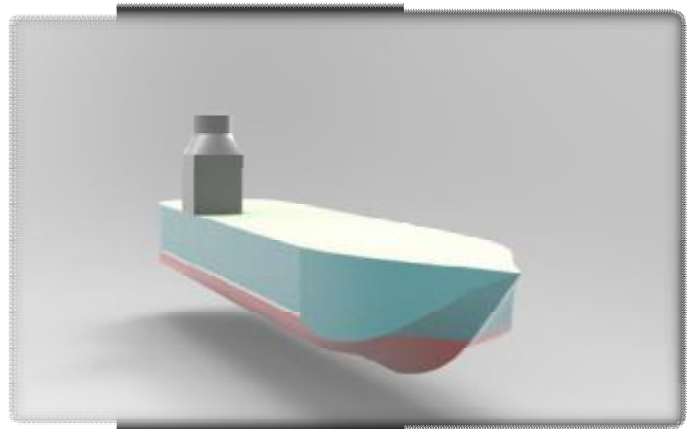
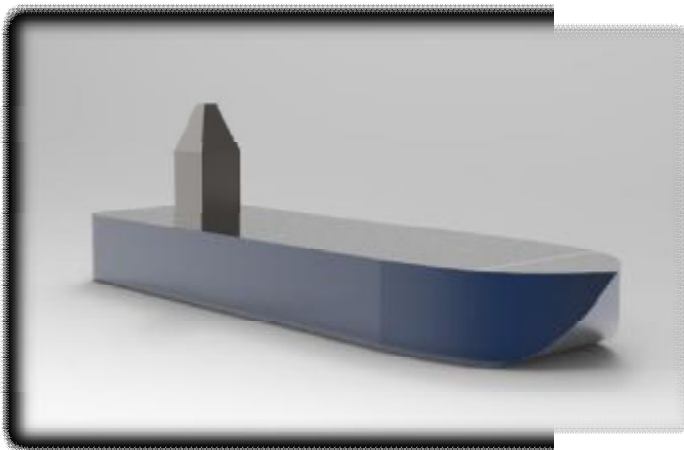


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΝΟΜΩΝ ΠΛΟΙΟΥ ΒΑΣΕΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ ΝΗΟΓΝΩΜΟΝΑ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΧΟΡΤΑΡΓΙΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ  
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΑΤΡΑ 2017

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρών τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας. Κατά την εκπόνηση ειδικεύτηκα σε ένα πολύ σημαντικό και ενδιαφέρον αντικείμενο για κάθε μηχανολόγο, την μοντελοποίηση και ανάλυση μοντέλων με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο σε σχέση με τη θεωρία της στατικής και της αντοχής των υλικών με βοήθησαν ώστε να κατανοήσω το αντικείμενο πάνω στο οποίο εργάσθηκα.

Το κύριο θέμα της εργασίας, είναι η στατική και δομική ανάλυση 2 διαφορετικών τύπων πλοίων και η βελτιστοποίηση τους, δηλαδή πως συμπεριφέρονται κάτω από την επίδραση συγκεκριμένων στατικών φορτίων, καθώς και πώς η αλλαγή στο πάχος ορισμένων τμημάτων της κατασκευής τους, επηρεάζει την κατανομή των τάσεων σε ολόκληρο το πλοίο. Αυτό έγινε με τη βοήθεια του εμπορικού πακέτου λογισμικού ANSYS, που χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση διαφόρων προβλημάτων.

Αρχικά, έγινε ο σχεδιασμός της γεωμετρίας των δύο πλοίων σε ένα CAD λογισμικό, το Spaceclaim με σκοπό την εισαγωγή τους στο πρόγραμμα προσομοιώσεων της ANSYS. Εφόσον σχεδιάστηκαν οι γεωμετρίες, στη συνέχεια, έκανα την εισαγωγή των μοντέλων στο πρόγραμμα προσομοίωσης ώστε να προχωρήσω στην διακριτοποίηση και ύστερα στην προσομοίωση κάποιων φορτίων, με σκοπό να εξετάσω τη συμπεριφορά τους και με τη βοήθεια νηογνώμονα να ελέγξω την δομική τους ακεραιότητα.

Ευχαριστώ τον κύριο Στέφανο Τσινόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. για το χρόνο του, την πολύτιμη βοήθεια του και τις προτάσεις του σε όλα τα στάδια μελέτης της Πτυχιακής μου εργασίας.

Κωνσταντίνος Χορταργιάς  
Φεβρουάριος 2017

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα Πτυχιακή Εργασία γίνεται η στατική ανάλυση δύο διαφορετικού τύπου πλοίων και ο έλεγχος της δομικής ακεραιότητάς του ενός με βάση νηογνώμονα.

Κάθε μέρος του πλοίου συμπεριφέρεται διαφορετικά κάτω από το ίδιο φορτίο για αυτό το λόγο πολλές φορές πρέπει να γίνει βελτιστοποίηση ορισμένων τμημάτων του πλοίου, είτε με την αύξηση του πάχους τους, είτε με την προσθήκη επιπρόσθετων νεύρων τα οποία είναι και αυτά που προσδίδουν την σκληρότητα στο πλοίο.

Η Πτυχιακή αυτή αποτελείται από 4 κεφάλαια και 1 παράρτημα, εκ των οποίων το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται στην θεωρία την αντοχής των υλικών και των παραμορφώσεων και του κριτηρίου αστοχίας Von Misses.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναδρομή στον τρόπο κατασκευής των πλοίων από την αρχαιότητα μέχρι τώρα. Επίσης θα γίνει εκτενής αναφορά στους νηογνώμονες και στην σημασία της δουλειάς τους και θα αναφέρω την σχέση των πεπερασμένων στοιχείων με τους νηογνώμονες

Στο τρίτο κεφάλαιο θα αναλύσω την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και θα αναφέρω την σχέση των πεπερασμένων στοιχείων με τους νηογνώμονες.

Το τέταρτο κεφάλαιο θα είναι η ανάλυση που έκανα στα δύο (2) διαφορετικά πλοία. Αφού θα γίνει η διακριτοποίηση θα εφαρμόσω τις συνοριακές συνθήκες στα δύο (2) πλοία και θα αναλύσω τα αποτελέσματα που θα βρω. Στο πρώτο πλοίο γίνεται μία απλή ανάλυση, ενώ στο δεύτερο πλοίο γίνεται και βελτιστοποίηση και έλεγχος λυγισμού με βάση τις οδηγίες νηογνώμωνων.

Στο παράρτημα γίνεται ανάλυση μίας απλής δοκού με το πρόγραμμα προσομοίωσης της ANSYS. Ξεκινάω από τη γεωμετρία της δοκού, συνεχίζω με τη διακριτοποίηση, εφαρμόζω της συνοριακές συνθήκες και ύστερα πραγματοποιείται η επίλυσή του, παράλληλα γίνεται και η εξήγηση κάθε βήματος που ακολουθείται.

## **ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ**

Πεπερασμένα στοιχεία, Μοντελοποίηση, Πρόγραμμα προσομοίωσης της ANSYS, Πρόγραμμα σχεδιασμού CAD, Ναυπηγική, Πλοίο, Στατική ανάλυση, Αστοχία, Νηογνώμονας, Αντοχή υλικών, Παραμόρφωση, Κριτήριο αστοχίας, Λυγισμός, Διακριτοποίηση, Συνοριακές συνθήκες.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1. <b>ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ</b> .....	3
1.1. <b>ΤΑΣΗ</b> .....	3
1.1.1. <b>Η έννοια των τάσεων</b> .....	3
1.1.2. <b>Ορθές τάσεις</b> .....	3
1.1.3. <b>Διατμητικές ή πλάγιες ή εγκάρσιες τάσεις</b> .....	4
1.1.4. <b>Μονάδες μετρήσεως τάσεων</b> .....	5
1.1.5. <b>Συστήματα και μονάδες μέτρησης</b> .....	5
1.2. <b>ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ</b> .....	5
A. <b>Ελεύθερη έδραση ή κύλιση</b> .....	7
B. <b>Άρθρωση</b> .....	8
C. <b>Πάκτωση</b> .....	8
1.3. <b>ΦΟΡΤΙΑ</b> .....	9
1.4. <b>ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ</b> .....	10
1.4.1. <b>Πείραμα εφελκυσμού</b> .....	10
1.4.2. <b>Τύποι διαγραμμάτων εφελκυσμού</b> .....	14
1.4.3. <b>Ανηγμένη επιμήκυνση</b> .....	15
1.4.4. <b>Μέτρο ελαστικότητας (Young Modulus)</b> .....	16
1.4.5. <b>Λόγος Poisson (Poisson's ratio)</b> .....	17
1.4.6. <b>Φαινόμενο δημιουργίας λαιμού</b> .....	18
1.4.7. <b>Όλκιμα και ψαθυρά υλικά</b> .....	19

1.4.8.	Σκληρότητα υλικού.....	20
1.5.	Λυγισμός.....	21
1.5.1.	Θεωρία λυγισμού.....	21
1.5.2.	Η Θεωρία και ο τύπος του Euler .....	22
1.6.	Κριτήριο Αστοχίας κατά Von-Misses.....	28
2.	<b>ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ</b> .....	31
2.1.	Εισαγωγή.....	31
2.2.	Διάκριση ναυπηγημάτων .....	32
2.2.1.	Διάκριση ως προς την αποστολή.....	33
2.2.2.	Διάκριση των πλοίων εμπορικής μεταφοράς ως προς το φορτίο.....	34
2.3.	Ορολογία και ονοματολογία πλοίου.....	35
2.4.	Κατασκευαστική αντοχή.....	41
2.5.	Σχεδίαση πλοίων.....	42
2.5.1.	Εξέλιξη-Αρμοδιότητες.....	42
2.5.2.	Διαδικασία σχεδίασης.....	43
2.6.	Νηογνώμονες (classification societies) .....	47
3.	<b>ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ</b> .....	50
3.1.	Γενικά .....	50
3.2.	Βασικές έννοιες της μεθόδου.....	51
3.3.	Φάση προ-επεξεργασίας (pre-processing).....	55
3.4.	Φάση λύσης (solution).....	57
3.5.	Φάση μετα-επεξεργασίας (post-processing).....	58
4.	<b>ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ, ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ 2 ΤΥΠΩΝ ΠΛΟΙΩΝ.</b> .....	60
4.1.	<b>ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ CAD</b> .....	60

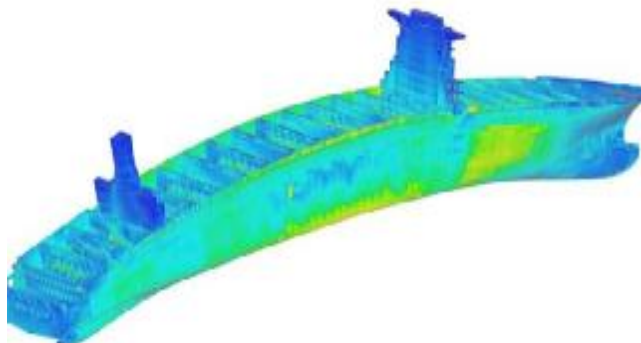
<b>4.2.</b>	<b>ΑΝΑΛΥΣΗ 1<sup>ΟΥ</sup> ΠΛΟΙΟΥ</b> .....	60
<b>4.3.</b>	<b>ΑΝΑΛΥΣΗ 2<sup>ΟΥ</sup> ΠΛΟΙΟΥ</b> .....	68
<b>5.</b>	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b> .....	86
<b>5.1.</b>	<b>Στατική ανάλυση δοκού</b> .....	86
<b>6.</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	96
6.1	Ελληνική Βιβλιογραφία .....	96
6.2	Ξένη Βιβλιογραφία.....	96
6.3	Πηγές Διαδικτύου.....	97

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρακάτω πτυχιακή εργασία μελετά την αντοχή δύο διαφορετικού τύπου πλοίων όταν αυτά υπόκεινται σε δύο διαφορετικά φορτία καθώς και τη δομική ακεραιότητα του ενός από τα δύο. Θέλησα να πραγματοποιήσω αυτή τη μελέτη διότι είναι πολύ συνηθισμένη και πολύ σημαντική στην ναυπηγική. Επίσης συμβάλει στην αντιμετώπιση πιθανών αστοχιών του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το πλοίο ή και κάποιου τμήματός του.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος προσομοίωσης της ANSYS το οποίο κάνει χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Πλέον τα πεπερασμένα στοιχεία επιλέγονται και από τους νηογνώμονες, πράγμα που τα έχει βάλει στην ναυπηγική βιομηχανία, κάτι που σημαίνει πως τα αποτελέσματά τους μπορούν να μελετηθούν και να ληφθούν υπόψη για την πρόληψη τυχόν αστοχιών καθώς και για μελλοντική βελτιστοποίηση των πλοίων.

Επιπρόσθετα, η χρήση των πεπερασμένων στοιχείων βοηθάει τις ναυπηγικές εταιρείες σε μεγάλο βαθμό, διότι με τη χρήση του προγράμματος σχεδιασμού CAD και του προγράμματος προσομοίωσης της ANSYS, οι εταιρείες μπορούν να δοκιμάζουν αλλαγές σε κάποια τμήματα του πλοίου προς την βελτίωσή του, χωρίς να έχουν το ρίσκο της αποτυχίας, καθώς όλα μπορούν να πραγματοποιηθούν από τον υπολογιστή χωρίς την κατασκευή πραγματικού μοντέλου, εξοικονομώντας έτσι χρήματα και χρόνο.

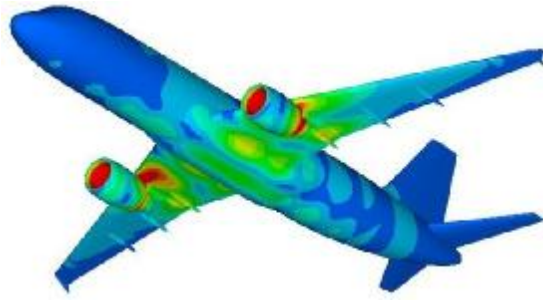


Στην πτυχιακή μου εργασία, το πρώτο βήμα ήταν να κατασκευάσω εξ' αρχής την γεωμετρία των δύο πλοίων χρησιμοποιώντας το σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD της ANSYS, στο οποίο πρόσθεσα και τα πάχη του κάθε τμήματος του πλοίου. Στη συνέχεια έβαλα την γεωμετρία του πρώτου πλοίου στο πρόγραμμα προσομοίωσης της ANSYS, έκανα την διακριτοποίηση σε σημείο ώσπου τα αποτελέσματα θα θεωρούνταν έγκριτα, εφάρμοσα τις συνοριακές συνθήκες που ασκούνται στο πλοίο και τέλος πήρα τα αποτελέσματα τα οποία σύγκρινα με τις ιδιότητες του υλικού ώστε να δω αν έχω κάποια αστοχία.

Στο δεύτερο πλοίο ακολούθησα ακριβώς την ίδια διαδικασία μέχρι τη διακριτοποίηση, καθώς μετά οι συνοριακές συνθήκες που εφάρμοσα ήταν με βάση τον νορβηγικό νηογνώμονα DNV GL και τις συνοριακές συνθήκες που είχαν σαν παράδειγμα στην επίσημη ιστοσελίδα τους και αφού πήρα και σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα, έκανα και μια ανάλυση δομικής ακεραιότητας του πλοίου με βάση πάλι τον νορβηγικό νηογνώμονα ώστε να ελέγξω αν υπάρχει λυγισμός σε κάποιο τμήμα του πλοίου.

Τέλος, δημιούργησα ένα Παράρτημα στο οποίο παρουσιάζω μια στατική ανάλυση μιας δοκού βήμα βήμα, ώστε να δείξω πως λειτουργεί το σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD καθώς και το πρόγραμμα προσομοίωσης με βάση τα πεπερασμένα στοιχεία. Γενικά τα





πεπερασμένα στοιχεία έχουν αρχίσει και μπαίνουν για τα καλά σε όλες τις μεγάλες βιομηχανίες όπως στην κατασκευή των πλοίων, αεροσκαφών, ηλεκτρομαγνητών κ.α. πράγμα που τα καθιστά ως μία μορφή τεχνολογίας η οποία στο προσεχές μέλλον θα θεωρείται απαραίτητη για τον τομέα της μηχανολογία και όχι μόνο, καθώς η εφαρμογή της δεν περιορίζεται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και για ιατρικούς σκοπούς. Αυτό δείχνει το πόσο μεγάλο είναι το εύρος που μπορούν να βρουν εφαρμογή τα πεπερασμένα στοιχεία και το πόσο αποτελεσματικά μπορούν να φανούν.

# 1. ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

## 1.1. ΤΑΣΗ

### 1.1.1. Η έννοια των τάσεων

Κάθε σώμα αποτελείται από μόρια τα οποία έλκονται μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να μένουν ενωμένα απαρτίζοντας ένα σώμα. Αν στο σώμα ενεργήσει μια εξωτερική δύναμη, τότε τα μόρια του σώματος αναπτύσσουν εσωτερικές δυνάμεις. **Τάση** ονομάζεται η συνισταμένη των εσωτερικών δυνάμεων που αναπτύσσουν τα μόρια ενός σώματος ανά μονάδα επιφάνειάς του, όταν στο σώμα ενεργούν εξωτερικές δυνάμεις.

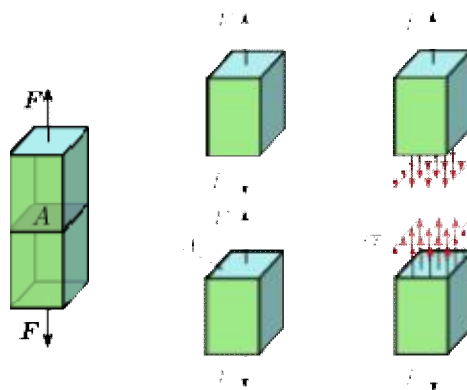
Θεωρούμε ότι οι εσωτερικές δυνάμεις είναι ομοιόμορφα κατανομημένες στις εξεταζόμενες επιφάνειες. Από τις διάφορες επιφάνειες που μπορεί να μελετήσει κάποιος σε ένα σώμα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην ατνοχή των υλικών παρουσιάζουν οι διατομές τους. Με κριτήριο τη διεύθυνση των δυνάμεων ως προς τη τις διατομές στις οποίες ενεργούν οι τάσεις διακρίνονται σε **ορθές** και **διαμητικές** ή **πλάγιες** ή **εγκάρσιες**

### 1.1.2. Ορθές τάσεις.

Όταν η εσωτερική δύναμη είναι κάθετη στη διατομή ενός σώματος, τότε οι τάσεις που αναπτύσσονται ονομάζονται ορθές και συμβολίζονται με  $\sigma$ . Αν ονομάσουμε  $F$  την εσωτερική δύναμη που αναπτύσσεται κάθετα στη διατομή ενός σώματος και  $A$  το εμβαδόν της διατομής, τότε τη ορθή τάση δίνεται από τη σχέση :

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

Η εσωτερική δύναμη  $F$  που αναπτύσσεται κάθετα στη διατομή ενός σώματος ονομάζεται **ορθή δύναμη**.



Εικόνα 1. Ορθή Τάση σε ορθογωνική διατομή

Ξέροντας την ασκούμενη δύναμη και το εμβαδόν διατομής μπορούμε να βρούμε σε μονάδες πίεσης ( $N/m^2$ ), την ασκούμενη δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας της εγκάρσιας διατομής. Διαιρώντας τη δύναμη με το εμβαδό της εγκάρσιας διατομής, παίρνουμε τη μέση ένταση που έχουν αυτές οι κατανεμημένες, κάθετες στη διατομή δυνάμεις, δηλαδή τη μέση **αξονική τάση ( $\sigma$ )** που ασκείται στη διατομή του μέλους της κατασκευής.

Συνήθως χρησιμοποιούμε θετικό πρόσημο για εφελκυστική τάση (tensile stress) και αρνητικό πρόσημο για θλιπτική τάση (compressive stress). Τα ( $N/m^2$ ), τα οποία είναι η μονάδα μέτρησης της πίεσης στο διεθνές σύστημα μονάδων ή «Μετρικό σύστημα» ονομάζεται και Pascal (Pa) προς τιμήν του Γάλλου φιλοσόφου, φυσικού και μαθηματικού Μπλεζ Πασκάλ. Όπως σε όλες τις μονάδες μέτρησις, έτσι και στα Pascal, έχουμε και τα πολλαπλάσιά του. Αυτά είναι τα kPa, τα MPa, τα GPa. Έτσι έχουμε :

$$1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa} = 10^3 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 10^6 \text{ N/m}^2$$

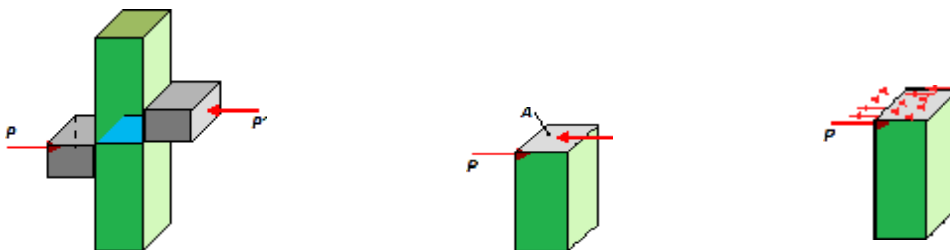
$$1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa} = 10^9 \text{ N/m}^2$$

### 1.1.3. Διατμητικές ή πλάγιες ή εγκάρσιες τάσεις.

Όταν η εσωτερική δύναμη δρα μέσα στο επίπεδο της διατομής ενός σώματος, τότε οι τάσεις που αναπτύσσονται **διατμητικές ή πλάγιες ή εγκάρσιες** και συμβολίζονται με  $\tau$ . Επίσης στην περίπτωση φόρτισης ενός μέλους με δύο εγκάρσια και αντίθετα μεταξύ τους εξωτερικά φορτία, μεταξύ των σημείων στα οποία ασκούνται, υπάρχει μια κάθετη διατομή στην εσωτερική περιοχή του υλικού στην οποία τα εξωτερικά φορτία προκαλούν εσωτερικές διατμητικές δυνάμεις. Οι δυνάμεις αυτές, ασκούνται σε όλο το εμβαδόν της διατομής και η συνισταμένη τους, μας δίνει τη **μέση διατμητική τάση ( $\tau$ )**. Αν ονομάσουμε **F** την εσωτερική δύναμη που δρα μέσα στο επίπεδο της διατομής ενός σώματος και **A** το εμβαδόν της διατομής, τότε η διατμητική τάση δίνεται από τη σχέση:

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

Η σχέση ισχύει μόνο για ομοιόμορφη κατανομή των διατμητικών τάσεων επί της διατομής. Ωστόσο, υπάρχουν και περιπτώσεις στις οποίες δεν έχουμε ομοιόμορφη κατανομή των διατμητικών τάσεων. Η εσωτερική δύναμη F που δρα μέσα στο επίπεδο της διατομής ενός σώματος ονομάζεται **τέμνουσα δύναμη**.



Εικόνα 2. Διατμητική τάση σε ορθογωνική διατομή

#### 1.1.4. Μονάδες μετρήσεως τάσεων.

Η τάση έχει μονάδες μέτρησης το  $1N/cm^2$ , το  $1N/mm^2$ , το  $1kp/cm^2$  και το  $1lb/in^2$ . Η μονάδα ονομάζεται και τεχνική ατμόσφαιρα. Άλλες μονάδες μετρήσεως που χρησιμοποιούνται είναι η  $1lb/ft^2$ , η  $1lb/m^2$  και η  $1lb/in^2$  η οποία αναφέρεται και ως psi.

#### 1.1.5. Συστήματα και μονάδες μέτρησης.

Συστήματα μετρήσεως που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση μεγεθών είναι τα ακόλουθα :

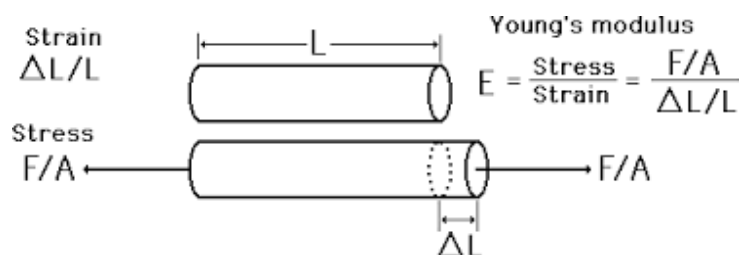
- Το Διεθνές Σύστημα (SI)
- Το Σύστημα C.G.S.
- Το Τεχνικό Σύστημα (Τ.Σ.)
- Το Αγγλικό Τεχνικό Σύστημα.

Το **Διεθνές Σύστημα SI** (*Systeme International d'Unites*), επικρατεί σήμερα παγκοσμίως . Με ελάχιστες εξαιρέσεις σε κάποιες χώρες είναι το μόνο σύστημα μετρήσεων που χρησιμοποιείται στην πράξη.

Επίσης για το **Σύστημα C.G.S.**, είναι γνωστό πως το όνομά του προκύπτει από τα αρχικά των μονάδων **C**entimeter, **G**ram, **S**econd, οι οποίες αποτελούν τις βασικές μονάδες μετρήσεως του συστήματος για τα μεγέθη του μήκους, της μάζας και του χρόνου αντίστοιχα.

#### 1.2. ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ.

Όταν σε ένα σώμα εφαρμόζεται μια δύναμη, τότε αλλάζει η μορφή του και λέμε ότι παραμορφώνεται. Αλλαγή της μορφής του σώματος σημαίνει να αυξηθεί ή να ελαττωθεί το μήκος του, να στραφεί, να καμπυλωθεί κ.ο.κ.. Η αλλαγή της μορφής ενός σώματος όταν σε αυτό εφαρμόζεται δύναμη ονομάζεται **παραμόρφωση**. Γενικά ως παραμόρφωση ορίζεται η γεωμετρική μεταβολή ενός αντικειμένου λόγω επίδρασης κάποιας δύναμης πάνω του ή λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής.



Εικόνα 3. Παραμορφωμένο σώμα λόγω εφελκυσμού

Η **μηχανική παραμόρφωση** συμβολίζεται συνήθως με το μικρό ελληνικό χαρακτήρα  $\varepsilon$  και ορίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Στην παραπάνω σχέση το  $l_0$  συμβολίζει το μήκος πριν εφαρμοσθεί φορτίο και το  $l$  αφού εφαρμοσθεί. Η αφαίρεση αυτών των δύο μεγεθών μας δίνει την μεταβολή του μήκους  $\Delta l$ , με αναφορά το αρχικό μήκος του δοκίμιου που καταπονούμε σε εφελκυσμό ή θλίψη. Η παραμόρφωση είναι αδιάστατο μέγεθος και ανεξάρτητο του συστήματος μονάδων. Για να πάρουμε την επί τοις εκατό (%) παραμόρφωση αρκεί να πολλαπλασιάσουμε το  $\varepsilon$  με το 100. Υπάρχουν διάφορα είδη παραμορφώσεων όπως η καμπτική, η διατμητική, η στρεπτική κ.α..

**Παραμόρφωση** παρουσιάζεται σε όλα τα στερεά σώματα, όσο μικρή και αν είναι η δύναμη που εφαρμόζεται σε αυτά. Στερεό σώμα που να μην παραμορφώνεται δεν υπάρχει. Σε κάποια υλικά η παραμόρφωση δεν διακρίνεται διά γυμνού οφθαλμού και δεν μπορεί να μετρηθεί με τα συνηθισμένα μέσα. Ωστόσο, η αδυναμία παρατηρήσεως της παραμόρφωσης δεν σημαίνει ότι αυτή δεν υπάρχει. Υπάρχει και μάλιστα μπορούμε να τη μετρήσουμε με τη χρήση ειδικών για τον σκοπό αυτό οργάνων ακριβείας. Για παράδειγμα η παραμόρφωση σωμάτων κατασκευασμένων από λάστιχο είναι εμφανής με γυμνό μάτι. Αντίθετα η παραμόρφωση σωμάτων από χάλυβα ή από άλλο σκληρό υλικό διακρίνεται μόνο με χρήση ειδικών οργάνων ακριβείας. Ο **βαθμός παραμορφώσεως** ενός σώματος εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

**i. Το είδος του υλικού του σώματος.**

Όλα τα υλικά δεν παραμορφώνονται το ίδιο. Δύο σώματα ίδιων διαστάσεων, στα οποία ασκούνται οι ίδιες ακριβώς δυνάμεις και με τον ίδιο τρόπο ακριβώς, παραμορφώνονται διαφορετικά ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένα. (Π.χ. Μεγαλύτερη παραμόρφωση παρουσιάζει μία ράβδος αλουμινίου από μία ράβδο χάλυβα.)

**ii. Τις διαστάσεις του σώματος.**

Δύο σώματα από το ίδιο υλικό, στα οποία ασκούνται οι ίδιες ακριβώς δυνάμεις και με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, παραμορφώνονται διαφορετικά ανάλογα με τις διαστάσεις τους. (Π.χ. Μία πιο χονδρή ράβδος αλουμινίου θα παραμορφωθεί λιγότερο από μία πιο λεπτή.)

**iii. Το μέγεθος των εφαρμοζομένων δυνάμεων (φορτίων).**

Δύο σώματα των ίδιων διαστάσεων, από το ίδιο υλικό, στα οποία ασκούνται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο διαφορετικές δυνάμεις, παραμορφώνονται διαφορετικά.

**iv. Τη μορφή της διατομής.**

Δύο σώματα από το ίδιο υλικό, στα οποία ασκούνται οι ίδιες ακριβώς δυνάμεις με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, αλλά έχουν διαφορετική μορφή διατομής, παρουσιάζουν και διαφορετική παραμόρφωση.

**v. Τον προσανατολισμό της διατομής σε σχέση με τη διεύθυνση του φορτίου.**

Δύο σώματα με την ίδια διατομή, από το ίδιο υλικό, στα οποία ασκούνται οι ίδιες ακριβώς δυνάμεις, αλλά με διαφορετικό προσανατολισμό ως προς τη διατομή, παρουσιάζουν διαφορετική παραμόρφωση ανάλογα με το τρόπο τοποθέτησής της διατομής σε σχέση με τη διεύθυνση της δυνάμεως. Για παράδειγμα, αν έχουμε δυνάμεις που εφαρμόζονται κάθετα στη διατομή μιας ράβδου τότε προκαλείται μεταβολή στο μήκος της ράβδου, ενώ αν εφαρμόζεται παράλληλα στη διατομή της ράβδου, τότε οι δυνάμεις αυτές τείνουν να κόψουν τη ράβδο.

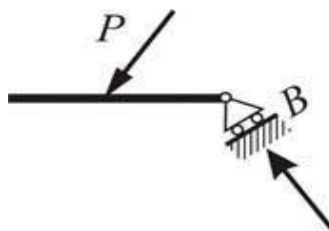
**vi. Τον τρόπο στηρίξεως.**

Δύο σώματα ίδιων διαστάσεων, από το ίδιο υλικό, στα οποία ασκούνται οι ίδιες ακριβώς δυνάμεις και με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, αλλά στερεώνονται διαφορετικά, παρουσιάζουν διαφορετική παραμόρφωση.

Οι διαφορετικοί **τρόποι στηρίξεως**, είναι οι παρακάτω:

**A. Ελεύθερη έδραση ή κύλιση**

Το σημείο στήριξης είναι ελεύθερο να κινείται σε επίπεδη ή άλλη επιφάνεια χωρίς τριβές, επιτρέποντας την περιστροφή του φορέα στο επίπεδο φόρτισης.

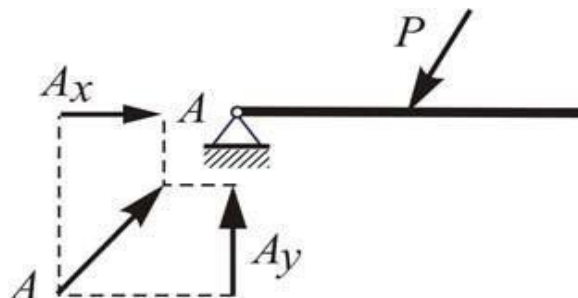


Εικόνα 4. Ελεύθερη έδραση

Η αντίδραση είναι δύναμη που περνάει από το σημείο στήριξης, κάθετα στην επιφάνεια κύλισης, γιατί κατά τη διεύθυνση αυτή αποκλείεται η μετακίνηση του σημείου στήριξης. Οι μετατοπίσεις που γίνονται στο επίπεδο κύλισης είναι γενικά πολύ μικρές και οφείλονται στις αναπόφευκτες παραμορφώσεις της δοκού από φορτία ή θερμοκρασιακές μεταβολές.

## B. Άρθρωση

Εδώ το σημείο στήριξης συνδέεται μόνιμα με το έδαφος ή άλλο στερεό σύστημα, μέσω άρθρωσης που επιτρέπει μόνο την ελεύθερη στροφή της δοκού πάνω στο επίπεδο φόρτισης.

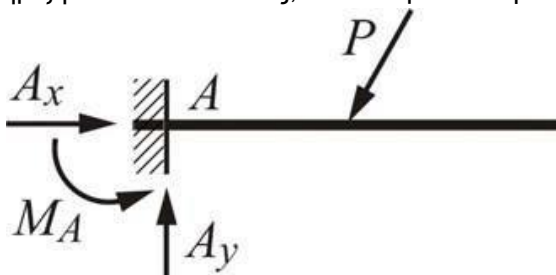


Εικόνα 5. Άρθρωση

Η αντίδραση επομένως A, που περνάει από την άρθρωση, μπορεί να έχει οποιαδήποτε διεύθυνση, γι' αυτό και αναλύεται ουσιαστικά σε οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα  $A_x$  και  $A_y$ .

## C. Πάκτωση

Η στήριξη αυτού του είδους, δεν επιτρέπει καμιά στροφή ή μετακίνηση στο άκρο της δοκού.



Εικόνα 6. Πάκτωση

Έτσι, για τις αντιδράσεις, πέρα από την  $A_x$  και  $A_y$  που συναντήσαμε στην άρθρωση, εμφανίζεται εδώ και η αντίδραση ροπή  $M_A$ , που οφείλεται στον αποκλεισμό περιστροφής του φορέα γύρω από το A.

## vii. Το μέγεθος της θερμοκρασιακής μεταβολής.

Δύο σώματα ίδιων διαστάσεων, από το ίδιο υλικό, στα οποία ασκούνται οι ίδιες ακριβώς δυνάμεις και με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, αλλά βρίσκονται σε διαφορετική κατάσταση θερμοκρασίας, παρουσιάζουν διαφορετική παραμόρφωση.

### 1.3. ΦΟΡΤΙΑ

Οι δυνάμεις που προκαλούν τις παραμορφώσεις στις κατασκευές αντιπροσωπεύουν τα φορτία που ενεργούν σε αυτές. Τα φορτία διακρίνονται με βάση κάποια κριτήρια σε κατηγορίες. Συγκεκριμένα, για τα σημαντικότερα από τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται, έχουμε τους ακόλουθους διαχωρισμούς:

- Με κριτήριο το αν τα φορτία ασκούνται κατά μόνιμο τρόπο ή όχι, διακρίνονται σε **σταθερά** και **μεταβλητά**. Τα σταθερά ασκούνται κατά μόνιμο τρόπο, αντίθετα τα μεταβλητά χαρακτηρίζονται από τη μεταβολή του μεγέθους τους με το χρόνο.
- Με κριτήριο τον χρόνο εντός του οποίου τα φορτία ενεργούν, διακρίνονται σε **στατικά**, **δυναμικά** και **κρουστικά**. Τα στατικά φορτία εξασκούνται ήπια (όχι απότομα), δηλαδή σταδιακά από τη μηδενική μέχρι την τελική τιμή τους μέσα σε ικανό χρονικό διάστημα. Τα δυναμικά ασκούνται μέσα σε βραχύ χρονικό διάστημα, ενώ τα κρουστικά ενεργούν σε πάρα πολύ μικρό χρόνο.
- Με κριτήριο τη μεταβολή της θέσεώς τους, τα φορτία διακρίνονται σε **ακίνητα** και **κινητά**. Ακίνητο ονομάζονται τα φορτία των οποίων η θέση παραμένει σταθερή με το χρόνο. Αντίθετα, κινητά ονομάζονται τα φορτία των οποίων η θέση μεταβάλλεται με τον χρόνο.
- Με κριτήριο την έκταση στην οποία ενεργούν, τα φορτία διακρίνονται σε **συγκεντρωμένα** και **κατανεμημένα**. Τα συγκεντρωμένα φορτία ενεργούν σε πολύ μικρό τμήμα της κατασκευής, τόσο μικρό που θεωρείται ως ένα σημείο. Τα κατανεμημένα φορτία ενεργούν σ' έναν χώρο, σε μια επιφάνεια ή σε μια γραμμή. Η κατανομή των φορτίων μπορεί να είναι ομοιόμορφη ή όχι.



## 1.4. ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

### 1.4.1. Πείραμα εφελκυσμού

Ο νόμος της αναλογίας ανάμεσα στην εφελκύνουσα δύναμη και την επιμήκυνση είναι κεφαλαιώδους σημασίας και αποτελεί σήμερα τη βάση των υπολογισμών αντοχής σε εφελκυστικές καταπονήσεις. Όμως ισχύει μόνο για ισότροπα υλικά που εφελκύνονται μέχρι κάποια οριακή τιμή που ονομάζεται όριο αναλογίας. Πέρα από αυτό το όριο η σχέση ανάμεσα στην εφελκύνουσα δύναμη και την επιμήκυνση γίνεται αρκετά πολυπλοκότερη.

Για να εξακριβωθούν οι μηχανικές ιδιότητες των διαφόρων υλικών, τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων εικονογραφούνται συνήθως σε ένα διάγραμμα, το οποίο, επειδή δείχνει τη συμπεριφορά του δοκιμαζόμενου υλικού σε εφελκυσμό, ονομάζεται διάγραμμα εφελκυσμού.

Στο διάγραμμα αυτό τα μεγέθη που υπεισέρχονται προκύπτουν από το νόμο του Hooke στην απλή του μορφή,  $\sigma = \varepsilon \cdot E$ . Στην επόμενη σελίδα εικονίζεται ένα τυπικό διάγραμμα εφελκυσμού για το μαλακό χάλυβα των σιδηρών κατασκευών.

Στην ονομαζόμενη **καμπύλη παραμόρφωσης** του διαγράμματος η **ανηγμένη επιμήκυνση  $\varepsilon$**  ταυτίζεται με τον οριζόντιο άξονα ενώ η **ορθή τάση  $\sigma$**  με τον κατακόρυφο. Τα δύο αυτά μεγέθη ανάγονται αντίστοιχα στο αρχικό μήκος  $l_0$  και την αρχική διατομή  $F_0$  του δοκιμίου.

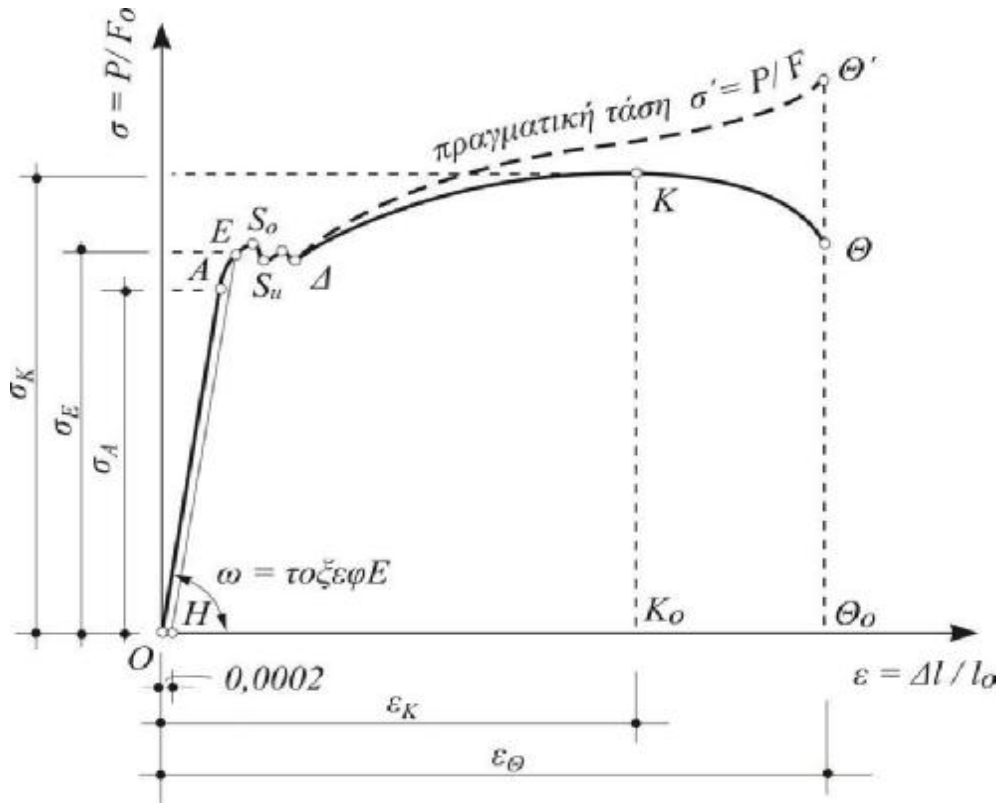
Η καμπύλη παραμόρφωσης έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Από το σημείο Ο μέχρι το Α η ορθή τάση είναι ανάλογη προς την αντίστοιχη επιμήκυνση και υπολογίζεται κανονικά από το νόμο του Hooke  $\sigma = \varepsilon \cdot E$ . Η αντιπροσωπευτική γραμμή της περιοχής αυτής είναι η ευθεία ΟΑ, που ονομάζεται **περιοχή αναλογίας**. Αν σε οποιοδήποτε σημείο της περιοχής αναλογίας αποφορτίσουμε το δοκίμιο, διαπιστώνουμε ότι επανέρχεται στην αρχική του θέση, συμπεριφερόμενο σαν ελατήριο. Η ορθή τάση  $\sigma_A$  που αντιστοιχεί στο τελευταίο σημείο της περιοχής αναλογίας ονομάζεται **όριο αναλογίας**.

