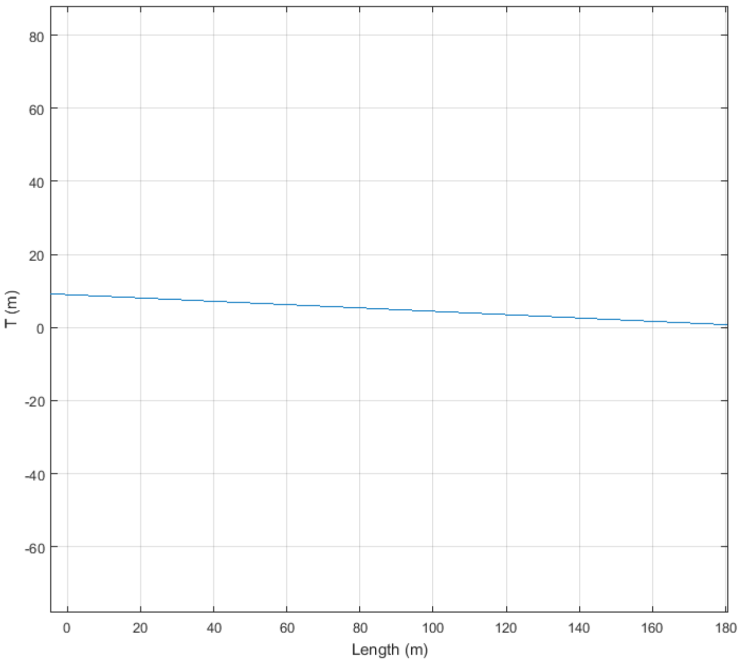
Οι υπολογισμοί της αντοχής της γάστρας έγιναν για δύο πραγματικές καταστάσεις φόρτωσης. Η πρώτη κατάσταση φόρτωσης είναι αυτή του άφορτου πλοίου (Lightship Condition), που περιλαμβάνει το βάρος του έρματος, των αναλώσιμων του πλοίου και του πληρώματος και φυσικά το βάρος της γάστρας.



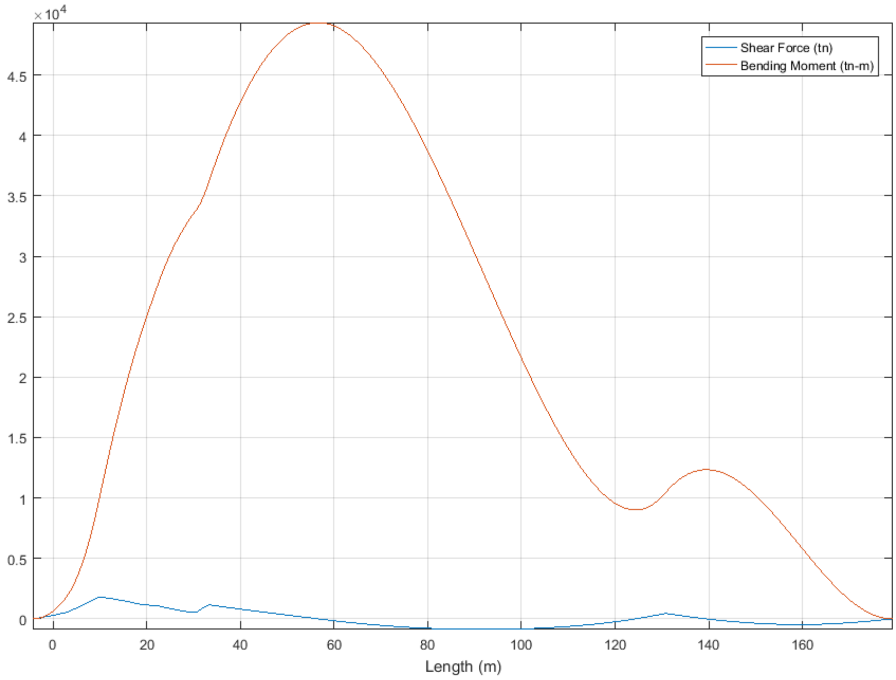
Εικόνα 4.3: Lightship Condition, φόρτωση δεξαμενών



Εικόνα 4.4: Lightship Condition, κατανομή βάρους και άνωσης

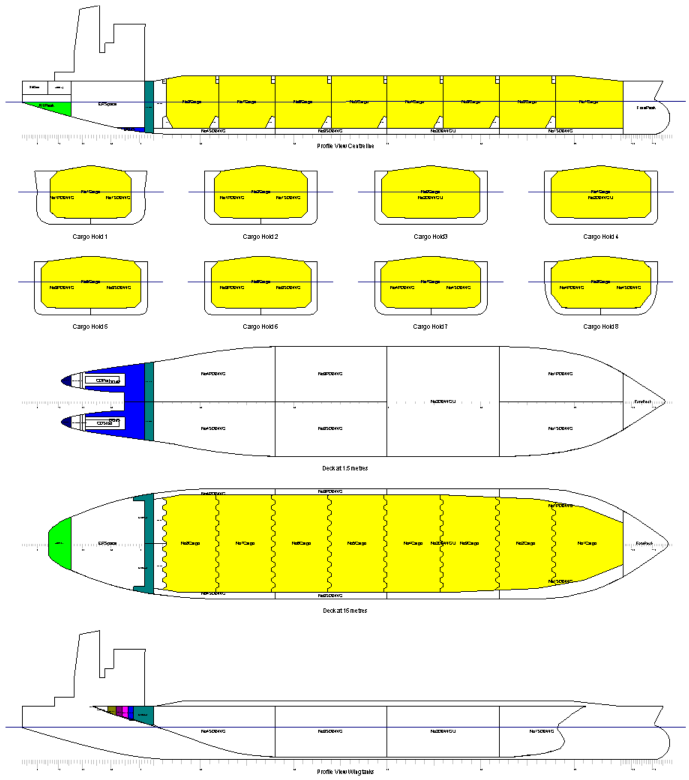


Εικόνα 4.5: Lightship Condition, κατανομή βυθίσματος

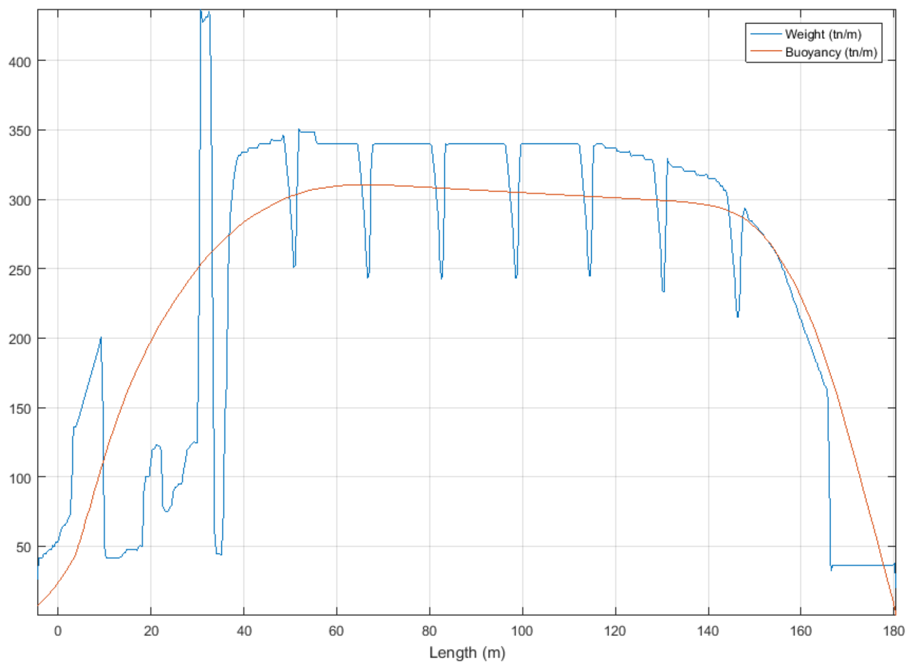


Εικόνα 4.6: Lightship Condition, κατανομή διατμητικής δύναμης και καμπτικής ροπής

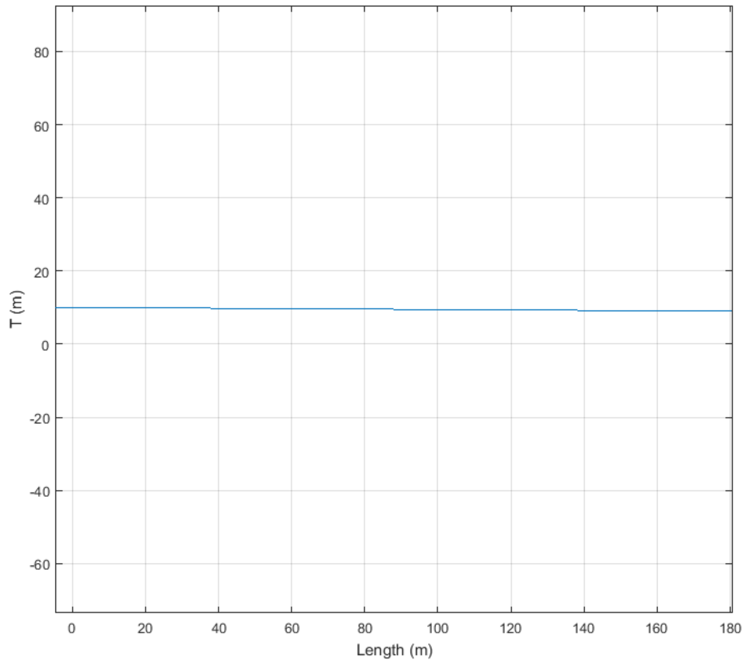
Η δεύτερη κατάσταση φόρτωσης είναι αυτή με το πλοίο πλήρες φορτωμένο για αναχώρηση (Full Load Departure).



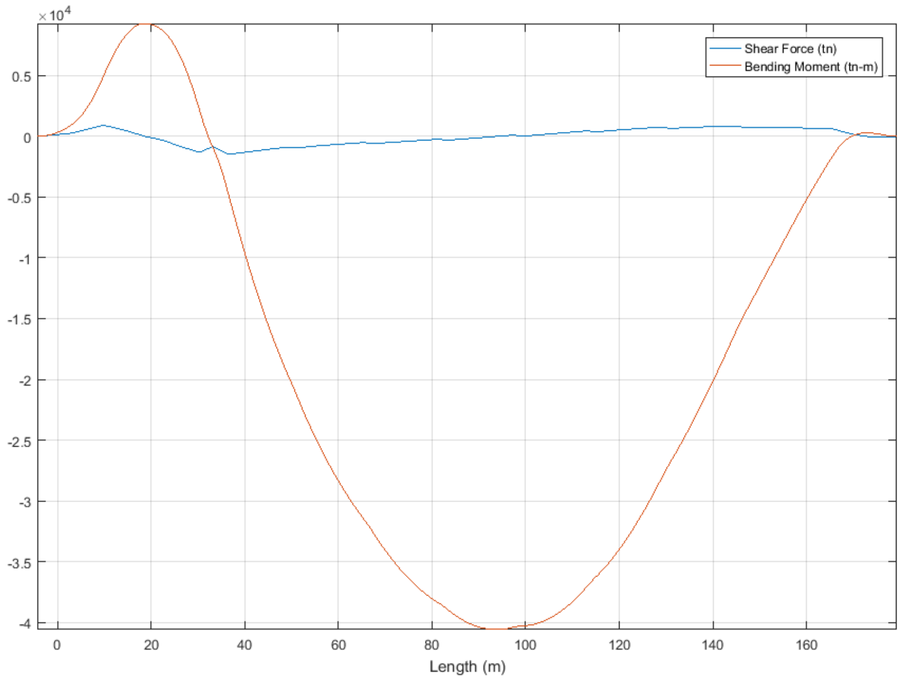
Εικόνα 4.7: Full Load Departure, φόρτωση δεξαμενών



Εικόνα 4.8: Full Load Departure, κατανομή βάρους και άνωσης



Εικόνα 4.9: Full Load Departure, κατανομή βυθίσματος



Εικόνα 4.10: Full Load Departure, κατανομή διατμητικής δύναμης και καμπτικής ροπής

Οι υπολογισμοί της καμπύλης άνωσης, βυθίσματος, των διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών έγιναν από τον κώδικα MATLAB. Η διαδικασία υπολογισμού περιγράφεται αναλυτικά στο εγχειρίδιο χρήσης και λειτουργίας. Ο υπολογισμός της καμπύλης φόρτισης έγινε από το πρόγραμμα Calc/Hydro του TRIBON M3 και είναι προϋπόθεση να είναι γνωστή στο μελετητή. Η εισαγωγή των δεδομένων της κατανομής βάρους πραγματοποιήθηκε με χρήση προγράμματος ψηφιοποίησης διαγραμμάτων (WebPlotDigitizer) με εφαρμογή πάνω στο διάγραμμα της κατανομής βάρους του Calc/Hydro. Το σφάλμα των κατανομών διατμητικών δυνάμεων ήταν τάξης 10^{-5}% ενώ το σφάλμα της κατανομής των καμπτικών ροπών για την κατάσταση Lightship ήταν $-0{,}016$% και για την κατάσταση Full Load Departure $-0{,}0003$%.

4.2 Η Καταπόνηση της Γάστρας

4.2.1 Τάσεις

Η μελέτη της παρούσας εργασίας έγινε για κάθε κατάσταση φόρτωσης (Lightship και Full Load Departure) για γάστρα χωρίς κατάστρωμα και με κατάστρωμα. Υπολογίστηκαν οι ορθές τάσεις, οι διατμητικές, οι μέγιστες κύριες, οι ελάχιστες κύριες, οι μέγιστες διατμητικές, οι τάσεις Von Mises καθώς και η διαφορά των Von Mises από τις ορθές τάσεις. Κάθε είδος τάσεων μας παρέχει διαφορετικό είδος πληροφορίας, το οποίο ωστόσο είναι απαραίτητο για την σφαιρική εικόνα της καταπόνησης της γάστρας.

4.2.2 Μέγιστες Κύριες Τάσεις (ΜΚΤ)

Από την παρατήρηση των τριδιάστατων απεικονίσεων των μέγιστων κύριων τάσεων (Εικ. 4.11, 4.12, 4.15, 4.16) συμπεραίνουμε ότι η συγκέντρωση των τάσεων στην κατάσταση του άφορτου πλοίου εμφανίζεται στο κατάστρωμα σε απόσταση περίπου L/4 από το πρωραίο άκρο (AP). Αντιθέτως, στο πλήρως φορτωμένο πλοίο η συγκέντρωση των τάσεων συμβαίνει στον πυθμένα και περίπου στο μέσο νομέα. Η περίσσεια άντωσης στην περιοχή της συγκέντρωσης τάσεων στο άφορτο πλοίο όπως και η περίσσεια βάρους περί το μέσο νομέα στο φορτωμένο πλοίο προκαλεί κάμψη της γάστρας με τα κοίλα προς τα κάτω (hogging) ή προς τα πάνω (sagging) αντίστοιχα. Αποτέλεσμα αυτού είναι η καταπόνηση με εφελκυστικές τάσεις του καταστρώματος για την κάμψη hogging και του πυθμένα για την κάμψη sagging. Επομένως, είναι λογικό οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις να εμφανίζονται στις ίδιες περιοχές.

Στο μέσο νομέα η συγκέντρωση των τάσεων εμφανίζεται στην τομή του καταστρώματος και της γάστρας στο άφορτο πλοίο (Εικ. 4.13, 4.14) ενώ στο κατάστρωμα οι ΜΚΤ παραμένουν σταθερές. Στο φορτωμένο εξαιτίας της γεωμετρικής ομαλότητας του πυθμένα δεν εμφανίζονται έντονες συγκεντρώσεις στα άκρα του πυθμένα σε σχέση με την περιοχή κοντά στο διάμηκες επίπεδο συμμετρίας (Εικ. 4.17, 4.18) ενώ παραμένουν γενικά σταθερές στον πυθμένα. Όσο απομακρυνόμαστε από το μέσο νομέα αυτή η εικόνα παρουσιάζει διαφοροποιήσεις.

Η κατανομή των τάσεων του άφορτου πλοίου είναι, επίσης, σαφώς πιο ομαλή από την αντίστοιχη του φορτωμένου πλοίου. Με δεδομένη την ομαλότητα της καμπύλης άντωσης, αυτό συμβαίνει εξαιτίας της σχετικής ομαλότητας που εμφανίζει η καμπύλη του βάρους και η οποία οφείλεται στο γεγονός, ότι το στο άφορτο πλοίο το κύριο βάρος είναι αυτό της γάστρας, η γεωμετρική ομαλότητα της οποίας οδηγεί και σε ομαλότητα του βάρους της. Αντίθετα, η ύπαρξη των φρακτών στο φορτωμένο πλοίο (κυρίως των λοξών ελασμάτων έδρασης των φρακτών (stools)) και η κατανομή του φορτίου (payload) μέσα στα αμπάρια δημιουργεί ασυνέχειες πρώτης παραγώγου της καμπύλης βάρους στις θέσεις των φρακτών.

Όσο αφορά την ύπαρξη καταστρώματος από τις απεικονίσεις φαίνεται ξεκάθαρα η σημασία του για την κάμψη hogging. Οι τάσεις στο άφορτο πλοίο βρήκαν διέξοδο προς το κατάστρωμα και οδήγησαν σε μείωση των μέγιστων κύριων τάσεων περίπου δύο (2) φορές. Ακόμα και στο φορτωμένο πλοίο που η συγκέντρωση των τάσεων συμβαίνει στον πυθμένα εμφανίστηκε μειωμένη καταπόνηση και οι τάσεις μετατοπίστηκαν προς το κατάστρωμα. Αυτό είναι αναμενόμενο εφόσον η ροπή αδράνειας αυξήθηκε και ο ουδέτερος άξονας μετατοπίστηκε προς τα πάνω με την προσθήκη του καταστρώματος.

4.2.3 Ελάχιστες Κύριες Τάσεις (ΕΚΤ)

Στα διαγράμματα των ελάχιστων κύριων τάσεων παρατηρούμε πως οι συγκεντρώσεις των μέγιστων θλιπτικών φορτίων παρατηρούνται στον πυθμένα για το άφορτο πλοίο και στο κατάστρωμα για το φορτωμένο κατά το ύψος (Εικ. 4.20, 4.24). Αυτό είναι μια αναμενόμενη εικόνα εφόσον συμφωνεί με τη μορφή κάμψης του πλοίου και με την κατανομή των μέγιστων κύριων τάσεων. Οι περιοχές συγκέντρωσης έχουν τις ίδιες αποστάσεις κατά το διάμηκες με τις μέγιστες κύριες τάσεις.

Τα διαγράμματα των εγκάρσιων τομών στο μέσο νομέα δείχνουν μικρή συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή του πυθμένα κοντά στα πλευρικά ελάσματα ενώ γενικά παραμένουν σταθερές στον πυθμένα, στην περίπτωση του άφορτου πλοίου (Εικ. 4.21, 4.22). Στο φορτωμένο πλοίο εμφανίζεται συγκέντρωση των ΕΚΤ στην τομή του καταστρώματος και των πλευρικών ελασμάτων ενώ στο κατάστρωμα είναι σταθερές (Εικ. 4.25, 4.26). Όσο απομακρυνόμαστε από το μέσο νομέα η εικόνα αυτή διαφοροποιείται.

Όσο αφορά την ομαλότητα των κατανομών αυτή είναι μεγαλύτερη για το άφορτο πλοίο και μικρότερη για το φορτωμένο εξαιτίας των φαινομένων που εξηγήσαμε στις ΜΚΤ.

Η ύπαρξη καταστρώματος οδήγησε σε μικρή αύξηση των μέγιστων θλιπτικών φορτίων στο πυθμένα στην περίπτωση του άφορτου πλοίου (Εικ. 4.19, 20). Αντιθέτως, στην περίπτωση του φορτωμένου οδήγησε σε πολύ μεγάλη μείωση των μέγιστων θλιπτικών φορτίων στο κατάστρωμα (Εικ. 4.23, 4.24).

4.2.4 Μέγιστες Διατμητικές Τάσεις (ΜΔΤ)

Οι μέγιστες διατμητικές τάσεις εμφανίζουν συγκέντρωση στο ύψος του καταστρώματος και για τις δύο καταστάσεις φόρτωσης στην περίπτωση της γάστρας χωρίς κατάστρωμα αλλά σε διαφορετική απόσταση κατά το διάμηκες (Εικ. 4.27, 4.21). Με την ύπαρξη καταστρώματος οι ΜΔΤ εμφανίζουν συγκέντρωση στην πρύμνη του πλοίου στα πλευρικά ελάσματα και μια μεγάλη περιοχή υψηλών τιμών στην περιοχή μεγιστοποίησης των καμπτικών ροπών η οποία εκτίνεται από το κατάστρωμα μέχρι και τον πυθμένα (Εικ. 4.28, 4.32).

Τα διαγράμματα του μέσου νομέα δείχνουν συγκέντρωση των τάσεων στα πλευρικά ελάσματα στο ύψος του καταστρώματος και για τις δύο καταστάσεις φόρτωσης (Εικ. 4.29, 4.33). Αντιθέτως, τα διαγράμματα με την ύπαρξη καταστρώματος δείχνουν μια συμμετρική κατανομή των ΜΔΤ γύρω από τον ουδέτερο άξονα της διατομής με τις μέγιστες τιμές να παρατηρούνται στο κατάστρωμα και τον πυθμένα και τις ελάχιστες πάνω στον ουδέτερο άξονα (Εικ. 4.30, 4.34). Στο κατάστρωμα και στον πυθμένα οι τάσεις παραμένουν σταθερές.

Η κατανομή των ΜΔΤ για τις δύο καταστάσεις φόρτωσης είναι πιο ομαλή χωρίς την ύπαρξη καταστρώματος ενώ με την προσθήκη του καταστρώματος εμφανίζονται πολλές περιοχές συγκέντρωσης των τάσεων κυρίως στα πλευρικά ελάσματα.

Ανεξαρτήτως της ύπαρξης καταστρώματος οι τάσεις στο άφορτο πλοίο είναι μεγαλύτερες από τις τάσεις στο φορτωμένο. Ειδικότερα, στο φορτωμένο πλοίο η ύπαρξη καταστρώματος οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερη πτώση των ΜΔΤ σε σχέση με το άφορτο.

4.2.5 Ορθές Τάσεις (ΟΤ)

Τα τριδιάστατα διαγράμματα των ορθών τάσεων δείχνουν εφελκυσμό στο ύψος του καταστρώματος και θλίψη στο ύψος του πυθμένα για το άφορτο πλοίο και το αντίστροφο για το φορτωμένο πλοίο (Εικ. 4.35, 4.36, 4.37, 4.38). Η συγκέντρωση των τάσεων συμβαίνει στις περιοχές μεγιστοποίησης των καμπτικών ροπών κατά το διάμηκες. Οι τάσεις παραμένουν σταθερές κατά το πλάτος και η ομαλότητα των διαγραμμάτων δεν επηρεάζεται από το είδος της φόρτισης εφόσον οι ΟΤ είναι άμεσα εξαρτώμενες από τις καμπτικές ροπές οι οποίες είναι σε κάθε περίπτωση ομαλές.

Με την προσθήκη του καταστρώματος οι τάσεις μειώνονται και στις δύο καταστάσεις φόρτωσης. Επίσης, λόγω της μετακίνησης του ουδέτερου άξονα προς το κατάστρωμα η κατανομή των εφελκυστικών και θλιπτικών ΟΤ γίνεται πιο συμμετρική κατά το ύψος.

Στην κατάσταση φόρτωσης Lightship το πλοίο εμφανίζει, ανεξάρτητα της ύπαρξης καταστρώματος, μεγαλύτερες τάσεις από την κατάσταση Full Load Departure. Αυτό είναι αναμενόμενο εφόσον η μέγιστη καμπτική ροπή είναι μεγαλύτερη για το άφορτο πλοίο λόγω της πιο συγκεντρωμένης κατανομής του βάρους.

4.2.6 Διατμητικές τάσεις (ΔΤ)

Οι διατμητικές τάσεις συγκεντρώνονται κυρίως στα πλευρικά ελάσματα της κατασκευής σε όλες τις καταστάσεις φόρτωσης ανεξάρτητα από την ύπαρξη καταστρώματος. Οι τάσεις του άφορτου πλοίου είναι γενικά μεγαλύτερες από αυτές του φορτωμένου.

Η τομή του μεσαίου νομέα δείχνει συγκέντρωση των τάσεων περί τον ουδέτερο άξονα της διατομής με μηδενισμό των τάσεων στο ύψος του καταστρώματος στο πλευρικό έλασμα και στο διάμηκες επίπεδο συμμετρίας στον πυθμένα για το άφορτο πλοίο (Εικ. 4.41, 4.42). Στο φορτωμένο οι τάσεις μεγιστοποιούνται στον ουδέτερο άξονα και μηδενίζονται στο διάμηκες επίπεδο συμμετρίας τόσο στο κατάστρωμα όσο και στον πυθμένα (Εικ. 4.45, 4.46).

Οι περιοχές συγκέντρωσης στο άφορτο πλοίο είναι περισσότερες από αυτές στο φορτωμένο. Στην κατάσταση Lightship, ανεξάρτητα από την ύπαρξη καταστρώματος εμφανίζονται πέντε (5) κύριες περιοχές συγκέντρωσης: δύο στην πρύμνη, μία στο παράλληλο τμήμα, μία στο πρωραίο άκρο του παράλληλου τμήματος και μία στην πλώρη. Στην κατάσταση Full Load Departure εμφανίζονται τρεις (3) περιοχές συγκέντρωσης: μία στην πρύμνη, μία στο πρωραίο παράλληλο τμήμα και μία στο πρωραίο παράλληλο τμήμα και στην πλώρη. Παράλληλα η κατανομή των τάσεων στο άφορτο πλοίο είναι πολύ πιο ομαλή από αυτή του φορτωμένου.

Στην περίπτωση του άφορτου πλοίου οι ΔΤ συγκεντρώνονται στην πρύμνη με φορά προς τον πυθμένα και στο μέσο του πλοίου με φορά προς το κατάστρωμα (Εικ. 4.39, 4.40). Στο φορτωμένο πλοίο οι ΔΤ συγκεντρώνονται στην πρύμνη και στην πλώρη με φορά προς τον πυθμένα και στο παράλληλο τμήμα με φορά προς το κατάστρωμα (Εικ. 4.43, 4.44).

4.2.7 Τάσεις Von Mises (TVM)

Οι τάσεις Von Mises ακολουθούν την ίδια κατανομή με τις ΜΔΤ σε κάθε περίπτωση (Εικ. 4.47, 4.48, 4.49, 4.50, 4.51, 4.52, 4.53, 4.54).

4.2.8 Διαφορά Von Mises – Ορθών Τάσεων

Τα διαγράμματα της διαφοράς των τάσεων Von Mises από τις ορθές τάσεις μας δείχνουν σε ποιες περιοχές της γάστρας οι TVM ξεπερνούν τις ΟΤ και κατά πόσο. Παρατηρούμε ότι στο άφορτο πλοίο, στο ύψος του καταστρώματος οι TVM είναι ίσες με τις ΟΤ ενώ όσο κατεβαίνουμε προς τον πυθμένα αυτές οι διαφορές αυξάνονται εμφανίζοντας συγκέντρωση στην περιοχή συγκέντρωσης των ΕΚΤ (εικ 4.55, 4.56). Στο φορτωμένο πλοίο οι TVM είναι ίσες με τις ΟΤ στον πυθμένα ενώ όσο ανεβαίνουμε προς το κατάστρωμα αυξάνονται οι διαφορές με περιοχή συγκέντρωσης ίδια με τις ΕΚΤ (Εικ. 4.59, 4.60).

Τα διαγράμματα του μέσου νομέα δείχνουν για το άφορτο πλοίο μια μικρή συγκέντρωση τάσεων στο πλευρικό έλασμα στο ύψος του πυθμένα ενώ οι διαφορές πάνω σε αυτό μένουν σταθερές (Εικ. 4.57, 4.58). Στο φορτωμένο πλοίο δείχνουν συγκέντρωση των διαφορών στο πλευρικό έλασμα στο ύψος του καταστρώματος ενώ πάνω σε αυτό παραμένουν σταθερές (Εικ. 4.61, 4.62).

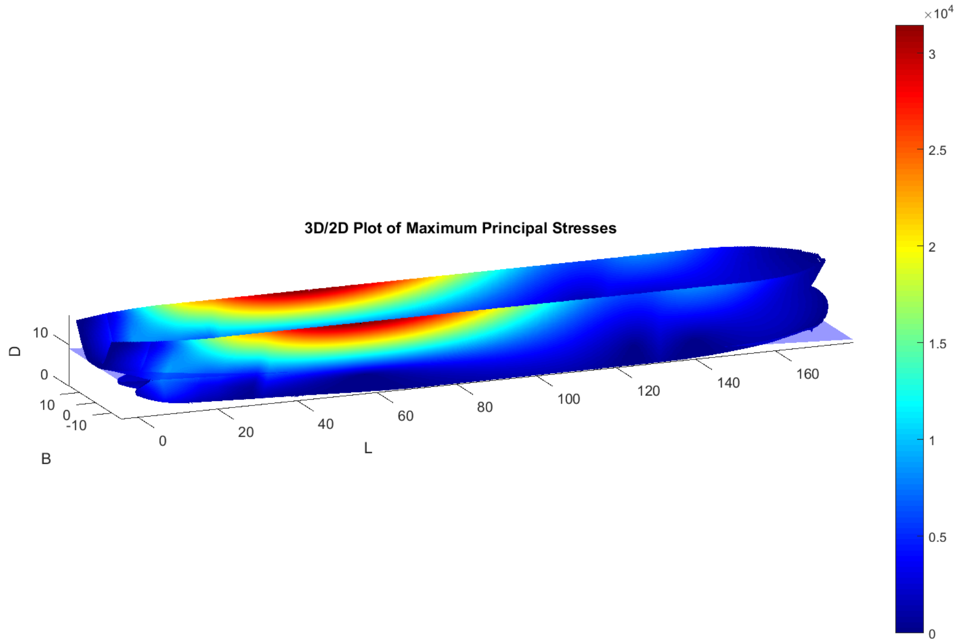
Η κατανομή των διαφορών στο άφορτο πλοίο είναι πιο ομαλή από το φορτωμένο.

Οι διαφορές μεγαλώνουν για την κατάσταση Lightship όταν προστίθεται κατάστρωμα. Αντίθετα, οι διαφορές εμφανίζουν τη μέγιστη τιμή τους για την κατάσταση Full Load Departure χωρίς κατάστρωμα ενώ με την προσθήκη καταστρώματος υπάρχει πολύ μεγάλη πτώση των διαφορών.

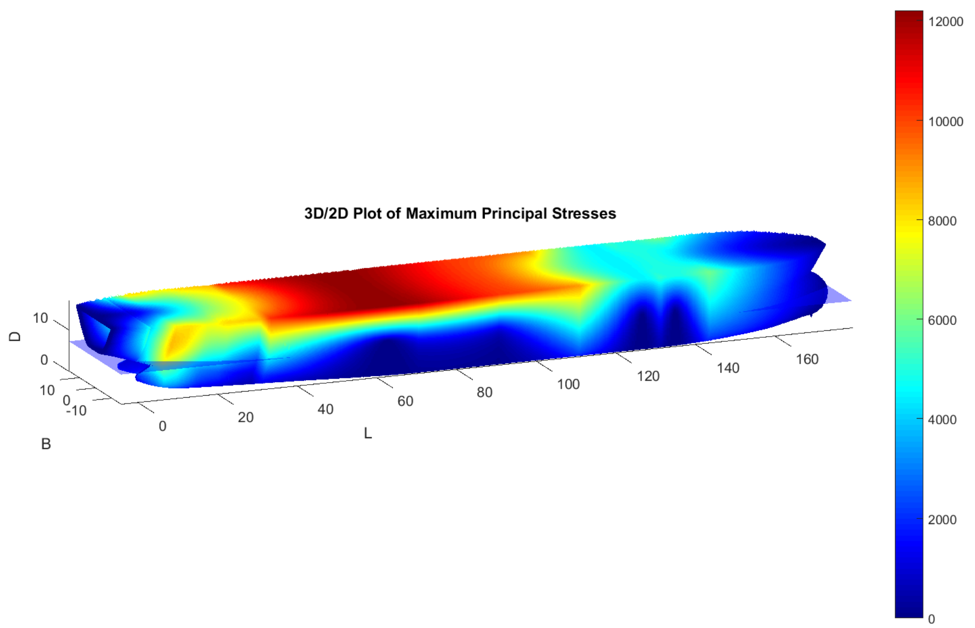
Τα διαγράμματα αυτά καταδεικνύουν περιοχές της γάστρας που οι ορθές τάσεις ακόμα κι αν δεν ξεπερνούν το όριο διαρροής εκεί, μπορεί να επέλθει αστοχία και άρα σε αυτές το κριτήριο της μέγιστης ορθής τάσης είναι ανεπαρκές. Επίσης, από τις περιοχές συγκέντρωσης των διαφορών συμπεραίνουμε πως το κριτήριο της μέγιστης ορθής τάσης υστερεί σε σημεία της γάστρας που βρίσκονται υπό θλίψη, αν λάβουμε υπόψη μας και την κατανομή των ορθών τάσεων σε κάθε περίπτωση. Το συμπέρασμα αυτό είναι βάσιμο, δεδομένου ότι η τάση διαρροής σε θλίψη και εφελκυσμό στα όλκιμα υλικά, όπως ο χάλυβας, είναι παρόμοια.

4.3 Διαγράμματα Τάσεων

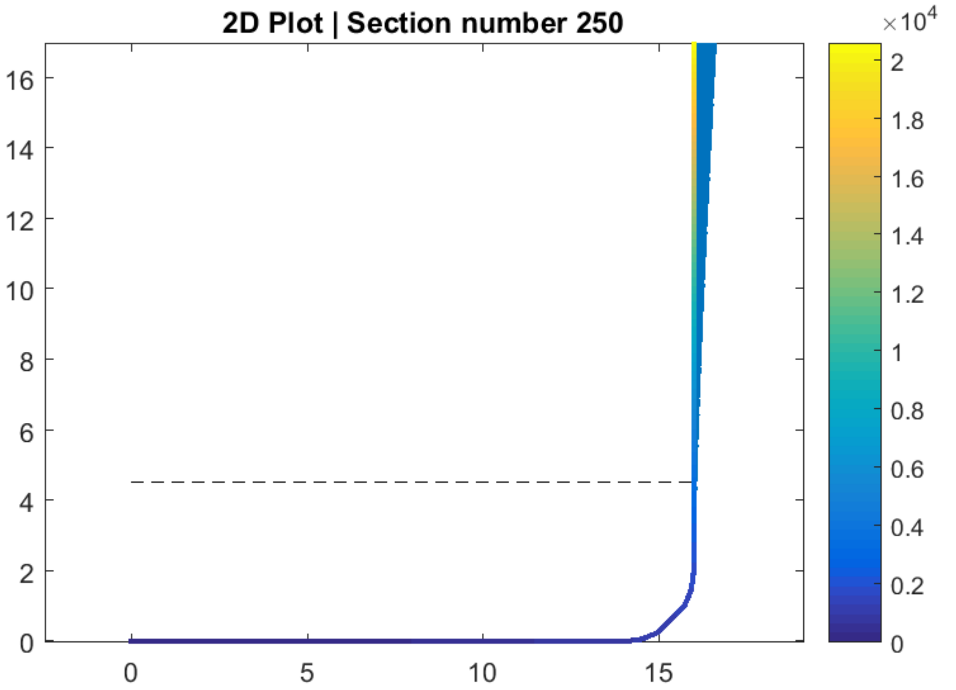
4.3.1 Μέγιστες Κύριες Τάσεις



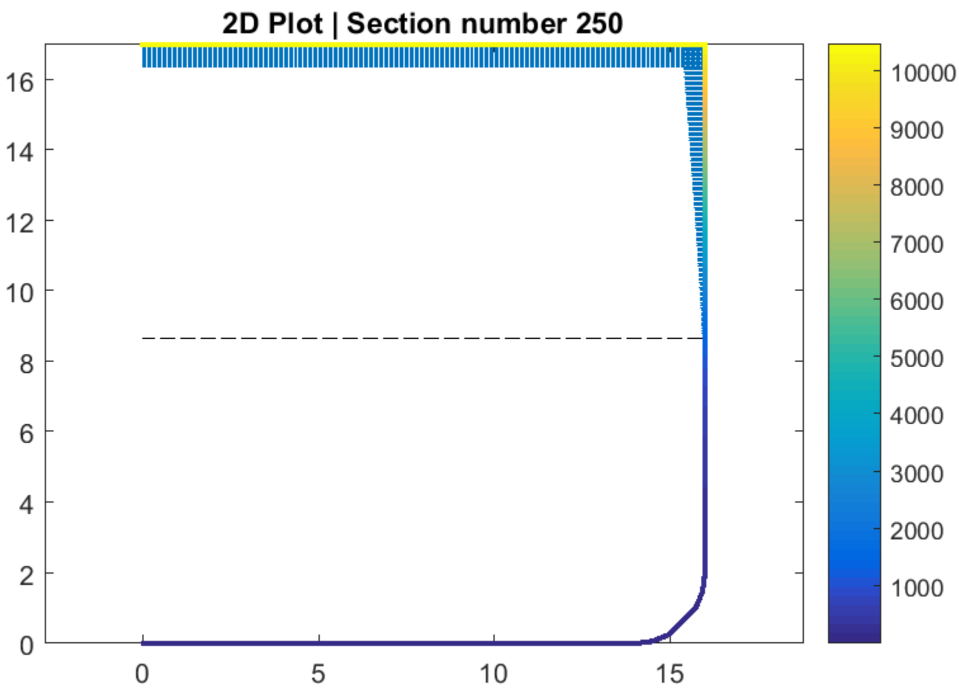
Εικόνα 4.11: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Lightship Condition



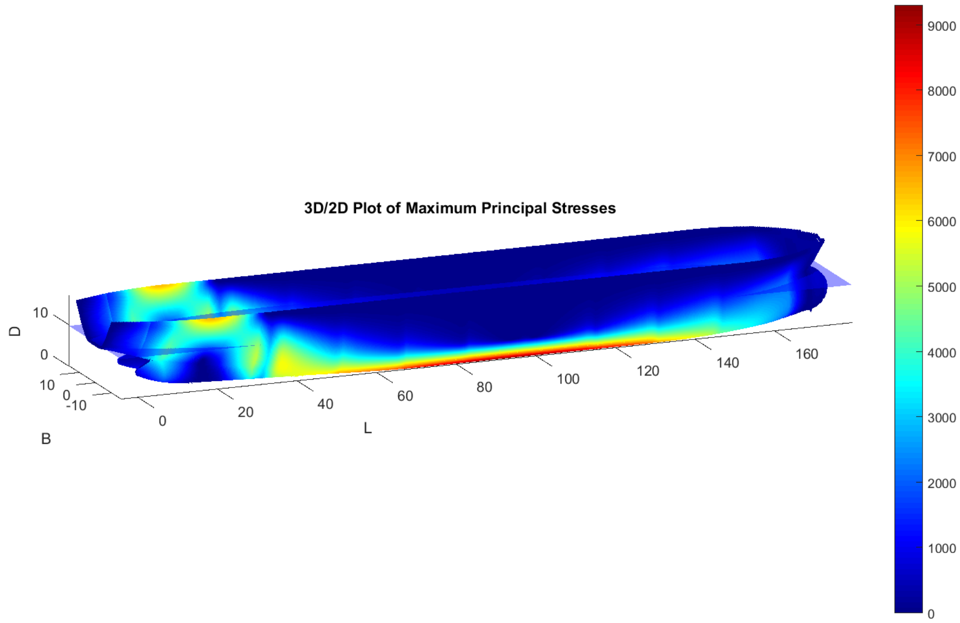
Εικόνα 4.12: Γάστρα με κατάστρωμα, Lightship Condition



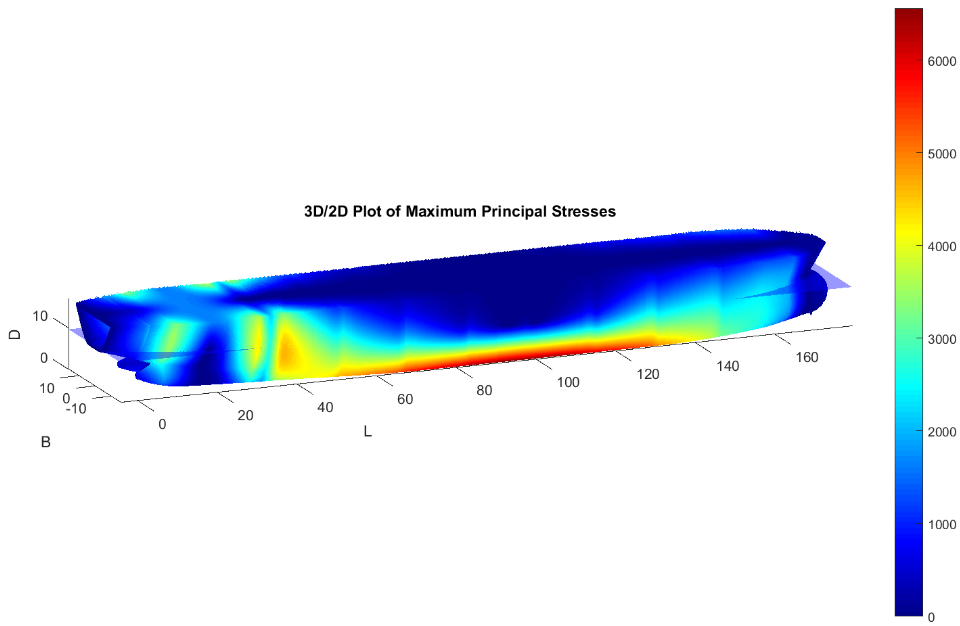
Εικόνα 4.13: Μέσος νομέας χωρίς κατάστρωμα, Lightship Condition



