



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Δομοστατικής Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“Σχεδιασμός Κτιρίου με Φέροντα Οργανισμό από
Ινοπλισμένα Πολυμερή (FRP)”**

Μελέτης Χ. Ανδρέας



Επιβλέπων: Ιωάννης Ραυτογιάννης
Αθήνα, Νοέμβριος 2016
ΕΜΚ ΔΕ 2016 54

Μελέτης Χ. Ανδρέας (2016)
Σχεδιασμός κτιρίου με φέροντα οργανισμό από Ινοπλισμένα Πολυμερή (FRP)
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2016 54
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Meletis C. Andreas (2016)
Design of a structure constructed with FRP pultruded elements
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2016 54
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

ΠΕΡΙΛΗΨΗ:

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την μελέτη και τον σχεδιασμό ενός διώροφου κτιρίου, όπου ο φέρων οργανισμός είναι κατασκευασμένος από σύνθετα υλικά (FRP). Η ανάλυση της κατασκευής υλοποιήθηκε σύμφωνα με τις οδηγίες των Eurocomp Design Code and Handbook και των ASCE Structural Plastics Design Manual, οι οποίες έχουν διατυπωθεί μετά από λεπτομερή μελέτη της συμπεριφοράς των FRP.

Στην ανάλυση συμπεριλήφθηκαν όλες οι δράσεις που μπορούν να καταπονούν μια κατασκευή, αλλά και ειδικότερα μία κατασκευή από σύνθετα υλικά. Οι κατασκευές από σύνθετα υλικά είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε πλευρικά φορτία όπως ο άνεμος λόγω και του μικρού τους βάρους. Επομένως, λήφθηκαν υπόψιν οι δυσμενέστεροι συνδυασμοί φορτίσεων και για συγκεκριμένους συντελεστές ασφαλείας ελέγχθηκαν οι υπολογισμένες διατομές.

Τέλος, οι δοκοί, τα υποστυλώματα και οι κατακόρυφοι συνδέσμοι δυσκαμψίας διαστασιολογήθηκαν χρησιμοποιώντας τις πρότυπες διατομές της εταιρείας Creative Pultrusions, η οποία πρωτοπορεί στον τομέα των σύνθετων υλικών επί σειρά ετών.

ABSTRACT:

The subject of this thesis is the study and the design of two storey building which is consisted of pultruded Fiber Reinforcement Polymers (FRP). The structural analysis is based on the instructions and guidelines of the Eurocomp Design Code and Handbook and the ASCE Structural Plastics Design Manual, which has been established after thorough research in the fields of composite's materials.

In the structural analysis, the whole kind of actions was taken into account that can be imposed on a common structure as well as in a structure of pultruded FRP materials. The FRP pultruded structures are really sensitive to lateral loads such as the wind, due to their own light weight. Consequently, the most unfavorable load cases are represented and the sections of the beams and the columns are dimensioned with the advised safety factors.

In the end, the beams, the columns and the bracing system were calculated using the conventional FRP pultruded sections provided by the company Creative Pultrusions which is pioneering in the field of composite materials.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Αναπληρωτή Καθηγητή Ιωάννη Ραυτογιάννη για την επίβλεψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης οφείλω ένα μεγάλο «Ευχαριστώ» στην οικογένεια μου που στάθηκε αρωγός σε κάθε προσπάθεια μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1.Εισαγωγή.....	7
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο	
2.1. Χαρακτηριστικά των Ινοπλισμένων Πολυμερών	
2.1.1 Η σύσταση των Ινοπλισμένων Πολυμερών	10
2.1.2 Ίνες οπλισμού	10
2.1.3 Η μήτρα από Πολυμερές	14
2.1.4 Φίλερ και πρόσθετα.....	16
2.1.5 Διαδικασίες παραγωγής	16
2.1.6 Πλεονεκτήματα Ινοπλισμένων Πολυμερών.....	19
2.2. Pultrusion profiles	
2.2.1 Μέλη FRP κατασκευασμένα με τη μέθοδο παραγωγής της έλξης (Pultrusion Process).....	20
2.2.2 Συμβολή της διάτμησης στις διατομές από FRP.....	24
2.2.3 Οδηγίες για τον σχεδιασμό κατασκευών από «pultruded» προφίλ.....	26
3.Δράσεις	
3.1.1 Εισαγωγή	28
3.2. Κατακόρυφα φορτία βαρύτητας	
3.2.1 Μόνιμα φορτία βαρύτητας.....	29
3.2.2 Κινητά φορτία ορόφων	29
3.3 Φορτίο χιονιού.....	30
3.4Δράσεις ανλεμου.....	31
4.Ανάλυση του υπό μελέτη κτιρίου	
4.1 Περιγραφή της γεωμετρίας του κτιρίου.....	39
4.2 Υλικά κατασκευής.....	41
4.3 Τα φορτία στην κατασκευή.....	43
4.4 Συνδυασμοί φορτίσεων.....	49
5. Έλεγχος και διαστασιολόγηση μελών του φορέα	
5.1 Εισαγωγή.....	51
5.2. Έλεγχος δευτερευουσών δοκών.....	52
5.2.2 Διαστασιολόγηση σε ΟΚΛ.....	54
5.2.3 Έλεγχος σε ΟΚΑ.....	61
5.3.1 Έλεγχος κυρίων δοκών.....	61
5.3.2 Διαστασιολόγηση σε ΟΚΛ.....	64
5.3.3 Έλεγχος σε ΟΚΑ.....	70
5.4. 1 Έλεγχος των υποστλωμάτων.....	71
5.5.1 Έλεγχος κατακόρυφων συνδέσμων δυσκαμψίας	80
5.6.1 Έλεγχος της πλάκας δαπέδου.....	84
6. Αποτελέσματα – Συμπεράσματα.....	88

Εισαγωγή

Από καταβολής του κόσμου, η αναζήτηση ανθεκτικών υλικών συγκριτικά με τα υπάρχοντα καθίσταται όλο και πιο επιτακτική. Η συνεχής έρευνα και μελέτη για εναλλακτικά δομικά υλικά, πέραν του σκυροδέματος και του δομικού χάλυβα, οδήγησε στην δημιουργία των σύνθετων υλικών.

Ως σύνθετα αναγνωρίζονται εκείνα τα υλικά, τα οποία συντίθενται από επιμέρους υλικά με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, ενώ και το ίδιο το σύνθετο υλικό έχει επίσης σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών του. Για να καταταχθεί ένα υλικό στην κατηγορία των σύνθετων, θα ακολουθείται ο εξής κανόνας: Το υλικό πρέπει να προκύπτει ως συνδυασμός συστατικών μερών, στα οποία οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη αυτά να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου (τουλάχιστον 5πλάσιες) και η κατ' όγκο περιεκτικότητα του ενός να μην είναι πολύ μικρή ($> 10\%$).

Σύμφωνα με τον Agarwal, σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μμακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους. Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- Στρωματικά σύνθετα (laminated composites): Με επάλληλες στρώσεις υλικών.
- Κοκκώδη σύνθετα (particulate composites): Με ενίσχυση σωματιδίων διασκορπισμένων στο υλικό της μμήτρας.
- Ινώδη σύνθετα (fibrous composites): Με ενίσχυση ινών εμποτισμένων σε υλικό μμήτρας. Πχ ινοπλισμένα πολυμερή

Τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μμήτρας. Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε:

- Μονοδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
- Πολυδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία, οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις.

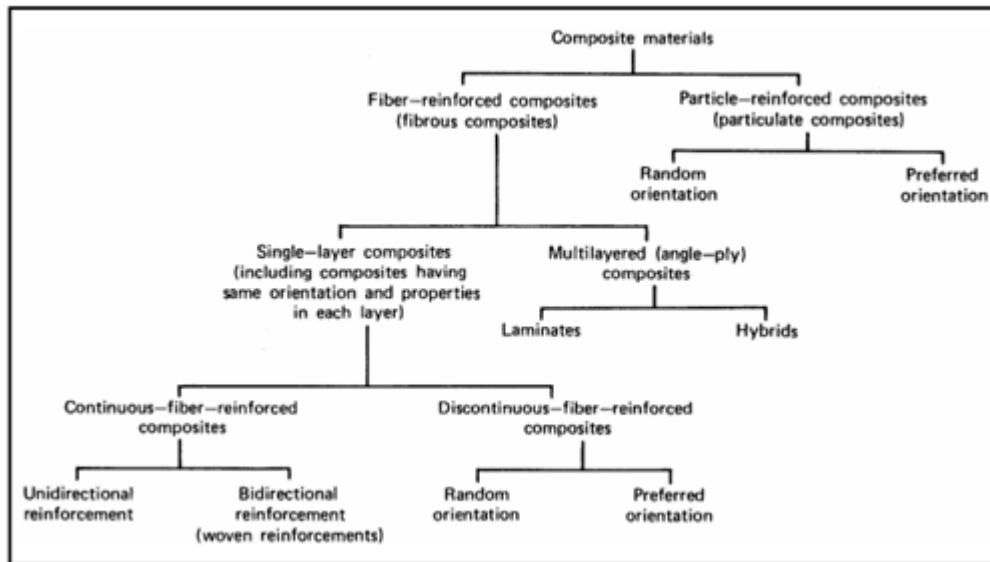
Η ιδιότητα αυτή οδηγεί άμεσα σε ταξινόμηση των πολυδιευθυντικών συνθέτων στις ακόλουθες υπό-ομάδες:

- Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης.
- Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης.
- Σύνθετα με ίνες σε τρισορθογώνια ύφανση.

Μία επιπλέον διάκριση των ινωδών συνθέτων στηρίζεται στο λόγο μήκους προς διάμετρο (A/d) των ινών, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως:

- Συνεχείς ή μεγάλου μήκους ίνες (continuous fibers), όταν είναι $A / d \geq 100$.
- Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers), όταν είναι $A / d < 100$.
- Νησίδια ή τριχωτές (whiskers): Με $d < 1 \mu\text{m}$ και $A \approx 100 \mu\text{m}$ (πρόκειται για λεπτούς μονοκρυστάλλους κεραμικού υλικού).

Με βάση όσα έχουν ήδη αναφερθεί για τις κατηγορίες των συνθέτων υλικών, έχει καθιερωθεί η ταξινόμησή τους, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 1. 1. Ταξινόμηση σύνθετων υλικών FRP

Ιστορική Αναδρομή

Καταρχάς, μέσω της χρονικής αναδρομής εντοπίζεται η σημαντικότητα της χρήσης των ινοπλισμένων πολυμερών στην γεφυροποιία, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην κατασκευή πλοίων, σε σωλήνες, δεξαμενές και ρακέτες τένις. Επιπλέον, η χρήση τους έχει συμβάλει με τρόπο εναλλακτικό και καινοτομικό στις βιομηχανίες υψηλής τεχνολογίας, όπως η αεροναυπηγική και η τεχνολογία του διαστήματος.

Πιο αναλυτικά, ο συνδυασμός δύο υλικών που δρουν μαζί σαν ένα σύνθετο υλικό ανακαλύφθηκε χιλιάδες χρόνια πριν. Το πρώτο γνωστό σύνθετο υλικό είναι ο συνδυασμός άχυρου και πηλού για την παρασκευή τούβλων από τους Αιγύπτιους και τους Κινέζους και στη συνέχεια οι Αιγύπτιοι ήταν οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν κοντραπλακέ το 1500 π.Χ.

Η εποχή του πλαστικού ξεκίνησε το 1868 όταν ο John W. Cpi εφεύρε το πρώτο συνθετικό υλικό, τη ζελατίνη. Μετά το 1900, ανακαλύφθηκαν "Duroplast" ή "Bakelite".

Η παραγωγή και ανάπτυξη των ινοπλισμένων πολυμερών αυξήθηκε ραγδαία μετά το Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, το 1940, όταν χρησιμοποιήθηκαν οι θόλοι για radar από GFRP. Κυρίως λόγω της υψηλής τους αντοχής και ανθεκτικότητας σε

συνδυασμό με το μικρό τους ειδικό βάρος άρχισαν να χρησιμοποιούνται και στην κατασκευή αεροσκαφών και κατασκευάστηκε το πρώτο κέλυφος αεροπλάνου από GFRP.

Έτσι λοιπόν η πρόοδος της αεροναυπηγικής στα πλαίσια του αμυντικού εξοπλισμού κατά τη διάρκεια του ψυχρού πολέμου έδωσαν ώθηση στην τεχνολογία των FRP. Παράλληλα η γοργά αναπτυσσόμενη οικονομία των Η.Π.Α. αναζητούσε οικονομικές μεθόδους μαζικής παραγωγής προϊόντων προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες της αγοράς και η τεχνολογία της εξέλασης αποτελούσε μια αρκετά αποτελεσματική λύση. Έτσι διευρύνθηκε η χρήση των σύνθετων υλικών.

Μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο τα FRP μπήκαν και στην αγορά πέρα από την πολεμικά βιομηχανία με πρώτο σημαντικό γεγονός την κατασκευή του Chevrolet Corvette το 1953. Έπειτα από έναν αιώνα έρευνας οι μηχανικοί έχουν την τάση να διαλέγουν τα ινοπλισμένα πολυμερή σε σχέση με τα παραδοσιακά υλικά όπως το οπλισμένο σκυρόδεμα, ο χάλυβας ή έναν συνδυασμό αυτών των δύο.

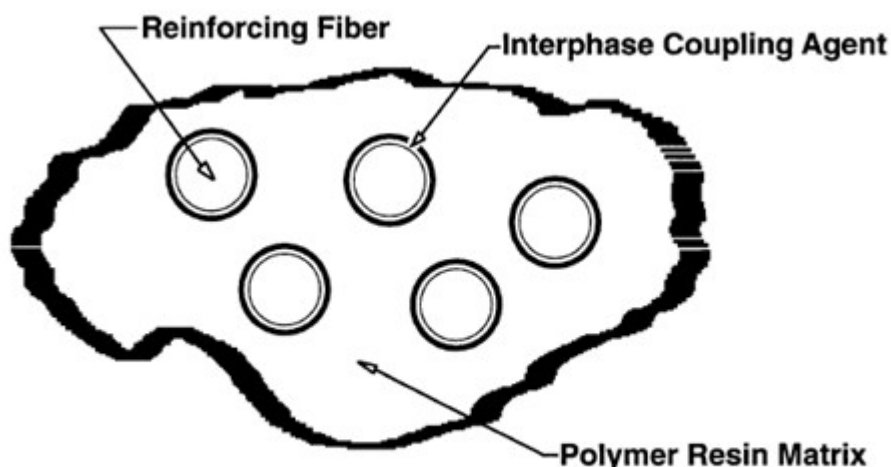
Σήμερα, κυρίως βιομηχανίες υψηλής τεχνολογίας καινοτομούν στον τομέα των FRP όπως η αεροναυπηγική η τεχνολογία του διαστήματος

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1. Χαρακτηριστικά των Ινοπλισμένων Πολυμερών

2.1.1 Η σύσταση των Ινοπλισμένων πολυμερών

Τα ινοπλισμένα πολυμερή είναι ένα σχετικά νέο υλικό ικανό να ανταγωνιστεί τα παραδοσιακά δομικά υλικά όπως ο χάλυβας, το σκυρόδεμα, το ξύλο, πέτρα. Τα ινοπλισμένα πολυμερή αποτελούνται από δυο κύρια υλικά: από μια δέσμη ινών υψηλής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας συγκολλημένες σε μια σκληρυμένη μήτρα ρητίνης. Οι ίνες λειτουργούν ως οπλισμός για την παραλαβή των φορτίων (όπως ο χάλυβας στο οπλισμένο σκυρόδεμα) ενώ η μήτρα ρητίνης προσδίδει συνοχή στο σύνθετο υλικό, μεταβιβάζει τα φορτία στις ίνες και παράλληλα τις προστατεύει από την επίδραση του περιβάλλοντος. Η μήτρα ρητίνης είναι υλικό πολυμερούς φύσεως ενώ ως ίνες χρησιμοποιούνται κυρίως ίνες γυαλιού, αραμιδίου και άνθρακα. την ενίσχυση και τη μήτρα, η οποία συνδέει την ενίσχυση σε ένα συμπαγές σύνολο .



Σχ. 2.1. Σύσταση των Ινοπλισμένων Πολυμερών

2.1.2. Οι ίνες οπλισμού

Το άλλο σημαντικό κομμάτι των FRP είναι οι ίνες οπλισμού. Υπάρχει ένας αριθμός διαφορετικών τύπων οπλισμού που διαφέρουν κυρίως στην αντοχή τους, μέτρο ελαστικότητας και επιμήκυνσης τους. Όλα τα είδη οπλισμού μπορούν να εφαρμοστούν στο FRP σε διάφορες υφάνσεις , νήματα ή πλέγμα. Συνήθως χωρίζονται σε ανόργανες ίνες, οργανικές ίνες, μεταλλικές ίνες, φυσικές ίνες. Οι οργανικές και ανόργανες ίνες συνήθως αναφέρονται ως συνθετικές, και είναι συνήθως προτιμώμενες στις κατασκευές λόγω της δυσκαμψίας και ανθεκτικότητας τους. Εκτός από τις ίνες άνθρακα, όλες οι συνθετικές ίνες παράγονται από συμπαγή υλικά.


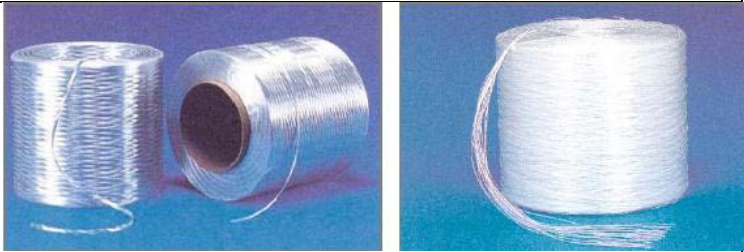
Οι ίνες στα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται κυρίως για να ενισχύσουν τη μήτρα μεταφέροντας την τάση από ένα εφαρμοζόμενο φορτίο από την πιο αδύναμη μήτρα στην πολύ δυνατότερη ίνα.

Για ένα ανθεκτικό ενισχυμένο πολυμερές υπό τάση, η επιμήκυνση της ίνας πρέπει να είναι μικρότερη και η αντοχή της πολύ μεγαλύτερη από αυτή της μήτρας. Η μεταφορά τάσης κατά μήκος της διεπιφάνειας ίνας- μήτρας επιτυγχάνεται με τη χρήση συνδετικών υλικών ή ειδικών μέσων σύζευξης. Η διάμετρος της ίνας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην μεγιστοποίηση της μεταφοράς τάσης. Μικρότερες διαμέτροι δίνουν μεγαλύτερη επιφάνεια ίνας ανά μονάδα βάρους ώστε βοηθούν τη μεταφορά τάσης.

Οι ίνες αποτελούν τον ‘οπλισμό’ του σύνθετου υλικού frp με κατ’ όγκο αναλογία που ποικίλει μεταξύ 30-70%. Κύρια λειτουργία τους είναι η παραλαβή των φορτίων. Γενικά οι ίνες είναι επιθυμητό να έχουν τις εξής ιδιότητες:

- Υψηλή εφελκυστική αντοχή και μικρή διακύμανση αυτής της τιμής μεταξύ των ξεχωριστών ινών.
- Μικρή διακύμανση της διατομής και της επιφάνειάς μεταξύ των ξεχωριστών ινών
- Σκληρότητα, ανθεκτικότητα.
- Κατά το δυνατόν σταθερότητα των χαρακτηριστικών τους κατά την επεξεργασία τους για την παραγωγή του σύνθετου υλικού.
- Δυνατότητα παραγωγής τους στην επιθυμητή μορφή και με τις επιθυμητές ιδιότητες.
- Αποδεκτό κόστος

Οι πιο συνήθεις ίνες σήμερα είναι οι ίνες γυαλιού, οι ίνες άνθρακα, οι ίνες αραμιδίου και οι φυσικές ίνες.

Ίνες αραμιδίου	
Ίνες γυαλιού	
Ίνες άνθρακα	

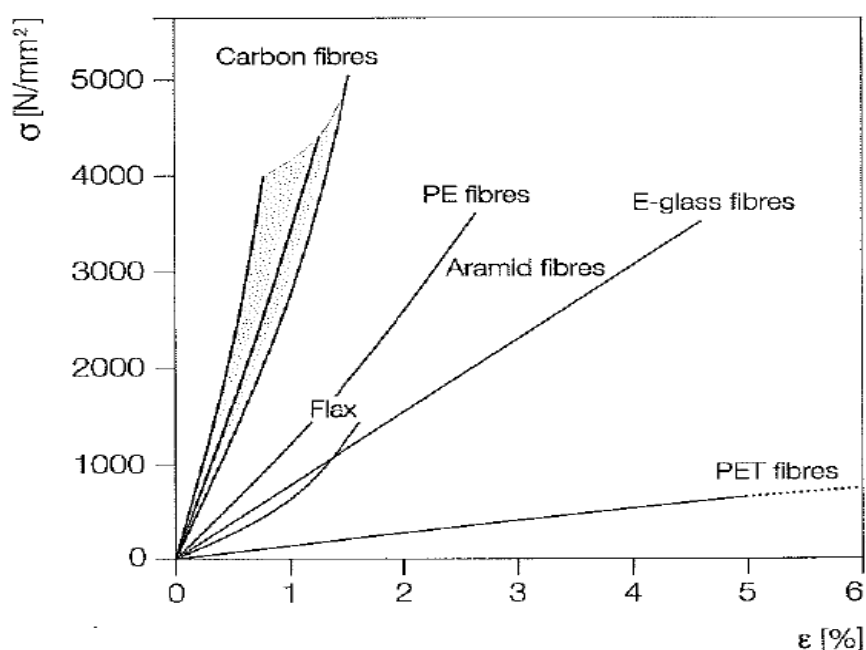
Σχ.2.2. Είδη Ινών

Επίσης ίνες πολυεστέρων και nylon χρησιμοποιούνται. Όλες οι ίνες έχουν μικρή πυκνότητα και δίνουν στο πλαστικό που ενισχύουν μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία. Η μικρή πυκνότητα των ινών είναι ένας από τους κυριότερους λόγους της εξαιρετικής αναλογίας αντοχής/δυσκαμψίας και βάρους.

Η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται όταν χρησιμοποιούνται ίνες με μήκος κοντά στο άπειρο και όταν τοποθετούνται σε μία κατεύθυνση και ισότροπα. Όσο πιο ανισότροπα εισάγονται οι ίνες και όσο μικρότερο μήκος έχουν, τόσο μικρότερες είναι οι μηχανικές τους ιδιότητες.

Αυτό το μεγάλο εύρος επιλογών σε ότι αφορά το μήκος, τη διεύθυνση και το είδος των ινών δείχνει ότι τα FRP μπορούν να παραχθούν σύμφωνα με τις μηχανικές απαιτήσεις του κάθε project. Αυτό οδηγεί σε μία πολύ αποτελεσματικότερη χρήση του υλικού σε σχέση με το χάλυβα και το σκυρόδεμα.

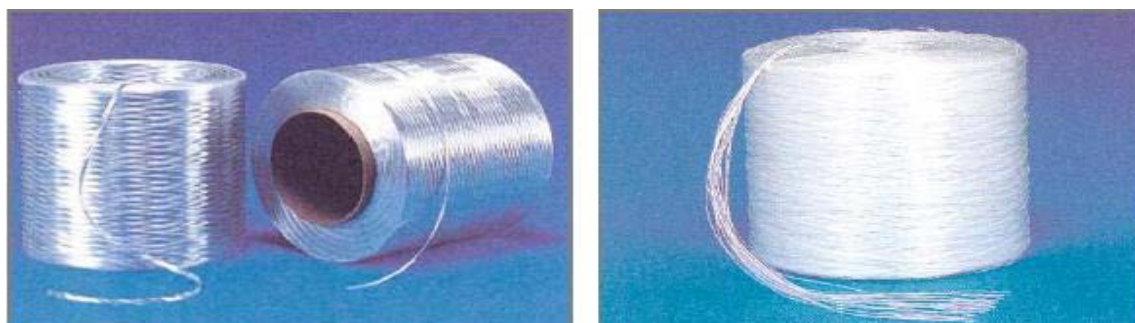
Όλες οι ίνες συμπεριφέρονται οιονεί ελαστικά μέχρι τη θραύση.



Σχ.2.3. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων των ινών

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι 4 είδη είναι τα καταλληλότερα για κατασκευές: ο άνθρακας, το γυαλί, το PE και το αραμίδιο. Ωστόσο οι ίνες PE και οι ίνες αραμιδίου είναι σχετικά ακριβές. Συγκρίνοντας τον άνθρακα με το γυαλί, το μέτρο ελαστικότητας του άνθρακα είναι ασφαλώς μεγαλύτερο αλλά η τιμή του γυαλιού είναι σαφώς μικρότερη.

ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ



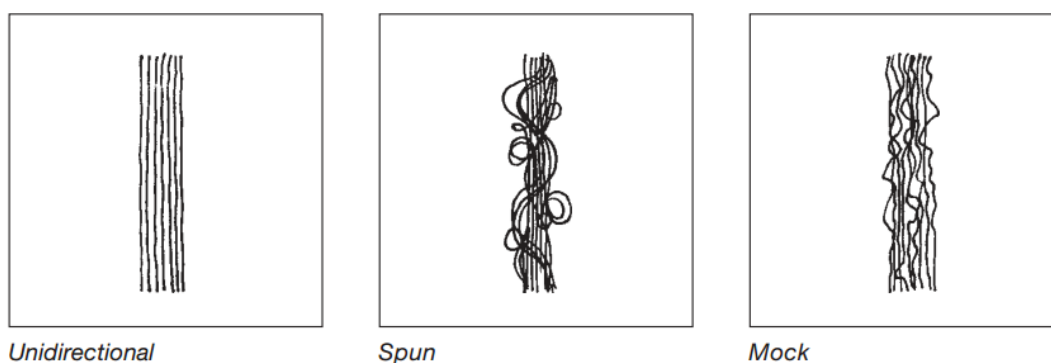
Σχ.2.4. Καρούλια ινών E-glass

Οι ίνες γυαλιού είναι οι πιο δημοφιλείς ως συστατικό των FRP κυρίως λόγω του βέλτιστου συνδυασμού χαρακτηριστικών αντοχής και κόστους.

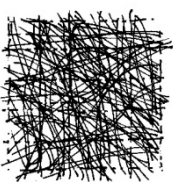
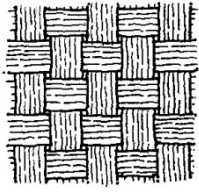
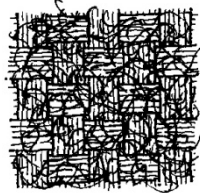
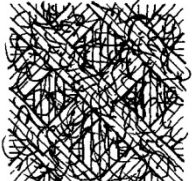
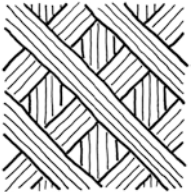

Παράγονται με ειδική κατεργασία υγρού γυαλιού το οποίο μπορεί να πάρει τη μορφή νήματος. Συνήθως κατά τη διαδικασία παραγωγής οι ίνες γυαλιού καλύπτονται (coated) με ειδικά διαλύματα (agents) έτσι ώστε να βελτιωθεί η συμπεριφορά τους κατά τον εμποτισμό τους από τη ρητίνη. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η συνάφεια μεταξύ των δύο υλικών και μειώνονται τα κενά στο τελικό προϊόν, το σύνθετο υλικό FRP. Οι πιο συνήθεις τύποι ινών γυαλιού είναι οι εξής:

- E-glass: είναι ο πιο φθηνός τύπος ινών και χρησιμοποιείται ευρέως
- S-glass: έχει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας ωστόσο δεν προτιμάται λόγω του υψηλού κόστους
- Alkali-resistant glass: παράγονται με την προσθήκη zirconium και είναι ανθεκτικές στο αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος που γενικά διαβρώνει τις ίνες γυαλιού.

Τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα των ινών γυαλιού είναι το σχετικά χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, η χαμηλή ανθεκτικότητα σε υγρό και αλκαλικό περιβάλλον, καθώς και η χαμηλή μακροχρόνια αντοχή λόγω του φαινομένου της ερπυστικής διάρρηξης (stress rupture). Παρακάτω φαίνονται οι διάφοροι τύποι ύφανσης και διαστρωμάτωσης.



Σχ. 2.5. Τύποι Διαστρωμάτωσης

		
Continuous mat random fiber orientation	Weave $0^{\circ}/90^{\circ}$	Complex mat $0^{\circ}/90^{\circ}$ weave + random fiber orientation
		
Bidirectional complex mat $0^{\circ}/\pm 45^{\circ}/90^{\circ}$ weave + random fiber orientation	Multiax mat $0^{\circ}/\pm 45^{\circ}$	Specially developed mat based on specific requirement

Εικόνα 2.6. Τύποι Ύφανσης

2.1.3. Η μήτρα από πολυμερές

Το πολυμερές είναι είτε θερμοσκληρυνόμενο ή θερμοπλαστικού τύπου και με βάση τα προϊόντα ρητίνης. Η μήτρα είναι ένα συνεχές υλικό που περιβάλλει και υποστηρίζει την ενίσχυση με τη διατήρηση της σχετικής θέσης του. Παρόλο που η αντοχή του ινοπλισμένου πολυμερούς προκύπτει από την ενίσχυση, η μήτρα πολυμερούς δίνει τη μορφή και διασφαλίζει σωστή τοποθέτηση των ινών. Επιπροσθέτως η ρητίνη προστατεύει την ενίσχυση από εξωτερικές επιδράσεις όπως ο καιρός, το νερό, η ακτινοβολία UV.

Όλοι οι τύποι ρητίνης λειτουργούν σχεδόν με τον ίδιο τρόπο. Στην ακατέργαστη μορφή τους αποτελούνται από χαλαρούς μοριακών αλυσίδων π.χ. μονομερή τα οποία διαλύονται σε μια ουσία. Όταν ο κατάλληλος παράγοντας σκλήρυνσης, καταλύτης ή επιταχυντής προστίθεται σε αυτήν την ουσία, οι αλυσίδες αρχίζουν να συγκεντρώνονται και να σχηματίζουν μια στερεή, τρισδιάστατη δομή. Οι διαφορές μεταξύ των ρητινών βρίσκονται στη αντοχή, σκλήρυνση και στην ποιότητα της διεπαφής ινών και ρητίνης.

Μήτρα του FRP είναι το υλικό της ρητίνης μαζί με τις διάφορες προσμείξεις που έχει πλέον μετά από κατεργασία αποκρυσταλλώσει την οριστική του δομή συνθέτοντας το πολυμερές. Αποτελεί περίπου το 30-60% κατ' όγκο του FRP. Η χημική του σύνθεση και οι ιδιότητες του καθορίζουν τη συμπεριφορά του σύνθετου υλικού. Η συμβατότητα του με τις ίνες και η δυνατότητα της από κοινού λειτουργίας τους επηρεάζουν τον τρόπο αστοχίας του μέλους.

Οι κυριότερες λειτουργίες του είναι οι εξής:

- Συγκρατεί σε ενότητα τις ίνες και καθορίζει τη γεωμετρική τους κατανομή
- Μεταβιβάζει τα φορτία στις ίνες κυρίως μέσω μηχανισμών τριβής
- Προσφέρει ακαμψία και το επιθυμητό σχήμα στο δομικό μέλος FRP
- Προστατεύει τις ίνες από τον κίνδυνο διάβρωσης από το περιβάλλον
- Απομονώνει τις ίνες ώστε να λειτουργούν χωριστά συμβάλλοντας έτσι σημαντικά στην επιβράδυνση επέκτασης πιθανών ρωγμών
- Διαμορφώνει την επιφάνεια σύνδεσης του μέλους
- Καθορίζει την διατμητική αντοχή του μέλους για φόρτιση κάθετη στην κύρια διεύθυνση των ινών
- Σε θλιπτική καταπόνηση προσφέρει πλευρική στήριξη στις ίνες ώστε να μην αστοχήσουν σε τοπικό λυγισμό

Δύο είναι οι κύριες κατηγορίες ρητινών που χρησιμοποιούνται στα FRP, οι θερμοσκληρυνόμενες (thermosetting) και οι θερμοπλαστικές (thermoplastic resins). Στις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες ανήκουν οι πολυεστερικές ρητίνες και οι βινυλεστερικές. Στα GFRP χρησιμοποιούνται πολυεστερικές ρητίνες και στα CFRP εποξικές ρητίνες. Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες προτιμούνται στην παραγωγή των FRP κυρίως επειδή είναι εύκολη η κατεργασία τους (κυρίως λόγω του χαμηλού ιξώδους) και έχουν σχετικά χαμηλό κόστος. Πρόκειται για πολυμερή τα οποία αναπτύσσουν πολύ ισχυρούς μοριακούς δεσμούς και ένα τρισδιάστατο δίκτυο πολυμερούς αλυσίδας το οποίο τους προσφέρει σταθερή εσωτερική δομή και σχήμα. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι, αντίθετα με τις θερμοπλαστικές ρητίνες, μετά την οριστική σκλήρυνσή τους δεν λιώνουν ούτε αλλάζουν σχήμα υπό την επίδραση της θερμοκρασίας παρά μόνο όταν φτάσουν το όριο της θερμοκτικής τους αποσύνθεσης.

Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες έχουν ψαθυρή συμπεριφορά. Προσφέρουν στο σύνθετο υλικό μεγάλη ακαμψία, σταθερότητα σχήματος, μικρότερο συντελεστή θερμικής διαστολής, μεγάλη αντοχή στην επίδραση διαλυτών και άλλων χημικών ουσιών. Πρέπει ωστόσο να ληφθεί υπόψη η προκύπτουσα ογκομετρική συρρίκνωση των ρητινών κατά την σκλήρυνσή τους (η οποία κυμαίνεται από 4% για τις εποξικές έως 8% για τις πολυεστερικές ρητίνες) και μπορεί να προκαλέσει την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων κυρίως στη διεπιφάνεια με τις ίνες.

Type	Density [g/cm ³]	Acids	Alkalis	Weather	Tensile Strength [N/mm ²]	Elastic Modulus [N/mm ²]
UP	1,20	0	0	+	40-70	3000-4200
EP	1,20	+	+	0	60-125	3000-6000
VE	1,20	+	+	0	70-84	3400-3600
PF	1,30	-	-	+	20-60	1500-2500

Σχ.2.7. Διάγραμμα ιδιοτήτων των μητρών

2.1.4. Φίλλερ και πρόσθετα

Τα φίλλερ (fillers) είναι υλικά που προστίθενται για να ‘γεμίσει’ η τελική διατομή με τη χρησιμοποίηση μικρότερων ποσοτήτων υλικών μήτρας έτσι ώστε να μειωθεί το τελικό κόστος. Επίσης μπορούν να συμβάλλουν στην πιο αποτελεσματική μεταβίβαση των φορτίων και να μειώσουν τη ρηγμάτωση σε μη ενισχυμένες περιοχές. Πιο ευρεία χρήση έχουν το ανθρακικό ασβέστιο, ο καολινίτης και το οξείδιο του αλουμινίου.

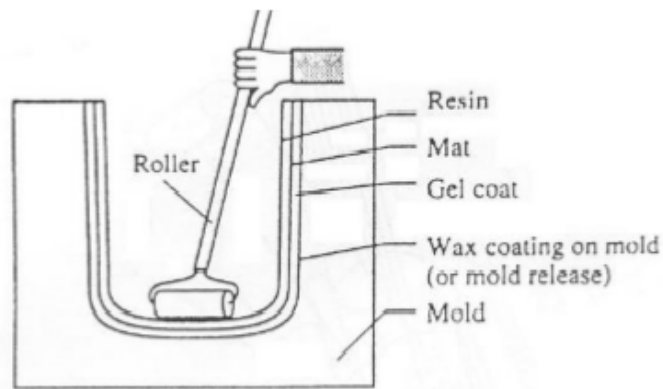
Τα πρόσθετα είναι ουσίες που προστίθενται στη μήτρα έτσι ώστε να αλλάξουν κάποιες ιδιότητες του σύνθετου υλικού, να βελτιωθεί η συμπεριφορά του και οι μηχανικές του ιδιότητες. Μπορεί να είναι καταλύτες, χρωστικές, επιβραδυντές φλόγας και κυρίως αυξάνουν την ανθεκτικότητα του υλικού σε διάβρωση υπό την επίδραση φωτιάς και γενικότερα κατά την έκθεση σε επιβλαβή περιβάλλοντα, μειώνουν τη συστολή ξηράνσεως.

2.1.5. Διαδικασίες παραγωγής

Η επιλογή της διαδικασίας παραγωγής εξαρτάται από τον τύπο των ινών και του συνδετικού υλικού, τη θερμοκρασία που απαιτείται για το σχηματισμό του τμήματος και την στερεοποίηση του συνδετικού υλικού, καθώς επίσης και από την επίδραση του κόστους. Η κάθε μέθοδος επεξεργασίας έχει εγγενή πλεονεκτήματα και περιορισμούς που επηρεάζουν την κατασκευή και το σχεδιασμό του τελικού προϊόντος.

Η χειρωνακτική μόρφωση μιας διαστρωμάτωσης

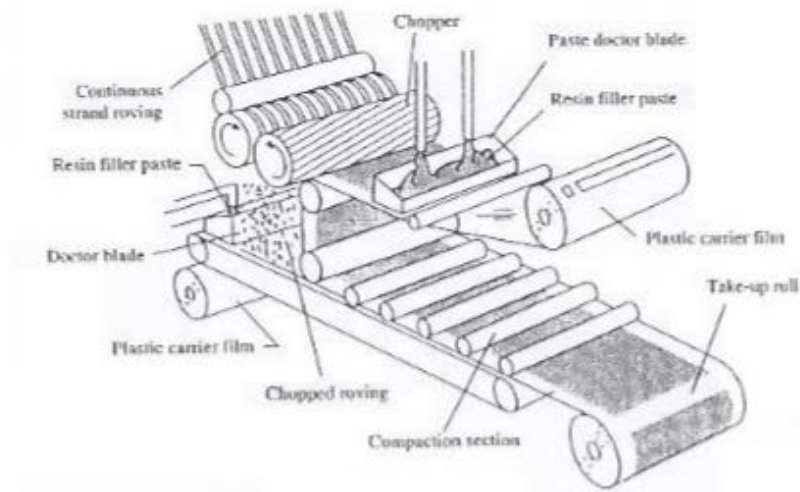
Η τεχνική της χειρωνακτικής διαδικασίας μόρφωσης μιας διαστρωμάτωσης (hand lay-up), ονομάζεται και wet hand lay-up, είναι η πιο απλή και διαδεδομένη διαδικασία παραγωγής. Περιλαμβάνει την χειρωνακτική τοποθέτηση των ξηρών ενισχύσεων στο εκμαγείο και την ταυτόχρονη εφαρμογή – εμποτισμό της ρητίνης. Στη συνέχεια, το υπό υγρή μορφή σύνθετο υλικό διαμορφώνεται χειροκίνητα με τη βοήθεια ρολών ώστε να διευκολυνθεί η ομοιόμορφη διάστρωση και η απομάκρυνση των θυλάκων αέρα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όσες στρώσεις χρειάζεται μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος. Έτσι προκύπτει μία κατασκευή με διαδοχικές στρώσεις. Η έκλυση πτητικών ουσιών, όπως το κατασκευασμένο από styrene, είναι υψηλή όπως και σε κάθε άλλη ανοικτή μέθοδο με καλούπια. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιήθηκε κατά την παραγωγή των δοκιμίων στην παρούσα εργασία. Τα 4 βασικά βήματα εφαρμογής της μεθόδου είναι: α) προετοιμασία εκμαγείου β) επικάλυψη με ζελατίνη (gel coating) γ) διάστρωση (lay-up) δ) στερεοποίηση (curing)



Σχ. 2.8. Χειρωνακτική διαδικασία διαστρωμάτωσης

Διαστρωμάτωση με προκατασκευασμένες στρώσεις (Prepreg lay-up).

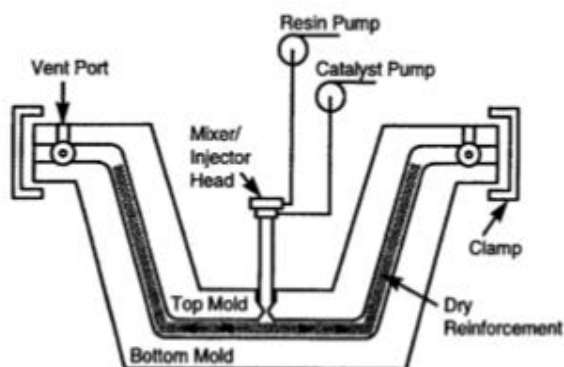
Η προκατασκευασμένη στρώση (prepreg) είναι προ-εμποτισμένο υλικό ενισχυμένο με ίνες (pre-impregnated fiber reinforced material) όπου η ρητίνη έχει μερικώς στερεοποιηθεί ή είναι πιά παχύρρευστη. Οι ίνες είναι τακτοποιημένες σε μία ταινία μονού προσανατολισμού (unidirectional tape), ένα πλεκτό ύφασμα (woven fabric) ή σε φύλλα με κοντές ίνες τυχαίου προσανατολισμού (random chopped fiber sheets). Η βασική διαφορά μεταξύ της μεθόδου διαστρωμάτωσης με προκατασκευασμένες στρώσεις (prepreg lay-up) και της συμβατικής μεθόδου χειρωνακτικής μόρφωσης διαστρωμάτωσης (hand lay-up) είναι ότι χρησιμοποιώντας προκατασκευασμένες στρώσεις (prepreg) ο εμποτισμός (impregnation) των ινών γίνεται πριν το καλούπωμα. Τα prepregs χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατασκευή υψηλών απαιτήσεων τμημάτων με πολύπλοκη γεωμετρία στην αεροναυπηγική.



Σχ. 2.9. Prepreg lay-up

Καλούπι ρητινένεσεως (Resin transfer molding – RTM)

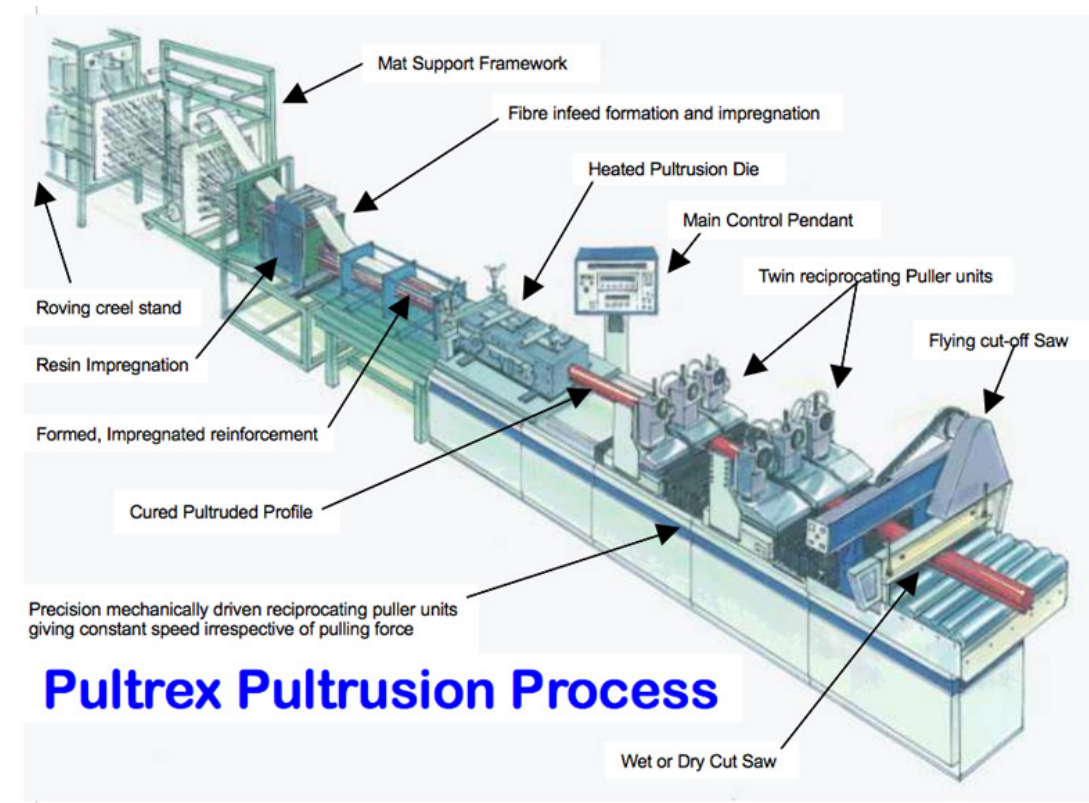
Η διαδικασία με το καλούπι ρητινένεσεως – Resin Transfer Molding (RTM) χρησιμοποιεί ένα καλούπι με εισόδους για την εισαγωγή της ρητίνης και εξόδους που επιτρέπουν τη διαφυγή του αέρα. Οι ίνες ενίσχυσης τοποθετούνται ξηρές στο καλούπι και αυτό κλείνεται. Από την είσοδο αντλείται υγρή ρητίνη μέσα στο καλούπι, εμποτίζοντας τις ίνες και γεμίζοντας την κοιλότητα του καλουπιού. Όταν αυτό γεμίσει, η παροχή ρητίνης σταματά, οι εισοδοί και έξοδοι σφραγίζονται και εφαρμόζεται θέρμανση ώστε να στερεοποιηθεί η ρητίνη. Στη συνέχεια, το καλούπι ανοίγεται και το τελικό τμήμα του σύνθετου υλικού απομακρύνεται.



Σχ. 2.10. Καλούπι ρητινένεσεως

Διαδικασία παραγωγής με έλξη (Pultrusion)

Η διαδικασία παραγωγής με έλξη (pultrusion) είναι μία συνεχής διαδικασία που χρησιμοποιείται για να κατασκευάζει σταθερές πρότυπες διατομές οιαδήποτε μήκους. Οι ίνες είναι εμποτισμένες με ρητίνη και έλκονται μέσω μιας θερμαινόμενης μήτρας, από όπου περνώντας σχηματίζεται και στερεοποιείται το τελικό προϊόν. Στην απλούστερη γραμμή παραγωγής με έλξη (pultrusion), οι δέσμες των ινών τεντώνονται και οδηγούνται σε καλούπια προσχηματισμού. Τα performing guides θέτουν τις ίνες με κατάλληλη διάταξη μέσα στη διατομή (cross-section) του προϊόντος, όπως ορίζεται από τον σχεδιαστή. Οι ενισχύσεις εισέρχονται ξηρές στο θάλαμο έγχυσης (injection chamber), όπου εμποτίζονται με παροχετευόμενη ρητίνη υπό πίεση. Η διατομή (cross-section) της μήτρας δίνει το τελικό σχήμα του προϊόντος. Καθώς οι εμποτισμένες ίνες κινούνται διαμέσου της μήτρας, η στερεοποίηση γίνεται με τη βοήθεια παρεχόμενης θερμότητας από μία σειρά θερμαντήρων. Όπως προκύπτει το σύνθετο υλικό, συρρικνώνεται και ξεχωρίζει από τα τοιχώματα της μήτρας και αφήνοντας τη μήτρα είναι ένα τελικό προϊόν. Τα πολυμερή που παράγονται με αυτήν την μέθοδο θα είναι το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής.



Σχ. 2.11. Pultrusion

2.1.6. Πλεονεκτήματα ινοπλισμένων πολυμερών

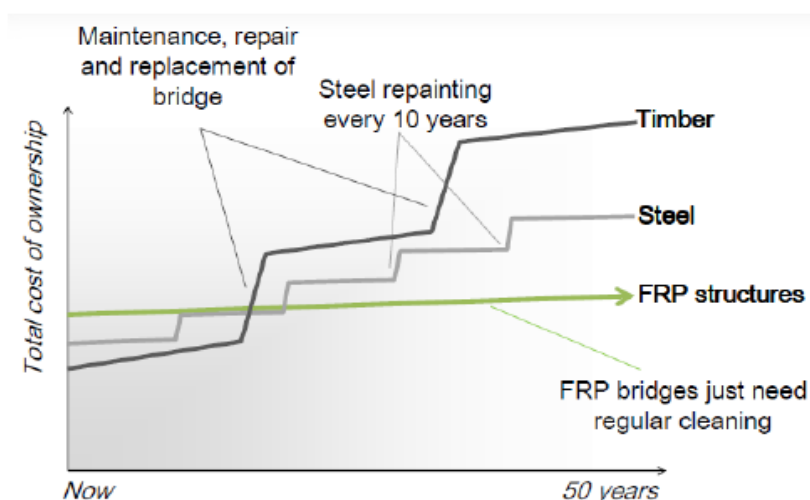
Σαφώς, τα ινοπλισμένα πολυμερή παρουσιάζουν πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα τα οποία αποτελούν εφελθτήριο για την εφαρμογή τους στην κατασκευή κτιρίων. Έχουν βέβαια και κάποια μειονεκτήματα, όπως είναι η ψαθυρή συμπεριφορά τους, η ευαισθησία τους στην ηλιακή ακτινοβολία και την φωτιά. Τα μειονεκτήματα αναμφισβήτητα δεν αποτελούν τροχοπέδη στην προσπάθεια των μηχανικών όσον αφορά τη χρήση ινοπλισμένων πολυμερών, η οποία βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο.

Οι ιδιότητες των ινοπλισμένων πολυμερών αποδεικνύονται πιο βελτιωμένες συγκριτικά με εκείνες των παραδοσιακών κατασκευαστικών υλικών. Δηλαδή, οι ιδιότητες του χάλυβα, του σκυροδέματος και του πλαστικού είναι ευάλωτες λόγω της χαμηλής αντοχής και δυσκαμψίας.

Μερικές από τις ιδιότητες/πλεονεκτήματα των πολυμερών είναι οι εξής:

- Υψηλή αντοχή
- Αντοχή σε κόπωση
- Αντοχή σε κρούσεις υψηλής ενέργειας

- Αντίσταση στη διάβρωση και αντοχή σε οξείδωση
- Ανισότροπα υλικά
- Μπορούν να σχεδιαστούν κατάλληλα για να μας δώσουν την απαιτούμενη αντοχή
 - Η παραγωγή τόσο του υλικού όσο και του δομικού στοιχείου ή της κατασκευής γίνονται σε μια φάση
 - Χαμηλό κόστος συντήρησης. Συγκεκριμένα, οι κατασκευαστές ινοπλισμένων πολυμερών υποστηρίζουν ότι τα προϊόντα τους έχουν μηδενικό κόστος συντήρησης κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, όπως και αποδεικνύεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ.2.12. Διάγραμμα κόστους συντήρησης-έτη

Δυνατότητα να δημιουργήσουν πολύπλοκες μορφές

- Νέες αισθητικές δυνατότητες.
- Γεωμετρικά πιο αποδοτικές λύσεις.

Επιθυμητές ηλεκτρικές και θερμικές δυνατότητες.

- Μπορούν να είναι ηλεκτρικά μη αγωγίμα, σημαντικό πλεονέκτημα κοντά σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις.
- Είναι θερμικά σταθερό (ειδικά όταν χρησιμοποιούμε ίνες άνθρακα), χαρακτηριστικό το οποίο μπορεί να εξαλείψει την ανάγκη για αρμούς διαστολής.

2.2.1 Μέλη FRP κατασκευασμένα με τη μέθοδο παραγωγής της έλξης (Pultrusion Process)

Η διαδικασία της έλξης (Pultrusion) όπως προαναφέρθηκε είναι η βασική διαδικασία παραγωγής προτύπων διατομών από FRP. Ο όρος Pultrusion στην Αγγλική, προέρχεται ακριβώς από τον ορισμό της διαδικασίας παραγωγής τους, έλξη

(pull) και εξώθηση (extrude). Κατά την παραγωγή με έλξη, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να μην αλλοιωθούν οι αντοχές του υλικού. Ο κορμός της διατομής αποτελείται κυρίως από ίνες παράλληλες στους οριζόντιους άξονες, ενώ η τελική σύσταση της διατομής έχει ίνες που προσανατολισμένες σε διάφορες κατευθύνσεις ($0, 90^0, \pm 45^0$).

Στα μέλη με “pultruded” διατομές κατασκευάζονται από πέλματα και κορμούς που χαρακτηρίζονται ως ορθότροπες, λεπτότοιχες πλάκες στις οποίες οι κύριοι άξονες του ορθότροπου υλικού και οι επιμέρους πλάκες έχουν τις ίδιες διευθύνσεις με το καθολικό σύστημα αξόνων της διατομής. Αυτός ο τύπος ορθότροπου υλικού, ονομάζεται “ειδικώς ορθότροπο υλικό”. Η δομή των πλακών μπορεί να είναι τέτοια ώστε η διατομή να θεωρείται συμμετρική και ισορροπημένη, έτσι ώστε να αποφεύγονται η επιπρόσθετη διατμητική και καμπτική σύζευξη των πλακών (Tsai and Hahn, 1980).