Η κλίση της ευθείας της περιοχής αναλογίας, δηλαδή η τριγωνομετρική εφαπτομένη της γωνίας  $\omega$  που σχηματίζει η ευθεία ΟΑ με τον άξονα των ανηγμένων επιμηκύνσεων Οε, ονομάζεται μέτρο ελαστικότητας  $E$  του υλικού, και είναι  $\varepsilon \cdot E = \sigma$ . Άρα  $\omega = \tan^{-1}(\sigma/\varepsilon) = \tan^{-1}(E)$ .

Στη σχέση αυτή πρέπει να δοθεί προσοχή, επειδή οι τιμές που εκφράζουν την ορθή τάση  $\sigma$  και την ανηγμένη επιμήκυνση  $\varepsilon$  στους δυο άξονες δεν παριστάνονται με την ίδια κλίμακα.

Επομένως, αν ζητηθεί το μέτρο ελαστικότητας ενός υλικού από το αντίστοιχο διάγραμμα εφελκυσμού του, θα ήταν λάθος να παίρναμε τη γωνία  $\omega$  της ευθείας ΟΑ με τον οριζόντιο άξονα και να εκφράζαμε την τριγωνομετρική της εφαπτομένη. Το σωστό θα ήταν ένα από τα παρακάτω:



Εικόνα 7. Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης

Σχηματική παράσταση διαγράμματος εφελκυσμού από μαλακό χάλυβα

1. για τυχόν σημείο της ευθείας της περιοχής αναλογίας, αφού αντιστοιχίσουμε την ορθή του τάση με την ανηγμένη του επιμήκυνση, να υπολογίσουμε το λόγο  $\sigma/\epsilon$ , ή
2. να εκφράσουμε την τριγωνομετρική εφαπτομένη της γωνίας  $\omega$ , πολλαπλασιασμένη όμως επί το λόγο  $\lambda/\lambda'$  των κλιμάκων των δύο αξόνων.

Συνεχίζοντας τη φόρτιση του υλικού, (αυξάνοντας δηλαδή την ορθή τάση πιο πάνω από τη  $\sigma_A$ , ή απλά τραβώντας περισσότερο το δοκίμιο), διαπιστώνουμε ότι η ανηγμένη επιμήκυνση μεταβάλλεται δυσανάλογα με την ορθή τάση, και μάλιστα είναι τόσο μεγαλύτερη από εκείνη που θα δινόταν από το νόμο του Hooke ( $\sigma = \epsilon \cdot E$ ), όσο η  $\sigma$  είναι μεγαλύτερη της  $\sigma_A$ . Επομένως για το τμήμα αυτό του διαγράμματος η γραμμή ΑΕ είναι καμπύλη και η αντίστοιχη περιοχή ονομάζεται **περιοχή ελαστικότητας**.

Η τάση  $\sigma_E$  που αντιστοιχεί στο τελευταίο σημείο της περιοχής ελαστικότητας ονομάζεται **όριο ελαστικότητας**. Αν στην περιοχή αυτή αποφορτίσουμε το δοκίμιο, παρατηρούμε ότι η ανηγμένη του επιμήκυνση ελαττώνεται, αλλά δεν εξαφανίζεται πλήρως, όπως συμβαίνει στην περιοχή αναλογίας. Εμφανίζεται επομένως στο δοκίμιο μια μόνιμη επιμήκυνση  $\Delta l$ , που ονομάζεται **παραμένουσα παραμόρφωση**.

Συμφωνούμε να ονομάζουμε συμβατικό όριο ελαστικότητας την τάση  $\sigma_E$  (μεγαλύτερη της  $\sigma_A$ ), που παρουσιάζεται στο δοκίμιο, έτσι ώστε, μετά την αποφόρτισή του,

να εμφανίζεται παραμένουσα παραμόρφωση ίση με δύο δεκάκις χιλιοστά του αρχικού του μήκους. Θα πρέπει δηλαδή μετά την αποφόρτιση του δοκιμίου να έχουμε μια επιμήκυνση:

$$\Delta l = 0,0002 \square l_0 \quad \text{ή} \quad \Delta l / l_0 = \varepsilon = 0,0002 = 0,2 \%,$$

για να μπορούμε να πούμε ότι η τάση  $\sigma_E$ , που εφαρμόστηκε στο δοκίμιο κατά το στάδιο της φόρτισης αντιστοιχούσε στο συμβατικό όριο ελαστικότητας.

Από το διάγραμμα εφελκυσμού ( $\sigma, \varepsilon$ ) κάποιου υλικού, είναι δυνατό να υπολογίσουμε γραφικά το συμβατικό όριο ελαστικότητάς του, αρκεί να πάρουμε στην αρχή του άξονα των ανηγμένων επιμηκύνσεων ένα πολύ μικρό τμήμα ίσο με 0,0002, φυσικά με την κλίμακα που διαλέξαμε για τις ανηγμένες επιμηκύνσεις.

Αν Η είναι το σημείο αυτό, τότε, φέρνοντας την ΗΕ παράλληλη προς την ΟΑ, βρίσκουμε το σημείο τομής της, Ε, με το διάγραμμα. Αν από το Ε φέρουμε παράλληλη προς τον άξονα των  $\varepsilon$ , το σημείο τομής της με τον άξονα των  $\sigma$  είναι η ορθή τάση που αντιστοιχεί στο συμβατικό όριο ελαστικότητας.

Συνεχίζοντας τη φόρτιση του υλικού, μπαίνουμε σε μια νέα περιοχή όπου η συμπεριφορά του υλικού είναι ανώμαλη.

Στην αρχή το υλικό συμπεριφέρεται όπως και στην περιοχή ελαστικότητας, όπου, αυξανόμενων των τάσεων αυξάνονται περισσότερο και οι αντίστοιχες επιμηκύνσεις. Αυτό συμβαίνει μέχρις ότου η ορθή τάση πάρει την τιμή που αντιστοιχεί στο σημείο  $S_0$ . Μετά, και ενώ η ανηγμένη επιμήκυνση συνεχώς αυξάνει, η ορθή τάση μικραίνει μέχρι το σημείο  $S_u$ , για να αυξηθεί πάλι, να μειωθεί κ.ο.κ.

Παρατηρούμε συνεπώς κάποια σκαμπανεβάσματα της ορθής τάσης τα οποία συμβαίνουν με διαρκώς αυξανόμενη επιμήκυνση του δοκιμίου. Η περιοχή ΕΔ του διαγράμματος ονομάζεται **περιοχή διαρροής** και σ' αυτή συμβαίνουν κάποιες ανακατατάξεις στη μοριακή δομή του δοκιμίου.

Συγκεκριμένα, τα μόρια του υλικού αλλάζουν προσανατολισμό και, άλλοτε 'γαντζώνονται' μεταξύ τους - οπότε το δοκίμιο εμφανίζει ιδιότητες στερεού υλικού και βρισκόμαστε σε ανοδικά τμήματα της καμπύλης, άλλοτε 'γλιστρούν' μεταξύ τους - οπότε το δοκίμιο εμφανίζει αντίστοιχα ιδιότητες πλαστικού υλικού και βρισκόμαστε σε καθοδικά τμήματα της καμπύλης.

Η μέγιστη τιμή  $\sigma_{S_0}$  που παίρνει η ορθή τάση στην περιοχή αυτή ονομάζεται **ανώτερο όριο διαρροής**, ενώ η ελάχιστη τιμή  $\sigma_{S_u}$  **κατώτερο όριο διαρροής**. Ο μέσος όρος των δύο αυτών τιμών ονομάζεται συνήθως απλά **όριο διαρροής**.

Μετά το σημείο Δ, ενώ η ανηγμένη επιμήκυνση αυξάνεται συνεχώς, το υλικό δείχνει ξανά ομαλή συμπεριφορά, όμοια μ' εκείνη που έδειχνε στην περιοχή ελαστικότητας ΑΕ, με τη διαφορά ότι οι αυξήσεις των επιμηκύνσεων είναι ακόμα μεγαλύτερες προς τις αντίστοιχες μεταβολές των τάσεων.

Μετά το φαινόμενο της διαρροής, η ανάκτηση και η αύξηση της αντίστασης που παρουσιάζει το δοκίμιο ονομάζεται **κράτυνση** του υλικού και το αντίστοιχο τμήμα της καμπύλης παραμόρφωσης ονομάζεται **περιοχή κρατύνσεως**.

Το φαινόμενο της κράτυνσης συμβαίνει μέχρι το τελευταίο σημείο K της αντίστοιχης περιοχής, όπου αντιστοιχεί η ορθή τάση  $\sigma_K$ , την οποία το υλικό δεν μπορεί να ξεπεράσει και ονομάζεται **όριο θραύσης**. Το όριο θραύσης αντιστοιχεί επομένως στο ψηλότερο σημείο του διαγράμματος εφελκυσμού.

Λίγο μετά από το όριο θραύσης, σε κάποια διατομή του δοκιμίου, άγνωστο εκ των προτέρων σε ποια, εμφανίζεται στένωση, που αυξάνεται προοδευτικά και ονομάζεται **λαιμός θραύσης**. Η εμφάνιση του λαιμού θραύσης ταυτίζεται με την ύπαρξη μιας ακόμη περιοχής, της τελευταίας στο διάγραμμα εφελκυσμού, που ονομάζεται **περιοχή θραύσης**. Εδώ οι ορθές τάσεις μικραίνουν με την αύξηση των επιμηκύνσεων, και μετά από λίγο το δοκίμιο σπάει. Η μείωση των ορθών τάσεων στην περιοχή θραύσης οφείλεται στην προοδευτική μείωση της διατομής λόγω του λαιμού, αλλά και στο γεγονός ότι οι τεταγμένες  $\sigma$  του διαγράμματος εφελκυσμού προέρχονται από την αναγωγή του φορτίου στην **αρχική** και όχι στη συνεσταλμένη διατομή του δοκιμίου.

Η ορθή τάση  $\sigma_{\theta}$ , που αντιστοιχεί στο τελευταίο σημείο της περιοχής θραύσης (που είναι επίσης και το τελευταίο σημείο του διαγράμματος εφελκυσμού), ονομάζεται **τάση θραύσης**.

Η περιοχή κράτυνσης μαζί με την περιοχή θραύσης αποτελούν τη λεγόμενη **πλαστική περιοχή** του διαγράμματος εφελκυσμού.

Αν κατά τη διάρκεια του πειράματος, οι εκάστοτε εφελκυστικές δυνάμεις του δοκιμίου μπορούσαν να ανάγονται στη - θεωρητικά έστω - μικρότερη, συνεσταλμένη διατομή του, τότε το διάγραμμα εφελκυσμού που θα παίρναμε, θα απεικονίζαμε τις λεγόμενες **πραγματικές τάσεις**, και όχι απλά τις **τάσεις**, οι οποίες ως εκ τούτου θεωρούνται **συμβατικές**. Στην περίπτωση αυτή, μέχρι την περιοχή διαρροής του διαγράμματος, όπου οι επιμηκύνσεις που εμφανίζονται στο δοκίμιο δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές, οι πραγματικές τάσεις φαίνονται σαν να συμπίπτουν με τις συμβατικές. Όμως στην πλαστική περιοχή, όπου οι παραμορφώσεις του δοκιμίου γίνονται πολύ μεγαλύτερες, οι πραγματικές τάσεις αρχίζουν να ξεχωρίζουν, ιδιαίτερα μετά το όριο θραύσης.

Πραγματικά, στην περιοχή θραύσης, οι πραγματικές τάσεις όχι μόνο δεν μικραίνουν, αλλά αυξάνουν σημαντικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με τη μείωση των διατομών του δοκιμίου στην περιοχή του λαιμού, μειώνεται η ικανότητα ανάληψης εφελκυστικών δυνάμεων απ' την πλευρά του δοκιμίου.

Αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος που μικραίνουν οι συμβατικές τάσεις. Όμως, οι διατομές του δοκιμίου μικραίνουν πολύ πιο γρήγορα απ' την αντίστοιχη μείωση ανάληψης εφελκυστικών δυνάμεων, με αποτέλεσμα, το πηλίκον της εκάστοτε (μικρής) δύναμης δια της (πολύ μικρότερης) αντίστοιχης διατομής να δίνει μεγαλύτερες τάσεις.

Σαν επιμήκυνση θραύσης δεν λαμβάνεται η  $\epsilon_K$  που αντιστοιχεί στο όριο θραύσης, αλλά η  $\epsilon_{\theta}$  που αντιστοιχεί στη θραύση του δοκιμίου.

Η μέτρηση της  $\epsilon_{\theta}$  δεν είναι εύκολη.

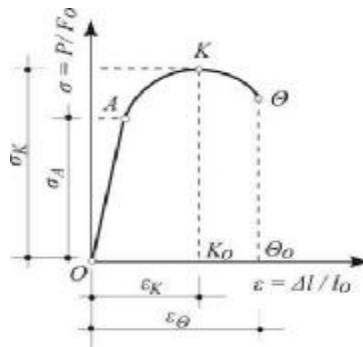
### 1.4.2. Τύποι διαγραμμάτων εφελκυσμού.

Ανάλογα με τη φύση του κάθε υλικού, μπορούμε να διακρίνουμε τρεις χαρακτηριστικούς τύπους διαγραμμάτων εφελκυσμού:

#### α) Διαγράμματα με περιοχή αναλογίας & όριο διαρροής

Τέτοια είναι κυρίως τα διαγράμματα του ρευστοπαγή χάλυβα, τα οποία, όπως περιγράψαμε πιο πάνω, παρουσιάζουν ανώτερο και κατώτερο όριο διαρροής με σημαντική περιοχή κρατύνσεως.

#### β) Διαγράμματα με περιοχή αναλογίας χωρίς όριο διαρροής (Χαλκός, αλουμίνιο)

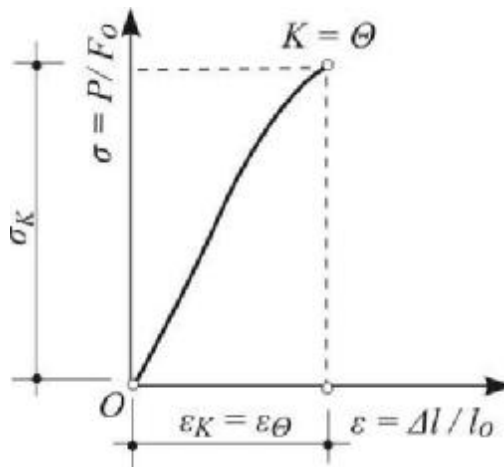


Διάγραμμα 1. Υλικών με περιοχή αναλογίας χωρίς όριο διαρροής

Σε τέτοια υλικά το φορτίο αυξάνει στην αρχή γραμμικά με την αύξηση της επιμήκυνσης μέχρι το όριο αναλογίας.

Μετά η ευθεία γραμμή του διαγράμματος μετατρέπεται, με συνεχή και ομαλή πορεία, σε ανιούσα καμπύλη, διατηρώντας αυξανόμενες τιμές μέχρι το όριο θραύσης. Η καμπύλη αυτή συνεχίζει τελικά με έναν μικρό ομαλό κατιόντα κλάδο μέχρι τη θραύση.

#### γ) Διαγράμματα ψαθυρών υλικών (Χυτοσίδηρος, γυαλί, σκυρόδεμα, ορείχαλκος)



Διάγραμμα 2. Ψαθυρών υλικών

Σ' αυτά τα υλικά το φορτίο αυξάνει συνέχεια μέχρι το όριο θραύσης χωρίς να υπάρχει καμιά σαφής ένδειξη ούτε για το όριο αναλογίας ούτε για το όριο διαρροής, ούτε για την κράτυνση του υλικού.

Έτσι, μέσα από έναν γραφικό τρόπο όπως είναι το διάγραμμα εφελκυσμού, γίνεται σαφής μια ουσιαστική διάκριση ανάμεσα σε δύο κατηγορίες υλικών, τα συνεκτικά ή όλκιμα, και τα ψαθυρά.

**Συνεκτικά** λέγονται τα υλικά που παρουσιάζουν μεγάλη πλαστική περιοχή μέχρι τη θραύση τους.

**Ψαθυρά** είναι τα υλικά που παρουσιάζουν ασήμαντη ή καθόλου πλαστική περιοχή.

Ο βαθμός της συνεκτικότητας ή της ψαθυρότητας ενός υλικού είναι επομένως συνάρτηση του μεγέθους της πλαστικής περιοχής του, στο διάγραμμα εφελκυσμού. Είναι συνεπώς η συνεκτικότητα μια ιδιότητα αντίθετη απ' την ψαθυρότητα.

#### 1.4.3. Ανηγγμένη επιμήκυνση.

Ως ανηγμένη επιμήκυνση  $\epsilon$  ορίζεται η επιμήκυνση που δημιουργείται σε μία μονάδα μήκους μιας εφελκυσμένης ράβδου. Δηλαδή, η ανηγμένη επιμήκυνση  $\epsilon$  παρέχεται από το λόγο της επιμηκύνσεως  $\Delta l$  προς το μήκος  $l$  της ράβδου.

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Η ανηγμένη επιμήκυνση είναι αδιάστατο μέγεθος και πολλές φορές εκφράζεται ως ποσοστό. Χρησιμοποιώντας τη σχέση ορισμού της ανηγμένης επιμήκυνσης και τη σχέση ορισμού της τάσεως, ο νόμος του Hooke λαμβάνει την εξής μορφή :

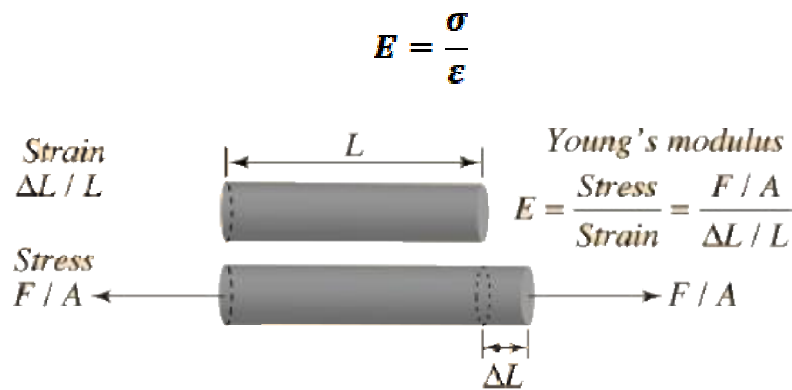
$$\Delta l = \frac{F \cdot l}{A \cdot E} \Leftrightarrow \Delta l \cdot A \cdot E \Leftrightarrow F \cdot l \Leftrightarrow \sigma = E \cdot \epsilon \Leftrightarrow$$

$$\text{Και τελικά γίνεται : } \epsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Δηλαδή η ανηγμένη επιμήκυνση σε μία εφελκυσμένη ράβδο είναι ανάλογη με την τάση που ενεργεί σε αυτήν. Επίσης, η εξίσωση  $\epsilon = \frac{\sigma}{E}$  οδηγεί στο συμπέρασμα ότι **το Μέτρο Ελαστικότητας** εκφράζει τη δύναμη που αναπτύσσεται στη μονάδα επιφάνειας, όταν η ανηγμένη επιμήκυνση ισούται με μονάδα. Γενικότερα, απαιτείται μεγάλη προσοχή στην εφαρμογή του νόμου του Hooke ώστε να εφαρμόζεται εκεί που πραγματικά ισχύει και να μην επεκτείνεται απρόσεκτα η εφαρμογή του στις περιπτώσεις όπου δεν ισχύει.

#### 1.4.4. Μέτρο ελαστικότητας (Young Modulus) .

Ο λόγος της τάσης ( $\sigma$ ) με τη μηχανική παραμόρφωση ( $\epsilon$ ) ή αλλιώς ανηγμένη επιμήκυνση (λόγω αναγωγής στην αρχική διάσταση του μέλους), ονομάζεται **μέτρο ελαστικότητας**, από τον Άγγλο επιστήμονα Thomas Young και συμβολίζεται με **E**. Το μέτρο ελαστικότητας είναι επίσημη η φυσική σημασία της κλίσης του ευθέως τμήματος του γραφήματος όπου ισχύει και ο νόμος του Hooke. Μιας και η παραμόρφωση είναι αδιάστατο μέγεθος, το μέτρο ελαστικότητας διατηρεί τις μονάδες τάσης ( N/m<sup>2</sup>) και έτσι έχουμε την εξίσωση :

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


*Young's modulus*  
 $E = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} = \frac{F/A}{\Delta L/L}$

Εικόνα 8. Σχηματική επεξήγηση του μέτρου Young

Το μέτρο ελαστικότητας είναι η μία εκ των δύο κύριων ιδιοτήτων που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό ενός υλικού, η οποία από μόνη της δεν αρκεί για να περιγράψει πλήρως τη **μηχανική συμπεριφορά** του κατά το πείραμα του εφελκυσμού. Έτσι παίρνουμε υπόψιν μας και μια γεωμετρική μεταβολή που λαμβάνει χώρα στο δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος πέραν της **επιμήκυνσης (elongation), την εγκάρσια συστολή του (lateral strain)**. Παρακάτω παρατίθενται κάποια υλικά με το μέτρο ελαστικότητας τους σε **GPa**.

<b>Material</b>	<b>Young Modulus /GPa</b>
Mild steel	210
Copper	120
Bone	18
Plastic	2

Rubber	0.02
--------	------

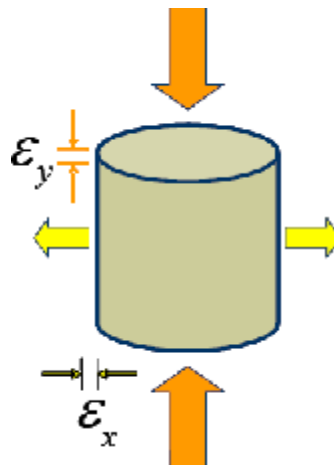
Πίνακας 1. Μέτρα ελαστικότητας υλικών

#### 1.4.5. Λόγος Poisson (Poisson's ratio).

Η **εγκάρσια συστολή** ( $\epsilon_y$ ) των διαστάσεων ενός μέλους που επιμηκύνεται κατά τον εφελκυσμό στη διεύθυνση του άξονά του, όταν διαιρεθεί με την **αξονική επιμήκυνση** (*longitudinal strain*) ( $\epsilon_x$ ) του δοκιμίου παίρνουμε μια σταθερά του υλικού η οποία ονομάζεται **λόγος Poisson** από τον Γάλλο μαθηματικό Simeon Denis Poisson, συμβολίζεται με το ελληνικό  $\nu$  και εκφράζεται ως :

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}$$

Η εγκάρσια συστολή είναι μέγεθος ανάλογο του εγκάρσιου μήκους του καταπονημένου μέλους και του φορτίου που το καταπονεί και συνεπώς αντιστρόφως ανάλογο του εμβαδού της διατομής του.



Εικόνα 9. Διαστάσεις λόγου Poisson

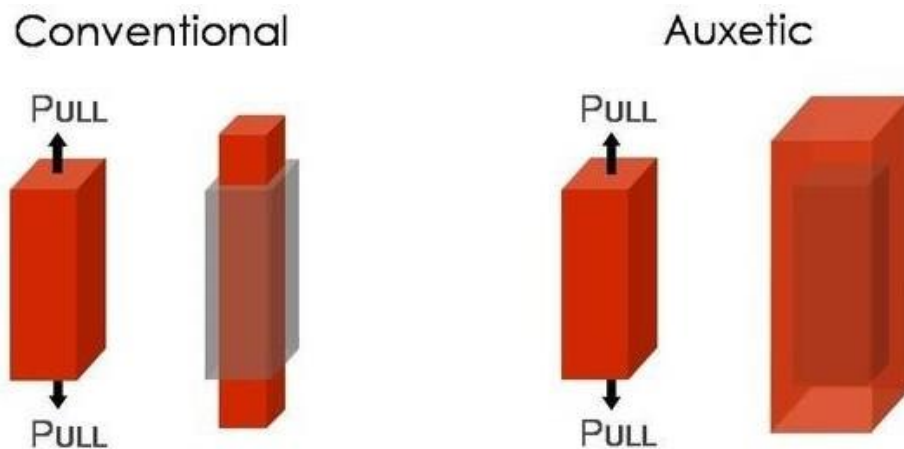
Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι σε δοκίμιο ορθογωνικής διατομής όπου διαμήκης άξονας είναι ο  $x$  και ο εγκάρσιος  $y$  είναι διάφορος του  $z$ , ο λόγος του Poisson, θα ισχύει και για τη δεύτερη κάθετη διάσταση και έτσι θα έχουμε:

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_x}$$



Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι ο **λόγος Poisson** είναι **αδιάστατο μέγεθος** το οποίο ονομάζεται επίσης και **αριθμός ελαστικότητας** του υλικού. Το αρνητικό πρόσημο των εξισώσεων αυτών μας δίνει θετικό αριθμό λόγω του ότι τα περισσότερα υλικά μειώνουν την εγκάρσια διατομή κατά τον εφελκυσμό και συνεπώς ο αριθμητής με τον παρονομαστή έχουν διαφορετικό τρόπο.

Υπάρχουν κάποιες περιπτώσεις όμως πειραματικών υλικών, ονομαζόμενα **αυξητικά (auxetic)** όπως τα αφρώδη πολυμερή των οποίων οι τροπές, εγκάρσια και αξονική, έχουν το ίδιο πρόσημο. Και έτσι ο λόγος Poisson καταλήγει να είναι **αρνητικός** λόγω αύξησης και των εγκάρσιων διαστάσεών τους.

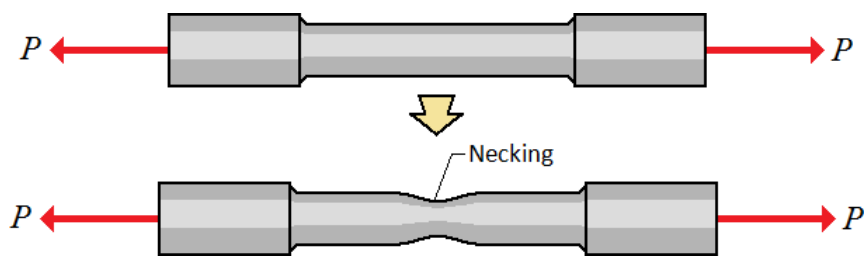


Εικόνα 10. Θετικός - Αρνητικός λόγος Poisson

Ο νόμος του Poisson ισχύει μόνο για υλικά που θεωρούνται ομογενή και ισότροπα ή **ισοτροπικά (isotropic)**. Ισοτροπικό, είναι το στερεό υλικό του οποίου οι μηχανικές ιδιότητες είναι ανεξάρτητες από τη θέση και τον προσανατολισμό του. Αυτό σημαίνει ότι η τροπή καθόλη την εγκάρσια διεύθυνση θα έχει την ίδια τιμή. Η φυσική αυτών των υλικών είναι ποιο εύκολη στην περιγραφή της και για αυτό πολλές φορές χρησιμοποιείται αν και στη πραγματικότητα τα περισσότερα κρυσταλικά στερεά συμπεριφέρονται τοπικά σαν ανισότροπα ή ανισοτροπικά.

#### 1.4.6. Φαινόμενο δημιουργίας λαιμού.

Στη μέγιστη τιμή του φορτίου  $R_m$ , η διάμετρος ενός τμήματος του δοκιμίου αρχίζει να μειώνεται ( Εικόνα 11. ). Η απομειωμένη αυτή διατομή ονομάζεται στένωση ή αλλιώς φαινόμενο σχηματισμού λαιμού (necking). Από αυτό το σημείο και έπειτα θεωρούμαι ότι ήδη έχει αστοχήσει το υλικό όπως προαναφέρεται και αρκούν μικρότερα φορτία ώστε να επέλθει η τελική θραυσση του.



Εικόνα 11. Σχηματισμός λαιμού

Η αντοχή εφελκυσμού δηλαδή αντιστοιχεί στο όριο θραύσης  $R_m$  και το σημείο της πραγματικής θραύσης δεν λαμβάνεται υπόψιν πουθενά στους υπολογισμούς αντοχής. Λόγω αστάθειας του υλικού του οποίου μειώνεται σταδιακά η διατομή και συνεπώς δεν θα άντεχε ούτε τα αρχικά μικρά φορτία της περιοχής ελαστικότητας και τάσεων η πραγματική θραύση του υλικού είναι αναπόφευκτη μετά το σημείο αυτό που έχουμε ορίσει ως το σημείο θραύσης.

Οι περιοχές και τα όρια αυτά ποικίλουν και διαφέρουν από υλικό σε υλικό και ακόμη περισσότερο από κατηγορία σε κατηγορία υλικού. Για παράδειγμα τα υλικά που είναι ελατά και όλκιμα μπορούν να έχουν αρκετά μεγάλη περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης μεταξύ του σημείου ελαστικότητας και του σημείου θραύσης.

Αντιθέτως τα υλικά που χαρακτηρίζονται ως ψαθυρά αστοχούν αμέσως μετά το όριο ελαστικότητας και όταν είμαστε σε μικρά όρια τέτοιων υλικών τα αποκαλούμε και εύθραστα.

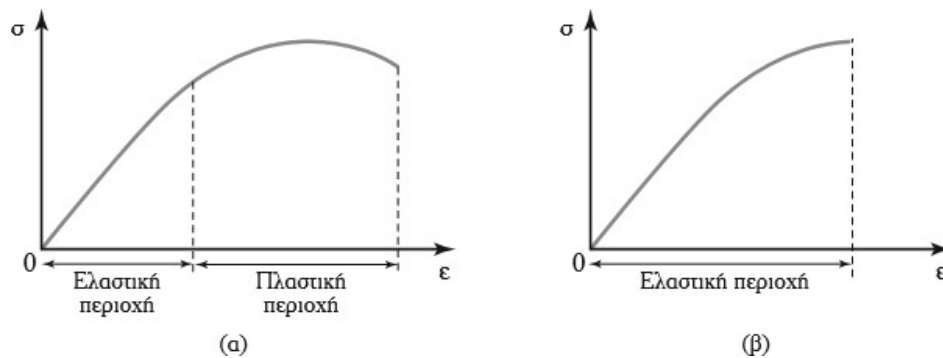
#### 1.4.7. Όλκιμα και ψαθυρά υλικά.

Δεν εμφανίζουν όλα τα υλικά την ίδια συμπεριφορά στις καταπονήσεις. Έτσι τα υλικά ταξινομούνται σε κατηγορίες ανάλογα με τη συμπεριφορά τους στις καταπονήσεις. Με κριτήριο την εμφάνιση πλαστικής περιοχής πριν από τη θραύση τους ή όχι, τα υλικά ταξινομούνται σε **όλκιμα** και **ψαθυρά**.

Στην κατηγορία των ολκίμων υλικών ανήκουν τα υλικά που μπορούν να υποστούν μόνιμες (πλαστικές) παραμορφώσεις πριν από τη θραύση τους.

Στην κατηγορία των ψαθυρών υλικών ανήκουν τα υλικά που θραύονται με το τέλος της ελαστικής περιοχής τους.

Με άλλα λόγια, ως ψαθυρά χαρακτηρίζονται τα υλικά που δεν παρουσιάζουν πλαστική περιοχή και ως όλκιμα αυτά που παρουσιάζουν πλαστική περιοχή πριν από το σημείο της θραύσεως τους. Δηλαδή, τα ψαθυρά υλικά θραύονται πριν αναπτύξουν μόνιμες παραμορφώσεις σε αντίθεση με τα όλκιμα.



Εικόνα 12. (α) Διάγραμμα εφελκυσμού ενός όλκιμου υλικού (β) Διάγραμμα εφελκυσμού ενός ψαθυρού υλικού

Το σχήμα 12(α) παρουσιάζει το τυπικό διάγραμμα εφελκυσμού όλκιμου υλικού, ενώ το 12(β) παρουσιάζει το τυπικό διάγραμμα εφελκυσμού ενός ψαθυρού υλικού. Από τη σύγκριση των δύο διαγραμμάτων είναι εμφανές ότι τα όλκιμα υλικά παρουσιάζουν πλαστική περιοχή πριν το όριο θραύσης σε αντίθεση με τα ψαθυρά υλικά που δεν παρουσιάζουν πλαστική περιοχή πριν το όριο θραύσης.

Στην καταπόνηση σε θλίψη, τα όλκιμα υλικά παρουσιάζουν πλαστική παραμόρφωση χωρίς να θραύονται, ενώ τα ψαθυρά θραύονται, χωρίς να υφίστανται πλαστική παραμόρφωση. Παραδείγματα όλκιμων υλικών είναι ο χαλκός, το αλουμίνιο, ο χάλυβας κ.ά.. Παραδείγματα ψαθυρών υλικών είναι η πέτρα, το μπετόν, ο χυτοσίδηρος, το γυαλί κ.ά..

Τα όλκια υλικά μπορούν κατόπιν επεξεργασίας, να γίνουν λαμαρίνες ή σύρματα. Σε αντίθεση με τα όλκιμα υλικά, τα ψαθυρά δεν μπορούν να γίνουν λαμαρίνες ούτε σύρματα.

#### 1.4.8. Σκληρότητα υλικού.

**Σκληρότητα** ενός υλικού ονομάζεται το μέγεθος που μετρά την αντίσταση του υλικού στην προσπάθεια εισόδου σε αυτό άλλων υλικών, τα οποία πιέζουν την επιφάνειά του με μία κάθετη δύναμη.

Η σκληρότητα αναφέρεται πρακτικά στα μέταλλα. Η σκληρότητα ενός μετάλλου ουσιαστικά αποτελεί μέτρο της απιστάσεως που εμφανίζουν τα μόρια του μετάλλου όταν άλλα υλικά, πιο σκληρά από αυτό, προσπαθούν να διεισδύσουν στο μέταλλο με εφαρμογή κάθετης δύναμης.

Η σκληρότητα έχει σημασία στη μελέτη της αντοχής υλικών, γιατί με τη βοήθειά της, μπορούμε να υπολογίζουμε το όριο θραύσεως των υλικών. Επομένως, μας ενδιαφέρει ο προσδιορισμός του μεγέθους της σκληρότητας.

Υπάρχουν ειδικές μέθοδοι μετρήσεως της σκληρότητας, οι οποίες **ονομάζονται μέθοδοι σκληρομέτρησης**. Οι μέθοδοι σκληρομέτρησης διακρίνονται στις **στατικές**, στις οποίες ανήκουν η μέθοδος Brinell, η μέθοδος Vickers και η μέθοδος Rockwell, στις **δυναμικές** ανήκουν η μέθοδος Bauman και η μέθοδος Poldi και τέλος, στις μεθόδους **αναπηδήσεως**, στις οποίες ανήκουν η μέθοδος Shore και η μέθοδος Leesen.

## 1.5. Λυγισμός.

### 1.5.1. Θεωρία λυγισμού.

**Λυγισμός** ονομάζεται η ασταθής κατάρρευση ενός πρισματικού φορέα υπό την επίδραση θλιπτικών φορτίων που υπερβαίνουν κάποια τιμή. Ο λυγισμός μπορεί να ξεκινήσει λόγω μικρής εκκεντρότητας του φορτίου ή λόγω κατασκευαστικών ατελειών/ανομοιομορφιών των πρισματικών φορέων. Η μαθηματική προσέγγιση στο πρόβλημα ξεκίνησε τον 18ο αιώνα από τον **Euler**, ο οποίος πρότεινε μια σχέση για τον προσδιορισμό του κρίσιμου φορτίου ελαστικού λυγισμού. Ως κρίσιμο φορτίο  $P_{cr}$  λυγισμού ορίζεται το ελάχιστο θλιπτικό φορτίο το οποίο μπορεί να προκαλέσει λυγισμό του φορέα.

Η χρήση κολονών (υποστυλωμάτων) είναι πολύ διαδεδομένη (κυρίως στα πλοία) καθ' όσον χρησιμοποιούνται για την μείωση του ανυποστήρικτου μήκους δοκών και για τη μεταφορά/διανομή κατακόρυφων φορτίων. Τα υποστυλώματα δέχονται θλιπτικά φορτία και πρέπει να ελέγχονται για λυγισμό (ειδικά που αυτά έχουν μεγάλο μήκος) Αντικείμενο της παρούσας ενότητας είναι ο έλεγχος έναντι λυγισμού, πρισματικών φορέων που δέχονται θλιπτικά φορτία. Ο λυγισμός εξαρτάται κυρίως από τις γεωμετρικές ιδιότητες της διατομής του φορέα παρά από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένος.

Θεωρούμε μια τέλεια ράβδο (perfect column) της οποίας θα εξετάσουμε την **ευστάθεια** όταν η αξονική θλιπτική δύναμη  $P$  που επιβάλεται αυξάνεται σταδιακά.

I. Στο αρχικό στάδιο της φόρτισης, όπου η  $P$  είναι μικρότερη μιας κρίσιμης τιμής  $P_k$  που θα υπολογίσουμε πιο κάτω, η ισορροπία της ράβδου είναι **ευσταθής**. Αυτό σημαίνει ότι αν η ράβδος καμπυλωθεί ελαφρά από κάποια εξωτερική αιτία, επανέρχεται αμέσως στην αρχική της ευθύγραμμη θέση, μόλις η αιτία εξαφανιστεί.

II. Άμα όμως η  $P$ , καθώς αυξάνει, λάβει την τιμή της  $P_k$ , τότε η ράβδος, μετά το εξωτερικό ερέθισμα, **δεν** επανέρχεται πια στην αρχική της θέση, αλλά παραμένει στην ίδια θέση της καμπύλωσης, όπου και ισορροπεί. Η ισορροπία της στο στάδιο αυτό χαρακτηρίζεται σαν **αδιάφορη**.

III. Μικρή αύξηση της  $P$ , πέρα από την τιμή της  $P_{cr}$ , προκαλεί απότομα στη ράβδο ακόμα μεγαλύτερη καμπύλωση από εκείνη που προκάλεσε αρχικά η εξωτερική αιτία, με άμεσο επακόλουθο την καταστροφή της. Στο στάδιο αυτό η ισορροπία της ράβδου χαρακτηρίζεται σαν **ασταθής**.

Ύστερα από τα παραπάνω, θα ονομάζουμε **λυγισμό**, το φαινόμενο κατά το οποίο μια ευθύγραμμη λεπτή ράβδος, όταν υποβληθεί σε κεντρική θλίψη με αυξανόμενη ένταση, μεταβαίνει, από κάποια τιμή της δύναμης και μετά, σε κατάσταση ασταθούς ισορροπίας, με αποτέλεσμα να καμπυλώνει με την επίδραση της παραμικρής εξωτερικής αιτίας.

Η συγκεκριμένη τιμή της δύναμης, μετά από την οποία εμφανίζεται το φαινόμενο του λυγισμού ονομάζεται **κρίσιμο φορτίο λυγισμού  $P_{cr}$**  και αντιστοιχεί στη μεταξύ ευσταθούς και ασταθούς ισορροπίας μεταβατική κατάσταση του υλικού.

Είναι φανερό ότι στο στάδιο I, η παραπάνω ράβδος υφίσταται **μόνο** θλιπτική καταπόνηση, με ορθές τάσεις που δίνονται από τη σχέση  $\sigma = P/F$ .

Στην ιδανική περίπτωση που η ράβδος είναι εντελώς ευθύγραμμη και το θλιπτικό φορτίο ασκείται αξονικά ακριβώς στο κεντροειδές της διατομής της, είναι δυνατόν να έχουμε ισορροπία της ράβδου ακόμα και όταν η  $P$  είναι μεγαλύτερη της  $P_{cr}$ . Όμως η ισορροπία αυτή είναι τόσο ασταθής, που η παραμικρή εξωτερική ενόχληση, μπορεί να προκαλέσει ένα ελάχιστο βέλος κάμψης, που αυξάνεται απότομα και οδηγεί τη ράβδο στη θραύση της.

Σαν κατάσταση είναι ανάλογη με την ισορροπία ενός μολυβιού κατακόρυφα στη μύτη του, που είναι δυνατή μόνο θεωρητικά.

