

PHOENIX

REGISTER OF SHIPPING

Ανάλυση υπολογισμού Αντοχής Πλαστικοποιημένων ξύλινων σκαφών (σύμφωνα με T.O.21)

Συνδιοργανωτές

«Σύλλογος Διπλωματούχων Ναυπηγών Μηχανικών Ελλάδας»
«ΦΟΙΝΙΞ ΝΗΟΓΝΩΜΩΝ Α.Ε.»

Εισηγητής:

Ναπολέων Θεοδωρόπουλος - Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός/
Αναπληρωτής Τεχνικός Διευθυντής/ Συντονιστής Τμήματος Εγκρίσεων
Σχεδίων/ Μελετών της «ΦΟΙΝΙΞ ΝΗΟΓΝΩΜΩΝ Α.Ε.»

Σκοπός

Ο σκοπός της παρούσας Αναλύσεως , είναι η διευκρίνιση του υπολογισμού της αντοχής των ξύλινων σκαφών που έχουν υποστεί εξωτερική πλαστικοποίηση της γάστρας.

Σχετικά

- Η Τ.Ο. -21
- To Mississippi State University, https://www.ae.msstate.edu/tupas/SA2/chA13.9_text.html
- Section II.3 Elastic Bending of NON-Homogeneous Beams
- To SHIP STRUCTURE COMMITTEE- SSC-403 Design Guide for Marine Applications of Composites -Chapter Five – Macromechanics- Applications of Composites Joints and Details

Εφαρμογή

Η Παρούσα Ανάλυση εφαρμόζεται σε όλα τα ξύλινα σκάφη στα οποία έχει πραγματοποιηθεί εξωτερική πλαστικοποίηση της γάστρας σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Τ.Ο. 21 του Οργανισμού «ΦΟΙΝΙΞ» Νηογνώμων Α.Ε.

Εισαγωγή

- Όπως περιγράφεται αναλυτικά στην Τ.Ο.21 η εφαρμογή επιστρώσεων ενισχυμένου πλαστικού στην εξωτερική πλευρά της γάστρας ξύλινων πλοίων πλην της στεγανοποίησης της γάστρας δημιουργεί και αύξηση της αντοχής του σκάφους.
- Το πως συμβαίνει αυτό, σε κάποιους συναδέλφους δεν είναι άμεσα αντιληπτό δεδομένου ότι η εξέταση της αντοχής των ξύλινων σκαφών βασίζεται σε εμπειρικές σχέσεις διαστάσεων (κλασικής μορφής σκάφη) ή εμπειρικών σχέσεων των κανονισμών των Νηογνωμόνων.
- Με βάση την γενική θεώρηση ότι στα ξύλινα σκάφη, στην αντοχή, καθοριστικός είναι ο ρόλος των εγκαρσίων νομέων προτείνεται η εξέταση σε αυτούς της αύξησης που προσδίδεται λόγω της εφαρμογής πλαστικοποίησης της γάστρας.
- Η προτεινόμενη μέθοδος αφορά στην σύγκριση της ροπής αντιστάσεως του Νομέα με το συνεργαζόμενο πέτσωμα της αρχικής καταστάσεως (πριν την πλαστικοποίηση) προς αυτή που προκύπτει στο ίδιο σύστημα νομέα και πετσώματος που έχει εφαρμοσθεί πλαστικοποίηση.
- Στην πράξη εξετάζεται η αντοχή σε κάμψη ενός φορέα αποτελούμενου από δύο υλικά, δηλαδή του ξύλου και της επιστρώσεως από ενισχυμένο πλαστικό τα οποία έχουν διαφορετικά μέτρα Ελαστικότητας.