Η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων σε μια “ειδικώς ορθότροπη” πλάκα που αποτελείται από πολύστρωτο υλικό είναι:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1^0 \\ \varepsilon_2^0 \\ \varepsilon_6^0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1^0} & -\frac{\nu_{12}^0}{E_2^0} & 0 \\ -\frac{\nu_{21}^0}{E_1^0} & \frac{1}{E_2^0} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{E_6^0} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\sigma}_1 \\ \bar{\sigma}_2 \\ \bar{\sigma}_6 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Όπου:

ε_i^0 είναι οι επίπεδες παραμορφώσεις στην πλάκα

$\bar{\sigma}_i$ είναι οι επίπεδες τάσεις στην πλάκα στην διαμήκη διεύθυνση, στην εγκάρσια διεύθυνση και στην διεύθυνση της διατμητικής τάσης

E_1^0 είναι το μέτρο ελαστικότητας στην διαμήκη διεύθυνση

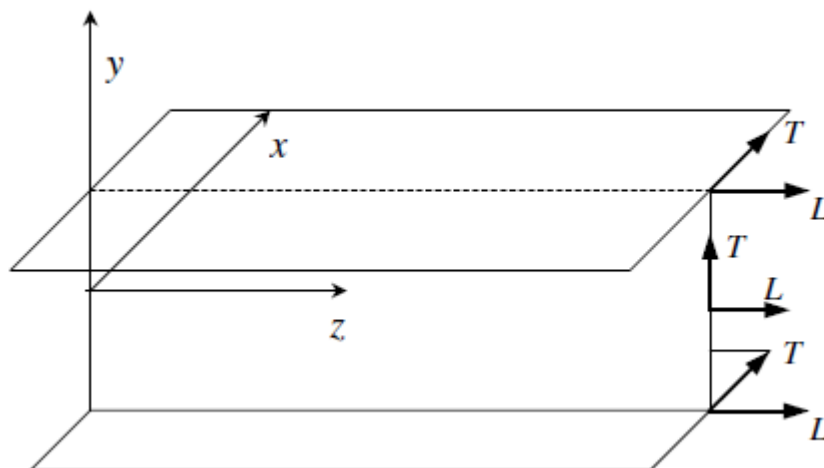
E_2^0 είναι το μέτρο ελαστικότητας στην εγκάρσια διεύθυνση

E_6^0 είναι το μέτρο διάτμησης

ν_{12}^0 είναι ο λόγος Poisson κατά την έννοια του άξονα 2

ν_{21}^0 είναι ο λόγος Poisson κατά την έννοια του άξονα 1

Όπως αναφέρθηκε μόνο 4 από τις 5 μηχανικές σταθερές ($E_1^0, E_2^0, E_6^0, \nu_{12}^0, \nu_{21}^0$) είναι ανεξάρτητες.



Σχ. : Σχέση μεταξύ τοπικού και καθολικού συστήματος αξόνων σε μια “pultruded” διατομή

Στην ανάλυση, για λόγους κατανόησης χρησιμοποιείται διαφορετικός συμβολισμός για τον προσδιορισμό των διευθύνσεων, των μηχανικών σταθερών καθώς και των τάσεων και των παραμορφώσεων στα επιμέρους τμήματα (πέλμα και κορμός) μιας διατομής. Οι διευθύνσεις εντός του επίπεδου των τμημάτων της διατομής κατηγοριοποιούνται ως η επιμήκης διεύθυνση (L), η εγκάρσια διεύθυνση (T), και η διεύθυνση της διατμητικής τάσης (LT). Ως έννοια του πάχους νοείται η διεύθυνση που είναι κάθετη στο επίπεδο του πέλματος και του κορμού της διατομής και συμβολίζεται ως (TT). Οι μηχανικές σταθερές ορίζονται ως:

E_L : το μέτρο ελαστικότητας κατά τη διαμήκη διεύθυνση
 E_T : το μέτρο ελαστικότητας κατά την εγκάρσια διεύθυνση
 ν_L : ο λόγος Poisson κατά τη διαμήκη διεύθυνση
 ν_T : ο λόγος Poisson κατά την εγκάρσια διεύθυνση
 G_{LT} : το μέτρο διάτμησης

Οι επίπεδες ορθές και διατμητικές τάσεις και παραμορφώσεις ορίζονται ως σ_L , σ_T , τ και ϵ_L , ϵ_T , και γ αντιστοίχα. Στην ανάλυση συχνά τα μετρά ελαστικότητας και διάτμησης λαμβάνονται ως ίδια σε εφελκυσμό και θλίψη στην διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση, το οποίο σαν διαπίστωση είναι επισφαλής. Για αυτό το λόγο οι κατασκευαστές συνήθως δίνουν διαφορετικά μετρά ελαστικότητας και διάτμησης σε εφελκυσμό και θλίψη.

Οι επίπεδες αντοχές μιας ορθότροπης πλάκας σε μια διατομή χαρακτηρίζονται από πέντε ανεξάρτητες σταθερές. Αυτές οι σταθερές ορίζονται ως: X_t η εφελκυστική αντοχή κατά τη διαμήκη διεύθυνση, X_c η θλιπτική αντοχή κατά τη διαμήκη διεύθυνση, Y_t η εφελκυστική αντοχή κατά την εγκάρσια διεύθυνση, Y_c η θλιπτική αντοχή κατά την εγκάρσια διεύθυνση και S η επίπεδη διατμητική αντοχή. Στην μηχανική, αυτές οι αντοχές ορίζονται ως: $\sigma_{L,t}$, $\sigma_{L,c}$, $\sigma_{T,t}$, $\sigma_{T,c}$, και τ_{LT} . Οι εκτός του επιπέδου αντοχές (κατά την έννοια του πάχους) ενός ορθότροπου υλικού μιας διατομής δεν λαμβάνονται υπόψιν στον σχεδιασμό. Εξάιρεση θα μπορούσε να αποτελέσει η διατμητική αντοχή ανάμεσα στη διαστρωμάτωση (Interlaminar shear strength (ILSS)), η οποία υπολογίζεται περιοδικά. Αυτή ορίζεται ως τ_{TT} και αποτελεί τη διατμητική αντοχή της στρώσης κατά την έννοια του πάχους.

Καθώς τα τοιχώματα μιας διατομής δεν είναι ομογενή κατά την έννοια του πάχους (αποτελείται από στρώσεις ινοπλισμένων υλικών διαφορετικών επίπεδων μηχανικών ιδιοτήτων), οι επίπεδες καμπτικές ιδιότητες τους δεν είναι ίδιες με τις ιδιότητες σε επίπεδη εντατική κατάσταση. Παρ' όλα αυτά, στις διατομές αυτές, οι διαστρωματώσεις φορτίζονται εντός του επιπέδου τους και έχουν μικρό πάχος. Συνεπώς, κατά το σχεδιασμό αυτών των διατομών, χρησιμοποιούνται οι επίπεδες μηχανικές ιδιότητες της διαστρωμάτωσης. Σε κελύφη μικρού πάχους, όπου οι διαστρωματώσεις φορτίζονται εκτός του επιπέδου, οι καμπτικές ιδιότητες λαμβάνονται υπόψιν.

Η επίπεδη δυσκαμψία μπορεί να προσδιοριστεί από πειράματα (coupon tests) που μπορούν να διεξαχθούν στις διατομές. Στην παρούσα ανάλυση, η διαστρωμάτωση λαμβάνεται ως ομογενή. Καθώς οι ορθότροπες πλάκες σε μια

διατομή λαμβάνονται ως ομογενείς, οι ιδιότητες των πλακών σε κάμψη μπορούν να υπολογιστούν από τις μηχανικές ιδιότητες υπό επίπεδη εντατική κατάσταση. Αυτή η υπόθεση γίνεται συνήθως κατά την ανάλυση κατασκευών από pultruded προφίλ και κρίνεται κατάλληλη δεδομένου των γεωμετρικών ιδιοτήτων των pultruded διατομών. Οι καμπτικές δυσκαμψίες μιας ορθότροπης πλάκας (ή τοιχώματος) (ισοδύναμες του γινομένου EI ανά μέτρο πλάτους της δοκού) δίνονται ως:

$$D_L = \frac{E_L t_p^3}{12(1-\nu_L \nu_T)} \quad (2.2)$$

$$D_T = \frac{E_T t_p^3}{12(1-\nu_L \nu_T)} \quad (2.3)$$

$$D_{LT} = \frac{\nu_L E_L t_p^3}{12(1-\nu_L \nu_T)} = \frac{\nu_L E_T t_p^3}{12(1-\nu_L \nu_T)} \quad (2.4)$$

$$D_S = \frac{G_{LT} t_p^3}{12} \quad (2.5)$$

Όπου D_L, D_T, D_{LT} , και D_S είναι η διαμήκης, η εγκάρσια, η συστροφική και η διατμητική δυσκαμψία και t_p είναι το πάχος της πλάκας. Οι καμπτικές δυσκαμψίες σχετίζουν τις καμπτικές ροπές της πλάκας (ανά μέτρο μήκους) με τις καμπυλότητες της πλάκας και μετριοούνται σε μονάδες δύναμης \times μήκους.

Οι επίπεδες αντοχές μπορούν να υπολογιστούν είτε από τη θεωρία είτε από πειράματα στατικού αξονικού εφελκυσμού (coupon test) της διαστρωμάτωσης.

Κατά τον σχεδιασμό, τα pultruded υλικά λαμβάνονται ότι έχουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά σε εφελκυσμό, θλίψη και τέμνουσα τόσο στη διαμήκη όσο και στην εγκάρσια διεύθυνση και η αστοχία τους είναι ψαθυρή. Αυτή η υπόθεση είναι βάσιμη κατά το σχεδιασμό σε κατάσταση λειτουργικότητας (~20% της οριακής κατάστασης αστοχίας) αλλά δεν είναι σωστή κατά την εγκάρσια διεύθυνση και τη διεύθυνση της διάτμησης όπου υψηλές παραμορφώσεις παρατηρούνται και η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων είναι μη γραμμική. Καθώς στον παρών σχεδιασμό, η πλειοψηφία των διατομών σχεδιάζεται ώστε να ικανοποιείται η οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (π.χ. έλεγχος βελών) και μεγάλοι συντελεστές ασφάλειας χρησιμοποιούνται στην οριακή κατάσταση αστοχίας η υπόθεση αυτή κρίνεται ασφαλής.

Συνήθεις pultruded διατομές συχνά λαμβάνονται ως ομογενείς (η διατομή αποτελείται από πλάκες οι οποίες όλες έχουν τις ίδιες ιδιότητες). Παρ όλα αυτά, αξίζει να σημειωθεί ότι μερικοί κατασκευαστές παράγουν διατομές όπου ο κορμός και τα πέλματα έχουν διαφορετικές ιδιότητες. Για τους σκοπούς της ανάλυσης, οι περιοχές όπου ενώνονται οι πλάκες για να σχηματίσουν μια διατομή (π.χ. η περιοχή που ο κορμός και το πέγμα ενώνονται σε μια διατομή I) έχουν ίδιες ιδιότητες με αυτές των επιμέρους πλακών. Παρ όλα αυτά, πειράματα έχουν δείξει ότι αυτό δεν

είναι πάντα σωστό. Ο προσδιορισμός, όμως, των ιδιοτήτων αυτών των τοπικών περιοχών είναι εξαιρετικά επίπονος.

Ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας κατά τη διαμήκη διεύθυνση ως προς το μετρό διάτμησης, $\frac{E_L}{G_{LT}}$, για ορθότροπες πλάκες μπορεί να είναι μεγαλύτερος από το λόγο ισότροπων πλακών. Σε pultruded διατομές, ινοπλισμένες με ίνες γυαλιού, ο λόγος είναι περίπου 6 (ενώ σε ισότροπα υλικά ο λόγος αυτός είναι ίσος με 2.6).

2.2.2 Συμβολή της διάτμησης στις FRP διατομές

Εξαιτίας του γεγονότος ότι οι “pultruded” διατομές είναι γενικά βραχείες σε σύγκριση με τις σύνηθες μεταλλικές διατομές, η διατμητική παραμόρφωση μπορεί να είναι σημαντική κατά την ανάλυση λεπτότοιχων “pultruded” διατομών. Η επίδραση των διατμητικών παραμορφώσεων πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά τον υπολογισμό βελών όπως επίσης και κατά τον έλεγχο ευστάθειας.

Συνεπώς λόγω του σημαντικού ρόλου που παίζει η διατμητική παραμόρφωση στον υπολογισμό των βελών στις δοκούς από GFRP η επίδρασή της δεν γίνεται να αμεληθεί στα μικρά ανοίγματα. Για την πρόβλεψη της συμβολής της διάτμησης στα αναπτυσσόμενα βέλη χρησιμοποιείται η θεωρία του Timoshenko (Σχ.2). Σύμφωνα με αυτήν, στην οποία βασίζονται όλοι οι ισχύοντες κανονισμοί, η ελαστική γραμμή που αναπτύσσεται σε μια δοκό υπό την δράση κατακόρυφων φορτίων καθορίζεται τόσο από την εγκάρσια μετατόπιση λόγω κάμψης και διάτμησης $\delta(z)$, όσο και από την κλίση $\varphi(z)$ της ελαστικής γραμμής λόγω κάμψης μόνο.

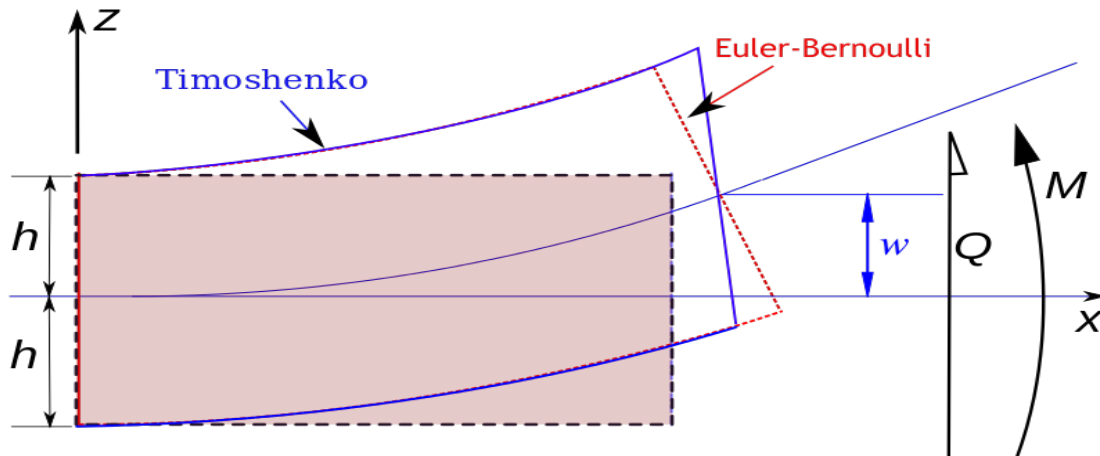
Άρα συνεπάγεται ότι οι αναπτυσσόμενες καμπυλότητες ισούνται με:

$$\frac{d\varphi}{dz} = \frac{M_x}{EI} \quad (3.1) \quad \text{και} \quad \frac{dy}{dz} - \varphi = -\frac{V_y}{KAG} \quad (3.2)$$

Επιλύοντας τις (3.1), (3.2) και με χρήση των συνοριακών συνθηκών συνεπάγεται ότι το αναπτυσσόμενο βέλος κάμψης και διάτμησης ισούνται με:

$$y(z) = y_{\text{bending}}(z) + y_{\text{shear}}(z) = \frac{f_1(z)}{EI} + \frac{f_2(z)}{KAG}$$

Όπου οι $f_1(z)$, $f_2(z)$ είναι συναρτήσεις του κατακόρυφου φορτίου και των συνοριακών συνθηκών, EI είναι η δυσκαμψία της διατομής, A το εμβαδόν της, G το μέτρο διάτμησης και K ο συντελεστής διάτμησης του Timoshenko ο οποίος λαμβάνεται από τον παρακάτω Πίνακα 2.16 για διάφορα είδη διατομών.



Σχήμα 2.15. Θεωρία δοκού Timoshenko

Homogenous Profile		
Profile	Symmetric Geometry (E_L, G_L, ν_L , constant and $t_w=t_f, b=h$)	Unsymmetric Geometry (E_L, G_L, ν_L , constant, $n=b/h$ and $m=bt_w/ht_f$)
I-shaped section	$\frac{80}{192 + (\nu_L G_{LT} / E_L)(33)}$	$\frac{20(1+3m)^2}{(180m^2 + 300m^2 + 144m + 60m^2n^2 + 60mn^2 + 24) + (\nu_L G_{LT} / E_L)(30m^2 - 50mn^2 - 30m^2n^2 + 6m - 4)}$
Box-shaped section	$\frac{80}{192 + (\nu_L G_{LT} / E_L)(-12)}$	
Source: Bank (1987)		

Πίνακας 2.16. Τιμές του συντελεστή k Timoshenko

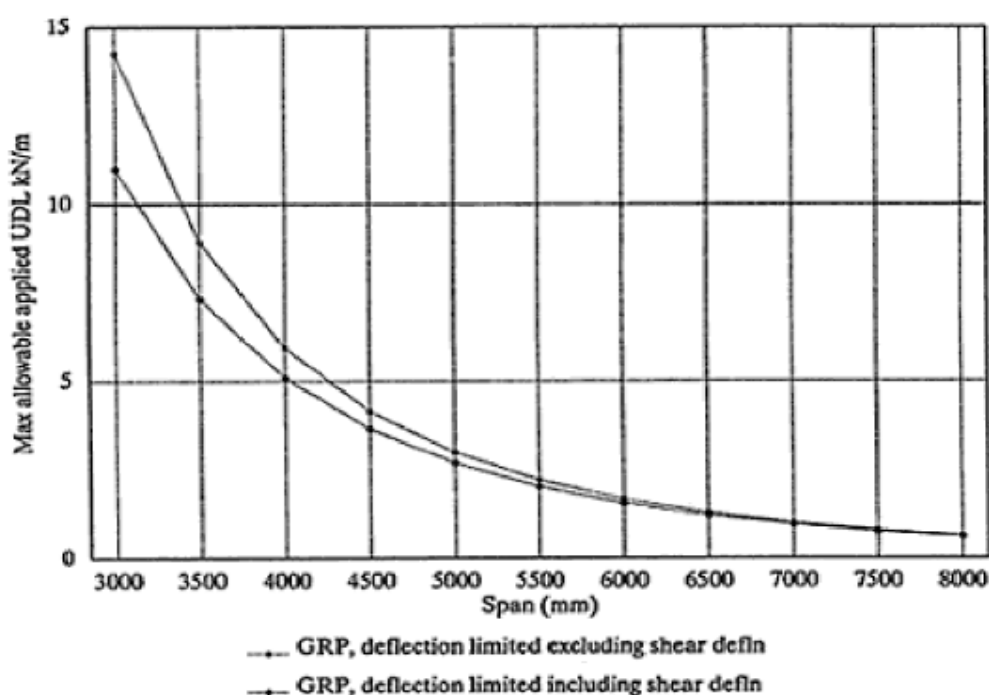
Σε αυτό το σημείο οφείλουμε να επισημάνουμε ότι σε καμπτόμενα μέλη από ινοπλισμένα πολυμερή (FRP pultruded elements) κρίσιμος είναι ο έλεγχος των βελών στην ΟΚΛ. Συγκεκριμένα, λόγω του μικρού μεγέθους μέτρου Ελαστικότητας (E_{LT}) οι παραμορφώσεις υπό τη δράση κατακορύφων φορτίων είναι πολύ μεγαλύτερες στις δοκούς από frp συγκριτικά με τις μεταλλικές δοκούς. Ας υποθέσουμε μια αμφιέριστη δοκό ορθογωνικής διατομής ($b \times h$) στην οποία δρα ένα ομοιόμορφο καταναμημένο φορτίο q σε όλο το μήκος της.

Το αναπτυσσόμενο βέλος κάμψης της δοκού ισούται με :

$$\delta = \left[\frac{5(ql)}{384Eb} \right] \cdot \left[\frac{l}{h} \right]^3$$

Δηλαδή το βέλος κάμψης είναι ανάλογο του κύβου του λόγου του μήκους της δοκού προς το ύψος της διατομής (αυτή η διαπίστωση ισχύσει γενικότερα στην στατική). Ας υποθέσουμε ότι η παραπάνω δοκός αποτελείται από χάλυβα στη μία περίπτωση και από ινοπλισμένα πολυμερή στην άλλη. Στην πρώτη περίπτωση το μέτρο ελαστικότητας εκτιμάται ίσο με $E_{\text{steel}}=200 \text{ N/mm}^2$ ενώ στην δεύτερη $E_{\text{GFRP}}=20 \text{ N/mm}^2$. Για να αναπτυχθεί το ίδιο βέλος κάμψης και στις δύο περιπτώσεις αρκεί το ύψος h της διατομής της δοκού GFRP να ισούται με $(E_{\text{steel}}/E_{\text{GFRP}})^{1/3} = (200/20)^{1/3} = 2.1$ φορές το ύψος της μεταλλικής δοκού. Επομένως θα αναζητήσουμε διατομές που το ύψος τους θα είναι πολύ μεγαλύτερο από το πλάτος τους.

Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί ότι για δοκούς με μικρά μήκη πλευρών (τυπικά $L < 7.00 \text{ m}$) η επίδραση της διατμητικής παραμόρφωσης των δοκών GFRP λόγω της ανομοιογένειας και του μικρού μέτρου διάτμησης G του υλικού, είναι εξίσου σημαντική με τη παραμόρφωση λόγω κάμψης. Στο Σχήμα 2.16 δίνεται γραφικά η επιρροή της διατμητικής παραμόρφωσης συναρτήσει του μήκους της δοκού. Βλέπουμε ότι για δοκούς μήκους μεγαλύτερου των 7.00 m η συμβολή της διάτμησης στη συνολική παραμόρφωση μπορεί να αμεληθεί.



Σχ. 2.17. Επιρροή διάτμησης στα βέλη για διάφορα ανοίγματα

2.2.3 Πρότυπα οδηγιών για τον σχεδιασμό κατασκευών από «pultruded» προφίλ

Αν και υπάρχουν αρκετές δημοσιεύσεις, οδηγοί ή βιβλία στα πρότυπα σχεδίασης των κατασκευών από FRP για τους πολιτικούς μηχανικούς, δεν υπάρχει

ένας παγκόσμιος ενιαίος κώδικας για την σχεδίαση τέτοιων κατασκευών. Δεν περιλαμβάνονται στις πρόσφατες σταθερές όπως ο Ευρωκώδικας, οπότε ο σχεδιασμός στην παρούσα εργασία περιορίστηκε στις οδηγίες που προβλέπουν οι παρακάτω δημοσιεύσεις:

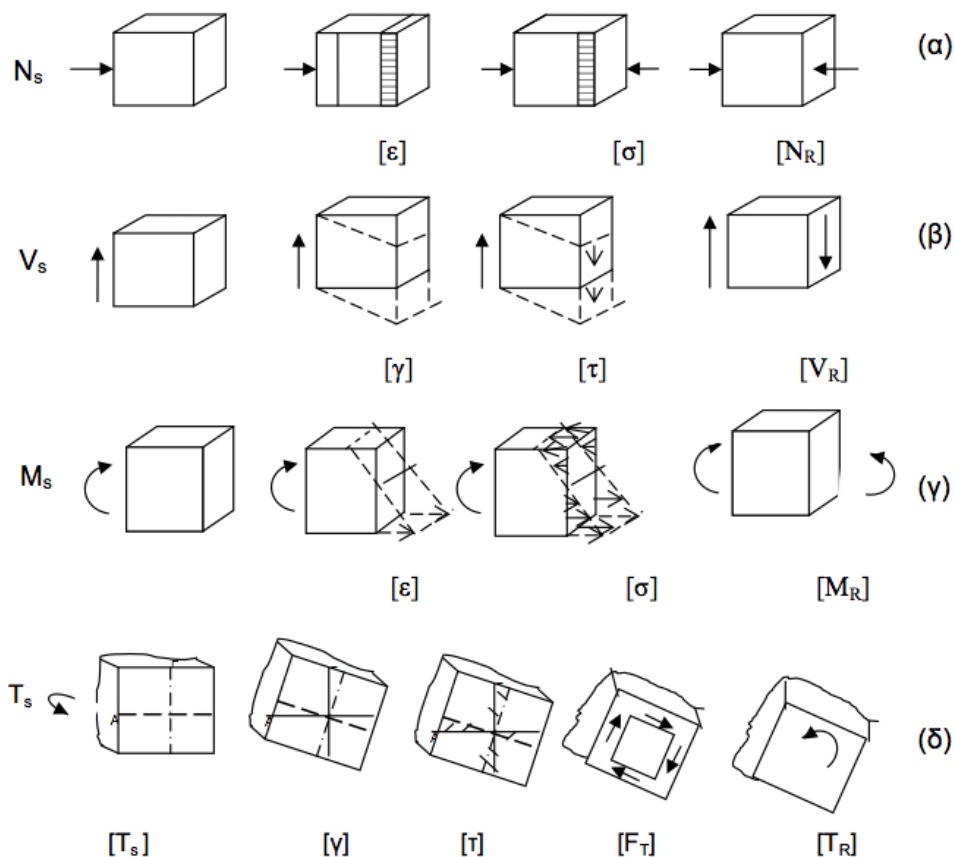
- **EUROCOMP Design Guidelines and Handbook.** Αυτή η δημοσίευση είναι ένας πρακτικός οδηγός σχεδιασμού ή κατευθυντήριες γραμμές που επιτρέπουν στους μηχανικούς να χρησιμοποιήσουν πολυμερή σε δομικές εφαρμογές. Το περιεχόμενο και οι διαδικασίες βασίζονται σε επιστημονικές πληροφορίες αλλά η δημοσίευση δεν έχει διαπιστευτεί ως επίσημος κατασκευαστικός κώδικας. Ο σχεδιαστικός κώδικας περιλαμβάνει κεφάλαια για κάθε ζήτημα των FRP και περιλαμβάνει υλικά, σχεδιασμό μελών διατομών, κατασκευή και έλεγχος ποιότητας.
- **ASCE Structural Plastics Design Manual:** Είναι ουσιαστικά ένα σύνολο οδηγιών το οποίο αναφέρεται σε μηχανικούς στην Αμερική. Κινείται στο ίδιο μήκος κύματος με τον Eurocomp Design Guidelines and Handbook, αλλά λαμβάνει υπόψη του κυρίως τα δεδομένα των Αμερικάνικων Κωδίκων για τον σχεδιασμό των κατασκευών.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι πολύ χρήσιμες για τον σχεδιασμό κατασκευών από FRP είναι και οι επιμέρους συστάσεις των κατασκευαστών, οι οποίοι για την διασφάλιση της ποιότητας των προϊόντων τους αναφέρουν κανονιστικές διατάξεις για τον σχεδιασμό των έργων. Αυτές οι διατάξεις συνήθως προκύπτουν από πειραματικές δοκιμές.

3.1 Δράσεις

3.1.1. Εισαγωγή

Δράσεις είναι οι εξωτερικές καταπονήσεις, που εφαρμόζονται στην κατασκευή προκαλώντας ορθές και διατμητικές τάσεις. Ορθές ονομάζονται οι τάσεις, που δρουν κάθετα στην επιφάνεια που φορτίζουν, ενώ διατμητικές είναι οι τάσεις που δρουν παράλληλα στην επιφάνεια φόρτισης. Ορθές τάσεις προκύπτουν, όταν στη διατομή εφαρμόζονται μεγέθη ορθής έντασης, όπως Αξονική Δύναμη ή Ροπή Κάμψης, ενώ διατμητικές τάσεις προκύπτουν, όταν στη διατομή εφαρμόζονται Διατμητικά εντατικά μεγέθη, όπως Τέμνουσα Δύναμη ή Ροπή Στρέψης.