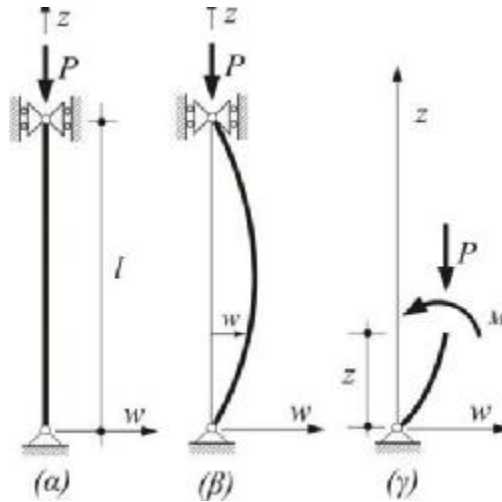
Πραγματικά, στην πράξη υπάρχουν πάντοτε αίτια που μπορούν να προκαλέσουν πλάγια παραμόρφωση της ράβδου, όπως ελαφρά καμπυλότητα που μπορεί να γίνει στη ράβδο όταν κατασκευάζεται, έκκεντρη τοποθέτηση του φορτίου πάνω σ' αυτή, κλπ. Γι αυτό οι συντελεστές ασφάλειας έναντι λυγισμού είναι πάντα μεγαλύτεροι.

### 1.5.2. Η Θεωρία και ο τύπος του Euler.

Ο φημισμένος Αυστριακός μαθηματικός Leonard Euler (1707 – 1783), που υπήρξε μαθητής του Bernoulli και θεωρείται ο μεγαλύτερος όλων των εποχών, ήταν ο πρώτος που διερεύνησε την περίπτωση λυγισμού μιας ράβδου και καθόρισε το κρίσιμο φορτίο της, το 1744. Η θεωρία του στηρίζεται στις παρακάτω παραδοχές:

1. Η ράβδος είναι ιδανικά ευθύγραμμη.
2. Το φορτίο ενεργεί ακριβώς στον άξονά της.
3. Το υλικό της ράβδου είναι ισότροπο, δηλαδή έχει ίδιες ιδιότητες σε εφελκυσμό και θλίψη.
4. Ισχύει ο νόμος του Hooke, δηλαδή η ορθή τάση που αναπτύσσεται είναι μικρότερη από το όριο αναλογίας του υλικού.

Οι θεωρητικές αυτές παραδοχές, ιδιαίτερα οι 1 και 2, έγιναν για να μπορεί το πρόβλημα του λυγισμού να αντιμετωπιστεί με προσιτά μαθηματικά μέσα.



Εικόνα 13. Ευθύγραμμη ράβδος

Θεωρούμε λοιπόν την ευθύγραμμη ράβδο της Εικόνας 13, μήκους  $l$ , η οποία στηρίζεται στο ένα της άκρο με άρθρωση, ενώ στο άλλο με αρθρωτή κύλιση, χωρίς τριβές.

Έστω  $P$  η τιμή του αξονικού φορτίου που προκαλεί το φαινόμενο λυγισμού στη ράβδο, η οποία, λόγω κάποιας εξωτερικής αιτίας, έχει πάρει την ελαφρά καμπύλη μορφή του σχήματος (β) και βρίσκεται σε ισορροπία.

Η μορφή αυτή είναι εκείνη που εμφανίζεται σε μια καμπτόμενη ράβδο (ελαστική γραμμή), λόγω της καμπτικής ροπής  $M$ , που προκαλεί η δύναμη  $P$  σε τυχούσα διατομή που απέχει απόσταση  $z$  από τη στήριξη  $A$ .

Προφανώς είναι:

$$M = P \square w$$

Επομένως η εξίσωση της ελαστικής γραμμής της ράβδου θα είναι:

$$EJw'' = -M = -P \square w ,$$

$$\text{Δηλαδή } EJw'' + P \square w = 0 , \text{ ή}$$

$$w'' + (P/EJ) \square w = 0 \quad (1)$$

$$\text{Θέτοντας ήδη } P/EJ = u^2, \quad (\alpha)$$

$$\text{η (1) γίνεται } w'' + u^2 w = 0 . \quad (2)$$

Η γενική λύση της διαφορικής αυτής εξίσωσης θα προκύψει αν βρούμε δύο μερικές λύσεις που να την ικανοποιούν. Παρατηρούμε ότι η συνάρτηση

$$w = \eta \mu(uz) \text{ είναι λύση της (2), επειδή είναι}$$

$$w' = u \sigma \nu(uz) \text{ και } w'' = -u^2 \eta \mu(uz).$$

$$\text{Συνεπώς η (2) ικανοποιείται, αφού } -u^2 \eta \mu uz + u^2 \eta \mu uz = 0 !$$

Αλλά και η συνάρτηση

$$w = \sigma \nu(uz)$$

είναι λύση της (2), όπως πολύ εύκολα μπορούμε όμοια να διαπιστώσουμε.

Επομένως η γενική λύση της (2), θα είναι:

$$w = C_1 \eta(\mu z) + C_2 \sigma(\mu z), \quad (3)$$

όπου  $C_1$  και  $C_2$  είναι σταθερές οι οποίες υπολογίζονται από τις λεγόμενες οριακές συνθήκες στήριξης της ράβδου, που εδώ εκφράζονται από το γεγονός ότι η πλάγια υποχώρηση της ράβδου στα άκρα της είναι μηδενική. Δηλαδή είναι:

- Συνθήκη πρώτη: για  $z = 0$  είναι  $w = 0$
- Συνθήκη δεύτερη: για  $z = l$  είναι  $w = 0$

Χρησιμοποιώντας την πρώτη από αυτές στην (3), προκύπτει:

$$0 = C_1 \eta \mu 0^\circ + C_2 \sigma \mu 0^\circ, \quad \text{ή} \quad 0 = C_1 \cdot 0 + C_2 \cdot 1 \Rightarrow C_2 = 0,$$

και επομένως η (3) γίνεται τώρα:

$$w = C_1 \eta(\mu z). \quad (4)$$

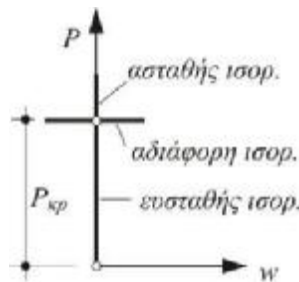
Η δεύτερη συνθήκη, συνδυαζόμενη με την (4), δίνει:

$$C_1 \eta(\mu l) = 0. \quad (5)$$

Για να ισχύει η (5), θα πρέπει:

1. Είτε  $C_1 = 0$ , ή
2.  $C_1 \neq 0$  και

$$\eta(\mu l) = 0.$$



Εικόνα 14. Διάγραμμα P-w

Από την **πρώτη** περίπτωση προκύπτει ότι η πλάγια μετατόπιση  $w$  είναι μηδενική για οποιαδήποτε τιμή του  $z$ , επομένως η ράβδος παραμένει ευθεία. Έτσι η (5) ικανοποιείται για οποιαδήποτε τιμή της ποσότητας  $\mu l$  και επομένως για **οποιαδήποτε** τιμή του φορτίου  $P$ , λόγω της (α).

Η λύση αυτής της διαφορικής εξίσωσης, που ονομάζεται **εκφυλισμένη**, και αντιστοιχεί σε ιδανική ράβδο που διατηρείται ευθύγραμμη σε ευσταθή ή ασταθή ισορροπία, παριστάνεται με τον κατακόρυφο άξονα του διαγράμματος,  $P - w$  της Εικόνας 14. Όμως σαν λύση δεν μας ενδιαφέρει, επειδή αρχικά υποθέσαμε ότι η ράβδος έχει καμπυλωθεί.

Από τη δεύτερη περίπτωση προκύπτει ότι

$$\eta\mu(u/l) = 0, \quad (6)$$

που συμβαίνει μόνον όταν:

$$u/l = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$$

Επειδή για  $u/l = 0$  προκύπτει λόγω της (α) ότι  $P = 0$ , που δείχνει ότι η ράβδος παραμένει αφόρτιστη, ούτε η λύση αυτή μας ενδιαφέρει.

Θεωρούμε λοιπόν την περίπτωση:

$$u/l = n\pi \quad (n = 1, 2, 3, \dots),$$

από όπου προκύπτει:

$$u = n\pi l, \quad (n=1,2,3,\dots) \quad (7)$$

και λόγω της (α),

$$P/EJ = u^2 = n^2 \pi^2 l^2,$$

προκύπτει τελικά:

$$P = n^2 \frac{\pi^2 EJ}{l^2}. \quad (8)$$

Η σχέση (8) δίνει τις τιμές της  $P$  που προκύπτουν από τη σχέση (5) και επομένως εκφράζει τις λύσεις που ικανοποιούν τη διαφορική εξίσωση (4) και είναι διαφορετικές της εκφυλισμένης.

Έτσι η εξίσωση της ελαστικής γραμμής της ράβδου, θα προκύψει τώρα από την (4), όπου όμως το  $u$  παίρνει τη συγκεκριμένη τιμή που δίνεται από τη σχέση (7), δηλαδή θα είναι:

$$w = C_1 * \sin\left(n * \frac{\pi}{l} * z\right) \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (9)$$

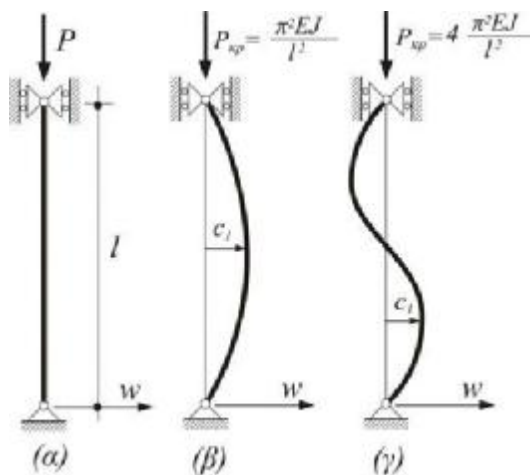
Θεωρητικά, η καμπύλωση της ράβδου είναι δυνατόν να γίνει μόνον όταν η  $P$  λαμβάνει τιμές που προκύπτουν από την (8) για ακέραια  $n$ . Για όλες τις άλλες (ενδιάμεσες) τιμές της  $P$ , η ράβδος ισορροπεί αν παραμείνει ευθεία.

Επομένως οι τιμές της  $P$  που δίνονται από τη σχέση (8), εκφράζουν ουσιαστικά τα **κρίσιμα φορτία** της ράβδου, το μικρότερο των οποίων, για  $n = 1$ , είναι:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EJ}{l^2} \quad (10)$$



και ονομάζεται **κρίσιμο φορτίο λυγισμού ή φορτίο του Euler**. Η αντίστοιχη εξίσωση της ελαστικής γραμμής που προκύπτει τώρα από την Εικόνα 15 και παριστάνει το **λεγόμενο θεμελιώδη τύπο** καμπύλης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, είναι:



Εικόνα 15.Θεμελιώδης τύπος καμπύλης

$$w = C_1 * \sin\left(n * \frac{\pi}{l} * z\right) \quad (11)$$

Στην εξίσωση (11) η  $C_1$  έχει την έννοια της μέγιστης απόκλισης, που εμφανίζεται στο μέσον της ράβδου και είναι θετική ή αρνητική. Πραγματικά, για  $z=l/2$ , έχουμε :

$$w = C_1 = w_{max}.$$

Επομένως στην εικόνα 14 , το τμήμα του διαγράμματος  $P - w$  που αντιστοιχεί ακριβώς στην τιμή  $P_{κρ}$ , προκύπτει ότι είναι μια **οριζόντια ευθεία** εκατέρωθεν του κατακόρυφου άξονα. Είναι φανερό, ότι η τιμή της  $C_1$ , μολονότι είναι απροσδιόριστη, πρέπει να παραμένει πολύ μικρή σε σχέση με το μήκος της ράβδου, επειδή αυτό είναι κάτι που και αρχικά το υποθέσαμε, και επί πλέον για μεγαλύτερες τιμές της  $C_1$ , η ράβδος θα έσπαζε. Η απροσδιοριστία αυτή της  $C_1$ , δείχνει ακριβώς το **αδιάφορο** της ισορροπίας της ράβδου. Η καμπύλη του λυγισμού που προκύπτει από τη σχέση (11) είναι ημιτονοειδής, με σημεία καμπής τα άκρα της ράβδου. Όμως από τις εξισώσεις (8) και (9), δίνοντας μεγαλύτερες τιμές στο  $n$ , παίρνουμε μια απειρία τιμών για τα κρίσιμα φορτία, σε συσχετισμό με τους αντίστοιχους τύπους ελαστικής γραμμής.

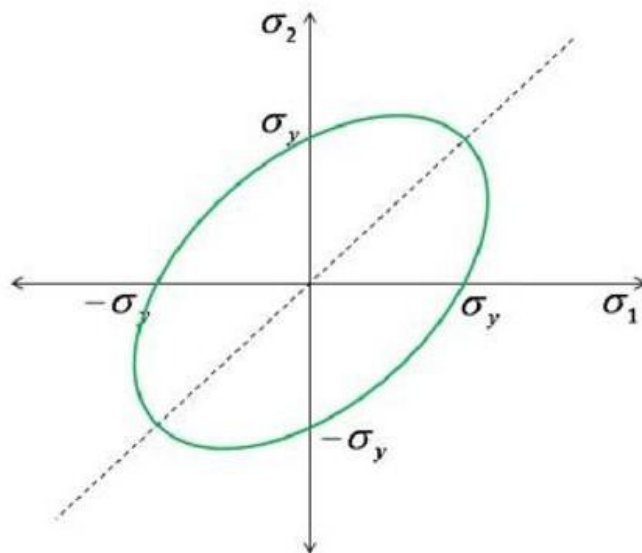
Στο τμήμα (γ) του σχ. 7.2.3, δίνεται ο τύπος της ελαστικής γραμμής για  $n = 2$ , που έχει σαν αντίστοιχο κρίσιμο φορτίο τετραπλάσιο του  $P_{κρ}$ . Παρατηρούμε λοιπόν ότι ενώ το  $P_{κρ}$  είναι ανάλογο του  $n^2$ , ο αριθμός των τμημάτων της καμπύλης «μεταξύ δύο σημείων καμπής» είναι ανάλογος του  $n$ . Τέτοιοι ανώτεροι τύποι λυγισμού ( $n > 1$ ) δεν παρουσιάζουν κανένα πρακτικό ενδιαφέρον, επειδή η ράβδος λυγίζει άμα η δύναμη  $P$  φτάσει την τιμή της  $P_{κρ}$ . Ο μόνος τρόπος για να πάρουμε ανώτερους τύπους λυγισμού, είναι να εξασφαλίσουμε πλευρική στήριξη στα «**σημεία καμπής**».

### 1.6. Κριτήριο Αστοχίας κατά Von-Misses.

Οποιοδήποτε **όλκιμο** στερεό διαρρέει όταν η πυκνότητα ενέργειας παραμόρφωσης του φθάσει μια συγκεκριμένη κρίσιμη τιμή στην οποία γίνεται η έναρξη της αστοχίας. Αυτή η φράση είναι γνωστή ως **κριτήριο αστοχίας κατά Von-Misses**.

Από τη στιγμή που η φράση αυτή ισχύει και για την κατάσταση της μονοαξονικής φόρτισης, η κρίσιμη τιμή της ενέργειας παραμόρφωσης μπορεί να εκτιμηθεί και με ένα πείραμα με καταπόνηση υπό μονοαξονικό εφελκυστικό φορτίο. Στην περίπτωση διαροής ενός υλικού υπό τέτοιου είδους φορτίο σε ένα πείραμα, η κατάσταση της τάσης με όρους **κύριων τάσεων** δίνεται από την τάση διαροής [Yield Stress ( $\sigma_y$ )].

$$\sigma_y = \sigma_1 \text{ (12) και } \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \text{ (13) (Εικόνα 16.)}$$



Εικόνα 16. Κατάσταση τάσης με όρους κύριων τάσεων

Μόλις το υλικό που εφελκύνουμε στο πείραμα φθάσει στην μέγιστη τιμή της πυκνότητας ενέργειας παραμόρφωσης, υπό πολυαξονική φορτίση θα διαρρεύσει όταν η ενέργεια παραμόρφωσης γίνει ίση ή μεγαλύτερη από την κρίσιμη τιμή του υλικού, δηλαδή το μέλος αστοχεί όταν η τάση κατά Von-Misses γίνει:

$$\sigma_{VM} > \sigma_y \quad (14)$$

Συνεπάγεται ότι για να ισχύει το κριτήριο Von-Misses θα πρέπει να ισχύει η παρακάτω ανίσωση που μας δείχνει ότι το μέλος θα είναι ασφαλές όταν:

$$\sigma_{VM} < \sigma_y \quad (15)$$

Έτσι, η θεωρία μέγιστης ενέργειας παραμόρφωσης μπορεί να δηλώσει ότι το υλικό δε διαρρέει αν η τάση κατά Von-Misses δεν ξεπερνά την τάση διαρροής του την οποία λάβαμε στο πείραμα της μονοαξονικής φόρτισης. Η τάση κατά Von-Misses ( $\sigma_{VM}$ ) με όρους κύριων τάσεων περιγράφεται ως:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 * \sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (16)$$

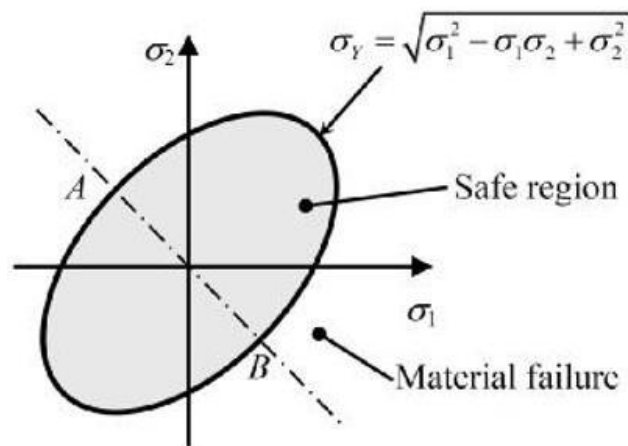
Και με όρους εντατικής κατάστασης η παραπάνω εξίσωση αποδίδεται ως:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_{xx'}^2 - \sigma_{xx'} * \sigma_{yy'} + \sigma_{yy'}^2 + 3 * \tau_{xy}^2} \quad (17)$$

Η εξίσωση της διδιάστατης ενέργειας παραμόρφωσης (Εξίσωση 17) περιγράφει μια έλλειψη την οποία σχεδιάζουμε στο επίπεδο  $\sigma_1$ - $\sigma_2$  (Εικόνα 17) η εσωτερική περιοχή της ελείψεως ορίζει την περιοχή της συνδιασμένης διαξονικής καταπόνησης στην οποία το υλικό είναι ασφαλές από την κατάσταση διαρροής υπό στατική φόρτιση.

Εικόνα 17.Επίπεδο αστοχίας της θεωρίας παραμόρφωσης ενέργειας

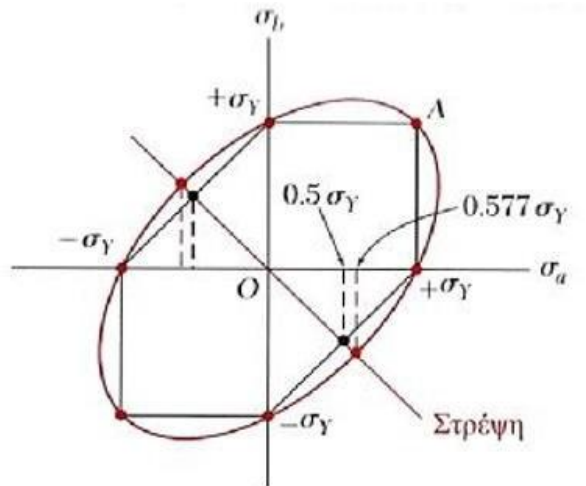
Ας υποθέσουμε μια κατάσταση στην οποία υπάρχει μόνο μία διαμητική τάση έτσι ώστε  $\sigma_x = \sigma_y = 0$  και  $\tau_{xy} = \tau$ . Για αυτήν την εντατική κατάσταση οι κύριες τάσεις είναι  $\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau$  και  $\sigma_3 = 0$ . Στο επίπεδο  $\sigma_1 - \sigma_2$ , αυτή η καθαρή διαμητική κατάσταση αναπαριστάται με μία ευθεία γραμμή η οποία περνά από την τομή των αξόνων με κλίση  $45^\circ$  και  $-45^\circ$  όπως στις δύο αντίστοιχες περιπτώσεις των σχημάτων στις Εικόνες 17 και 16. Η γραμμή διχοτομεί το επίπεδο αστοχίας Von-Misses μέσω των σημείων A και B (Εικόνα 17) και στα αντίστοιχα των άλλων δύο εικόνων. (Εικόνα 16 και 18)



Εικόνα 18. Διατμητική τάση συναρτήσει τάσης διαρροής

Το μέγεθος των  $\sigma_1$  και  $\sigma_2$  σε αυτά τα σημεία μπορεί να βρεθεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$\sigma_y = \sigma_1^2 * \sigma_2 + \sigma_1^2 = 3 * \sigma_1^2 = 3 * \tau_{max}^2 \quad (18)$$



$$\tau_{max} = \sigma_1 = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} = 0.577 * \sigma_y \quad (19)$$

Έτσι σε κατάσταση καθαρής διατμητικής καταπόνησης το υλικό διαρρέει όταν η διατμητική τάση φτάσει το 0.577 της τάσης διαρροής ( $\sigma_y$ ) (Εικόνα 18). Τα πειράματα στρέψης έδειξαν ότι η διατμητική τάση ισούται με το 0.577 της τάσης διαρροής, μια αποδεκτή απόκλιση και κατά τον Von-Misses είναι συνυπεύθυνες και οι τρεις κύριες τάσεις και όχι μόνο η μέγιστη.

## 2. ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ

### 2.1. Εισαγωγή.

Η Θαλάσσια Τεχνολογία (Marine ή Ocean Technology) καλύπτει όλες τις εφαρμογές της τεχνολογίας που σχετίζονται με την εξερεύνηση, την αξιοποίηση και την προστασία της θάλασσας και των φυσικών πόρων της, περιλαμβάνοντας τη θαλάσσια ατμόσφαιρα, τις ακτές, το θαλάσσιο πυθμένα και τον υποθαλάσσιο χώρο.

Η Θαλάσσια Τεχνολογία απαιτεί τη σύνθεση της τεχνογνωσίας που αναπτύχθηκε και αναπτύσσεται από τους επιστημονικούς κλάδους της ναυπηγικής, της τεχνολογίας των λιμενικών και παρακτίων έργων, της τεχνολογίας για την εξερεύνηση και εκμετάλλευση του θαλάσσιου και υποθαλάσσιου φυσικού πλούτου, της μηχανολογίας, της ηλεκτρολογίας, της ηλεκτρονικής, κ.ά. Αποσκοπεί στη σύλληψη, σχεδίαση, κατασκευή και λειτουργία πλωτών και υποβρύχιων κατασκευών και ναυπηγημάτων που έχουν σαν κύριο κοινό χαρακτηριστικό την παροχή και υποστήριξη διάφορων υπηρεσιών που σχετίζονται με το θαλάσσιο περιβάλλον.

Μέσα στο πλαίσιο αυτό, η Ναυτιλιακή Τεχνολογία εκφράζει μια ενότητα της Θαλάσσιας Τεχνολογίας που καλύπτει τόσο τα πλωτά και υποβρύχια ναυπηγήματα των ποταμών, λιμνών και θαλασσών, όσο και τις υποδομές και τον εξοπλισμό ξηράς (λιμάνια, ναυπηγεία, κ.ά.), που προορίζονται τόσο για τη διεκπεραίωση της μεταφοράς φορτίων και επιβατών, όσο και για την παροχή ειδικών (μη μεταφορικών) ναυτιλιακών υπηρεσιών. Η Τεχνολογία Πλοίου συνδυάζει την εφαρμογή της Ναυπηγικής και της Ναυτικής Μηχανολογίας στη σύλληψη, σχεδίαση, κατασκευή και λειτουργία των θαλάσσιων μεταφορικών μέσων και στην συγκεκριμένη περίπτωση ειδικότερα αυτών που στηρίζουν τις θαλάσσιες εμπορικές μεταφορές.

Επίσης, στο βαθμό που η εμπορική ναυτιλία αποτελεί μια βιομηχανική εφαρμογή έντονης ανταγωνιστικότητας, είναι απαραίτητη η αριστοποίηση της διαχείρισης της τεχνολογίας, καθώς και η συνεχής οικονομοτεχνική της αξιολόγηση. Κατά συνέπεια, στα πλαίσια της διαχείρισης της τεχνολογίας που εφαρμόζεται στα πλοία εξετάζεται η προώθηση της τεχνολογίας εκείνης που επιτυγχάνει τη μεγιστοποίηση των εσόδων και τη ελαχιστοποίηση του κόστους για τη ναυτιλία, σε απόλυτη όμως συμμόρφωση με το θεσμικό πλαίσιο της ασφάλειας της ναυσιπλοΐας και της προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Τα περισσότερα ναυπηγήματα της ναυτιλίας είναι αυτοπρωθούμενα, όπως είναι η περίπτωση των εμπορικών, πολεμικών και άλλων πλοίων, ενώ ένας μικρός αριθμός ναυπηγημάτων κυρίως αυτά των ειδικών υπηρεσιών πέρα από την διαφοροποίησή τους ως προς το σχήμα δεν έχουν την δυνατότητα αυτοπροώθησης, αλλά ρυμουλκούνται από άλλα αυτοπρωθούμενα. Πολλά από αυτά τα εξειδικευμένα ναυπηγήματα δραστηριοποιούνται στην ωκεανογραφική έρευνα, την εξόρυξη του φυσικού πλούτου των ωκεανών, την υποστήριξη των ναυπηγο-επισκευαστικών δραστηριοτήτων, των λιμενοκατασκευών και τέλος στην γενικότερη εξυπηρέτηση των αυτοπρωθούμενων ναυπηγημάτων της ναυτιλίας.

## **2.2. Διάκριση ναυπηγημάτων.**

Η γενική διάκριση των ναυπηγημάτων γίνεται συνήθως στη βάση της αποστολής τους, ενώ για τα ναυπηγήματα των μεταφορών (δηλαδή για τα πλοία) η κατάταξη αυτή μπορεί να εξειδικευθεί ως προς τον τύπο του μεταφερόμενου φορτίου και ως προς τη τεχνική της στήριξης τους στο υγρό στοιχείο, καθώς και ως προς άλλα περισσότερο εξειδικευμένα χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα το σύστημα πρόωσης τους.

### **2.2.1. Διάκριση ως προς την αποστολή.**

Με εξαίρεση τα ναυπηγήματα που αφορούν την πολεμική ναυτιλία, η γενική διάκριση των λοιπών ναυπηγημάτων ως προς την αποστολή τους έχει ως ακολούθως:

#### **A . Πλοία εμπορικών μεταφορών**

##### **A .1 Φορηγά**

- Δεξαμενόπλοια (Tankers):
- Μεταφοράς χύδην φορτίου (Bulkier): - ξηρού π.χ. άνθρακας (coal). τσιμέντο (cement). μέταλλευμα (Ore). σιτάρι (grain). - συνδυασμένου (OBO, PROBO, OO).
- Μεταφοράς γενικού φορτίου (General Cargo).
- Εμπορευματοκιβωτίων (Container ships). - Μεταφοράς οχημάτων και βαρέων τροχήλατων φορτίων (Ro-Ro).
- Ψυγεία (Refrigeration ships/Reefers).
- Μεταφοράς φορηγίδων (Barge carriers).
- Μεταφοράς βαρέων φορτίων (Heavy Lift Ships and Lo-Lo).
- Πολλαπλών χρήσεων (Multi-purpose carriers).
- Μεταφοράς διαφορετικών φορτίων (Con/Bulkers, Breakbulker/Bulker, Con/Bulk/Ro-Ro, Ro-Lo)

##### **A .2 Επιβατηγά**

- Επιβατηγά (Passenger-ferries).
- Επιβατηγά-Οχηματαγωγά (Car-ferries).

#### **B . Ναυπηγήματα ναυτιλιακής υποστήριξης**

- Πλοία ανεφοδιασμού (Replenishment ships).
- Πλοία συνεργεία (Workshop boats).
- Συνοδευτικά πλοία (Escort ships).
- Ρυμουλκά (Tug boats).
- Ναυαγοσωστικά (Salvage ships).
- Παγοθραυστικά (Ice breakers).
- Διανομής φορτίου ή μαούνες/φορηγίδες (Mini-bulcas or Barges)
- Πλοία πιλότοι (Pilot boats).
- Ναυπηγήματα υποδοχής ναυτιλιακών αποβλήτων (Shipping discharge reception crafts or SLOPS).
- Βυθοκόροι ή εσκαπτικά πλοία (Dredges).
- Γερανοφόρα πλοία (Crane ships).
- Πλωτές και μόνιμες ναυπηγο-επισκευαστικές δεξαμενές (Floating and Dry Docks).
- Σκάφη τεχνικής επιθεώρησης υποβρυχίων κατασκευών και ναυπηγημάτων (Submarine technical surveying crafts).
- Ναυπηγήματα καταπολέμησης της πετρελαιοειδούς ρύπανσης (Oil pollution fighting crafts, π.χ. skimmers)
- Πλωτές φορτο-εκφορτωτικές εγκαταστάσεις (Floating cargo handling installations)

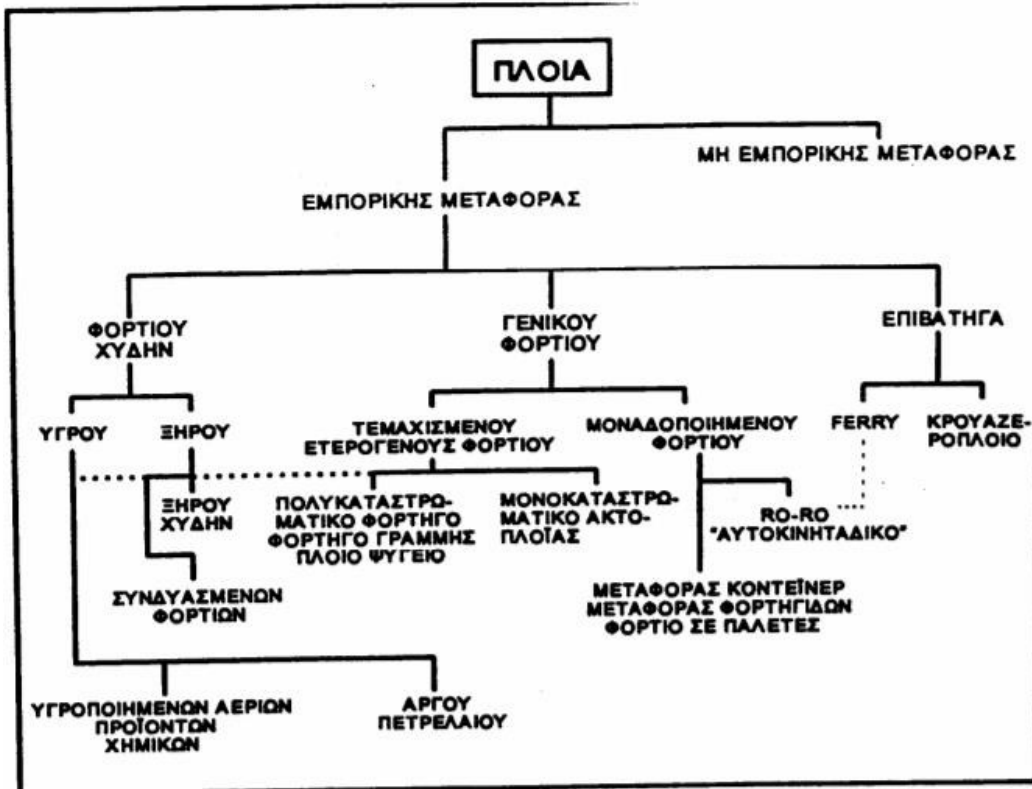


### **Γ . Ναυπηγήματα ειδικών υπηρεσιών ή ειδικής αποστολής**

- Αλιευτικά πλοία ή Αλιευτικά πλοία/εργοστάσια (Fishing boats or Fishing ships/factories).
- Πλοία πόντισης καλωδίων (Cable layers).
- Εξέδρες γεωτρήσεων, πλωτές ή μόνιμες (Offshore drilling rigs, floating or permanent).
- Ωκεανογραφικής έρευνας, πλωτά ή υποβρύχια (Oceanographic research, floating or submersibles).
- Μετεωρολογικά πλοία (Meteorological vessels).
- Πλοία σεισμολογικής έρευνας (Earthquake research ships).
- Πλοία αναψυχής (recreation vessels): Κρουαζιερόπλοια (Cruise ships), τουριστικά (Motor-boats and Sailboats).

#### **2.2.2. Διάκριση των πλοίων εμπορικής μεταφοράς ως προς το φορτίο.**

Η γενική διάκριση των πλοίων ως προς τον τύπο του μεταφερόμενου φορτίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 19. Η συμμετοχή των πλοίων της φορτηγού ναυτιλίας και ειδικότερα αυτών της μεταφοράς ξηρών και υγρών φορτίων χύδην στη διαμόρφωση της συνολικής χωρητικότητας του παγκόσμιου εμπορικού στόλου είναι κυρίαρχη, ενώ αντίθετα αριθμητική υπεροχή με μικρό όμως ποσοστό χωρητικότητας έχουν όλα τα άλλα πλοία της εμπορικής ναυτιλίας. Κατά την μεταπολεμική περίοδο, η πιο σημαντική τάση γιγαντισμού των εμπορικών πλοίων συνδέεται με τα δεξαμενόπλοια μεταφοράς αργού πετρελαίου. Η τάση αυτή κορυφώθηκε και ανακόπηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1970, κατά περίοδο της πρώτης ενεργειακής κρίσης. Σήμερα, συνεχή αύξηση μεγέθους και κατά συνέπεια μεταφορικής ικανότητας παρουσιάζουν κυρίως τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και τα κρουαζιερόπλοια, ενώ μια ηπιώτερη αλλά σαφή τάση γιγαντισμού ακολουθούν τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένων αερίων, τα πλοία ψυγεία και τα επιβατηγά-οχηματαγωγά. Σε κάθε περίπτωση, ο γιγαντισμός των πλοίων αξιοποιεί τη δυνατότητα εφαρμογής «οικονομιών κλίμακας», στα πλαίσια της διαμόρφωσης της ζήτησης για τις συγκεκριμένες ναυτιλιακές υπηρεσίες. Ειδικότερα, όμως, για τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, αξίζει να σημειωθεί ότι ο γιγαντισμός υπαγορεύεται και από την τάση μοναδοποίησης των φορτίων (και ειδικότερα του γενικού φορτίου), στην κατεύθυνση της μείωσης του χρόνου φορτο- εκφόρτωσης των πλοίων στα λιμάνια και της ενίσχυσης των συνδυασμένων μεταφορών.



Εικόνα 19. Διάκριση πλοίων ως προς το φορτίο τους

### 2.3. Ορολογία και ονοματολογία πλοίου

Τόσο κατά τη διάρκεια της σχεδίασης και κατασκευής του πλοίου όσο και κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσής του χρησιμοποιείται τεχνική ορολογία που καθορίζει το πλοίο διαστατικά, μορφολογικά και λειτουργικά. Η χρήση μιας κοινής και κατανοητής από όλους τεχνικής ορολογίας παρέχει τη πρακτική δυνατότητα του καθορισμού στοιχείων του πλοίου για τη γενικότερη διευκόλυνση της εκμετάλλευσής του. Μερικά από τα σημαντικότερα στοιχεία της ονοματολογίας και ορολογίας του πλοίου είναι τα ακόλουθα:

#### 1. Άφορτο πλοίο (*Light ship*)

Είναι το βάρος του πλοίου όπως παραδίνεται από το ναυπηγείο με όλη την κατασκευή συμπληρωμένη και με κανονική (λειτουργική) στάθμη υγρών στους λέβητες, στις μηχανές και στα μηχανήματα, αλλά χωρίς πλήρωμα, εφόδια, πετρέλαιο, λάδι λίπανσης, πόσιμο και τροφοδοτικό νερό και φορτίο.

#### 2. Άφορτη ίσαλος (*Light Waterline, LWL*)

Είναι η ίσαλος που ανταποκρίνεται στην πλεύση του άφορτου πλοίου.

#### 3. Βασικό επίπεδο (*Base Level*)

Είναι το επίπεδο που συμπίπτει με την άνω επιφάνεια του ελάσματος της επίπεδης τρόπιδας.

#### **4. Βασική γραμμή (Base Line)**

Είναι η γραμμή που συμπίπτει με τη γραμμή τομής του βασικού επιπέδου και του διαμήκους επιπέδου συμμετρίας του πλοίου.

#### **5. Βύθισμα (Draft or Draught)**

Είναι η κάθετη απόσταση μεταξύ του βασικού επιπέδου και μιάς ισάλου. Το βύθισμα που ανταποκρίνεται στην ίσαλο σχεδίασης (Designed Waterline, DWL) του πλοίου ονομάζεται Βύθισμα Σχεδίασης ή Αναφοράς (Moulded Draft). Το Μέσο Βύθισμα (Mean Draft) του πλοίου στο μέσο της απόστασης μεταξύ καθέτων ή το ημιάθροισμα μεταξύ πρυμναίου και πρωραίου βυθίσματος. Το βύθισμα στην πρυμναία και στην πρωραία κάθετο ονομάζεται Πρυμναίο (Aft Draft) και Πρωραίο Βύθισμα (Forward Draft), αντίστοιχα.

#### **6. Γάστρα (Hull)**

Σαν κατασκευή η γάστρα συχνά αναφέρεται στο τμήμα του πλοίου που περιλαμβάνεται μεταξύ του υδατοστεγούς κελύφους (περιβλήματος) και του ανώτερου υδατοστεγούς καταστρώματος του πλοίου. Το περίβλημα του πλοίου σχηματίζεται από συγκολλημένα παραλληλεπίπεδα ελάσματα στα οποία οι δύο μικρές πλευρές ονομάζονται Πέρατα (ends), οι δύο μεγάλες ονομάζονται πλευρικές Ακμές (sides). Η τοποθέτηση των ελασμάτων στο περίβλημα του πλοίου γίνεται με τις ακμές τους κατά μήκος του πλοίου. Η σύνδεση των μεγάλων πλευρικών ακμών ονομάζεται Ραφή και αυτή των περάτων ονομάζεται Σόκκορο.

#### **7. Δεξαμενές (Tanks)**

Είναι οι χώροι του πλοίου με προορισμό και εξοπλισμό που επιτρέπει την αποθήκευση και φόρτο-εκφόρτωση του καυσίμου, του νερού και του λιπαντέλαιου. Οι δεξαμενές για τη μεταφορά και φόρτο-εκφόρτωση υγρού φορτίου σε δεξαμενόπλοια ονομάζονται Δεξαμενές φορτίου (Deer or Cargo tanks). Οι Δεξαμενές Ερματισμού ή Ζυγοστάθμισης (Ballast Tanks) είναι δεξαμενές θαλάσσιου νερού που χρησιμοποιούνται για την ρύθμιση του βυθίσματος και της διαγωγής του πλοίου στις διάφορες καταστάσεις φόρτωσης και περιοχές ή/και εποχές πλεύσης. Για τον σκοπό αυτό υπάρχουν αφενός η Πρωραία Δεξαμενή (Fore Peak) που βρίσκεται στο χώρο του στεγανού σύγκρουσης (μεταξύ της στείρας και της πρώτης στεγανής φρακτής) και αφετέρου η Πρυμναία Δεξαμενή (Aft Peak) που βρίσκεται στον αντίστοιχο στεγανό χώρο της πρύμνης.

#### **8. Διαγωγή (Trim)**

Είναι η διαφορά μεταξύ πρωραίου και πρυμναίου βυθίσματος. Όταν τα βυθίσματα είναι ίσα το πλοίο αναφέρεται ως Ισοβύθιστο (Evenkeel). Όταν το πρυμναίο βύθισμα είναι μεγαλύτερο έχουμε Διαγωγή προς τη Πρύμνη (Trim by Stern), ενώ όταν το πρωραίο βύθισμα είναι μεγαλύτερο έχουμε Διαγωγή προς την Πλώρη (trim by bow).

#### **9. Διαδοκίδες (Stringers or Beams)**

Είναι οι διαμήκεις ενισχυτικές δοκοί του καταστρώματος.

#### **10. Διάμηκες Επίπεδο Συμμετρίας (Centerline Plane or Middle Line Plane)**

Είναι το επίπεδο που περιλαμβάνει την πρωραία και πρυμναία κάθετο και από την πρύμνη προς την πλώρη χωρίζει το πλοίο στο Δεξιό Τμήμα (Starboard side) και Αριστερό Τμήμα (Port side) του πλοίου.