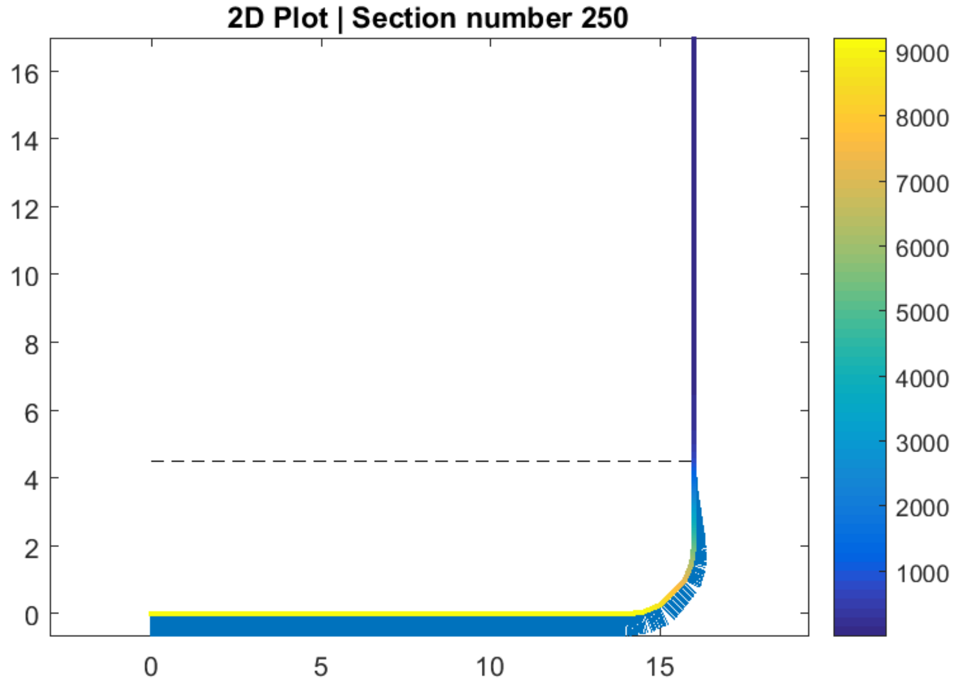
Εικόνα 4.14: Μέσος νομέας με κατάστρωμα, Lightship Condition



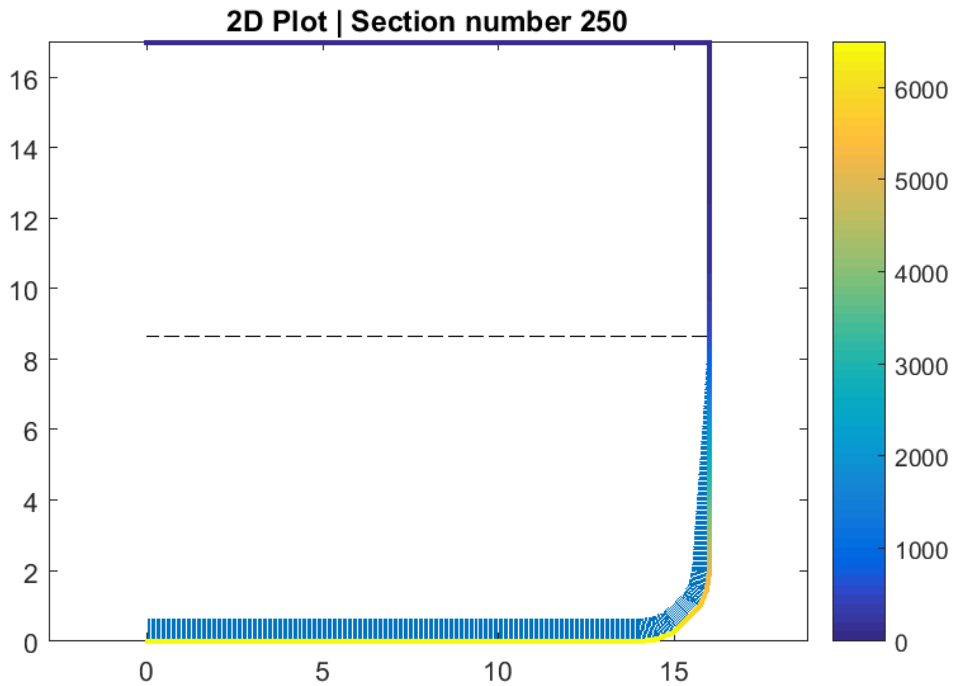
Εικόνα 4.15: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Full Load Departure



Εικόνα 4.16: Γάστρα με κατάστρωμα, Full Load Departure

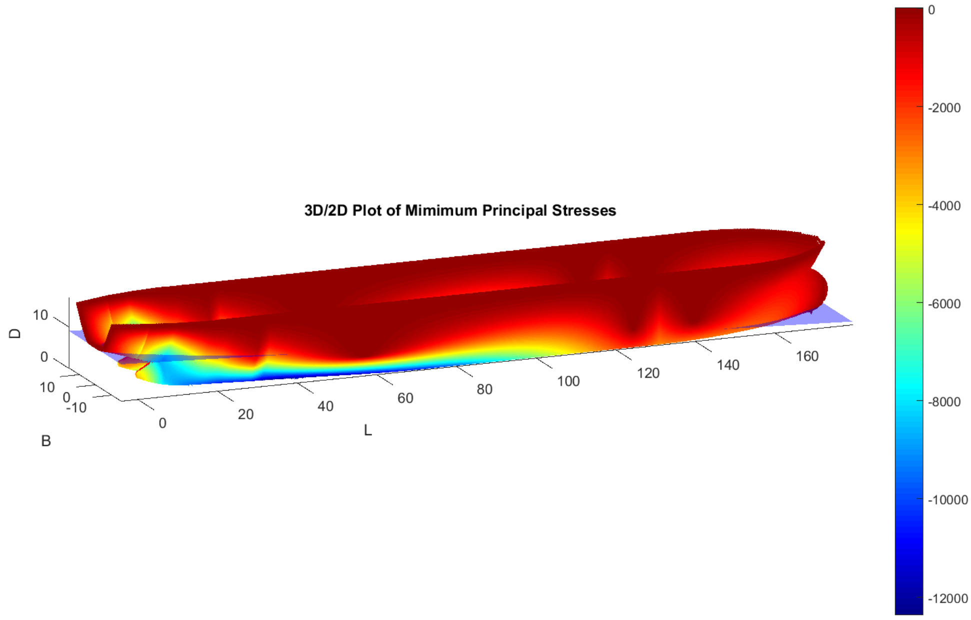


Εικόνα 4.17: Μέσος νομέας χωρίς κατάστρωμα, Full Load Departure

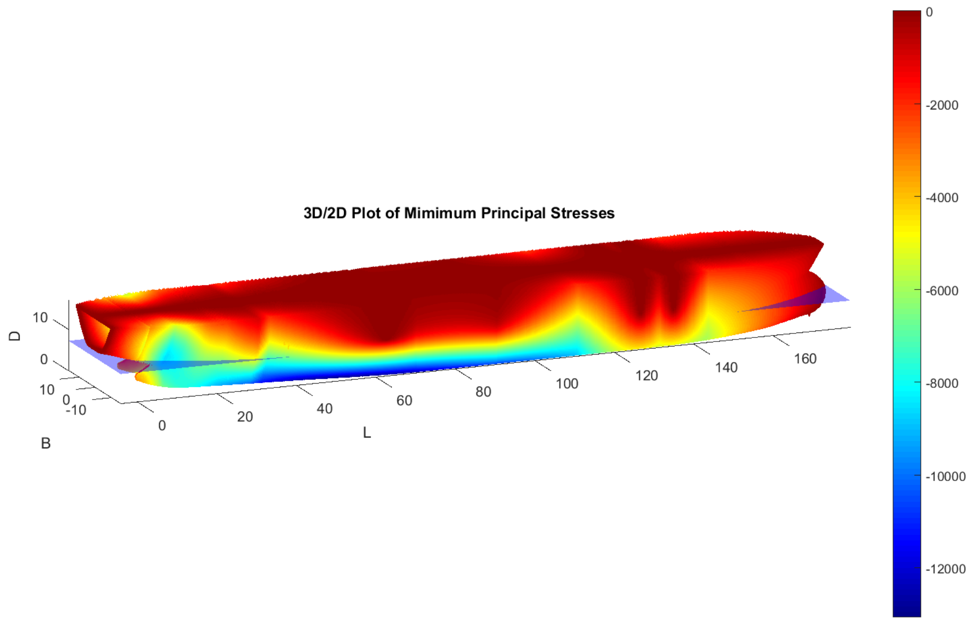


Εικόνα 4.18: Μέσος νομέας με κατάστρωμα, Full Load Departure

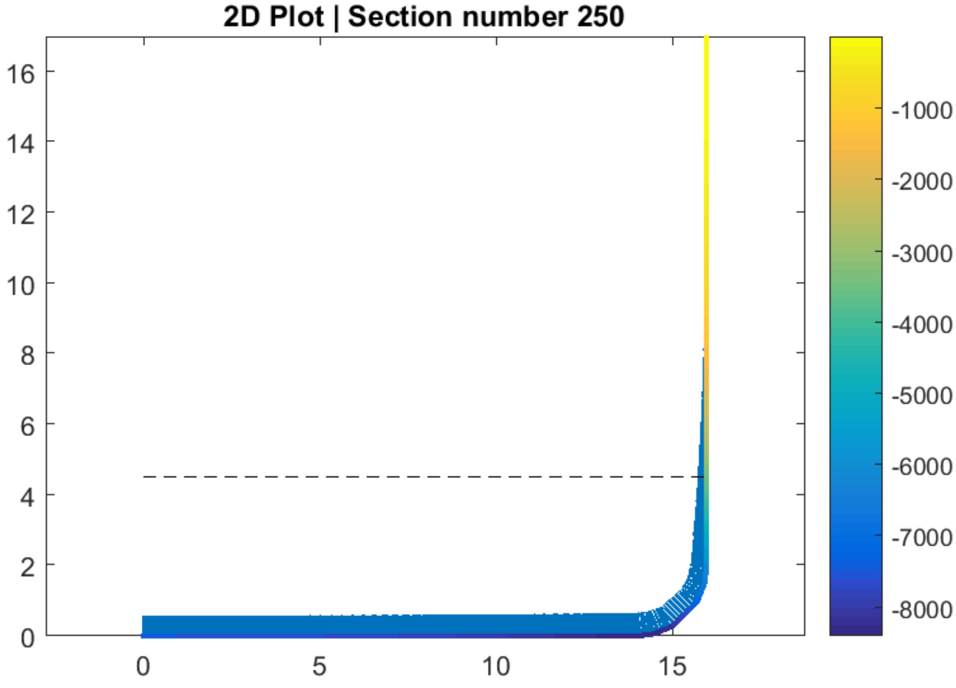
4.3.2 Ελάχιστες Κύριες Τάσεις



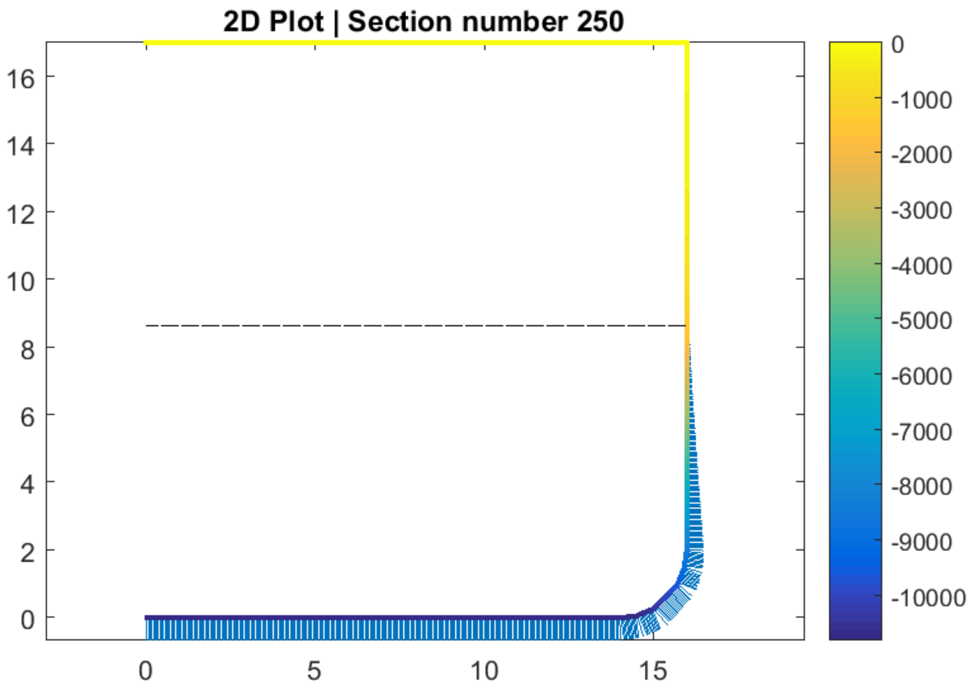
Εικόνα 4.19: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Lightship Condition



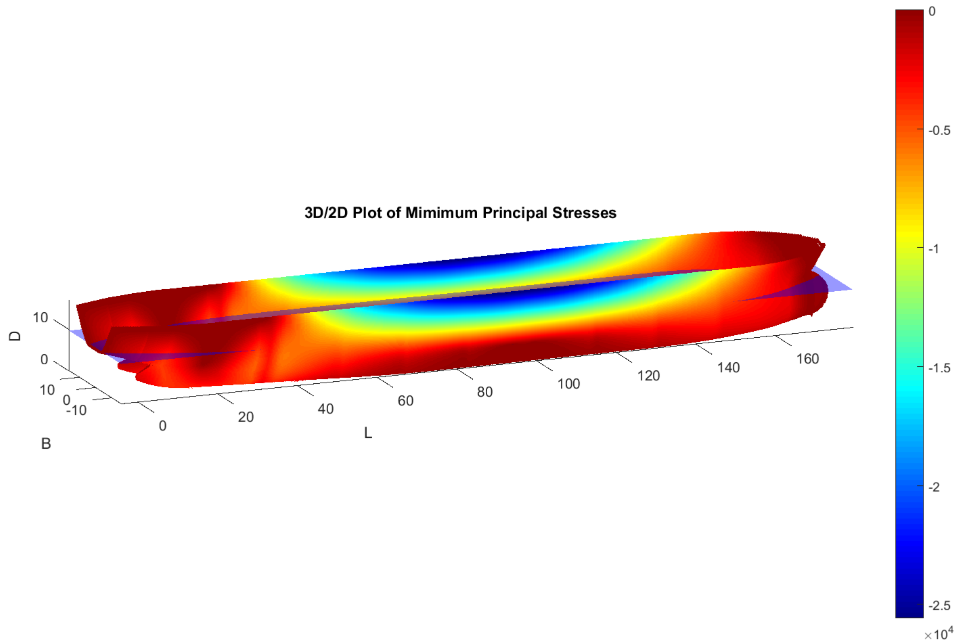
Εικόνα 4.20: Γάστρα με κατάστρωμα, Lightship Condition



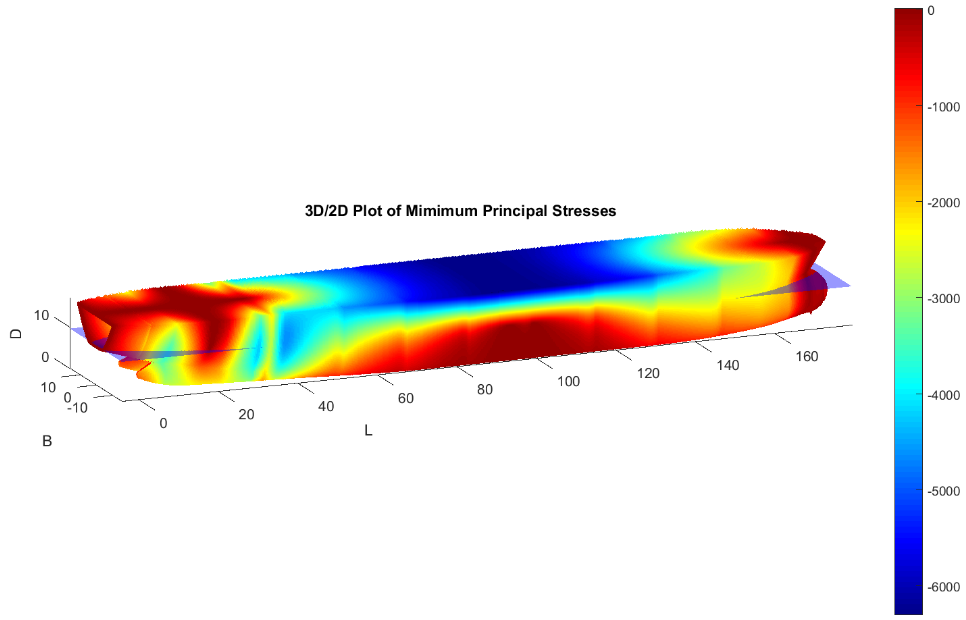
Εικόνα 4.21: Μέσος νομέας χωρίς κατάστρωμα, Lightship Condition



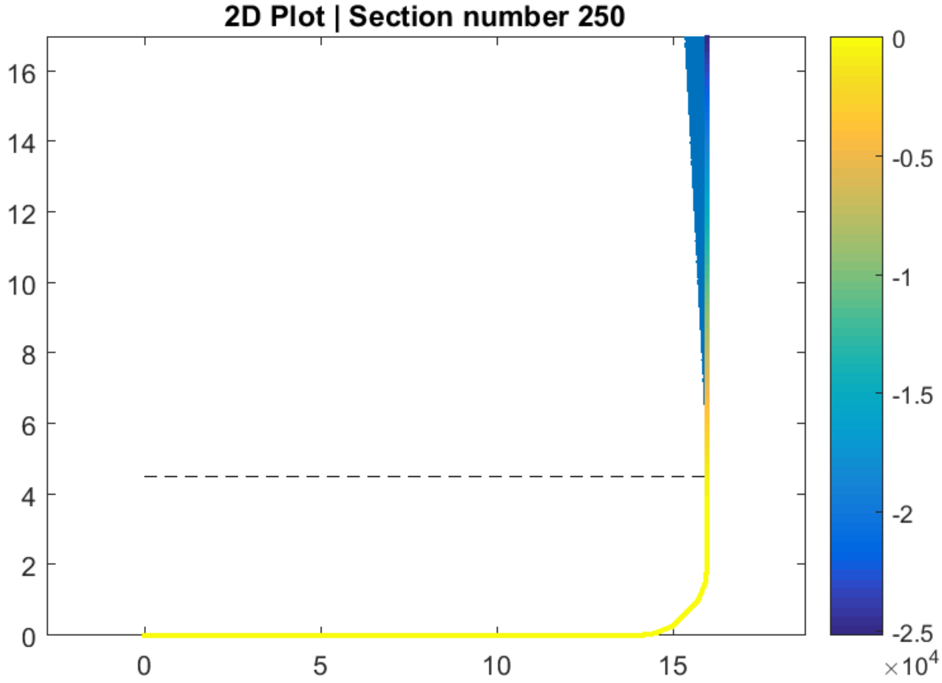
Εικόνα 4.22: Μέσος νομέας με κατάστρωμα, Lightship Condition



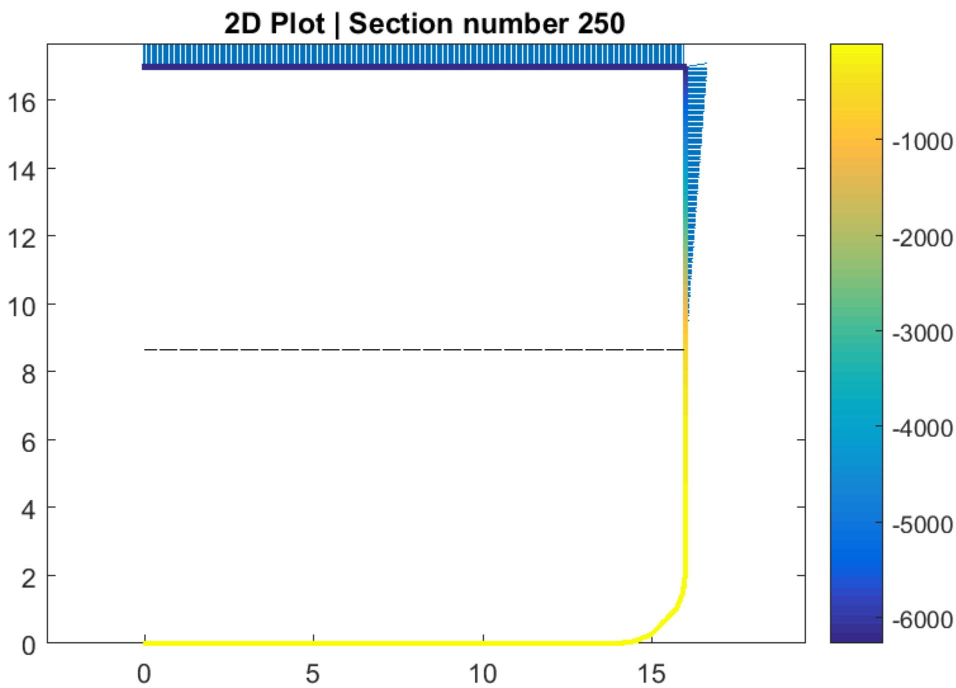
Εικόνα 4.23: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Full Load Departure



Εικόνα 4.24: Γάστρα με κατάστρωμα, Full Load Departure

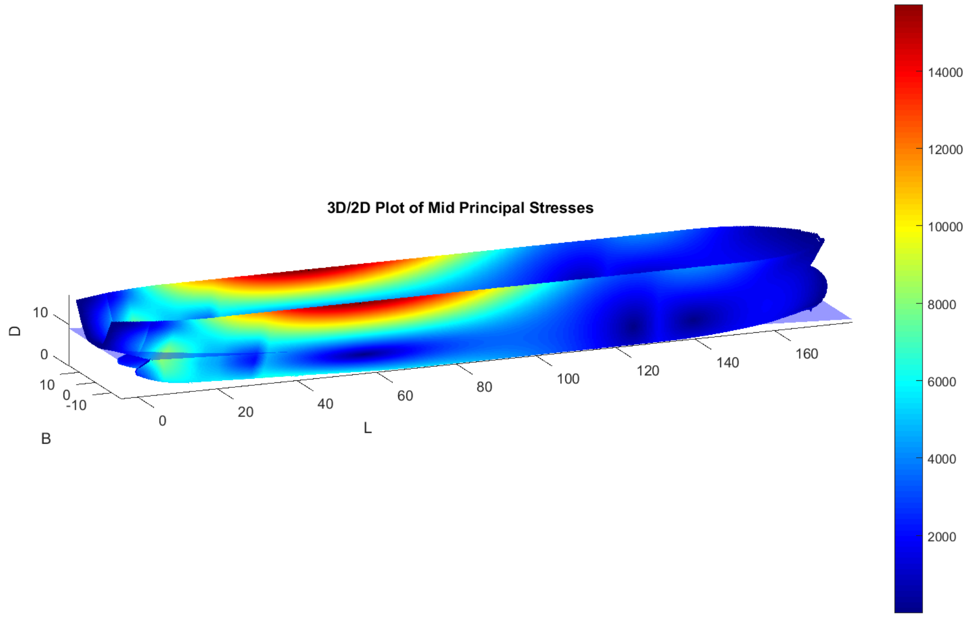


Εικόνα 4.25: Μέσος νομέας χωρίς κατάστρωμα, Full Load Departure

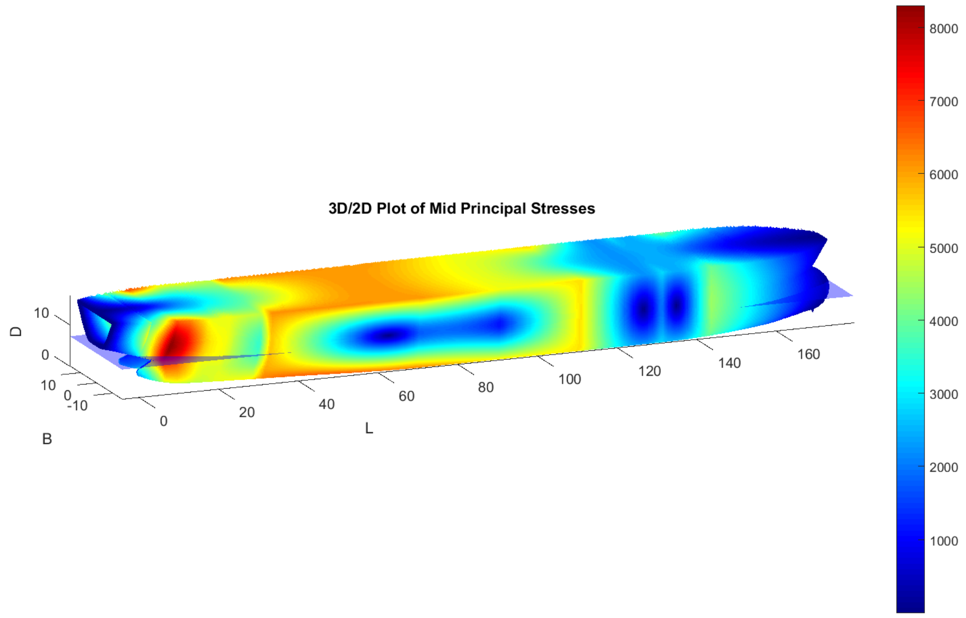


Εικόνα 4.26: Μέσος νομέας με κατάστρωμα, Full Load Departure

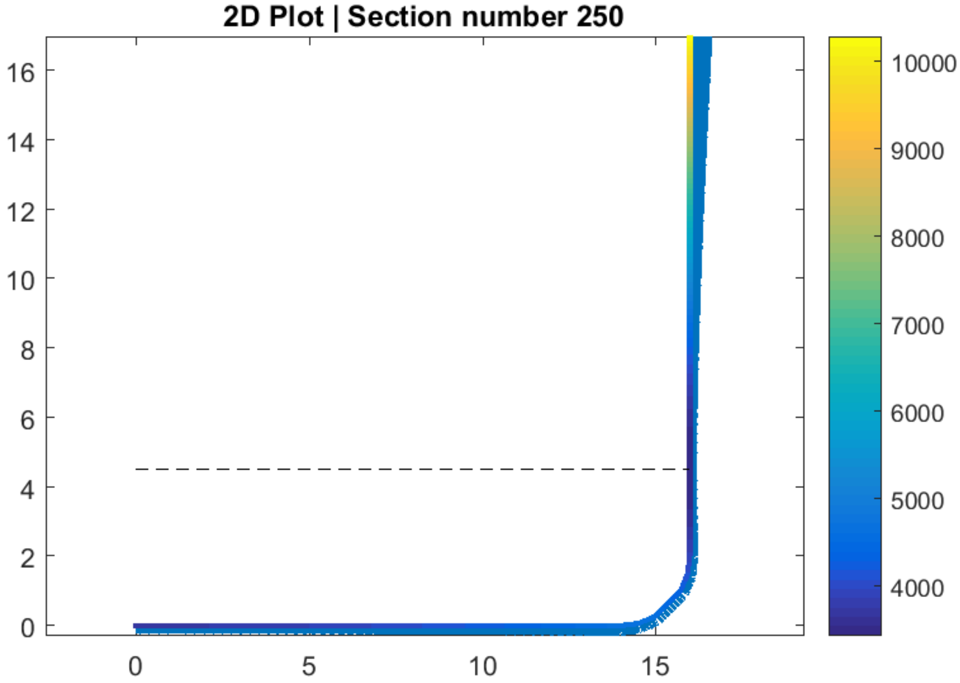
4.3.3 Μέγιστες Διατμητικές Τάσεις



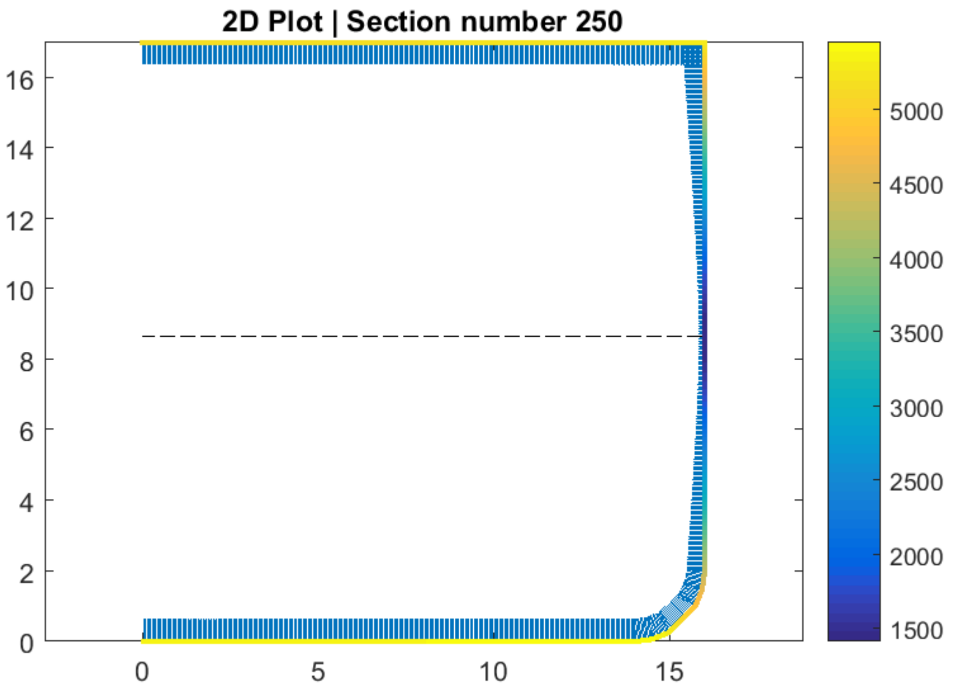
Εικόνα 4.27: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Lightship Condition



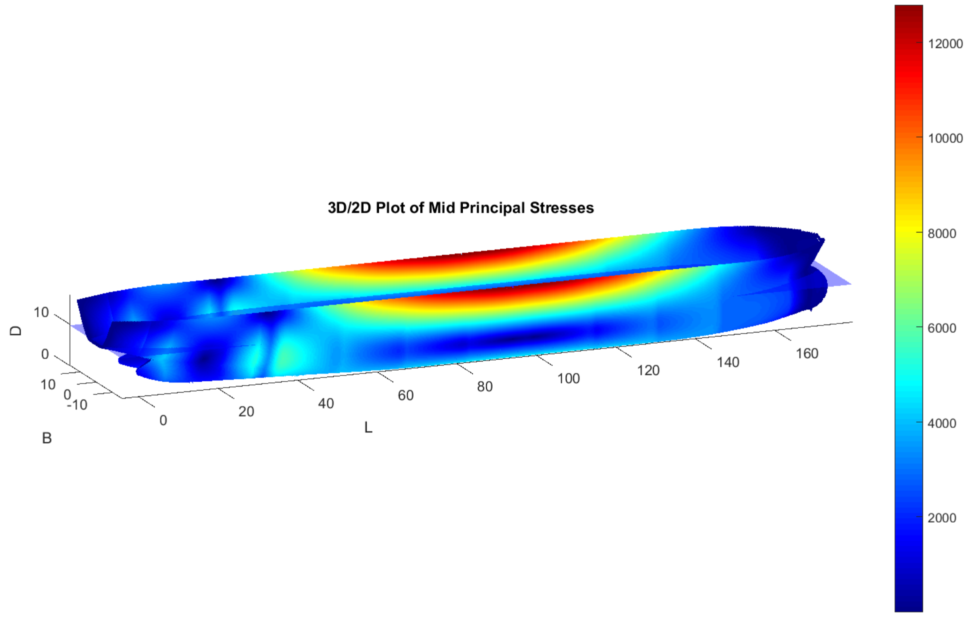
Εικόνα 4.28: Γάστρα με κατάστρωμα, Lightship Condition



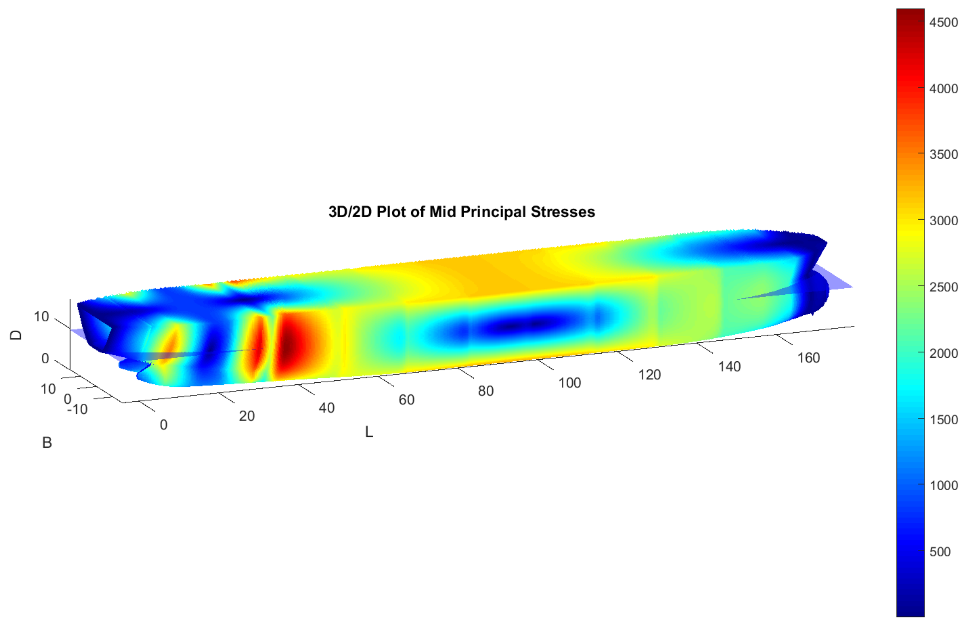
Εικόνα 4.29: Μέσος νομέας χωρίς κατάστρωμα, Lightship Condition



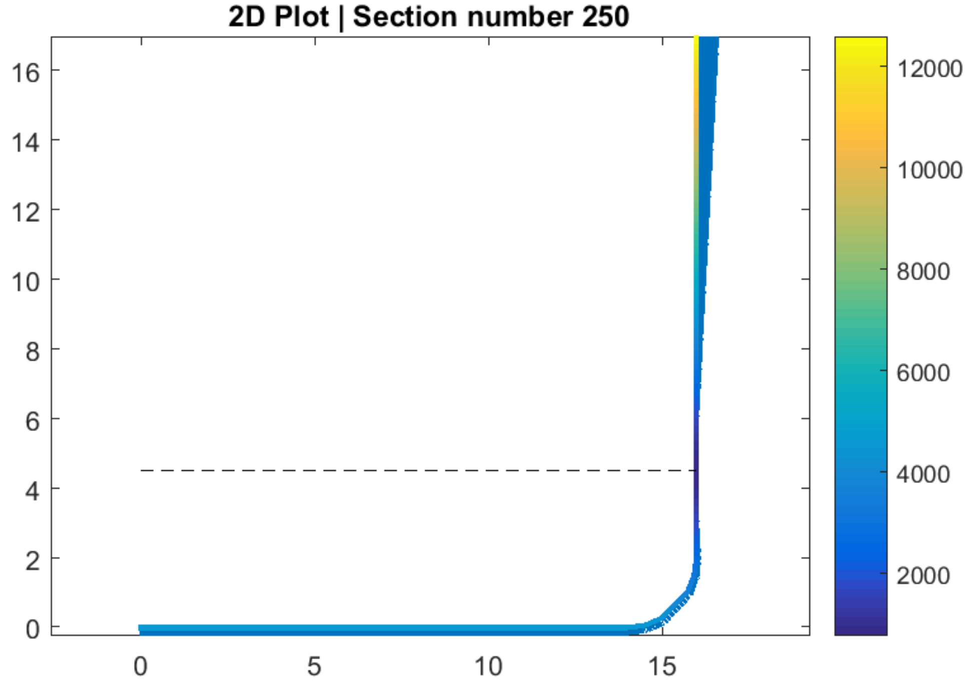
Εικόνα 4.30: Μέσος νομέας με κατάστρωμα, Lightship Condition



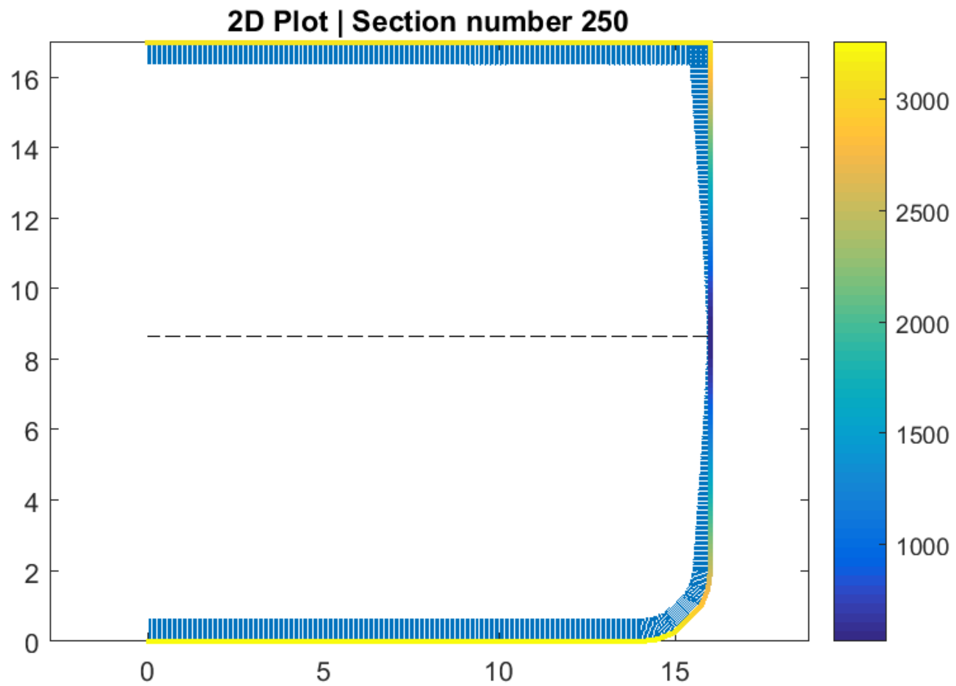
Εικόνα 4.31: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Full Load Departure