Εικόνα 3.1.1. Ορθές παραμορφώσεις, τάσεις, εσωτερικές δυνάμεις και εσωτερικά μεγέθη για : α) Αξονική , β) Διατμητική , γ) Καμπτική , δ) Στρεπτική καταπόνηση

Ανάλογα με τη χρήση, τη μορφή και τη θέση του έργου, προσδιορίζονται οι δράσεις από τους ισχύοντες κανονισμούς, τους οποίους ο μελετητής είναι υποχρεωμένος να ακολουθήσει, ώστε να εξασφαλισθεί η μη αστοχία αλλά και η σωστή λειτουργία της κατασκευής. Οι τιμές των φορτίων αλλά και οι συντελεστές ασφαλείας αυτών προκύπτουν από στατιστική ανάγνωση των αποκλίσεων των δυσμενέστερων καταστάσεων, που μπορεί να προκύψουν τόσο από πλευράς καταπονήσεων όσο και από πλευράς αντοχής των μελών. Σκοπός όλης αυτής της

διαδικασίας είναι η σωστή μεταφορά των φορτίων, που δρουν επί του κτιρίου, με ασφάλεια στη θεμελίωση. Οι κατηγορίες φορτίων είναι οι εξής :

Μόνιμα Φορτία (G)

- Ιδία βάρη κατασκευής GIB
- Ιδία βάρη επικαλύψεων Γεπικ

Κινητά Φορτία (Q)

- Ομοιόμορφα διανεμημένο κατακόρυφο φορτίο q_k
- Δράσεις Ανέμου w
- Φορτίο Χιονιού s
- Θερμοκρασιακές Μεταβολές T

Τυχηματικά Φορτία (F)

- Πρόσκρουση οχήματος
- Πυρκαγιά

Σεισμικά Φορτία (E)

3.2. Κατακόρυφα φορτία βαρύτητας

3.2.1. Μόνιμα Φορτία

Στα μόνιμα φορτία κατατάσσονται οι καταπονήσεις, που έχουν μεγάλο (πρακτικά άπειρο) χρόνο επιβολής στην κατασκευή και εφαρμόζονται σε όλη τη διάρκεια ζωής του έργου. Αυτά είναι :

I. Το ίδιο βάρος των Διατομών προκύπτει από το ειδικό βάρος του ινοπλισμένου πολυμερούς με γυαλί (GFRP), το οποίο είναι $18,0 \text{ kN/m}^3$

II. Βάρος επικάλυψης θεωρείται ένα φορτίο $0,50 \text{ kN/m}^2$, το οποίο περιλαμβάνει τα βάρη επιχρίσεων, λοιπών εξοπλισμών, μονώσεων κτλ.

3.2.2.Κινητά φορτία ορόφων

Στα κινητά φορτία κατατάσσονται οι καταπονήσεις , που προκύπτουν από τη χρήση της κατασκευής αλλά κυρίως από φορτία, τα οποία αν και αναμένεται να προκύψουν δεν γνωρίζουμε το χρόνο, τη φορά και το μέγεθός τους με σιγουριά. Αυτά τα φορτία έχουν αυξημένους συντελεστές ασφαλείας, διότι οι τιμές τους προκύπτουν από στατιστική παρατήρηση και υπάρχει σχετική αβεβαιότητα. Τα κινητά φορτία πρέπει να τοποθετούνται με τέτοια φορά και παράλληλα με διαφορετικά ενδεχόμενα ταυτόχρονου συνδυασμού, ώστε να προκύπτουν τα πιθανότερα δυσμενή αποτελέσματα καταπόνησης. Αυτά είναι :

I. Ένα ομοιόμορφο διανεμημένο φορτίο βατού δαπέδου ίσο με $2,0 \text{ kN/m}^2$.

II. Ένα ομοιόμορφο διανεμημένο φορτίο μη βατής στέγης ίσο με $0,75 \text{ kN/m}^2$.

3.3. Φορτία χιονιού

Ανάλογα με τον τρόπο κατά τον οποίο το χιόνι εναποτίθεται πάνω στις στέγες, προκύπτει και η φύση του φορτίου αυτού. Αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως:

- Η μορφή και το σχήμα της στέγης.
- Τα θερμικά χαρακτηριστικά της στέγης.
- Την τραχύτητα της επιφάνειάς της.
- Την ποσότητα της θερμότητας που εκλύεται κάτω από αυτήν.
- Την απόσταση από τα γειτονικά κτίρια.
- Τον περιβάλλοντα χώρο (έδαφος).
- Τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες (ταχύτητα ανέμου στην περιοχή, την μεταβολή της θερμοκρασίας και την ένταση των βροχοπτώσεων και των χιονοπτώσεων).
- Τον βαθμό έκθεσης της επιφάνειας στον άνεμο.
- Την δημιουργία χιονοστιβάδων από πτώση του χιονιού από υψηλότερη επιφάνεια σε χαμηλότερη.

Για τον υπολογισμό του φορτίου χιονιού σε στέγες χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$S = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot S_k \quad S = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot S_k$$

Όπου:

S = φορτίο χιονιού στη στέγη

μ_i = ο συντελεστής σχήματος του φορτίου

C_e = συντελεστής έκθεσης

C_t = θερμικός συντελεστής

S_k = χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού στο έδαφος

Σημειώνεται ότι το φορτίο χιονιού S θεωρείται ότι δρα κατακόρυφα στην επιφάνεια της στέγης και ορίζεται στην οριζόντια προβολή της έκτασης αυτής. Ο συντελεστής έκθεσης C_e , ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν σε κάθε περίπτωση, μπορεί να πάρει τις εξής τιμές:

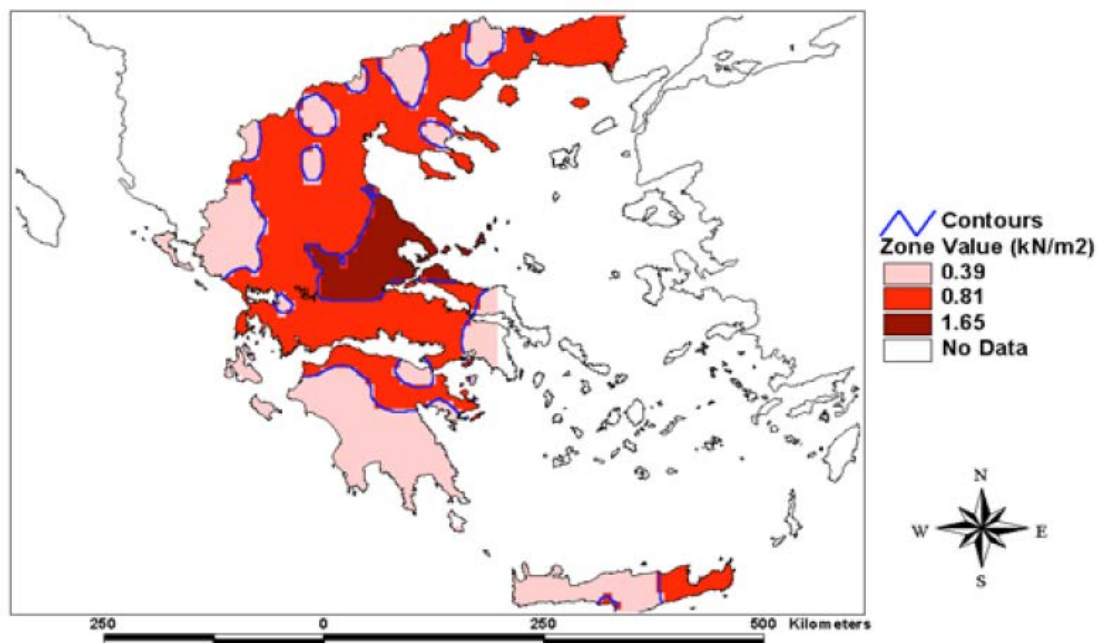
Κανονικές συνθήκες	1,00
Έκθεση σε ισχυρούς ανέμους	0,80
Κατασκευές προστατευμένες	1,20

Ο συντελεστής C_t λαμβάνεται ίσος με 1,00 ενώ η χαρακτηριστική τιμή χιονιού S_k

$$s_k = (0,42z - 0,03) \cdot \left[1 + \left(\frac{A}{917} \right)^2 \right]$$

Όπου, A = υψόμετρο της περιοχής πάνω από το επίπεδο της θάλασσας σε m

Z = αριθμός ζώνης που δίνεται στο χάρτη



Σχ. 3.3. Κατανομή ζωνών στον Ελλαδικό χώρο

Τέλος ο συντελεστής φορτίου μ για οριζόντια στέγη λαμβάνεται ίσος με 1,00.

3.4. Δράσεις Ανέμου

Οι δράσεις λόγω ανέμου στις κατασκευές από χάλυβα, παίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο και αποτελούν σε πολλές περιπτώσεις τη βασική φόρτιση, ανεξάρτητα από τον τύπο τους (μονώροφα, πολυώροφα κλπ.)

Οι δυνάμεις λόγω ανέμου είναι χρονικά μεταβαλλόμενες και μπορεί να προκαλέσουν ταλαντώσεις, για πολλές όμως κατασκευές (π.χ. σε δύσκαμπτες) η δυναμική αυτή επίδραση είναι μικρή, οπότε τα φορτία του ανέμου μπορεί να θεωρούνται ως στατικά.

Η πλέον σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό των δράσεων του ανέμου είναι η ταχύτητα του ανέμου. Η βάση σχεδιασμού είναι η μέγιστη ταχύτητα που προβλέπεται για τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού της κατασκευής. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος της ταχύτητας και συνεπώς της ασκούμενης πίεσης είναι οι εξής:

- Η γεωγραφική θέση της κατασκευής
- Η φυσική θέση της κατασκευής

- Η τοπογραφία
- Οι διαστάσεις των κτιρίων
- Η μέση ταχύτητα του ανέμου
- Το σχήμα της κατασκευής
- Η κλίση της στέγης
- Η διεύθυνση του ανέμου

Ο EN 1991-1-4 (Ευρωκώδικας 1, μέρος 1-4) παρέχει κανόνες και μεθόδους υπολογισμού των δράσεων λόγω ανέμου σε κτίρια και έργα πολιτικού μηχανικού και στα επιμέρους στοιχεία και στα προσαρτήματα τους για ύψη μέχρι 200 m.

Μάλιστα στο Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN1991-1-4 (Δράσεις ανέμου), προκειμένου να απλοποιηθεί η διαδικασία εισαγωγής των δράσεων λόγω ανέμου στις κατασκευές, οι δράσεις ανάγονται σε δυνάμεις ή πιέσεις (κάθετες) επί των εξωτερικών ή και εσωτερικών επιφανειών και μάλιστα σε ομοιόμορφη κατανομή σε όλη την επιφάνεια μιας όψης ή σε τμήμα της.

Η συνολική εξωτερική δύναμη του ανέμου δίδεται από τον τύπο

$$F_{w,e} = c_s \cdot c_d \cdot \sum q_p(z_e) \cdot c_{pe} \cdot A_{ref}$$

Εξωτερική πίεση w_e

Η πίεση του ανέμου η οποία δρα κάθετα στις εξωτερικές επιφάνειες μιας κατασκευής, προκύπτει από την σχέση:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe}$$

όπου:

$q_p(z_e)$ είναι η πίεση ταχύτητας αιχμής

z_e είναι το ύψος αναφοράς για την εξωτερική πίεση

c_{pe} είναι ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης

Εσωτερική πίεση w_i

Η πίεση του ανέμου η οποία δρα κάθετα στις εσωτερικές επιφάνειες μια κατασκευής, προκύπτει από τη σχέση:

$$w_i = q_p(z_i) \cdot c_{pi}$$

όπου:

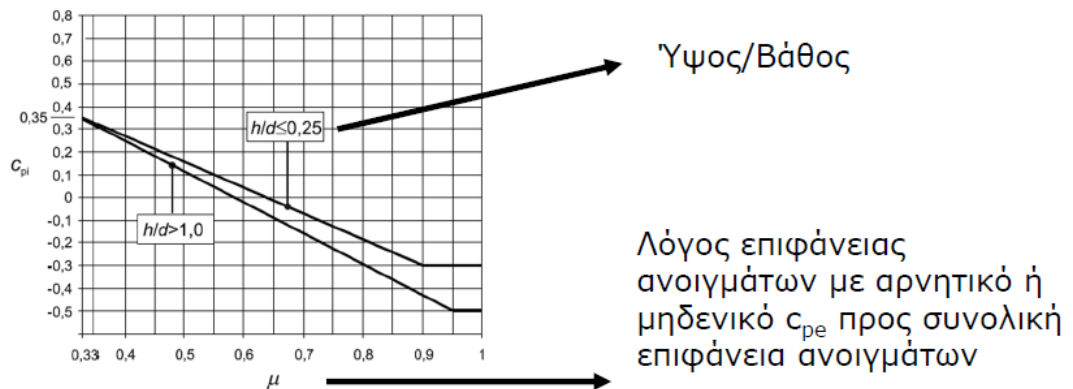
$q_p(z_i)$ είναι η πίεση ταχύτητας αιχμής

z_i είναι το ύψος αναφοράς για την εσωτερική πίεση

c_{pi} είναι ο συντελεστής εσωτερικής πίεσης

Ο συντελεστής c_{pi} σχετίζεται με την κατανομή των ανοιγμάτων σε κάθε πλευρά του κτιρίου. Καθοριστική ορίζεται η πλευρά που η επιφάνεια των ανοιγμάτων της είναι διπλάσια των επιφανειών των ανοιγμάτων των υπολοίπων πλευρών.

Για κτίρια χωρίς καθοριστική πλευρά, ορίζεται ο συντελεστής μ ως ο λόγος των επιφανειών με μηδενικό ή αρνητικό c_{pe} προς τη συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων. Από το παρακάτω διάγραμμα λαμβάνεται και η τιμή του c_{pi} .



Αν τελικώς δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή μ , τότε λαμβάνεται $c_{pi} = +0,2$ ή $-0,3$ (όποιο είναι δυσμενέστερο)

Πίεση ταχύτητας αιχμής:

Η πίεση ταχύτητας αιχμής σε ύψος z , η οποία περιλαμβάνει μέσες και μικρή διάρκειας διακυμάνσεις ταχύτητας προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b$$

Όπου:

ρ είναι η πυκνότητα του αέρα που εξαρτάται από το υψόμετρο, τη θερμοκρασία και τη βαρομετρική πίεση που αναμένονται σε μια περιοχή κατά τη διάρκεια ανεμοθύελλας.

$$(\rho = 1,25 \text{ Kg/m}^3)$$

$I_v(z)$ είναι η ένταση του στροβιλισμού σε ύψος z

$c_e(z)$ είναι ο συντελεστής έκθεσης που δίνεται από τη σχέση:

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b}$$

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2$$

Όπου:

q_b είναι η βασική πίεση

v_b είναι η βασική ταχύτητα ανέμου, η οποία ορίζεται ως συνάρτηση της διεύθυνσης του ανέμου και της εποχής του ανέμου και την εποχή του έτους στα 10m πάνω από το έδαφος κατηγορίας II, σύμφωνα με τη σχέση:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} v_{b,0}$$

Όπου:

c_{dir} είναι ο συντελεστής διεύθυνσης (ίσος με 1,0)

c_{season} είναι ο συντελεστής εποχής (ίσος 1,0)

$V_{b,0}$ είναι η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας του ανέμου, η οποία είναι η χαρακτηριστική μέση ταχύτητα του ανέμου 10 λεπτών ανεξάρτητα από τη διεύθυνση του και την εποχή του έτους στα 10 m πάνω από το έδαφος

Σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα, η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας του ανέμου $v_{b,0}$ για την χώρα μας ορίζεται σε 33 m/s για τα νησιά και τα παράλια μέχρι 10 km από την ακτή και σε 27 m/s για την υπόλοιπη χώρα.

Η μέση ταχύτητα του ανέμου $V_m(z)$ σε ύψος z πάνω από το έδαφος εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους και την τοπογραφική διαμόρφωση και προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b$$

Όπου:

$C_0(z)$ είναι ο συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης (προτεινόμενη τιμή 1,00)

V_b είναι η βασική ταχύτητα ανέμου (=33m/s)

$C_r(z)$ είναι ο συντελεστής τραχύτητας

Ο συντελεστής τραχύτητας $C_r(z)$ λαμβάνει υπόψιν τη μεταβλητότητα της μέσης ταχύτητας ανέμου της θέσης της κατασκευής λόγω του ύψους πάνω από το έδαφος και λόγω της τραχύτητας του εδάφους της προσήνεμης περιοχής στη θεωρούμενη διεύθυνση του ανέμου, υπολογίζεται δε συναρτήσει του ύψους z με τις ακόλουθες λογαριθμικές σχέσεις:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ για } z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \text{ για } z \leq z_{\min}$$

Όπου k_r είναι ο συντελεστής εδάφους που δίνεται από την σχέση:

$$k_r = 0,19 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)^{0,07}$$

Στις παραπάνω σχέσεις ισχύει:

Z_0 είναι το μήκος τραχύτητας σε m όπως ορίζεται στον παράτω πίνακα

Z_{\min} είναι το ελάχιστο ύψος όπως ορίζεται στον παράτω πίνακα

Z_{\max} λαμβάνεται ίσο προς 200m

Κατηγορία εδάφους	z_0 (m)	z_{\min} (m)
0 Θάλασσα ή παράκτια περιοχή ανοικτής θάλασσας.	0,003	1
I Λίμνες ή επίπεδες και οριζόντιες περιοχές με αμελητέα βλάστηση και χωρίς εμπόδια.	0,01	1
II Περιοχή με χαμηλή βλάστηση όπως γρασίδι και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτίρια) με απόσταση τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων.	0,05	2
III Περιοχή με κανονική κάλυψη βλάστησης ή με κτίρια ή με μεμονωμένα εμπόδια με μέγιστη απόσταση το πολύ 20 φορές το ύψος των εμποδίων (όπως χωριά, προάστια, μόνιμα δάση).	0,3	5
IV Περιοχή όπου τουλάχιστον το 15% της επιφάνειας καλύπτεται με κτίρια των οποίων το μέσο ύψος ξεπερνά τα 15m.	1,0	10

Η ένταση συμβολισμού $I_v(z)$ σε ύψος z υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad \text{για } z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{για } z \leq z_{\min}$$

Δυναμικός συντελεστής $C_s C_d$

Προκειμένου να γίνει ο προσδιορισμός των δυνάμεων, οι οποίες ενεργούν σε μια κατασκευή και προέρχονται από ανεμοπίεση, πρέπει να προσδιορίζεται ο δυναμικός συντελεστής $C_s C_d$. Ο συντελεστής αυτός απαρτίζεται από δύο επιμέρους παραμέτρους την παράμετρο μεγέθους C_s , η οποία λαμβάνει υπόψη τη μειωτική επίδραση στη δράση του ανέμου λόγω μη ταυτόχρονης ύπαρξης των πιέσεων αιχμής από άνεμο επί της επιφάνειας και τη δυναμική παράμετρο C_d , η οποία λαμβάνει υπόψη την αυξημένη επίδραση από ταλαντώσεις λόγω στροβιλισμού.

Ο δυναμικός συντελεστής εξαρτάται από τον τύπο της κατασκευής και από το ύψος και το πλάτος της, μπορεί δε να εκτιμηθεί είτε με τη βοήθεια διαγραμμάτων ή, εφόσον είναι μεγαλύτερος από 1,10, με λεπτομερή διαδικασία που περιγράφεται στο Μέρος 1-4 του Ευρωκώδικα 1.

Συντελεστής εξωτερικής πίεσης C_{pe}

Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης C_{pe} εξαρτώνται από τις διαστάσεις της φορτιζόμενης επιφάνειας A και δίνονται παρακάτω για δυο χαρακτηριστικές τιμές της, για $1m^2$ και για $10m^2$.

Ως φορτιζόμενη θεωρείται η επιφάνεια η οποία μεταφέρει στο εξεταζόμενο στοιχείο της κατασκευής τη δράση της ανεμοπίεσης και προκαλεί την αντίστοιχη καταπόνησή του.

Στο σχήμα φαίνεται η γραφική απεικόνιση της μεταβολής της πίεσης C_{pe} συναρτήσει της φορτιζόμενης επιφάνειας.

$$\text{για } A \leq 1 \text{ m}^2 \quad \text{είναι } c_{pe} = c_{pe,1}$$

$$\text{για } 1 \text{ m}^2 \leq A \leq 10 \text{ m}^2 \quad \text{είναι } c_{pe} = c_{pe,1} + (c_{pe,10} - c_{pe,1}) \log_{10} A$$

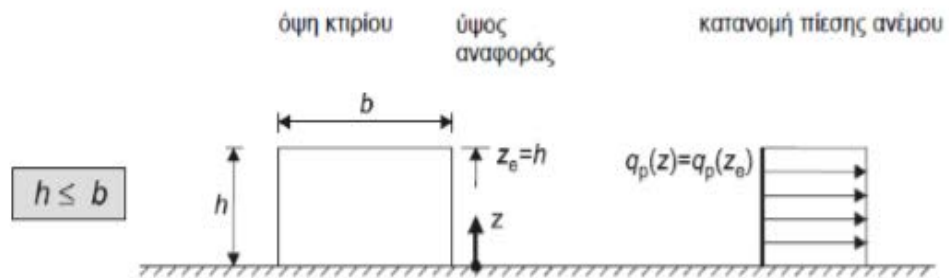
$$\text{για } A \geq 10 \text{ m}^2 \quad \text{είναι } c_{pe} = c_{pe,10}$$

Οι φορτιζόμενες επιφάνειες χωρίζονται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1 στις εξής κατηγορίες:

- | | |
|------|---|
| I. | Κατακόρυφοι τοίχοι κτιρίων με ορθογωνική κάτοψη |
| II. | Οριζόντιες στέγες |
| III. | Μονόκλινες στέγες |
| IV. | Δίκλινες στέγες |
| V. | Τετράκλινες στέγες |
| VI. | Επαναλαμβανόμενες στέγες |
| VII. | Κυλινδρικές στέγες και θόλοι |

Κατακόρυφοι τοίχοι κτιρίων με ορθογωνική κάτοψη

Στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 3.4) φαίνεται ο τρόπος προσδιορισμού του ύψους αναφοράς z_e για τους προσήνεμους τοίχους ανάλογα με τη σχέση μεταξύ του ύψους h και του b του κτιρίου. Δεδομένου ότι ισχύει $h=13,5 < b=20\text{m}$ ή 121m (b είναι πάντα η εγκάρσια διάσταση στον άνεμο και άρα μεταβάλλεται ανάλογα με τη διεύθυνση του ανέμου(0,90ο)) προκύπτει ότι $z_e=h$.

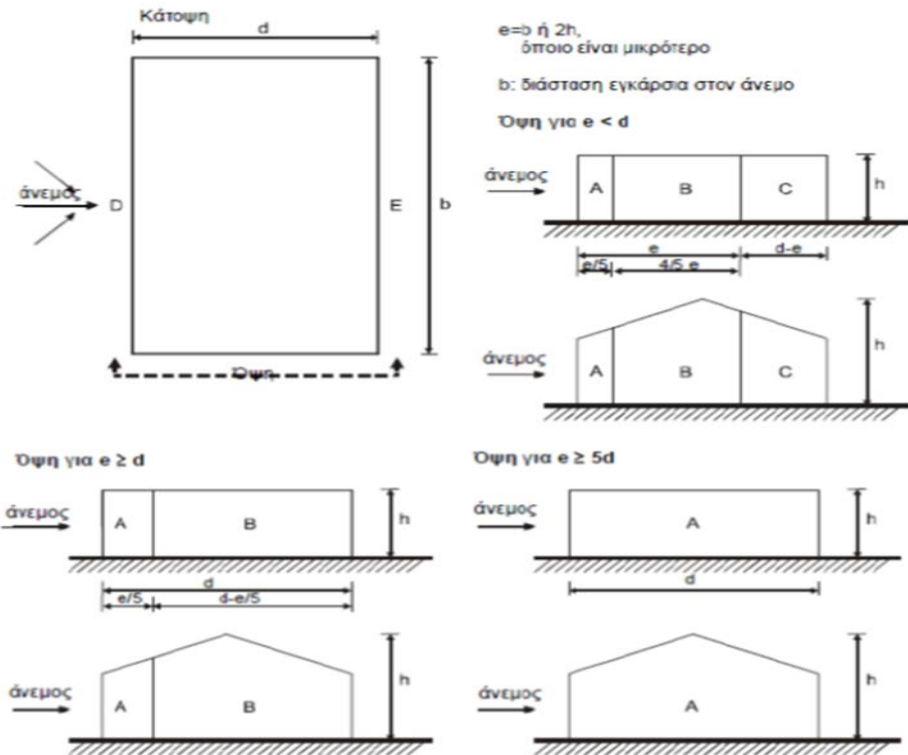


Σχ. 3.4. Φόρτιση προσήνεμου κατακόρυφου τοίχου

Για τον υπήνεμο τοίχο και τους παράπλευρους τοίχους το ύψος αναφοράς λαμβάνεται ίσο προς το ύψος του κτιρίου. Στον Πίνακα 3.5 δίνονται οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης $C_{pe,10}$ και $C_{pe,1}$, οι οποίοι αντιστοιχούν στους κατακόρυφους τοίχους των ορθογωνικών κτιρίων, σύμφωνα με τον συμβολισμό του σχήματος.

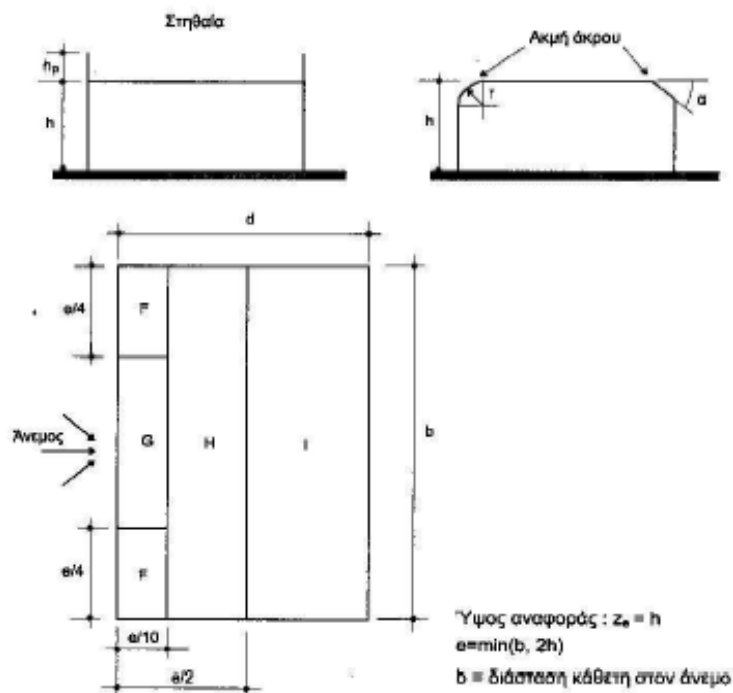
Ζώνη										
/d	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
	1.2	1.4	0.8	1.1	-0.5		.8			-0.7
	1.2	1.4	0.8	1.1	-0.5		.8			-0.5
0,25	1.2	1.4	0.8	1.1	-0.5		.7			-0.3
Για ενδιάμεσες τιμές του h/d θα χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή										

Πιν. 3.5 Συντελεστές εξωτερικής πίεσης για κατακόρυφους τοίχους ορθογωνικών κτιρίων



Σχ. 3.6. Επιφάνειες φόρτισης κατακόρυφων τοίχων από άνεμο
Οριζόντιες στέγες κτιρίων

Οριζόντιες οροφές (Σχήμα 3.7) θεωρούνται οι οροφές με κλίση μέχρι 5° ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Οι εξωτερικές πιέσεις δίνονται στον παρακάτω πίνακα. Για οροφές μεγάλης επιφάνειας θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι δυνάμεις τριβής.