#### **11. Διπύθμενο (Doublebottom)**

Είναι ο χώρος που παρεμβάλλεται μεταξύ του πυθμένα του πλοίου και σειρών ελασμάτων που ονομάζονται Ελάσματα Οροφής Διπύθμενου (Tank Top Plates) και τοποθετούνται πάνω στις έδρες και στις σταθμίδες του πλοίου εφόσον οι τελευταίες είναι του ίδιου ύψους. Οι χώροι αυτοί χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση υγρών και ονομάζονται Δεξαμενές Διπύθμενου (Double Bottom Tanks or D.B. Tanks).

#### **12. Εκτόπισμα (Displacement)**

Είναι το βάρος του νερού που εκτοπίζει η βρεχόμενη επιφάνεια (τα ύφαλα) του πλοίου και είναι ίσο με το βάρος του πλοίου. Το Αφορτο Εκτόπισμα (Light Ship Displacement) είναι το βάρος του άφορτου πλοίου, ενώ το βάρος του έμφορτου πλοίου ονομάζεται Εμφορτο Εκτόπισμα (Full Load Displacement).

#### **13. Έξαλα (Overwater)**

Είναι η κατασκευή του πλοίου που βρίσκεται έξω από το νερό.

#### **14. Εεφεδρικό Ύψος ή Ύψος Εξάλων (Freeboard)**

Είναι η απόσταση μεταξύ της γραμμής φόρτωσης και μιας γραμμής παράλληλης προς αυτή που φέρεται από την πλευρά του ανώτερου υδατοστεγούς καταστρώματος στη θέση της μέσης τομής. Το Ελάχιστο Ύψος Εξάλων (Minimum Freeboard) ανταποκρίνεται στο μέγιστο επιτρεπτό βύθισμα του πλοίου.

#### **15. Ίσαλος (Waterline)**

Είναι η τομή που προκύπτει από την επιφάνεια της θάλασσας με το πλοίο. Η ίσαλος που αντιστοιχεί στο μέγιστο βύθισμα του πλοίου ονομάζεται Εμφορτη Ίσαλος ή Ίσαλος Σχεδίασης (Load Waterline, LWL or Design Waterplane, DWL) και συμπίπτει με τη Γραμμή Φόρτωσης Θέρους (Summer Loadline).

#### **16. Ισχύο ή Γοφός (Quarter)**

Είναι το τμήμα των πλευρών του πλοίου ανάμεσα στην πρύμνη και το μέσο του.

#### **17. Κύριο Κατάστρωμα (Main Deck)**

Είναι το συνεχές κατάστρωμα που αναπτύσσεται σε όλο το μήκος του πλοίου και στο οποίο έχουν κατάληξη οι εγκάρσιες και διαμήκεις φρακτές του πλοίου με συνέπεια να ονομάζεται και Κατάστρωμα Αντοχής. Το κατάστρωμα αυτό εφόσον συμπίπτει και με το κατάστρωμα που καλύπτει το πλοίο υδατοστεγώς από τον καιρό ονομάζεται και Ανώτερο Κατάστρωμα (Upper Deck) ή Κατάστρωμα Καιρού (Weather Deck), ενώ τα χαμηλότερα από αυτό καταστρώματα ονομάζονται Ενδιάμεσα Καταστρώματα ή Κουραδόροι (Tweendecks). Το αμέσως χαμηλότερο από το ανώτερο κατάστρωμα ορίζεται ως το 2ο Κατάστρωμα.

**18. Κέντρο Βάρους (Centre of Gravity)**

Είναι το σημείο δράσης της συνισταμένης όλων των βαρών του πλοίου και αυτών που μεταφέρονται από αυτό.

**19. Κέντρο Άνωσης (Centre of Buoyancy)**

Είναι το κέντρο του όγκου των υφάλων του πλοίου. Λέγεται και κέντρο άντωσης γιατί εκεί επενεργεί η δύναμη της άντωσης.

**20. Κοίλο ή Ύψος (Depth or Height)**

Είναι η κάθετη απόσταση ανάμεσα στο βασικό επίπεδο αναφοράς και ένα παράλληλο προς αυτό που περνάει από την πλευρά του ανώτερου καταστρώματος στη μέση τομή.

**21. Κυρτότητα Καταστρώματος (Camber)**

Είναι το μήκος που χρησιμοποιείται για να δείξει την καμπυλότητα που παρουσιάζει ένα κατάστρωμα κατά το εγκάρσιο και εκφράζεται από την κάθετη απόσταση μεταξύ δύο παραλλήλων προς το βασικό επίπεδο που φέρονται από το μέσο και την πλευρά του καταστρώματος (στη μέση τομή). Είναι συνήθως τμήμα παραβολικής ή κυκλικής καμπύλης και το ύψος της κυρτότητας αυτής είναι συχνά ίσο με το 1/50 του πλάτους. Η κυρτότητα διευκολύνει τη ροή των νερών του καταστρώματος προς τις Υδροροές ή Μπούνια (Waterways or Gunways).

**22. Κύπη ή Αμπάρια (Holds)**

Είναι οι χώροι του πλοίου που προορίζονται για τη μεταφορά ξηρών κυρίως φορτίων. Τα στόμια των κυτών (Hatch Openings or Hatch Covers) είναι υπερυψωμένα σε σχέση με το κύριο κατάστρωμα.

**23. Λωροί (Stringer or Beams)**

Είναι οι διαμήκεις ενισχυτικοί δοκοί των πλευρών της γάστρας.

**24. Μάσκα ή Παρειά (Bow)**

Είναι το τμήμα της γάστρας στην αριστερή ή δεξιά πλευρά της στείρας.

**25. . Μέση Τομή (Amidship or Midship Section)**

Είναι η εγκάρσια τομή που ανταποκρίνεται στο μέσο της απόστασης μεταξύ των καθέτων.

**26. Μετάκεντρο (Metacentre)**

Αναφορικά με την εγκάρσια ευστάθεια του πλοίου και για μικρές εγκάρσιες κλίσεις, το μετάκεντρο είναι το σημείο που η γραμμή δράσης της άνωσης τέμνει το επίπεδο συμμετρίας του πλοίου. Αν το μετάκεντρο είναι ψηλότερα από το κέντρο βάρους, η ισορροπία του πλοίου χαρακτηρίζεται ευσταθής.

**27. Μήκος Μεταξύ Καθέτων (Length Between Perpendiculars, LBP or LPP)**

Είναι η διαμήκης απόσταση μεταξύ του ακρότατου σημείου της πλώρης και της εξωτερικής πλευράς του ποδοστήματος ή το αξονικού κέντρου του πηδαλίου, στο επίπεδο της ισάλου

σχεδίασης ή εμπορτης ισάλου. Στα σημεία αυτά ορίζονται η Πρωραία (Forward Perpendicular, FP) και Πρυμναία Κάθετος (After Perpendicular, AP) του πλοίου. Το Μήκος Ισάλου (Length of Waterline, LWL) είναι η διαμήκης απόσταση μεταξύ των ακραίων σημείων του πλοίου στο επίπεδο της ισάλου αναφοράς, ενώ η απόσταση μεταξύ των ακρότατων σημείων της πλώρης και της πρύμνης είναι το Ολικό Μήκος (Length Overall, LOA) του πλοίου.

### **28. Νεκρό ή Πρόσθετο Βάρος (Deadweight)**

Το βάρος αυτό αναφέρεται στο βάρος των καυσίμων και των λιπαντικών, του νερού (τροφοδοτικού, πόσιμου, έρματος), των εφοδίων, των καταναλώσιμων ειδών, του πληρώματος, των επιβατών καθώς και των αποσκευών τους, των εργαλείων και κυρίως του μεταφερόμενου φορτίου. Είναι η διαφορά μεταξύ του έμφορτου και άφορτου εκτοπίσματος. Το μέγιστο πρόσθετο ή νεκρό βάρος του πλοίου ανταποκρίνεται στο μέγιστο επιτρεπτό βύθισμα.

### **29. Νομείς (Frames)**

Αποτελούν κατασκευές από δοκούς διατομής 'Γ' ή 'Τ' που ενισχύουν εσωτερικά τα λεπτά ελάσματα του περιβλήματος του πλοίου. Διακρίνονται σε Εγκάρσιους (Transverse) ή Διαμήκεις Νομείς (Longitudinal Frames). Το τμήμα του νομέα που προσαρμόζεται στον πυθμένα του πλοίου ονομάζεται Έδρα (Floor), ενώ το τμήμα του νομέα που προσαρμόζεται στο κατάστρωμα ονομάζεται Ζυγό (Beam). Η σύνδεση νομέα και ζυγού γίνεται με τους Βραχίονες, Αγκώνες ή Μπρατσόλια (brackets), ενώ αυτή μεταξύ του νομέα και της έδρας γίνεται με τους Βραχίονες ή Αγκώνες Κυρτού της γάστρας (Bilge Brackets).

### **30. Παράλληλο Μέσο Τμήμα (Parallel Middle Body)**

Είναι το τμήμα του πλοίου κοντά στη μέση τομή που η μορφή των εγκαρσίων τομών του παραμένει αμετάβλητη.

### **31. Παραπέτο ή Δρύφρακτο (Bulwark)**

Είναι το παραπέτασμα στο ανώτερο κατάστρωμα που εμποδίζει την είσοδο του νερού των κυμάτων σε αυτό.

### **32. Παρατροπίδια (Bilge Keels)**

Είναι η μόνιμη διαμήκης προεξοχή πτερυγιακής διατομής που τοποθετείται κάθετα στο κυρτό τμήμα του περιβλήματος του πλοίου.

### **33. Παρίσαλος Επιφάνεια (Waterplane)**

Είναι οποιαδήποτε επιφάνεια παράλληλη με το επίπεδο της ισάλου σχεδίασης που τέμνει το πλοίο στα ύφαλα ή στα έξαλα του.

### **34. Πλάτος Σχεδίασης ή Αναφοράς (Moulded Breadth or Beam)**

Είναι η μέγιστη απόσταση μεταξύ των πλευρών του πλοίου που μετριέται κάθετα προς το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας και δεν περιλαμβάνει το πάχος του πλευρικού ελάσματος. Η αντίστοιχη απόσταση μαζί με το πάχος των πλευρικών ελασμάτων και τυχόν προεξοχές είναι το Μέγιστο Πλάτος (Breadth or Beam Extreme) του πλοίου.

### **35. Ποδόστημα (Stern Post)**

Είναι η ακροπρυμναία κατασκευή του πλοίου.

### **36. Σιμότητα Καταστρώματος (Sheer)**

Εκφράζει την καμπυλότητα του καταστρώματος κατά το διαμήκες και διακρίνεται σε Πρωραία ή Πρυμναία Σιμότητα (Fore ή Aft Sheer).

### **37. Σειρά Ελασμάτων (Strake)**

Είναι το σύνολο της κατά μήκος διάταξης των ελασμάτων του περιβλήματος του πλοίου.

### **38. Σειρά Ελασμάτων Ζωστήρα (Sheer Strake)**

Είναι η ανώτερη (τελευταία) σειρά των ελασμάτων του πλευρικού περιβλήματος του πλοίου.

### **39. Σειρά Κυρτού Γάστρας (Bilge Strake)**

Είναι η σειρά των ελασμάτων μεταξύ πυθμένα και πλευράς.

### **40. Σταθμίδα (Keelson)**

Είναι οι διαμήκεις ενισχυτικές δοκοί του πυθμένα. Αυτή που βρίσκεται στο διαμήκες επίπεδο συμμετρίας του πλοίου ονομάζεται Κεντρική Σταθμίδα (Center Keelson) ή Κατακόρυφη Τρόπιδα (Vertical Keel), οι παράλληλες με αυτή ονομάζονται Πλευρικές Σταθμίδες (Side Keelsons), ενώ υπάρχουν και αυτές του κυρτού της γάστρας.

### **41. Στείρα (Stem Post)**

Είναι η ακροπρωραία κατασκευή του πλοίου.

### **42. Συντελεστής Γάστρας (Block Coefficient)**

Είναι ο λόγος του όγκου του έμφορτου εκτοπίσματος των υφάλων του πλοίου προς το όγκο του παραλληλεπίπεδου με πλευρές ίσες προς το μέγιστο πλάτος (B), το μέσο βύθισμα (T) και το μήκος μεταξύ καθέτων (LPP) και συμβολίζεται με το CB.

### **43. Συντελεστής Πρόσθετου Βάρους (Deadweight Coefficient)**

Είναι ο λόγος του πρόσθετου βάρους προς το έμφορτο εκτόπισμα.

### **44. Συντελεστής Στοιβασίας (Stowage Factor)**

Ο συντελεστής αυτός καθορίζει τον απαιτούμενο όγκο στοιβασίας του φορτίου στη μονάδα βάρους του και εκφράζεται με κυβικά μέτρα ή πόδια ανά τόννο. Για παράδειγμα, σε πλοίο με πρόσθετο βάρος 100000 τόννων και χώρο 180000 m<sup>3</sup> που προορίζεται αποκλειστικά για την μεταφορά φορτίου, απαιτείται ρυθμός στοιβασίας 1.8 m<sup>3</sup> /ton. για τη φόρτωση του σε πλήρες βύθισμα. Ετσι, αν κάποιος μεταφορέας προσφέρει 100000 τόννους φορτίου με συντελεστή στοιβασίας 2.1 m<sup>3</sup>/ton. προκύπτει ότι μόνο 66600 τόννοι φορτίου μπορούν να φορτωθούν στο χώρο των 140000m<sup>3</sup> που προορίζονται για τη μεταφορά του φορτίου.

### **45. Τρόπιδα ή Καρένα (Keel)**

Είναι η σειρά ελασμάτων που βρίσκεται στον πυθμένα του πλοίου. Η σειρά ελασμάτων που βρίσκεται στο διαμήκες επίπεδο συμμετρίας ονομάζεται Επίπεδη Τρόπιδα (Flat Keel).

#### **46. Υπερκατασκευή (Superstructure)**

Είναι κάθε κατασκευή του πλοίου πάνω από το κύριο κατάστρωμα του πλοίου που εκτείνεται σε όλο το πλάτος του πλοίου αλλά όχι σε όλο το μήκος.

#### **47. Υπερστέγασμα (Deck Erection)**

Είναι η κατασκευή του πλοίου πάνω από το κύριο κατάστρωμα του πλοίου που εκτείνεται σε μέρος του πλάτους και μήκους του πλοίου. Για παράδειγμα αναφέρονται το Πρόστεγο ή Καμπούνι (Forecastle) στην πλώρη του πλοίου το Μεσόστεγο ή Γέφυρα (Bridge) στο μέσο του πλοίου και το Επίστεγο ή Πούπι (Poop) στην πρύμνη του πλοίου.

#### **48. Υφαλα (Underwater or Submerged)**

Είναι το μέρος του πλοίου που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του νερού.

#### **49. Φρακτές ή Μπουλμέδες (Bulkheads)**

Είναι κατακόρυφα στεγανά ή μη στεγανά διαφράγματα τοποθετημένα εγκάρσια ή κατά μήκος που χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό των διαμερισμάτων του πλοίου και ταυτόχρονα ενισχύουν την αντοχή του.

#### **50. Φρακτή Στεγανού Σύγκρουσης (Collision bulkhead)**

Είναι η πρώτη από την πλώρη στεγανή φρακτή. Το διαμέρισμα μεταξύ της πλώρης και της φρακτής στεγανού σύγκρουσης ονομάζεται Πρωραίο Στεγανό (Fore Peak).

#### **51. Φρακτή Πρυμναίου Στεγανού (Aft Bulkhead)**

Είναι η πρώτη από την πρύμνη στεγανή φρακτή. Το διαμέρισμα μεταξύ της πρύμνης και της φρακτής του πρυμναίου στεγανού ονομάζεται Πρυμναίο Στεγανό (After Peak).

#### **52. Μικτή ή Ολική Χωρητικότητα (Gross Tonnage, GRT)**

Είναι ο όγκος όλων των περικλειόμενων χώρων του πλοίου όπως αυτός προκύπτει από τους ειδικούς κανονισμούς καταμέτρησης και αποτελεί μια ένδειξη του μεγέθους του πλοίου όπως αυτό συμμετέχει στη διαμόρφωση των λιμενικών, «καναλιάτικων» και άλλων τελών και δαπανών του πλοίου. Η Καθαρή Χωρητικότητα (Net Tonnage, NRT) αντιπροσωπεύει τον όγκο των εκμεταλλεύσιμων ή κερδοκτητικών χώρων του πλοίου. Η χωρητικότητα του πλοίου εκφράζεται σε κυβικά μέτρα, πόδια ή κόρους χωρητικότητας (1 κόρος = 100 κυβικά πόδια = 2.83 κυβικά μέτρα) και κατά συνέπεια αποδίδεται με κόρους ολικής ή καθαρής χωρητικότητας, κ.ο.χ. ή κ.κ.χ., αντίστοιχα.

### **2.4. Κατασκευαστική αντοχή.**

Τόσο ο φέρων σκελετός όσο και το ελασματικό περίβλημα όλων σχεδόν των πλοίων είναι χαλύβδινα και η σύνδεση σκελετού και ελασμάτων γίνεται με την τεχνική των μεταλλικών συγκολήσεων. Η κατασκευαστική αντοχή των πλοίων παρέχεται από το σκελετό



του, που βασικά συγκροτείται από την τρόπιδα, τους νομείς, τους λωρούς και τις σταθμίδες. Σε ότι αφορά την ενίσχυση της κατασκευής από την πλευρά του καταστρώματος, περαιτέρω συνδρομή παρέχεται από τα ζυγά και τις διαδοκίδες. Τέλος, οι φρακτές προσδίδουν μια γενικότερη ενίσχυση της κατασκευής του πλοίου. Η κατασκευή πρέπει να ανταποκρίνεται στην ανάπτυξη υψηλών τάσεων και η φορτο-εκφόρτωση καθώς και ο ερματισμός/αφερματισμός πρέπει να ακολουθούν συγκεκριμένη διαδικασία για τη βέλτιστη κατανομή των μεταφερόμενων βαρών. Σε δυσμενείς θαλάσσιες συνθήκες, στις τάσεις αυτές προστίθεται και ο κυματισμός που είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία προϋποθέσεων κόπωσης (fatigue) της μεταλλικής κατασκευής, μέσω της συνεχούς εναλλαγής της διεύθυνσης των δυνάμεων (τάσεων) που εξασκούνται σε αυτή. Η κόπωση της μεταλλικής κατασκευής μπορεί ανύποπτα να οδηγήσει στην έναρξη και ανάπτυξη ρωγμών (crack initiation and propagation) και τελικά στη θραύση των μεταλλικών ελασμάτων ή/και δομικών στοιχείων του πλοίου.

## **2.5. Σχεδίαση πλοίων.**

### **2.5.1. Εξέλιξη-Αρμοδιότητες.**

Ιστορικά η σχεδίαση των πρώτων πλοίων χαρακτηρίστηκε από τη διατύπωση των απόψεων και αποφάσεων ενός συχνά ιδιοφυή σχεδιαστή, που αντιμετώπιζε τη διαδικασία σχεδίασης μέσα στα στενά όρια κάποιας συγκεκριμένης εφαρμογής. Η επιτυχία σχεδίασης και κατασκευής του πλοίου κρίνεται ανάλογα με την ικανότητα παροχής μιας ποιοτικής μεταφορικής υπηρεσίας που καθορίζεται από την «εξυπηρετικότητα», την ασφάλεια, τη φιλικότητα προς το περιβάλλον και τη διαχρονικότητα που παρουσιάζει. Από λειτουργική άποψη το πλοίο είναι από τα πλέον πολύπλοκα και πολυσύνθετα μέσα μεταφοράς με απαιτήσεις αυτονομίας (αυτοδυναμίας) μακράς χρονικής διάρκειας και με υψηλό βαθμό αξιοπιστίας. Οι απαιτήσεις αυτές ικανοποιούνται από λειτουργίες που στηρίζονται σε απaráμιλλο αριθμό εξαρτημάτων, μηχανημάτων και συστημάτων με τεχνικές προδιαγραφές που παρέχουν τη δυνατότητα επιτυχούς προσαρμογής στο συχνά εχθρικό αλλά και πολύτιμο για τον άνθρωπο θαλάσσιο περιβάλλον.

Με τη σύλληψη, σχεδίαση, την κατασκευή και τη λειτουργία των πλοίων ασχολείται ο ναυπηγός μηχανολόγος που καλείται στην πράξη να συνθέσει τις ειδικότητες της ναυτικής μηχανολογίας και της ναυπηγικής αρχιτεκτονικής. Η αναλογία της σύνθεσης των δύο ειδικοτήτων διαμορφώνονται κατά περίπτωση ανάλογα με το υπό επίλυση πρόβλημα. Η μηχανολογία καλύπτει τη τεχνολογία των συστημάτων πρόωσης, πηδαλιουχίας, αγκυροβολισμού, διαχείρισης του φορτίου, θέρμανσης, εξαερισμού, κλιματισμού, παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, εσωτερικής και εξωτερικής επικοινωνίας και άλλων μηχανολογικών συστημάτων σχετικών με τις γενικότερες λειτουργικές απαιτήσεις του πλοίου.

Στην αρχιτεκτονική του πλοίου εντάσσεται κυρίως η μελέτη για τη στατική και δυναμική αντοχή και συμπεριφορά της κατασκευής του πλοίου στο θαλάσσιο περιβάλλον, για την εσωτερική και εξωτερική διαρύθμιση των χώρων του και για τη γενική αισθητική του πλοίου όταν και όπου υπάρχει ιδιαίτερη απαίτηση εσωτερικής και εξωτερικής καλαισθησίας. Υπάρχουν όμως και θέματα στη σχεδίαση των πλοίων που είναι δύσκολο να αποδοθεί η αρμοδιότητα σε μία από τις παραπάνω ειδικότητες. Για παράδειγμα, η σχεδίαση της έλικας του πλοίου είναι ένα θέμα που αποτελεί από μία άποψη υδροδυναμική διάταξη ναυπηγικού

χαρακτήρα και από την άλλη μηχανολογική διάταξη μετατροπής ενέργειας, όπως οι αντλίες και οι στροβιλομηχανές.

Ετσι, ο διαχωρισμός των δύο ειδικοτήτων εμφανίζεται συχνά δύσκολος και ως προς το συγκεκριμένο παράδειγμα η αντιμετώπιση των προβλημάτων της απόδοσης, των κραδασμών, της σύνδεσης της έλικας με τον κινητήρα, κ.ά, απαιτεί τη συνεργασία και των δύο ειδικοτήτων. Το ίδιο ισχύει και για μια σειρά άλλων θεμάτων, όπως η διαχείριση του φορτίου, η προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος, η διαβιωσιμότητα του πληρώματος, η εργονομία του πλοίου, κλπ.

Η απόκλιση από την έννοια του πολυπράγμονος τεχνολόγου υπαγορεύτηκε από την ανάγκη αλληλοέξαρτησης αυτών των ειδικοτήτων αλλά και από την υποστήριξη τους από άλλες πιά σύγχρονες ειδικότητες, όπως της ηλεκτρονικής και πληροφορικής με σημαντική παρέμβαση στη σχεδίαση, κατασκευή και λειτουργία των πλοίων.

Η εφαρμογή της ναυπηγικής αρχιτεκτονικής και της ναυτικής μηχανολογίας στην πολύπλοκη και λεπτομερή διαδικασία επιλογής, σχεδίασης, κατασκευής και λειτουργίας των πλοίων ενισχύεται μέσα από τη συνεργασία των ειδικοτήτων, στο βαθμό που αυτές διατηρούν την ιδιαιτερότητά τους και ταυτόχρονα αναζητούν διέξοδους παραγωγικού συμβιβασμού.

Η διαδικασία αυτή εναλλαγής σχεδιαστικών προτάσεων και απόψεων μεταξύ των υπό συμμετοχή ειδικοτήτων καθορίζει μιά πιά ορθολογική προσέγγιση της ναυτιλιακής τεχνολογίας, μέσα από τη σύγχρονη αντίληψη της τεχνολογίας των ολοκληρωμένων συστημάτων.

### 2.5.2. Διαδικασία σχεδίασης.

Αναπόφευκτα, η απόφαση για την επιλογή ενός νέου πλοίου οδηγεί στη διαδικασία σχεδίασης του, που χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα στάδια:

A. ΒΑΣΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ή ΠΡΟΜΕΛΕΤΗ (BASIC DESIGN)
i) Μελέτη Αρχικής Σχεδίασης ή Εφικτότητας (Concept ή Feasibility Design) ii) Προκαταρκτική Μελέτη Σχεδίασης (Preliminary Design)
B. ΜΕΛΕΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΣΥΜΒΟΛΑΙΟΥ (CONTRACT DESIGN)
Γ. ΜΕΛΕΤΗ ΛΕΠΤΟΜΕΡΟΥΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ (DETAIL DESIGN)

#### **A. Βασική Σχεδίαση ή Προμελέτη**

Τα υπο-στάδια (i) και (ii) συγκροτούν στο στάδιο σχεδίασης υπό το γενικό όρο Βασική Σχεδίαση ή Προμελέτη του πλοίου και περιλαμβάνουν τις παράπανω οικονομο-τεχνικές μελέτες που σχετίζονται με το στόχο και τους προσδιοριστικούς παράγοντες της επένδυσης. Στις μελέτες αυτές λαμβάνονται υπόψη οι βασικές απαιτήσεις του πλοιοκτήτη που αφορούν:

- i. τη μεταφορική ικανότητα του πλοίου (σε νεκρό βάρος ή χωρητικότητα ή σε αριθμό εμπορευματοκιβωτίων ή επιβατων ή/και οχημάτων)
- ii. την ταχύτητα του πλοίου

iii. την εμβέλεια ή αυτοδυναμία του πλοίου iv. το νηογνώμονα και την κλάση του πλοίου.

Στην Προμελέτη καλύπτονται οι φάσεις:

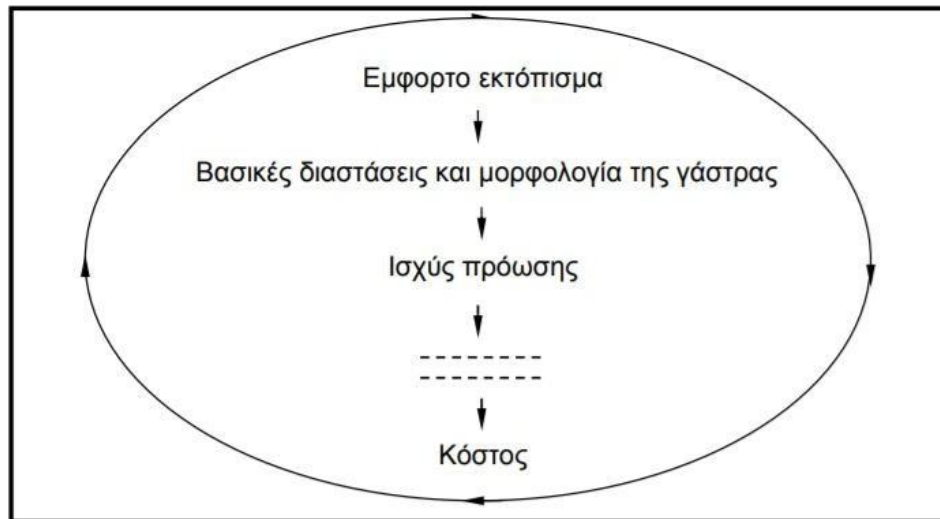
- εκτίμησης των απαιτήσεων του πελάτη ή πλοιοκτήτη,
- συγκέντρωσης στοιχείων για όμοιες απαιτήσεις, και
- προσαρμογής των στοιχείων σε υφιστάμενους κανονισμούς, νόμους και προδιαγραφές. Κατά συνέπεια, η προκαταρκτική μελέτη αποτελεί τη βάση για τη διατύπωση των προσφορών από τα διάφορα ναυπηγεία που εκδηλώνουν ενδιαφέρον για την ανάληψη του ναυπηγικού έργου.

**B.** Με την ανάθεση της ναυπήγησης στο ναυπηγείο της συμφερότερης προσφοράς, η διαδικασία σχεδίασης εισέρχεται **στο στάδιο της Μελέτης Συμβολαίου** (Contract Design). Στο στάδιο αυτό η ακριβής διατύπωση των τεχνικών προδιαγραφών του πλοίου αποτελεί μέρος της συμβατικής δέσμευσης μεταξύ πλοιοκτήτη και ναυπηγείου, σε συνδυασμό με τους διάφορους εμπορικούς όρους και προϋποθέσεις του συμβολαίου, όπως τον τρόπο πληρωμής, τις εγγυήσεις, το χρονοδιάγραμμα παράδοσης, τις ποινικές ρήτρες σε τυχόν τεχνικές ή χρονικές παρεκλίσεις, κ.ά.

**Γ. Το στάδιο της Μελέτης Λεπτομερούς Σχεδίασης** (Detail Design) περιλαμβάνει τη λεπτομερή διατύπωση όλων των στοιχείων κατασκευής του πλοίου, με σκοπό τη διευκόλυνση της παραγωγικής διαδικασίας. Έτσι στο στάδιο αυτό, η ακριβής σχεδίαση του πλοίου προσαρμόζεται στην παραγωγή (design for production) και ελέγχεται από αυτή, σε αντίθεση με τα προηγούμενα στάδια σχεδίασης που είναι αποδεσμευμένα από την παραγωγική διαδικασία και ελέγχονται από καθαρά ναυπηγο-μηχανολογικά κριτήρια προσαρμογής του πλοίου στις απαιτήσεις του πελάτη και στο πλαίσιο των κανονισμών, νόμων και άλλων εξωγενών περιορισμών. Σε όλα τα στάδια της σχεδίασης του πλοίου και ειδικότερα κατά την Προμελέτη εξετάζεται η προσαρμοστικότητα των επιλεγμένων σχεδιαστικών στοιχείων του «συστήματος πλοίο» στη εισαγωγή νέων στοιχείων, στα πλαίσια της σχεδιαστικής διαδικασίας που είναι γνωστή σαν «ανάλυση συστήματος» (system analysis). Επίσης, καταγράφεται η ευαισθησία του συστήματος στις σχεδόν αναπόφευκτες μεταβολές των διάφορων σχεδιαστικών στοιχείων για την επίτευξη της βέλτιστης προσαρμοστικότητας, στα πλαίσια της διαδικασίας που ονομάζεται «ανάλυση ευαισθησίας» (sensitivity analysis). Ο συνεχής επανακαθορισμός των επί μέρους επιλογών είναι μια χαρακτηριστική διαδικασία κατά τη σχεδίαση του πλοίου και επαναλαμβάνεται σε σημεία που κρίνεται ότι μπορεί να εκτιμηθεί συνολικά (και με οικονομικά κριτήρια) η απόδοση της σχεδίασης του όλου «συστήματος πλοίο» ή επιμέρους υπο-συστημάτων (όπως π.χ. του συστήματος πρόωσης).

Σε όλα τα στάδια της σχεδίασης του πλοίου και ειδικότερα κατά την Προμελέτη εξετάζεται η προσαρμοστικότητα των επιλεγμένων σχεδιαστικών στοιχείων του «συστήματος πλοίο» στη εισαγωγή νέων στοιχείων, στα πλαίσια της σχεδιαστικής διαδικασίας που είναι γνωστή σαν «ανάλυση συστήματος» (system analysis). Επίσης, καταγράφεται η ευαισθησία του συστήματος στις σχεδόν αναπόφευκτες μεταβολές των διάφορων σχεδιαστικών στοιχείων για την επίτευξη της βέλτιστης προσαρμοστικότητας, στα πλαίσια της διαδικασίας που ονομάζεται «ανάλυση ευαισθησίας» (sensitivity analysis). Ο συνεχής επανακαθορισμός των επί μέρους επιλογών είναι μια χαρακτηριστική διαδικασία κατά τη σχεδίαση του πλοίου και επαναλαμβάνεται σε σημεία που κρίνεται ότι μπορεί να εκτιμηθεί συνολικά (και με οικονομικά κριτήρια) η απόδοση της σχεδίασης του όλου

«συστήματος πλοίου» ή επιμέρους υπο-συστημάτων (όπως π.χ. του συστήματος πρόωσης). Για παράδειγμα, ο καθορισμός των κύριων χαρακτηριστικών ενός δεξαμενόπλοιου ακολουθεί την προσέγγιση του Πίνακα Ι. Με την πρώτη ανακεφαλαίωση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων επιβάλλεται η επανάληψη της διαδικασίας από το (1) μέχρι και το (9) με τον



Πίνακας 1. Σχεδιαστική προσέγγιση κύριων χαρακτηριστικών δεξαμενόπλοιου (ή πλοίου εκτοπίσματος)

επανακαθορισμό των σχεδιαστικών στοιχείων που εμπεριέχονται σε αυτά. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται διαγραμματικά στην Εικόνα 20.

1. Εμφορτο εκτόπισμα
2. Κύριες διαστάσεις και σχήμα πλοίου
3. Ισχύς πρόωσης
4. Ναυπηγικές γραμμές και γενική διάταξη
5. Βάρος
6. Χωρητικότητα δεξαμενών φορτίου
7. Ύψος εξάλων
8. Ευστάθεια και διαγωγή
9. Κόστος
10. Ανακεφαλαίωση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Εικόνα 20. Διαδικασία καθορισμού κύριων χαρακτηριστικών του πλοίου

Μετά από μικρό αριθμό ανακυκλώσεων επιτυγχάνεται ο ακριβής και τελικός καθορισμός των κύριων χαρακτηριστικών του πλοίου σύμφωνα με τη βέλτιστη συνολική ανταπόκριση των χαρακτηριστικών αυτών σε όλα τα βασικά κριτήρια της σχεδίασης. Η σχεδιαστική αυτή διαδικασία αναπτύσσεται συνεχώς αναλυτικότερα και καλύπτει το πλοίο σαν ένα ολοκληρωμένο σύστημα. Επιτυγχάνει την συγκλίση στη συνολική τελική επιλογή που είναι το αποτέλεσμα στο τέλος της Λεπτομερούς Σχεδίασης του πλοίου. Ειδικότερα, η συνεχώς αναλυτικότερη σχεδιαστική προσέγγιση καλύπτει όλη την κατασκευή και τον εξοπλισμό του πλοίου. Τα βασικά στοιχεία αναφοράς που αφορούν τον εξοπλισμό του πλοίου παρουσιάζονται στον Πίνακα II.

1. Σύστημα Πρόωσης
1α. Κινητήρας πρόωσης
1β. Προωθητήρας
1γ. Μετάδοση ισχύος
1δ. Δίκτυο καυσίμου, αέρα, ψύξης και λίπανσης
2. Βοηθητικά Συστήματα
2α. Ηλεκτροπαραγωγή
2β. Ατμοπαραγωγή
2γ. Κλιματισμός
2δ. Πυρόσβεση/πυρασφάλεια/πυροπροστασία
2ε. Δίκτυο παροχής νερού
2στ. Δίκτυο ερματισμού
3. Μηχανήματα Σκάφους και Καταστρώματος
3α. Μηχανήματα αγκυροβολίας και πρόσδεσης
3β. Μηχανισμοί πηδαλιουχίας, οιακιστήριο (τιμονιέρα),
3γ. Μηχανήματα και μηχανισμοί φορτο-εκφόρτωσης
3δ. Ναυαγοσωστικά μέσα και εξοπλισμός
4. Συστήματα Ναυσιπλοίας και Αυτομάτου Ελέγχου
4α. Επικοινωνίες, εσωτερικές και εξωτερικές
4β. Αυτόματος πιλότος, αυτόματος μηχανολογικός έλεγχος
4γ. Εξοπλισμός τηλεχειρισμού και ηλεκτρονικής παρακολούθησης του εξοπλισμού.

Πίνακας II. Χαρακτηριστικά στοιχεία εξοπλισμού πλοίου

## 2.6. Νηογνώμονες (classification societies)

Η ανάγκη δημιουργίας τέτοιων οργανισμών ήταν αισθητή από τους αρχαίους χρόνους. Στην αρχαία Ελλάδα λειτουργούσαν παρόμοιοι που με διάφορες παραλλαγές μέσω των Ρωμαίων και των μεσαιωνικών χωρών διατηρήθηκαν μέχρι το τέλος του 17ου αι. όταν στη Μεγάλη Βρετανία ιδρύθηκε ο πρώτος με διεθνή επιρροή νηογνώμονας, ο Lloyd Register of Shipping, του οποίου η εξέλιξη και επί σειρά ετών "μονοπωλιακή" επικράτησή του οφείλεται κυρίως στη Βρετανική θαλασσοκρατορία κατά τους τελευταίους πέντε αιώνες.

Είναι γεγονός πως η αγγλική επίδραση σε όλα γενικώς τα ναυτικά ζητήματα υπήρξε τόσο σημαντική ώστε και αυτή ακόμα η Ναυπηγία (Ναυπηγική) να θεωρείται "αγγλικό" δημιούργημα και διεθνής ναυτική γλώσσα να καταστεί η αγγλική πολλά χρόνια πριν επικρατήσει διεθνώς στη διπλωματία, τις επιστήμες, στο εμπόριο και στο τουρισμό. Και όμως κρίνοντας από καθαρή ιστορική έρευνα θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι τόσο ο "φλεγματικός" χαρακτήρας των Βρετανών, όσο και ο συντηρητισμός του Λόυδ (Lloyd) να ήταν οι αιτίες στη βραδύτητα της εξέλιξης της ναυπηγικής. Αντίθετα ο Γαλλικός Νηογνώμονας "Μπιυρό Βεριτάς" (Bureau Veritas) αν και επηρέαζε μικρότερο αριθμό

πλοίων, ίσως και από αντίδραση προς τον Λούδ, υπήρξε υποστηρικτής των τεχνικών ναυπηγικών καινοτομιών.

Ακόμα και το πνεύμα της ασφάλισης των πλοίων μεταμοσχεύθηκε στην Αγγλία από την Μεσόγειο, περί τον 14ο αιώνα, από Ιταλούς εμπόρους (Lega Anseatica) που είχαν εγκατασταθεί στη Lombard str. του Λονδίνου. Το 1600 αυτοί εκδιώχθηκαν από την Βασίλισσα Ελισάβετ για να ιδρυθεί το Changers of Assurance, με βάση όμως το δίκτυο της "Λίγκα Ανσεάτικα". Το επιμελητήριο αυτό τηρούσε ειδικό βιβλίο αρχείο πλοίων με κύριο ενδιαφέρον τις αγοραπωλησίες και την ασφάλισή τους. Στην αρχή το έργο αυτό το αναλάμβαναν ιδιωτικά γραφεία (συμβολαιογραφικά) σε καφενεία της εποχής (coffee-houses). Σημαντικότερο δε αυτών των καφενειών ήταν του Εδουάρδου Λούδ (Edward Lloyd) επίσης στη Λόμβαρντ στρητ που ιδρύθηκε το 1691. Το 1696 ο Λούδ εξέδωσε την πρώτη ναυτιλιακή εφημερίδα τη "Λούδ'ς νιούς" (Lloyd's News), 3 φορές την εβδομάδα, στην οποία περιελάμβανε διάφορες πληροφορίες για την κίνηση των Βρετανικών και ευρωπαϊκών λιμένων καθώς και χαρακτηριστικά των πλοίων με διάφορους συμβολισμούς όπως με τα φωνήεντα A,E,I,O,U την αξία του πλοίου και με τα G,M,B από τις λέξεις Good (=καλό), Middling (=μέτριο) και Bad (=κακό) την αξία του εξαρτισμού. Τα πλοία που κατασκευάζονταν στο Τάμεση έπαιρναν την ανώτατη κλάση (A-G) για 13 χρόνια. Τα ναυπηγούμενα στη Σκωτία και Ευρώπη ανεξάρτητα αν ήταν καλλίτερα μόνο για 8 χρόνια και εκείνα στην Αμερική για 6 χρόνια.

Αυτό είχε σαν συνέπεια τελικά οι εφοπλιστές της Σκωτίας και Γαλλίας, προκειμένου να υπερασπίσουν τα συμφέροντά τους να ιδρύσουν ανεξάρτητους νηογνώμονες. Αυτούς βρήκαν αργότερα μιμητές και σε άλλα ναυτικά κράτη και με την πάροδο του χρόνου να ιδρυθούν και άλλοι νηογνώμονες.

**Ο Νηογνώμονας** είναι ναυτιλιακός τεχνικός οργανισμός που καταρτίζει κανονισμούς ασφαλείας, τόσο επί της ναυπήγησης των πλοίων όσο και επί του εξοπλισμού τους, κατατάσσοντας αυτά σε κλάση (classification). Με ειδικούς δε επιθεωρητές (surveyors) τα παρακολουθεί καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής τους, είτε με περιοδικές είτε με έκτακτες επιθεωρήσεις.