Εικόνα 4.32: Γάστρα με κατάστρωμα, Full Load Departure

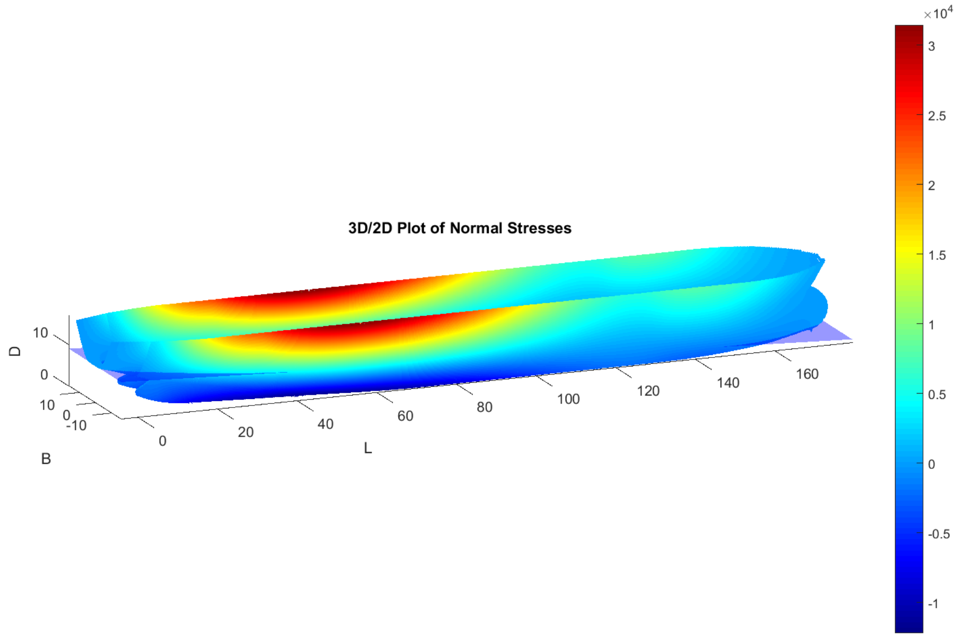


Εικόνα 4.33: Μέσος νομέας χωρίς κατάστρωμα, Full Load Departure

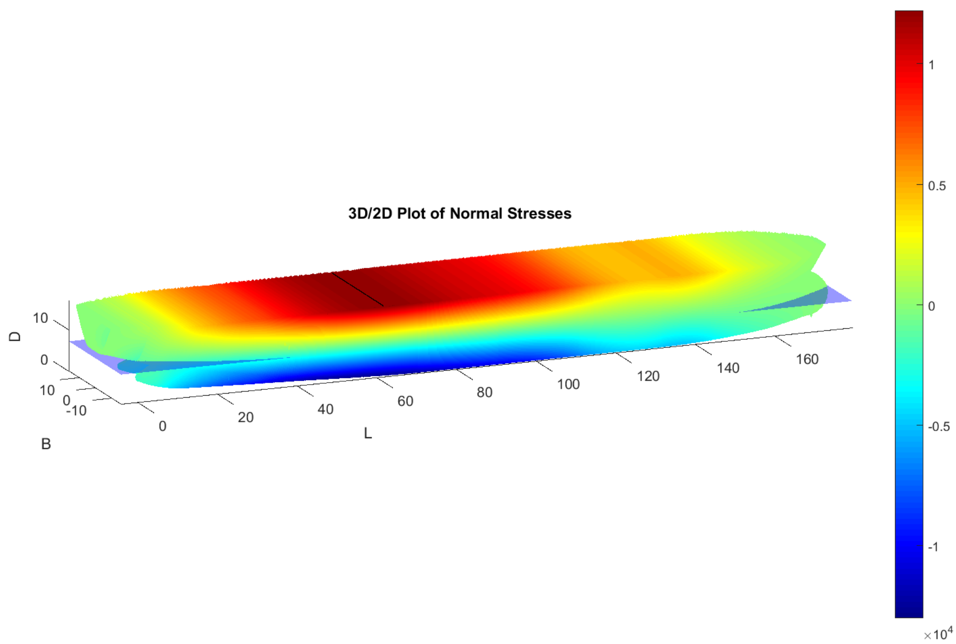


Εικόνα 4.34: Μέσος νομέας με κατάστρωμα, Full Load Departure

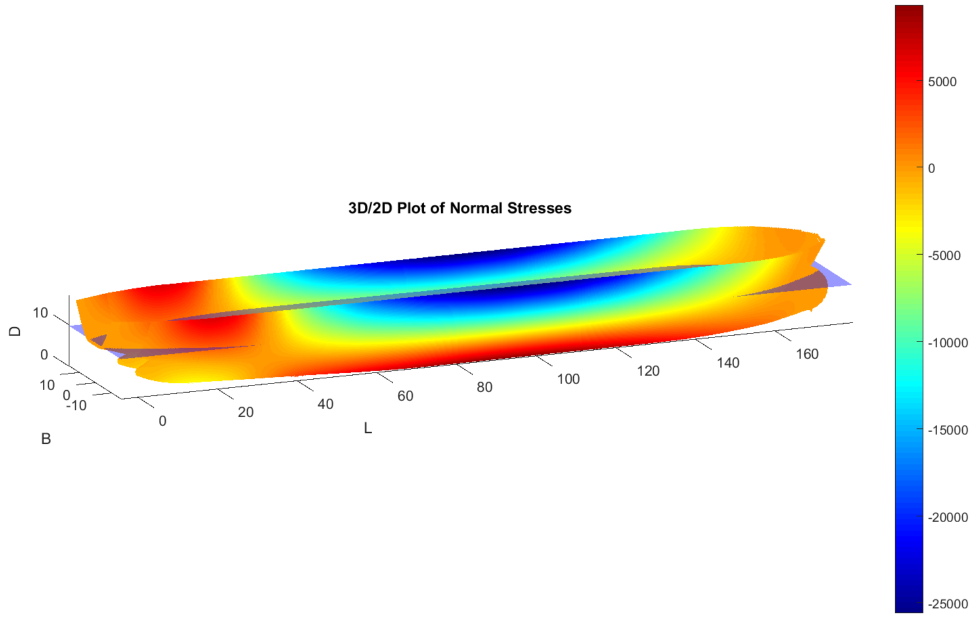
4.3.4 Ορθές Τάσεις



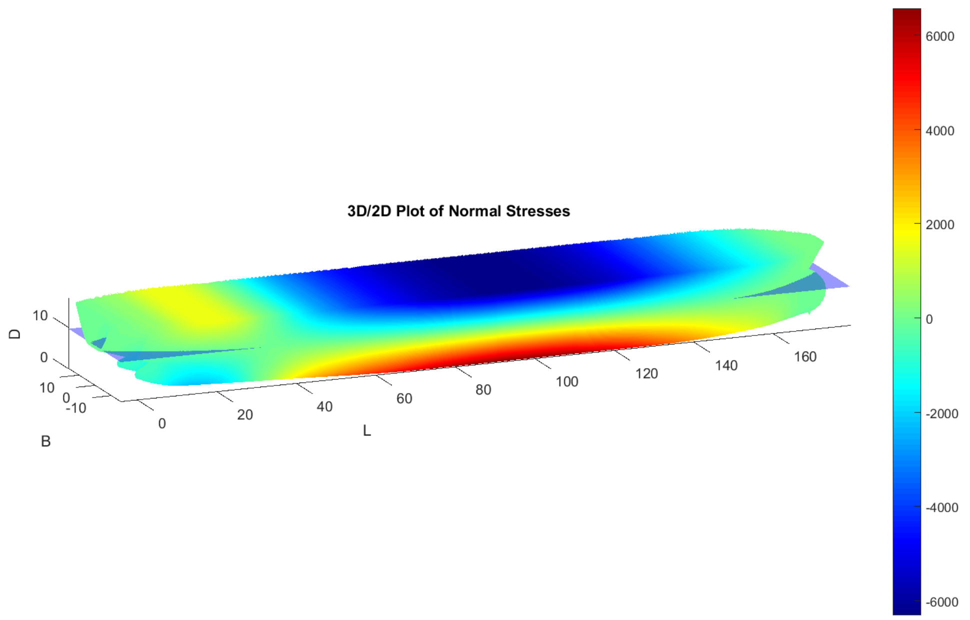
Εικόνα 4.35: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Lightship Condition



Εικόνα 4.36: Γάστρα με κατάστρωμα, Lightship Condition

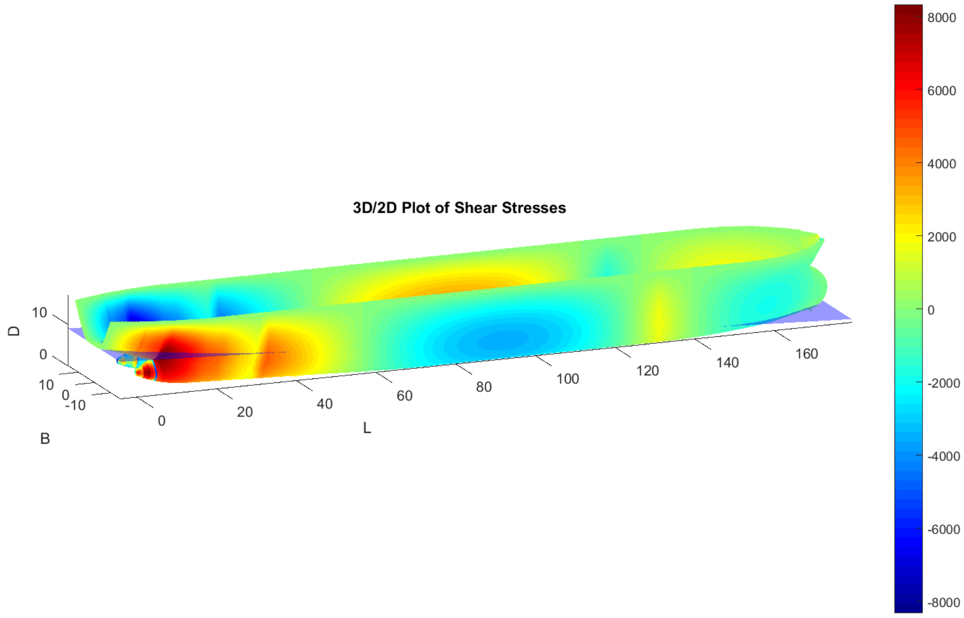


Εικόνα 4.37: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Full Load Departure

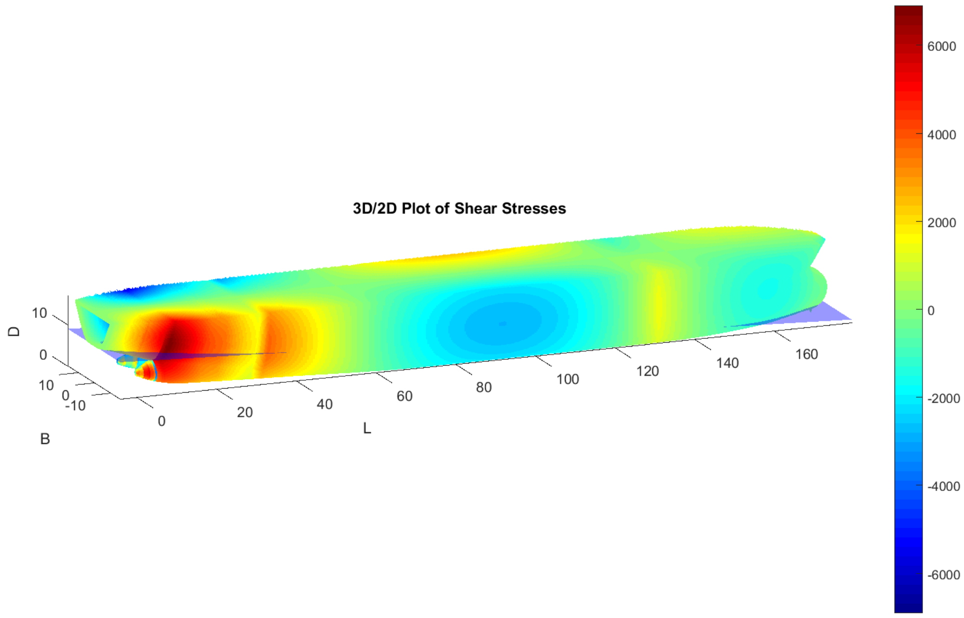


Εικόνα 4.38: Γάστρα με κατάστρωμα, Full Load Departure

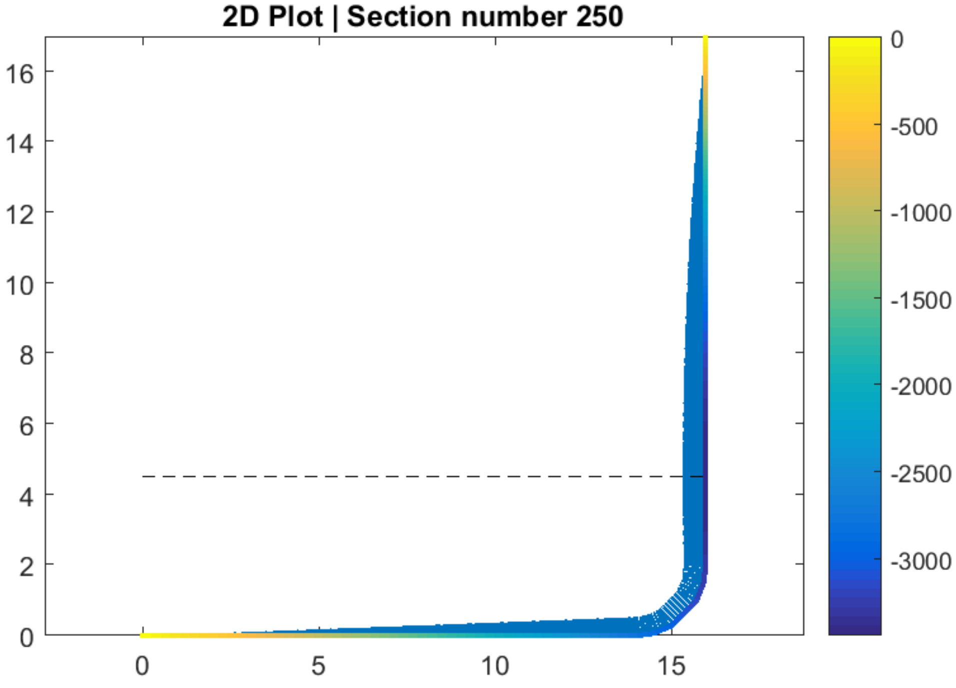
4.3.5 Διατμητικές Τάσεις



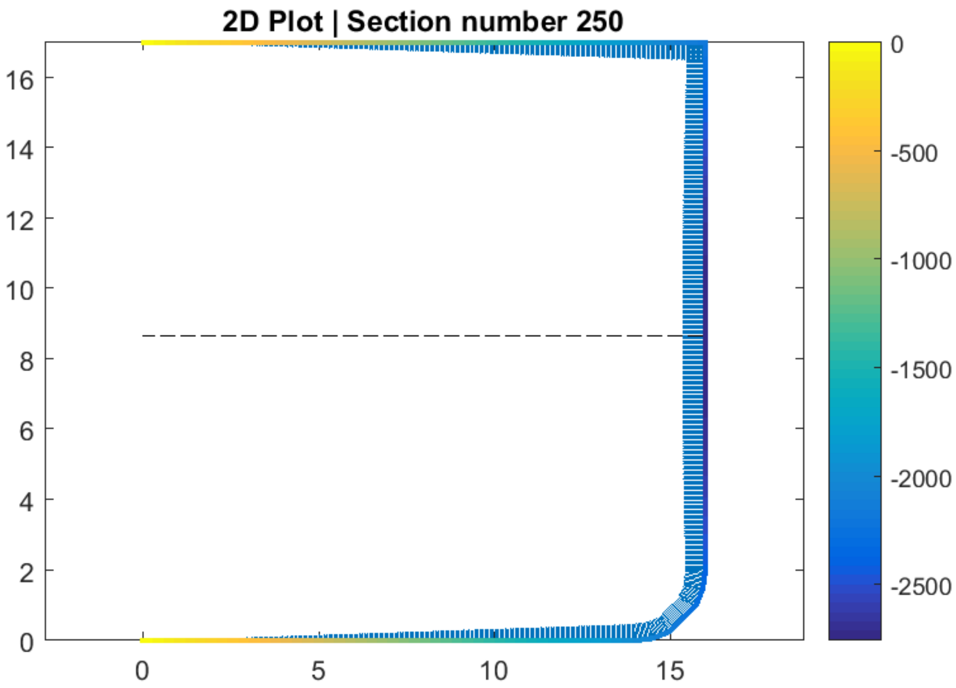
Εικόνα 4.39: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Lightship Condition



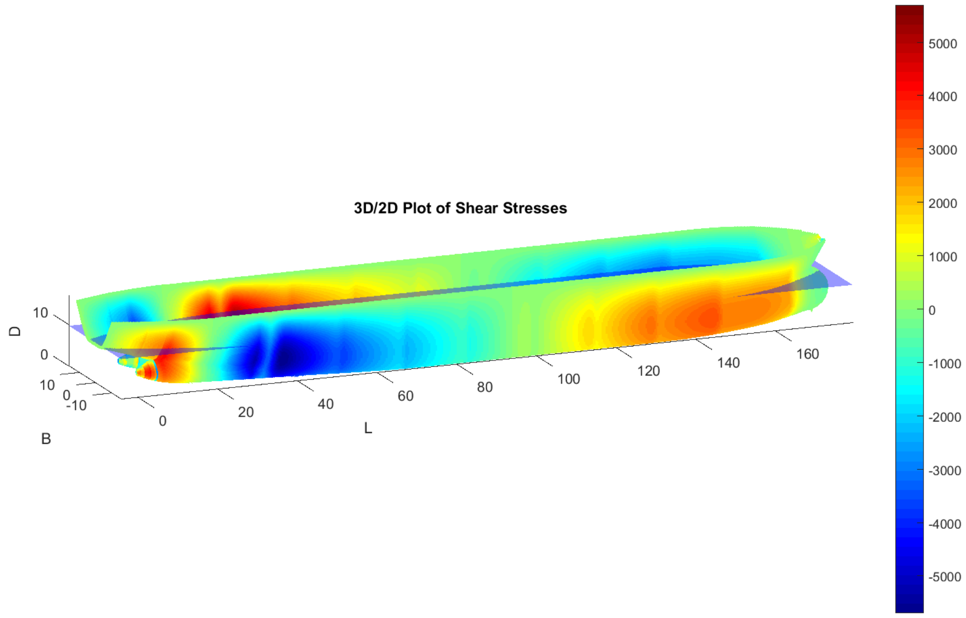
Εικόνα 4.40: Γάστρα με κατάστρωμα, Lightship Condition



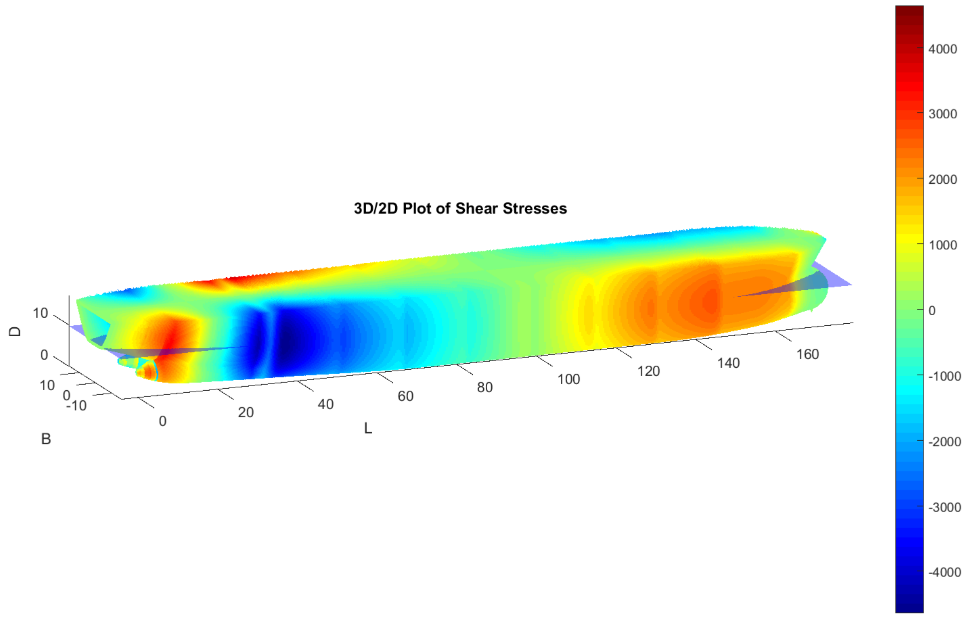
Εικόνα 4.41: Μέσος νομέας χωρίς κατάστρωμα, Lightship Condition



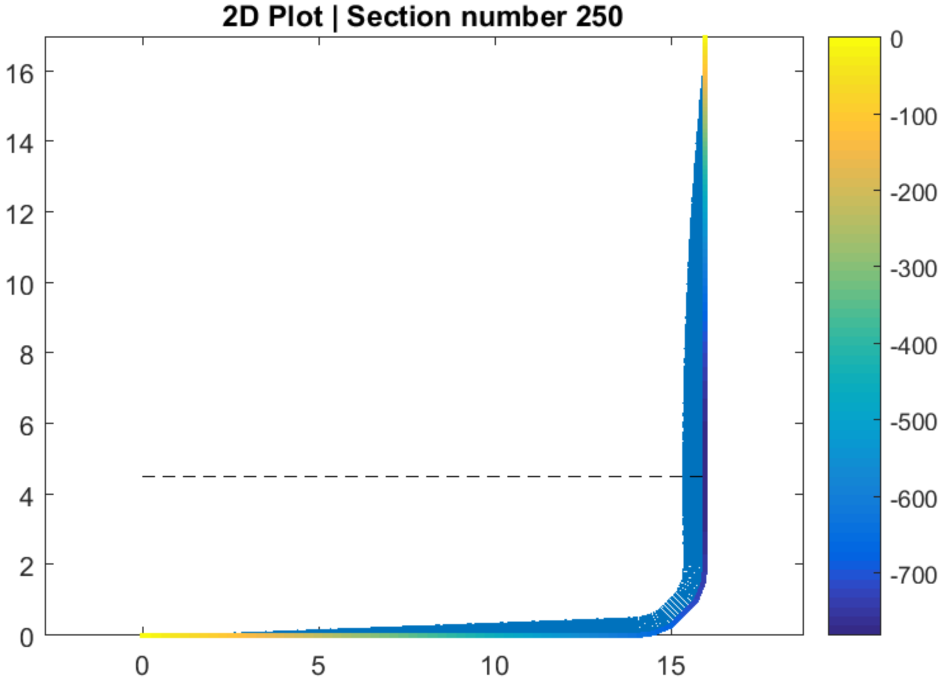
Εικόνα 4.42: Μέσος νομέας με κατάστρωμα, Lightship Condition



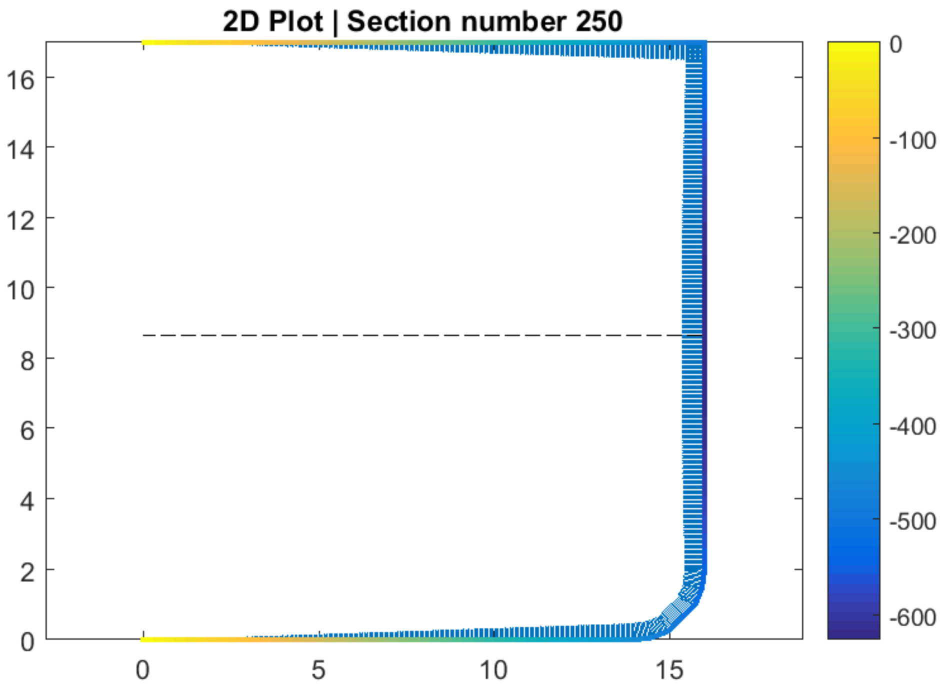
Εικόνα 4.43: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Full Load Departure



Εικόνα 4.44: Γάστρα με κατάστρωμα, Full Load Departure

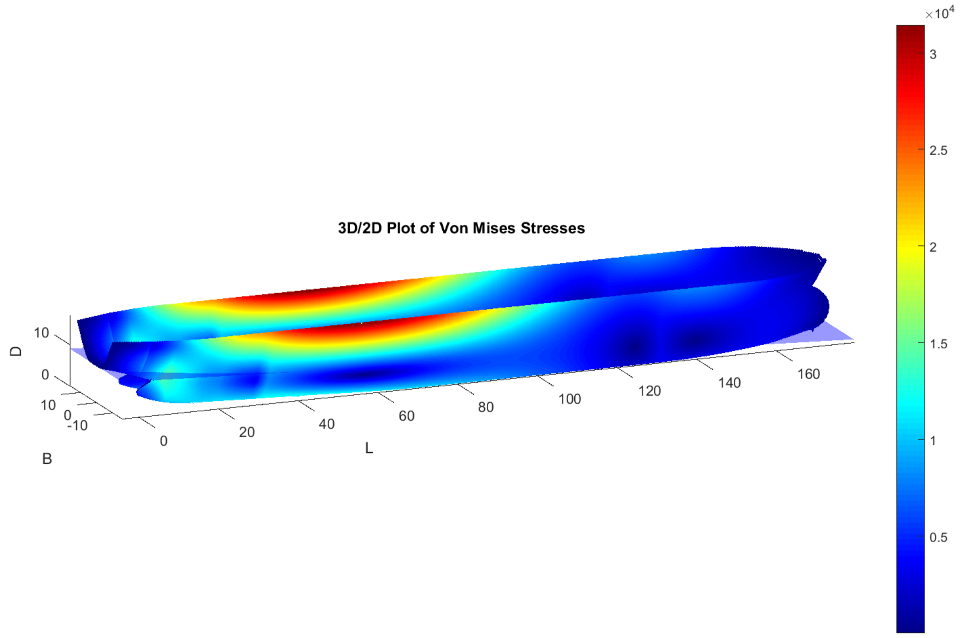


Εικόνα 4.45: Μέσος νομέας χωρίς κατάστρωμα, Full Load Departure

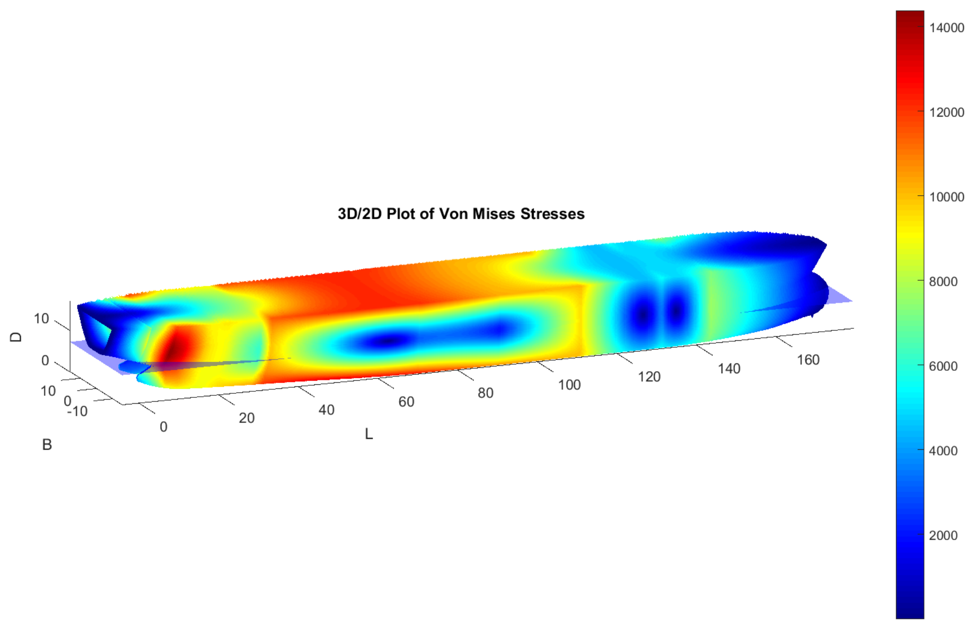


Εικόνα 4.46: Μέσος νομέας με κατάστρωμα, Full Load Departure

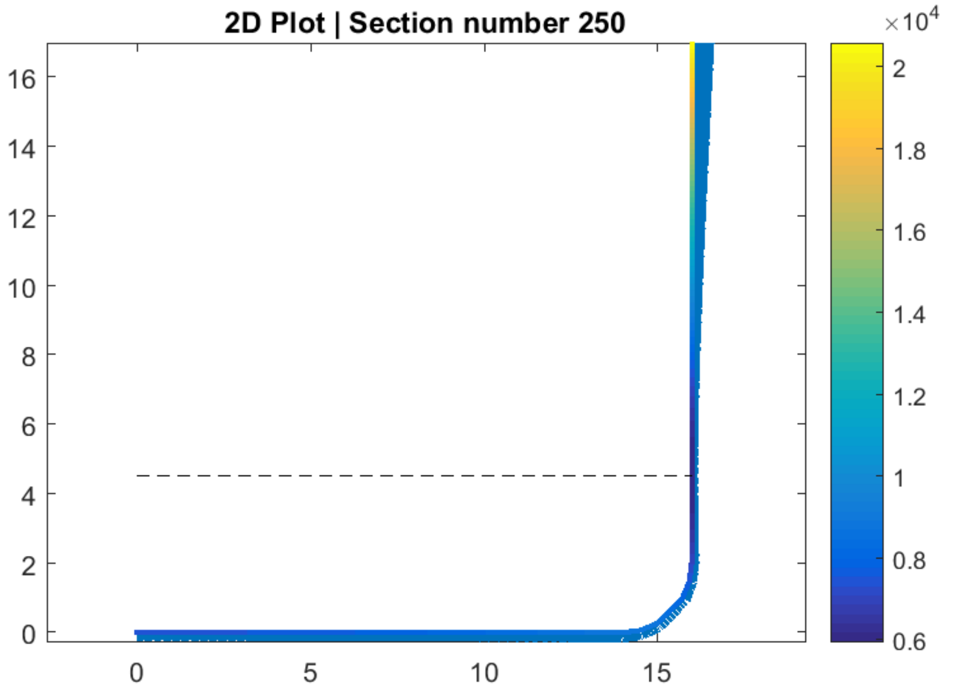
4.3.6 Τάσεις Von Mises



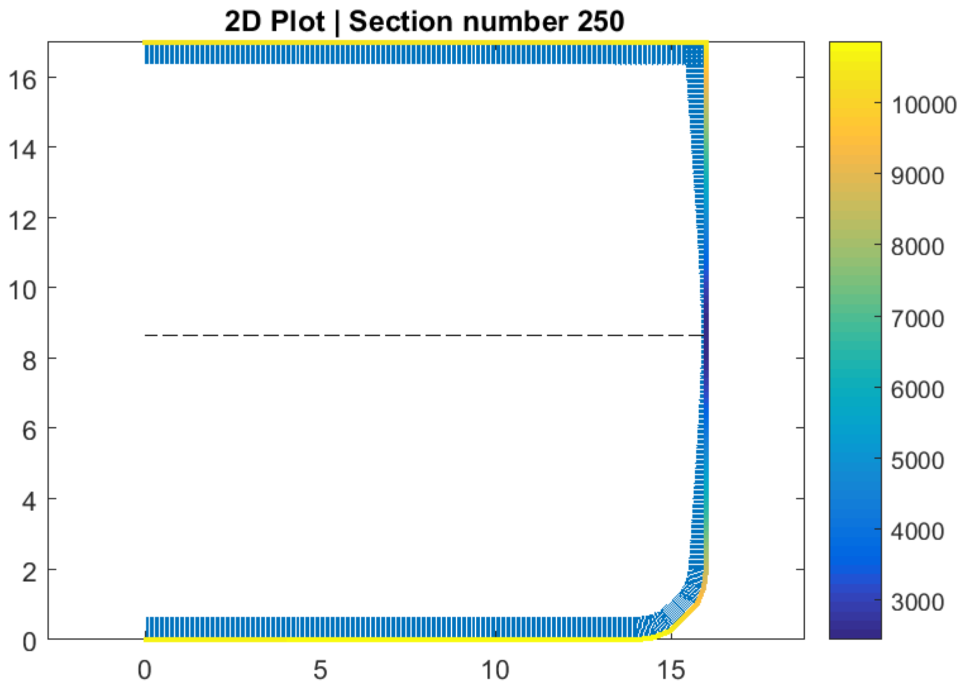
Εικόνα 4.47: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Lightship Condition



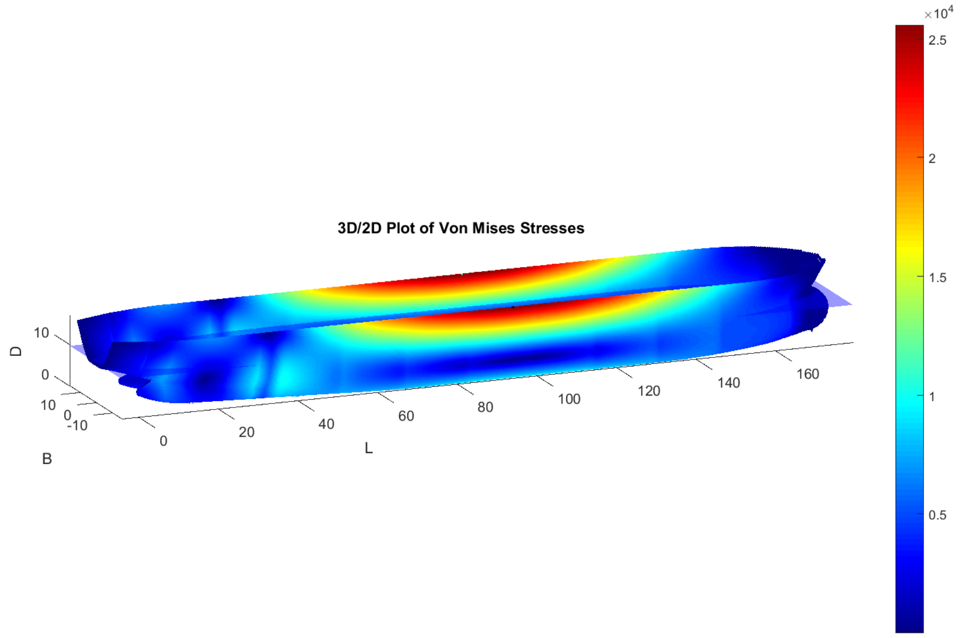
Εικόνα 4.48: Γάστρα με κατάστρωμα, Lightship Condition



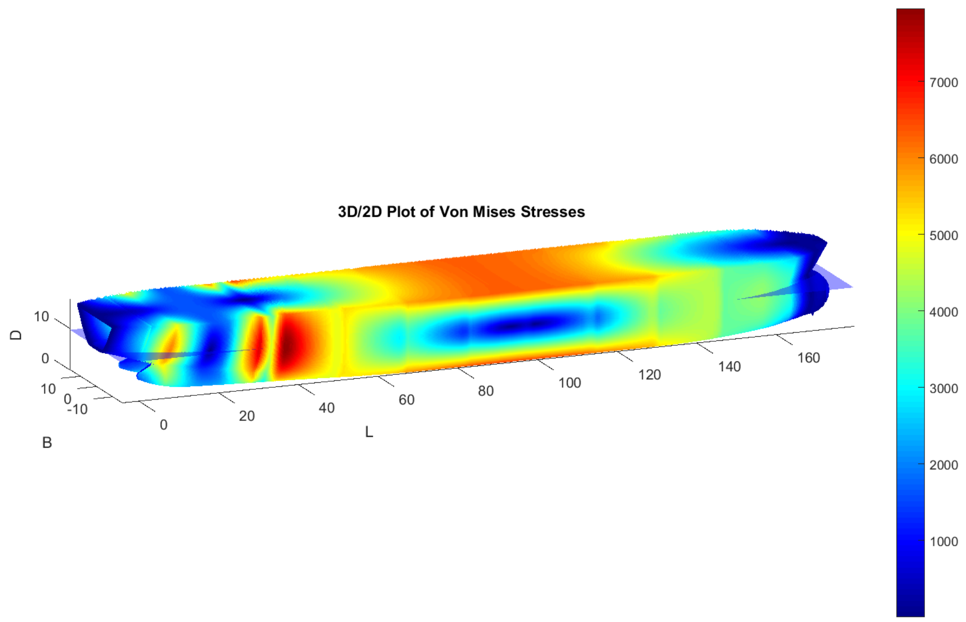
Εικόνα 4.49: Μέσος νομέας χωρίς κατάστρωμα, Lightship Condition



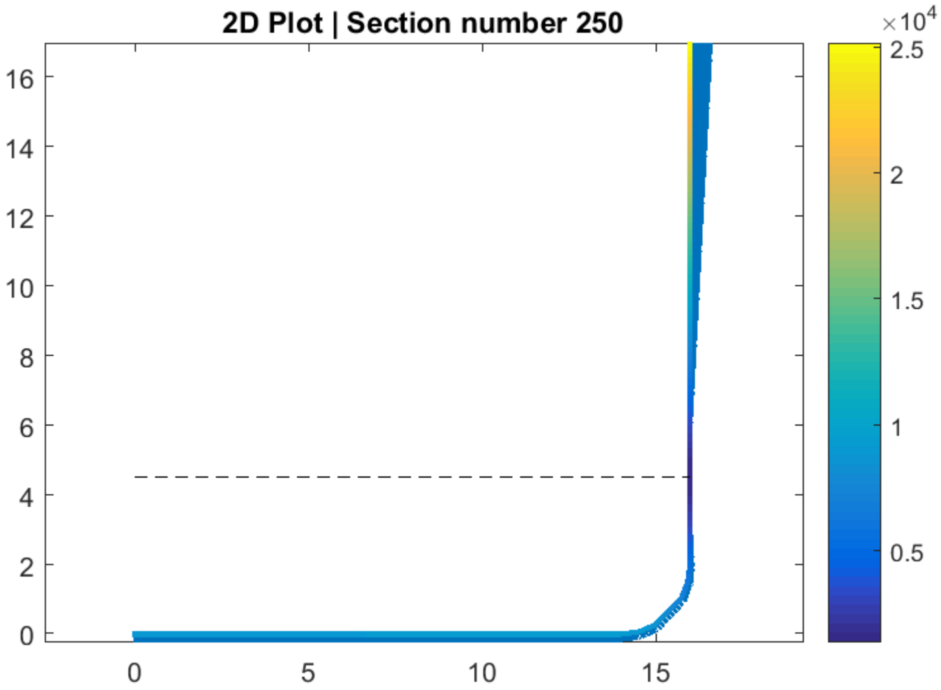
Εικόνα 4.50: Μέσος νομέας με κατάστρωμα, Lightship Condition



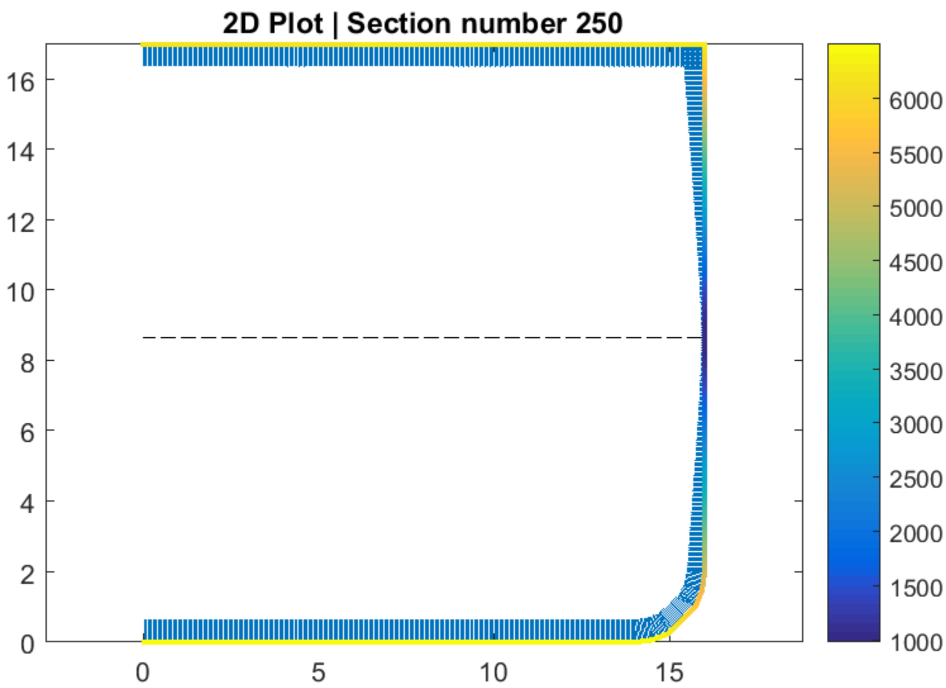
Εικόνα 4.51: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Full Load Departure