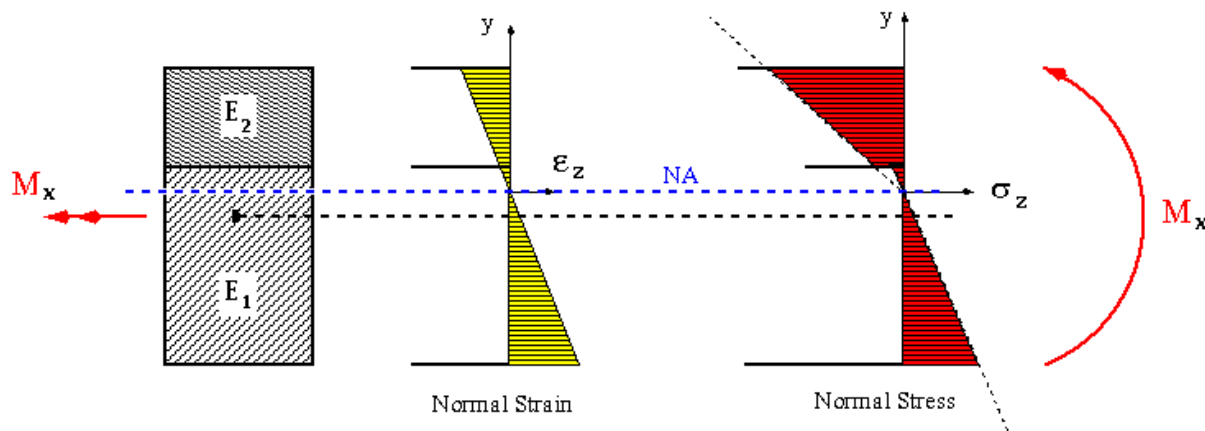
Περιγραφή της εξέτασης φορέα από δύο διαφορετικά υλικά σε κάμψη

Παρ όλο που υπάρχει πλούσια βιβλιογραφία για το θέμα, θεωρούμε ότι η δημοσιευμένη από το Mississippi State University, https://www.ae.msstate.edu/tupas/SA2/chA13.9_text.html - Section II.3 Elastic Bending of NON-Homogeneous Beams, είναι πολύ καλή για σύντομη τεκμηρίωση του θέματος

• Ουδέτερος άξονας της φόρτισης

Υπενθυμίζεται ότι στην καθαρή κάμψη η κανονική μεταβολή της τάσης είναι γραμμική με τιμή μηδέν στον ουδέτερο άξονα. Συνεπώς πριν αναφερθούμε στην σχέση μεταξύ τάσης και ροπής κάμψης, ας προσδιορίσουμε πρώτα τη θέση του ουδετέρου άξονα (NA). Ως γνωστόν σε συνθήκη ισορροπίας το άθροισμα των καθέτων στην επιφάνεια δυνάμεων μηδενίζεται και μαθηματικά, αυτό εκφράζεται ως

$$F_z = \int \sigma_z dA = 0$$



Θεωρώντας ένα τμήμα κατασκευασμένο από δύο διαφορετικά υλικά με μέτρα ελαστικότητας (συντελεστές Young) που προσδιορίζονται από τα E_1 και E_2 και με τάσεις κάτω από το όριο ελαστικότητας κάθε υλικού, η προηγούμενη εξίσωση αναλύεται ως:

$$F_z = \int_{-y_B}^{y_i} E_1 \epsilon_z dA + \int_{y_i}^{y_T} E_2 \epsilon_z dA = 0$$

Όπου y_B είναι η απόσταση από τον ουδέτερο άξονα (NA) στην κάτω επιφάνεια, y_i είναι η απόσταση από το NA έως την ενδιάμεση επιφάνεια επαφής του υλικού και y_T είναι η απόσταση από την επάνω επιφάνεια. Χρησιμοποιώντας τη γραμμική εξίσωση για τη διακύμανση παραμόρφωσης έχουμε:

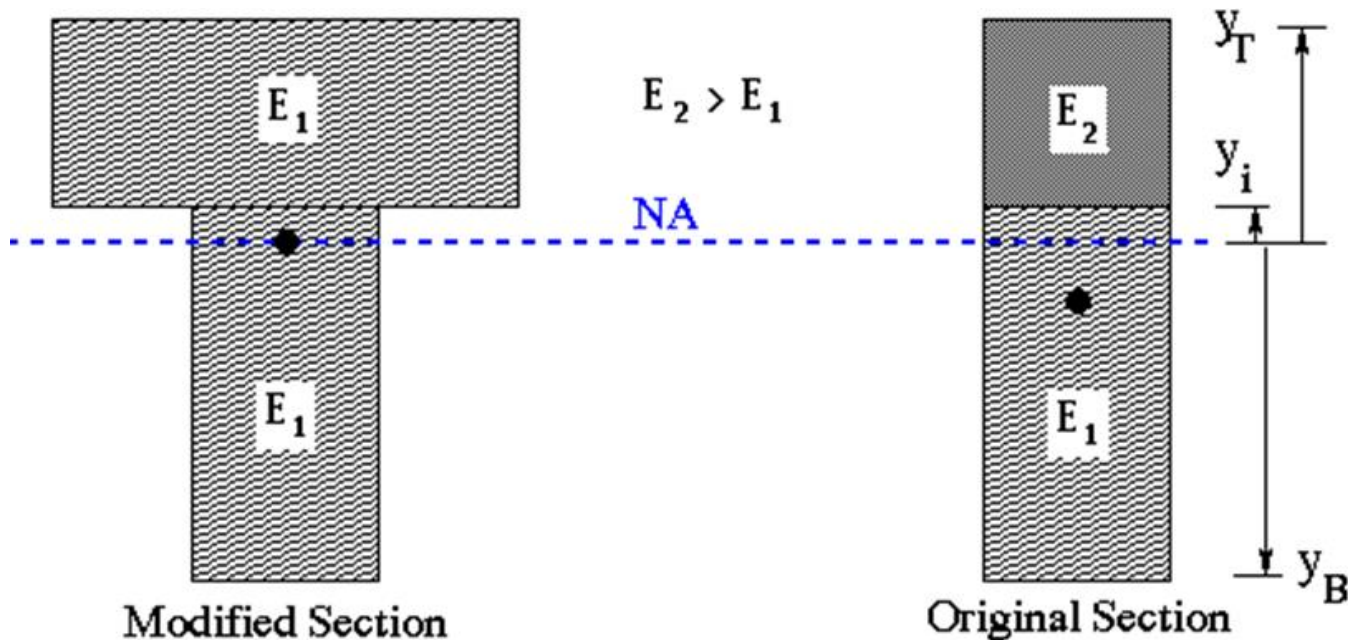
$$E_1 \int_{-y_B}^{y_i} \left(\frac{-y}{c} \epsilon_{max} \right) dA + E_2 \int_{y_i}^{y_T} \left(\frac{-y}{c} \epsilon_{max} \right) dA = 0$$

Εξάγοντας τους κοινούς όρους και ανάγοντας ως προς E_1 έχουμε:

$$E_1 \frac{\epsilon_{max}}{c} \left[\int_{-y_B}^{y_i} y dA + \frac{E_2}{E_1} \int_{y_i}^{y_T} y dA \right] = 0$$

Εξετάζοντας προσεκτικά την ως άνω εξίσωση διαπιστώνεται ότι ο όρος σε αγκύλες πρέπει να είναι ίσος με μηδέν. Ωστόσο, η αναλογία E_2 προς E_1 μπροστά από τον δεύτερο όρο μέσα στις αγκύλες δείχνει ότι ο ουδέτερος άξονας θα διέλθει από το κέντρο τροποποιημένου ομοιογενούς τμήματος, με το υλικό 2 να αντικαθίσταται με ένα ισοδύναμο υλικό 1 κατ' αναλογία E_2/E_1 .

Αυτό το γεγονός αποτυπώνεται στο σχήμα παρακάτω με την προϋπόθεση ότι $E_2 > E_1$.



Σημειώνεται ότι η αναγωγή των δύο μέτρων ελαστικότητας E_2/E_1 τροποποιεί μόνο το πλάτος του τμήματος επειδή το ύψος του διατηρείται το ίδιο. (Αυτή η συνθήκη θα είχε αντιστραφεί εάν εφαρμοζόταν η ροπή κάμψης γύρω από τον κατακόρυφο άξονα.)

- **Ροπή κάμψεως της φόρτισης**

Όσον αφορά την σχέση της ροπής κάμψεως αυτή προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$M_x = - \int y \sigma_z dA \rightarrow - \int y E \epsilon dA$$

Για την περίπτωση ενός τμήματος από δύο διαφορετικά υλικά, όπως φαίνεται παραπάνω, το ολοκλήρωμα χωρίζεται σε δύο μέρη, ένα για κάθε ελαστικό υλικό. (Παρατηρήστε ότι το y μετριέται από τον ουδέτερο άξονα.)

$$M_x = - \int_{-y_B}^{y_i} y E_1 \epsilon_z dA - \int_{y_i}^{y_T} y E_2 \epsilon_z dA$$

Χρησιμοποιώντας τη γραμμική κατανομή της παραμόρφωσης λαμβάνουμε

$$M_x = -E_1 \int_{-y_B}^{y_i} y \left(\frac{-y}{c} \epsilon_{max} \right) dA - E_2 \int_{y_i}^{y_T} y \left(\frac{-y}{c} \epsilon_{max} \right) dA$$

Εξάγοντας τους κοινούς όρους και ανάγοντας ως προς E_1 έχουμε:

$$M_x = -E_1 \frac{\epsilon_{max}}{c} \left[- \int_{-y_B}^{y_i} y^2 dA - \frac{E_2}{E_1} \int_{y_i}^{y_T} y^2 dA \right]$$