Εκτός από το **πιστοποιητικό ταξινόμησης ή κλάσεως (certificate of class)** οι Νηογνώμονες χορηγούν και τα ακόλουθα πιστοποιητικά:

- **Πιστοποιητικό καταμέτρησης χωρητικότητας (tonnage certificate)**
- **Πιστοποιητικό γραμμής φόρτωσης (load line certificate)**
- **Πιστοποιητικό αξιοπλοΐας (certificate of seaworthiness)**
- **Πιστοποιητικό ασφάλειας φορτοεκφορτωτικών μέσων (cargo gear certificate)**
- **Πιστοποιητικό βλαβών (παρακολούθησης) (certificate of damages) και άλλα ειδικότερης φύσεως.**

Συγκεκριμένα, επιτρέπεται στους νηογνώμονες να επιθεωρούν πλοία, πετρελαιοπηγές, υποβρύχια και άλλες θαλάσσιες δομές και να εκδίδουν πιστοποιητικά για λογαριασμό του κράτους υπό τη σημαία του οποίου είναι νηολογημένα τα πλοία. Εκτός από την παροχή υπηρεσιών ταξινόμησης και πιστοποίησης, οι μεγαλύτερες κοινωνίες διεξάγουν επίσης έρευνα στις δικές τους ερευνητικές εγκαταστάσεις προκειμένου να βελτιώσουν την

αποτελεσματικότητα των κανόνων τους και να ερευνήσουν την ασφάλεια των νέων καινοτομιών στη ναυπηγική βιομηχανία.

Σήμερα οι εγκυρότεροι Νηογνώμονες - αναγνωρισμένοι από την ελληνική νομοθεσία και αρχές, κατά σειρά έτους ίδρυσής των είναι:

- Ο Βρετανικός, "**Lloyd's Register of Shipping**", ιδρύθηκε το 1760, έδρα: Λονδίνο, ο αρχαιότερος, σύντμηση τίτλου: L.R.
- Ο γαλλικός, "**Bureau Veritas**", ιδρύθηκε το 1828, έδρα: Παρίσι, σύντμηση τίτλου: B.V.
- Ο Αμερικανικός, "**American Bureau of Shipping**", ιδρύθηκε το 1862 και αναδιοργανώθηκε το 1898, Νέα Υόρκη, σύντμηση τίτλου: A.B.S. ή A.B.
- Ο Νορβηγικός, "**Det Norske Veritas**", ιδρύθηκε το 1864, έδρα: Όσλο, σύντμηση τίτλου: D.N.V.
- Ο Ιταλικός, "**Registro Italiano Navale**", ιδρύθηκε το 1865 και ανασυστήθηκε το 1920, έδρα: Γένοβα, σύντμηση τίτλου: RINA R.I.
- Ο Γερμανικός, "**Germanischer Lloyd**", ιδρύθηκε το 1867, έδρα: Αμβούργο, σύντμηση τίτλου: G.L.
- Ο Ελληνικός, "**Veritas Hellenique**", ιδρύθηκε το 1870 και επανασυστήθηκε το 1919 ως "Ελληνικός Νηογνώμων" "Hellenic Register of Shipping" ανώνυμη εταιρία, έδρα: Πειραιάς, σύντμηση τίτλου: EN ή αγγλ. H.R.
- Ο Ιαπωνικός, "**Nippon Kaiji Kyokai**" ("Imperial Japanese Marine Corporation") "Teikoku Kaiji Kyokai", ιδρύθηκε το 1899, έδρα: Τόκιο, σύντμηση τίτλου: N.K. J.R.
- Ο Ρωσικός, "**Morskoj Registr Rusia**" πρώην "Morskoj Registr SSSR", έτος ίδρυσης 1913, σύντμηση τίτλου: R.R.
- Ο Ολλανδικός, "**Nederlandsche Vereenigener van Assuradensen**", σύντμηση τίτλου: N.V.

Οι δώδεκα κορυφαίοι ναυτικοί οργανισμοί ταξινόμησης αποτελούν τη **διεθνή ένωση ταξινομικών εταιρειών** (IACS). Το **IACS** είναι ένα σύστημα για την προώθηση της ασφάλειας της ζωής, της περιουσίας και του περιβάλλοντος, κυρίως μέσω της καθιέρωσης και της επαλήθευσης της συμμόρφωσης με τα τεχνικά και τεχνικά πρότυπα για τη συντήρηση, κατασκευή και διατήρηση του κύκλου ζωής των πλοίων, υπεράκτιων μονάδων και άλλων θαλάσσιων εγκαταστάσεων.

Τα μέλη της IACS κατά ελληνική αλφαβητική σειρά είναι:

- Ο Αγγλικός Νηογνώμονας, (LR) [Lloyd's Register],
- Ο Αμερικανικός Νηογνώμονας, (ABS) [American Bureau of Shipping],
- Ο Γαλλικός Νηογνώμονας, (BV) [Bureau Veritas],
- Ο Γερμανικός Νηογνώμονας, (GL) [Germanischer Lloyd],
- Ο Ιαπωνικός Νηογνώμονας, (NK) [Nippon Kaiji Kyokai] (Class NK),
- Ο Ινδικός Νηογνώμονας, (IRCLASS) [Indian Register of Shipping],
- Ο Ιταλικός Νηογνώμονας, (RINA) [Registro Italiano Navale],
- Ο Κινεζικός Νηογνώμονας, CCS [China Classification Society],
- Ο Κορεατικός Νηογνώμονας, (KR) [K. Register of Shipping],
- Ο Κροατικός Νηογνώμονας, (CRS) [Croatian Register of Shipping]
- Ο Νορβηγικός Νηογνώμονας (DNV) [Det Norske Veritas],



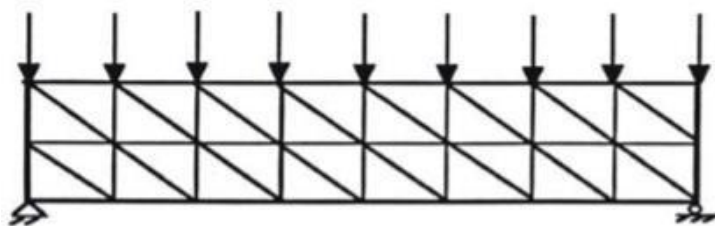
- Ο Πολωνικός Νηογνώμονας, (PRS) [Polish Register of Shipping] και
- Ο Ρωσικός Νηογνώμονας, (RS) [R. Register of Shipping].

Σήμερα, οι νηογνώμονες δέχονται ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ως νόμιμη μέθοδο για τη διεξαγωγή της έρευνας και την επικύρωση των αποτελεσμάτων τους. Κάθε κοινωνία εκδίδει κατευθυντήριες γραμμές, περιγράφοντας το πεδίο εφαρμογής και τις μεθόδους που απαιτούνται για τη δομική ανάλυση των πλοίων και το υπόβαθρο για τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να διεξάγονται οι αναλύσεις αυτές. Αυτές οι κατευθυντήριες γραμμές βασίζονται σε σχετικούς κανόνες για την ταξινόμηση των πλοίων. Οι διαρθρωτικές αναλύσεις που διεξάγονται σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στις συγκεκριμένες κατευθυντήριες γραμμές θα γίνουν κανονικά αποδεκτές ως βάση για την έγκριση του σχεδίου. Αυτό σημαίνει ότι η προσομοίωση αναλαμβάνει τη ναυτιλιακή βιομηχανία.

### 3. ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

#### 3.1. Γενικά.

Η μέθοδος αυτή αποτελεί ισχυρό εργαλείο στη μελέτη των κατασκευών και βρίσκει μεγάλο αριθμό εφαρμογών. Στο πεδίο της ανάλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο στο (συμβατικό) ελαστικό πεδίο (θεωρία μικρών μετατοπίσεων) αλλά και για μη-γραμμικά προβλήματα, λυγισμό, δυναμική συμπεριφορά κ.ά. Η μέθοδος χρησιμοποιείται γενικότερα σε προβλήματα που επιδέχονται μεταβολική διατύπωση στην μηχανική των συνεχών μέσων. Η αρχική διατύπωση της μεθόδου έγινε με βάση την μητρική ανάλυση, αργότερα όμως δόθηκε ευρύτερη και πιο θεμελιώδης θεωρητική βάση. Αρχικά θα θεωρήσουμε την μέθοδο ως επέκταση της μητρικής ανάλυσης στην ανάλυση των συνεχών μέσων (ελάσματα, κελύφη). Το χαρακτηριστικό της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση διδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων για την προσομοίωση συνεχών μέσων. Μια από τις πρώτες δημοσιεύσεις στις οποίες παρουσιάστηκε η ιδέα αυτή είναι των Turner, Clough, Martin, και Torp (1956), ορισμένα όμως χαρακτηριστικά της είχαν ήδη περιγραφεί από τους Courant (1943), Hrenikoff (1941), McHenry (1943) και άλλους. Ακολούθησαν πολλές δημοσιεύσεις, συμπεριλαμβανομένων και αυτών του Αργύρη και των συνεργατών του την περίοδο 1954-60. Τα πρώτα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν σε προβλήματα επίπεδης εντατικής κατάστασης, αργότερα όμως διατυπώθηκαν στοιχεία και για τρισδιάστατα στερεά, ελάσματα υπό κάμψη, παχιά κελύφη, και άλλες μορφές κατασκευών. Μετά την καθιέρωσή τους στη γραμμική ελαστική περιοχή εφαρμόστηκαν και σε δυσκολότερα προβλήματα όπως η δυναμική συμπεριφορά, ο λυγισμός και η μη-γραμμική απόκριση και συμπεριφορά του υλικού. Για να επιλυθούν δε προβλήματα με μη-γραμμική συμπεριφορά του υλικού απαιτείται επαναληπτική διαδικασία.

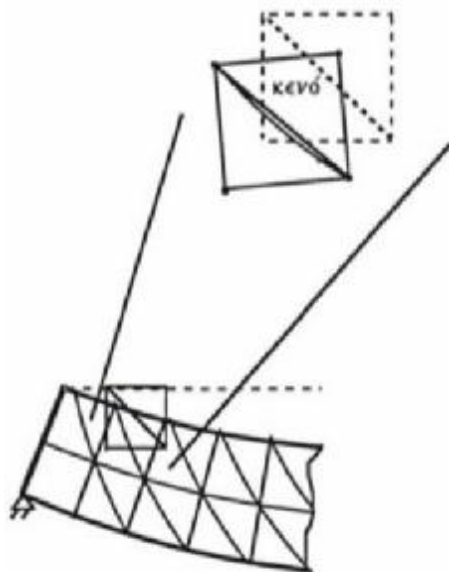


Εικόνα 21. Χρήση τριγωνικών στοιχείων για τη διακριτοποίηση αμφιέριστης δοκού υπό καμπτικά φόρτιση.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1960 αναγνωρίστηκε ότι η μέθοδος αποτελεί συγκεκριμένη μορφή της μεθόδου Ritz, και το 1964 οι Zienkiewicz και Cheung έδειξαν ότι μπορεί να εφαρμοσθεί σε όλα τα προβλήματα πεδίου που έχουν μεταβολική διατύπωση. Για προβλήματα κατασκευών υπάρχει τώρα ένας ικανός αριθμός προγραμμάτων γενικής χρήσης και το γεγονός αυτό σε συνάρτηση με τις δυνατότητες της μεθόδου έχει οδηγήσει στην ραγδαία εξέλιξη και χρήση της τα τελευταία χρόνια.

### 3.2. Βασικές έννοιες της μεθόδου.

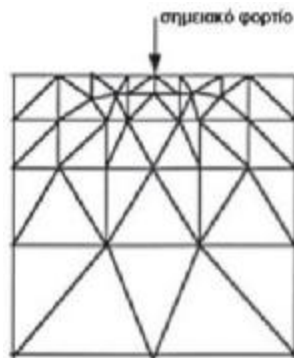
Η βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι, όπως και στη μητρική ανάλυση, η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με συστατικά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί φυσιολογική προσομοίωση των πλαισίων, καθώς αυτά αποτελούνται από δοκούς που είναι συνδεδεμένες στα άκρα τους. Σε μία συνεχή όμως κατασκευή δεν υπάρχουν φυσικοί διαχωρισμοί και συνεπώς απαιτείται να γίνει τεχνητός διαχωρισμός σε στοιχεία, τα οποία να συνδέονται κατά μήκος των άκρων (πλευρών) τους. Τα τεχνητά αυτά στοιχεία, ή πεπερασμένα στοιχεία είναι συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά και οι κόμβοι συνήθως βρίσκονται στα άκρα. Η Εικόνα 21 δείχνει τον κορμό δοκού υποδιαιρεμένο σε τριγωνικά στοιχεία. Για να γίνει χρήση μητρικών μεθόδων απαιτείται να προσομοιωθεί η συνεχής κατασκευή με ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και σε ορισμένες περιπτώσεις και οι παράγωγοί τους. Εάν περιλαμβάνονται και οι παράγωγοι γίνεται λόγος για βαθμούς ελευθερίας αντί για μετατοπίσεις κόμβων. Οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων πρέπει να είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των κόμβων και όλες οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων εκφράζονται σε σχέση με τις κομβικές μετατοπίσεις. Με αυτό τον τρόπο οι μόνοι άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις στους κόμβους και το πρόβλημα μετατρέπεται από συνεχές σε διακριτό. Παρ' όλο που μπορεί να υπάρχει μεγάλος αριθμός κομβικών μετατοπίσεων ο αριθμός τους είναι πεπερασμένος. Το πρόβλημα εκφράζεται τότε ως ένα σύνολο (σύστημα) γραμμικών εξισώσεων οι οποίες επιλύονται με αριθμητικές (μητρικές) μεθόδους.



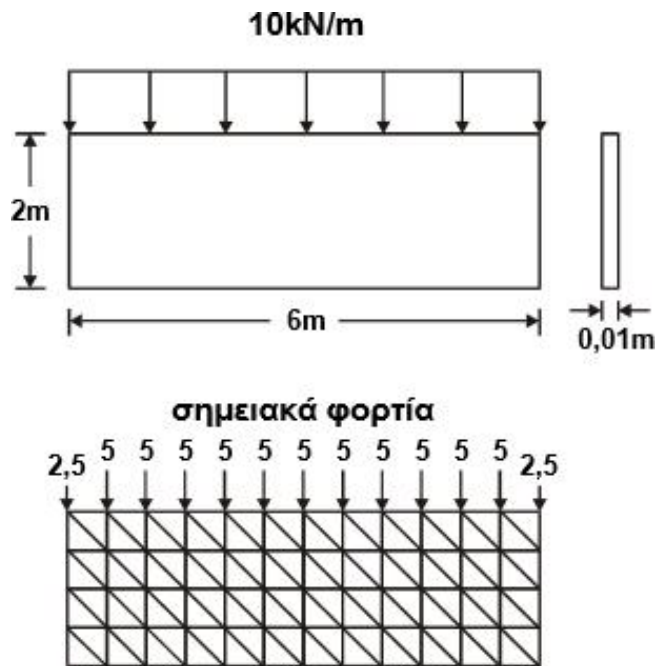
Εικόνα 22. Παραμόρφωση στοιχείων

Για να επιτευχθεί ακριβής λύση ενός συγκεκριμένου προβλήματος στη διακριτοποιημένη μορφή του, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας και γεωμετρικής συμβιβαστότητας στο εσωτερικό των στοιχείων αλλά και στα σύνορά τους. Οι απαιτήσεις αυτές ανάγονται στην ικανοποίηση τεσσάρων συνθηκών. Ας θεωρηθεί, για παράδειγμα, η συμβιβαστότητα μεταξύ των στοιχείων. Σε μία συνεχή κατασκευή όπως το έλασμα της Εικόνας 22 ισχύει συνέχεια των μετατοπίσεων στα κοινά όρια των στοιχείων. Συνεπώς στο αριθμητικό μοντέλο (πεπερασμένα στοιχεία) δεν επαρκεί να ικανοποιείται η συνθήκη της συνέχειας των μετατοπίσεων στους κόμβους και μόνο. Εάν δηλαδή δεν διατυπωθούν περιορισμοί στις μετατοπίσεις κατά μήκος των ορίων των στοιχείων το θεωρητικό μοντέλο της κατασκευής θα είναι περισσότερο εύκαμπτο επειδή θα δημιουργηθούν κενά, όπως δείχνει η Εικόνα 21. Ένας τρόπος να περιορισθεί το σφάλμα είναι να χρησιμοποιηθούν μικρότερα και περισσότερα στοιχεία διότι έτσι θα δημιουργηθούν περισσότεροι κόμβοι και συνεπώς περισσότερα σημεία στα οποία θα ικανοποιείται η συμβιβαστότητα. Μία διακριτή προσομοίωση δεν μπορεί όμως να αποδώσει με απόλυτη ακρίβεια την συμπεριφορά ενός συνεχούς μέσου, ανεξαρτήτως του αριθμού των διακριτών μεταβλητών που χρησιμοποιούνται. Υπάρχει δηλαδή πάντοτε ένα σφάλμα, το οποίο όμως μπορεί να περιορισθεί και να γίνει αμελητέο και τοπικό. Δεν είναι συνεπώς δυνατόν να ικανοποιηθούν όλες οι προαναφερθείσες συνθήκες με απόλυτη ακρίβεια, έστω και αν γίνει χρήση μεγάλου αριθμού στοιχείων. Είναι όμως δυνατό, με σωστή επιλογή των ιδιοτήτων των στοιχείων και κατάλληλη διακριτοποίηση, να περιορισθεί το αριθμητικό σφάλμα. Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των στοιχείων αποτελεί ένα από τα βασικότερα στάδια διατύπωσης μιας λύσης. Θα πρέπει τότε να γίνεται αυτό έτσι ώστε να ικανοποιούνται επαρκώς οι συνθήκες συμβιβαστότητας χωρίς να χρειασθεί να γίνει χρήση υπερβολικά μικρών στοιχείων. Η συμπεριφορά των στοιχείων καθορίζεται από συναρτήσεις οι οποίες ορίζουν τον τρόπο μεταβολής των τάσεων ή των μετατοπίσεων στο εσωτερικό τους. Με

άλλα λόγια, προκαθορίζεται ο τρόπος συμπεριφοράς των διαφόρων μεταβλητών. Το αποτέλεσμα είναι ότι, παρ' όλο που οι συνθήκες ισορροπίας και συμβιβαστότητας ικανοποιούνται μόνο στους κόμβους, η προδιαγεγραμμένη συμπεριφορά στο εσωτερικό κάθε στοιχείου εξασφαλίζει ότι η συμβιβαστότητα ικανοποιείται επαρκώς στο εσωτερικό και στα σύνορά τους. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι απαιτείται προσοχή κατά την υποδιαίρεση (διακριτοποίηση) της κατασκευής, καθώς επίσης και κατά την επιλογή της συνάρτησης που περιγράφει τη συμπεριφορά στο εσωτερικό του κάθε στοιχείου. Θα γίνει αναφορά σε ορισμένα θέματα σχετικά με την υποδιαίρεση και σε συνέχεια, για να γίνει κατανοητός ο τρόπος επιλογής της συνάρτησης εσωτερικής συμπεριφοράς θα μελετηθούν ορισμένα απλά στοιχεία τα οποία είναι ευρέως διαδεδομένα και βρίσκουν εφαρμογή σε προβλήματα λεπτότοιχων κατασκευών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ακρίβεια της μεθόδου αυξάνεται όταν αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων, ή καλύτερα, των κόμβων. Όσο αυξάνεται όμως ο αριθμός των στοιχείων, τόσο αυξάνονται ο χρόνος υπολογισμού και το κόστος. Σε πολλές περιπτώσεις η βαθμιαία μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων χρησιμοποιείται για να αποκτηθεί ακριβέστερη εικόνα της τοπικής συμπεριφοράς (σε συγκεντρώσεις τάσεων, σε ανοίγματα, κοντά στο σημείο εφαρμογής του εξωτερικού φορτίου, κλπ). Η βαθμιαία μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων είναι ένας εφικτός τρόπος ελάττωσης του κόστους χωρίς να μειωθεί ακρίβεια της λύσης του προβλήματος. Λόγω όμως της μεγάλης ποικιλίας κατασκευών και φορτίσεων δεν είναι δυνατό να δοθεί γενικός κανόνας σχετικά με τον αριθμό ή το μέγεθος των στοιχείων ή τον τρόπο διακριτοποίησης που απαιτούνται για επαρκή ακρίβεια. Σε κάθε περίπτωση ο τρόπος διακριτοποίησης πρέπει να βασίζεται στην εμπειρία συμπεριφοράς και μελέτης παρόμοιων κατασκευών. Εάν αυτό δεν είναι εφικτό πρέπει να επιλυθεί σειρά προβλημάτων με διαφορετικές διακριτοποιήσεις και να υπολογισθεί ο βαθμός σύγκλισης στην ακριβή λύση. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η ακρίβεια της λύσης για το συγκεκριμένο πρόβλημα (Εικόνα 23). Στην Εικόνα 24 δείχνεται ότι η εξωτερική φόρτιση παριστάνεται με σύνολα αντίστοιχων σημειακών φορτίων τα οποία εφαρμόζονται στους κόμβους των στοιχείων. Στην περίπτωση συγκεντρωμένων φορτίων ο προφανής τρόπος είναι να επιλεγεί κόμβος στο σημείο εφαρμογής του φορτίου. Για κατανεμημένα φορτία πρέπει να επιλεγούν στατικά ισοδύναμα σημειακά φορτία στους αντίστοιχους κόμβους. Τα περισσότερα στοιχεία επίπεδης εντατικής κατάστασης δεν έχουν στρεπτικό βαθμό ελευθερίας και συνεπώς δεν είναι δυνατό να γίνει χρήση αντίστοιχων ροπών στους κόμβους. Αυτό δεν είναι όμως σοβαρό πρόβλημα διότι οι κόμβοι είναι αρκετά κοντά ο ένας στον άλλο και έτσι οι δυνάμεις στους κόμβους αποτελούν ικανοποιητική προσομοίωση του κατανεμημένου φορτίου. Για παράδειγμα, η Εικόνα 24 δείχνει:



Εικόνα 23. Βαθμιαία ελάτωση του μεγέθους των στοιχείων.



Εικόνα 24. Ισοδύναμα επικόμβια φορτία .

τον κορμό της δοκού που θεωρήθηκε προηγουμένως, με μήκος 6 m και κατανεμημένο φορτίο 10 kN/m. Η επιλογή των ισοδύναμων φορτίων στους κόμβους είναι προφανής και δίνεται στο σχήμα αυτό.

Ο πλέον διαδεδομένος τρόπος διατύπωσης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για γραμμικά στατικά προβλήματα βασίζεται στη μέθοδο των μετατοπίσεων. Άλλοι τρόποι κάνουν χρήση της ισορροπίας δυνάμεων, ή άλλων υβριδικών ή και μικτών μεθόδων. Τα βασικά στάδια της μεθόδου είναι:

1. Η προσομοίωση (διακριτοποίηση) της κατασκευής με ένα σύνολο στοιχείων που συνδέονται σε συνοριακούς κόμβους.
2. Ο προσδιορισμός των γενικευμένων (άγνωστων) μετατοπίσεων που θα καθορίσουν πλήρως την απόκριση της κατασκευής.
3. Η διατύπωση των εξισώσεων ισορροπίας που αντιστοιχούν στις άγνωστες κομβικές μετατοπίσεις και η επίλυσή τους.
4. Ο υπολογισμός των εσωτερικών κατανομών των τάσεων των στοιχείων, για δεδομένες μετατοπίσεις στους κόμβους.
5. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, (μετατοπίσεις και τάσεις), με βάση τις δεδομένες παραδοχές του προβλήματος.

Αναλυτικότερα, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) είναι μια αριθμητική μέθοδος για την επίλυση προβλημάτων της μηχανικής και της μαθηματικής φυσικής. Ονομάζεται επίσης και ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA). Οι τυπικές προβληματικές περιοχές ενδιαφέροντος περιλαμβάνουν τη δομική ανάλυση, τη μεταφορά θερμότητας, τη ροή υγρών, τη μαζική μεταφορά και το ηλεκτρομαγνητικό δυναμικό. Η αναλυτική λύση αυτών των προβλημάτων απαιτεί γενικά την επίλυση προβλημάτων οριακών συνθηκών για μερικές διαφορικές εξισώσεις. Η επίλυση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων του προβλήματος οδηγεί σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων. Για να λύσει το πρόβλημα, υποδιαιρεί ένα μεγάλο πρόβλημα σε μικρότερα, απλούστερα μέρη που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Οι απλές εξισώσεις που μοντελοποιούν αυτά τα πεπερασμένα στοιχεία στη συνέχεια συναρμολογούνται σε ένα μεγαλύτερο σύστημα εξισώσεων που μοντελοποιεί ολόκληρο το πρόβλημα. Στη συνέχεια, η FEM χρησιμοποιεί μεταβλητές μεθόδους από τον υπολογισμό των παραλλαγών για να προσεγγίσει μια λύση ελαχιστοποιώντας το σφάλμα που εμφανίζεται.

### **3.3. Φαση προ-επεξεργασίας (pre-processing).**

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από 3 φάσεις, την φάση της προεπεξεργασίας (pre-processing), της λύσης (solution) και της μετεπεξεργασίας (post-processing). Οι στόχοι της προεπεξεργασίας είναι να αναπτυχθεί ένα κατάλληλο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, να αποδοθούν οι κατάλληλες ιδιότητες υλικού και να εφαρμοστούν οριακές συνθήκες με τη μορφή περιορισμών και φορτίων. Το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων υποδιαιρεί τη γεωμετρία στα στοιχεία στα οποία βρίσκονται οι κόμβοι. Οι κόμβοι, οι οποίοι είναι ακριβής θέσεις σημείων στο διάστημα, βρίσκονται γενικά στις γωνίες στοιχείων και ίσως κοντά σε κάθε μεσαίο τμήμα. Για μια δισδιάστατη ανάλυση (2D) ή μια τρισδιάστατη (3D) ανάλυση λεπτού κελύφους, τα στοιχεία είναι ουσιαστικά 2D, αλλά μπορούν να "στρεβλωθούν" ελαφρώς για να συμμορφωθούν με μια 3D επιφάνεια. Ένα παράδειγμα είναι το λεπτό γραμμικό τετράπλευρο κέλυφος. Το λεπτό κέλυφος υποδηλώνει ουσιαστικά την κλασική θεωρία των κελυφών, η γραμμική καθορίζει την

παρεμβολή των μαθηματικών ποσοτήτων σε όλο το στοιχείο και το τετράπλευρο περιγράφει τη γεωμετρία. Για ανάλυση 3D στερεών, τα στοιχεία έχουν φυσικό πάχος και στις τρεις διαστάσεις. Τα συνηθισμένα παραδείγματα περιλαμβάνουν στερεά γραμμικά τούβλα και στερεά παραβολικά τετραεδρικά στοιχεία. Επιπρόσθετα, υπάρχουν πολλά ειδικά στοιχεία, όπως τα στοιχεία αξονικής συμμετρίας για καταστάσεις στις οποίες η γεωμετρία, το υλικό και οι οριακές συνθήκες είναι όλες συμμετρικές γύρω από έναν άξονα. Οι βαθμοί ελευθερίας του μοντέλου (dof) αποδίδονται στους κόμβους. Τα στερεά στοιχεία έχουν γενικά τρεις μεταφράσεις dof ανά κόμβο. Οι περιστροφές επιτυγχάνονται με μεταφράσεις ομάδων κόμβων σε σχέση με άλλους κόμβους. Τα λεπτά στοιχεία κελύφους, από την άλλη πλευρά, έχουν έξι DOF ανά κόμβο: τρεις μεταφράσεις και τρεις περιστροφές. Η προσθήκη περιστροφικού DOF επιτρέπει την αξιολόγηση των ποσοτήτων μέσω του κελύφους, όπως οι τάσεις κάμψεως λόγω της περιστροφής ενός κόμβου σε σχέση με το άλλο. Έτσι, για δομές στις οποίες η κλασική θεωρία λεπτού κελύφους είναι μια έγκυρη προσέγγιση, η μεταφορά επιπλέον DOF σε κάθε κόμβο παρακάμπτει την αναγκαιότητα μοντελοποίησης του φυσικού πάχους. Η ανάθεση του κόμβου dof εξαρτάται επίσης από την κατηγορία της ανάλυσης. Για μια θερμική ανάλυση, για παράδειγμα, υπάρχει μόνο μία θερμοκρασία σε κάθε κόμβο.

Η ανάπτυξη του πλέγματος είναι συνήθως το πιο χρονοβόρο έργο στο FEA. Στο παρελθόν, οι θέσεις κόμβων πληκτρολογήθηκαν με το χέρι για να προσεγγίσουν τη γεωμετρία. Η πιο σύγχρονη προσέγγιση είναι να αναπτυχθεί το πλέγμα απευθείας στη γεωμετρία CAD, το οποίο θα είναι (1) wireframe, με σημεία και καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τα άκρα, (2) επιφανειακά, με επιφάνειες που ορίζουν τα όρια ή (3) στερεά, καθορίζοντας πού βρίσκεται το υλικό. Η στερεή γεωμετρία προτιμάται, αλλά συχνά ένα πακέτο επικάλυψης μπορεί να δημιουργήσει ένα περίπλοκο μίγμα που δεν θα χειριστεί ένα πακέτο στερεών. Όσον αφορά τις γεωμετρικές λεπτομέρειες, ένας βασικός κανόνας της FEA είναι να «μοντελοποιήσει αυτό που υπάρχει» και παρόλα αυτά η απλούστευση των υποθέσεων πρέπει απλώς να εφαρμοστεί για να αποφευχθούν τα τεράστια μοντέλα. Η εμπειρία του αναλυτή είναι ουσιώδης.

Η γεωμετρία συνδέεται με έναν αλγόριθμο χαρτογράφησης ή έναν αυτόματο αλγόριθμο ελεύθερης συμπλοκής. Το πρώτο χαρτογραφεί ένα ορθογώνιο πλέγμα σε μια γεωμετρική περιοχή, η οποία πρέπει επομένως να έχει τον σωστό αριθμό πλευρών. Τα χαρτογραφημένα πλέγματα (mapped meshes) μπορούν να χρησιμοποιήσουν το ακριβές και φτηνό στερεό γραμμικό τούβλο τρισδιάστατο στοιχείο, αλλά μπορεί να είναι πολύ χρονοβόρο, αν όχι αδύνατο, να εφαρμοστεί σε σύνθετες γεωμετρίες. Τα ελεύθερα πλέγματα υποδιαιρούν αυτόματα την εμπλοκή των περιοχών σε στοιχεία, με τα πλεονεκτήματα της ταχείας εμπλοκής, της εύκολης μετάβασης σε μέγεθος πλέγματος (για πυκνότερο πλέγμα σε περιοχές μεγάλης κλίσης) και προσαρμοστικών δυνατοτήτων. Τα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν την παραγωγή τεράστιων μοντέλων, τη δημιουργία παραμορφωμένων στοιχείων και, σε 3D, τη χρήση του μάλλον δαπανηρού στερεού παραβολικού τετραεδρικού στοιχείου. Είναι πάντα σημαντικό να ελέγξετε τη στοιχειώδη παραμόρφωση πριν από τη λύση. Ένα ελαφρώς παραμορφωμένο στοιχείο θα προκαλέσει μια ιδιαιτερότητα μήτρας, θα σκοτώσει τη λύση. Ένα λιγότερο διαστρεβλωμένο στοιχείο μπορεί να λύσει, αλλά μπορεί να δώσει πολύ κακές απαντήσεις. Τα αποδεκτά επίπεδα παραμόρφωσης εξαρτώνται από τον χρησιμοποιούμενο λύτη (solver).

Οι απαιτούμενες ιδιότητες υλικών ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο της λύσης. Μια γραμμική ανάλυση στατικής, για παράδειγμα, θα απαιτήσει ένα ελαστικό μέτρο, την αναλογία Poisson και ίσως μια πυκνότητα για κάθε υλικό. Για θερμική ανάλυση απαιτούνται θερμικές ιδιότητες. Τα φορτία περιλαμβάνουν τις δυνάμεις, τις πιέσεις και τη ροή θερμότητας. Είναι προτιμότερο να εφαρμοστούν οριακές συνθήκες στη γεωμετρία CAD, με τη δέσμη FEA να τις μεταφέρει στο υποκείμενο μοντέλο, ώστε να καταστεί δυνατή η απλούστερη εφαρμογή προσαρμοστικών και βελτιστοποιημένων αλγορίθμων. Αξίζει να

σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο σφάλμα σε ολόκληρη τη διαδικασία είναι συχνά στις οριακές συνθήκες. Η εκτέλεση πολλαπλών περιπτώσεων μπορεί να απαιτηθεί ως μία λύση, για την επίτευξη ακριβέστερων αποτελεσμάτων.

### 3.4. Φάση λύσης (solution).

Ενώ οι φάσεις προεπεξεργασίας και μετα-επεξεργασίας της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων είναι αλληλεπιδραστικές και χρονοβόρες για τον αναλυτή, η λύση είναι συχνά μια γρήγορη διαδικασία και απαιτεί καλή μονάδα υπολογιστή. Οι ισχύουσες εξισώσεις συναρμολογούνται σε μορφή μήτρας και επιλύονται αριθμητικά. Η διαδικασία συναρμολόγησης εξαρτάται όχι μόνο από τον τύπο της ανάλυσης (π.χ. στατική ή δυναμική), αλλά και από τους τύπους και τις ιδιότητες του μοντέλου, τις ιδιότητες των υλικών και τις οριακές συνθήκες. Στην περίπτωση μιας γραμμικής στατικής δομικής ανάλυσης, η συναρμολογημένη εξίσωση είναι της μορφής  $Kd = r$ , όπου το  $K$  είναι η μήτρα ακαμψίας του συστήματος, το  $d$  είναι ο φορέας μετατόπισης του βαθμού ελευθερίας (dof) και το  $r$  είναι ο εφαρμοζόμενος φορέας φορτίου κόμβου. Για να εκτιμήσουμε αυτή την εξίσωση, πρέπει να ξεκινήσουμε με την θεωρία ελαστικότητας. Η σχέση μετατόπισης του στελέχους μπορεί να εισαχθεί στη σχέση τάσης-καταπόνησης για να εκφράσει την καταπόνηση σε όρους μετατόπισης. Υπό την προϋπόθεση συμβατότητας, οι διαφορικές εξισώσεις ισορροπίας σε συνεννόηση με τις οριακές συνθήκες καθορίζουν στη συνέχεια μια μοναδική λύση πεδίου μετατόπισης, η οποία με τη σειρά της καθορίζει τα πεδία καταπόνησης. Οι πιθανότητες άμεσης επίλυσης αυτών των εξισώσεων είναι ελάχιστες παρά μόνο για τις πιο ασήμαντες γεωμετρίες, επομένως παρουσιάζεται η ανάγκη για προσεγγιστικές αριθμητικές τεχνικές. Ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων είναι στην πραγματικότητα μια σχέση μετατόπισης-μετατόπισης κόμβου, η οποία, μέσω του σχεδίου παρεμβολής στοιχείων, καθορίζει την μετατόπιση οπουδήποτε σε ένα στοιχείο που δίδει τις τιμές του κόμβου dof. Παρουσιάζοντας αυτή τη σχέση στη σχέση μετατόπισης του στελέχους, μπορούμε να εκφράσουμε την τάση όσον αφορά το σχήμα μετατόπισης κόμβου, τη διάταξη παρεμβολής στοιχείων και τη διαφορική μήτρα χειριστή. Υπενθυμίζοντας ότι η έκφραση για τη δυναμική ενέργεια ενός ελαστικού σώματος περιλαμβάνει ένα ολοκλήρωμα για αποθηκευμένη ενέργεια καταπόνησης (εξαρτώμενη από το πεδίο παραμόρφωσης) και ολοκληρώματα για εργασία που πραγματοποιείται από εξωτερικές δυνάμεις (εξαρτάται από το πεδίο μετατόπισης), μπορούμε συνεπώς να εκφράσουμε δυναμική ενέργεια συστήματος σε όρους κομβικής μετατόπισης.

Εφαρμόζοντας την αρχή της ελάχιστης δυναμικής ενέργειας, μπορούμε να ορίσουμε το μερικό παράγωγο της δυναμικής ενέργειας σε σχέση με τον φορέα κόμβου dof στο μηδέν, με αποτέλεσμα: μια αθροιστική ολοκλήρωση των άκαμπτων στοιχείων, πολλαπλασιασμένη με τον φορέα μετατόπισης κόμβου, ισούται με ένα άθροισμα ολοκληρωμάτων φορτίων. Κάθε ολοκλήρωμα ακαμψίας οδηγεί σε μια μήτρα ακαμψίας στοιχείου, η οποία αθροίζεται για την παραγωγή της μήτρας ακαμψίας του συστήματος, και η άθροιση των ολοκληρωμάτων φορτίου αποδίδει το εφαρμοσμένο φορτίο, με αποτέλεσμα το  $Kd = r$ . Στην πράξη, εφαρμόζονται κανόνες ενσωμάτωσης στα στοιχεία, φορτία εμφανίζονται στον φορέα  $r$ , και οριακές συνθήκες κόμβου dof μπορεί να εμφανίζονται στο διάνυσμα  $d$  ή μπορούν να διαχωριστούν από την εξίσωση.

Οι μέθοδοι λύσης για τις εξισώσεις μήτρας πεπερασμένων στοιχείων είναι άφθονοι. Στην περίπτωση της γραμμικής στατικής  $Kd = r$ , η αντιστροφή  $K$  είναι υπολογιστικά δαπανηρή και αριθμητικά ασταθής. Μια καλύτερη τεχνική είναι ο συντελεστής



Cholesky, μια μορφή απομάκρυνσης του Gauss και μια μικρή παραλλαγή στο θέμα της παραγοντοποίησης "LDU". Η μήτρα K μπορεί να παραγοντοποιηθεί αποτελεσματικά σε LDU, όπου L είναι χαμηλότερη τριγωνική, D είναι διαγώνια και U είναι άνω τριγωνική, με αποτέλεσμα  $LDUd = r$ . Εφόσον τα L και D είναι εύκολα ανεστραμμένα και το U είναι το άνω τριγωνικό, το d μπορεί να προσδιοριστεί με αντικατάσταση προς τα πίσω. Μερικές από τις καλύτερες σύγχρονες μεθόδους λύσης χρησιμοποιούν τεχνικές αραιών πινάκων. Επειδή οι δυσκαμψίες κόμβου-κόμβου είναι μηδενικές μόνο για τα κοντινά ζεύγη κόμβων, η μήτρα ακαμψίας έχει μεγάλο αριθμό μηδενικών καταχωρήσεων. Αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί για να μειωθεί ο χρόνος λύσης και η αποθήκευση με συντελεστή 10 ή περισσότερο. Βελτιωμένες μέθοδοι λύσεων αναπτύσσονται συνεχώς. Το βασικό σημείο είναι ότι ο αναλυτής πρέπει να κατανοήσει την εφαρμοζόμενη τεχνική λύσης.

Η δυναμική ανάλυση για πάρα πολλούς αναλυτές σημαίνει κανονικός τρόπος λειτουργίας. Η γνώση των φυσικών συχνοτήτων και των μορφών λειτουργίας ενός σχεδίου μπορεί να είναι αρκετή στην περίπτωση μιας μοναδικής-συχνότητας ενός υπάρχοντος προϊόντος ή ενός πρωτότυπου, ενώ η FEA χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση των επιπτώσεων των τροποποιήσεων μάζας, δυσκαμψίας και απόσβεσης. Κατά τη διερεύνηση ενός μελλοντικού προϊόντος ή ενός υπάρχοντος σχεδιασμού με διεγερμένους πολλαπλούς τρόπους, θα πρέπει να χρησιμοποιείται προσομοίωση αναγκαστικής απόκρισης για την εφαρμογή του αναμενόμενου μεταβατικού περιβάλλοντος ή συχνοτήτων για την εκτίμηση της μετατόπισης και ακόμη και της δυναμικής τάσης σε κάθε βήμα του χρόνου.

Μια άλλη τεχνική, p-code, αυξάνει τη σειρά επαναληπτικά μέχρι τη σύγκλιση, με εκτιμήσεις σφάλματος διαθέσιμες μετά από μία ανάλυση. Τέλος, η μέθοδος του οριακού στοιχείου τοποθετεί στοιχεία μόνο κατά μήκος του γεωμετρικού ορίου (boundary geometry). Αυτές οι τεχνικές έχουν περιορισμούς, αλλά πολύ πιθανό στο μέλλον να μην υπάρχουν και να δούμε θετικά αποτελέσματα.

### 3.5. Φάση μετα-επεξεργασίας (post-processing).

Αφού προετοιμαστεί και ελεγχθεί ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, έχουν εφαρμοστεί οριακές συνθήκες και έχει λυθεί το μοντέλο, είναι καιρός να διερευνηθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Αυτή η δραστηριότητα είναι γνωστή ως η φάση μετα-επεξεργασίας της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.