Εικόνα 4.52: Γάστρα με κατάστρωμα, Full Load Departure

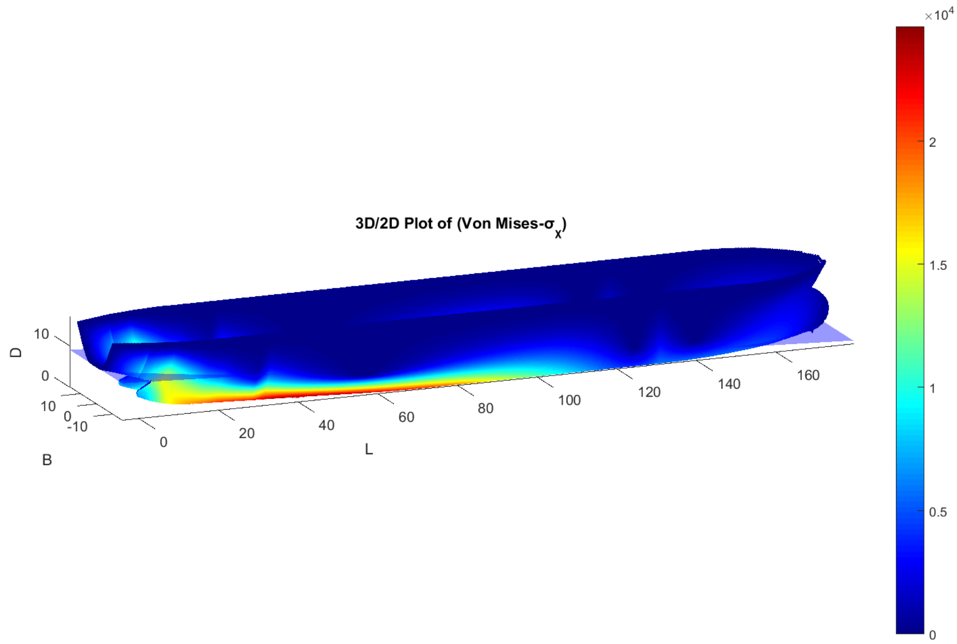


Εικόνα 4.53: Μέσος νομέας χωρίς κατάστρωμα, Full Load Departure

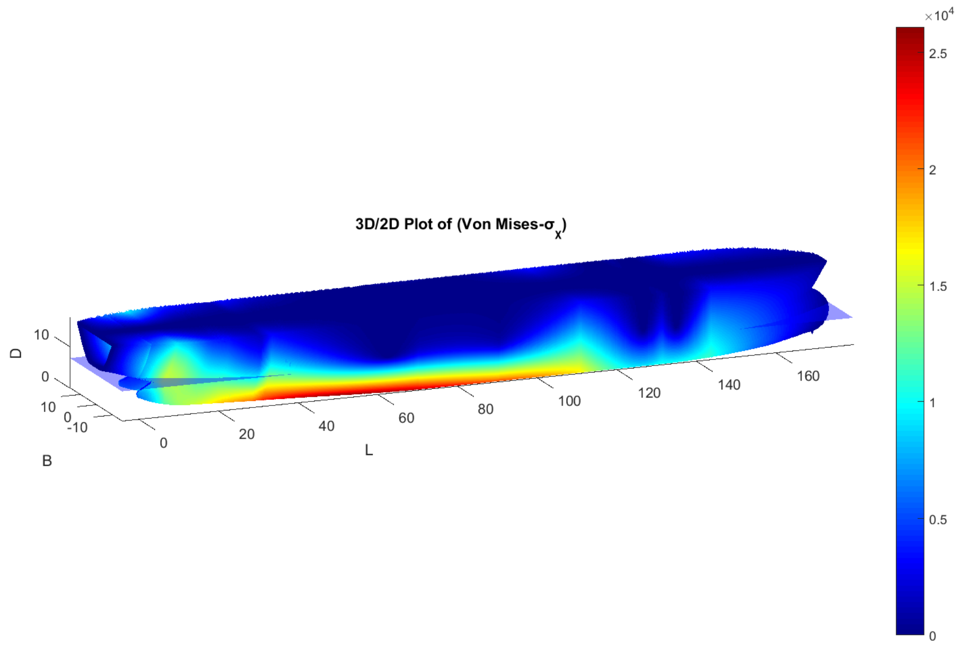


Εικόνα 4.54: Μέσος νομέας με κατάστρωμα, Full Load Departure

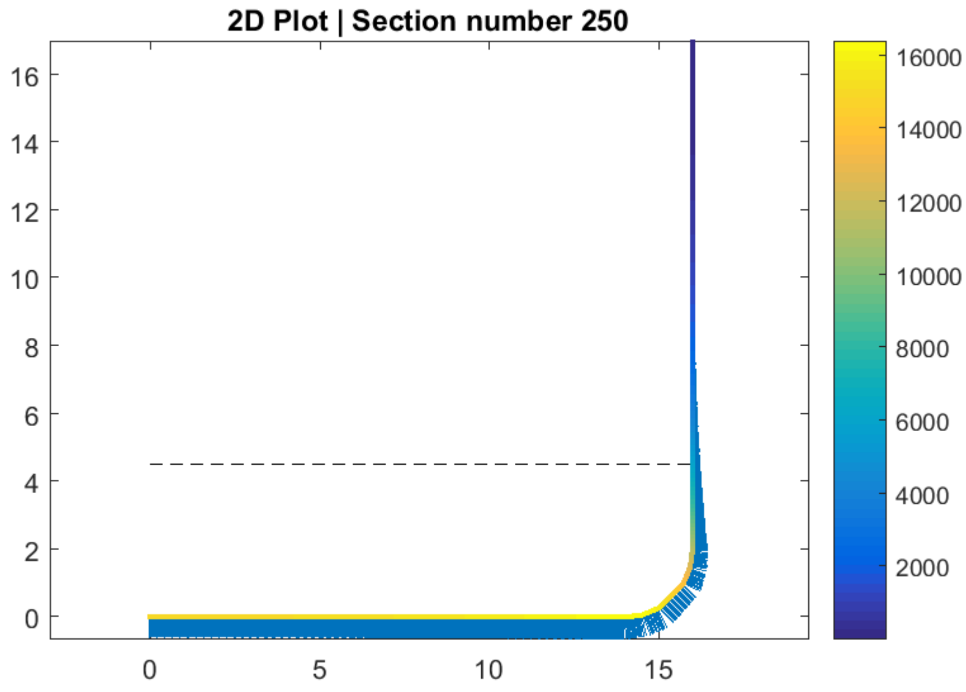
4.3.7 Διαφορά Von Mises – Ορθών Τάσεων



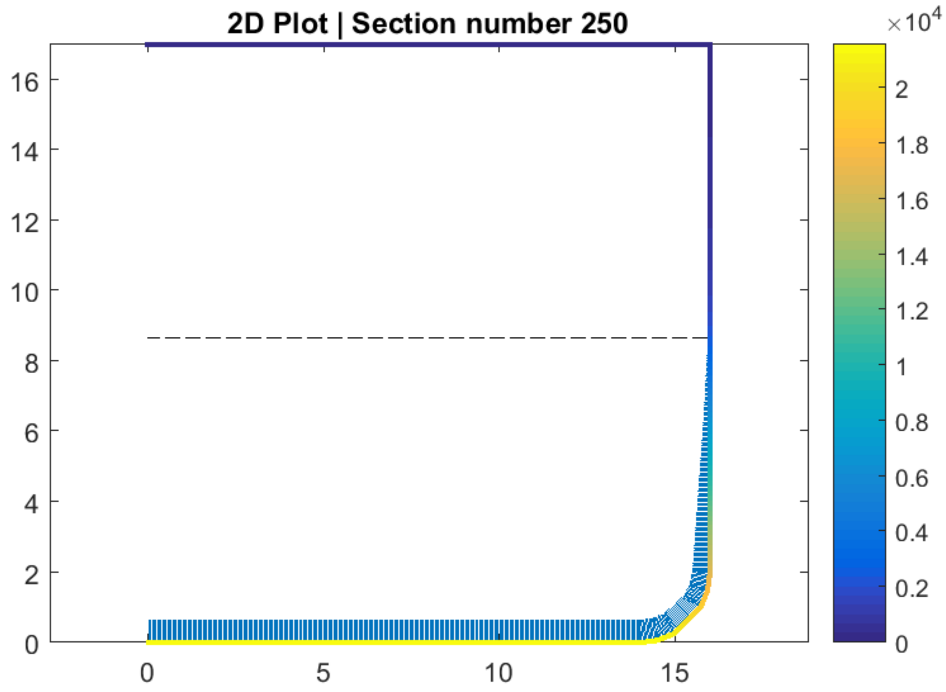
Εικόνα 4.55: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Lightship Condition



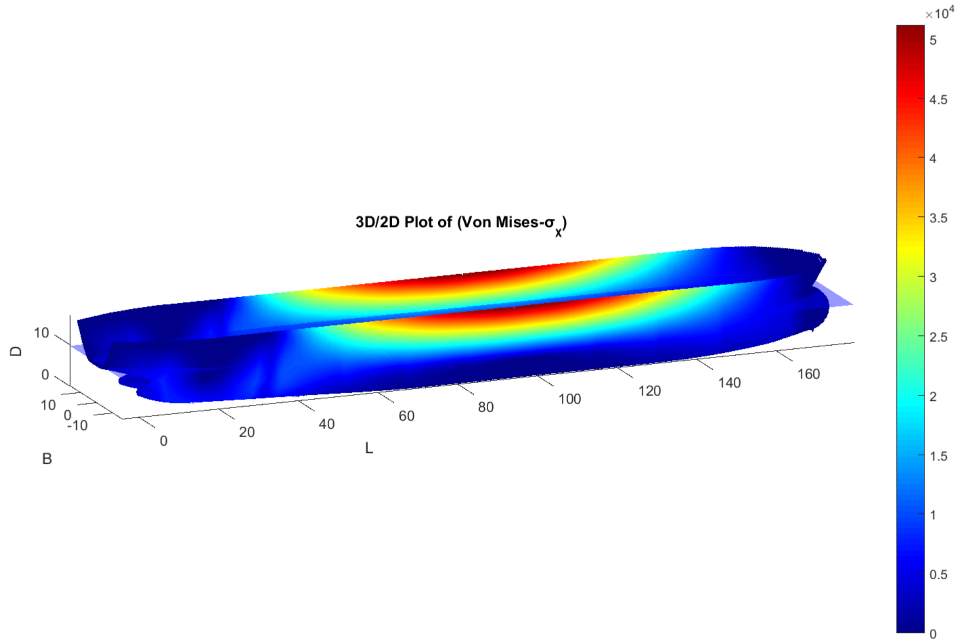
Εικόνα 4.56: Γάστρα με κατάστρωμα, Lightship Condition



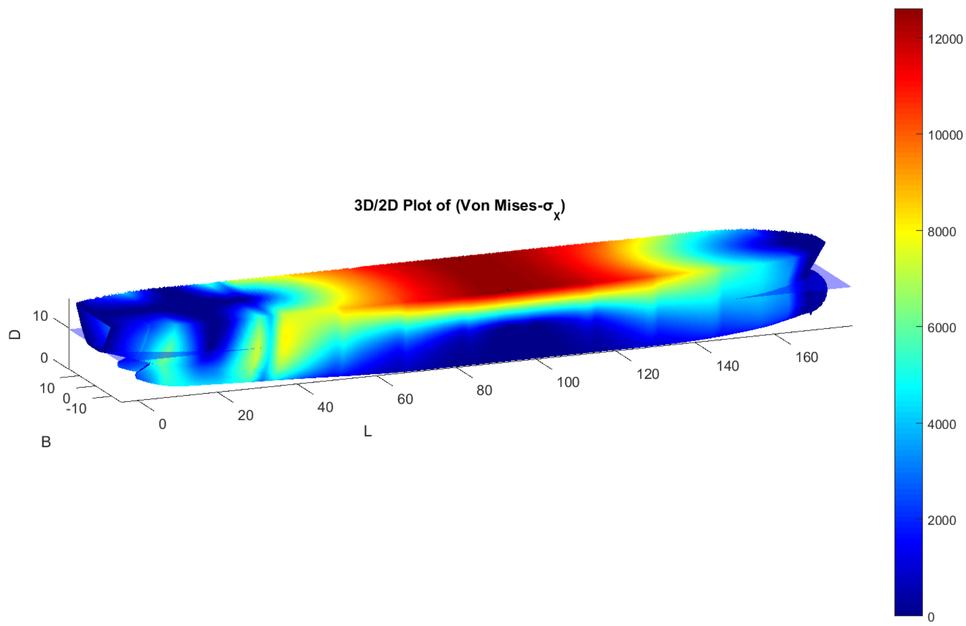
Εικόνα 4.57: Μέσος νομέας χωρίς κατάστρωμα, Lightship Condition



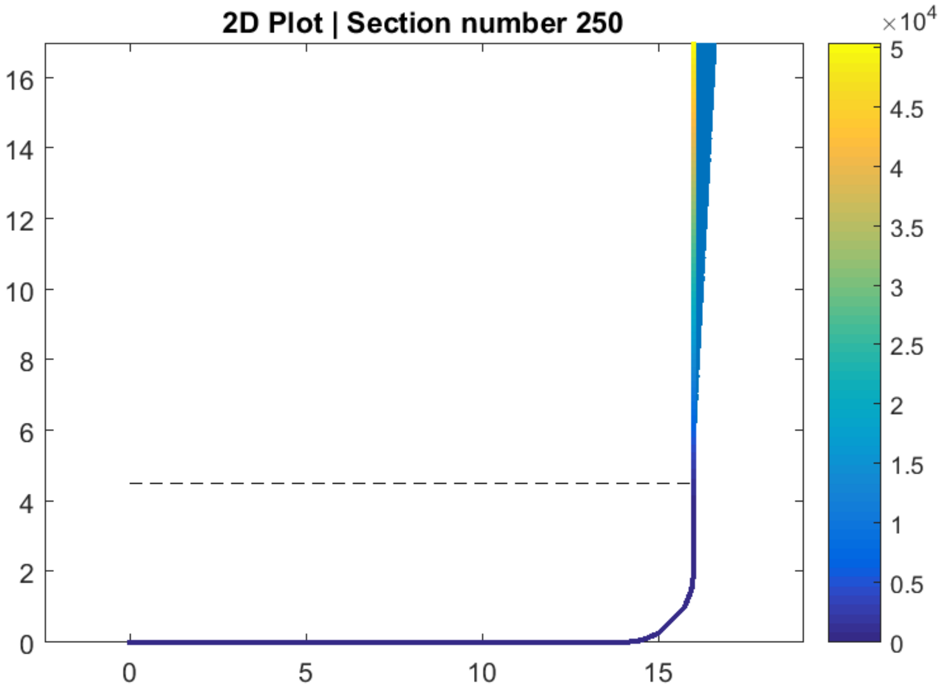
Εικόνα 4.58: Μέσος νομέας με κατάστρωμα, Lightship Condition



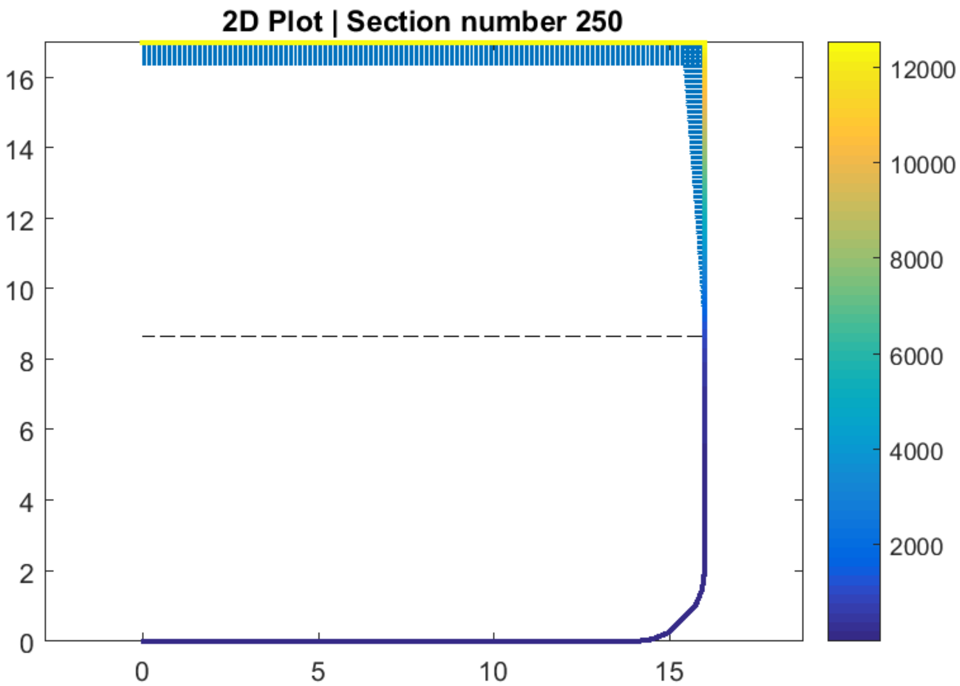
Εικόνα 4.59: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Full Load Departure



Εικόνα 4.60: Γάστρα με κατάστρωμα, Full Load Departure



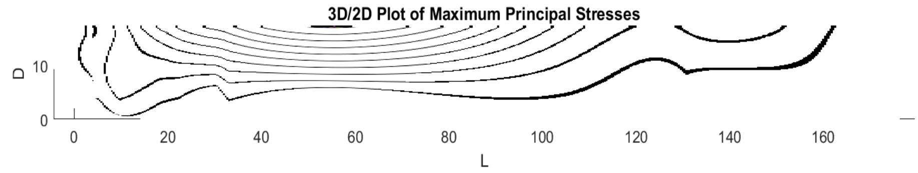
Εικόνα 4.61: Μέσος νομέας χωρίς κατάστρωμα, Full Load Departure



Εικόνα 4.62: Γάστρα με κατάστρωμα, Full Load Departure

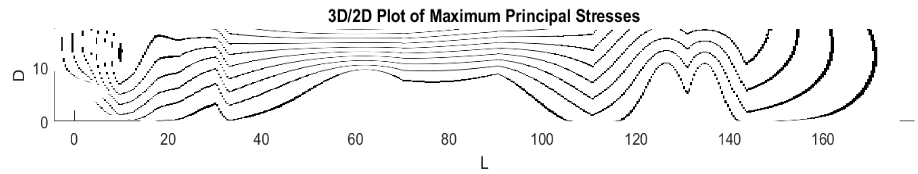
4.4 Ισοτασικές Καμπύλες

4.4.1 Μέγιστες Κύριες Τάσεις



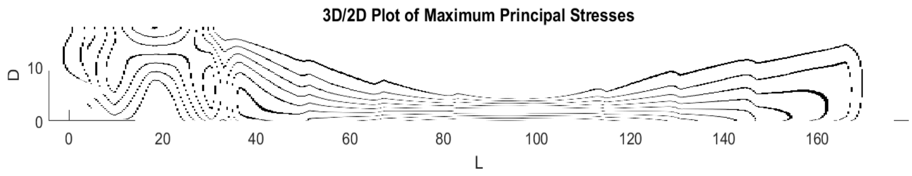
Εικόνα 4.63: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Lightship Condition

Στη γάστρα χωρίς κατάστρωμα οι ισοτασικές καμπύλες (Εικ. 4.63) των μέγιστων κύριων τάσεων σχηματίζουν τοξοειδείς παράλληλες τροχιές με τα κοίλα προς τα πάνω. Τα κέντρα τους βρίσκονται στο ύψος του κοίλου και κατά το διάμηκες στα 58μ και στα 138μ, δηλαδή στα σημεία τοπικού μέγιστου των καμπτικών ροπών. Στην πρύμνη υπάρχει μια έντονη παρέκκλιση της παραλληλίας των καμπυλών.



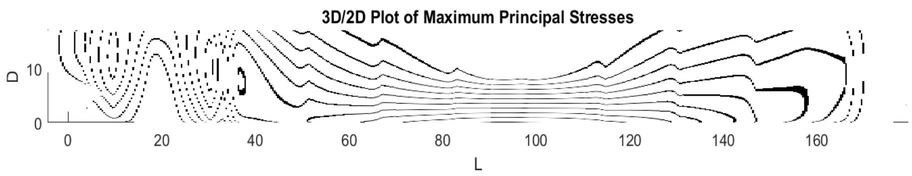
Εικόνα 4.64: Γάστρα με κατάστρωμα, Lightship Condition

Στη γάστρα με κατάστρωμα οι ισοτασικές καμπύλες (Εικ. 4.64) για το άφορτο πλοίο εκφυλίζονται σε ευθείες, στην περιοχή που στην περίπτωση χωρίς κατάστρωμα ήταν τοξοειδείς (Εικ. 53). Επίσης, εμφανίζονται ασυνέχειες καμπυλότητας στα 30μ, στα 110μ, στα 130μ και στα 142μ κατά το διάμηκες. Στην πρύμνη και στην πλώρη διατηρούν το τοξοειδές σχήμα με τα κοίλα προς τα πάνω.



Εικόνα 4.65: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Full Load Departure

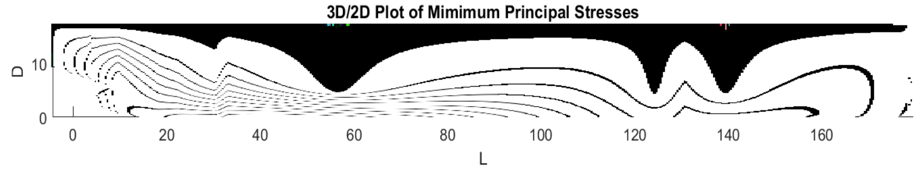
Στη γάστρα χωρίς κατάστρωμα στο φορτωμένο πλοίο οι ισοτασικές καμπύλες (Εικ. 4.65) είναι σε γενικές γραμμές τοξοειδείς με τα κοίλα προς τα κάτω και σχεδόν ευθείες από τα 60μ μέχρι τα 140μ κατά το διάμηκες ενώ εμφανίζουν και μία κυματοειδή κατανομή λόγω μη ομαλότητας της καμπύλης βάρους στις θέσεις των εγκάρσιων φρακτών. Στην πρύμνη εμφανίζονται παράλληλες τοξοειδείς καμπύλες τόσο με τα κοίλα προς τα πάνω όσο και προς τα κάτω και εμφανίζουν έντονες αλλαγές καμπυλότητας.



Εικόνα 4.66: Γάστρα με κατάστρωμα, Full Load Departure

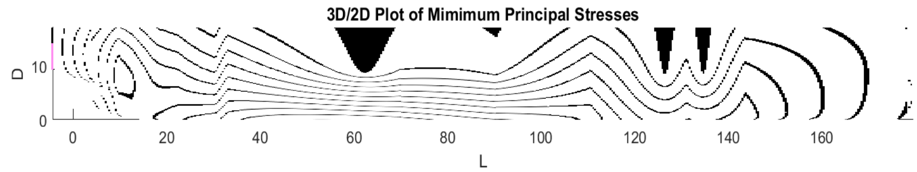
Όσο αφορά τη γάστρα με κατάστρωμα για το φορτωμένο πλοίο, οι ισοτασικές καμπύλες (Εικ. 4.66) δείχνουν μια μετατόπιση προς το κατάστρωμα σε σχέση με τις αντίστοιχες για γάστρα χωρίς κατάστρωμα (Εικ. 4.65) διατηρώντας γενικά το ίδιο σχήμα με πιο έντονη κυματοειδή μορφή. Στην πρύμνη δεν υπάρχουν πλέον τοξοειδείς καμπύλες με κέντρο στο κοίλο ενώ οι υπόλοιπες έχουν πιο έντονες αλλαγές καμπυλότητας από το προηγούμενο σχήμα.

4.4.2 Ελάχιστες Κύριες Τάσεις



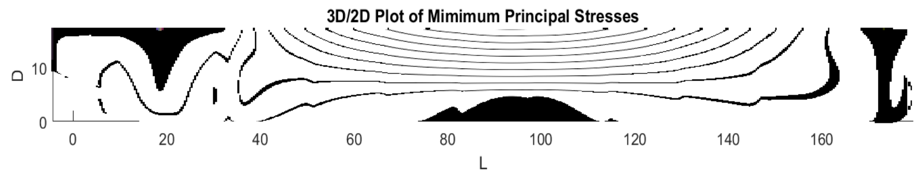
Εικόνα 4.67: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Lightship Condition

Οι ισοτασικές καμπύλες των ΕΚΤ για γάστρα χωρίς κατάστρωμα (Εικ. 4.67) σε άφορτο πλοίο είναι τοξοειδείς με τα κοίλα προς τα κάτω και σχεδόν ευθείες από τα 30μ μέχρι τα 120μ και κείνται πολύ κοντά στον πυθμένα. Εμφανίζουν μη ομαλή ανύψωση (κορυφή) στα 30μ και στα 130μ μέχρι το μέσο του κοίλου.



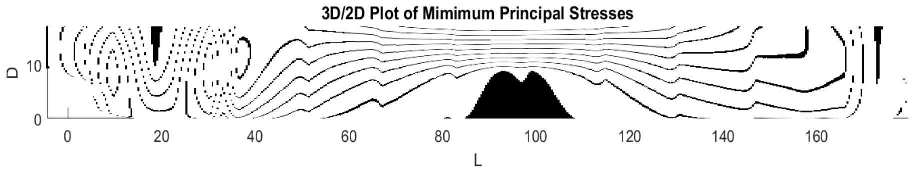
Εικόνα 4.68: Γάστρα με κατάστρωμα, Lightship Condition

Οι ισοτασικές καμπύλες των ΕΚΤ για γάστρα με κατάστρωμα στο άφορτο πλοίο (Εικ. 4.68) είναι τοξοειδείς με τα κοίλα προς τα κάτω στην πρύμνη και την πλώρη. Από τα 35μ μέχρι τα 110μ είναι σχεδόν ευθείες από το μισό του κοίλου μέχρι τον πυθμένα ενώ από το μισό μέχρι το κατάστρωμα είναι τοξοειδείς με τα κοίλα προς τα πάνω. Στα 32μ, 110μ, 130μ και 142μ εμφανίζουν ασυνέχεια ομαλότητας. Ανυψώνονται σημαντικά στα 32μ και στα 110μ.



Εικόνα 4.69: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Full Load Departure

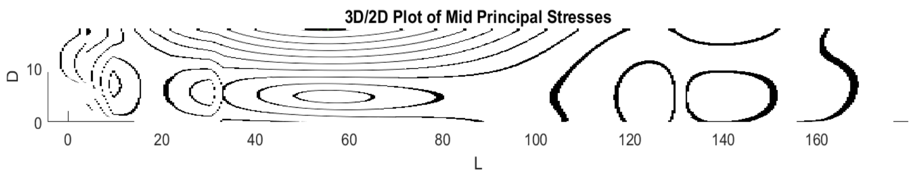
Στη γάστρα με κατάστρωμα στο φορτωμένο πλοίο (Εικ. 4.69) οι ισοτασικες καμπύλες των ΕΚΤ είναι κυρίως τοξοειδείς με τα κοίλα προς τα πάνω και με κέντρο στα 90μ περίπου. Εκτίνονται από το 1/3 του κοίλου μέχρι το κοίλο. Στην πρύμνη και στην πλώρη έχουν ακανόνιστη μορφολογία.



Εικόνα 4.70: Γάστρα με κατάστρωμα, Full Load Departure

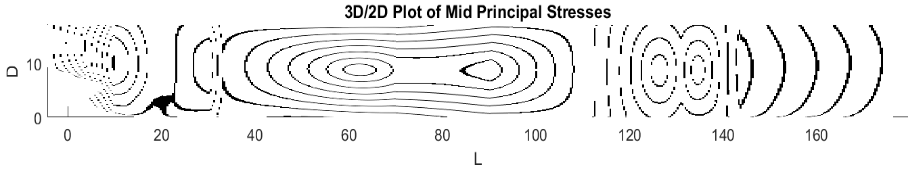
Στη γάστρα με κατάστρωμα στο φορτωμένο πλοίο (Εικ. 4.70) οι ισοτασικές καμπύλες των ΕΚΤ έχουν ακανόνιστη μορφολογία στην πρύμνη. Στην πλώρη είναι τοξοειδείς με τα κοίλα προς τα πάνω ενώ στο μέσο του πλοίου από τα 70μ μέχρι τα 120μ είναι σχεδόν ευθείες από το μισό του κοίλου και πάνω ενώ από το μισό και κάτω είναι τοξοειδείς με τα κοίλα προς τα κάτω και κέντρο στα 90μ. Εμφανίζουν μια γενικά κυματοειδή μορφή από τα 50μ μέχρι τα 145μ με ασυνέχειες της ομαλότητας στα 50μ, 68μ, 83μ, 115μ, 130μ, 145μ.

4.4.3 Μέγιστες Διατμητικές Τάσεις



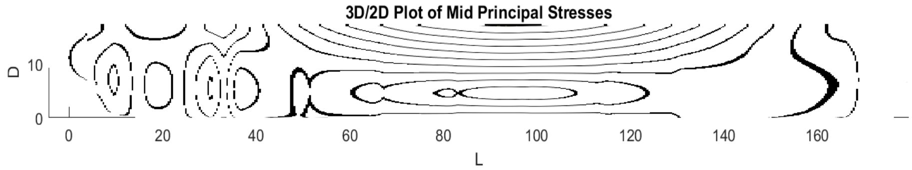
Εικόνα 4.71: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Lightship Condition

Οι ισοτασικές καμπύλες των ΜΔΤ στη γάστρα χωρίς κατάστρωμα στο άφορτο πλοίο (Εικ. 4.71) είναι τοξοειδείς από τα 15μ μέχρι τα 110μ από το μέσο του κοίλου μέχρι το ύψος του καταστρώματος με κέντρο περί τα 55μ. Στην ίδια περιοχή αλλά κάτω από το μέσω του κοίλου μέχρι τον πυθμένα είναι κλειστές καμπύλες με συγκέντρωση στο 1/4 του ύψους από το κατάστρωμα. Το ίδιο συμβαίνει μερικώς στην πρύμνη και στην πλώρη για ισοτασικές κάτω από το μισό του κοίλου.



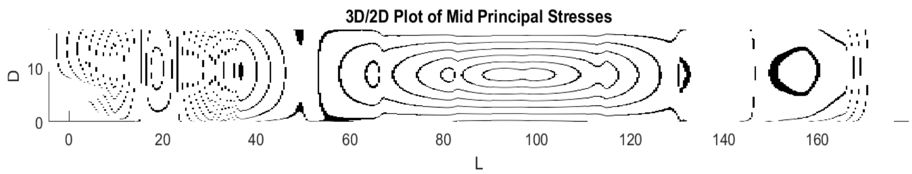
Εικόνα 4.72: Γάστρα με κατάστρωμα, Lightship Condition

Με την ύπαρξη καταστρώματος στο άφορτο πλοίο (Εικ. 4.72) οι ισοτασικές των ΜΔΤ είναι τοξοειδείς στην πλώρη, ακανόνιστες στην πρύμνη ενώ γενικά είναι κλειστές καμπύλες με κέντρο στο μισό του κοίλου και κατά το διάμηκες στα 32μ, 62μ, 88μ, 125μ, 135μ, 142μ. Εκτίνονται από το κατάστρωμα μέχρι τον πυθμένα.



Εικόνα 4.73: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Full Load Departure

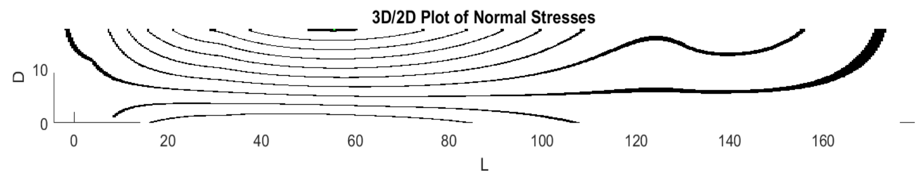
Στη γάστρα χωρίς κατάστρωμα στο φορτωμένο πλοίο (Εικ. 4.73) οι ισοτασικές των ΜΔΤ είναι τοξοειδείς από τα 42 μέχρι τα 148μ στην περιοχή από το μέσο του κοίλου μέχρι το κατάστρωμα με κέντρο στα 95μ. Από το μισό του κοίλου μέχρι τον πυθμένα είναι κλειστές καμπύλες με κέντρο στο 1/4 του κοίλου στην πρύμνη και στο παράλληλο τμήμα. Στην πλώρη είναι ακανόνιστης μορφής.



Εικόνα 4.74: Γάστρα με κατάστρωμα, Full Load Departure

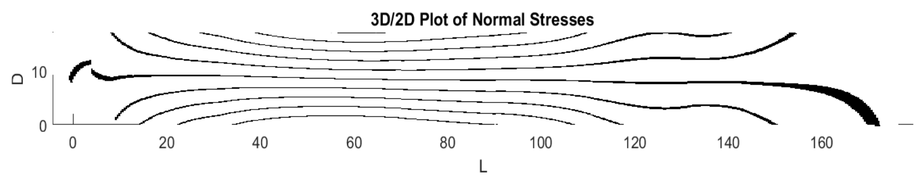
Στη γάστρα με κατάστρωμα στο φορτωμένο πλοίου (Εικ. 4.74) οι ισοτασικές καμπύλες των ΜΔΤ είναι κλειστές καμπύλες με κέντρο στο μισό του κοίλου κυρίως στην περιοχή από τα 55μ μέχρι τα 128μ κατά το διάμηκες.

4.4.4 Ορθές τάσεις



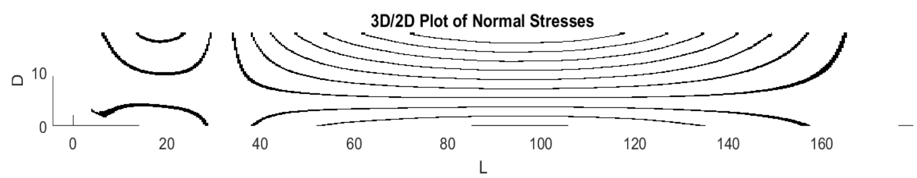
Εικόνα 4.75: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Lightship Condition

Οι ισοτασικές των ΟΤ στη γάστρα χωρίς κατάστρωμα στο άφορτο πλοίο (Εικ. 4.75) είναι τοξοειδείς με τα κοίλα προς τα πάνω από το 1/3 του κοίλου προς το κατάστρωμα. Από το 1/3 του κοίλου μέχρι τον πυθμένα έχουν τα κοίλα προς τα κάτω. Το κέντρο και των δύο βρίσκεται στα 58μ περίπου.



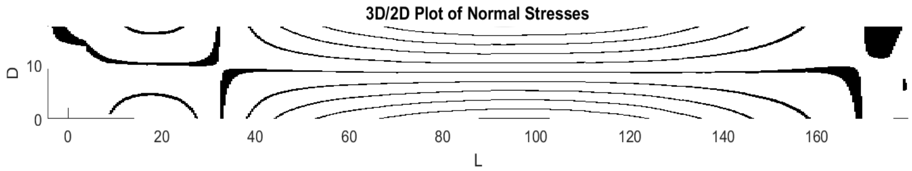
Εικόνα 4.76: Γάστρα με κατάστρωμα, Lightship Condition

Στη γάστρα με κατάστρωμα στο άφορτο πλοίο (Εικ. 4.76) οι ισοτασικές των ΟΤ είναι τοξοειδείς με τα κοίλα προς τα πάνω σε ύψος από το μισό του κοίλου μέχρι το κατάστρωμα. Από το μισό του κοίλου μέχρι των πυθμένα έχουν τα κοίλα προς τα κάτω. Το κέντρο τους βρίσκεται σε απόσταση 62μ περίπου κατά το διάμηκες.



Εικόνα 4.77: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Full Load Departure

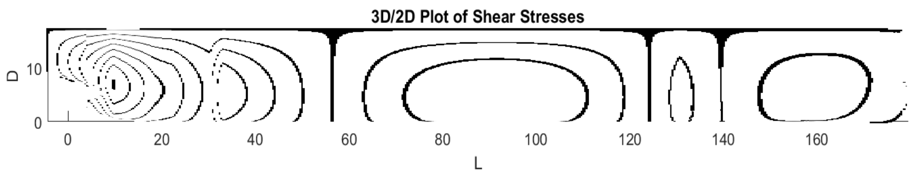
Στη γάστρα χωρίς κατάστρωμα στο φορτωμένο πλοίο (Εικ. 4.77) οι ισοτασικές καμπύλες των ΟΤ είναι τοξοειδείς. Χωρίζονται σε δύο περιοχές κατά το διάμηκες. Μία από τα 7μ μέχρι τα 24μ με κέντρο στα 18μ και μία από τα 38μ μέχρι τα 165μ με κέντρο στα 98μ. Και στις δύο περιοχές σε ύψος από το μισό και πάνω έχουν στραμμένα τα κοίλα προς τα πάνω και από το μισό και κάτω έχουν στραμμένα τα κοίλα προς τα κάτω.



Εικόνα 4.78: Γάστρα με κατάστρωμα, Full Load Departure

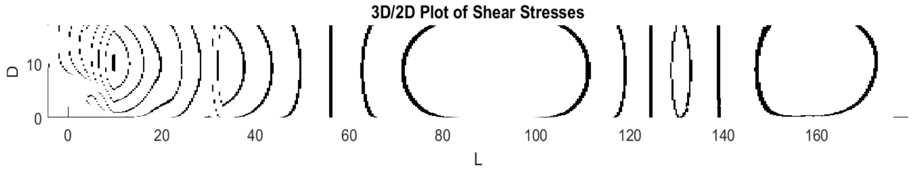
Στη γάστρα με κατάστρωμα στο φορτωμένο πλοίο (Εικ. 4.78) οι ισοτασικές των ΟΤ χωρίζονται στις ίδιες περιοχές κατά το διάμηκες με τα ίδια κέντρα. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση εμφανίζονται πολύ πιο ορθογωνισμένες καμπύλες σε ύψος κοντά στο μισό του κοίλου.

4.4.5 Διατμητικές Τάσεις



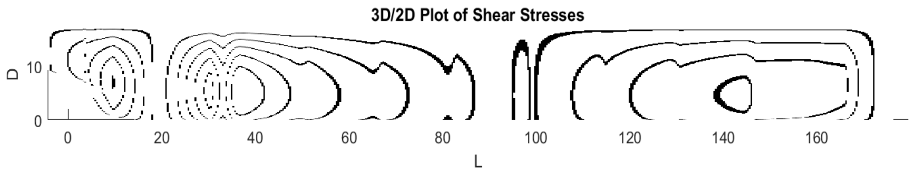
Εικόνα 4.79: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Lightship Condition

Οι ισοτασικές των ΔΤ στη γάστρα χωρίς κατάστρωμα στο άφορτο πλοίο (Εικ. 4.79) είναι κυρίως κλειστές καμπύλες που εμφανίζονται σε πέντε περιοχές. Η πρώτη περιοχή εκτίνεται από το πρυμναίο άκρο μέχρι τα 32μ με κέντρο στα 10μ, η δεύτερη περιοχή από τα 32μ μέχρι τα 50μ με κέντρο στα 35μ, η τρίτη από τα 62μ μέχρι τα 120μ με κέντρο στα 95μ, η τέταρτη από τα 125μ μέχρι τα 135μ με κέντρο στα 130μ και η πέμπτη από τα 148μ μέχρι τα 170μ με κέντρο στα 160μ. Κατά το ύψος όλα τα κέντρα βρίσκονται στο 1/4 περίπου του κοίλου. Υπάρχουν καμπύλες που είναι κατακόρυφες ευθείες στα 57μ, 123μ και στα 140μ και μία οριζόντια ευθεία πάνω στο κοίλο.



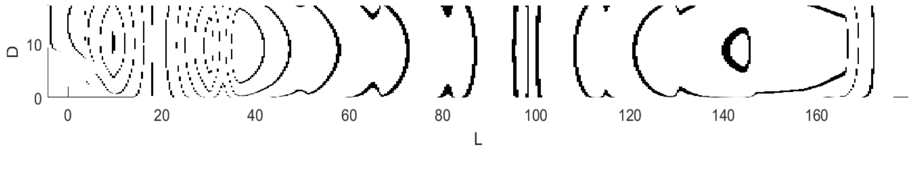
Εικόνα 4.80: Γάστρα με κατάστρωμα, Lightship Condition

Οι ισοτασικές καμπύλες της γάστρας με κατάστρωμα στο άφορτο πλοίο (Εικ. 4.80) εμφανίζει την ίδια περίπου μορφολογία με αυτή της γάστρας χωρίς κατάστρωμα στο άφορτο πλοίο (Εικ. 4.79). Η κλειστές καμπύλες είναι ελαφρά μετατοπισμένες προς το κατάστρωμα με κέντρο κατά το ύψος στο μισό του κοίλου. Η οριζόντια ευθεία στο κοίλο δεν υπάρχει πια.



Εικόνα 4.81: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Full Load Departure

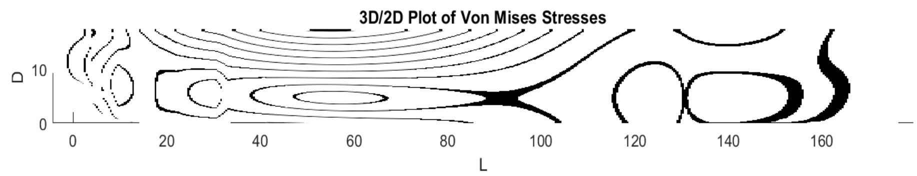
Στη γάστρα χωρίς κατάστρωμα στο φορτωμένο πλοίο (Εικ. 4.81) οι ισοτασικές καμπύλες των ΔΤ χωρίζονται σε τρεις κύριες περιοχές. Η πρώτη εκτίνεται από το πρυμναίο άκρο μέχρι τα 18μ με κέντρο στα 13μ, η δεύτερη από τα 20μ μέχρι τα 88μ με κέντρο στα 35μ και η τρίτη περιοχή εκτίνεται από τα 100μ μέχρι το πρωραίο άκρο με κέντρο στα 142μ. Κατά το ύψος τα κέντρα βρίσκονται στο 1/4 του κοίλου περίπου. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι καμπύλες δεν είναι ομαλές αλλά έχουν κυματοειδή μορφή κυρίως στο παράλληλο τμήμα.