- **Ροπή αδρανείας του φορέα**

Οι όροι μέσα στις αγκύλες της προηγούμενης εξισώσεως αντιπροσωπεύουν τη ροπή αδράνειας του τροποποιημένου ομογενούς τμήματος ως προς τον ουδέτερο άξονα και μπορούν να εκφραστούν ως:

$$I_{mod} = I_1 + \frac{E_2}{E_1} I_2$$

- **Αναπτυσσόμενες καμπτικές τάσεις στο φορέα**

Η αντικατάσταση της τροποποιημένης ροπής αδρανείας της ως άνω εξισώσεως η επίλυση της τάσης δίνει

$$\sigma_{z_1} = - \frac{M}{I_{mod}} y_1$$

που αντιστοιχεί στον υπολογισμό της τάσης κάμψης μόνο για το τμήμα που αποτελείται από υλικό 1.

Ενώ για το τμήμα που αποτελείται από το υλικό 2, θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί με τον λόγο των συντελεστών του Young των δύο υλικών ως:

$$\sigma_{z_2} = - \frac{E_2}{E_1} \frac{M}{I_{mod}} y_2$$

Η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω είναι γνωστή ως Μέθοδος Τροποποιημένης Τομής και χρησιμοποιείται στην ανάλυση ελαστικών μη ομοιογενών τμημάτων δοκού στην κάμψη.

- **Αναπτυσσόμενες καμπτικές τάσεις στο φορέα**

Απόσπασμα από την SHIP STRUCTURE COMMITTEE- SSC-403 Design Guide for Marine Applications of Composites -Chapter Five – Macromechanics- Applications of Composites Joints and Details.

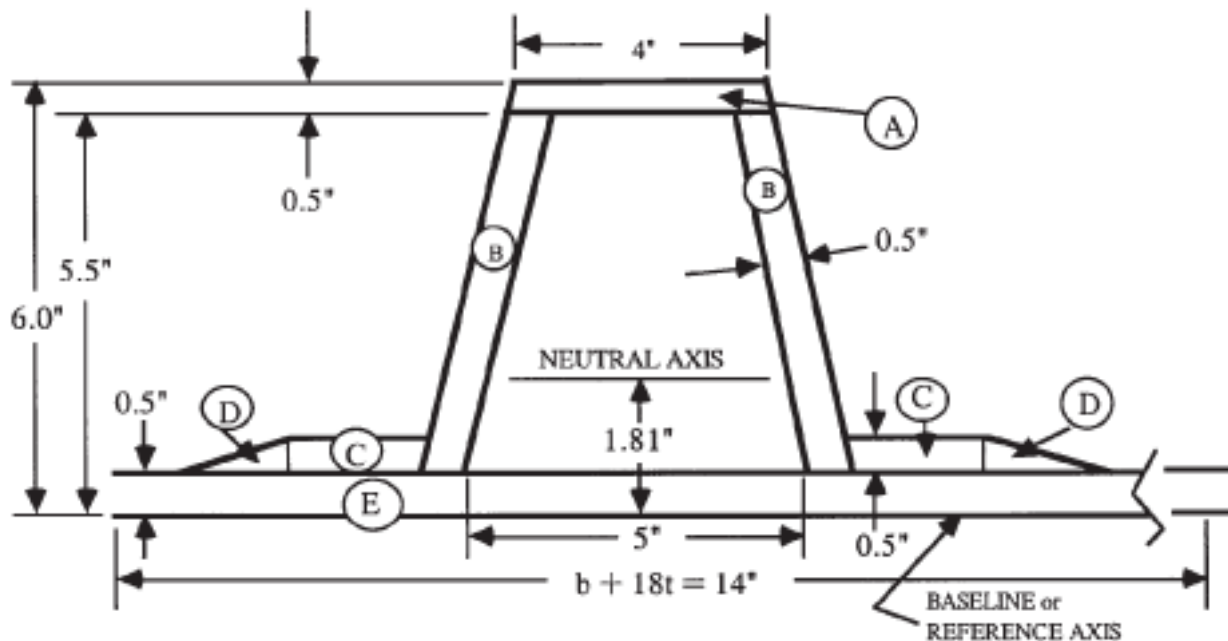


Figure 5-46 Stringer Geometry for Sandwich Construction [Al Horsmon, USCG NVIC No. 8-87]

