



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βελτιστοποίηση διαστάσεων των επί μέρους κατασκευαστικών στοιχείων της γάστρας πλοίων μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων



Γιαννόπουλος Γιώργος

Επιβλέπων Καθηγητής: Κ. Ανοφαντής, Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής: Ε. Σαμουηλίδης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής: Χ. Προβατίδης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2020, ΑΘΗΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κύριο Ανυφαντή Κωσταντίνο, για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω το συγκεκριμένο θέμα, καθώς και για την υπομονή με την οποία με συμβούλεψε κατά τη μελέτη και συγγραφή. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα τους γονείς μου, καθώς και τους φίλους μου για την υποστήριξη και την κατανόηση που μου έδειξαν κατά την διάρκεια της πραγματοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό να διαπιστωθεί κατά πόσο μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων μπορούν να βελτιστοποιηθούν κατασκευαστικά στοιχεία της γάστρας του πλοίου. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε το κατασκευαστικό στοιχείο του διπύθμενου της μέσης τομής ενός Bulk carrier, το οποίο βρίσκεται στην διάθεση του Ελληνικού στόλου.

Ως αντικειμενική συνάρτηση της βελτιστοποίησης, είναι η ελαχιστοποίηση του βάρους του διπύθμενου, χωρίς όμως να παραβιάζονται οι κανονισμοί αντοχής του πλοίου σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς CSR (Common Structural Rules) που δίνονται από τον I.A.C.S. (International Association of Classification Societies). Ορισμένοι κανονισμοί της αντοχής του πλοίου θεωρήθηκαν ως περιορισμοί (constraints) της παρούσας βελτιστοποίησης, μέγιστη επιτρεπόμενη ορθή και διατμητική τάση καθώς και η επιτρεπόμενη λυγηρότητα. Ως κατάσταση φόρτωση του πλοίου θεωρήθηκε η Alternate Hold Loading (AHL), διότι είναι μια από τις επίπονες για την γάστρα των Bulk carriers.

Το διπύθμενο μοντελοποιήθηκε με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) με την χρήση του υπολογιστικού προγράμματος (ANSYS Mechanical APDL). Στη συνέχεια με την χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης (MOGA, NLPQL, RSM), που βρίσκονται στην διάθεση του προγράμματος (ANSYS Workbench) βρέθηκαν οι βέλτιστες τιμές των διαστάσεων, οι οποίες θεωρήθηκαν ως μεταβλητές εισόδου της βελτιστοποίησης, που περιγράφουν το μοντελοποιημένο διπύθμενο έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το βάρος του. Είναι συνετό επίσης να επισημανθεί ότι κατά την διαδικασία που ακολουθήθηκε έγιναν ορισμένες παραδοχές, οι οποίες έχουν ως σκοπό την απλούστευση του προβλήματος αλλά συγχρόνως να αντιπροσωπεύουν την πραγματική κατάσταση όσον αυτό είναι δυνατόν. Οι παραδοχές παρουσιάζονται στα εκάστοτε κεφάλαια λεπτομερώς.

Για να εξασφαλιστεί η επαρκής αντοχή της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, με το βελτιστοποιημένο διπύθμενο, πρέπει να πραγματοποιηθεί μελέτη αντοχής κατά την διαμήκη κάμψη της γάστρας, έτσι ώστε να ελεγχθεί η διαμήκης αντοχή καθώς και η τοπική αντοχή. Ο έλεγχος αντοχής θα πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια του προγράμματος MARS2000, λογισμικό που παρέχεται από τον γαλλικό νηογνώμονα (Bureau Veritas), το οποίο είναι πλήρως εναρμονισμένο με τους διεθνείς κανονισμούς CSR - I.A.C.S.

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή.....	2
1.1 Κανονιστική σχεδίαση της γάστρας πλοίων	2
1.1.2 Πρωτεύουσες, δευτερεύουσες και τριτεύουσες τάσεις.....	12
1.1.3 Έλεγχος αντοχής με πεπερασμένα στοιχεία	13
1.1.4 Βασικό θεωρητικό υποβαθρο πεπερασμένων στοιχείων.	15
1.2 Βελτιστοποίηση	16
1.3 Βελτιστοποίηση κατασκευών.....	17
1.4 Εφαρμογές της βελτιστοποίησης κατασκευών.....	20
1.5 Κίνητρο.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Βασικό θεωρητικό υπόβαθρο	21
2.1 Τρι-διάστατο 2-κομβο στοιχείο δοκού	21
2.2 Τρι-διάστατο 4-κομβο στοιχείο πλάκας.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Μέθοδοι βελτιστοποίησης.....	29
3.1 NLPQL.....	29
3.2 MOGA.....	31
3.3 RSM	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Βελτιστοποίηση δοκού με ισοκατανεμημένο φορτίο και αξονική δύναμη	42
4.1 Περιγραφή προβλήματος	42
4.2 Αναλυτικός προσδιορισμός βέλτιστης λύσης	43
4.3 Επίλυση παραδείγματος	45
4.4 Αριθμητική βελτιστοποίηση.....	58
4.4.1 Λυγισμός υπό συνδυασμό φορτίσεων	58
4.4.2 Μοντελοποίηση δοκού προβλήματος μέσω υπολογιστικού προγράμματος	60
4.5 Εφαρμογή τεχνικών βελτιστοποίησης.....	70
4.5.1 Αποτελέσματα πρώτης περίπτωσης του προβλήματος και των δύο στοιχείων μέσω επίλυσης MOGA	70
4.5.2 Αποτελέσματα πρώτης περίπτωσης του προβλήματος και των δύο στοιχείων μέσω επίλυσης NLPQL	77
4.4.3 Αποτελέσματα δεύτερης περίπτωσης του προβλήματος και των δύο στοιχείων μέσω επίλυσης MOGA	85

4.5.4 Αποτελέσματα δεύτερης περίπτωσης του προβλήματος και των δύο στοιχείων μέσω επίλυσης NLPQL	88
4.6 Συμπεράσματα	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Βελτιστοποίηση διπύθμενου	92
5.1 Στόχοι και μέθοδοι επίλυση	92
5.2 Γεωμετρία και μοντέλο ΠΣ	93
5.3 Ansys mechanical APDL.....	95
5.4 Workbench	108
5.4.1 Βελτιστοποίηση βασισμένη στις αναλυτικές εξισώσεις του CSR.....	108
5.4.2 Βελτιστοποίηση βασισμένη στις απαιτήσεις λυγηρότητας	116
5.5 Mars2000	126
5.5.1 Παρουσίαση Mars 2000.....	126
5.5.2 Αποτελέσματα Mars 2000.....	130
5.5.2.1 Αποτελέσματα Mars 2000 πλοίου αναφοράς	131
5.5.2.2 Αποτελέσματα Mars 2000 Opt CSR analytic equation.....	139
5.5.2.3 Αποτελέσματα Mars 2000 Opt slenderness requirements.....	142
5.5.2.4 Τελικά αποτελέσματα Mars 2000.....	145
5.6 Συμπεράσματα	149
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	150
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	151
Κώδικας Ardl παραδείγματος δοκού (Beam188).....	151
Κώδικας Ardl παραδείγματος δοκού (Shell181)	153
Κώδικας Ardl για διπύθμενο	157
Αποτελέσματα Workbench διπύθμενου	183

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή

1.1 Κανονιστική σχεδίαση της γάστρας πλοίων

Η σχεδίαση της μεταλλικής κατασκευής των πλοίων γίνεται με βάση αναλυτικές τεχνικές. Οι τεχνικές αυτές βασίζονται σε εμπειρία χρόνων και έρευνας από την Διεθνή Ένωση Νηογνωμόνων (IACS). Όλοι οι κανονισμοί που πρέπει να ικανοποιούνται περιγράφονται αναλυτικά στο CSR (Common Structural Rules). Παρακάτω θα παρουσιαστεί η ακολουθία για τον σχεδιασμό της Μέσης τομής ενός Bulk carrier.

Αρχικά πρέπει να υπολογιστεί η ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης της μέσης τομής (SM_{min}). Η πραγματική τιμή της ροπής αντίστασης της μέσης τομής, που θα προκύψει μετά τον τελικό σχεδιασμό, θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτή που προκύπτει από τις σχέσεις (1.1, 1.2, 1.6) :

$$1. \quad Z_R = 0.9 k C_W L^2 B (c_B + 0.7) 10^{-8} \quad (1.1)$$

όπου:

k : Συντελεστής υλικού ,Πίνακας 1.1.

C_W : Συντελεστής κυματισμού ,Πίνακας 1.2.

L : Μήκος πλοίου.

B : Πλάτος πλοίου.

c_B : Συντελεστής γάστρας.

Πίνακας 1.1 : Συντελεστής υλικού.

R_{eHr} , specified minimum yield stress, in N/mm ²	k
235	1.00
315	0.78
355	0.72
390	0.68

Πίνακας 1.2 : Συντελεστής κυματισμού.

$$C_w = 10.75 - \left(\frac{300 - L}{100}\right)^{1.5} \quad \text{for } 90m \leq L \leq 300m$$

$$C_w = 10.75 \quad \text{for } 300m < L \leq 350m$$

$$C_w = 10.75 - \left(\frac{L - 350}{150}\right)^{1.5} \quad \text{for } 350m < L \leq 500m$$

$$2. Z_{min} = M_{max} / \sigma_{perm} \quad (1.2)$$

όπου:

M_{max} : Μέγιστη ροπή κάμψης στην μέση τομή του πλοίου από τις καταστάσεις φόρτωσης.

σ_{perm} : Μέγιστη επιτρεπόμενη τάση στην μέση τομή του πλοίου, σχέση (1.3).

$$\sigma_{perm} = \frac{190}{k} \quad (1.3)$$

Η μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή κάμψης στην μέση τομή του πλοίου υπολογίζεται για τις καταστάσεις Hogging και Sagging. Έχει ληφθεί υπόψη η κατάσταση φόρτωσης που μας δίνει τις μέγιστες ροπές κάμψης για πλευση του πλοίου χωρίς κυματισμό. Οι τιμές της ροπής κάμψης με κυματισμό για Hogging και Sagging λαμβάνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$M_{wv-h} = 0.19 f_{nl-vh} f_m f_p C_w L^2 B C_B \quad (1.4)$$

$$M_{wv-s} = -0.19 f_{nl-vs} f_m f_p C_w L^2 B C_B \quad (1.5)$$

όπου,

f_{nl-vh} : Συντελεστής λαμβάνοντας υπόψη μη γραμμικές επιδράσεις για hogging, να θεωρηθεί ως:

$$f_{nl-vh} = 1.0 \text{ για εκτιμήσεις αντοχής και κόπωσης.}$$

f_{nl-vs} : Συντελεστής λαμβάνοντας υπόψη μη γραμμικές επιδράσεις για sagging, να θεωρηθεί ως:

$$f_{nl-vs} = 0.58 \left(\frac{C_B + 0.7}{C_B} \right) \text{ για εκτιμήσεις αντοχής.}$$

$$f_{nl-vs} = 1.0 \text{ για εκτιμήσεις κόπωσης.}$$

f_p : Συντελεστής, να θεωρηθεί ως:

$$f_p = f_{ps} \text{ για εκτιμήσεις αντοχής.}$$

$$f_p = 0.9 [0.27 - (6 + 4 f_T) L 10^{-5}] \text{ για εκτιμήσεις κόπωσης.}$$

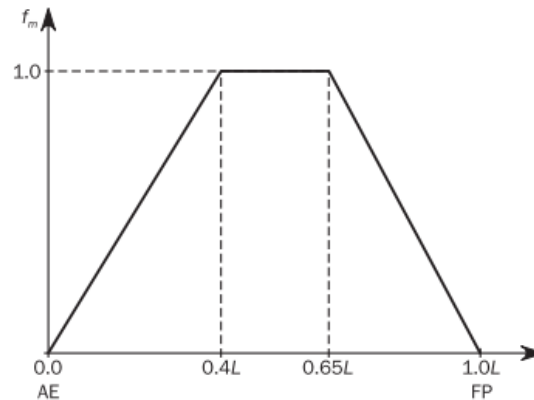
f_m : Συντελεστής κατανομής για κατακόρυφη ροπή κάμψης κυματισμού κατά το μήκος του πλοίου να θεωρηθεί ως:

$$f_m = 0.0 \text{ για } x \leq 0$$

$$f_m = 1.0 \text{ για } 0.4 L \leq x \leq 0.65 L$$

$$f_m = 0.0 \text{ για } x \geq L$$

Οι ενδιάμεσες τιμές του συντελεστή f_m μπορούν να υπολογιστούν μέσω γραμμικής παρεμβολής (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1 : Συντελεστής κατανομής f_m .

$$3. Z_{min} = M_{min} / \sigma_{perm} \quad (1.6)$$

Η ελάχιστη αναπτυσσόμενη ροπή κάμψης στην μέση τομή του πλοίου υπολογίζεται για τις καταστάσεις Hogging και Sagging. Στην περίπτωση αυτή και οι τιμές της ροπής κάμψης για Hogging και Sagging για πλεύση χωρίς κυματισμούς λαμβάνονται με βάση τις παρακάτω εξισώσεις από τους κανονισμούς.

$$M_{sw-h-min} = f_{sw} (171 C_w L^2 B (C_B + 0.7) 10^{-3} - M_{wv-h-mid} \quad (1.7)$$

$$M_{sw-s-min} = -0.85 f_{sw} (171 C_w L^2 B (C_B + 0.7) 10^{-3} - M_{wv-s-mid} \quad (1.8)$$

όπου:

$M_{wv-h-mid}$: Κατακόρυφη ροπή κάμψης κυματισμού για εκτίμηση αντοχής σε hogging, όπως έχει οριστεί στην σχέση (1.4).

$M_{wv-s-mid}$: Κατακόρυφη ροπή κάμψης κυματισμού για εκτίμηση αντοχής σε sagging, όπως έχει οριστεί στην σχέση (1.5).

f_{sw} : Συντελεστής κατανομής κατά το μήκος του πλοίου, να θεωρηθεί ως:

$$f_{sw} = 0.0 \quad \text{για } x \leq 0$$

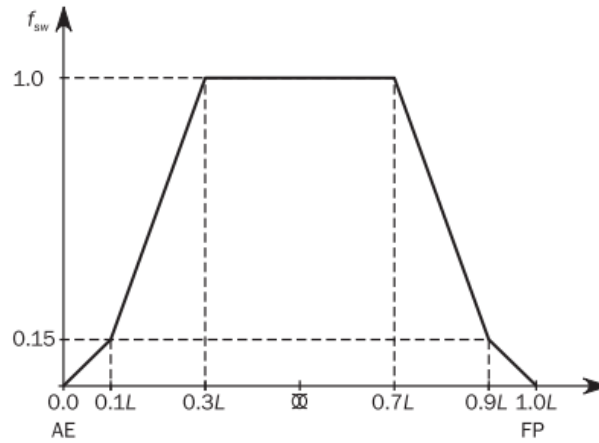
$$f_{sw} = 0.15 \quad \text{για } x = 0.1 L$$

$$f_{sw} = 1.0 \quad \text{για } 0.3 L \leq x \leq 0.7 L$$

$$f_{sw} = 0.15 \quad \text{για } x = 0.9 L$$

$$f_{sw} = 0.0 \quad \text{για } x \geq L$$

Οι ενδιάμεσες τιμές του συντελεστή f_{sw} μπορούν να υπολογιστούν μέσω γραμμικής παρεμβολής (Εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.2: Συντελεστής κατανομής f_{sw} .

Η ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης θα είναι η μέγιστη που θα προκύψει από τις τιμές που προκύπτουν από τους τρεις παραπάνω κανονισμούς.

Στη συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός του πάχους των ελασμάτων της μέσης τομής με βάση τις πιέσεις που ασκούνται στα ελάσματα, αναλόγως την θέση τους. Οι πιέσεις που ασκούνται στην κατασκευή διακρίνονται σε εσωτερικές (P_{in}) και εξωτερικές (P_{ex}).

Η συνολική εξωτερική πίεση σε οποιοδήποτε σημείο της γάστρας για στατικά και δυναμικά σενάρια φόρτωσης, εκφράζεται ως:

$$P_{ex} = P_s + P_w, \text{ αλλά όχι μικρότερη του } 0.$$

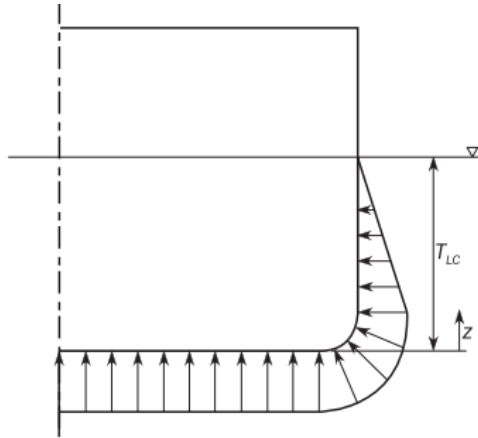
όπου:

P_s : Υδροστατική πίεση, σε kN/m^2 , όπως ορίζεται από τον Πίνακα 1.3.

P_w : Πίεση λόγω κυματισμών, σε kN/m^2 , όπως ορίζεται στα εδάφια [1.3.2] έως [1.3.8] στον CSR (Part 1/Chapter 4/Section 5).

Πίνακας 1.3: Υδροστατική πίεση, P_s .

Location	Hydrostatic Pressure, P_s , in kN/m^2
$z \leq T_{LC}$	$\rho g (T_{LC} - z)$
$z > T_{LC}$	0



Εικόνα 1.3: Υδροστατική πίεση, P_s .

Οι εσωτερικές πιέσεις οφείλονται λόγω του υγρού ή ξηρού φορτίου των δεξαμενών και του θαλασσινού νερού στις δεξαμενές έρματος. Για στατικά και δυναμικά σενάρια φόρτωσης του πλοίου (με υγρό φορτίο) η εσωτερική πίεση εκφράζεται ως:

$$P_{in} = P_{Is} + P_{Id}, \text{ αλλά όχι μικρότερη του } 0.$$

όπου:

P_{Is} : Στατική πίεση λόγω υγρού φορτίου των δεξαμενών και δεξαμενών έρματος, σε kN/m^2 , όπως ορίζεται στο εδάφιο [1.2] στον CSR (Part 1/Chapter 4/Section 6).

P_{Id} : Δυναμική αδρανειακή πίεση λόγω υγρού φορτίου των δεξαμενών και δεξαμενών έρματος, σε kN/m^2 , όπως ορίζεται στο εδάφιο [1.3] στον CSR (Part 1/Chapter 4/Section 6).

Για στατικά και δυναμικά σενάρια φόρτωσης του πλοίου (με ξηρό φορτίο) η εσωτερική πίεση εκφράζεται ως:

$$P_{in} = P_{bs} + P_{bd}, \text{ αλλά όχι μικρότερη του } 0.$$

όπου:

P_{bs} : Στατική πίεση λόγω ξηρού φορτίου των δεξαμενών, σε kN/m^2 , όπως ορίζεται στο εδάφιο [2.4.2] στον CSR (Part 1/Chapter 4/ Section 6).

P_{bd} : Δυναμική αδρανειακή πίεση λόγω ξηρού φορτίου των δεξαμενών, σε kN/m^2 , όπως ορίζεται στο εδάφιο [2.4.3] στον CSR (Part 1/Chapter 4/Section 6).

Αφού έχουν υπολογιστεί οι εσωτερικές και εξωτερικές πιέσεις, τότε μέσω της εξίσωσης (1.9) υπολογίζονται τα καθαρά πάχη των ελασμάτων της μέσης τομής.

$$t = 0.0158 \alpha_p b \sqrt{\frac{|P|}{\chi C_a R_{eH}}} \quad (1.9)$$

όπου:

C_a : Συντελεστής επιτρεπτής τάσης κάμψης για ελάσματα, να θεωρηθεί ως:

$$C_a = \beta - \alpha \frac{|\sigma_{hg}|}{R_{eH}}, \text{ να μην είναι μεγαλύτερη από } C_{a-\max}.$$

β : Συντελεστής, Πίνακας 1.4.

α : Συντελεστής, Πίνακας 1.4.

$C_{a-\max}$: Μέγιστη επιτρεπόμενος συντελεστής τάσης κάμψης, Πίνακας 1.4.

Πίνακας 1.4 : Ορισμός β, α και $C_{a-\max}$.

Acceptance criteria set	Structural member		β	α	$C_{a-\max}$
AC-S	Longitudinal strength members	Longitudinally stiffened plating	0.9	0.5	0.8
		Transversely stiffened plating	0.9	1.0	0.8
	Other members		0.8	0	0.8
AC-SD	Longitudinal strength members	Longitudinally stiffened plating	1.05	0.5	0.95
		Transversely stiffened plating	1.05	1.0	0.95
	Other members		1.0	0	1.0

Στη συνέχεια προσδιορίζεται το ελάχιστο καθαρό πάχος των στοιχείων πρωτεύουσας στήριξης (Σταθμίδες, Έδρες, κλπ.). Ο υπολογισμός γίνεται σύμφωνα με τον Πίνακα 1.5.

Πίνακας 1.5 : Ελάχιστο καθαρό πάχος στοιχείων πρωτεύουσας στήριξης.

Element	Location	Net thickness	
Double bottom centreline girder	Machinery space	$1.55 L_2^{1/3} + 3.5$	
	Elsewhere	$5.5 + 0.025 L_2$	
Other bottom girder	Machinery space	$1.7 L_2^{1/3} + 1.0$	
	Fore part of ships with $L \geq 150 m$	$0.7 L_2^{1/2}$	
	Elsewhere and fore part of ships with $L < 150 m$	$5.5 + 0.02 L_2$	
Girders bounding a duct keel	Machinery space	$0.8 L_2^{1/2} + 2.5$	
Bottom floor	Machinery space	$1.7 L_2^{1/3} + 1.0$	
	Fore part	$0.7 L_2^{1/2}$	
	Elsewhere	$0.6 L_2^{1/2}$	
Aft peak floor	-	$0.7 L_2^{1/2}$	
Other primary supporting member	Aft part / fore part	$0.7 L_2^{1/2}$	
	Elsewhere	In oil cargo tanks	$5.5 + 0.015 L_2$
		For other cases	$0.6 L_2^{1/2}$

Τέλος γίνεται η διαστασιολόγηση των διαμήκων ενισχυτικών. Για την διαστασιολόγηση τους γίνεται εκ νέου η χρήση των εσωτερικών και εξωτερικών πιέσεων. Από την χρήση των εξισώσεων των κανονισμών προκύπτουν το ελάχιστο πάχος του κορμού του ενισχυτικού καθώς και η ελάχιστη ροπή αντίστασης τους.

$$t_w = \frac{f_{shr} |P| s l_{shr}}{d_{shr} \times C_t \tau_{eH}} \quad (1.10)$$

όπου:

f_{shr} : Συντελεστής κατανομής διατμητικής δύναμης.

C_t : Συντελεστής επιτρεπτής διατμητικής τάσης.

d_{shr} : Αποτελεσματικό βάθος διάτμησης, σε mm.

l_{bdg} : Αποτελεσματικό άνοιγμα κάμψης, σε mm.

l_{shr} : Αποτελεσματικό άνοιγμα διάτμησης, σε mm.

P : Πίεση σχεδίασης, σε kN/m^2 .

χ : Συντελεστής, να θεωρηθεί ως:

- Σε άθικτη κατάσταση :
 $\chi = 0.9$ για ενισχυτικά στον εσωτερικό πυθμένα ή στο έλασμα bilge hopper σε δεξαμενές φορτίου bulk carriers.
 $\chi = 1.00$ για τις υπόλοιπες περιπτώσεις.
- Σε κατάσταση πλημμυρισμού: χ όπως έχει οριστεί στο (Part 1/Chapter 4/ Section 6).

$$Z = \frac{|P| s l_{bdg}^2}{f_{bdg} \chi C_s R_{eH}} \quad (1.11)$$

όπου:

f_{bdg} : Συντελεστής καμπτικής ροπής.

C_s : Συντελεστής επιτρεπτής καμπτικής τάσης, Πίνακας 1.6.

σ_{hg} : Καμπτική τάση, θεωρώντας το πλοίο σαν δοκό, σε N/mm^2 , όπως έχει οριστεί στο Ch 6, Sec 2, [1.1].

β_s : Συντελεστής, Πίνακας 1.7.

α_s : Συντελεστής, Πίνακας 1.7.

C_{s-max} : Συντελεστής, Πίνακας 1.7.

Πίνακας 1.6: Ορισμός C_s .

Sign of hull girder bending stress, σ_{hg}	Lateral pressure acting on	Coefficient C_s
Tension (positive)	Stiffener side	$C_s = \beta_s - \alpha_s \frac{ \sigma_{hg} }{R_{eH}}$ but not to be taken greater than C_{s-max}
Compression (negative)	Plate side	
Tension (positive)	Plate side	$C_s = C_{s-max}$
Compression (negative)	Stiffener side	

Πίνακας 1.7: Ορισμός β_s , α_s , C_{s-max} .

Acceptance criteria set	Structural member	β_s	α_s	C_{s-max}
AC-S	Longitudinal strength member	0.85	1.0	0.75
	Transverse or vertical member	0.75	0	0.75
AC-SD	Longitudinal strength member	1.0	1.0	0.9
	Transverse or vertical member	0.9	0	0.9

Στην συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός του πάχους διάβρωσης των ελασμάτων και των ενισχυτικών, σύμφωνα με τις σχέσεις (1.12), (1.13) και τον Πίνακα 1.8 και 1.9.

$$t_c = Roundup_{0.5}(t_{c1} + t_{c2}) + t_{res} \quad (1.12)$$

$$t_{gr-req} = t_{req} + t_c \quad (1.13)$$

Πίνακας 1.8: Προσθήκη διάβρωσης για την μία πλευρά των δομικών στοιχείων.

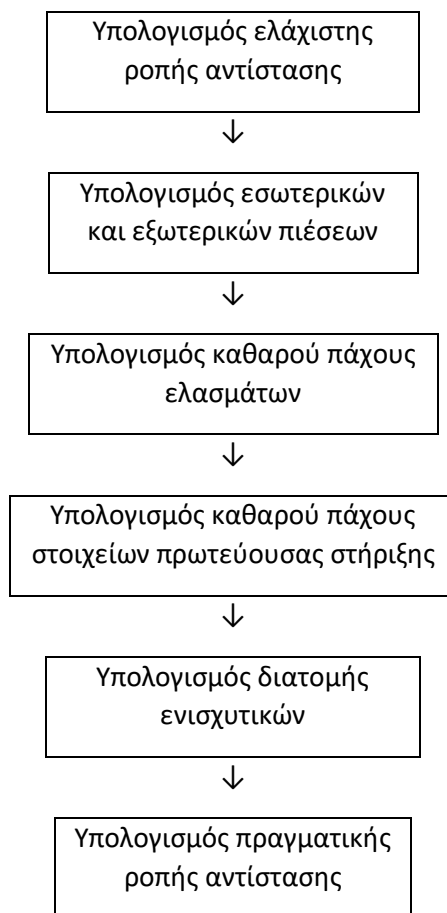
Compartment type	Structural member		t_{e1} or t_{e2}		
			Oil tankers	BC-A or BC-B ships with $L \geq 150$ m	Other BC ships
Ballast water tank, bilge tank, drain storage tank, chain locker ⁽¹⁾	Face plate of PSM	Within 3m below top of tank ⁽⁴⁾	2.0		
		Elsewhere	1.5		
	Other members ⁽²⁾ ⁽³⁾	Within 3m below top of tank ⁽⁴⁾	1.7		
		Elsewhere	1.2		
Cargo oil tank	Face plate of PSM	Within 3m below top of tank ⁽⁴⁾	1.7	N/A	
		Elsewhere	1.4		
	Inner-bottom plating/bottom of tank		2.1		
	Other members	Within 3m below top of tank ⁽⁴⁾	1.7		
		Elsewhere	1.0		
	Dry bulk cargo hold ⁽⁵⁾	Transverse bulkhead	Upper part ⁽⁶⁾		
Lower stool: sloping plate, vertical plate and top plate ⁽⁷⁾			5.2	2.6	
Other parts			3.0	1.5	
Sloped plating of hopper tank, inner bottom plating		3.7	2.4		
Other members		Upper part ⁽⁶⁾	1.8	1.0	
		Webs and flanges of the upper end brackets of side frames of single side bulk carriers			
		Webs and flanges of lower brackets of side frames of single side bulk carriers			
		Other parts			2.2
Exposed to atmosphere	Weather deck plating		1.7		
	Other members		1.0		
Exposed to seawater	Shell plating between the minimum design ballast draught waterline and the scantling draught waterline		1.5		
	Shell plating elsewhere		1.0		
Fuel and lube oil tank			0.7		
Fresh water tank			0.7		
Void spaces ⁽⁸⁾	Spaces not normally accessed, e.g. access only via bolted manhole openings, pipe tunnels, inner surface of stool space not common with a dry bulk cargo hold or ballast cargo hold, etc.		0.7		
Dry spaces	Internals of machinery spaces, pump room, store rooms, steering gear space, etc.		0.5		

Πίνακας 1.9: Εκτίμηση προστιθέμενου πάχους διάβρωσης ενισχυτικών.

Structural requirement	Property/analysis type	Applied corrosion addition
Minimum thickness (all members including PSM)	Thickness	t_c
Local strength (plates, stiffeners, and hold frames)	Thickness/sectional properties	t_c
	Stiffness / proportions / Buckling capacity	t_c
Primary supporting members (prescriptive)	Sectional properties	$0.5 t_c$
	Stiffness/proportions of web and flange Buckling capacity	t_c
Strength assessment by FEM	Cargo tank/cargo hold	$0.5 t_c$
	Buckling capacity	t_c
	Local fine mesh	$0.5 t_c$
	Specified fine mesh areas	$0.5 t_c$
Hull girder strength	Sectional properties	$0.5 t_c$
	Buckling capacity	t_c
Hull girder ultimate strength	Sectional properties	$0.5 t_c$
Hull girder residual strength	Buckling/collapse capacity	$0.5 t_c$
Fatigue assessment (simplified stress analysis)	Hull girder section properties	$0.5 t_c$
	Local support member	
Fatigue assessment (FE Stress analysis)	Coarse mesh FE model Very fine mesh portion	$0.5 t_c$

Τέλος υπολογίζεται η ροπή αντίστασης της μέσης τομής με τα καθαρά πάχη όλων των δομικών στοιχείων που συνεισφέρουν στην διαμήκη αντοχή. Η υπολογιζόμενη ροπή αντίστασης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη που έχει υπολογιστεί στο πρώτο βήμα.

Όλη η παραπάνω διαδικασία της σχεδίασης της μέσης τομής, περιγράφεται συνοπτικά με το παρακάτω διάγραμμα ροής.



1.1.2 Πρωτεύουσες, δευτερεύουσες και τριτεύουσες τάσεις

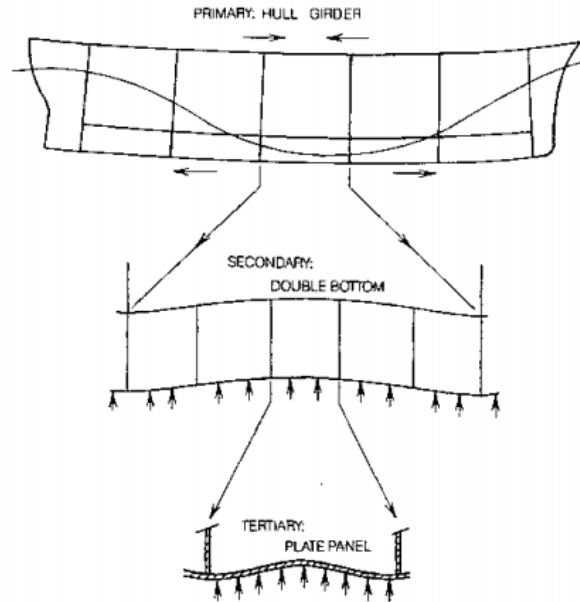
Οι ορθές τάσεις λόγω της διαμήκου κάμψης δεν είναι οι μοναδικές που αναπτύσσονται στα διαμήκη στοιχεία του πλοίου. Άλλες τάσεις είναι:

- i. οι διατμητικές που και αυτές προέρχονται από την κάμψη στο κατακόρυφο επίπεδο,
- ii. οι τάσεις από άλλες μορφές καταπόνησης του πλοίου θεωρούμενου ως δοκαριού-στρέψη, οριζόντια κάμψη,
- iii. τάσεις λόγω της καταπόνησης των ενισχυμένων ελασμάτων μεταξύ των φρακτών και του περιβλήματος,
- iv. τάσεις λόγω της καταπόνησης μη ενισχυμένων πλακών μεταξύ των ενισχύσεων.

Οι ορθές τάσεις και οι τάσεις i. και ii. οφείλονται στην απόκριση του πλοίου θεωρούμενου ως δοκαριού και αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως πρωτεύουσες τάσεις - primary stresses (Σχήμα 1.1).

Οι τάσεις που προέρχονται από την απόκριση των ενισχυμένων ελασμάτων φορτιζομένων εγκάρσιως αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως δευτερεύουσες τάσεις - secondary stresses, (Σχήμα 1.1).

Οι τάσεις που προέρχονται από την απόκριση των ελασμάτων μεταξύ των ενισχύσεων φορτιζομένων εγκάρσιως αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως τριτεύουσες τάσεις - tertiary stresses (Σχήμα 1.1).



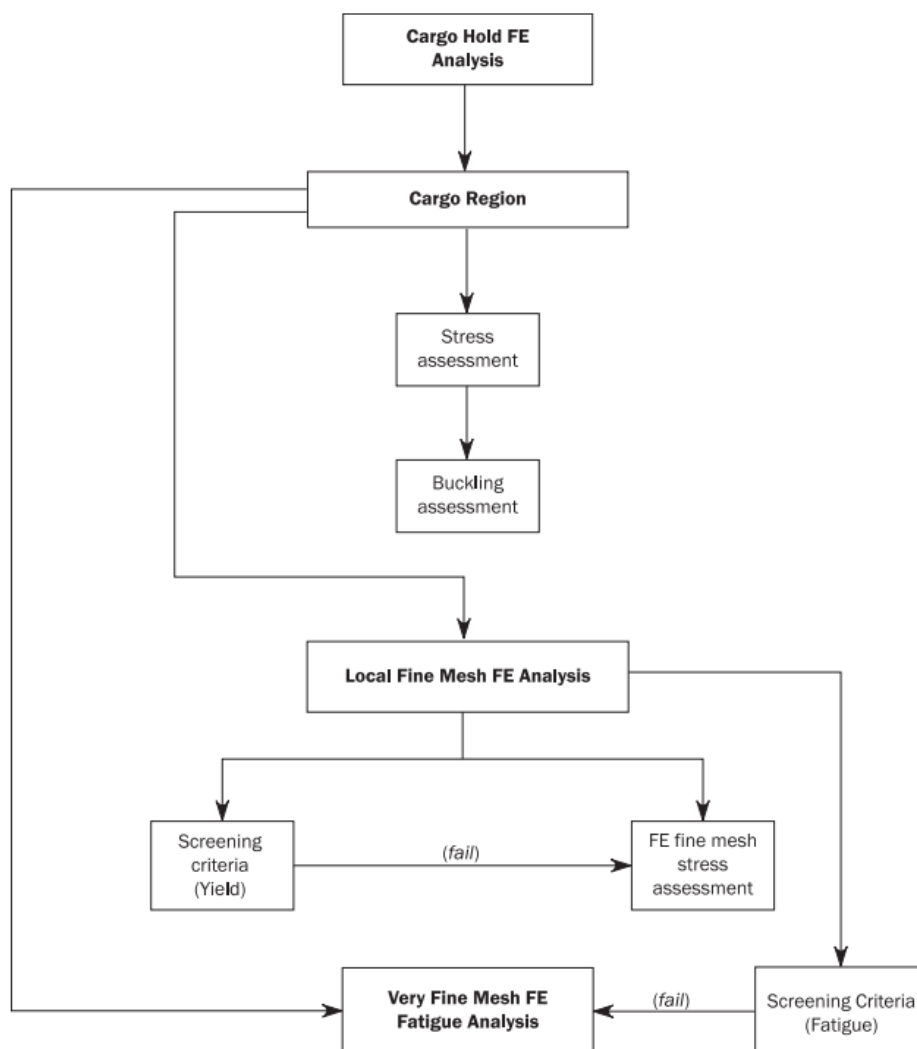
Σχήμα 1.1 : Πρωτεύουσες-δευτερεύουσες-τριτεύουσες ορθές τάσεις.

1.1.3 Έλεγχος αντοχής με πεπερασμένα στοιχεία

Για τον έλεγχο της αντοχής της μεταλλικής κατασκευής της γάστρας του πλοίου χρησιμοποιούνται τα πεπερασμένα στοιχεία. Ο έλεγχος αυτός περιλαμβάνει:

- a) Έλεγχο διαμήκης αντοχής των δεξαμενών φόρτωσης,
- b) Έλεγχο των τάσεων σε τοπικά κατασκευαστικά στοιχεία,
- c) Έλεγχο ικανότητας κόπωσης των τοπικών κατασκευαστικών στοιχείων.

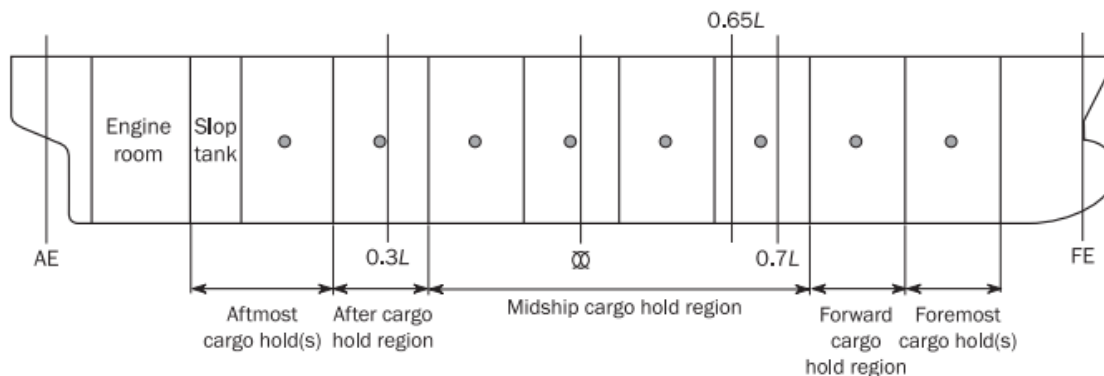
Η ανάλυση μέσω των πεπερασμένων στοιχείων έχει ως σκοπό να επαληθεύσει ότι οι τάσεις που αναπτύσσονται είναι εντός των αποδεκτών ορίων αντοχής, την ικανότητα των μη αλλά και ενισχυμένων πλακών να αντέχουν σε λυγισμό και την ικανότητα σε κόπωση των τοπικών κατασκευαστικών στοιχείων. Η ανάλυση αυτή μέσω των πεπερασμένων στοιχείων περιγράφεται στο διάγραμμα ροής παρακάτω.



Εικόνα 1.4: Διάγραμμα ροής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

Όσον αφορά την ανάλυση αντοχής των δεξαμενών φόρτωσης του πλοίου, αυτές χωρίζονται σε υποπεριοχές κατά το διάμηκες του πλοίου (Εικόνα 1.5):

- Midship cargo hold region,
- Forward cargo hold region,
- After cargo hold region,
- Foremost cargo hold(s),
- Aftmost cargo hold(s).



Εικόνα 1.5: Ορισμός των δεξαμενών φόρτωσης για ανάλυση με (ΠΣ).

Η παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθεί με την περιοχή του Midship cargo hold, και συγκεκριμένα με το διτύθμενο της μέσης τομής.

1.1.4 Βασικό θεωρητικό υποβαθρο πεπερασμένων στοιχείων.

Η βασική ιδέα των πεπερασμένων στοιχείων είναι η αντικατάσταση συνεχών συναρτήσεων με τμηματικές προσεγγίσεις, συνήθως πολυώνυμα.

Με την εφαρμογή των υπολογιστικών τεχνικών και των υπολογιστικών προγραμμάτων είναι δυνατόν να αποφευχθεί η εκτέλεση δαπανηρών και χρονοβόρων πειραμάτων και έτσι να επιταχυνθεί ο έλεγχος των κατασκευών.

Για την ΜΠΣ υπάρχουν πέντε ισοδύναμοι μέθοδοι διατύπωσης της, που οδηγούν στις ίδιες ακριβώς μητρικές εξισώσεις κίνησης.

1. Αρχή των Δυνατών Έργων
2. Ελαχιστοποίηση της Ολικής Ενέργειας
3. Μέθοδος Galerkin
4. Αρχή του Hamilton
5. Μέθοδος των εξισώσεων Lagrange

Ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια της προσομοίωσης, την κρισιμότητα της κατασκευής και τον διαθέσιμο χρόνο ή ανάλογα με μια προκαθορισμένη αμοιβή μελέτης ή προμελέτης, μια κατασκευή μπορεί να μοντελοποιηθεί είτε σαν συνεχές μέσο ή με διακριτά στοιχεία. Μεταξύ αυτών των δύο επιλογών προφανώς η συνεχής μοντελοποίηση είναι η πιο πιστή αναπαράσταση της πραγματικότητας.

Ειδικότερα, παρόλο που οι περισσότερες κατασκευές ή δομές σχηματίζονται από ένα συνεχές μέσο που συγκροτείται από ένα ή περισσότερα υλικά, σε πολλές περιπτώσεις αυτές μπορούν να εξιδανικευτούν με διακριτά δομικά στοιχεία όπως δοκοί (κολώνες, δοκάρια, πλάισια), ράβδοι (δικτυώματα), ελατήρια, πλάκες, κελύφη, τόξα, χορδές, μεμβράνες και αλυσοειδείς.

1.2 Βελτιστοποίηση

Μαθηματική βελτιστοποίηση (βελτιστοποίηση) είναι η επιλογή της κατάλληλης λύσης (με βάση κάποια κριτήρια) από κάποιο σετ με ορισμένες διαθέσιμες εναλλακτικές. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης παρουσιάζονται σε πολλούς κλάδους, από την επιστήμη των υπολογιστών και την μηχανική μέχρι σε επιχειρησιακές έρευνες και στα οικονομικά. Στην πιο απλή του μορφή, ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης απαρτίζεται από την ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης μέσω της συστηματικής επιλογής μεταβλητών εισόδου και υπολογίζοντας τις τιμές της απόκρισης της αντικειμενικής συνάρτησης. Η θεωρία και ο τρόπος επίλυσης των προβλημάτων βελτιστοποίησης βασίζονται σε μια μεγάλη περιοχή των εφαρμοσμένων μαθηματικών. Γενικότερα, η βελτιστοποίηση βρίσκει τις "καλύτερα διαθέσιμες" τιμές ορισμένων αντικειμενικών συναρτήσεων για έναν δεδομένο πρόβλημα. Γενικά, είναι δυνατόν να αναπαρασταθούν τα περισσότερα προβλήματα βελτιστοποίησης στην εξής γενική μαθηματική μορφή:

$$x \in R^n \quad f_i(x) \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (1.14)$$

$$\phi_j(x) = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, J) \quad (1.15)$$

$$\Psi_k(x) \leq 0 \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (1.16)$$

όπου $f_i(x)$, $\phi_j(x)$ και $\Psi_k(x)$ είναι συναρτήσεις του διανύσματος σχεδίασης $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$.

Εδώ τα στοιχεία x_i του διανύσματος σχεδίασης, ονομάζονται μεταβλητές σχεδίασης ή απόφασης και μπορεί να είναι πραγματικές συνεχείς, διακριτές ή μία μίξη τους. Οι συναρτήσεις $f_i(x)$ όπου $i = 1, 2, \dots, M$ ονομάζονται αντικειμενικές συναρτήσεις και στην περίπτωση όπου $M=1$, υπάρχει μόνο μία αντικειμενική συνάρτηση. Ο χώρος που εκτείνονται οι μεταβλητές απόφασης ονομάζεται χώρος σχεδίασης. Καθώς αποτυπώνονται στον χώρο αυτό οι τιμές απόκρισης της αντικειμενικής συνάρτησης δημιουργείται ένας χώρος, ο οποίος ονομάζεται χώρος απόκρισης. Η ισότητα για την $\phi_j(x)$ και η ανισότητα για την $\Psi_k(x)$ ονομάζονται περιορισμοί.

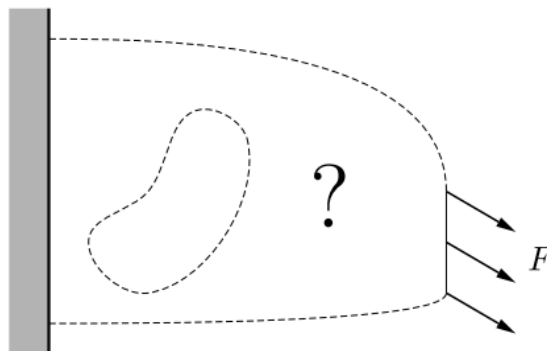
Εάν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να θεωρηθεί εύκολο ή δύσκολο, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και από την μαθηματική προσέγγιση που έχει γίνει στο πρόβλημα. Στην πραγματικότητα, τρεις παράγοντες είναι που κάνουν ένα πρόβλημα πιο απαιτητικό, η μη-γραμμικότητα της αντικειμενικής συνάρτησης, η υψηλή τάξη του προβλήματος και η πολυπλοκότητα του σχήματος που περιγράφει την απόκριση του προβλήματος.

- **Μη-γραμμικότητα και πολυτροπικότητα:** Η υψηλή μη-γραμμικότητα μιας συνάρτησης που επρόκειτο να βελτιστοποιηθεί συνήθως σημαίνει πολυτροπικότητα με πολλαπλά τοπικά ακρότατα, που θεωρούνται ως τοπικά βέλτιστα και οι αλγόριθμοι που θα χρησιμοποιηθούν για να λύσουν το πρόβλημα είναι πολύ πιθανόν να εγκλωβιστούν σε αυτά.
- **Υψηλή τάξη του προβλήματος:** Η υψηλή τάξη του προβλήματος είναι συσχετισμένη με τις μεγάλες αποστάσεις στον χώρο σχεδίασης και ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται δεν έχει την ισχύ, έτσι ώστε να είναι αποτελεσματικός.

- Περιορισμοί: Οι πολλαπλοί περιορισμοί μπορούν να μεταμορφώσουν τον χώρο απόκρισης σε πολύπλοκο με ακανόνιστη γεωμετρία ή σχήματα.

1.3 Βελτιστοποίηση κατασκευών

Βελτιστοποίηση κατασκευών σημαίνει να κάνεις τις ποθητές κατασκευές να αντέχουν τις ίδιες φορτίσεις με πιο αποδοτικό τρόπο (λιγότερο υλικό). Στη βελτιστοποίηση κατασκευών η "καλύτερη" λύση συνήθως συνεπάγεται με το να γίνει η κατασκευή όσο το δυνατόν πιο ελαφριά, δηλαδή να ελαχιστοποιηθεί το βάρος. Μια άλλη σκοπιά της "καλύτερης" λύσης συνεπάγεται με το να γίνει η κατασκευή όσο πιο στιβαρή γίνεται και ακόμα μια είναι η κατασκευή να έχει επαρκής αντοχή στον λυγισμό ή στην αστάθεια.



Σχήμα 1.2: Δομικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Επιλογή καταλληλότερης κατασκευής για την μεταφορά του φορτίου F στην στήριξη.

Φυσικά τέτοια προβλήματα ελαχιστοποίησης ή μεγιστοποίησης δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν χωρίς κανέναν περιορισμό. Για παράδειγμα, εάν δεν υπάρχει κανένας περιορισμός στην ποσότητα του υλικού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, η κατασκευή μπορεί να γίνει στιβαρή χωρίς κάποιο όριο και έτσι να έχουμε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς μια καλά ορισμένη λύση. Οι ποσότητες που συνήθως απαρτίζουν τους περιορισμούς στα προβλήματα βελτιστοποίησης κατασκευών είναι οι τάσεις, οι μετατοπίσεις και γενικά κάποια γεωμετρία. Να σημειωθεί ότι οι περισσότερες ποσότητες που μπορεί να σκεφτεί κάποιος ως περιορισμούς, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως αντικειμενικές συναρτήσεις.

Ο παραδοσιακός μέχρι και σήμερα, κυρίαρχος τρόπος υλοποίησης της βελτιστοποίησης κατασκευών είναι ο επαναλαμβανόμενος-διαισθητικός, ο οποίος περιγράφεται παρακάτω:

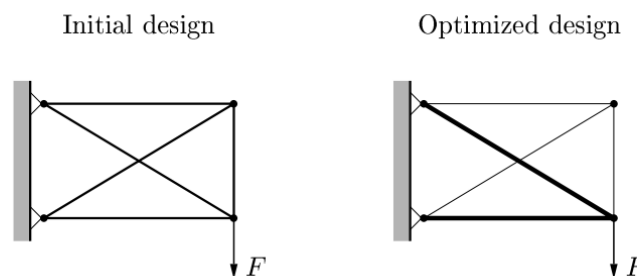
- Ένα συγκεκριμένο σχέδιο προτείνεται,
- Διερευνώνται οι προϋποθέσεις που είναι βασισμένες στην αντικειμενική συνάρτηση,

- c) Εάν δεν ικανοποιούνται, δηλαδή οι τάσεις να είναι πολύ μεγάλες, ένα καινούργιο σχέδιο προτείνεται και ακόμα και εάν οι προϋποθέσεις ικανοποιηθούν το σχέδιο μπορεί να μην είναι το βέλτιστο και έτσι μπορεί να προταθεί πάλι καινούργιο σχέδιο,
- d) Το προτεινόμενο καινούργιο σχέδιο πηγαίνει στο βήμα b).

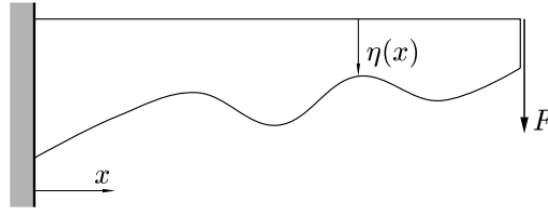
Για μηχανικές κατασκευές, το βήμα b) σήμερα πραγματοποιείται σχεδόν αποκλειστικά μέσω μεθόδων που βασίζονται στον υπολογιστή όπως την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM).

Αναλόγως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τα προβλήματα βελτιστοποίησης κατασκευών χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Παρακάτω η παράμετρος x εκφράζει κάποιο γεωμετρικό χαρακτηριστικό της κατασκευής.

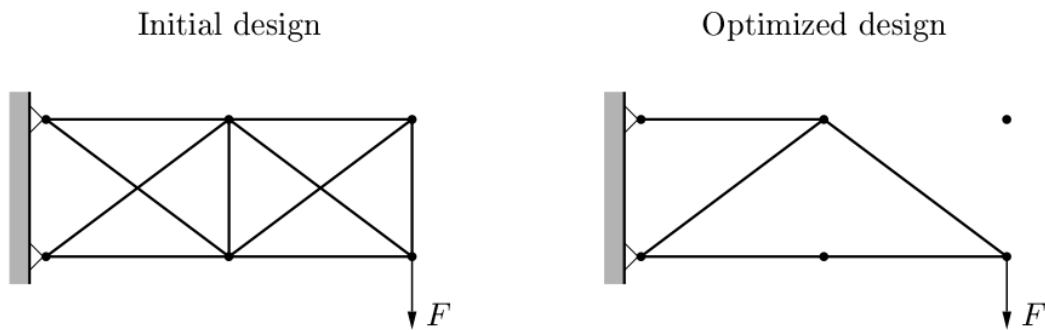
- **Sizing optimization:** Σε αυτή την κατηγορία εμπεριέχονται τα προβλήματα όταν η x εκφράζει το πάχος κάποιου μέρους της κατασκευής.
- **Shape optimization:** Σε αυτή την περίπτωση η x εκφράζει το σχήμα ή το περίγραμμα κάποιου μέρους του ορίου της κατασκευής. Για παράδειγμα εάν θεωρηθεί ένα στερεό σώμα, η κατάσταση του οποίου θα περιγράφεται από ένα σετ μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η βελτιστοποίηση σε αυτή την περίπτωση διαλέγει τον τομέα ολοκλήρωσης για τις διαφορικές εξισώσεις με έναν βέλτιστο τρόπο.
- **Topology optimization:** Αυτή είναι η πιο γενική μορφή βελτιστοποίησης κατασκευών. Έστω μια δικτυωτή κατασκευή, εάν θεωρηθούν ως μεταβλητές σχεδίασης οι διατομές των στοιχείων του δικτύματος και έπειτα εικαστεί ότι οι μεταβλητές αυτές μπορούν να πάρουν και την τιμή μηδέν, έτσι ώστε να αφαιρεθούν από το δικτύωμα, τότε λέγεται ότι η βελτιστοποίηση της κατασκευής αυτής εμπίπτει στην κατηγορία αυτή.



Σχήμα 1.3: Πρόβλημα βελτιστοποίησης Sizing.



Σχήμα 1.4: Πρόβλημα βελτιστοποίησης Shape.



Σχήμα 1.5: Πρόβλημα βελτιστοποίησης Topology.

Η topology optimization δίνει απαντήσεις σε θεμελιώδη ερωτήματα της μηχανικής όπως: πως να τοποθετηθεί το υλικό σε ένα δεδομένο σχεδιασμό έτσι ώστε να αποδίδει την καλύτερη δυνατή δομική απόδοση. Επίσης η συγκεκριμένη κατηγορία βελτιστοποίησης κατασκευών γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλής σε αρκετές βιομηχανίες όπως την αυτοκινητιστική, την αεροναυπηγική και την βαριά βιομηχανία, λόγω της ανάπτυξης και της προώθησης μέσω διαφήμισης των προγραμμάτων Πεπερασμένων Στοιχείων.

1.4 Εφαρμογές της βελτιστοποίησης κατασκευών

- Χημική βιομηχανία.
- Μηχανικά εξαρτήματα.
- Πολιτικούς μηχανικούς.
- Αεροδιαστημική βιομηχανία (Σχεδιασμό αεροσκαφών ή αεροδυναμικός σχεδιασμός).

Στην ναυπηγική βιομηχανία η βελτιστοποίηση κατασκευών δεν είναι τόσο διαδεδομένη όσο στις παραπάνω βιομηχανίες που αναφέρθηκαν, αλλά υπάρχουν κάποια παραδείγματα χρήση της όπως: Ανάπτυξη συνθετικού υλικού για ναυτική χρήση, βελτιστοποίηση εγκάρσιων πτυχωτών φρακτών για chemical tanker και βελτιστοποίηση μέσης τομής για tanker έτσι ώστε να έχει μεγαλύτερη αντοχή σε σύγκρουση.

1.5 Κίνητρο

Στην εργασία αυτή θα ελεγχθεί υπάρχον σχέδιο διπύθμενου Bulk carrier μέσω της βελτιστοποίησης κατασκευών και της μοντελοποίησης του με την μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων και θα διαπιστωθεί εάν υπάρχει περαιτέρω βελτίωση της κατασκευής του για δεδομένες φορτίσεις. Ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του βάρους του. Για την διαδικασία αυτή θα χρησιμοποιηθούν τρεις διαφορετικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης:

- NLPQL
- MOGA
- RSM

Με βάση τα αποτελέσματα θα διαπιστωθεί ποιά από τις τρεις μεθόδους προσεγγίζει το πρόβλημα μας καλύτερα. Δηλαδή ποιά μας δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα αλλά και επίσης θα ληφθεί υπόψιν και ο χρόνος που θα ληφθούν τα αποτελέσματα, που συνεπάγεται με λιγότερη υπολογιστική ισχύς.

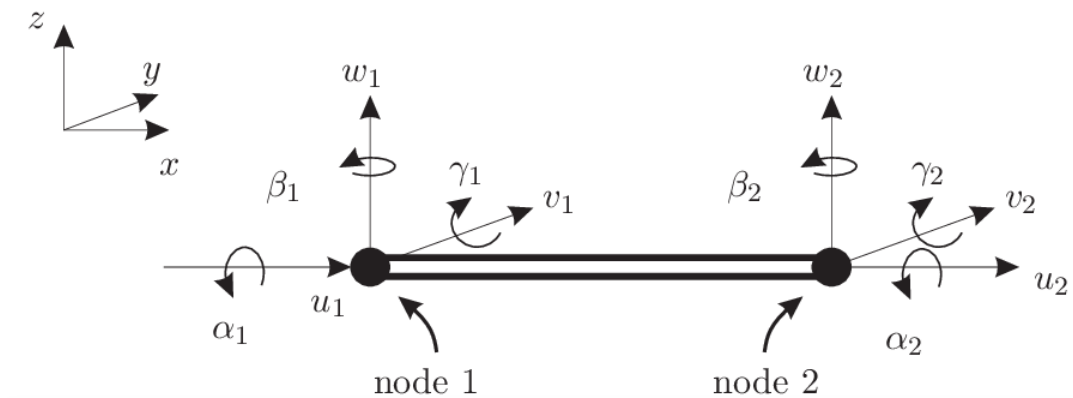
Πριν όμως αρχίσει το κύριο μέρος της εργασίας, θα επιχειρηθεί μέσω ενός παραδείγματος βελτιστοποίησης μιας αμφιαρθρωτής δοκού I-διατομής για δύο συγκεκριμένες καταστάσεις φόρτισης να ληφθούν κάποια αρχικά συμπεράσματα. Έτσι θα διαπιστωθεί πως συμπεριφέρονται οι τρεις προαναφερθείς αλγόριθμοι βελτιστοποίησης αλλά και η μοντελοποίηση της μέσω των Πεπερασμένων Στοιχείων. Επίσης στο παράδειγμα αυτό θα συγκριθούν τα αποτελέσματα που θα προκύψουν μέσω των υπολογιστικών προγραμμάτων, με αυτών της αναλυτικής λύσης του προβλήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Βασικό θεωρητικό υπόβαθρο

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί το θεωρητικό υπόβαθρο των δύο στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν για να γίνει η κατασκευή και η μοντελοποίηση του διπύθμενου μέσω του προγράμματος *Ansys Mechanical APDL*.

2.1 Τρι-διάστατο 2-κομβο στοιχείο δοκού

Το στοιχείο αυτό υπόκειται στην κατηγορία της δοκού. Αρχικά θα θεωρηθεί ότι υπάρχει ένα μόνο πεπερασμένο στοιχείο, με δύο κόμβους 1 και 2, όπου 1 ο αριστερός και 2 στα δεξιά. Επιπλέον θεωρούνται 6 βαθμοί ελευθερίας σε κάθε κόμβο ($u_1, u_1, w_1, \alpha_1, \gamma_1, \beta_1$) και ($u_2, u_2, w_2, \alpha_2, \gamma_2, \beta_2$). Όπου οι τρεις πρώτοι όροι κάθε κόμβου εκφράζουν τις μετατοπίσεις και οι άλλοι τρεις τις περιστροφές. Οπότε συνολικά υπάρχουν 12 βαθμοί ελευθερίας (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Τρι-διάστατο 2-κομβο στοιχείο δοκού.

Το συνολικό μητρώο στιβαρότητας \mathbf{K} για το τρι-διάστατο 2-κόμβο στοιχείο, το οποίο περιέχει και τα τέσσερα δυνατά είδη παραμόρφωσης (εφελκυσμός-θλίψη, στρέψη, κάμψη στο επίπεδο x-y, κάμψη στο επίπεδο x-z) παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.1:

$$\begin{pmatrix}
 \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^2} \\
 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{l^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{l} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2} & 0 & \frac{4EI_y}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_y}{l} & 0 \\
 0 & \frac{6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{l} \\
 -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -\frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{l^2} \\
 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{l^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^3} & 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{l} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2} & 0 & \frac{2EI_y}{l} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & 0 & \frac{4EI_y}{l} & 0 \\
 0 & \frac{6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{l} & 0 & -\frac{6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{l}
 \end{pmatrix}$$

Εικόνα 2.1: Μητρώο στιβαρότητας τρι-διάστατου 2-κομβού στοιχείου δοκού.

όπου:

I_y, I_z : ροπή αδράνειας.

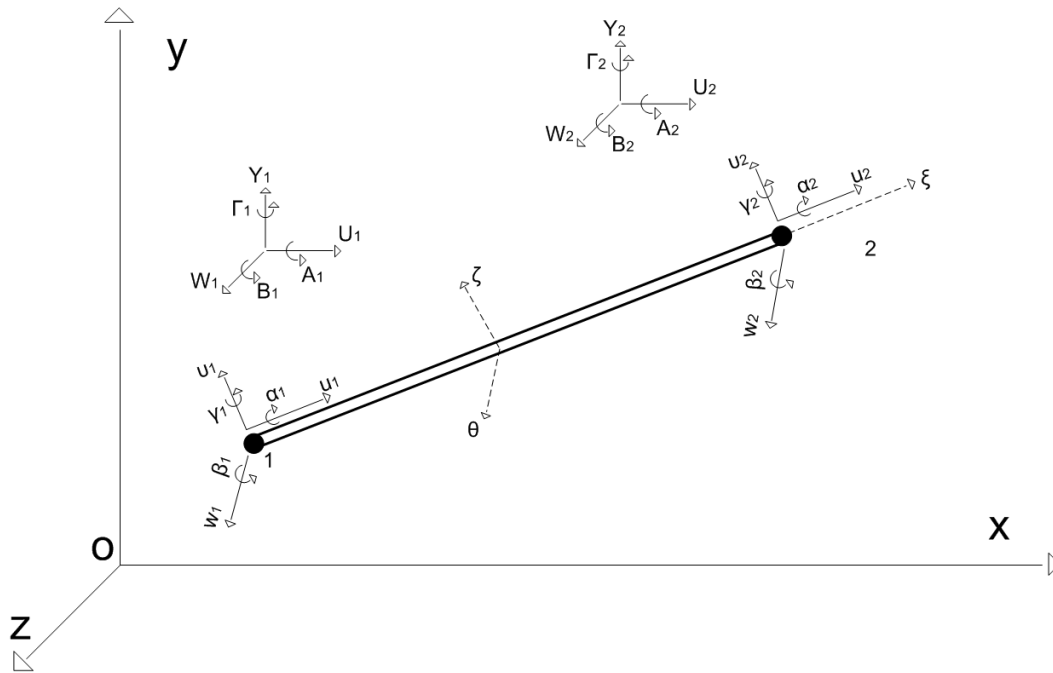
J : ροπή αδράνειας στρέψης.

E : Μέτρο ελαστικότητας.

A : Εγκάρσια διατομή.

Στροφή αξόνων για τρι-διάστατο 2-κομβό στοιχείο δοκού.

Έστω η δοκός που φαίνεται στο Σχήμα 2.2:



Σχήμα 2.2: Τρι-διάστατο 2-κομβο στοιχείο δοκού σε τυχαίο σύστημα συντεταγμένων.

Για να γίνει ο μετασχηματισμός του μητρώου στιβαρότητας από το τοπικό σύστημα Οξζθ (local system) στο καθολικό Οxyz (global system), απαιτούνται τρεις στροφές αξόνων. Σαν σημείο εκκίνησης θα θεωρηθεί το μητρώο στιβαρότητας εκφρασμένο στο τοπικό σύστημα Οξζθ (Σχήμα 2.2).

Η πρώτη στροφή πραγματοποιείται γύρω από τον καθολικό άξονα y κατά γωνία δ , οι άξονες x και z αλλάζουν θέση στον χώρο ενώ ο y παραμένει αμετάβλητος. Σε αυτή την στροφή, οι προβολές Q_1, Q_2, Q_3 ενός τυχαίου διανύσματος Q στους καθολικούς άξονες $x - y - z$ μπορούν να αναλυθούν σε διανυσματικές συνιστώσες ως προς τους νέους άξονες $x_\delta, y_\delta, z_\delta$ που έχουν προκύψει και να εκφραστούν ως:

$$\begin{Bmatrix} Q_{1\delta} \\ Q_{2\delta} \\ Q_{3\delta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & 0 & \sin \delta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \delta & 0 & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

Έτσι το μητρώο μετασχηματισμού συντεταγμένων της πρώτης στροφής είναι:

$$[T_\delta] = \begin{bmatrix} \cos \delta & 0 & \sin \delta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \delta & 0 & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Η δεύτερη περιστροφή αφορά το σύστημα των αξόνων που έχει προκύψει μετά την πρώτη περιστροφή. Έστω ότι στρέφονται γύρω από τον άξονα z_δ κατά γωνία κ , οι άξονες x_δ και y_δ αλλάζουν

θέση στον χώρο ενώ ο z_δ παραμένει αμετάβλητος. Οι συνιστώσες $Q_{1\delta}, Q_{2\delta}, Q_{3\delta}$ ως προς τους άξονες $x_\delta, y_\delta, z_\delta$ μπορούν τώρα να αναλυθούν στις συνιστώσες $Q_{1\kappa}, Q_{2\kappa}, Q_{3\kappa}$ ως προς το σύστημα αξόνων $x_\kappa, y_\kappa, z_\kappa$ σύμφωνα με την σχέση:

$$\begin{cases} Q_{1\kappa} \\ Q_{2\kappa} \\ Q_{3\kappa} \end{cases} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} Q_{1\delta} \\ Q_{2\delta} \\ Q_{3\delta} \end{cases} \quad (2.3)$$

Έτσι το μητρώο μετασχηματισμού που αντιστοιχεί στην δεύτερη περιστροφή είναι:

$$[T_\kappa] = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Η τρίτη περιστροφή αφορά τους άξονες $x_\kappa, y_\kappa, z_\kappa$, γίνεται περιστροφή κατά γωνία λ γύρω από τον άξονα x_κ . Οι άξονες y_κ, z_κ περιστρέφονται ενώ ο x_κ παραμένει σταθερός. Οι συνιστώσες $Q_{1\lambda}, Q_{2\lambda}, Q_{3\lambda}$ μπορούν να εκφραστούν σε όρους $Q_{1\kappa}, Q_{2\kappa}, Q_{3\kappa}$ αναφορικά με τους άξονες $x_\lambda, y_\lambda, z_\lambda$ ως:

$$\begin{cases} Q_{1\lambda} \\ Q_{2\lambda} \\ Q_{3\lambda} \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \lambda & \sin \lambda \\ 0 & -\sin \lambda & \cos \lambda \end{bmatrix} \begin{cases} Q_{1\kappa} \\ Q_{2\kappa} \\ Q_{3\kappa} \end{cases} \quad (2.5)$$

οπότε το αντίστοιχο μητρώο μετασχηματισμού είναι:

$$[T_\lambda] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \lambda & \sin \lambda \\ 0 & -\sin \lambda & \cos \lambda \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.1), (2.3), (2.5), οι συνιστώσες του διανύσματος με αναφορά τους καθολικούς άξονες μπορεί να αναλυθεί σε συνιστώσες ως προς τους τοπικούς άξονες. Έτσι,

$$\{Q_{\xi\zeta\theta}\} = [T_\delta][T_\kappa][T_\lambda]\{Q\} \quad (2.7)$$

δηλαδή, $\{Q_{\xi\zeta\theta}\} = [T]\{Q\}$

όπου $[T] = [T_\delta][T_\kappa][T_\lambda]$

Η σχέση (2.7) μπορεί να γραφτεί σαν:

$$\{Q_{local}\} = [T]\{Q_{global}\} \quad (2.8)$$

όπου T είναι το μητρώο στροφής που συσχετίζει τους τοπικούς Β.Ε. με τους καθολικούς Β.Ε.

Επίσης για ολόκληρη την κατασκευή μπορεί να υπολογιστεί το ολικό μητρώο στιβαρότητας της μέσω της σχέσης:

$$K_{structure} = \sum_{k=1}^m T^T \cdot K_G \cdot T \quad (2.9)$$

όπου m ο αριθμός των δοκών ή πεπερασμένων στοιχείων που απαρτίζουν την κατασκευή.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί τι εκφράζει ένας τυχαίος συντελεστής του μητρώου στιβαρότητας K_{ij} . Ο συντελεστής k_{ij} ισούται με την δύναμη F_i που προκύπτει όταν όλες οι μετακινήσεις των κόμβων είναι μηδέν ($u_j = 0, j = 1, \dots, j-1, j+1, \dots, n$) εκτός από την $u_j = 1$.

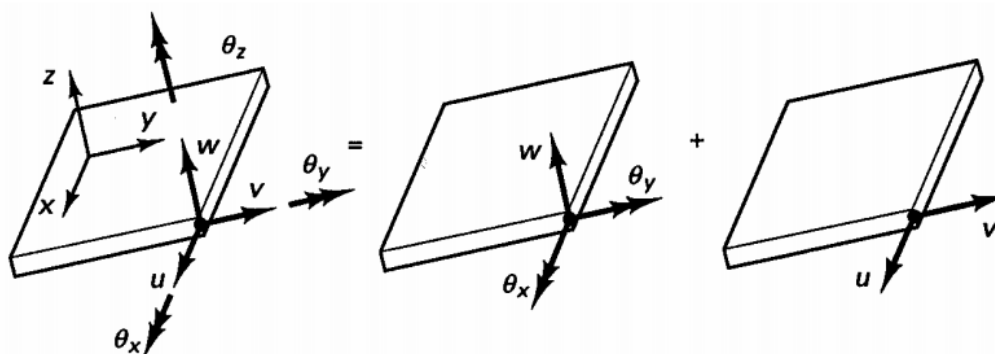
2.2 Τρι-διάστατο 4-κομβο στοιχείο πλάκας

Όπως και για το πεπερασμένο στοιχείο της κατηγορίας δοκού, έτσι και για τα ορθογώνια ελάσματα (ορθογώνιο επίπεδο στοιχείο-κέλυφος) η συμπεριφορά τους καθορίζεται πλήρως από το μητρώο ακαμψίας τους.

Η διαδικασία διατύπωσης του μητρώου ακαμψίας περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

1. Επιλογή συστήματος αναφοράς και αρίθμηση κόμβων στοιχείου.
2. Επιλογή συνάρτησης συμβιβαστού των μετατοπίσεων (πεδίου-κόμβων).
3. Προσδιορισμός των μετατοπίσεων πεδίου συναρτήσει των μετατοπίσεων στους κόμβους.
4. Σχέσεις παραμορφώσεων πεδίου με μετατοπίσεις στους κόμβους μέσω μετατοπίσεων πεδίου.
5. Σχέση τάσεων πεδίου με παραμορφώσεις πεδίου και μετατοπίσεις στους κόμβους.
6. Αντικατάσταση τάσεων πεδίου με στατικά ισοδύναμες δυνάμεις στους κόμβους.
7. Σχέση δυνάμεων στους κόμβους με μετατοπίσεις στους κόμβους. Σύνταξη μητρώου ακαμψίας στοιχείου.
8. Διατύπωση μητρώου συμβιβαστού των μετατοπίσεων.

Το μητρώο στιβαρότητας του στοιχείου κελύφους (Shell) προκύπτει από την επαλληλία της επίπεδης εντατικής κατάστασης και της κάμψης. Επομένως εάν γίνει υπέρθεση της καμπτικής συμπεριφοράς του ορθογωνίου στοιχείου-κάμψης στο ορθογώνιο στοιχείο επίπεδης εντατικής κατάστασης, τότε είναι δυνατό να αναπτυχθεί ένα επίπεδο στοιχείο-κέλυφος (shell). Το αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



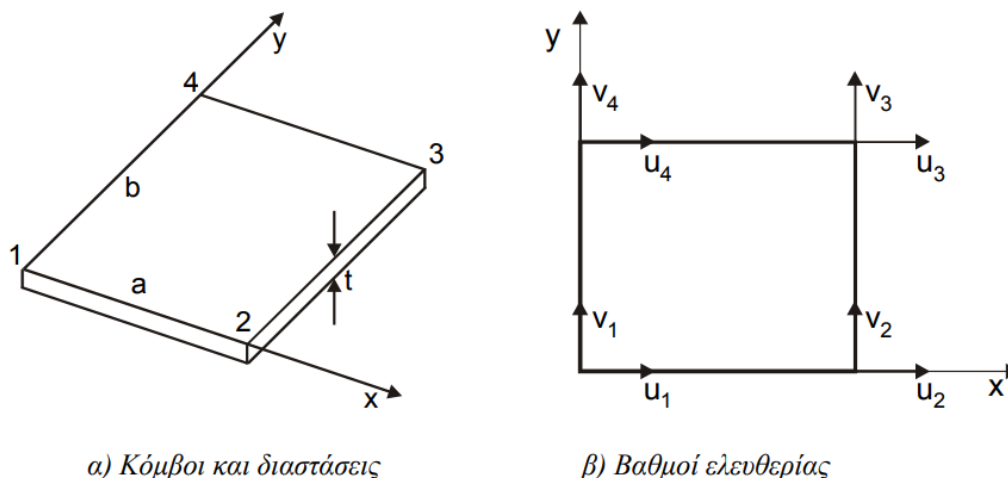
Σχήμα 2.3: Ορθογώνιο επίπεδο στοιχείο-κέλυφος.

Εάν τα μητρώα ακαμψίας σε κάμψη και επίπεδη εντατική κατάσταση είναι K_B και K_M αντίστοιχα, στο τοπικό σύστημα αναφοράς, το μητρώο ακαμψίας του στοιχείου-κελύφους είναι:

$$K_S = \begin{bmatrix} K_B & 0 \\ 0 & K_M \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Στη σχέση αυτή το μητρώο K_S έχει διαστάσεις 20x20 ενώ τα μητρώα K_B και K_M έχουν διαστάσεις 12x12 και 8x8 αντίστοιχα. Για την μετατροπή στο γενικό σύστημα αναφοράς της κατασκευής απαιτείται ο μετασχηματισμός $K_S = T^T \cdot K_S \cdot T$, όπου T μητρώο μετασχηματισμού.

Ορθογώνιο στοιχείο επίπεδης εντατικής κατάστασης

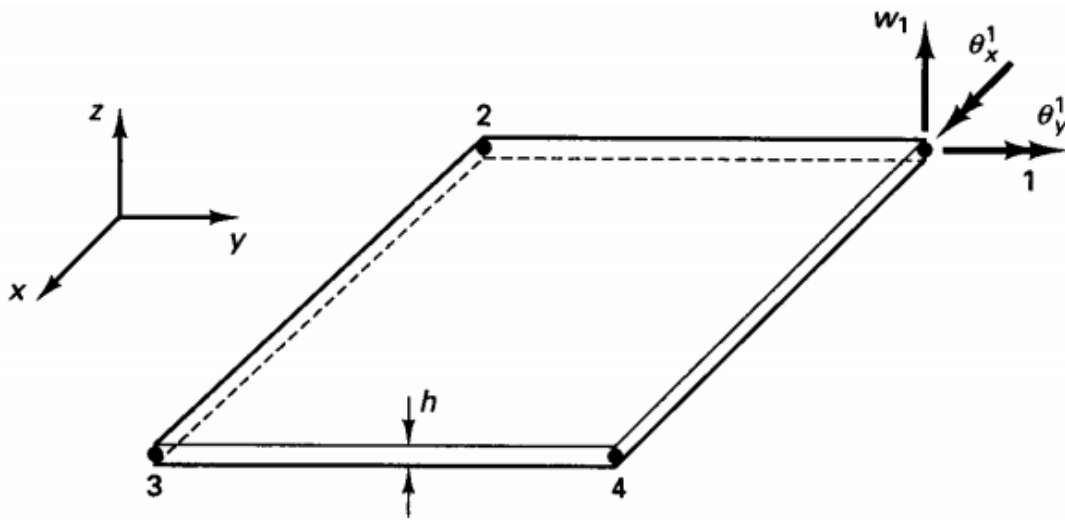


α) Κόμβοι και διαστάσεις

β) Βαθμοί ελευθερίας

Σχήμα 2.4: Ορθογώνιο στοιχείο γραμμικών παραμορφώσεων.

Ορθογώνιο στοιχείο κάμψης



Σχήμα 2.5: Ορθογώνιο στοιχείο κάμψης.

Όπως δείχνει το Σχήμα 2.5, σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν τρεις ΒΕ σε κάθε κόμβο. Απαιτούνται συνεπώς 12 γενικευμένες μετατοπίσεις $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{12}$ στο πολυώνυμο που συντάσσεται για το βέλος κάμψης. Το πολυώνυμο είναι:

$$w = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 + a_7x^3 + a_8x^2y + a_9xy^2 + a_{10}y^3 + a_{11}x^3y + a_{12}xy^3 \quad (2.17)$$

Αντίστοιχα ακολουθώντας τα βήματα που έχουν αναφερθεί παραπάνω προκύπτει το μητρώο ακαμψίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Μέθοδοι βελτιστοποίησης

3.1 NLPQL

Ο αλγόριθμος NLPQL είναι μία διαφορετική εκδοχή του Διαδοχικού Τετραγωνικού Προγραμματισμού (SQP). Ο SQP είναι μια συνηθισμένη μέθοδος βελτιστοποίησης, που βασίζεται στην χρήση της κλίσης της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών, έτσι ώστε να λύσει μη-γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης. Ως μη-γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης χαρακτηρίζονται εκείνα που έχουν μόνο μία αντικειμενική συνάρτηση. Οι δύο προαναφερθείς αλγόριθμοι χαρακτηρίζονται ως ντετερμινιστικοί.

Γενικά οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι κατασκευάζουν προσεγγιστικά την αντικειμενική συνάρτηση από τις τοπικές πληροφορίες και έπειτα προσπαθούν να επικεντρωθούν στις περιοχές όπου υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να βρεθεί κάποια λύση.

Η λύση p^* χαρακτηρίζεται ως ολικό βέλτιστο, εάν για την αντικειμενική συνάρτηση ισχύει :

$$\psi(p^*) \leq \psi(p) , \forall p \in R^n \quad (3.1)$$

και ως τοπικό βέλτιστο, όταν υπάρχει ένα ανοιχτό σύνολο U γύρω από το p^* , τέτοιο ώστε :

$$\psi(p^*) \leq \psi(p) , \forall p \in U \subset R^n \quad (3.2)$$

Στους ντετερμινιστικούς αλγορίθμους κάθε επανάληψη αποτελείται από τρία επιμέρους βήματα:

1. Καθορισμός κατεύθυνσης αναζήτησης $s^{(i)}$ στο σημείο $p^{(i)}$, τέτοια ώστε η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης $\psi(p)$ τοπικά να ελαττώνεται εφόσον το p κινείται στην κατεύθυνση $s^{(i)}$.

2. Εκτέλεση αναζήτησης κατά μήκος της γραμμής που δίνεται από την σχέση:

$$p(a) = p^{(i)} + a s^{(i)} , a > 0 \quad (3.3)$$

Το αποτέλεσμα αυτής της αναζήτησης είναι $a^{(i)}$, όπου η τιμή $\psi(p(a^{(i)}))$ φτάνει το ελάχιστό της, κατά το μήκος της γραμμής, ή τουλάχιστον υπάρχει κάποια σημαντική μείωση.

3. Το καινούργιο σημείο $p(a^{(i)}) = p^{(i)} + a^{(i)}s^{(i)}$, είναι το σημείο εκκίνησης για την επόμενη επανάληψη ή το τελικό αποτέλεσμα του προβλήματος βελτιστοποίησης, εάν ικανοποιούνται τα κριτήρια σύγκλισης που έχουν θεωρηθεί.

Οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης έχουν συνήθως το πλεονέκτημα να συγκλίνουν γρήγορα σε τοπικό βέλτιστο. Για αυτό τον λόγο χρησιμοποιούνται συχνά για την βελτιστοποίηση μηχανικών συστημάτων. Φυσικά, ο ρυθμός σύγκλισης εξαρτάται επίσης και από την παραγωγισιμότητα και την κυρτότητα. Όμως οι δύο προαναφερθείσες ιδιότητες είναι δύσκολο να επιτευχθούν για πολύπλοκα μη-γραμμικά συστήματα και επομένως δεν μπορεί σίγουρα να εγγυηθεί σύγκλιση. Επομένως χρειάζεται ορισμένη εμπειρία σε συγκεκριμένα προβλήματα και αλγορίθμους βελτιστοποίησης, έτσι ώστε να υπάρχει η επιθυμητή συμπεριφορά. Λόγω της μεγάλης μη-γραμμικότητας των προβλημάτων στην μηχανική, υπάρχουν συχνά αρκετά τοπικά βέλτιστα και έτσι δεν

υπάρχει αμιγώς μαθηματικός τρόπος ώστε να βρεθεί το ολικό βέλτιστο με ντετερμινιστικούς αλγορίθμους.

Ο κώδικας του αλγόριθμου NLPQL σχεδιάστηκε ώστε να μπορεί να λύνει μη-γραμμικά προβλήματα με περιορισμούς:

$$\min f(x)$$

$$g_j(x) = 0, \quad j=1, \dots, m_e \quad (3.4)$$

$$g_j(x) \geq 0, \quad j=m_e+1, \dots, m \quad (3.5)$$

$$x_q \leq x \leq x_u$$

$$x \in R^n$$

Αυτή η μέθοδος βελτιστοποίησης δημιουργεί μια σειρά από τετραγωνικά υποπρογράμματα προγραμματισμού, τα οποία λύνονται διαδοχικά. Κατά την εφαρμογή του παραπάνω αλγόριθμου γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

- Το πρόβλημα να είναι ομαλό: Οι συναρτήσεις του προβλήματος είναι συνεχείς παραγωγίσιμες στο σύνολο $U = \{x \in R^n : x_q \leq x \leq x_u\}$. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συναρτήσεις f και g_j , $j=1, \dots, m$, πρέπει να οριστούν μόνο στο σύνολο U , εφόσον οι επαναλήψεις που υπολογίζονται από τον αλγόριθμο δεν θα υπερβούν ποτέ τα άνω και κάτω όρια.
- Το πρόβλημα να είναι μικρό: Το μέγεθος του προβλήματος εξαρτάται από την υπολογιστική ισχύ που υπάρχει διαθέσιμη και από την ικανότητα της τετραγωνικής προγραμματιστικής ρουτίνας να λύσει μεγάλα προβλήματα.

Η λαγκρανζιανή συνάρτηση είναι: $L(p_e, u) = f(p_e) - \sum_{i=1}^m u_i g_j(p_e)$, όπου το u είναι ο λαγκραζιανός πολλαπλασιαστής.

$$g_j(p_e) = p_e^{(j-m)} - (p_e)_t^{(j-m)}, \quad j = m+1, \dots, m+n \quad (3.6)$$

$$g_j(p_e) = (p_e)_h^{(j-m-n)} - p_e^{(j-m-n)}, \quad j = m+n+1, \dots, m \quad (3.7)$$

υποπρόβλημα

$$\min \frac{1}{2} d^T B_k d + \nabla f((p_e)_k)^T d$$

s.t.

$$\nabla g_j((p_e)_k)^T d + g_j((p_e)_k) = 0, \quad j = 1, \dots, m_e \quad (3.8)$$

$$\nabla g_j((p_e)_k)^T d + g_j((p_e)_k) \geq 0, \quad j = m_e+1, \dots, m \quad (3.9)$$

$$p_l - (p_e)_k \leq p \leq p_h - (p_e)_k$$

d είναι η κατεύθυνση αναζήτησης.

$$\text{Γραμμή αναζήτησης: } (p_e)_{k+1} = p_e)_k + a_k d_k$$

3.2 MOGA

Ο στόχος της βελτιστοποίησης με πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις είναι να βρεθεί ένα σετ λύσεων που ονομάζεται Pareto-optimal για ένα ορισμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης το οποίο έχει πολλαπλούς στόχους.

Ας θεωρηθεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με n στόχους που πρέπει να επιτευχθούν επομένως και n αντίστοιχες αντικειμενικές συναρτήσεις.

$$\text{Μεγιστοποίηση } f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$$

όπου $f_1(\cdot), f_2(\cdot), \dots, f_n(\cdot)$, οι αντικειμενικές συναρτήσεις. Μπορεί να θεωρηθεί ότι όλες οι συναρτήσεις θα μεγιστοποιηθούν χωρίς να χαθεί η γενικότητα. Όταν υπάρχουν οι επακόλουθες ανισότητες μεταξύ δύο λύσεων x και y , η λύση y λέγεται ότι κυριαρχεί την λύση x :

$$\forall i : f_i(x) \leq f_i(y) \quad \& \quad \exists j : f_j(x) < f_j(y)$$

Με άλλα λόγια η λύση y κυριαρχεί της λύσης x , εάν η y δεν είναι χειρότερη από την x σε όλους τους στόχους και όταν η y είναι αυστηρά καλύτερα από την x σε τουλάχιστον έναν στόχο. Οι λύσεις που δεν κυριαρχούνται από καμία άλλη λύση σε έναν συγκεκριμένο πληθυσμό λέγονται ότι είναι μη κυριαρχούμενες και απαρτίζουν το Pareto-optimal σετ.

Όταν χρησιμοποιούνται ευρετικοί αλγόριθμοι αναζήτησης, όπως είναι και οι γενετικοί αλγόριθμοι, για να βρεθούν οι Pareto-optimal λύσεις, συνήθως δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί με βεβαιότητα ότι οι προκύπτουσες λύσεις είναι οι βέλτιστες. Είναι σίγουρο όμως ότι κάθε μία από τις προκύπτουσες λύσεις δεν είναι κυριαρχούμενη από καμία άλλη λύση που εξετάστηκε κατά την διάρκεια της εκτέλεσης των αλγορίθμων. Επομένως οι προκύπτουσες λύσεις από ευρετικούς αλγορίθμους αναφέρονται και ως "nondominated" λύσεις.

Στον αλγόριθμο MOGA, που εμπίπτει στην στοχαστική μέθοδο αναζήτησης, το άθροισμα βάρους των n αντικειμενικών συναρτήσεων χρησιμοποιείται ως συνάρτηση προσέγγισης :

$$f(x) = w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) + \dots + w_n f_n(x) \quad (3.10)$$

όπου w_1, \dots, w_n είναι μη αρνητικά βάρη για τις n αντικειμενικές συναρτήσεις, τα οποία ικανοποιούν τις ακόλουθες σχέσεις:

$$w_i \geq 0 \text{ για } i = 1, 2, \dots, n \quad (3.11)$$

$$w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1 \quad (3.12)$$

Η συνάρτηση προσέγγισης εφαρμόζεται όταν ένα ζευγάρι από γονικές λύσεις επιλέγονται για να παράγουν μία νέα λύση μέσω μίξης και μετάλλαξης. Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα του MOGA είναι ότι τυχαία ορίζει τιμές βαρών όταν ένα ζευγάρι γονικών λύσεων επιλέγονται. Έτσι κάθε επιλογή εκτελείται

βασισμένη σε διαφορετικό διάνυσμα βάρους. Αυτό σημαίνει ότι κάθε καινούργια λύση που δημιουργείται από τις γενετικές διαδικασίες έχει το δικό της διάνυσμα βάρους.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό γνώρισμα είναι ότι αποθηκεύει δύο διαφορετικά σετ λύσεων: Έναν τρέχων πληθυσμό και ένα προσωρινό σετ από "nondominated" λύσεις. Λόγω αυτής της αποθήκευσης, καθεμία από τις "nondominated" λύσεις που βρίσκεται κατά την εκτέλεση του αλγόριθμου αποθηκεύεται στο σετ με τις "nondominated" λύσεις.

Διαδικασία Επιλογής

Όταν ένα ζευγάρι από γονικές λύσεις επιλέγονται από έναν τρέχων πληθυσμό για να δημιουργήσουν έναν απόγονο μέσω της γενετικής διαδικασίας, αρχικά n τιμές βαρών (w_1, w_2, \dots, w_n) ορίζονται τυχαία όπως ακολουθεί:

$$w_i = \text{random}_i / (\text{random}_1 + \dots + \text{random}_n), i = 1, 2, \dots, n \quad (3.13)$$

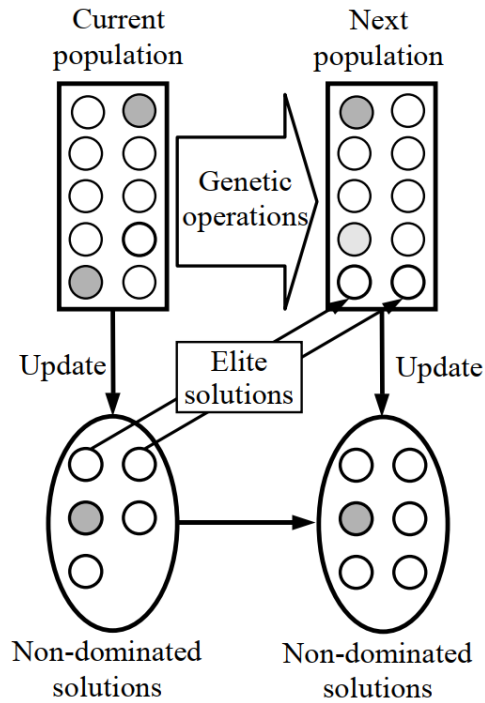
όπου random_i μη αρνητικοί τυχαίοι πραγματικοί αριθμοί.

Για παράδειγμα, όταν N ζευγάρια από γονικές λύσεις επιλέγονται για να δημιουργήσουν έναν καινούργιο πληθυσμό, N διαφορετικές τιμές βαρών ορίζονται από την σχέση (3.13). Αυτό συνεπάγεται ότι N κατευθύνσεις αναζήτησης χρησιμοποιούνται σε μία γενιά. Με άλλα λόγια, κάθε επιλογή διέπεται από διαφορετική συνάρτηση προσέγγισης.

Στρατηγική Ελιτισμού

Ο MOGA όπως έχει ήδη αναφερθεί αποθηκεύει δύο διαφορετικά σετ λύσεων: Έναν τρέχων πληθυσμό και ένα προσωρινό σετ από "nondominated" λύσεις. Έπειτα από τις γενετικές διαδικασίες που εφαρμόζονται σε κάθε λύση, ο τρέχων πληθυσμός αντικαθιστάται από τις καινούργιες λύσεις που προκύπτουν. Το προσωρινό σετ από τις "nondominated" λύσεις ανανεώνεται και αυτό από τις προκύπτουσες λύσεις. Έτσι εάν μια λύση που προκύπτει από τις γενετικές διαδικασίες δεν κυριαρχείται από άλλη λύση στον καινούργιο προκύπτον τρέχων πληθυσμό και στο προσωρινό σετ των "nondominated" λύσεων, τότε η λύση αυτή προστίθεται στο προσωρινό σετ. Έπειτα όλες οι λύσεις που κυριαρχούνται από την πρόσφατα προστιθέμενη αφαιρούνται από το προσωρινό σετ. Με τον τρόπο αυτό, το προσωρινό σετ των "nondominated" λύσεων ανανεώνεται σε κάθε γενιά του MOGA.

Από το σετ των "nondominated" λύσεων, επιλέγονται τυχαία μερικές λύσεις και προστίθενται στον τρέχων πληθυσμό. Οι τυχαία επιλεγμένες "nondominated" λύσεις μπορούν να θεωρηθούν ως ελιτιστικές λύσεις, διότι προστίθενται στον τρέχων πληθυσμό χωρίς γενετικές διαδικασίες. Η διαδικασία που περιγράφεται, φαίνεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Απεικόνιση αλγορίθμου MOGA.

Αλγόριθμος

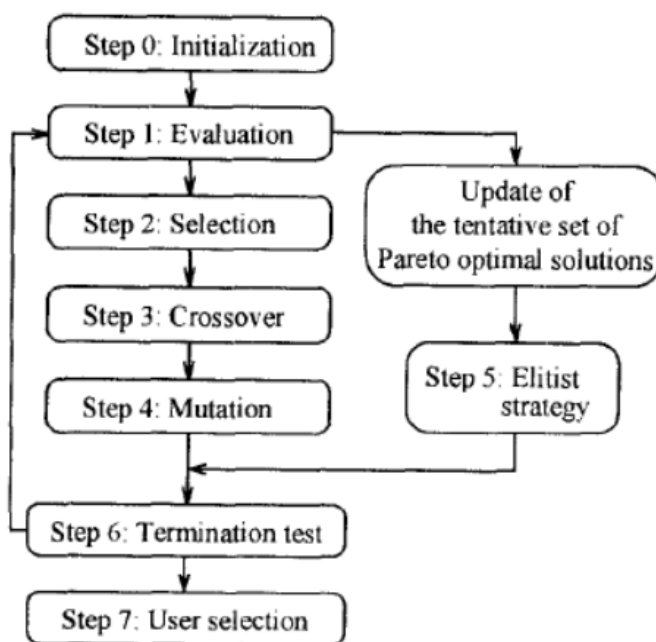
Ας θεωρηθεί ο πληθυσμός με μέγεθος N_{pop} και ακόμα ας θεωρηθεί ο αριθμός των "nondominated" λύσεων που προστίθενται στον τρέχων πληθυσμό ως N_{elite} . Χρησιμοποιώντας αυτούς τους συμβολισμούς, η διαδικασία του αλγορίθμου MOGA μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως εξής:

1. Αρχικοποίηση : Τυχαία παράγεται ένας αρχικός πληθυσμός με N_{pop} λύσεις.
2. Εκτίμηση : Υπολογισμός των τιμών των n αντικειμενικών συναρτήσεων για κάθε λύση στον τρέχων πληθυσμό. Έπειτα ανανεώνεται το προσωρινό σεντ των "nondominated" λύσεων.
3. Επιλογή : Επανάληψη των επακόλουθων διαδικασιών για την επιλογή ($N_{pop} - N_{elite}$) ζευγαριών γονικών λύσεων.
 - Τυχαία ορίζονται οι τιμές των βαρών w_1, \dots, w_n στην συνάρτηση προσέγγισης (3.10) από την σχέση (3.13).
 - Σύμφωνα με την ακόλουθη επιλογή πιθανότητας $P(x)$, επιλέγεται ένα ζευγάρι γονικών λύσεων από τον τρέχων πληθυσμό Ψ .

$$P(x) = \frac{f(x) - f_{min}(\Psi)}{\sum_{x \in \Psi} \{f(x) - f_{min}(\Psi)\}} \quad (3.14)$$

όπου $f_{min}(\Psi)$ είναι το ελάχιστο της συνάρτησης προσέγγισης στον τρέχων πληθυσμό Ψ .

4. Μίξη & Μετάλλαξη : Εφαρμογή της μίξης για κάθε ένα από τα επιλεγμένα ($N_{pop} - N_{elite}$) ζευγάρια γονικών λύσεων. Μία νέα λύση δημιουργείται από κάθε ένα ζευγάρι. Έπειτα γίνεται η εφαρμογή της μετάλλαξης στις καινούργιες λύσεις που προέκυψαν πριν.
5. Ελιτιστική Στρατηγική : Τυχαία επιλέγονται N_{elite} λύσεις από το προσωρινό σετ των "nondominated" λύσεων και προστίθενται στις ($N_{pop} - N_{elite}$) λύσεις που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο βήμα έτσι ώστε να δημιουργηθεί ο πληθυσμός με τις N_{pop} λύσεις.
6. Τεστ Τερματισμού : Εάν η προκαθορισμένη κατάσταση τερματισμού ικανοποιείται ο αλγόριθμος σταματάει, διαφορετικά γίνεται επιστροφή στο βήμα 2.



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου MOGA.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (GA) είναι ένα είδος αυτοπροσαρμοστικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Σε αντίθεση με τους συμβατικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης, ο γενετικός αλγόριθμος είναι βασισμένος στον πληθυσμό, στον οποίο κάθε πιθανή λύση μέσα σε αυτόν εξελίσσεται παράλληλα και το τελικό αποτέλεσμα-σετ λύσεων συμπεριλαμβάνεται στον τελευταίο πληθυσμό. Η εξέλιξη του πληθυσμού εξαρτάται από κάποιους γενετικούς συντελεστές που επιδρούν στον τρέχων πληθυσμό και συνήθως είναι η μίξη και η μετάλλαξη.

Η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση πολλαπλών και πιθανόν ανταγωνιστικών αντικειμενικών συναρτήσεων διαφοροποιείται, από τους αλγόριθμους βελτιστοποίησης με μόνο μια αντικειμενική συνάρτηση, στο ότι σπάνια προκύπτει μία και τέλεια λύση, αλλά συνήθως προκύπτει ένα σετ από εναλλακτικές λύσεις που ονομάζεται "nondominated" σετ λύσεων ή σετ Pareto. Αυτές οι λύσεις είναι βέλτιστες με μία πιο ευρεία έννοια, στο ότι καμία άλλη λύση στο χώρο που έχει ελεγχθεί δεν είναι ανώτερη από αυτές όταν

όλοι οι στόχοι ικανοποιούνται. Ο κύριος στόχος των αλγορίθμων βελτιστοποίησης με πολλαπλούς στόχους είναι να βρουν μία ή πολλαπλές αποδεκτές λύσεις στο Pareto σετ.

Pareto-Based Approaches.

Ο σκοπός της χρήσης του σετ λύσεων Pareto, σε μια βελτιστοποίηση με παραπάνω από μια αντικειμενικές συναρτήσεις, είναι το να βρεθεί αρχικά ένα σετ λύσεων μέσα από έναν πληθυσμό, το οποίο να είναι Pareto non-dominated. Στη συνέχεια σε αυτό το σετ λύσεων ανατίθεται η υψηλότερη βαθμίδα (rank) και δεν μπορούν να επιλεγθούν ξανά. Έπειτα ένα άλλο σετ Pareto non-dominated λύσεων καθορίζεται από τον εναπομείναντα πληθυσμό και ανατίθεται και σε αυτές η επόμενη υψηλότερη βαθμίδα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου όλος ο πληθυσμός να είναι κατάλληλα ταξινομημένος.

Ένα πλεονέκτημα της ταξινόμησης κατά Pareto είναι ότι, εάν μία λύση θεωρείται ότι είναι βέλτιστη σε μία από τις αντικειμενικές συναρτήσεις χωρίς να είναι ταυτόχρονα από τις βέλτιστες στις υπόλοιπες αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος, ξεχωρίζει ούτως ή άλλως. Επομένως οι λύσεις οι οποίες παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά σε πολλές αντικειμενικές συναρτήσεις του ίδιου προβλήματος είναι πιο πιθανόν να έχουν παραχθεί από ανασυνδυασμό. Δηλαδή το σετ των βέλτιστων λύσεων που θα προκύψει δεν θα είναι από τον συνδυασμό όλων των αντικειμενικών συναρτήσεων σε μία καινούργια, όπως γίνεται σε άλλους γενετικούς αλγορίθμους.

3.3 RSM

Τα μοντέλα βασισμένα στο RSM είναι ακριβή μόνο για στενό εύρος των καταχωρημένων παραμέτρων. Η επιφάνεια που δημιουργείται από γραμμικά μοντέλα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υποδείξει την κατεύθυνση στην οποία το αρχικό πρόβλημα πρέπει να τοποθετηθεί έτσι ώστε να επιτευχθούν οι βέλτιστες συνθήκες.

Η βασική διαδικασία του RSM περιλαμβάνει την επιλογή περιορισμένου αριθμού σημείων, στα οποία ο αλγόριθμος θα τρέξει, συνήθως χρησιμοποιώντας DOE (Design Of Experiment) μεθόδους. Έπειτα, όταν παραχθούν τα σημεία μέσω του DOE, η επιφάνεια της απόκρισης (καμπύλη εφαρμογής) κατασκευάζεται δια μέσου ή κοντά στα δεδομένα (σημεία) που είχαν προκύψει προηγουμένως. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση του προβλήματος στην προκύπτουσα επιφάνεια έτσι ώστε να βρεθούν καινούργιοι και καλύτεροι συνδυασμοί των μεταβλητών σχεδίασης. Αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετά για να αναβαθμίσουν το μοντέλο και έτσι όλη η διαδικασία να ξανά επαναληφθεί έως ότου να έχει επιτευχθεί κάποια σύγκλιση ή σημαντική βελτίωση του αρχικού σχεδιασμού.

Η μεθοδολογία επιφάνειας απόκρισης (RSM) είναι μια συλλογή από στατιστικές και μαθηματικές τεχνικές χρήσιμες για την ανάπτυξη, βελτίωση, και βελτιστοποίηση διεργασιών, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ορίσουν την σχέση μεταξύ της απόκρισης και των ανεξάρτητων μεταβλητών. Έχει επίσης σημαντικές εφαρμογές στην σχεδίαση, ανάπτυξη, και υλοποίηση καινούργιων προϊόντων αλλά και την στην βελτίωση ήδη υπάρχων προϊόντων. Οι πιο εκτενείς εφαρμογές της μεθόδου RSM

είναι στον βιομηχανικό κλάδο, συγκεκριμένα σε περιπτώσεις όπου αρκετές μεταβλητές εισόδου πιθανόν να επηρεάζουν την απόδοση ή τα χαρακτηριστικά ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας. Η απόδοση και τα χαρακτηριστικά ενός προϊόντος ή διαδικασίας ονομάζονται η απόκριση του συστήματος, του προβλήματος προς βελτιστοποίηση. Οι περισσότερες εφαρμογές της μεθόδου σε πραγματικά προβλήματα, περιλαμβάνουν περισσότερες από μια αντικειμενικές συναρτήσεις. Οι μεταβλητές εισόδου μερικές φορές καλούνται ανεξάρτητες μεταβλητές και ελέγχονται από τον μηχανικό ή επιστήμονα κατά την διαδικασία ενός πειράματος ή τεστ.

Η μέθοδος RSM προσφέρει πολύ πληροφορία με μικρό αριθμό πειραμάτων. Είναι επίσης δυνατόν να παρατηρηθεί σε τι βαθμός επηρεάζει κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή σχεδίασης την απόκριση του προβλήματος. Αφ' ετέρου, το κύριο μειονέκτημα είναι ότι προσεγγίζει το δεδομένα με πολυώνυμο δευτέρου βαθμού.

Μια διαδικασία βελτιστοποίησης, στην οποία χρησιμοποιείται η μέθοδος RSM, χωρίζεται σε τρία στάδια:

- Πρώτο Στάδιο: Είναι η προκαταρκτική δουλειά κατά την οποία ορίζονται οι ανεξάρτητες μεταβλητές και τα όρια στα οποία θα μπορεί να κυμαίνεται η τιμή τους.
- Δεύτερο Στάδιο: Επιλογή του πειραματικού σχεδίου και πρόβλεψη και επαλήθευση της εξίσωσης του μοντέλου.
- Τρίτο Στάδιο: Παράγεται η επιφάνεια απόκρισης και αντίστοιχα αρκετά άλλα διαγράμματα της απόκρισης συναρτήσει των ανεξάρτητων παραμέτρων και καθορίζονται τα βέλτιστα σημεία.

DOE

Υπάρχουν αρκετά πειραματικά σχέδια διαθέσιμα για την ανάλυση μέσω της επιφάνειας απόκρισης, όπως το παραγοντικό σχέδιο (factorial design). Όμως, πρέπει να επισημανθεί, ότι στο παραγοντικό σχέδιο, ο συνολικός αριθμός των πειραμάτων αυξάνεται εκθετικά με τον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών εισόδου. Με αποτέλεσμα το υπολογιστικό κόστος να είναι υπερβολικά μεγάλο.

Η διαδικασία του σχεδιασμού και ανάλυσης με την μέθοδο RSM σε δύο βήματα είναι:

- Σχεδιασμός και εκτέλεση ενός πειράματος έτσι ώστε να παραχθούν δεδομένα απόκρισης (DOE)
- Εφαρμογή των δεδομένων σε μια σειρά από πολυωνυμικά μοντέλα που χρησιμοποιούν εργαλεία παλινδρομησης.

Η πραγματική σχέση μεταξύ της απόκρισης (y) και των μεταβλητών εισόδου ($\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$) μπορεί να γραφτεί ως:

$$y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) + \varepsilon \quad (3.15)$$

,όπου η μορφή της πραγματικής συνάρτησης απόκρισης f είναι άγνωστη και πιθανόν αρκετά πολύπλοκη και το ε είναι ο όρος που αντιπροσωπεύει άλλες πηγές μεταβλητότητας που δεν λαμβάνονται υπόψη στην f . Η μορφή της πραγματικής συνάρτησης απόκρισης f είναι άγνωστη επομένως πρέπει να προσεγγιστεί. Στη πραγματικότητα, η επιτυχημένη χρήση της μεθόδου RSM εξαρτάται από την ικανότητα του μελετητή να αναπτύξει κατάλληλη προσέγγιση για την f . Για σχετικά μικρή περιοχή των ανεξάρτητων μεταβλητών συνήθως η χρήση πολυωνύμων χαμηλής τάξης είναι

ικανοποιητική. Σε αρκετές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται πολυωνυμικά μοντέλα πρώτης ή δεύτερης τάξης.

Η χρήση μοντέλου πρώτης τάξης είναι κατάλληλη όταν η πραγματική επιφάνεια απόκρισης του πειράματος που μας ενδιαφέρει να προσεγγιστεί προσδιορίζεται από σχετικά μικρή περιοχή τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών, όπου κιόλας στην περιοχή αυτή η συνάρτηση f έχει λίγη κυρτότητα.

Το μοντέλο δεύτερης τάξης είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο για αρκετούς λόγους:

- Τα μοντέλα αυτά είναι πολύ ευέλικτα. Μπορούν να εφαρμοστούν σε μεγάλη ποικιλία πρακτικών προβλημάτων, επομένως η προσέγγιση της πραγματικής επιφάνειας απόκρισης γίνεται με αρκετά μεγάλη ακρίβεια.
- Είναι εύκολος ο υπολογισμός των παραμέτρων (β) στο μοντέλο αυτό. Για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων.

Γενικά το μοντέλο πρώτης τάξης έχει την μορφή:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (3.16)$$

και το μοντέλο δεύτερης τάξης:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.17)$$

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται συνήθως στην μέθοδο RSM είναι μία πλήρης τετραγωνική εξίσωση ή κάποια υποβαθμισμένη μορφή της εξίσωσης (3.17).

Για την κατασκευή της επιφάνειας απόκρισης έχει επιλεχθεί η μοντελοποίηση μέσω της μεθόδου Kriging. Στην μέθοδο αυτή, μία μονοδιάστατη τιμή της απόκρισης υπολογίζεται από την σχέση:

$$y(x) = p(x) + Z(x) \quad (3.18)$$

,όπου $y(x)$ είναι η άγνωστη απόκριση της αντικειμενικής συνάρτησης που μας ενδιαφέρει, $p(x)$ είναι μια γνωστή πολυωνυμική συνάρτηση και $Z(x)$ θεωρείται ως η υλοποίηση μια τυχαίας Γκαουσιανής διαδικασίας με μέσο μηδέν, απόκλιση σ^2 και συνδιακύμανση μη-μηδενική. Η συνάρτηση $p(x)$ παρέχει μια "global" προσέγγιση του χώρου σχεδίασης της επιφάνειας απόκρισης. Επιπλέον ο όρος $Z(x)$ δημιουργεί μια "τοπική" απόκλιση έτσι ώστε η επιφάνεια απόκρισης που θα δημιουργηθεί με την μέθοδο Kriging να παρεμβάλει σωστά τα σημεία παρατήρησης (σημεία που δημιουργούνται από DOE).

Η ρίζα της μέσης τετραγωνικής απόκλισης (RMSE) αντιπροσωπεύει την απόκλιση των τιμών που υπολογίζονται μέσω της μεθόδου Kriging από αυτές της πραγματικής απόκρισης. Στην περίπτωση που εξετάζεται αντιπροσωπεύει πόσο καλά έχει κάνει εφαρμογή η επιφάνεια απόκρισης που έχει υπολογιστεί μέσω της μεθόδου Kriging στα σημεία που έχουν προκύψει προηγουμένως μέσω του DOE.

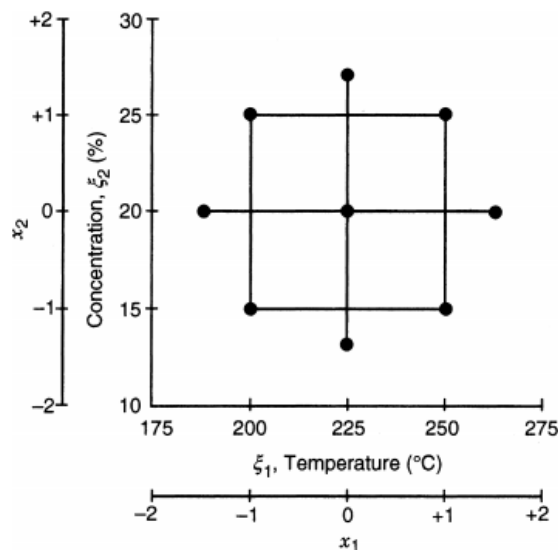
Η διαδοχική φύση της μεθόδου RSM

- Φάση 0: Η φάση αυτή ονομάζεται πειραματική διαλογή, και έχει ως σκοπό να διαπιστωθεί ποιές μεταβλητές είναι πιο σημαντικές για την απόκριση.
- Φάση 1: Η φάση αυτή ονομάζεται "απότομη ανάβαση" και έχει ως σκοπό ο μελετητής να καθορίσει εάν τα συγκεντρωμένα δεδομένα που έχει, σχετίζονται με την πραγματική απόκριση.
- Φάση 2: Η φάση ξεκινά όταν η διαδικασία είναι κοντά στο βέλτιστο. Ο μελετητής πρέπει να αποφασίσει τι μοντέλο θα χρησιμοποιήσει, το οποίο θα προσεγγίσει ικανοποιητικά την πραγματική συνάρτηση απόκρισης σε σχετικά μικρή περιοχή γύρω από το βέλτιστο.
- Τελική Φάση: Η φάση αυτή περιλαμβάνει την επιβεβαίωση του πειράματος. Το βέλτιστο που έχει προκύψει από την φάση 2 πρέπει να επιβεβαιωθεί ότι μπορεί να επιτευχθεί. Αυτό γίνεται βάζοντας τις βέλτιστες τιμές που έχουν προκύψει στις ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος.

Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων συνήθως χρησιμοποιείται για να εκτιμηθούν οι σταθερές της παλινδρόμησης σε ένα πολλαπλά γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης. Ακόμα επιλέγονται τέτοιες σταθερές (β), έτσι ώστε το άθροισμα των τετραγώνων των λαθών, ϵ_i , να ελαχιστοποιείται.

Εφαρμογή Δεύτερης-Τάξης Μοντέλου

Το μοντέλο Central Composite Design παρουσιάστηκε από τους Box και Wilson, είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο για την προσέγγιση δεύτερης τάξης επιφάνειας απόκρισης και είναι ουσιαστικά μία αναβάθμιση του απλού παραγοντικού σχεδίου (Factorial Design). Το μοντέλο αποτελείται από τέσσερα τρεξίματα στις γωνίες ενός τετραγώνου, ακόμα τέσσερα τρεξίματα στο κέντρο του και άλλα τέσσερα αξονικά (axial) τρεξίματα, τα οποία βρίσκονται σε απόσταση a από το κέντρο, αξίζει να αναφερθεί ότι στο πρόγραμμα Ansys το CCD τρέχει μόνο ένα τρέξιμο στο κέντρο του τετραγώνου.



Σχήμα 3.3: Μοντέλο CCD.

Το πλήρες μοντέλο CCD έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

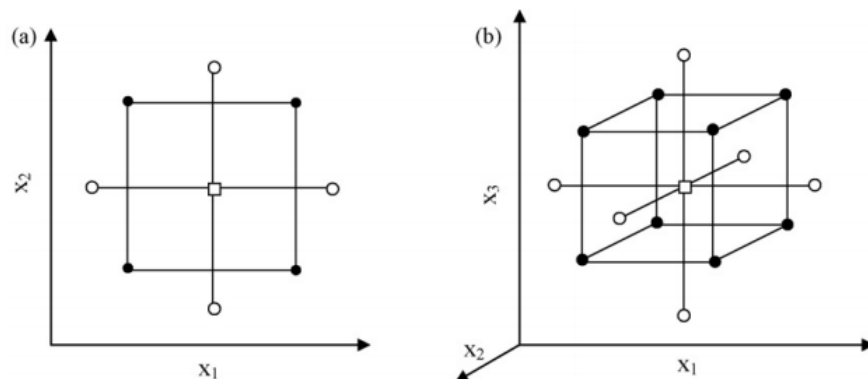
- απαιτεί αριθμό πειραματικών σημείων σύμφωνα με την σχέση $N = 2^k + 2k + n_c$, όπου k είναι ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών και n_c είναι τα σημεία του κέντρου.
- οι τιμές του α βασίζονται στον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών και μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση $\alpha = 2^{(k-p)/4}$. Για 2,3 και 4 ανεξάρτητες μεταβλητές έχει αντίστοιχα τις τιμές 1.41, 1.68 και 2.00.
- Όλες οι ανεξάρτητες μεταβλητές χρησιμοποιούνται σε 5 βαθμίδες (- α , -1, 0, +1, + α).

Πίνακας 3.1: Πειραματικοί πίνακες για CCD: (α) δύο μεταβλητές και (β) τρεις μεταβλητές.

(a)	x_1	x_2	(b)	x_1	x_2	x_3
Factorial design	-1	-1	Factorial design	-1	-1	-1
	1	-1		1	-1	-1
	-1	1		-1	1	-1
	1	1		1	1	-1
Axial points	$-\alpha$	0	Axial points	-1	-1	1
	α	0		1	-1	1
	0	$-\alpha$		-1	1	1
	0	α		1	1	1
Central point	0	0	Central point	$-\alpha$	0	0
				α	0	0
				0	$-\alpha$	0
				0	α	0
				0	0	$-\alpha$
				0	0	α

Το CCD ανήκει στην οικογένεια των 2^k παραγοντικών μοντέλων. Τα 2^k παραγοντικά μοντέλα είναι πολύ σημαντικά στις διαδικασίες που έχουν να κάνουν με επιφάνειες. Ειδικά, βρίσκουν εφαρμογή σε 3 συγκεκριμένες κατηγορίες:

- Ένα 2^k παραγοντικό μοντέλο είναι χρήσιμο στην αρχή μιας μελέτης απόκρισης επιφάνειας, όπου πρέπει να πραγματοποιηθεί πειραματική διαλογή έτσι ώστε να καθοριστούν οι μεταβλητές που έχουν την σημαντικότερη βαρύτητα στο πρόβλημα της μελέτης.
- Ακόμα ένα 2^k παραγοντικό μοντέλο συχνά χρησιμοποιείται για να προσεγγίσει ένα μοντέλο επιφάνειας απόκρισης πρώτης τάξης και να υπολογίσει τον συντελεστή επίδρασης που χρειάζεται ώστε να εκτελεστεί η "απότομη ανάβαση".
- Το 2^k παραγοντικό μοντέλο είναι ένα βασικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για να δημιουργηθούν άλλα μοντέλα απόκρισης επιφάνειας. Για παράδειγμα, εάν προσθέσεις ένα 2^2 μοντέλο με αξονικά (axial) τρεξίματα και κεντρικά σημεία, τότε έχεις ως αποτέλεσμα το CCD. Ιστορικά, το CCD είναι ένα από τα πιο σημαντικά σχέδια για την προσέγγιση της επιφάνειας απόκρισης μοντέλου δεύτερης τάξης.



Σχήμα 3.4: Βελτιστοποίηση με CCD για: (a) δύο μεταβλητές ($\alpha=1.41$) και (b) τρεις μεταβλητές ($\alpha=1.68$). Μαύροι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τα παραγοντικά σημεία, οι άσπροι τα αξονικά και το τετράγωνο το κεντρικό σημείο.

Όλα τα σημεία στο χώρο σχεδίασης, τα οποία απέχουν την ίδια απόσταση από το κέντρο του σχεδίου έχουν την ίδια πρόβλεψη απόκλισης. Αυτή η ιδιότητα ονομάζεται δυνατότητα περιστροφής. Όταν σημεία προστίθενται στο κέντρο ενός 2^k μοντέλου, τότε ελέγχουν την καμπυλότητα στην επιφάνεια απόκρισης.

Σύμφωνα με την εξίσωση (3.17), το μοντέλο αυτό έχει $1 + 2k + k(k-1)/2$ παραμέτρους. Σαν αποτέλεσμα το πειραματικό μοντέλο πρέπει να περιέχει τουλάχιστον $1 + 2k + k(k-1)/2$ διαφορετικά σημεία σχεδίασης.

Το επιλεγμένο πειραματικό μοντέλο για να προσεγγίσει μια δεύτερης τάξης επιφάνεια απόκρισης πρέπει να διαθέτει τις εξής ιδιότητες:

- Τουλάχιστον 3 επίπεδα για κάθε μεταβλητή σχεδίασης
- Τουλάχιστον $1 + 2k + k(k-1)/2$ διαφορετικά σημεία σχεδίασης

Δυνατότητα περιστροφής

Η έννοια της δυνατότητας περιστροφής επικεντρώνεται στην συμμετρία της πρόβλεψης της απόκλισης στην περιοχή ενδιαφέροντος. Ένα μοντέλο με την δυνατότητα περιστροφής είναι αυτό που έχει σταθερή πρόβλεψη της απόκλισης των τιμών για όλες τις τοποθεσίες που βρίσκονται σε ισαπόσταση από το κέντρο του χώρου σχεδίασης. Για παράδειγμα, ένα μοντέλο με την δυνατότητα περιστροφής θα έχει την ίδια πρόβλεψη απόκλισης για οποιαδήποτε καινούργια παρατήρηση στον χώρο σχεδίασης, η οποία θα βρίσκεται μια μονάδα μακριά από το σημείο προέλευσής της, όταν εξετάζονται οι μεταβλητές εισόδου υπό εύρος κλίμακας.

Το CCD εμπεριέχει, F παραγοντικά (factorial) σημεία, $2k$ αξονικά (axial) σημεία και n_c σημεία κέντρου. Τα παραγοντικά σημεία αντιπροσωπεύουν το βέλτιστο σε ότι αφορά την απόκλιση, πρώτης τάξης μοντέλο. Τα σημεία του κέντρου παρέχουν πληροφορία για την ύπαρξη καμπύλωσης στο πρόβλημα. Εάν βρεθεί καμπυλότητα, η προσθήκη αξονικών σημείων επιτρέπει την ικανοποιητική εκτίμηση των καθαρά τετραγωνικών όρων.

Είναι σημαντικό για ένα μοντέλο δεύτερης τάξης να διαθέτει μια λογική και σταθερή κατανομή πρόβλεψης της απόκλισης $N \text{Var}[\hat{y}(x)]/\sigma^2$ σε όλη την πειραματική περιοχή. Πρέπει να ξεκαθαριστεί ότι ο μελετητής δεν γνωρίζει εκ των προτέρων σε ποιά περιοχή θέλει να κινηθεί ή σε ποιόν χώρο βρίσκεται

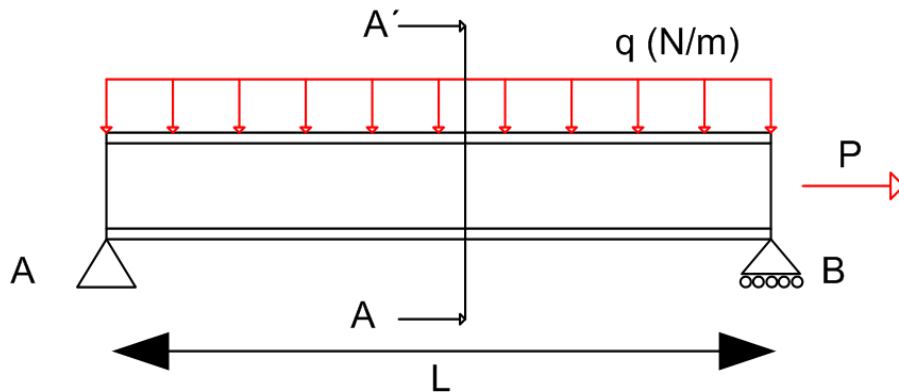
το βέλτιστο. Επομένως, μια λογική τιμή της πρόβλεψης της απόκλισης $N \text{Var}[\check{y}(x)]/\sigma^2$ προσδίδει την ασφάλεια ότι η ποσότητα $\check{y}(x)$ ως πρόβλεψη μελλοντικών τιμών απόκρισης παραμένει σταθερή καθ' όλη την περιοχή ενδιαφέροντος. Με άλλα λόγια αυτό συμβαίνει όταν η τιμή της απόκλισης, $N \text{Var}[\check{y}(x)]/\sigma^2$, είναι σταθερή σε σφαίρες.

Στο CCD, η δυνατότητα περιστροφής επιτυγχάνεται επιλέγοντας σωστή τιμή της τιμής του α , αξονική απόσταση. Όπου $\alpha = \sqrt[4]{F}$ και F είναι ο αριθμός των παραγοντικών σημείων $F = 2^k$.

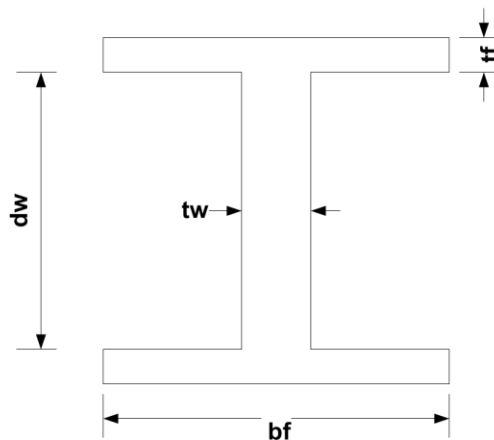
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Βελτιστοποίηση δοκού με ισοκατανεμημένο φορτίο και αξονική δύναμη

4.1 Περιγραφή προβλήματος

Το παράδειγμα αυτό έχει ως σκοπό τη βελτιστοποίηση της διατομής μιας αμφιέριστης δοκού όπως αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Το παράδειγμα θα λυθεί σε 2 μέρη. Στο πρώτο ως φόρτιση θα υπάρχει μόνο ισοκατανεμημένο φορτίο καθόλο το μήκος της δοκού, μεγέθους q , και στο δεύτερο θα εφαρμοστεί και αξονική δύναμη, μεγέθους P . Ως υλικό της δοκού επιλέγεται τυπικός κατασκευαστικός χάλυβας **St37** με όριο διαρροής **235 MPa**. Ως προφίλ διατομής επιλέχθηκε τύπου I και το πρόβλημα προς επίλυση εστιάζεται στον εντοπισμό των βέλτιστων διαστάσεων της διατομής που οδηγούν στο ελάχιστο βάρος της δοκού. Οι διαστάσεις που ορίζουν την διατομή είναι οι d_w , t_w , b_f , t_f , οι οποίες θα αποτελούν και τις μεταβλητές σχεδίασης του προβλήματος. Το πρόβλημα αυτό έχει ως σκοπό την εξοικείωση με ένα απλό πρόβλημα βελτιστοποίησης κατασκευαστικών στοιχείων, όπου υπάρχει αναλυτική λύση του. Παράλληλα θα συγκριθούν τα αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης του και αυτής με την ΜΠΣ.



Σχήμα 4.1: Αναπαράσταση στήριξης και φορτίων στην δοκό.



Σχήμα 4.2: Διατομή δοκού.

4.2 Αναλυτικός προσδιορισμός βέλτιστης λύσης

Επιπλέον θα γίνει σύγκριση των τιμών του παραδείγματος με το κατανεμημένο φορτίο, που θα προκύψουν από την υπολογιστική λύση του, με τις θεωρητικές τιμές που δίνονται στην διεθνή αναφορά [1].

Οι παραδοχές που ισχύουν στη θεωρητική λύση είναι ότι η δοκός δέχεται μόνο καμπτική ροπή, η οποία έχει σταθερή τιμή καθόλου το μήκος. Επομένως δεν υπάρχει διατμητική δύναμη και η δοκός βρίσκεται σε θλίψη πάνω από τον ουδέτερο άξονα και σε εφελκυσμό κάτω από αυτόν.

Στο παράδειγμα μας όμως η καμπτική ροπή δεν είναι σταθερή κατά το μήκος της δοκού, αλλά η τιμή της περιγράφεται από το Σχήμα 4.6. Οπότε όπως είναι φυσιολογικό αναπτύσσεται και διατμητική δύναμη στη δοκό, η τιμή της οποίας περιγράφεται από το Σχήμα 4.7. Όμως δεδομένου ότι το μήκος της δοκού μας είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από τις διαστάσεις της διατομής της, στη δοκό έχει κυρίαρχο ρόλο η καμπτική ροπή. Επομένως το μεγαλύτερο μέρος της διατμητικής τάσης παραλαμβάνεται από τον κορμό και το μεγαλύτερο μέρος της καμπτικής τάσης από τις φλάντζες. Επίσης όπως προαναφέρθηκε λόγω της κυριαρχίας της καμπτικής ροπής το πάχος των φλαντζών είναι μεγαλύτερο από το πάχος του κορμού, θα παρατηρηθεί ότι αυτό θα ισχύει καθόλη την ανάλυση.

Για να είναι δυνατή η σύγκριση των τιμών των τεσσάρων διαστάσεων (d_w , t_w , b_f , t_f) της διατομής που θα προκύψουν από το θεωρητικό κομμάτι του βιβλίου και από την δική μας ανάλυση, πρέπει να θεσπιστούν κάποιες παραδοχές, για να καλυφθούν οι διαφορές που προαναφέρθηκαν. Αρχικά όπως θα αναφερθεί παρακάτω στην κρίσιμη διατομή της δοκού αναπτύσσεται η μέγιστη καμπτική ροπή και καθόλου διατμητική δύναμη, επομένως θα θεωρηθεί αυτή η μέγιστη τιμή της, ως την σταθερή κατά το μήκος, καμπτική ροπή και ότι δεν αναπτύσσεται καθόλου διατμητική δύναμη. Με αυτή την προϋπόθεση μπορούν να συγκριθούν αρκετά καλά οι τιμές των τεσσάρων διαστάσεων (d_w , t_w , b_f , t_f) μεταξύ θεωρητικής και υπολογιστικής λύσης. Εξάλλου στην υπολογιστική λύση η βέλτιστη διατομή που θα προκύψει θα λαμβάνει υπόψιν τις τιμές που θα προκύπτουν στην κρίσιμη διατομή, οπότε θα μπορούν να εξαχθούν αρκετά καλά συμπεράσματα.

Για την εύρεση της βέλτιστης διατομής από την θεωρητική προσέγγιση ισχύουν τα παρακάτω. Για την διατομή του Σχήματος 4.2, η επιφάνεια της και η ροπή αδράνειας της δίνονται από τις σχέσεις:

$$A = d_w \cdot t_w + 2 \cdot b_f \cdot t_f \quad (4.1)$$

$$I = \frac{t_w \cdot d_w^3}{12} + 2 \cdot b_f \cdot t_f \cdot \left(\frac{d_w}{12}\right)^2 \quad (4.2)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι:

$$W = \rho \cdot A \cdot L = \rho \cdot t_w \cdot d_w \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{b_f}{d_w} \cdot \frac{t_f}{t_w}\right) \quad (4.3)$$

Οι περιορισμοί του προβλήματος είναι δύο, το κριτήριο κατάρρευσης λόγω υπέρβασης της καμπτικής τάσης της μέγιστης επιτρεπόμενης και ο τοπικός λυγισμός της φλάντζας και του κορμού.

$$\sigma_{max} = \frac{M \cdot y_{max}}{I} = \frac{6 \cdot M}{t_w \cdot d_w^2 \cdot [1 + 6 \cdot (\frac{b_f}{d_w}) \cdot (\frac{t_f}{t_w})]} \quad (4.4)$$

$$\sigma_{Lf} = 0.385 \cdot E_T \cdot (\frac{t_f}{b_f/2})^2 = 1.54 \cdot E_T \cdot (\frac{t_f}{b_f})^2 \quad (4.5)$$

$$\sigma_{Lw} = 21.7 \cdot E_T \cdot (\frac{t_w}{d_w})^2 \quad (4.6)$$

Το επόμενο βήμα είναι η βελτιστοποίηση της διατομής, θα θεωρηθεί ότι συμβαίνει ταυτόχρονος τοπικός λυγισμός στον κορμό και στην φλάντζα, οπότε από τις εξισώσεις (4.5) και (4.6) προκύπτει:

$$\frac{t_f/t_w}{b_f/d_w} = 3.754 \quad (4.7)$$

Έπειτα από τον συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων προκύπτουν οι βέλτιστες διαστάσεις της διατομής για τις οποίες ελαχιστοποιείται το βάρος της δοκού:

$$b_{f_{opt}} = 0.698 \cdot \frac{M^{1/3} \cdot E_T^{1/6}}{\sigma_y^{1/2}}, \quad t_{f_{opt}} = 0.562 \cdot (\frac{M}{E_T})^{1/3} \quad (4.8a,b)$$

$$d_{w_{opt}} = 1.912 \cdot \frac{M^{1/3} \cdot E_T^{1/6}}{\sigma_y^{1/2}}, \quad t_{w_{opt}} = 0.410 \cdot (\frac{M}{E_T})^{1/3} \quad (4.8c,d)$$

όπου E_T είναι το εφαπτόμενο μέτρο ελαστικότητας.

Το εφαπτόμενο μέτρο ελαστικότητας, χρησιμοποιείται όταν η ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού έχει υπερβεί την επιτρεπτή τάση διαρροής του υλικού. Αυτό αντιβαίνει στην υπόθεση ότι ισχύει η γραμμική ελαστικότητα στο πρόβλημα για την συγκεκριμένη κρίσιμη τάση. Επομένως όταν χρησιμοποιείται στις σχέσεις (4.5), (4.6) λειτουργεί ως διορθωτικός συντελεστής, ώστε να ισχύει η γραμμική ελαστικότητα στο πρόβλημα που εξετάζεται. Λόγω της πολυπλοκότητας η τιμή του δεν μπορούσε να υπολογιστεί, οπότε για τις σχέσεις (4.5), (4.6) θα αντικατασταθεί με το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του προβλήματος (E). Οι τάσεις που θα προκύψουν θα είναι ελαστικές τάσεις λυγισμού, και εάν υπερβαίνουν την τάση διαρροής θα χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις της παραβολής Johnson.

$$\sigma_{cr} = \sigma_e, \quad \sigma_e \leq 0.5 \sigma_f \quad (4.9)$$

$$\sigma_{cr} = \sigma_f \left(1 - \frac{\sigma_f}{4\sigma_e}\right), \quad \sigma_e \geq 0.5 \sigma_f \quad (4.10)$$

Με την παραπάνω παραδοχή δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις (4.8a,b) και (4.9c,d), επομένως για την σύγκριση με την αναλυτική και υπολογιστική λύση θα χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις:

$$\left(\frac{b}{d}\right)_{opt} = 0.36 \quad (4.11)$$

$$\left(\frac{t_f}{t_w}\right)_{opt} = 1.37 \quad (4.12)$$

4.3 Επίλυση παραδείγματος

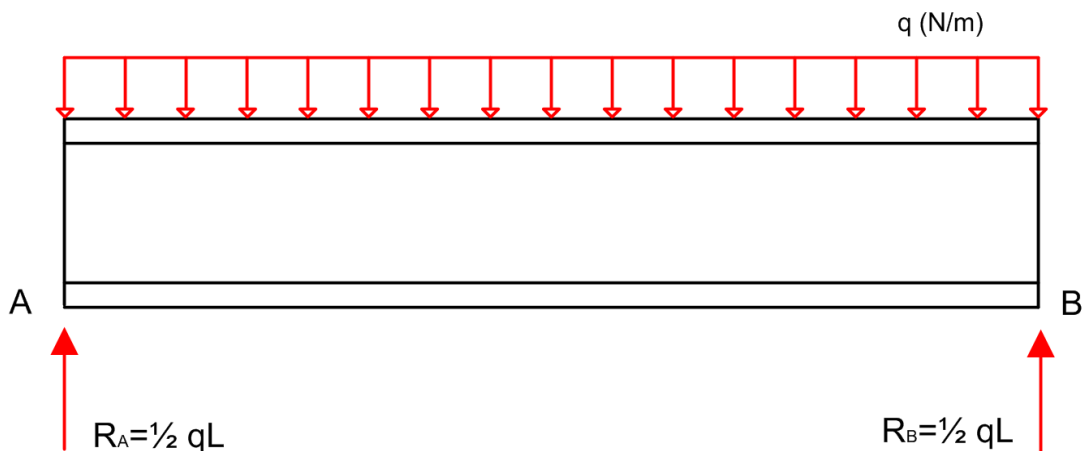
1. Καταμεμημένο Φορτίο

Τα παρακάτω μεγέθη θεωρήθηκαν δεδομένα, ως υλικό της δοκού επιλέγεται τυπικός κατασκευαστικός χάλυβας **St37** με όριο διαρροής **235 MPa**.

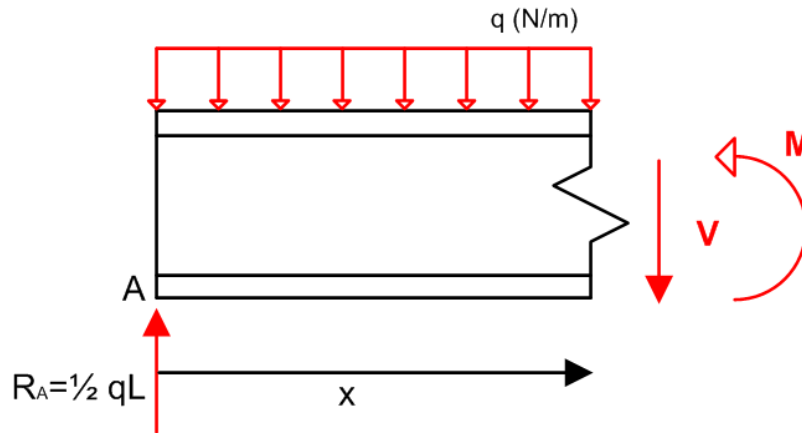
Πίνακας 4.1: Αρχικές μεταβλητές.

L(m)	5
q(N/m)	50000
σ_y (MPa)	235
SF	1.4

Στη συνέχεια θα επιλυθεί το πρόβλημα για τα παραπάνω δεδομένα στοιχεία, θα υπολογιστούν οι αναπτυσσόμενες φορτίσεις και θα υπολογιστεί η ελάχιστη τιμή της ροπής αντίστασης της διατομής. Αυτό είναι ένα κλασικό πρόβλημα αμφιέριστης δοκού, στα Σχήματα 4.3, 4.4 φαίνονται το Δ.Ε.Σ καθώς και μια τομή της δοκού.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα ελευθέρου σώματος δοκού.



Σχήμα 4.4: Τομή διαγράμματος ελεύθερου σώματος δοκού.

Από το διάγραμμα ελευθέρου σώματος ολόκληρης της δοκού, προσδιορίζεται το μέτρο των αντιδράσεων στις στηρίξεις.

$$R_A = R_B = \frac{1}{2} qL \quad (4.13)$$

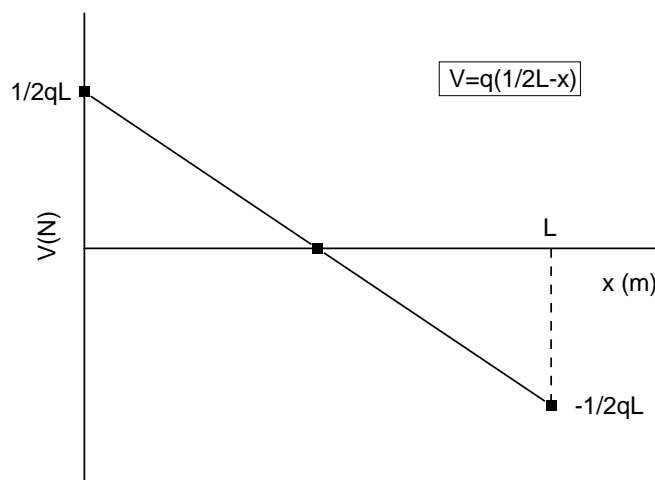
Από την τομή υπολογίζεται η εξίσωση της τέμνουσας δύναμης καθώς και η εξίσωση ροπής κάμψης.

$$V = q\left(\frac{1}{2}L - x\right) \quad (4.14)$$

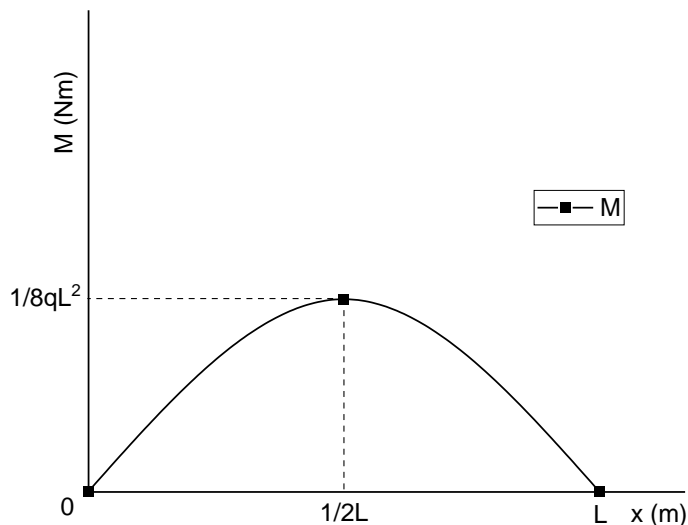
$$M = \frac{1}{2}q(Lx - x^2) \quad (4.15)$$

, όπου x η απόσταση από το άκρο(A).

Τα διαγράμματα της τέμνουσας δύναμης καθώς και της ροπής κάμψης είναι τα εξής:



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης.



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα καμπτικής ροπής.

Στα διαγράμματα φαίνονται επίσης και οι μέγιστες-ελάχιστες τιμές της τέμνουσας δύναμης και της ροπής κάμψης καθώς και η θέση τους. Εύκολα παρατηρείται ότι η κρίσιμη θέση είναι αυτή στο μέσο της δοκού ($x = L/2$), όπου εμφανίζεται η μέγιστη ροπή. Στη θέση αυτή η τέμνουσα δύναμη ισούται με μηδέν, το οποίο μας διευκολύνει την ανάλυση μας. Εφόσον δεν αναπτύσσεται τέμνουσα δύναμη στην διατομή τύπου I το κρίσιμο σημείο της είναι αυτό στο πάνω και κάτω μέρος αντίστοιχα της φλάντζας, λόγω συμμετρίας κατά τον Y-άξονα στην περίπτωση μας θα εξεταστεί το πάνω.

Για την επιλογή κατάλληλης διατομής τύπου I θα χρησιμοποιηθεί η σχέση (4.16)

$$S_{min} = \frac{M_{max}}{\sigma_{ALL}} \quad (4.16) \quad , \quad \text{όπου } \sigma_{ALL} = \frac{\sigma_y}{SF} \quad (4.17)$$

Έτσι θα προκύψει η ελάχιστη ροπή αντίστασης που πρέπει να έχει η διατομή τύπου I ,έτσι ώστε να μπορεί να παραλάβει επαρκώς το φορτίο που έχει οριστεί. Έπειτα από Πίνακα με διατομές τύπου I επιλέχθηκαν ορισμένες που τηρούν την προϋπόθεση της ελάχιστης ροπής αντίστασης.

Οι επιλεγμένες διατομές μαζί με κάποιες κύριες ιδιότητες τους φαίνονται παρακάτω.

Πίνακας 4.2: Διατομές τύπου I.

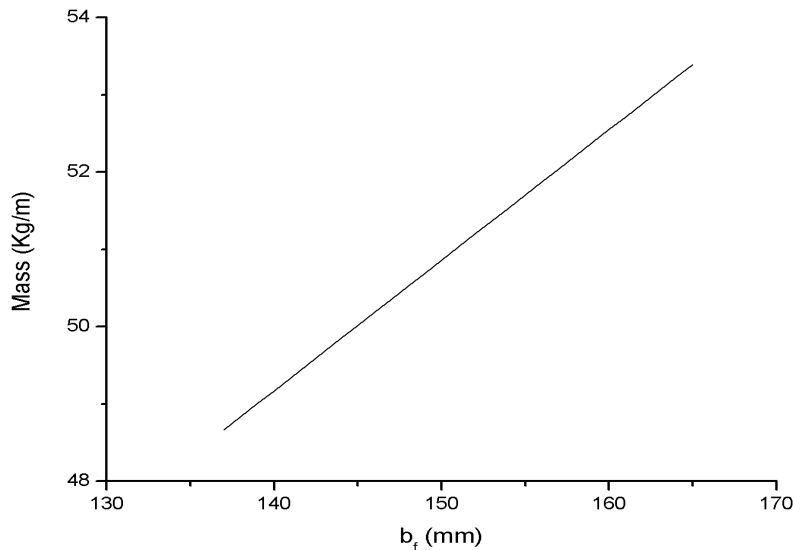
Designation	Mass(kg/m)	Web Thick.(mm)	Depth(mm)	$S = I/c(10^3 \text{ mm}^3)$	S_{min}	Area(mm ²)
W460 x 52	52	7.62	450	944	930.6	6650
W410 x 60	60	12.8	406	1060	930.6	7610
W360 x 64	64	7.75	348	1030	930.6	8130
W310 x 67	67	8.51	307	946	930.6	8450
W250 x 80	80	9.4	257	983	930.6	10200

Εφόσον ο σκοπός της ανάλυσης είναι η ελαχιστοποίηση του βάρους, επιλέγεται η διατομή **W460 x 52**.

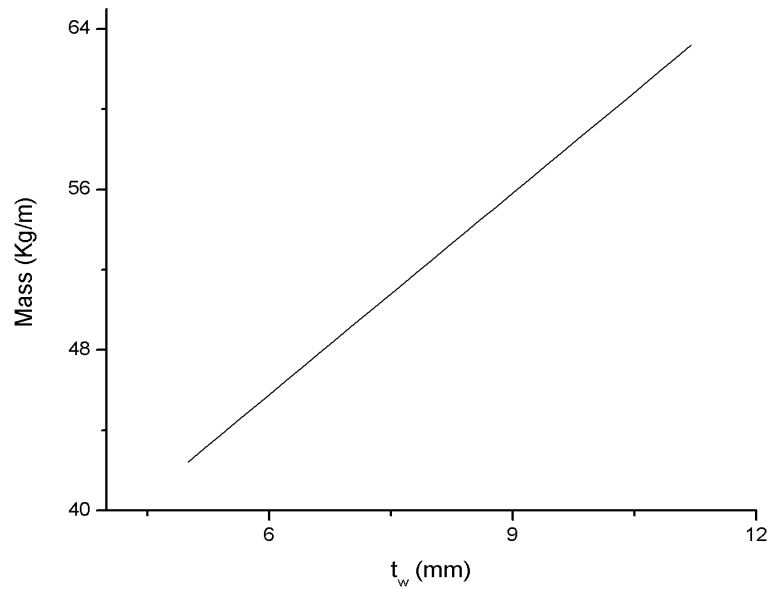
Στη συνέχεια παρουσιάζεται πως μεταβάλλεται το βάρος της διατομής που επιλέχθηκε **W460 x 52** αλλάζοντας μια κάθε φορά διάσταση της διατομής (**d_w**, **t_w**, **b_f**, **t_f**). Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, κρίνονται σκόπιμες κάποιες διευκρινήσεις.

- Με βάση τα στοιχεία από τον Πίνακα 4.2, υπολογίστηκε η πυκνότητα της **W460 x 52** διατομής από την σχέση $\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{Mass \left(\frac{kg}{m} \right)}{Area \left(m^2 \right)}$. Επομένως για κάθε αλλαγή μία εκ των 4 διαστάσεων (**d_w**, **t_w**, **b_f**, **t_f**) η μάζα της διατομής θα μεταβάλλεται γραμμικά, αφού και η επιφάνεια της διατομής μεταβάλλεται και αυτή γραμμικά.
- Η σχέση μεταξύ της ροπής αντίστασης και της μάζας της διατομής δεν είναι σε κάθε περίπτωση γραμμική, διότι $S = \frac{I}{c}$, όπου *I*: Ροπή αδράνειας διατομής και *c*: Θέση ουδέτερου άξονα. Όμως στην ανάλυση επειδή οι αλλαγές σε κάθε μια από τις 4 διαστάσεις (**d_w**, **t_w**, **b_f**, **t_f**) είναι μικρές θεωρείται ότι η σχέση S-W είναι και αυτή γραμμική.

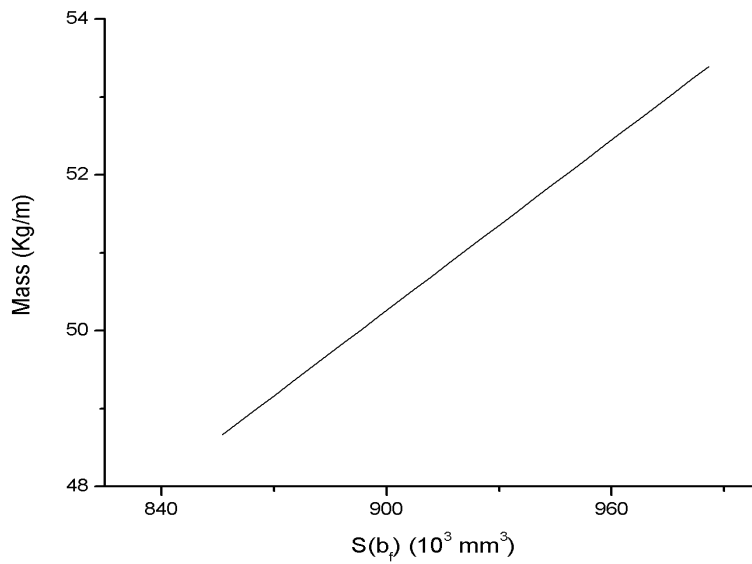
Στη συνέχεια παρουσιάζονται επιλεκτικά η μεταβολή της μάζας συναρτήσει της αλλαγής των διαστάσεων της διατομής, καθώς και συναρτήσει της μεταβολής της ροπής αντίστασης.



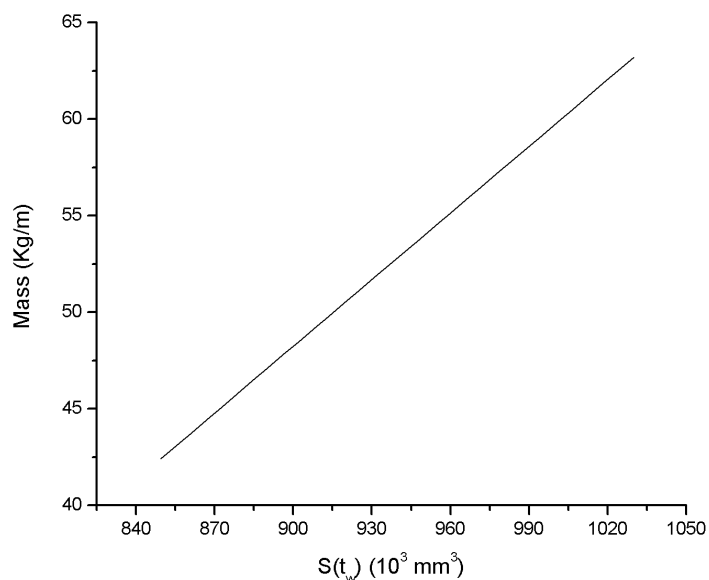
Σχήμα 4.7: Γραφική αναπαράσταση σχέση μάζας με πλάτος της φλάντζας.



Σχήμα 4.8: Γραφική αναπαράσταση σχέση μάζας με πάχος κορμού.



Σχήμα 4.9: Γραφική αναπαράσταση σχέση μάζας με ροπή αντίστασης.



Σχήμα 4.10: Γραφική αναπαράσταση σχέση μάζας με ροπή αντίστασης.

Στη συνέχεια θα αναφερθούν σε πίνακες τα ελάχιστα όρια καθεμίας από τις 4 διαστάσεις. Το ανώτατο όριο τάσης που πρέπει να ισχύει είναι $\sigma_m \leq \sigma_{ALL} = 168$.

Πίνακας 4.3: Ελάχιστο όριο πλάτος φλάντζας.

b_f (mm)	Mass (kg/m)	σ_m
149	51.5	168.1
150	51.7	167.2
151	51.8	166.4
152	52.0	165.6
153	52.2	164.8
154	52.3	164.0

Πίνακας 4.4: Ελάχιστο όριο πάχος φλάντζας.

t_f (mm)	Mass (kg/m)	σ_m
10.6	51.5	167.9
10.8	52.0	165.6
11.0	52.5	163.4
11.2	53.0	161.2

Πίνακας 4.5: Ελάχιστο όριο ύψος κορμού.

d_w (mm)	Mass (kg/m)	σ_m
423.4	51.7	168.0
424.4	51.8	167.5
425.4	51.8	167.0
426.4	51.9	166.5
427.4	51.9	166.1
428.4	52.0	165.6
429.4	52.1	165.1
430.4	52.1	164.7

Πίνακας 4.6: Ελάχιστο όριο πάχος κορμού.

t_w (mm)	Mass (kg/m)	σ_m
7.2	50.6	167.8
7.4	51.3	166.7
7.6	51.9	165.7
7.8	52.6	164.7
8.0	53.3	163.7

Σχόλια Διαγραμμμάτων και Πινάκων.

- Υπάρχει κάποια απόκλιση των τιμών που υπολογίζονται στο excel, της ροπής αδράνειας και της επιφάνειας της διατομής, σε σχέση με αυτών από την λίστα των διατομών. Αυτό δεν έχει όμως κάποια σημαντική επίδραση στα διαγράμματα παρά μόνο κάποια σταθερή μετατόπιση. Η απόκλιση αυτή έχει σημασία όμως στο min-max κάθε διάστασης που μπορεί να μεταβληθεί στην συγκεκριμένη καταπόνηση. Στους Πίνακες έχουν υπολογιστεί οι αποκλίσεις στην ροπή αδρανείας και στην επιφάνειας της διατομής, ώστε να μπορούν να συγκριθούν καλύτερα τα αποτελέσματα σε σχέση με αυτό που δίνονται από των διατομών.
- Ακόμα παρατηρείται ότι δεν υπάρχουν πολλά περιθώρια για σημαντική μείωση του βάρους, μέσω της μείωσης μία κάθε φορά από τις 4 διαστάσεις (d_w , t_w , b_f , t_f) και αυτό γιατί η συγκεκριμένη διατομή **W460 x 52** έχει $S = 944 (10^3 \text{ mm}^3)$ και η ελάχιστη που προκύπτει από τα δεδομένα της καταπόνησης είναι $S_{\min} = 930.6 (10^3 \text{ mm}^3)$. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι με την μείωση του πάχους του κορμού υπάρχει σημαντική μείωση του βάρους.
- Για την περίπτωση που υπάρχει η μεγαλύτερη μείωση βάρους, δηλαδή για νέο πάχος κορμού $t_w = 7.2$ και οι υπόλοιπες τρεις διαστάσεις να παραμένουν σταθερές. Εάν συγκριθούν οι σχέσεις (4.11) και (4.12) με τις τιμές των σχέσεων (4.18), (4.19) που θα προκύψουν με τις διαστάσεις της αναλυτικής λύσης για την μείωση του βάρους της δοκού, παρατηρείται ότι υπάρχει απόκλιση. Αυτό υποδηλώνει ότι μέσω της αναλυτικής λύσης και της αλλαγής των διαστάσεων μίας κάθε φορά (One factor at a time) δεν μπορεί να προσεγγιστεί με μεγάλη ακρίβεια η βέλτιστη λύση για το πρόβλημα μας.

$$\left(\frac{b}{d}\right)_{as} = 0.34 \quad (4.18)$$

$$\left(\frac{t_f}{t_w}\right)_{as} = 1.5 \quad (4.19)$$

2. Κατανεμημένο Φορτίο και Αξονική Δύναμη

Τα παρακάτω μεγέθη θεωρήθηκαν δεδομένα, ως υλικό της δοκού επιλέγεται τυπικός κατασκευαστικός χάλυβας **St37** με όριο διαρροής **235 MPa**.

Πίνακας 4.7: Αρχικές μεταβλητές.

L(m)	5
P(N)	100000
q(N/m)	50000
σ_y (MPa)	235
SF	1.4

Η όλη η ανάλυση του προβλήματος παραμένει η ίδια, δηλαδή οι αντιδράσεις παραμένουν οι ίδιες απλά στο αριστερό άκρο της δοκού υπάρχει επιπλέον την δύναμη-αντίδραση σε αυτή της δύναμης P. Τα διαγράμματα της τέμνουσας δύναμης και της καμπτικής ροπής παραμένουν τα ίδια. Επομένως η ελάχιστη ροπή αντίστασης είναι η ίδια όπως και στην πρώτη περίπτωση.

Θα αλλάξει όμως το κρίσιμο σημείο της διατομής, δεδομένου ότι η άνω φλάντζα υπόκειται σε θλίψη και η κάτω σε εφελκυσμό και αναπτύσσεται επίσης εφελκυστική τάση λόγω της αξονικής δύναμης. Επομένως το μόνο κρίσιμο σημείο θα είναι αυτό που βρίσκεται στο κάτω μέρος της κάτω φλάντζας.

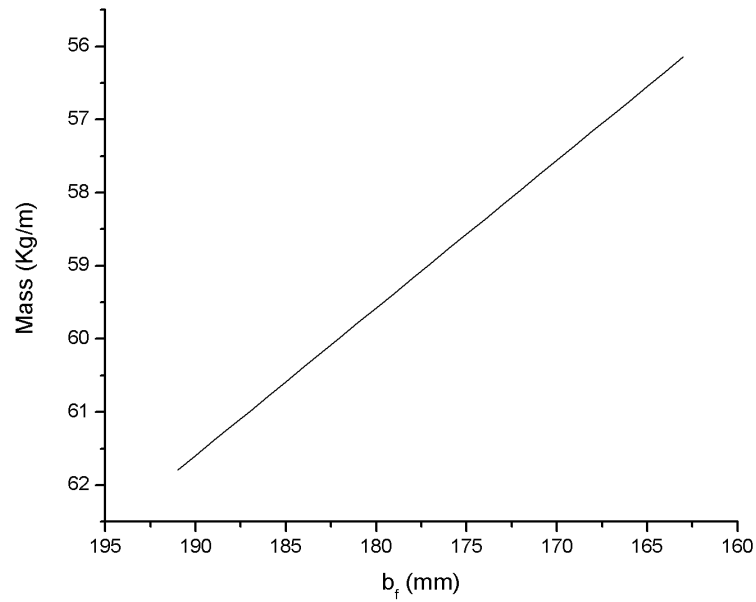
Πάλι από τον Πίνακα με τις διατομές τύπου I θα επιλεχθούν ορισμένες που έχουν ροπή αντίστασης κοντά στην S_{min} , απλά θα ληφθούν υπόψιν αυτές που έχουν παραπάνω ροπή αντίστασης σε σχέση με την πρώτη περίπτωση διότι αναπτύσσεται και επιπλέον τάση. Οι επιλεγμένες διατομές μαζί με κάποιες κύριες ιδιότητες τους φαίνονται παρακάτω.

Πίνακας 4.8: Διατομές τύπου I.

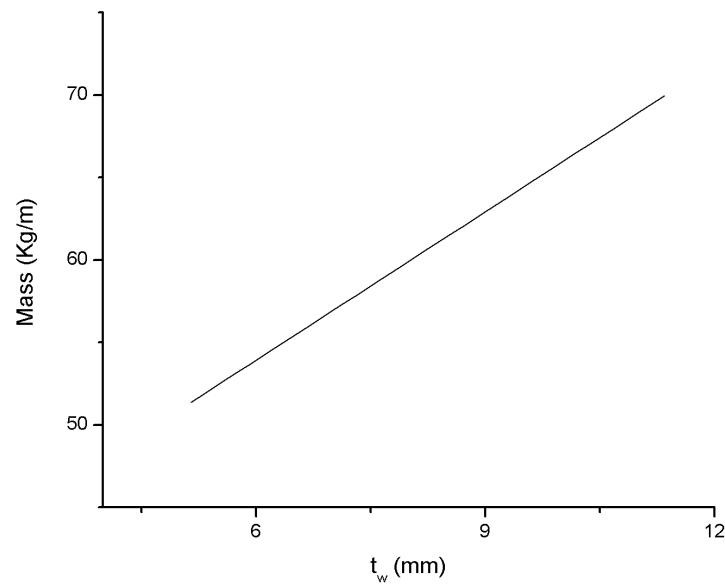
Designation	Mass(kg/m)	Web Thick.(mm)	Depth(mm)	$S = I/c(10^3 \text{ mm}^3)$	S_{min}	Area(mm ²)
W460 x 52	52	7.62	450	944	930.6	6650
W410 x 60	60	12.8	406	1060	930.6	7610
W360 x 64	64	7.75	348	1030	930.6	8130
W310 x 67	67	8.51	307	946	930.6	8450
W250 x 80	80	9.4	257	983	930.6	10200
W310 x 74	74	9.4	307	1050	930.6	9420
W200 x 100	100	14.5	229	990	930.6	12700

Εφόσον ο σκοπός του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση του βάρους επιλέγεται η διατομή **W410 x 60**. Οι διατομές που είναι με κόκκινο δεν τηρούν την προϋπόθεση $\sigma_m \leq \sigma_{ALL} = 168$. Στη συνέχεια παρουσιάζεται πως μεταβάλλεται το βάρος της διατομής που επιλέχθηκε **W410 x 60** αλλάζοντας μια κάθε φορά διάσταση της διατομής (d_w , t_w , b_f , t_f). Ισχύουν οι ίδιες διευκρινήσεις με την πρώτη περίπτωση.

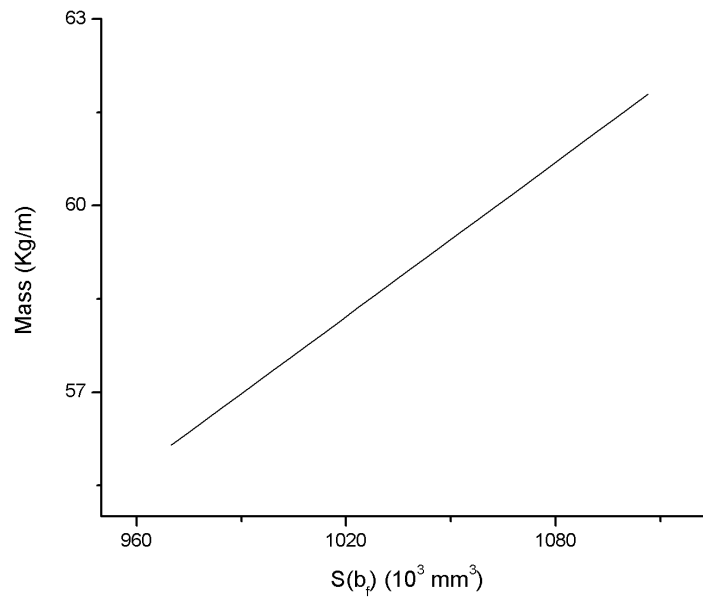
Επίσης παρουσιάζονται επιλεκτικά η μεταβολή της μάζας συναρτήσει της αλλαγής των διαστάσεων της διατομής, καθώς και συναρτήσει της μεταβολής της ροπής αντίστασης.