Σχ. 3.7. Φόρτιση ανέμου για οριζόντιες στέγες

ΖΩΝΗ										
		F		G		H		I		
		$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	
Αιχμηρά άκρα		1.8	-	2.5	-	1.2	2.0	0.7	1.2	± 0.2
Με στηθαία	h_p/h =0,025	1.6	-	2.2	-	1.1	1.8	0.7	1.2	± 0.2
	h_p/h =0,05	1.4	-	2.0	-	0.9	1.6	0.7	1.2	± 0.2
	h_p/h =0,10	1.2	-	1.8	-	0.8	1.4	0.7	1.2	± 0.2
Με καμπύλα άκρα	h_p/h =0,05	1.0	-	1.5	-	1.2	1.8	-0.4		± 0.2
	h_p/h =0,1	0.7	-	1.2	-	0.8	1.4	-0.3		± 0.2
	h_p/h =0,2	0.5	-	0.8	-	0.5	0.8	-0.3		± 0.2
Με κεκλιμένα άκρα	h_p/h =30°	1.0	-	1.5	-	1.0	1.5	-0.3		± 0.2
	h_p/h =45°	1.2	-	1.8	-	1.3	1.9	-0.4		± 0.2
	h_p/h =60°	1.3	-	1.9	-	1.3	1.9	-0.5		± 0.2

Πιν 3.8. Τιμές των $c_{pe,10}$ - $c_{pe,1}$ για οριζόντιες στέγες

4. Ανάλυση του υπό μελέτη κτιρίου

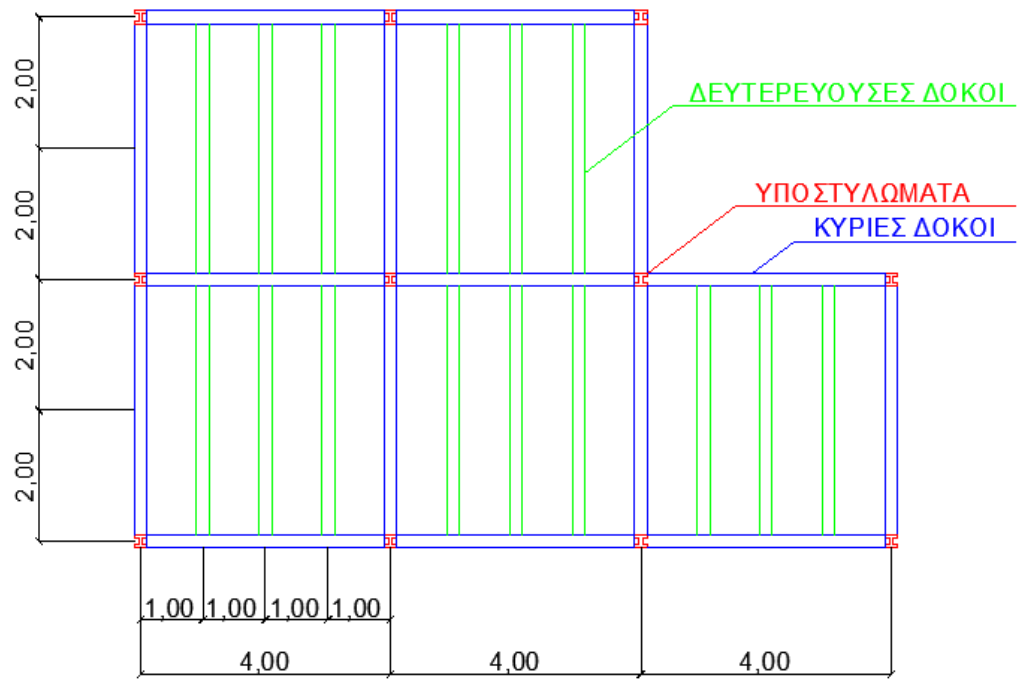
4.1. Περιγραφή της γεωμετρίας του κτιρίου

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τον σχεδιασμό ενός διώροφου κτιρίου του οποίου ο φέρων οργανισμός αποτελείται αποκλειστικά από ινοπλισμένα πολυμερή (FRP pultruded profiles). Αναλυτικά, τα επιμέρους μέλη του φορέα της κατασκευής είναι τα εξής:

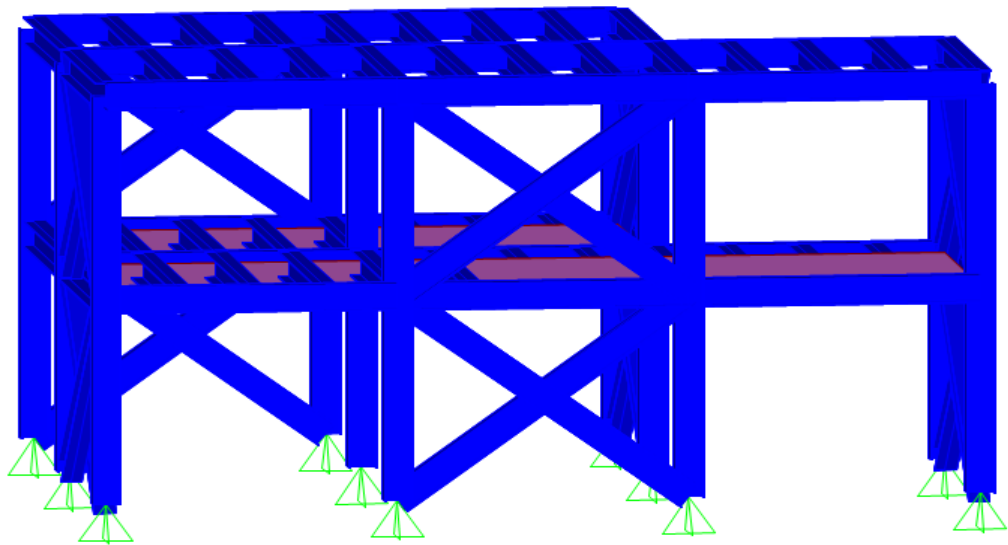
- Κύριες δοκοί διατομής I
- Δευτερεύουσες δοκοί οι οποίες εδράζονται επί των κύριων δοκών διατομής I
- Υποστυλώματα διατομής κοίλης ορθογωνικής διατομής
- Διαγώνιοι χιαστοί συνδέσμοι δυσκαμψίας για την παραλαβή των πλευρικών φορτίων διατομής U
- Κατάστρωμα δαπέδου (flooring deck) το οποίο υποστηρίζεται από τις δοκούς και συμβάλει μέσω της μεγάλης δυσκαμψίας του στην εξασφάλιση της διαφραγματικής λειτουργίας της ανωδομής.

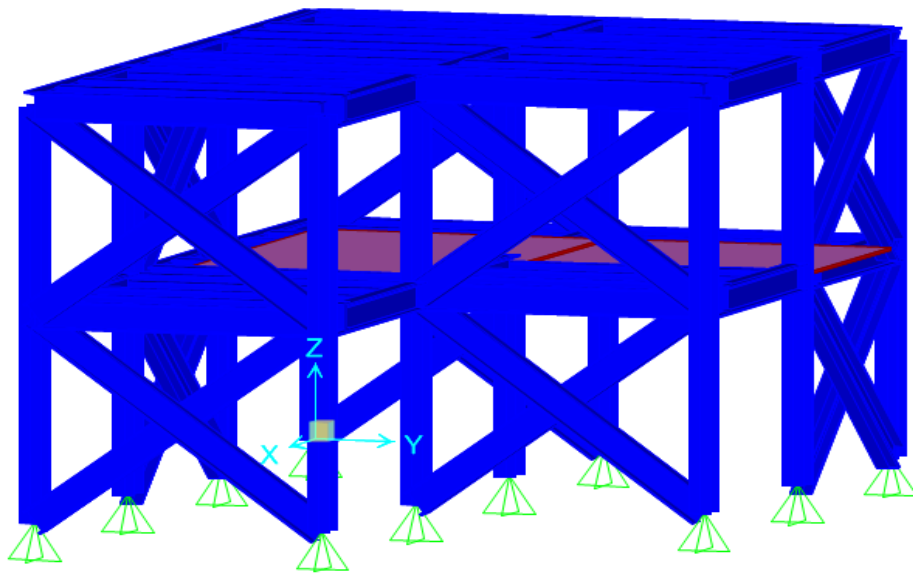
Τόσο το σύνολο των δοκών (κυρίων, δευτερευόντων) και των υποστυλωμάτων όσο και οι πλάκες σχεδιάστηκαν από πολυμερές με ίνες γυαλιού (υλικό GFRP). Το κτίριο έχει πολυγωνική κάτοψη μορφής L και τα επιμέρους ανοίγματα των κύριων δοκών είναι τέσσερα (4) μέτρα (Σχ. 4.1). Οι δευτερεύουσες δοκοί είναι τοποθετημένες ανά 1,00 m και έχουν και αυτές μήκος 4 m. Η σύνδεση δευτερευουσών–κυρίων δοκών είναι σύνδεση τέμνουσας όπως και η σύνδεση δοκών-υποστηλωμάτων. Τα υποστυλώματα με την σειρά τους συνδέονται αρθρωτά στη θεμελίωση.

Το συνολικό ύψος του κτιρίου ισούται με έξι (6) μέτρα και η στέγη είναι κατακόρυφη με στηθαίο στις άκρες της. Για την μόρφωση του μοντέλου της γέφυρας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Sap2000. Το πρώτο στάδιο της εισαγωγής του μοντέλου στο πρόγραμμα αποτελεί η καταχώρηση των ραβδωτών στοιχείων. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός των δράσεων του φορέα σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 (EC8, Part 1) και εισάχθηκαν ως φορτίσεις στο πρόγραμμα. Η τελική προσομοίωση του των κύριων δοκών και των διαδοκίδων επιτυγχάνεται με τη συμπλήρωση του υλικού και του πάχους κάθε στοιχείου. Η γεωμετρία του μοντέλου φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα.



Σχ. 4.1. Κάτοψη μεταλότυπου





Σχ.4.2-4.3. Γεωμετρία φορέα κατασκευής

4.2.Υλικά κατασκευής

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι κατασκευασμένα από την εταιρεία Creative Pultrusions. Η εταιρεία Creative Pultrusions ειδικεύεται στην παραγωγή τυποποιημένων διατομών από ινοπλισμένα πολυμερή με ίνες γυαλιού (GFRP pultruded profiles) μέσω της διαδικασίας παραγωγής με έλξη (pultrusion). Οι διατομές αυτές μπορεί να είναι μορφής L, I, H, κοίλης ορθογωνικής ή κυκλικής και ανήκουν στην σειρά The New and Improved Pultrex. Υπενθυμίζεται ότι κατά την διαδικασία της παραγωγής με έλξη (pultrusion), ίνες από διάφορα υλικά (γυαλί, άνθρακας) σε μορφή ρολού ενώνονται με λεπτά επιφανειακά ελάσματα(mat) χρησιμοποιώντας ως μήτρα του πολυμερούς την ρυτίνη. Η ειδικά διαμορφωμένη ρυτινική μήτρα προσφέρει αντοχή σε διάβρωση με χρήση του vinyl ester.

Παρακάτω δίδεται ο αναλυτικός πίνακας των υλικών Pultrex 1500/1525 Series και 1625 Series.

Για το κατάστρωμα των ορόφων χρησιμοποιήθηκε flooring deck της Fiberline.

MATERIAL PROPERTIES

Pultex[®] Fiber Reinforced Polymer **SuperStructural** Profiles *Wide Flange Sections and I-Sections*

1500 Series - Thermoset Polyester – Olive Green

1525 Series - Thermoset Polyester Class 1 FR – Slate Gray (Dark Gray)

1625 Series - Thermoset Vinyl Ester Class 1 FR – Beige

Pultex[®] **SuperStructural** Profiles are identified with
imprinted veil.

The following data was derived from ASTM coupon and full section testing. The results are average values based on random sampling and testing of production lots. Composite materials are not homogeneous; and therefore, the location of the coupon extraction can cause variances in the coupon test results. Creative Pultrusions publishes an average value of random samples from production lots.

Property (coupon values)	ASTM Test	Units	1500/1525 Series	1625 Series
Full Section				
Modulus of Elasticity (1/2" thick profiles)	Full Section ²	10 ⁶ psi	3.9-4.0	3.9-4.0
(1/4" & 3/8" thick profiles)	Full Section ²	10 ⁶ psi	3.9	3.9
Shear Modulus (Modulus of Rigidity)	Full Section ²	10 ⁶ psi	4.0	4.0
Flexural Strength	Full Section ²	psi	0.50	0.50
			33,000	33,000
Flange Section - Mechanical				
Tensile Strength (LW)	D638	psi	40,000	46,000
Tensile Modulus (LW)	D638	10 ⁶ psi	4.16	4.16
Compressive Strength (LW)	D695	psi	45,770	52,500
Compressive Strength (CW)	D695	psi	17,800	20,400
Compressive Modulus (LW)	D695	10 ⁶ psi	3.85	3.85
Compressive Modulus (CW)	D695	10 ⁶ psi	1.9	1.9
Flexural Strength (LW)	D790	psi	42,800	49,200
Flexural Modulus (LW)	D790	10 ⁶ psi	2.0	2.0
Interlaminar Shear (LW) ⁵	D2344	psi	4,000	4,500
Shear Strength By Punch (PF)	D732	ppi	5,500	6,000
Notched Izod Impact (LW)	D256	ft-lbs/in	28	32
Notched Izod Impact (CW)	D256	ft-lbs/in	21	24
Maximum Bearing Strength (LW)	D953	psi	33,000	38,000
Maximum Bearing Strength (CW) ³	D953	psi	23,000	26,500
Poisson's Ratio (LW)	D3039	in/in	0.35	0.35
Poisson's Ratio (CW)	D3039	in/in	0.12	0.12
Web Section - Mechanical				
Tensile Strength (LW)	D638	psi	30,300	35,000
Tensile Strength (CW)	D638	psi	10,500	12,000
Tensile Modulus (LW)	D638	10 ⁶ psi	3.1	3.1
Tensile Modulus (CW)	D638	10 ⁶ psi	1.4	1.4
Compressive Strength (LW)	D695	psi	37,500	43,125
Compressive Strength (CW)	D695	psi	14,200	16,330

Property (coupon values)	ASTM Test	Units	1500/1525 Series	1625 Series
Web Section - Mechanical				
Compressive Modulus (LW)	D695	10 ⁶ psi	2.8	2.8
Compressive Modulus (CW)	D695	10 ⁶ psi	1.9	1.9
Flexural Strength (LW)	D790	psi	43,320	49,800
Flexural Strength (CW)	D790	psi	17,360	19,900
Flexural Modulus (LW)	D790	10 ⁶ psi	1.9	1.9
Flexural Modulus (CW)	D790	10 ⁶ psi	1.75	1.75
Interlaminar Shear (LW) ⁵	D2344	psi	3,400	3,900
Shear Strength By Punch (PF)	D732	psi	5,500	6,000
Notched Izod Impact (LW)	D256	ft-lbs/in	38	43
Notched Izod Impact (CW)	D256	ft-lbs/in	19	22
Maximum Bearing Strength (LW)	D953	psi	33,980	39,000
Maximum Bearing Strength (CW) ³	D953	psi	30,000	34,500
Poisson's Ratio (LW)	D3039	in/in	0.35	0.35
Poisson's Ratio (CW)	D3039	in/in	0.12	0.12
In-plane Shear (LW)	Modified D2344 ⁴	psi	7,000	7,000
Physical				
Barcol Hardness ¹	D2583		33	39
Water Absorption	D570	% Max	0.6	0.6
Density	D792	lbs/in ³	0.060-0.070	0.060-0.070
Specific Gravity	D792		1.66-1.93	1.66-1.93
Coefficient of Thermal Expansion (LW)	D696	10 ⁻⁶ in/in/°F	4.4	4.4
Thermal Conductivity (PF)	C177	BTU-in/ft ² /hr/°F	4	4
Electrical				
Arc Resistance (LW)	D495	seconds	120	120
Dielectric Strength (LW)	D149	KV/in	40	40
Dielectric Strength (PF)	D149	volts/mil	200	200
Dielectric Constant (PF)	D150	@60Hz	5.2	5.2

LW = lengthwise

CW = crosswise

PF = perpendicular to laminate face

¹Pultex® uses a synthetic veil that reduces the Barcol Hardness, but does not reflect lack of cure.

²Full section testing is based on a 3-point bend with simply supported end conditions (Reference *The New and Improved Pultex® Pultrusion Global Design Manual* Appendix for details).

³Crosswise bearing strength of the Web sections of 1.4" profiles = 20,500 psi.

⁴Follow ASTM D2344, but rotate coupon 90° (cut section of coupon length faces up).

⁵Tested on a 3:1, span to depth ratio.

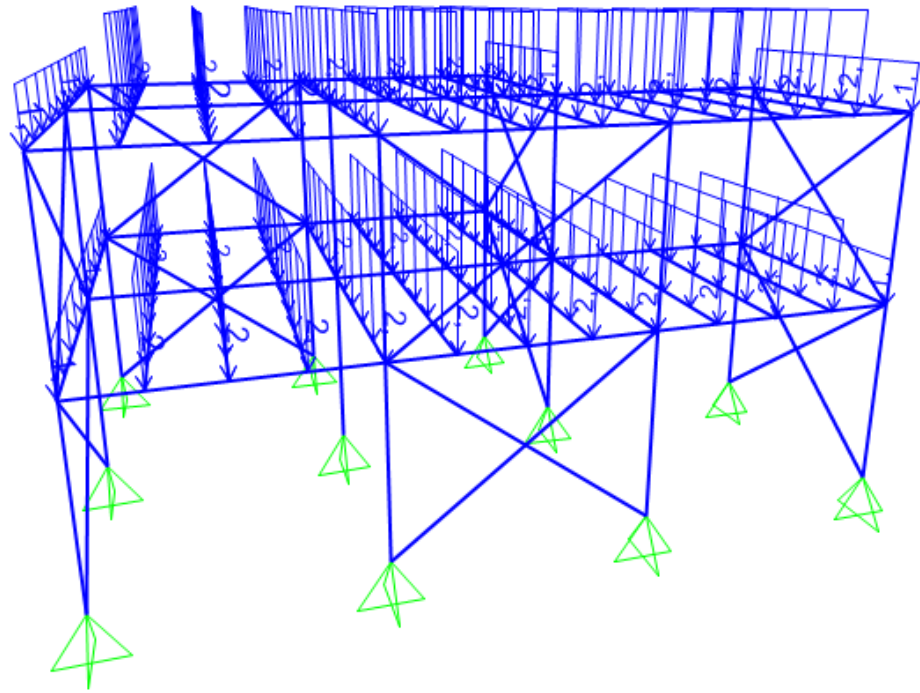
Πίνακας 4.4. Ιδιότητες χρησιμοποιηθέντων υλικών

4.3. Τα φορτία στην κατασκευή

Κατακόρυφα φορτία βαρύτητας

Για την διαστασιολόγηση των κύριων και δευτερευουσών δοκών των ορόφων πραγματοποιήθηκε έλεγχος αρχικά στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ) και έπειτα στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΑ). Τα φορτία υπολογίστηκαν από τους συνδυασμούς φόρτισης και σύμφωνα με τους συντελεστές που ορίζει ο ευρωκώδικας όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3. Η αποτύπωση των κατακόρυφων φορτίων στο SAP2000 έγινε ως γραμμικά κατανεμημένα φορτία κατά μήκος των δοκών και των διαδοκίδων. Η μετατροπή των επιφανειακών μονίμων (βάρος πλάκας, επικαλύψεις) και μεταβλητών (κινητό οροφου, χιόνι στέγης) φορτίων σε γραμμικά κατανεμημένα έγινε με την χρήση ζωνών επιρροής πλάτους 1 m. Τα φορτία που λήφθηκαν υπόψη είναι:

1. $G_{\text{επικ}} = 0,5 \text{ kN/m}^2$
2. $G_{\text{deck}} = 0,185 \text{ kN/m}$
3. $Q_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$



Σχ. 4.5. Διανομή των κατανεμημένων επιφανειακών φορτίων κατά μήκος των δοκών με πλάτος επιρροής 1,00 m

Φορτίο χιονιού

Το χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού υπολογίστηκε ίσο με $S = 0,788 \text{ kN/m}^2$ σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1 όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 3.3 της παρούσας εργασίας. Ο συντελεστής φορτίου στέγης $\mu = 1,00$, $z=0,81 \text{ kN/m}^2$, $A=1100 \text{ m}$ και $C_e, C_t = 1,00$.

$$s_k = (0,42z - 0,03) \cdot \left[1 + \left(\frac{A}{917} \right)^2 \right] = 0,788 \text{ kN/m}^2$$

Άρα, $S = \mu C_t C_e s_k = 0,788 \text{ kN/m}^2$

Φορτίο ανέμου

Ο άνεμος υπολογίστηκε όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3.4, δηλαδή υπολογίστηκαν οι συντελεστές εξωτερικής πίεσεως C_{pe} και εσωτερικής πίεσεως C_{pi} οι οποίες δρουν επί των κατακόρυφων τοίχων και επί της στέγης. Ο Ευρωκώδικας όμως δίνει τους συντελεστές αυτούς για κτίρια ορθογωνικής κατόψεως ενώ το κτίριο μελέτης είναι μορφής L. Παρόλο αυτά, ενδείκνυται σε αυτές τις περιπτώσεις όσον αφορά τις στέγες που αναφέρονται στην κάτοψη να χωρίζεται η συνολική κάτοψη σε επιμέρους ορθογώνια.

Θεωρήθηκε $cs \cdot cd = 1,00$. (Βλέπε κεφάλαιο 3.4)

Υπολογίστηκε η ταχύτητα $v_m(z)$, για $c_o(z) = 1,00$ και $c_r(z) = k_r \cdot \ln(z/z_0) = 0,786$

Αφού $z = 6 \text{ m} > z_{min} = 5 \text{ m}$ για έδαφος κατηγορίας III. (Βλέπε κεφάλαιο 3.4)

$$V_m(z) = 0,786 \cdot 1,00 \cdot 27 = 21,22 \text{ m / sec}$$

$$I_v(z) = 0,339$$

$$\text{Και } q_p(z) = (1+7 \cdot 0,339) \cdot 0,5 \cdot 1,25 \cdot 21,22^2 = 0,950$$

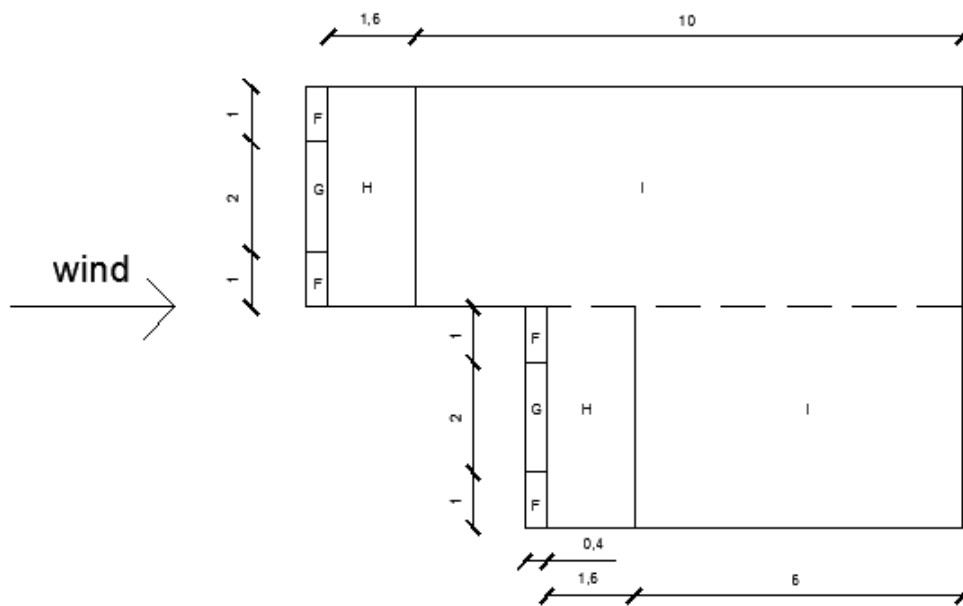
Για να υπολογίσουμε τους συντελεστές πιέσεων, εσωτερικής και εξωτερικής πίεσης, χωρίσαμε τις κατόψεις που φαίνονται από κάτω σε 4 ορθογώνια, 2 για κάθε φορά του ανέμου και υπολογίσαμε τα $C_{pe}, 10$ για κάθε κατακόρυφο τοίχο (αφού $A > 10 \text{m}^2$). Στην $\Theta = 0^\circ$ αντιστοιχούν τα ορθογώνια 1,2 και στην $\theta = 90^\circ$ αντιστοιχούν τα 3,4 (χωρίζονται μεταξύ τους με διακεκομμένη). Τα ορθογώνια 1,2,3 έχουν $z_e = 6 \text{ m}$ και οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης υπολογίζονται εύκολα ενώ το τέταρτο που έχει διαστάσεις κατόψεως $4 \times 4 \text{ m}^2$, ύψος 6 m , έχει 2 φορτίσεις $q_p(z)$. Η μία για $z_e = 4 \text{ m}$ μας δίνει φορτίο $q_p(z=4) = 0,865$ ενώ για ύψος $z > 4 \text{ m}$ το ορθογώνιο αυτό δέχεται πίεση $q_p(z=6)$ το οποίο έχει υπολογιστεί και για τα άλλα ορθογώνια. Τέλος, σε κάθε επιμέρους εξωτερική πίεση. Επειδή δεν είναι ευχερής ο υπολογισμός του λόγου μ όταν δεν ξέρουμε τον αριθμό των ανοιγμάτων (Βλέπε κεφάλαιο 3.4), στις πιέσεις C_{pe} αφαιρέσαμε όπου είναι θετικές (D επιφάνειες στους κατακόρυφους τοίχους) τον $C_{pi} = -0,3$ ενώ όπου οι πιέσεις C_{pe} είναι αρνητικές (A, B, C, D, E στους κατακόρυφους τοίχους), αφαιρέσαμε το $C_{pi} = +0,2$. Ο τελικός πίνακας συντελεστών πιέσεων είναι ο εξής:

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ $\Theta = 0^\circ$:

$W_{τελ} = (C_{pe} - C_{pi}) q_p(z)$, αν $C_{pe} < 0$ και $C_{pi} = +0,2$

$W_{τελ} = (C_{pe} - C_{pi}) q_p(z)$, αν $C_{pe} > 0$ και $C_{pi} = -0,3$

W _{τελ}	Ορθογώνιο	A	B	C	D	E	F	G	H	I
$z_e = 6 \text{ m}$	1	-1,33	-0,95	0,665	1,014	0,601	1,52	1,09	0,855	0,38
$z_e = 6 \text{ m}$	2	-1,33	-0,95	0,665	0,981	0,539	1,52	1,09	0,855	0,38