Table 5-3 Example Calculation for Single Skin Stiffener

Item	b	h	A = b x h	d	Ad	Ad ²	i _o
A	4.00	0.50	2.00	5.75	11.50	66.13	0.04
B	0.50	5.10	2.55	3.00	7.65	23.95	5.31
B	0.50	5.10	2.55	3.00	7.65	23.95	5.31
C	2.00	0.50	1.00	0.75	0.75	0.56	0.02
C	2.00	0.50	1.00	0.75	0.75	0.56	0.02
D	3.00	0.50	0.75	0.67	0.50	0.33	0.01
E	14.00	0.50	7.00	0.25	1.75	0.44	0.15
Totals:			16.85		30.55	115.92	10.86

$$d_{NA} = \frac{\sum Ad}{\sum A} = \frac{30.55}{16.85} = 1.81 \text{ inches} \quad (5-55)$$

$$I_{NA} = \sum i_o + \sum Ad^2 - [Ad^2] = 10.86 + 115.92 - [16.85 \times (1.81)^2] = 71.58 \quad (5-56)$$

$$SM_{top} = \frac{I}{d_{NA \text{ top}}} = \frac{71.58}{4.19} = 17.08 \text{ in}^3 \quad (5-57)$$

$$SM_{bottom} = \frac{I}{d_{NA \text{ bottom}}} = \frac{71.58}{1.81} = 39.55 \text{ in}^3 \quad (5-58)$$

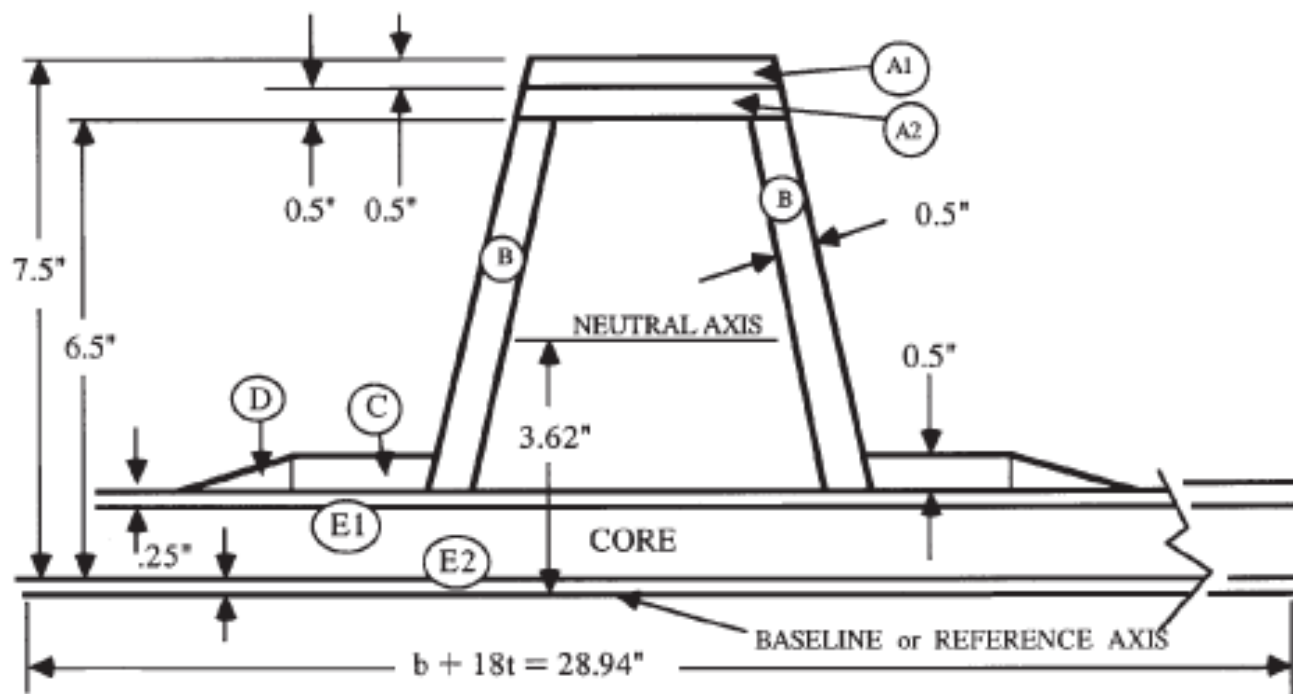


Figure 5-47 Stringer Geometry including High-Strength Reinforcement (3" wide layer of Kevlar® in the top) [Al Horsmon, USCG NVIC No. 8-87]