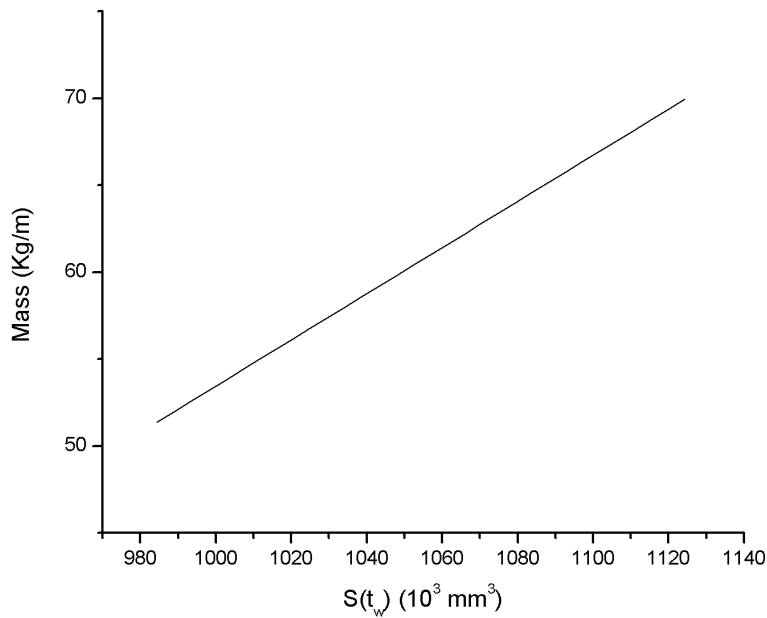
Σχήμα 4.11: Γραφική αναπαράσταση σχέση μάζας με πλάτος της φλάντζας.



Σχήμα 4.12: Γραφική αναπαράσταση σχέση μάζας με πάχος κορμού.



Σχήμα 4.13: Γραφική αναπαράσταση σχέση μάζας με ροπή αντίστασης.



Σχήμα 4.14: Γραφική αναπαράσταση σχέση μάζας με ροπή αντίστασης.

Στη συνέχεια θα αναφερθούν σε πίνακες τα ελάχιστα όρια καθεμίας από τις 4 διαστάσεις. Το ανώτατο όριο τάσης που πρέπει να ισχύει είναι $\sigma_m \leq \sigma_{ALL} = 168$.

Πίνακας 4.9: Ελάχιστο όριο πλάτος φλάντζας.

b_f (mm)	Mass (kg/m)	σ_m
168	57.9	167.7
169	58.1	166.9
170	58.4	166.1
171	58.6	165.4
172	58.8	164.6
173	59.0	163.8
174	59.2	163.1
175	59.4	162.3
176	59.6	161.6
177	59.8	160.9
178	60.0	160.2
179	60.2	159.4
180	60.4	158.7

Πίνακας 4.10: Ελάχιστο όριο πάχος φλάντζας.

t_f (mm)	Mass (kg/m)	σ_m
12.2	58.3	166.3
12.4	58.9	164.2
12.6	59.4	162.2
12.8	60.0	160.2
13.0	60.6	158.2
13.2	61.1	156.3

Πίνακας 4.11: Ελάχιστο όριο ύψος κορμού.

d_w (mm)	Mass (kg/m)	σ_m
364.4	59.0	167.7
365.4	59.1	167.2
366.4	59.1	166.7
367.4	59.2	166.2
368.4	59.3	165.8
369.4	59.3	165.3
370.4	59.4	164.8
371.4	59.5	164.3
372.4	59.5	163.9
373.4	59.6	163.4
374.4	59.6	162.9
375.4	59.7	162.5
376.4	59.8	162.0
377.4	59.8	161.5
378.4	59.9	161.1
379.4	59.9	160.6
380.4	60.0	160.2
381.4	60.0	159.7
382.4	60.1	159.3
364.4	59.0	167.7

Πίνακας 4.12: Ελάχιστο όριο πλάτος φλάντζας.

t_w (mm)	Mass (kg/m)	σ_m
5.95	54.6	167.3
6.15	55.2	166.5
6.35	55.8	165.7
6.55	56.4	164.9
6.75	57.0	164.0
6.95	57.6	163.3
7.15	58.2	162.5
7.35	58.8	161.7
7.55	59.4	160.9
7.75	60.0	160.2
7.95	60.6	159.4
8.15	61.2	158.7

Σχόλια Διαγραμμάτων και Πινάκων.

- Υπάρχει κάποια απόκλιση των τιμών που υπολογίζονται στο excel, της ροπής αδράνειας και της επιφάνειας της διατομής, σε σχέση με αυτών από την λίστα των διατομών. Αυτό δεν έχει όμως κάποια σημαντική επίδραση στα διαγράμματα παρά μόνο κάποια σταθερή μετατόπιση. Η απόκλιση αυτή έχει σημασία όμως στο min-max κάθε διάστασης που μπορεί να μεταβληθεί στην συγκεκριμένη καταπόνηση. Στους Πίνακες έχουν υπολογιστεί οι αποκλίσεις στην ροπή αδράνειας και στην επιφάνειας της διατομής, ώστε να μπορούν να συγκριθούν καλύτερα τα αποτελέσματα σε σχέση με αυτό που δίνονται από των διατομών.
- Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται σημαντική μείωση του βάρους της διατομής, μέσω της μείωσης του πάχους του κορμού (t_w), όπου αν για παράδειγμα επιλεγθεί πάχος 5.95 αντι 7.75 η δοκός θα είναι και πάλι λειτουργική και το βάρος της θα έχει μειωθεί κατά 27 κιλά. Και στις υπόλοιπες 3 διαστάσεις υπάρχει κάποια μείωση του βάρους αλλά όχι τόσο σημαντική όσο στην προαναφερθείσα.

- Για την περίπτωση που υπάρχει η μεγαλύτερη μείωση βάρους, δηλαδή για νέο πάχος κορμού $t_w = 5.95$ και οι υπόλοιπες τρεις διαστάσεις να παραμείνουν σταθερές. Εάν συγκριθούν οι σχέσεις (4.11) και (4.12) με τις τιμές των σχέσεων (4.20), (4.21) που θα προκύψουν με τις διαστάσεις της αναλυτικής λύσης για την μείωση του βάρους της δοκού, παρατηρείται ότι υπάρχει απόκλιση. Αυτό υποδηλώνει ότι μέσω της αναλυτικής λύσης και της αλλαγής των διαστάσεων μίας κάθε φοράς (One factor at a time) δεν μπορεί να προσεγγιστεί με μεγάλη ακρίβεια η βέλτιστη λύση για το πρόβλημα μας. Η απόκλιση σε αυτή την περίπτωση είναι ακόμα μεγαλύτερη από την πρώτη, το οποίο υποδηλώνει ότι η συγκεκριμένη διατομή της δοκού, μπορεί να υποστεί μεγαλύτερες αλλαγές στις διαστάσεις της, με ακόμα μεγαλύτερη μείωση του βάρους. Από τις δύο αυτές περιπτώσεις του προβλήματος, συμπεραίνεται ότι η μέθοδος βελτιστοποίησης μέσω της μεθόδου One-factor-at-a-time δεν είναι ικανή να μας δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

$$\left(\frac{b}{d}\right)_{as} = 0.44 \quad (4.20)$$

$$\left(\frac{t_f}{t_w}\right)_{as} = 2.15 \quad (4.21)$$

4.4 Αριθμητική βελτιστοποίηση

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί πως μοντελοποιήθηκε η δοκός στο υπολογιστικό πρόγραμμα και επίσης θα ελεγχθούν τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν προηγουμένως και με αυτά που προκύπτουν από το **Mechanical Apdl & Workbench**. Αρχικά μοντελοποιείται η δοκός του προβλήματος και εφαρμόζονται οι συγκεκριμένες φορτίσεις των δύο περιπτώσεων, έπειτα ελέγχεται η αντοχή της δοκού σε διαρροή, αλλά και σε τοπικό λυγισμό. Ο σκοπός της λύσης του προβλήματος μέσω υπολογιστικού προγράμματος, είναι η εφαρμογή της μεθόδου των ΠΣ. Έτσι ορίζοντας σαν μεταβλητές εισόδου τις διαστάσεις που περιγράφουν την διατομή της δοκού (d_w , t_w , b_f , t_f) και μεταβλητές εξόδου την μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση (Von Mises) της δοκού και τις μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις του κορμού και της φλάντζας, είναι δυνατός ο έλεγχος του κριτηρίου διαρροής της δοκού και του τοπικού λυγισμού. Στη συνέχεια μέσω των τεχνικών βελτιστοποίησης που έχουν περιγραφεί στο Κεφάλαιο 3, θα γίνει η εύρεση των πιθανών βέλτιστων διατομών της δοκού λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που θα έχουν οριστεί.

4.4.1 Λυγισμός υπό συνδυασμό φορτίσεων

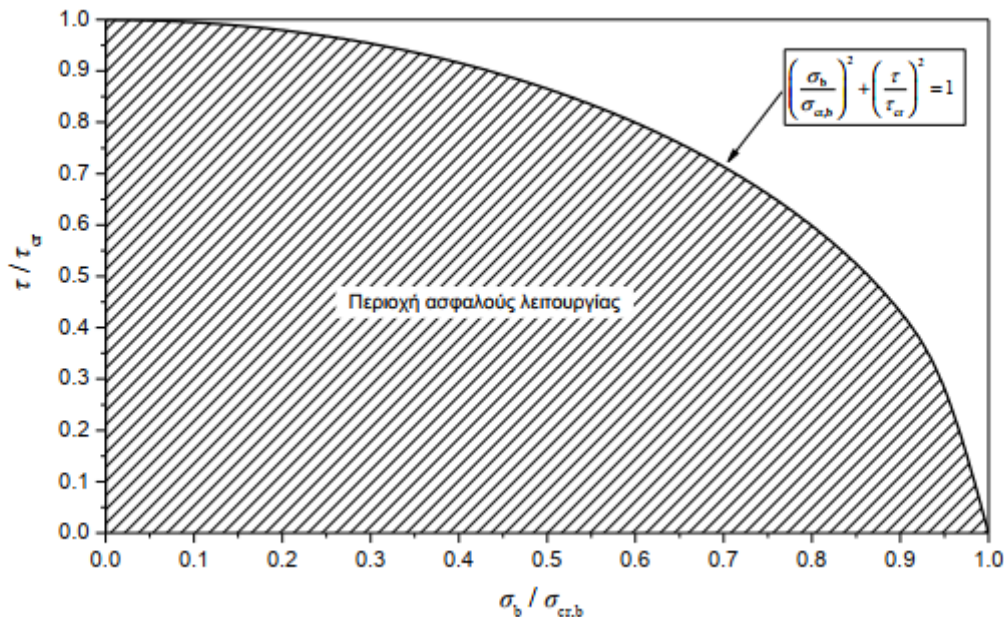
Θα γίνει μία σύντομη αναφορά στον λυγισμό υπό συνδυασμό φορτίσεων, ορθές και διατμητικές τάσεις. Συνήθως τέτοιες περιπτώσεις αποτελούν οι συνδυαστικές καταπονήσεις που προέρχονται από την διαμήκη κάμψη του πλοίου ως δοκού (shagging/hogging) περί τον οριζόντιο ή κάθετο άξονα της διατομής και οδηγούν στην ανάπτυξη καμπτικών ροπών και τεμνουσών δυνάμεων. Για τον έλεγχο της αντοχής στον λυγισμό απαιτείται η χρήση κριτηρίων λυγισμού που βασίζονται σε εφαρμογή σχέσεων/καμπυλών αλληλεπίδρασης (interaction formulas/curves).

Μια γενική εμπειρική σχέση αλληλεπίδρασης (κριτήριο λυγισμού) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έλεγχο σε λυγισμό δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{cr}} + \left(\frac{\sigma_b}{\sigma_{cr,b}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2 = 1 \quad (4.22)$$

,όπου ο πρώτος όρος αφορά ομοιόμορφη θλίψη, ο δεύτερος όρος αφορά καθαρή ομοεπίπεδη κάμψη και ο τρίτος όρος αφορά καθαρή διάτμηση. Ο λυγισμός συμβαίνει όταν το αριστερό σκέλος της εξίσωσης (4.22) γίνει ίσο ή μεγαλύτερο της μονάδας.

Ακόμα το αριστερό σκέλος της εξίσωσης (14) ισούται με τον βαθμό εκμετάλλευσης. Ο λόγος της μέσης ασκούμενης τάσης προς την κρίσιμη τάση καλείται βαθμός εκμετάλλευσης (utilization factor) και συμβολίζεται με "η", ακόμα εκφράζει το ποσοστό της φέρουσας ικανότητας του δομικού στοιχείου που εξετάζεται.



Σχήμα 4.15: Καμπύλη αλληλεπίδρασης λυγισμού για συνδυαστική φόρτιση ομοεπίπεδης κάμψης και διάτμησης.

4.4.2 Μοντελοποίηση δοκού προβλήματος μέσω υπολογιστικού προγράμματος

Η μοντελοποίηση έγινε με δύο διαφορετικά στοιχεία.

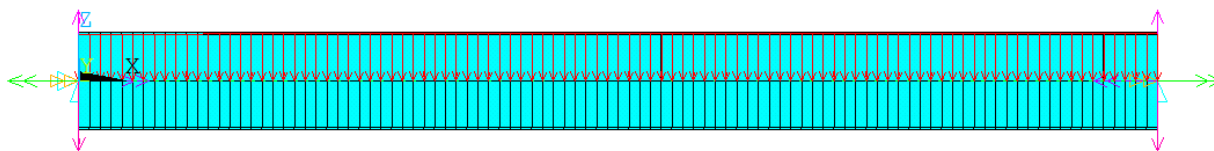
- 3-Δ 2-κομβο στοιχείο δοκού (Beam188 από την βιβλιοθήκη του Ansys)
- 3-Δ 4-κομβο στοιχείο πλάκας (Shell181 από την βιβλιοθήκη του Ansys)

Για το στοιχείο Beam188, αρχικά σχεδιάστηκε η διατομή με τις αρχικές διαστάσεις που έχουν ληφθεί από τον κατάλογο του κατασκευαστή με την αντίστοιχη εντολή του προγράμματος και έπειτα δόθηκε το επιθυμητό μήκος στην δοκό. Η διαμερισματοποίηση της δοκού επιλέχθηκε να γίνει σε 100 στοιχεία. Έπειτα θεσπίστηκαν οι συνοριακές συνθήκες στα δύο άκρα της δοκούς. Πιο συγκεκριμένα για το αριστερό άκρο θεωρήθηκε άρθρωση και για το δεξί άκρο κύλιση. Δηλαδή για το αριστερό άκρο από τους 6 BE περιορίστηκαν 4 από αυτούς, όλες τις μετατοπίσεις και την περιστροφή κατά τον x-άξονα. Για το δεξί άκρο από τους 6 BE περιορίστηκαν οι 3, όλες τις μετατοπίσεις εκτός από τον x-άξονα και την περιστροφή κατά τον x-άξονα. Τέλος εφαρμόστηκε και η ομοιόμορφη φόρτιση στη δοκό και αντίστοιχα για την άλλη περίπτωση η εφελκυστική δύναμη.

```

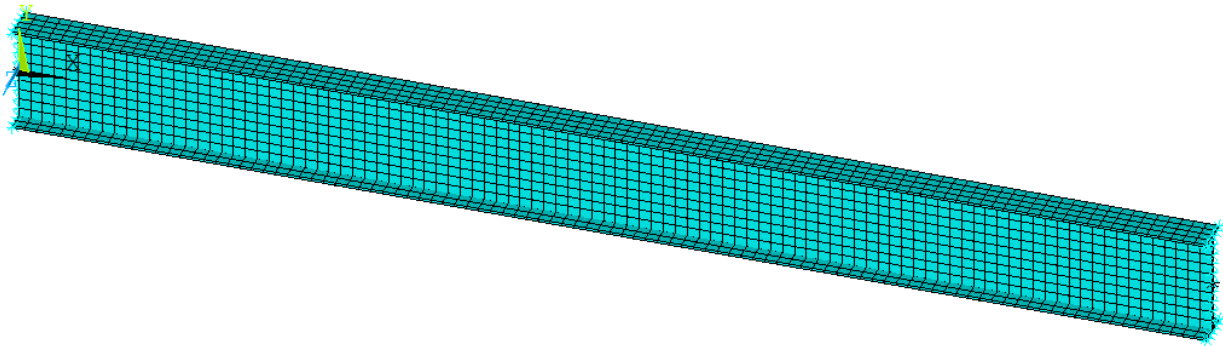
U
ROT
NFOR
NMOM
RFOR
RMOM
PRES-NORM
50

```



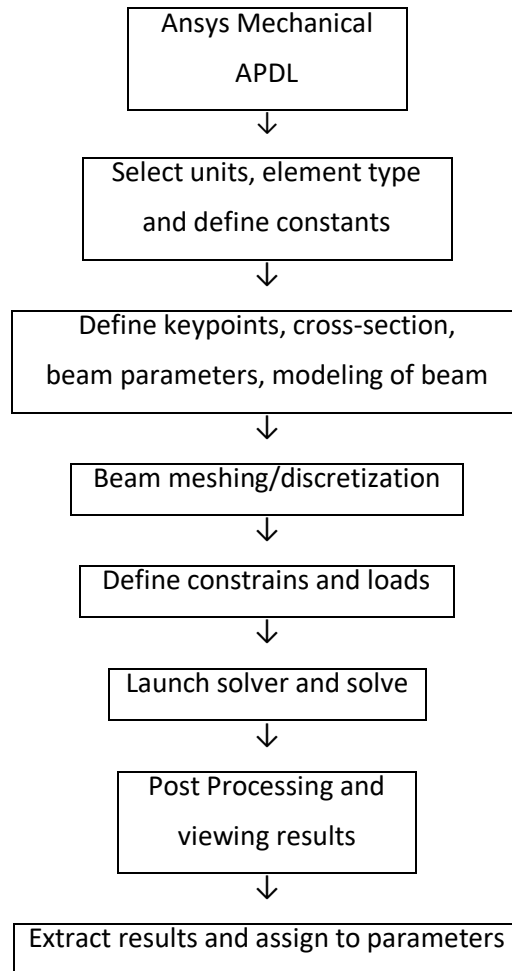
Σχήμα 4.16: Μοντελοποιημένη δοκός μέσω προγράμματος Ansys APDL.

Για το στοιχείο Shell181, αρχικά σχεδιάστηκε το περίγραμμα της διατομής της δοκού και έπειτα επεκτάθηκε έτσι ώστε η δοκός να αποκτήσει το επιθυμητό μήκος. Η διαμερισματοποίηση της δοκού έγινε αυτόματα μέσω του προγράμματος σε μικρά τετραγωνικά στοιχεία. Δηλαδή σε κάθε αλλαγή των τιμών των τεσσάρων διαστάσεων της διατομής το συνολικά στοιχεία που απαρτίζουν την δοκό μεταβάλλονται. Για τις αρχικές διαστάσεις της πρώτης περίπτωσης έχουμε 1840 στοιχεία και για την δεύτερη περίπτωση έχουμε 1636. Έπειτα θεσπίστηκαν οι συνοριακές συνθήκες στα δύο άκρα της δοκού. Πιο συγκεκριμένα για το αριστερό άκρο θεωρήθηκε άρθρωση και για το δεξί άκρο κύλιση. Λόγω όμως της διαφορετικής μοντελοποίησης του στοιχείου αυτού για την επιβολή των συνοριακών συνθηκών δημιουργήθηκε στα δύο άκρα "Contact Pair Creation". Δηλαδή τα σημεία που δόθηκαν, τα οποία περιγράφουν τη διατομή της δοκού, συνδέθηκαν με έναν καινούργιο κόμβο, ο οποίος βρίσκεται στο κέντρο μάζας της διατομής. Στη συνέχεια στον κόμβο αυτό περιορίστηκαν οι αντίστοιχοι BE όπως στο στοιχείο Beam. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκαν οι στηρίξεις στα δύο άκρα της δοκού. Τέλος εφαρμόστηκε και η ομοιόμορφη φόρτιση στη δοκό και αντίστοιχα για την άλλη περίπτωση η εφελκυστική δύναμη. Και για τα δύο στοιχεία οι κώδικες της μοντελοποίησης τους βρίσκονται στο παράρτημα οι κώδικες της μοντελοποίησης τους.



Σχήμα 4.17: Μοντελοποιημένη δοκός μέσω προγράμματος Ansys APDL.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του **Mechanical Apdl**.



Σχήμα 4.18: Διάγραμμα ροής του Mechanical Apdl.

Η μοντελοποίηση έγινε με δύο διαφορετικά στοιχεία, διότι το Beam188 δεν υπολογίζει τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στην διατομή, ενώ αντίθετα το Shell181 τις υπολογίζει αναλυτικά. Ακόμα στην περίπτωση της μοντελοποίησης με το Shell181 για κάθε ένα από τα δύο παραδείγματα έχουν υπολογιστεί δύο υποπεριπτώσεις. Στην πρώτη, στην ένωση των επιφανειών-όγκων του κορμού με την φλάντζα υπάρχει επικάλυψη που από εδώ και κάτω θα αναφέρεται ως Shell181-Midplane και στην δεύτερη ο κορμός με την φλάντζα εφάπτονται. Η περίπτωση αυτή θα αναφέρεται ως Shell181-Offset.

Επομένως για κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις που θα ελεγχθούν, καταναμημένο φορτίο και καταναμημένο φορτίο με αξονική δύναμη, δημιουργήθηκαν συνολικά τρεις διαφορετικές μοντελοποιήσεις.

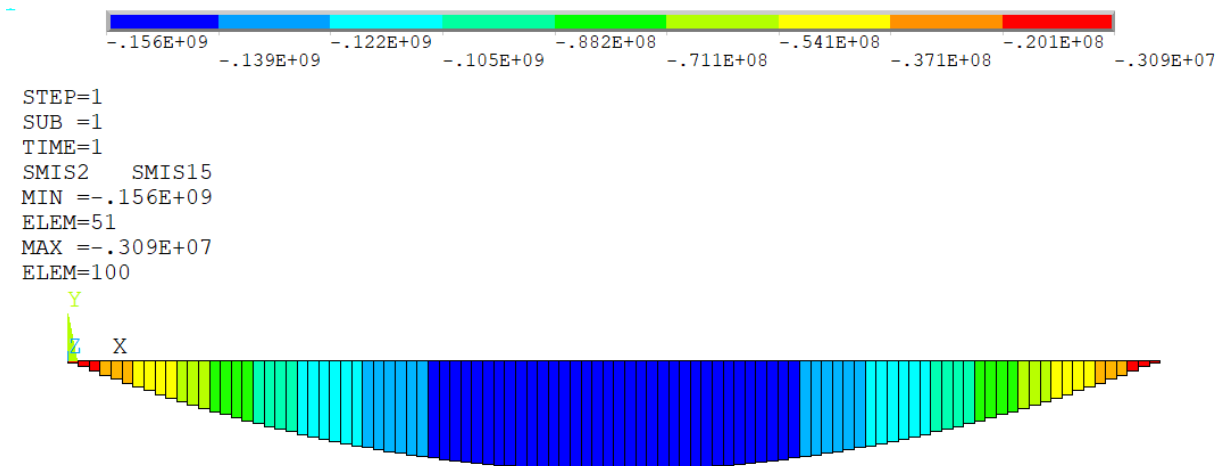
Καταναμημένο φορτίο

- Beam_1
- Shell-Midplane_1
- Shell-Offset_1

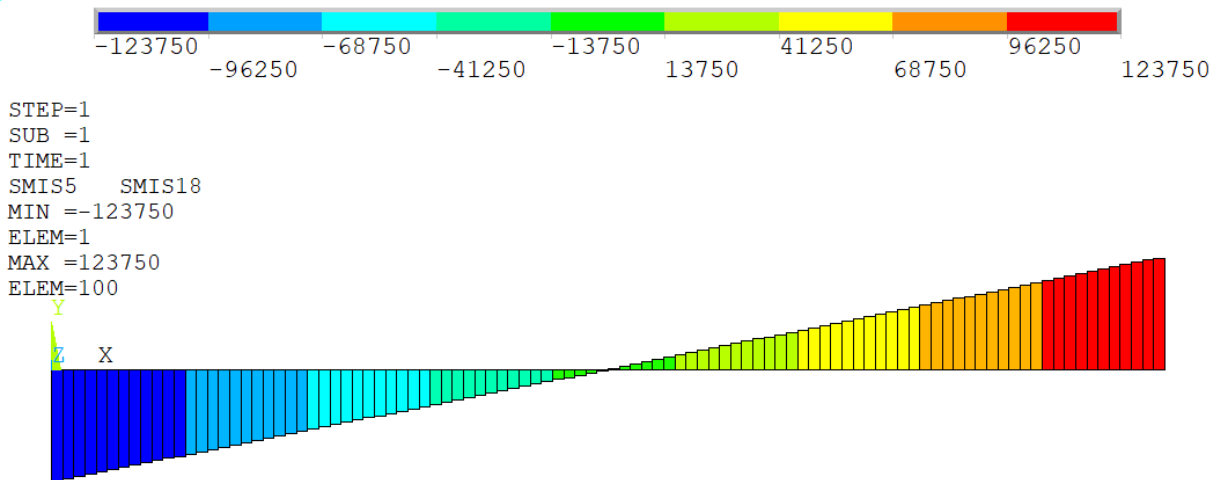
Καταναμημένο φορτίο και αξονική δύναμη

- Beam_2
- Shell-Midplane_2
- Shell-Offset_2

Τα διαγράμματα των καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων έχουν προέλθει μόνο από το στοιχείο Beam188 και αυτό γιατί το στοιχείο Shell181 δεν μας δίνει αυτή την δυνατότητα.



Σχήμα 4.19: Διάγραμμα καμπτικής ροπής μέσω Mechanical Apdl (Beam).

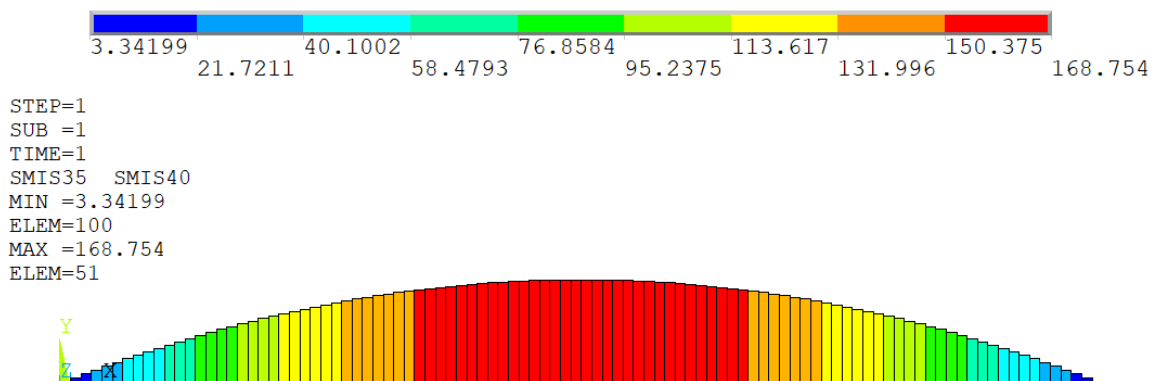


Σχήμα 4.20: Διάγραμμα διατμητικής δύναμης μέσω Mechanical Apdl (Beam).

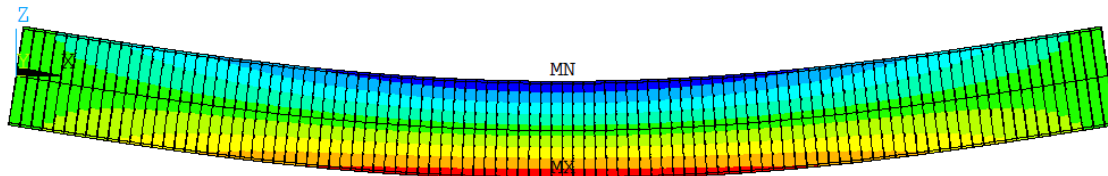
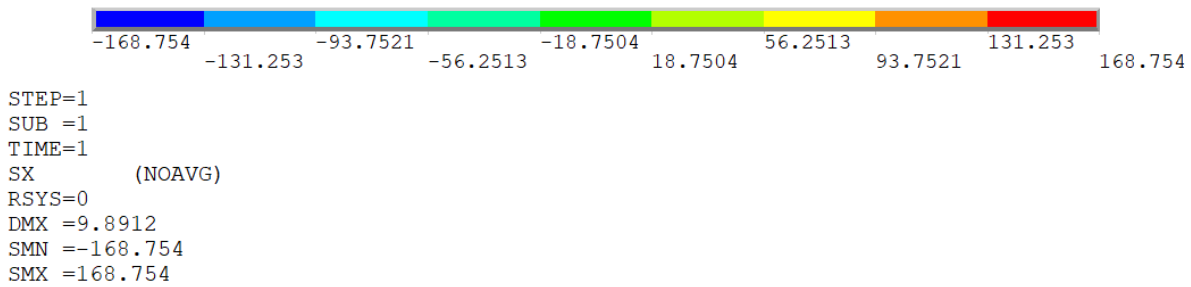
Τα διαγράμματα των Σχημάτων 4.19, 4.20 αντιπροσωπεύουν και τα δύο παραδείγματα. Παρατηρείται ότι και τα δύο τα διαγράμματα είναι τα ίδια με αυτά που προέκυψαν από την αρχική ανάλυση.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η τάση κατά το διάμηκες (X-κατεύθυνση) σε κάθε ένα από τα δύο παραδείγματα αλλά και η τιμή της σε όλη την δοκό.

- Κατανεμημένο Φορτίο-Beam_1



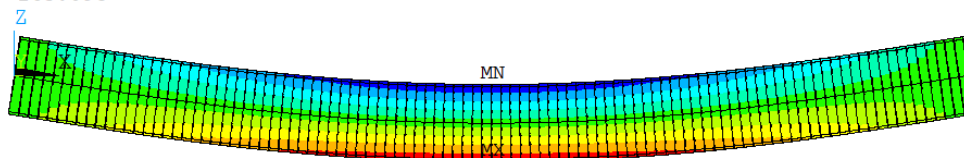
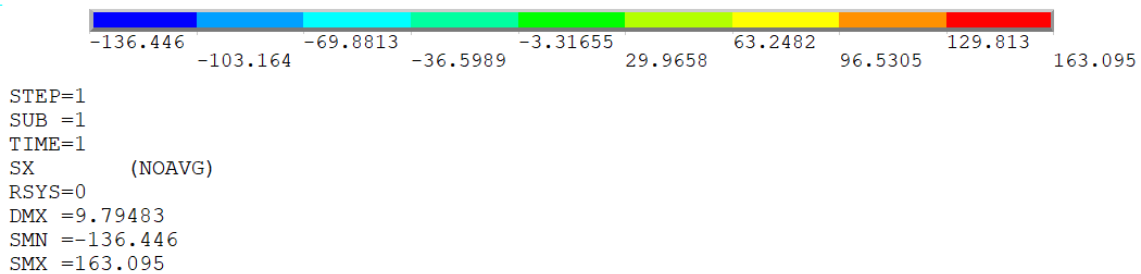
Σχήμα 4.21: Αξονική τάση μέσω Mechanical Apdl.



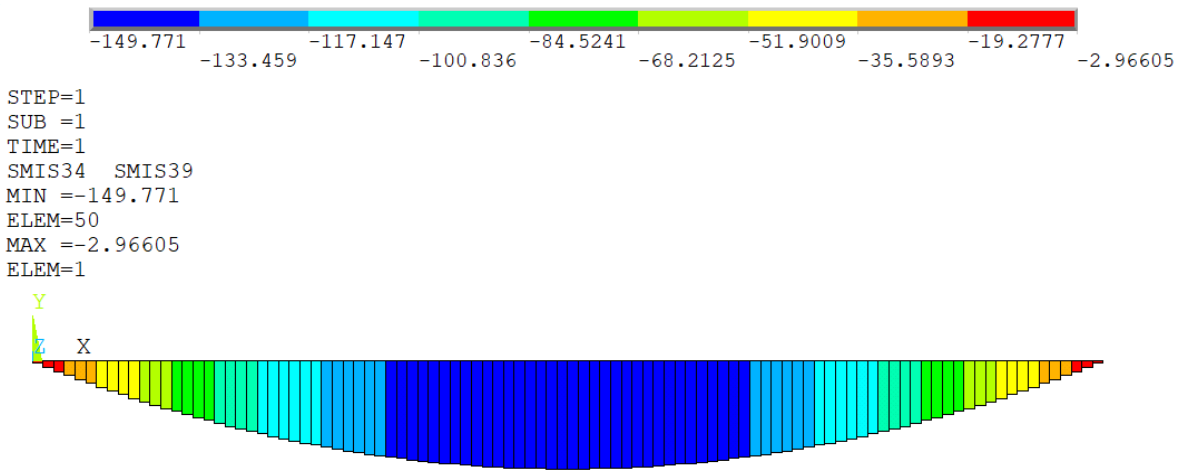
Σχήμα 4.22: Κατανομή κατά το διαμήκες της αξονικής τάσης μέσω Mechanical Apdl.

Από τα Σχήματα 4.21, 4.22 διαπιστώνεται ότι σωστά θεωρήθηκαν στην πρώτη περίπτωση ως κρίσιμα σημεία αυτά που βρίσκονται στο μέσο της δοκού και όσον αφορά την διατομή βρίσκονται στα άκρα της άνω και κάτω φλάντζας

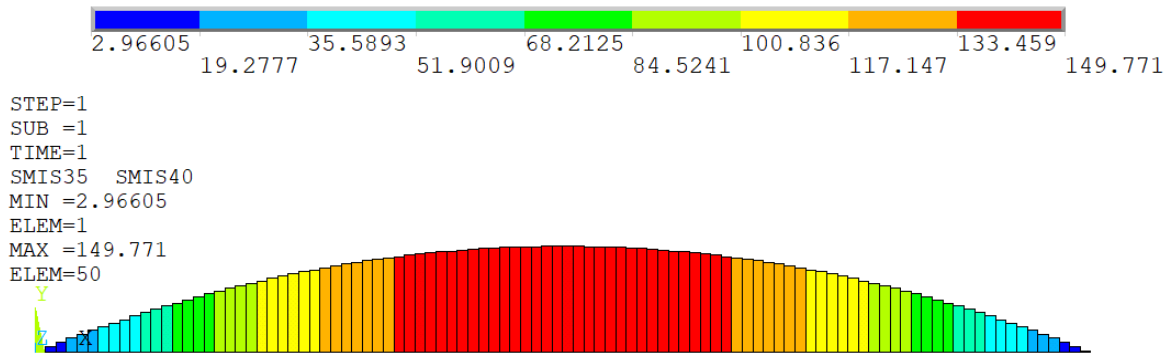
- Κατανεμημένο Φορτίο και Αξονική Δύναμη-Beam 2



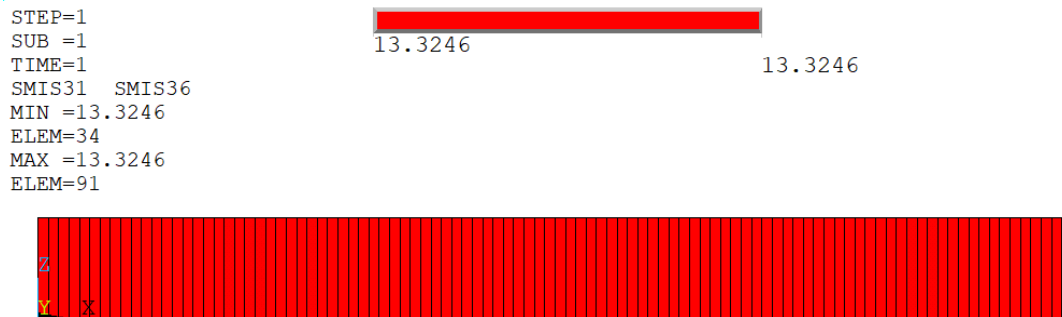
Σχήμα 4.23: Αξονική τάση λόγω καμπτικού φορτίου μέσω Mechanical Apdl.



Σχήμα 4.24: Κατανομή κατά το διαμήκες της θλιπτικής αξονικής τάσης μέσω Mechanical Apdl.



Σχήμα 4.25: Κατανομή κατά το διαμήκες της εφελκυστικής αξονικής τάσης μέσω Mechanical Apdl.



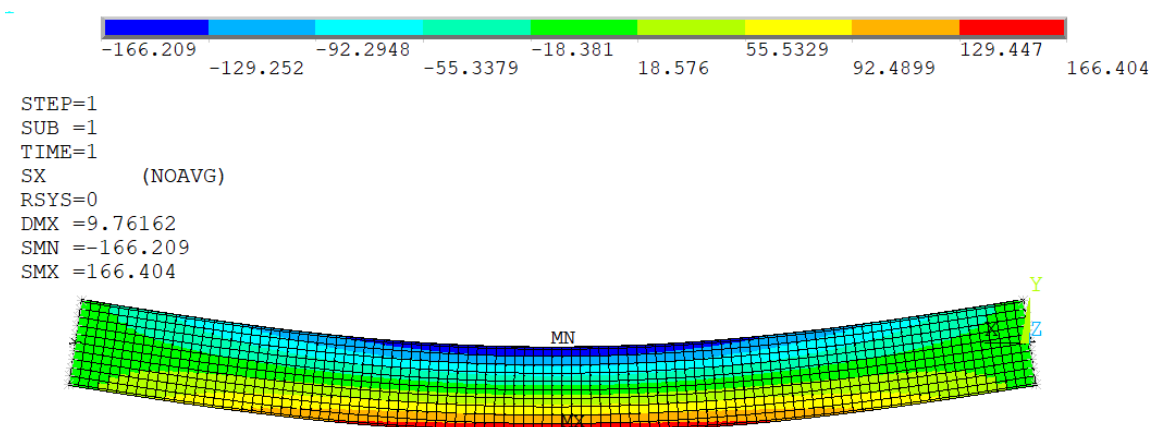
Σχήμα 4.26: Αξονική τάση λόγω εφελκυστικού φορτίου μέσω Mechanical Apdl.

Τα Σχήματα 4.23, 4.24, 4.25 δείχνουν την αξονική τάση που προκύπτει λόγω της καμπτικής ροπής-κατανεμημένο φορτίο και το Σχήμα 4.26 την αξονική τάση λόγω του εφελκυστικού φορτίου.

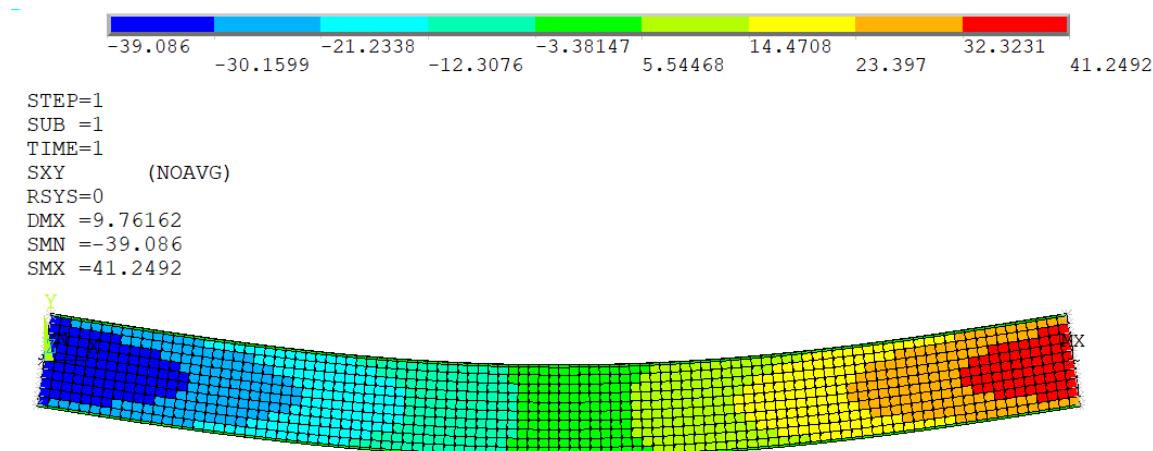
Και σε αυτήν την περίπτωση διαπιστώνεται ότι σωστά θεωρήθηκε ως κρίσιμο σημείο αυτό της κάτω φλάντζας, αφού το κάτω μισό της διατομής υπόκειται σε εφελκυσμό λόγω του κατανεμημένου φορτίου και σε αυτήν την εφελκυστική τάση προστίθεται και αυτή λόγω της αξονικής δύναμης.

Επίσης παρατηρείται ότι οι τιμές της τάσης δεν είναι ακριβώς οι ίδιες με αυτές που προκύπτουν από το excel με βάση τον Πίνακα διατομών του προμηθευτή. Επομένως συμπεραίνεται ότι και στο *Ansys mechanical* οι τιμές του εμβαδού της διατομής και η ροπή αδραειάς της έχουν κάποια απόκλιση με αυτή που μας δίνει ο Πίνακας διατομών.

- Κατανεμημένο Φορτίο-Shell-Midplane_1

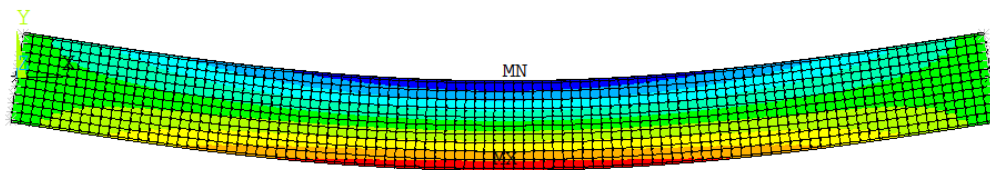
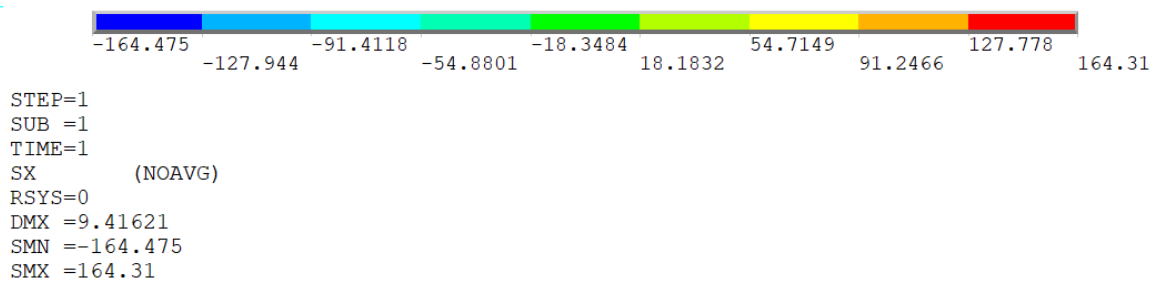


Σχήμα 4.27: Αξονική τάση μέσω Mechanical Apdl.

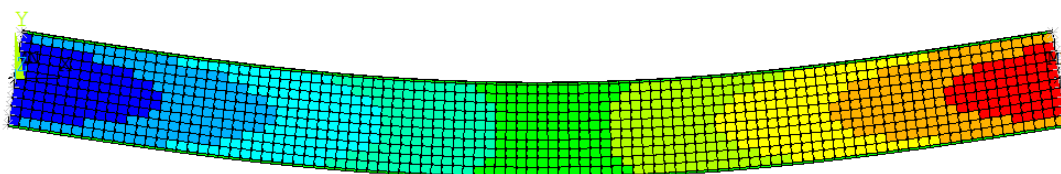
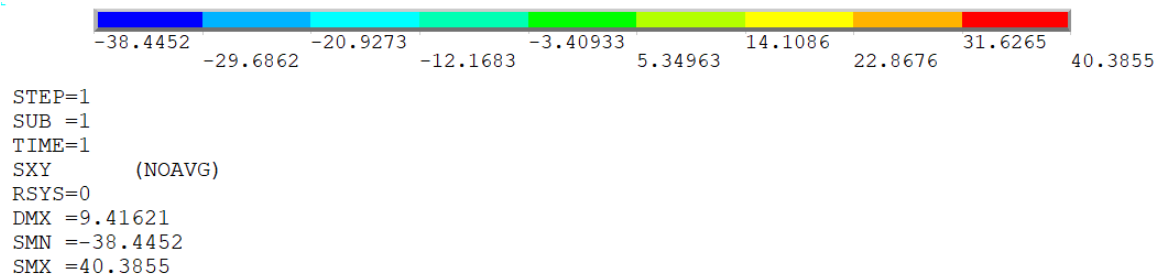


Σχήμα 4.28: Διατμητική τάση μέσω Mechanical Apdl.

- Κατανεμημένο Φορτίο-Shell-Offset 1



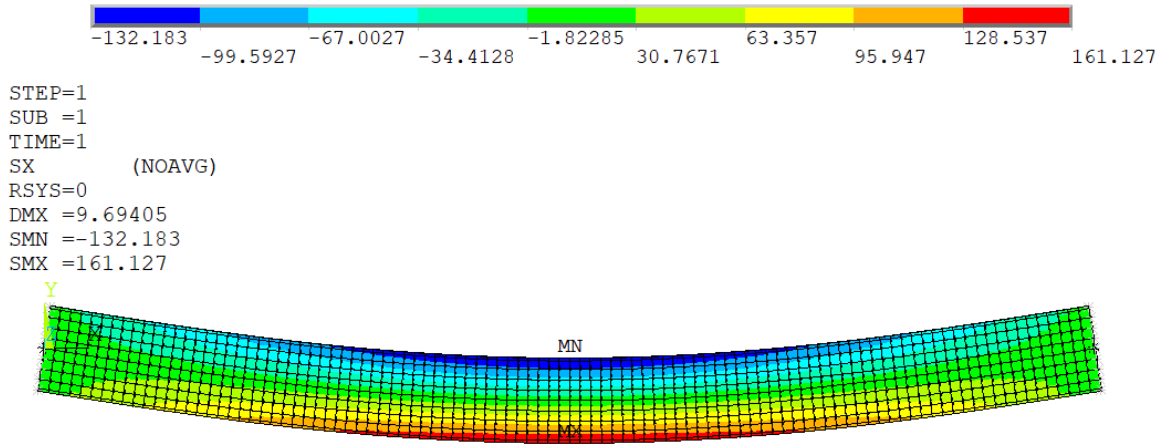
Σχήμα 4.29: Αξονική τάση μέσω Mechanical Apdl.



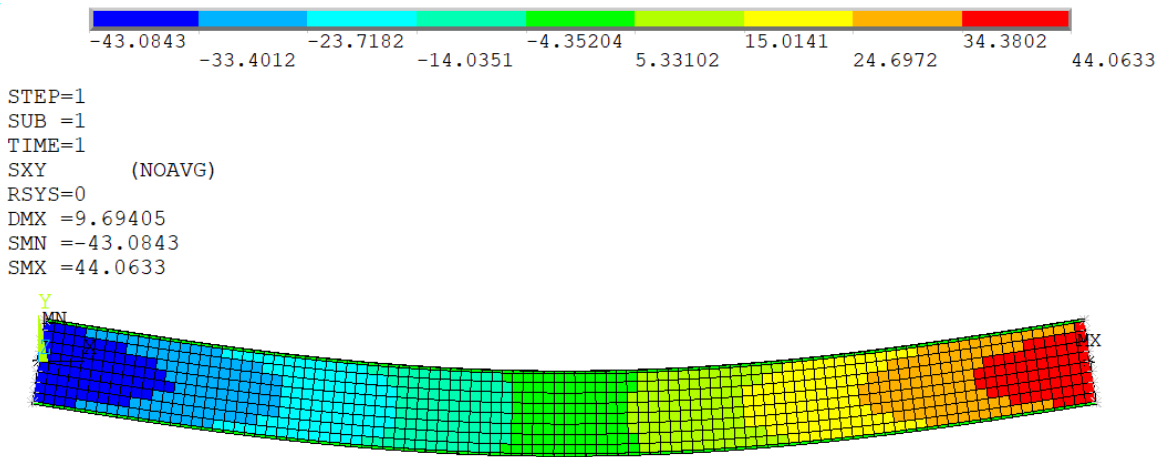
Σχήμα 4.30: Διατμητική τάση μέσω Mechanical Apdl.

Στο πρώτο παράδειγμα για το στοιχείο Shell181, παρατηρείται ότι η τιμή της αξονικής τάσης και της διατμητικής δύναμης στην περίπτωση Offset είναι ελάχιστα μικρότερη από αυτή της Midplane. Η μικρή αυτή διαφορά μπορεί να οφείλεται σε διαφορές λόγω της αριθμητικής ολοκλήρωσης κατά το πάχος. Όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω στο στοιχείο Beam188 δεν ήταν δυνατή η γραφική αναπαράσταση της διατμητικής δύναμης διότι δεν υπολογίζεται αναλυτικά.

- Κατανεμημένο Φορτίο και Αξονική Δύναμη -Shell-Midplane_2

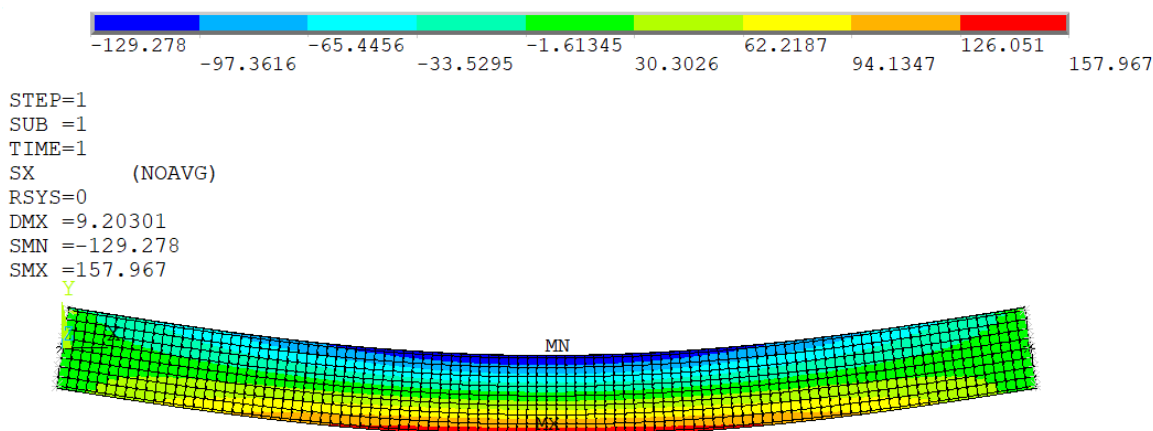


Σχήμα 4.31: Αξονική τάση μέσω Mechanical Apdl.

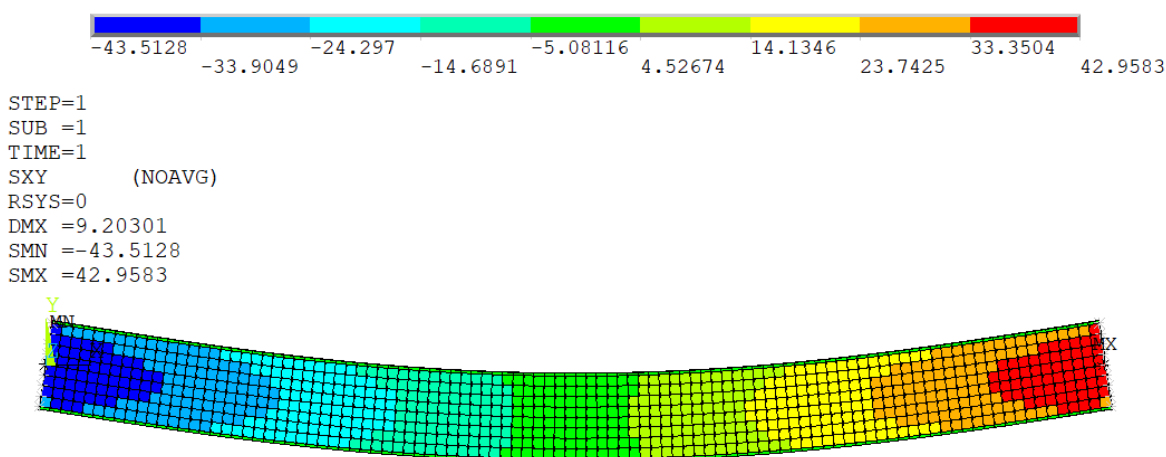


Σχήμα 4.32: Διατμητική τάση μέσω Mechanical Apdl.

- Κατανεμημένο Φορτίο και Αξονική Δύναμη -Shell-Offset 2



Σχήμα 4.33: Αξονική τάση μέσω Mechanical Apdl.



Σχήμα 4.34: Διατμητική τάση μέσω Mechanical Apdl.

Όπως και στο πρώτο παράδειγμα έτσι και στο δεύτερο η αξονική τάση και η διατμητική δύναμη της περίπτωσης Offset είναι μικρότερη από αυτή της Midplane. Η μικρή αυτή διαφορά μπορεί να οφείλεται σε διαφορές λόγω της αριθμητικής ολοκλήρωσης κατά το πάχος.

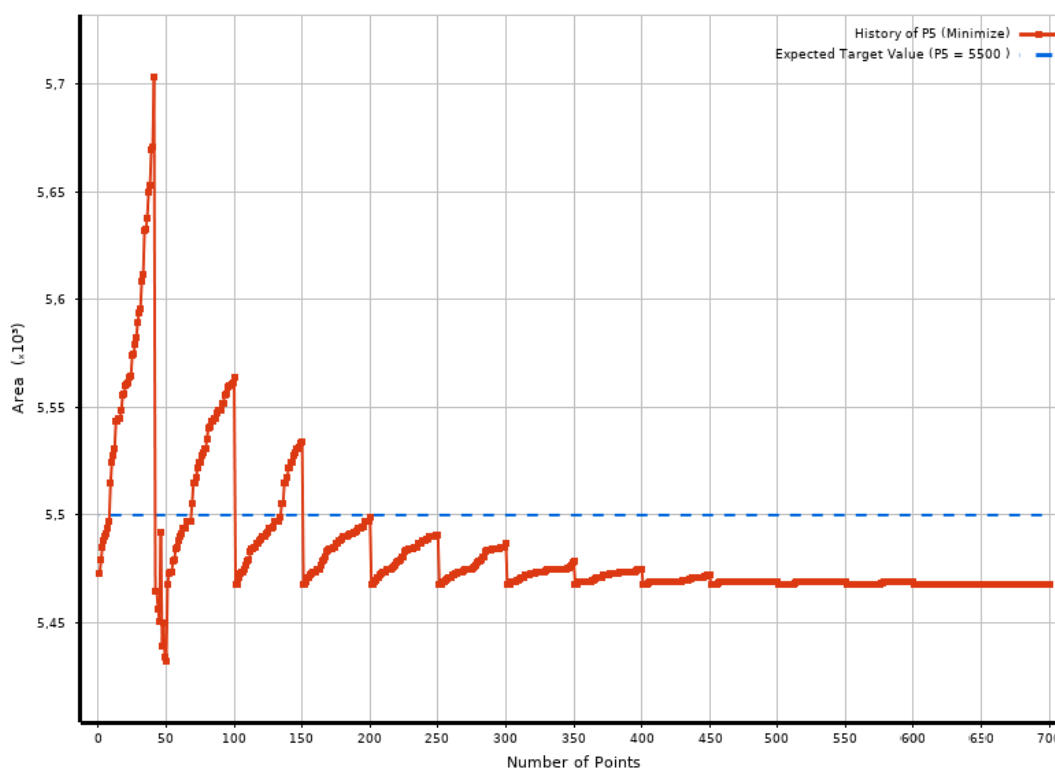
Επίσης τα σχήματα των αξονικών τάσεων του στοιχείου Shell181 είναι τα αποτελέσματα του Element Solution. Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν θα γίνει η βελτιστοποίηση μέσω του Workbench τότε σαν τάση, η οποία θα πρέπει να είναι μικρότερη της τάσης διαρροής, θα έχει επιλεγθεί η ισοδύναμη τάση Von Mises. Παρατηρείται ότι οι αξονικές τάσεις που προκύπτουν από το στοιχείο Shell181 είναι ελάχιστα μικρότερες από τις προκύπτουσες αξονικές τάσεις των δύο παραδειγμάτων με το στοιχείο Beam188.

4.5 Εφαρμογή τεχνικών βελτιστοποίησης

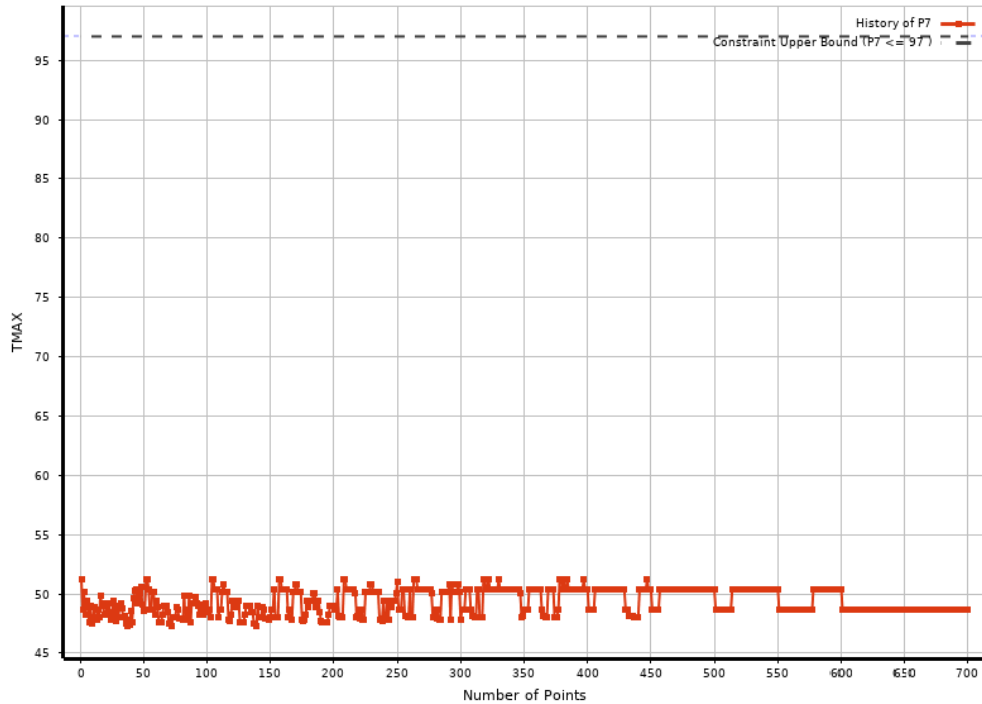
Αφού έχει τελειώσει η μοντελοποίηση των παραδειγμάτων, τώρα μέσω του προγράμματος Workbench Ansys θα βελτιστοποιηθεί η δοκός. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω κάθε ένα από τα δύο παραδείγματα έχει 3 διαφορετικές μοντελοποιήσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

4.5.1 Αποτελέσματα πρώτης περίπτωσης του προβλήματος και των δύο στοιχείων μέσω επίλυσης MOGA

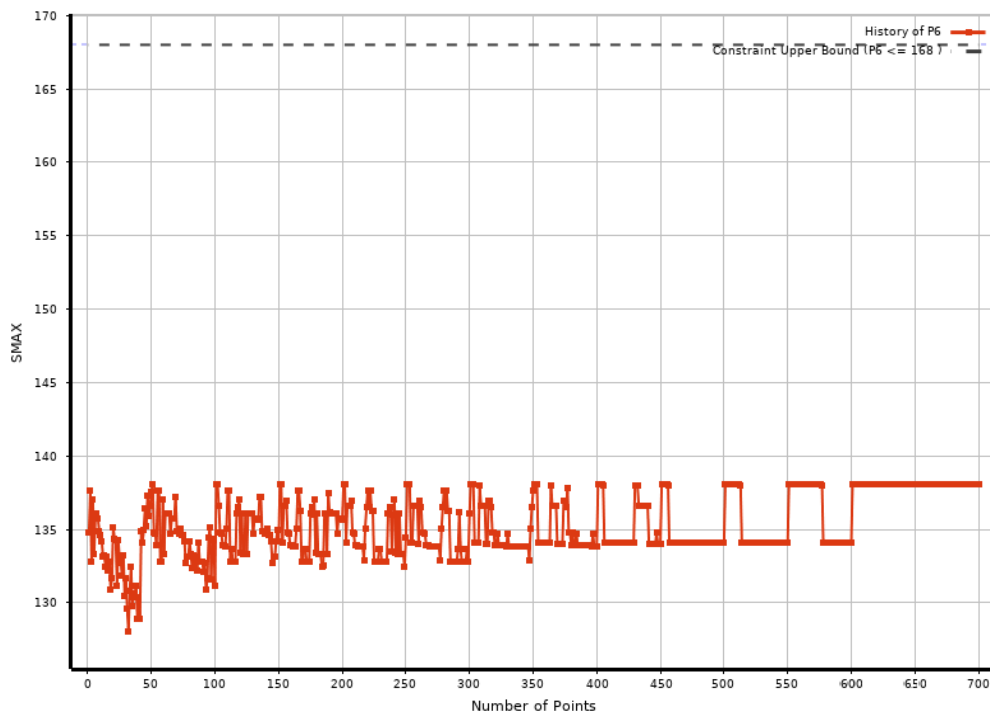
Λόγω της ομοιότητας των διαγραμμάτων θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα για Beam_1 και τα υπόλοιπα θα παρουσιαστούν στο παράρτημα.



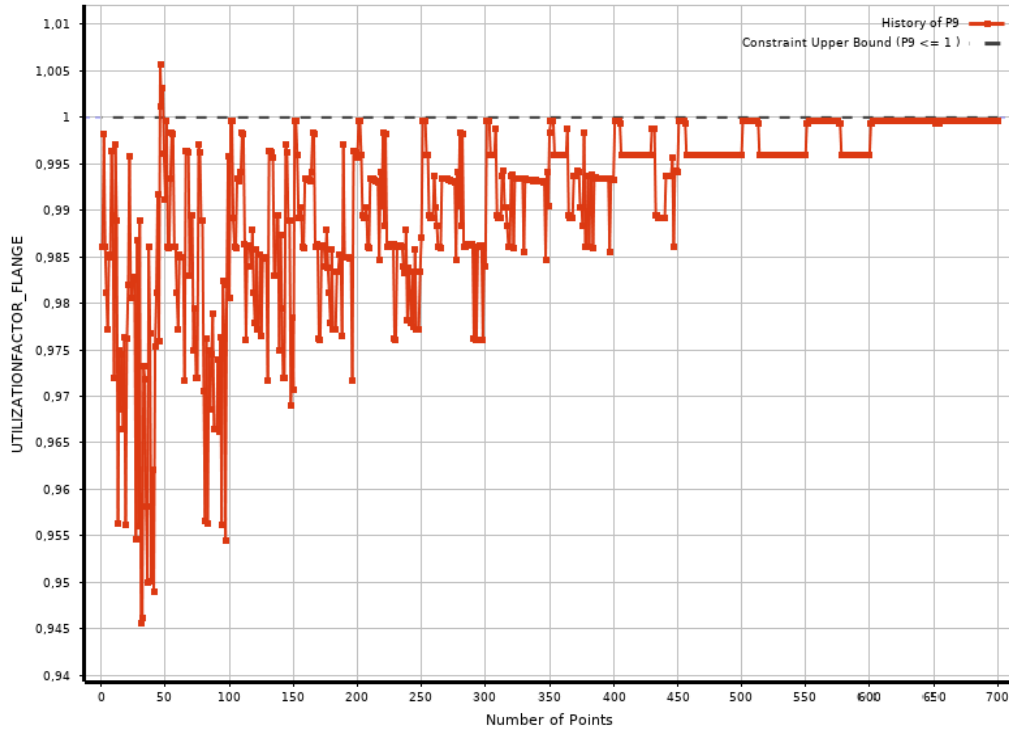
Σχήμα 4.35: Μεταβολή τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής), για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου MOGA (50 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Beam_1.



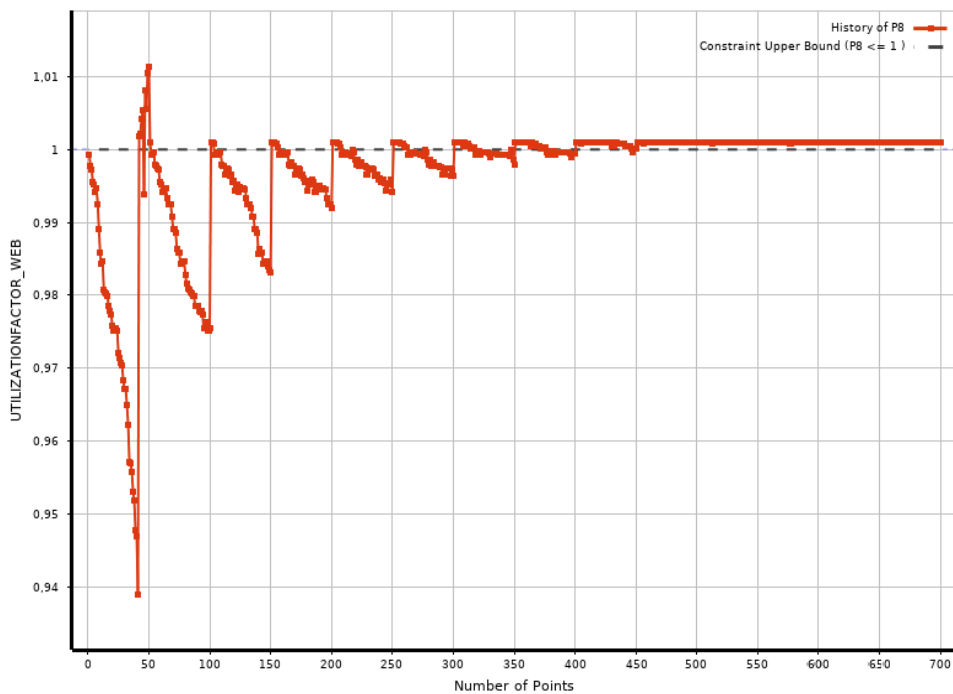
Σχήμα 4.36: Μεταβολή τιμής της μέγιστης διατμητικής τάσης του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου MOGA (50 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Beam_1.



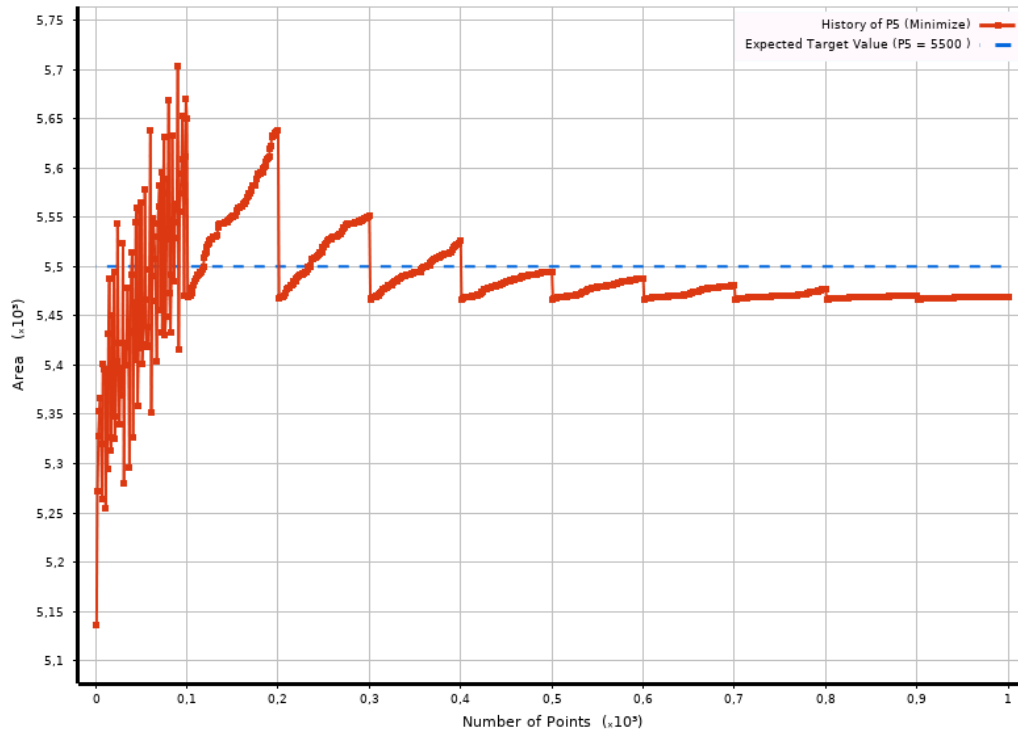
Σχήμα 4.37: Μεταβολή τιμής της μέγιστης τάσης Von Mises του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου MOGA (50 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Beam_1.



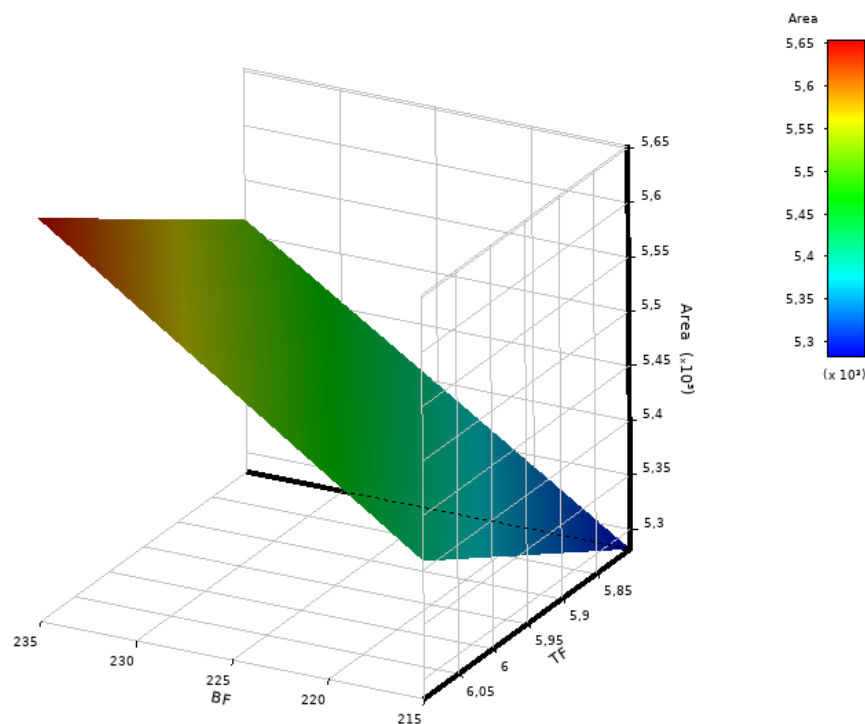
Σχήμα 4.38: Μεταβολή τιμής του βαθμού εκμετάλλευσης φλάντζας της δοκού του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου MOGA (50 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Beam_1.



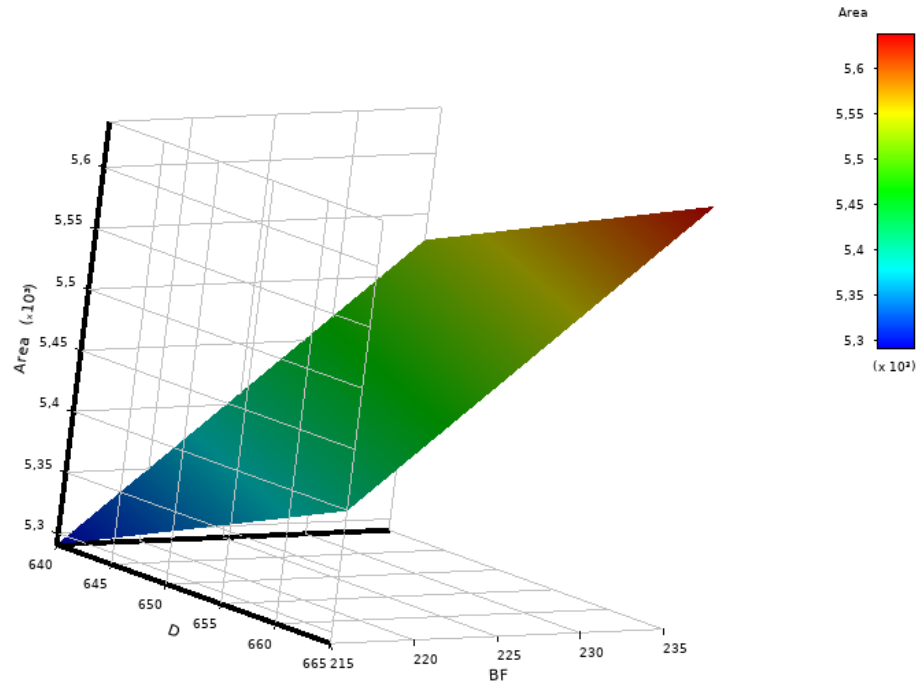
Σχήμα 4.39: Μεταβολή τιμής του βαθμού εκμετάλλευσης κορμού της δοκού του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου MOGA (50 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Beam_1.



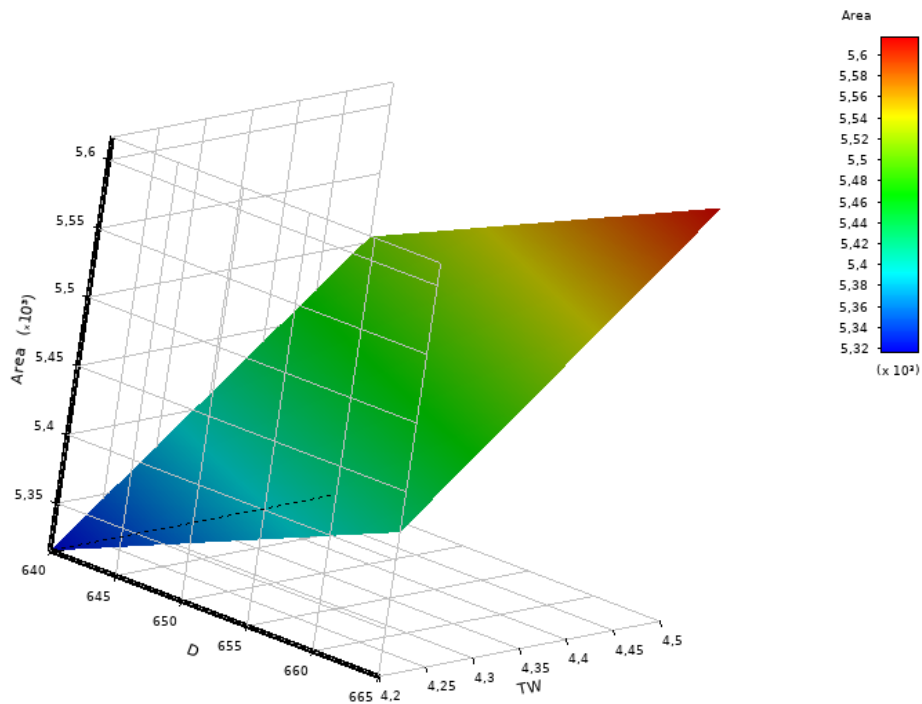
Σχήμα 4.40: Μεταβολή τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής), για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Beam_1.



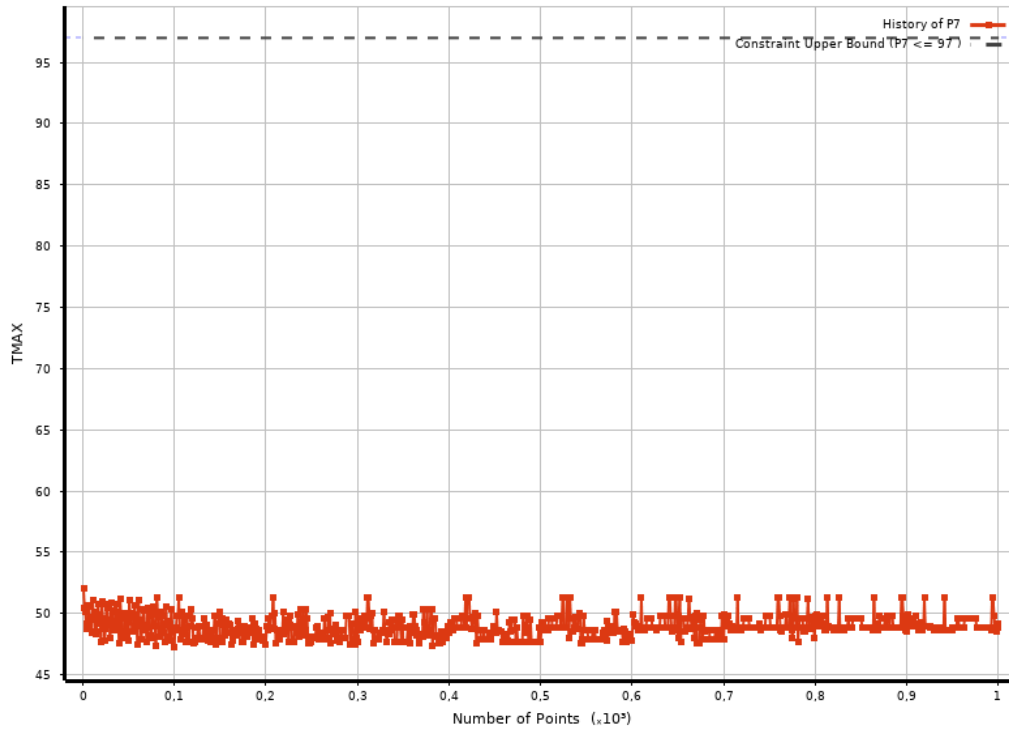
Σχήμα 4.41: Επιφάνεια απόκρισης της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής) συνάρτηση των διαστάσεων t_f και b_f , για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Beam_1.



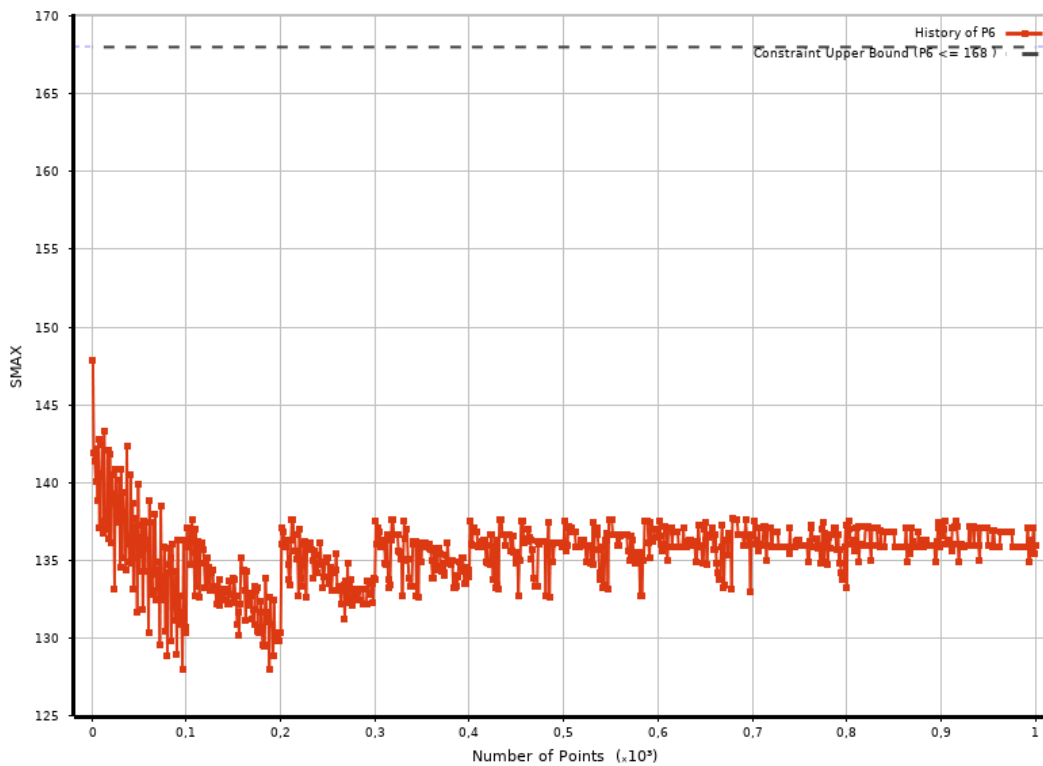
Σχήμα 4.42: Επιφάνεια απόκρισης της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής) συνάρτηση των διαστάσεων d και b_f , για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Beam_1.