Εικόνα 4.82: Γάστρα με κατάστρωμα, Full Load Departure

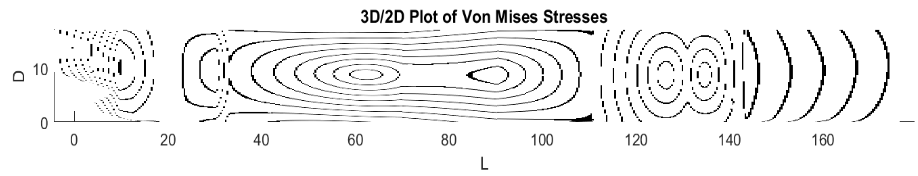
Στη γάστρα με κατάστρωμα στο φορτωμένο πλοίο (Εικ. 4.82) οι ισοτασικές καμπύλες των ΔΤ έχουν την ίδια μορφολογία με αυτές της γάστρας χωρίς κατάστρωμα στο φορτωμένο πλοίο (Εικ. 4.81). Ωστόσο, είναι μετατοπισμένες προς το κατάστρωμα και τα κέντρα τους βρίσκονται κατά το ύψος στο μισό του κοίλου.

4.4.6 Τάσεις Von Mises



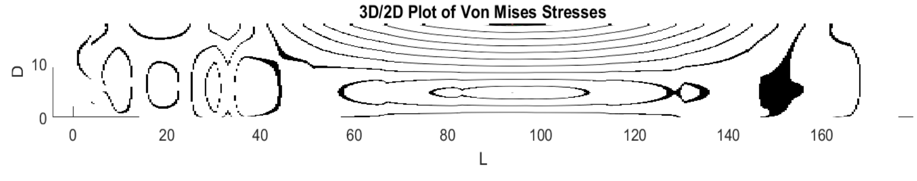
Εικόνα 4.83: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Lightship Condition

Στη γάστρα χωρίς κατάστρωμα στο άφορτο πλοίο (Εικ. 4.83) οι ισοτασικές καμπύλες των TVM έχουν την ίδια μορφολογία με τις ισοτασικές καμπύλες των ΜΔΤ για την αντίστοιχη περίπτωση (Εικ. 4.71).



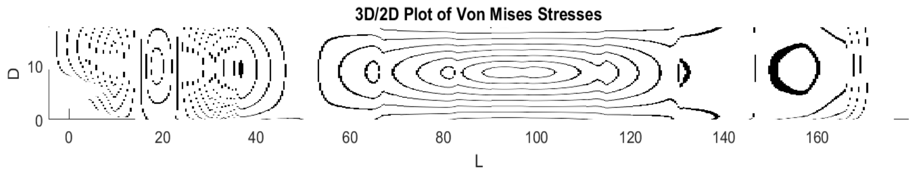
Εικόνα 4.84: Γάστρα με κατάστρωμα, Lightship Condition

Στη γάστρα με κατάστρωμα στο άφορτο πλοίο (Εικ. 84) οι ισοτασικές καμπύλες των TVM έχουν την ίδια μορφολογία με τις ισοτασικές καμπύλες των ΜΔΤ για την αντίστοιχη περίπτωση (Εικ. 4.72).



Εικόνα 4.85: Γάστρα χωρίς κατάστρωμα, Full Load Departure

Στη γάστρα χωρίς κατάστρωμα στο φορτωμένο πλοίο (Εικ. 85) οι ισοτασικές καμπύλες των TVM έχουν την ίδια μορφολογία με τις ισοτασικές καμπύλες των ΜΔΤ για την αντίστοιχη περίπτωση (Εικ. 4.73).

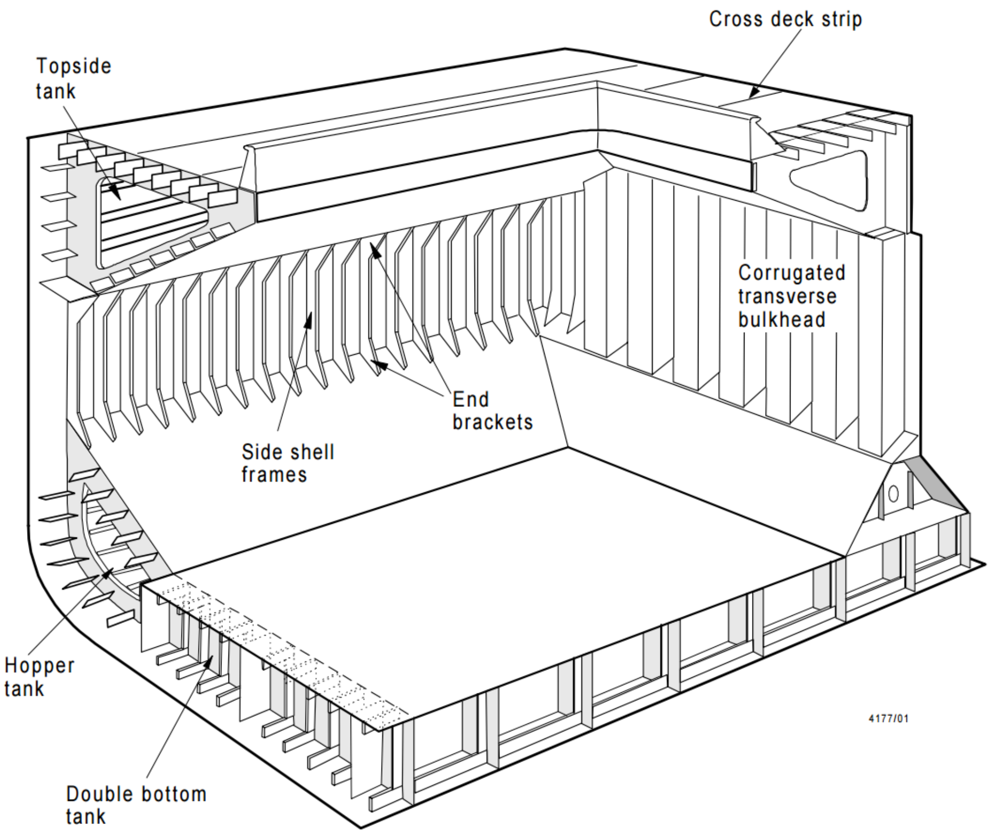


Εικόνα 4.86: Γάστρα με κατάστρωμα, Full Load Departure

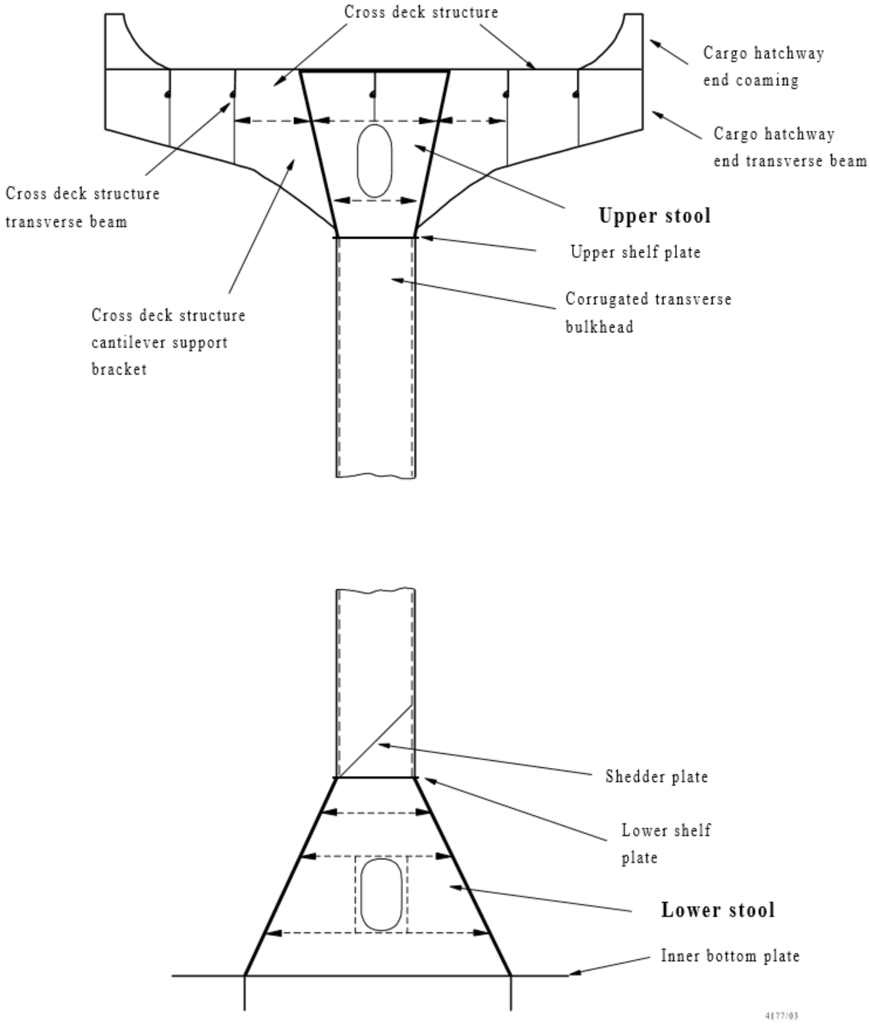
Στη γάστρα χωρίς κατάστρωμα στο φορτωμένο πλοίο (Εικ. 86) οι ισοτασικές καμπύλες των TVM έχουν την ίδια μορφολογία με τις ισοτασικές καμπύλες των ΜΔΤ για την αντίστοιχη περίπτωση (Εικ. 4.74).

4.5 Μελέτη Επίδρασης Εγκάρσιων Φρακτών

Για να μελετήσουμε την επίδραση της παρουσίας των εγκάρσιων φρακτών πρέπει πρώτα να αποκτήσουμε μια γενική εικόνα του χώρου φορτίου ενός bulk carrier. Ο χώρος φορτίου (Εικ. 4.87) πλαισιώνεται κατά το διάμηκες από τις εγκάρσιες πτυχωτές φρακτές (corrugated transverse bulkheads), κατά το πλάτος από τα πλευρικά ελάσματα (side shell) με τα εγκάρσια ενισχυτικά (side shell frames) και κατά το ύψος από το διπύθμενο (double bottom) και το κατάστρωμα (main deck) με τα καπάκια του χώρου φορτίου (hatches). Στις γωνίες του πυθμένα και του καταστρώματος εκτείνονται κατά το διάμηκες οι δεξαμενές έρματος (hopper tanks, topside tanks). Πάνω στη φρακτή υπάρχουν πλευρικά ελάσματα (Εικ. 4.88), που αναφέραμε και στα διαγράμματα ΜΔΤ, στον πυθμένα (lower stools) και στο κατάστρωμα (upper stools).

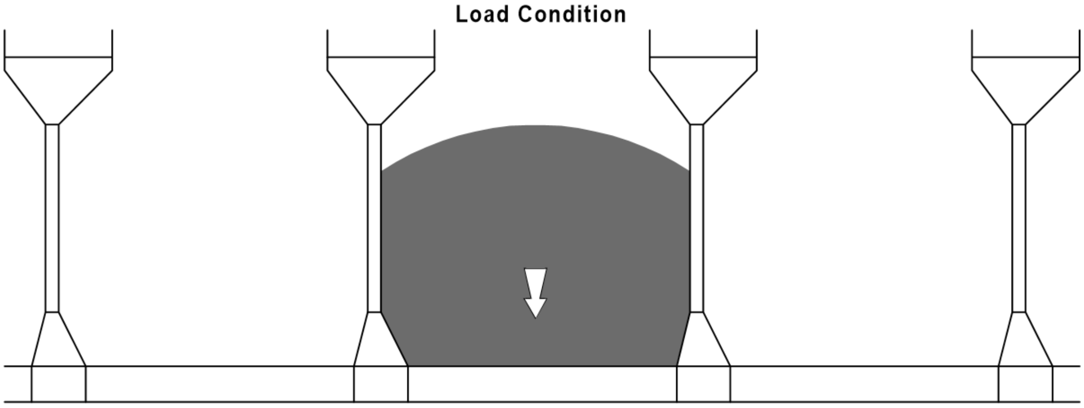


Εικόνα 4.87: Διάταξη χώρου φορτίου



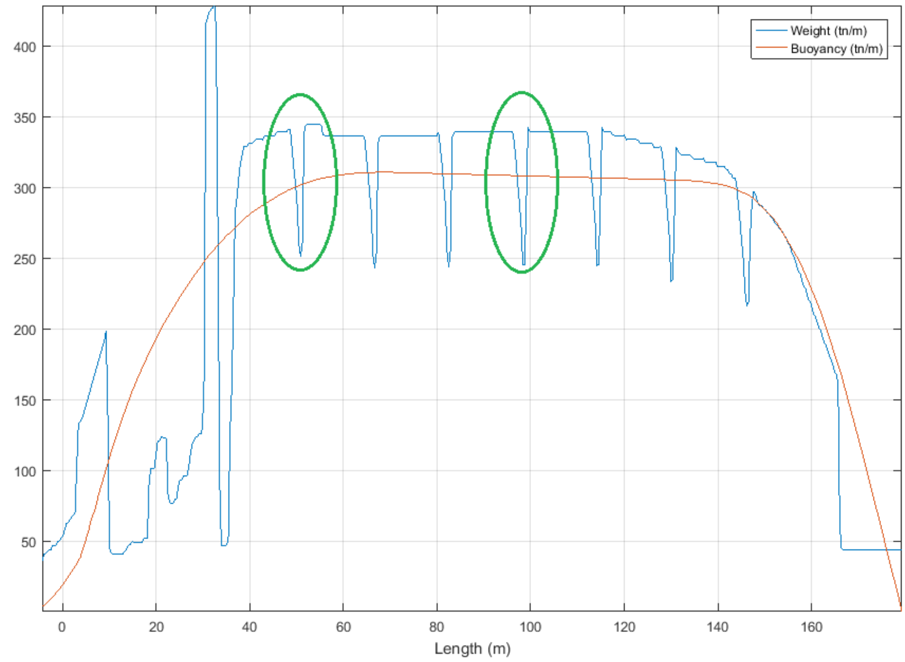
Εικόνα 4.88: Εγκάρσια τομή της εγκάρσια φρακτής

Όπως θα δούμε και στο διάγραμμα της κατανομής του βάρους (Εικ. 4.89) η ύπαρξη των stools δημιουργεί μια έντονη πτώση στο βάρος κοντά στις φρακτές με αποτέλεσμα την απότομη περίσσεια άντωσης σε αυτές τις περιοχές.



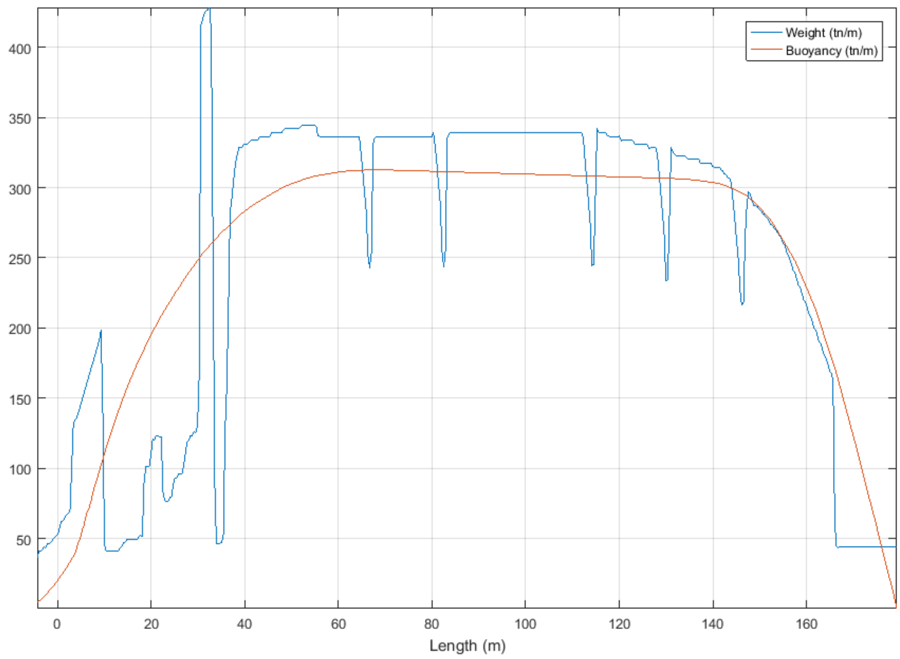
Εικόνα 4.89: Κατανομή του φορτίου κατά το διάμηκες

Αυτό συμβαίνει επειδή ο χώρος εκεί που υπάρχουν τα stools είναι κενός από φορτίο. Στην εικόνα 4.90 φαίνεται το αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου.

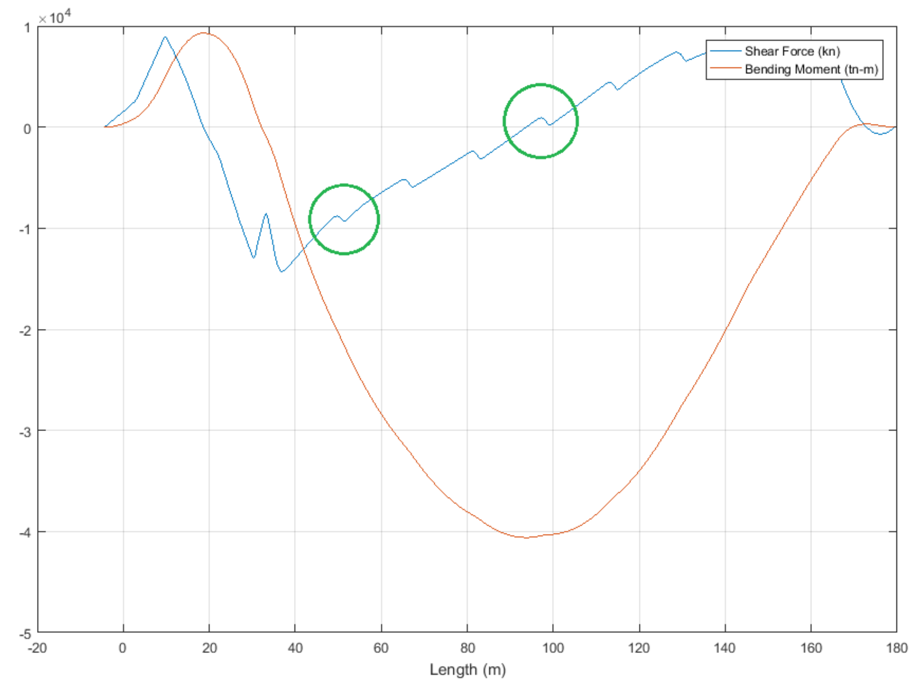


Εικόνα 4.90: Απότομη πτώση του βάρους στη φρακτή των 51.45μ και 99.15μ (πράσινο)

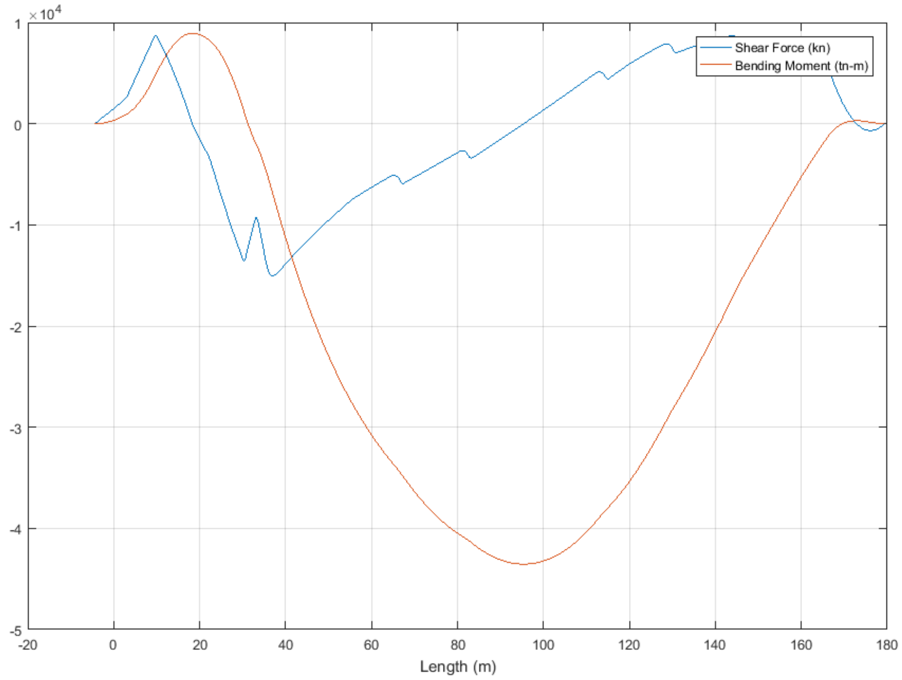
Με σκοπό να μελετήσουμε τις διατμητικές τάσεις στη φρακτή των 51.45μ και τις ορθές τάσεις στη φρακτή των 99.15μ θεωρήσαμε πως η αφαίρεση της φρακτής οδηγεί σε ομαλά κατανεμημένο φορτίο στις θέσεις αυτές, που καταλαμβάνει τον όγκο που αλλιώς θα ήταν κενός λόγω των stools (Εικ. 4.91). Η αλλαγή είχε άμεση επίδραση στην κατανομή των διατμητικών δυνάμεων αλλά όχι στη μορφή των καμπτικών ροπών, παρά μόνο στο μέγεθός τους (Εικ. 4.91, 4.92).



Εικόνα 4.91: Αφαίρεση των ανωμαλιών της κατανομής στα 51.45μ και στα 99.15μ



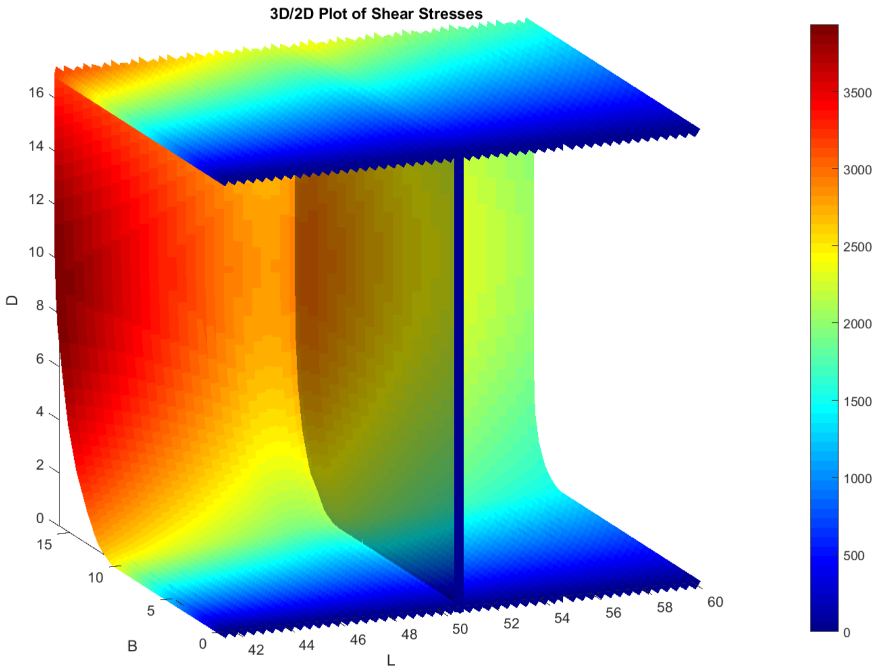
Εικόνα 4.92: Διατμητικές δυνάμεις και καμπτικές ροπές πριν την αφαίρεση των φρακτών



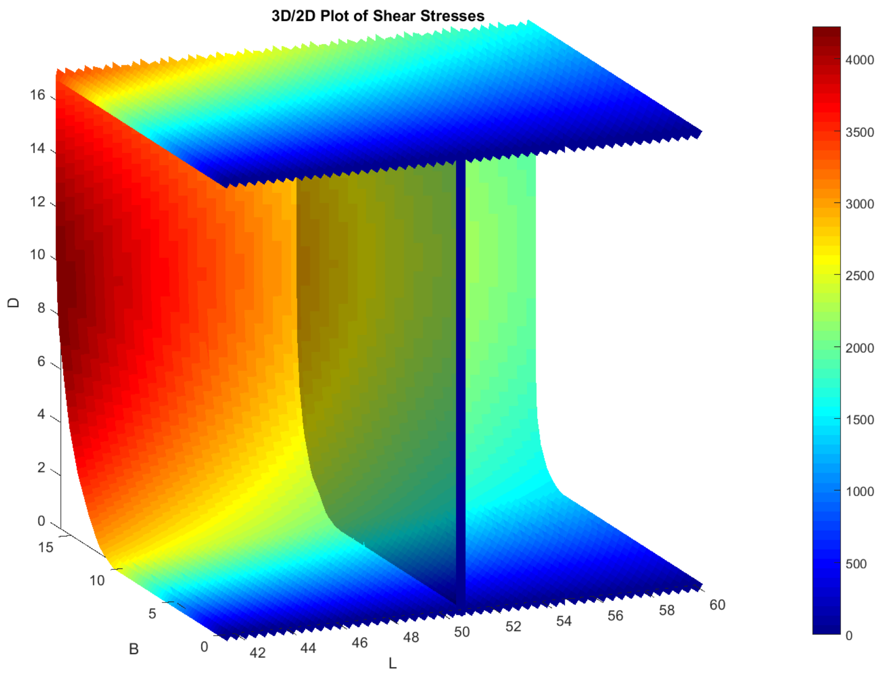
Εικόνα 4.93: Διατμητικές δυνάμεις και καμπτικές ροπές μετά την αφαίρεση των φρακτών

Το αποτέλεσμα στην τριδιάστατη κατανομή των διατμητικών τάσεων στα πλευρικά ελάσματα ήταν να αυξηθούν οι διατμητικές τάσεις προ της φρακτής των 51.45μ και να μειωθούν μετά από αυτήν, μετατοπίζοντας μια περιοχή υψηλών τάσεων προς την πρύμνη και εξομαλύνοντας τη γενική εικόνα των τάσεων (Εικ. 4.94, 4.95). Η αύξηση της μέγιστης διατμητικής τάσης στην περιοχή οφείλεται στην αύξηση του συνολικού βάρους και της άντωσης.

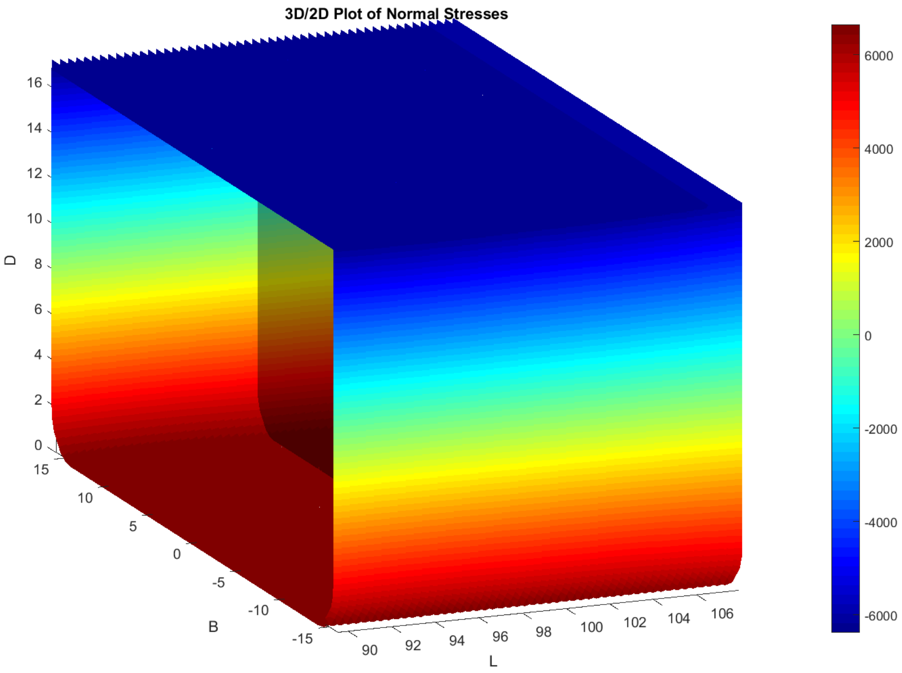
Όσο αφορά τις ορθές τάσεις καμία αλλαγή στην κατανομή τους δεν παρατηρήθηκε, όσο αφορά τη φρακτή των 99.15μ. Λόγω του αυξημένου βάρους οι ορθές τάσεις γενικά αυξήθηκαν οδηγώντας σε μεγαλύτερη καταπόνηση το κατάστρωμα και τον πυθμένα (Εικ. 4.96, 4.97). Αυτή ήταν μια προβλέψιμη συμπεριφορά εξαιτίας της άμεσης σχέσης των ΟΤ με τις καμπτικές ροπές, οι οποίες δεν επηρεάστηκαν από την αλλαγή όσο αφορά τη μορφή τους (Εικ. 4.92, 4.93).



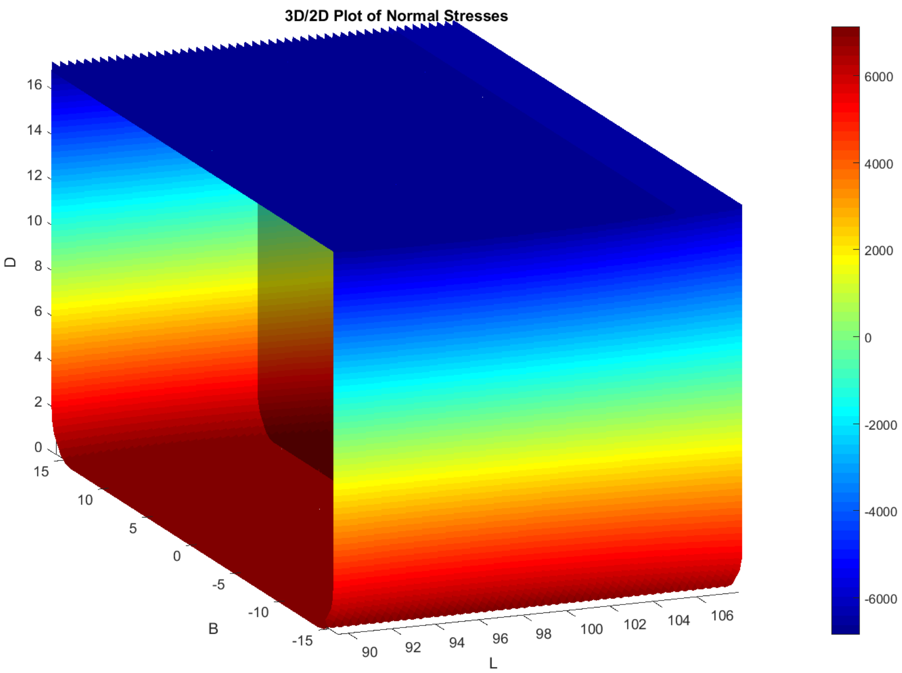
Εικόνα 4.94: Διατμητικές τάσεις εκατέρωθεν της φρακτής των 51.45μ (πριν την αφαίρεση)



Εικόνα 4.95: Διατμητικές τάσεις εκατέρωθεν της φρακτής των 51.45μ (μετά την αφαίρεση)



Εικόνα 4.96: Ορθές τάσεις εκατέρωθεν της φρακτής των 99.15μ (πριν την αφαίρεση)



Εικόνα 4.97: Ορθές τάσεις εκατέρωθεν της φρακτής των 99.15μ (μετά την αφαίρεση)

5

Αξιολόγηση

5.1 Επαλήθευση των αποτελεσμάτων

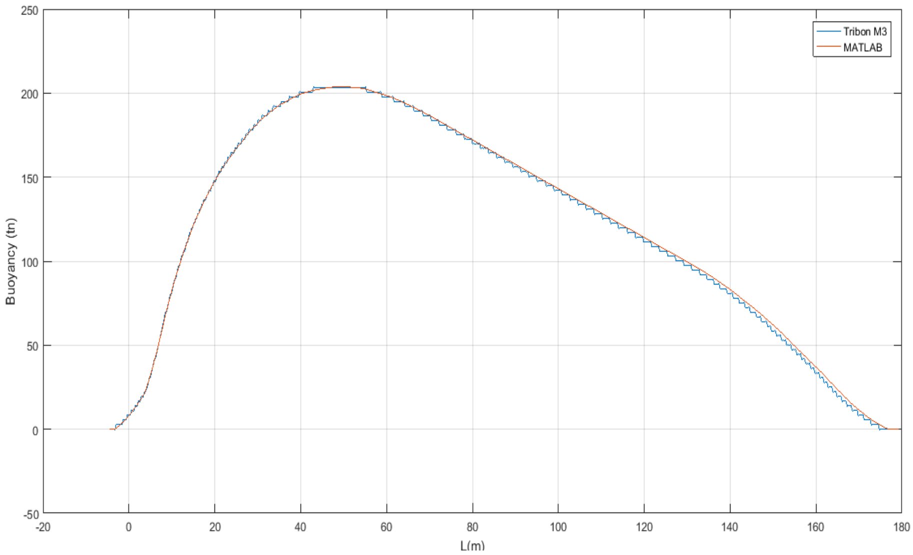
Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων έγινε αρχικά για τα υδροστατικά αποτελέσματα του κώδικα MATLAB δηλαδή την καμπύλη άντωσης, τις διατμητικές δυνάμεις και τις καμπτικές ροπές. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα σε μία ορθογωνική φορτηγίδα των τάσεων Von Mises, των Μέγιστων Κύριων, των Ελάχιστων Κύριων, των ορθών και τέλος των διατμητικών δυνάμεων. Για τις διατμητικές δυνάμεις παρουσιάζονται επιπλέον τα διαγράμματα της κατανομής τους σε μία τυχαία εγκάρσια τομή της φορτηγίδας και επιπλέον τα διαγράμματα για εγκάρσια τομή με προσθήκη απλουστευμένης μορφής άνω πλευρική δεξαμενή και κάτω πλευρική δεξαμενή με διπύθμενο.

Στα διαγράμματα σύγκρισης της άντωσης η μέγιστη απόκλιση του κώδικα από το Tribon M3 ήταν 2.24%. Όσο αφορά τις διατμητικές δυνάμεις ήταν 3.96% και τις καμπτικές ροπές 4.19%. Αυτές οι αποκλίσεις δεν μπορούμε να πούμε ότι οφείλονται μόνο σε αριθμητικά σφάλματα του κώδικα MATLAB καθώς όπως διαπιστώθηκε τα διαγράμματα της καμπύλης βάρους του TRIBON δεν απέδιδαν ακριβώς το συνολικό βάρος και διάμηκες κέντρο βάρους που παρουσίαζε το πρόγραμμα στα συγκεντρωτικά αποτελέσματα. Αντιθέτως, ο κώδικας MATLAB απέδωσε με ακρίβεια τόσο το βάρος όσο και το διάμηκες κέντρο βάρους στην περίπτωση της ορθογωνικής φορτηγίδας.

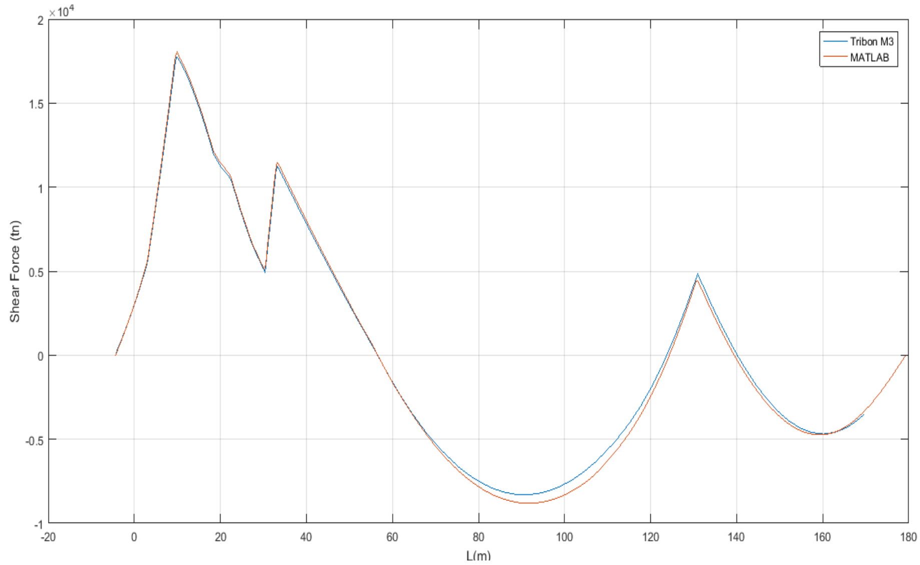
Όσο αφορά τα τριδιάστατα διαγράμματα που υπολογίστηκαν στο πρόγραμμα ABAQUS χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία κελύφους S4 και θεωρήσαμε αδύνατες τις στροφές των στοιχείων γύρω από τον άξονα X ώστε να μην έχουμε κάμψη των εσωτερικών ελασμάτων. Στα άκρα έχουμε απλή έδραση. Σε γενικές γραμμές ο κώδικας MATLAB αποδίδει την τριδιάστατη κατανομή των τάσεων. Οι διαφορές των μέγιστων τιμών που παρατηρούνται εντοπίζονται κυρίως στην μη γραμμική συμπεριφορά των στοιχείων κελύφους του ABAQUS όσο αφορά τις ορθές τάσεις κατά το πλάτος. Αυτή είναι μια μη γραμμική συμπεριφορά που δεν καλύπτεται στην απλή θεωρία κάμψης. Επιπλέον, φαινόμενα υστέρησης διάτμησης δεν έχουν ληφθεί υπόψην.

Όσο αφορά τις ισοτασικές καμπύλες ενώ ο κώδικας αποδίδει πάλι τη γενική εικόνα των τάσεων εμφανίζει ασυνέχειες, σε αντίθεση με ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, όπως το ABAQUS.