Table 5-4 High Strength Stiffener with Sandwich Side Shell

Item	b	h	A = b x h	d	Ad	Ad ²	i _o
A1	3.70	0.50	3.29*	7.25	23.85	172.93	0.069
A2	3.80	0.50	1.90	6.75	12.83	86.57	0.040
B	0.50	5.00	2.50	4.00	10.00	40.00	5.208
B	0.50	5.00	2.50	4.00	10.00	40.00	5.208
C	2.00	0.50	1.00	1.75	1.75	3.06	0.021
C	2.00	0.50	1.00	1.75	0.75	0.56	0.021
D	3.00	0.50	0.75	0.67	0.50	0.33	0.01
E1	28.94	0.25	7.23	1.37	9.95	13.68	0.038
E2	28.94	0.25	7.23	0.12	0.90	0.11	0.038
Totals:			27.40		70.53	357.24	10.65

$$d_{NA} = \frac{\sum Ad}{\sum A} = \frac{70.53}{27.40} = 2.57 \text{ inches} \quad (5-59)$$

$$I_{NA} = \sum i_o + \sum Ad^2 - [Ad^2] = 10.65 + 357.24 - [27.40 \times (2.57)^2] = 186.92 \quad (5-60)$$

$$SM_{top} = \frac{I}{d_{NA \text{ top}}} = \frac{186.92}{4.93} = 37.9 \text{ in}^3 \quad (5-61)$$

$$SM_{bottom} = \frac{I}{d_{NA \text{ bottom}}} = \frac{186.92}{2.57} = 72.73 \text{ in}^3 \quad (5-62)$$

SYMBOLS:

b = width or horizontal dimension

h = height or vertical dimension

d = height to center of A from reference axis

NA = neutral axis

i_o = item moment of inertia = M^2/A_2

d_{NA} = distance from reference axis to real NA

I_{NA} = moment of inertia of stiffener and plate about the real neutral axis

The assumed neutral axis is at the outer shell so all distances are positive.

Note how the stiffened plate is divided into discrete areas and lettered.

Items B and C have the same effect on section properties and are counted twice.

Some simplifications were made for the vertical legs of the stiffener, item B .
The item i_o was calculated using the equation for the I of an inclined rectangle.
Considering the legs as vertical members would be a further simplification.

Item D is combined from both sides of the required bonding angle taper.

$$\text{Ratio of elastic moduli } E = \frac{E_{\text{Kevlar}^*}}{E_{\text{E-glass}}} = \frac{9.8 \text{ msi}}{5.5 \text{ msi}}$$

- * Effective area of Kevlar® compared to the E-glass = $3.7 \times 0.5 \times 1.78 = 3.29$

The overall required section modulus for this example must also reflect the mixed materials calculated as a modifier to the required section modulus:

$$SM_{Kevlar^{\circledast}} = SM_{E-glass} \times \frac{E_{Kevlar^{\circledast}}}{E_{E-glass}} \times \frac{Ultimate Strength_{E-glass}}{Ultimate Strength_{Kevlar^{\circledast}}}$$

$$\frac{E_{Kevlar^{\circledast}}}{E_{E-glass}} \times \frac{Ultimate Strength_{E-glass}}{Ultimate Strength_{Kevlar^{\circledast}}} = \frac{9.8 \text{ msi}}{5.5 \text{ msi}} \times \frac{110 \text{ ksi}}{196 \text{ ksi}} = 1.0$$

Reinforcing fibers of different strengths and different moduli can be limited in the amount of strength that the fibers can develop by the maximum elongation tolerated by the resin and the strain to failure of the surrounding laminate. Therefore, the strength of the overall laminate should be analyzed, and for marginal safety factor designs or arrangements meeting the minimum of a rule, tests of a sample laminate should be conducted to prove the integrity of the design. In this example, the required section modulus was unchanged but the credit for the actual section modulus to meet the rule was significant.

- Προς διευκόλυνση των συναδέλφων το τμήμα εγκρίσεως Μελετών & Σχεδίων του Οργανισμού έχει εκπονήσει υπόδειγμα εφαρμογής υπολογισμών αντίστασης εγκαρσίου νομέα, σε λογιστικό φύλλο EXCEL το οποίο διατίθεται ηλεκτρονικά σε όποιον το ζητήσει.