Η μετα-επεξεργασία ξεκινάει με ενδελεχή έλεγχο για προβλήματα που μπορεί να έχουν συμβεί κατά τη διάρκεια της λύσης. Οι περισσότεροι λύτες παρέχουν ένα αρχείο καταγραφής, το οποίο θα πρέπει να αναζητηθεί για προειδοποιήσεις ή σφάλματα, και το οποίο θα παρέχει επίσης μια ποσοτική μέτρηση για το πόσο καλά συμπεριφέρθηκαν οι αριθμητικές διαδικασίες κατά τη διάρκεια της λύσης. Στη συνέχεια, τα φορτία αντίδρασης στους συγκρατημένους κόμβους θα πρέπει να αθροίζονται και να εξετάζονται ως "έλεγχος ευεξίας". Τα φορτία αντίδρασης που δεν εξισορροπούν προσεκτικά το εφαρμοσμένο φορτίο που προκύπτει για μια γραμμική στατική ανάλυση θα πρέπει να θέσουν υπό αμφισβήτηση την εγκυρότητα άλλων αποτελεσμάτων. Οι κανόνες σφάλματος, όπως η πυκνότητα ενεργειακής καταπόνησης και η απόκλιση τάσεων μεταξύ των παρακείμενων στοιχείων, θα μπορούσαν να εξεταστούν στο επόμενο, αλλά για τις αναλύσεις h-code αυτές οι ποσότητες χρησιμοποιούνται καλύτερα για να στοχεύσουν σε μεταγενέστερη δημιουργία ακριβέστερου πλέγματος.

Μόλις διαπιστωθεί ότι η λύση είναι απαλλαγμένη από αριθμητικά προβλήματα, μπορούν να εξεταστούν οι ενδιαφερόμενες ποσότητες. Υπάρχουν πολλές επιλογές εμφάνισης, η επιλογή των οποίων εξαρτάται από τη μαθηματική μορφή της ποσότητας καθώς και από τη φυσική της σημασία. Για παράδειγμα, η μετατόπιση ενός κόμβου ενός

στερεού γραμμικού στοιχείου τούβλου είναι ένας χωροταξικός φορέας 3 συστατικών και η συνολική μετατόπιση του μοντέλου εμφανίζεται συχνά με την εμφάνιση του παραμορφωμένου σχήματος πάνω από το μη παραμορφωμένο σχήμα. Οι δυνατότητες δυναμικής προβολής και κινούμενων εικόνων βοηθούν σε μεγάλο βαθμό στην κατανόηση του μοτίβου παραμόρφωσης. Υπογραμμίζει ότι, δεδομένου ότι οι ποσότητες τανιστή, δεν διαθέτουν σήμερα μια καλή τεχνική ενιαίας απεικόνισης, και συνεπώς εξάγονται και εμφανίζονται τα αποτελέσματα των τάσεων. Οι κύριοι φορείς τάσης μπορούν να εμφανιστούν ως χρωματικά βέλη, υποδεικνύοντας και την κατεύθυνση και το μέγεθος. Το μέγεθος των κύριων τάσεων ή της τάσης, όπως η τάση Von Mises, μπορεί να εμφανιστεί στο μοντέλο ως έγχρωμες ζώνες. Όταν ο συγκεκριμένος τύπος προβολής αντιμετωπίζεται ως αντικείμενο 3D υποβαλλόμενο σε πηγές φωτός, η προκύπτουσα εικόνα είναι γνωστή ως σκιασμένη γραφική παράσταση απεικόνισης εικόνας. Το μέγεθος μετατόπισης μπορεί επίσης να εμφανίζεται με έγχρωμες ζώνες, αλλά αυτό μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένη ερμηνεία ως απεικόνιση τάσεων.

Μια περιοχή μετα-επεξεργασίας που κερδίζει γρήγορα τη δημοτικότητα είναι αυτή της προσαρμοστικής διακριτοποίησης (remeshing). Τα σφάλματα, όπως η πυκνότητα ενεργειακής τάσης, χρησιμοποιούνται για την εκπόνηση του μοντέλου, την τοποθέτηση πυκνότερου πλέγματος σε περιοχές που χρειάζονται βελτίωση και ένα χονδρότερο πλέγμα σε περιοχές υπερβολικής συσσώρευσης. Η προσαρμοστικότητα απαιτεί μια συσχετιστική σύνδεση μεταξύ του μοντέλου και της υποκείμενης CAD γεωμετρίας και λειτουργεί καλύτερα εάν οι οριακές συνθήκες μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα και στη γεωμετρία. Η προσαρμοστική αποκατάσταση είναι μια πρόσφατη επίδειξη της επαναληπτικής φύσης της ανάλυσης h-code.

Η βελτιστοποίηση είναι ένας άλλος τομέας που απολαμβάνει την πρόσφατη πρόοδο. Με βάση τις τιμές διαφόρων αποτελεσμάτων, το μοντέλο τροποποιείται αυτόματα σε μια προσπάθεια ικανοποίησης ορισμένων κριτηρίων απόδοσης και επιλύεται και πάλι. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί κάποιο κριτήριο σύγκλισης. Στην κλιμακωτή μορφή της, η βελτιστοποίηση τροποποιεί τις ιδιότητες της εγκάρσιας διατομής των ακτίνων, τα πάχη λεπτού κελύφους ή / και τις ιδιότητες των υλικών σε μια προσπάθεια να πληρούνται οι μέγιστοι περιορισμοί τάσεων, οι μέγιστοι περιορισμοί εκτροπής και / ή οι περιορισμοί των ιδιοσυχνοτήτων. Η βελτιστοποίηση του σχήματος είναι πιο περίπλοκη, με τα όρια του πραγματικού μοντέλου 3D να τροποποιούνται. Αυτό επιτυγχάνεται καλύτερα χρησιμοποιώντας τις μεταβλητές διαστάσεις ως παράμετροι βελτιστοποίησης, αλλά η ποιότητα του πλέγματος σε κάθε επανάληψη μπορεί να είναι μια ανησυχία, η οποία να επηρεάζει αρνητικά τα αποτελέσματά μας, λόγω της κακής ποιότητάς του.

Συνοπτικά, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια σχετικά πρόσφατη μέθοδος που γρήγορα έγινε αποτελεσματική, καθώς είναι πολύ έγκυρη, ειδικά για δομική και θερμική ανάλυση. Το κόστος της εφαρμογής αυτής της τεχνολογίας στις καθημερινές εργασίες σχεδιασμού έχει πέσει, ενώ οι δυνατότητες που παρέχονται με τη μέθοδο επεκτείνονται συνεχώς. Με την εκπαίδευση στην τεχνική και τα εμπορικά πακέτα λογισμικού να γίνεται όλο και προσυτή, η ερώτηση έχει μετακινηθεί από το "Γιατί να εφαρμόσει FEA κανείς;" στο "Γιατί όχι;". Η μέθοδος είναι πλήρως ικανή να παρέχει προϊόντα υψηλότερης ποιότητας σε μικρότερο κύκλο σχεδιασμού με μειωμένη πιθανότητα αποτυχίας, υπό τον όρο ότι εφαρμόζεται από έναν ικανό αναλυτή.

## 4. ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ, ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ 2 ΤΥΠΩΝ ΠΛΟΙΩΝ.

### 4.1. ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ CAD

Η γεωμετρία κατασκευάστηκε και για τα δύο πλοία από την αρχή εξ'ολοκλήρου με τη βοήθεια σχεδίων και δημιουργήθηκε στο κατασκευαστικό πρόγραμμα της ANSYS , το Spaceclaim. Το Spaceclaim αποτελεί ένα λογισμικό CAD, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως, κυρίως για την προετοιμασία ήδη υπάρχοντων μοντέλων, με σκοπό την εισαγωγή τους σε κάποιο λογισμικό προσομοίωσης. Προτιμάται ιδιαίτερα από τον κλάδο των οργανισμών που ασχολούνται με προσομοιώσεις, λόγω της ευκολίας που δίνει στο χρήστη να πραγματοποιήσει "boolean" operations, δηλαδή να αλλάξει σε πραγματικό χρόνο τις διαστάσεις των μοντέλων, ακόμα και να ενσωματώσει δύο στερεά μοντέλα σε ένα.

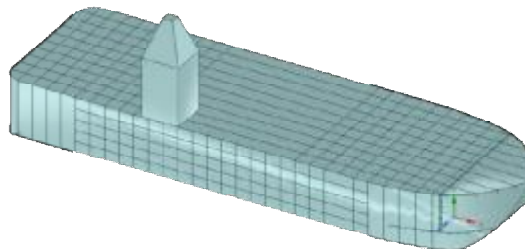
### 4.2. ΑΝΑΛΥΣΗ 1<sup>ΟΥ</sup> ΠΛΟΙΟΥ

Η ανάλυση του πρώτου πλοίου είναι στατική και είναι μία σχετικά απλή ανάλυση, ώστε να γίνει μία πρώτη εφαρμογή των γνώσεών μου πάνω στο πρόγραμμα προσομοίωσης που χρησιμοποίησα.

Οι διαστάσεις του πλοίου είναι οι εξής :

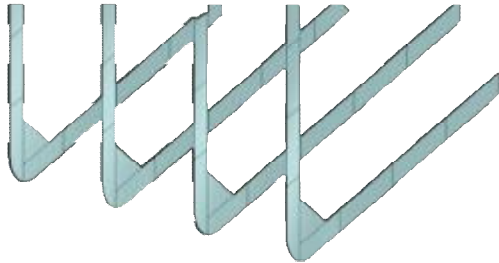
Μήκος	66577 mm
Πλάτος	20000 mm
Ύψος	21001 mm

Η Εικόνα 25 δείχνει την γεωμετρία του πλοίου η οποία έχει επεξεργασθεί στο πρόγραμμα keyshot το οποίο είναι ένα πρόγραμμα που δημιουργεί γραφικά με προεπιλογή υλικών, περιβάλλοντος και χρωμάτων.

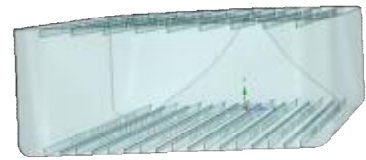


Εικόνα 25. Γεωμετρία πρώτου πλοίου

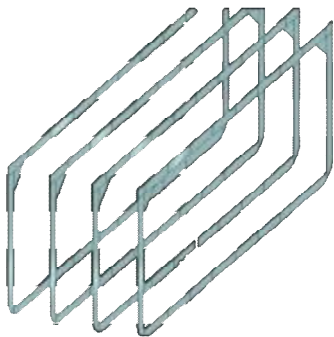
Το πλοίο αποτελείται από τα εξής μέρη:



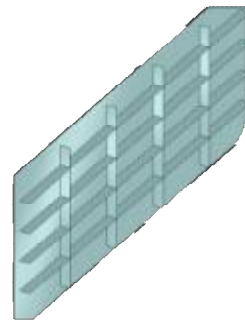
Εικόνα 26. Υποστηρίγματα (Brackets)



Εικόνα 27. Επίπεδες τορπίδες



Εικόνα 28. Νομείς (frames)



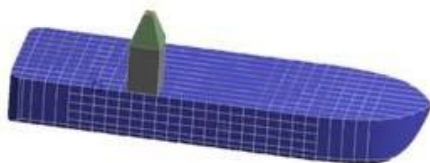
Εικόνα 29. Μπουλμέδες

Στην συνέχεια έγινε η επιλογή του υλικού το οποίο ήταν το Structural Steel DH32 με καλές ιδιότητες σκληρότητας, μεγαλύτερη αντοχή, ισχυρή αντίσταση στη διάβρωση και καλές ιδιότητες συγκόλλησης και είναι εγκεκριμένο από όλους τους νηογνώμονες.

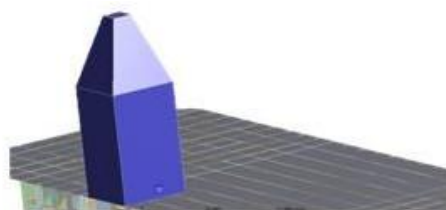
Properties of Outline Row 3: Structural Steel DH 32			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
4	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C <sup>-1</sup>
5	Zero-Thermal-Strain Reference Temperature	22	C
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus a...	
8	Young's Modulus	2E+11	Pa
9	Poisson's Ratio	0.3	
10	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa
11	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular	
16	Strain-Life Parameters		
24	Tensile Yield Strength	315	MPa
25	Compressive Yield Strength	315	MPa
26	Tensile Ultimate Strength	528	MPa
27	Compressive Ultimate Strength	528	MPa

Εικόνα 30. Ιδιότητες Υλικού

Το επόμενο βήμα είναι να χωρισθεί το υπολογιστικό πεδίο σε μικρότερους όγκους. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται διακριτοποίηση (meshing). Όσο μικρότεροι είναι οι όγκοι στους οποίους διακριτοποιείται το υπολογιστικό πεδίο, τόσο πιο ακριβές είναι τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Η διακριτοποιημένη γεωμετρία πρέπει να τηρεί ορισμένες προϋποθέσεις ώστε τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν να είναι αξιόπιστα, δηλαδή η ποιότητα της διακριτοποίησης να είναι αποδεκτή από τον επιλυτή και όσο καλύτερη γίνεται. Η διακριτοποιημένη γεωμετρία παρουσιάζεται παρακάτω για την οποία χρησιμοποιήθηκε 1 body sizing για όλο το πλοίο (Εικόνα 31) και 1 body sizing για το γερανό (Εικόνα 32) με μέγεθος στοιχείων 127mm και 112mm αντίστοιχα.



Εικόνα 31. Body Sizing στο πλοίο



Εικόνα 32. Body Sizing στο γερανό

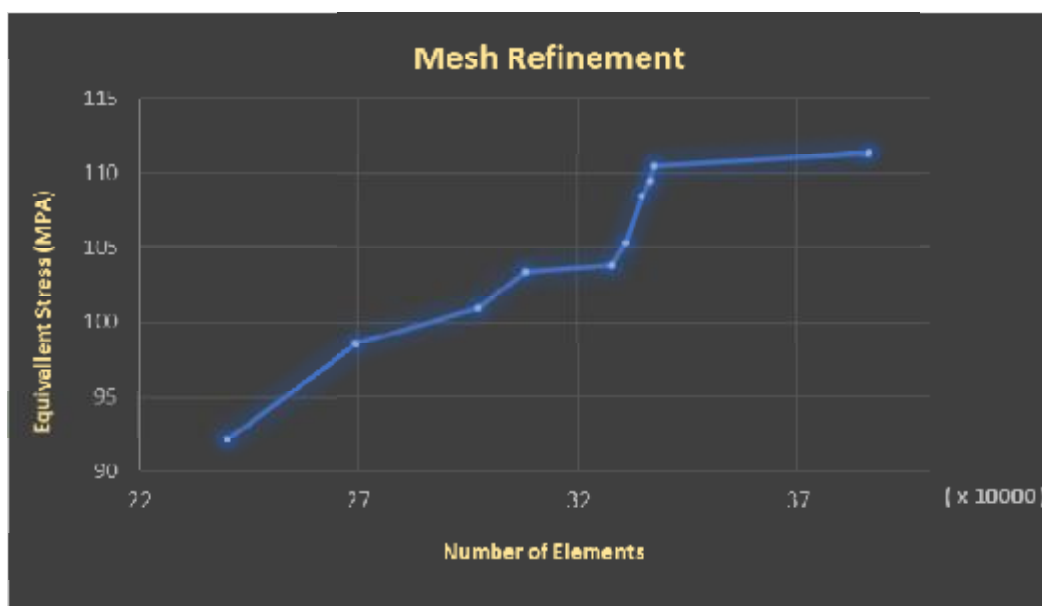
- Τα στοιχεία της διακριτοποίησης είναι τα παρακάτω:

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	451932
<input type="checkbox"/> Elements	461807
<input checked="" type="checkbox"/> Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	0.27801
<input type="checkbox"/> Max	0.99947
<input type="checkbox"/> Average	0.98125
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	4.7394e-002

Έχουμε 451932 κόμβους και 461807 στοιχεία, με μέσο όρο ποιότητας του κάθε στοιχείου 0.98125 το οποίο είναι πάρα πολύ καλό, διότι το άριστο είναι η μονάδα (1). Όμως για να ελέγξω αν το mesh μου είναι καλό έκανα και ένα Mesh Dependency study, το οποίο είναι ένας έλεγχος του mesh. Ξεκινώντας από ένα αραιό πλέγμα, καθώς το πλέγμα γινόταν όλο και πιο πυκνό, δεν παρατηρήθηκαν μεγάλες ανισορροπίες μεταξύ των τάσεων. Έτσι, το πλέγμα συνεχίζει να γίνεται όλο και πιο πυκνό μέχρις ότου οι τιμές τείνουν να είναι σταθερές, και αριθμητικά αυτό σημαίνει ότι, οι ανισορροπίες είναι κάτω από το 1%.

Element Sizing (mm)	Element Numbers	Deformation (mm)	Equivalent Stress (Mpa)
155-140	239939	23.807	92.134
145-130	269440	23.796	98.541
140-125	297342	23.813	100.99
135-120	308257	23.817	103.4
133-118	327922	23.806	103.86
131-116	330948	23.819	105.32
129-114	334542	23.819	108.48
127-112	336558	23.819	109.52
125-110	337429	23.822	110.52
123-108	386066	23.815	111.32

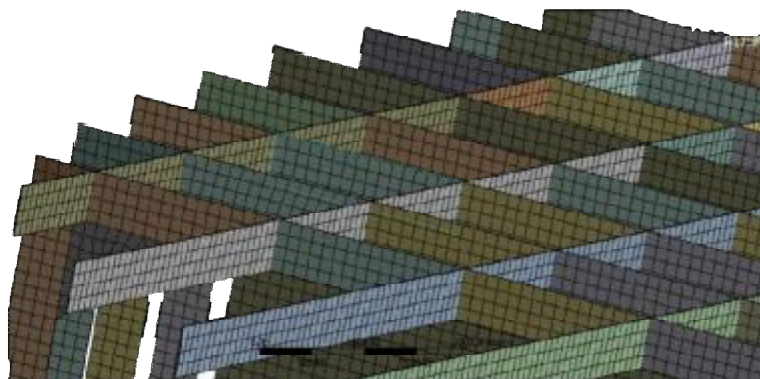
Στον πίνακα παραπάνω φαίνονται τα μεγέθη των στοιχείων για το πλοίο και για το γερανό αντίστοιχα στην πρώτη στήλη, ο αριθμός των στοιχείων στη δεύτερη, η παραμόρφωση στην Τρίτη και η τάση στην τέταρτη στήλη.



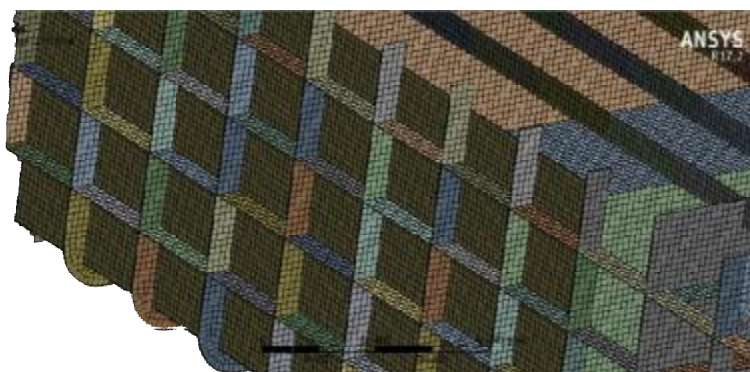
Διάγραμμα 3. Mesh Refinement

Το διάγραμμα μας επιβεβαιώνει αυτό που λέγαμε καθώς για τάση 108.48 MPa η καμπύλη τείνει να γίνει ευθεία γραμμή με τις μεταβολές να είναι μικρότερες του 1%.

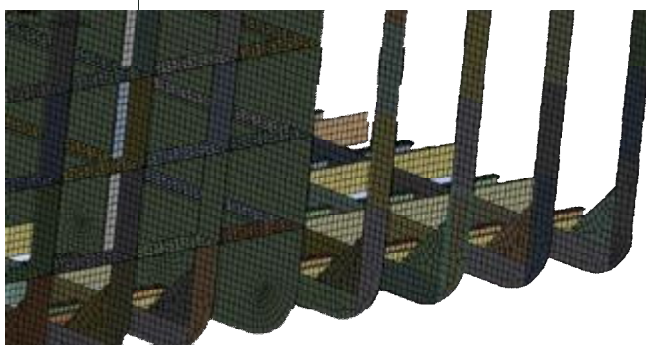
Αναλυτικά η διακριτοποιημένη γεωμετρία παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 33. Διακριτοποιημένη Γεωμετρία 1



Εικόνα 34. Διακριτοποιημένη Γεωμετρία 2



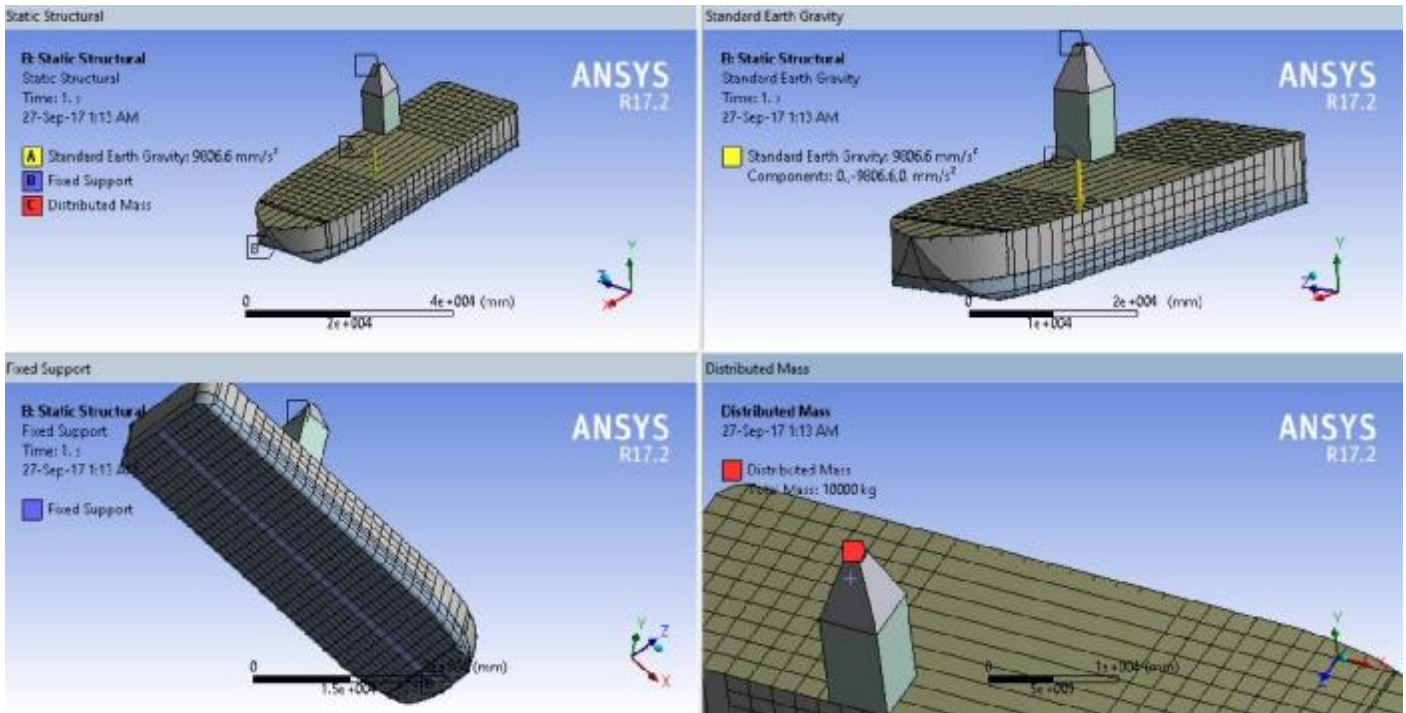
Εικόνα 35. Διακριτοποιημένη Γεωμετρία 3



Εικόνα 36. Διακριτοποιημένη Γεωμετρία 4



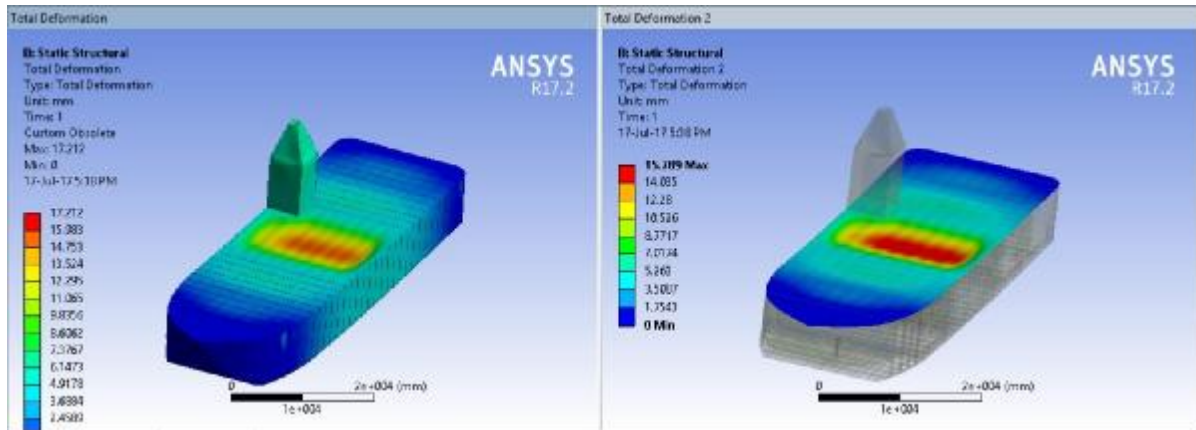
Εφ'όσον η διακριτοποίηση είναι επαρκής, στη συνέχεια εφαρμόζουμε τις απαραίτητες οριακές συνθήκες. Οι οριακές συνθήκες είναι αυτές οι οποίες πιστεύω πως προσομοιώνουν καλύτερα το πρόβλημα της στατικής ανάλυσης που ήθελα να εξετάσω:



Εικόνα 37.Οριακές συνθήκες

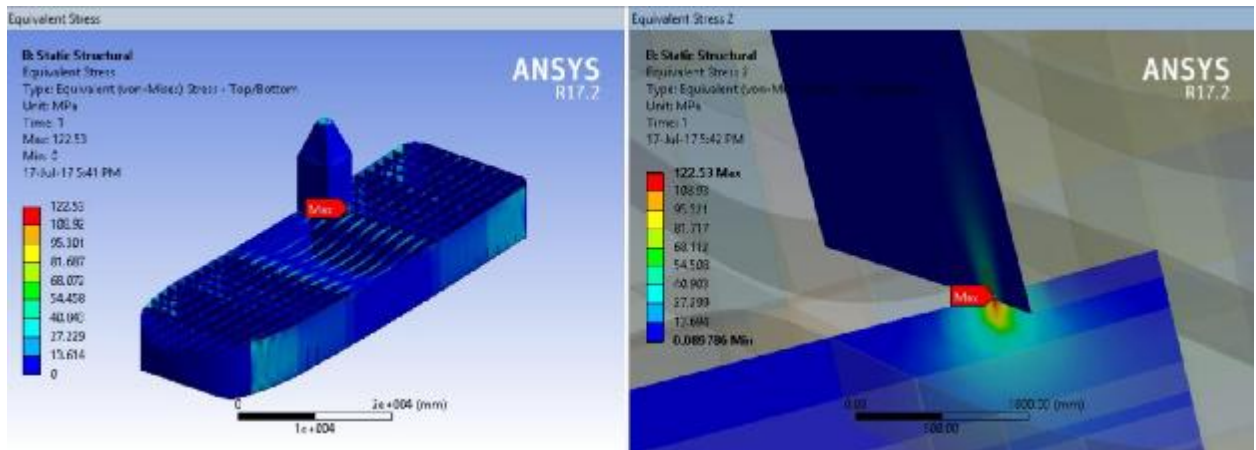
Στην περίπτωση αυτή θέλω να δω την συμπεριφορά του πλοίου όταν αυτό βρίσκεται κάτω από την επίδραση της δύναμης, του φορτίου του γερανού. Ο γερανός προσομοιώνεται σαν την κατασκευή πάνω στο deck και η εφαρμογή της κατανεμημένης μάζας γίνεται στην κορυφή του, στο κόκκινο σημείο στην 4<sup>η</sup> εικόνα. Επίσης έχω βάλει την επιτάχυνση της βαρύτητας, ώστε να μετατραπεί η μάζα σε δύναμη και επίσης έχω απαγορεύσει την κίνηση και στους 3 άξονες σε ένα σημείο στο κάτω μέρος του πλοίου ώστε να προσομοιώσω την ευστάθεια του στο νερό.

Τα αποτελέσματα που με ενδιαφέρουν είναι η συνολική παραμόρφωση και η τάση Von-Misses. Τα δύο αυτά αποτελέσματα παρουσιάζονται στις παρακάτω φωτογραφίες:



Εικόνα 38.Συνολική παραμόρφωση

Η συνολική παραμόρφωση όπως φαίνεται είναι 17mm και εμφανίζεται στο κύριο επίπεδο (main deck),πράγμα που είναι φυσιολογικό, διότι είναι κοντά στο σημείο εφαρμογής της δύναμης.



Εικόνα 39. Μέγιστη τάση Von-Misses

Όπως φαίνεται στην δεύτερη φωτογραφία η μέγιστη τάση, εμφανίζεται στο σημείο που ενώνεται ο γερανός με τους μπουλμεδες του πλοίου και η τιμή της τάσης είναι 122 MPa και γνωρίζουμε ότι η τάση διαρροής του υλικού είναι 315 Mpa πράγμα που σημαίνει ότι η κατασκευή είναι ασφαλής από διαρροή ή αστοχία του υλικού.

### 4.3. ΑΝΑΛΥΣΗ 2<sup>ΟΥ</sup> ΠΛΟΙΟΥ

Στο δεύτερο πλοίο η ανάλυση είναι διαφορετική, κάτι που σημαίνει πως και οι οριακές συνθήκες είναι διαφορετικές, αλλά και η διακριτοποίηση. Σε αυτή τη περίπτωση, η ανάλυση είναι σύμφωνα με τα πρότυπα του Νορβηγικού Νηογνώμονα DN VGL και γίνεται στατική ανάλυση του πλοίου(container), στο οποίο ασκείται Υδροστατική πίεση, λόγω της θάλασσας, Ροπή λόγω των containers και κατανεμημένη μάζα η οποία αντιστοιχεί στην συνολική μάζα των containers αλλά και του γερανού που βρίσκεται πάνω στο κύριο επίπεδο του πλοίου.

Οι διαστάσεις του 2<sup>ΟΥ</sup> πλοίου είναι

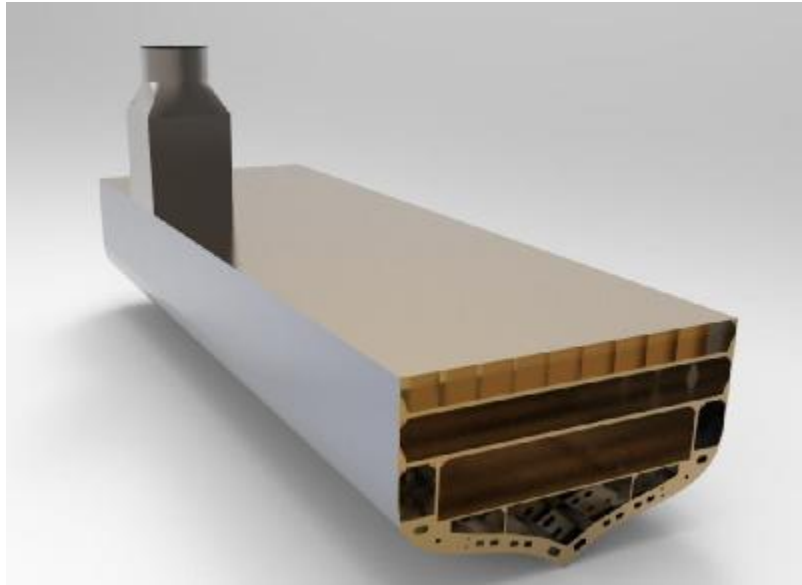
Length	44 m
Height	15.4 m
Width	10 m

Και η γεωμετρία του παρουσιάζεται στην Εικόνα 40.



Εικόνα 40.Γεωμετρία πλοίου

Εμείς σε αυτή τη περίπτωση δεν θα μελετήσουμε όλο το πλοίο, αλλά το μέρος του πλοίου το οποίο θα φορτωθεί με containers το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 41.



Εικόνα 41. Μέρος πλοίου προς ανάλυση

Αν κοιτάξετε κάποια από τις πρόσφατες ή παρελθούσες περιπτώσεις ατυχημάτων όπου το σκάφος έχει αναπτύξει ρωγμή ή έχει χωριστεί πλήρως σε δύο, ο εντυπωσιακός παράγοντας θα είναι η περιοχή εμφάνισης αυτού του φαινομένου. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι ρωγμές ή οι διαχωρίσεις προέκυψαν από το μέσο, για αυτό το λόγο θα μελετήσω το μέρος του πλοίου που φαίνεται παραπάνω.

Το υλικό που έχει επλεγεί για αυτό το πλοίο είναι το Structural Steel DH-36 το οποίο έχει τις εξής ιδιότητες. :

**Density = 7850 [ kg\*m<sup>-3</sup>]**  
**Tensile Strength, Ultimate = 490 – 620 [ Mpa]**  
**Tensile Strength, Yield = 365 [ Mpa]**

Το επόμενο βήμα είναι η διακριτοποίηση, η οποία παρουσιάζεται λεπτομερώς παρακάτω:

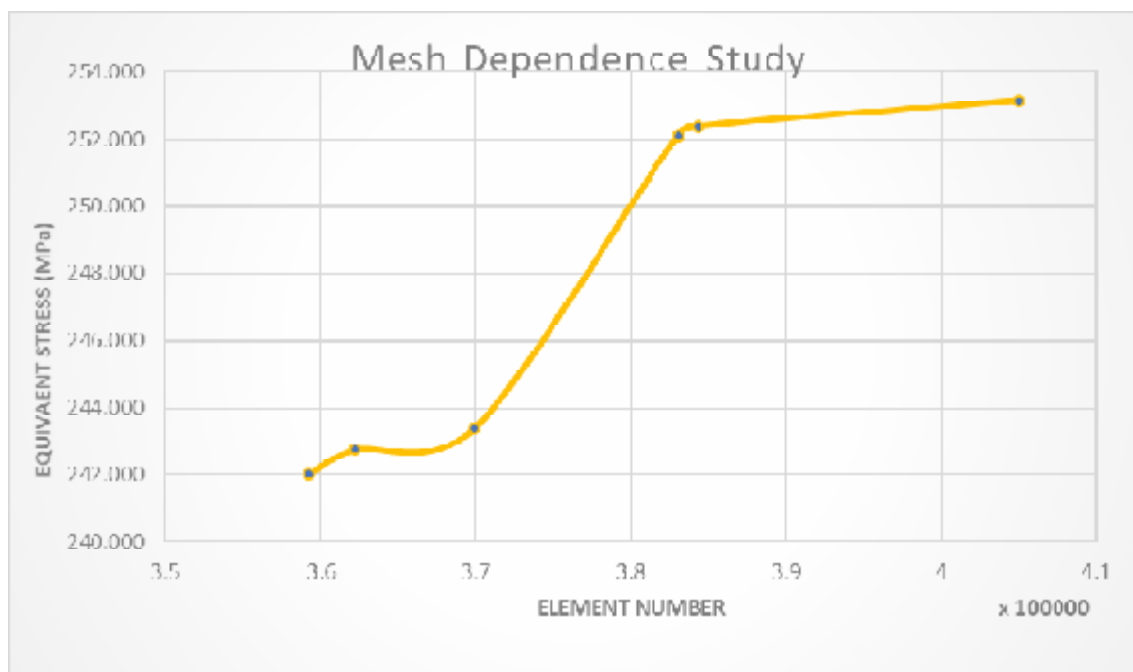
Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	4.7714e-002
<input type="checkbox"/> Max	0.99987
<input type="checkbox"/> Average	0.86193
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.18994
<b>Inflation</b>	
<b>Advanced</b>	
<b>Statistics</b>	
<input type="checkbox"/> Nodes	207184
<input type="checkbox"/> Elements	215814

Εικόνα 42.Στοιχεία διακριτοποίησης

Όπως φαίνεται, έχουμε 207184 κόμβους και 215814 στοιχεία, με μέσο όρο ποιότητας κάθε στοιχείου 0.86193 το οποίο είναι επίσης αποδεκτό. Και εδώ χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Mesh Dependency καθώς θέλω το πλέγμα μου να είναι όσο καλύτερο γίνεται, ώστε και τα αποτελέσματά να είναι όσο το δυνατόν πιο έγκυρα.

Element Size (mm)	Element Numbers	Equivalent Stress ( Mpa )
150	359216	242.000
135	362235	242.740
120	369967	243.390
110	383065	252.130
108	384398	252.382
100	405087	253.160

Στον πίνακα, φαίνεται το μέγεθος των στοιχείων, ο αριθμός των στοιχείων και η τάση Von-Misses αντίστοιχα και με πράσινο χρώμα επισημαίνεται, η γραμμή που μας δείχνει το επιθυμητό μέγεθος των στοιχείων. Βλέπουμε διαφορές στον αριθμό των στοιχείων και είναι λογικό καθώς ο έλεγχος της διακριτοποίησης έπρεπε να γίνει σε ολόκληρη τη γεωμετρία του πλοίου και όχι στο τμήμα που θα μελετήσουμε εμείς. Στην συνέχεια παρουσιάζεται και το διάγραμμα το οποίο επιβεβαιώνει τα προηγούμενα.