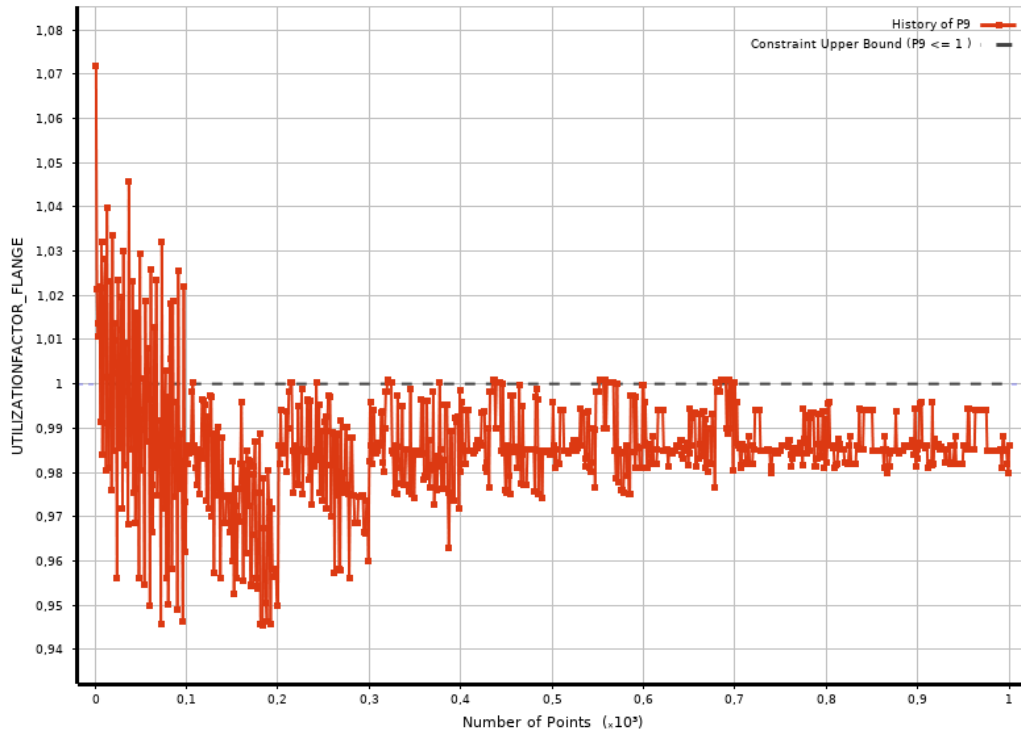
Σχήμα 4.43: Επιφάνεια απόκρισης της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής) συνάρτηση των διαστάσεων d και t_w , για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Beam_1.



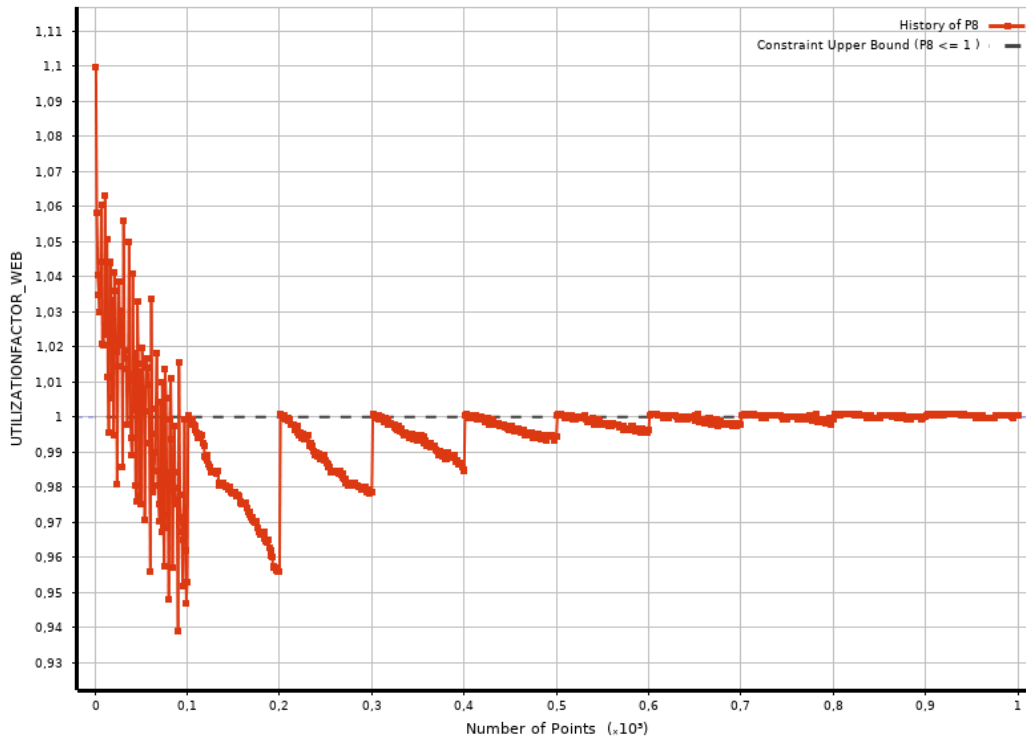
Σχήμα 4.44: Μεταβολή τιμής της μέγιστης διατμητικής τάσης του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Beam_1.



Σχήμα 4.45: Μεταβολή τιμής της μέγιστης τάσης Von Mises του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Beam_1.



Σχήμα 4.46: Μεταβολή τιμής του βαθμού εκμετάλλευσης φλάντζας της δοκού του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Beam_1.

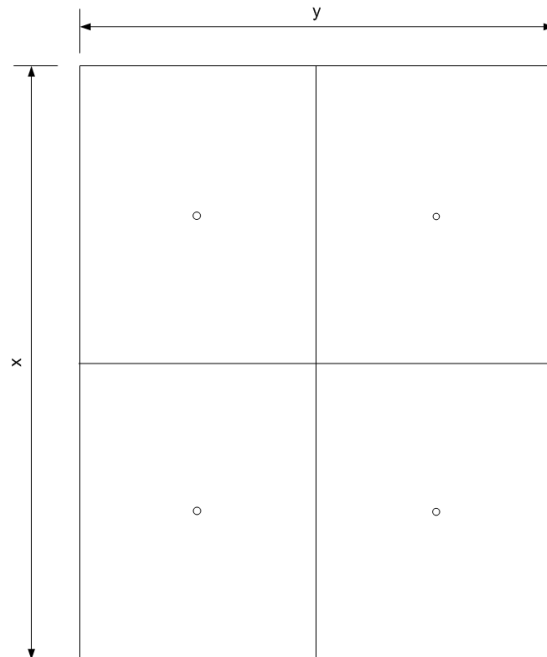


Σχήμα 4.47: Μεταβολή τιμής του βαθμού εκμετάλλευσης κορμού της δοκού του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Beam_1.

4.5.2 Αποτελέσματα πρώτης περίπτωσης του προβλήματος και των δύο στοιχείων μέσω επίλυσης NLPQL

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η μέθοδος αυτή μπορεί αρκετά εύκολα να εγκλωβιστεί σε τοπικά βέλτιστα, οπότε για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό επιλέχθηκαν αρκετά σημεία εκκίνησης έτσι ώστε να αποτραπεί όσον περισσότερο το δυνατόν.

Η λογική με την οποία επιλέχθηκαν τα σημεία εκκίνησης φαίνεται στο Σχήμα 4.48, για 2 μεταβλητές εισόδου.



Σχήμα 4.48: Γραφική αναπαράσταση σημείων εκκίνησης μεθόδου NLPQL.

Οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τα σημεία εκκίνησης. Δηλαδή αντί στον δισδιάστατο χώρο που απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα να επιλεγθεί ένα σημείο εκκίνησης, αυτό στο κέντρο του χώρου, επιλέγονται πλέον 4 τα οποία έχουν τις παρακάτω συντεταγμένες:

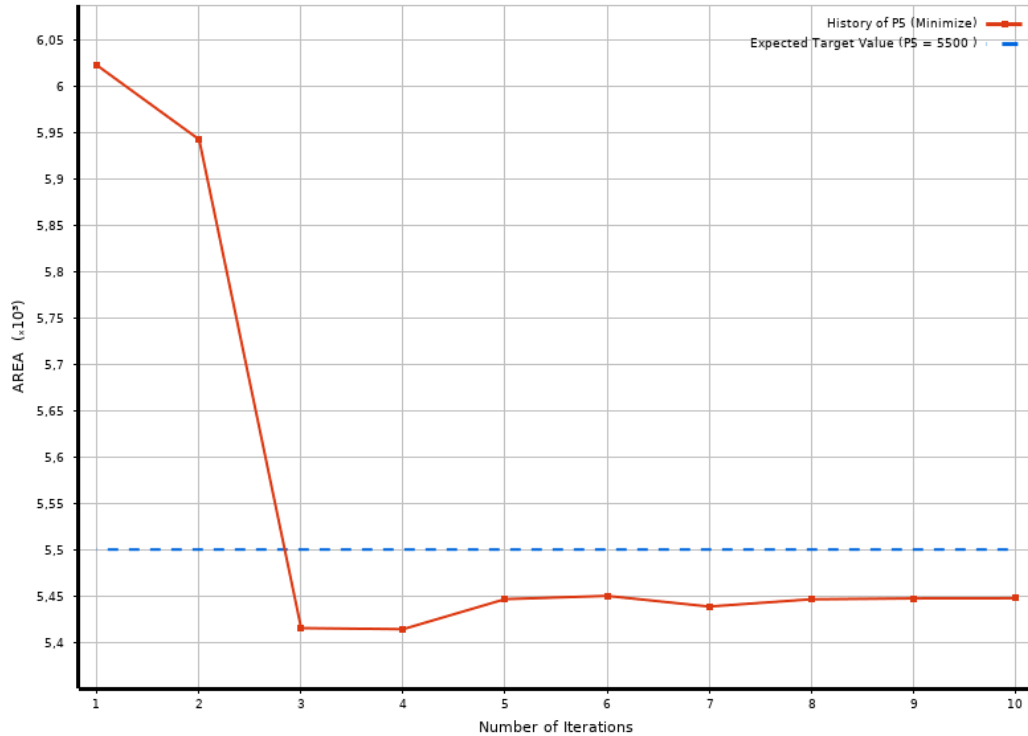
$$1 \rightarrow (x/4, y/4)$$

$$2 \rightarrow (x/4, 3y/4)$$

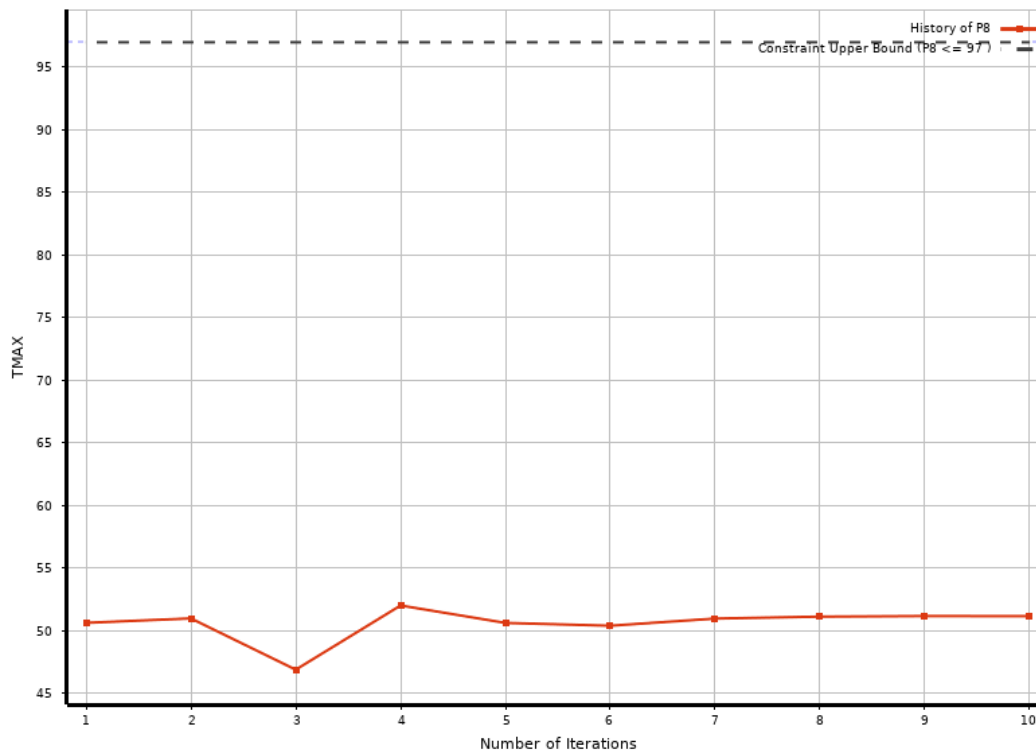
$$3 \rightarrow (3x/4, y/4)$$

$$4 \rightarrow (3x/4, 3y/4)$$

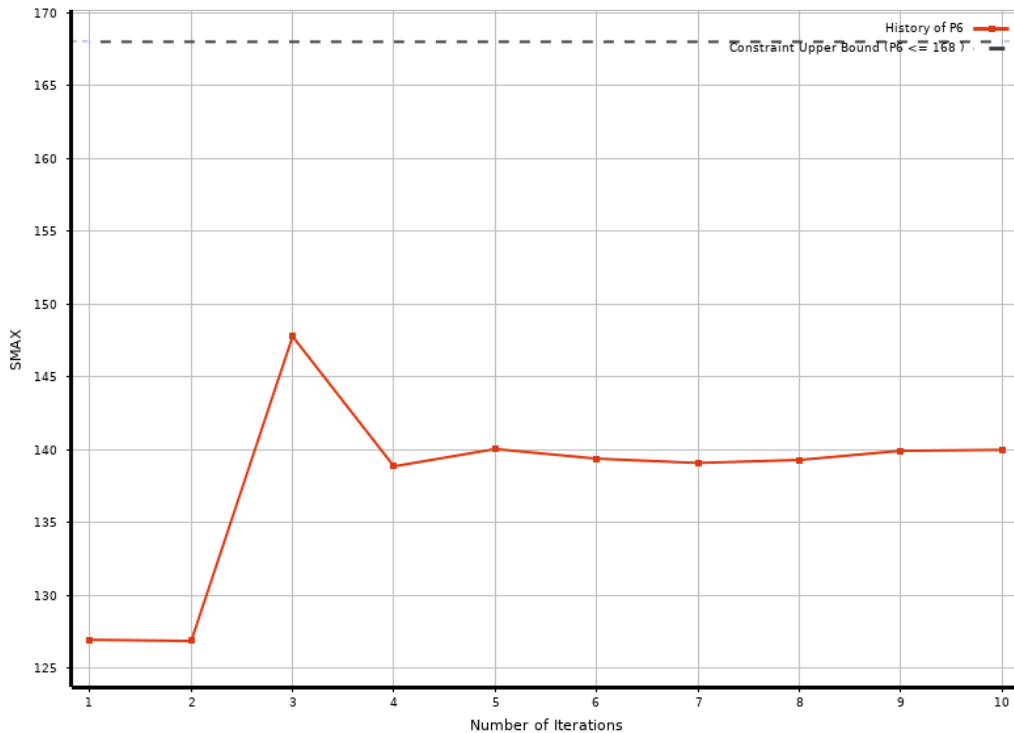
Η σχέση που δίνει τα σημεία εκκίνησης είναι 2^x , όπου x είναι το πλήθος των μεταβλητών εισόδου. Επομένως στο εξεταζόμενο πρόβλημα που υπάρχουν 4 μεταβλητές εισόδου θα προκύψουν 16 διαφορετικά σημεία εκκίνησης.



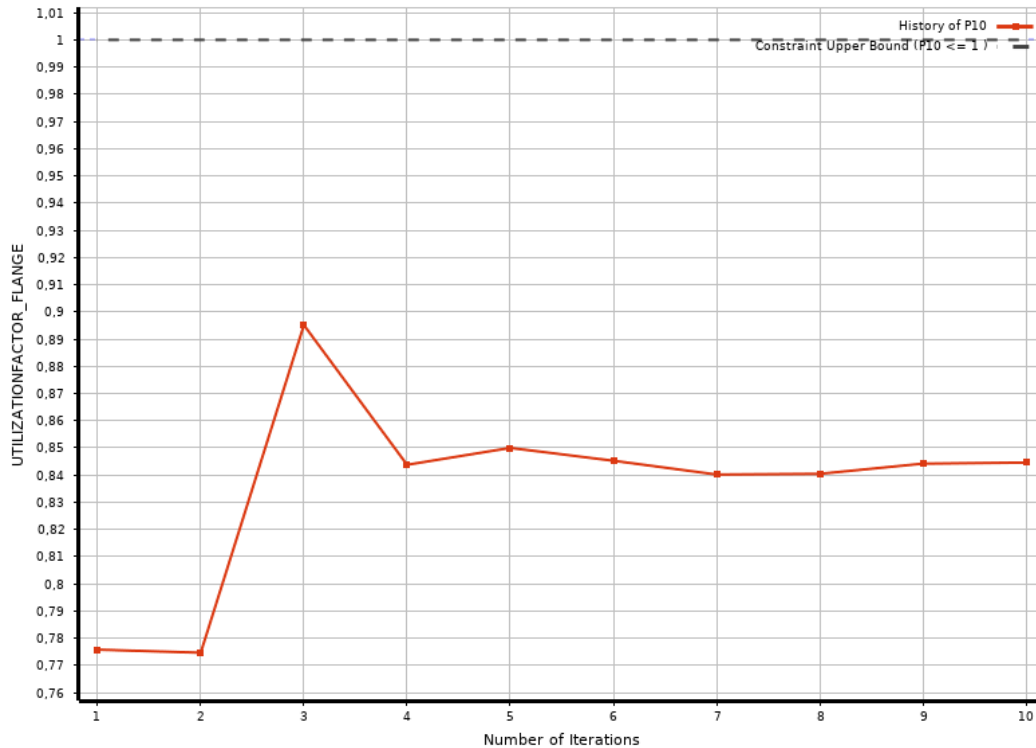
Σχήμα 4.49: Μεταβολή τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής), για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου NLPQL για την μοντελοποίηση Beam_1.



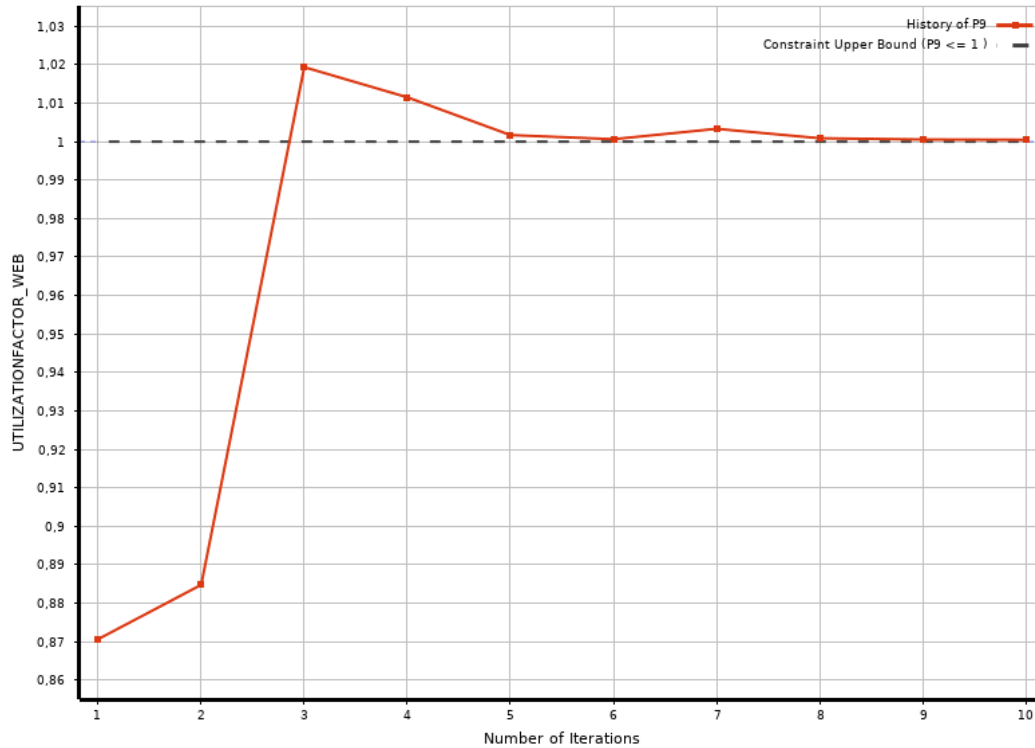
Σχήμα 4.50: Μεταβολή τιμής της μέγιστης διατμητικής τάσης του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου NLPQL για την μοντελοποίηση Beam_1.



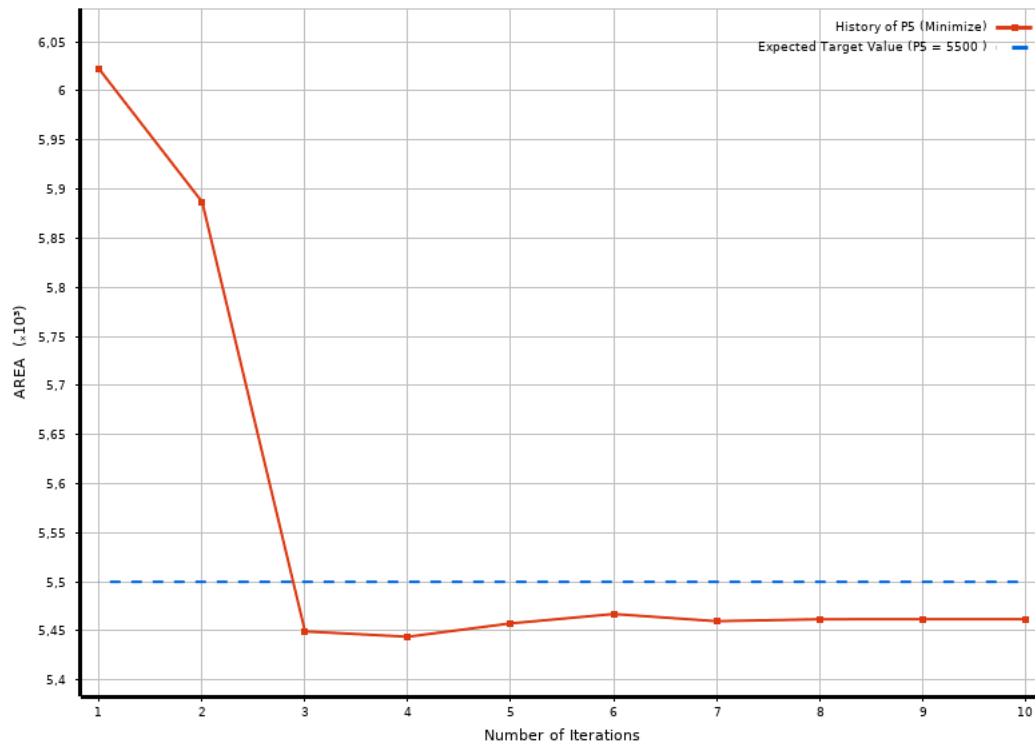
Σχήμα 4.50: Μεταβολή τιμής της μέγιστης τάσης Von Mises του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου NLPQL για την μοντελοποίηση Beam_1.



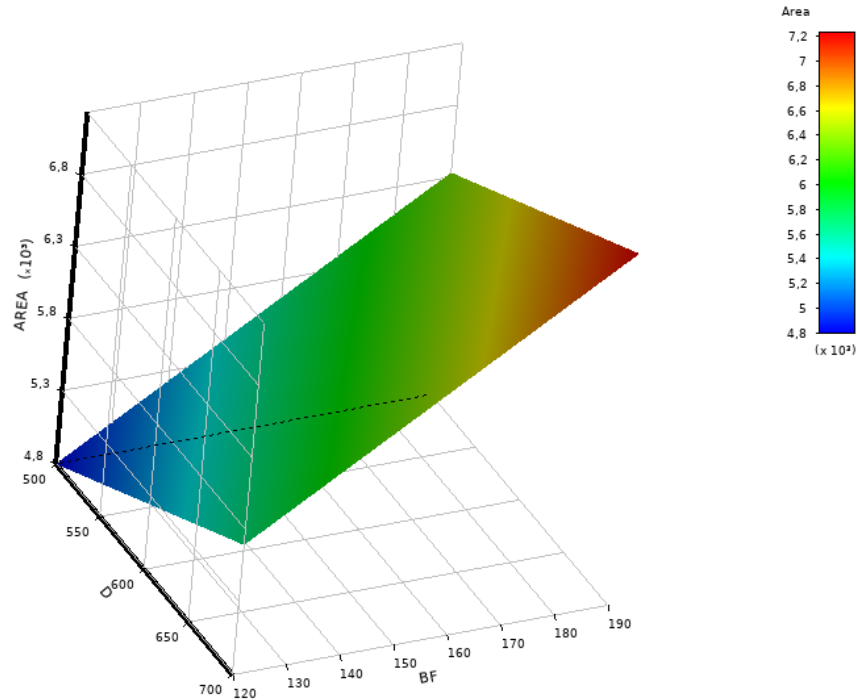
Σχήμα 4.51: Μεταβολή τιμής του βαθμού εκμετάλλευσης φλάντζας της δοκού του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου NLPQL για την μοντελοποίηση Beam_1.



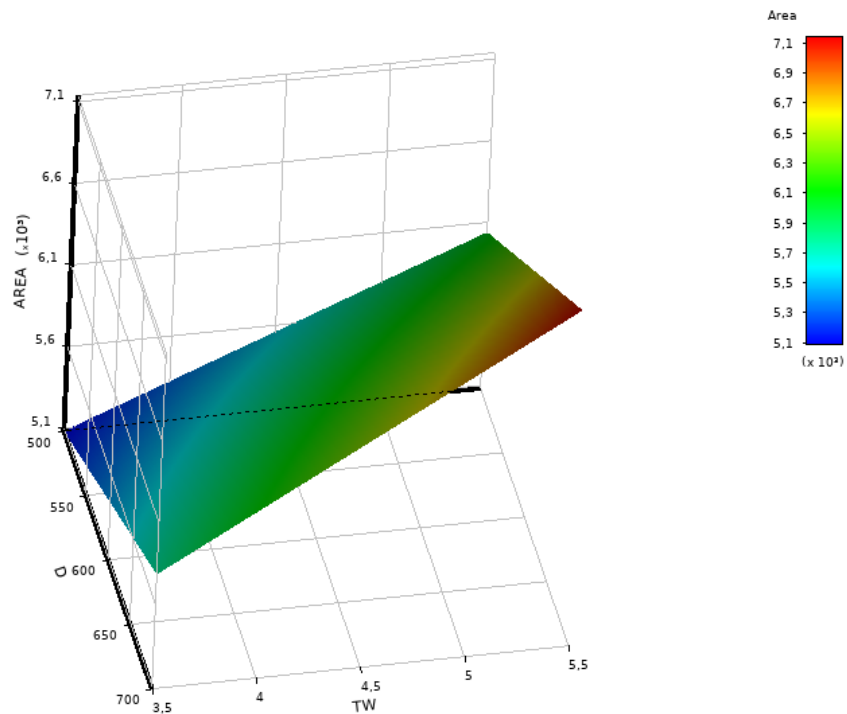
Σχήμα 4.52: Μεταβολή τιμής του βαθμού εκμετάλλευσης κορμού της δοκού του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου NLPQL για την μοντελοποίηση Beam_1.



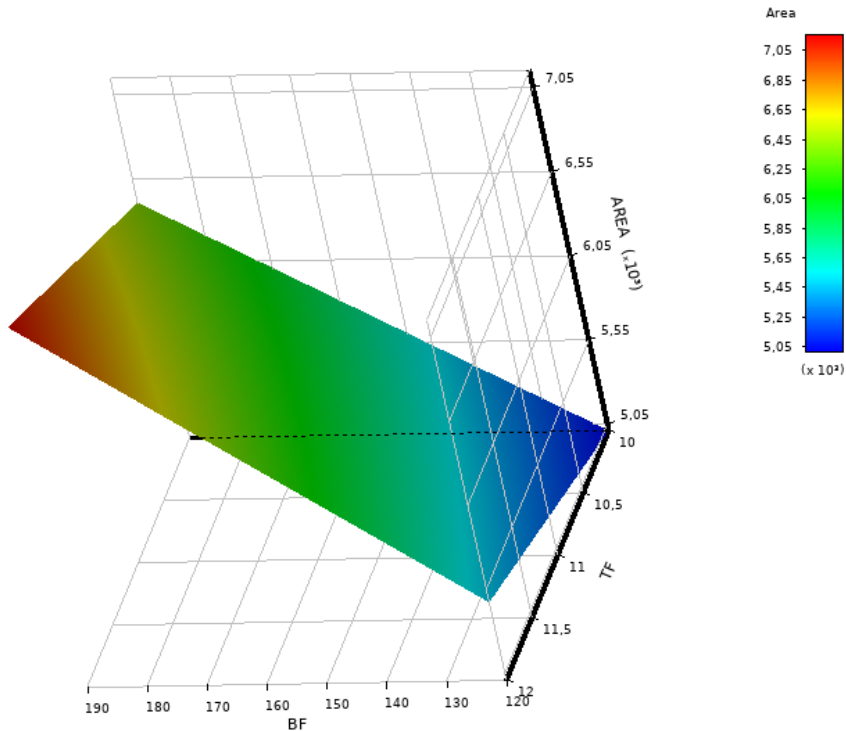
Σχήμα 4.53: Μεταβολή τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής), για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_NLPQL για την μοντελοποίηση Beam_1.



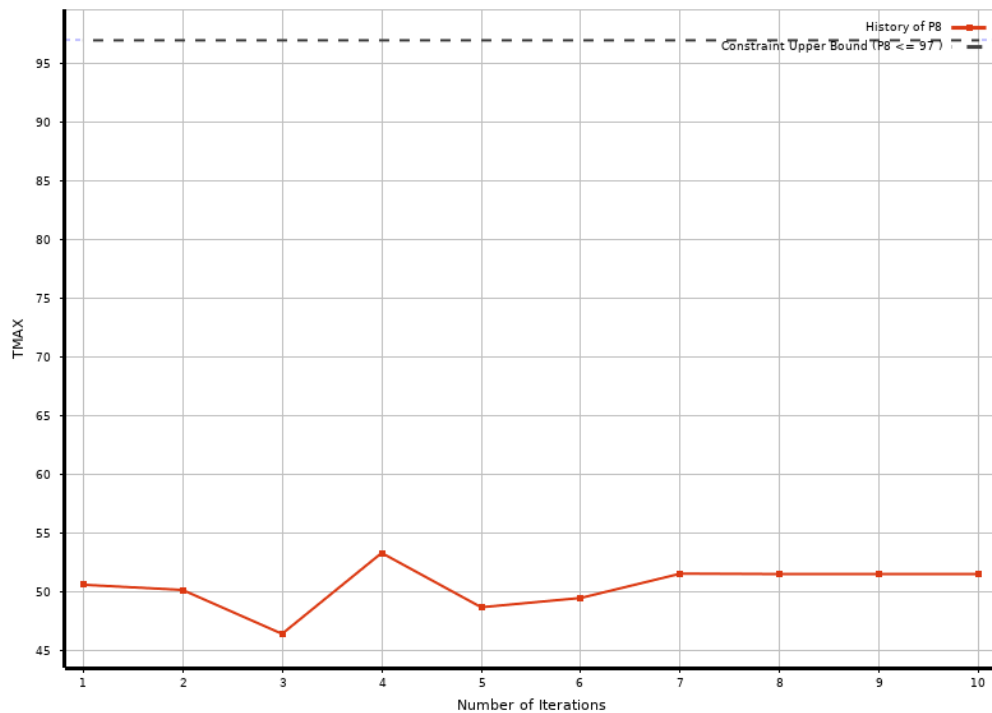
Σχήμα 4.54: Επιφάνεια απόκρισης της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής) συνάρτηση των διαστάσεων d και b_f , για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_NLPQL για την μοντελοποίηση Beam_1.



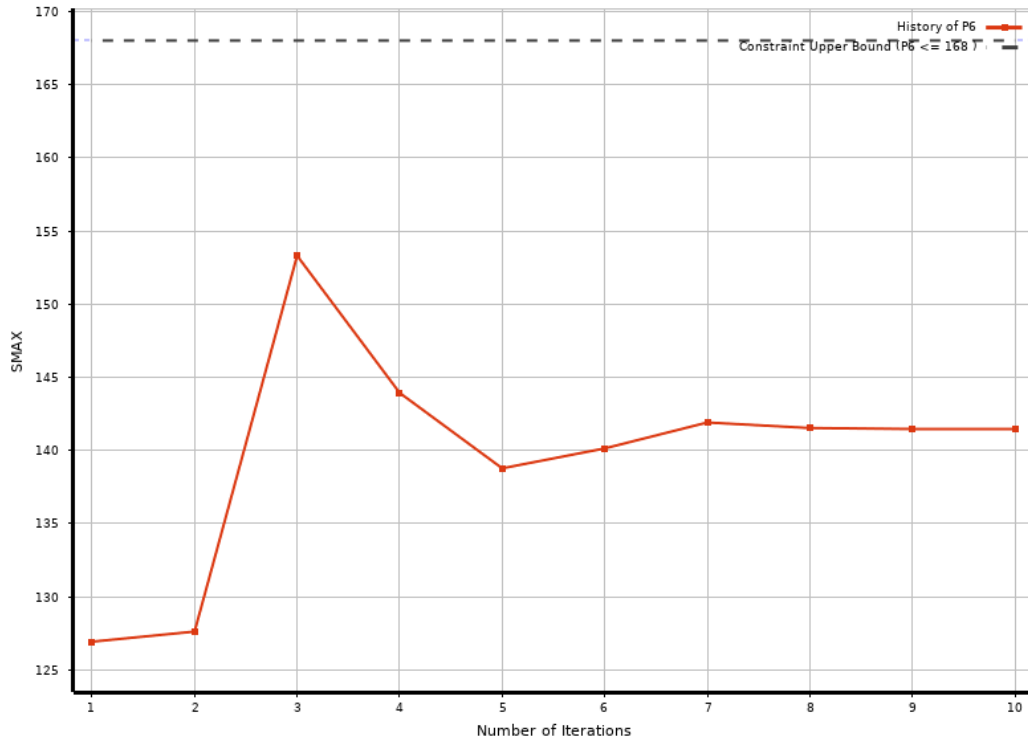
Σχήμα 4.55: Επιφάνεια απόκρισης της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής) συνάρτηση των διαστάσεων d και t_w , για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_NLPQL για την μοντελοποίηση Beam_1.



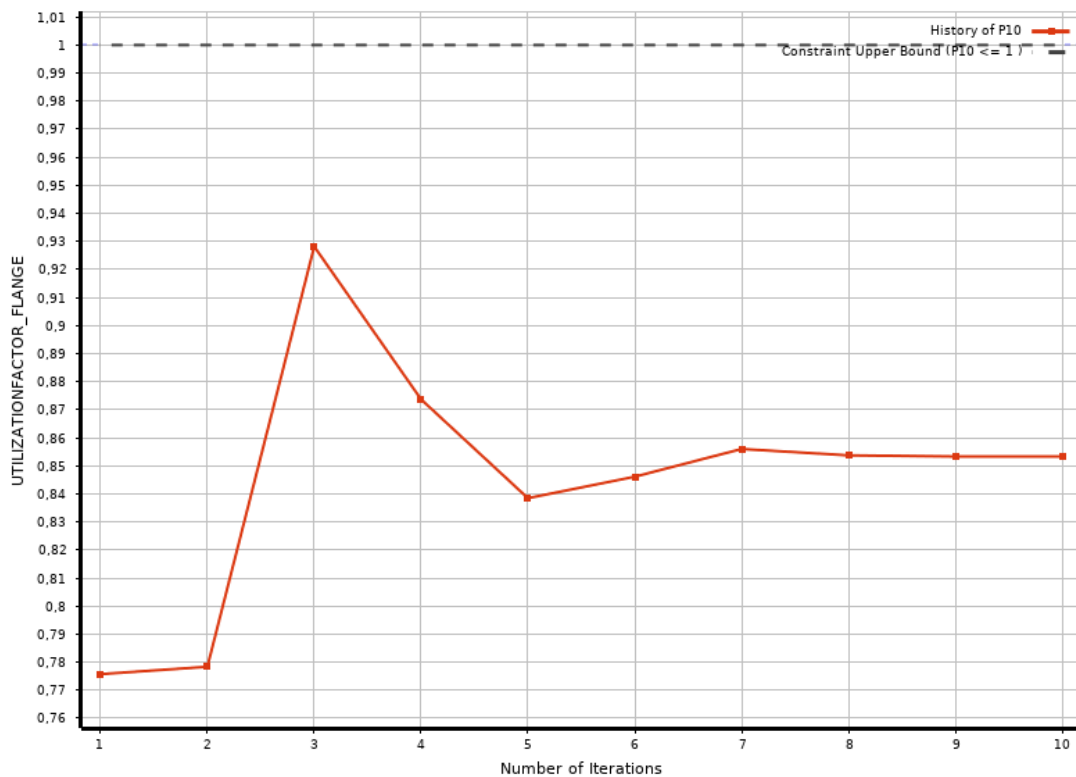
Σχήμα 4.56: Επιφάνεια απόκρισης της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής) συνάρτηση των διαστάσεων b_f και t_f , για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_NLPQL για την μοντελοποίηση Beam_1.



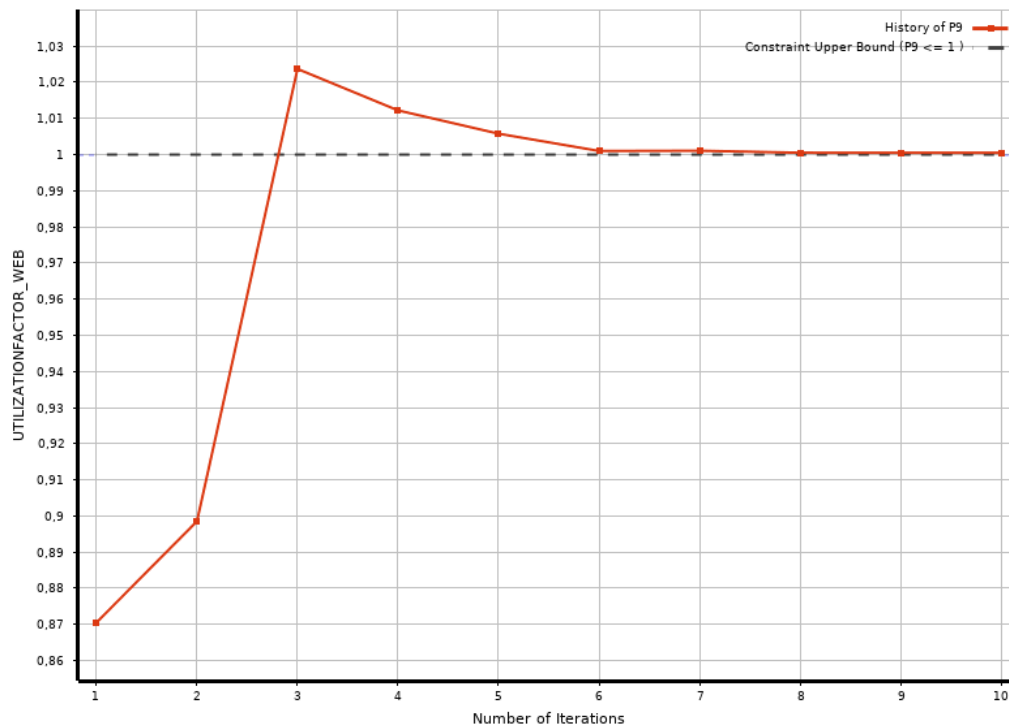
Σχήμα 4.57: Μεταβολή τιμής της μέγιστης διατμητικής τάσης του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_NLPQL για την μοντελοποίηση Beam_1.



Σχήμα 4.58: Μεταβολή τιμής της μέγιστης τάσης Von Mises του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_NLPQL για την μοντελοποίηση Beam_1.



Σχήμα 4.59: Μεταβολή τιμής του βαθμού εκμετάλλευσης φλάντζας της δοκού του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_NLPQL για την μοντελοποίηση Beam_1.

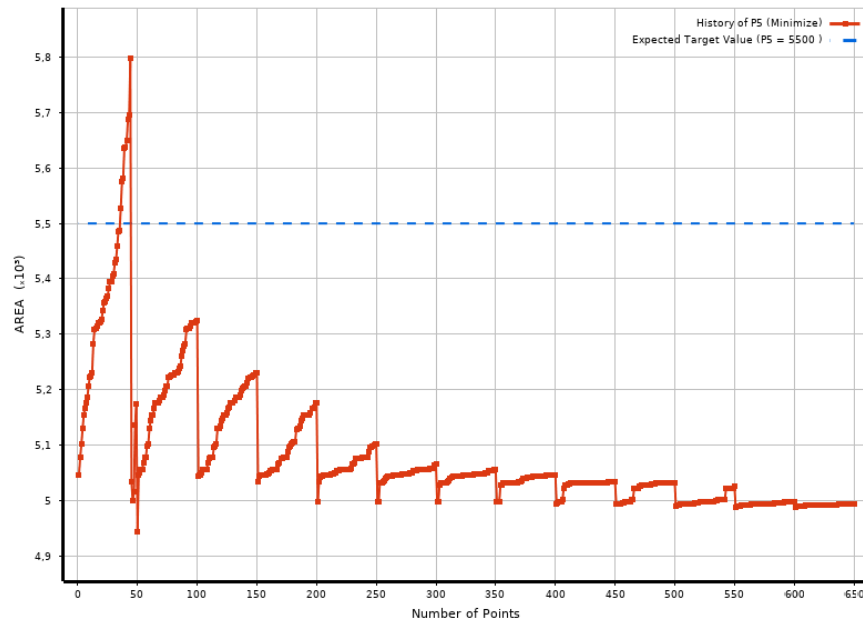


Σχήμα 4.60: Μεταβολή τιμής του βαθμού εκμετάλλευσης κορμού της δοκού του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_NLPQL για την μοντελοποίηση Beam_1 .

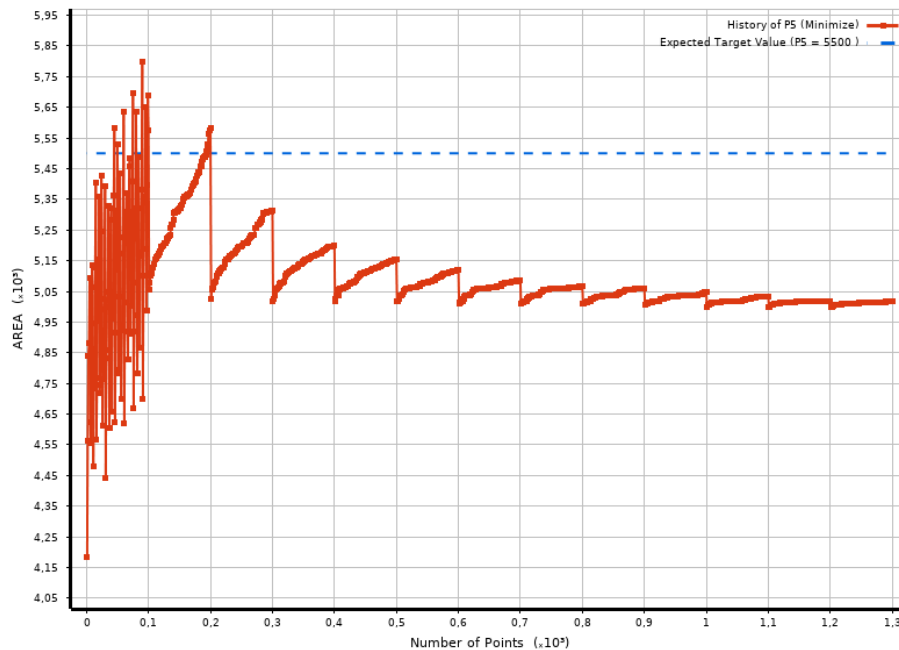
Λόγω της ομοιότητας όλων των διαγραμμάτων στην μέθοδο NLPQL και αντίστοιχα και για την περίπτωση λύσης μέσω RSM και της απλότητας των διαγραμμάτων από άποψη πληροφοριών σε σχέση με την μέθοδο MOGA, τα διαγράμματα για τις υπόλοιπες περιπτώσεις παραλείπονται.

4.4.3 Αποτελέσματα δεύτερης περίπτωσης του προβλήματος και των δύο στοιχείων μέσω επίλυσης MOGA

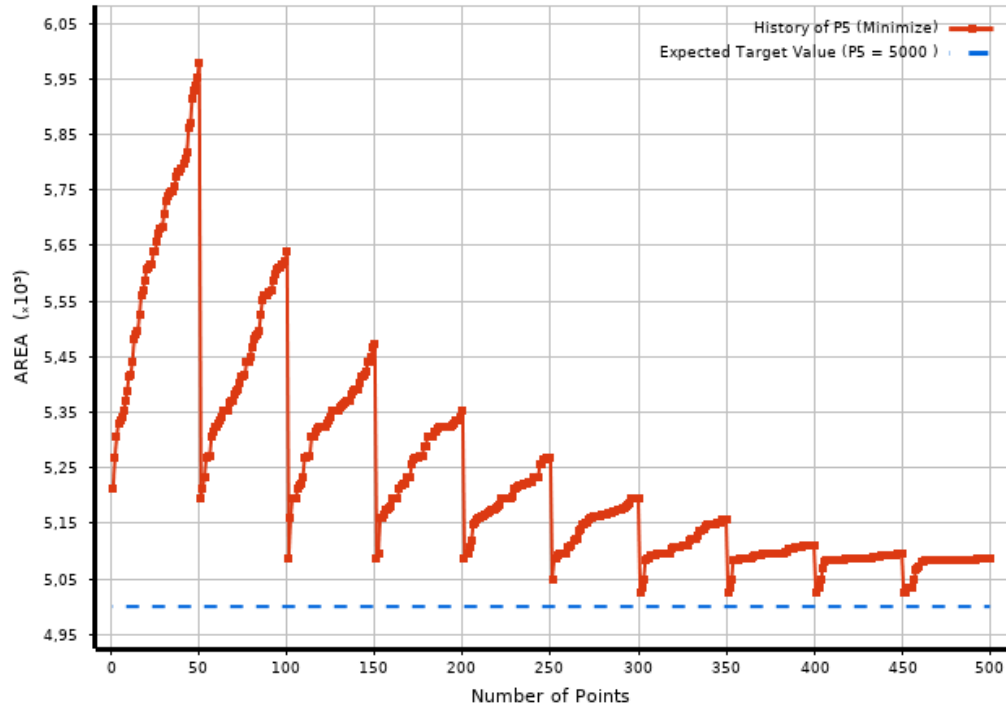
Λόγω ομοιότητας των αντίστοιχων διαγραμμάτων με το πρώτο παράδειγμα. Σε κάθε περίπτωση θα παραληφθούν τα διαγράμματα των περιορισμών και θα παρουσιαστούν μόνο αυτά των αντικειμενικών συναρτήσεων.



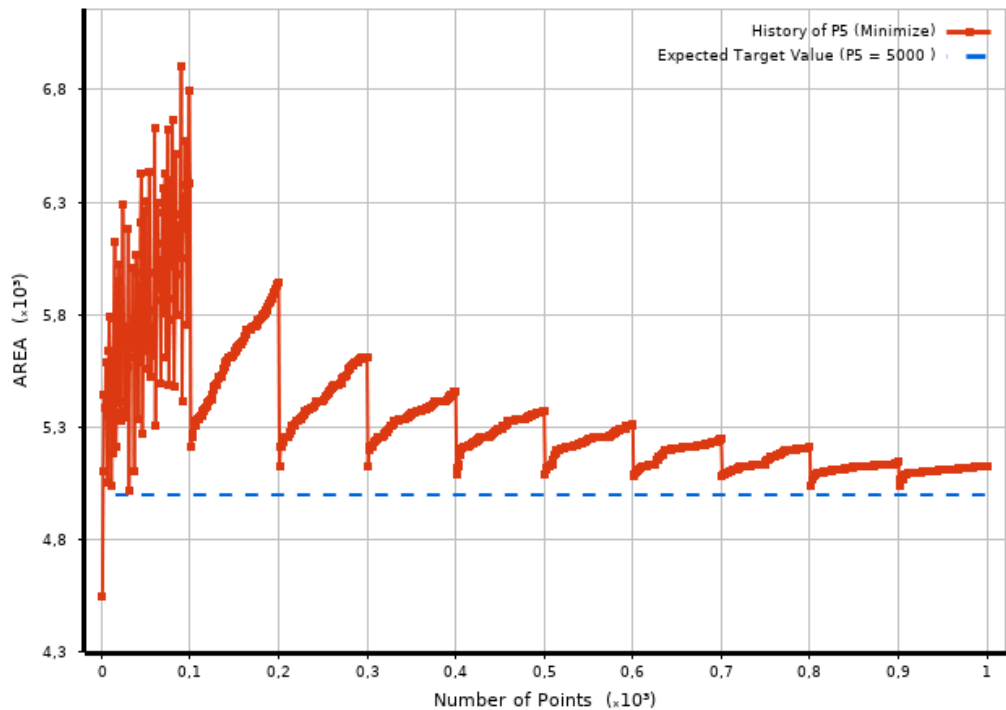
Σχήμα 4.61: Μεταβολή τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής), για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου MOGA (50 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Beam_2.



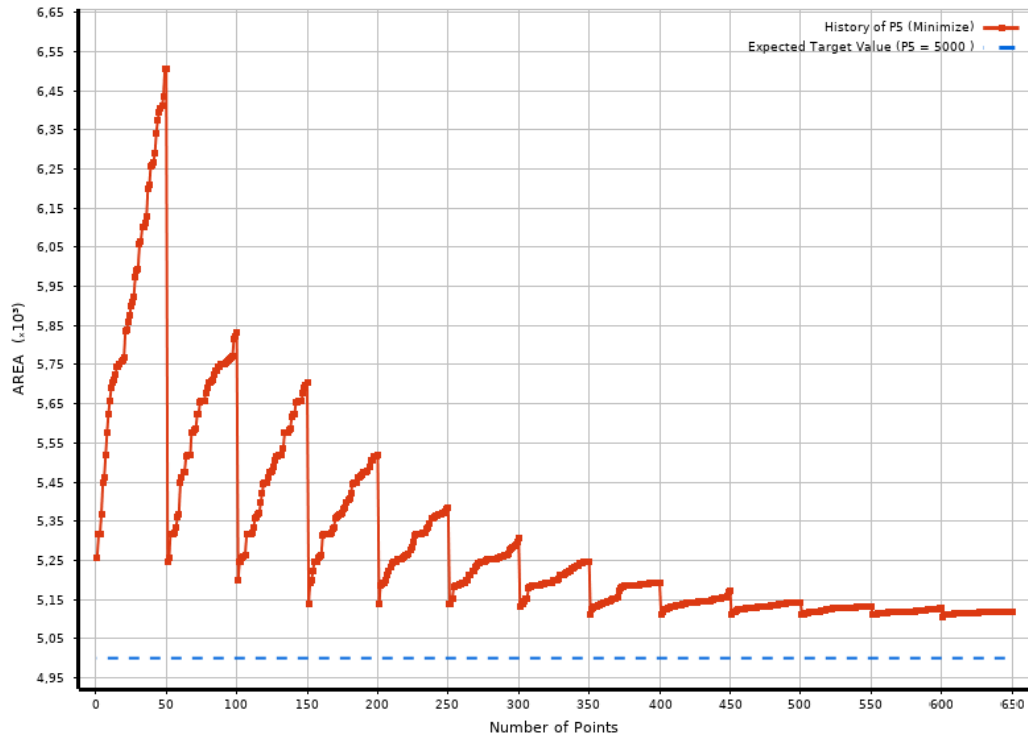
Σχήμα 4.62: Μεταβολή τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής), για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Beam_2.



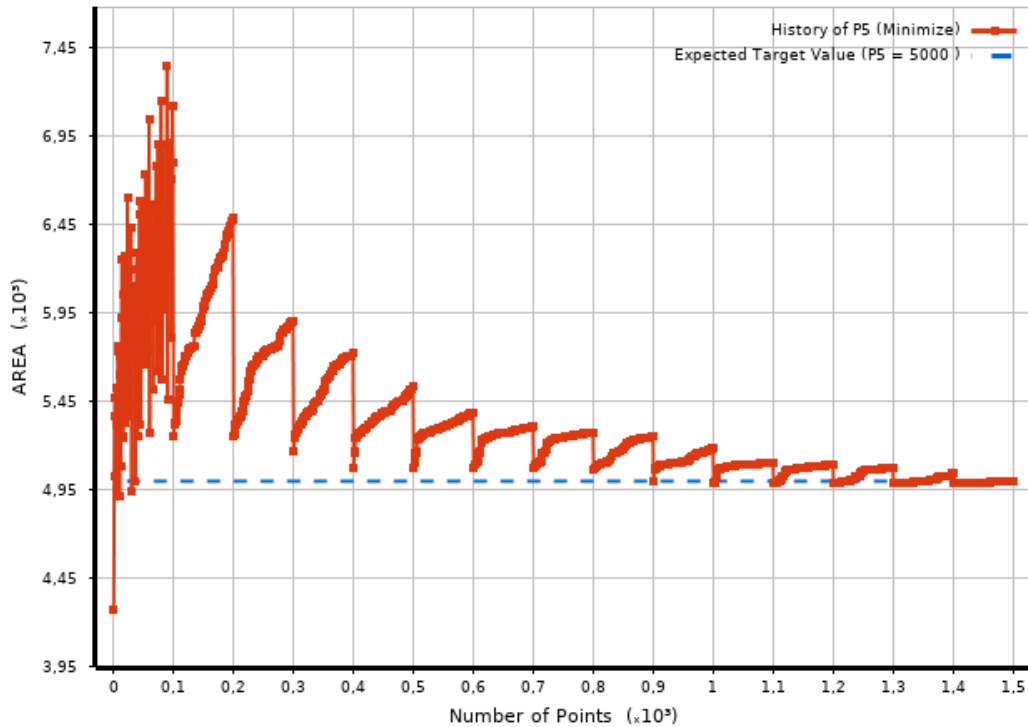
Σχήμα 4.63: Μεταβολή τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής), για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου MOGA (50 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_2_Midplane.



Σχήμα 4.64: Μεταβολή τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής), για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_2_Midplane.



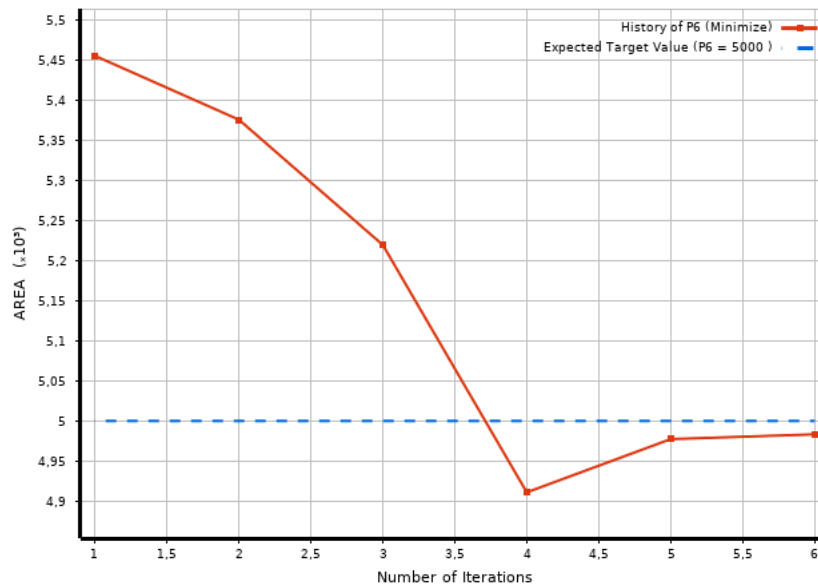
Σχήμα 4.65: Μεταβολή τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής), για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου MOGA (50 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_2_Offset.



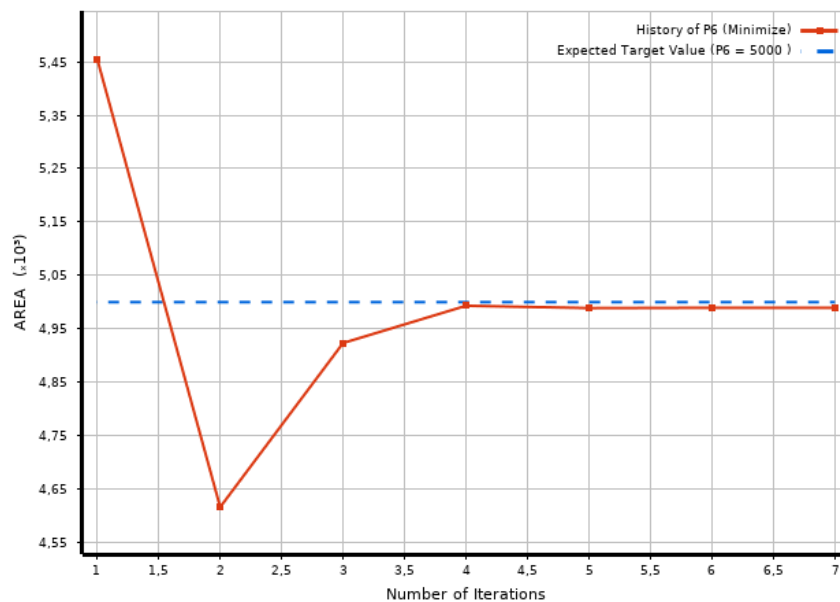
Σχήμα 4.66: Μεταβολή τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής), για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_2_Offset.

4.5.4 Αποτελέσματα δεύτερης περίπτωσης του προβλήματος και των δύο στοιχείων μέσω επίλυσης NLPQL

Λόγω ομοιότητας των αντίστοιχων διαγραμμάτων με το πρώτο παράδειγμα. Σε κάθε περίπτωση θα παραληφθούν τα διαγράμματα των περιορισμών. Επίσης λόγω της ομοιότητας όλων των διαγραμμάτων στην μέθοδο NLPQL και αντίστοιχα και για την περίπτωση λύσης μέσω RSM και της απλότητας των διαγραμμάτων από άποψη πληροφοριών σε σχέση με την μέθοδο MOGA, τα διαγράμματα για τις υπόλοιπες περιπτώσεις παραλείπονται.



Σχήμα 4.67: Μεταβολή τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής), για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου NLPQL για την μοντελοποίηση Beam_2.



Σχήμα 4.68: Μεταβολή τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής), για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_NLPQL για την μοντελοποίηση Beam_2.

Τέλος παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, δηλαδή οι βέλτιστες λύσεις ανά περίπτωση.

Πίνακας 4.13: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα πρώτου παραδείγματος.

	MOGA				NLPQL			
Beam_1	b _f	221.00	A	5467.6	b _f	120.00	A	5446.4
	d	646.77	S _{max}	138.04	d	634.27	S _{max}	139.30
	t _f	5.97	T _{max}	48.68	t _f	11.80	T _{max}	51.10
	t _w	4.45			t _w	4.28		
Shell_1_Mid-Plane	b _f	160.89	A	5486.50	b _f	103.37	A	5376.2
	d	535.65	S _{max}	164.87	d	627.43	S _{max}	141.4
	t _f	9.65	T _{max}	56.63	t _f	13.00	T _{max}	50.97
	t _w	4.37			t _w	4.20		
Shell_1_Offcet	b _f	133.72	A	5464.7	b _f	110.00	A	5261.0
	d	504.74	S _{max}	164.00	d	587.25	S _{max}	147.67
	t _f	11.25	T _{max}	54.01	t _f	13.00	T _{max}	55.29
	t _w	4.76			t _w	4.00		
RSM								
Beam_1	b _f	223.90	A	5465.8	b _f	120.00	A	5461.9
	d	643.83	S _{max}	136.6	d	619.05	S _{max}	141.54
	t _f	6.08	T _{max}	49.92	t _f	12.00	T _{max}	51.52
	t _w	4.34			t _w	4.34		
Shell_1_Mid-Plane	b _f	160.56	A	5496.5	b _f	106.18	A	5332.8
	d	529.75	S _{max}	164.82	d	630.00	S _{max}	139.40
	t _f	9.78	T _{max}	57.20	t _f	13.00	T _{max}	52.85
	t _w	4.37			t _w	4.00		
Shell_1_Offcet	b _f	135.75	A	5458.4	b _f	110.00	A	5211.8
	d	509.05	S _{max}	163.83	d	625.85	S _{max}	143.86
	t _f	11.01	T _{max}	53.86	t _f	12.09	T _{max}	52.43
	t _w	4.75			t _w	4.00		

Πίνακας 4.14: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δεύτερου παραδείγματος.

	MOGA				NLPQL			
Beam_2	b _f	144.42	A	4988.6	b _f	152.89	A	4983.3
	d	636.62	S _{max}	168.00	d	650.00	S _{max}	168.00
	t _f	9.22	T _{max}	57.61	t _f	8.308	T _{max}	55.47
	t _w	3.76			t _w	3.86		
Shell_2_Mid-Plane	b _f	143.19	A	5024.6	b _f	144.33	A	4997.6
	d	588.93	S _{max}	167.53	d	590.92	S _{max}	168.00
	t _f	9.13	T _{max}	62.11	t _f	9.00	T _{max}	62.38
	t _w	4.03			t _w	4.00		
Shell_2_Offcet	b _f	137.38	A	5105.4	b _f	120.00	A	4969
	d	576.44	S _{max}	167.96	d	636.23	S _{max}	168.00
	t _f	9.53	T _{max}	60.30	t _f	9.64	T _{max}	61.33
	t _w	4.24			t _w	4.11		
RSM								
Beam_2	b _f	147.88	A	4997	b _f	147.00	A	4989.4
	d	636.71	S _{max}	167.14	d	645.23	S _{max}	168.00
	t _f	9.07	T _{max}	57.86	t _f	8.80	T _{max}	56.11
	t _w	3.74			t _w	3.83		
Shell_2_Mid-Plane	b _f	146.20	A	5038.3	b _f	143.53	A	5019.6
	d	595.98	S _{max}	166.94	d	600.00	S _{max}	168.00
	t _f	8.84	T _{max}	62.30	t _f	9.00	T _{max}	60.91
	t _w	4.05			t _w	4.00		
Shell_2_Offcet	b _f	137.38	A	4986.3	b _f	120.00	A	4979.7
	d	592.05	S _{max}	167.87	d	634.55	S _{max}	168.00
	t _f	9.25	T _{max}	62.52	t _f	10.00	T _{max}	64.47
	t _w	4.07			t _w	4.00		

4.6 Συμπεράσματα

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν και από τις 2 μεθόδους (MOGA & NLPQL) είναι αρκετά κοντά. Όμως ο χρόνος επίλυσης μέσω του αλγορίθμου NLPQL είναι σημαντικά μικρότερος, αλλά κατά την επίλυση αντιμετωπίστηκε συχνά το πρόβλημα μη εύρεσης βελτίστου. Για αυτόν τον λόγο πρώτα επιλύθηκε το πρόβλημα με τον αλγόριθμο MOGA και έπειτα για αυτά τα όρια των μεταβλητών εισόδου έγινε η επίλυση μέσω του αλγορίθμου NLPQL. Επομένως είναι λίγο δύσκολο να προτιμηθεί κάποια από τις δύο μεθόδους.

Το παραπάνω πρόβλημα όμως λύθηκε όταν το πρόβλημα προσεγγίστηκε με την μέθοδο RSM. Δημιουργώντας την επιφάνεια απόκρισης ο χρόνος επίλυσης μειώθηκε σημαντικά και για τους δύο αλγορίθμους. Μια παρατήρηση όμως είναι ότι μέσω της μεθόδου RSM τα όρια των μεταβλητών εισόδου δεν μπορούν να έχουν μεγάλο εύρος, διότι η μέθοδος αυτή δεν ανταποκρίνεται καλά. Αυτό οφείλεται στο πόσο καλά προσεγγίζεται το πρόβλημα μας από την πολυωνυμική συνάρτηση που δημιουργείται και την RSM. Παρόλο που το πρόβλημα αρχικά έχει λυθεί μόνο με τις μεθόδους (MOGA & NLPQL), αποδοτικότερο θα ήταν να λυθεί αρχικά μέσω RSM έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερη αντίληψη για ποιά όρια των μεταβλητών βρίσκονται οι βέλτιστες λύσεις. Στην ανάλυση μας έγινε μεταγενέστερα και τα αποτελέσματα έπειτα με τις μεθόδους (MOGA & NLPQL) βελτιώθηκαν στις περισσότερες περιπτώσεις.

Οπότε θα προτιμηθεί η λύση των προβλημάτων αφού πρώτα έχει υπολογιστεί η επιφάνεια απόκρισης μέσω RSM, διότι κερδίζεται σημαντικός χρόνος και συνεπώς υπολογιστική ισχύς. Και σε ότι αφορά ποιά από τις δύο μεθόδους βελτιστοποίησης θα χρησιμοποιηθούν, πιο ασφαλής θεωρείται η MOGA, διότι πάντα συγκλίνει σε βέλτιστο. Ενώ με την NLPQL σε αρκετές περιπτώσεις για διάφορα σημεία εκκίνησης ή μικρές αλλαγές στα όρια των μεταβλητών εισόδου το βέλτιστο αλλάζει ή δεν συγκλίνει καθόλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Βελτιστοποίηση διπύθμενου

5.1 Στόχοι και μέθοδοι επίλυση

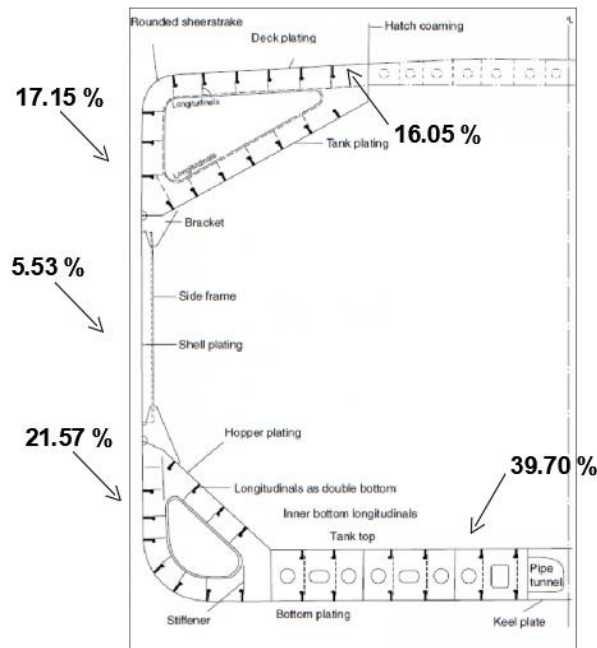
Ο στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι η βελτιστοποίηση του διπύθμενου ενός Bulk carrier. Συγκεκριμένα για ένα πραγματικό Bulk carrier που υπάρχει στην διάθεση του Ελληνικού στόλου, τα στοιχεία του οποίου δίνονται στον Πίνακα 5.1, θα μοντελοποιηθεί το διπύθμενο της μέσης τομής του μέσω της μεθόδου των ΠΣ και με τις τεχνικές βελτιστοποίησης θα γίνει προσπάθεια μείωσης του βάρους με την προϋπόθεση όμως ότι ικανοποιούνται τα κριτήρια αντοχής της μέσης τομής και το κριτήριο ολικής αντοχής του πλοίου. Η μοντελοποίηση μέσω ΠΣ και η χρήση των τεχνικών βελτιστοποίησης θα γίνουν μέσω των προγραμμάτων **Ansys Mechanical APDI & Workbench** αντίστοιχα, και ο έλεγχος της αντοχής με το πρόγραμμα **Mars2000**.

Πίνακας 5.1: Στοιχεία πλοίου.

Μήκος Ο.Α. (m)	292.00
Μήκος Β.Ρ. (m)	284.00
Πλάτος (m)	45.00
Κοίλο (m)	24.70
Βύθισμα Σχεδίασης (m)	16.50
Μεταφορική Ικανότητα (tons)	180000
Αριθμός Κυτών	9

Το διπύθμενο της μέσης τομής των πλοίων Bulk carrier αποτελεί σημαντικό ποσοστό του βάρους της. Επομένως οποιαδήποτε μείωση του βάρους του διπύθμενου θα έχει σημαντική επίδραση στην μείωση του συνολικού βάρους όλου του κύτους. Στην Εικόνα 5.1 φαίνεται το ποσοστό του βάρους των επιμέρους υποπεριοχών που απαρτίζουν τις περιοχές του κύτους (από φρακτή σε φρακτή) της μέσης τομής του πλοίου που έχουμε επιλέξει. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με τις διαστάσεις της μέσης τομής του πλοίου της επιλογής μας.

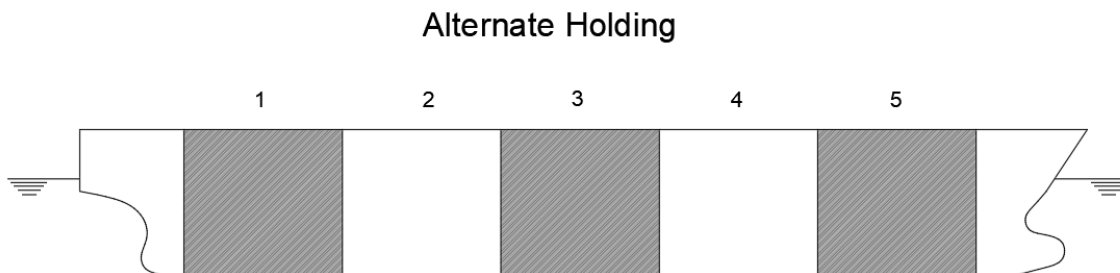
Οι μεταβλητές σχεδίασης του προβλήματος θα είναι τα πάχη των ελασμάτων που συνιστούν το διπύθμενο (Εσωτερικός-Εξωτερικός πυθμένας, Σταθμίδες, Έδρες) καθώς και οι διαστάσεις που περιγράφουν τις διατομές των ενισχυτικών του εσωτερικού-εξωτερικού πυθμένα και των σταθμίδων. Οι τιμές αυτών των μεταβλητών σχεδίασης θα επαναπροσδιοριστούν, θεωρώντας συγκεκριμένη φόρτωση του πλοίου AHL (Alternate Hold Loading), έτσι η βελτιστοποιημένη κατασκευή να αντέχει στις τάσεις που προκύπτουν από την δεδομένη φόρτωση.



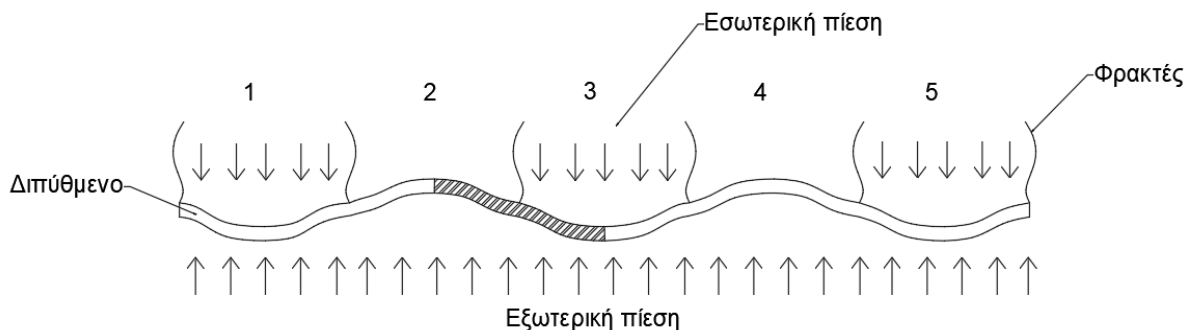
Εικόνα 5.1: Ποσοστό βάρους κάθε υποπεριοχής μέσης τομής.

5.2 Γεωμετρία και μοντέλο ΠΣ

Η χρήση των bulk carriers ειδικεύεται στην μεταφορά φορτίου, το οποίο έχει συχνά υψηλότερη πυκνότητα από αυτή του νερού. Σαν αποτέλεσμα, το πλοίο πλέει συχνά στο μέγιστο επιτρεπόμενο του βύθισμα, χωρίς ωστόσο οι χώροι φόρτωσής του να είναι πλήρως γεμάτοι. Όμως η μη πλήρης φόρτωση των αμبارιών δεν συνιστάται από τους κανονισμούς, λόγω των μεγάλων εγκάρσιων γωνιών που θα προκύψουν. Επομένως είναι προτιμητέα η εναλλάξ φόρτωση των αμبارιών του πλοίου (Alternate Hold Loading). Η συγκεκριμένη φόρτωση προκαλεί ροπές κάμψης και υψηλές διατμητικές δυνάμεις στις κατασκευές του πλοίου και συγκεκριμένα το διπύθμενο υποβάλλεται σε πίεση που προκύπτει από το βάρος του φορτίου στο κάτω έλασμα του αμبارιού και σε πίεση στο εξωτερικό έλασμα του διπύθμενου από το θαλασσινό νερό. Στα Σχήματα 5.1 και 5.2 φαίνεται η AHL φόρτωση και οι πιέσεις που επιδρούν στο διπύθμενο.



Σχήμα 5.1: Φόρτωση πλοίου σε AHL.

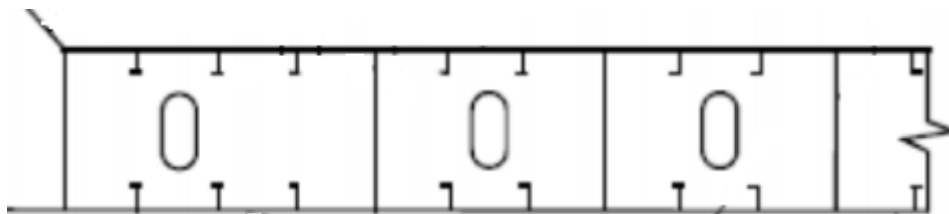


Σχήμα 5.2: Παραμόρφωση διπύθμενου σε ΑΗΛ.

Επίσης στο Σχήμα 5.2 η διαγραμμισμένη επιφάνεια είναι και περιοχή του διπύθμενου που θα μοντελοποιηθεί.

Το μοντέλο που θα σχεδιαστεί βασίζεται στην στρατηγική μοντελοποίησης που έχει ακολουθήσει στην αναφορά (Διεθνή [11]). Για την απλότητα των υπολογισμών αλλά και εξοικονόμηση χρόνου και υπολογιστικής ισχύς, το μοντέλο θα έχει μήκος ενός αμπαριού (δεν έχουν συμπεριληφθεί υπόψιν τις εγκάρσιες φρακτές), που θα απαρτίζεται από μισό άδειο αμπάρι και άλλο μισό γεμάτο με φορτίο. Μόνο το μισό πλάτος των αμπαριών θα μοντελοποιηθεί αφού το υπόλοιπο μισό είναι συμμετρικό και θα έχει την ίδια απόκριση δυνάμεων θεωρώντας συμμετρικές οριακές συνθήκες στην κεντρική γραμμή του πλοίου.

Το μοντέλο εκτείνεται από την σταθμίδα στην κεντρική γραμμή του πλοίου μέχρι την σταθμίδα που χωρίζει το Horper tank από το διπύθμενο εγκάρσια και έχει το ύψος του διπύθμενου Σχήμα 5.3. Στην γεωμετρία έχει συμπεριληφθεί:



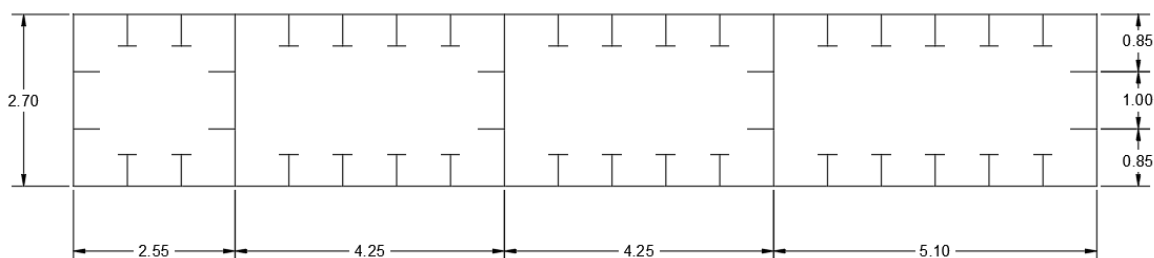
Σχήμα 5.3: Μοντελοποιημένη περιοχή της μέσης τομής.

- Έλασμα εξωτερικού πυθμένα
- Έλασμα εσωτερικού πυθμένα
- Σταθμίδες
- Έδρες
- Ενισχυτικά σταθμίδων
- Ενισχυτικά εσωτερικού πυθμένα
- Ενισχυτικά εξωτερικού πυθμένα

Όλα τα άλλα τα στοιχεία που υπάρχουν στην κανονική μέση τομή του συγκεκριμένου κομματιού δεν έχουν συμπεριληφθεί το μοντέλο, όπως οι τρύπες στα ελάσματα και τα ενισχυτικά στα εγκάρσια ελάσματα των εδρών, τα οποία χρησιμοποιούνται για την αποφυγή του τοπικού λυγισμού των εν λόγω ελασμάτων.

5.3 Ansys mechanical APDL

Οι γενικές διαστάσεις του μοντέλου έχουν περιγραφεί παραπάνω. Επίσης στο Σχήμα 5.4 φαίνεται η εγκάρσια τομή του. Οι μεταβλητές εισόδου της βελτιστοποίησης θα είναι τα πάχη του εσωτερικού-εξωτερικού πυθμένα, των σταθμίδων και των εδρών καθώς και οι διαστάσεις που περιγράφουν τις διατομές όλων των ενισχυτικών, Πίνακας 5.2. Όλες οι άλλες οι διαστάσεις που περιγράφουν την γεωμετρία θα θεωρηθούν σταθερές.



Σχήμα 5.4: Απεικόνιση διπύθμενου προς μοντελοποίηση.