Υπολογισμός Εγκάρσιας Αντοχής

Ξύλινο Πλοίο με πλαστικοποιημένη γάστρα

Στοιχεία Ξυλείας

Είδος Ξυλείας:

Πεύκη

Μέτρο Ελαστικότητας Ξύλου:

7.66 Gra

Διαστάσεις

Νομέως

Πλάτος: 16 cm

Υψος: 12 cm

Πετσώματος:

Πλάτος: 35 cm

Πάχος: 5 cm

Στοιχεία Πλαστικοποίησης

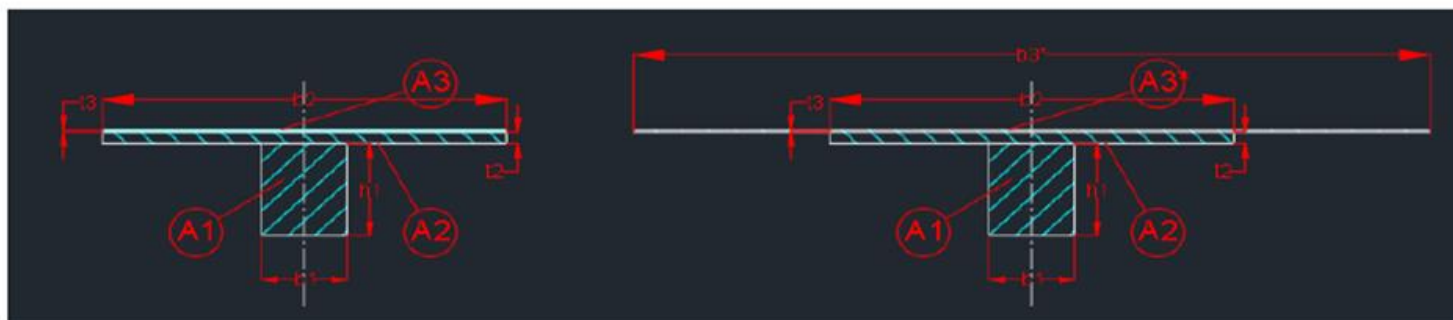
Είδος επίστρωσης: Πολυεστέρας με υαλοϋφασμα

Στρώση	Τύπος υφάσματος	CSM grms/m ²	WR grms/m ²	Σύνολο grms/m ²	Πάχος (mm)
1	CSM	450	0	450	1.13
2	CSM	450	0	450	1.125
3	CP	300	600	900	1.47
4	CSM	450	0	450	1.13
5	CP	300	600	900	1.47
6	CSM	450	0	450	1.125
7	CSM	450	0	450	1.125
8					
9					
10					
Σύνολα:		2850	1200	4050	8.57

Πάχος επιστρώσεως: 0.86 cm

Μέτρο ελαστικότητας επιστρώσεως: 9.66 Gra

ΠΡΟΣΟΧΗ!!! ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΟΝΟ ΣΤΑ ΧΡΩΜΑΤΙΣΤΑ ΚΕΛΙΑ



Original Frame

Side frame

A1

b1 = 16.00 cm

h1 = 12.00 cm

Material: Wood

Elasticity modulus E= 7.66 Gpa

Side plank

A2

b2 = 35.00 cm

t2 = 5.00 cm

Material: Wood

Elasticity modulus E= 7.66 Gpa

			Section Modulus				
	width	height	AREA	KG	1st Mom.	2nd Mom.	Inertia
	[1]	[2]	[3]=[1]x[2]	[4]	[5]=[3]x[4]	[6]=[4]x[5]	Io
	cm	cm	cm ²	cm	cm ³	cm ⁴	cm ⁴
A1	16.00	12.00	192.00	6.00	1152.00	6912.00	2304.00
A2	35.00	5.00	175.00	14.50	2537.50	36793.75	364.58
SUM=	51.00	17.00	367.00		3689.50	43705.75	2668.58
	e1=	10.05	e2= 17.00	-e1= 6.95		I=	46374.33