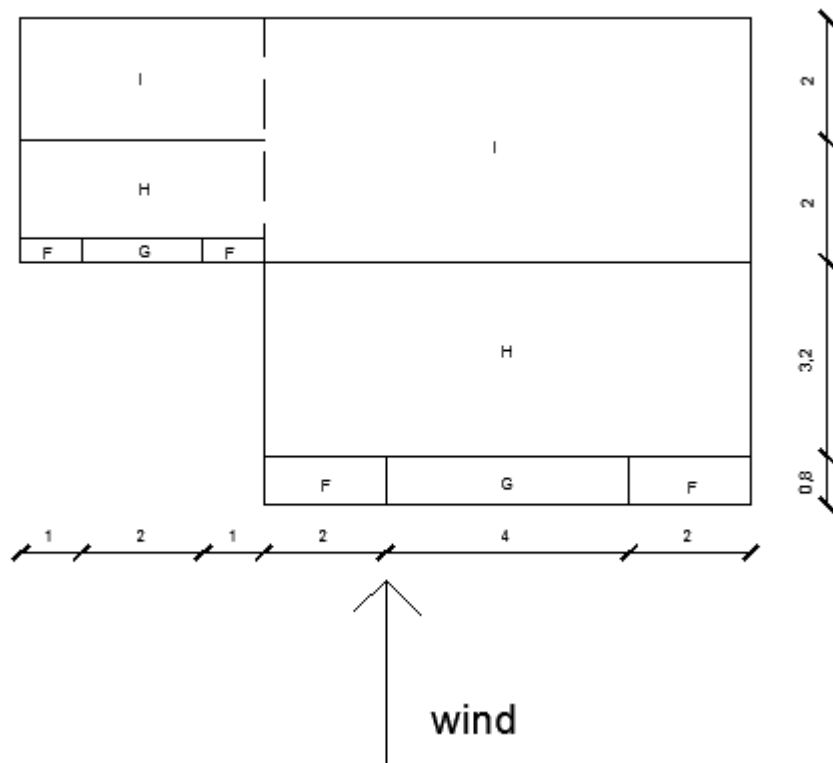
Σχ 4.6. Κάτοψη φόρτισης στέγης για $\Theta=0^0$

Δίδεται η σχηματική απεικόνιση χωρισμού της στέγης

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ $\Theta=90^0$:

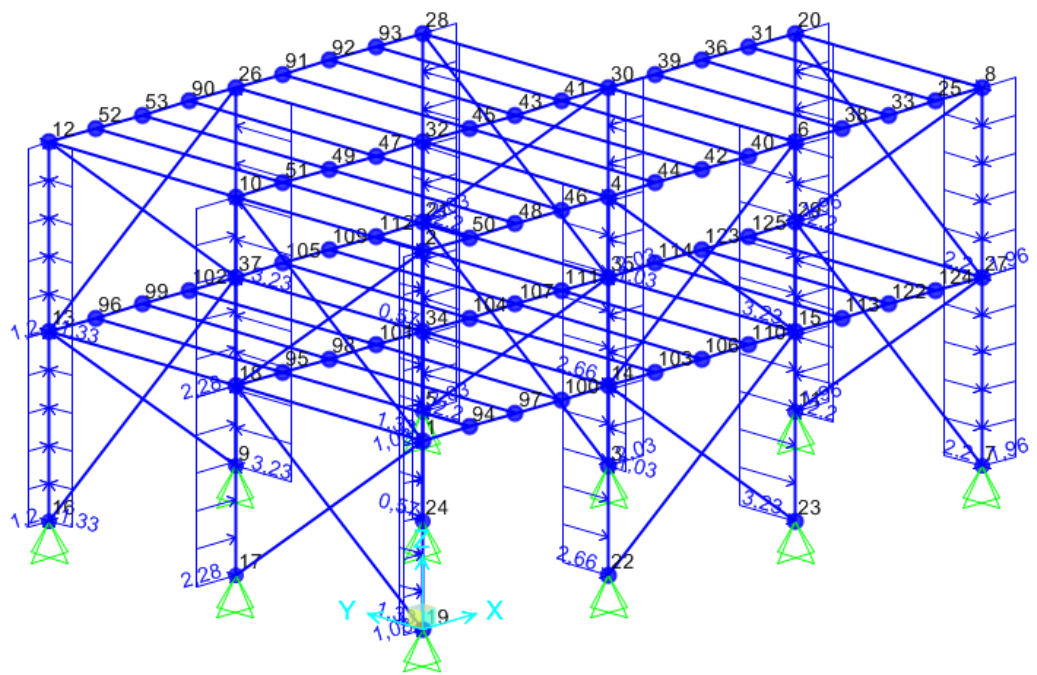
Αντίστοιχα δουλέψαμε και σε αυτήν την περίπτωση και προκύπτει ο πίνακας:

Wτελ	Ορθογώνιο	A	B	C	D	E	F	G	H	I
$z_e = 6 \text{ m}$	3	-1,33	-0,95	-	1,014	-0,601	-1,52	-1,09	-0,855	-0,38
$z_e = 4 \text{ m}$	4	-1,211	-0,865		1,045	-0,627	-1,52	-1,09	-0,855	-0,38
$z_e = 6 \text{ m}$		-1,33	-0,95		1,014	-0,601				

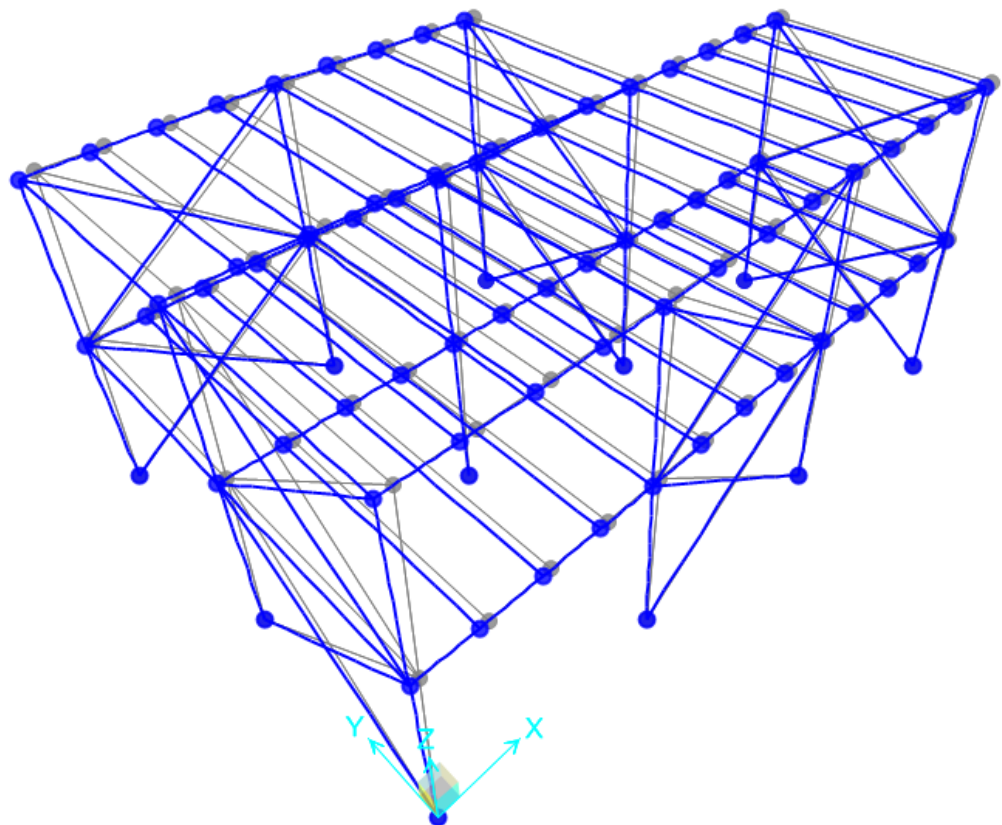


Σχ 4.7. Κάτοψη φόρτισης στέγης για $\Theta=90^\circ$

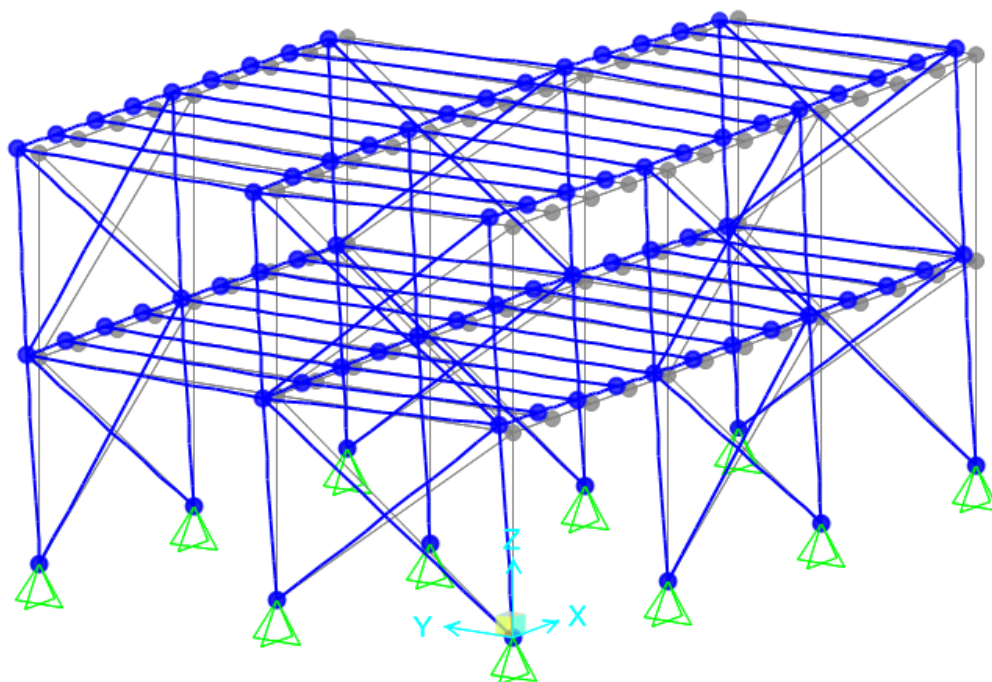
Τα φορτία Wτελ αναλύθηκαν στο μοντέλο ως γραμμικά σε κάθε υποσύλωμα και με πλάτος ζώνης επιρροής ανάλογα σε ποιο σημείο (A, B, C, D, E) βρίσκονται. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι οι πιέσεις στην οριζόντια στέγη αμελήθηκαν γιατί έχουν ευμενή επιρροή ως προς τα φορτία βαρύτητας.



Σχ.4.8. Ανάλυση φορτίων ανέμου στο πρόγραμμα SAP2000



Σχ.4.9. Παραμόρφωση φορέα για άνεμο $\theta=0^\circ$



Σχ. 4.10. Παραμόρφωση φορέα για άνεμο $\theta=90^\circ$

4.4. Συνδυασμοί φορτίσεων

Οι συνδυασμοί φορτίσεων που λήφθηκαν υπόψιν στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας είναι οι εξής:

- Επικρατέστερο μεταβλητό φορτίο τα κινητά ορόφων:
 $1,35G_k + 1,50Q_k + 1,50 \cdot 0,6W + 1,50 \cdot 0,2S$
 $1,35G_k + 1,50Q_k + 1,50 \cdot 0,2W + 1,50 \cdot 0,5S$
- Επικρατέστερο μεταβλητό φορτίο ο άνεμος
 $1,35G_k + 1,50 \cdot 0,7Q_k + 1,50W + 1,50 \cdot 0,2S$
 $1,35G_k + 1,50 \cdot 0,5Q_k + 1,50W + 1,50 \cdot 0,5S$
- Επικρατέστερο μεταβλητό φορτίο το χιόνι:
 $1,35G_k + 1,50 \cdot 0,7 \cdot Q_k + 1,50 \cdot 0,2 W + 1,50S$
 $1,35G_k + 1,50 \cdot 0,5 \cdot Q_k + 1,50 \cdot 0,6 W + 1,50S$

Αντίστοιχα στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας είναι οι εξής:

- Επικρατέστερο μεταβλητό φορτίο τα κινητά ορόφων:
 $1,00G_k + 1,00Q_k + 0,6W + 0,2S$
 $1,00G_k + 1,00Q_k + 0,2W + 0,5S$
- Επικρατέστερο μεταβλητό φορτίο ο άνεμος

$$1,00G_k + 0,7Q_k + 1,00W + 0,2S$$

$$1,00G_k + 0,5Q_k + 1,00W + 0,5S$$

- Επικρατέστερο μεταβλητό φορτίο το χιόνι:

$$1,00G_k + 0,7 \cdot Q_k + 0,2 W + 1,00S$$

$$1,00G_k + 0,5 \cdot Q_k + 0,6 W + 1,00S$$

5. Έλεγχος και διαστασιολόγηση μελών του φορέα

5.1.Εισαγωγή

Παρουσιάζεται η βάση σχεδιασμού των pultruded μελών του φορέα υπό τα δρώντα φορτία στην κατασκευή. Γίνεται η διαστασιολόγηση τους υπό την δυσμενέστερη καταπόνηση για κάθε μέλος και ελέγχεται η επάρκεια των επιλεγμένων διατομών. Για την διαστασιολόγηση χρησιμοποιήθηκαν κυρίως οι εμπειρικές σχέσεις που αφορούν τα μεγέθη αντοχής των διατομών από pultruded profiles, οι οποίες αναπτύχθηκαν κυρίως από εργαστηριακή δοκιμή και έρευνα. Λόγω της έλλειψης ενός κοινώς αποδεκτού κώδικα για την διαστασιολόγηση των pultruded profiles, άλλα και της αβεβαιότητας που υφίσταται για την συμπεριφορά του υλικού σε διάφορους εξωγενείς παράγοντες (θερμοκρασία, περιβάλλον) οι έλεγχοι αυτοί έχουν μια πολύ συντηρητική προσέγγιση. Η χρησιμοποίηση αυτών των ελέγχων έγινε σύμφωνα με τις προτάσεις του *Structural Plastics Design Manual* (ASCE, 1984) και του *Eurocomp Design Code and Handbook* (Eurocomp, 1996).

Σημειώνεται ότι για την διαστασιολόγηση των δευτερευουσών δοκών και των διαδοκίδων λήφθηκαν υπόψιν τα φορτία στη στάθμη του ορόφου και όχι της στέγης στην οποία μπορεί να δρα το χιόνι άλλα η πρόβλεψη για το κινητό φορτίο δαπέδου είναι μικρότερη. Συνεπώς οι ίδιες διατομές που υπολογίστηκαν στις δοκούς για την στάθμη του ορόφου θα τοποθετηθούν και στις δοκούς της στέγης.

Τέλος σε όλο τον σχεδιασμό ενώ τα φορτία υπολογισθήκαν σε μονάδες μέτρησης (kN, m) για την ευχέρεια των υπολογισμών στον έλεγχο και την εκλογή των διατομών χρησιμοποιήθηκαν οι μονάδες μέτρησης (lb, ft). Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού (E_{LT} , GLT) λαμβάνονται από τον Πίνακα 3.1.

5.2.2. Έλεγχος δευτερευουσών δοκών

Για τις δευτερεύουσες δοκούς του ορόφου υπολογίστηκε η διατομή από τον συνδυασμό φορτίσεων στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ). Ο έλεγχος των αναπτυσσόμενων βέλων κάμψης λόγω κάμψης και διάτμησης (Timoshenko beam), μας οδήγησε στην επιλογή της κατάλληλης διατομής, η οποία έπειτα ελέγχθηκε στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ). Υπολογίστηκαν τα βέλη κάμψης υπό τα μόνιμα φορτία για την χρονική στιγμή $t=0$, αλλά και για την $t=50$ έτη στα οποία ορίζεται ο χρόνος ζωής της κατασκευής. Η ευαισθησία των σύνθετων υλικών και δη των pultruded προφίλ σε ερπυστικές παραμορφώσεις δεν μπορεί να αγνοηθεί με την πάροδο του χρόνου. Παρόλα αυτά, στα pultruded προφίλ κατά το δυνατό μεγαλύτερη ύπαρξη οπλισμού (γυαλί, άνθρακας), έχει αποδείξει ότι μειώνει αισθητά τις ερπυστικές παραμορφώσεις αλλά προφανώς δεν μπορούν να αμεληθούν.

Όσον αφορά την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ), οι δευτερεύουσες δοκοί ελέγχθηκαν σε επίπεδο διατομής (κάμψη, διάτμηση κορμού) αλλά και σε επίπεδο μέλους (πλευρικός λυγισμός, τοπικός λυγισμός άνω θλιβόμενου πέλματος). Επίσης λόγω της ανισοτροπίας του υλικού και του μικρού μεγέθους μέτρου διάτμησης G_{LT} ελέγχθηκε και το τοπικός λυγισμός του κορμού λόγω διάτμησης.

5.2.3. Διαστασιολόγηση σε ΟΚΛ:

Η δυσμενέστερη αμφιέριστη διαδοκίδα μήκους $L=4$ m με πλάτος ζώνης επιρροής $1,00$ m, στην ΟΚΛ φορτίζεται με το κατανεμημένο φορτίο σχεδιασμού:

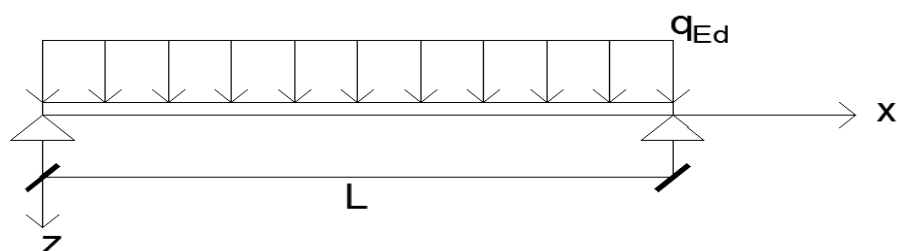
$$q_{Ed} = 1,00 \cdot (\text{γεπικ} + \text{γπλ} + \text{γδοκ}) + 1,00 \cdot q_k$$

όπου, γεπικ: βάρος επικαλύψεων $0,50$ kN/m

γπλ: βάρος της πλάκας καταστρώματος που εκτιμήθηκε σε $0,185$ kN/m

γδοκ: το ίδιο βάρος της δοκού που εκτιμήθηκε $0,100$ kN/m

qk: κινητό φορτίου χρήσης ορόφου $2,00$ kN/m



Άρα, $q_{Ed} = 1,00 \cdot (0,50 + 0,185 + 0,1) + 1,00 \cdot 2,00 = 2,785$ kN/m = $190,65$ lb/ft

μέγιστο επιτρεπόμενο βέλος: $\delta_{max} = L / 250 = 4000 / 250 = 16$ mm = $0,63$ in

Η απαιτούμενη διατομή για τον έλεγχο των βελών την $t=0$ προκύπτει από τον έλεγχο του βέλους λόγω κάμψης:

$$I_{y, reqd} = \frac{5q_{Ed}L^4}{384E_{LT}\delta_{max}} = \frac{5 \cdot (190,65 / 12) \cdot (13,12 \cdot 12)^4}{384 \cdot 39 \cdot 10^5 \cdot 0,63} = 51,75 \text{ in}^4 = 2154 \text{ cm}^4$$

Όπου $L = 4,00$ m = $13,12$ ft

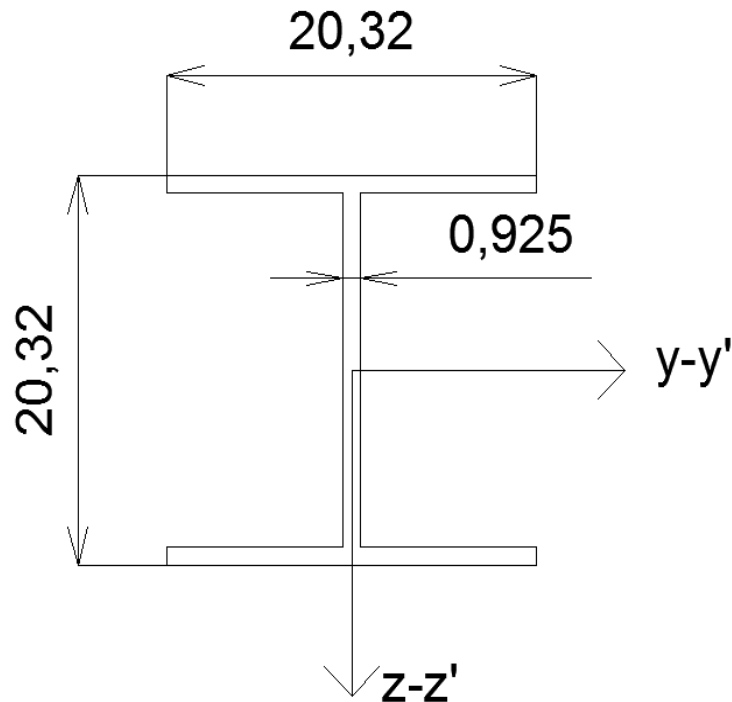
E_{LT} : είναι η χαρακτηριστική τιμή του διαμήκους μέτρου ελαστικότητας που δίνεται από τον κατασκευαστή.

Άρα επιλέγεται από τον πίνακα των I διατομών της σειράς Pultrex η διατομή IW860 με τα εξής χαρακτηριστικά:

h	b	f=tw	Are a	Weigh t	Y-Y'		Z-Z'		It	Iw
					I	W	I	W		
in	in	in	in ²	Lb/ft	in ⁴	in ³	in ⁴	in ³	in ⁴	in ⁶
8	8	0.375	8.82	7.77	100.35	25.09	31.65	7.91	0.422	506.46
cm	cm	mm	cm ²	Kg/m	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm ⁶
20.32	20.32	9.25	56.9	11.45	4176.88	411.5	1317.37	29.62	7.56	136002.675

Πίνακας 5.1

Δίνεται σκαρίφημα της επιλεγμένης διατομής στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.2

Υπολογίζεται το συνολικό βέλος κάμψης λόγω κάμψης και διάτμησης για την αμφιέρειστη δοκό με τις ιδιότητες της επιλεγμένης διατομής.

Βέλη κινητών και μονίμων:

$$\delta = \frac{5q_{Ed}L^4}{384E_{LT}I_y} + \frac{q_{Ed}L^2}{8kAG_{LT}} = 0,325 + 0,027 = 0,352 \text{ in} = 8,94 \text{ mm} < 16 \text{ mm OK}$$

Βέλη κινητών:

$$\delta_{LIVE} = \frac{5qL^4}{384E_{LT}I_y} + \frac{qL^2}{8kAG_{LT}} = 0,233 + 0,019 = 0,253 \text{ in} = 6,43 \text{ mm} < L/300 = 13,33 \text{ OK}$$

Ο συντελεστής k του Timoshenko υπολογίστηκε από την Πίνακα του κεφαλαίου 4.2.

Έλεγχος των βελών κάμψης λόγω ερπυσμού για t=50 έτη

Προσεγγιστικά, θεωρούμε ότι το μέτρο ελαστικότητας έχει μειωθεί λόγω του ερπυσμού με την πάροδο των χρόνων. Για να λάβουμε υπόψιν αυτή την μείωση χρησιμοποιούμε τους συντελεστές $\varphi_E(t)$, $\varphi_G(t)$ που δίδονται στον παρακάτω πίνακα.

t (elapsed time)	$\phi_E(t)$	$\phi_G(t)$
1 year	0.26	0.57
5 years	0.42	0.98
10 years	0.50	1.23
30 years	0.60	1.76
50 years	0.66	2.09

Επομένως, υπολογίζονται τα νέα μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης ως εξής:

$$E_{LT}(t) = \frac{E_{LT}}{1 + \phi_E(t)} = \frac{39 \cdot 10^5}{1 + 0.66} = 23,49 \text{ psi ή lb/in}^2$$

$$G_{LT}(t) = \frac{G_{LT}}{1 + \phi_G(t)} = \frac{5 \cdot 10^5}{1 + 0.66} = 1,62 \text{ psi ή lb/in}^2$$

$$\text{Επομένως, } \delta_{t=50} = \frac{5q_{\mu\text{ov}}L^4}{384E_{LT}(t=50)I_y} + \frac{q_{\mu\text{ov}}L^2}{8kAG_{LT}(t=50)} = 0,149 + 0,023 = 0,172$$

in = 4,52 mm μόνο για τα μόνιμα φορτία που ασκούνται την t=50 έτη στην κατασκευή.

Συνολικά βέλη, $\delta_{\text{tot}} = \delta_{\text{live}} + \delta_{t=50} = 6,43 + 4,52 = 10,95 \text{ mm} < 16 \text{ mm OK}$

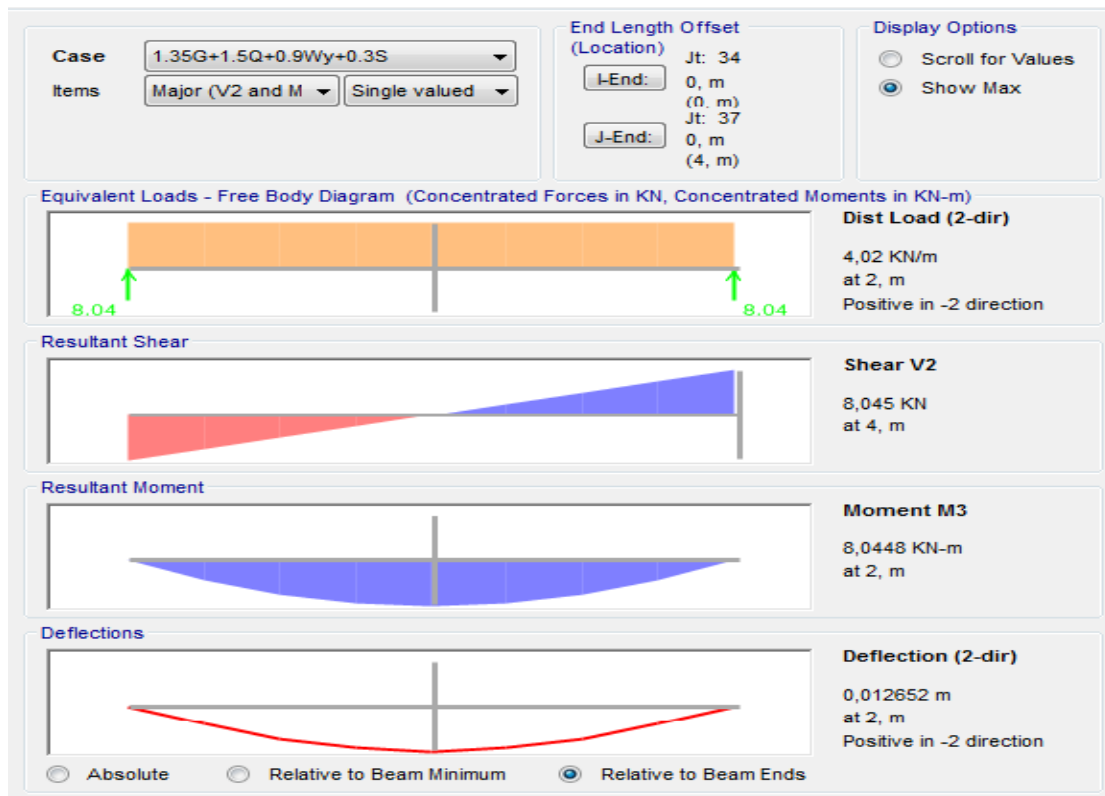
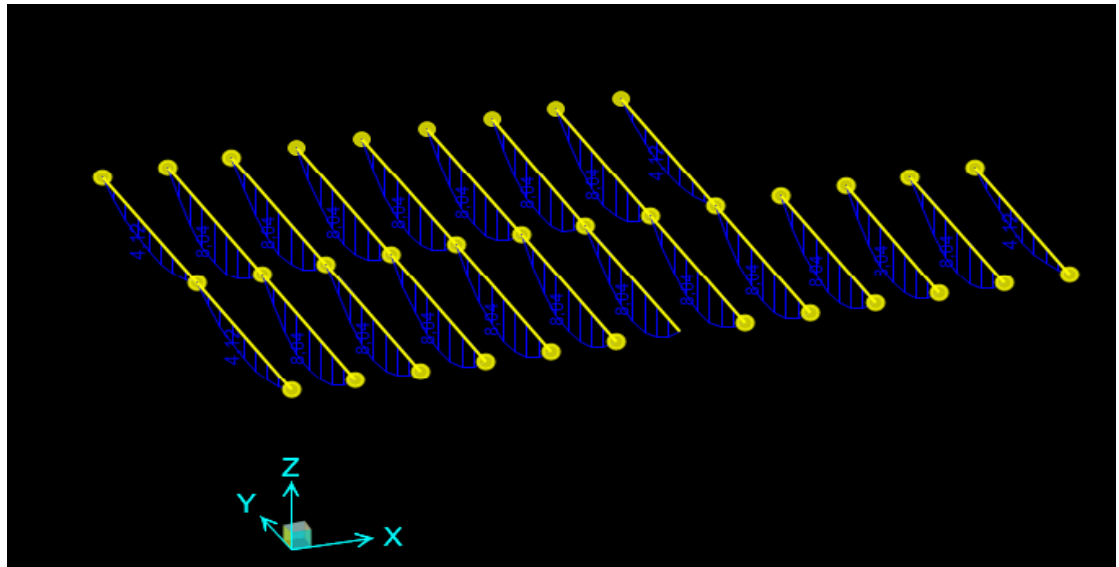
Εύκολα συμπεραίνεται δηλαδή ότι ο ερπυσμός δεν μπορεί να αμεληθεί αφού την $t = 0$, τα αναπτυσσόμενα βέλη απέχουν αρκετά από τα μέγιστα την t=50 έτη, όπου οι έλεγχοι ικανοποιούνται.