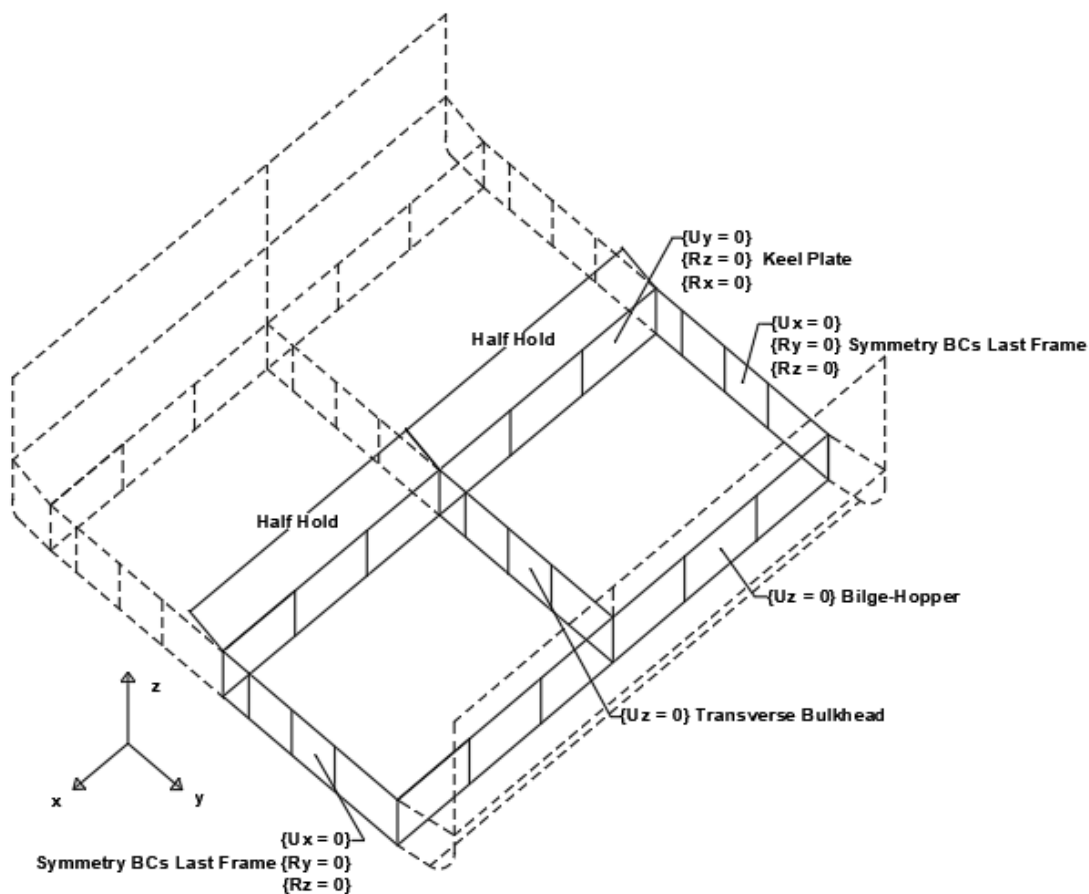
Πιο συγκεκριμένα τα διαμήκεις ενισχυτικά στον εσωτερικό και εξωτερικό πυθμένα είναι τύπου "Tee stiffeners". Η ισαπόσταση των ενισχυτικών μεταξύ τους είναι 850 mm. Η ισαπόσταση των εδρών είναι 3700 mm και επομένως αφού όλο το μοντέλο έχει το μήκος ενός πλήρους αμπαριού υπάρχουν συνολικά 7 πατώματα και το πλήρες μήκος του μοντέλου είναι 22200 mm.

Πίνακας 5.2: Αρχικές διαστάσεις μεταβλητών εισόδου (Net thick.).

Μεταβλητές εισόδου	Διαστάσεις (mm)
Ενισχυτικό εξωτερικού πυθμένα	475 x 9/150 x 17
Ενισχυτικό εσωτερικού πυθμένα	425 x 10/175 x 17
Ενισχυτικό σταθμίδων	200 x 12
Εξωτερικός πυθμένας	18
Εσωτερικός πυθμένας	19.5
Σταθμίδα	13
Έδρα	15

Οι οριακές συνθήκες του διπύθμενου που έχει μοντελοποιηθεί περιγράφονται ως:

- *Διαμήκεις περιορισμοί* : Η εγκάρσια μετατόπιση περιορίζεται στο έλασμα της τρόπιδας (Keel Plate) όπως και οι περιστροφές κατά τον διαμήκη άξονα. Επίσης η κατακόρυφη μετατόπιση στην σταθμίδα του Bilge-Hopper ελάσματος περιορίζεται. Με τους περιορισμούς αυτούς επιτυγχάνεται η συμμετρία στην κεντρική σταθμίδα και η υποστηρικτική ικανότητα της Bilge-hopper κατασκευής.
- *Εγκάρσιοι περιορισμοί* : Η κατακόρυφη μετατόπιση στην κεντρική έδρα περιορίζεται, αυτό που διαχωρίζει τα δύο αμπάρια, έτσι ώστε να μην μπορεί να κινηθεί κατακόρυφα ανεξαρτήτως του φορτίου των αμπαριών. Ακόμα στην αρχική και στη τελευταία έδρα περιορίζονται η διαμήκης μετατόπιση καθώς και οι κατακόρυφες και εγκάρσιες περιστροφές, προσομοιάζοντας έτσι την συμμετρία.



Σχήμα 5.5: Οριακές συνθήκες μοντέλου.

Στο Σχήμα 5.5 φαίνονται οι περιορισμοί που περιγράφηκαν και έχουν εφαρμοστεί στο μοντέλο.

Για την μοντελοποίηση στην ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν 2 στοιχεία:

- 3-Δ 2-κομβο στοιχείο δοκού (Beam188 από την βιβλιοθήκη του Ansys)
- 3-Δ 4-κομβο στοιχείο πλάκας (Shell181 από την βιβλιοθήκη του Ansys)

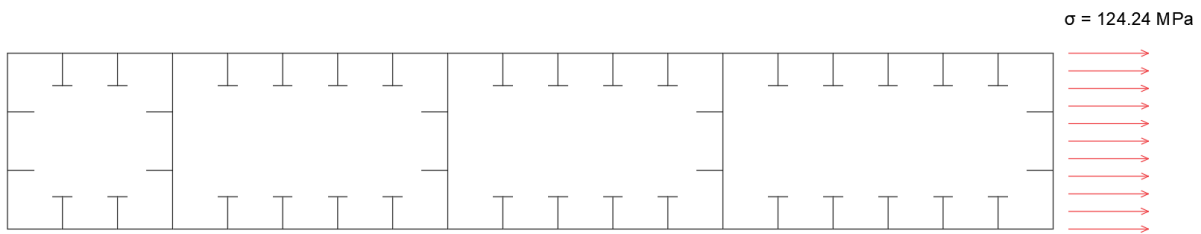
Με το στοιχείο Beam188 μοντελοποιήθηκαν όλα τα ενισχυτικά και με το Shell181 όλα τα ελάσματα. Το μοντέλο απαρτίζεται από 6852 στοιχεία και 5001 κόμβους.

Φορτία

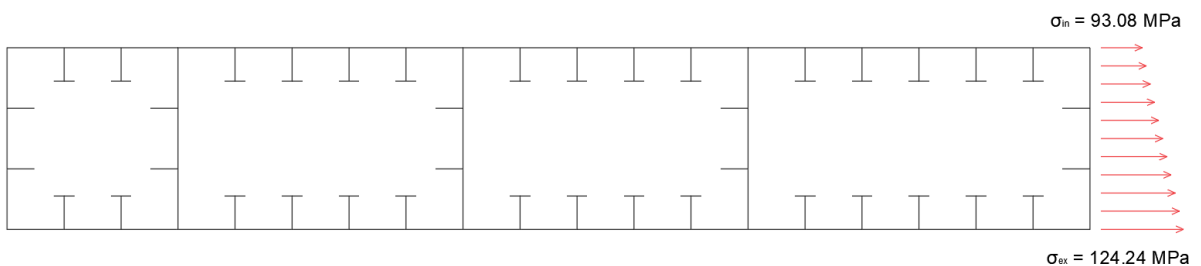
Όπως έχει ήδη αναφερθεί η κατάσταση που εξετάζεται είναι η AHL, επομένως στον εσωτερικό πυθμένα του μισού αμπαρίου θα εφαρμοστεί πίεση λόγω του φορτίου και στον εξωτερικό πυθμένα όλου του μοντέλου πίεση που δέχεται λόγω του θαλασσινού νερού. Η τιμή της πίεσης στο εσωτερικού του αμπαριού έχει θεωρηθεί ότι προκύπτει με πλήρως φόρτωση του με πυκνότητα αυτή του θαλασσινού νερού και η τιμή της πίεσης στο εξωτερικό έλασμα του πυθμένα προέκυψε θεωρώντας ότι το πλοίο πλέει στο βύθισμα σχεδίασης.

- Πίεση στον εξωτερικό πυθμένα $P_{ex} = \rho_{sw} g T_{Design} = 1025 \frac{Kg}{m^3} 9.81 \frac{m}{s^2} 16.5 m = 0.166 MPa$
- Πίεση στον εσωτερικό πυθμένα $P_{in} = \rho_{sw} g (D - h_{DB}) = 1025 \frac{Kg}{m^3} 9.81 \frac{m}{s^2} 22 m = 0.221 MPa$

Ακόμα έχει θεωρηθεί ότι το διπύθμενο που έχει μοντελοποιηθεί υποβάλλεται σε ομοιόμορφη τάση και ίση με $124.24 MPa$, που προκύπτει από την κάμψη του πλοίου σαν δοκάρι, Σχήμα 5.6. Η τιμή της τάσης έχει υπολογιστεί από το πρόγραμμα *Mars2000*, όπου έχει σχεδιαστεί η μέση τομή του πλοίου του οποίου το διπύθμενο μελετάτε. Στην πραγματικότητα η πρωτεύουσα ορθή τάση μεταβάλλεται γραμμικά καθ' ύψος του διπύθμενου, Σχήμα 5.7.

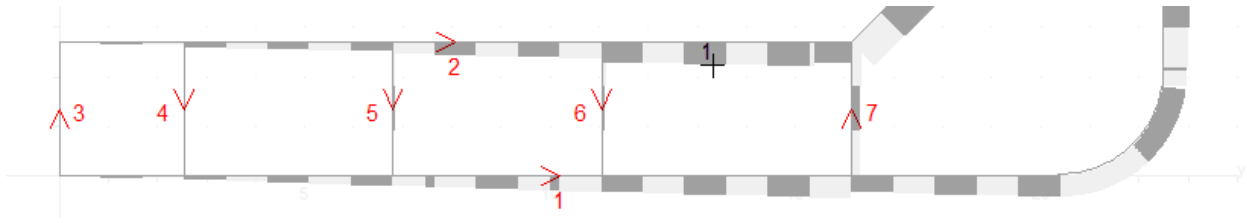


Σχήμα 5.6: Ομοιόμορφη κατανομή ορθής τάσης.



Σχήμα 5.7: Πραγματική κατανομή πρωτεύουσας ορθής τάσης.

Επίσης αμελείται η διατμητική ροή, διότι είναι μικρή στην περιοχή του διπύθμενου, Σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8: Διατμητική ροή στην περιοχή του διπύθμενου.

Έχει οριστεί χάλυβας υψηλής αντοχής AH36 με όριο διαρροής και συντελεστή υλικού k που φαίνονται στους παρακάτω πίνακες από το CSR σε όλα τα στοιχεία του μοντέλου, σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια του πλοίου αναφοράς. Επομένως η μέγιστη τάση που επιτρέπεται να αναπτυχθεί στο μοντέλο είναι $\sigma_{perm} = 264 \text{ Mpa}$.

Πίνακας 5.3: Μηχανικές ιδιότητες χαλύβων.

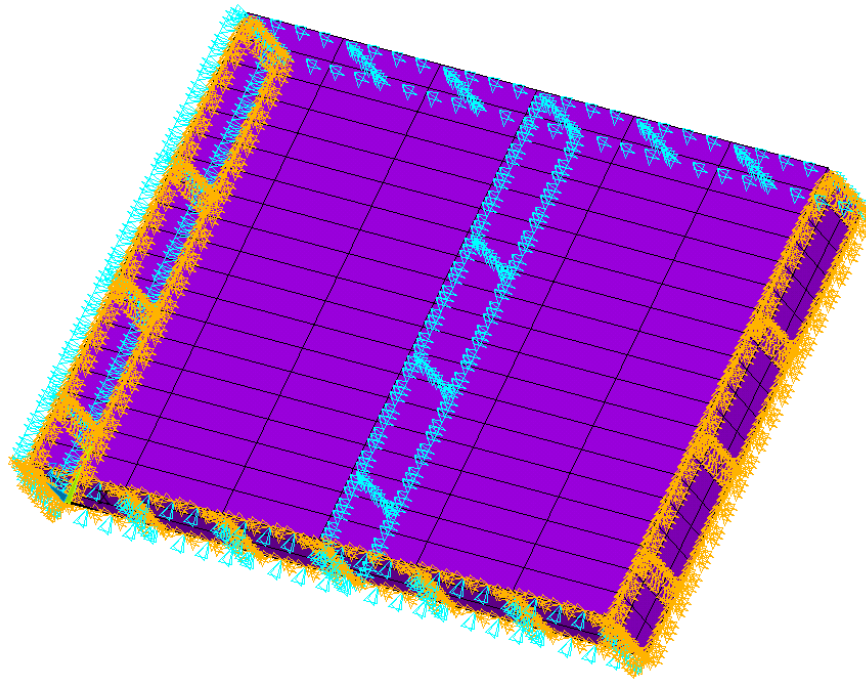
Table 1 : Mechanical properties of hull steels

Steel grades for plates with $t_{as_built} \leq 100 \text{ mm}$	R_{eH} , specified minimum yield stress, in N/mm^2	R_m , specified tensile strength, in N/mm^2
A-B-D-E	235	400 - 520
AH32-DH32-EH32-FH32	315	440 - 570
AH36-DH36-EH36-FH36	355	490 - 630
AH40-DH40-EH40-FH40	390	510 - 660

Πίνακας 5.4: Συντελεστής υλικού, k .

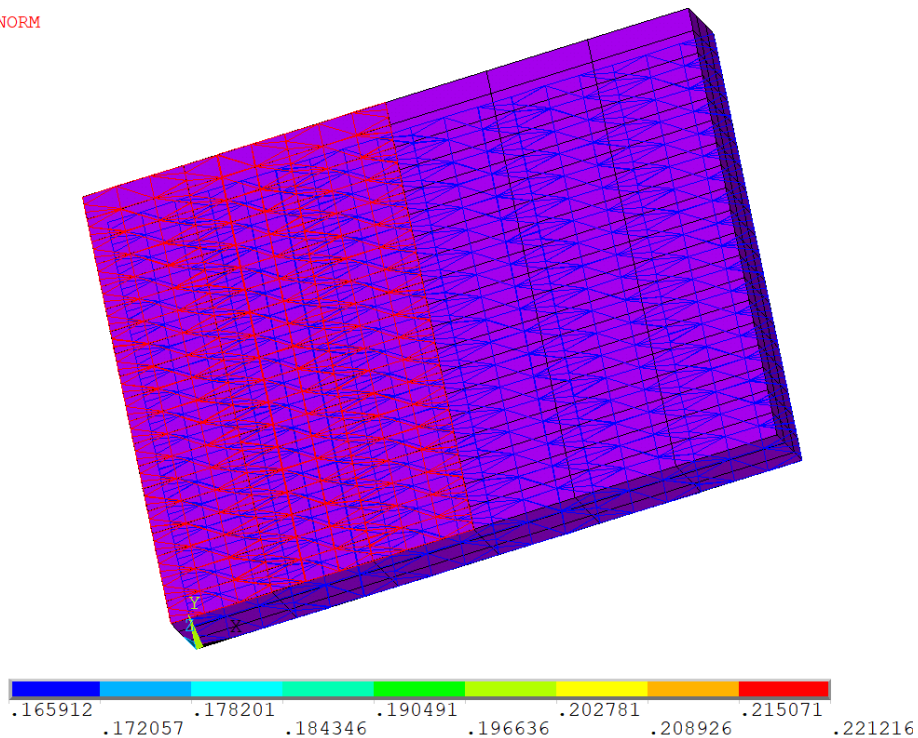
Table 2 : Material factor, k

R_{eH} , specified minimum yield stress, in N/mm^2	k
235	1.00
315	0.78
355	0.72
390	0.68



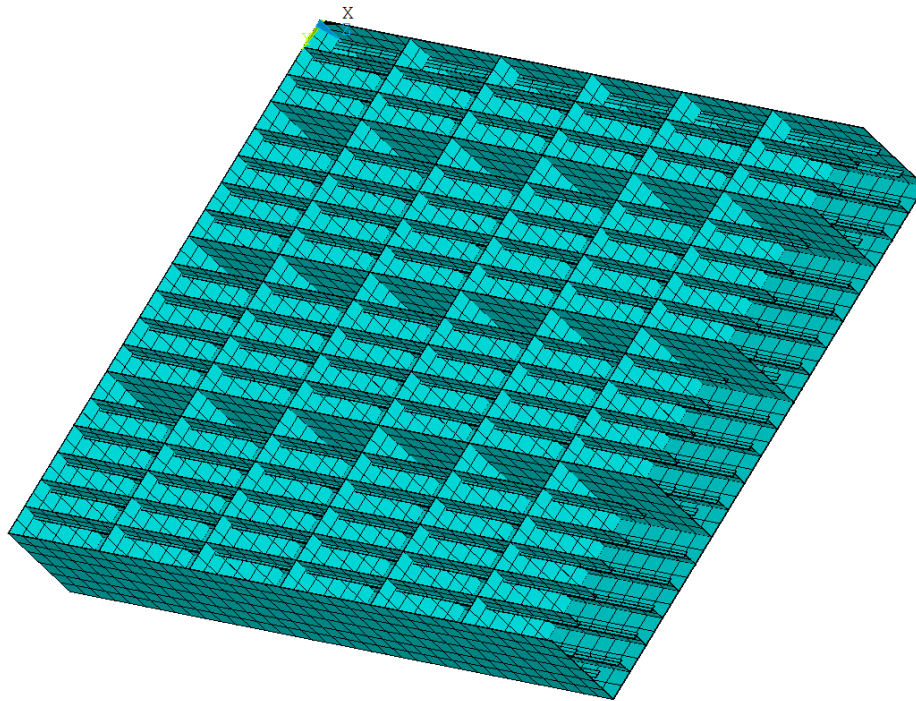
Σχήμα 5.9: Εφαρμοσμένοι περιορισμοί στο υπό μελέτη σχεδιασμένο διπύθμενο.

PRES-NORM

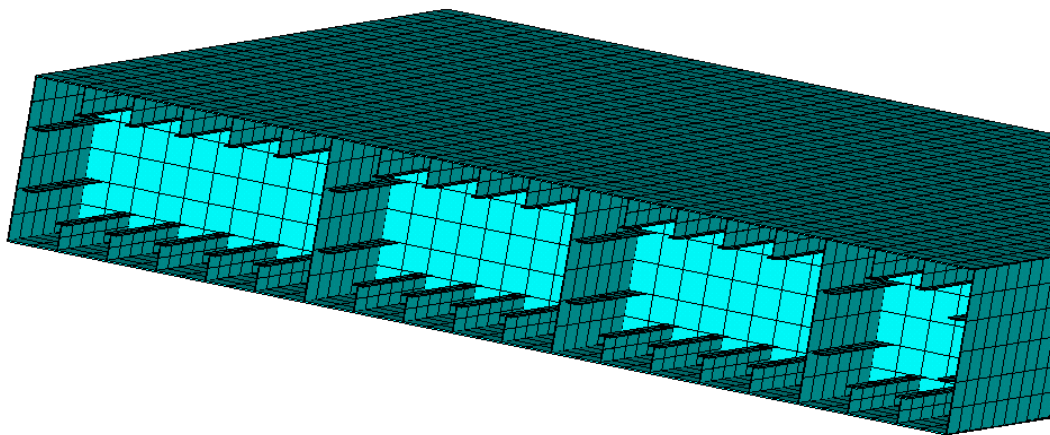


Σχήμα 5.10: Πιέσεις στο υπό μελέτη σχεδιασμένο μοντέλο, κόκκινη διαγράμμιση πίεση στον εσωτερικό πυθμένα - μπλε διαγράμμιση πίεση στον εξωτερικό πυθμένα.

Έχοντας αναφέρει όλα τα βασικά στοιχεία για την μοντελοποίηση, στα Σχήματα 5.11 και 5.12 φαίνεται το σχεδιασμένο μοντέλο.



Σχήμα 5.11: Μοντελοποιημένο διτύθμενο στο Ansys Apdl.



Σχήμα 5.12: Μοντελοποιημένο διτύθμενο στο Ansys Apdl.

Πριν παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης από το Ansys Mechanical APDL, θα γίνει αναφορά στο Mesh sensitivity analysis που πραγματοποιήθηκε. Με την διαδικασία αυτή ελέγχεται κατά πόσο επηρεάζονται τα αποτελέσματα από την διακριτοποίηση του μοντέλου. Έγιναν δύο αναλύσεις με τα εξής στοιχεία:

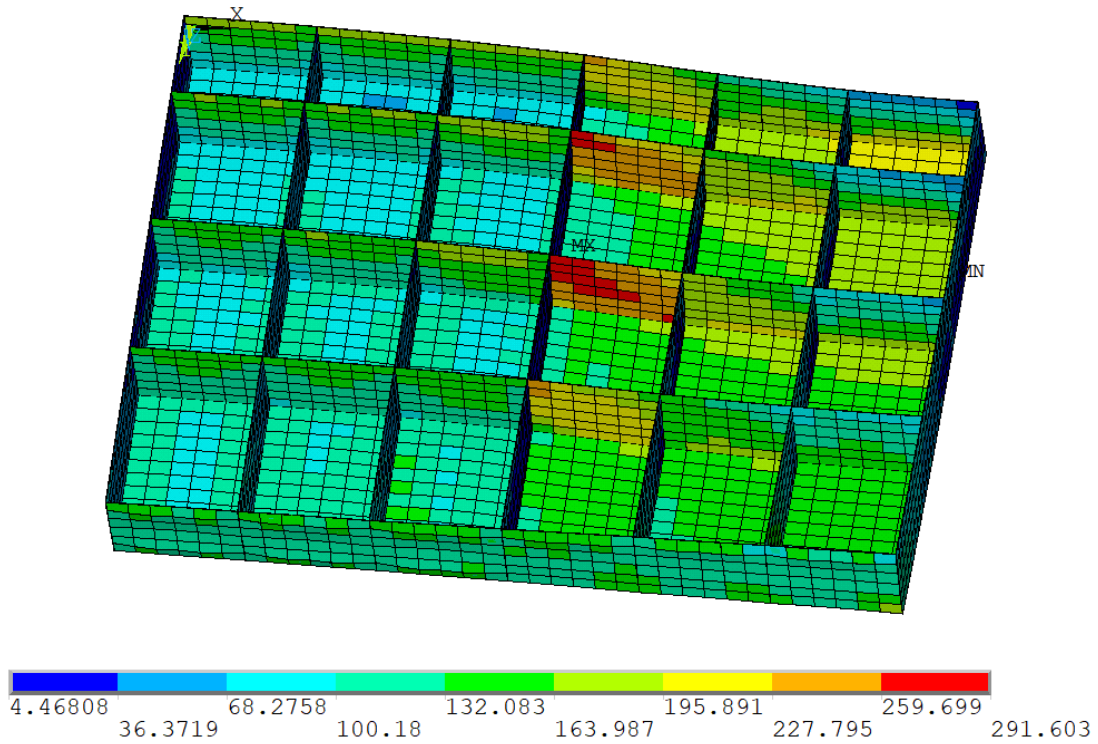
- Ανάλυση 1 : 3-Δ 2-κομβο στοιχείο δοκού (Beam188 από την βιβλιοθήκη του Ansys)
3-Δ 4-κομβο στοιχείο πλάκας (Shell181 από την βιβλιοθήκη του Ansys)
- Ανάλυση 2 : 3-Δ 3-κομβο στοιχείο δοκού (Beam189 από την βιβλιοθήκη του Ansys)
3-Δ 8-κομβο στοιχείο πλάκας (Shell281 από την βιβλιοθήκη του Ansys)

Στην δεύτερη ανάλυση η διακριτοποίηση (πλήθος κόμβων) του σχεδιασμένου μοντέλου είναι μεγαλύτερη, και για τον λόγο αυτό δεν ήταν δυνατόν το μέγεθος των στοιχείων (Element Size) να είναι ίδιο και στις δύο αναλύσεις που ελέγχθηκαν διότι το Ansys Mechanical APDL που χρησιμοποιήθηκε έχει ανώτερο όριο κόμβων και στοιχείων που μπορεί να λύσει.

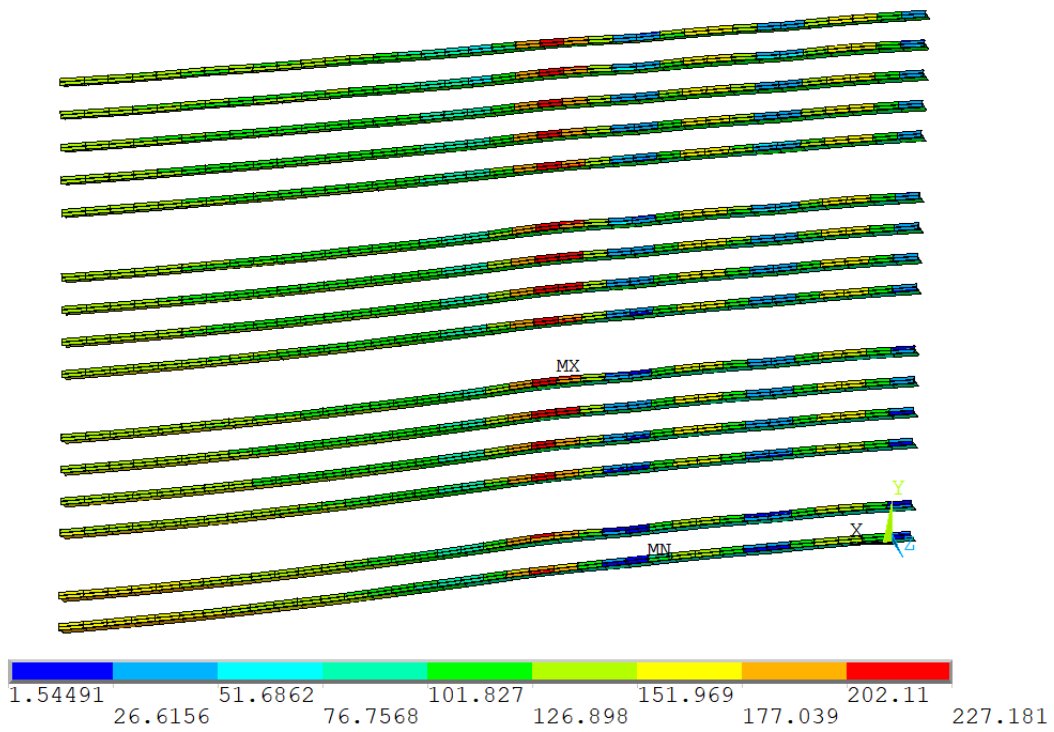
Η S_{max} η οποία αναφέρεται στον Πίνακα 5.5 είναι η μέγιστη τάση Von Mises που αναπτύσσεται στα επιμέρους στοιχεία (Beam & Shell). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το στοιχείο Beam εκφράζει όλα τα ενισχυτικά του μοντελοποιημένου διτύθμενου και το στοιχείο Shell όλα του τα ελάσματα. Ο υπολογισμών των τάσεων έχει γίνει μέσω του ήδη υπάρχον κώδικα σχεδίασης του μοντελοποιημένου διτύθμενου αλλάζοντας σε κάθε περίπτωση το μέγεθος των στοιχείων (Element Size) καθώς και το είδος των στοιχείων.

Πίνακας 5.5: Μέγιστες τάσεις στο μοντέλο για διαφορετική διακριτοποίηση.

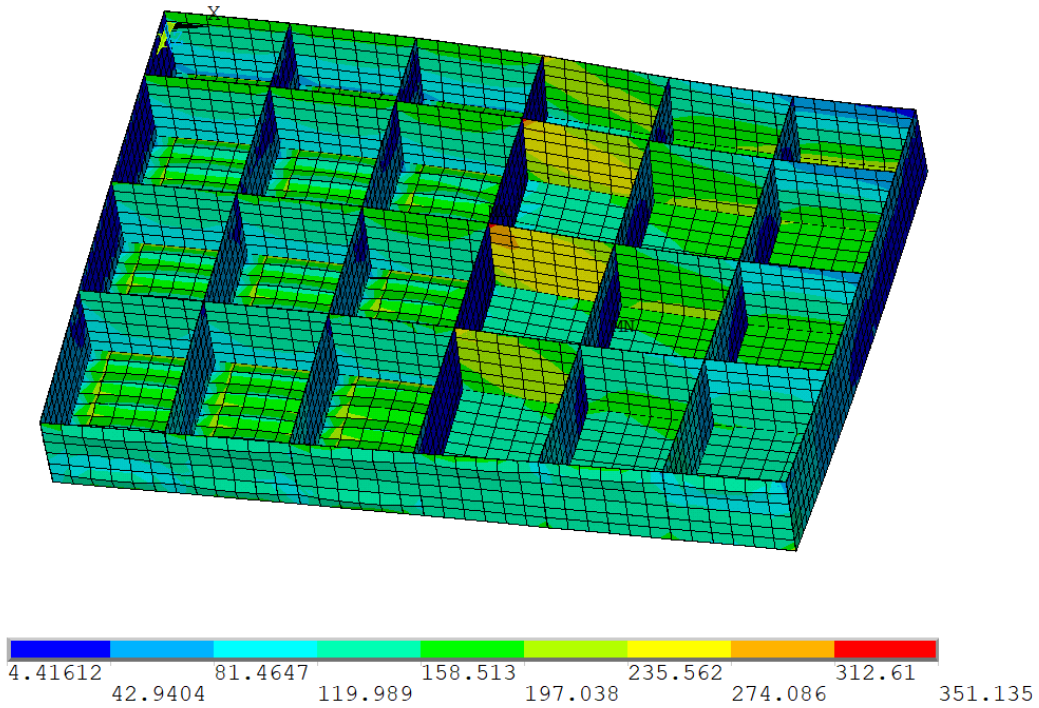
Element Size	Ανάλυση 1		Ανάλυση 2	
	S_{MAX} (Beam)	S_{MAX} (Shell)	S_{MAX} (Beam)	S_{MAX} (Shell)
950	-	-	237.72	329.57
850	-	-	236.55	333.75
750	223.57	291.33	234.97	349.65
650	227.18	291.60	229.18	351.14
550	226.42	298.78	232.04	350.67
450	227.31	300.73	-	-
350	226.05	308.10	-	-
250	228.78	314.57	-	-



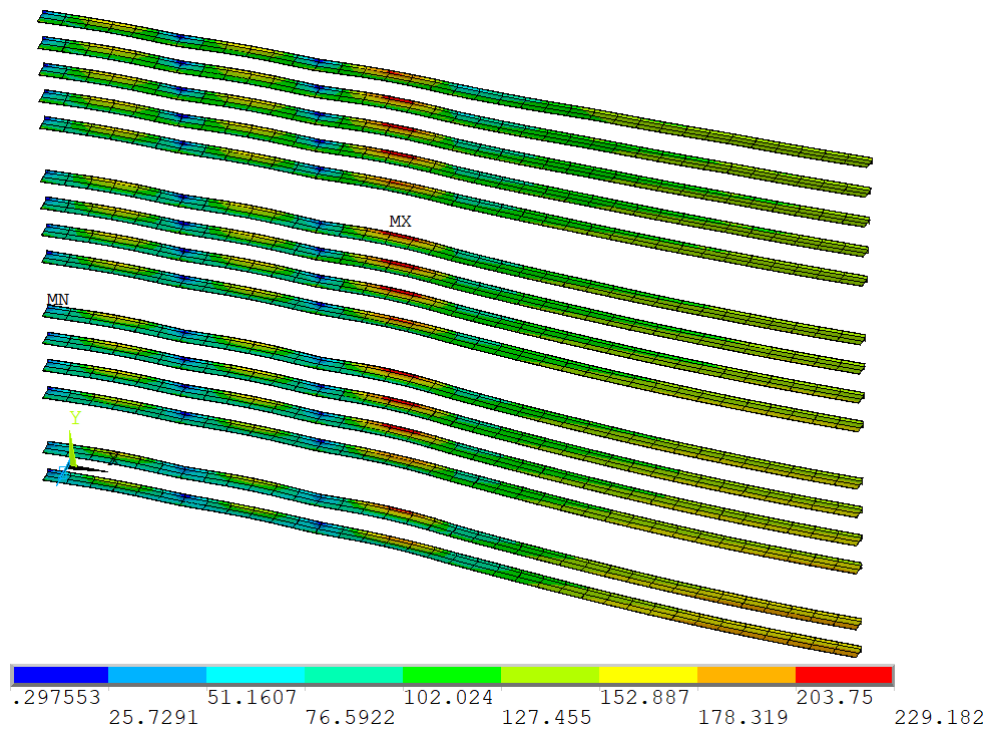
Σχήμα 5.13: Αναπτυσσόμενη τάση Von Mises πρώτης ανάλυσης για τα στοιχεία Shell181 με Element Size 650.



Σχήμα 5.14: Αναπτυσσόμενη τάση Von Mises πρώτης ανάλυσης για τα στοιχεία Beam188 με Element Size 650 (Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση στα ενισχυτικά του εσωτερικού πυθμένα).



Σχήμα 5.15: Αναπτυσσόμενη τάση Von Mises δεύτερης ανάλυσης για τα στοιχεία Shell281 με Element Size 650.

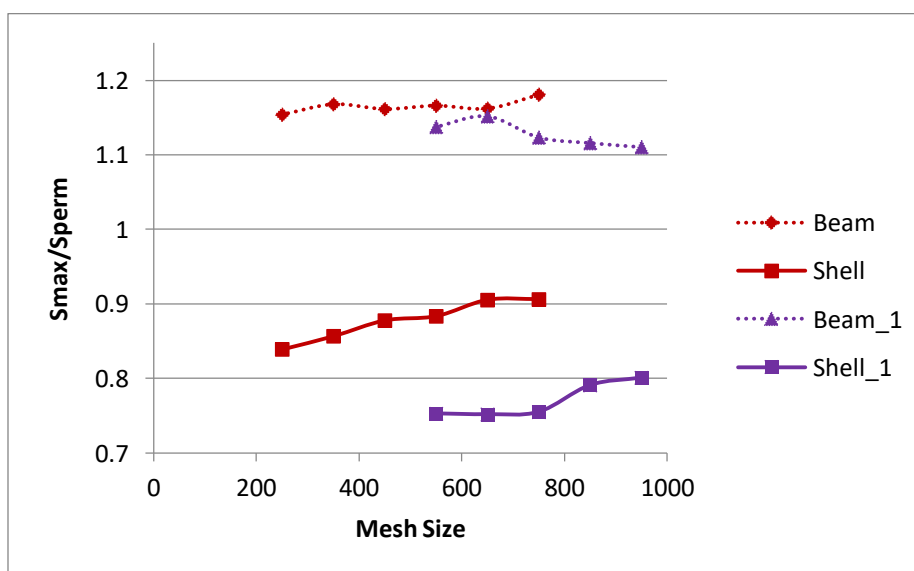


Σχήμα 5.16: Αναπτυσσόμενη τάση Von Mises δεύτερης ανάλυσης για τα στοιχεία Beam189 με Element Size 650 (Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση στα ενισχυτικά του εσωτερικού πυθμένα).

Η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση Von Mises σε όλο το μοντέλο και στις δύο αναλύσεις για όλα τα μεγέθη στοιχείου (Element Size), υπερβαίνει την τιμή της μέγιστης επιτρεπόμενης $\sigma_{perm} = 264$ MPa, Πίνακας 5.5. Αυτό πιθανόν οφείλεται στις υποθέσεις που έχουν γίνει στον ορισμό των φορτίων που επιδρούν στο μοντελοποιημένο διπύθμενο. Σε αυτή της φάσης όμως του προβλήματος δεν μας απασχολεί η υπέρβαση αυτή, περισσότερο μας ενδιαφέρει η κατανομή των τάσεων και πως παραμορφώνεται το μοντέλο. Ακόμα παρατηρείται ότι καθώς η διακριτοποίηση μεγαλώνει (μείωση του Element Size), η τιμή της μέγιστης τάσης στα ενισχυτικά παραμένει σχετικά σταθερή χωρίς μεγάλες αυξομειώσεις. Αντίθετα η αναπτυσσόμενη τάση στα ελάσματα έχει κυρίως αυξητική τάση. Επιπρόσθετα παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση του ολικού μοντελοποιημένου διπύθμενου αναπτύσσεται στα ελάσματα και όχι στα ενισχυτικά Σχήμα 5.13 έως 5.16. Στον Πίνακα 5.6 φαίνεται η εκμετάλλευση του μοντέλου όσον αφορά την μέγιστη τάση (S_{MAX}/S_{perm}).

Πίνακας 5.6: Λόγος S_{MAX}/S_{perm} στο μοντέλο για διαφορετική διακριτοποίηση.

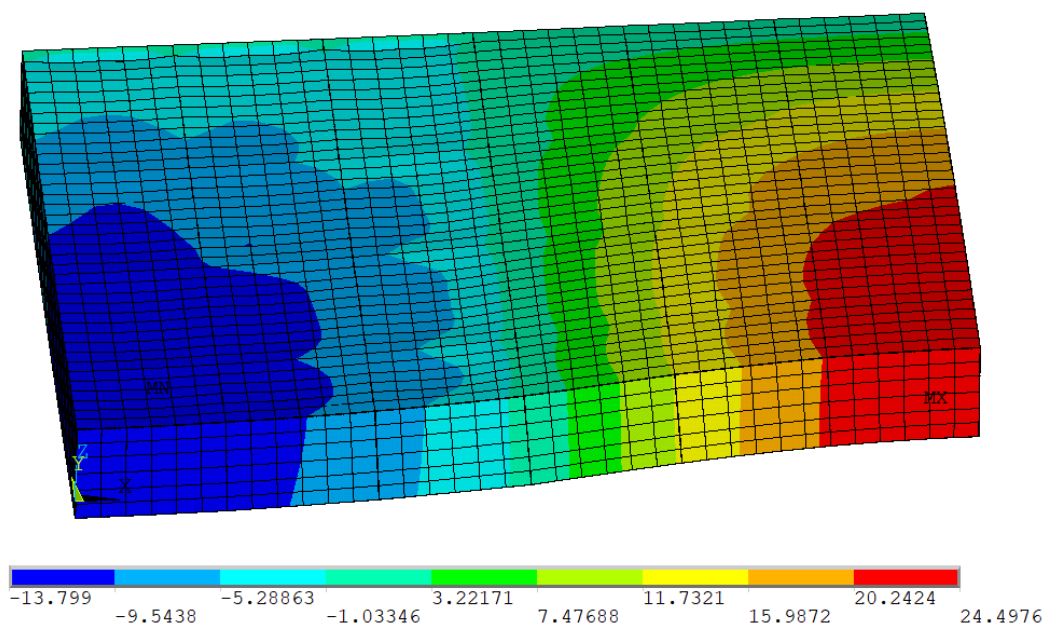
Element Size	Ανάλυση 1		Ανάλυση 2	
	S_{MAX} (Beam)	S_{MAX} (Shell)	S_{MAX} (Beam)	S_{MAX} (Shell)
950			1.11	0.80
850	-	-	1.12	0.79
750	1.18	0.91	1.12	0.76
650	1.16	0.91	1.15	0.75
550	1.17	0.88	1.14	0.75
450	1.16	0.87	-	-
350	1.17	0.86	-	-
250	1.15	0.84	-	-



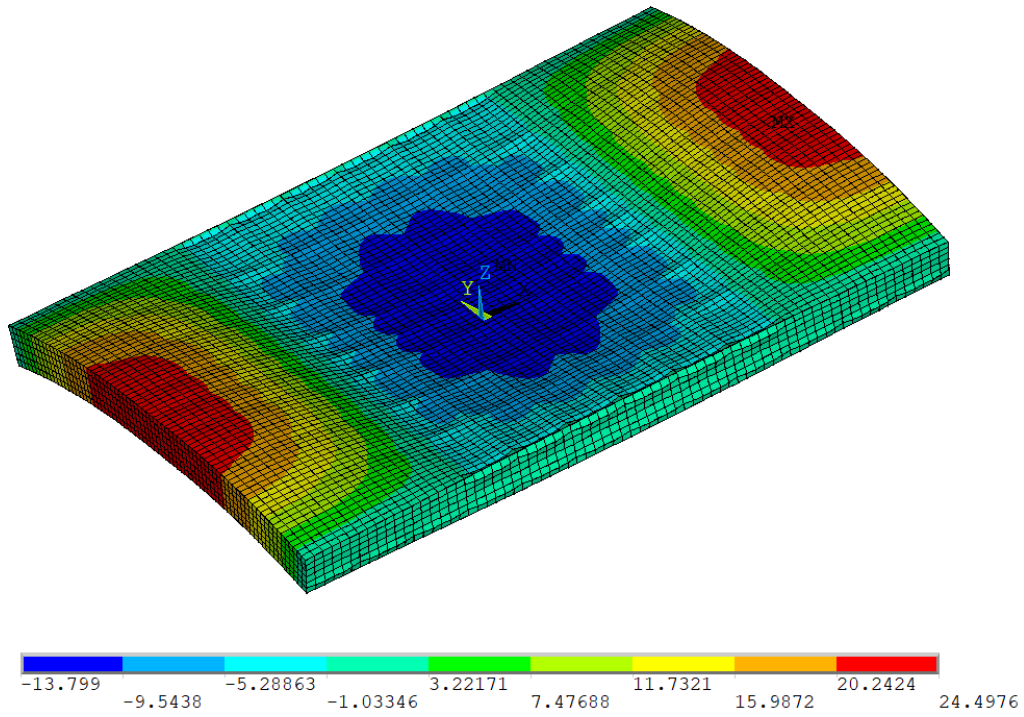
Σχήμα 5.17: Γραφική απεικόνιση Πίνακα 5.6.

Ο λόγος (S_{MAX}/S_{perm}) πρέπει να είναι μεγαλύτερος της μονάδας, Σχήμα 5.17, αλλά όπως εξηγήθηκε παραπάνω αυτό δεν ισχύει για τα ελάσματα του μοντελοποιημένου διπύθμενου. Για τα μεγέθη στοιχείων 650, 550 και 750 παρατηρείται σταθεροποίηση των αναπτυσσόμενων τάσεων και στις δύο αναλύσεις. Για λόγους εξοικονόμησης χρόνου, υπολογιστικής ισχύς αλλά και επαρκούς διακριτοποίησης επιλέχθηκε τελικά το μέγεθος στοιχείου 650.

Αφού προσδιορίστηκε και το μέγεθος των στοιχείων, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα του μοντελοποιημένου διπύθμενου. Στο Σχήμα 5.18 φαίνεται η κατακόρυφη μετατόπιση όλων των στοιχείων του μοντέλου. Στο Σχήμα 5.19 πάλι φαίνεται η κατακόρυφη μετατόπιση, αλλά στην συμμετρική επέκταση του μοντέλου. Το μοντελοποιημένο διπύθμενο παρουσιάζεται σε όλο το πλάτος της μέσης τομής καθώς και σε μήκος συνολικά δύο αμπαριών. Το κεντρικό αμπάρι, το οποίο θεωρείται και φορτωμένο απεικονίζεται καθ' όλο το μήκος του και τα μισά σε μήκος πλαϊνά αμπάρια. Όπως φαίνεται η παραμόρφωση του μοντέλου είναι όπως αυτή που αναμενόταν να έχει και στην πραγματικότητα, για τη κατάσταση φόρτωσης που εξετάζεται (ALH).

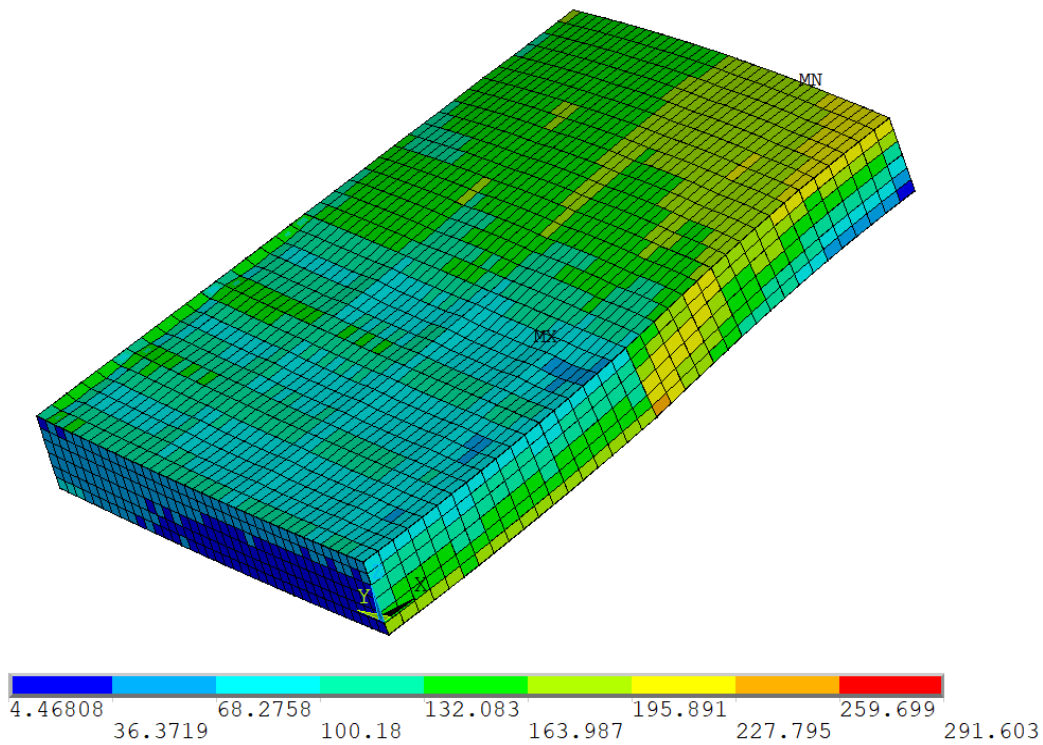


Σχήμα 5.18: Κατακόρυφη μετατόπιση μοντελοποιημένου διπύθμενου.

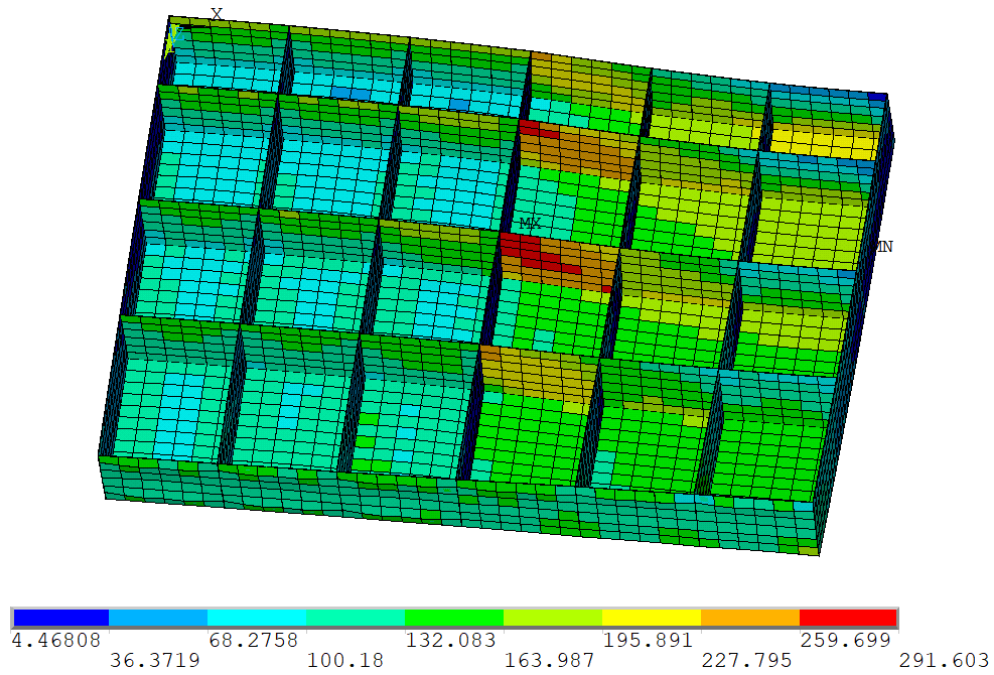


Σχήμα 5.19: Κατακόρυφη μετατόπιση εκτεταμένου μοντελοποιημένου διτύθμενου.

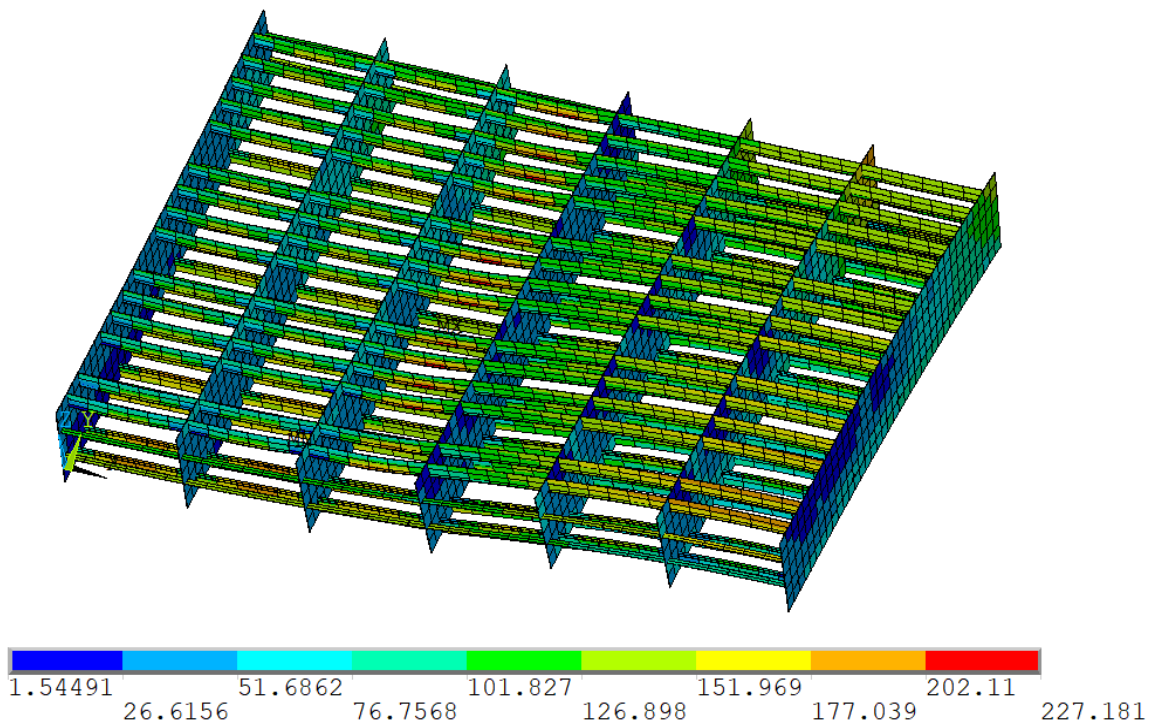
Ακόμα στα Σχήματα 5.20 έως 5.22 απεικονίζεται η τάση Von Mises στο μοντέλο.



Σχήμα 5.20: Αναπτυσσόμενη τάση Von mises στο μοντέλο.



Σχήμα 5.21: Αναπτυσσόμενη τάση Von mises σε επιμέρους στοιχεία του μοντέλου.



Σχήμα 5.22: Αναπτυσσόμενη τάση Von mises επιμέρους στοιχεία του μοντέλου.

5.4 Workbench

Αφού η μοντελοποίηση της κατασκευής έχει οριστικοποιηθεί, μέσω του προγράμματος **Workbench Ansys** θα βελτιστοποιηθεί. Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές βελτιστοποιήσεις με διαφορετικό αριθμό μεταβλητών εισόδου, αλλά και περιορισμών. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι δύο που είχαν τα καλύτερα αποτελέσματα.

Όπως και στην ανάλυση του προβλήματος στο κεφάλαιο 4, έτσι και εδώ χρησιμοποιήθηκαν 3 αλγόριθμοι, τα χαρακτηριστικά των οποίων έχουν περιγραφεί στο Κεφάλαιο 3:

- MOGA
- NLPQL
- RSM

Η μέθοδος RSM στο πρόγραμμα **Workbench Ansys** που χρησιμοποιήθηκε έχει ανώτερο όριο αριθμού μεταβλητών εισόδου (20), οπότε δεδομένου ότι οι βελτιστοποιήσεις που θα παρουσιαστούν έχουν 24 μεταβλητές εισόδου δεν ήταν δυνατή η χρήση της μεθόδου RSM. Συνεπώς χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι άλλες δύο μέθοδοι, τα αποτελέσματα των οποίων ήταν αρκετά κοντά, αλλά λίγο καλύτερα της μεθόδου NLPQL, η οποία είναι και πιο γρήγορη.

5.4.1 Βελτιστοποίηση βασισμένη στις αναλυτικές εξισώσεις του CSR

Στο εδάφιο αυτό έχει γίνει βελτιστοποίηση του μοντελοποιημένου διπύθμενου με τους αλγόριθμους NLPQL & MOGA. Οι περιορισμοί της συγκεκριμένης βελτιστοποίησης είναι να μην γίνεται υπέρβαση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises όλου του μοντέλου αυτή της επιτρεπόμενης ορθής τάσης (σ_{perm}), αλλά και αντίστοιχα της διατμητικής. Επίσης οι κατώτατες τιμές των μεταβλητών εισόδου έχουν υπολογιστεί από τις αναλυτικές εξισώσεις του CSR, μέσω των ασκούμενων πιέσεων (Part 1/Chapter 6).

- NLPQL

Στην πρώτη στήλη του Πίνακα 5.7 παρουσιάζονται οι μεταβλητές εισόδου της βελτιστοποίησης, στην δεύτερη και τρίτη τα όρια αυτών μέσα στα οποία ο αλγόριθμος θα ψάξει να βρει τις βέλτιστες λύσεις. Στην τέταρτη και πέμπτη στήλη αναγράφονται τα ολικά καθώς και τα καθαρά (χωρίς την προσαύξηση λόγω διάβρωσης) πάχη αντίστοιχα των μεταβλητών εισόδου, τα οποία έχουν υπολογιστεί από την μέση τομή του πλοίου αναφοράς. Στην έκτη στήλη παρουσιάζονται τα πάχη των μεταβλητών εισόδου της βέλτιστης λύσης που υπολογίστηκαν έπειτα της βελτιστοποίησης. Στην τελευταία στήλη αναφέρεται η ποσοστιαία μεταβολή των μεταβλητών εισόδου, ο υπολογισμός έχει γίνει με τα καθαρά πάχη. Τέλος στην τελευταία γραμμή παρουσιάζεται το βάρος σε τόνους της ημιατομής της μέσης τομής καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή του.

Πίνακας 5.7: Στοιχεία των μεταβλητών εισόδου της πρώτης βελτιστοποίησης με τον αλγόριθμο NLPQL.

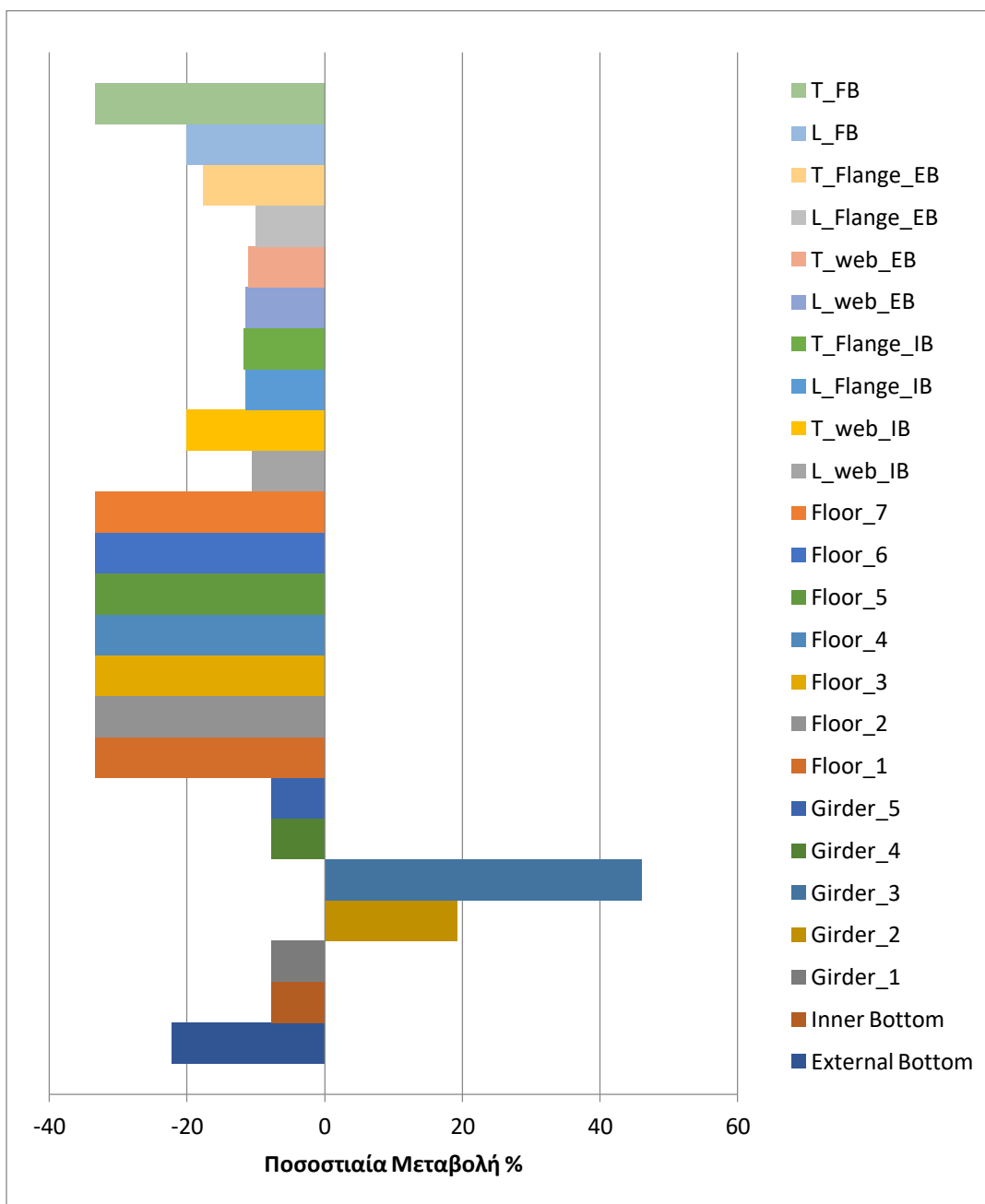
	Min*(net th.)	Max	Reference (Mid-ship plan)	Reference Net Thickness	Optimal Value(gross thick.)	% Difference from reference
External_B thick.	14	23	21	18	14(17)	-22.22
Inner_B thick.	18	25	25	19.5	18(23.5)	-7.69
1_Girder thick.	12	21	16	13	12(15)	-7.69
2_Girder thick.	12	21	16	13	15.5(18.5)	+19.23
3_Girder thick.	12	21	16	13	19(22)	+46.15
4_Girder thick.	12	21	16	13	12(15)	-7.69
5_Girder thick.	12	21	16	13	12(15)	-7.69
1_Floor thick.	10	23	18	15	10(13)	-33.33
2_Floor thick.	10	23	18	15	10(13)	-33.33
3_Floor thick.	10	23	18	15	10(13)	-33.33
4_Floor thick.	10	23	18	15	10(13)	-33.33
5_Floor thick.	10	23	18	15	10(13)	-33.33
6_Floor thick.	10	23	18	15	10(13)	-33.33
7_Floor thick.	10	23	18	15	10(13)	-33.33
L_web_IB	380	480	425	425	380	-10.59
T_web_IB	8	12	13	10	8(11)	-20.00
L_Flange_IB	155	200	175	175	155	-11.43
T_Flange_IB	14	19	20	17	15(18)	-11.76
L_web_EB	420	525	475	475	420	-11.58
T_web_EB	8	12	12	9	8(11)	-11.11
L_Flange_EB	135	165	150	150	135	-10.00
T_Flange_EB	14	19	20	17	14(17)	-17.65
L_FB	160	200	200	200	160	-20.00
T_FB	8	12	15	12	8(11)	-33.33
Min DB mass [tons]			261.14	212.56	176.87	-16.79

* Selected based on CSR analytic equation

** All thickness values in mm

$$\text{Mass DB} = A_{\text{mid-section}} [\text{mm}^2] * L_{\text{model}} [\text{mm}] * 7.85 * 10^{(-9)} + A_{\text{Floors}} * L * 7.85 * 10^{(-9)},$$

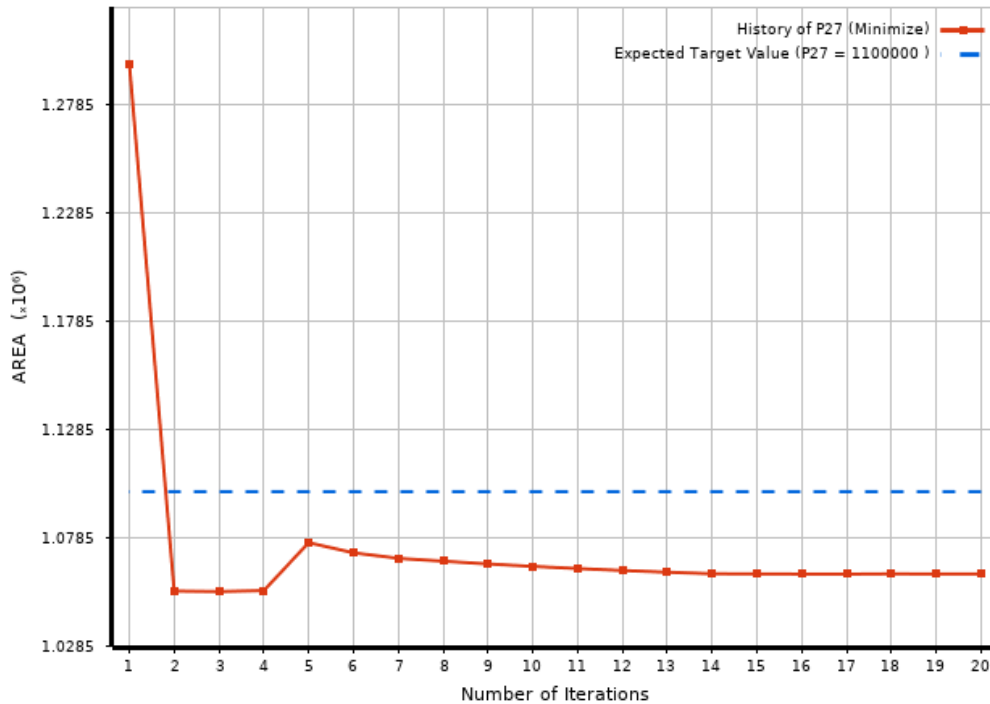
where $L_{\text{model}} = 22200 \text{ mm}$, $L = 16150 \text{ mm}$



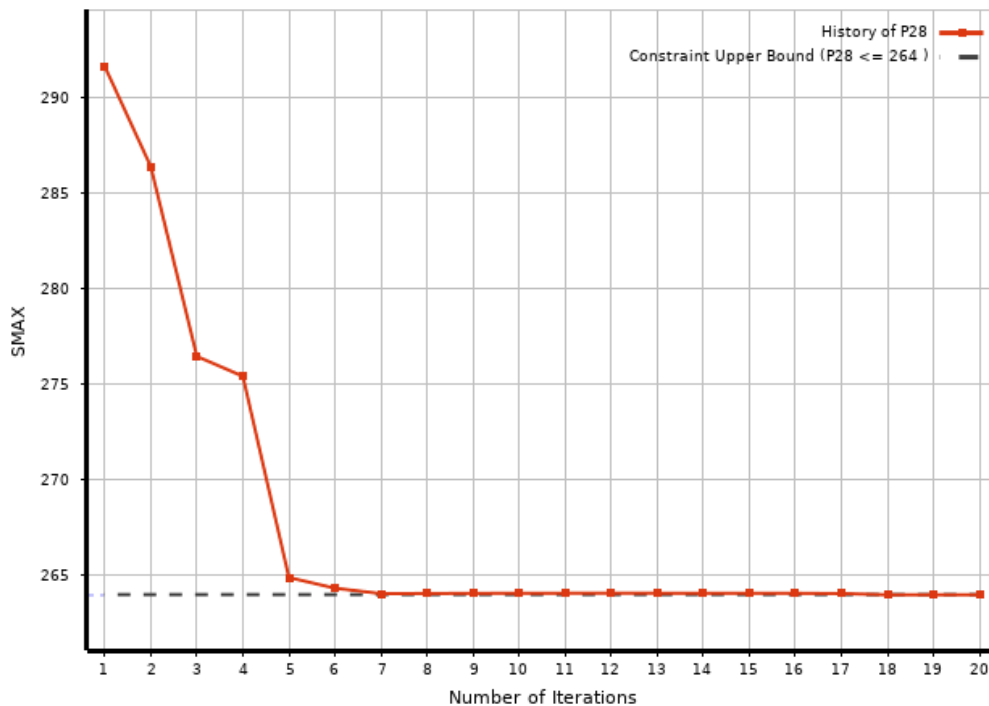
Σχήμα 5.23: Ιστόγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής των μεταβλητών σχεδίασης.

Παρατηρείται μείωση του βάρους του μοντέλου κατά 16.8%. Επιπλέον παρατηρείται αύξηση του πάχους σε ορισμένες σταθμίδες, αυτό συμβαίνει διότι οι σταθμίδες αυτές ήταν που δέχονταν τις υψηλότερες τάσεις σε όλο το μοντέλο, Σχήμα 5.21.

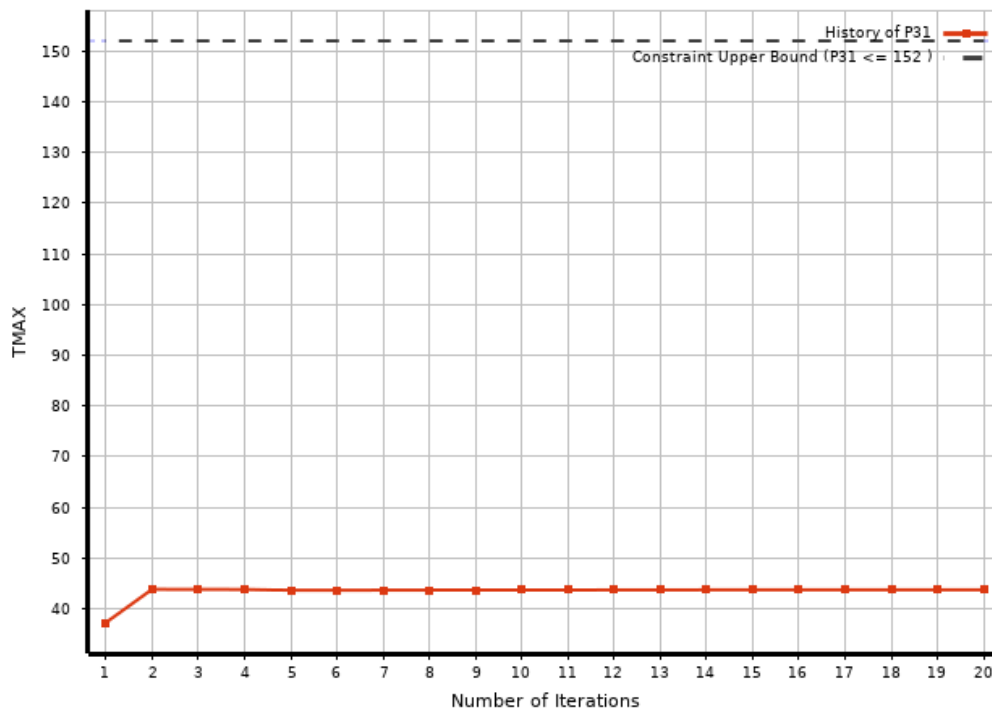
Τέλος παρουσιάζονται τα διαγράμματα που δείχνουν την μεταβολή καθ' όλη την διάρκεια της βελτιστοποίησης για την αντικειμενική συνάρτηση καθώς και για την μέγιστη ορθή και διατμητική τάση που αναπτύσσεται στο μοντελοποιημένο διτύθμενο.



Σχήμα 5.24: Μεταβολή τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (συνολικό εμβαδόν όλων των στοιχείων που απαρτίζουν το μοντελοποιημένο διπύθμενο), για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου NLPQL, για το μοντελοποιημένο διπύθμενο.



Σχήμα 5.25: Μεταβολή τιμής της μέγιστης τάσης Von Mises του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου NLPQL για το μοντελοποιημένο διπύθμενο.



Σχήμα 5.26: Μεταβολή τιμής της μέγιστης διαμητικής τάσης του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου NLPQL για το μοντελοποιημένο διπύθμενο.

- **MOGA**

Στην πρώτη στήλη του Πίνακα 5.8 παρουσιάζονται οι μεταβλητές εισόδου της βελτιστοποίησης, στην δεύτερη και τρίτη τα όρια αυτών μέσα στα οποία ο αλγόριθμος θα ψάξει να βρει τις βέλτιστες λύσεις. Στην τέταρτη και πέμπτη στήλη αναγράφονται τα ολικά καθώς και τα καθαρά (χωρίς την προσαύξηση λόγω διάβρωσης) πάχη αντίστοιχα των μεταβλητών εισόδου, τα οποία έχουν υπολογιστεί από την μέση τομή του πλοίου αναφοράς. Στην έκτη στήλη παρουσιάζονται τα πάχη των μεταβλητών εισόδου της βέλτιστης λύσης που υπολογίστηκαν έπειτα της βελτιστοποίησης. Στην τελευταία στήλη αναφέρεται η ποσοστιαία μεταβολή των μεταβλητών εισόδου, ο υπολογισμός έχει γίνει με τα καθαρά πάχη. Τέλος στην τελευταία γραμμή παρουσιάζεται το βάρος σε τόνους της ημιδιατομής της μέσης τομής καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή του.

Πίνακας 5.8: Στοιχεία των μεταβλητών εισόδου της πρώτης βελτιστοποίησης με τον αλγόριθμο MOGA.

	Min*(net th.)	Max	Reference (Mid-ship plan)	Reference Net Thickness	Optimal Value(gross thick.)	% Difference from reference
External_B thick.	14	23	21	18	14(17)	-22.22
Inner_B thick.	18	25	25	19.5	18(23.5)	-7.69

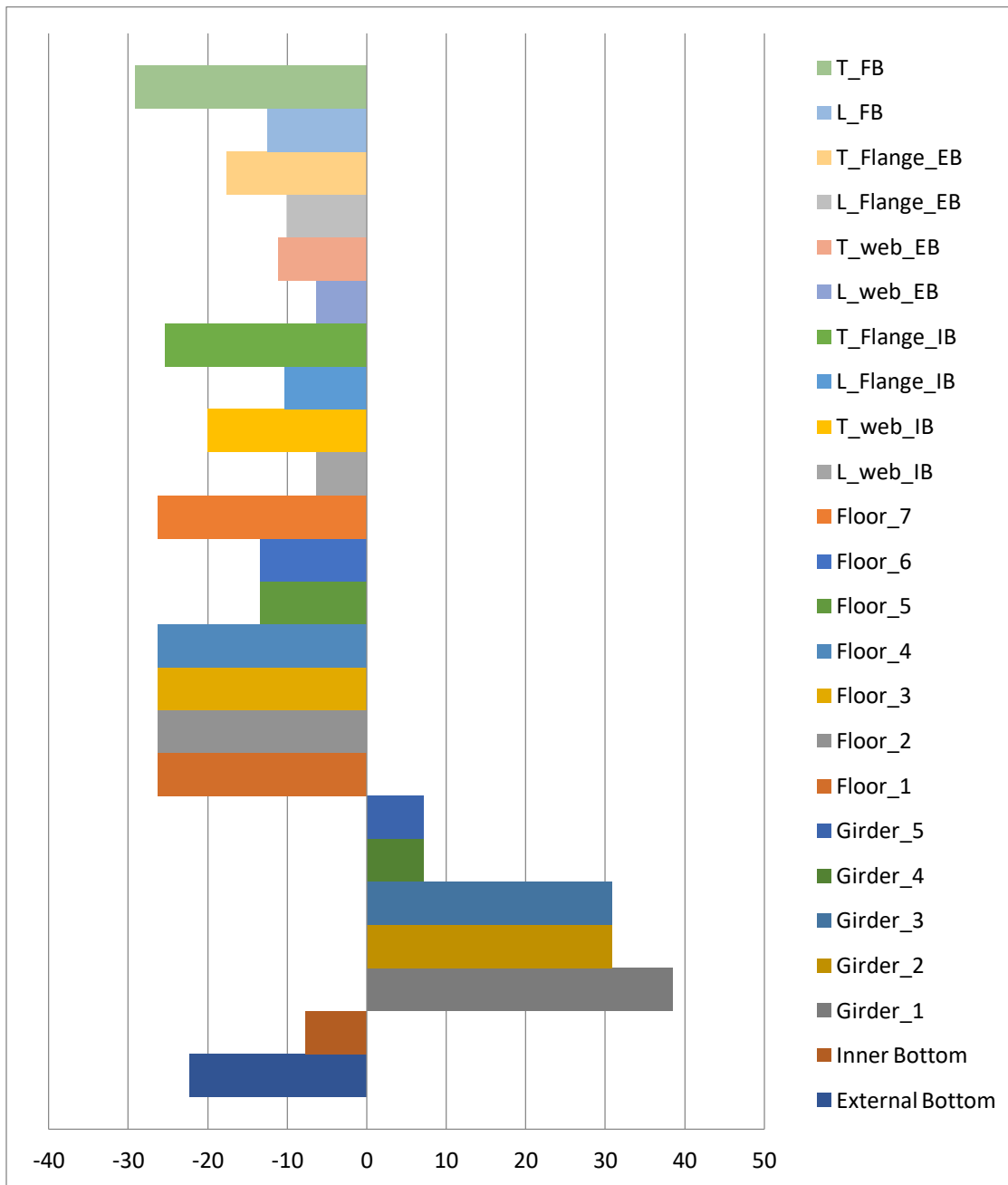
1_Girder thick.	12	21	16	13	18(21)	+38.46
2_Girder thick.	12	21	16	13	17(20)	+30.77
3_Girder thick.	12	21	16	13	17(20)	+30.77
4_Girder thick.	12	21	16	13	14(17)	+7.07
5_Girder thick.	12	21	16	13	14(17)	+7.07
1_Floor thick.	10	23	18	15	11(14)	-26.27
2_Floor thick.	10	23	18	15	11(14)	-26.27
3_Floor thick.	10	23	18	15	11(14)	-26.27
4_Floor thick.	10	23	18	15	11(14)	-26.27
5_Floor thick.	10	23	18	15	13(16)	-13.33
6_Floor thick.	10	23	18	15	13(16)	-13.33
7_Floor thick.	10	23	18	15	11(14)	-26.27
L_web_IB	380	480	425	425	398	-6.35
T_web_IB	8	12	13	10	8(11)	-20.00
L_Flange_IB	155	200	175	175	157	-10.29
T_Flange_IB	14	19	20	17	12.7(15.7)	-25.29
L_web_EB	420	525	475	475	445	-6.32
T_web_EB	8	12	12	9	8(11)	-11.11
L_Flange_EB	135	165	150	150	135	-10.00
T_Flange_EB	14	19	20	17	14(17)	-17.65
L_FB	160	200	200	200	175	-12.50
T_FB	8	12	15	12	8.5(11.5)	-29.17
Min DB mass [tons]			261.14	212.56	185.73	-12.62

* Selected based on CSR analytic equation

** All thickness values in mm

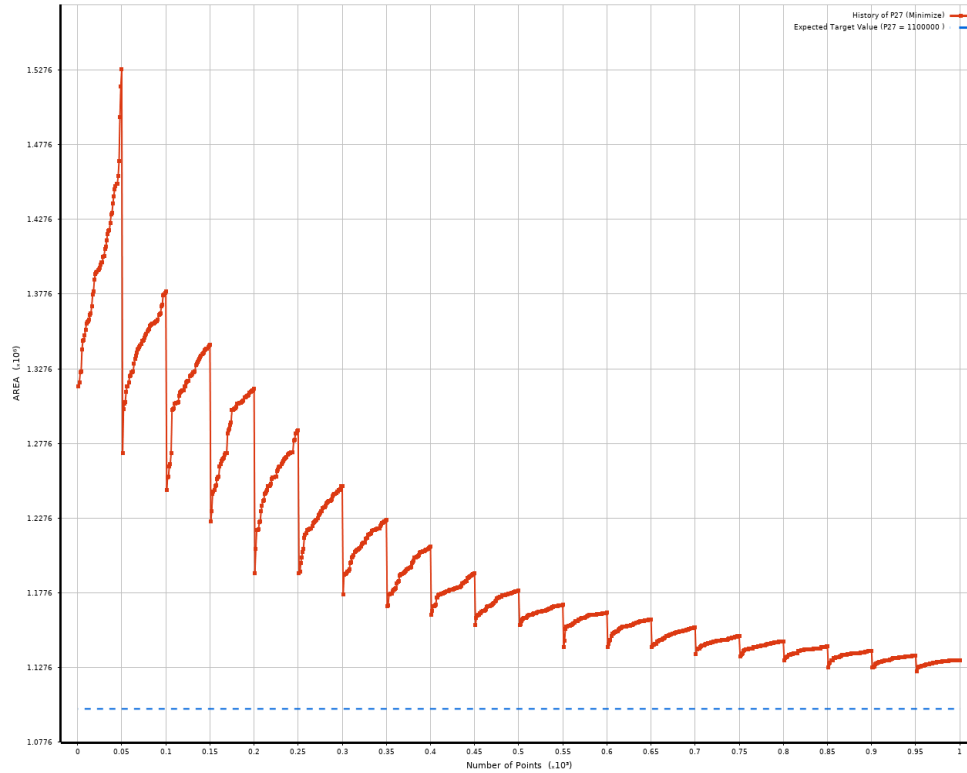
$$\text{Mass DB} = A_{\text{mid-section}}[\text{mm}^2] * L_{\text{model}}[\text{mm}] * 7.85 * 10^{(-9)} + A_{\text{Floors}} * L * 7.85 * 10^{(-9)},$$

where $L_{\text{model}} = 22200 \text{ mm}$, $L = 16150 \text{ mm}$

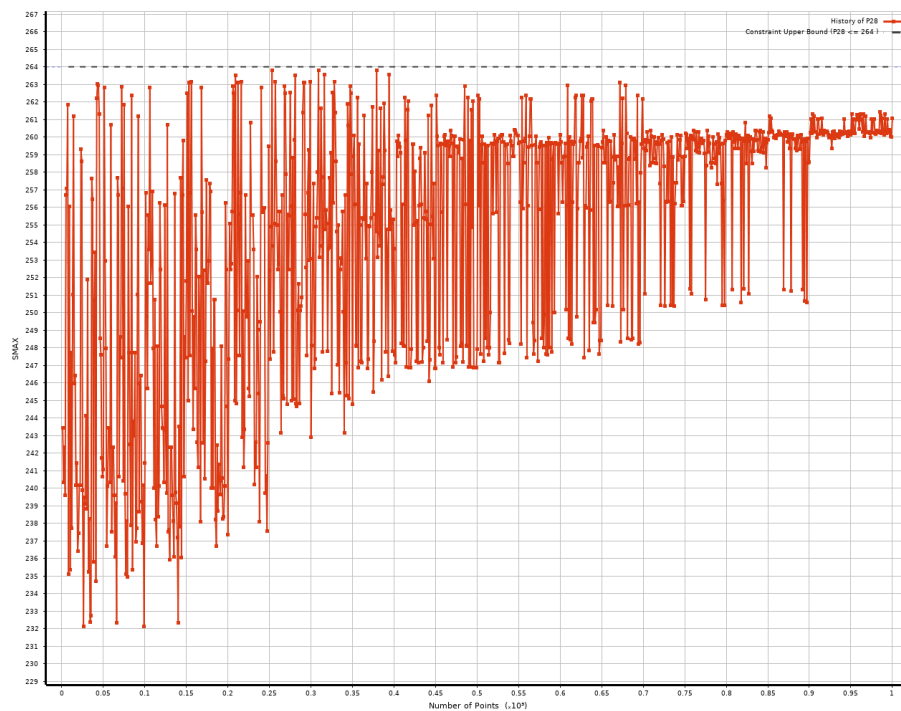


Σχήμα 5.27: Ιστόγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής των μεταβλητών σχεδίασης.