$$I_o = I - e1^2 \cdot A = 9283.297 \text{ cm}^4$$

$$SM1 = I_o / e1 = 923.4233 \text{ cm}^3$$

$$SM2 = I_o / e2 = 1336.329 \text{ cm}^3$$

Frame with laminated GRP hull

Side frame

A1

b1 = 16.00 cm

h1 = 12.00 cm

Material: Wood

Elasticity modulus E= 7.66 Gpa

Tensile strength TS= 52 Mpa

Side plank

A2

b2 = 35.00 cm

t1 = 5.00 cm

Material: Wood

Elasticity modulus E= 7.66 Gpa

Tensile strength TS= 52 Mpa

Side plank with Laminated GRP

A3

b3 = 35.00 cm

t3 = 0.86 cm

Material: GRP

Elasticity modulus E= 9.66

Tensile strength TS= 138 Mpa

Ratio of Elastic moduli=E3/E2 = 1.2611

			Section Modulus				
	width cm [1]	height cm [2]	AREA cm ² [3]=[1]x[2]	KG cm [4]	1st Mom. cm ³ [5]=[3]x[4]	2nd Mom. cm ⁴ [6]=[4]x[5]	Inertia I _o cm ⁴
A1	16.00	12.00	192.00	6.00	1152.00	6912.00	2304.00
A2	35.00	5.00	175.00	14.50	2537.50	36793.75	364.58
A3*	44.14	0.86	37.80	17.43	658.87	11482.89	2.31
SUM=	95.14	17.86	404.80		4348.37	55188.64	2670.89
	e1=	10.74	e2= 17.9	-e1= 7.11		I=	57859.54

$$I_o = I - e_1^2 \cdot A = 11149.85 \text{ cm}^4$$

$$SM1 = I_o / e_1 = 1037.978 \text{ cm}^3$$

$$SM2 = I_o / e_2 = 1567.177 \text{ cm}^3$$

$$\text{Increase of Strength} = 1567.2 / 1336.3 = 1.17 \text{ or } 17\%$$

Table 1-1 Overview of Shipbuilding Construction Materials

Material		Density		Tensile Strength		Tensile Modulus		Ultimate Elongation %
		lbs/ft ³	gm/cm ³	psix10 ³	Mpa	psix10 ⁶	Gpa	
Resins	Orthophthalic Polyester	76.7	1.23	7	48.3	0.59	4.07	1
	Isophthalic Polyester	75.5	1.21	10.3	71.1	0.57	3.90	2
	Vinyl Ester	69.9	1.12	11-12	76-83	0.49	3.38	4-5
	Epoxy (Gougen Proset)	74.9	1.20	7-11	48-76	0.53	3.66	5-6
	Phenolic	71.8	1.15	5.1	35.2	0.53	3.66	2
Fibres	E-Glass (24 oz WR)	162.4	2.60	500	3450	10.5	72.45	4.8
	S- Glass	155.5	2.49	665	4589	12.6	86.94	5.7
	Kevlar 49	90	1.44	525	3623	18	124.2	2.9
	Carbon-PAN	109.7	1.76	350-700	2415-4830	33-57	227-393	0.38-2.0
Cores	End Grain Balsa	7	0.11	1.320	9.11	0.370	2.55	n/a
	Linear PVC (Airex R62.80)	5-6	.08-.1	0.200	1.38	0.0092	0.06	30
	Cross-Linked PVC (Diab H-100)	6	0.10	0.450	3.11	0.0174	0.12	n/a
	Honeycomb (Nomex HRH-78)	6	0.10	n/a	n/a	0.0600	0.41	n/a
	Honeycomb (Nidaplast H8PP)	4.8	0.08	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Laminates	Solid Glass/Polyester hand lay-up	<u>96</u>	<u>1.54</u>	<u>20</u>	<u>138</u>	<u>1.4</u>	<u>9.66</u>	<u>n/a</u>
	Glass/Polyester Balsa Sandwich vacuum assist	24	0.38	6	41	0.4	2.76	n/a
	Glass/Vinyl Ester PVC Sandwich SCRIMP	18	0.29	6	41	0.4	2.76	n/a
	Solid Carbon/Epoxy filament wound	97	1.55	88	607	8.7	60	n/a
	Carbon/Epoxy Nomex Sandwich prepreg	9	0.14	9	62	0.5	3.45	n/a
Metals	ABS Grd A (ASTM 131)	490.7	7.86	58	400	29.6	204	21
	ABS Grd AH (ASTM A242)	490.7	7.86	71	490	29.6	204	19
	Aluminum (6061-T6)	169.3	2.71	45	310	10.0	69	10
	Aluminum (5088-H34)	165.9	2.66	44	304	10.0	69	9
Wood	Douglas Fir	24.4	0.39	13.1	90	1.95	13.46	n/a
	White Oak	39.3	0.63	14.7	101	1.78	12.28	n/a
	Western Red Cedar	21.2	0.34	7.5	52	1.11	7.66	n/a
	Sitka Spruce	21.2	0.34	13.0	90	1.57	10.83	n/a
Note: The values used in this table are for illustration only and should not be used for design purposes. In general, strength is defined as yield strength and modulus will refer to the material's initial modulus. A core thickness of 1" with appropriate skins was assumed for the sandwich laminates listed.								

Ευχαριστούμε για την προσοχή σας!