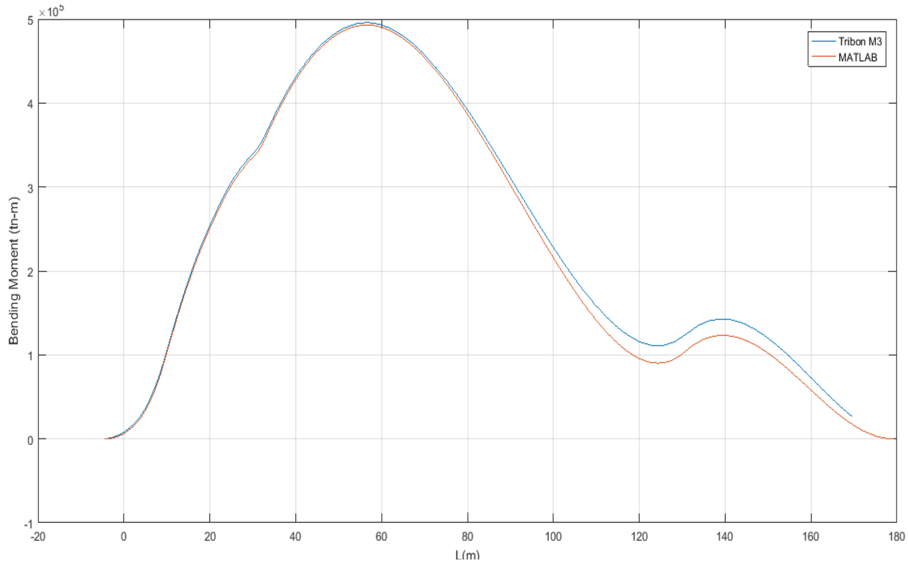
5.1.1 Σύγκριση υδροστατικών αποτελεσμάτων



Εικόνα 5.1: Σύγκριση καμπύλης άντωσης

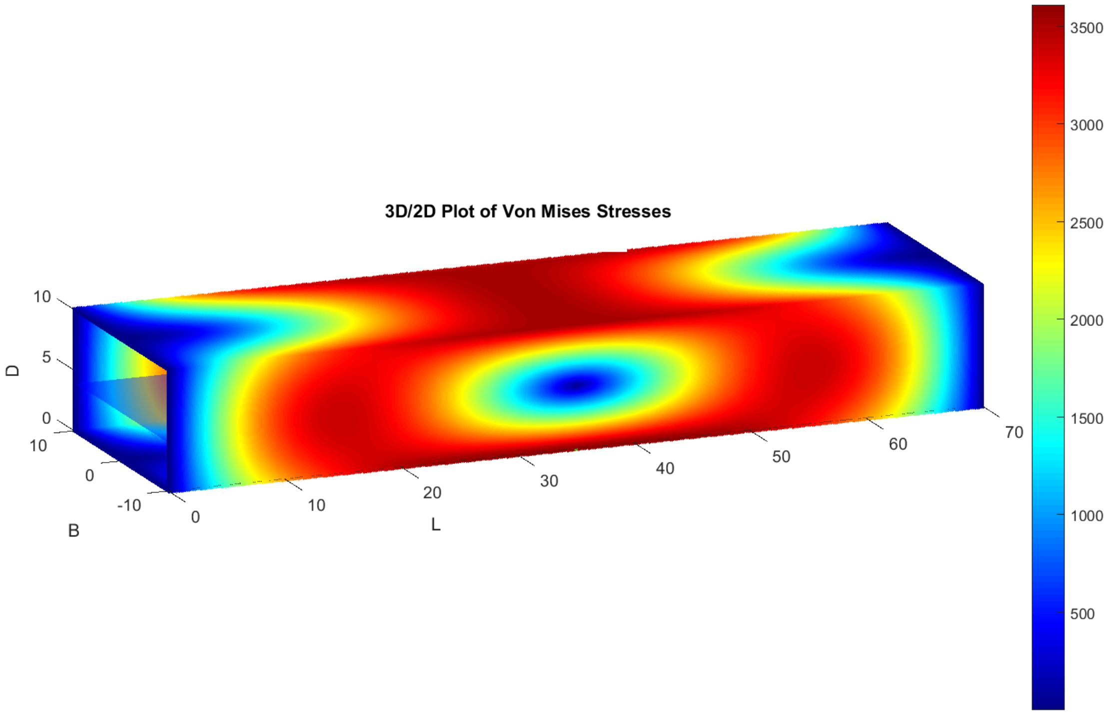


Εικόνα 5.2: Σύγκριση καμπύλων διατμητικών δυνάμεων

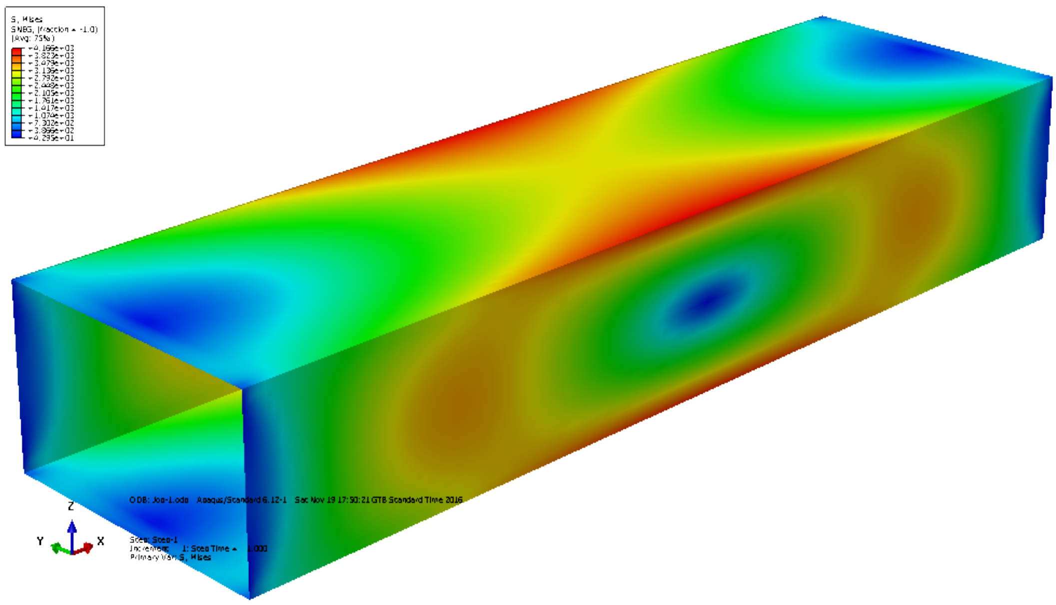


Εικόνα 5.3: Σύγκριση καμπυλών καμπτικών ροπών

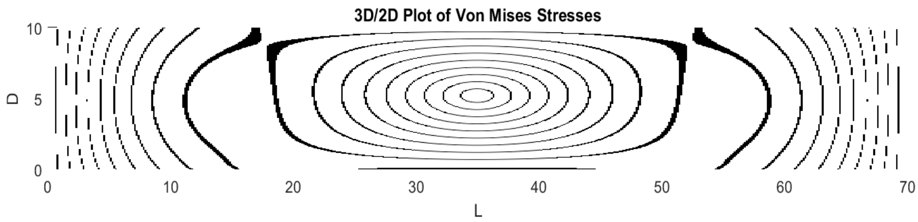
5.1.2 Σύγκριση Τάσεων Von Mises



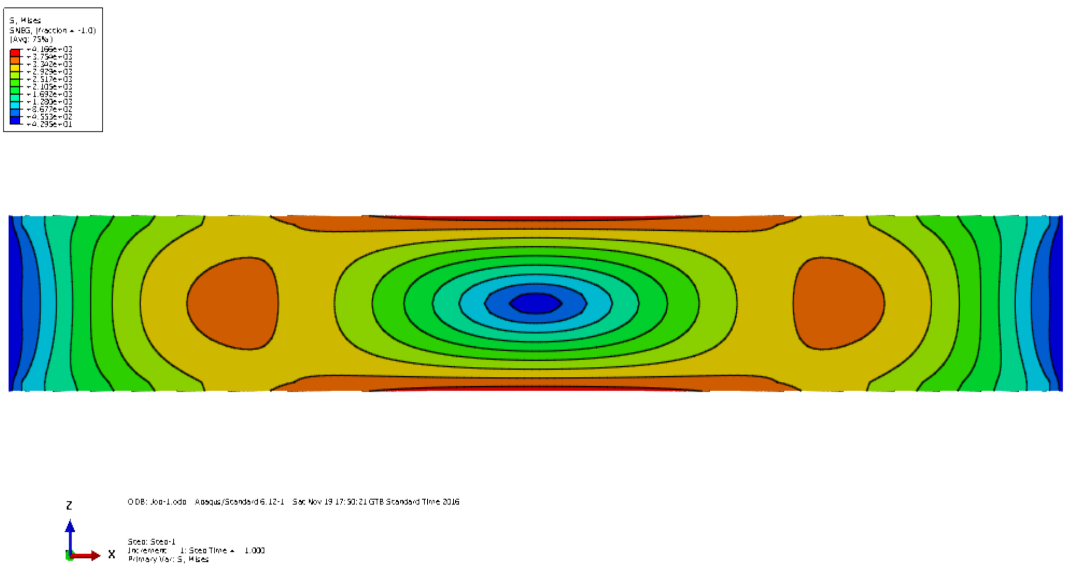
Εικόνα 5.4: Τάσεις Von Mises από τον κώδικα MATLAB



Εικόνα 5.5: Τάσεις Von Mises από το πρόγραμμα ABAQUS

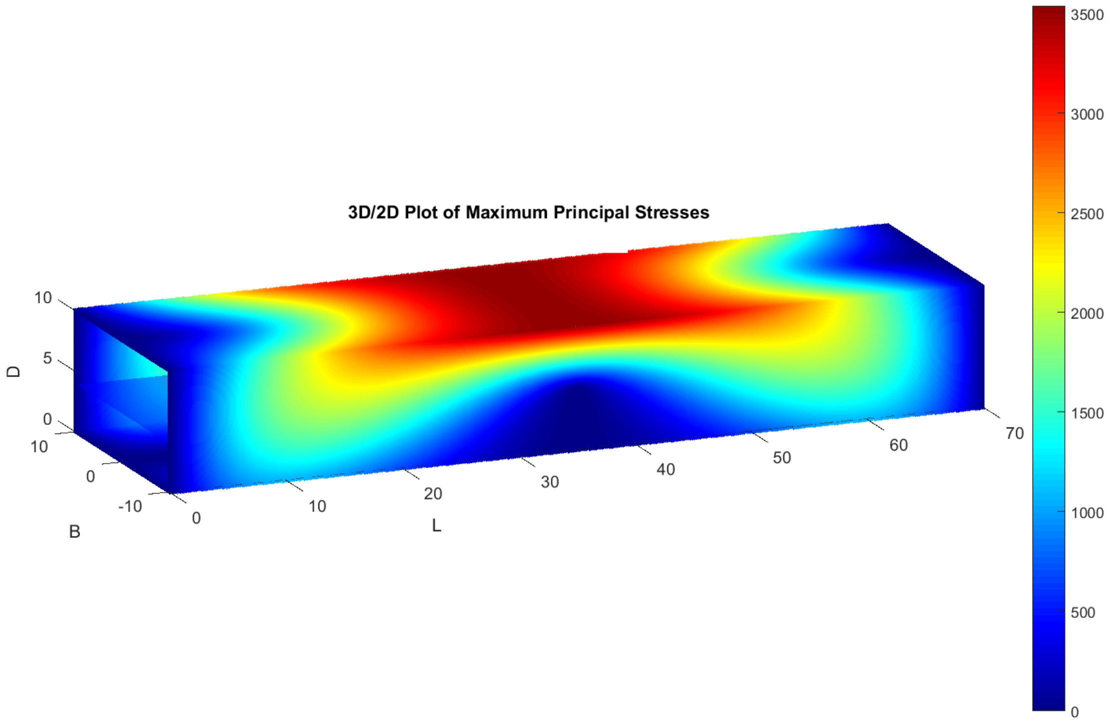


Εικόνα 5.6: Ισοτασικές καμπύλες τάσεων Von Mises από τον κώδικα MATLAB

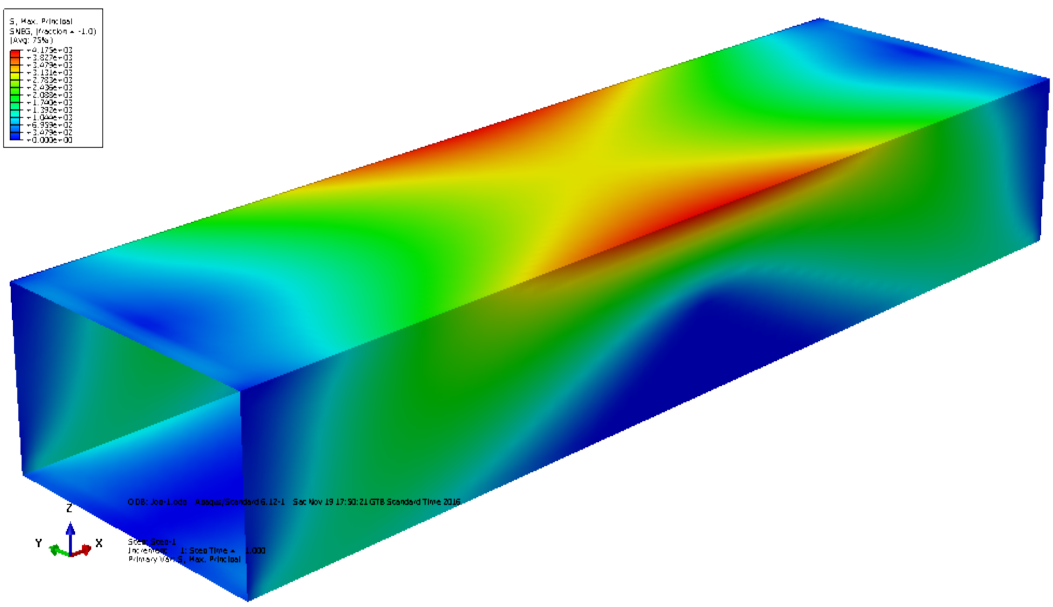


Εικόνα 5.7: Ισοτασικές καμπύλες τάσεων Von Mises από το πρόγραμμα ABAQUS

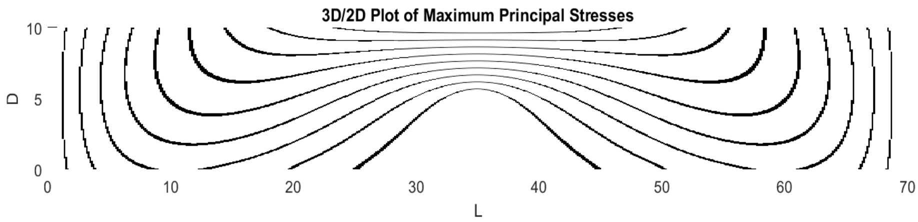
5.1.3 Σύγκριση Μέγιστων Κύριων Τάσεων



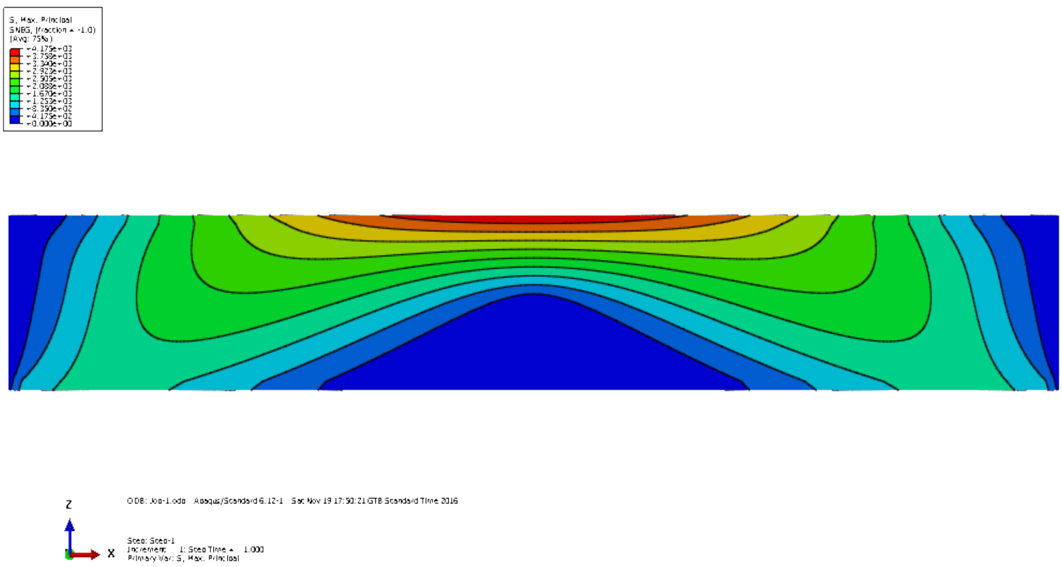
Εικόνα 5.8: Μέγιστες Κύριες τάσεις από τον κώδικα MATLAB



Εικόνα 5.9: Μέγιστες Κύριες τάσεις από το πρόγραμμα ABAQUS

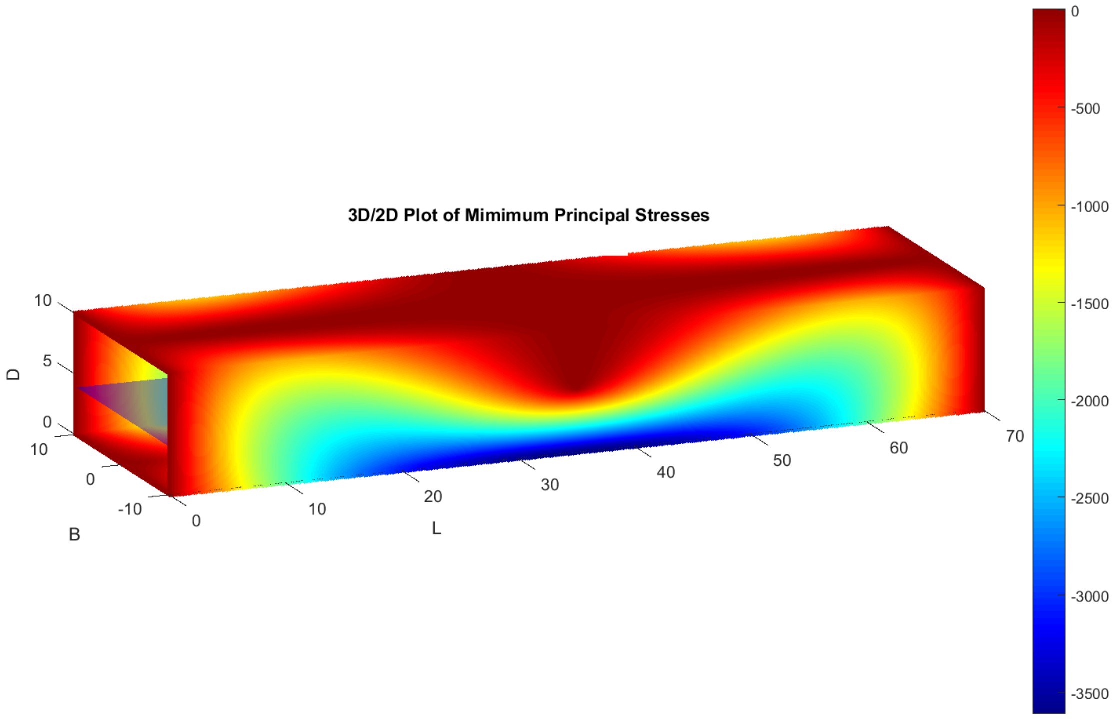


Εικόνα 5.10: Ισοτασικές καμπύλες των Μέγιστων Κύριων τάσεων από τον κώδικα MATLAB

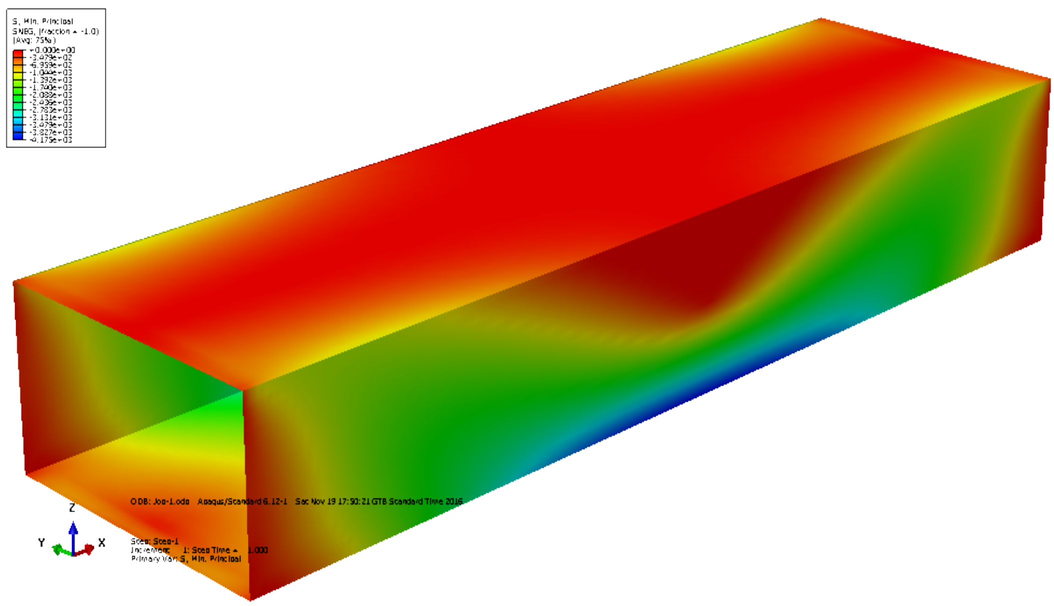


Εικόνα 5.11: Ισοτασικές καμπύλες των Μέγιστων Κύριων τάσεων από το πρόγραμμα ABAQUS

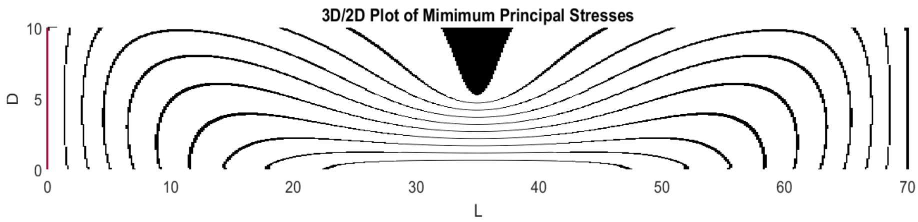
5.1.4 Σύγκριση Ελάχιστων Κύριων Τάσεων



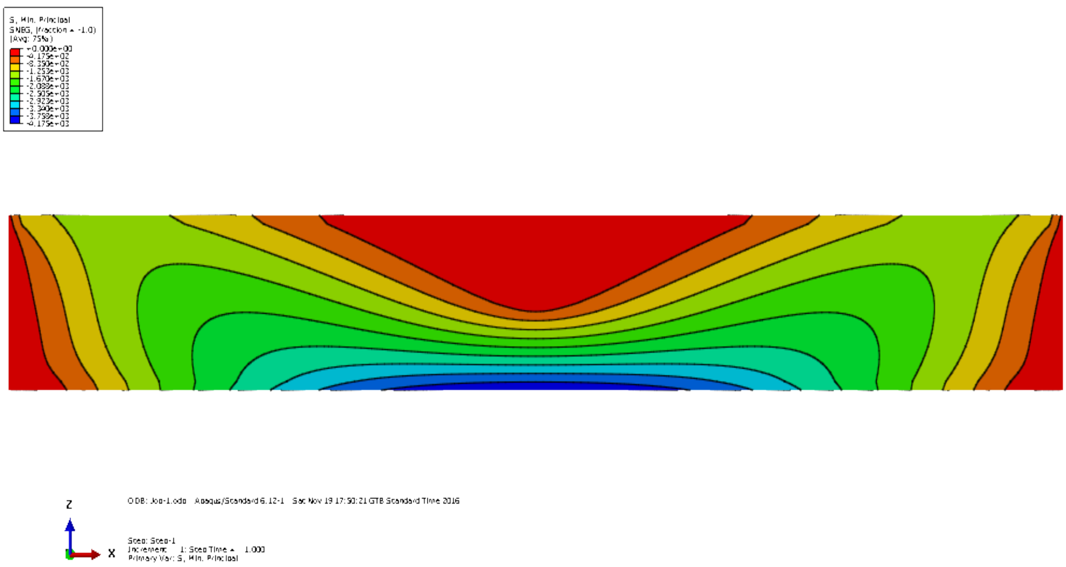
Εικόνα 5.12: Ελάχιστες Κύριες τάσεις από τον κώδικα MATLAB



Εικόνα 5.13: Ελάχιστες Κύριες τάσεις από το πρόγραμμα ABAQUS

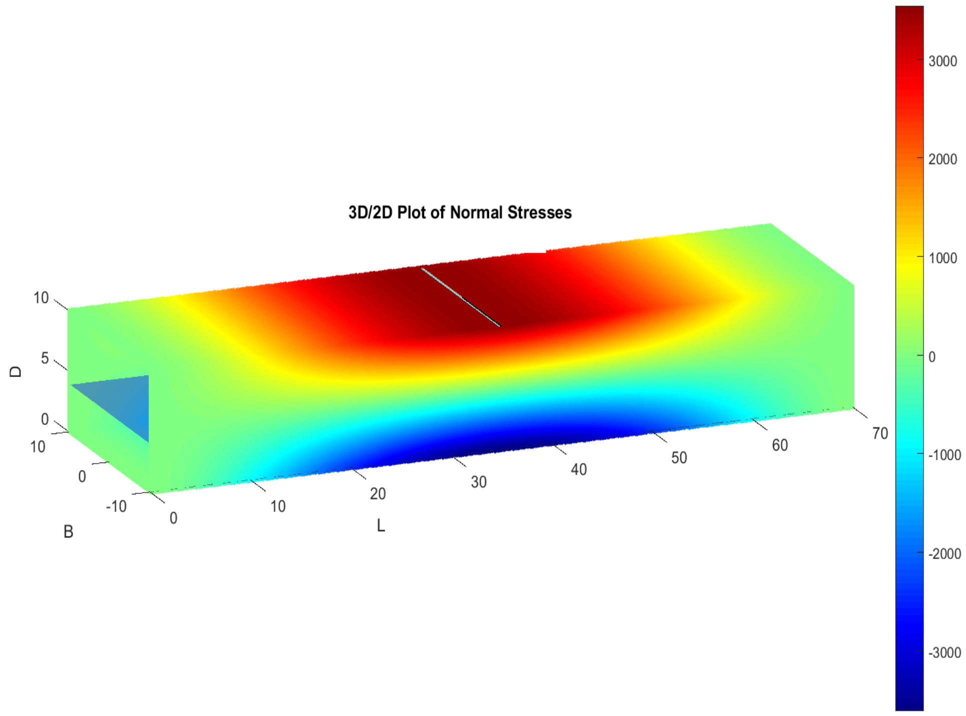


Εικόνα 5.14: Ισοτασικές καμπύλες Ελάχιστων Κύριων τάσεων από τον κώδικα MATLAB

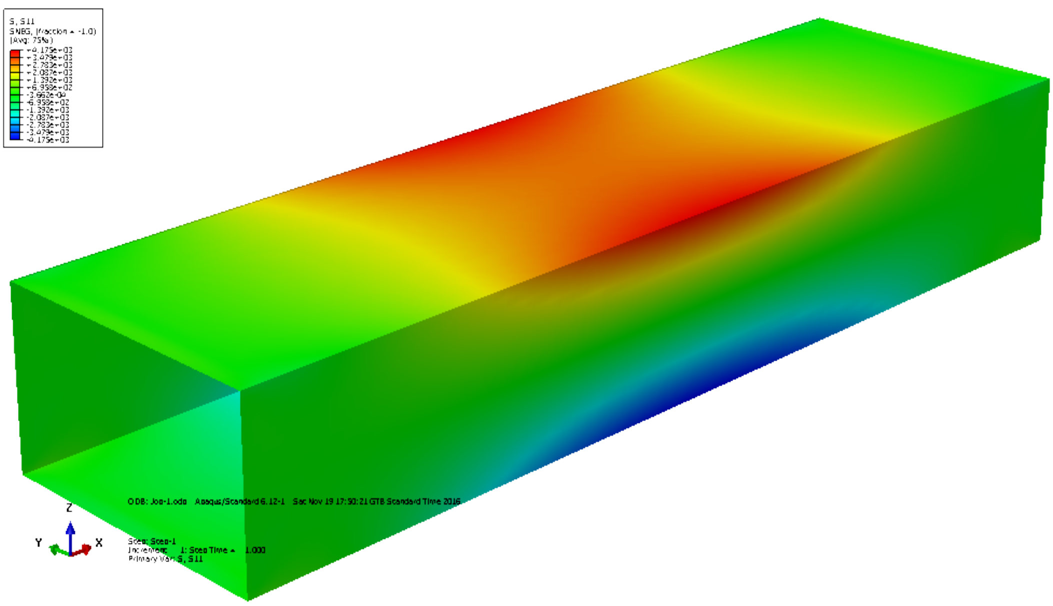


Εικόνα 5.15: Ισοτασικές καμπύλες Ελάχιστων Κύριων τάσεων από το πρόγραμμα ABAQUS

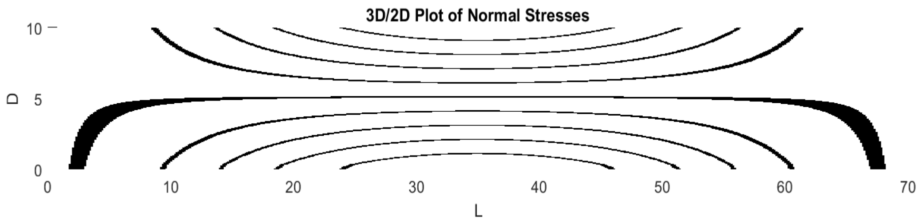
5.1.5 Σύγκριση Ορθών Τάσεων



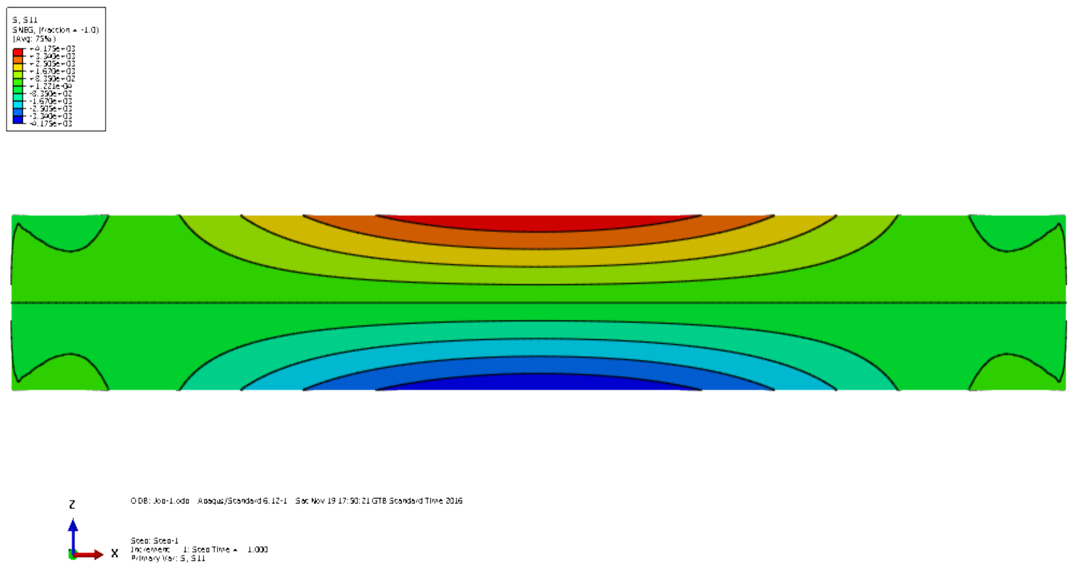
Εικόνα 5.16: Ορθές τάσεις από τον κώδικα MATLAB



Εικόνα 5.17: Ορθές τάσεις από το πρόγραμμα ABAQUS



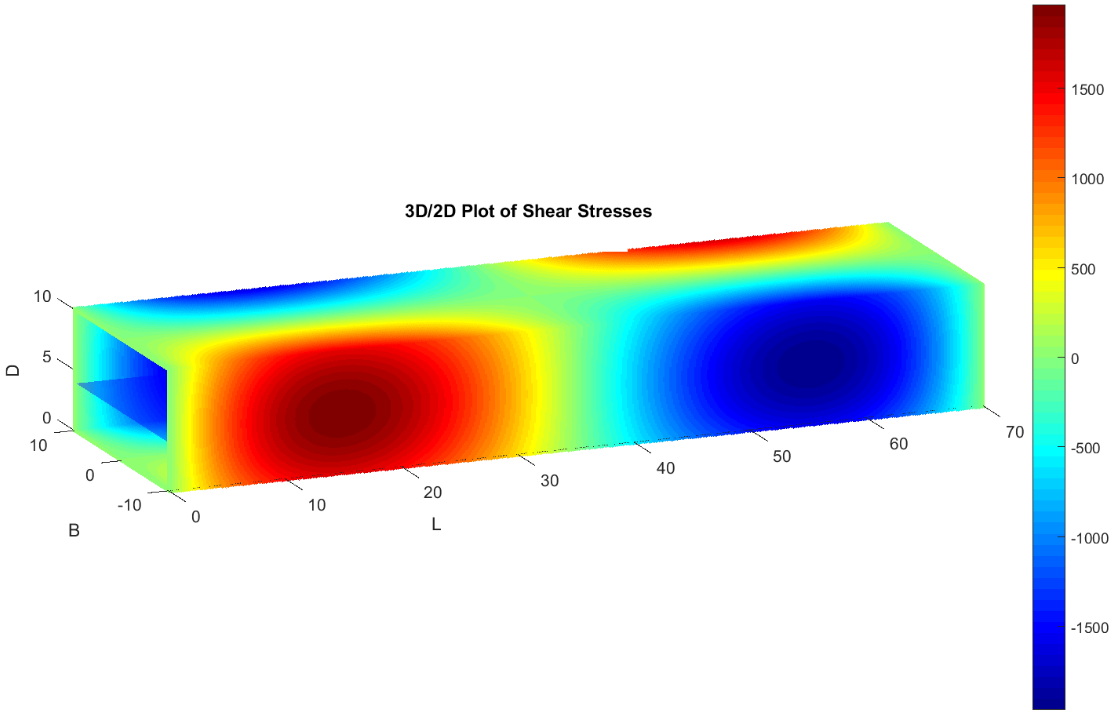
Εικόνα 5.18: Ισοτασικές καμπύλες Ορθών τάσεων από τον κώδικα MATLAB



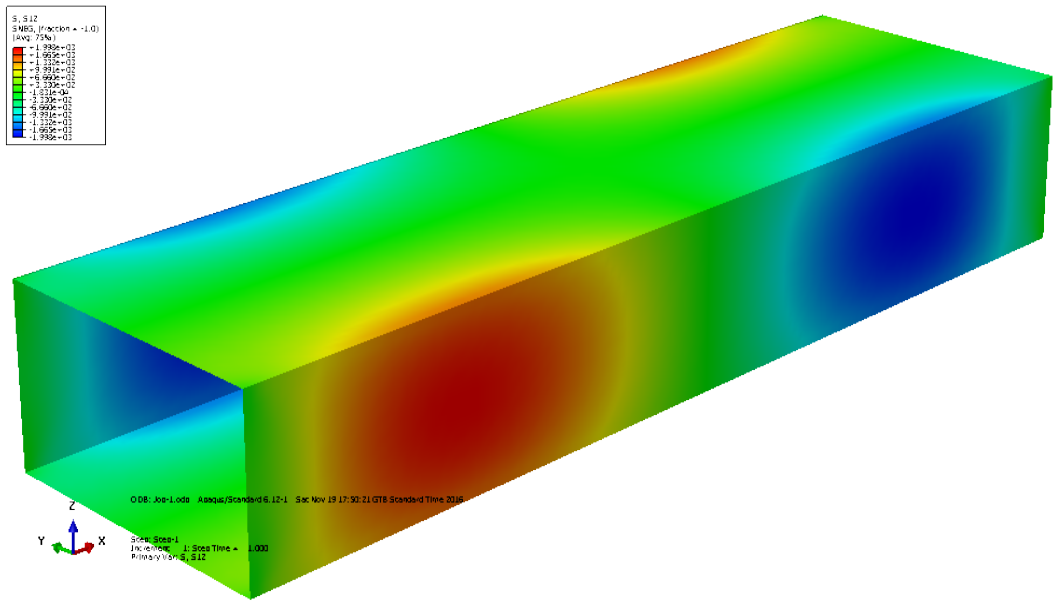
Εικόνα 5.19: Ισοτασικές καμπύλες Ορθών τάσεων από το πρόγραμμα ABAQUS

5.1.6 Σύγκριση Διατμητικών Τάσεων

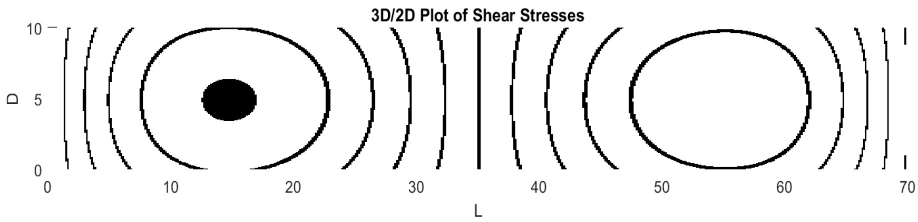
Περίπτωση απλής ορθογωνικής φορτηγίδας



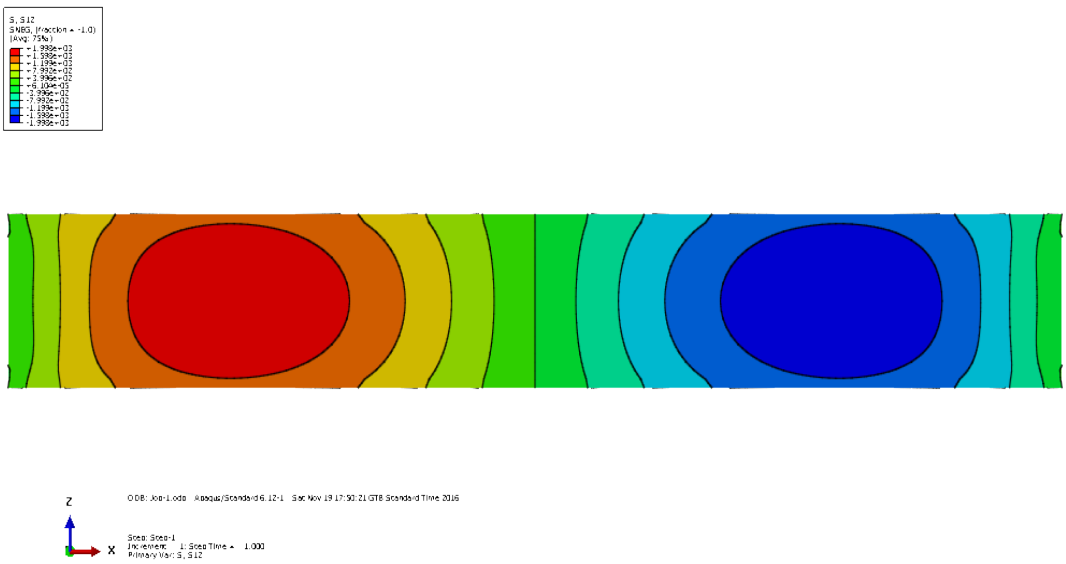
Εικόνα 5.20: Διατμητικές τάσεις από τον κώδικα MATLAB



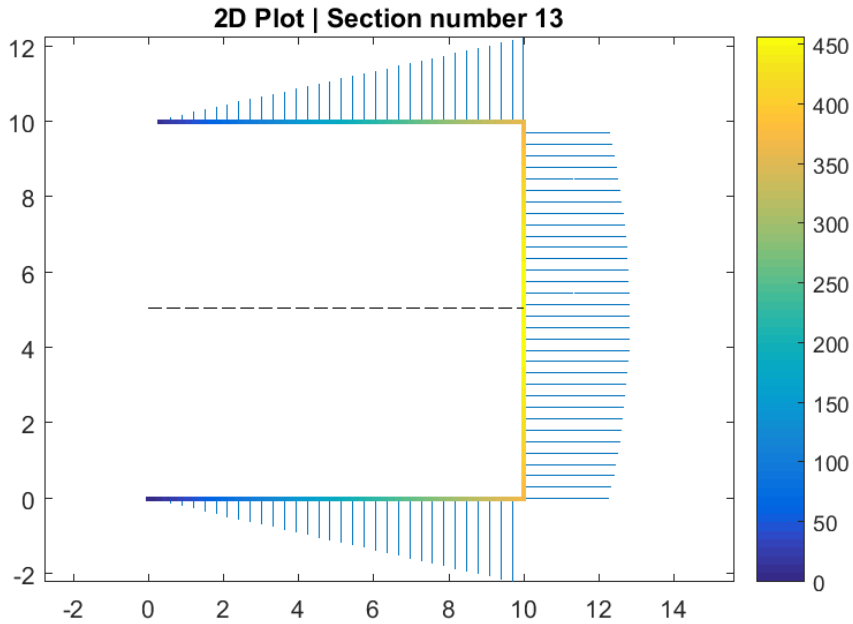
Εικόνα 5.21: Διατμητικές τάσεις από το πρόγραμμα ABAQUS



Εικόνα 5.22: Ισοτασικές καμπύλες από τον κώδικα MATLAB

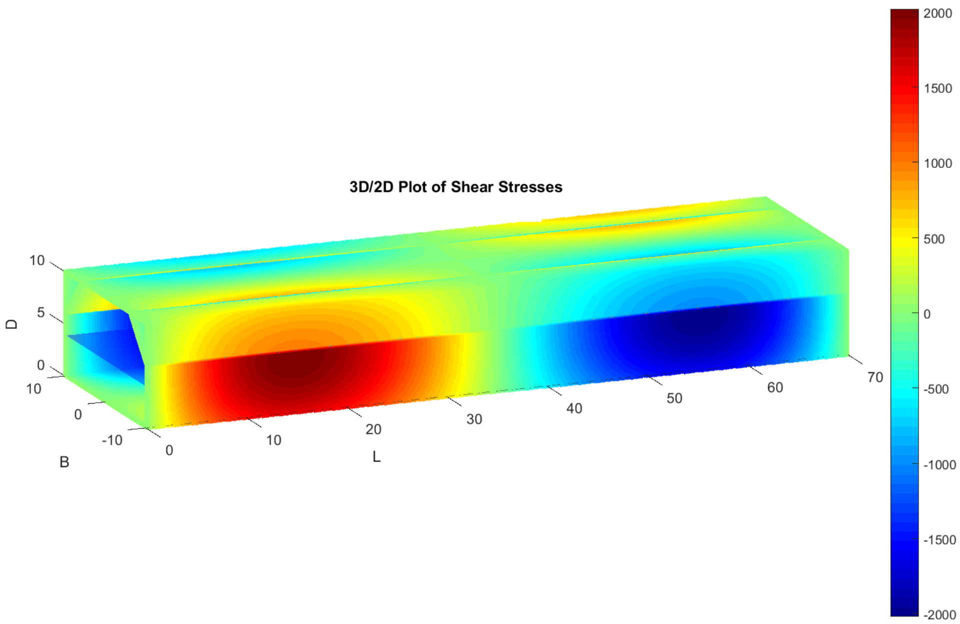


Εικόνα 5.23: Ισοτασικές καμπύλες από το πρόγραμμα ABAQUS

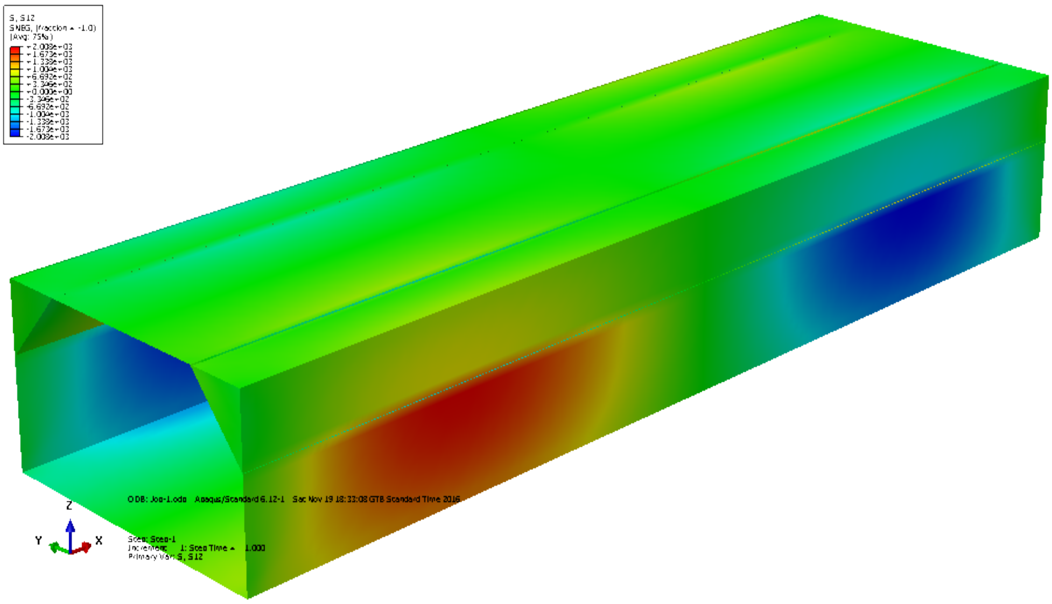


Εικόνα 5.24: Διατμητικές τάσεις σε εγκάρσια τομή από τον κώδικα MATLAB

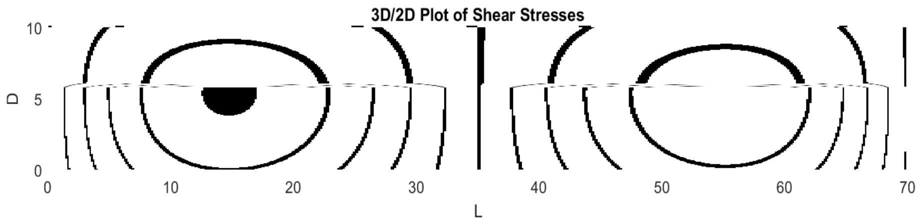
Περίπτωση ορθογωνικής φορτηγίδας με άνω πλευρική δεξαμενή