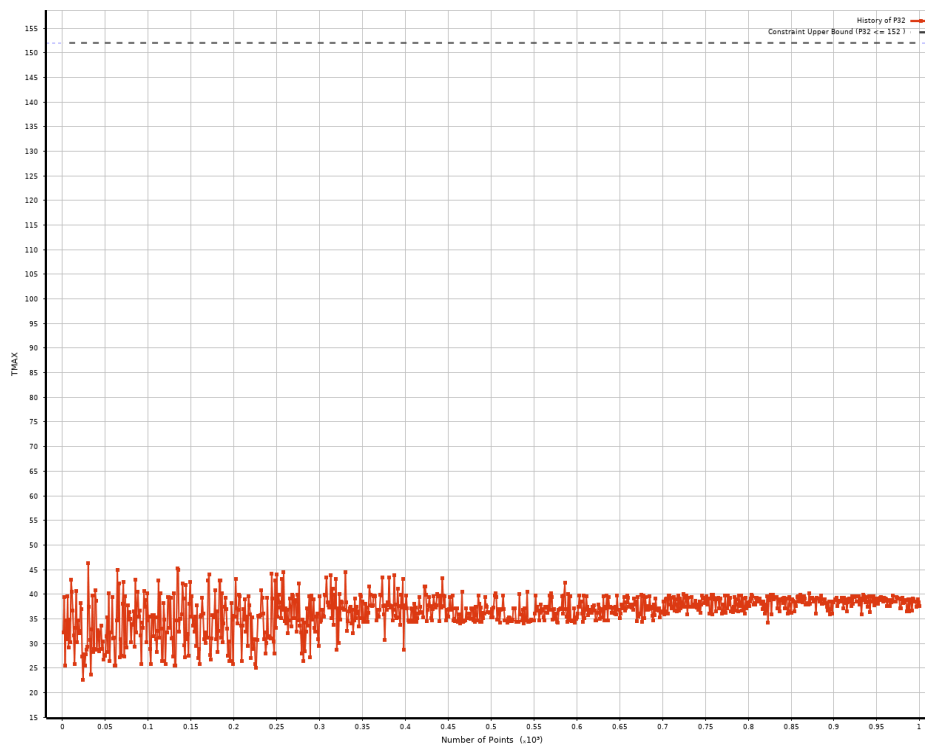
Παρατηρείται μείωση του βάρους του μοντέλου κατά 12.62%. Τέλος παρουσιάζονται τα διαγράμματα που δείχνουν την μεταβολή καθ' όλη την διάρκεια της βελτιστοποίησης για την αντικειμενική συνάρτηση καθώς και για την μέγιστη ορθή και διατμητική τάση που αναπτύσσεται στο μοντελοποιημένο διπύθμενο.



Σχήμα 5.28: Μεταβολή τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (συνολικό εμβαδόν όλων των στοιχείων που απαρτίζουν το μοντελοποιημένο διτύθμενο), για όλες τις επαναλήψεις (50 δείγματα ανά επανάληψη) του αλγορίθμου MOGA, για το μοντελοποιημένο διτύθμενο.



Σχήμα 5.29: Μεταβολή τιμής της μέγιστης τάσης Von Mises του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις (50 δείγματα ανά επανάληψη) του αλγορίθμου MOGA για το μοντελοποιημένο διτύθμενο.



Σχήμα 5.30: Μεταβολή τιμής της μέγιστης διατμητικής τάσης του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις (50 δείγματα ανά επανάληψη) του αλγορίθμου MOGA για το μοντελοποιημένο διτύθμενο.

5.4.2 Βελτιστοποίηση βασισμένη στις απαιτήσεις λυγηρότητας

Στο εδάφιο αυτό έχει γίνει βελτιστοποίηση του μοντελοποιημένου διτύθμενου με τους αλγόριθμους NLPQL & MOGA. Οι περιορισμοί της συγκεκριμένης βελτιστοποίησης είναι να μην γίνεται υπέρβαση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises όλου του μοντέλου αυτή της επιτρεπόμενης ορθής τάσης (σ_{perm}), αλλά και αντίστοιχα της διατμητικής. Οι κατώτατες τιμές των μεταβλητών εισόδου έχουν υπολογιστεί με βάση την λυγηρότητα των αντίστοιχων ελασμάτων και ενισχυτικών σύμφωνα με τις σχέσεις από το CSR (Part 1_Chapter 8_Section 2). Ακόμα έχουν προστεθεί σαν περιορισμοί για τα ενισχυτικά του εσωτερικού και εξωτερικού πυθμένα οι λόγοι λυγηρότητας για τον κορμό $\frac{t_w}{h_w}$ και την φλάντζα $\frac{t_f}{b_f}$, η τιμή των οποίων υπολογίζεται από τις σχέσεις των Σχημάτων 5.31 και 5.32.

Πίνακας 5.9: Συντελεστές λυγηρότητας.

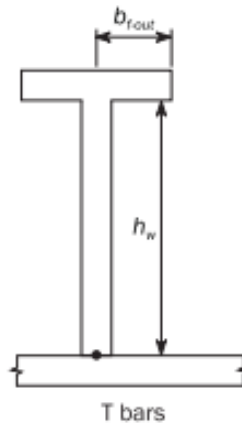
Type of Stiffener	C_w	C_f
Angle, L2 and L3 bars	75	12
T-bars	75	12
Bulb bars	45	-
Flat bars	22	-
[RCN1 to 01 JAN 2017]		

$$t_w \geq \frac{h_w}{C_w} \sqrt{\frac{R_{eH}}{235}}$$

Σχήμα 5.31: Σχέση επιτρεπόμενου πάχους κορμού.

$$t_f \geq \frac{b_{f-out}}{C_f} \sqrt{\frac{R_{eH}}{235}}$$

Σχήμα 5.32: Σχέση επιτρεπόμενου πάχους φλάντζας.



Σχήμα 5.33: Διατομή ενισχυτικού (Tee stiffener).

- NLPQL

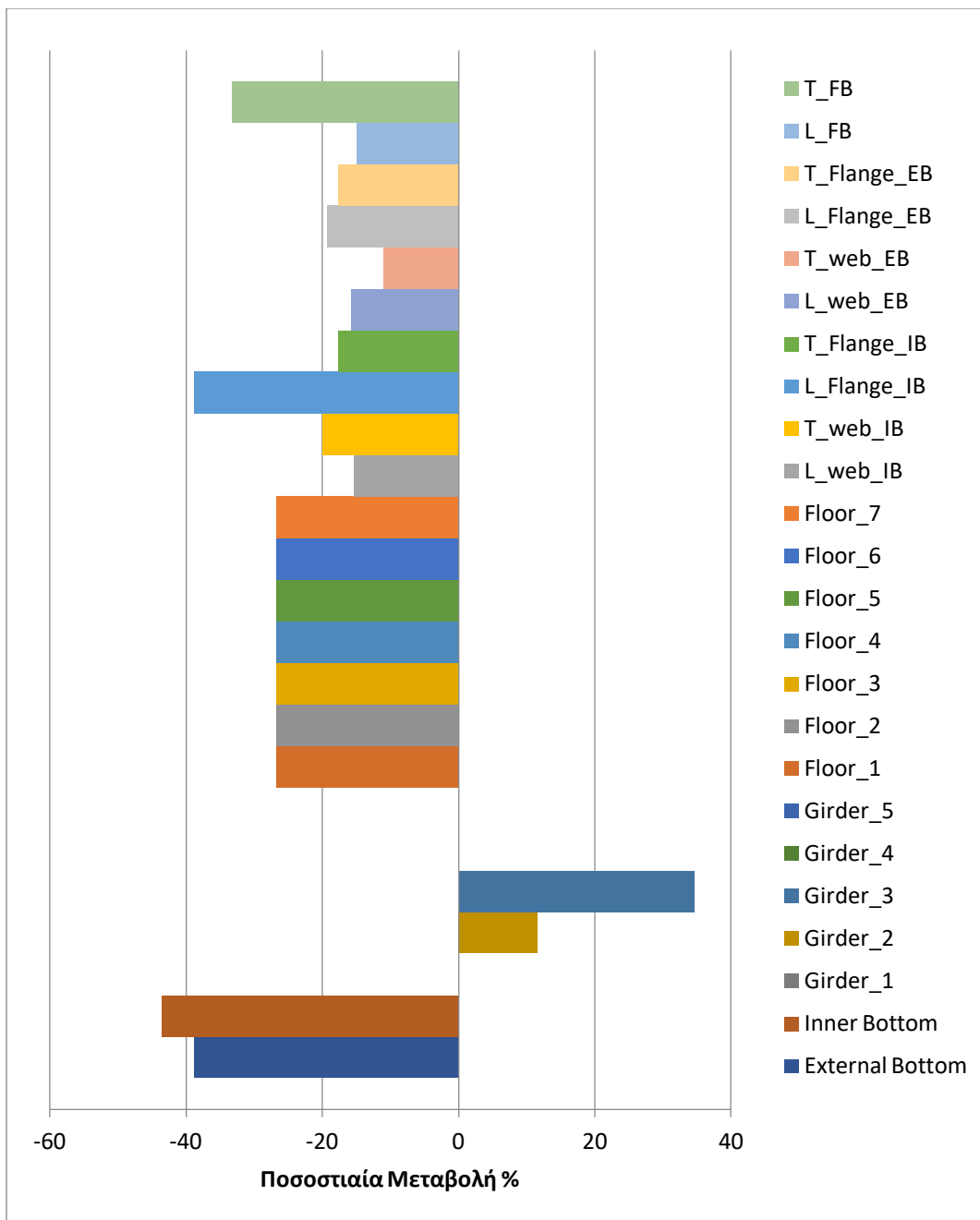
Στην πρώτη στήλη του Πίνακα 5.10 παρουσιάζονται οι μεταβλητές εισόδου της βελτιστοποίησης, στην δεύτερη και τρίτη τα όρια αυτών μέσα στα οποία ο αλγόριθμος θα ψάξει να βρει τις βέλτιστες λύσεις. Στην τέταρτη και πέμπτη στήλη αναγράφονται τα ολικά καθώς και τα καθαρά (χωρίς την προσαύξηση λόγω διάβρωσης) πάχη αντίστοιχα των μεταβλητών εισόδου, τα οποία έχουν υπολογιστεί από την μέση τομή του πλοίου αναφοράς. Στην έκτη στήλη παρουσιάζονται τα πάχη των μεταβλητών εισόδου της βέλτιστης λύσης που υπολογίστηκαν έπειτα της βελτιστοποίησης. Στην τελευταία στήλη αναφέρεται η ποσοστιαία μεταβολή των μεταβλητών εισόδου, ο υπολογισμός έχει γίνει με τα καθαρά πάχη. Τέλος στην τελευταία γραμμή παρουσιάζεται το βάρος σε τόνους της ημιδιατομής της μέσης τομής καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή του.

Πίνακας 5.10: Στοιχεία των μεταβλητών εισόδου της δεύτερης βελτιστοποίησης.

	Min*(net th.)	Max	Reference (Mid-ship plan)	Reference Net Thickness	Optimal Value(gross thick.)	% Difference from reference
External_B thick.	11	23	21	18	11(14)	-38.89
Inner_B thick.	11	25	25	19.5	11(16.5)	-43.59
1_Girder thick.	13	21	16	13	13(16)	0.00
2_Girder thick.	13	21	16	13	14.5(17.5)	+11.54
3_Girder thick.	13	21	16	13	17.5(20.5)	+34.62
4_Girder thick.	13	21	16	13	13(16)	0.00
5_Girder thick.	13	21	16	13	13(16)	0.00
1_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
2_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
3_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
4_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
5_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
6_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
7_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
L_web_IB	360	460	425	425	360	-15.30
T_web_IB	8	12	13	10	8(11)	-20.00
L_Flange_IB	107	170	175	175	107	-38.86
T_Flange_IB	14	19	20	17	14(17)	-17.65
L_web_EB	400	500	425	475	400	-15.79
T_web_EB	8	12	13	9	8(11)	-11.11
L_Flange_EB	120	150	175	150	121	-19.33
T_Flange_EB	14	19	20	17	14(17)	-17.65
L_FB	160	200	200	200	170	-15.00
T_FB	8	12	15	12	8(11)	-33.33
Min DB mass [tons]			261.14	212.56	147.88	-30.43

* Selected based on slenderness requirements

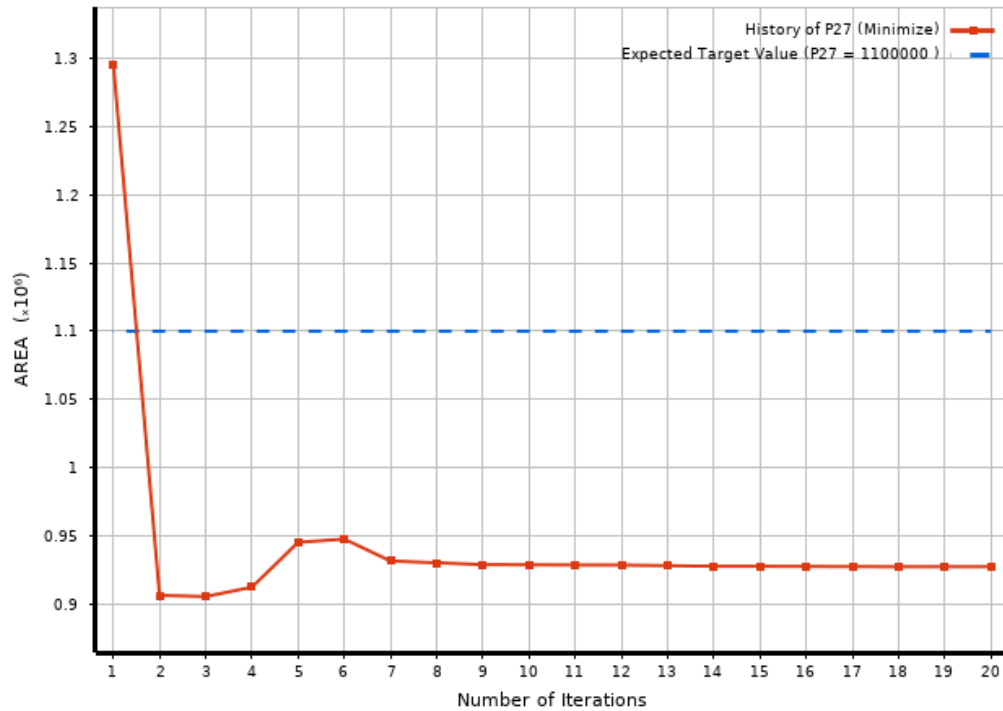
** All thickness values in mm



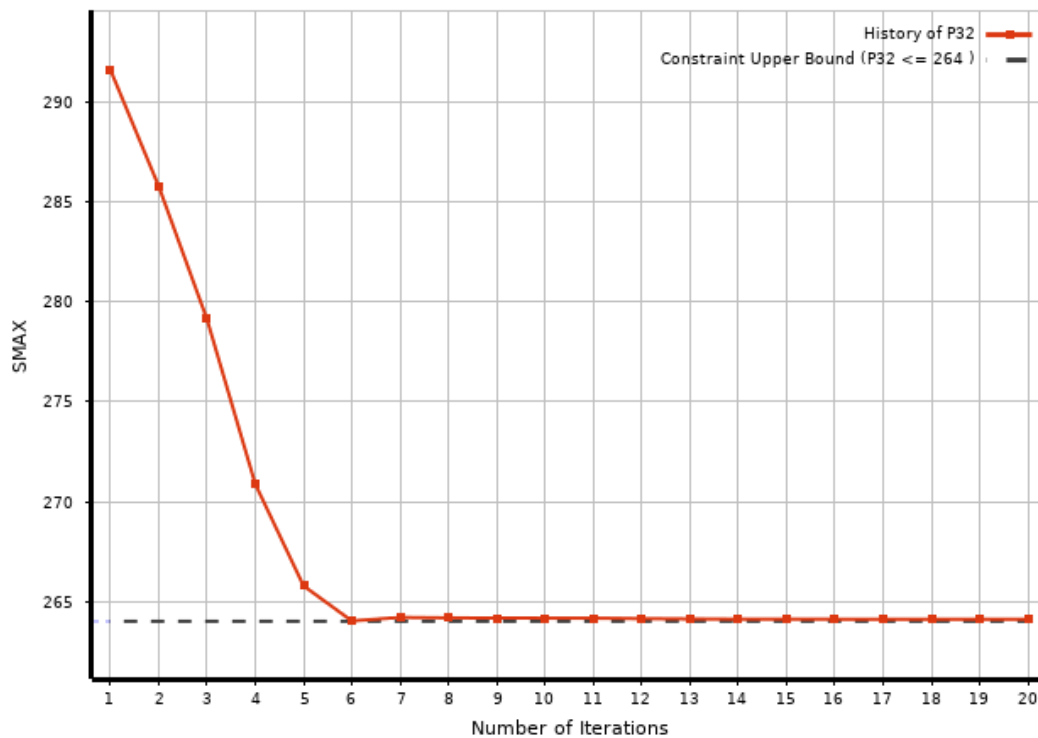
Σχήμα 5.34: Ιστόγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής των μεταβλητών σχεδίασης.

Παρατηρείται μείωση του βάρους του μοντέλου κατά 30.43%. Επιπλέον παρατηρείται, ότι όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, αύξηση του πάχους σε ορισμένες σταθμίδες, αυτό συμβαίνει διότι οι σταθμίδες αυτές ήταν που δέχονταν τις υψηλότερες τάσεις σε όλο το μοντέλο μας, Σχήμα 5.21.

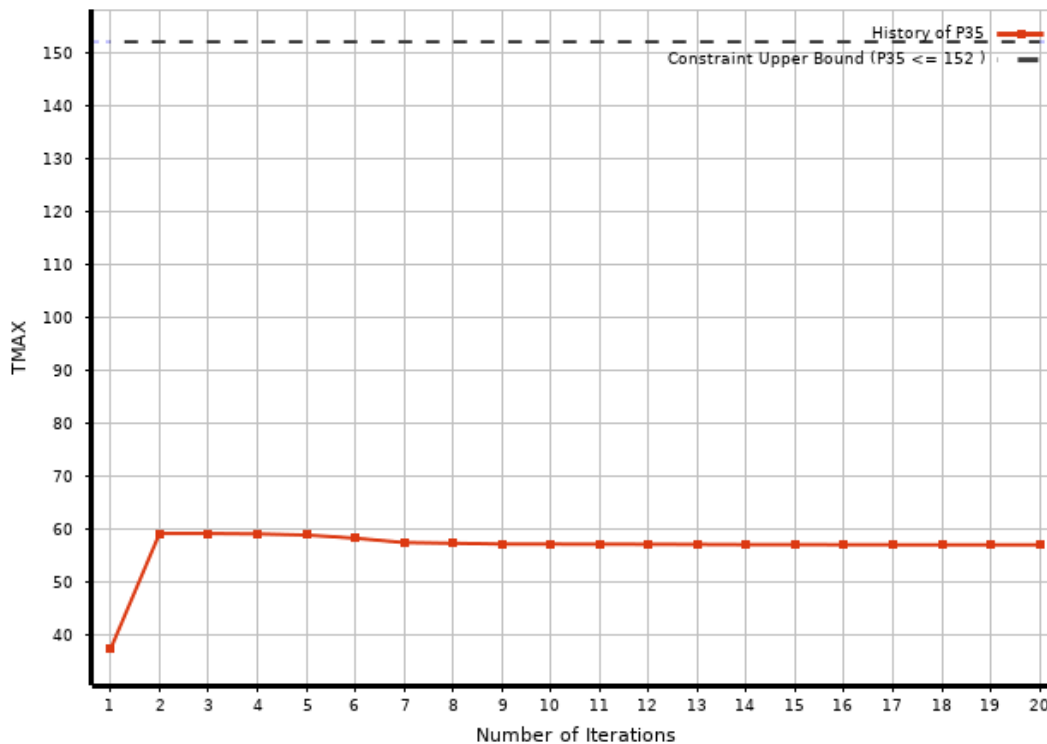
Τέλος παρουσιάζονται τα διαγράμματα που δείχνουν την μεταβολή καθ' όλη την διάρκεια της βελτιστοποίησης για την αντικειμενική συνάρτηση καθώς και για την μέγιστη ορθή και διατμητική τάση που αναπτύσσεται στο μοντελοποιημένο διτύθμενο.



Σχήμα 5.35: Μεταβολή τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (συνολικό εμβαδόν όλων των στοιχείων που απαρτίζουν το μοντελοποιημένο διτύθμενο), για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου NLPQL, για το μοντελοποιημένο διτύθμενο.



Σχήμα 5.36: Μεταβολή τιμής της μέγιστης τάσης Von Mises του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου NLPQL για το μοντελοποιημένο διτύθμενο.



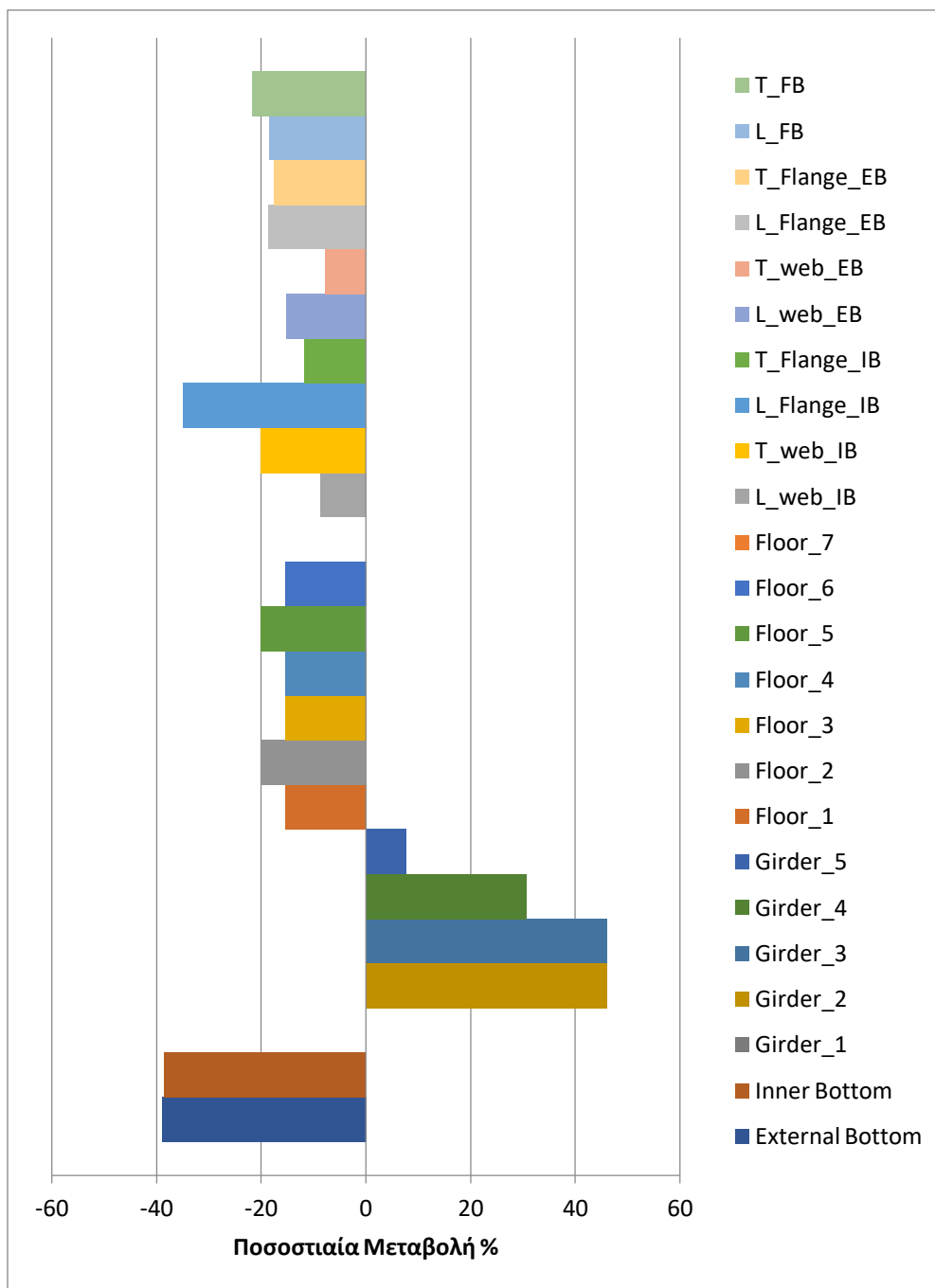
Σχήμα 5.37: Μεταβολή τιμής της μέγιστης διαμητρικής τάσης του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου NLPQL για το μοντελοποιημένο διτύθμενο.

- **MOGA**

Στην πρώτη στήλη του Πίνακα 5.11 παρουσιάζονται οι μεταβλητές εισόδου της βελτιστοποίησης, στην δεύτερη και τρίτη τα όρια αυτών μέσα στα οποία ο αλγόριθμος θα ψάξει να βρει τις βέλτιστες λύσεις. Στην τέταρτη και πέμπτη στήλη αναγράφονται τα ολικά καθώς και τα καθαρά (χωρίς την προσαύξηση λόγω διάβρωσης) πάχη αντίστοιχα των μεταβλητών εισόδου, τα οποία έχουν υπολογιστεί από την μέση τομή του πλοίου αναφοράς. Στην έκτη στήλη παρουσιάζονται τα πάχη των μεταβλητών εισόδου της βέλτιστης λύσης που υπολογίστηκαν έπειτα της βελτιστοποίησης. Στην τελευταία στήλη αναφέρεται η ποσοστιαία μεταβολή των μεταβλητών εισόδου, ο υπολογισμός έχει γίνει με τα καθαρά πάχη. Τέλος στην τελευταία γραμμή παρουσιάζεται το βάρος σε τόνους της ημιδιατομής της μέσης τομής καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή του.

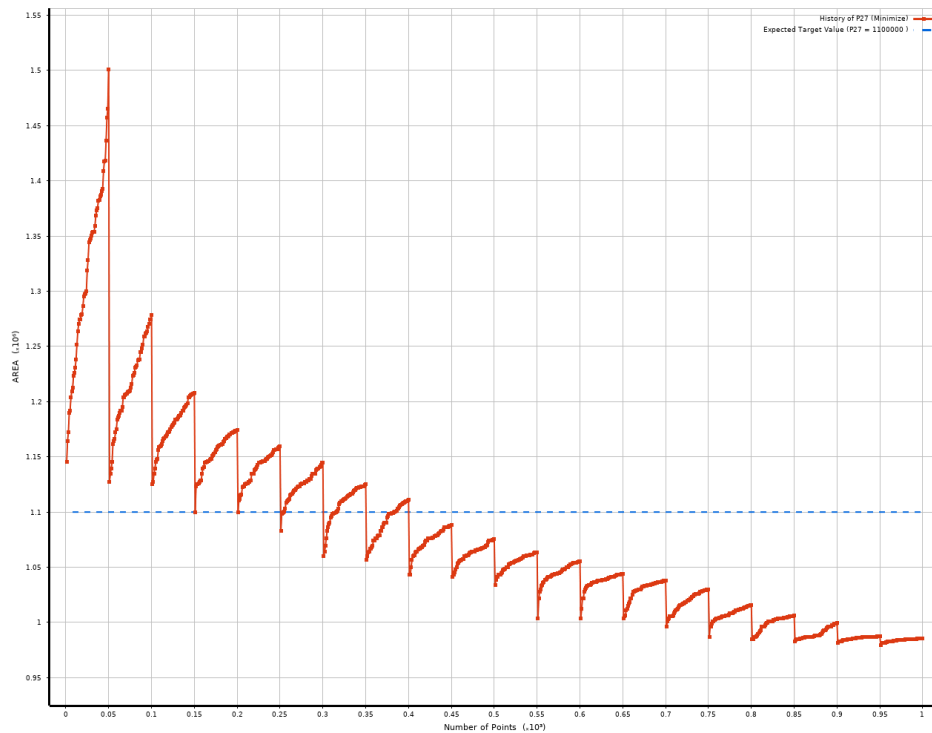
Πίνακας 5.11: Στοιχεία των μεταβλητών εισόδου της δεύτερης βελτιστοποίησης.

	Min*(net th.)	Max	Reference (Mid-ship plan)	Reference Net Thickness	Optimal Value(gross thick.)	% Difference from reference
External_B thick.	11	23	21	18	11(14)	-38.89
Inner_B thick.	11	25	25	19.5	12(17.5)	-38.46
1_Girder thick.	13	21	16	13	13(16)	0.00
2_Girder thick.	13	21	16	13	19(22)	+46.15
3_Girder thick.	13	21	16	13	19(22)	+46.15
4_Girder thick.	13	21	16	13	17(20)	+30.77
5_Girder thick.	13	21	16	13	14(17)	+7.69
1_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-15.38
2_Floor thick.	11	23	18	15	12(15)	-20.00
3_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-15.38
4_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-15.38
5_Floor thick.	11	23	18	15	12(15)	-20.00
6_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-15.38
7_Floor thick.	11	23	18	15	15(18)	0.00
L_web_IB	360	460	425	425	388	-8.71
T_web_IB	8	12	13	10	8(11)	-20.00
L_Flange_IB	107	170	175	175	114	-34.86
T_Flange_IB	14	19	20	17	15(18)	-11.76
L_web_EB	400	500	425	475	403	-15.16
T_web_EB	8	12	13	9	8.3(11.3)	-7.78
L_Flange_EB	120	150	175	150	122	-18.67
T_Flange_EB	14	19	20	17	14(17)	-17.65
L_FB	160	200	200	200	166	-18.50
T_FB	8	12	15	12	9.4(12.4)	-21.67
Min DB mass [tons]			261.14	212.56	160.05	-24.70

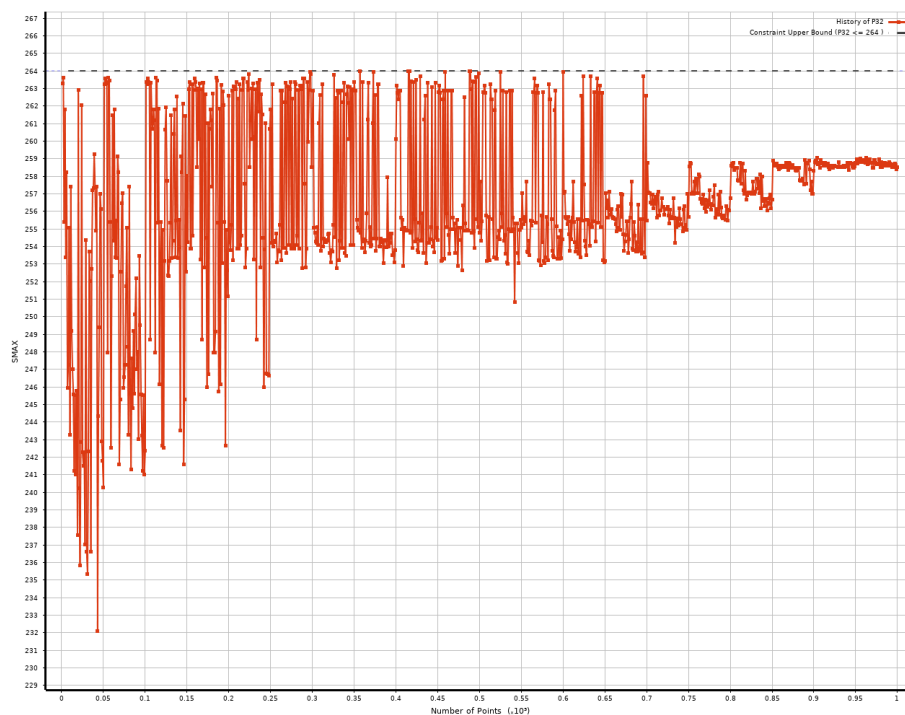


Σχήμα 5.38: Ιστόγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής των μεταβλητών σχεδίασης.

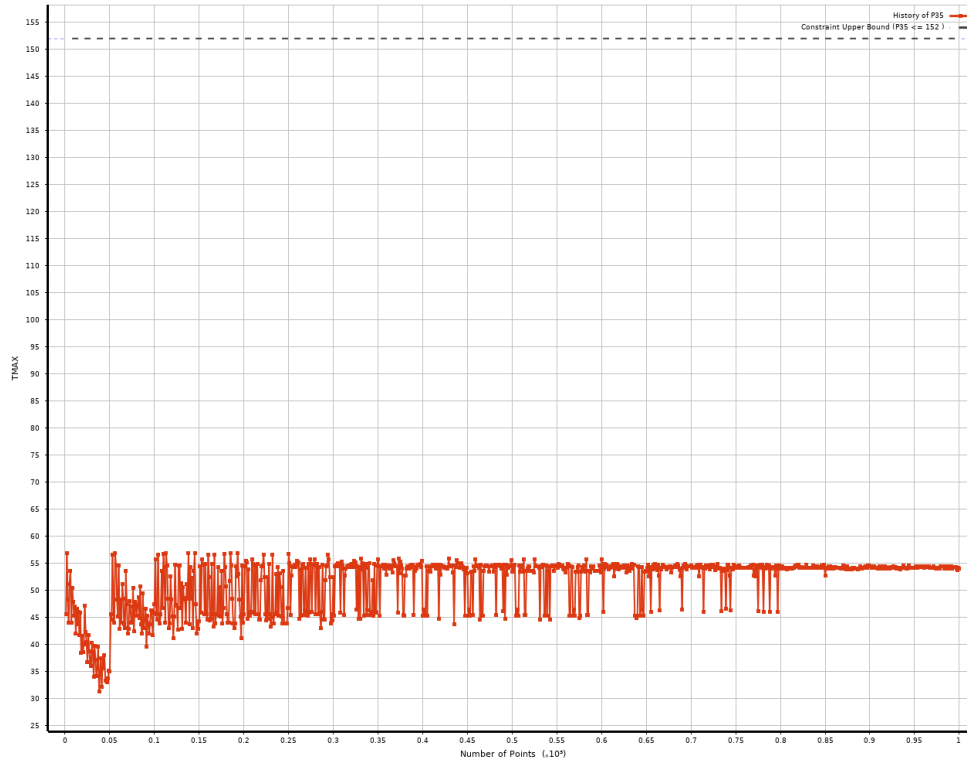
Παρατηρείται μείωση του βάρους του μοντέλου κατά 24.7%. Τέλος παρουσιάζονται τα διαγράμματα που δείχνουν την μεταβολή καθ' όλη την διάρκεια της βελτιστοποίησης για την αντικειμενική συνάρτηση καθώς και για την μέγιστη ορθή και διατμητική τάση που αναπτύσσεται στο μοντελοποιημένο διτύθμενο.



Σχήμα 5.39: Μεταβολή τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (συνολικό εμβαδόν όλων των στοιχείων που απαρτίζουν το μοντελοποιημένο διτύθμενο), για όλες τις επαναλήψεις (50 δείγματα ανά επανάληψη) του αλγορίθμου MOGA, για το μοντελοποιημένο διτύθμενο.

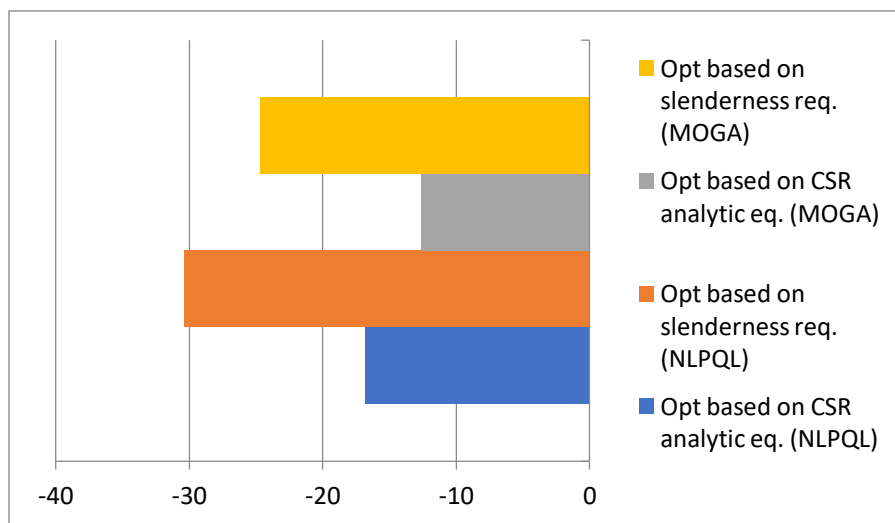


Σχήμα 5.40: Μεταβολή τιμής της μέγιστης τάσης Von Mises του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις (50 δείγματα ανά επανάληψη) του αλγορίθμου MOGA για το μοντελοποιημένο διτύθμενο.



Σχήμα 5.41: Μεταβολή τιμής της μέγιστης διατμητικής τάσης του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις (50 δείγματα ανά επανάληψη) του αλγορίθμου MOGA για το μοντελοποιημένο διτύθμενο.

Θα παρουσιαστεί συνοπτικά η μείωση του βάρους του μοντελοποιημένου διτύθμενου για κάθε μία από τις δύο βελτιστοποιήσεις που έγιναν με τους αλγορίθμους NLPQL & MOGA. Η ποσοστιαία μείωση φαίνεται στο ιστόγραμμα του Σχήματος 5.42.



Σχήμα 5.42: Ιστόγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής βάρους μοντελοποιημένου διτύθμενου.

Παρατηρείται ότι η βελτιστοποίηση που οι περιορισμοί είναι βασισμένοι στις απαιτήσεις λυγρότητας παράγει καλύτερα αποτελέσματα και για τους δύο αλγόριθμους. Η μείωση σε τόνους κάθε περίπτωσης είναι:

- Opt based on CSR analytic eq. (NLPQL) ---> **71.4 tons**
- Opt based on slenderness req. (NLPQL) ---> **129.4 tons**
- Opt based on CSR analytic eq. (MOGA) ---> **53.7 tons**
- Opt based on slenderness req. (MOGA) ---> **105.0 tons**

Είναι φανερό επομένως ότι με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης NLPQL λαμβάνονται καλύτερα αποτελέσματα, το οποία θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια.

5.5 Mars2000

Αφού προέκυψε το βελτιστοποιημένο μοντέλο από τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, μένει ακόμα να ελεγχθεί εάν η καινούργια μέση τομή, αντέχει και σε άλλες καταπονήσεις. Μέχρι τώρα έχουν ελεγχθεί με τους περιορισμούς που έχουν οριστεί ότι δεν υπάρχει υπέρβαση στην μέγιστη επιτρεπόμενη ορθή και διατμητική τάση, υπό συγκεκριμένες συνθήκες.

Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα **Mars2000**, από τον γαλλικό νηογνώμονα **Bureau Veritas**, σχεδιάζοντας την μέση τομή με τις διαστάσεις του διπύθμενου που έχουν προκύψει από τις δύο βελτιστοποιήσεις μας δίνεται η δυνατότητα να ελεγχθούν ακόμα μέσω του προγράμματος:

- Ultimate Strength
- Yield Check
- Buckling check

5.5.1 Παρουσίαση Mars 2000

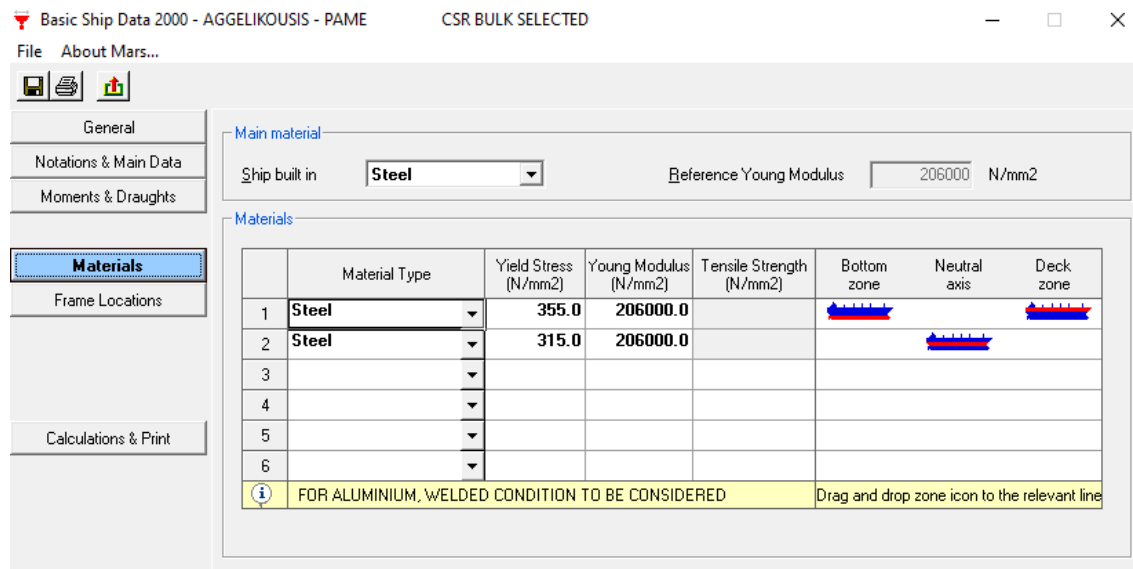
Υπάρχουν εξειδικευμένα προγράμματα που ασχολούνται με την αντοχή ενός πλοίου. Για να υπολογιστεί, λοιπόν, τη μέγιστη αντοχή σε διαμήκη κάμψη του συγκεκριμένου πλοίου επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα Mars 2000 το οποίο διατίθεται από τον οργανισμό Bureau Veritas. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι φτιαγμένο ώστε να ακολουθεί τους κανονισμούς του 2012, Common Structural Rules (CSR) Edition July 2012. Το πλοίο αναφοράς ακολουθεί τους κανονισμούς του 2012, το οποίο μας επιτρέπει τη χρήση του προγράμματος για την μελέτη αντοχής του. Για να πραγματοποιήσει το συγκεκριμένο πρόγραμμα υπολογισμούς απαιτεί από τον χρήστη την εισαγωγή στοιχείων της ημιδιατομής της μέσης τομής του πλοίου, αρχικά και άλλων τομών στη συνέχεια. Πιο συγκεκριμένα, είναι απαραίτητη η εισαγωγή των κύριων διαστάσεων, των ενισχυτικών, των ιδιοτήτων των υλικών κατασκευής και των ισαποστάσεων μεταξύ των ενισχυτικών καθώς και η κατάσταση φόρτωσης του αμπαριού. Αρχικά θα εισαχθούν οι κύριες διαστάσεις του πλοίου, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.

Εικόνα 5.1: Εισαγωγή στοιχείων στο Mars 2000 - Notations & Main Data.

Στην καρτέλα, Notations & Main Data, συμπληρώνονται οι βασικές διαστάσεις του πλοίου, Μήκος σχεδίασης (Scantling length), Πλάτος σχεδίασης (Breadth moulded), Συντελεστής γάστρας (Block coefficient), Ταχύτητα σχεδίασης (Maximum service speed). Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη ότι για την φόρτωση του χύδην φορτίου στο πλοίο χρησιμοποιούνται γερανοί, οι οποίοι φορτώνουν τις δεξαμενές, επομένως, θα πρέπει να εισαχθεί και η τιμή του Grab Notation, η οποία για το πλοίο μας είναι ίση με 25 tonnes.

Εικόνα 5.2: Εισαγωγή στοιχείων στο Mars 2000 - Moments & Draughts.

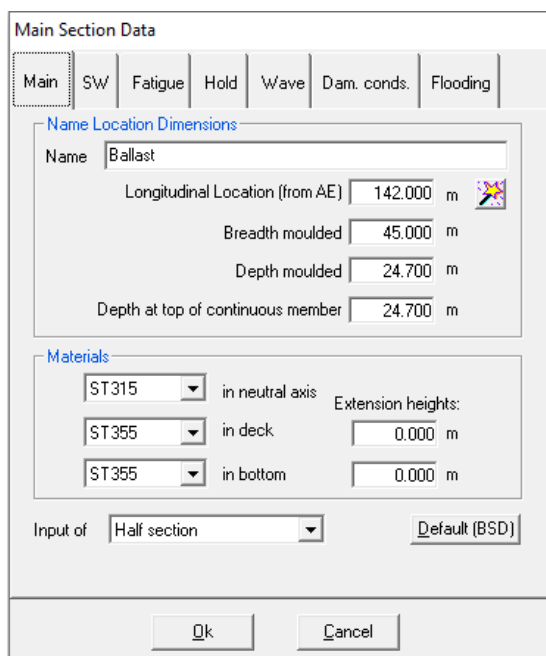
Στην τρίτη καρτέλα, Moments & Draughts, συμπληρώνονται η ροπή σε ήρεμο νερό για hogging και sagging condition (Still Water Bending Moments) και το βύθισμα σχεδίασης (Scantling draught).



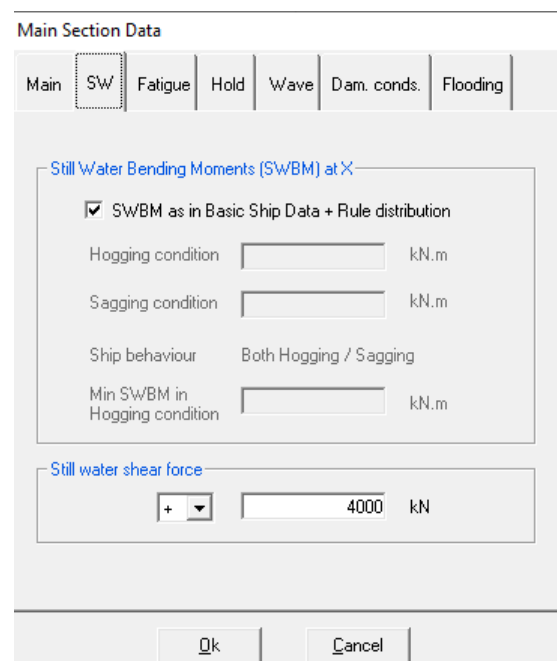
Εικόνα 5.3: Εισαγωγή στοιχείων στο Mars 2000 - Materials.

Στην τέταρτη καρτέλα, Materials, εισάγεται το υλικό που χρησιμοποιήθηκε, χάλυβας και στη συνέχεια ορίζεται η κατηγορία χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε στον πυθμένα, στον ουδέτερο άξονα και στο κατάστρωμα. Στον πυθμένα και στο κατάστρωμα χρησιμοποιήθηκε χάλυβα υψηλής αντοχής AH36, ενώ στον ουδέτερο άξονα χάλυβας AH32.

Στη συνέχεια πατάμε "create section" ώστε να σχεδιαστεί η μέση τομή και μετά "edit" στην τομή για να επεξεργαστεί. Θα μας εμφανίσει τις παρακάτω καρτέλες:



Εικόνα 5.4: Main Section Data - Main.



Εικόνα 5.5: Main Section Data - SW Bending Moments.

Main Section Data

Main SW **Fatigue** Hold Wave Dam. conds. Flooding

Bending

Weld configuration

Grind welds Other cases

Lambda

Mean weld toe angle deg

Still Water Bending Moments (SWBM) at X

Rule default values User input values

Full load homogeneous kN.m Hogging Sagging

Normal ballast kN.m Hogging Sagging

Heavy ballast kN.m Hogging Sagging

Full load alternate kN.m Hogging Sagging

Εικόνα 5.6: Main Section Data - Fatigue.

Main Section Data

Main SW Fatigue **Hold** Wave Dam. conds. Flooding

Dimensions

Hold volume excluding hatch coaming Vh (m3)

Volume enclosed by the hatch coaming (m3)

Transverse stool volume (m3)

Does the hold have a cylindrical shape? Yes No

Εικόνα 5.7: Main Section Data -Hold.

Main Section Data

Main SW Fatigue Hold **Wave** Dam. conds. Flooding

Rule Vertical Wave Bending Moments

Hogging condition kN.m

Sagging condition kN.m

Εικόνα 5.8: Main Section Data - Wave.

Στην εικόνα 5.4 επιλέγοντας την εντολή "Default (BSD)", έτσι ώστε να πάρει αυτόματα τα βασικά στοιχεία του πλοίου που συμπληρώθηκαν στην ενότητα Basic Ship Data. Στη συνέχεια επιλέγεται η καρτέλα "SW" και συμπληρώνεται η τιμή "Still Water Shear Force". Στην επόμενη καρτέλα επιλέγεται το "Rule default values" και υπολογίζει αυτόματα τις ροπές σε ήρεμο νερό κατά hogging και sagging στις καταστάσεις φόρτωσης σύμφωνα με τους κανονισμούς. Στην εικόνα 5.7 συμπληρώνονται οι διαστάσεις της δεξαμενής φορτίου και στην επόμενη 5.8 επιλέγουμε "Rule Vertical Wave Bending Moments" για να υπολογίσει και τις ροπές λόγω κυματισμού αυτόματα σύμφωνα με τους κανονισμούς.

Έπειτα από την εισαγωγή όλων των προηγούμενων στοιχείων, θα πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός της ημιδιατομής της μέσης τομής. Αρχικά θα γίνει ο σχεδιασμός της με τις διαστάσεις που έχει το πατρικό πλοίο και ακόμα και με τις βελτιστοποιημένες διαστάσεις που προέκυψαν από τις δύο αναλύσεις βελτιστοποίησης. Έτσι έχει προκύψει η παρακάτω μέση τομή που φαίνεται στην εικόνα. Επιπροσθέτως έχει θεωρηθεί ότι το αμπάρι της μέσης τομής είναι πλήρως φορτωμένο και επίσης κατά τον σχεδιασμό δεν έχει ληφθεί υπόψιν το hatch cover στο κατάστρωμα. Με την σχεδίαση και την φόρτωση αυτή έχει θεωρηθεί ένα αρκετά κακό σενάριο αντοχής της μέσης τομής.

5.5.2 Αποτελέσματα Mars 2000

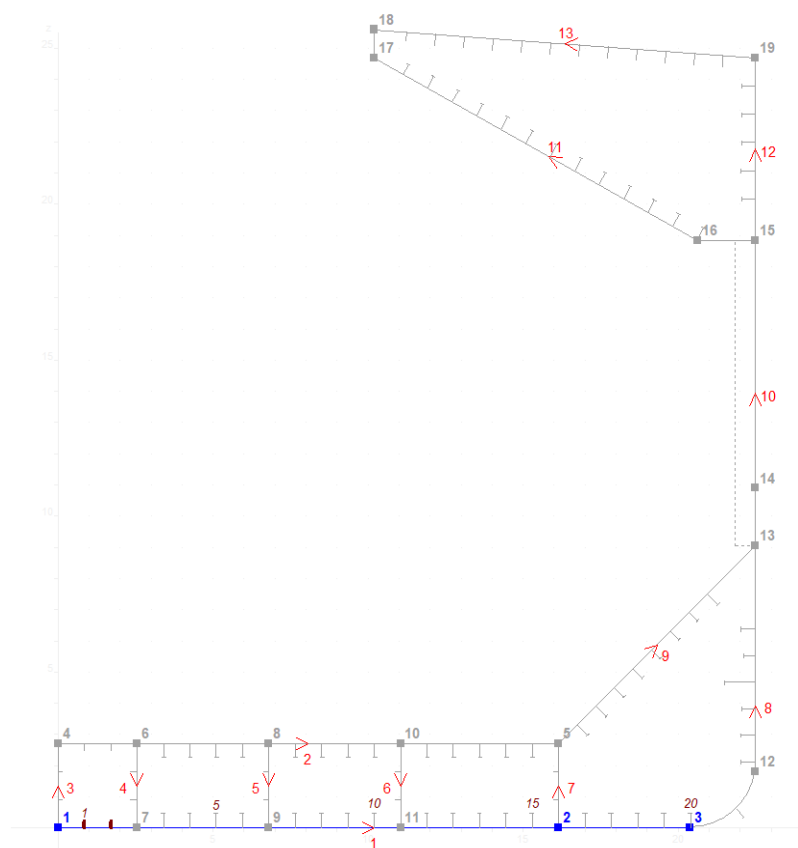
Θα παρουσιαστούν εδώ τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει. Συνολικά θα παρουσιαστούν 3 διαφορετικές περιπτώσεις:

- Πλοίο Αναφοράς
- Opt CSR analytic equation
- Opt slenderness requirements

Η πρώτη περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί ως μέτρο σύγκρισης για να γίνει αντιληπτό πως συμπεριφέρεται η μέση τομή του πλοίου αναφοράς. Στις άλλες δύο περιπτώσεις εάν υπάρχει κάποια υπέρβαση των ορίων της αντοχής της μέσης τομής τότε θα αλλαχθούν οι απαραίτητες διαστάσεις ώστε να είναι πάλι εντός των ορίων αυτών.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα εξής κριτήρια αντοχής και για τις τρεις περιπτώσεις:

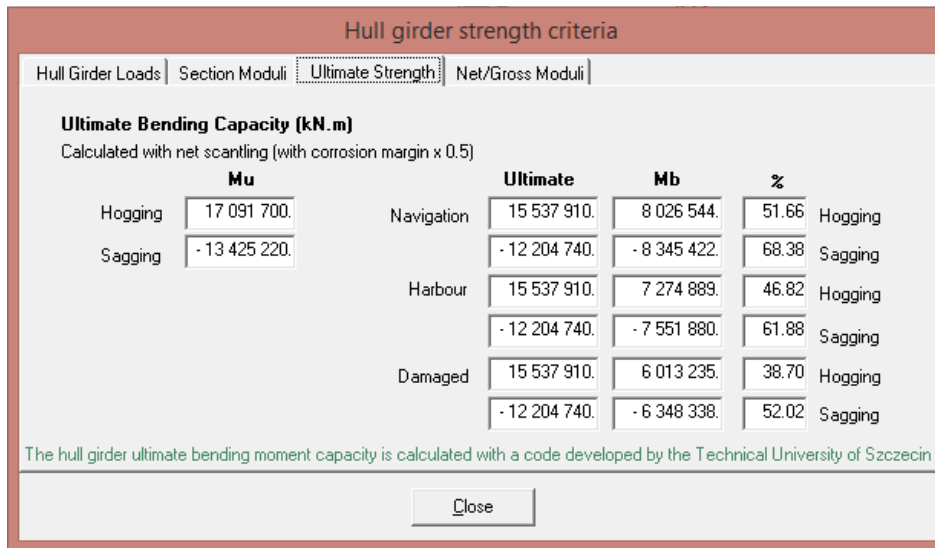
- Ultimate Strength
- Yield Check
- Buckling Check



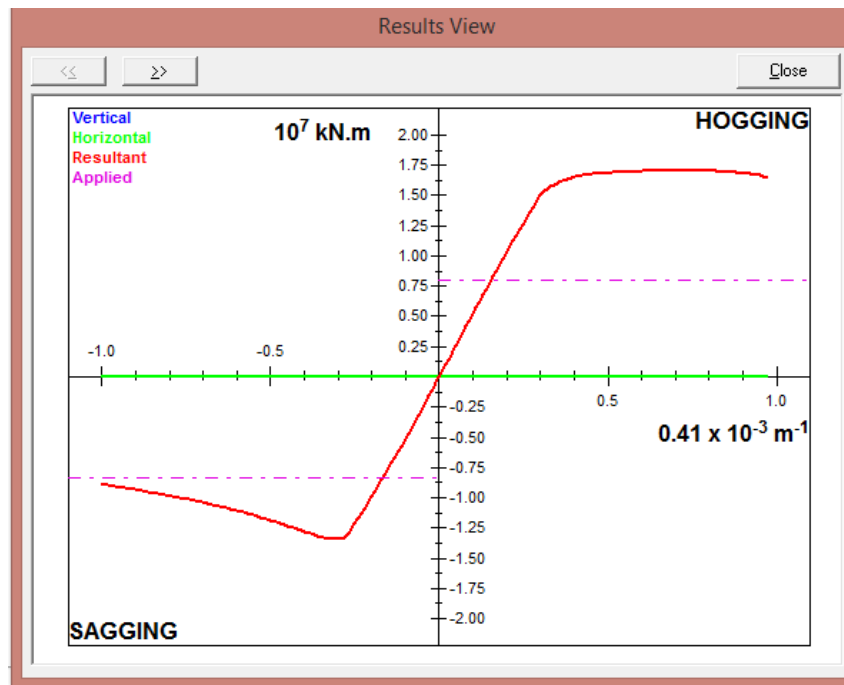
Σχήμα 5.43: Ημιδιατομή μέσης τομής.

5.5.2.1 Αποτελέσματα Mars 2000 πλοίου αναφοράς

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα στοιχεία που προέκυψαν από το πρόγραμμα Mars2000 με βάση τα οποία θα γίνει αντιληπτό εάν το πλοίο αναφοράς και η μέση τομή του ικανοποιούν τα κριτήρια αντοχής. Αρχικά στα Σχήματα 5.44 και 5.45 φαίνεται η μέγιστη αντοχή της γάστρας. Η εκτίμηση της μέγιστης αντοχής της γάστρας γίνεται για τις περιοχές των δεξαμενών φόρτωσης και αυτή του μηχανοστασίου, θεωρώντας το πλοίο σαν δοκάρι. Κατά την ανάλυση, ελέγχεται κατά πόσο ικανοποιείται η φέρουσα καμπτική ικανότητα του πλοίου σε κάμψη (Hogging & Sagging) για τις καταστάσεις Seagoing/Navigation, Harbour/Sheltered water και Flooded/Damaged, έτσι ώστε οι κατασκευές του πλοίου να είναι άθικτες (Part1/Chap5/Sec2).



Σχήμα 5.44: Μέγιστη διαμήκης αντοχή.



Σχήμα 5.45: Διάγραμμα διαμήκης αντοχής.

Μέση τομή αποτελέσματα Mars 2000 για τα ελάσματα του διπύθμενου

Θα παρουσιαστούν οι τιμές των ορθών και διατμητικών τάσεων λόγω κάμψης, καθώς και οι ορθές και διατμητικές τάσεις λυγισμού για τα ελάσματα του διπύθμενου του πλοίου αναφοράς που προκύπτουν από το πρόγραμμα Mars2000. Οι Πίνακες 5.12 έως 5.17 περιέχουν τα απαραίτητα στοιχεία που απαιτούνται για τον έλεγχο των κριτηρίων διαρροής και λυγισμού.

Πίνακας 5.12: Πραγματικές τιμές και τιμές κανονισμών ορθών τάσεων λυγισμού, διατμητικών τάσεων λυγισμού και του συντελεστή λυγισμού των ελασμάτων του εξωτερικού πυθμένα.

	Ορθές Τάσεις Λυγισμού (Sig. Buckling) N/mm ²		Διατμητικές Τάσεις Λυγισμού (Tau. Buckling) N/mm ²		Bu. Comb. (Ratio)	
	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)
Strake 1	-119.26	-323.59	2.36	204.96	0.19	1.00
Strake 2	-119.26	-305.59	8.71	204.96	0.23	1.00
Strake 3	-119.26	-286.44	12.48	204.96	0.29	1.00
Strake 4	-119.26	-279.80	18.57	204.96	0.31	1.00

Πίνακας 5.13: Πραγματικές τιμές και τιμές κανονισμών ορθών τάσεων κάμψης, διατμητικών τάσεων κάμψης των ελασμάτων του εξωτερικού πυθμένα.

	Ορθές Τάσεις Κάμψης (HGS Bend.) N/mm ²		Διατμητικές Τάσεις Κάμψης (HGS Tau) N/mm ²	
	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)
Strake 1	123.64	263.89	2.74	166.67
Strake 2	123.64	263.89	8.58	166.67
Strake 3	123.64	263.89	12.52	166.67
Strake 4	123.64	263.89	18.94	166.67

Πίνακας 5.14: Πραγματικές τιμές και τιμές κανονισμών ορθών τάσεων λυγισμού, διατμητικών τάσεων λυγισμού και του συντελεστή λυγισμού των ελασμάτων του εξωτερικού πυθμένα.

	Ορθές Τάσεις Λυγισμού (Sig. Buckling) N/mm ²		Διατμητικές Τάσεις Λυγισμού (Tau. Buckling) N/mm ²		Bu. Comb. (Ratio)	
	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)
Strake 5	-89.78	-286.44	20.03	204.96	0.20	1.00
Strake 6	-89.78	-323.59	19.40	204.96	0.12	1.00

Πίνακας 5.15: Πραγματικές τιμές και τιμές κανονισμών ορθών τάσεων κάμψης, διατμητικών τάσεων κάμψης των ελασμάτων του εξωτερικού πυθμένα.

	Ορθές Τάσεις Κάμψης (HGS Bend.) N/mm ²		Διατμητικές Τάσεις Κάμψης (HGS Tau) N/mm ²	
	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)
Strake 5	93.08	263.89	20.57	166.67
Strake 6	93.08	263.89	18.29	166.67

Πίνακας 5.16: Πραγματικές τιμές και τιμές κανονισμών ορθών τάσεων λυγισμού, διατμητικών τάσεων λυγισμού και του συντελεστή λυγισμού των ελασμάτων των σταθμίδων.

	Ορθές Τάσεις Λυγισμού (Sig. Buckling) N/mm ²		Διατμητικές Τάσεις Λυγισμού (Tau. Buckling) N/mm ²		Bu. Comb. (Ratio)	
	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)
Strake 7	-119.26	-239.48	1.41	183.81	0.43	1.00
Strake 8	-119.26	-274.27	1.75	204.96	0.32	1.00
Strake 9	-119.26	-232.17	2.44	177.00	0.45	1.00
Strake 10	-119.26	-232.17	3.64	177.00	0.46	1.00
Strake 11	-119.26	-253.76	8.61	197.42	0.39	1.00

Πίνακας 5.17: Πραγματικές τιμές και τιμές κανονισμών ορθών τάσεων κάμψης, διατμητικών τάσεων κάμψης των ελασμάτων των σταθμίδων.

	Ορθές Τάσεις Κάμψης (HGS Bend.) N/mm ²		Διατμητικές Τάσεις Κάμψης (HGS Tau) N/mm ²	
	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)
Strake 7	123.64	263.89	1.72	166.67
Strake 8	123.64	263.89	2.06	166.67
Strake 9	123.64	263.89	2.75	166.67
Strake 10	123.64	263.89	3.95	166.67
Strake 11	123.64	263.89	8.92	166.67

Μέση τομή αποτελέσματα Mars 2000 για τα ενισχυτικά του διπύθμενου.

Θα παρουσιαστούν οι τιμές των ορθών τάσεων λόγω κάμψης, καθώς και οι τάσεις πλευρικού λυγισμού για τα ενισχυτικά του διπύθμενου του πλοίου αναφοράς που προκύπτουν από το πρόγραμμα Mars2000. Οι Πίνακες 5.18 έως 5.20 περιέχουν τα απαραίτητα στοιχεία που απαιτούνται για τον έλεγχο των κριτηρίων διαρροής και λυγισμού.

Πίνακας 5.18: Πραγματικές τιμές και τιμές κανονισμών ορθών τάσεων κάμψης, τάσεων πλευρικού λυγισμού των ενισχυτικών του εξωτερικού πυθμένα.

	Τύπος ενισχυτικών	Διαστάσεις Ενισχυτικών		Ορθές Τάσεις Κάμψης (HGS Bend.) N/mm ²		Πλευρικός λυγισμός (Lat. Buckling) N/mm ²	
		Web (mm)	Flange (mm)	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)
Stiffener 1	Flat bar	230x20	-	123.64	263.89	204.74	355.00
Stiffener 2	Flat bar	230x20	-	123.64	263.89	205.23	355.00
Stiffener 3	Tee	475x12	150x20	123.64	263.89	143.36	355.00
Stiffener 4	Tee	475x12	150x20	123.64	263.89	143.50	355.00
Stiffener 5	Tee	475x12	150x20	123.64	263.89	143.63	355.00
Stiffener 6	Tee	475x12	150x20	123.64	263.89	143.77	355.00
Stiffener 7	Tee	475x12	150x20	123.64	263.89	145.72	355.00
Stiffener 8	Tee	475x12	150x20	123.64	263.89	145.87	355.00
Stiffener 9	Tee	475x12	150x20	123.64	263.89	146.01	355.00
Stiffener 10	Tee	475x12	150x20	123.64	263.89	146.79	355.00
Stiffener 11	Tee	475x12	150x20	123.64	263.89	147.09	355.00
Stiffener 12	Tee	475x12	150x20	123.64	263.89	147.24	355.00
Stiffener 13	Tee	475x12	150x20	123.64	263.89	147.39	355.00
Stiffener 14	Tee	475x12	150x20	123.64	263.89	147.54	355.00
Stiffener 15	Tee	475x12	150x20	123.64	263.89	147.68	355.00

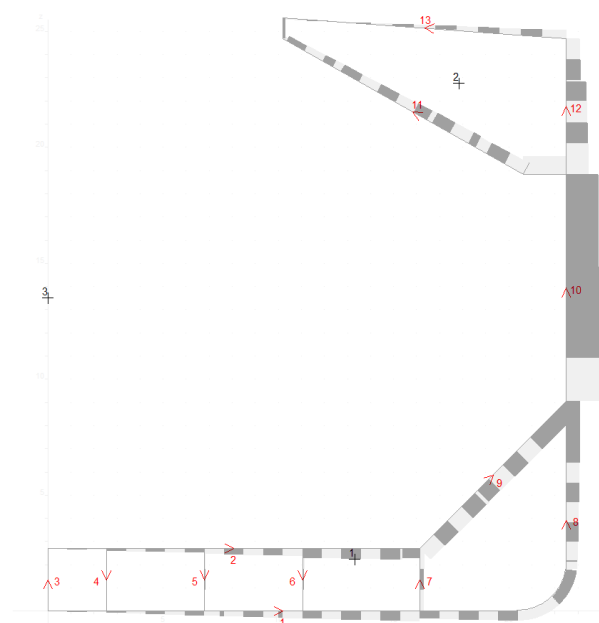
Πίνακας 5.19: Πραγματικές τιμές και τιμές κανονισμών ορθών τάσεων κάμψης, τάσεων πλευρικού λυγισμού των ενισχυτικών του εσωτερικού πυθμένα.

	Τύπος ενισχυτικών	Διαστάσεις Ενισχυτικών		Ορθές Τάσεις Κάμψης (HGS Bend.) N/mm ²		Πλευρικός λυγισμός (Lat. Buckling) N/mm ²	
		Web (mm)	Flange (mm)	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)
Stiffener 1	Flat bar	250x20	-	93.08	263.89	242.58	355.00
Stiffener 2	Flat bar	250x20	-	93.08	263.89	242.58	355.00
Stiffener 3	Tee	425x12	150x15	93.08	263.89	157.43	355.00
Stiffener 4	Tee	425x12	150x15	93.08	263.89	157.43	355.00
Stiffener 5	Tee	425x12	150x15	93.08	263.89	157.43	355.00
Stiffener 6	Tee	425x12	150x15	93.08	263.89	157.43	355.00
Stiffener 7	Tee	425x12	150x15	93.08	263.89	157.43	355.00
Stiffener 8	Tee	425x12	150x15	93.08	263.89	157.43	355.00
Stiffener 9	Tee	425x12	150x15	93.08	263.89	157.43	355.00
Stiffener 10	Tee	425x12	150x15	93.08	263.89	157.43	355.00
Stiffener 11	Tee	425x12	150x15	93.08	263.89	157.43	355.00
Stiffener 12	Tee	425x12	150x15	93.08	263.89	157.43	355.00
Stiffener 13	Tee	425x12	150x15	93.08	263.89	157.43	355.00
Stiffener 14	Tee	425x12	150x15	93.08	263.89	157.43	355.00
Stiffener 15	Tee	425x12	150x15	93.08	263.89	157.43	355.00

Πίνακας 5.20: Πραγματικές τιμές και τιμές κανονισμών ορθών τάσεων κάμψης, τάσεων πλευρικού λυγισμού των ενισχυτικών των σταθμίδων.

	Τύπος ενισχυτικών	Διαστάσεις Ενισχυτικών		Ορθές Τάσεις Κάμψης (HGS Bend.) N/mm ²		Πλευρικός λυγισμός (Lat. Buckling) N/mm ²	
		Web (mm)	Flange (mm)	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)
Stiffener 1	Flat bar	150x12	-	113.46	263.89	0.00	355.00
Stiffener 2	Flat bar	150x12	-	103.27	263.89	0.00	355.00
Stiffener 3	Flat bar	250x23	-	113.46	263.89	131.65	355.00
Stiffener 4	Flat bar	250x23	-	103.27	263.89	119.48	355.00
Stiffener 5	Flat bar	200x15	-	113.46	263.89	160.82	355.00
Stiffener 6	Flat bar	200x15	-	103.27	263.89	144.23	355.00
Stiffener 7	Flat bar	200x15	-	113.46	263.89	160.82	355.00
Stiffener 8	Flat bar	200x15	-	103.27	263.89	144.23	355.00
Stiffener 9	Flat bar	200x15	-	113.46	263.89	165.02	355.00
Stiffener 10	Flat bar	200x15	-	103.27	263.89	147.76	355.00

Τέλος παρουσιάζεται ποιοτικά η κατανομή της διατμητικής τάσης στην μέση τομή.



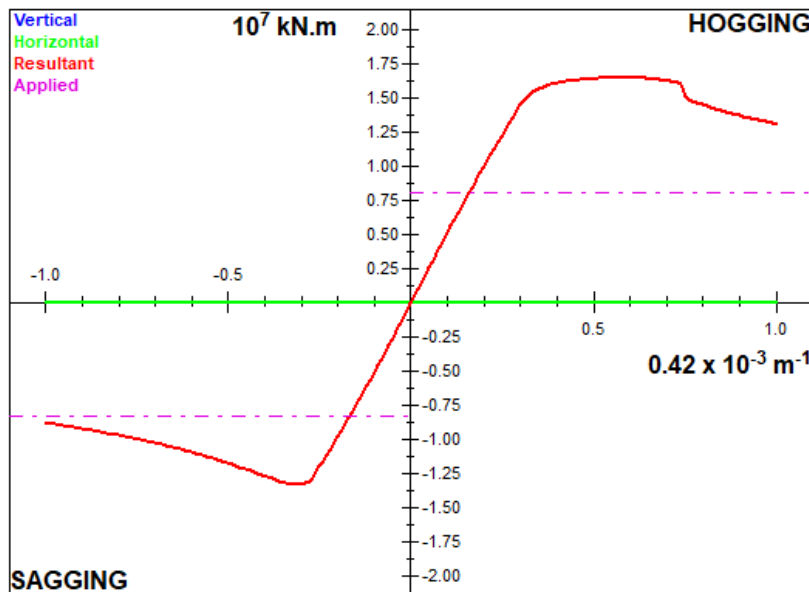
Σχήμα 5.46: Κατανομή Διατμητικής τάσης στην ημιδιατομή της μέσης τομής του πλοίου αναφοράς.

5.5.2.2 Αποτελέσματα Mars 2000 Opt CSR analytic equation

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα στοιχεία που προέκυψαν από το πρόγραμμα Mars2000 με βάση τα οποία θα γίνει αντιληπτό εάν το πλοίο και η μέση τομή, με τις διαστάσεις που προέκυψαν από την βελτιστοποίηση, ικανοποιούν τα κριτήρια αντοχής. Αρχικά στα Σχήματα 5.47 και 5.48 φαίνεται η μέγιστη αντοχή της γάστρας. Παρατηρείται μείωση της μέγιστης καμπτικής ικανότητας και για Hogging και για Sagging. Οι καμπτικές ροπές (Hogging & Sagging) που αναπτύσσονται για τις τρεις καταστάσεις που φαίνονται στο Σχήμα 5.43 παραμένουν οι ίδιες με αυτές του πλοίου αναφοράς. Επομένως αυξάνεται το ποσοστό εκμετάλλευσης της καμπτικής ροπής.

Hull girder strength criteria					
Hull Girder Loads		Section Moduli	Ultimate Strength	Net/Gross Moduli	
Ultimate Bending Capacity (kN.m)					
Calculated with net scantling (with corrosion margin x 0.5)					
	Mu		Ultimate	Mb	%
Hogging	16 544 380.	Navigation	15 040 350.	8 026 544.	53.37
Sagging	- 13 320 820.	Harbour	- 12 109 840.	- 8 345 422.	68.91
		Damaged	15 040 350.	7 274 889.	48.37
			- 12 109 840.	- 7 551 880.	62.36
			15 040 350.	6 013 235.	39.98
			- 12 109 840.	- 6 348 338.	52.42
The hull girder ultimate bending moment capacity is calculated with a code developed by the Technical University of Szczecin					
Close					

Σχήμα 5.47: Μέγιστη διαμήκης αντοχή.



Σχήμα 5.48: Διάγραμμα διαμήκης αντοχής.

Μέση τομή αποτελέσματα Mars 2000 για τα ελάσματα του διπύθμενου

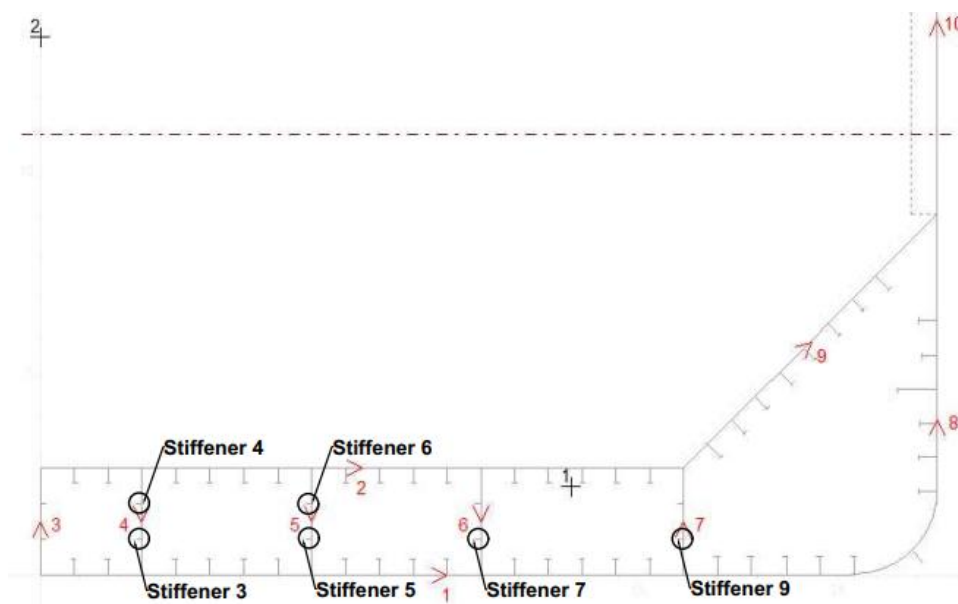
Θα παρουσιαστούν μόνο τα ελάσματα και τα ενισχυτικά που υπερβαίνουν οι τάσεις τους τα επιτρεπόμενα όρια. Στον εσωτερικό και εξωτερικό πυθμένα οι τάσεις που αναπτύσσονται στα ελάσματα είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων.

Μέση τομή αποτελέσματα Mars 2000 για τα ενισχυτικά του διπύθμενου.

Θα παρουσιαστούν οι τιμές των ορθών τάσεων λόγω κάμψης, καθώς και οι τάσεις πλευρικού λυγισμού των ενισχυτικών, που δεν πληρούν τα κριτήρια, του βελτιστοποιημένου διπύθμενου, που προκύπτουν από το πρόγραμμα Mars2000. Ο Πίνακας 5.21 περιέχει τα απαραίτητα στοιχεία που απαιτούνται για τον έλεγχο των κριτηρίων διαρροής και λυγισμού.

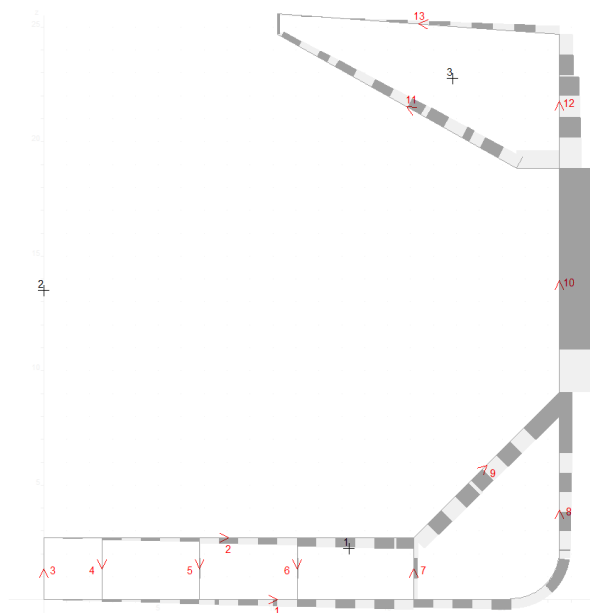
Πίνακας 5.21: Πραγματικές τιμές και τιμές κανονισμών ορθών τάσεων κάμψης, τάσεων πλευρικού λυγισμού των ενισχυτικών του διτύθμενου που υπερβαίνουν τα όρια.

	Τύπος ενισχυτικών	Διαστάσεις Ενισχυτικών		Ορθές Τάσεις Κάμψης (HGS Bend.) N/mm ²		Πλευρικός λυγισμός (Lat. Buckling) N/mm ²	
		Web (mm)	Flange (mm)	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)
Stiffener 3	Flat bar	160x11	-	120.19	263.89	771.90	355.00
Stiffener 4	Flat bar	160x11	-	109.69	263.89	462.49	355.00
Stiffener 5	Flat bar	160x11	-	120.19	263.89	1388.62	355.00
Stiffener 6	Flat bar	160x11	-	109.69	263.89	613.04	355.00
Stiffener 7	Flat bar	160x11	-	120.19	263.89	469.30	355.00
Stiffener 9	Flat bar	160x11	-	120.19	263.89	469.30	355.00



Σχήμα 5.49: Επισήμανση ενισχυτικών που υπερβαίνουν τις επιτρεπόμενες τάσεις.

Τέλος παρουσιάζεται ποιοτικά η κατανομή της διατμητικής τάσης στην μέση τομή.



Σχήμα 5.50: Κατανομή Διατμητικής τάσης στην ημιδιατομή της μέσης τομής.