5.2.4. Έλεγχος σε ΟΚΑ:

Κατά την φόρτιση της δοκού στην ΟΚΑ πρέπει να ελεγχθούν οι παρακάτω τρόποι αστοχίας:

- Έλεγχος σε πλευρικό λυγισμό
- Έλεγχος θλιβόμενου πέλματος σε τοπικό λυγισμό
- Έλεγχος πελμάτων σε αστοχία υλικού λόγω θλιψης στο άνω πέλμα ή εφελκυσμού στο κάτω πέλμα
- Έλεγχος του κορμού σε διάτμηση
- Έλεγχος του κορμού σε τοπικό λυγισμό λόγω διάτμησης το οποίο είναι απόρροια του μικρού μέτρου G_{LT}
- Έλεγχος του κορμού σε λυγισμό του κορμού στην εγκάρσια διεύθυνση.

Από την στατική ανάλυση που έγινε με την βοήθεια του SAP2000 προκύπτουν τα μέγιστα εντατικά μεγέθη που φαίνονται στο σχήμα. Ο κρίσιμος συνδυασμός για τον οποίο προκύπτει αυτή η εντατική κατάσταση στις δευτερεύουσες δοκούς είναι ο συνήθης $1,35 \cdot G + 1,50 \cdot Q + 0,9 \cdot W_x$.



Σχ 5.2β. Εντατικά μεγέθη δευτερεύουσας δοκού

Επομένως, προκύπτουν τα εξής εντατικά μεγέθη:

$$M_{Ed} = 8,045 \text{ kN}\cdot\text{m} \text{ άρα } \sigma_{\chi,Ed} = M_{Ed} / W_y = 1,96 \text{ kN/cm}^2$$

$$V_{Ed} = 8,045 \text{ kN} \text{ άρα } \tau_{xy,Ed} = V_{Ed} / A_w = 0,459 \text{ kN/cm}^2$$

Έλεγχος αστοχίας υλικού στο θλιβόμενο και εφελκόμενο πέλμα:

Στις περισσότερες εφαρμογές των pultruded προφίλ η αστοχία της διατομής προέρχεται από τον τοπικό λυγισμό του θλιβόμενου πέλματος. Παρόλο αυτά, σε σπάνιες περιπτώσεις, όπου οι λόγοι δυσκαμψίας hw / tw και bf / tf είναι μικροί, αυτό συμβαίνει όταν τα τοιχώματα της διατομής έχουν μεγάλο πάχος ή υπάρχουν ενισχύσεις, κρίσιμος δεν είναι ο τοπικός λυγισμός του θλιβόμενου πέλματος αλλά η αστοχία του υλικού σε θλίψη. Ακόμα πιο σπάνια το υλικό μπορεί να αστοχήσει στο εφελκόμενο πέλμα. Ο έλεγχος των τάσεων που αναπτύσσονται στα πέλματα υπό την ροπή κάμψης αρκεί για να διευκρινιστεί ο τρόπος αστοχίας.

Στον πίνακα των ιδιοτήτων των υλικών του υλικού 1500 / 1525 Series φαίνεται η αντοχή σε θλίψη του πέλματος (flange, compressive strength) κατά την διαμήκη (LW) και την εγκάρσια διεύθυνση (CW). Η θλιπτική αντοχή λαμβάνεται κατά την διαμήκη έννοια οπότε:

$$\sigma_x^{\text{comp,LW}} = 45770 \text{ psi} = 32,18 \text{ kN/cm}^2 > 1,96 \text{ kN / cm}^2$$

$$\sigma_x^{\text{tensile,LW}} = 40000 \text{ psi} = 28,12 \text{ kN/cm}^2 > 1,96 \text{ kN / cm}^2$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό:

Στην περίπτωση δοκού σταθερού διατομής, με συνήθεις στρεπτικές συνθήκες στήριξης στα άκρα της, συμμετρική ως προς τον ασθενή άξονα αδράνειας και υποκείμενης σε κάμψη περί τον ισχυρό άξονα αδράνειας, η κρίσιμη ελαστική ροπή πλευρικού λυγισμού, όπως προβλέπεται στο Παράρτημα F του EC3-Μέρος 1.1 (έκδοση 1992), δίνεται από το γενικό τύπο:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left\{ \left[\left[\frac{k}{k_w} \right]^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2 \right]^{0.5} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right\}$$

όπου:

C_1, C_2, C_3 συντελεστές εξαρτώμενοι από τις συνθήκες φότισης και στρεπτικής στήριξης

I_t η σταθερά στρέψης

I_w η σταθερά στρέβλωσης

I_z η ροπή αδράνειας ως προς τον ασθενή άξονα

L το μήκος της δοκού μεταξύ σημείων πλευρικά εξασφαλισμένων

k και k_w συντελεστές εξαρτώμενοι από το είδος των στηριξεων ως προς την ελευθερία στροφής και στρέβλωσης των άκρων του εξεταζόμενου πλευρικά μη προστατευόμενου τμήματος

$z_g = z_a - z_s$ η απόσταση του κέντρου διάτμησης από το σημείο εφαρμογής του φορτίου

- z_a η τεταγμένη του σημείου εφαρμογής του φορτίου ως προς τον κεντροβαρικό άξονα $y-y'$
- z_s η τεταγμένη του κέντρου διάτμησης ως προς τον κεντροβαρικό άξονα $y-y'$

Παρόλο που ο παραπάνω τύπος ισχύει για δοκό από ομογενές υλικό οι οδηγίες αναφέρουν ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της αντοχής σε πλευρικό λυγισμό. Οι τιμές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διατομής δίνονται στον Πίνακα 4.1, για ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο σε αμφιέριστη δοκό: $C1= 1,132$ $C2 = 0,459$ $C3 = 0,525$ για $\kappa=1$.

Επειδή τα φορτία ασκούνται στο πάνω μέρος της δοκού, $z_g = h/2 = 4$ in.

$$M_{cr} = \frac{1,132 \cdot \pi^2 \cdot 39 \cdot 10^5 \cdot 5,27}{(13,12 \cdot 12)^2} \left\{ \left[\frac{84,26}{5,27} + \frac{(13,12 \cdot 12)^2 \cdot 5 \cdot 10^5 \cdot 0,667}{\pi^2 \cdot 39 \cdot 10^5 \cdot 5,27} - 0,525 \cdot 4 \right]^{0,5} - 0,525 \cdot 4 \right\} = 220482,84$$

lb ft = 25,40 kNm > 8,05 kNm

Έλεγχος σε τοπικό λυγισμό:

Τα τυποποιημένα pultruded FRP προφίλ είναι πολύ ευαίσθητα στον τοπικό λυγισμό του θλιβόμενου πέλματος. Αυτό οφείλεται κυρίως στο χαμηλό μέτρο ελαστικότητας αλλά και στο μικρή δυσκαμψία των επιμέρους τοιχωμάτων (κορμός και κυρίως τα πέλματα) και για αυτό αντιμετωπίζονται σαν λεπτότοιχες διατομές. Οι λεπτότοιχες διατομές μορφής I αστοχούν καθώς τα πέλματα (τοιχώματα) στο ένα άκρο είναι ελεύθερα ενώ στο άλλο στηρίζονται στο κορμό.



Σχ. 5.3. Τοπικός λυγισμός άνω πέλματος

Τόσο στο σύνολο των οδηγιών που προβλέπει ο *Structural Plastics Design Manual* (ASCE, 1984) αλλά και ο *Eurocomp Design Code and Handbook* (Eurocomp, 1996), προτείνεται η συντηρητική προσέγγιση ότι ο κορμός προσφέρει απλή στήριξη στο άκρο κάθε πέλματος. Διάφορες δοκιμές που έγιναν σε δοκίμια, έδειξαν ότι οι κρίσιμη τάση για λυγισμό στην περίπτωση αυτή είναι μικρότερη της πραγματικής. Γίνεται ευλόγως κατανοητό ότι με κάποιο τρόπο πρέπει να εκτιμηθεί η δυσκαμψία που προσφέρει ο κορμός στο άκρο του πέλματος. Μία μέθοδος που μπορεί να εκτιμήσει την δυσκαμψία αυτή αναπτύχθηκε από τον Kollar (2002). Ο Kollar στην έρευνα του αυτή, διακρίνει τις εξής τρεις διαφορετικές περιπτώσεις:

➤ Ένα τοίχωμα (πλάκα) το οποίο στο ένα άκρο του είναι ελεύθερο και στο άλλο στηρίζεται απλά και υπόκειται σε ομοιόμορφη θλίψη. Αυτή η προσέγγιση αναφέρεται στην κρίσιμη τάση του πέλματος μιας I διατομής. Δίδεται από τον εξής τύπο:

$$(\sigma_{free}^{ss})_f = \frac{\pi^2}{t_f(b_f/2)^2} \left[D_L \left(\frac{b_f/2}{a} \right)^2 + \frac{12}{\pi^2} D_S \right]$$

Όπου, t_f πάχος πέλματος, b_f πλάτος πέλματος και a το μήκος του πέλματος.

D_L , D_S είναι η διαμήκης και η διατμητική δυσκαμψία της ορθότροπης πλάκας (πέλημα) αντίστοιχα

➤ Ένα τοίχωμα το οποίο στηρίζεται και στα δύο του άκρα και υπόκειται σε ομοιόμορφη θλίψη. Αυτή η προσέγγιση αναφέρεται στην κρίσιμη τάση του πέλματος μιας κοίλης ορθογωνικής διατομής. Δίδεται από τον εξής τύπο:

$$(\sigma_{ss}^{ss})_f = \frac{2\pi^2}{t_f b_f^2} (\sqrt{D_L D_T} + D_{LT} + 2D_S)$$

Όπου, D_T , D_{LT} η εγκάρσια και η στρεπτική δυσκαμψία της πλάκας

➤ Ένα τοίχωμα το οποίο στηρίζεται και στα δύο του άκρα και υπόκειται σε γραμμικά μεταβαλλόμενη θλίψη. Αυτή η προσέγγιση αναφέρεται στην κρίσιμη τάση του κορμού μιας I διατομής ή μιας κοίλης ορθογωνικής διατομής. Δίδεται από τον εξής τύπο:

$$(\sigma_{ss}^{ss})_w = \frac{\pi^2}{t_w d_w^2} (13.9\sqrt{D_L D_T} + 11.1D_{LT} + 22.2D_S)$$

Υπολογισμός των δυσκαμψιών του κορμού της διατομής:

$$D_L = D_{11} = \frac{E_L^c t_p^3}{12(1-\nu_L \nu_T)} = \frac{28 \cdot 10^5 \cdot 0,375^3}{12(1-0,35 \cdot 0,12)} = 12844,14 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$D_T = D_{22} = \frac{E_T^c}{E_L^c} \cdot D_L = \frac{19 \cdot 10^5}{28 \cdot 10^5} \cdot 12844,14 = 8715,67 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$D_{LT} = D_{12} = D_T \cdot \nu_T = 1541,27 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$D_S = D_{66} = \frac{t_w G_{LT}^3}{12} = 2197,27 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$(\sigma_{free}^{ss})_f = 4408,17 \text{ lb/in}^2$$

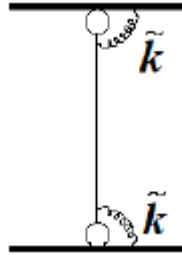
$$(\sigma_{ss}^{ss})_w = 105174,80 \text{ lb/in}^2$$

Λόγω του διαφορετικού διαμήκους μέτρου Ελαστικότητας του κορμού και του πέλματος δεν μπορεί να φανεί μόνο από τις κρίσιμες τάσεις ποιο από τα δύο θα αστοχήσει πρώτα σε τοπικό λυγισμό.

Ελέγχουμε τις ποσότητες $(\sigma_{free}^{ss})_f(E_L^c)_f$ και $(\sigma_{ss}^{ss})_w(E_L^c)_w$ και όποιο προκύψει μικρότερο θα μας δώσει το στοιχείο που θα λυγίσει πρώτα.

$(\sigma_{free}^{ss})_f \cdot E_{L,f}^c = 3,01 \cdot 10^{11} < (\sigma_{ss}^{ss})_w \cdot E_{L,w}^c = 3,2 \cdot 10^{12}$ άρα πρώτα αστοχεί το πέλμα.

Για να ληφθεί υπόψιν η δυσκαμψία που προσφέρει ο κορμός ως τοίχωμα στο πέλμα υπολογίζουμε το μέτρο της ισοδύναμης δυσκαμψίας του ελατηρίου \tilde{k} .



Σχ. 5.4. Η στήριξη που προσφέρει ο κορμός στο πέλμα μπορεί να παρομοιαστεί με ένα στροφικό ελατήριο δυσκαμψίας \tilde{k} .

$$\tilde{k} = \frac{2 \cdot D_T}{d_w} \left[1 - \frac{(\sigma_{free}^{ss})_f \cdot E_{L,w}^c}{(\sigma_{ss}^{ss})_w \cdot E_{L,f}^c} \right] = 2315 \text{ lb}$$

Και η κρίσιμη τάση λυγισμού του πέλματος συμπεριλαμβανομένης της στήριξης που προσφέρει ο κορμός δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_{cr}^{local, I-flange} = \frac{1}{(b_f/2)^2 t_f} \left(7 \sqrt{\frac{D_L D_T}{1 + 4.12 \zeta_{I-flange}}} + 12 D_S \right)$$

Όπου υπολογίζεται ο όρος $\zeta_{I-flange}$ υπολογίζεται ως εξής:

$$\zeta_{I-flange} = \frac{(D_T)_f}{k_{I-flange} (b_f/2)} = \frac{(E_T)_f t_f^3}{6 k_{I-flange} b_f [1 - (\nu_T)_f (\nu_L)_f]}$$

$$\zeta_{I-flange} = \frac{8715,67}{2315 \cdot (8/2)} = 0,941$$

Επομένως, $\sigma_{cr}^{local-I-flange} = 9983,64 \text{ psi} = 7,02 \text{ kN/cm}^2 > 2,71 \text{ kN/cm}^2$

$$SF = \frac{7,02}{1,96} = 3,58 > 2,50 \text{ άρα επαρκεί η δοκός έναντι τοπικού λυγισμού.}$$

Έλεγχος σε διάτμηση του κορμού:

Οι κατασκευαστές των pultruded προφίλ συνήθως δεν παρουσιάζουν την διατμητική αντοχή εντός του επιπέδου διάτμησης, αλλά την διαστρωματική διατμητική αντοχή στο κάθετο επίπεδο. Για τον έλεγχο αρκεί να χρησιμοποιηθεί η πολύ συντηρητική τιμή της διαστρωματικής αντοχής σε διάτμηση.

Η διατμητική τάση λόγω της τέμνουσας στα άκρα υπολογίσθηκε ίση με $\tau_{max} = 0,713 \text{ kN/cm}^2$

Η διαστρωματική αντοχή σε διάτμηση δίνεται από τον Πίνακα $\tau_{Res} = 3400 \text{ psi} = 2,39 \text{ kN/cm}^2$

$$\text{Άρα, } SF = \frac{2,39}{0,459} = 5,21 > 3,00 \text{ που προτείνεται, η διατομή επαρκεί.}$$

Έλεγχος σε τοπικό λυγισμό λόγω διάτμησης:

Σε αντίθεση με τα ισότροπα υλικά όπως ο χάλυβας, τα pultruded προφίλ λόγω του μικρού μέτρου διατμήσεως κινδυνεύουν σε τοπικό λυγισμό λόγω της δρώσας σιαμητικής καταπόνησης. Η κρίσιμη τάση για την ανάπτυξη τοπικού λυγισμού στο κορμό ορθότροπου υλικού λόγω διάτμησης δίνεται από την σχέση:

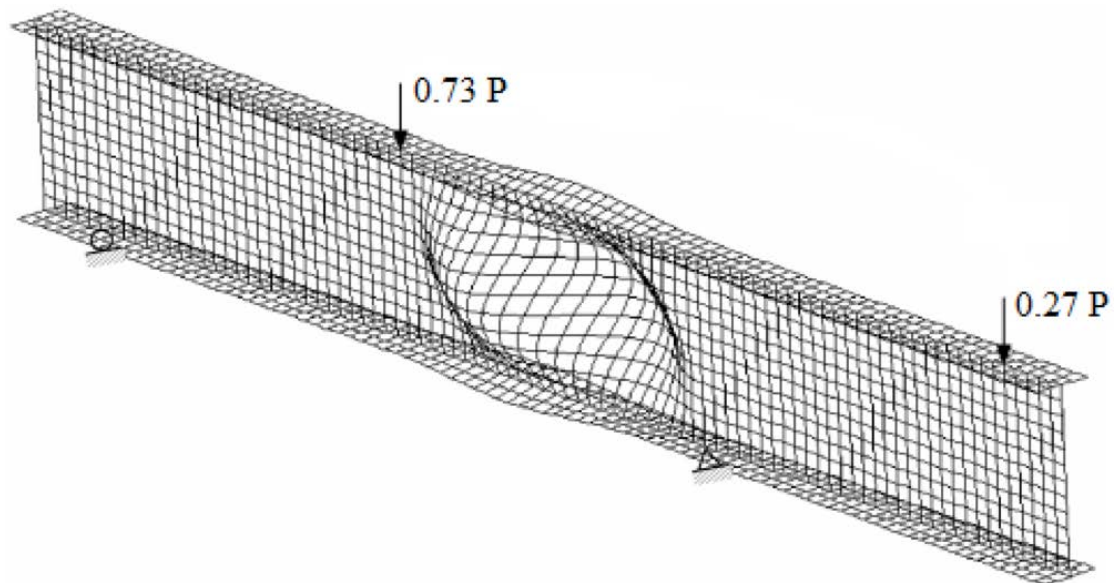
$$\tau_{cr}^{local} = \frac{4 \cdot k_{LT} \cdot (D_L \cdot D_T^3)^{1/4}}{t_w \cdot d_w^2} = 17533,82 \text{ psi} = 12,32 \text{ kN/cm}^2 > 0,459$$

kN/cm^2

$$\text{Όπου, } k_{LT} = 8,125 + 5,045K = 10,96$$

$$K = \frac{2D_s + D_{LT}}{\sqrt{D_L D_T}} = 0,56 < 1,00$$

Άρα, ο κορμός εξασφαλίζεται έναντι τοπικού λυγισμού λόγω διατμήσεως.



Σχ.5.4. Τοπικός λυγισμός κορμού λόγω διάτμησης

Συγκεντρωτικά, παρουσιάζονται οι αντοχές της δευτερεύουσας δοκού έναντι όλων των καταπονήσεων στην ΟΚΑ.

Είδος αστοχίας	Ονομαστική ή αντοχή	Προτεινόμενος SF	Αντοχή σχεδιασμού	Αναπτυσσόμενα μεγέθη	Έλεγχος
Πλευρικός λυγισμός	25,40 kN	2,50	10,16 kN	8,045 kN	OK
Τοπικός λυγισμός	7,02 kN/cm ²	2,50	2,8 kN/cm ²	1,96 kN/cm ²	OK

άνω πέλματος					
Αστοχία υλικού στην εφελκυσόμενη ακραία ίνα	28,12 kN/cm ²	2,50	11,25 kN/cm ²	1,96 kN/cm ²	OK
Αστοχία υλικού στην άνω θλιβόμενη ίνα	32,18 kN/cm ²	2,50	12,87 kN/cm ²	1,96 kN/cm ²	OK
Αστοχία κορμού σε διάτμηση	2,39 kN/cm ²	3,00	0,797 kN/cm ²	0,459 kN/cm ²	OK
Τοπικός λυγισμός κορμού λόγω διάτμησης	12,32 kN/cm ²	3,00	4,11 kN/cm ²	0,459 kN/cm ²	OK

5.3.1 Έλεγχος κύριων δοκών

Για τις κύριες δοκούς του ορόφου υπολογίστηκε η διατομή ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με τις δευτερεύουσες δοκούς. Το μόνο που διαφοροποιήθηκε ήταν η τιμή του φορτίου που καταπονεί την δοκό. Καθώς οι δευτερεύουσες δοκοί συνδέονται στο ίδιο ύψος με τις κύριες και είναι τοποθετημένες ανά 1 m στην εγκάρσια διεύθυνση, θα επιβάλλουν στις δοκούς ως συγκεντρωμένα φορτία τις αντιδράσεις τους. Η διαδικασία εκλογής διατομής ξεκινά από την ΟΚΛ και έπειτα ελέγχεται στην ΟΚΑ

Όσον αφορά την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ), οι κύριες δοκοί ελέγχθηκαν σε επίπεδο διατομής (κάμψη, διάτμηση κορμού) αλλά και σε επίπεδο μέλους (πλευρικός λυγισμός, τοπικός λυγισμός άνω θλιβόμενου πέλματος). Επίσης λόγω της ανισοτροπίας του υλικού και του μικρού μεγέθους μέτρου διάτμησης G_{LT} ελέγχθηκε και το τοπικός λυγισμός του κορμού λόγω διάτμησης αλλά και σε διάτμηση λόγω των συγκεντρωμένων φορτίων.

5.3.2. Διαστασιολόγηση σε ΟΚΑ:

Η δυσμενέστερη αμφιέριστη κύρια δοκός μήκους $L=4$ m στην ΟΚΛ φορτίζεται με ένα κατανεμημένο φορτίο q_{Ed} το οποίο υπολογίστηκε για ζώνη πλάτους επιρροής 4,00 m.:

$$q_{Ed} = 1,00 \cdot (\text{γεπικ} + \text{γπλ} + \text{γδοκ}) + 1,00 \cdot q_k$$

όπου, γεπικ: βάρος επικαλύψεων $0,50 \text{ kN/m}^2 \cdot 4,00 \text{ m} = 2 \text{ kN/m}$

γπλ: βάρος της πλάκας καταστρώματος που εκτιμήθηκε σε $0,185 \text{ kN/m}$

γδοκ: το ίδιο βάρος της δοκού που εκτιμήθηκε $0,100 \text{ kN/m}$

qk: κινητό φορτίο χρήσης ορόφου $2,00 \text{ kN/m}^2 \cdot 4,00 \text{ m} = 8 \text{ kN/m}^2$

άρα, $q_{Ed} = 1,00 \cdot (2,00 + 0,185 + 0,1) + 1,00 \cdot 8,00 = 10,785 \text{ kN/m} = 691,12 \text{ lb/ft}$

μέγιστο επιτρεπόμενο βέλος: $\delta_{\max} = L / 250 = 4000 / 250 = 16 \text{ mm} = 0,63 \text{ in}$

Η απαιτούμενη διατομή για τον έλεγχο των βελών την $t=0$ προκύπτει από τον έλεγχο του βέλους λόγω κάμψης:

$$I_{y, reqd} = \frac{q_{Ed} L^3}{384 E_{LT} \delta_{\max}} = \frac{5 \cdot (691,12 / 12) \cdot (13,12 \cdot 12)^4}{384 \cdot 39 \cdot 10^5 \cdot 0,63} = 187,53 \text{ in}^4 = 7806 \text{ cm}^4$$

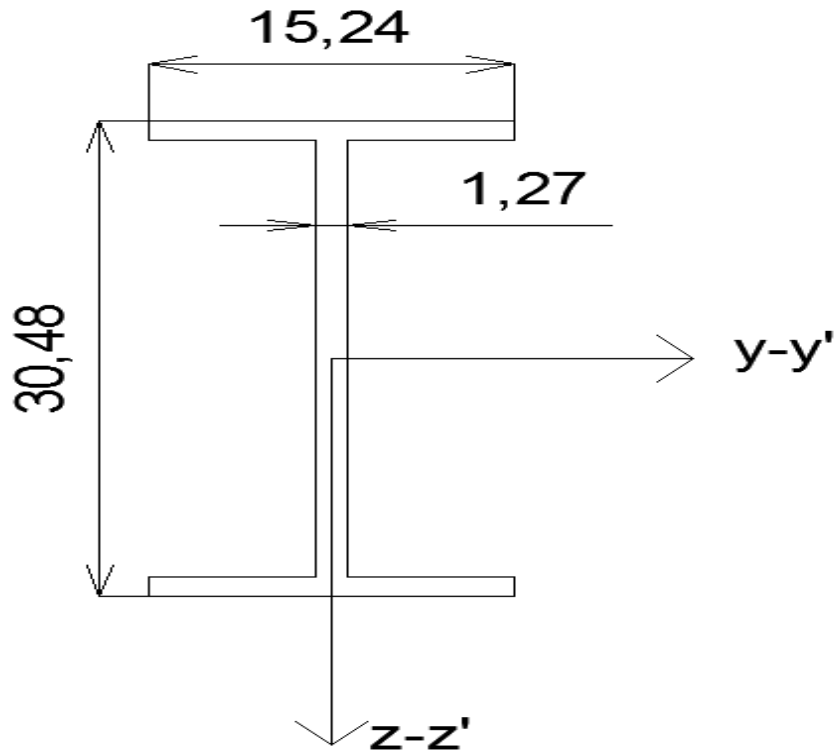
Όπου $L = 4,00 \text{ m} = 13,12 \text{ ft}$

Άρα επιλέγεται από τον πίνακα των I διατομών της σειράς Pultrex η διατομή IB982 με τα εξής χαρακτηριστικά (Βλέπε Παράρτημα):

h	b	tf=tw	Area	Weight	Y-Y'		Z-Z'		It	Iw
					I	W	I			
in	in	in	in ²	Lb/ft	in ⁴	in ³	in ⁴	in ³	in ⁴	in ⁶
12	6	0.5	11.67	10.31	258.76	43.13	17.76	5.92	1	639.33
cm	cm	mm	cm ²	Kg/m	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm ⁶
30.48	15.24	12,7	75.29	15.34	10770.4	706.77	739.23	97.01	41.62	171683,04

Πίνακας 5.1

Δίνεται σκαρίφημα της επιλεγμένης διατομής στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.5. Πρότυπη Διατομή Pultrex IB982

Υπολογίζεται η ακριβής τιμή του φορτίου για την επιλεγμένη διατομή:

$$q_{Ed} = 1,00 \cdot (g_{επικ} + g_{πλ} + g_{δοκ}) + 1,00 \cdot q_k = 1,00(2,00 + 0,185 + 0,15) + 8,00 = 10,335 \text{ kN/m}$$

Υπολογίζεται το συνολικό βέλος κάμψης λόγω κάμψης και διάτμησης για την αμφιέρειστη δοκό με τις ιδιότητες της επιλεγμένης διατομής. Στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής του Timoshenko $k = 0,6085$ γιατί η διατομή είναι υψίκορμη.