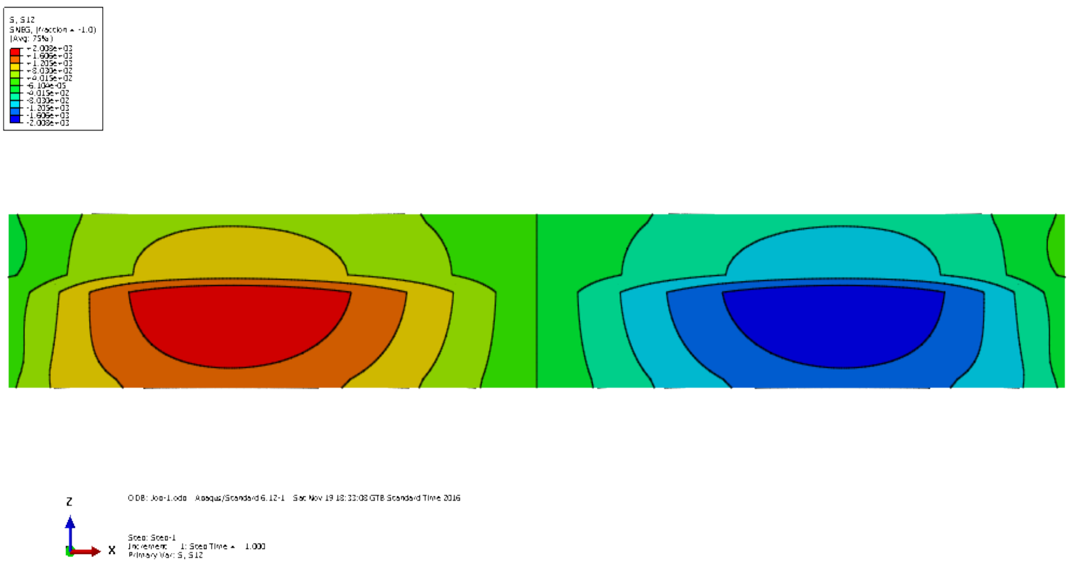
Εικόνα 5.25: Διατμητικές τάσεις από κώδικα MATLAB



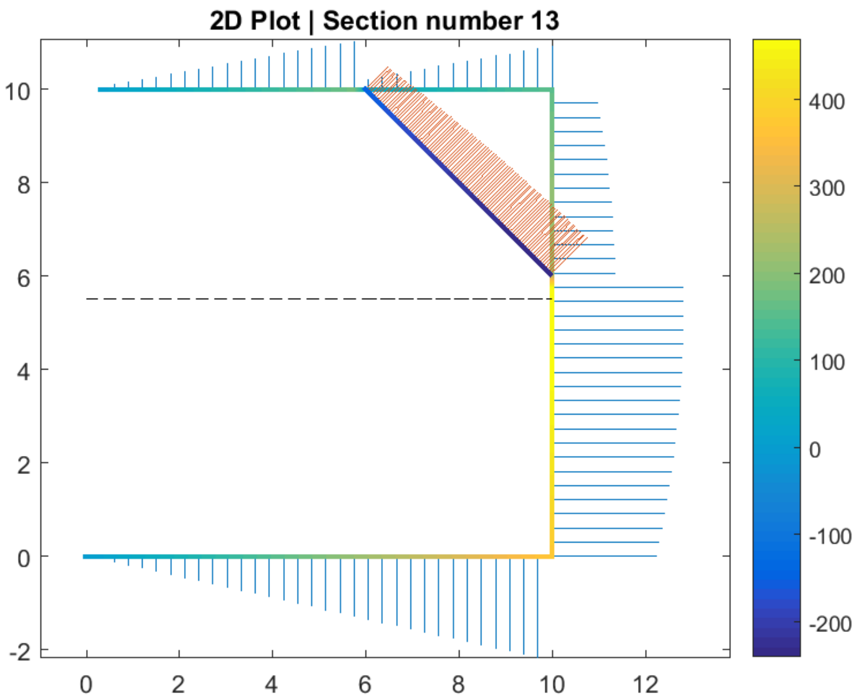
Εικόνα 5.26: Διατμητικές τάσεις από πρόγραμμα ABAQUS



Εικόνα 5.27: Ισοτασικές καμπύλες από κώδικα MATLAB

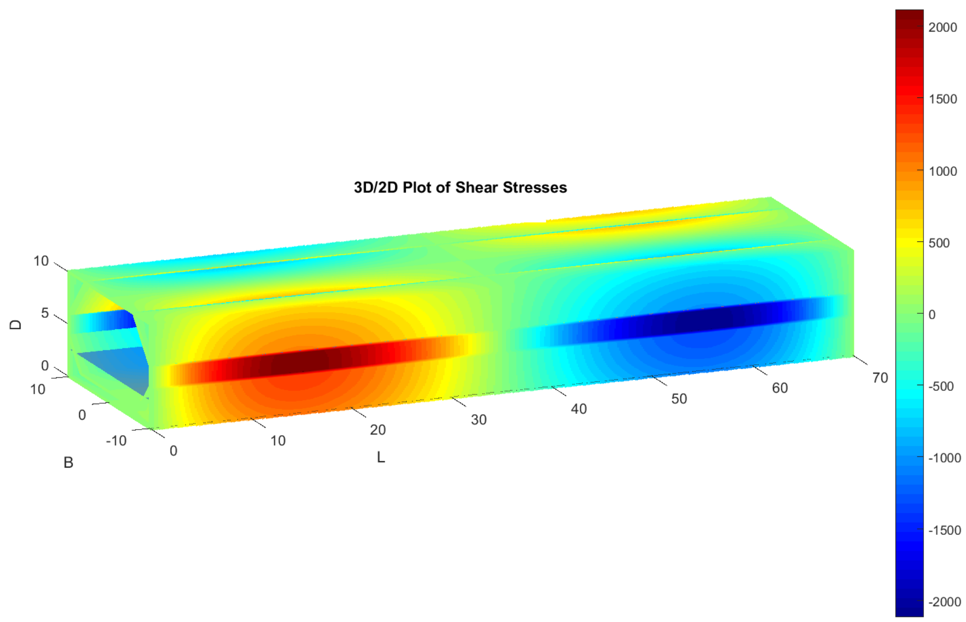


Εικόνα 5.28: Ισοτασικές καμπύλες από πρόγραμμα ABAQUS

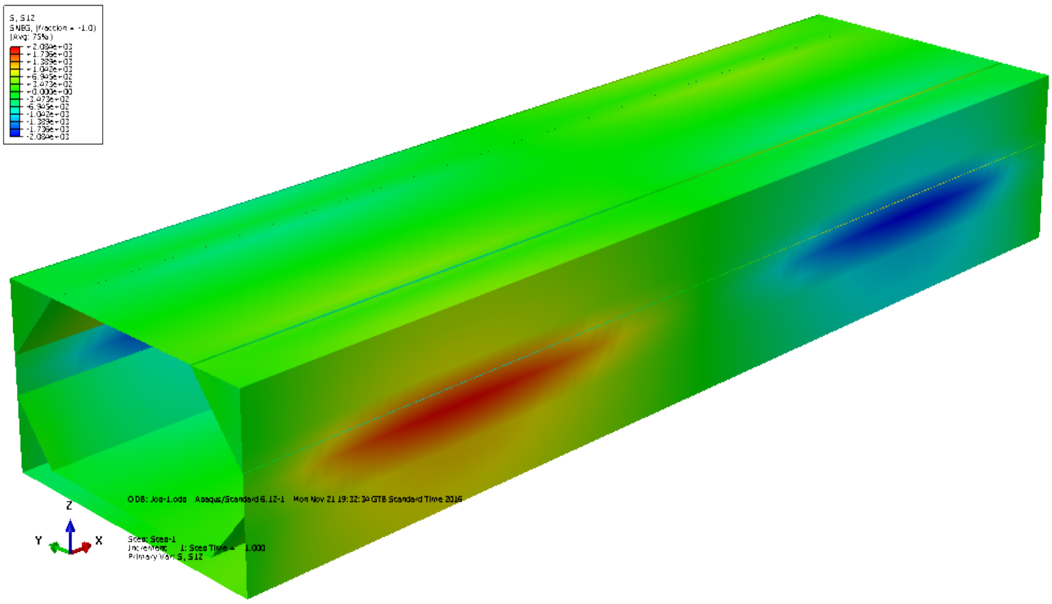


Εικόνα 5.29: Διατμητικές τάσεις σε εγκάρσια τομή από τον κώδικα MATLAB

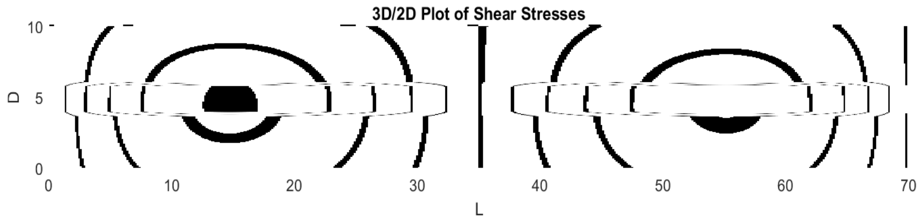
Περίπτωση ορθογωνικής φορτηγίδας με πλευρικές δεξαμενές και διπύθμενο



Εικόνα 5.30: Διατμητικές τάσεις από κωδικα MATLAB

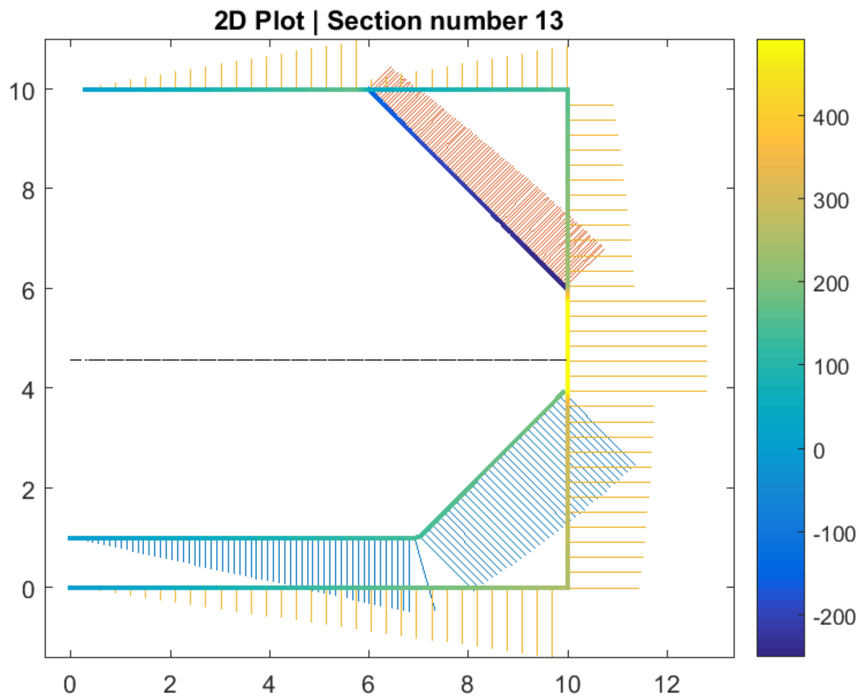


Εικόνα 5.31: Διατμητικές τάσεις από πρόγραμμα ABAQUS



Εικόνα 5.32: Ισοτασικές καμπύλες από κώδικα MATLAB

Εικόνα 5.33: Ισοτασικές καμπύλες από πρόγραμμα ABAQUS



Εικόνα 5.34: Διατμητικές τάσεις σε εγκάρσια τομή από τον κώδικα MATLAB

5.1.7 Αναλυτικός υπολογισμός διατμητικών τάσεων

Ενδεικτικά υπολογίσαμε για την περίπτωση της ορθογωνικής φορτηγίδας με άνω πλευρική δεξαμενή αναλυτικά τις διατμητικές τάσεις.

Αρχικά υπολογίζουμε τα χαρακτηριστικά τις διατομής

A/A	**Στοιχείο**	**w**	**h**	**I_0**	**a**	**y**	**a y**	**a y^2**
1	Κατ/μα	10	0.03	*	0.3	10	3	30
2	Έλ.Πλ.Δ.		4	0.23	0.17	8	1.36	10.9
3	Πλ.Έλ.		10	2.5	0.3	5	1.5	7.5
4	Πυθμ.	10	0.3	*	0.3	0	0	0
Σ				2.73	1.07		5.86	48.38

Πίνακας 5.1:Χαρακτηριστικά διατομής

Η απόσταση του Ουδέτερου Άξονα και η ροπή αδράνειας της διατομής (της μισής) είναι

$$c=\frac{\sum a\cdot y}{A}=\frac{5.86}{1.07}=5.48\ m \tag{5.1}$$

$$I_{base}=\sum I_0+\sum a\cdot y^2=2.73+48.38=51.1\ m^4 \tag{5.2}$$

και ολόκληρης στον Ο.Α.

$$I_{na}=2\times(I_{base}-A\cdot c^2=51.1-1.07\cdot 5.48^2)=38.0\ m^4 \tag{5.3}$$

Η διατμητική ροή και οι διατμητικές τάσεις μπορούν να βρεθούν από

$$q=\frac{Q\ m}{I}\Rightarrow q=\frac{255.43}{38}m\Rightarrow q=6.722\,m \tag{5.4}$$

$$\tau=\frac{Q\ m}{I\ t}\Rightarrow \tau=\frac{255.43}{38\cdot 0.03}m\Rightarrow \tau=224.061\,m \tag{5.5}$$

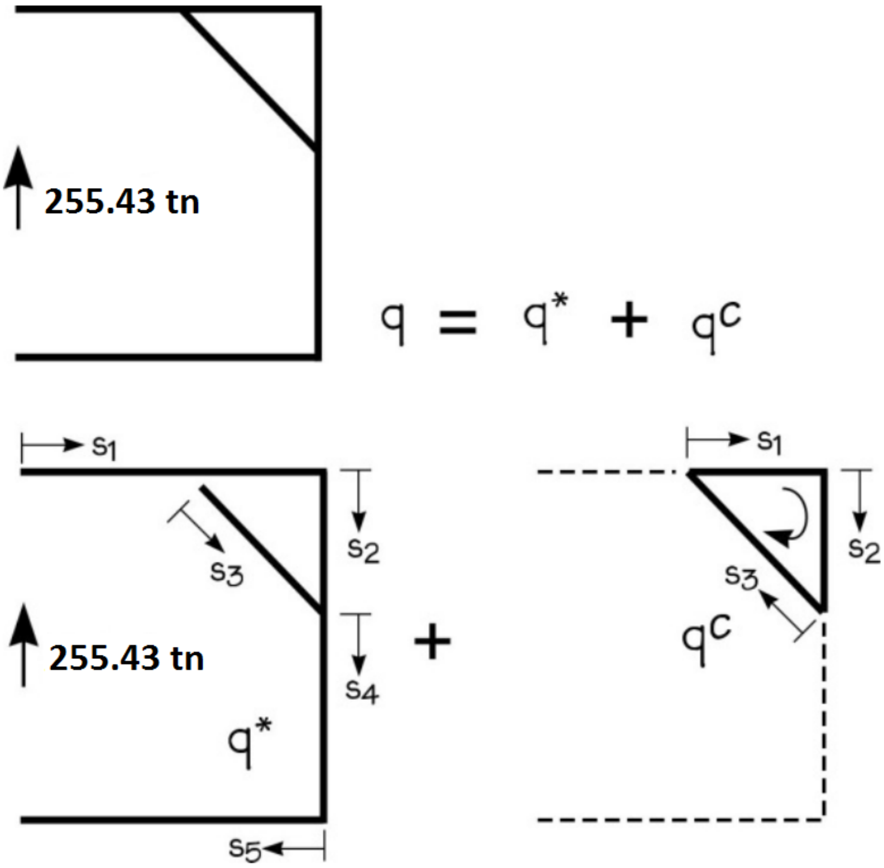
όπου

$$m=\int_0^s y\ t\ \ ds \tag{5.6}$$

Επομένως, για να υπολογίσουμε το τ πρέπει να βρούμε το m. Για να βρούμε το m πρέπει να ολοκληρώσουμε κατά μήκος των πέντε κλάδων του προβλήματος.

Επειδή, έχουμε μια κλειστή διατομή, το πρόβλημα είναι υπερστατικό και πρέπει να τη κόψουμε, να βρούμε την αρχική κατανομή και να προσθέσουμε μία διορθωτική διατμητική ροή.

Η αρχική κατανομή είναι q^*. Η διορθωτική διατμητική ροή είναι q^c.



Εικόνα 5.35: Αρχική και διορθωτική διατμητική ροή

Για το s_1

$$m=0+\int_0^{s_1} y\ t\ \ ds \Rightarrow m=0+\int_0^{s_1}(10-5.48)\cdot 0.03\ \ ds \Rightarrow m=0.1357\ s_1$$

$$m_{s_1}=1.357\,m^2 \tag{5.7}$$

Για το s_2

$$m=1.357+\int_0^{s_2} y\ t\ \ ds \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m=1.357+\int_0^{s_2}(4.52\cdot s_2-s_2^2/2)\cdot 0.03\ \ ds \Rightarrow m=1.357+0.1357\,s_2-0.015\,s_2^2 \tag{5.8}$$

$$m_{s_2}=1.658\,m^2$$

Για το s_3

$$m = 0 + \int_0^{s_3} y\ t\ \ ds \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m = \int_0^{s_3} 0.03 \cdot (4.52\, s_3 - s_3^2 / 2\sqrt{2})\ \ ds \Rightarrow m = 0.1357\, s_3 - 0.0106\, s_3^2 \tag{5.9}$$

$$m_{s_3} = 0.428\, m^2$$

Για το s_4

$$m = 0.428 + 1.658 + \int_0^{s_4} y\ t\ \ ds \Rightarrow$$

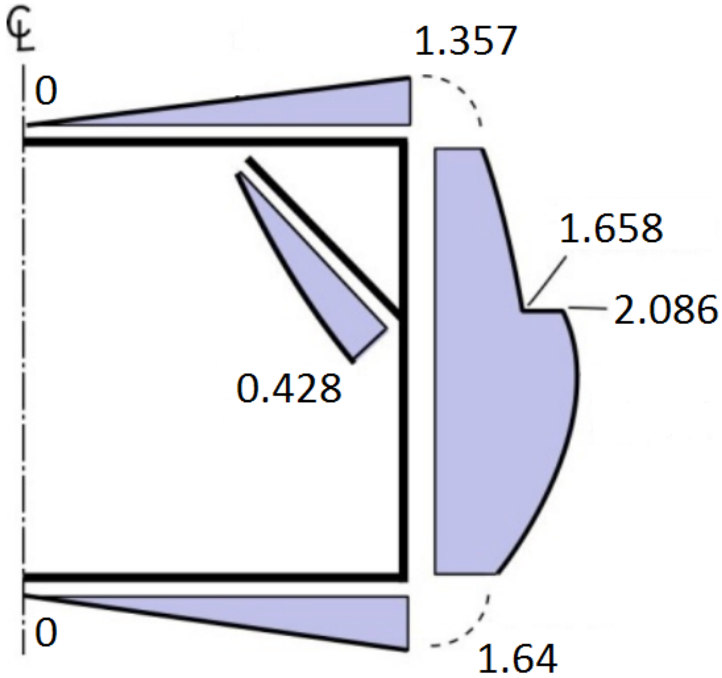
$$\Rightarrow m = 2.086 + \int_0^{s_4} (0.52 \cdot s_4 - s_4^2/2) \cdot 0.03\ \ ds \Rightarrow m = 2.086 + 0.0156\, s_4 - 0.015\, s_4^2 \tag{5.10}$$

$$m_{s_4} = 2.09\, m^2$$

Για το s_5

$$m = 1.64 + \int_0^{s_5} y\ t\ \ ds \Rightarrow m = 1.64 - \int_0^{s_5} 5.48 \cdot 0.03\ \ ds \Rightarrow m = 1.64 - 0.164\ s_5$$

$$m_{s_5} = 0\, m^2 \tag{5.11}$$



*Εικόνα 5.36: Τιμές των στατικών ροπών της αρχικής κατανομής q**

Τώρα μπορούμε να υπολογίσουμε τη διορθωτική διατμητική ροή

$$q^c = \frac{-\oint \frac{q*}{t} ds}{\oint \frac{1}{t} ds} \underset{t=const.}{\Rightarrow} q^c = \frac{-\oint q* ds}{S} \tag{5.12}$$

όπου $S = 8 + 4\sqrt{2}$ η περίμετρος της κλειστής διατομής.

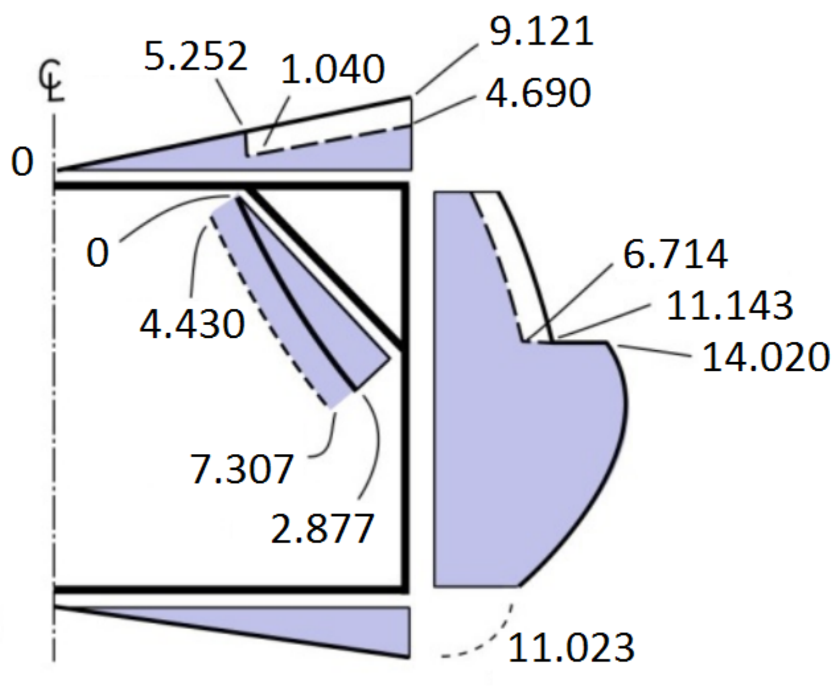
Εν τέλει από τον ορισμό της διατμητικής ροής παίρνουμε

$$q^c = \frac{-Q}{I \cdot S} \oint m* ds = -0.4922 \oint m* ds \tag{5.13}$$

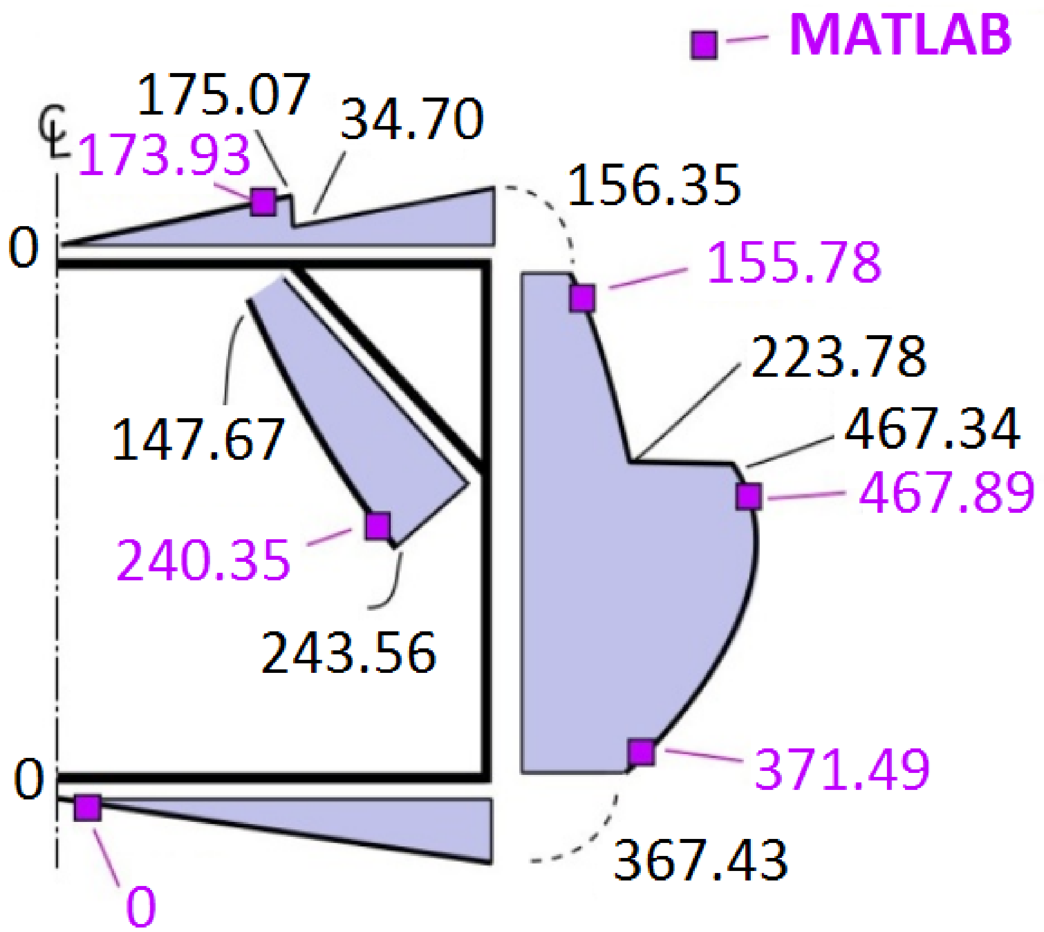
όπου

$$\begin{gathered} \oint m* ds = \\ = \int_0^4 (0.814 + 0.1357 s) ds + \int_0^4 (1.357 + 0.03(4.52 s - s^2/2)) ds + \\ - \int_0^{4\sqrt{2}} (0.1357 s - 0.0106 s^2) ds = \\ = 4.34 + 6.188 - 1.53 = 9.00 \, m^3 \end{gathered} \tag{5.14}$$

Επομένως μπορούμε να υπολογίσουμε το $q^c = -4.430 \; tn/m$.



Εικόνα 5.37: Τιμές της διατμητικής ροής πριν και μετά τη διόρθωση της κλειστής διατομής (tn/m)



Εικόνα 5.38: Σύγκριση διατμητικών τάσεων αναλυτικού υπολογισμού και κώδικα MATLAB (tn/m^2)

6

Επίλογος

Αφού μελετήσαμε τη βασική θεωρία της κάμψης κι επιλύσαμε τα γεωμετρικά και υπολογιστικά προβλήματα είδαμε την επίδραση του καταστρώματος και των φρακτών στην αντοχή του πλοίου.

6.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Η ύπαρξη του καταστρώματος βελτιώνει σημαντικά την διαμήκη αντοχή του πλοίου, όχι μόνο μειώνοντας τις κύριες τάσεις κατά μέτρο αλλά και διαφοροποιώντας την κατανομή τους. Οι φρακτές δημιουργούν μια ανοιμοιομορφία στην κατανομή των διατμητικών τάσεων ενώ δεν επηρεάζουν άμεσα τις ορθές τάσεις.

Η εφαρμογή της μελέτης των κύριων τάσεων στη γάστρα του πλοίου φανερώνει πόσο σημαντική είναι η ασφαλής προεκτίμηση τόσο του μεγέθους των τάσεων όσο και της κατανομής τους με έναν αυτοματοποιημένο τρόπο. Βελτιώνει το χρόνο και την ποιότητα της προμελέτης. Αναδεικνύει γρήγορα τις περιοχές σε υψηλή επικινδυνότητα και δίνει τη δυνατότητα μέσω γρήγορων αλλαγών στη σχεδίαση να εκτιμάται η νέα κατανομή των κύριων τάσεων.

6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Στη μελέτη μας φανερώθηκαν διάφορα προβλήματα που δεν επιλύθηκαν επαρκώς.

Πρέπει

- να γίνει η αναγνώριση της γεωμετρίας πολυκυψελικών διατομών και η επίλυσή τους. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό για όλους τους τύπους πλοίων.
- να υπολογιστεί η κατανομή των τάσεων με τη προσθήκη του φαινομένου της υστέρησης διάτμησης. Αυτό θα αλλάξει την εικόνα των τάσεων ειδικά σε διαμήκη ενισχυτικά και σε καταστρώματα.
- να προεκταθεί ο ακριβής υπολογισμός σε περιοχές προς τα άκρα του πλοίου με χρήση βελτιωμένων θεωριών.
- να προστεθεί διαδικασία υπολογισμού των υπερκατασκευών.
- να γίνει αναπαράσταση τη γεωμετρίας του πλοίου με συνεχή τρόπο και χωρίς μεγάλες καθυστερήσεις κατά την περιστροφή του μοντέλου.
- να προστεθεί τοπική καταπόνηση της κατασκευής του πλοίου (π.χ. από ένα βάρος ή από την πίεση της θάλασσας).
- να βελτιωθούν οι ασυνέχειες από την απλή θεωρία της κάμψης.

7

Βιβλιογραφία

1. Μυλωνάς, Κ., *Μηχανική Παραμορφωτών Σωμάτων Ι* 3η έκδ., ΕΜΠ, 1985
2. Gere, J. M, and Timoshenko, S. P., *Mechanics of Materials* 3η έκδ, Springer, 1991
3. Edward, V. L, *Principles of Naval Architecture: Vol. I,* SNAME, 1988
4. Hughes, O. F., and Paik, J. K. *Ship Structural Analysis and Design,* SNAME, 2010
5. Hovgaard, W. *Structural Design of Warships,* E. & F. N. Spon, Ltd., 1915
6. Timoshenko, S. P., and Goodier, J. N., *Theory of Elasticity,* Mc-Graw Hill, 1951
7. Σαμουηλίδης, Μ., *Σημειώσεις Αντοχής Πλοίου,* ΕΜΠ, 2011
8. Ευταξιόπουλος, Δ., *Ελαστικότητα,* Αθήνα, 2014
9. Τζαμπίρας, Γ., *Υδροστατική κι Ευστάθεια Πλοίου,* ΕΜΠ, 2015
10. Ξενοφώντος, Χ., *Οδηγός MATLAB για Αρχάριους,* Πανεπιστήμιο Κύπρου, 2015
11. Αράβας, Ν., *Εγχειρίδιο χρήσης του εκπαιδευτικού λογισμικού ABAQUS,* Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2001

12. Coetzee, E., *Ρουτίνα STL_Import,* https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/32210-dynamical-systems-toolbox/content/dynasys/toolbox/dynasys/utils/flightviz/private/drawModel/F100geom/STL_Import.m

13. Ozturk, M., *Ρουτίνα IntersectPlaneSurf II,* https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/32256-intersectplanesurf-ii

14. D' Erriko, J., *Ρουτίνα interparc,* *https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/34874-interparc*

15. Harvey, J. H., *Ship Structural Design Concepts: Second Cycle, C*ornell Maritime Pr/Tidewater Pub, 1983

8

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: MANUAL

Δομή Κώδικα MATLAB

0. Αρχικοποίηση
1. Φάση προκαταρκτικών υπολογισμών
    1.1. Ενότητα ανακαθορισμού γεωμετρικής αναπαράστασης
    1.2. Ενότητα γεωμετρικής επεξεργασίας και αναγνώρισης
    1.3. Ενότητα υδροστατικών υπολογισμών
2. Φάση υπολογισμών χαρακτηριστικών νομέα
3. Φάση υπολογισμών τάσεων
4. Φάση υπολογισμών εξόδου και εκτύπωσης

Ο κώδικας του προγράμματος MATLAB έχει δομηθεί σε τρεις (3) κύριες φάσεις υπολογισμών με ένα κομμάτι αρχικοποίησης των μεταβλητών στην αρχή. Η πρώτη φάση χωρίζεται σε τρεις υποενότητες υπολογισμού.

Ο κώδικας δημιουργήθηκε με σκοπό να υπολογίζει τις ορθές τάσεις, τις διατμητικές τάσεις, τις μέγιστες και ελάχιστες κύριες τάσεις, τις μέγιστες διατμητικές τάσεις και τις τάσεις Von Mises σε ήρεμο νερό έχοντας ως είσοδο τη γεωμετρία του πλοίου σε μορφή αρχείου .stl και την κατανομή βάρους κατά μήκος σε μορφή αρχείου .xlsx. Στο τέλος υπολογίζει και παράγει τα τριδιάστατα διαγράμματα της κατανομής των τάσεων (συνεχή ή διακριτοποιημένη) και τα διδιάστατα διαγράμματα των ισοτασικών καμπυλών στο επίπεδο x-z.

Παρακάτω θα αναλύσουμε με τη σειρά εντολών τη λειτουργία του προγράμματος. Στην πρώτη στήλη αναγράφεται ο αριθμός της σειράς, στη δεύτερη η γραμμή εντολών και στην τρίτη η λειτουργία της.

	Εντολή	**Επεξήγηση**
1	clear all	Καθαρισμός όλων των μεταβλητών από την προσωρινή μνήμη.
2	close all	Κλείσιμο όλων των ανοικτών διαγραμμάτων.
3	clc	Καθαρισμός της περιοχής εξόδου των αποτελεσμάτων.
4	%C H A R A C T E R I S T I C S	
5	disp('Initialising...')	

6	[ship,Tri,tnorm]=STL_Import('tribon2.stl',1);	Εισαγωγή αρχείου γεωμετρίας. Το αρχείο πρέπει να είναι της μορφής .stl και να βρίσκεται στον ίδιο φάκελο με το πρόγραμμα. Η εισαγωγή γίνεται με την εντολή STL_Import('αρχείο_γεωμετρίας.stl',1). Ο πίνακας ship περιέχει όλα τα σημεία του πλοίου, ο πίνακας Tri τις αναφορές στα σημεία των τριγώνων από τον πίνακα ship και ο πίνακας tnorm περιέχει τις συντεταγμένες των κάθετων διανυσμάτων των τριγώνων. ΠΡΟΣΟΧΗ! Η γεωμετρία εισαγωγής περιλαμβάνει μόνο τη πλευρά starboard του πλοίου καθώς προϋποθέτουμε τη

		συμμετρικότητα της γεωμετρίας.
7	weight=xlsread('full.xlsx');	Εισαγωγή αρχείου κατανομής βάρους του πλοίου. Γίνεται με την εντολή xlsread('αρχείο_κατανομής_βάρους.xlsx') και το αρχείο πρέπει να βρίσκεται στον ίδιο φάκελο με το κύριο πρόγραμμα. ΠΡΟΣΟΧΗ! Η κατανομή βάρους πρέπει να περιέχει στην πρώτη στήλη τη διαμήκη θέση (x) σε μέτρα και στη δεύτερη

		στήλη το βάρος σε αυτή τη θέση. Το βάρος αφορά ΟΛΟΚΛΗΡΟ το πλοίο και όχι το μισό!
8	X=ship(:,1)';	Διαμήκης θέση των σημείων του πλοίου.
9	Y=ship(:,2)';	Εγκάρσια θέση των σημείων του πλοίου.
10	Z=ship(:,3)';	Κατακόρυφη θέση των σημείων του πλοίου.
11	L=max(X(:))-min(X(:)); %beam length	Υπολογισμός μήκους.
12	D=max(Z(:))-min(Z(:)); %beam draft	Υπολογισμός κοίλου.
13	B=max(Y(:))-min(Y(:)); %beam breadth	Υπολογισμός ημιπλάτους.
14	t=0.01; %plate thickness	Εισαγωγή μέσου πάχους ελασμάτων και ενισχυτικών σε μέτρα.
15	RF=500; %resolution factor (sections)	Αριθμός εγκάρσιων τομών υπολογισμού για το πρόγραμμα. Ενδείκνυνται τιμές μεταξύ 200-500. Ο παράγοντας αυτός επηρεάζει έντονα την

		ταχύτητα υπολογισμού. Μικρότερες τιμές από τις προβλεπόμενες έχουν σαν αποτέλεσμα μεγάλα σφάλματα και κακής ποιότητας γεωμετρική αναπαράσταση.
16	num=1000; %resolution factor (section segments)	Αριθμός τμημάτων των εγκάρσιων τομών. Ενδείκνυνται τιμές μεταξύ 100-1000. Ο παράγοντας αυτός επηρεάζει έντονα την ταχύτητα υπολογισμού. Μικρότερες τιμές από τις προβλεπόμενες έχουν σαν αποτέλεσμα μεγάλα σφάλματα και κακής ποιότητας γεωμετρική αναπαράσταση.
17	pstep=1; %Plot step	Βήμα εκτύπωσης των εγκάρσιων τομών. Ενδείκνυται η τιμή αυτή να είναι 1 και να

		μην αλλάζει.
18	%1: Maximum Principal | 2: Minimum Principal | 3: Tmax | 4: Shear	
19	%5: Normal | 6: Von Mises | 7: σ1-σχ | 8: σ2-σχ | 9: Von Mises-σχ	
20	plvn=4;	Είδος τάσεων προς εκτύπωση. Οι αριθμοί περιγράφονται στα παραπάνω σχόλια. Ισχύει μόνο για την περίπτωση χειροκίνητης λειτουργίας (“manu”) που περιγράφεται παρακάτω.
21	plotopt=3; %1: Plot 3D Contour | 2: Plot 2D Isocurves | 3: Plot Continuous	Είδος διαγραμμάτων προς εκτύπωση. Οι αριθμοί περιγράφονται στα σχόλια. Ισχύει μόνο για την περίπτωση χειροκίνητης λειτουργίας (“manu”) που περιγράφεται παρακάτω.
22	sectnum=250; %section of great interest	Αριθμός τομής για διδιάστατη εκτύπωση.