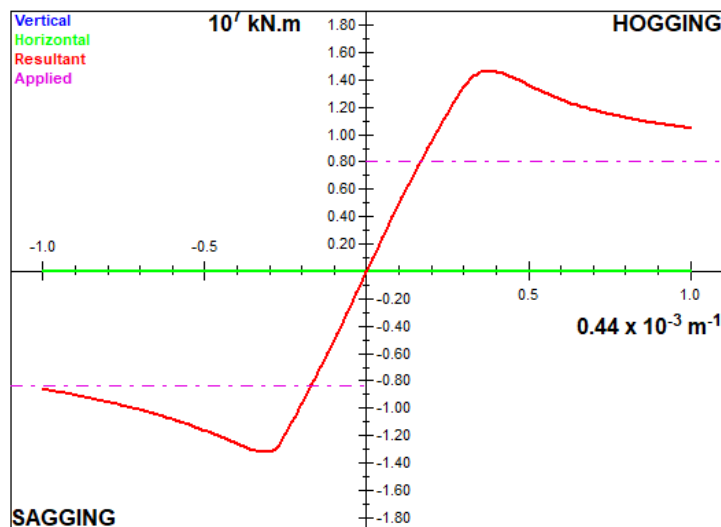
5.5.2.3 Αποτελέσματα Mars 2000 Opt slenderness requirements

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα στοιχεία που προέκυψαν από το πρόγραμμα Mars2000 με βάση τα οποία θα γίνει αντιληπτό εάν το πλοίο και η μέση τομή, με τις διαστάσεις που προέκυψαν από την βελτιστοποίηση, ικανοποιούν τα κριτήρια αντοχής. Αρχικά στα Σχήματα 5.51 και 5.52 φαίνεται η μέγιστη αντοχή της γάστρας. Παρατηρείται μείωση της μέγιστης καμπτικής ικανότητας και για Hogging και για Sagging, μεγαλύτερη από αυτή της προηγούμενης βελτιστοποίησης, που οφείλεται στην μεγαλύτερη μείωση των παχών των ελασμάτων. Οι καμπτικές ροπές (Hogging & Sagging) που αναπτύσσονται για τις τρεις καταστάσεις που φαίνονται στο Σχήμα 5.51 παραμένουν οι ίδιες με αυτές του πλοίου αναφοράς. Επομένως αυξάνεται το ποσοστό εκμετάλλευσης της καμπτικής ροπής.

Hull girder strength criteria							
Hull Girder Loads		Section Moduli		Ultimate Strength		Net/Gross Moduli	
Ultimate Bending Capacity (kN.m)						Calculated with net scantling (with corrosion margin x 0.5)	
	Mu		Ultimate	Mb	%		
Hogging	14 553 480.	Navigation	13 230 440.	8 026 544.	60.67	Hogging	
Sagging	- 13 216 040.		- 12 014 580.	- 8 345 422.	69.46	Sagging	
		Harbour	13 230 440.	7 274 889.	54.99	Hogging	
			- 12 014 580.	- 7 551 880.	62.86	Sagging	
		Damaged	13 230 440.	6 013 235.	45.45	Hogging	
			- 12 014 580.	- 6 348 338.	52.84	Sagging	

The hull girder ultimate bending moment capacity is calculated with a code developed by the Technical University of Szczecin

Σχήμα 5.51: Μέγιστη διαμήκης αντοχή.



Σχήμα 5.52: Διάγραμμα διαμήκης αντοχής.

Μέση τομή αποτελέσματα Mars 2000 για τα ελάσματα του διπύθμενου

Θα παρουσιαστούν μόνο τα ελάσματα και τα ενισχυτικά που υπερβαίνουν οι τάσεις τους τα επιτρεπόμενα όρια.

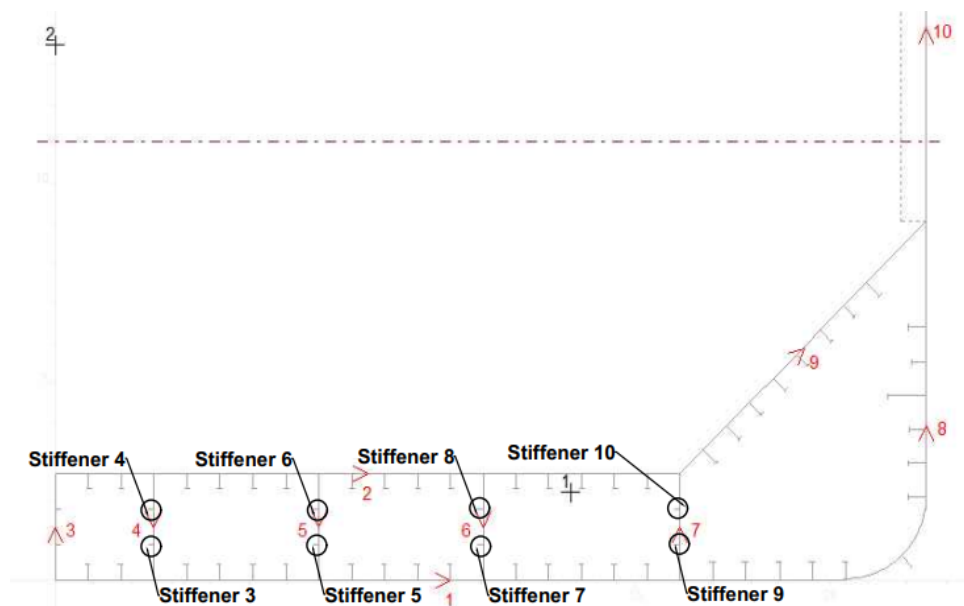
Στον εσωτερικό και εξωτερικό πυθμένα οι τάσεις που αναπτύσσονται στα ελάσματα είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων.

Μέση τομή αποτελέσματα Mars 2000 για τα ενισχυτικά του διπύθμενου.

Θα παρουσιαστούν οι τιμές των ορθών τάσεων λόγω κάμψης, καθώς και οι τάσεις πλευρικού λυγισμού των ενισχυτικών, που δεν πληρούν τα κριτήρια, του βελτιστοποιημένου διπύθμενου, που προκύπτουν από το πρόγραμμα Mars2000. Ο Πίνακας 5.22 περιέχει τα απαραίτητα στοιχεία που απαιτούνται για τον έλεγχο των κριτηρίων διαρροής και λυγισμού.

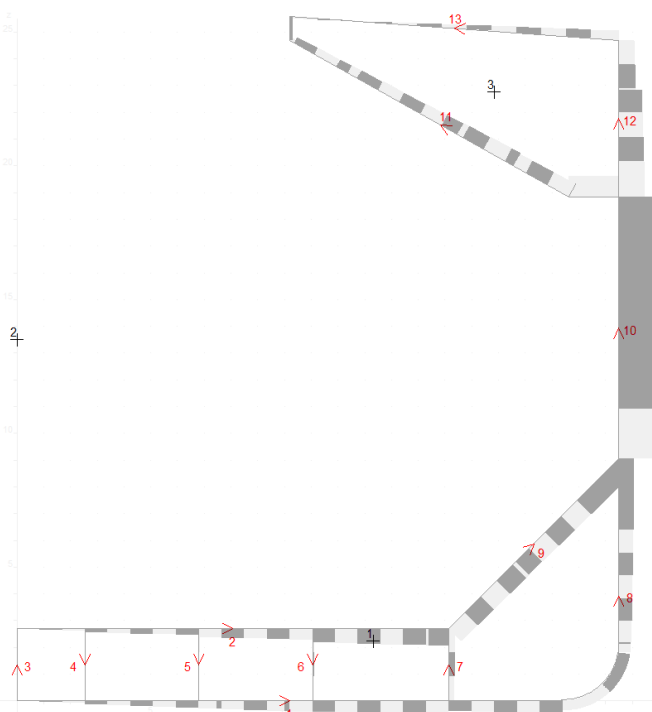
Πίνακας 5.22: Πραγματικές τιμές και τιμές κανονισμών ορθών τάσεων κάμψης, τάσεων πλευρικού λυγισμού των ενισχυτικών του διπύθμενου που υπερβαίνουν τα όρια.

	Τύπος ενισχυτικών	Διαστάσεις Ενισχυτικών		Ορθές Τάσεις Κάμψης (HGS Bend.) N/mm ²		Πλευρικός λυγισμός (Lat. Buckling) N/mm ²	
		Web (mm)	Flange (mm)	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)	Πραγματικές Τιμές (Actual)	Τιμές Κανονισμών (Rule)
Stiffener 3	Flat bar	170x11	-	137.12	263.89	653.88	355.00
Stiffener 4	Flat bar	170x11	-	125.92	263.89	444.45	355.00
Stiffener 5	Flat bar	170x11	-	137.12	263.89	1079.65	355.00
Stiffener 6	Flat bar	170x11	-	125.92	263.89	589.72	355.00
Stiffener 7	Flat bar	170x11	-	137.12	263.89	536.14	355.00
Stiffener 8	Flat bar	170x11	-	125.92	263.89	390.09	355.00
Stiffener 9	Flat bar	170x11	-	137.12	263.89	536.14	355.00
Stiffener 10	Flat bar	170x11	-	125.92	263.89	390.09	355.00



Σχήμα 5.53: Επισήμανση ενισχυτικών που υπερβαίνουν τις επιτρεπόμενες τάσεις.

Τέλος θα παρουσιαστεί ποιοτικά η κατανομή της διατμητικής τάσης στην μέση τομή.



Σχήμα 5.54: Κατανομή Διατμητικής τάσης στην ημιδιατομή της μέσης τομής.

5.5.2.4 Τελικά αποτελέσματα Mars 2000

Τώρα για κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις βελτιστοποίησης θα αυξήσουμε τις διαστάσεις των ενισχυτικών, όπου οι τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτά ξεπερνούν τις επιτρεπόμενες τιμές. Οι αλλαγές στις διαστάσεις θα γίνουν χειροκίνητα (δοκιμή - έλεγχος) έως ότου μειωθούν οι αναπτυσσόμενες τάσεις.

Για την περίπτωση της βελτιστοποίησης CSR analytic equation πραγματοποιήθηκε αλλαγή στις διαστάσεις των ενισχυτικών των σταθμίδων από FB 160x11 έγινε 170x13 (gross thick.). Για την περίπτωση της βελτιστοποίησης slenderness requirements πραγματοποιήθηκε αλλαγή στις διαστάσεις των ενισχυτικών των σταθμίδων από FB 170x11 έγινε 180x14. Παρά τις αλλαγές αυτές είναι ξεκάθαρο ότι η μεγαλύτερη μείωση βάρους του διπύθμενου θα εξακολουθεί να ισχύει για την περίπτωση της βελτιστοποίησης βασισμένη στις απαιτήσεις λυγρότητας.

Αφού μετά την αλλαγή των διαστάσεων των ενισχυτικών οι τάσεις των οποίων υπερβαίνουν τις επιτρεπόμενες, δεν υπάρχει κάποιο άλλο πρόβλημα στο πρόγραμμα Mars 2000, θα τρέξουμε την επικρατέστερη περίπτωση πάλι στο Ansys APDL για να ελεγχθεί άλλη μια και τελευταία φορά ότι όλα είναι καλά. Ο έλεγχος αυτός γίνεται επίσης διότι κατά την βελτιστοποίηση μέσω του Workbench, η εύρεση των βέλτιστων λύσεων των μεταβλητών εισόδου δεν γίνεται σε διακριτές τιμές, αλλά σε συνεχόμενο εύρος αυτών. Μπορεί επομένως το σύνολο των βέλτιστων τιμών των μεταβλητών εισόδου να αντιπροσωπεύει τις θεωρητικές βέλτιστες λύσεις, αλλά όταν πρέπει να γίνει η κατασκευή των

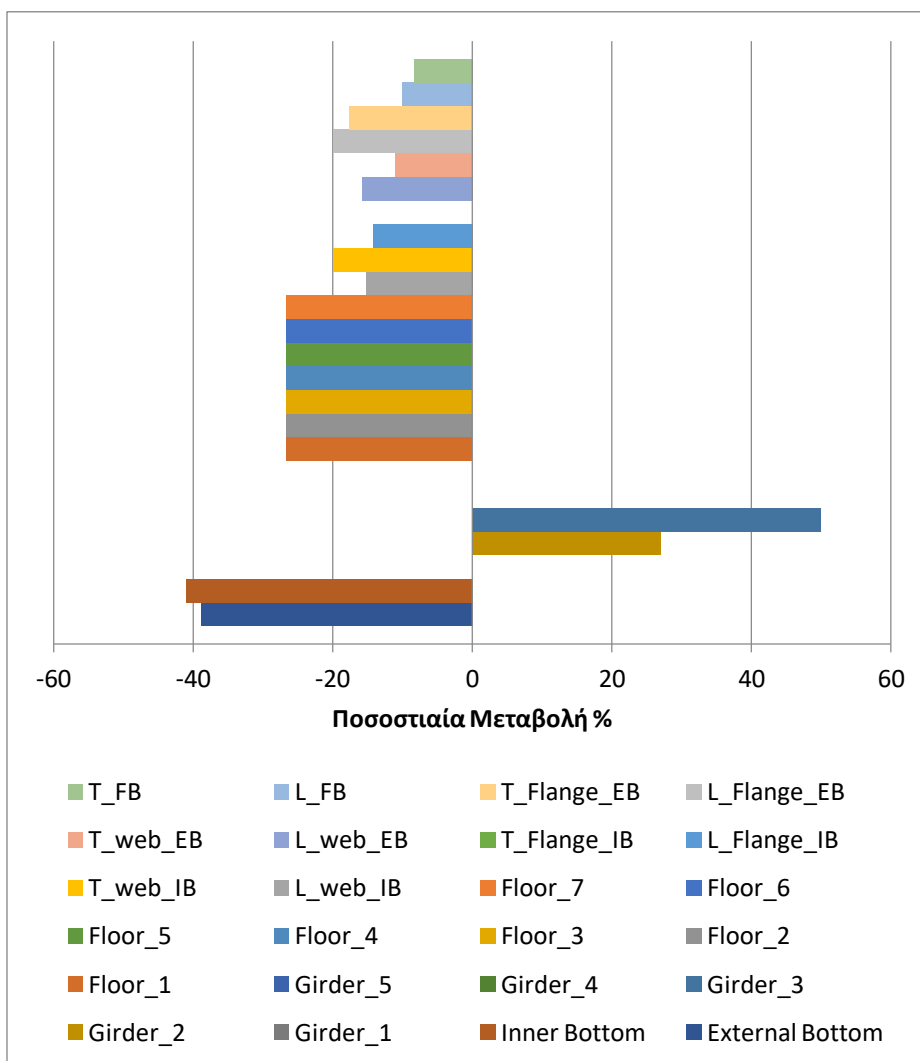
στοιχείων αυτών δεν είναι δυνατόν να έχουμε τέτοια ακρίβεια στις διαστάσεις των κατασκευαστικών στοιχείων. Για αυτόν το λόγο έχουν γίνει μικρές προσεγγίσεις στις τιμές των βέλτιστων λύσεων των μεταβλητών εισόδου, όπου ήταν αναγκαίο.

Κατά τον έλεγχο στο Ansys APDL, διαπιστώθηκε ότι έπρεπε να γίνουν κάποιες αλλαγές σε ορισμένες τιμές των μεταβλητών εισόδου. Οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν είναι εμφανείς από την σύγκριση του Πίνακα 5.10 και του Πίνακα 5.23. Στον Πίνακα 5.23 φαίνονται οι διαστάσεις, που θεωρήθηκαν ως μεταβλητές εισόδου για το πρόβλημα της βελτιστοποίησης, του διπύθμενου για το πλοίο αναφοράς και για το τελικό βελτιστοποιημένο μοντέλο. Στο τελικό βελτιστοποιημένο μοντέλο το βάρος μειώνεται κατά **27.06%**, που ισοδυναμεί με μείωση του βάρους του διπύθμενου κατά **115 τόνους**. Η μείωση αυτή είναι αρκετά σημαντική, εάν συνυπολογιστεί ότι το διπύθμενο, στην μέση τομή του πλοίου αναφοράς μας, αποτελεί το 39.7% του βάρους της.

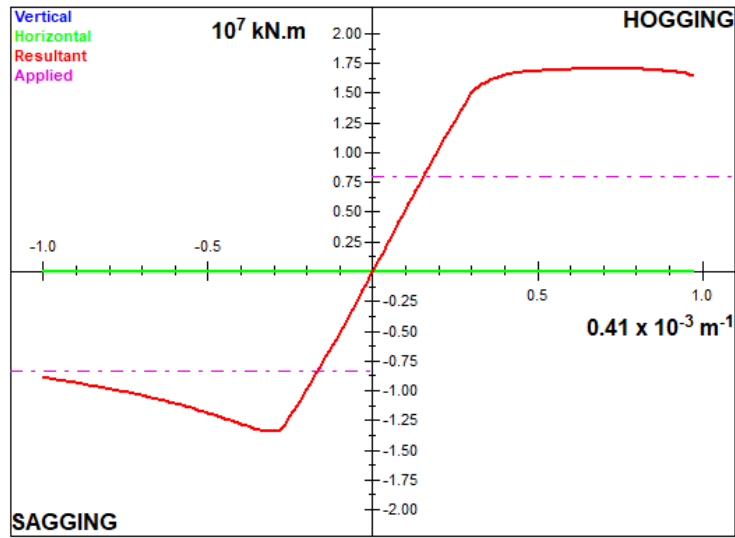
Πίνακας 5.23: Πάχη ελασμάτων και διαστάσεις διατομών ενισχυτικών (mm) της περιοχής του διπύθμενου για το πλοίο αναφοράς και για τα τελικά αποτελέσματα της βελτιστοποίησης του.

	Πλοίο Αναφοράς (gross thick.)	Τελικό Αποτέλεσμα Βελτιστοποίησης (gross thick.)	% Difference from reference
External_B thick.	18(21)	11(14)	-38.89
Inner_B thick.	19.5(25)	11.5(17)	-41.03
1_Girder thick.	13(16)	13(16)	0.00
2_Girder thick.	13(16)	16.5(19.5)	+26.92
3_Girder thick.	13(16)	19.5(22.5)	+50.00
4_Girder thick.	13(16)	13(16)	0.00
5_Girder thick.	13(16)	13(16)	0.00
1_Floor thick.	15(18)	11(14)	-26.67
2_Floor thick.	15(18)	11(14)	-26.67
3_Floor thick.	15(18)	11(14)	-26.67
4_Floor thick.	15(18)	11(14)	-26.67
5_Floor thick.	15(18)	11(14)	-26.67
6_Floor thick.	15(18)	11(14)	-26.67
7_Floor thick.	15(18)	11(14)	-26.67
L_web_IB	425	360	-15.29
T_web_IB	10(13)	8(11)	-20.00

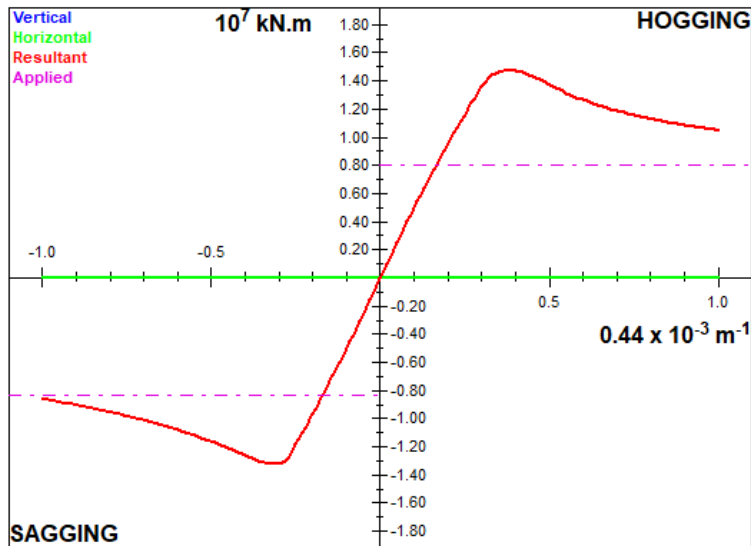
L_Flange_IB	175	150	-14.29
T_Flange_IB	17(20)	17(20)	0.00
L_web_EB	475	400	-15.79
T_web_EB	9(12)	8(11)	-11.11
L_Flange_EB	150	120	-20.00
T_Flange_EB	17(20)	14(17)	-17.65
L_FB	200	180	-10.00
T_FB	12(15)	11(14)	-8.33



Σχήμα 5.55: Ιστόγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής των μεταβλητών σχεδίασης.



Σχήμα 5.56: Διάγραμμα διαμήκης αντοχής πλοίου αναφοράς.



Σχήμα 5.57: Διάγραμμα διαμήκης αντοχής τελικού αποτελέσματος βελτιστοποίησης.

5.6 Συμπεράσματα

Έπειτα από τις αναλύσεις που έγιναν για την δοκό και το διπύθμενο, έχουν εξαχθεί ορισμένα συμπεράσματα όσον αφορά το σχεδιασμό αλλά και τον έλεγχο τμημάτων της κατασκευής του πλοίου. Ιδιαίτερη προσοχή όμως πρέπει να δοθεί στην ανάθεση των περιορισμών κατά την κατασκευή του μοντέλου, διότι πρέπει να είναι τέτοιοι έτσι ώστε να περιγράφουν όσο το δυνατόν καλύτερα την πραγματική απόκριση του μοντέλου αυτού καθώς και στις παραδοχές που για τα φορτία και τις φορτίσεις αντιστοιχά. Τα αποτελέσματα είναι αρκετά ενθαρρυντικά για τις δεδομένες παραδοχές, καθώς παρουσιάστηκε σημαντική μείωση του βάρους, χωρίς όμως να επηρεάζεται η αντοχή των κατασκευών στις υποκείμενες φορτίσεις που θεωρήθηκαν. Όσον αφορά τους αλγορίθμους βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν, κάθε ένας από αυτούς έχει τα δικά του προτερήματα, αλλά ξεχωρίσαμε παραπάνω την μέθοδο RSM. Αυτό διότι το αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν πολύ καλά και ακόμα ο χρόνος επίλυσης των προβλημάτων ήταν σημαντικά μικρότερος σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους. Όμως η μέθοδος RSM δεν ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθεί για παραπάνω από 20 μεταβλητές εισόδου. Συνεπώς για τις περιπτώσεις που έδιναν τα πιο ενθαρρυντικά αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι MOGA και NLPQL. Από αυτές τις δύο, η μέθοδος NLPQL απέφερε τα καλύτερα αποτελέσματα, τα οποία οδήγησαν σε πιο ελαφρύ διπύθμενο. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά γρήγορη συγκριτικά με την MOGA, αλλά πρέπει να έχουν οριστεί με προσοχή τα όρια των μεταβλητών εισόδου της, διότι σε διαφορετική περίπτωση υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να εγκλωβιστεί σε κάποιο τοπικό βέλτιστο ή να μην συγκλίνει καθόλου. Εν κατακλείδι η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM) προσεγγίζει αρκετά καλά τις πραγματικές καταστάσεις και μπορεί εύκολα να γίνει ο έλεγχος αντοχής των επιθυμητών κατασκευαστικών στοιχείων ή όλης της κατασκευής. Οι προοπτικές της επομένως είναι ενθαρρυντικές για τον ναυπηγικό τομέα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Προβατίδης Χ.Γ., Πεπερασμένα Στοιχεία στην Ανάλυση Κατασκευών (2η Έκδοση), 2016, Εκδόσεις Τζιόλα.
2. Σαμουηλίδης Μ., Σημειώσεις Αντοχής Πλοίου, 2011, ΕΜΠ Αθήνα.
3. Ανυφαντής Κ., Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Στατική Ναυπηγικών Κατασκευών, 2020, ΕΜΠ Αθήνα.
4. Καρύδης Π.Α., Υπολογιστικές Μέθοδοι και Εφαρμογές σε Λεπτότοιχες Κατασκευές, ΕΜΠ Αθήνα.

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Mechanics of Optimal Structural Design, David W.A. Rees, 2009, Brunel University, UK.
2. Ship Structural Analysis and Design, O.F. Hughes, J.K. Paik, 2010, SNAME.
3. An Introduction to Structural Optimization, P.W. Christensen, A. Klarbing, 2009, Springer.
4. MOGA: Multi-objective genetic algorithms, T. Murata, H. Ishibuchi, 1995, University of Osaka.
5. Cellular Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization, T. Murata, M. Gen, 1996, AIT.
6. Study on Multi-Objective Genetic Algorithm, Y. Gao, L. Shi, P. Yao, 2000, DUT, China.
7. NLPQL: A Fortran Subroutine Solving Constrained Nonlinear Programming Problems, K. Schittkowski, 1985, Stuttgart University.
8. Some advantages of stochastic methods in multicriteria optimization multibody systems, P. Eberhard, W. Schiehlen, D. Bestle, 1999, Stuttgart University.
9. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytic chemistry, M.A. Bezerra, R.E. Santelli, E.P. Oliveira, L.S. Villar, L.A. Escalera, 2008, Brazil.
10. Response Surface Methodology, R.H. Myers, D.C. Montgomery, 2016, Wiley.
11. Compressive strength of double-bottom under alternate hold loading condition, J.M. Gordo, 2017, CENTEC, Portugal.

Κανονισμοί σχεδίασης (available online)

1. Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, IACS, 01 Jan 2018.
2. User's Guide, MARS2000, Bureau Veritas, February 2000.
3. ANSYS Product Help, 2020 R1.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΚώδικας Apdl παραδείγματος δοκού (Beam188)

```

/CLEAR,START /GO
/COM, Structural SECDATA,bf,bf,d,tf,tf,tw,0,0,0 DK,P51X, , ,
/0,0,0 ,0,UX,UY,UZ,ROTX,, ,
/PREP7
/units,mpa FLST,2,1,3,ORDE,1
!!!!keyponts-line FITEM,2,2
K,1,0,,, !*
ET,1,BEAM188 K,2,5000,,, /GO
!* LSTR, 1, 2 DK,P51X, , , ,0,UY,UZ,ROTX,, ,
MPTEMP,,,,,,,, '
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2.1e5 !!!!mesh
MPDATA,PRXY,1,,0.3 FLST,5,1,4,ORDE,1
SECTYPE, 1, BEAM, I, , 0 FITEM,5,1 *Get,A,Secp,1,Prop,Area
SECOFFSET, CENT CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X !!!! loads
CM,_Y1,LINE FLST,2,100,2,ORDE,2
FITEM,2,1
lbf=152 CMSEL,,_Y FITEM,2,-100
ld=450 !*
ltf=10.8 LESIZE,_Y1, , ,100, , , , ,1 SFBEAM,P51X,1,PRES,50,50, ,
ltw=7.62 LMESH, 1 , , , ,0
!*
!!!! Parameters first case !!!! Second example
FLST,2,1,3,ORDE,1
lbf=178 !!!! constrains FITEM,2,2
d=406 FLST,2,1,3,ORDE,1 !*
tf=12.8 FITEM,2,1 /GO
tw=7.75 !* FK,P51X,FX,100000

```

```

!!! Do command to get max stress at flange for buckling constrain
!!! Solve
FINISH
/SOL
/STATUS,SOLU
SOLVE
!* Make 3D
/SHRINK,0
/ESHAPE,1.0
/EFACET,1
/RATIO,1,1,1
/CFORMAT,32,0
/REPLOT
!*

!!! Do command to get max stress
*Do,E_N,1,100,1
*Get,Smax,secr,E_N,s,eqv,max
*Get,Sm_2,secr,E_N+1,s,eqv,max
*If,Sm_2,LT,Smax,exit
*Enddo

!!! Do command to get max stress at web for buckling constrain
*Do,E_N_w,1,100,1
*Do,S_N,31,51,2
*get,Sw,secr,E_N_w,s,3,ival,S_N
*get,Sw_2,secr,E_N_w+1,s,3,ival,S_N
*If,Sw_2,GT,Sw,exit
*Enddo
*If,Sw_2,GT,Sw,exit
*Enddo
Sw=abs(Sw)

!!! Get max shear stress
*Get,Vmax,elem,1,smisc,5

Tmax=abs((3/2)*Vmax*(1+4*(bf/d)*(tf/tw))/(d*tw*(1+6*(bf/d)*(tf/tw)))) !! from "Mechanics of Optimal Structural Design (5.26a)
G=(tf/tw)*(d/bf)
Se_w=21.7*210000*(tw/d)*(tw/d)
Se_f=0.385*210000*(tf/(bf/2))*(tf/(bf/2))
Scr_f=168-(168*168)/(4*Se_f)
Scr_w=168-(168*168)/(4*Se_w)
UtilizationFactor_W=Sw/Scr_w
UtilizationFactor_F=Sf/Scr_f

!!! Get max stress example_2
!*get,Sf,secr,51,s,3,min !
Max stress at flange for buckling constrain
! S_flange=abs(Sf) !
Max stress at flange for buckling constrain
!*get,Smax,secr,,s,eqv,max
!*get,Sw,secr,51,s,3,ival,35 !
Max stress at web for buckling constrain
! S_web=abs(Sw) !
Max stress at web for buckling constrain

```

Κώδικας Ardl παραδείγματος δοκού (Shell181)

/CLEAR,START	K,5,0,-(dw+tf)/2,bf/2,	FITEM,2,-6
/COM, Structural	K,6,0,-(dw+tf)/2,0,	ADRAG,P51X,,,,, 8
/PREP7	K,7,0,-(dw+tf)/2,-bf/2,	
/units,mpa	!* FLST,3,2,3,ORDE,2	!!!! merge lines
!* ET,1,SHELL181	FITEM,3,2	!* NUMMRG,KP,,,LOW
KEYOPT,1,3,2	FITEM,3,7	
KEYOPT,1,10,1	KGEN,2,P51X,,,5000,,,0	!* !!!! Profile-offcet
KEYOPT,1,8,2	!* LSTR, 4, 3	
!* MPTEMP,,,,,,,,	LSTR, 3, 2	lsect,1,shell,,tf_u
MPTEMP,1,0	LSTR, 1, 6	lsecdata, tf,1,0,3
MPDATA,EX,1,,2.1e5	LSTR, 6, 5	lsecoffset,USER,tf/2
MPDATA,PRXY,1,,0.3	LSTR, 6, 7	lseccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1
	LSTR, 2, 8	lsect,2,shell,,tw
!!!! Parameters second case	LSTR, 7, 9	lsecdata, tw,1,0,3
bf=178	FLST,2,2,4,ORDE,2	lsecoffset,MID
dw=380.4	FITEM,2,1	lseccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1
tf=12.8	FITEM,2,-2	lsect,3,shell,,tf_l
tw=7.75	ADRAG,P51X,,,,, 7	lsecdata, tf,1,0,3
	FLST,2,2,4,ORDE,2	lsecoffset,USER,-tf/2
!!!! Keypoints & lines	FITEM,2,3	lseccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1
K,1,0,0,0,	FITEM,2,-4	
K,2,0,(dw+tf)/2,-bf/2,	ADRAG,P51X,,,,, 11	!!!! Profile-midplane
K,3,0,(dw+tf)/2,0,	FLST,2,2,4,ORDE,2	sect,1,shell,,tf_u
K,4,0,(dw+tf)/2,bf/2,	FITEM,2,5	secdata, tf,1,0,3

secoffset,MID	FITEM,5,-4	AESIZE,P51X,50,
seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1	CM,_Y,AREA	FLST,5,6,5,ORDE,2
sect,2,shell,,tw	ASEL, , , ,P51X	FITEM,5,1
secdata, tw,1,0,3	CM,_Y1,AREA	FITEM,5,-6
secoffset,MID	CMSEL,S,_Y	CM,_Y,AREA
seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1	!*	ASEL, , , ,P51X
sect,3,shell,,tf_l	CMSEL,S,_Y1	CM,_Y1,AREA
secdata, tf,1,0,3	AATT, 1, 3, 1, 0, 2	CHKMSH,'AREA'
secoffset,MID	CMSEL,S,_Y	CMSEL,S,_Y
seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1	CMDELE,_Y	!*
!*	CMDELE,_Y1	AMESH,_Y1
	!*	!*
!!! Mesh attributes	FLST,5,2,5,ORDE,2	CMDELE,_Y
FLST,5,2,5,ORDE,2	FITEM,5,1	CMDELE,_Y1
FITEM,5,5	FITEM,5,-2	CMDELE,_Y2
FITEM,5,-6	CM,_Y,AREA	!*
CM,_Y,AREA	ASEL, , , ,P51X	/UI,MESH,OFF
ASEL, , , ,P51X	CM,_Y1,AREA	
CM,_Y1,AREA	CMSEL,S,_Y	!!!! CONTACT PAIR CREATION
CMSEL,S,_Y	!*	/COM, CONTACT PAIR
!*	CMSEL,S,_Y1	CREATION - START
CMSEL,S,_Y1	AATT, 1, 3, 1, 0, 1	CM,_NODECM,NODE
AATT, 1, 3, 1, 0, 3	CMSEL,S,_Y	CM,_ELEMCM,ELEM
CMSEL,S,_Y	CMDELE,_Y	CM,_KPCM,KP
CMDELE,_Y	CMDELE,_Y1	CM,_LINECM,LINE
CMDELE,_Y1	!*	CM,_AREACM,AREA
!*	FLST,2,6,5,ORDE,2	CM,_VOLUCM,VOLU
FLST,5,2,5,ORDE,2	FITEM,2,1	/GSAV,cwz,gsav,,temp
FITEM,5,3	FITEM,2,-6	

! Define surface-based constraint type of pair	CM,_CONTACT,LINE	CMSEL,S,_VOLUCM
	TYPE,3	CMDEL,_VOLUCM
MAT,1	NSLL,S,1	/GRES,cwz,gsav
R,3	ESLN,S,0	CMDEL,_TARGET
REAL,3	ESURF	CMDEL,_CONTACT
ET,2,170	*SET,_REALID,3	/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
ET,3,175	ALLSEL	!* /COM, CONTACT PAIR CREATION - START
KEYOPT,3,12,5	ESEL,ALL	CM,_NODECM,NODE
KEYOPT,3,4,0	ESEL,S,TYPE,,2	CM,_ELEMCM,ELEM
KEYOPT,3,2,2	ESEL,A,TYPE,,3	CM,_KPCM,KP
KEYOPT,2,2,1	ESEL,R,REAL,,3	CM,_LINECM,LINE
KEYOPT,2,4,1111	/PSYMB,ESYS,1	CM,_AREACM,AREA
TYPE,2	/PNUM,TYPE,1	CM,_VOLUCM,VOLU
! Create a pilot node	/NUM,1	/GSAV,cwz,gsav,,temp
! At center of mass of contact geometric entities	ESEL,ALL	! Define surface-based constraint type of pair
N,6001, 0,0,0	ESEL,S,TYPE,,2	MAT,1
TSHAP,PILO	ESEL,A,TYPE,,3	R,4
E,6001	ESEL,R,REAL,,3	REAL,4
NSEL,S,,,6001	CMSEL,A,_NODECM	ET,4,170
CM,Pilot_1,NODE	CMDEL,_NODECM	ET,5,175
CMSEL,S,_NODECM	CMSEL,A,_ELEMCM	KEYOPT,5,12,5
! Generate the contact surface	CMDEL,_ELEMCM	KEYOPT,5,4,0
LSEL,S,,,1	CMSEL,S,_KPCM	KEYOPT,5,2,2
LSEL,A,,,2	CMDEL,_KPCM	KEYOPT,4,2,1
LSEL,A,,,3	CMSEL,S,_LINECM	KEYOPT,4,4,1110
LSEL,A,,,4	CMDEL,_LINECM	TYPE,4
LSEL,A,,,5	CMSEL,S,_AREACM	
LSEL,A,,,6	CMDEL,_AREACM	

```

! Create a pilot node          /PNUM,TYPE,1          /GO
! At center of mass of contact /NUM,1                D,P51X, , , ,
geometric entities          EPLOT                 ,UX,UY,UZ,ROTX, ,
N,6002,                      ESEL,ALL              FLST,2,1,1,ORDE,1
5000.0,0,1.59088147511e-14  ESEL,S,TYPE,,4       FITEM,2,6002
TSHAP,PILO                   ESEL,A,TYPE,,5       !*
E,6002                        ESEL,R,REAL,,4       /GO
NSEL,S,,,6002                CMSEL,A,_NODECM      D,P51X, , , , ,UY,UZ,ROTX, ,
CM,Pilot_2,NODE              CMDEL,_NODECM
CMSEL,S,_NODECM              CMSEL,A,_ELEMCM      !!!! Volume of model
! Generate the contact       CMDEL,_ELEMCM        GSUM
surface                       CMSEL,S,_KPCM        *Get,A,AREA,0,VOLU
LSEL,S,,,9                   CMDEL,_KPCM           A=(A/5000)
LSEL,A,,,12                   CMSEL,S,_LINECM
LSEL,A,,,14                   CMDEL,_LINECM        !!!! loads
LSEL,A,,,17                   CMSEL,S,_AREACM      FLST,2,2,5,ORDE,2
LSEL,A,,,19                   CMDEL,_AREACM        FITEM,2,1
LSEL,A,,,22                   CMSEL,S,_VOLUCM      FITEM,2,-2
CM,_CONTACT,LINE            CMDEL,_VOLUCM        /GO
TYPE,5                       /GRES,cwz,gsav       !*
NSLL,S,1                     CMDEL,_TARGET        SFA,P51X,1,PRES,50/bf !!
ESLN,S,0                     CMDEL,_CONTACT       50(N/mm) / 152
ESURF
*SET,_REALID,4              /COM, CONTACT PAIR
ALLSEL                        CREATION - END
ESEL,ALL                      !!!! Axial force
ESEL,S,TYPE,,4              FLST,2,17,1,ORDE,15
ESEL,A,TYPE,,5              FITEM,2,4
ESEL,R,REAL,,4              FITEM,2,104
/PSYMB,ESYS,1               FITEM,2,-105
!*
```


FITEM,2,306	!!! Get max stress	!!! Get stress for buckling at web
FITEM,2,406	Finish	
FITEM,2,510	/post1	asel,s,,,3
FITEM,2,610	/Eshape,1.0	esla,s
FITEM,2,-612		/show
FITEM,2,914	!!! Element stress	Plesol,s,eqv
FITEM,2,1014	/show	*Get,Sw,PInsol,0,bmax
FITEM,2,-1016	Plesol,s,eqv	
FITEM,2,1316	*Get,Smax,PInsol,0,max	G=(tf/tw)*(dw/bf)
FITEM,2,-1317	/show	Se_w=21.7*210000*(tw/dw) *(tw/dw)
FITEM,2,1518	Plesol,s,xy	Se_f=0.385*210000*(tf/(bf/2)) *(tf/(bf/2))
FITEM,2,1618	*Get,Tmax,PInsol,0,max	
!* /GO		Scr_f=168- (168*168)/(4*Se_f)
F,P51X,FX,100000/17	!!! Get stress for buckling at flange	Scr_w=168- (168*168)/(4*Se_w)
	asel,s,,,2	UtilizationFactor_W=Sw/Scr_w
!!! Solve	esla,s	UtilizationFactor_F=Sf/Scr_f
FINISH	/show	allsel,all
/SOL	Plesol,s,eqv	!pdef,sxz,etab,Sxz
/STATUS,SOLU	*Get,Sf,PInsol,0,bmax	
SOLVE		

Κώδικας Apdl για διτύθμενο

/CLEAR,START	KEYW,PR_SET,1	KEYW,PR_ELMAG,0
/REPLOT,RESIZE	KEYW,PR_STRUC,1	KEYW,MAGNOD,0
!* /NOPR	KEYW,PR_THERM,0 KEYW,PR_FLUID,0	KEYW,MAGEDG,0 KEYW,MAGHFE,0

KEYW,MAGELC,0	t_F_2 = 18	secdata, t_E_B,1,0,0,3
KEYW,PR_MULTI,0	t_F_3 = 18	secoffset,MID
/GO	t_F_4 = 18	seccontrol,,,, , , ,
!*	t_F_5 = 18	sect,2,shell,,Inner_Bottom
/COM,	t_F_6 = 18	secdata, t_I_B,1,0,3
/COM,Preferences for GUI filtering have been set to display:	t_F_7 = 18	secoffset,MID
/COM, Structural	L_web_IB = 425	seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1
!*	T_web_IB = 13	sect,3,shell,,Girder_1
/PREP7	L_flange_IB = 175	secdata, t_G_1,1,0,3
/units,mpa	T_flange_IB = 20	secoffset,MID
!*	L_web_EB = 475	seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1
ET,1,BEAM188	T_web_EB = 12	sect,4,shell,,Floor_1
ET,2,SHELL181	L_flange_EB = 150	secdata, t_F_1,1,0,3
MPTEMP,,,,,,,,	T_flange_EB = 20	secoffset,MID
MPTEMP,1,0	L_FB = 200	seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1
MPDATA,EX,1,,2.1e5	T_FB = 15	sect,9,shell,,G_2
MPDATA,PRXY,1,,0.3	Pext = (1025*9.81*16.5)/1000000	secdata, t_G_2,1,0,3
!!!! Input Parameters	Pinner = (1025*9.81*22)/1000000	secoffset,MID
t_E_B = 21	C_IW = T_web_IB/L_web_IB	seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1
t_I_B = 25	C_IF = T_flange_IB/L_flange_IB	sect,10,shell,,G_3
t_G_1 = 16	C_EW = T_web_EB/L_web_EB	secdata, t_G_3,1,0,3
t_G_2 = 16	C_EF = T_flange_EB/L_flange_EB	secoffset,MID
t_G_3 = 16		seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1
t_G_4 = 16		sect,11,shell,,G_4
t_G_5 = 16		secdata, t_G_4,1,0,3
t_F_1 = 18	sect,1,shell,,External_Bottom	secoffset,MID
		seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1
		sect,12,shell,,G_5
		secdata, t_G_5,1,0,3

secoffset,MID	SECOFFSET, USER, -2.09608e-	K,8,0,5950,2700,
seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1	15, L_web_IB +	K,9,0,6800,2700,
sect,13,shell,,Floor_2	T_flange_IB/2	K,10,0,7650,2700,
secdata, t_F_2,1,0,3	SECDATA,L_flange_IB,L_web	K,11,0,8500,2700,
secoffset,MID	_IB +	K,12,0,9350,2700,
seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1	T_flange_IB/2,T_flange_IB,T_	K,13,0,10200,2700,
sect,14,shell,,Floor_3	web_IB,0,0,0,0,0,0,0	K,14,0,11050,2700,
secdata, t_F_3,1,0,3	SECTYPE, 6, BEAM, T,	K,15,0,11900,2700,
secoffset,MID	Ext_Stif, 0	K,16,0,12750,2700,
seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1	SECOFFSET, USER, 0, -	K,17,0,13600,2700,
sect,15,shell,,Floor_4	(L_web_EB + T_flange_EB/2)	K,18,0,14450,2700,
secdata, t_F_4,1,0,3	SECDATA,L_flange_EB,-	K,19,0,15300,2700,
secoffset,MID	(L_web_EB + T_flange_EB/2)	K,20,0,16150,2700,
seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1	,T_flange_EB,T_web_EB,0,0,	K,21,0,0,850,
sect,16,shell,,Floor_5	0,0,0,0,0	K,22,0,0,1850,
secdata, t_F_5,1,0,3	SECTYPE, 7, BEAM, RECT,	K,23,0,2550,850,
secoffset,MID	FB_keel, 0	K,24,0,2550,1850,
seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1	SECOFFSET, USER, -(L_FB), 0	K,25,0,6800,850,
sect,17,shell,,Floor_6	SECOFFSET, USER, L_FB, 0	K,26,0,6800,1850,
secdata, t_F_6,1,0,3	SECDATA,L_FB,T_FB,0,0,0,0,0	K,27,0,11050,850,
secoffset,MID	,0,0,0,0,0	K,28,0,11050,1850,
seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1	SECTYPE, 8, BEAM, RECT,	K,29,0,16150,850,
sect,18,shell,,Floor_7	FB, 0	K,30,0,16150,1850,
secdata, t_F_7,1,0,3	SECTYPE, 5, BEAM, T,	K,51,0,15300,1850,
secoffset,MID	Inner_B_Stiff, 0	K,52,0,15300,850,
seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1	K,4,0,2550,2700,	FLST,3,20,3,ORDE,2
SECTYPE, 5, BEAM, T,	K,5,0,3400,2700,	FITEM,3,1
Inner_B_Stiff, 0	K,6,0,4250,2700,	FITEM,3,-20
	K,7,0,5100,2700,	KGEN,2,P51X, , , , ,-2700, ,0

K, ,3700,0,0,	FITEM,2,74	FITEM,2,1
LSTR, 31, 53	FITEM,2,75	A,P51X
FLST,2,50,3,ORDE,2	FITEM,2,22	FLST,3,1,5,ORDE,1
FITEM,2,1	FITEM,2,21	FITEM,3,35
FITEM,2,-50	A,P51X	AGEN,19,P51X, , , ,850, , ,0
LDRAG,P51X, , , , , 1	FLST,2,4,3	NUMMRG,ALL, , , ,LOW
NUMMRG,ALL, , , ,LOW	FITEM,2,75	
	FITEM,2,54	!!!! Floors
!!!! Inner_Bottom	FITEM,2,1	FLST,2,4,3
FLST,2,4,3	FITEM,2,22	FITEM,2,50
FITEM,2,32	A,P51X	FITEM,2,49
FITEM,2,31	FLST,3,3,5,ORDE,2	FITEM,2,52
FITEM,2,53	FITEM,3,20	FITEM,2,29
FITEM,2,84	FITEM,3,-22	A,P51X
A,P51X	AGEN,2,P51X, , , ,2550, , ,0	FLST,2,4,3
FLST,3,1,5,ORDE,1	FLST,3,3,5,ORDE,2	FITEM,2,52
FITEM,3,1	FITEM,3,23	FITEM,2,51
AGEN,19,P51X, , , ,850, , ,0	FITEM,3,-25	FITEM,2,30
NUMMRG,ALL, , , ,LOW	AGEN,3,P51X, , , ,4250, , ,0	FITEM,2,29
	FLST,3,3,5,ORDE,2	A,P51X
!!!! Girders	FITEM,3,29	FLST,2,4,3
	FITEM,3,-31	FITEM,2,51
FLST,2,4,3	AGEN,2,P51X, , , ,5100, , ,0	FITEM,2,19
FITEM,2,53		FITEM,2,20
FITEM,2,74	!!!! External_Bottom	FITEM,2,30
FITEM,2,21	FLST,2,4,3	A,P51X
FITEM,2,31	FITEM,2,54	FLST,3,3,5,ORDE,2
A,P51X	FITEM,2,55	FITEM,3,54
FLST,2,4,3	FITEM,2,2	FITEM,3,-56

AGEN,19,P51X, , , , -850, , , 0	FITEM,2,691	ASEL, , , , P51X
NUMMRG,ALL, , , , LOW	FITEM,2,653	CM,_Y1,AREA
	FITEM,2,654	CMSEL,S,_Y
!!!! Copy Geometry	FITEM,2,103	!*
FLST,3,110,5,ORDE,2	A,P51X	CMSEL,S,_Y1
FITEM,3,1	FLST,3,3,5,ORDE,2	AATT, 1, , 2, 0, 3
FITEM,3,-110	FITEM,3,661	CMSEL,S,_Y
AGEN,6,P51X, , , 3700,0, , , 0	FITEM,3,-663	CMDELE,_Y
NUMMRG,ALL, , , , LOW	AGEN,19,P51X, , , , 850, , , 0	CMDELE,_Y1
	NUMMRG,ALL, , , , LOW	!*
		ASEL,S,LOC,Y,2550
!!!! Floors	!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! Mesh Attributes	FLST,5,18,5,ORDE,12
FLST,3,2,3,ORDE,2		FITEM,5,23
FITEM,3,233	!!!! Girders	FITEM,5,-25
FITEM,3,235	ASEL,S,LOC,Y,0	FITEM,5,133
KGEN,2,P51X, , , 22200, , , , 0	FLST,5,18,5,ORDE,12	FITEM,5,-135
FLST,2,4,3	FITEM,5,20	FITEM,5,243
FITEM,2,721	FITEM,5,-22	FITEM,5,-245
FITEM,2,695	FITEM,5,130	FITEM,5,353
FITEM,2,693	FITEM,5,-132	FITEM,5,-355
FITEM,2,104	FITEM,5,240	FITEM,5,463
A,P51X	FITEM,5,-242	FITEM,5,-465
FLST,2,4,3	FITEM,5,350	FITEM,5,573
FITEM,2,104	FITEM,5,-352	FITEM,5,-575
FITEM,2,693	FITEM,5,460	CM,_Y,AREA
FITEM,2,691	FITEM,5,-462	ASEL, , , , P51X
FITEM,2,103	FITEM,5,570	CM,_Y1,AREA
A,P51X	FITEM,5,-572	CMSEL,S,_Y
FLST,2,4,3	CM,_Y,AREA	!*

CMSEL,S,_Y1	CMDELE,_Y1	FITEM,5,32
AATT, 1, , 2, 0, 9	!*	FITEM,5,-34
CMSEL,S,_Y	ASEL,S,LOC,Y,11050	FITEM,5,142
CMDELE,_Y	FLST,5,18,5,ORDE,12	FITEM,5,-144
CMDELE,_Y1	FITEM,5,29	FITEM,5,252
!*	FITEM,5,-31	FITEM,5,-254
ASEL,S,LOC,Y,6800	FITEM,5,139	FITEM,5,362
FLST,5,18,5,ORDE,12	FITEM,5,-141	FITEM,5,-364
FITEM,5,26	FITEM,5,249	FITEM,5,472
FITEM,5,-28	FITEM,5,-251	FITEM,5,-474
FITEM,5,136	FITEM,5,359	FITEM,5,582
FITEM,5,-138	FITEM,5,-361	FITEM,5,-584
FITEM,5,246	FITEM,5,469	CM,_Y,AREA
FITEM,5,-248	FITEM,5,-471	ASEL, , , ,P51X
FITEM,5,356	FITEM,5,579	CM,_Y1,AREA
FITEM,5,-358	FITEM,5,-581	CMSEL,S,_Y
FITEM,5,466	CM,_Y,AREA	!*
FITEM,5,-468	ASEL, , , ,P51X	CMSEL,S,_Y1
FITEM,5,576	CM,_Y1,AREA	AATT, 1, , 2, 0, 12
FITEM,5,-578	CMSEL,S,_Y	CMSEL,S,_Y
CM,_Y,AREA	!*	CMDELE,_Y
ASEL, , , ,P51X	CMSEL,S,_Y1	CMDELE,_Y1
CM,_Y1,AREA	AATT, 1, , 2, 0, 11	!*
CMSEL,S,_Y	CMSEL,S,_Y	
!*	CMDELE,_Y	!!!! Floors
CMSEL,S,_Y1	CMDELE,_Y1	ASEL,S,LOC,X,0
AATT, 1, , 2, 0, 10	!*	FLST,5,57,5,ORDE,2
CMSEL,S,_Y	ASEL,S,LOC,Y,16150	FITEM,5,54
CMDELE,_Y	FLST,5,18,5,ORDE,12	FITEM,5,-110

CM,_Y,AREA	FITEM,5,-330	FITEM,5,494
ASEL, , , ,P51X	CM,_Y,AREA	FITEM,5,-550
CM,_Y1,AREA	ASEL, , , ,P51X	CM,_Y,AREA
CMSEL,S,_Y	CM,_Y1,AREA	ASEL, , , ,P51X
!* CMSEL,S,_Y1	CMSEL,S,_Y	CM,_Y1,AREA
AATT, 1, , 2, 0, 4	!* CMSEL,S,_Y1	CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y	AATT, 1, , 2, 0, 14	!* CMSEL,S,_Y1
CMDELE,_Y	CMSEL,S,_Y	AATT, 1, , 2, 0, 16
CMDELE,_Y1	CMDELE,_Y	CMSEL,S,_Y
!* ASEL,S,LOC,X,3700	CMDELE,_Y1	CMDELE,_Y
FLST,5,57,5,ORDE,2	!* ASEL,S,LOC,X,11100	CMDELE,_Y1
FITEM,5,164	!* FLST,5,57,5,ORDE,2	ASEL,S,LOC,X,18500
FITEM,5,-220	FITEM,5,384	FLST,5,57,5,ORDE,2
CM,_Y,AREA	FITEM,5,-440	FITEM,5,604
ASEL, , , ,P51X	CM,_Y,AREA	FITEM,5,-660
CM,_Y1,AREA	ASEL, , , ,P51X	CM,_Y,AREA
CMSEL,S,_Y	CM,_Y1,AREA	ASEL, , , ,P51X
!* CMSEL,S,_Y1	CMSEL,S,_Y	CM,_Y1,AREA
AATT, 1, , 2, 0, 13	!* CMSEL,S,_Y1	CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y	AATT, 1, , 2, 0, 15	!* CMSEL,S,_Y1
CMDELE,_Y	CMSEL,S,_Y	AATT, 1, , 2, 0, 17
CMDELE,_Y1	CMDELE,_Y	CMSEL,S,_Y
!* ASEL,S,LOC,X,7400	CMDELE,_Y1	CMDELE,_Y
FLST,5,57,5,ORDE,2	!* ASEL,S,LOC,X,14800	CMDELE,_Y1
FITEM,5,274	FLST,5,57,5,ORDE,2	!* ASEL,S,LOC,X,22200

FLST,5,57,5,ORDE,2	FITEM,5,-569	ASEL, , , ,P51X
FITEM,5,661	CM,_Y,AREA	CM,_Y1,AREA
FITEM,5,-717	ASEL, , , ,P51X	CMSEL,S,_Y
CM,_Y,AREA	CM,_Y1,AREA	!*
ASEL, , , ,P51X	CMSEL,S,_Y	CMSEL,S,_Y1
CM,_Y1,AREA	!*	AATT, 1, , 2, 0, 2
CMSEL,S,_Y	CMSEL,S,_Y1	CMSEL,S,_Y
!*	AATT, 1, , 2, 0, 1	CMDELE,_Y
CMSEL,S,_Y1	CMSEL,S,_Y	CMDELE,_Y1
AATT, 1, , 2, 0, 18	CMDELE,_Y	!*
CMSEL,S,_Y	CMDELE,_Y1	
CMDELE,_Y	!*	!!!!!! Keel Stiffeners
CMDELE,_Y1		ASEL,S,LOC,Y,0
!*	!!!!!! Inner_Bottom	LSLA,S
	ASEL,S,LOC,Z,2700	FLST,5,12,4,ORDE,12
!!!!!! External_Bottom	FLST,5,114,5,ORDE,12	FITEM,5,22
ASEL,S,LOC,Z,0	FITEM,5,35	FITEM,5,-23
FLST,5,114,5,ORDE,12	FITEM,5,-53	FITEM,5,270
FITEM,5,1	FITEM,5,145	FITEM,5,275
FITEM,5,-19	FITEM,5,-163	FITEM,5,538
FITEM,5,111	FITEM,5,255	FITEM,5,541
FITEM,5,-129	FITEM,5,-273	FITEM,5,777
FITEM,5,221	FITEM,5,365	FITEM,5,780
FITEM,5,-239	FITEM,5,-383	FITEM,5,1016
FITEM,5,331	FITEM,5,475	FITEM,5,1019
FITEM,5,-349	FITEM,5,-493	FITEM,5,1255
FITEM,5,441	FITEM,5,585	FITEM,5,1258
FITEM,5,-459	FITEM,5,-603	CM,_Y,LINE
FITEM,5,551	CM,_Y,AREA	LSEL, , , ,P51X

CM,_Y1,LINE	CM,_Y1,LINE	CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y	CMSEL,S,_Y	!*
!*	!*	!*
!*	!*	CMSEL,S,_Y1
CMSEL,S,_Y1	CMSEL,S,_Y1	LATT,1,,1,, , , ,8
LATT,1,,1,, , , ,7	LATT,1,,1,, , , ,8	CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y	CMSEL,S,_Y	CMDELE,_Y
CMDELE,_Y	CMDELE,_Y	CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y1	CMDELE,_Y1	!*
!*	!*	
		ASEL,S,LOC,Y,11050
!!!!!! Girder Stiffeners	ASEL,S,LOC,Y,6800	LSLA,S
ASEL,S,LOC,Y,2550	LSLA,S	FLST,5,12,4,ORDE,12
LSLA,S	FLST,5,12,4,ORDE,12	FITEM,5,28
FLST,5,12,4,ORDE,12	FITEM,5,26	FITEM,5,-29
FITEM,5,24	FITEM,5,-27	FITEM,5,318
FITEM,5,-25	FITEM,5,303	FITEM,5,322
FITEM,5,288	FITEM,5,308	FITEM,5,565
FITEM,5,292	FITEM,5,556	FITEM,5,568
FITEM,5,547	FITEM,5,559	FITEM,5,804
FITEM,5,550	FITEM,5,795	FITEM,5,807
FITEM,5,786	FITEM,5,798	FITEM,5,1043
FITEM,5,789	FITEM,5,1034	FITEM,5,1046
FITEM,5,1025	FITEM,5,1037	FITEM,5,1282
FITEM,5,1028	FITEM,5,1273	FITEM,5,1285
FITEM,5,1264	FITEM,5,1276	CM,_Y,LINE
FITEM,5,1267	CM,_Y,LINE	LSEL, , , ,P51X
CM,_Y,LINE	LSEL, , , ,P51X	CM,_Y1,LINE
LSEL, , , ,P51X	CM,_Y1,LINE	CMSEL,S,_Y

!*	CMSEL,S,_Y1	FITEM,5,380
!*	LATT,1,,1,,8	FITEM,5,383
CMSEL,S,_Y1	CMSEL,S,_Y	FITEM,5,386
LATT,1,,1,,8	CMDELE,_Y	FITEM,5,389
CMSEL,S,_Y	CMDELE,_Y1	FITEM,5,392
CMDELE,_Y	!*	FITEM,5,583
CMDELE,_Y1		FITEM,5,586
!*	!!!! Inner_B_Stiff	FITEM,5,591
ASEL,S,LOC,Y,16150	ASEL,S,LOC,Z,2700	FITEM,5,594
LSLA,S	LSLA,S	FITEM,5,597
FLST,5,12,4,ORDE,12	FLST,5,90,4,ORDE,83	FITEM,5,600
FITEM,5,30	FITEM,5,3	FITEM,5,605
FITEM,5,-31	FITEM,5,-4	FITEM,5,608
FITEM,5,333	FITEM,5,6	FITEM,5,611
FITEM,5,338	FITEM,5,-9	FITEM,5,614
FITEM,5,574	FITEM,5,11	FITEM,5,619
FITEM,5,577	FITEM,5,-14	FITEM,5,622
FITEM,5,813	FITEM,5,16	FITEM,5,625
FITEM,5,816	FITEM,5,-20	FITEM,5,628
FITEM,5,1052	FITEM,5,344	FITEM,5,631
FITEM,5,1055	FITEM,5,347	FITEM,5,822
FITEM,5,1291	FITEM,5,352	FITEM,5,825
FITEM,5,1294	FITEM,5,355	FITEM,5,830
CM,_Y,LINE	FITEM,5,358	FITEM,5,833
LSEL,, , ,P51X	FITEM,5,361	FITEM,5,836
CM,_Y1,LINE	FITEM,5,366	FITEM,5,839
CMSEL,S,_Y	FITEM,5,369	FITEM,5,844
!*	FITEM,5,372	FITEM,5,847
!*	FITEM,5,375	FITEM,5,850

FITEM,5,853	FITEM,5,1328	FITEM,5,-43
FITEM,5,858	FITEM,5,1331	FITEM,5,45
FITEM,5,861	FITEM,5,1336	FITEM,5,-49
FITEM,5,864	FITEM,5,1339	FITEM,5,130
FITEM,5,867	FITEM,5,1342	FITEM,5,148
FITEM,5,870	FITEM,5,1345	FITEM,5,176
FITEM,5,1061	FITEM,5,1348	FITEM,5,192
FITEM,5,1064	CM,_Y,LINE	FITEM,5,196
FITEM,5,1069	LSEL, , , ,P51X	FITEM,5,202
FITEM,5,1072	CM,_Y1,LINE	FITEM,5,211
FITEM,5,1075	CMSEL,S,_Y	FITEM,5,218
FITEM,5,1078	!*	FITEM,5,222
FITEM,5,1083	!*	FITEM,5,230
FITEM,5,1086	CMSEL,S,_Y1	FITEM,5,241
FITEM,5,1089	LATT,1, ,1, , , ,5	FITEM,5,248
FITEM,5,1092	CMSEL,S,_Y	FITEM,5,252
FITEM,5,1097	CMDELE,_Y	FITEM,5,256
FITEM,5,1100	CMDELE,_Y1	FITEM,5,260
FITEM,5,1103	!*	FITEM,5,482
FITEM,5,1106		FITEM,5,485
FITEM,5,1109	!!!! Ext_Stif	FITEM,5,491
FITEM,5,1300	ASEL,S,LOC,Z,0	FITEM,5,494
FITEM,5,1303	LSLA,S	FITEM,5,497
FITEM,5,1308	FLST,5,90,4,ORDE,83	FITEM,5,500
FITEM,5,1311	FITEM,5,32	FITEM,5,506
FITEM,5,1314	FITEM,5,-33	FITEM,5,509
FITEM,5,1317	FITEM,5,35	FITEM,5,512
FITEM,5,1322	FITEM,5,-38	FITEM,5,515
FITEM,5,1325	FITEM,5,40	FITEM,5,521

FITEM,5,524	FITEM,5,999	CMDELE,_Y
FITEM,5,527	FITEM,5,1002	CMDELE,_Y1
FITEM,5,530	FITEM,5,1005	!*
FITEM,5,533	FITEM,5,1008	
FITEM,5,721	FITEM,5,1011	!!!!!!! Mesh Areas
FITEM,5,724	FITEM,5,1199	ALLSEL,ALL
FITEM,5,730	FITEM,5,1202	FLST,2,717,5,ORDE,2
FITEM,5,733	FITEM,5,1208	FITEM,2,1
FITEM,5,736	FITEM,5,1211	FITEM,2,-717
FITEM,5,739	FITEM,5,1214	AESIZE,P51X,650,
FITEM,5,745	FITEM,5,1217	MSHAPE,0,2D
FITEM,5,748	FITEM,5,1223	MSHKEY,0
FITEM,5,751	FITEM,5,1226	!*
FITEM,5,754	FITEM,5,1229	FLST,5,717,5,ORDE,2
FITEM,5,760	FITEM,5,1232	FITEM,5,1
FITEM,5,763	FITEM,5,1238	FITEM,5,-717
FITEM,5,766	FITEM,5,1241	CM,_Y,AREA
FITEM,5,769	FITEM,5,1244	ASEL, , , ,P51X
FITEM,5,772	FITEM,5,1247	CM,_Y1,AREA
FITEM,5,960	FITEM,5,1250	CHKMSH,'AREA'
FITEM,5,963	CM,_Y,LINE	CMSEL,S,_Y
FITEM,5,969	LSEL, , , ,P51X	!*
FITEM,5,972	CM,_Y1,LINE	AMESH,_Y1
FITEM,5,975	CMSEL,S,_Y	!*
FITEM,5,978	!*	CMDELE,_Y
FITEM,5,984	!*	CMDELE,_Y1
FITEM,5,987	CMSEL,S,_Y1	CMDELE,_Y2
FITEM,5,990	LATT,1, ,1, , , ,6	!*
FITEM,5,993	CMSEL,S,_Y	

	FITEM,5,218	FITEM,5,383
!!!! Mesh Stiffeners	FITEM,5,222	FITEM,5,386
!! LSEL,S,LENGTH,,3700 !!! how to pick quick all the lines	FITEM,5,230	FITEM,5,389
	FITEM,5,241	FITEM,5,392
	FITEM,5,248	FITEM,5,482
FLST,5,240,4,ORDE,216	FITEM,5,252	FITEM,5,485
FITEM,5,3	FITEM,5,256	FITEM,5,491
FITEM,5,-4	FITEM,5,260	FITEM,5,494
FITEM,5,6	FITEM,5,270	FITEM,5,497
FITEM,5,-9	FITEM,5,275	FITEM,5,500
FITEM,5,11	FITEM,5,288	FITEM,5,506
FITEM,5,-14	FITEM,5,292	FITEM,5,509
FITEM,5,16	FITEM,5,303	FITEM,5,512
FITEM,5,-20	FITEM,5,308	FITEM,5,515
FITEM,5,22	FITEM,5,318	FITEM,5,521
FITEM,5,-33	FITEM,5,322	FITEM,5,524
FITEM,5,35	FITEM,5,333	FITEM,5,527
FITEM,5,-38	FITEM,5,338	FITEM,5,530
FITEM,5,40	FITEM,5,344	FITEM,5,533
FITEM,5,-43	FITEM,5,347	FITEM,5,538
FITEM,5,45	FITEM,5,352	FITEM,5,541
FITEM,5,-49	FITEM,5,355	FITEM,5,547
FITEM,5,130	FITEM,5,358	FITEM,5,550
FITEM,5,148	FITEM,5,361	FITEM,5,556
FITEM,5,176	FITEM,5,366	FITEM,5,559
FITEM,5,192	FITEM,5,369	FITEM,5,565
FITEM,5,196	FITEM,5,372	FITEM,5,568
FITEM,5,202	FITEM,5,375	FITEM,5,574
FITEM,5,211	FITEM,5,380	FITEM,5,577

FITEM,5,583	FITEM,5,772	FITEM,5,972
FITEM,5,586	FITEM,5,777	FITEM,5,975
FITEM,5,591	FITEM,5,780	FITEM,5,978
FITEM,5,594	FITEM,5,786	FITEM,5,984
FITEM,5,597	FITEM,5,789	FITEM,5,987
FITEM,5,600	FITEM,5,795	FITEM,5,990
FITEM,5,605	FITEM,5,798	FITEM,5,993
FITEM,5,608	FITEM,5,804	FITEM,5,999
FITEM,5,611	FITEM,5,807	FITEM,5,1002
FITEM,5,614	FITEM,5,813	FITEM,5,1005
FITEM,5,619	FITEM,5,816	FITEM,5,1008
FITEM,5,622	FITEM,5,822	FITEM,5,1011
FITEM,5,625	FITEM,5,825	FITEM,5,1016
FITEM,5,628	FITEM,5,830	FITEM,5,1019
FITEM,5,631	FITEM,5,833	FITEM,5,1025
FITEM,5,721	FITEM,5,836	FITEM,5,1028
FITEM,5,724	FITEM,5,839	FITEM,5,1034
FITEM,5,730	FITEM,5,844	FITEM,5,1037
FITEM,5,733	FITEM,5,847	FITEM,5,1043
FITEM,5,736	FITEM,5,850	FITEM,5,1046
FITEM,5,739	FITEM,5,853	FITEM,5,1052
FITEM,5,745	FITEM,5,858	FITEM,5,1055
FITEM,5,748	FITEM,5,861	FITEM,5,1061
FITEM,5,751	FITEM,5,864	FITEM,5,1064
FITEM,5,754	FITEM,5,867	FITEM,5,1069
FITEM,5,760	FITEM,5,870	FITEM,5,1072
FITEM,5,763	FITEM,5,960	FITEM,5,1075
FITEM,5,766	FITEM,5,963	FITEM,5,1078
FITEM,5,769	FITEM,5,969	FITEM,5,1083

FITEM,5,1086	FITEM,5,1282	FITEM,2,6
FITEM,5,1089	FITEM,5,1285	FITEM,2,-9
FITEM,5,1092	FITEM,5,1291	FITEM,2,11
FITEM,5,1097	FITEM,5,1294	FITEM,2,-14
FITEM,5,1100	FITEM,5,1300	FITEM,2,16
FITEM,5,1103	FITEM,5,1303	FITEM,2,-20
FITEM,5,1106	FITEM,5,1308	FITEM,2,22
FITEM,5,1109	FITEM,5,1311	FITEM,2,-33
FITEM,5,1199	FITEM,5,1314	FITEM,2,35
FITEM,5,1202	FITEM,5,1317	FITEM,2,-38
FITEM,5,1208	FITEM,5,1322	FITEM,2,40
FITEM,5,1211	FITEM,5,1325	FITEM,2,-43
FITEM,5,1214	FITEM,5,1328	FITEM,2,45
FITEM,5,1217	FITEM,5,1331	FITEM,2,-49
FITEM,5,1223	FITEM,5,1336	FITEM,2,130
FITEM,5,1226	FITEM,5,1339	FITEM,2,148
FITEM,5,1229	FITEM,5,1342	FITEM,2,176
FITEM,5,1232	FITEM,5,1345	FITEM,2,192
FITEM,5,1238	FITEM,5,1348	FITEM,2,196
FITEM,5,1241	CM,_Y,LINE	FITEM,2,202
FITEM,5,1244	LSEL, , , ,P51X	FITEM,2,211
FITEM,5,1247	CM,_Y1,LINE	FITEM,2,218
FITEM,5,1250	CMSEL,,_Y	FITEM,2,222
FITEM,5,1255	!*	FITEM,2,230
FITEM,5,1258	LESIZE,_Y1, , ,50, , , , ,1	FITEM,2,241
FITEM,5,1264	!*	FITEM,2,248
FITEM,5,1267	FLST,2,240,4,ORDE,216	FITEM,2,252
FITEM,5,1273	FITEM,2,3	FITEM,2,256
FITEM,5,1276	FITEM,2,-4	FITEM,2,260

FITEM,2,270	FITEM,2,497	FITEM,2,611
FITEM,2,275	FITEM,2,500	FITEM,2,614
FITEM,2,288	FITEM,2,506	FITEM,2,619
FITEM,2,292	FITEM,2,509	FITEM,2,622
FITEM,2,303	FITEM,2,512	FITEM,2,625
FITEM,2,308	FITEM,2,515	FITEM,2,628
FITEM,2,318	FITEM,2,521	FITEM,2,631
FITEM,2,322	FITEM,2,524	FITEM,2,721
FITEM,2,333	FITEM,2,527	FITEM,2,724
FITEM,2,338	FITEM,2,530	FITEM,2,730
FITEM,2,344	FITEM,2,533	FITEM,2,733
FITEM,2,347	FITEM,2,538	FITEM,2,736
FITEM,2,352	FITEM,2,541	FITEM,2,739
FITEM,2,355	FITEM,2,547	FITEM,2,745
FITEM,2,358	FITEM,2,550	FITEM,2,748
FITEM,2,361	FITEM,2,556	FITEM,2,751
FITEM,2,366	FITEM,2,559	FITEM,2,754
FITEM,2,369	FITEM,2,565	FITEM,2,760
FITEM,2,372	FITEM,2,568	FITEM,2,763
FITEM,2,375	FITEM,2,574	FITEM,2,766
FITEM,2,380	FITEM,2,577	FITEM,2,769
FITEM,2,383	FITEM,2,583	FITEM,2,772
FITEM,2,386	FITEM,2,586	FITEM,2,777
FITEM,2,389	FITEM,2,591	FITEM,2,780
FITEM,2,392	FITEM,2,594	FITEM,2,786
FITEM,2,482	FITEM,2,597	FITEM,2,789
FITEM,2,485	FITEM,2,600	FITEM,2,795
FITEM,2,491	FITEM,2,605	FITEM,2,798
FITEM,2,494	FITEM,2,608	FITEM,2,804

FITEM,2,807	FITEM,2,1002	FITEM,2,1199
FITEM,2,813	FITEM,2,1005	FITEM,2,1202
FITEM,2,816	FITEM,2,1008	FITEM,2,1208
FITEM,2,822	FITEM,2,1011	FITEM,2,1211
FITEM,2,825	FITEM,2,1016	FITEM,2,1214
FITEM,2,830	FITEM,2,1019	FITEM,2,1217
FITEM,2,833	FITEM,2,1025	FITEM,2,1223
FITEM,2,836	FITEM,2,1028	FITEM,2,1226
FITEM,2,839	FITEM,2,1034	FITEM,2,1229
FITEM,2,844	FITEM,2,1037	FITEM,2,1232
FITEM,2,847	FITEM,2,1043	FITEM,2,1238
FITEM,2,850	FITEM,2,1046	FITEM,2,1241
FITEM,2,853	FITEM,2,1052	FITEM,2,1244
FITEM,2,858	FITEM,2,1055	FITEM,2,1247
FITEM,2,861	FITEM,2,1061	FITEM,2,1250
FITEM,2,864	FITEM,2,1064	FITEM,2,1255
FITEM,2,867	FITEM,2,1069	FITEM,2,1258
FITEM,2,870	FITEM,2,1072	FITEM,2,1264
FITEM,2,960	FITEM,2,1075	FITEM,2,1267
FITEM,2,963	FITEM,2,1078	FITEM,2,1273
FITEM,2,969	FITEM,2,1083	FITEM,2,1276
FITEM,2,972	FITEM,2,1086	FITEM,2,1282
FITEM,2,975	FITEM,2,1089	FITEM,2,1285
FITEM,2,978	FITEM,2,1092	FITEM,2,1291
FITEM,2,984	FITEM,2,1097	FITEM,2,1294
FITEM,2,987	FITEM,2,1100	FITEM,2,1300
FITEM,2,990	FITEM,2,1103	FITEM,2,1303
FITEM,2,993	FITEM,2,1106	FITEM,2,1308
FITEM,2,999	FITEM,2,1109	FITEM,2,1311

FITEM,2,1314	FITEM,2,332	!!!!!! Keel Plate
FITEM,2,1317	FITEM,2,336	ASEL,S,LOC,Y,0
FITEM,2,1322	FITEM,2,340	LSLA,S
FITEM,2,1325	FITEM,2,-341	FLST,2,33,4,ORDE,33
FITEM,2,1328	FITEM,2,536	FITEM,2,1
FITEM,2,1331	FITEM,2,573	FITEM,2,-2
FITEM,2,1336	FITEM,2,576	FITEM,2,54
FITEM,2,1339	FITEM,2,579	FITEM,2,56
FITEM,2,1342	FITEM,2,-580	FITEM,2,58
FITEM,2,1345	FITEM,2,775	FITEM,2,60
FITEM,2,1348	FITEM,2,812	FITEM,2,62
LMESH,P51X	FITEM,2,815	FITEM,2,64
	FITEM,2,818	FITEM,2,117
	FITEM,2,-819	FITEM,2,268
!!!!!! Apply Constrains	FITEM,2,1014	FITEM,2,272
	FITEM,2,1017	FITEM,2,280
!!!! Bilge-Hopper Plate	FITEM,2,1026	FITEM,2,-281
ASEL,S,LOC,Y,16150	FITEM,2,1035	FITEM,2,480
LSLA,S	FITEM,2,1051	FITEM,2,537
FLST,2,33,4,ORDE,33	FITEM,2,1054	FITEM,2,540
FITEM,2,21	FITEM,2,1057	FITEM,2,543
FITEM,2,50	FITEM,2,-1058	FITEM,2,-544
FITEM,2,125	FITEM,2,1253	FITEM,2,719
FITEM,2,127	FITEM,2,1297	FITEM,2,776
FITEM,2,129	!*	FITEM,2,779
FITEM,2,131	/GO	FITEM,2,782
FITEM,2,-132	DL,P51X, ,UZ,	FITEM,2,-783
FITEM,2,134		FITEM,2,958
FITEM,2,265		FITEM,2,1015

FITEM,2,1018	FITEM,2,-544	FITEM,2,268
FITEM,2,1021	FITEM,2,719	FITEM,2,272
FITEM,2,-1022	FITEM,2,776	FITEM,2,280
FITEM,2,1197	FITEM,2,779	FITEM,2,-281
FITEM,2,1254	FITEM,2,782	FITEM,2,480
FITEM,2,1257	FITEM,2,-783	FITEM,2,537
FITEM,2,1260	FITEM,2,958	FITEM,2,540
FITEM,2,-1261	FITEM,2,1015	FITEM,2,543
!*	FITEM,2,1018	FITEM,2,-544
/GO	FITEM,2,1021	FITEM,2,719
DL,P51X, ,UY,	FITEM,2,-1022	FITEM,2,776
FLST,2,33,4,ORDE,33	FITEM,2,1197	FITEM,2,779
FITEM,2,1	FITEM,2,1254	FITEM,2,782
FITEM,2,-2	FITEM,2,1257	FITEM,2,-783
FITEM,2,54	FITEM,2,1260	FITEM,2,958
FITEM,2,56	FITEM,2,-1261	FITEM,2,1015
FITEM,2,58	!*	FITEM,2,1018
FITEM,2,60	/GO	FITEM,2,1021
FITEM,2,62	DL,P51X, ,ROTX,	FITEM,2,-1022
FITEM,2,64	FLST,2,33,4,ORDE,33	FITEM,2,1197
FITEM,2,117	FITEM,2,1	FITEM,2,1254
FITEM,2,268	FITEM,2,-2	FITEM,2,1257
FITEM,2,272	FITEM,2,54	FITEM,2,1260
FITEM,2,280	FITEM,2,56	FITEM,2,-1261
FITEM,2,-281	FITEM,2,58	!*
FITEM,2,480	FITEM,2,60	/GO
FITEM,2,537	FITEM,2,62	DL,P51X, ,ROTZ,
FITEM,2,540	FITEM,2,64	
FITEM,2,543	FITEM,2,117	!!!! First Floor

ASEL,S,LOC,X,0	FITEM,2,-110	DL,P51X, ,UX,
LSLA,S	FITEM,2,113	
FLST,2,53,4,ORDE,53	FITEM,2,118	
FITEM,2,51	FITEM,2,121	
FITEM,2,53	FITEM,2,124	ASEL,S,LOC,X,0
FITEM,2,56	FITEM,2,127	LSLA,S
FITEM,2,-57	FITEM,2,-128	FLST,2,53,4,ORDE,53
FITEM,2,60	FITEM,2,131	FITEM,2,51
FITEM,2,-61	FITEM,2,134	FITEM,2,53
FITEM,2,64	FITEM,2,136	FITEM,2,56
FITEM,2,-65	FITEM,2,139	FITEM,2,-57
FITEM,2,69	FITEM,2,143	FITEM,2,60
FITEM,2,-70	FITEM,2,147	FITEM,2,-61
FITEM,2,73	FITEM,2,151	FITEM,2,64
FITEM,2,77	FITEM,2,-152	FITEM,2,-65
FITEM,2,-78	FITEM,2,155	FITEM,2,69
FITEM,2,81	FITEM,2,159	FITEM,2,-70
FITEM,2,84	FITEM,2,163	FITEM,2,73
FITEM,2,-85	FITEM,2,167	FITEM,2,77
FITEM,2,89	FITEM,2,171	FITEM,2,-78
FITEM,2,-90	FITEM,2,-172	FITEM,2,81
FITEM,2,92	FITEM,2,175	FITEM,2,84
FITEM,2,-93	FITEM,2,179	FITEM,2,-85
FITEM,2,97	FITEM,2,183	FITEM,2,89
FITEM,2,-98	FITEM,2,187	FITEM,2,-90
FITEM,2,101	FITEM,2,191	FITEM,2,92
FITEM,2,104	FITEM,2,207	FITEM,2,-93
FITEM,2,-105	!*	FITEM,2,97
FITEM,2,109	/GO	FITEM,2,-98

FITEM,2,101	FITEM,2,191	FITEM,2,-98
FITEM,2,104	FITEM,2,207	FITEM,2,101
FITEM,2,-105	!*	FITEM,2,104
FITEM,2,109	/GO	FITEM,2,-105
FITEM,2,-110	DL,P51X, ,ROTY,	FITEM,2,109
FITEM,2,113	ASEL,S,LOC,X,0	FITEM,2,-110
FITEM,2,118	LSLA,S	FITEM,2,113
FITEM,2,121	FLST,2,53,4,ORDE,53	FITEM,2,118
FITEM,2,124	FITEM,2,51	FITEM,2,121
FITEM,2,127	FITEM,2,53	FITEM,2,124
FITEM,2,-128	FITEM,2,56	FITEM,2,127
FITEM,2,131	FITEM,2,-57	FITEM,2,-128
FITEM,2,134	FITEM,2,60	FITEM,2,131
FITEM,2,136	FITEM,2,-61	FITEM,2,134
FITEM,2,139	FITEM,2,64	FITEM,2,136
FITEM,2,143	FITEM,2,-65	FITEM,2,139
FITEM,2,147	FITEM,2,69	FITEM,2,143
FITEM,2,151	FITEM,2,-70	FITEM,2,147
FITEM,2,-152	FITEM,2,73	FITEM,2,151
FITEM,2,155	FITEM,2,77	FITEM,2,-152
FITEM,2,159	FITEM,2,-78	FITEM,2,155
FITEM,2,163	FITEM,2,81	FITEM,2,159
FITEM,2,167	FITEM,2,84	FITEM,2,163
FITEM,2,171	FITEM,2,-85	FITEM,2,167
FITEM,2,-172	FITEM,2,89	FITEM,2,171
FITEM,2,175	FITEM,2,-90	FITEM,2,-172
FITEM,2,179	FITEM,2,92	FITEM,2,175
FITEM,2,183	FITEM,2,-93	FITEM,2,179
FITEM,2,187	FITEM,2,97	FITEM,2,183

FITEM,2,187	FITEM,2,542	FITEM,2,1035
FITEM,2,191	FITEM,2,545	FITEM,2,1198
FITEM,2,207	FITEM,2,548	FITEM,2,1254
!*	FITEM,2,572	FITEM,2,1257
/GO	FITEM,2,578	FITEM,2,1260
DL,P51X, ,ROTZ,	FITEM,2,601	FITEM,2,1299
	FITEM,2,606	!*
!!!!!! Last Floor	FITEM,2,629	/GO
ASEL,S,LOC,X,22200	FITEM,2,634	DL,P51X, ,ROTY,
LSLA,S	FITEM,2,740	ASEL,S,LOC,X,22200
FLST,2,53,4,ORDE,53	FITEM,2,746	LSLA,S
FITEM,2,194	FITEM,2,755	FLST,2,53,4,ORDE,53
FITEM,2,238	FITEM,2,764	FITEM,2,194
FITEM,2,250	FITEM,2,770	FITEM,2,238
FITEM,2,261	FITEM,2,773	FITEM,2,250
FITEM,2,282	FITEM,2,778	FITEM,2,261
FITEM,2,295	FITEM,2,802	FITEM,2,282
FITEM,2,301	FITEM,2,808	FITEM,2,295
FITEM,2,305	FITEM,2,831	FITEM,2,301
FITEM,2,342	FITEM,2,837	FITEM,2,305
FITEM,2,348	FITEM,2,859	FITEM,2,342
FITEM,2,370	FITEM,2,865	FITEM,2,348
FITEM,2,376	FITEM,2,970	FITEM,2,370
FITEM,2,479	FITEM,2,976	FITEM,2,376
FITEM,2,486	FITEM,2,1000	FITEM,2,479
FITEM,2,510	FITEM,2,1006	FITEM,2,486
FITEM,2,516	FITEM,2,1017	FITEM,2,510
FITEM,2,525	FITEM,2,1026	FITEM,2,516
FITEM,2,534	FITEM,2,1032	FITEM,2,525

FITEM,2,534	FITEM,2,1032	FITEM,2,520
FITEM,2,542	FITEM,2,1035	FITEM,2,523
FITEM,2,545	FITEM,2,1198	FITEM,2,526
FITEM,2,548	FITEM,2,1254	FITEM,2,529
FITEM,2,572	FITEM,2,1257	FITEM,2,532
FITEM,2,578	FITEM,2,1260	FITEM,2,535
FITEM,2,601	FITEM,2,1299	FITEM,2,537
FITEM,2,606	!*	FITEM,2,540
FITEM,2,629	/GO	FITEM,2,543
FITEM,2,634	DL,P51X, ,ROTZ,	FITEM,2,546
FITEM,2,740		FITEM,2,549
FITEM,2,746		FITEM,2,552
FITEM,2,755	!!!!!! Transverse Bulkhead	FITEM,2,555
FITEM,2,764	ASEL,S,LOC,X,11100	FITEM,2,558
FITEM,2,770	LSLA,S	FITEM,2,561
FITEM,2,773	FLST,2,53,4,ORDE,53	FITEM,2,564
FITEM,2,778	FITEM,2,481	FITEM,2,567
FITEM,2,802	FITEM,2,484	FITEM,2,570
FITEM,2,808	FITEM,2,487	FITEM,2,573
FITEM,2,831	FITEM,2,490	FITEM,2,576
FITEM,2,837	FITEM,2,493	FITEM,2,579
FITEM,2,859	FITEM,2,496	FITEM,2,582
FITEM,2,865	FITEM,2,499	FITEM,2,585
FITEM,2,970	FITEM,2,502	FITEM,2,588
FITEM,2,976	FITEM,2,505	FITEM,2,590
FITEM,2,1000	FITEM,2,508	FITEM,2,593
FITEM,2,1006	FITEM,2,511	FITEM,2,596
FITEM,2,1017	FITEM,2,514	FITEM,2,599
FITEM,2,1026	FITEM,2,517	FITEM,2,602

```

FITEM,2,604      Agirder_1 = 2700*t_G_1      Aweb_EB =
FITEM,2,607      Agirder_2 = 2700*t_G_2      L_web_EB*T_web_EB
FITEM,2,610      Agirder_3 = 2700*t_G_3
FITEM,2,613      Agirder_4 = 2700*t_G_4      !!!!! Coupling nodes
FITEM,2,616      Agirder_5 = 2700*t_G_5      FLST,4,103,1,ORDE,103
FITEM,2,618      Afloor_1= 2700*t_F_1      FITEM,4,4044
FITEM,2,621      Afloor_2= 2700*t_F_2      FITEM,4,4050
FITEM,2,624      Afloor_3= 2700*t_F_3      FITEM,4,-4051
FITEM,2,627      Afloor_4= 2700*t_F_4      FITEM,4,4062
FITEM,2,630      Afloor_5= 2700*t_F_5      FITEM,4,-4063
FITEM,2,633      Afloor_6= 2700*t_F_6      FITEM,4,4074
!*              Afloor_7= 2700*t_F_7      FITEM,4,-4075
/GO              FITEM,4,4086
DL,P51X, ,UZ,   !!!!! Total Mid-section area      FITEM,4,-4087
                Agirders = Agirder_1 +      FITEM,4,4098
                Agirder_2 + Agirder_3 +      FITEM,4,-4099
                Agirder_4 + Agirder_5      FITEM,4,4110
                Amid_section = AStiff +      FITEM,4,-4111
                Ainner + Aext + Agirders      FITEM,4,4122
*get,Ainner_s,Secp,5,Prop,Ar      FITEM,4,-4123
ea              Fsx = 124.24*Amid_section
*get,AExt_s,Secp,6,Prop,Area      FITEM,4,4134
*get,Afb,Secp,7,Prop,Area      FITEM,4,-4135
                Afloors = Afloor_1 + Afloor_2      FITEM,4,4146
                + Afloor_3 + Afloor_4 +      FITEM,4,-4147
                Afloor_5 + Afloor_6 +      FITEM,4,4158
                Afloor_7      FITEM,4,-4159
                Atotal = AStiff + Ainner +      FITEM,4,4170
                Aext + Agirders + Afloors
!!!! Get Plates Area
Ainner = 16150*t_I_B      Aweb_IB =      FITEM,4,-4171
Aext = 16150*t_E_B      L_web_IB*T_web_IB      FITEM,4,4182

```


FITEM,4,-4183	FITEM,4,4362	FITEM,4,4536
FITEM,4,4194	FITEM,4,-4363	FITEM,4,4542
FITEM,4,-4195	FITEM,4,4374	FITEM,4,-4543
FITEM,4,4206	FITEM,4,-4375	FITEM,4,4554
FITEM,4,-4207	FITEM,4,4386	FITEM,4,-4555
FITEM,4,4218	FITEM,4,-4387	FITEM,4,4566
FITEM,4,-4219	FITEM,4,4398	FITEM,4,-4567
FITEM,4,4230	FITEM,4,-4399	FITEM,4,4578
FITEM,4,-4231	FITEM,4,4410	FITEM,4,-4579
FITEM,4,4242	FITEM,4,-4411	FITEM,4,4590
FITEM,4,-4243	FITEM,4,4422	FITEM,4,4596
FITEM,4,4254	FITEM,4,-4423	FITEM,4,-4597
FITEM,4,-4255	FITEM,4,4434	FITEM,4,4608
FITEM,4,4266	FITEM,4,-4435	FITEM,4,-4609
FITEM,4,-4267	FITEM,4,4446	FITEM,4,4620
FITEM,4,4278	FITEM,4,-4447	FITEM,4,-4621
FITEM,4,-4279	FITEM,4,4458	FITEM,4,4632
FITEM,4,4290	FITEM,4,-4459	FITEM,4,-4633
FITEM,4,-4291	FITEM,4,4470	FITEM,4,4644
FITEM,4,4302	FITEM,4,-4471	FITEM,4,-4645
FITEM,4,-4303	FITEM,4,4482	FITEM,4,4656
FITEM,4,4314	FITEM,4,4488	CP,1,UX,P51X
FITEM,4,-4315	FITEM,4,-4489	ALLSEL,ALL
FITEM,4,4326	FITEM,4,4500	FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,4,-4327	FITEM,4,-4501	FITEM,2,4656
FITEM,4,4338	FITEM,4,4512	!*
FITEM,4,-4339	FITEM,4,-4513	/GO
FITEM,4,4350	FITEM,4,4524	F,P51X,FX,Fsx
FITEM,4,-4351	FITEM,4,-4525	

```

!!!!!! Apply loads          FITEM,2,-273          /REPLO
                             /GO          AVPRIN,0, ,
!!! External_Bottom        !*          ETABLE, ,SMISC, 5
ASEL,S,LOC,Z,0            SFA,P51X,2,PRES,Pinner  !*
FLST,2,114,5,ORDE,12     ALLSEL,ALL          AVPRIN,0, ,
FITEM,2,1                 FINISH          ETABLE, ,SMISC, 18
FITEM,2,-19              /SOL          !*
FITEM,2,111              /STATUS,SOLU
FITEM,2,-129             SOLVE          ESORT,ETAB,SMIS18,0,0, ,
FITEM,2,221              !*
FITEM,2,-239             /SHRINK,0          *get,Szmax,sort,0,max
FITEM,2,331              /ESHAPE,1.0        *get,Szmin,sort,0,min
FITEM,2,-349             /EFACET,1
FITEM,2,441              /RATIO,1,1,1        Tmax1 = Szmax/Aweb_IB
FITEM,2,-459             /CFORMAT,32,0      Tmax2 = Szmax/Aweb_EB
FITEM,2,551              /REPLOT          Tmin1 = abs(Szmin/Aweb_IB)
FITEM,2,-569             !*          Tmin2 =abs(Szmin/Aweb_EB)
/GO
!*
SFA,P51X,1,PRES,Pext      !!!! Get Max Stress
                             /POST1
!!!!!! Inner Bottom        ETABLE, ,S,EQV
ASEL,S,LOC,Z,2700        !*
FLST,2,57,5,ORDE,6       ESORT,ETAB,SEQV,0,0, ,
FITEM,2,35                *get,Smax,sort,0,max
FITEM,2,-53
FITEM,2,145              !!!! Get Max T
FITEM,2,-163             ESEL,S,SEC,,5,8,1
FITEM,2,255              /USER, 1

```

Αποτελέσματα Workbench διτύθμενουOPT Case 1 (MOGA)

4 input-values and one constrain (Smax)

* All thickness values in mm

** Selected based on CSR analytic equation

Πίνακας 1: Στοιχεία των μεταβλητών εισόδου της βελτιστοποίησης.