Διάγραμμα 4. Mesh refinement

Εφόσον τελείωσαμε με τη διακριτοποίηση θα περάσουμε στις οριακές συνθήκες οι οποίες εφαρμόστηκαν σύμφωνα με τον Νορβηγικό Νηογνώμονα DN VGL

Οι οριακές συνθήκες είναι οι παρακάτω:

- Standard earth gravity = 9.806 m/s<sup>2</sup> (επιτάχυνση βαρύτητας)
- Displacement Point A (Ελευθερία σε κανέναν άξονα)
- Displacement Point B (Ελευθερία στον X,Y και δέσμευση στον Z άξονα)
- Displacement Point C (Ελευθερία στον Z και δέσμευση στον X και Y)
- Distributed Mass = 100000 kg
- Moment = 3245 Nm (Ροπή λόγω φόρτωσης των containers)
- Pressure = 40024 Pa (Υδροστατική πίεση)

✚ Η Ροπή υπολογίζεται από τον τύπο

$$M_{st} = 20 * B * \sqrt{CC} , CC = n \cdot G$$

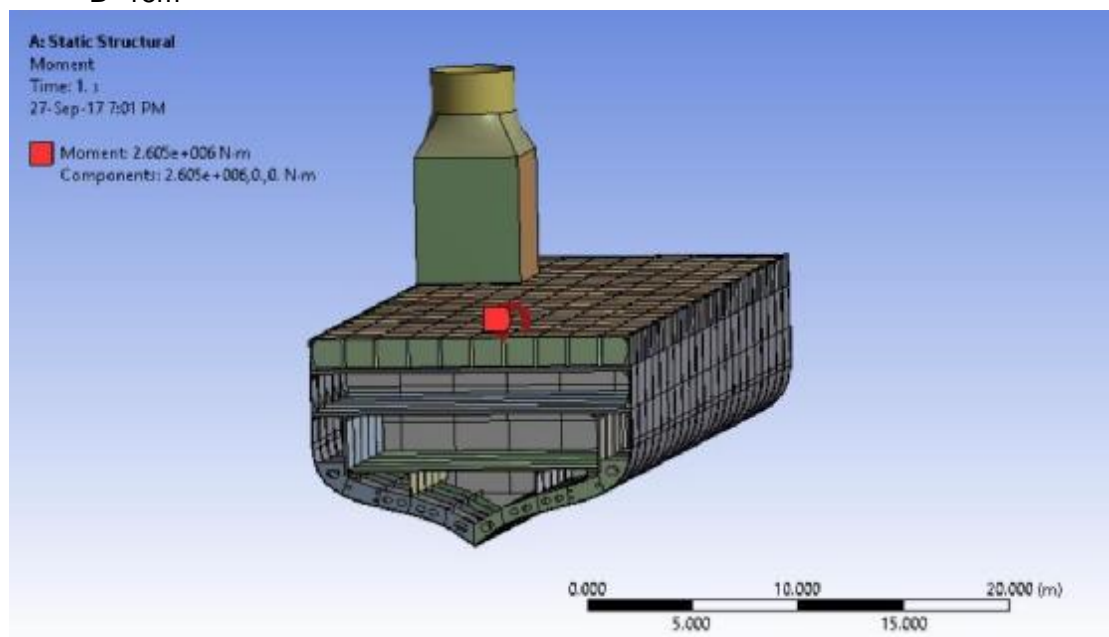
n = μέγιστος αριθμός εμπορευματοκιβωτίων 20 ft (TEU)

G = μέγιστη μάζα σε τόνους κάθε TEU που μπορεί να μεταφέρει το πλοίο

,όπου n=5800

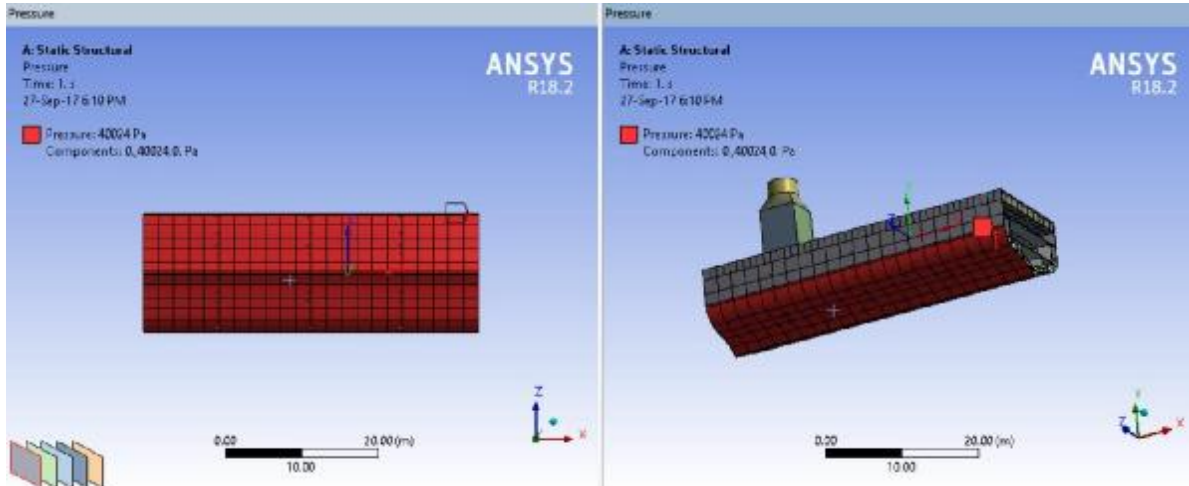
G=13 t

B=15m



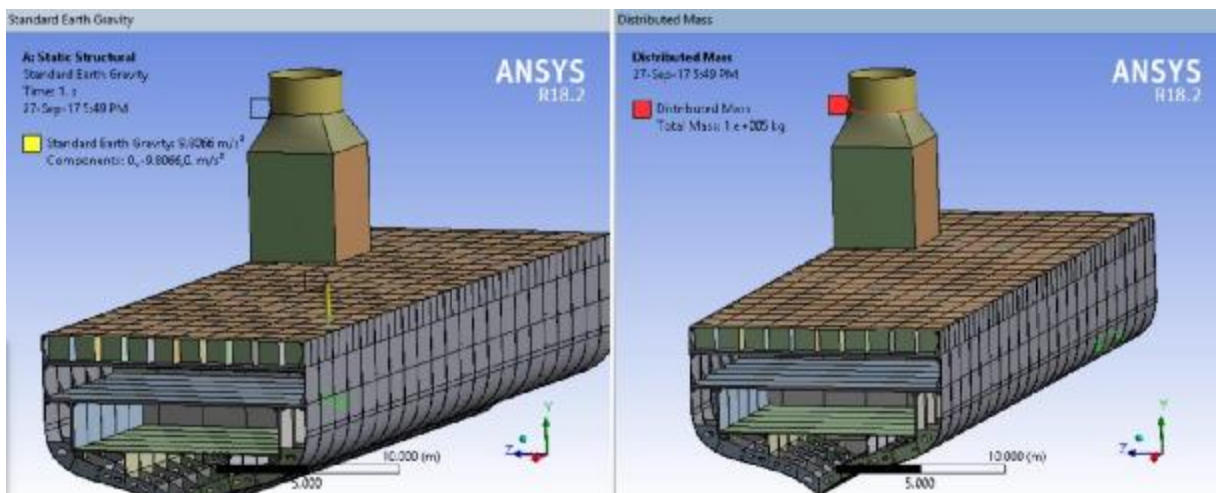
Εικόνα 43. Εφαρμογή ροπής

- ✚ Η Υδροστατική πίεση υπολογίστηκε από τον τύπο  $\rho \cdot g \cdot H$ , όπου  $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$   
 $g = 9.806 \text{ m/s}^2$   
 $H = 4\text{m}$ .



Εικόνα 44. Εφαρμογή Υδροστατικής Πίεσης

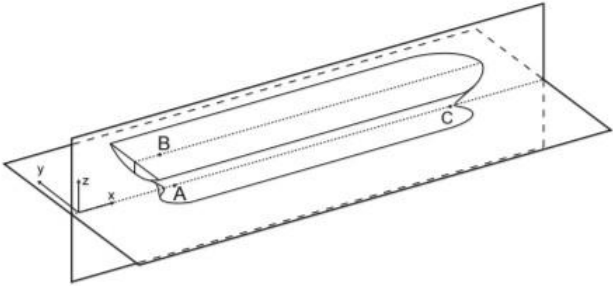
- ✚ Η Κατανεμημένη μάζα και η επιτάχυνση της βαρύτητας αντιπροσωπεύουν την δύναμη που ασκείται από τον γερανό στο κύριο κατάστρωμα του πλοίου.



Εικόνα 45. Κατανεμημένη μάζα & επιτάχυνση της βαρύτητας

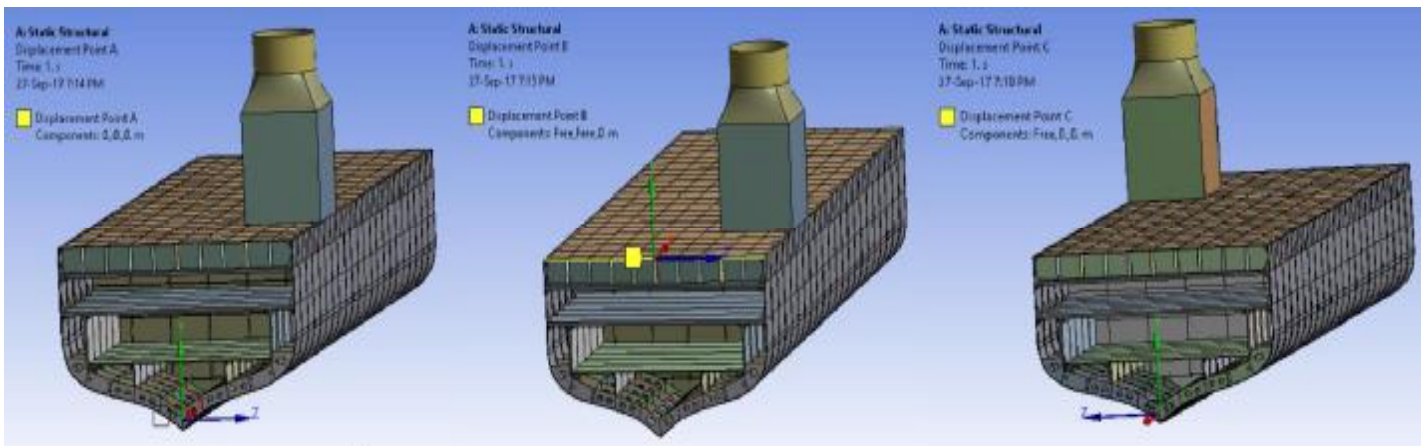
- ✚ Τέλος τα 3 Displacements, χρησιμοποιούνται για να δώσουν στο πλοίο την ελευθερία της κίνησης όταν αυτό φορτώνεται με containers σύμφωνα με το νηογνώμονα.

	Location	Direction of support
Aft End	WL, CL (point A)	X, Y, Z
	CL, Upper deck (point B)	Y
Forward End	WL, CL (point C)	Y, Z



**Figure 9 Example 1 of boundary conditions**

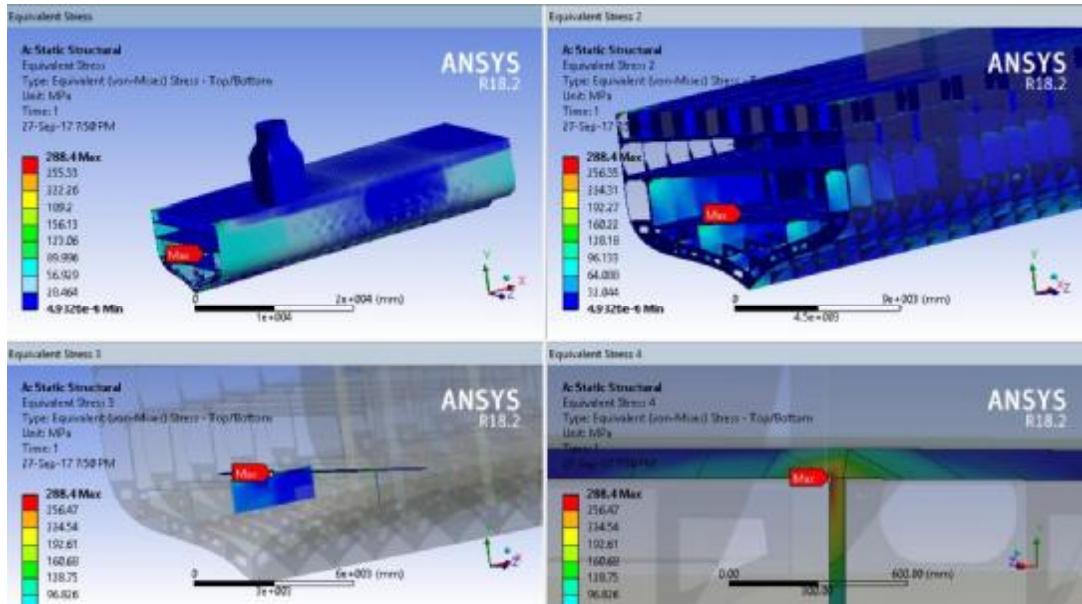
Εικόνα 46. Υπόδειγμα τοποθέτησης στηρίξεων



Εικόνα 47. Στηρίξεις A,B,C

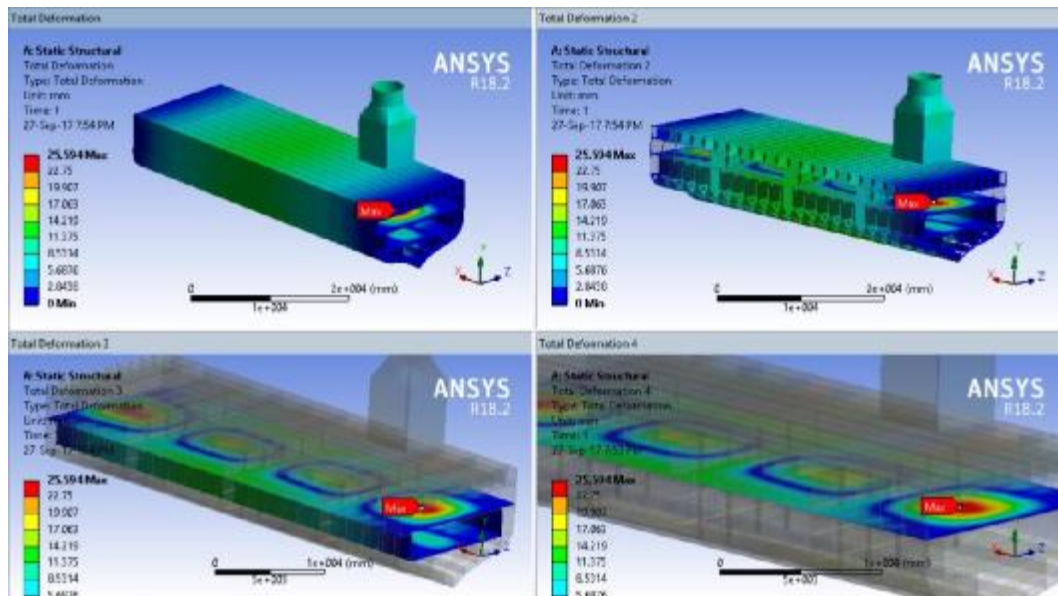


Το επόμενο βήμα, αφού εφαρμόστηκαν οι οριακές συνθήκες, είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν είναι η παραμόρφωση και η τάση Von-Mises. Αυτά τα δύο αποτελέσματα φαίνονται στις Εικόνες 47 και 48 αντίστοιχα.



Εικόνα 48. Τάση Von-Mises

Φαίνεται το ακριβές σημείο στο οποίο εμφανίζεται το Max Stress με τιμή 288Μpa. Το όριο διαρροής του υλικού μας είναι 365Μpa άρα αυτό σημαίνει, ότι η κατασκευή μας είναι ασφαλής από διαρροή και αστοχία του υλικού.



Εικόνα 49. Παραμόρφωση

Η στατική ανάλυση ολοκληρώθηκε, αυτό που είναι αναγκαίο να ελεγχθεί τώρα είναι η δομική ακεραιότητα της κατασκευής λόγω των φορτίων που ασκούνται πάνω του, δηλαδή θα πρέπει να γίνει έλεγχος λυγισμού στα νεύρα του πλοίου. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η διαδικασία που προβλέπεται από τον Νορβηγικό Νηογνώμονα.

# Buckling Check

ΤΥΠΟΙ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΝΗΟΓΝΩΜΟΝΑ DN VGL  
(Det Norske Veritas)

Ansys Mechanical Results		
$\sigma_{y,Sd}$	$\sigma_{z,Sd}$	$T_{Sd}$

- Τα παραπάνω αποτελέσματα πάρθηκαν από την ανάλυση με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων.

Τα  $\sigma_{y,Rd}$ ,  $\sigma_{x,Rd}$ ,  $T_{Rd}$  υπολογίστηκαν από τους τύπους που υπάρχουν στο αναλυτικό τυπολόγιο του DN VGL. (Recommended Practice DNV–RP-C201, October 2002, σελίδα 11-12)

1.  $\sigma_{xRd}$

Οι τύποι που με τη σειρά που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής :

$$\sigma_{x,Rd} = C_x \cdot \frac{f_y}{\gamma_M} \quad (6.1)$$

where

$$C_x = 1 \quad \text{when } \bar{\lambda}_p \leq 0.673 \quad (6.2)$$

$$C_x = \frac{(\bar{\lambda}_p - 0.22)}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{when } \bar{\lambda}_p > 0.673$$

where  $\bar{\lambda}_p$  is the plate slenderness given by:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{f_{cr}}} = 0.525 \frac{s}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (6.3)$$

2. Ομοίως για το  $\sigma_{y,Rd}$  χρησιμοποιήθηκαν οι εξής:

$$\sigma_{y,Rd} = \frac{\sigma_{y,R}}{\gamma_M} \quad (6.5)$$

$$\sigma_{y,R} = \left[ \frac{1.3 \cdot t}{l} \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} + \kappa \cdot \left( 1 - \frac{1.3 \cdot t}{l} \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right) \right] \cdot f_y \cdot k_p \quad (6.6)$$

where:

$$\kappa = 1.0 \quad \text{for } \lambda_c \leq 0.2 \quad (6.7)$$

$$\kappa = \frac{1}{2 \cdot \bar{\lambda}_c^2} \cdot \left( 1 + \mu + \bar{\lambda}_c^2 - \sqrt{(1 + \mu + \bar{\lambda}_c^2)^2 - 4 \cdot \bar{\lambda}_c^2} \right) \quad \text{for } 0.2 < \bar{\lambda}_c < 2.0$$

$$\kappa = \frac{1}{2 \cdot \bar{\lambda}_c^2} + 0.07 \quad \text{for } \bar{\lambda}_c \geq 2.0$$

and  $\bar{\lambda}_c$  is:

$$\bar{\lambda}_c = 1.1 \cdot \frac{s}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (6.8)$$

and  $\mu$  is:

$$\mu = 0.21 \cdot (\bar{\lambda}_c - 0.2) \quad (6.9)$$

$$k_p = 1.0 \quad \text{for} \quad p_{Sd} \leq 2 \cdot \left(\frac{t}{s}\right)^2 \cdot f_y \quad (6.10)$$

otherwise

$$k_p = 1.0 - h_a \cdot \left(\frac{p_{Sd}}{f_y} - 2 \cdot \left(\frac{t}{s}\right)^2\right), \quad \text{but } k_p \geq 0$$

where

$$h_a = 0.05 \cdot \frac{s}{t} - 0.75 \quad \text{but } h_a \geq 0 \quad (6.11)$$

The resistance of the plate is satisfactory when:

$$\sigma_{y,Sd} \leq \sigma_{y,Rd} \quad (6.12)$$

3. Οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν στο φύλλο του Excel για τον υπολογισμό του  $T_{Rd}$ :

$$\tau_{Sd} \leq \tau_{Rd} \quad (6.13)$$

$$\tau_{Rd} = \frac{C_t}{\gamma_M} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (6.14)$$

where

$$C_t = 1.0 \quad \text{for} \quad \bar{\lambda}_w \leq 0.8 \quad (6.15)$$

$$C_t = 1.0 - 0.625 (\bar{\lambda}_w - 0.8), \quad \text{for } 0.8 < \bar{\lambda}_w \leq 1.2$$

$$C_t = \frac{0.9}{\bar{\lambda}_w}, \quad \text{for } \bar{\lambda}_w > 1.2$$

$$\bar{\lambda}_w = 0.795 \cdot \frac{s}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E \cdot k_t}} \quad (6.16)$$

$$k_t = 5.34 + 4 \left(\frac{s}{l}\right)^2, \quad \text{for } l \geq 8 \quad (6.17)$$

$$= 5.34 \left(\frac{s}{l}\right)^2 + 4, \quad \text{for } l < 8$$

$$\left(\frac{\sigma_{x,Rd}}{\sigma_{x,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{y,Rd}}{\sigma_{y,Rd}}\right)^2 - c_1 \cdot \left(\frac{\sigma_{x,Rd}}{\sigma_{x,Rd}}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{y,Rd}}{\sigma_{y,Rd}}\right) + \left(\frac{r_{Rd}}{r_{Rd}}\right)^2 \leq 1.0 \quad (6.18)$$

where if both  $\sigma_{x,Rd}$  and  $\sigma_{y,Rd}$  is compression (positive) then

$$c_1 = 1 - \frac{s}{120 \cdot t} \quad \text{for } \frac{s}{t} \leq 120$$

$$c_1 = 0 \quad \text{for } \frac{s}{t} > 120$$

If either of  $\sigma_{x,Rd}$  and  $\sigma_{y,Rd}$  or both is in tension (negative), then  $c_1 = 1.0$ .

$\sigma_{x,Rd}$  is given by eq. (6.1) and  $\sigma_{y,Rd}$  is given by eq. (6.5). In case of tension, apply  $f_y/\gamma_M$ .

$r_{Rd}$  is given by eq. (6.19) in cases where  $\sigma_{y,Rd}$  is positive (compression) and by eq. (6.14) in cases where  $\sigma_{y,Rd}$  is zero or negative (in tension).

$$r_{Rd} = \frac{C_w \cdot f_y}{\gamma_M \cdot \sqrt{3}} \quad (6.19)$$

$$C_w = 1.0 \quad \text{for } \bar{\lambda}_w \leq 0.8 \quad (6.20)$$

$$C_w = 1.0 - 0.8 \cdot (\bar{\lambda}_w - 0.8), \quad \text{for } 0.8 < \bar{\lambda}_w \leq 1.25$$

$$C_w = \frac{1.0}{\bar{\lambda}_w^2}, \quad \text{for } \bar{\lambda}_w > 1.25$$

$$\sigma_{x,Rd} = C_x \cdot \frac{f_y}{\gamma_M} \quad (6.21)$$

where

$$C_x = 1 \quad \text{when } \bar{\lambda}_p \leq 0.673 \quad (6.22)$$

$$C_x = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{when } \bar{\lambda}_p > 0.673 \quad (6.23)$$

where  $\bar{\lambda}_p$  is the plate slenderness given by:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{f_{cr}}} = \frac{s}{t} \cdot \frac{1}{28.4 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} \quad (6.24)$$

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

$$k_\sigma = \frac{8.2}{1.05 + \psi} \quad \text{when } 0 \leq \psi \leq 1$$

$$= 7.81 - 6.29\psi + 9.78\psi^2 \quad \text{when } -1 \leq \psi < 0$$

$$= 5.98(1 - \psi)^2 \quad \text{when } -2 \leq \psi < -1$$

Σύμφωνα με τις κατασκευαστικές διαστάσεις των νομών του πλοίου έγινε η αντικατάσταση και κατέληξα στα αποτελέσματα που ακολουθούν. Για λόγους χώρου σας παρουσιάζω τα αποτελέσματα που θα χρειαστώ για τη σύγκριση.

### Buckling of unstiffened biaxially loaded plates with shear

Ο έλεγχος έγινε σε όλα τα νεύρα του πλοίου τα οποία έχουν ταξινομηθεί με βάση το χρώμα τους όπως φαίνεται. Οι 3 πρώτες στήλες είναι οι τάσεις στον X,Y για το κάθε νεύρο και η διατμητική τάση  $\tau$  αντίστοιχα, υπολογισμένες θεωρητικά και οι 3 επόμενες στήλες είναι οι τάσεις που προκύπτουν από την ανάλυση. Η τελευταία στήλη μας δείχνει αν υπάρχει λυγισμός.

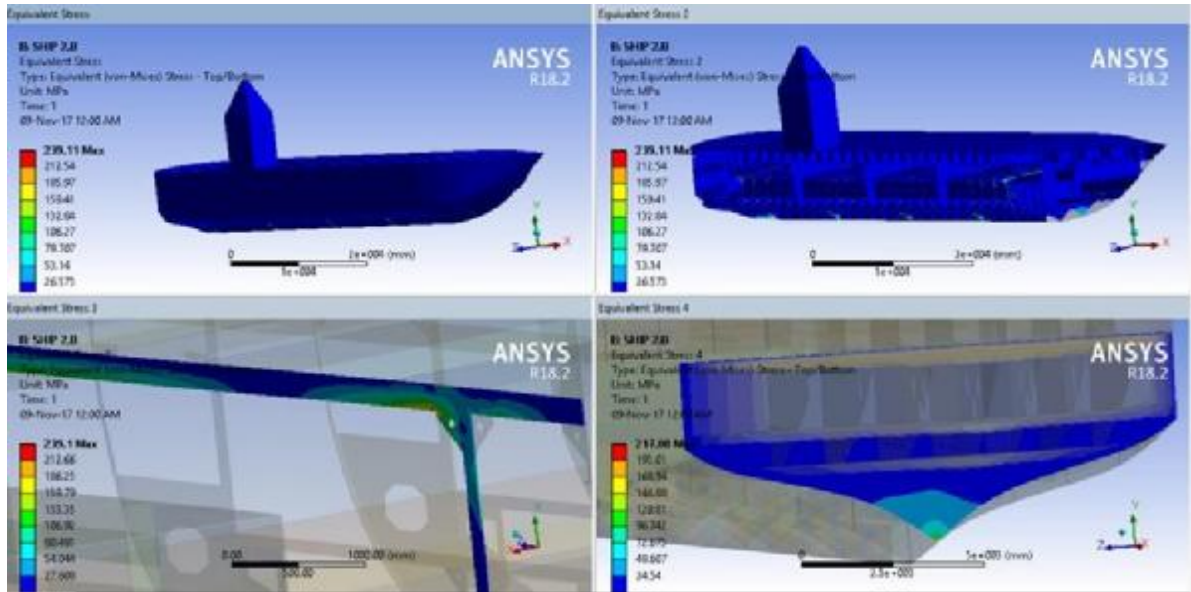
0 =	No Buckling
1 =	Buckling



Part	$\sigma_{y,Rd}$	$\sigma_{x,Rd}$	$T_{Rd}$	$\sigma_{y,Sd}$	$\sigma_{z,Sd}$	$T_{Sd}$	Buckling
Red 1	32.26673888	245.7323061	158.1438	0.2683	1.3787	1.1529	0
Red 2	25.94525733	245.7323061	158.1438	0.3931	1.1247	0.6039	0
Red 3	21.57239162	245.7323061	158.1438	0.8145	0.7131	0.2692	0
Red 4	18.35319438	245.7323061	158.1438	0.8043	0.7339	0.5158	0
Red 5	15.87444339	245.7323061	158.1438	0.5072	0.8036	0.3252	0
Red 6	13.91463869	245.7323061	158.1438	0.5215	0.7445	0.2739	0
Red 7	12.36999401	245.7323061	158.1438	0.4798	0.7151	0.3931	0
Red 8	11.3609208	245.7323061	158.1438	0.3268	0.6277	0.253	0
Red 9	10.40191481	245.7323061	158.1438	0.3184	0.7949	0.2673	0
Red 10	9.637024218	245.7323061	158.1438	0.3241	0.484	0.2302	0
Red 11	9.055663482	245.7323061	158.1438	0.4061	0.4773	0.3240	0
Red 12	8.610077851	245.7323061	158.1438	0.2703	0.4388	0.3704	0
Red 13	8.258655536	245.7323061	158.1438	0.2897	0.6243	0.4570	0
Red 14	7.973966691	245.7323061	158.1438	0.2654	0.7908	0.6859	0
Red 15	7.737011873	245.7323061	158.1438	0.3387	0.8207	0.5818	0
Red 16	7.534050247	245.7323061	158.1438	0.3273	1.0900	0.9160	0
Red 17	7.354667604	245.7323061	158.1438	0.3224	1.3846	1.2087	0
Red 18	7.190650684	245.7323061	158.1438	1.6727	0.4043	0.9289	0
Red 19	8.33511296	241.0355166	158.1438	0.2946	1.8754	1.1645	0
Red 20	8.33511296	241.0355166	158.1438	0.3592	1.9753	1.4173	0
Red 21	8.33511296	241.0355166	158.1438	0.4888	1.7931	1.7641	0
Red 22	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.6178	1.4579	2.1375	0
Red 23	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.6268	1.2071	1.9749	0
Red 24	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.4957	1.0322	1.6144	0
Red 25	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.2682	0.9343	1.0647	0
Red 26	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.6707	1.1030	0.9972	0
Red 27	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.5177	0.8249	1.2122	0
Red 28	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.2680	0.6005	0.7515	0
Red 29	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.2275	0.5119	1.0566	0
Red 30	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.1957	0.5079	1.0654	0
Red 31	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.2213	0.5889	0.7730	0
Red 32	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.6007	0.8763	1.0367	0
Red 33	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.5265	0.9487	1.1302	0
Red 34	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.2822	0.5749	0.9703	0
Red 35	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.2473	0.5707	1.4898	0
Red 36	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.4906	0.7342	1.8500	0
Red 37	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.6496	1.1406	1.7338	0
Red 38	8.335066802	244.9632389	158.1438	1.2325	1.7344	0.8542	0
Red 39	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.5700	1.3229	0.9148	0
Red 40	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.2570	0.7708	1.1776	0
Red 41	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.1700	0.6215	1.2926	0
Red 42	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.1777	0.6387	1.2529	0
Red 43	8.335066802	244.9632389	158.1438	0.2320	0.7734	1.1083	0
Red 44	8.335418776	222.0487448	158.1438	0.8837	0.5385	0.8136	0

Red 45	8.406572838	222.0487448	158.1438	0.7712	0.411	0.7448	0
Red 46	8.49826867	222.0487448	158.1438	0.3889	0.7053	0.4811	0
Red 47	8.633480768	222.0487448	158.1438	0.2579	0.8736	0.7062	0
Red 48	8.843123595	222.0487448	158.1438	0.4247	1.1636	0.8869	0
Red 49	9.174943333	222.0487448	158.1438	0.3486	1.1902	1.0335	0
Red 50	9.71419568	222.0487448	158.1438	0.2712	1.1648	0.9664	0
Red 51	10.64108171	222.0487448	158.1438	0.2261	1.0269	0.9679	0
Red 52	12.43567413	222.0487448	158.1438	0.3171	0.7947	1.057	0
Red 53	20.06855767	222.0487448	158.1438	0.5222	0.4637	0.9961	0
Yellow 1	7.195973954	273.9130435	158.1438	7.132	3.7066	0.9696	0
Yellow 2	7.195973954	273.9130435	158.1438	2.2989	2.5823	0.9361	0
Yellow 3	7.195973954	273.9130435	158.1438	2.3821	2.4438	0.9107	0
Yellow 4	7.195973954	273.9130435	158.1438	2.0052	2.0369	0.6509	0
Yellow 5	7.195973954	273.9130435	158.1438	1.8324	1.9624	0.5633	0
Yellow 6	7.195973954	273.9130435	158.1438	1.6230	1.8543	0.5230	0
Yellow 7	7.195973954	273.9130435	158.1438	1.9353	1.8402	0.5764	0
Yellow 8	7.195973954	273.9130435	158.1438	1.8832	2.069	0.7629	0
Yellow 9	7.195973954	273.9130435	158.1438	1.8954	1.9325	0.6791	0
Yellow 10	7.195973954	273.9130435	158.1438	1.7109	1.6821	0.5316	0
Yellow 11	7.195973954	273.9130435	158.1438	1.7468	1.8272	0.5862	0
Yellow 12	7.195973954	273.9130435	158.1438	2.0065	1.8833	0.6746	0
Yellow 13	7.195973954	273.9130435	158.1438	2.0979	2.1595	0.7709	0
Yellow 14	7.195973954	273.9130435	158.1438	2.3081	2.1533	0.7538	0
Yellow 15	7.195973954	273.9130435	158.1438	1.7306	2.2589	0.5786	0
Yellow 16	7.195973954	273.9130435	158.1438	1.8918	2.1814	0.6439	0
Yellow 17	7.195973954	273.9130435	158.1438	1.9095	1.7995	0.6769	0
Yellow 18	7.195973954	273.9130435	158.1438	2.0260	2.2660	0.8463	0
Yellow 19	7.195973954	273.9130435	158.1438	2.1094	2.7402	1.2177	0
Yellow 20	7.195973954	273.9130435	158.1438	3.0855	1.5241	0.9036	0
Green 1	735.4602701	261.2115826	158.1438	64.231	15.633	36.187	0
Green 2	735.4602701	261.2115826	158.1438	65.905	19.886	19.559	0
Green 3	735.4602701	261.2115826	158.1438	66.351	21.477	35.256	0
Green 4	735.4602701	261.2115826	158.1438	68.205	16.529	17.001	0
Green 5	735.4602701	261.2115826	158.1438	56.099	20.065	31.096	0
Green 6	735.4602701	261.2115826	158.1438	57.341	21.206	17.38	0
Green 7	735.4602701	261.2115826	158.1438	38.082	18.829	21.474	0
Green 8	735.4602701	261.2115826	158.1438	38.905	15.903	10.404	0
Green 9	735.4602701	261.2115826	158.1438	13.745	15.728	9.7057	0
Green 10	735.4602701	261.2115826	158.1438	13.598	14.806	8.6234	0
Green 11	735.4602701	261.2115826	158.1438	7.8598	13.999	6.126	0
Green 12	735.4602701	261.2115826	158.1438	8.8211	14.312	6.8417	0
Green 13	735.4602701	261.2115826	158.1438	28.715	16.137	17.332	0
Green 14	735.4602701	261.2115826	158.1438	29.507	17.291	10.798	0

Green 15	735.4602701	261.2115826	158.1438	38.374	18.659	21.374	0
Green 16	735.4602701	261.2115826	158.1438	38.92	16.951	10.074	0
Green 17	735.4602701	261.2115826	158.1438	32.131	16.904	18.963	0
Green 18	735.4602701	261.2115826	158.1438	32.157	17.763	10.932	0
Green 19	735.4602701	261.2115826	158.1438	12.408	13.835	8.8155	0
Green 20	735.4602701	261.2115826	158.1438	12.112	13.111	6.8002	0
Green 21	735.4602701	261.2115826	158.1438	7.5306	14.243	6.1615	0
Green 22	735.4602701	261.2115826	158.1438	8.6487	13.799	8.3785	0
Green 23	735.4602701	261.2115826	158.1438	28.027	18.819	16.485	0
Green 24	735.4602701	261.2115826	158.1438	29.958	16.871	8.079	0
Green 25	189.9000203	14.98136646	10.54292	36.53	14.135	8.541	0
Green 26	735.4602701	261.2115826	158.1438	38.656	19.051	12.115	0
Green 27	735.4602701	261.2115826	158.1438	29.897	19.261	17.697	0
Green 28	735.4602701	261.2115826	158.1438	31.995	16.32	8.7441	0
Green 29	735.4602701	261.2115826	158.1438	10.853	16.245	8.525	0
Green 30	735.4602701	261.2115826	158.1438	12.022	14.25	8.3575	0
Green 31	735.4602701	261.2115826	158.1438	9.1205	15.509	6.7671	0
Green 32	735.4602701	261.2115826	158.1438	10.134	14.585	6.7989	0
Green 33	735.4602701	261.2115826	158.1438	34.188	15.818	20.015	0
Green 34	735.4602701	261.2115826	158.1438	35.149	17.796	11.868	0
Green 35	735.4602701	261.2115826	158.1438	54.145	20.604	28.808	0
Green 36	735.4602701	261.2115826	158.1438	55.008	17.933	13.637	0
Green 37	735.4602701	261.2115826	158.1438	65.716	15.157	36.068	0
Green 38	735.4602701	261.2115826	158.1438	66.343	19.95	19.727	0
Green 39	735.4602701	261.2115826	158.1438	64.805	18.163	35.167	0
Green 40	735.4602701	261.2115826	158.1438	65.317	15.649	16.146	0



Εικόνα 50. Τάση Von-Misses με αλλαγή πάχους των νεύρων

Ο έλεγχος της δομικής ακεραιότητας του πλοίου ήταν επιτυχής και αυτό που μένει είναι η βελτιστοποίηση, αυτό σημαίνει ότι με την αύξηση του πάχους των νεύρων από 12mm σε 16mm θα πρέπει να μειωθούν οι συνολικές τάσεις. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία απλά τώρα θα γίνει η ανάλυση σε όλο το πλοίο, καθώς έγιναν όλοι οι απαραίτητοι έλεγχοι. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης φαίνονται στην Εικόνα 50.

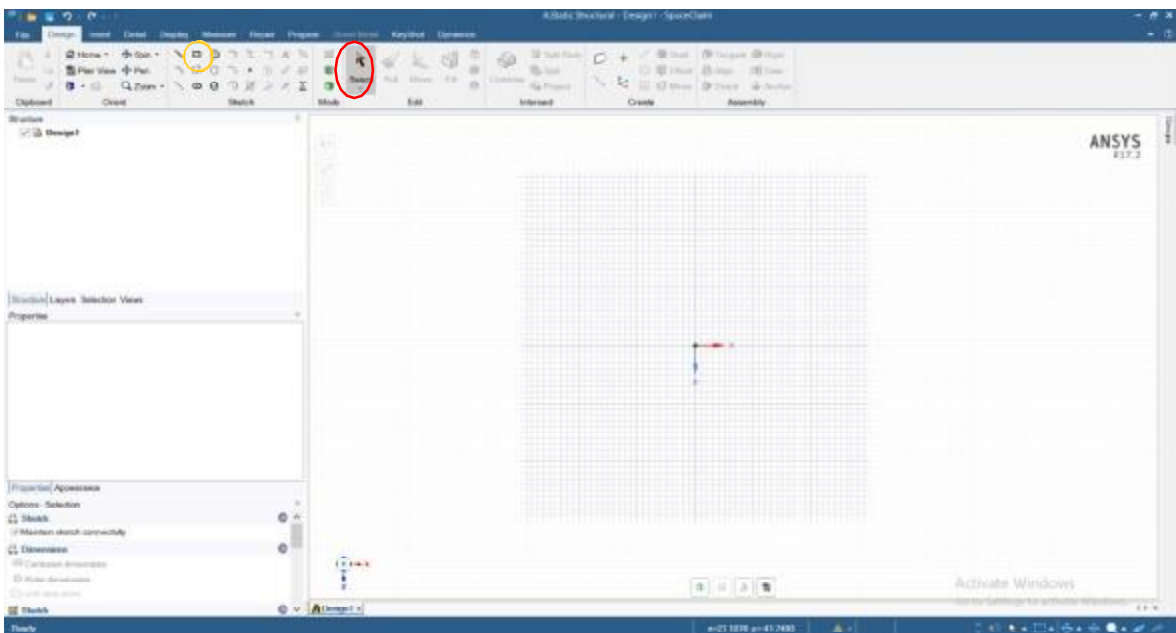
Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 50, μετά την αλλαγή του πάχους των νεύρων από 12mm σε 16mm, η μέγιστη τάση Von-Misses από 288 Mpa έπεσε στα 239 Mpa, δηλαδή έχουμε μείωση της τάσης κατά 49Mpa ή μπορούμε να πούμε ότι η μείωση της τάσης είναι της τάξης του 19%.

Ένας άλλος τρόπος βελτιστοποίησης θα ήταν η χρησιμοποίηση άλλου υλικού με ακόμα καλύτερες ιδιότητες, αυτό όμως θα ανέβαζε το κόστος της κατασκευής κατά ένα μεγάλο βαθμό και ένας άλλος τρόπος βελτιστοποίησης, εξίσου αποτελεσματικός και οικονομικός σχετικά θα ήταν η κατασκευή των νεύρων όλο και πιο κοντά μεταξύ τους, ώστε να αυξηθεί ο αριθμός τους και να αυξηθεί η δομική ακεραιότητα και η σταθερότητα του πλοίου.

## 5. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

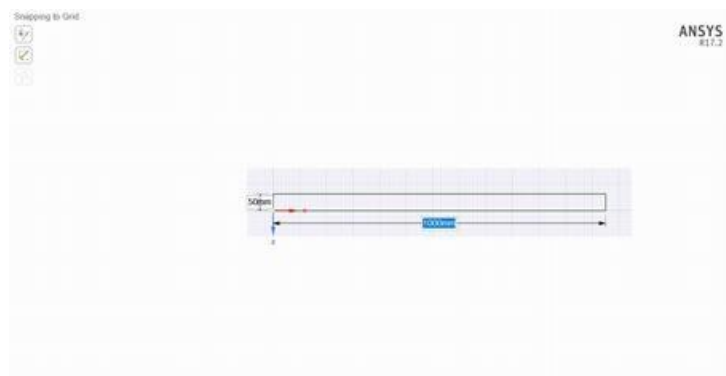
### 5.1. Στατική ανάλυση δοκού

Η Γεωμετρία της ράβδου σχεδιάστηκε στο σχεδιαστικό εμπορικό πρόγραμμα Spaceclaim της ANSYS. Το περιβάλλον του προγράμματος φαίνεται στην Εικόνα 5.Π.1.



Εικόνα 5.Π.1. Γραφικό περιβάλλον

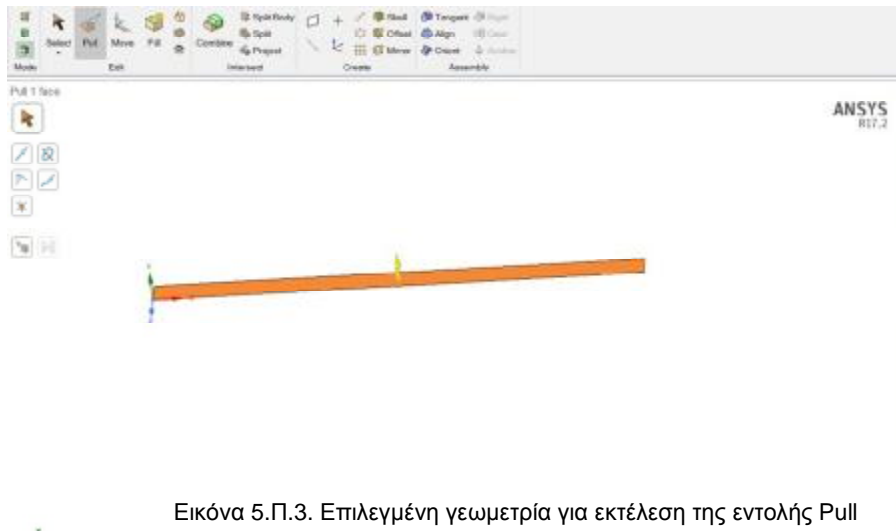
Το ορθογώνιο σχεδιάστηκε με τη βοήθεια του εικονιδίου το οποίο είναι κυκλωμένο με κίτρινο και φαίνεται στην Εικόνα 5.Π.1. Ονομάζεται rectangle και μας βοηθάει επιλέγοντας το αρχικό σημείο να σχεδιάσουμε ένα ορθογώνιο με τις διαστάσεις που εμείς θέλουμε όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.Π.2.