		Πρέπει να είναι μικρότερος από τον συνολικό αριθμό τομών (RF) που περιγράφηκε παραπάνω.
23	mode='manu'; %'auto' for all diagrams |'manu' for selected	Χειροκίνητη για την παραγωγή ενός είδους τάσεων και διαγράμματος ή αυτόματη λειτουργία για την παραγωγή όλων.
24	secflag=0; %0: plot entire ship | 1,2: plot bulkhead 1 or 2 (only for mode='manu')	Επιλογή για την εκτύπωση στοχευμένων τριδιάστατων διαγραμμάτων σε δύο τομές (μόνο για την χειροκίνητη λειτουργία) ή για όλο το πλοίο.
25	blkpos(1)=51.45; %Longitudinal position of bulkhead 1 from AP	Θέση τομής 1 σε μέτρα κατά το διάμηκες από το πρυμναίο ακρο.
26	blkpos(2)=99.15; %Longitudinal position of bulkhead 2 from AP	Θέση τομής 2 σε μέτρα κατά το διάμηκες από το πρυμναίο ακρο.
27	%--	

28	x=linspace(min(X(:))+L*10^-6,max(X(:))-L*10^-6,RF);	Διαμήκης απόσταση των τομών από το πρυμναίο άκρο διορθωμένη για να μην υπάρχουν τομές με ένα μόνο σημείο στην πλώρη και την πρύμνη.
29	Wd=-interp1(weight(:,1),weight(:,2),x,'pchip'); %weight distribution calculations	Υπολογισμός βάρους στα σημεία των τομών κατά το διάμηκες.
30	W=simps(x,abs(Wd));	Υπολογισμός συνολικού βάρους.
31	LCG=simps(x,x.*abs(Wd))/W;	Υπολογισμός διαμήκους κέντρου βάρους (από το πρυμναίο άκρο)
32		
33	fv.faces=Tri;	
34	fv.vertices=ship;	
35	v=[1 0 0];	Διάνυσμα διεύθυνσης εγκάρσιων τομών
36	%--- -----------	
37		
38	perc=['Phase 1.1/3:']; %percentage of completion (%)	Φάση 1η, ενότητα 1η: ανακαθορίζεται η γεωμετρία για να είναι δυνατός ο έλεγχος της

	ακρίβειας των υπολογισμών και η προσαρμογή στις απαιτήσεις και τις συνθήκες υπολογισμού.
disp(perc)	
sect=cell(RF,1);	
sectemp=cell(RF,1);	
parfor_progress(RF);	
parfor ii=1:RF	
p0=[x(ii) 0 0];	Συντεταγμένες ενός σημείου για την εγκάρσια τομή
temp=intersectPlaneSurf(fv,p0,v);	Τομή εγκάρσιου επιπέδου με τη γεωμετρία του αρχείου εισόδου με σκοπό την παραγωγή μιας διδιάστατης καμπύλης νομέα σε τριδιάστατες συντεταγμένες.
NOC(ii)=size(temp,2);	Αριθμός παραγόμενων καμπυλών σε κάθε τομή.
for kk=1:NOC(ii)	
temp1=temp{1,kk};	
temp2=unique(temp1','rows','stable');	
if temp1(3,1)>temp1(3,end)	Έλεγχος κατεύθυνσης

temp1=fliplr(temp1);	
elseif temp1(3,1)==temp1(3,end) && temp1(3,2)>temp1(3,end-1)	
temp1=fliplr(temp1);	της καμπύλης.
elseif temp1(3,1)==temp1(3,end) && temp1(2,1)>temp1(2,end)	
temp1=fliplr(temp1);	
end %curve direction fix	
ccflag{ii}{kk}=0;	Μεταβλητή που δείχνει αν μια καμπύλη είναι κλειστή.
if length(temp2)~=length(temp1');ccflag{ii}{kk}=1;end	
method='linear';	
sectemp{ii}=temp1;	
points=interparc(num,sectemp{ii}(2,:),sectemp{ii}(3,:),method);	Ισοδιαμέριση της καμπύλης σε τμήματα ίσου μήκους με αριθμό ίσο με το num.
pointx=ones([length(points) 1])*sectemp{ii}(1,1);	
sect{ii}{kk}=round([pointx'; points'],3);	Στρογγυλοποίηση των συντεταγμένων των σημείων των καμπυλών σε τρία δεκαδικά ψηφία.
end	
parfor_progress;	
end	
parfor_progress(0);	Τέλος ενότητας 1.1
sc=cell(RF,max(NOC(:)));	

69	disp('Phase 1.2/3:')	Φάση 1η, ενότητα 2η: αναγνώριση διάφορων γεωμετρικών ιδιοτήτων όπως π.χ. τομών των καμπυλών για κάθε διαμήκη θέση και υπολογισμός διάφορων γεωμετρικών ιδιοτήτων τους.
70	parfor_progress(RF);	
71	for ii=1:RF	
72	for kk=1:NOC(ii)	Υπολογισμός περιγεγραμμένου ορθογωνίου της καμπύλης και της επιφάνειάς του.
73	sc{ii,kk}=sect{ii,1}{1,kk};	
74	bordersmin{ii,kk}=[min(sc{ii,kk}(2,:)) min(sc{ii,kk}(3,:))];	
75	bordersmax{ii,kk}=[max(sc{ii,kk}(2,:)) max(sc{ii,kk}(3,:))];	
76	artemp(ii,kk)=diff([min(sc{ii,kk}(2,:)) max(sc{ii,kk}(2,:))])*diff([min(sc{ii,kk}(3,:)) max(sc{ii,kk}(3,:))]);	
77	end	
78	[C,imax]=max(abs(artemp(ii,:)));	
79	mainc(ii)=imax;	Ορισμός κύριας καμπύλης με βάση το μέγιστο εμβαδόν περιγεγραμμένης επιφάνειας ορθογωνίου.
80	slavec(ii)=0;	
81	cc=0;	
82	for kk=1:NOC(ii)	

<table>
<tr><td>83</td><td>for jj=1:length(sc{ii,imax}(2,:))</td><td></td></tr>
<tr><td>84</td><td>%minimum distances between curves and their points</td><td></td></tr>
<tr><td>85</td><td>[disto(ii,jj,kk),cptso(ii,jj,kk)]=min(abs(complex(sc{ii,imax}(2,jj)-sc{ii,kk}(2,:),sc{ii,imax}(3,jj)-sc{ii,kk}(3,:))));</td><td>Εύρεση ελάχιστων αποστάσεων μεταξύ των καμπυλών και των άκρων της πάνω στις καμπύλες.</td></tr>
<tr><td>86</td><td>end</td><td></td></tr>
<tr><td>87</td><td>intcount(ii,kk)=sum(disto(ii,:,kk)<(10/num)); %curve intersection counter</td><td>Αριθμός κοινών σημείων των καμπυλών.</td></tr>
<tr><td>88</td><td>if intcount(ii,kk)==0 || intcount(ii,kk)==1</td><td></td></tr>
<tr><td>89</td><td>[mdisto(ii,kk), maincint(ii,kk)]=min(disto(ii,:,kk));</td><td>Ορισμός σημείου ελάχιστης απόστασης κύριας καμπύλης.</td></tr>
<tr><td>90</td><td>seccint(ii,kk)=cptso(ii,maincint(ii,kk),kk);</td><td>Ορισμός σημείου ελάχιστης απόστασης δευτερεύουσας καμπύλης.</td></tr>
<tr><td>91</td><td>elseif intcount(ii,kk)==2</td><td></td></tr>
<tr><td>92</td><td>maininters{ii,kk}=find(disto(ii,:,kk)<10/num);</td><td></td></tr>
<tr><td>93</td><td>sc{ii,kk}=fliplr(sc{ii,kk});</td><td></td></tr>
<tr><td>94</td><td>end</td><td></td></tr>
<tr><td>95</td><td>CLF{ii,kk}=sqrt(diff(sc{ii,kk}(2,:)).^2+diff(sc{ii,kk}(3,:)).^2);</td><td>Μήκος στοιχειώδους τμήματος καμπύλης.</td></tr>
<tr><td>96</td><td>CLF{ii,kk}(end+1)=CLF{ii,kk}(end);</td><td></td></tr>
<tr><td>97</td><td>CGCLF{ii,kk}=sc{ii,kk}(3,1:end-1)+diff(sc{ii,kk}(3,:))/2;</td><td>Κέντρο βάρους στοιχειώδους τμήματος</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td></td><td></td><td>καμπύλης από τη baseline.</td></tr>
<tr><td>98</td><td>CGCLF{ii,kk}(end+1)=CGCLF{ii,kk}(end);</td><td></td></tr>
<tr><td>99</td><td>area(ii,kk)=t*sum(CLF{ii,kk});</td><td>Περικλειόμενο από την καμπύλη του νομέα εμβαδόν.</td></tr>
<tr><td>100</td><td>zcc(ii,kk)=t*sum(CGCLF{ii,kk}.*CLF{ii,kk})/area(ii,kk);</td><td>Κέντρο βάρους της κάθε καμπύλης σε κάθε διαμήκη θέση.</td></tr>
<tr><td>101</td><td>quiv{ii,kk}=complex(diff(sc{ii,kk}(2,:)),diff(sc{ii,kk}(3,:)))./abs(complex(diff(sc{ii,kk}(2,:)),diff(sc{ii,kk}(3,:))));</td><td>Εφαπτόμενο διάνυσμα σε κάθε σημείο της καμπύλης.</td></tr>
<tr><td>102</td><td>quiv{ii,kk}(end+1)=quiv{ii,kk}(end);</td><td></td></tr>
<tr><td>103</td><td>quiv2{ii,kk}=quiv{ii,kk}*exp(j*(-pi/2));</td><td>Κάθετο διάνυσμα σε κάθε σημείο της καμπύλης.</td></tr>
<tr><td>104</td><td>alpha{ii,kk}=angle(quiv2{ii,kk});</td><td>Γωνία του κάθετου διανύσματος της καμπύλης.</td></tr>
<tr><td>105</td><td>alpha{ii,kk}(1)=alpha{ii,kk}(2);</td><td></td></tr>
<tr><td>106</td><td>outoformain(ii,kk)=0;</td><td>Δείκτης που δηλώνει αν μια καμπύλη δεν βρίσκεται εντός της κύριας.</td></tr>
<tr><td>107</td><td>if (min(sc{ii,kk}(2,:))<=min(sc{ii,imax}(2,:)) || min(sc{ii,kk}(3,:))<=min(sc{ii,imax}(3,:)) || max(sc{ii,kk}(2,:))>=max(sc{ii,imax}(2,:)) || max(sc{ii,kk}(3,:))>=max(sc{ii,imax}(3,:)))</td><td></td></tr>
<tr><td>108</td><td>cc=cc+1;</td><td></td></tr>
</table>

skin{ii,cc}=sc{ii,kk}; %outer region of the hull;	Ορισμός των καμπυλών που διαβρέχονται από τη θάλασσα, αν αυτές είναι εξωτερικές της κύριας.
outoformain(ii,kk)=1;	
if slavec(ii)==0	Ορισμός της δευτερεύουσας εξωτερικής καμπύλης, αν υπάρχει.
slavec(ii)=mainc(ii);	
end	
if kk~=mainc(ii)	
slavec(ii)=kk;	
end	
elseif sum(sc{ii,kk}(2,:)==max(sc{ii,kk}(2,:)))>1	
cc=cc+1;	
skin{ii,cc}(1,:)=sc{ii,kk}(1,sc{ii,kk}(2,:)==max(sc{ii,kk}(2,:)));	Ορισμός των καμπυλών που διαβρέχονται από τη θάλασσα, αν αυτές δεν είναι εξωτερικές της κύριας (π.χ. μπορεί ένα τμήμα τους να θεωρηθεί εσωτερικό κι ένα άλλο ότι ανήκει στην κύρια αλλά παρόλα αυτά αποτελεί μια καμπύλη)
skin{ii,cc}(2,:)=sc{ii,kk}(2,sc{ii,kk}(2,:)==max(sc{ii,kk}(2,:)));	
skin{ii,cc}(3,:)=sc{ii,kk}(3,sc{ii,kk}(2,:)==max(sc{ii,kk}(2,:)));	
end	
end	

zcu(ii)=sum(zcc(ii,:).*area(ii,:))/sum(area(ii,:)); %universal neutral axis	Κατακόρυφη απόσταση του κέντρου βάρους του νομέα που περιλαμβάνει όλες τις καμπύλες σε κάθε διαμήκη θέση.
NOOBC(ii)=cc;	Αριθμός καμπυλών που διαβρέχονται από θάλασσα σε κάθε διαμήκη θέση.
parfor_progress;	
end	
parfor_progress(0);	Τέλος ενότητας 1.2
%---	
perc=['Phase 1.3/3: Please wait...']; %percentage of completion (%)	Φάση 1η, ενότητα 3η: υπολογισμός της διαμήκους κλίσης του πλοίου, της κατανομής του βυθίσματος και της καμπύλης άντωσης.
disp(perc)	
for kk=1:10	
T(kk)=kk*D/10;	Ορισμός πίνακα αρχικών βυθισμάτων σε ισοβύθιστη κατάσταση για κάθε 1/10 του κοίλου.

135	for ii=1:RF	
136	Volo(ii)=0;	
137	for jj=1:NOOBC(ii);	
138	tmp(ii,jj)=0;	
139	if min(skin{ii,jj}(3,:))<=T(kk)	
140	idx=skin{ii,jj}(3,:)<=T(kk);	
141	y=skin{ii,jj}(2,idx);	Ορισμός συντεταγμένων διατρεχόμενων σημείων μέχρι το εκάστοτε βύθισμα.
142	z=skin{ii,jj}(3,idx);	
143	if isempty(find(idx==0,1))==0	
144	y(end+1)=interp1([z(end) skin{ii,jj}(3,find(idx==0,1))], [y(end) skin{ii,jj}(2,find(idx==0,1))],T(kk));	Υπολογισμός τελευταίου προς τα πάνω σημείου με γραμμική παρεμβολή στο εκάστοτε βύθισμα.
145	z(end+1)=T(kk);	
146	end	
147	if (length(y)>1); tmp(ii,jj)=2*abs(trapz(z,y)); end	Υπολογισμός ολοκληρώματος της διαβρεχόμενης καμπύλης.
148	end	
149	end	
150	Volo(ii,kk)=sum(tmp(ii,:));	Συνολική επιφάνεια νομέα για κάθε βύθισμα σε κάθε διαμήκη θέση.

151	end	
152	Volume(kk)=simps(x,Volo(:,kk));	Ολικός βυθισμένος όγκος για κάθε βύθισμα.
153	end	
154	[Volume1,ia,ic]=unique(Volume);	
155	T1=T(ia);	
156	To=interp1(Volume1,T1,W/1.025,'pchip');	Υπολογισμός βυθίσματος για το δεδομένο βάρος σε ισοβύθιστη κατάσταση.
157	clear Volume Volume1 ia	
158	clear T T1	
159	for ii=1:RF	
160	Vol(ii)=0;	
161	for jj=1:NOOBC(ii);	
162	tmp(ii,jj)=0;	
163	wp(ii,jj)=0;	
164	if min(skin{ii,jj}(3,:))<=To	
165	idx=skin{ii,jj}(3,:)<=To;	
166	y=skin{ii,jj}(2,idx);	
167	z=skin{ii,jj}(3,idx);	
168	if isempty(find(idx==0,1))==0	
169	y(end+1)=interp1([z(end) skin{ii,jj}(3,find(idx==0,1))], [y(end) skin{ii,jj}(2,find(idx==0,1))],To);	
170	z(end+1)=To;	
171	end	
172	if (length(y)>1); tmp(ii,jj)=2*abs(trapz(z,y)); end	
173	wp(ii,jj)=y(end);	
174	end	

end	
Vol(ii)=sum(tmp(ii,:));	Υπολογισμός επιφανειών βυθισμένων νομέων για την ισοβύθιστη κατάσταση.
ywp(ii)=max(wp(ii,:));	Υπολογισμός σημείων της ισάλου στην ισοβύθιστη κατάσταση.
end	
ywp(isnan(ywp))=0;	
WPA=2*simps(x,ywp);	Υπολογισμός εμβαδού ισάλου στην ισοβύθιστη κατάσταση.
LCF=2*simps(x,x.*ywp)/WPA;	Διαμήκης απόσταση από το πρυμναίο άκρο του κέντρου πλευστότητας.
IyyF=2*simps(x,x.^2.*ywp)-WPA*LCF^2;	Υπολογισμός ροπής αδράνειας ισάλου στην ισοβύθιστη κατάσταση.
clear ywp	
LCB=simps(x,x.*Vol)/simps(x,Vol);	Υπολογισμούς διαμήκους θέσης του κέντρου άντωσης στην ισοβύθιστη κατάσταση.
tantheta=-W*(LCG-LCB)/(1.025*IyyF);	Αρχική γωνία διαμήκους κλίσης.

188	TCF=To;	Ορισμός βυθίσματος κέντρου πλευστότητας ως το βύθισμα της ισοβύθιστης κατάστασης.
189	TF=TCF-(L/2-(LCF-L/2))*tantheta;	Υπολογισμός πρωραίου βυθίσματος.
190	TA=TCF+(L/2+(LCF-L/2))*tantheta;	Υπολογισμός πρυμναίου βυθίσματος.
191	T=interp1([min(X(:)) max(X(:))],[TA TF],x);	Βύθισμα σε κάθε διαμήκη θέση.
192	cr(1:RF)=0;	
193	for ii=1:RF	
194	Vol1(ii)=0;	
195	for jj=1:NOOBC(ii);	
196	tmp(ii,jj)=0;	
197	wp(ii,jj)=0;	
198	if min(skin{ii,jj}(3,:))<=T(ii)	
199	idx=skin{ii,jj}(3,:)<=T(ii);	
200	y=skin{ii,jj}(2,idx);	
201	z=skin{ii,jj}(3,idx);	
202	if isempty(find(idx==0,1))==0	
203	y(end+1)=interp1([z(end) skin{ii,jj}(3,find(idx==0,1))], [y(end) skin{ii,jj}(2,find(idx==0,1))],T(ii));	
204	z(end+1)=T(ii);	
205	end	
206	if (length(y)>1); tmp(ii,jj)=2*abs(trapz(z,y)); end	
207	wp(ii,jj)=y(end);	
208	end	
209	end	

Vol1(ii)=sum(tmp(ii,:));	Υπολογισμός βυθισμένων νομέων για την αρχική διαμήκη κλίση.
ywp(ii)=max(wp(ii,:));	Υπολογισμός καμπύλης ισάλου επιφανείας για την αρχική διαμήκη κλίση.
end	
Volume1=simps(x,Vol1);	Συνολικός βυθισμένος όγκος για την αρχική κλίση.
LCB=simps(x,x.*Vol1)/Volume1;	Διαμήκης απόσταση από το πρυμναίο άκρο του κέντρου άντωσης για την αρχική κλίση.
ywp(isnan(ywp))=0;	
WPA=2*simps(x,ywp); %WPA for trim	Εμβαδόν επιφάνειας ισάλου για την αρχική κλίση.
LCF=2*simps(x,x.*ywp)/WPA;	Διαμήκης απόσταση από το πρυμναίο άκρο του κέντρου πλευστότητας για την αρχική κλίση.
IyyF=2*simps(x,x.^2.*ywp)-WPA*LCF^2;	Υπολογισμός ροπής αδράνειας ισάλου για την αρχική κλίση.

220	while (abs(W/1.025-Volume1)>0.001 | abs(LCB-LCG)>0.001)	Διόρθωση των υδροστατικών μεγεθών ώστε η διαφορά του υπολογιζόμενου και του πραγματικού βυθισμένου όγκου να είναι μικρότερη από 0.001 κυβικά μέτρα και η διαφορά του διαμήκους κέντρου άντωσης από το διάμηκες κέντρο πλευστότητας να είναι μικρότερη από 0.001 μέτρα.
221	tan=-W*(LCG-LCB)/(1.025*IyyF);	Διόρθωση διαμήκους κλίσης.
222	TFF=(W/1.025-Volume1)/WPA-(L/2-(LCF-L/2))*tan;	Διόρθωση κατανομής βυθίσματος.
223	TAA=(W/1.025-Volume1)/WPA+(L/2+(LCF-L/2))*tan;	
224	TT=interp1([min(X(:)) max(X(:))],[TAA TFF],x);	
225	T=T+TT;	
226	TA=T(1);	
227	TF=T(end);	
228	TCF=TCF+(W/1.025-Volume1)/WPA;	
229	cr=2*ywp.*TT;	
230	cr(isnan(cr))=0;	
231	Vol1(:)=Vol1(:)+cr(:);	Διόρθωση κατανομής άντωσης.
232	Volume1=simps(x,Vol1);	Διορθωση βυθισμένου

		όγκου.
233	LCB=simps(x,x.*Vol1)/Volume1;	Διόρθωση διαμήκους κέντρου άντωσης.
234	end	
235		
236	Bu=Vol1*1.025;	
237	P=Wd+Bu;	Υπολογισμός κατανομής φόρτισης ως άθροισμα του βάρους και της άντωσης.
238	V1(1)=0;	
239	M(1)=0;	
240	for ii=2:RF	
241	V1(ii)=-simps(x(1:ii),P(1:ii)); %(-) towards bottom	Υπολογισμός διατμητικών δυνάμεων σε κάθε θέση κατά το διάμηκες με ολοκλήρωση simpson της φόρτισης.
242	end	
243	for ii=2:RF	
244	M1(ii)=simps(x(1:ii),V1(1:ii));	Υπολογισμός καμπτικών ροπών σε κάθε θέση κατά το διάμηκες με ολοκλήρωση simpson της κατανομής των διατμητικών δυνάμεων.

end	
V=V1-V1(end)/L*x;	Διόρθωση διατμητικών δυνάμεων ώστε να είναι μηδενικές στο πρωραίο άκρο.
M=M1-M1(end)/L*x;	Διόρθωση καμπτικών ροπών ώστε να είναι μηδενικές στο πρωραίο άκρο.
disp(['Shear error: ',num2str(100*V1(end)/max(abs(V1(:)))),'%'])	
disp(['Moment error: ',num2str(100*M1(end)/max(abs(M1(:)))),'%'])	
%---	Τέλος ενότητας 1.3. Τέλος Φάσης 1.
perc=['Phase 2/3: ']; %percentage of completion (%)	Φάση 2η: Υπολογισμός χαρακτηριστικών των καμπυλών των νομέων και της διατμητικής ροής.
disp(perc)	
parfor_progress(RF);	
for ii=1:RF	
for kk=1:NOC(ii)	
I(ii,kk)=0;	
endc(ii,kk)=length(CLF{ii,kk});	

260	sc{ii,kk}(3,:)=sc{ii,kk}(3,:)-zcu(ii);	Μεταφορά συστήματος συντεταγμένων για τις συντεταγμένες των νομέων στο κέντρο βάρους της καμπύλης του νομέα.
261		
262	for jj=1:endc(ii,kk)	
263	s{ii,kk}(jj)=trapz(CLF{ii,kk}(1:jj));	Υπολογισμός συνάρτησης μήκους καμπύλης νομέα.
264	end	
265		
266	CGCLF{ii,kk}=CGCLF{ii,kk}-zcu(ii);	Μεταφορά συστήματος συντεταγμένων για τα κέντρα βάρους στοιχειωδών τμημάτων της καμπύλης νομέα στο κέντρο βάρους του νομέα.
267	if sum(intcount(ii,:))==length(sc{ii,mainc(ii)});CGCLF{ii,kk}=CGCLF{ii,kk}+zcu(ii)-zcc(ii,kk);end	Μεταφορά του συστήματος συντεταγμένων για τα κέντρα βάρους στοιχειωδών τμημάτων της καμπύλης νομέα στο κέντρο βάρους της εκάστοτε καμπύλης για

		κάθε νομέα. Ισχύει για περιπτώσεις νομέων που οι καμπύλες τους δεν έχουν κανένα κοινό σημείο.
268	I(ii,kk)=2*t*trapz(s{ii,kk},((t*cos(alpha{ii,kk})).^2+ (CLF{ii,kk}.*sin(alpha{ii,kk})).^2)/12+CGCLF{ii,kk}.^2);	Υπολογισμός ροπής αδράνειας της εκάστοτε καμπύλης για κάθε νομέα.
269		
270	Q1{ii,kk}(1)=0;	
271	for jj=2:endc(ii,kk)	
272	Q1{ii,kk}(jj)=t*trapz(s{ii,kk}(1:jj),(CGCLF{ii,kk}(1:jj)));	Υπολογισμός συνάρτησης πρώτης ροπής επιφανείας της εκάστοτε καμπύλης νομέα.
273	end	
274	end	
275	nn=0;	
276	for kk=1:NOC(ii)	
277	cc1(ii)=mainc(ii);	
278	if kk~=cc1(ii) && ccflag{ii}{kk}~=1 && intcount(ii,kk)>0	
279	if intcount(ii,kk)==2	
280	Q1{ii,cc1(ii)}(maininters{ii,kk}(1):end)=Q1{ii,cc1(ii)}(maininters{ii,kk}(1):end)+Q1{ii,kk}(end);	Υπολογισμός αρχικής διόρθωσης της πρώτης ροπής επιφανείας για κλειστές καμπύλες

	νομέα (π.χ. top side wing tanks). Υπολογίζεται η διόρθωση θεωρώντας ανοικτή διατομή.
`elseif intcount(ii,kk)==1`	
`Q1{ii,cc1(ii)}(maincint(ii,kk):end)=Q1{ii,cc1(ii)}(maincint(ii,kk):end)+Q1{ii,kk}(end);`	Υπολογισμός διόρθωσης της πρώτης ροπής επιφανείας για ανοικτές καμπύλες νομέα. (π.χ. διαμήκη ενισχυτικά)
`end`	
`if intcount(ii,kk)==2`	
`correction(ii,kk)=(trapz(s{ii,cc1(ii)}(maininters{ii,kk}(1):maininters{ii,kk}(2)),Q1{ii,cc1(ii)}(maininters{ii,kk}(1):maininters{ii,kk}(2)))+trapz(s{ii,kk},Q1{ii,kk}))/(trapz(CLF{ii,cc1(ii)}(maininters{ii,kk}(1):maininters{ii,kk}(2)))+trapz(CLF{ii,kk}));`	Υπολογισμός δεύτερης διόρθωσης της πρώτης ροπής επιφανείας για κλειστές καμπύλες νομέα. Υπολογίζεται σταθερή ροπή επιφανείας της διατμητικής ροής για να μην προκαλείται στρέψη της κλειστής καμπύλης.
`Q1{ii,cc1(ii)}(maininters{ii,kk}(1):maininters{ii,kk}(2))=Q1{ii,cc1(ii)}(maininters{ii,kk}(1):maininters{ii,kk}(2))-correction(ii,kk);`	Πρόσθεση ή αφαίρεση της δεύτερης

288	Q1{ii,kk}=Q1{ii,kk}-correction(ii,kk);	διόρθωσης αναλόγως της φοράς της διατμητικής ροής στο εκάστοτε τμήμα της κλειστής καμπύλης.
289	end	
290	end	
291	end	
292	parfor_progress;	
293	end	
294	parfor_progress(0);	
295	%---	Τέλος δεύτερης φάσης.
296	perc=['Phase 3/3:']; %percentage of completion (%)	Φάση 3η: Υπολογισμός τάσεων
297	disp(perc)	
298	Is=sum(I,2);	Συνολική ροπή αδρανείας του κάθε νομέα.
299	parfor_progress(RF);	
300	for ii=1:RF	
301	for kk=1:NOC(ii)	
302	if sum(intcount(ii,:))==length(sc{ii,mainc(ii)})	
303	cf(ii,kk)=(area(ii,kk)/sum(area(ii,:)));	Υπολογισμός συντελεστή παραλαβής φορτίου για καμπύλες νομέα χωρίς κανένα κοινό σημείο.
304	else	
305	cf(ii,kk)=1;	

end	
for jj=1:endc(ii,kk)	
sx=M(ii)/Is(ii)*CGCLF{ii,kk}(jj)*cf(ii,kk); %normal stress	Υπολογισμός ορθών τάσεων.
txy=V(ii)*Q1{ii,kk}(jj)/(Is(ii)*t)*cf(ii,kk); %shear stress	Υπολογισμός διατμητικών τάσεων.
shear{ii,kk}(jj)=txy;	
normal{ii,kk}(jj)=sx;	
S1{ii,kk}(jj)=sx/2+sqrt((sx/2)^2+txy^2); %maximum principal	Υπολογισμός μέγιστων κύριων τάσεων
S2{ii,kk}(jj)=sx/2-sqrt((sx/2)^2+txy^2); %minimum principal	Υπολογισμός ελάχιστων κύριων τάσεων.
VnMs{ii,kk}(jj)=sqrt(S1{ii,kk}(jj)^2+S2{ii,kk}(jj)^2-S1{ii,kk}(jj)*S2{ii,kk}(jj));	Υπολογισμός τάσεων Von Mises.
d1{ii,kk}(jj)=S1{ii,kk}(jj)-normal{ii,kk}(jj);	
d2{ii,kk}(jj)=S2{ii,kk}(jj)-normal{ii,kk}(jj);	
d3{ii,kk}(jj)=VnMs{ii,kk}(jj)-normal{ii,kk}(jj);	
end	
sc{ii,kk}(3,:)=sc{ii,kk}(3,:)+zcu(ii); %restore coordinates to before neutral axis	
tmax{ii,kk}=(S1{ii,kk}-S2{ii,kk})/2;	Υπολογισμός μέγιστων διατμητικών τάσεων.
minS1(ii,kk)=min(S1{ii,kk}(:));	Υπολογισμός ελάχιστων και μέγιστων τιμών όλων των τάσεων.
maxS1(ii,kk)=max(S1{ii,kk}(:));	
minS2(ii,kk)=min(S2{ii,kk}(:));	
maxS2(ii,kk)=max(S2{ii,kk}(:));	
mintmax(ii,kk)=min(tmax{ii,kk}(:));	

maxtmax(ii,kk)=max(tmax{ii,kk}(:));	
minshear(ii,kk)=min(shear{ii,kk}(:));	
maxshear(ii,kk)=max(shear{ii,kk}(:));	
minnormal(ii,kk)=min(normal{ii,kk}(:));	
maxnormal(ii,kk)=max(normal{ii,kk}(:));	
minVnMs(ii,kk)=min(VnMs{ii,kk}(:));	
maxVnMs(ii,kk)=max(VnMs{ii,kk}(:));	
end	
parfor_progress;	
end	
parfor_progress(0);	
S1m=min(minS1(:,:));	Υπολογισμός ελάχιστων και μέγιστων τιμών όλων των τάσεων.
S1M=max(maxS1(:,:));	
S2m=min(minS2(:,:));	
S2M=max(maxS2(:,:));	
tmaxm=min(mintmax(:,:));	
tmaxM=max(maxtmax(:,:));	
shearm=min(minshear(:,:));	
shearM=max(maxshear(:,:));	
normalm=min(minnormal(:,:));	
normalM=max(maxnormal(:,:));	
VnMsm=min(minVnMs(:,:));	
VnMsM=max(maxVnMs(:,:));	
%---	Τέλος τρίτης φάσης.
disp('Done')	Φάση εκτύπωσης αποτελεσμάτων.
figure(1);	
plot(sum(I,2));	Εκτύπωση συνάρτησης ροπής αδρανείας των

		νομέων.
356	title('Moment of Inertia per Section');	
357		
358	figure(2);	
359	plot(M(1:pstep:end));	Εκτύπωση καμπτικών ροπών.
360	title('Bending Moment per section');	
361		
362	if mode=='auto'	Επιλογή αυτόματης ή χειροκίνητης εκτύπωσης.
363	one=1;	Στην αυτόματη εκτύπωση όλα τα τριδιάστατα διαγράμματα και διαγράμματα ισοτασικών καμπυλών και νομέων παράγωνται και αποθηκεύονται.
364	two=9;	
365	three=2;	
366	four=3;	
367	else	
368	one=plvn;	
369	two=plvn;	
370	three=plotopt;	
371	four=plotopt;	
372	end	
373		
374	for plvn=one:two	
375	if plvn==1	
376	fpath='C:\Maximum Principal Diagrams\';	Ορισμός διαδρομής για

elseif plvn==2	
fpath='C:\Minimum Principal Diagrams\';	
elseif plvn==3	
fpath='C:\Tmax Principal Diagrams\';	
elseif plvn==4	
fpath='C:\Shear Diagrams\';	
elseif plvn==5	
fpath='C:\Normal Diagrams\';	την αποθήκευση των
elseif plvn==6	διαγραμμάτων.
fpath='C:\Von Mises Diagrams\';	
elseif plvn==7	
fpath='C:\s1-sx Diagrams\';	
elseif plvn==8	
fpath='C:\s2-sx Diagrams\';	
elseif plvn==9	
fpath='C:\VnMs-sx Diagrams\';	
end	
mkdir(fpath);	
for plotopt=three:four	
FigHandle(1) = figure(3);	
set(FigHandle(1),'Position', [0, 0, 1049, 895]);	Ορισμός θέσης και μεγέθους των τριδιάστατων και διδιάστατων διαγραμμάτων του πλοίου εκτός των διαγραμμάτων νομέων.
for ii=1:RF	
for kk=1:NOC(ii)	
if plvn==1	Επιλογή είδους τάσεων

plv1{ii,kk}=S1{ii,kk};	προς εκτύπωση.
cM(ii,kk)=maxS1(ii,kk);	
elseif plvn==2	
plv1{ii,kk}=S2{ii,kk};	
cM(ii,kk)=maxS2(ii,kk);	
elseif plvn==3	
plv1{ii,kk}=tmax{ii,kk};	
cM(ii,kk)=maxtmax(ii,kk);	
elseif plvn==4	
plv1{ii,kk}=shear{ii,kk};	
cM(ii,kk)=maxshear(ii,kk);	
elseif plvn==5	
plv1{ii,kk}=normal{ii,kk};	
cM(ii,kk)=maxnormal(ii,kk);	
elseif plvn==6	
plv1{ii,kk}=VnMs{ii,kk};	
cM(ii,kk)=maxVnMs(ii,kk);	
elseif plvn==7	
plv1{ii,kk}=d1{ii,kk};	
elseif plvn==8	
plv1{ii,kk}=d2{ii,kk};	
elseif plvn==9	
plv1{ii,kk}=d3{ii,kk};	
end	
end	
end	
if secflag==0	
for ii=1:pstep:RF	
for kk=1:NOC(ii)	

431	sc{ii,kk}(1,end)=NaN;sc{ii,kk}(2,end)=NaN;sc{ii,kk}(3,end)=NaN;plv1{ii,kk}(end)=NaN;	Ορισμός τελικών σημείων ως “NaN” με σκοπό να μην ενώνονται τα τελικά με τα αρχικά σημεία των νομέων.
432	h=patch(sc{ii,kk}(1,:),sc{ii,kk}(2,:),sc{ii,kk}(3,:),plv1{ii,kk}(:)','EdgeColor','interp','FaceColor','None','Linewidth',2); hold on;	Παραγωγή των έγχρωμων νομέων με τις τάσεις.
433	end	
434	end	
435	for ii=1:pstep:RF	
436	for kk=1:NOC(ii)	
437	if plvn==4;plv1{ii,kk}(:)=-plv1{ii,kk}(:);end	
438	h=patch(sc{ii,kk}(1,:),-sc{ii,kk}(2,:),sc{ii,kk}(3,:),plv1{ii,kk}(:)','EdgeColor','interp','FaceColor','None','Linewidth',2); hold on;	Παραγωγή των έγχρωμων νομέων με τις τάσεις. (συμμετρική όψη)
439	end	
440	end	
441	elseif mode=='manu'	Παραγωγή τριδιάστατων διαγραμμάτων γύρω από συγκεκριμένους νομείς.
442	if secflag==1	Επιλογή θέσης νομέα.
443	pos=floor((blkpos(1)-min(X(:)))/L*RF);	
444	elseif secflag==2	
445	pos=floor((blkpos(2)-min(X(:)))/L*RF);	

end	
for ii=pos-round(0.05*RF):pstep:pos+round(0.05*RF)	
fcal(ii)=0.4;	
fccol{ii}='k';	
for kk=1:NOC(ii)	
if ii~=pos	
sc{ii,kk}(1,end)=NaN;sc{ii,kk}(2,end)=NaN;sc{ii,kk}(3,end)=NaN;plv1{ii,kk}(end)=NaN;fcal(ii)=1;fccol{ii}='none';	
end	
h=patch(sc{ii,kk}(1,:),sc{ii,kk}(2,:),sc{ii,kk}(3,:),plv1{ii,kk}(:)','EdgeColor','interp','FaceAlpha',fcal(ii),'Linewidth',7,'Facecolor',fccol{ii});hold on;	
end	
end	
end	
for ii=1:RF	Ορισμός τίτλων διαγραμμάτων.
for kk=1:NOC(ii)	
if plvn==1	
title('3D/2D Plot of Maximum Principal Stresses');	
elseif plvn==2	
title('3D/2D Plot of Mimimum Principal Stresses');	
elseif plvn==3	
title('3D/2D Plot of Mid Principal Stresses');	
elseif plvn==4	
title('3D/2D Plot of Shear Stresses');	
elseif plvn==5	

472	title('3D/2D Plot of Normal Stresses');	
473	elseif plvn==6	
474	title('3D/2D Plot of Von Mises Stresses');	
475	elseif plvn==7	
476	title('3D/2D Plot of (y_1-y_ч)');	
477	elseif plvn==8	
478	title('3D/2D Plot of (y_2-y_ч)');	
479	elseif plvn==9	
480	title('3D/2D Plot of (Von Mises-y_ч)');	
481	end	
482	end	
483	end	
484	if plotopt==1	Υπολογισμοί για χρωματικό χάρτη που αφορά διακριτοποιημένη τριδιάστατη εκτύπωση.
485	if secflag==0	
486	surf(linspace(min(X(:)),max(X(:)),RF),linspace(min(Y(:)),max(Y(:)),RF),repmat(T,RF,1),'FaceColor','b','EdgeColor','none','FaceAlpha',0.4);hold on;	Υπολογισμός κι εκτύπωση επιφάνειας θάλασσας.
487	surf(linspace(min(X(:)),max(X(:)),RF),-linspace(min(Y(:)),max(Y(:)),RF),repmat(T,RF,1),'FaceColor','b','EdgeColor','none','FaceAlpha',0.4);	
488	end	
489	% number of isointervals	
490	nin = 10;	Ορισμός αριθμού ισοτασικών περιοχών.
491	M = jet(nin);	Ορισμός χρωματικού προτύπου.

492	% thickness ratio of each isointerval compared to "isoline"	
493	thickness = 10;	Ορισμός πάχους ισοτασικών περιοχών.
494	MM = reshape(permute(cat(3,repmat(M,[1 1 thickness]),zeros([nin 3 1])),[3 1 2]),nin*thickness + nin,3);	Υπολογισμός χρωματικού χάρτη με βάση τις τρέχουσες ρυθμίσεις.
495	colormap(MM)	
496	axis equal tight	
497	colorbar	
498	view(-22,15)	Ορισμός τριδιαστατης προβολής.
499	xlabel('L')	
500	ylabel('B')	
501	zlabel('D')	
502	saveas(FigHandle(1),fullfile(fpath,'3DContour'),'png')	
503	elseif plotopt==2	Υπολογισμοί για χρωματικό χάρτη που αφορά εκτύπωση ισοτασικών καμπυλών.
504	% number of isointervals	
505	nin = 10;	Ορισμός αριθμού ισοτασικών καμπυλών.
506	M = white(nin);	Ορισμός ασπρόμαυρου χρωματικού προτύπου.
507	% thickness ratio of each isointerval compared to "isoline"	
508	thickness = 10;	Ορισμός πάχους ισοτασικών καμπυλών.

509	MM = reshape(permute(cat(3,repmat(M,[1 1 thickness]),zeros([nin 3 1])),[3 1 2]),nin*thickness + nin,3);	Υπολογισμός χρωματικού χάρτη με βάση τις τρέχουσες ρυθμίσεις.
510	colormap(MM)	
511	axis equal tight	
512	view(0,0)	Ορισμος διδιάστατης προβολής στο επίπεδο x-z
513	xlabel('L')	
514	ylabel('B')	
515	zlabel('D')	
516	saveas(FigHandle(1),fullfile(fpath,'2DContour'),'png')	
517	elseif plotopt==3	
518	if secflag==0	
519	surf(linspace(min(X(:)),max(X(:)),RF),linspace(min(Y(:)),max(Y(:)),RF),repmat(T,RF,1),'FaceColor','b','EdgeColor','none','FaceAlpha',0.4);hold on;	
520	surf(linspace(min(X(:)),max(X(:)),RF),-linspace(min(Y(:)),max(Y(:)),RF),repmat(T,RF,1),'FaceColor','b','EdgeColor','none','FaceAlpha',0.4);	
521	end	
522	colormap jet	
523	axis equal tight	
524	colorbar	
525	view(−22,15)	
526	xlabel('L')	
527	ylabel('B')	
528	zlabel('D')	
529	saveas(FigHandle(1),fullfile(fpath,'3DPlot'),'png')	
530	end	

end	
ii=sectnum;	Ορισμός νομέα προς διδιάστατη εκτύπωση.
for kk=1:NOC(ii);	
quiv3{ii,kk}=quiv2{ii,kk}.*plv1{ii,kk};	Υπολογισμός μέτρου κάθετων διανυσμάτων στις καμπύλες κάθε νομέα.
FigHandle(2)=figure(4);	
quiver(sc{ii,kk}(2,:),sc{ii,kk}(3,:),real(quiv3{ii,kk}),imag(quiv3{ii,kk}),'ShowArrowHead','off','AutoScaleFactor',2);	Εκτύπωση συνάρτησης τάσεων πάνω στις καμπύλες του νομέα.
title(['2D Plot | Section number ',num2str(ii)]);axis equal;hold on;	
sc{ii,kk}(2,end)=NaN;sc{ii,kk}(3,end)=NaN;plv1{ii,kk}(end)=NaN;	Εκτύπωση έγχρωμων καμπυλών του νομέα.
patch(sc{ii,kk}(2,:),sc{ii,kk}(3,:),plv1{ii,kk},'EdgeColor','interp','LineWidth',2);hold on;colorbar	
plot(sc{ii,kk}(2,:),ones(length(sc{ii,kk}(2,:)))*zcu(ii),'k','LineStyle','--');	Εκτύπωση ουδέτερου άξονα του νομέα.
end	
saveas(FigHandle(2),fullfile(fpath,'SectionPlot'),'png')	
if mode=='auto'	
close Figure 3	
close Figure 4	
end	
end	Τέλος εκτύπωση αποτελεσμάτων.