	Min**(net th.)	Max	Reference (Mid-ship plan)	Reference Net Thickness	Optimal Value(gross thick.)	% Difference from reference
External_B thick.	11	20	21	18	12(15)	-33.33
Inner_B thick.	15	24	25	19.5	20(25.5)	+2.56
Girder thick. (x5)	10	16	16	13	16(19)	+23.08
Floor thick. (x7)	10	20	18	15	15(18)	0.00
Min DB mass [tons]			261.14	212.56	204.13	-3.97

OPT Case 2 (RSM NLPQL)

4 input-values and one constrain (Smax)

* All thickness values in mm

** Selected based on slenderness requirements

Πίνακας 2: Στοιχεία των μεταβλητών εισόδου της βελτιστοποίησης.

	Min**(net th.)	Max	Reference (Mid-ship plan)	Reference Net Thickness	Optimal Value(gross thick.)	% Difference from reference
External_B thick.	11	23	21	18	11(14)	-38.89
Inner_B thick.	11	25	25	19.5	11(16.5)	-43.60
Girder thick. (x5)	13	21	16	13	18(21)	+38.46
Floor thick. (x7)	10	20	18	15	11(14)	-26.67
Min DB mass [tons]			261.14	212.56	171.14	-19.49

OPT Case 3 (RSM NLPQL)

14 input-values and one constrain (Smax)

* All thickness values in mm

** Selected based on CSR analytic equation

Πίνακας 3: Στοιχεία των μεταβλητών εισόδου της βελτιστοποίησης.

	Min**(net th.)	Max	Reference (Mid-ship plan)	Reference Net Thickness	Optimal Value(gross thick.)	% Difference from reference
External_B thick.	14	23	21	18	14(17)	-22.22
Inner_B thick.	18	25	25	19.5	18(23.5)	-7.69
1_Girder thick.	12	21	16	13	12(15)	-7.69
2_Girder thick.	12	21	16	13	12(15)	-7.69
3_Girder thick.	12	21	16	13	19(22)	+46.15
4_Girder thick.	12	21	16	13	12(15)	-7.69
5_Girder thick.	12	21	16	13	12(15)	-7.69
1_Floor thick.	10	23	18	15	10(13)	-33.33
2_Floor thick.	10	23	18	15	10(13)	-33.33
3_Floor thick.	10	23	18	15	10(13)	-33.33
4_Floor thick.	10	23	18	15	10(13)	-33.33
5_Floor thick.	10	23	18	15	10(13)	-33.33
6_Floor thick.	10	23	18	15	10(13)	-33.33
7_Floor thick.	10	23	18	15	10(13)	-33.33
Min DB mass [tons]			261.14	212.56	185.98	-12.50

OPT Case 4(RSM NLPQL)

14 input-values and one constrain (Smax)

* All thickness values in mm

** Selected based on slenderness requirements

Πίνακας 4: Στοιχεία των μεταβλητών εισόδου της βελτιστοποίησης.

	Min**(net th.)	Max	Reference (Mid-ship plan)	Reference Net Thickness	Optimal Value(gross thick.)	% Difference from reference
External_B thick.	11	23	21	18	11(14)	-38.89
Inner_B thick.	11	25	25	19.5	11(16.5)	-43.59
1_Girder thick.	13	21	16	13	13(16)	0.00
2_Girder thick.	13	21	16	13	13(16)	0.00
3_Girder thick.	13	21	16	13	20(23)	+53.85

4_Girder thick.	13	21	16	13	13(16)	0.00
5_Girder thick.	13	21	16	13	13(16)	0.00
1_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
2_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
3_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
4_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
5_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
6_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
7_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
Min DB mass [tons]			261.14	212.56	162.50	-23.55

OPT Case 5(NLPQL)

22 input-values and two constrain (Smax-Tmax)

From which 8 input-values stiffeners at External & Inner Bottom

* All thickness values in mm

** Selected based on slenderness requirements

Πίνακας 5: Στοιχεία των μεταβλητών εισόδου της βελτιστοποίησης.

	Min**(net th.)	Max	Reference (Mid-ship plan)	Reference Net Thickness	Optimal Value(gross thick.)	% Difference from reference
External_B thick.	11	23	21	18	11(14)	-38.89
Inner_B thick.	11	25	25	19.5	11.5(17)	-41.03
1_Girder thick.	13	21	16	13	13(16)	0.00
2_Girder thick.	13	21	16	13	18.5(21.5)	+42.31
3_Girder thick.	13	21	16	13	19(22)	+46.15
4_Girder thick.	13	21	16	13	13(16)	0.00
5_Girder thick.	13	21	16	13	13(16)	0.00
1_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
2_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
3_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
4_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
5_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
6_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
7_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
L_web_IB	380	480	425	425	380	-10.59
T_web_IB	8	12	13	10	8(11)	-20.00
L_Flange_IB	155	200	175	175	155	-11.43
T_Flange_IB	14	19	20	17	14(17)	-17.65

L_web_EB	420	525	475	475	420	-11.58
T_web_EB	8	12	12	9	8(11)	-11.11
L_Flange_EB	135	165	150	150	135	-10.00
T_Flange_EB	14	19	20	17	14(17)	-17.65
Min DB mass [tons]			261.14	212.56	159.95	-24.75

OPT Case 6(RSM_NLPQL)

12 input-values and two constrain (Smax-Tmax)

From which 8 input-values stiffeners at External & Inner Bottom

* All thickness values in mm

** Selected based on slenderness requirements

Πίνακας 6: Στοιχεία των μεταβλητών εισόδου της βελτιστοποίησης.

	Min**(net th.)	Max	Reference (Mid-ship plan)	Reference Net Thickness	Optimal Value(gross thick.)	% Difference from reference
External_B thick.	11	23	21	18	11(15)	-38.89
Inner_B thick.	11	25	25	19.5	11(16.5)	-43.59
Girder thick. (x5)	13	21	16	13	17.5(20.5)	+34.62
Floor thick.(x7)	11	23	18	15	11(14)	-26.67
L_web_IB	380	480	425	425	380	-10.59
T_web_IB	8	12	13	10	8(11)	-20.00
L_Flange_IB	155	200	175	175	155	-11.43
T_Flange_IB	14	19	20	17	14(17)	-17.65
L_web_EB	420	525	475	475	420	-11.58
T_web_EB	8	12	12	9	8(11)	-11.11
L_Flange_EB	135	165	150	150	135	-10.00
T_Flange_EB	14	19	20	17	14(17)	-17.65
Min DB mass [tons]			261.14	212.56	160.90	-24.30

OPT Case 8(NLPQL)

24 input-values and two constrain (Smax-Tmax)

From which 8 input-values stiffeners at External & Inner Bottom and 2 input-values at girders

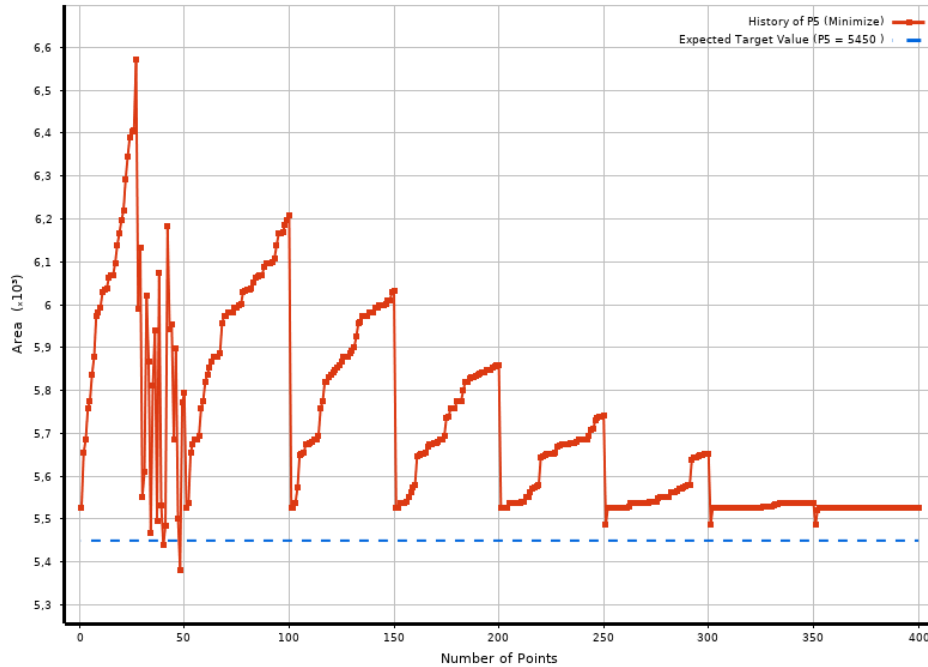
* All thickness values in mm

** Selected based on slenderness requirements

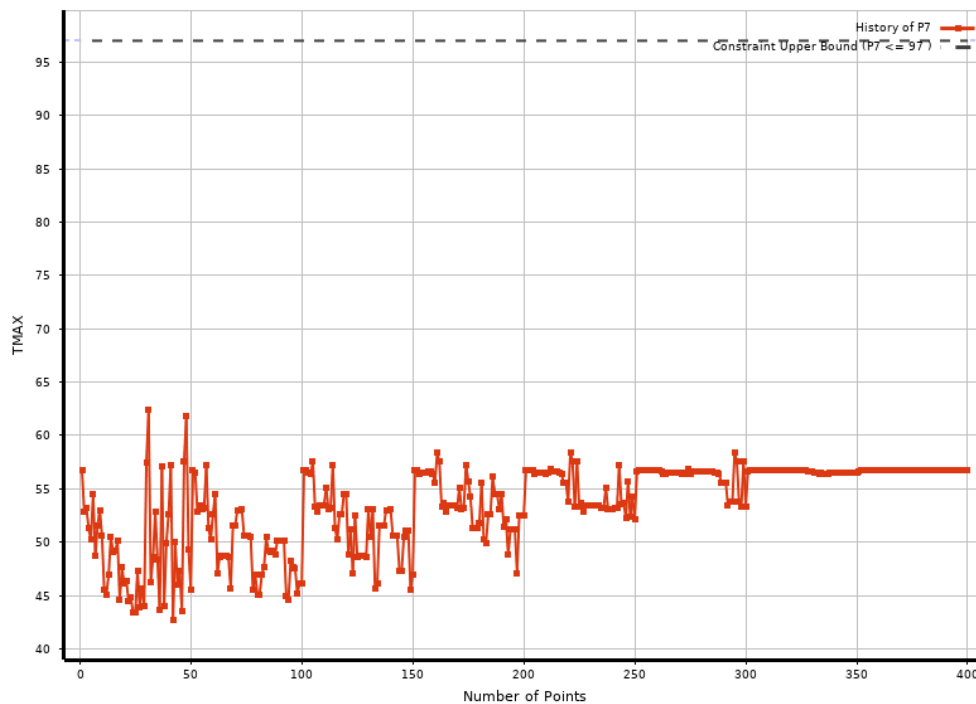
Πίνακας 7: Στοιχεία των μεταβλητών εισόδου της βελτιστοποίησης.

	Min**(net th.)	Max	Reference (Mid-ship plan)	Reference Net Thickness	Optimal Value(gross thick.)	% Difference from reference
External_B thick.	11	23	21	18	11(14)	-38.89
Inner_B thick.	11	25	25	19.5	12(17.5)	-38.46
1_Girder thick.	13	21	16	13	13(16)	0.00
2_Girder thick.	13	21	16	13	16(19)	+23.08
3_Girder thick.	13	21	16	13	20(23)	+53.85
4_Girder thick.	13	21	16	13	13(16)	0.00
5_Girder thick.	13	21	16	13	13(16)	0.00
1_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
2_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
3_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
4_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
5_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
6_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
7_Floor thick.	11	23	18	15	11(14)	-26.67
L_web_IB	360	460	425	425	360	-15.30
T_web_IB	7	10	13	10	7(10)	-30.00
L_Flange_IB	107	170	175	175	107	-38.86
T_Flange_IB	9	20	20	17	9(12)	-47.06
L_web_EB	400	500	475	475	400	-15.79
T_web_EB	8	12	12	9	8(11)	-11.11
L_Flange_EB	120	150	150	150	120	-20.00
T_Flange_EB	8	18	20	17	8(11)	-52.94
L_FB	160	200	200	200	160	-20.00
T_FB	8	12	15	12	8(11)	-33.33
Min DB mass [tons]			261.14	212.56	148.16	-30.30

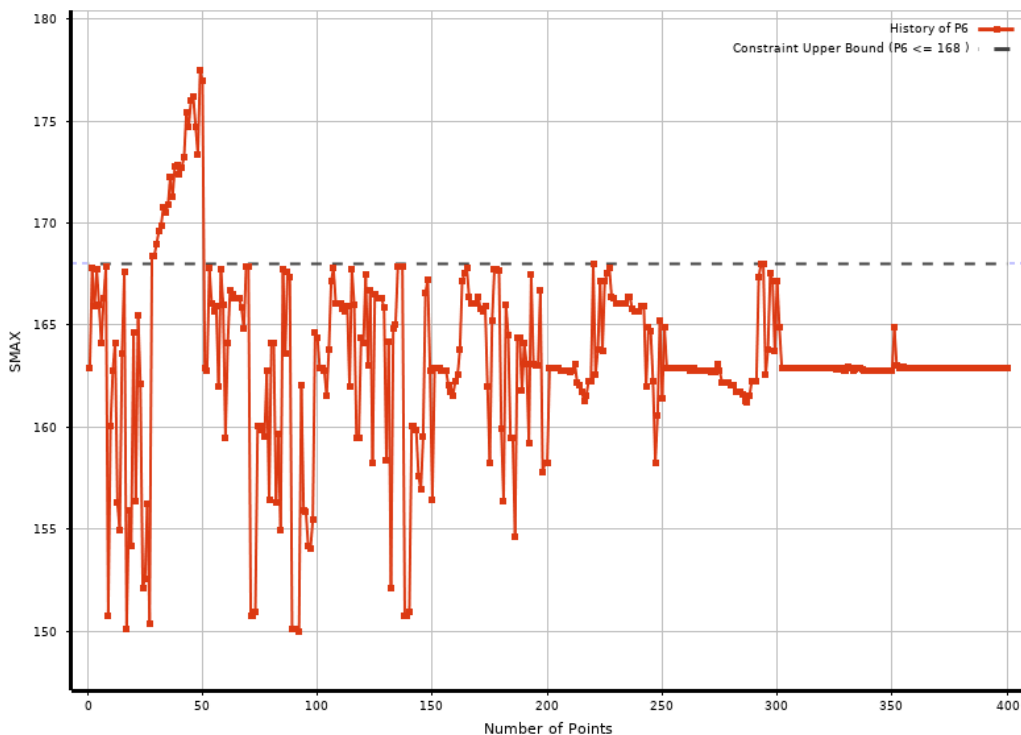
Διαγράμματα Βελτιστοποίησης δοκού Workbench



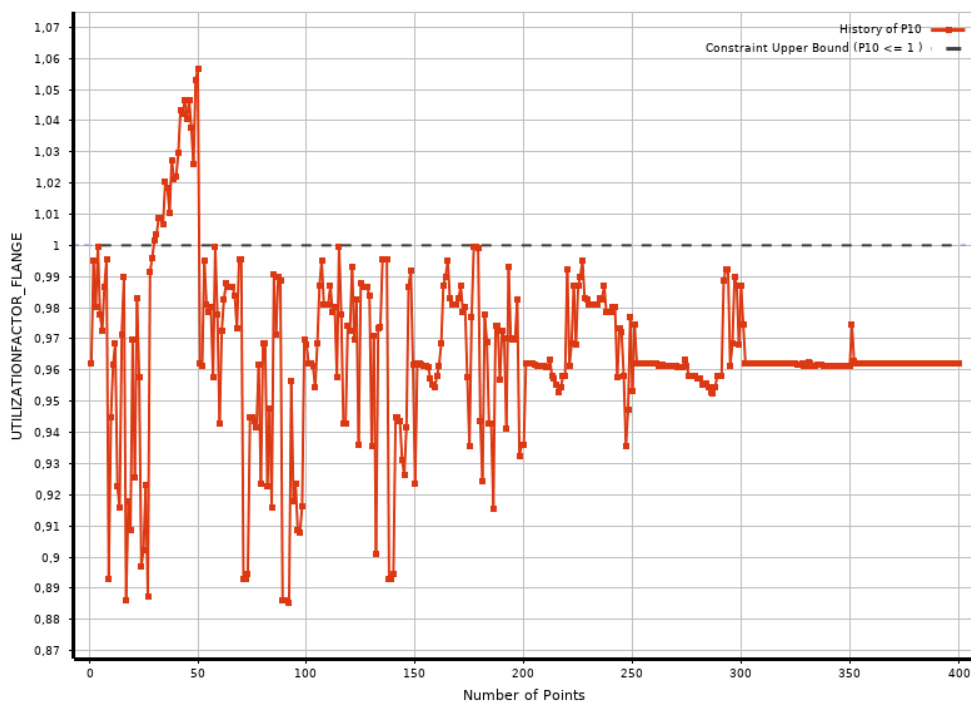
Σχήμα 1: Μεταβολή τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής), για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου MOGA (50 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Mid-Plane.



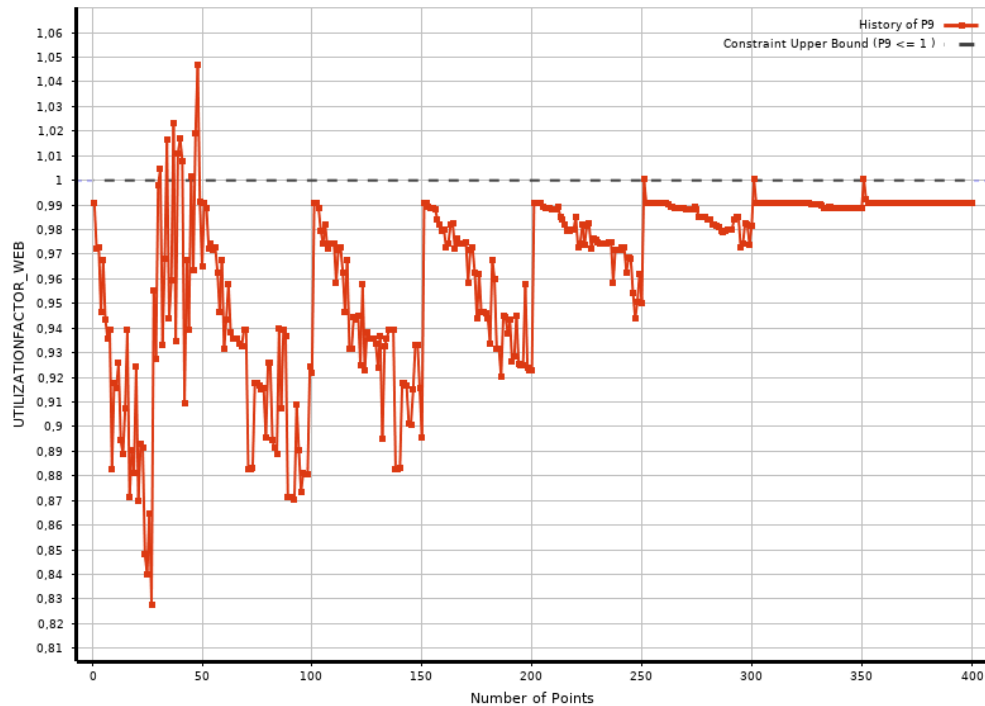
Σχήμα 2: Μεταβολή τιμής της μέγιστης διατμητικής τάσης του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου MOGA (50 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Mid-Plane.



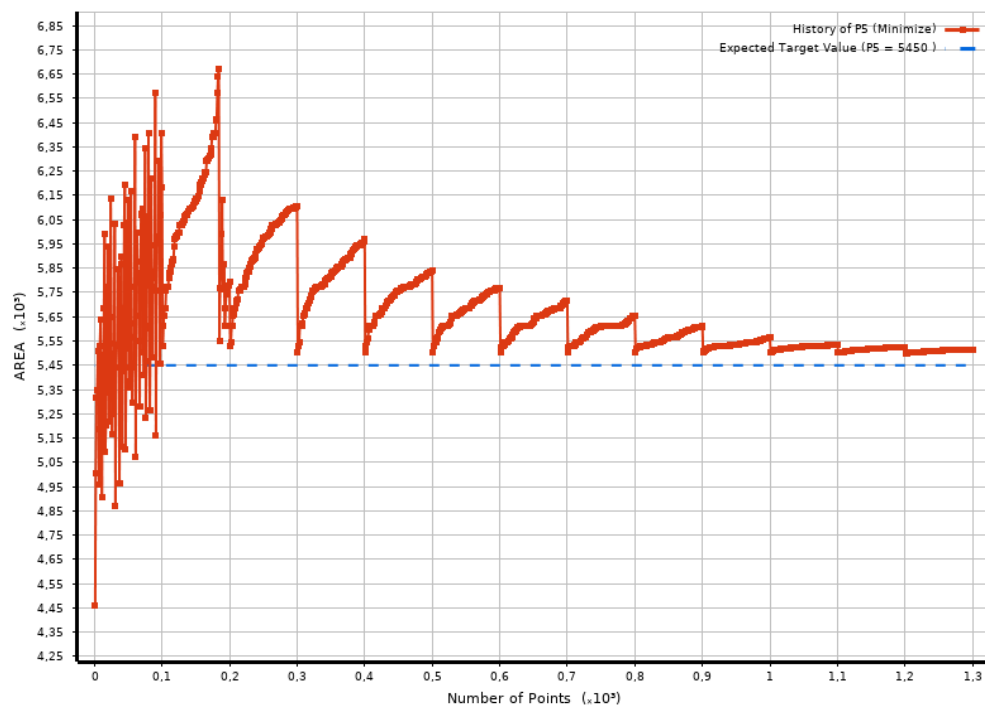
Σχήμα 3: Μεταβολή τιμής της μέγιστης τάσης Von Mises του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου MOGA (50 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Mid-Plane.



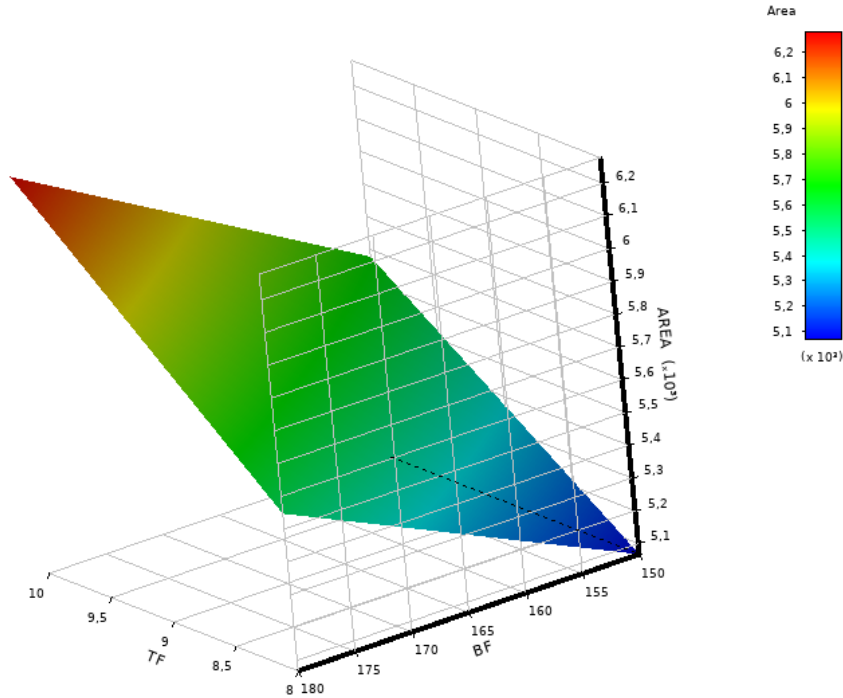
Σχήμα 4: Μεταβολή τιμής του βαθμού εκμετάλλευσης φλάτζας της δοκού του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου MOGA (50 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Mid-Plane.



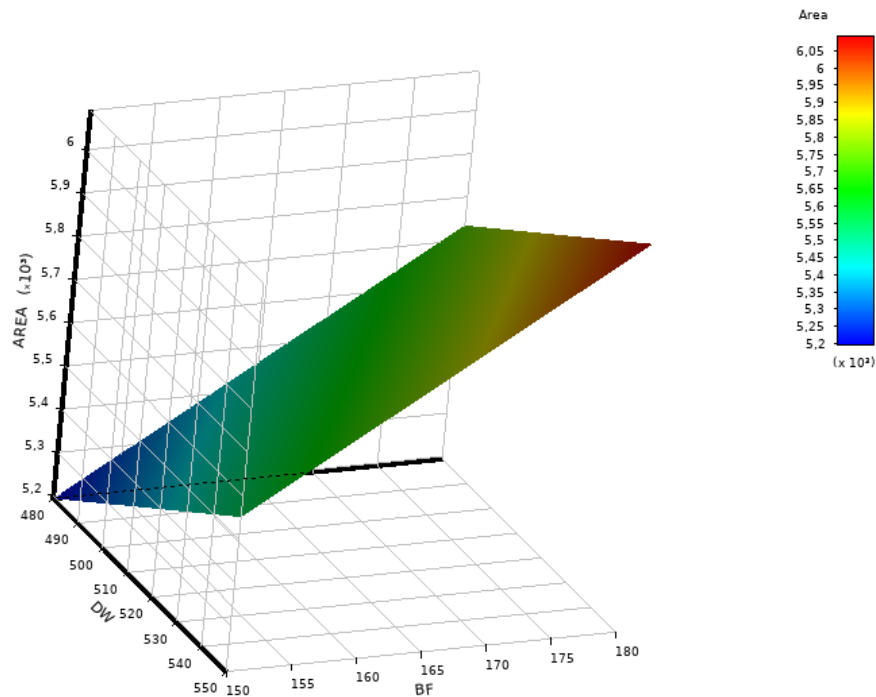
Σχήμα 5: Μεταβολή τιμής του βαθμού εκμετάλλευσης κορμού της δοκού του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου MOGA (50 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Mid-Plane.



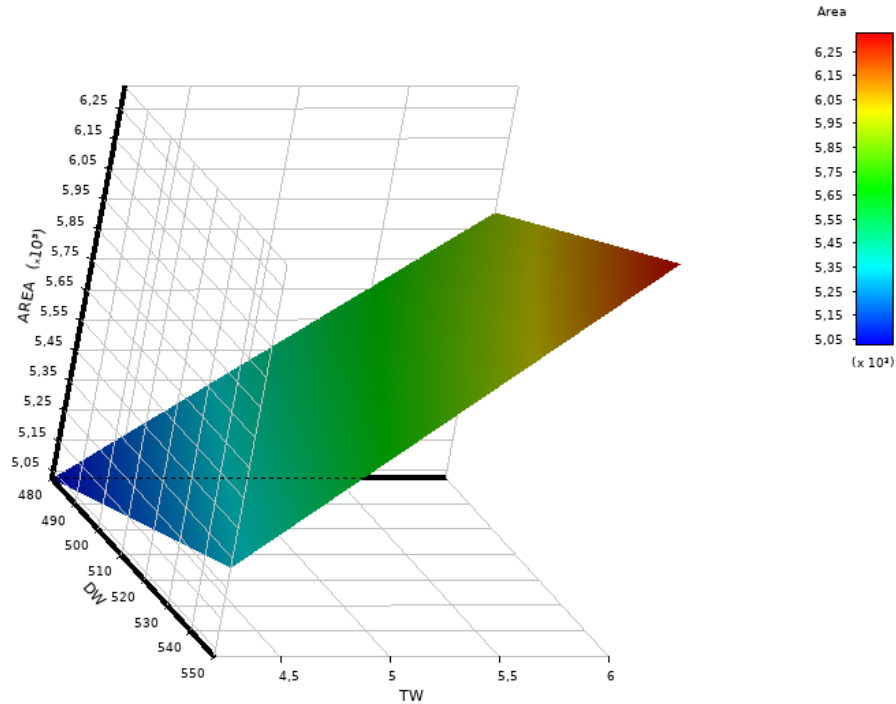
Σχήμα 6: Μεταβολή τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής), για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Mid-Plane.



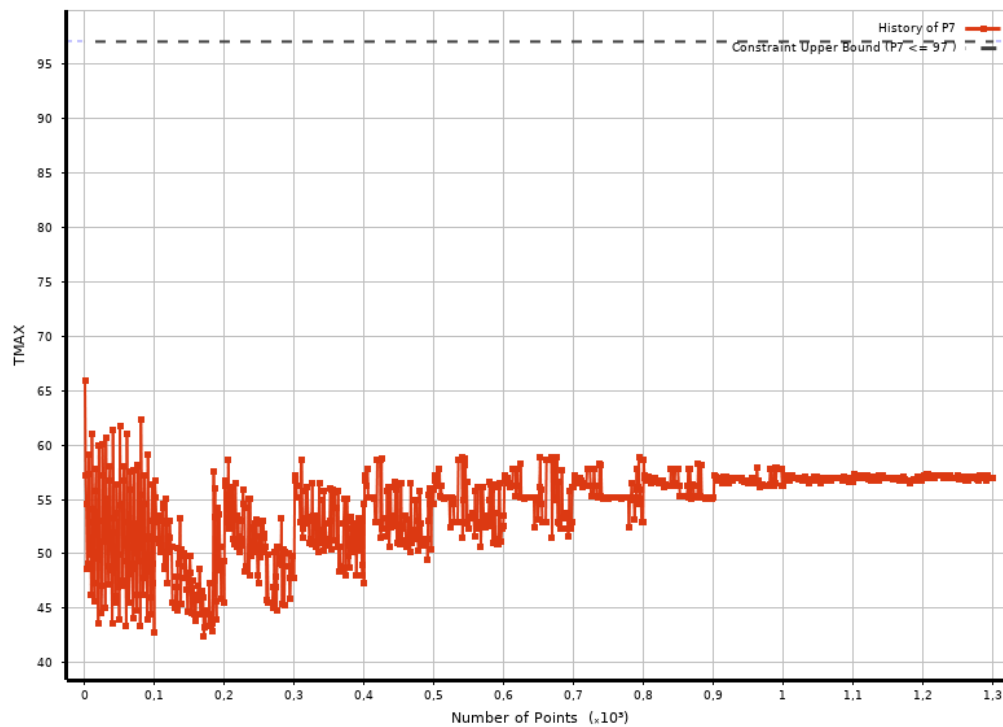
Σχήμα 7: Επιφάνεια απόκρισης της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής) συναρτήση των διαστάσεων t_f και b_f , για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Mid-Plane.



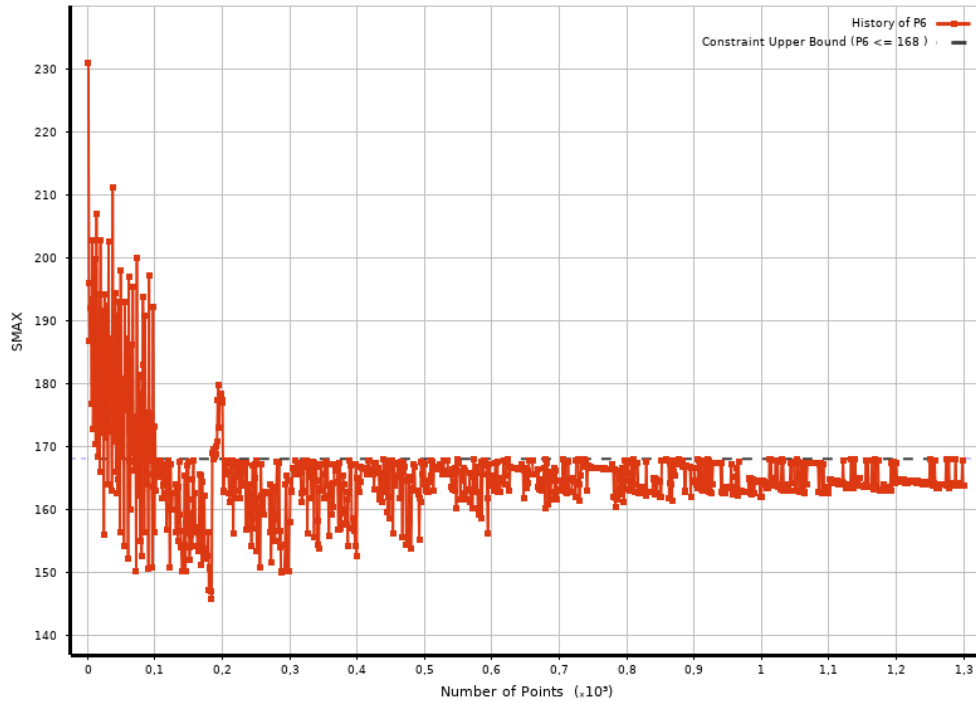
Σχήμα 8: Επιφάνεια απόκρισης της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής) συναρτήση των διαστάσεων d και b_f , για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Mid-Plane.



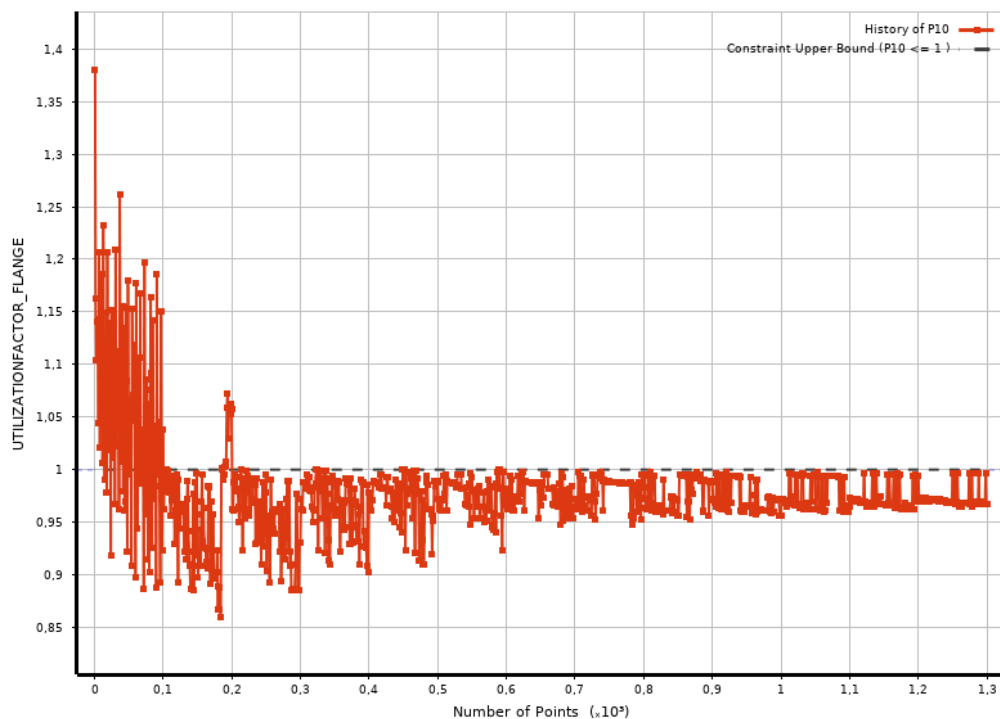
Σχήμα 9: Επιφάνεια απόκρισης της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής) συναρτήσει των διαστάσεων d και t_w , για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Mid-Plane.



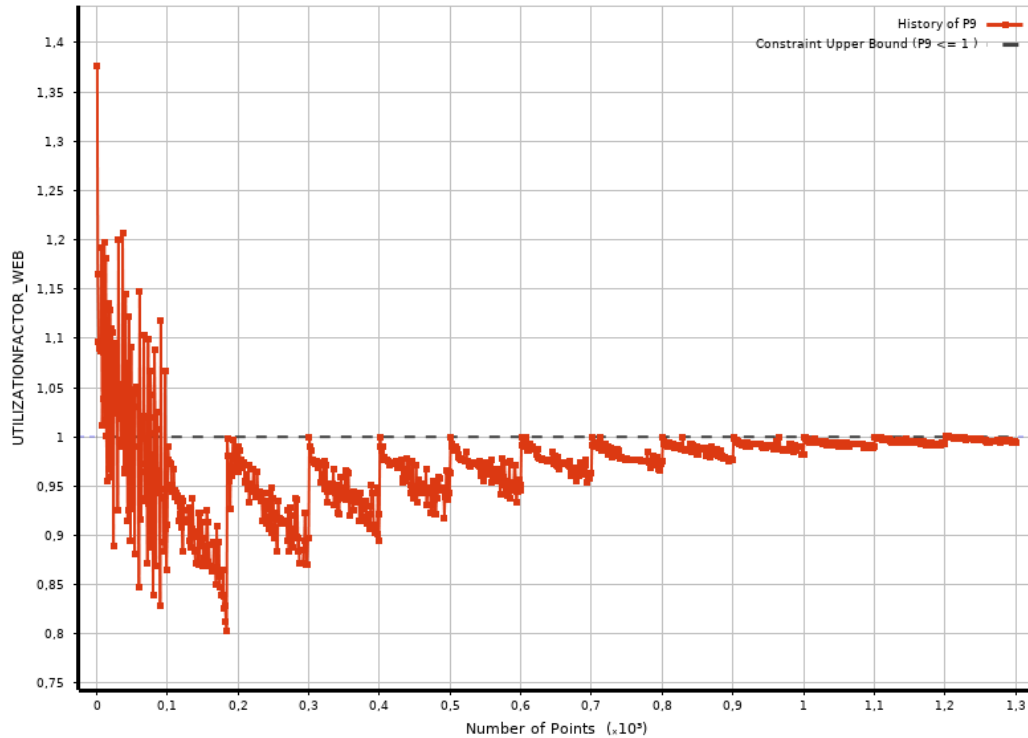
Σχήμα 10: Μεταβολή τιμής της μέγιστης διατμητικής τάσης του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Mid-Plane.



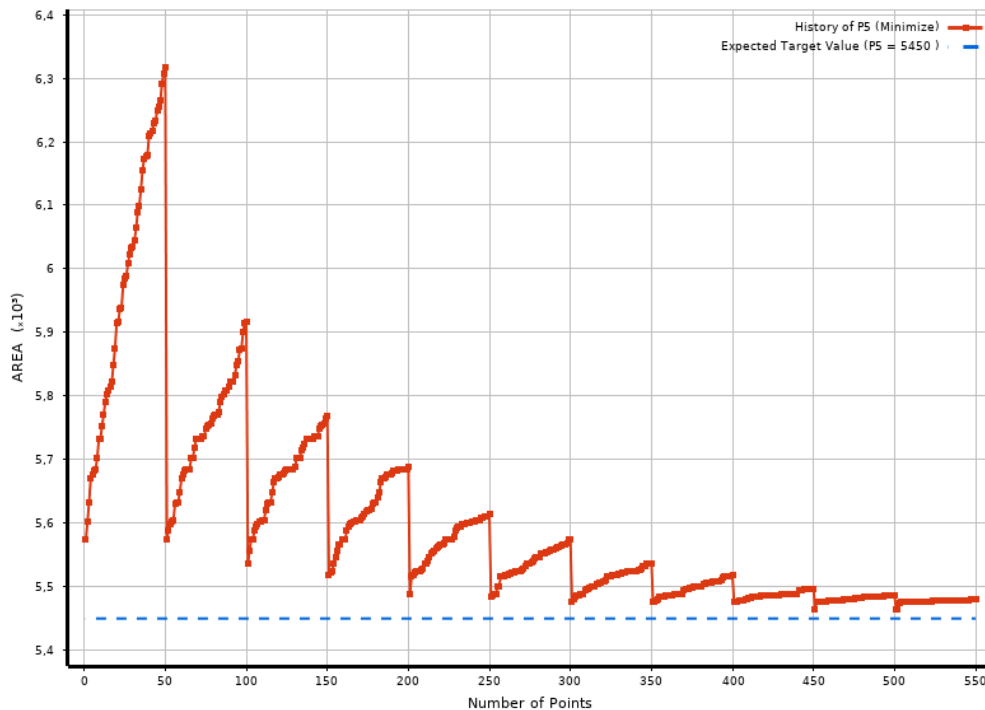
Σχήμα 11: Μεταβολή τιμής της μέγιστης τάσης Von Mises του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Mid-Plane.



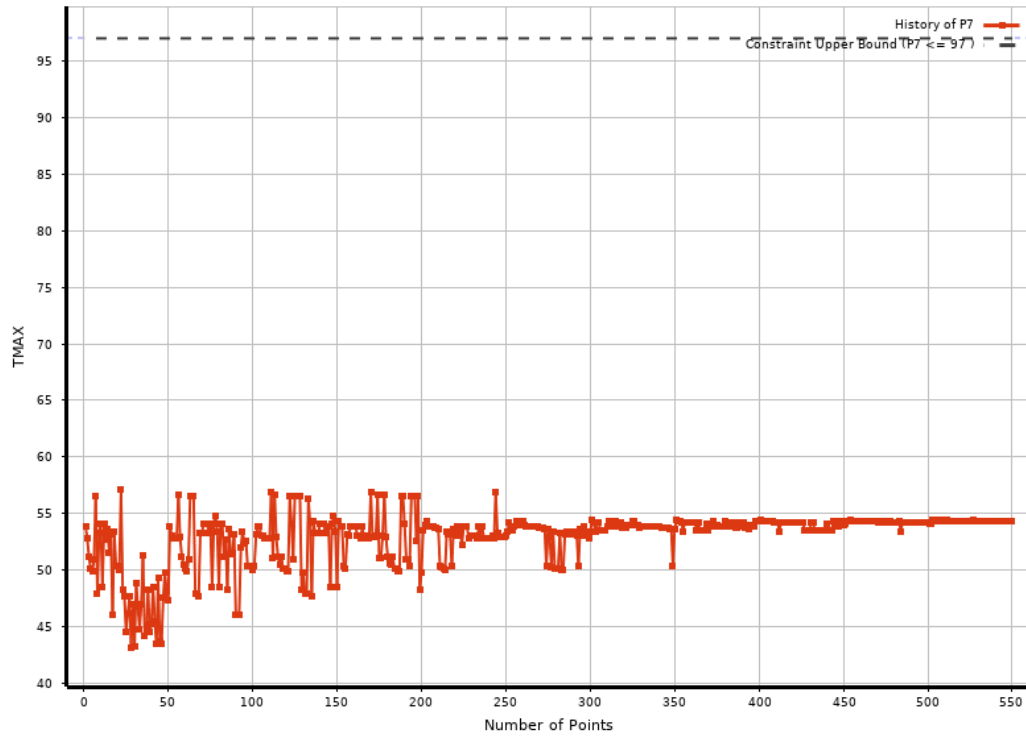
Σχήμα 12: Μεταβολή τιμής του βαθμού εκμετάλλευσης φλάτζας της δοκού του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Mid-Plane.



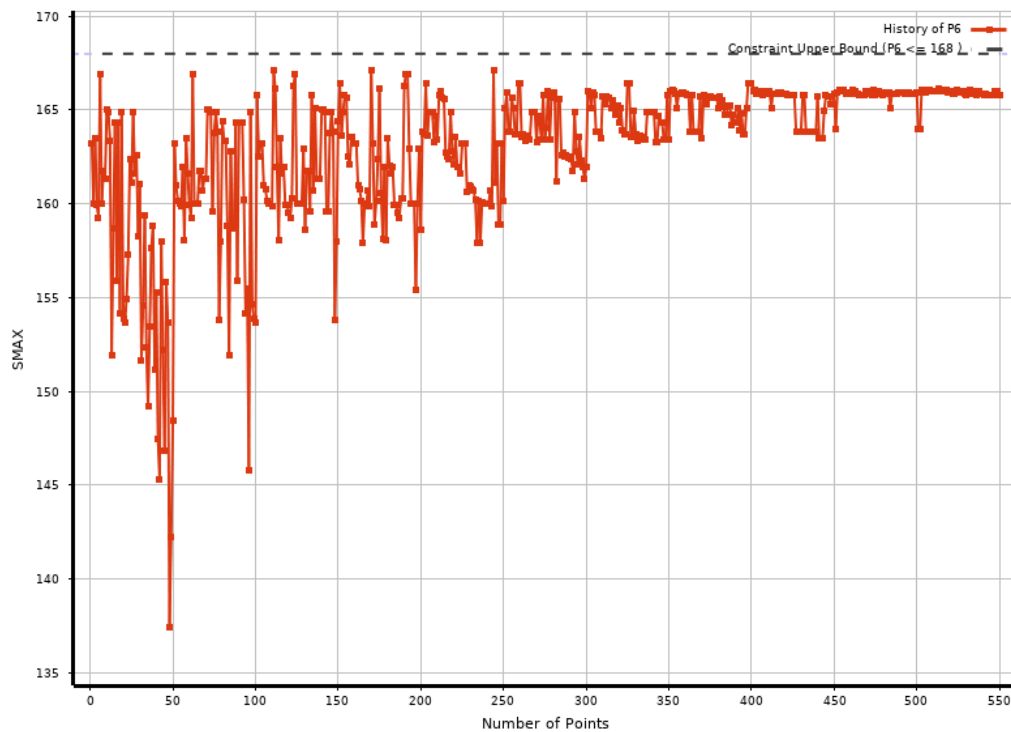
Σχήμα 13: Μεταβολή τιμής του βαθμού εκμετάλλευσης κορμού της δοκού του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Mid-Plane.



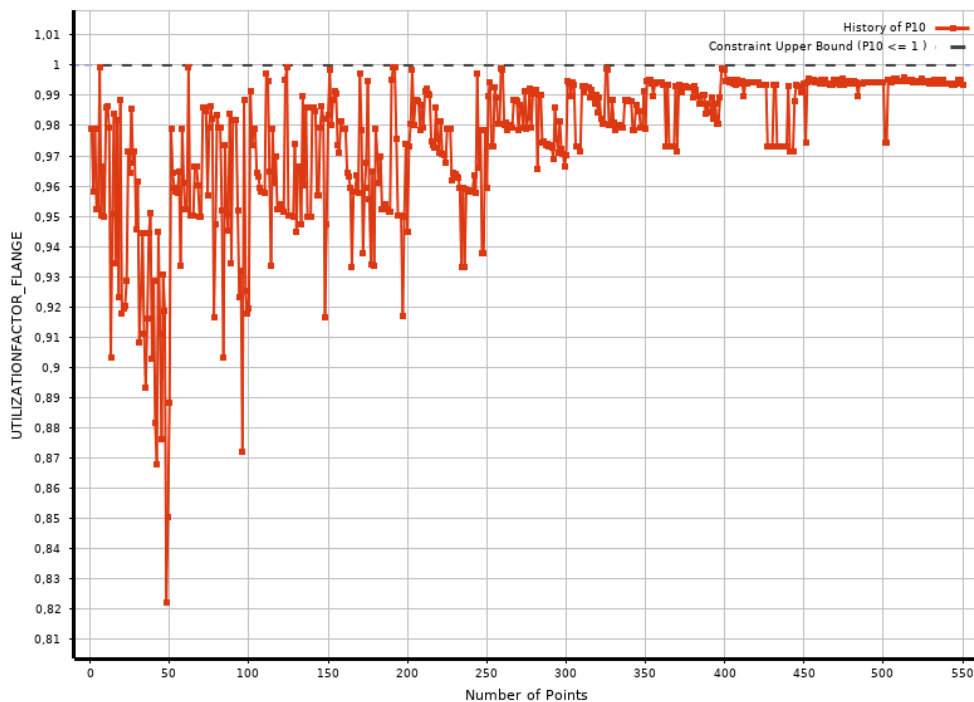
Σχήμα 14: Μεταβολή τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής), για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου MOGA (50 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Offcet.



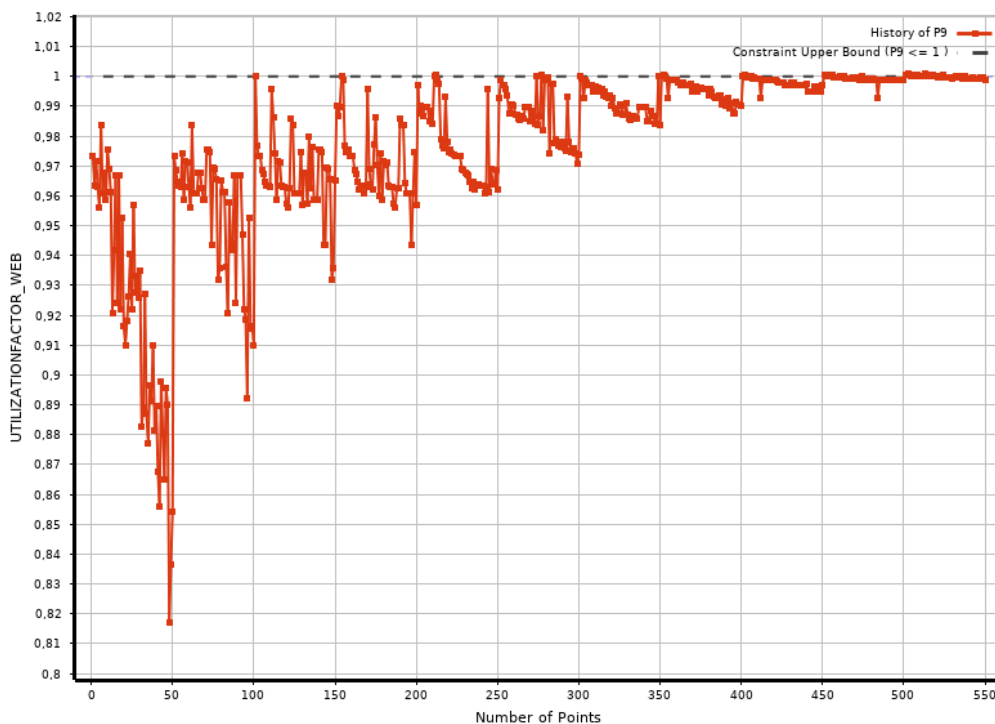
Σχήμα 15: (Αριστερά) Μεταβολή τιμής της μέγιστης διατμητικής τάσης του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου MOGA (50 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Mid-Offcet.



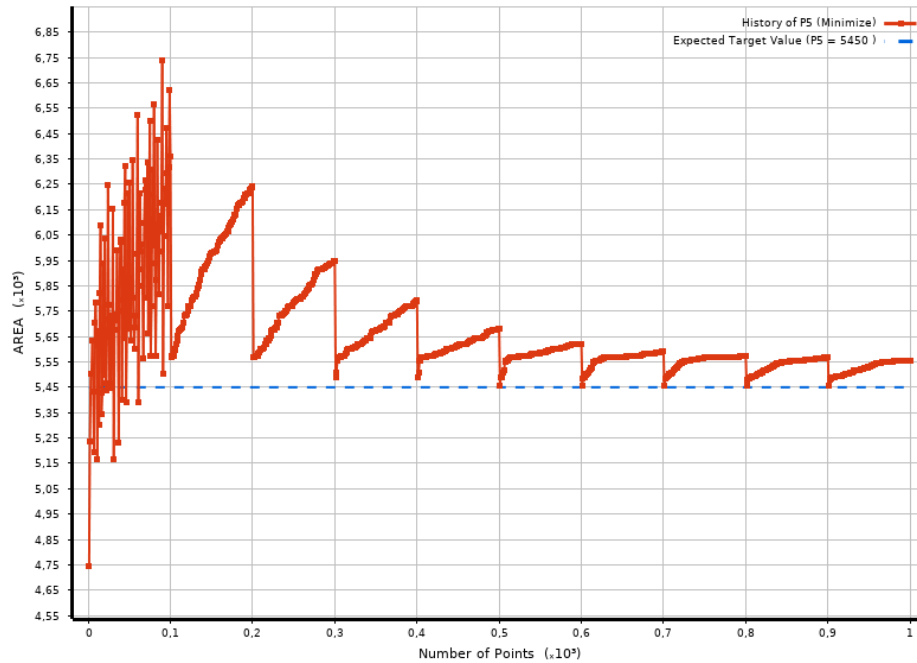
Σχήμα 16: Μεταβολή τιμής της μέγιστης τάσης Von Mises του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου MOGA (50 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Offcet.



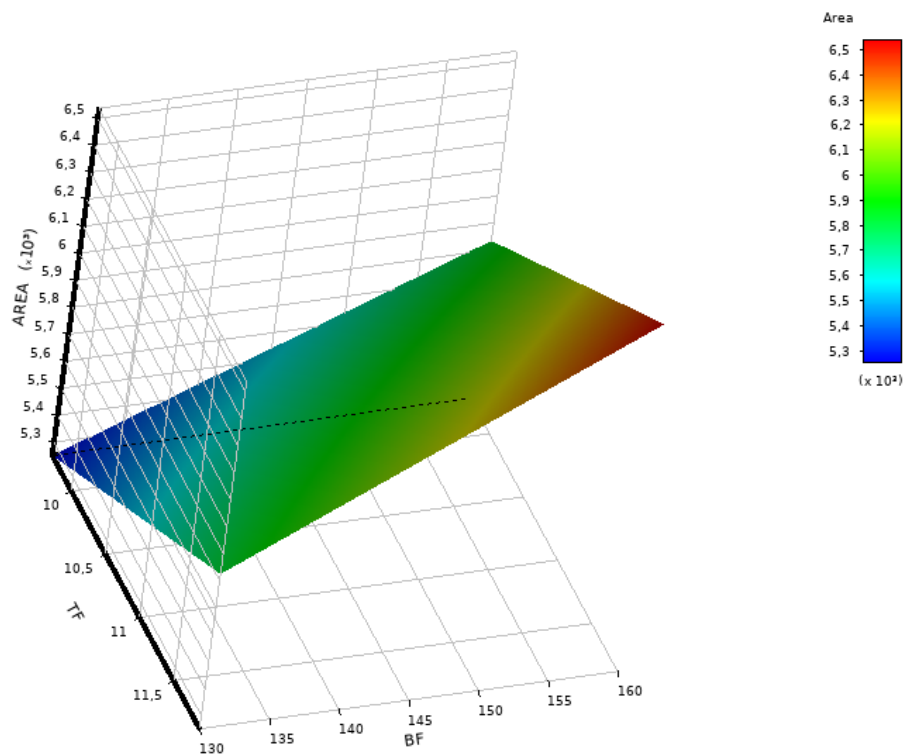
Σχήμα 17: Μεταβολή τιμής του βαθμού εκμετάλλευσης φλάτζας της δοκού του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου MOGA (50 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Offcet.



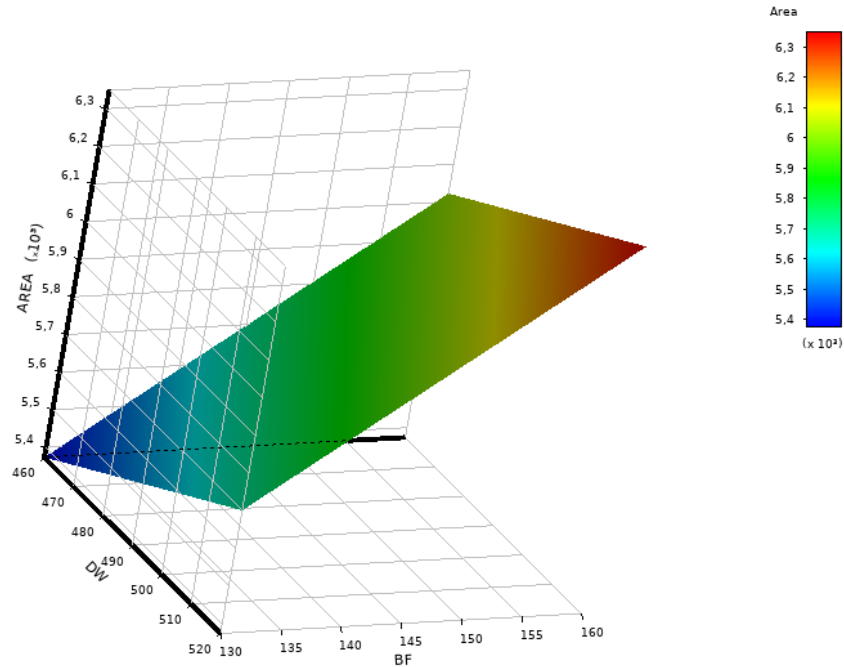
Σχήμα 18: Μεταβολή τιμής του βαθμού εκμετάλλευσης κορμού της δοκού του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου MOGA (50 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Offcet.



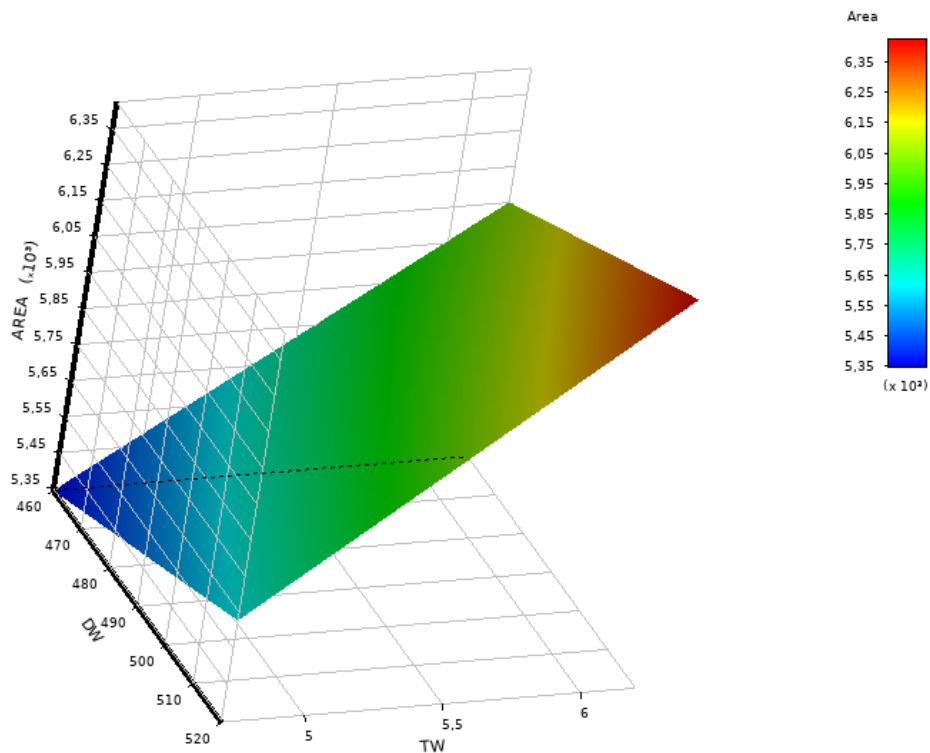
Σχήμα 19: Μεταβολή τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής), για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Offcet.



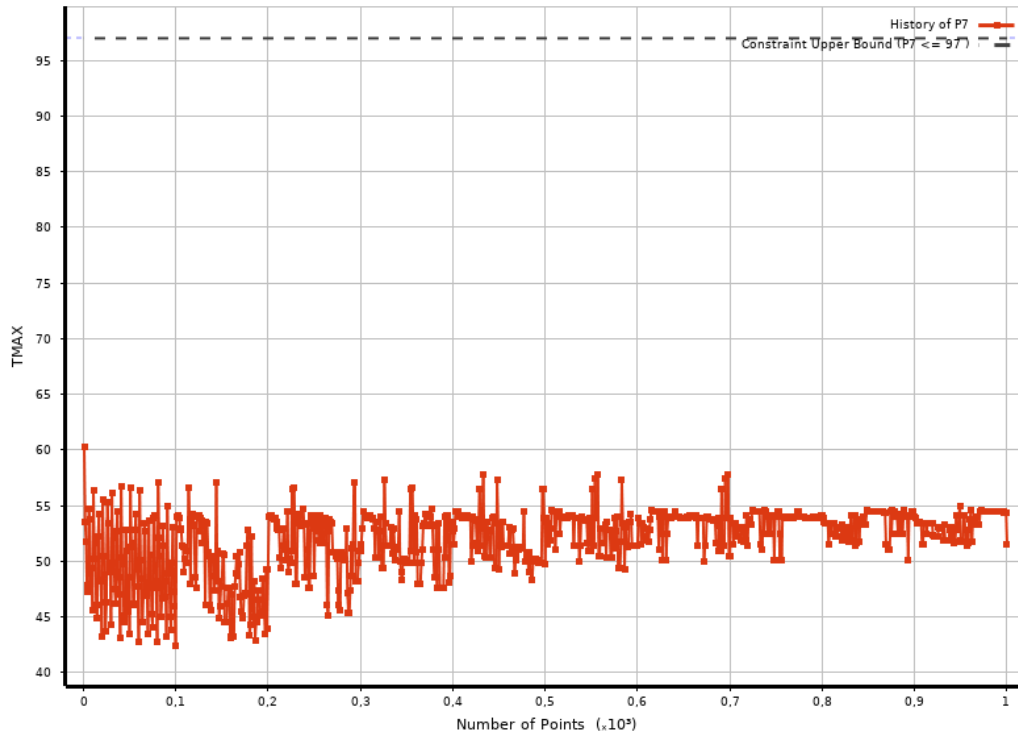
Σχήμα 20: Επιφάνεια απόκρισης της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής) συναρτήσει των διαστάσεων t_f και b_f , για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_offcet.



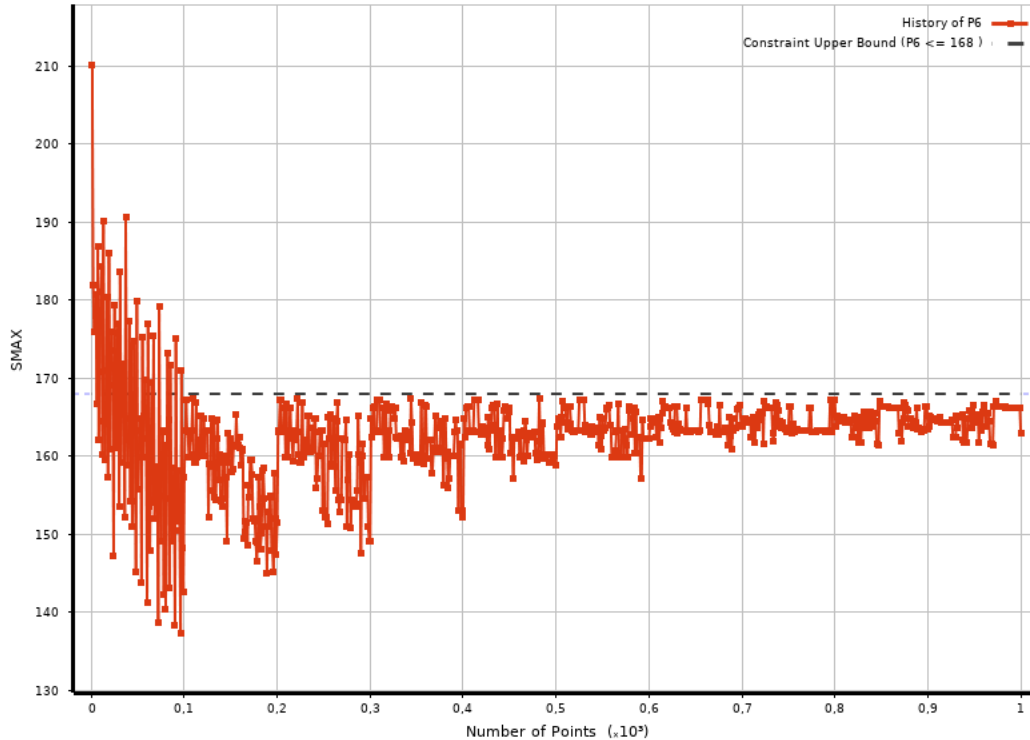
Σχήμα 21: Επιφάνεια απόκρισης της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής) συναρτήση των διαστάσεων d και b_f , για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Offcet.



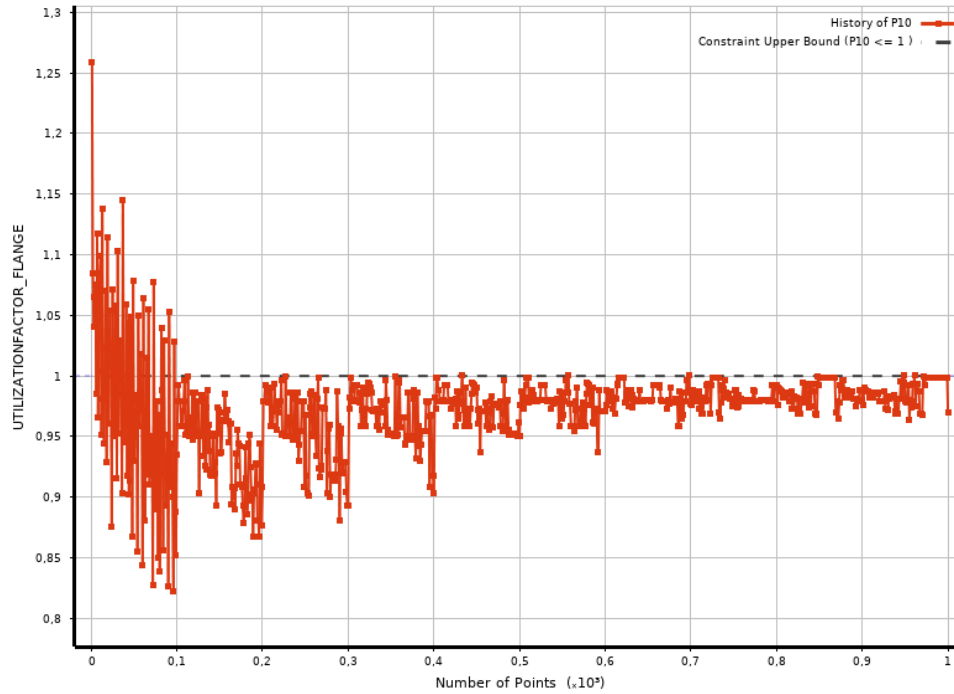
Σχήμα 22: Επιφάνεια απόκρισης της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (εμβαδόν διατομής) συναρτήση των διαστάσεων d και t_w , για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Offcet.



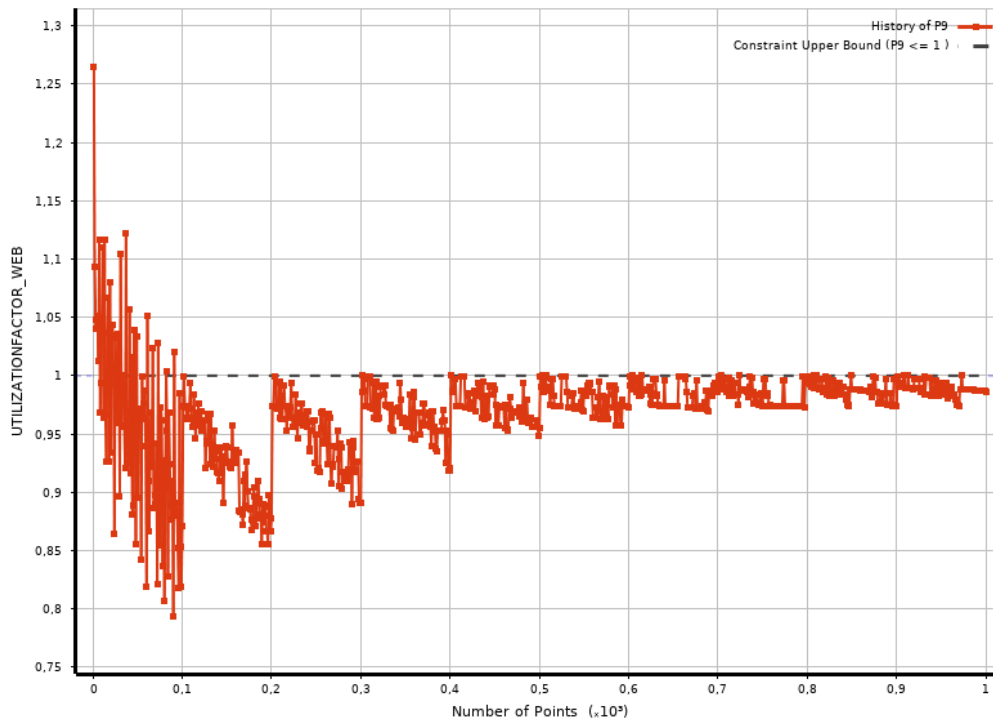
Σχήμα 23: Μεταβολή τιμής της μέγιστης διατμητικής τάσης του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Offcet.



Σχήμα 24: Μεταβολή τιμής της μέγιστης τάσης Von Mises του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Offcet.



Σχήμα 25: Μεταβολή τιμής του βαθμού εκμετάλλευσης φλάτζας της δοκού του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Offcet.



Σχήμα 26: Μεταβολή τιμής του βαθμού εκμετάλλευσης κορμού της δοκού του προβλήματος, για όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου RSM_MOGA (100 δείγματα ανά επανάληψη) για την μοντελοποίηση Shell_1_Offcet.