Εικόνα 5.Π.2. Διαστάσεις ορθογωνίου

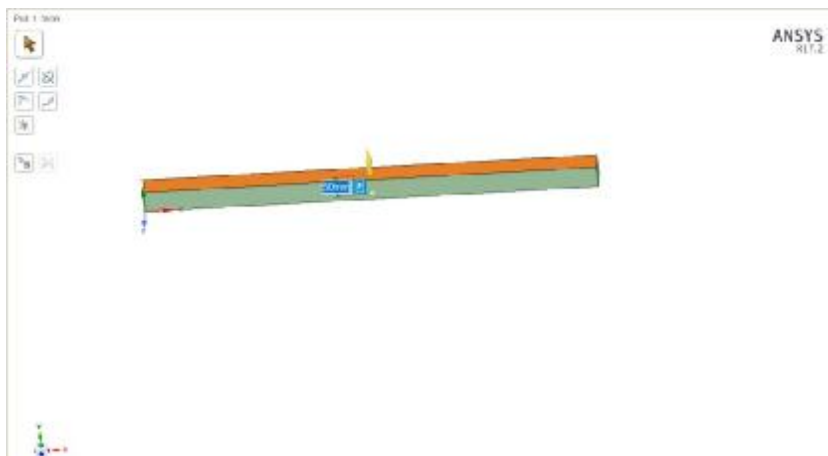
Οι διαστάσεις, όπως φαίνονται και από την Εικόνα 5.Π.2. είναι 50mm στον άξονα Z και 1000mm στον άξονα X. Στον άξονα Y θα δώσουμε το πάχος της δοκού και με αυτόν τον τρόπο θα μετατρέψουμε το σχέδιο από 2D σε 3D, δηλαδή σε τρισδιάστατο. Αυτό γίνεται με την επιλογή Pull, η οποία είναι κυκλωμένη με κόκκινο στην Εικόνα 5.Π.1. Είναι ανενεργή (γκρι), γιατί δεν έχουμε επιλέξει την γεωμετρία που θέλουμε να “τραβήξει”.

Στην Εικόνα 5.Π.3. φαίνεται η επιλεγμένη γεωμετρία με πορτοκαλί και το κίτρινο βέλος μας δείχνει τον άξονα προς τον οποίο θέλουμε να δώθι το πάχος. Εδώ είναι προς τον +Y, όπως και θέλουμε.



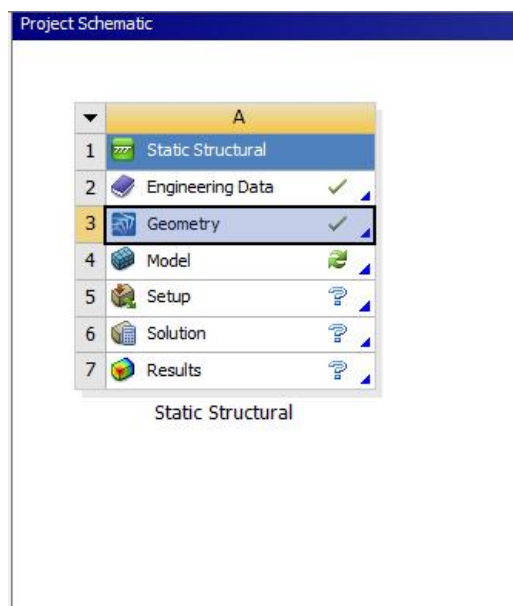
Εικόνα 5.Π.3. Επιλεγμένη γεωμετρία για εκτέλεση της εντολής Pull

Στην συνέχεια πρέπει να δώσουμε το πάχος, δηλαδή το πόσο θέλουμε να τραβηχτεί η γεωμετρία προς τον άξονα Y. Σε αυτή τη περίπτωση, επέλεξα να δώσω πάχος στην δοκό 50mm, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.Π.4.



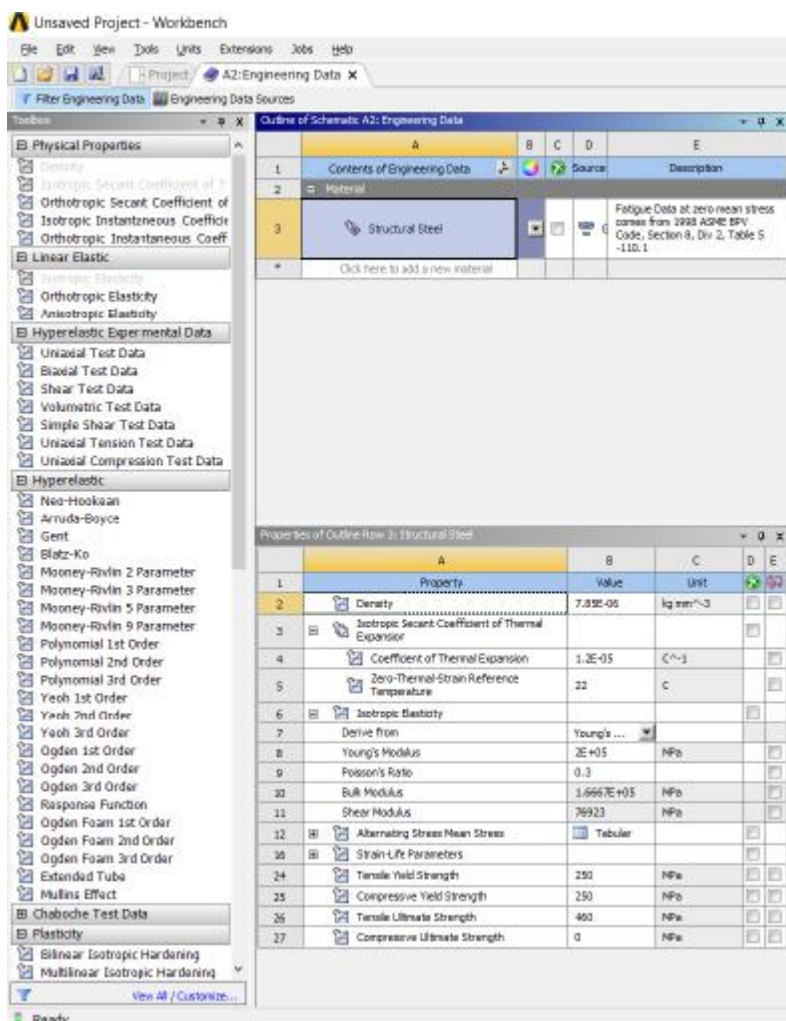
Εικόνα 5.Π.4. Εκτέλεση εντολής Pull

Εφόσον τελειώσαμε και με το πάχος της δοκού, τελειώσαμε και με το σχεδιασμό της τρισδιάστατης γεωμετρίας της δοκού. Αυτό που ακολουθεί είναι να ανοίξουμε το πρόγραμμα προσομοίωσης της ANSYS και να δημιουργήσουμε τη γεωμετρία με το τρόπο που αναφέρθηκε πριν. Στην Εικόνα 5.Π.5. είναι επιλεγμένο το κελί της γεωμετρίας, με διπλό κλικ σε αυτό το κελί θα μας ανοίξει το γραφικό περιβάλλον που φαίνεται στην Εικόνα 5.Π.1. και εκεί θα κάνουμε την προηγούμενη διαδικασία.



Εικόνα 5.Π.5. Σύστημα στατικής ανάλυσης

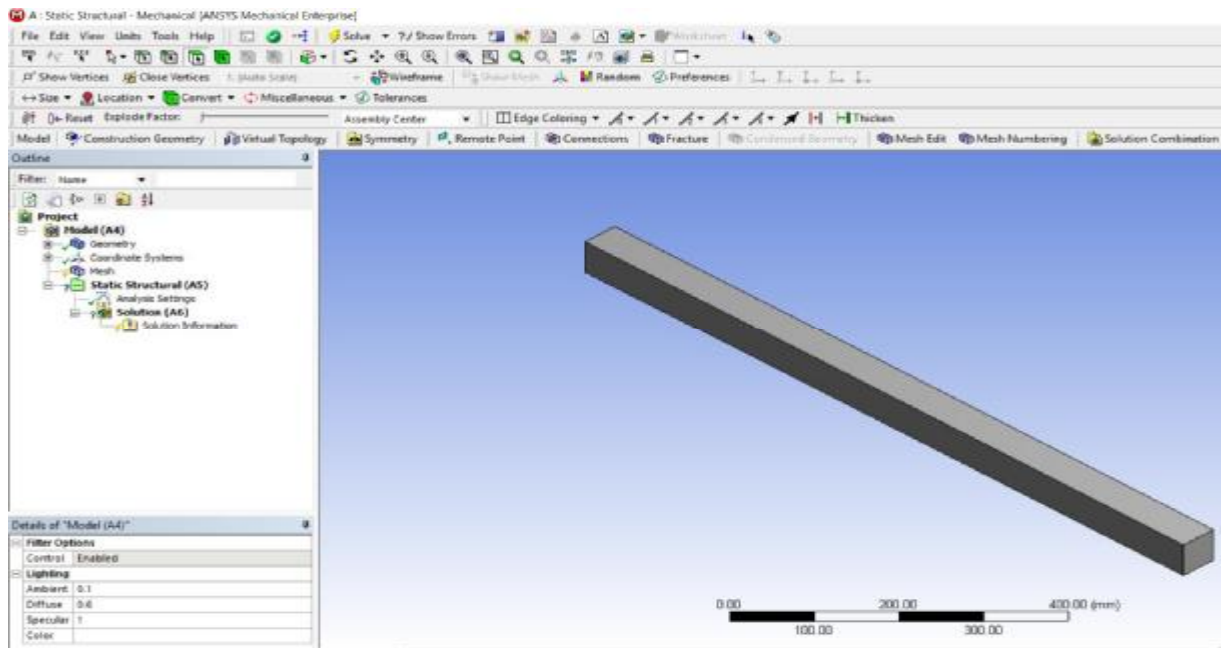
Επίσης στην Εικόνα 5.Π.5., φαίνονται οι επιλογές που μου δίνονται από το Σύστημα Στατικής Ανάλυσης που έχω επιλέξει, όπως το Engineering Data, στο οποίο μπορώ να κάνω την επιλογή του υλικού και να αλλάξω τις ιδιότητες του, ή ακόμα και να δημιουργήσω το δικό μου υλικό με τις ιδιότητες που θέλω εγώ. Τα Model, Setup, Solution, Results ανοίγουν το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος προσομοίωσης όπως θα αναφερθεί παρακάτω. Αν επιλέξουμε το Engineering Data θα μας ανοίξει το παράθυρο που φαίνεται στην Εικόνα 5.Π.6. Εκεί φαίνονται το υλικό, το οποίο είναι το Structural Steel, με πυκνότητα  $7.85 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3}$ , Μέτρο ελαστικότητας (Young Modulus) ίσο με  $2 \times 10^5 \text{ Mpa}$ , λόγο Poisson 0.3 και όριο διαρροής (Tensile Yield Strength) ίσο με 250 MPa. Στα αριστερά φαίνονται όλες οι ιδιότητες του υλικού της οποίες μπορούμε να προσθέσουμε στον υπάρχον υλικό.



Εικόνα 5.Π.6. Ιδιότητες υλικού

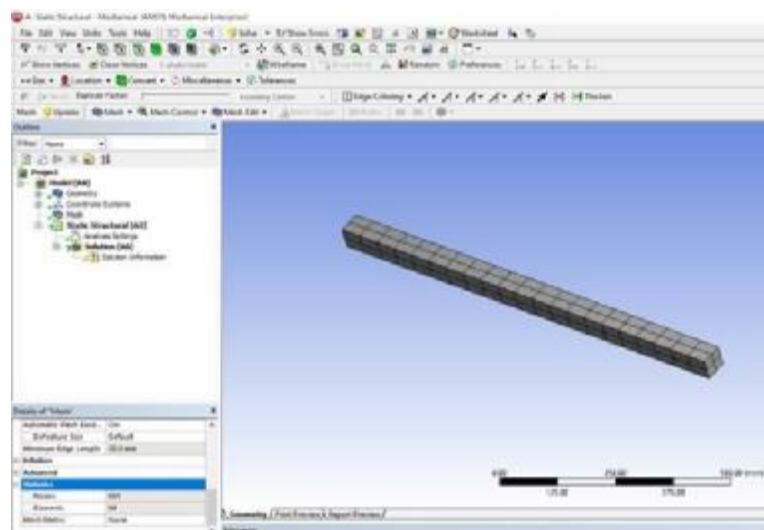
Έπειτα, γυρνάμε στο σύστημα της Εικόνας 5.Π.5., αφού κλείσουμε το παράθυρο που άνοιξε, πατώντας το X πάνω στην καρτέλα με όνομα "A2:Engineering Data". Αφού κλείσει θα κάνουμε διπλό αριστερό κλικ στο κελί A3 : Model, και θα μεταφερθούμε στο πρόγραμμα προσομοίωσης που φαίνεται στην Εικόνα 5.Π.6., το οποίο έχει κρατήσει τη γεωμετρία μας πράγμα που φαίνεται από το πράσινο «τικ» δίπλα στο Geometry. Το ερωτηματικό στα επόμενα κελιά, σημαίνει ότι δεν έχει γίνει κάποια επεξεργασία. Στην Εικόνα 5.Π.7. στο αριστερό μέρος, στο αποκαλούμενο δέντρο, φαίνονται οι επιλογές που υπάρχουν, όπως το Geometry, που μας δείχνει τη γεωμετρία μας, το Connections, που δείχνει αν έχω επαφές, εδώ δεν έχω γιατί έχω ένα σώμα. Επίσης υπάρχει το Mesh, που είναι η δημιουργία του πλέγματος, το Static Structural στο οποίο γίνεται η εφαρμογή των οριακών συνθηκών της ανάλυσης και το Solution στο οποίο γίνεται η εφαρμογή των αποτελεσμάτων που θέλω να αποκομίσω από την ανάλυση.



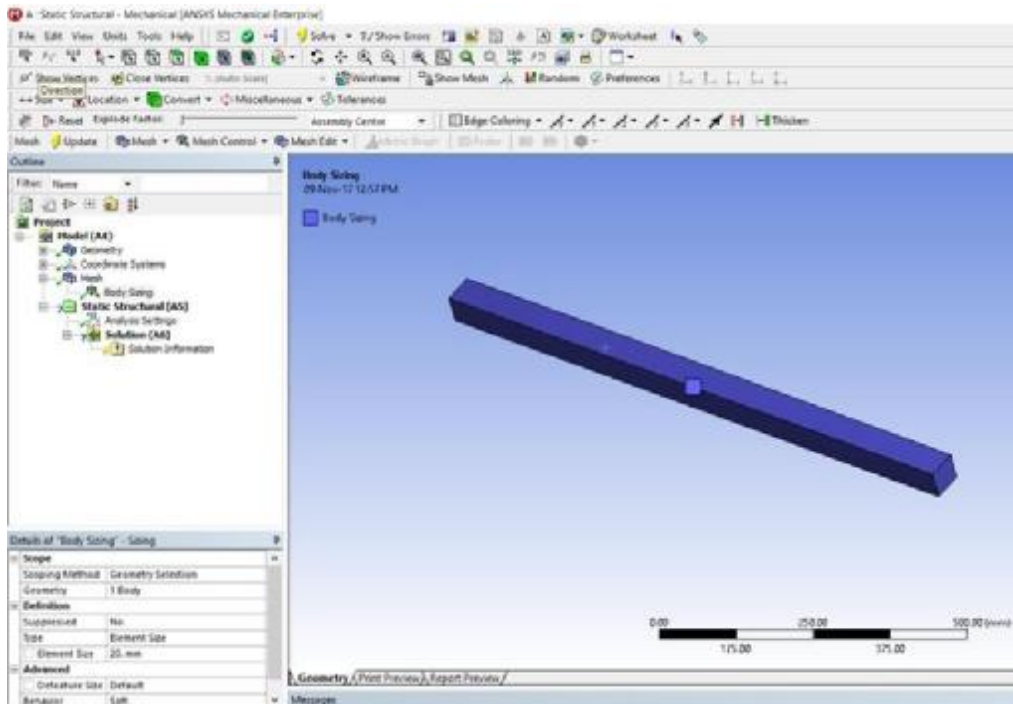


Εικόνα 5.Π.7. Γραφικό περιβάλλον προγράμματος προσομοίωσης

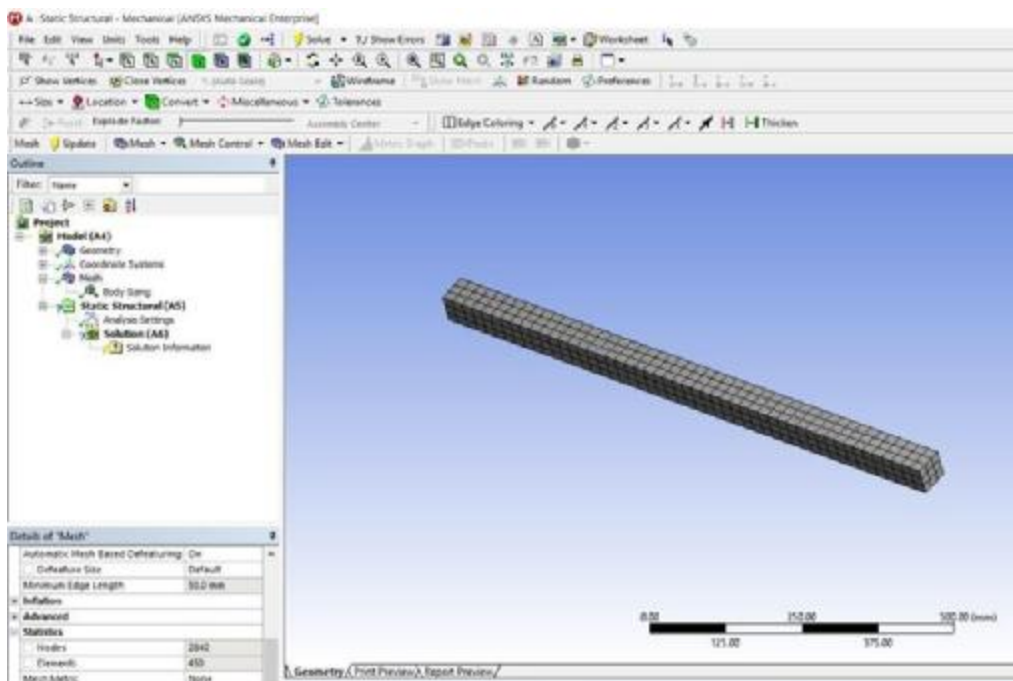
Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία του πλέγματος, επιλέγοντας το Mesh στο Outline, και στη συνέχεια το κουμπί Update, όπως στην Εικόνα 5.Π.8. Δημιουργεί ένα πλέγμα με τις προϋπάρχουσες επιλογές, το οποίο είναι καλό αλλά είναι πολύ αραιό. Όπως φαίνεται έχω 651 κόμβους και 84 στοιχεία. Για τον λόγο αυτό θα μειώσω το μέγεθος των στοιχείων ώστε να περιορίσω την πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος, κάνοντας δεξί κλικ πάνω στο Mesh->Insert->Element Size και επιλέγοντας τη γεωμετρία. Στο κελί του Element Size, το οποίο θα έχει μετονομαστεί σε Body Sizing, καθώς επέλεξα ένα σώμα ( δοκό ), στη γραμμή του Element Size θα βάλω 20mm(Εικόνα 5.Π.9.), αυτό σημαίνει ότι θα δημιουργήσει ένα πλέγμα με στοιχεία τα οποία θα έχουν μέγεθος 20mm, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.Π.10.



Εικόνα 5.Π.8. Δημιουργία πλέγματος με προϋπάρχουσες επιλογές (default)



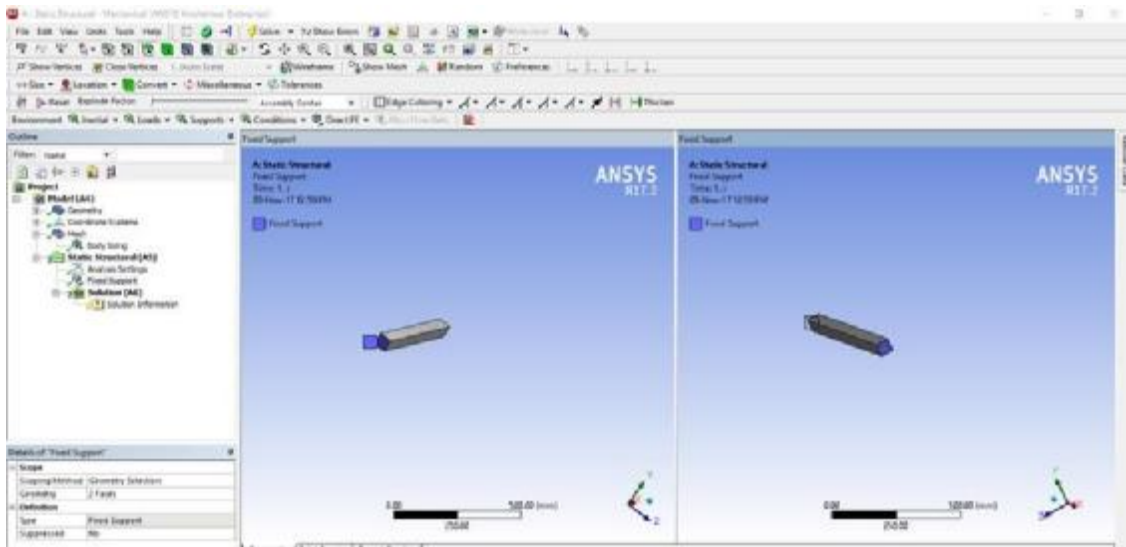
Εικόνα 5.Π.9. Επιλογή μεγέθους στοιχείων



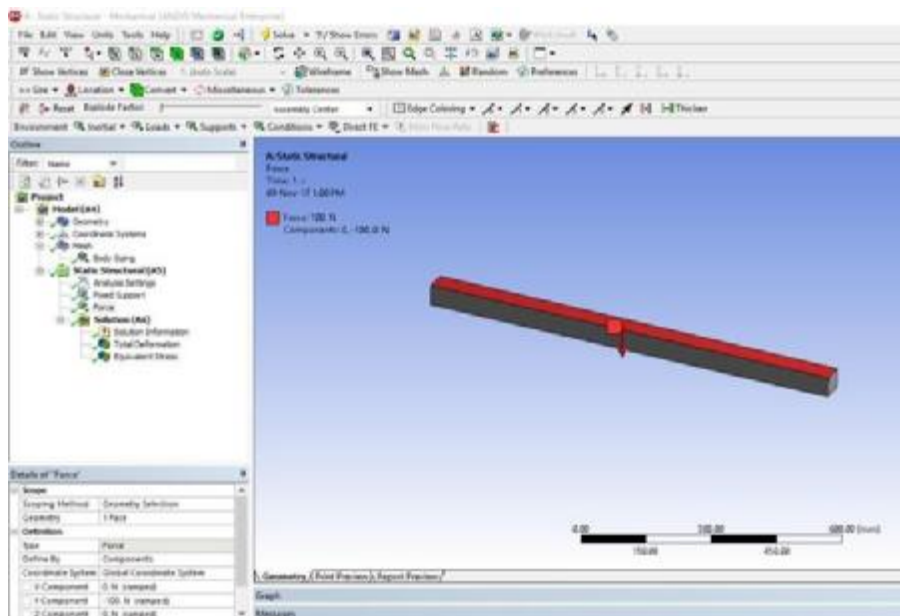
Εικόνα 5.Π.10. Δημιουργία νέου πλέγματος

Το επόμενο βήμα είναι η εφαρμογή των οριακών συνθηκών, οι οποίες εφαρμόζονται, κάνοντας δεξί κλικ πάνω στο Static Structural->Insert και επιλέγοντας αυτές που μας ενδιαφέρουν. Στην δικιά μας περίπτωση θα επιλέξουμε 2 Fixed Supports, δηλαδή 2 στηρίξεις οι

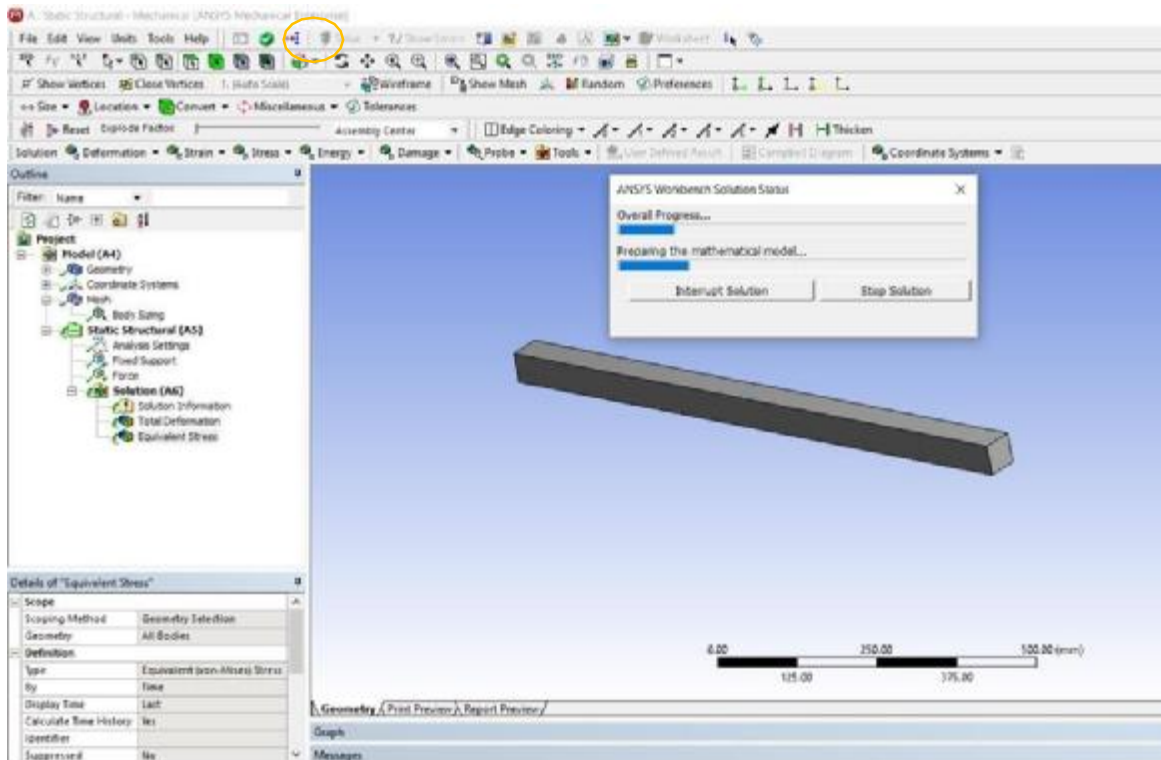
οποίες δεσμεύουν και τους 3 άξονες και η εφαρμογή τους θα γίνει στα Faces (πλευρές) που φαίνονται στην Εικόνα 5.Π.11. τα οποία είναι χρωματισμένα με μπλε και μία δύναμη (Force) της τιμής των 100N, όμως επειδή θέλουμε η δύναμη να είναι προς τον -Y,θα επιλέξουμε την πλευρά που φαίνεται στην Εικόνα 5.Π.12. και στο παράθυρο κάτω δεξιά "Details of Force" στη γραμμή του Y component , θα βάλω την τιμή της δύναμης με (-) μείον μπροστά, ώστε να δείξω ότι η κατεύθυνσή της είναι στον -Y, δηλαδή η δύναμη θα είναι -100N(Εικόνα 5.Π.12.).



Εικόνα 5.Π.11. Εφαρμογή στηρίξεων



Εικόνα 5.Π.12. Εφαρμογή Δύναμης(Force)

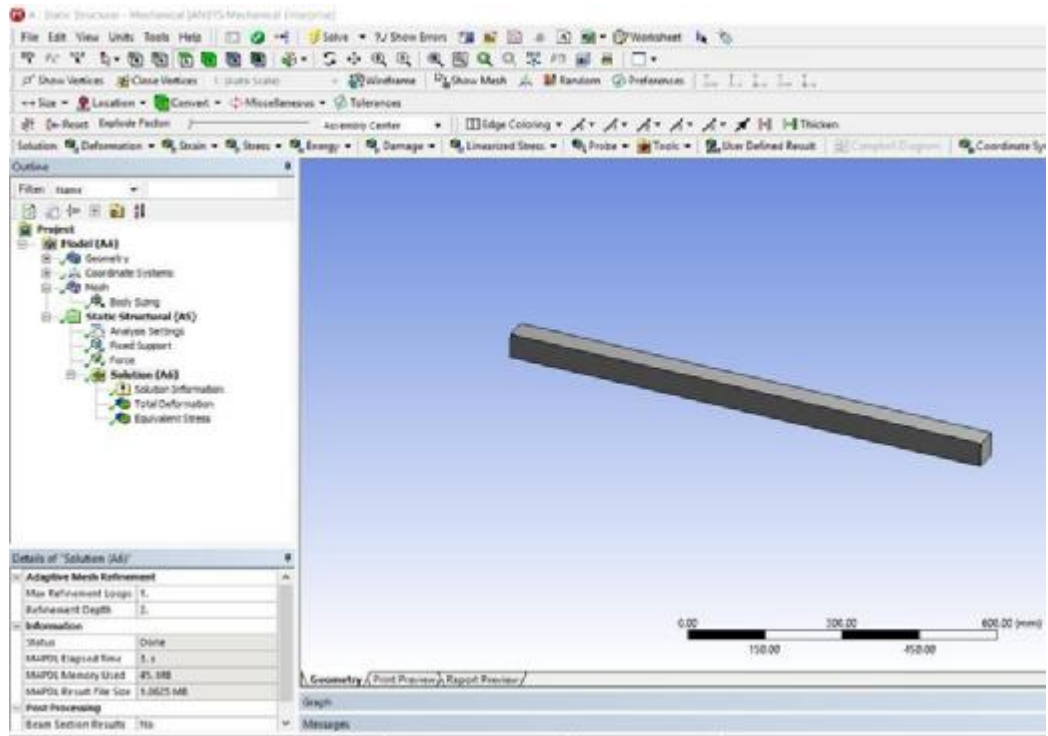


Εικόνα 5.Π.13. Λύση του προβλήματος

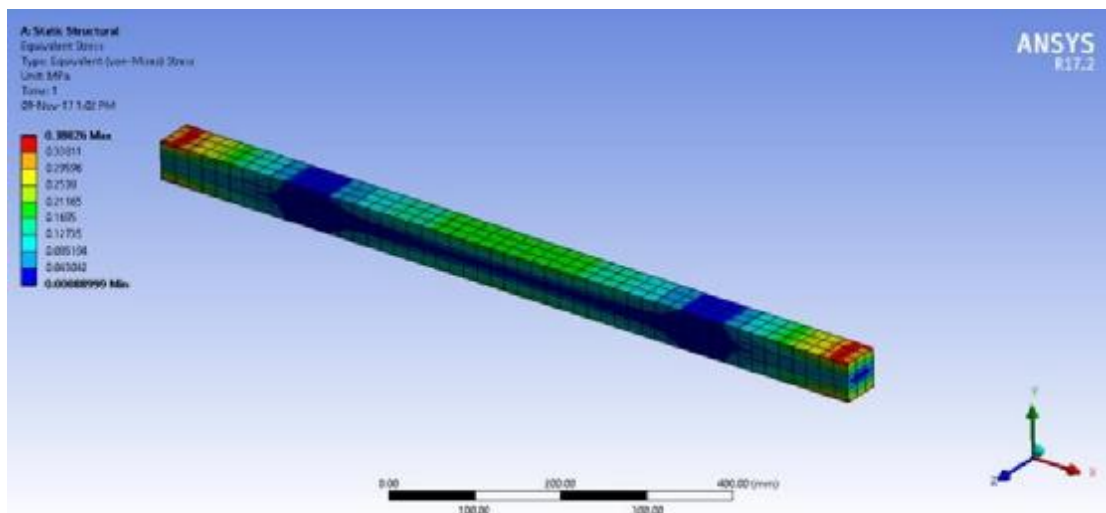
Αφού έγινε και η εφαρμογή των οριακών συνθηκών, θα πρέπει τώρα να λυθεί το πρόβλημα, ώστε να πάρουμε αποτελέσματα για την παραμόρφωση και την Τάση. Αυτό θα γίνει αφού πατήσουμε το κουμπί Solve στην γραμμή εργαλείων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.Π.13. Πριν πατήσουμε το Solve, μπορούμε να κάνουμε δεξί κλικ στο Solution->Insert->Deformation->Total Deformation, και επιλέγουμε στη γραμμή Geometry του Details of "Total Deformation" τη δοκό, για να πάρουμε τα αποτελέσματα για την Παραμόρφωση και ξανά δεξί κλικ στο Solution->Insert->Stress->Equivalent Stress, επιλέγοντας πάλι τη δοκό στη γραμμή του Geometry του Details of "Equivalent Stress" για να πάρουμε τα αποτελέσματα των Τάσεων Von-Mises.

Βλέπουμε ότι κάτω από το Solution (A6) , (A6 είναι το κελί, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.Π.5.), υπάρχουν 3 πράσινοι κεραυνοί, αυτό σημαίνει ότι το πρόγραμμα προσομοίωσης ακόμα λύνει, κάτι που φαίνεται και από το παράθυρο "ANSYS Workbench Solution Status" που έχει εμφανιστεί στο γραφικό περιβάλλον. Όταν τελειώσει με τη λύση, θα εμφανιστούν δίπλα από τα Solution Information, Total Deformation, Equivalent Stress, στη θέση των κεραυνών, 3 πράσινα «Τικ», όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.Π.14.

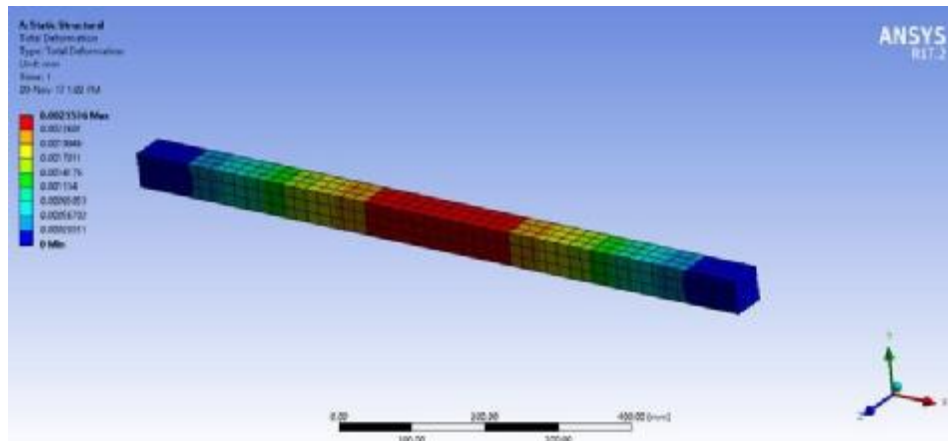
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.Π.14, η διαδικασία λύσης δεν εντόπισε κάποιο σφάλμα και το πρόγραμμα προσομοίωσης μας έλυσε το πρόβλημα της στατικής αυτής ανάλυσης, δίνοντας μας τα αποτελέσματα που εμείς επιλέξαμε και θέλαμε. (Total Deformation & Equivalent Stress). Επιλέγοντας τώρα το Total Deformation ή το Equivalent Stress, το γραφικό περιβάλλον μας εμφανίζει τη δοκό με βάση το αποτέλεσμα που επιλέξαμε, δηλαδή αν θέλουμε να δούμε τη συνολική παραμόρφωση της δοκού, θα επιλέξουμε το Total Deformation και θα πάρουμε τα αποτελέσματα που φαίνονται στην Εικόνα 5.Π.15.



Εικόνα 5.Π.14. Ολοκλήρωση λύσης



Εικόνα 5.Π.15 Συνολική Παραμόρφωση



Εικόνα 5.Π.16. Τάση Von-Misses

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 5.Π.15 η μέγιστη συνολική παραμόρφωση βρίσκεται στο μέσο της δοκού πράγμα λογικό και η ελάχιστη τιμή στα σημεία που έχουμε δεσμεύσει με τις 2 στηρίξεις. Η μέγιστη τιμή είναι 0.00255 mm. Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, θα εμφανίσουμε τα αποτελέσματα για την Τάση, επιλέγοντάς την από τον δέντρο, κάτω από την Συνολική παραμόρφωση. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην Εικόνα 5.Π.16.

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 5.Π.16, η μέγιστη τιμή της τάσης είναι 0.38 MPa και εμφανίζεται στα σημεία που είναι με κόκκινο χρώμα, όπως μας δείχνει και ο χρωματικός οδηγός αριστερά. Εμείς γνωρίζουμε, όπως δείχνει και η Εικόνα 5.Π.6., ότι η Τάση Διαρροής του υλικού είναι 250MPa, άρα η κατασκευή μας είναι ασφαλής από διαρροή ή αστοχία του υλικού διότι η Τάση που εμφανίστηκε λόγω της Δύναμης που ασκήθηκε είναι πολύ μικρότερη του 250MPa.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάστηκε η ανάλυση δύο διαφορετικών τύπων πλοίων, ο έλεγχος της δομικής ακεραιότητας των νομών καθώς και η βελτιστοποίησή τους, μετά από αλλαγή του πάχους τους. Η υλοποίηση της πτυχιακής έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, ώστε να πάρω αποτελέσματα μέσω του υπολογιστή σε πραγματικές συνθήκες. Βασικό συμπέρασμα είναι ότι με τη χρήση του προγράμματος αυτού, οι εταιρείες εξοικονομούν χρόνο και χρήματα, καθώς και ελαχιστοποιείται έτσι ο παράγοντας του λάθους. Έπισης μπορούμε να δοκιμάσουμε τις διαφορετικές ιδιότητες του κάθε υλικού χωρίς να χρειάζεται να λάβουν χώρα πραγματικά πειράματα. Το εύρος χρήσης των πεπερασμένων στοιχείων είναι πολυδιάστατο και αφήνεται πάνω στον εκάστοτε χρήστη τους για κάθε παροντική ή μελλοντική εφαρμογή.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### 6.1 Ελληνική Βιβλιογραφία

- Κακαβάς Π., Η Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, 3Η Έκδοση, Αυτοέκδοση, Πάτρα, 2013.
- Κερμανίδης Θ., Αντοχή των υλικών, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Τόμος 1, Πάτρα, 2009
- Κερμανίδης Θ., Αντοχή των υλικών, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Τόμος 2, Πάτρα, 2009
- Μαυράκος, Σ., “Θαλάσσια Τεχνολογία - Προοπτικές Ανάπτυξης”, Χρονικά Ναυπηγών Μηχανικών, Αριθ. Φύλλου 46, σελ. 7-13, (1993).
- Παπανικολάου, Α., “Μελέτη Πλοίου”, Τόμος Α, Αθήνα (1989)

### 6.2 Ξένη Βιβλιογραφία

- IACS - Common Structural rules for Bulk Carriers 2006
- Ultimate Strength of Ship Hulls Under Combined Vertical, Horizontal Bending and Shearing Forces, By J. K. Paik, A. K. Thayamballi, J. S. Che
- Estimation of Ultimate Longitudinal Bending Moment of Ships and Box Girder, By M. K. Rahman and M. Chowdhury, Journal of Ship Research vol. 40 No.3 Sept. 1996

- ANSYS 17.2 Manuals
- The ABS Rules for Building and Classing Steel Vessels, Part 5C, Chapter 1 (Tankers), Chapter 3 (Bulk Carriers), Chapter 5 (Containerships).
- Hughes O. Ship Structural Design: A rationally-based, computer-aided optimization procedure. SNAME, New York, 1996.
- Bathe K.J. Finite Element Procedures. Prentice Hall Inc, New Jersey, 1996
- UNIDO (United Nations Industrial Development Organisation): “Marine Industrial Technology Monitor”, No 1, (1991).
- Erdogan Madenci , Ibrahim Guven , The finite element method and applications in engineering using Ansys, SPRINGER Publications, New York, 2006.
- Walter D. Pikey, Formulas for stress, strain and structural matrices, second edition, John WILEY & Sons Inc. Publications, New Jersey, 2005.
- 1. Rules For Classification, Part 3, Chapter 4, Section 4, 2.3. Still water torsion moment for container ships, Page 36.
- 2.Class guideline for finite element analysis , Section 2 , 2.5 Boundary conditions, 2.5.2.Boundary conditions Example 1 Figure 9 , page 21
- Brush.D.O. and Almroth. B.O. “Buckling of Bars, Plates and Shells”, McGraw-Hill 1975
- BUCKLING STRENGTH OF PLATED STRUCTURES, 6.5 Buckling of unstiffened biaxially loaded plates with shear, Recommended Practice DNV–RP-C201, October 2002, Page 12
- NAUTICUS HULL, User Manual – PULS, July 2007, DNV Software.
- Washizu, K. (1975). “Variational methods in elasticity and plasticity”, Pergamon Press, Second Edition, Bath, Great Britain.

### 6.3 Πηγές Διαδικτύου

- <https://www.quora.com/Is-it-possible-for-any-material-to-have-a-negative-poisson-ratio-If-yes-how-do-they-behave-when-loaded>
- [http://www.engineeringarchives.com/les\\_mom\\_necking.html](http://www.engineeringarchives.com/les_mom_necking.html)
- <http://www.shipbuilding-steel.com/Problems/DH32.html>
- <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=fa27ba8f8094415b97e48657bb44c6f0>
- <http://www.aasteel.com/ah-36-dh-36-eh-36-40.html>
- <http://diavazma.blogspot.gr/2012/11/dokimio.html>