Βέλη κινητών και μονίμων:

$$\delta = \frac{5q_{Ed}L^4}{384E_{LT}I_y} + \frac{q_{Ed}L^2}{8kAG_{LT}} = 0,458 + 0,04 = 0,498 \text{ in} = 12,8 \text{ mm} < 16 \text{ mm OK}$$

Βέλη κινητών:

$$\delta_{LIVE} = \frac{5qL^4}{384E_{LT}I_y} + \frac{qL^2}{8kAG_{LT}} = 0,354 + 0,038 = 0,400 \text{ in} = 10,16 \text{ mm} < L/300 = 13,33 \text{ OK}$$

Ο συντελεστής k του Timoshenko υπολογίστηκε από την Πίνακα του κεφαλαίου 4.2.

Έλεγχος των βελών κάμψης λόγω ερπυσμού για $t=50$ έτη

Προσεγγιστικά, θεωρούμε ότι το μέτρο ελαστικότητας έχει μειωθεί λόγω του ερπυσμού με την πάροδο των χρόνων. Για να λάβουμε υπόψη αυτή την μείωση χρησιμοποιούμε τους συντελεστές $\varphi_E(t)$, $\varphi_G(t)$ που δίδονται στον παρακάτω πίνακα.

t (elapsed time)	$\phi_E(t)$	$\phi_G(t)$
1 year	0.26	0.57
5 years	0.42	0.98
10 years	0.50	1.23
30 years	0.60	1.76
50 years	0.66	2.09

Επομένως, υπολογίζονται τα νέα μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης ως εξής:

$$E_{LT}(t) = \frac{E_{LT}}{1 + \phi_E(t)} = \frac{39 \cdot 10^5}{1 + 0.66} = 23,49 \text{ psi ή lb/in}^2$$

$$G_{LT}(t) = \frac{G_{LT}}{1 + \phi_G(t)} = \frac{5 \cdot 10^5}{1 + 0.66} = 1,62 \text{ psi ή lb/in}^2$$

$$\text{Επομένως, } \delta_{t=50} = \frac{5q_{\mu\text{ov}}L^4}{384E_{LT}(t=50)I_y} + \frac{q_{\mu\text{ov}}L^2}{8kAG_{LT}(t=50)} = 0,175 + 0,034 = 0,209 \text{ in}$$

= 5,1 mm μόνο για τα μόνιμα φορτία που ασκούνται την t=50 έτη στην κατασκευή.

Συνολικά βέλη, $\delta_{\text{tot}} = \delta_{\text{live}} + \delta_{t=50} = 0,385 + 0,209 = 0,594 \text{ in} = 15,16 \text{ mm} < 16 \text{ mm OK}$

Εύκολα συμπεραίνεται δηλαδή ότι ο ερπυσμός δεν μπορεί να αμεληθεί αφού την $t = 0$, τα αναπτυσσόμενα βέλη απέχουν αρκετά από τα μέγιστα ενώ την t=50 έτη, οι έλεγχοι ικανοποιούνται οριακά.

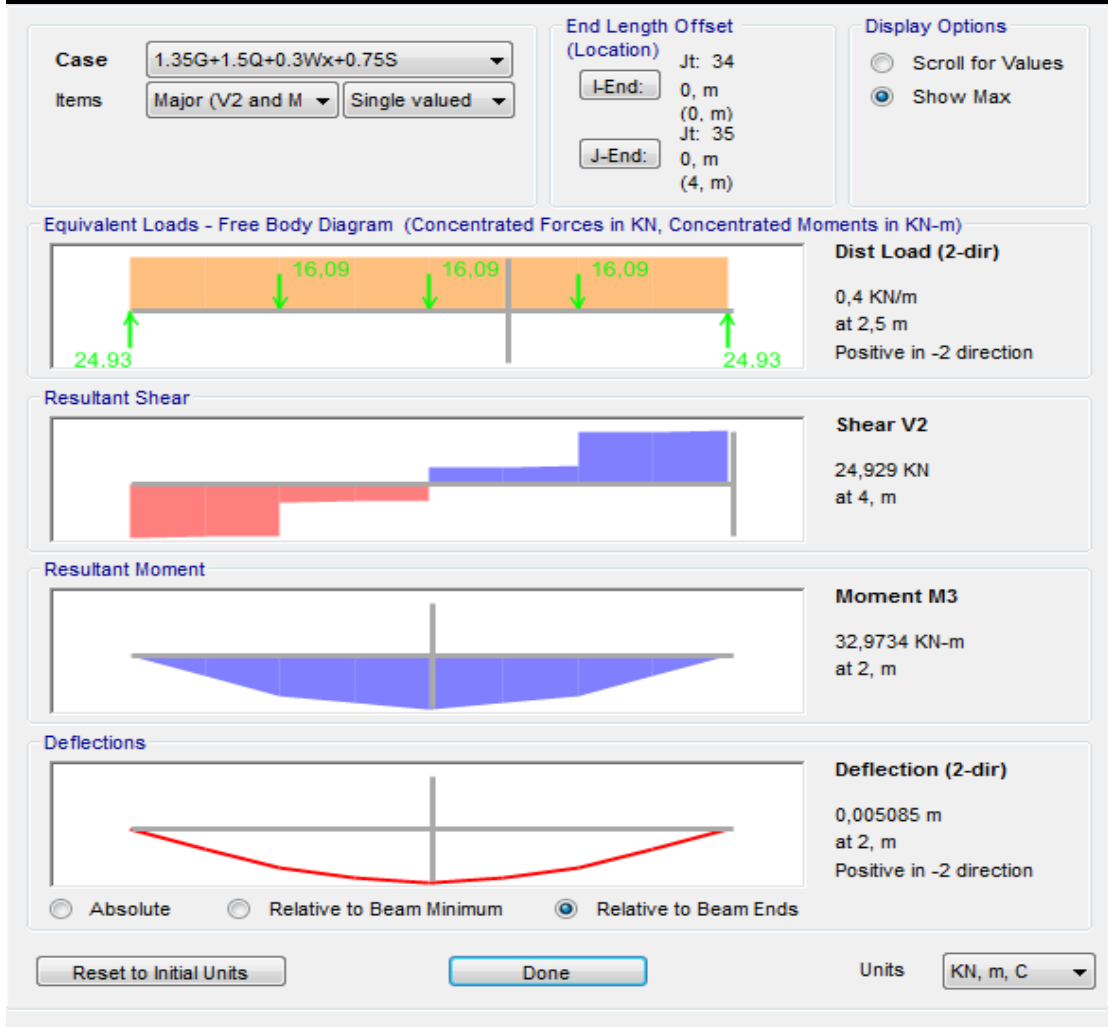
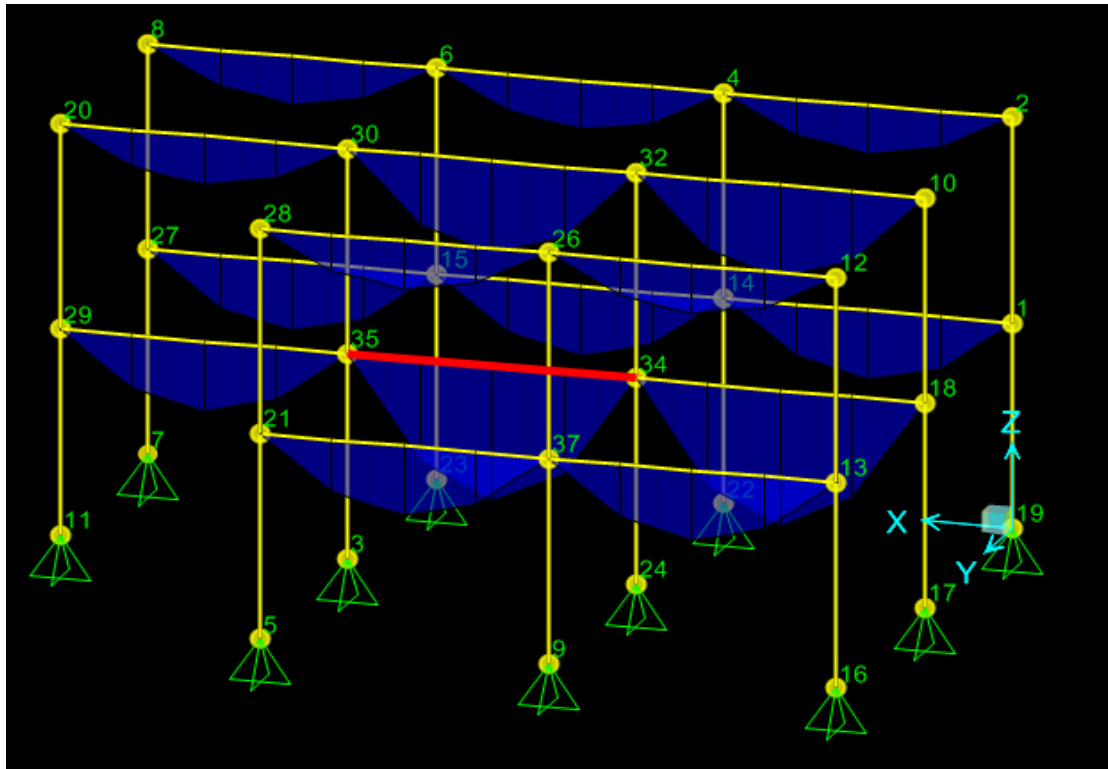
5.2.3. Έλεγχος σε ΟΚΑ:

Κατά την φόρτιση της δοκού στην ΟΚΑ πρέπει να ελεγχθούν οι παρακάτω τρόποι αστοχίας:

- Έλεγχος σε πλευρικό λυγισμό
- Έλεγχος θλιβόμενου πέλματος σε τοπικό λυγισμό
- Έλεγχος πελμάτων σε αστοχία υλικού λόγω θλίψης στο άνω πέλμα ή εφελκυσμού στο κάτω πέλμα
- Έλεγχος του κορμού σε διάτμηση
- Έλεγχος του κορμού σε τοπικό λυγισμό λόγω διάτμησης το οποίο είναι απόρροια του μικρού μέτρου G_{LT}

- Έλεγχος του κορμού σε λυγισμό του κορμού στην εγκάρσια διεύθυνση.
- Έλεγχος σε διάτρηση του κορμού της διατομής λόγω των συγκεντρωμένων φορτίων

Από την στατική ανάλυση που έγινε με την βοήθεια του SAP2000 προκύπτουν τα μέγιστα εντατικά μεγέθη που φαίνονται στο σχήμα. Ο κρίσιμος συνδυασμός για τον οποίο προκύπτει αυτή η εντατική κατάσταση στις κύριες δοκούς είναι ο συνήθης $1,35 \cdot G + 1,50 \cdot Q + 0,9 \cdot W_x + 0,3 \cdot S$ (Σχήματα 5.5-5.6).



Σχ 5.5-5.6. Μέγιστη ροπή στην δοκό για τον δυσμενέστερο συνδυασμό

Επομένως, προκύπτουν τα εξής εντατικά μεγέθη:

$$M_{Ed} = 32,973 \text{ kN}\cdot\text{m} \text{ άρα } \sigma_{\chi,Ed} = M_{Ed} / W_y = 4,67 \text{ kN/cm}^2$$

$$V_{Ed} = 24,929 \text{ kN} \text{ άρα } \tau_{xy,Ed} = V_{Ed} / A_w = 0,703 \text{ kN/cm}^2$$

Έλεγχος αστοχίας υλικού στο θλιβόμενο και εφελκόμενο πέλμα:

Στον πίνακα των ιδιοτήτων των υλικών του υλικού 1500 / 1525 Series φαίνεται η αντοχή σε θλίψη του πέλματος (flange, compressive strength) κατά την διαμήκη (LW) και την εγκάρσια διεύθυνση (CW). Η θλιπτική αντοχή λαμβάνεται κατά την διαμήκη έννοια οπότε:

$$\sigma_x^{\text{comp,LW}} = 45770 \text{ psi} = 32,18 \text{ kN/cm}^2 > 4,67 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_x^{\text{tensile,LW}} = 40000 \text{ psi} = 28,12 \text{ kN/cm}^2 > 4,67 \text{ kN/cm}^2$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left\{ \left[\left[\frac{k}{k_w} \right]^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g - C_3 z_J)^2 \right]^{0,5} - (C_2 z_g - C_3 z_J) \right\}$$

όπου:

C_1, C_2, C_3 συντελεστές εξαρτώμενοι από τις συνθήκες φότισης και στρεπτικής στήριξης

I_t η σταθερά στρέψης

I_w η σταθερά στρέβλωσης

I_z η ροπή αδράνειας ως προς τον ασθενή άξονα

L το μήκος της δοκού μεταξύ σημείων πλευρικά εξασφαλισμένων

k και k_w συντελεστές εξαρτώμενοι από το είδος των στηρίξεων ως προς την ελευθερία στροφής και στρέβλωσης των άκρων του εξεταζόμενου πλευρικά μη προστατευόμενου τμήματος

$z_g = z_a - z_s$ η απόσταση του κέντρου διάτμησης από το σημείο εφαρμογής του φορτίου

z_a η τεταγμένη του σημείου εφαρμογής του φορτίου ως προς τον κεντροβαρικό άξονα $y-y'$

z_s η τεταγμένη του κέντρου διάτμησης ως προς τον κεντροβαρικό άξονα $y-y'$

Παρόλο που ο παραπάνω τύπος ισχύει για δοκό από ομογενές υλικό οι οδηγίες αναφέρουν ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της αντοχής σε πλευρικό

λυγισμό. Οι τιμές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διατομής δίνονται στον Πίνακα 4.1, για ομοιόμορφο καταναμημένο φορτίο σε αμφιέριστη δοκό: $C1 = 1,365$
 $C2 = 0,553$ $C3 = 1,730$ για $\kappa = 1$.

Επειδή τα φορτία ασκούνται στο πάνω μέρος της δοκού, $z_g = h/2 = 6$ in. Για τον έλεγχο της δοκού στον πλευρικό λυγισμό θεωρούμε ότι τόσο η πλάκα όσο και οι εγκάρσιες δευτερεύουσες δοκοί τοποθετημένες ανά 1 m εξασφαλίζουν την εκτροπή της δοκού εκτός επιπέδου.

$$M_{cr} = \frac{1,365 \cdot \pi^2 \cdot 39 \cdot 10^5 \cdot 17,76}{(3,28 \cdot 12)^2} \left\{ \left[\frac{639,33}{17,76} + \frac{(3,28 \cdot 12)^2 \cdot 5 \cdot 10^5 \cdot 1,00}{\pi^2 \cdot 39 \cdot 10^5 \cdot 17,76} - 0,553 \cdot 4 \right]^{0,5} - 0,553 \cdot 6 \right\} = 1503960,16$$

lb ft = 173,28 kNm > 32,97 kNm OK

Έλεγχος σε τοπικό λυγισμό:

Υπολογισμός των τάσεων για το πέλμα και τον κορμό της διατομής με την μέθοδο του Kollar:

$$D_L = D_{11} = \frac{E_L^c t_p^3}{12(1 - \nu_L \nu_T)} = \frac{28 \cdot 10^5 \cdot 0,5^3}{12(1 - 0,35 \cdot 0,12)} = 30445,37 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$D_T = D_{22} = \frac{E_T^c}{E_L^c} \cdot D_L = \frac{19 \cdot 10^5}{28 \cdot 10^5} \cdot 30445,37 = 20659,36 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$D_{LT} = D_{12} = D_T \cdot \nu_T = 3653,44 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$D_S = D_{66} = \frac{t_w^3 \cdot G_{LT}}{12} = 5208,33 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$(\sigma_{free}^{ss})_f = 13913,13 \text{ lb/in}^2$$

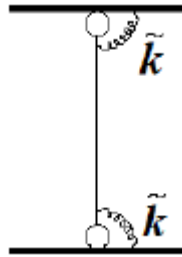
$$(\sigma_{ss}^{ss})_w = 82347,32 \text{ lb/in}^2$$

Λόγω του διαφορετικού διαμήκους μέτρου Ελαστικότητας του κορμού και του πέλματος δεν μπορεί να φανεί μόνο από τις κρίσιμες τάσεις ποιο από τα δύο θα αστοχήσει πρώτα σε τοπικό λυγισμό.

Ελέγχουμε τις ποσότητες $(\sigma_{free}^{ss})_f (E_L^c)_f$ και $(\sigma_{ss}^{ss})_w (E_L^c)_w$ και όποιο προκύψει μικρότερο θα μας δώσει το στοιχείο που θα λυγίσει πρώτα.

$(\sigma_{free}^{ss})_f \cdot E_{L,f}^c = 5,35 \cdot 10^{11} < (\sigma_{ss}^{ss})_w \cdot E_{L,w}^c = 2,3 \cdot 10^{12}$ άρα πρώτα αστοχεί το πέλμα.

Για να ληφθεί υπόψιν η δυσκμψία που προσφέρει ο κορμός ως τοίχωμα στο πέλμα υπολογίζουμε το μέτρο της ισοδύναμης δυσκαμψίας του ελατηρίου \tilde{k} .



Σχ. 5.4. Η στήριξη που προσφέρει ο κορμός στο πέλαμα μπορεί να παρομοιαστεί με ένα στρωφικό ελατήριο δυσκαμψίας \tilde{k} .

$$\tilde{k} = \frac{2 \cdot D_T}{d_w} \left[1 - \frac{(\sigma_{free}^{ss})_f \cdot E_{L,w}^c}{(\sigma_{ss}^{ss})_w \cdot E_{L,f}^c} \right] = 3295 \text{ lb}$$

Και η κρίσιμη τάση λυγισμού του πέλατος συμπεριλαμβανομένης της στήριξης που προσφέρει ο κορμός δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_{cr}^{local, I-flange} = \frac{1}{(b_f/2)^2 t_f} \left(7 \sqrt{\frac{D_L D_T}{1 + 4.12 \zeta_{I-flange}}} + 12 D_S \right)$$

Όπου υπολογίζεται ο όρος $\zeta_{I-flange}$ υπολογίζεται ως εξής:

$$\zeta_{I-flange} = \frac{(D_T)_f}{k_{I-flange} (b_f/2)} = \frac{(E_T)_f t_f^3}{6 k_{I-flange} b_f [1 - (\nu_T)_f (\nu_L)_f]}$$

$$\zeta_{I-flange} = \frac{8715,67}{3295 \cdot (6/2)} = 2,09$$

Επομένως, $\sigma_{cr}^{local-I-flange} = 26472,61 \text{ psi} = 18,61 \text{ kN/cm}^2 > 4,67 \text{ kN/cm}^2$ OK

Έλεγχος σε διάτμηση του κορμού:

Οι κατασκευαστές των pultruded προφίλ συνήθως δεν παρουσιάζουν την διατμητική αντοχή εντός του επιπέδου διάτμησης, αλλά την διαστρωματική διατμητική αντοχή στο κάθετο επίπεδο. Για τον έλεγχο αρκεί να χρησιμοποιηθεί η πολύ συντηρητική τιμή της διαστρωματικής αντοχής σε διάτμηση.

Η διατμητική τάση λόγω της τέμνουσας στα άκρα υπολογίσθηκε ίση με $\tau_{max} = 0,703 \text{ kN/cm}^2$

Η διαστρωματική αντοχή σε διάτμηση δίνεται από τον Πίνακα $\tau_{Res} = 3400 \text{ psi} = 2,39 \text{ kN/cm}^2$

Άρα, $SF = \frac{2,39}{0,713} = 3,35 > 3,00$ που προτείνεται, η διατομή επαρκεί.

Έλεγχος σε τοπικό λυγισμό λόγω διάτμησης:

Σε αντίθεση με τα ισότροπα υλικά όπως ο χάλυβας, τα pultruded προφίλ λόγω του μικρού μέτρου διατμήσεως κινδυνεύουν σε τοπικό λυγισμό λόγω της δρώσας

διατμητικής καταπόνησης. Η κρίσιμη τάση για την ανάπτυξη τοπικού λυγισμού στο κορμό ορθότροπου υλικού λόγω διάτμησης δίνεται από την σχέση:

$$\tau_{cr}^{local} = \frac{4 \cdot k_{LT} \cdot (D_L \cdot D_T^3)^{1/4}}{t_w \cdot d_w^2} = 13853,89 \text{ psi} = 9,74 \text{ kN/cm}^2 > 0,703 \text{ kN/cm}^2$$

Όπου, $k_{LT} = 8,125 + 5,045K = 10,96$

$$K = \frac{2D_s + D_{LT}}{\sqrt{D_L D_T}} = 0,56 < 1,00$$

Άρα, ο κορμός εξασφαλίζεται έναντι τοπικού λυγισμού λόγω διατμήσεως.

Έλεγχος του κορμού σε σύνθλιψη λόγω συγκεντρωμένου φορτίου:

Στις περιπτώσεις όπου σε pultruded δοκούς δημιουργείται ένταση από συγκεντρωμένο φορτίο, πρέπει να ελέγχεται η σύνθλιψη του κορμού του.

Για την αποφυγή της σύνθλιψης του κορμού η τάση αστοχίας του κορμού λαμβάνεται ίση με την εγκάρσια θλιπτική του αντοχή.

$$\sigma_{cr}^{crush} = \sigma_{CT}^{ult}$$

$$F_{cr}^{crush} = \sigma_{CT}^{ult} \cdot A_{web} = 14200 \cdot 11 \cdot 0,5 = 78100 \text{ lb} = 355 \text{ kN} > V_{Ed} =$$

28,12 kN OK

Συγκεντρωτικά, παρουσιάζονται οι αντοχές της δευτερεύουσας δοκού έναντι όλων των καταπονήσεων στην ΟΚΑ.

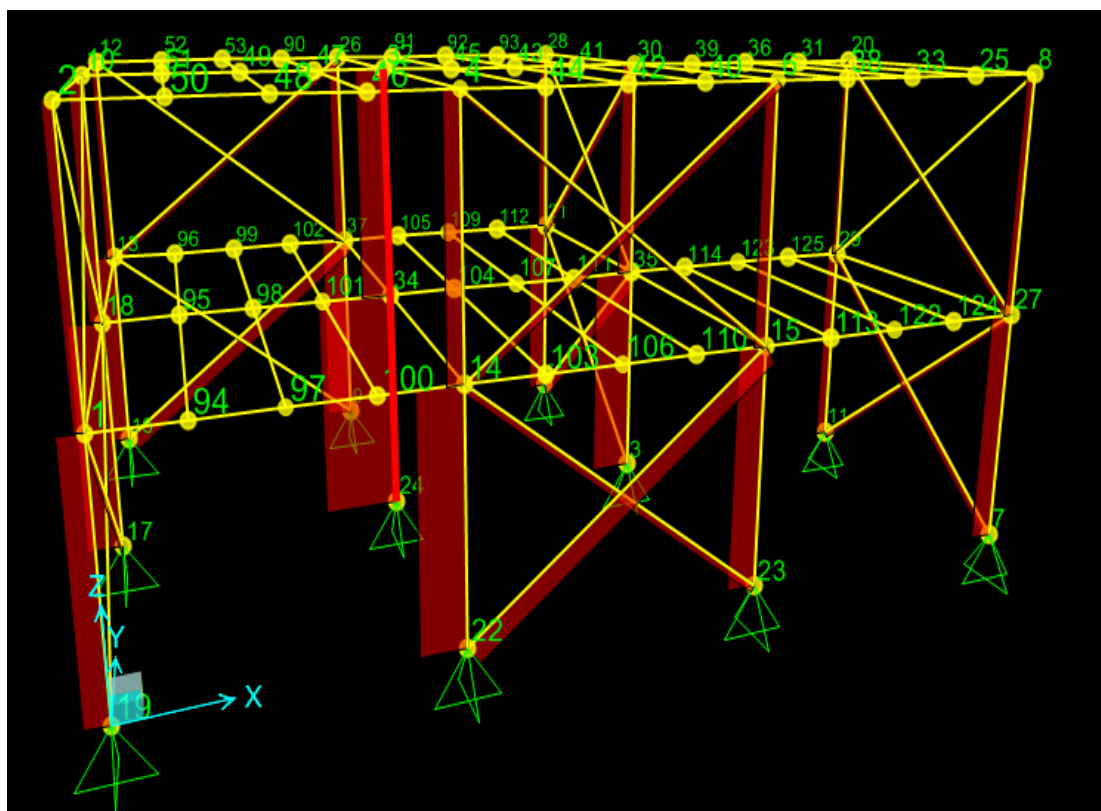
Είδος αστοχίας	Ονομαστική αντοχή	Προτεινόμενος SF	Αντοχή σχεδιασμού	Αναπτυσσόμενα μεγέθη	Έλεγχος
Πλευρικός λυγισμός	173,28 kN	2,50	69,312 kN	32,97 kN	OK
Τοπικός λυγισμός άνω πέλματος	18,61 kN/cm ²	2,50	7,44 kN/cm ²	4,67 kN/cm ²	OK
Αστοχία υλικού στην εφελκυσόμενη ακραία ίνα	28,12 kN/cm ²	2,50	11,25 kN/cm ²	4,67 kN/cm ²	OK
Αστοχία υλικού στην άνω θλιβόμενη ίνα	32,18 kN/cm ²	2,50	12,87 kN/cm ²	4,67 kN/cm ²	OK
Αστοχία κορμού σε διάτμηση	2,39 kN/cm ²	3,00	0,797 kN/cm ²	0,703 kN/cm ²	OK
Τοπικός λυγισμός κορμού λόγω διάτμησης	9,74 kN/cm ²	3,00	3,25 kN/cm ²	0,703 kN/cm ²	OK
Σύνθλιψη του κορμού λόγω συγκεντρωμένου φορτίου	355 kN	3,00	118,33 kN	28,12 kN	OK

5.4.1 Έλεγχος υποστυλωμάτων:

Η διαστασιολόγηση των υποστυλωμάτων έγινε στην ΟΚΑ για την δυσμενέστερη φόρτιση από τους συνδυασμούς φορτίσεων. Οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν για τον καθορισμό της κρίσιμης τάσης αστοχίας είναι οι εξής:

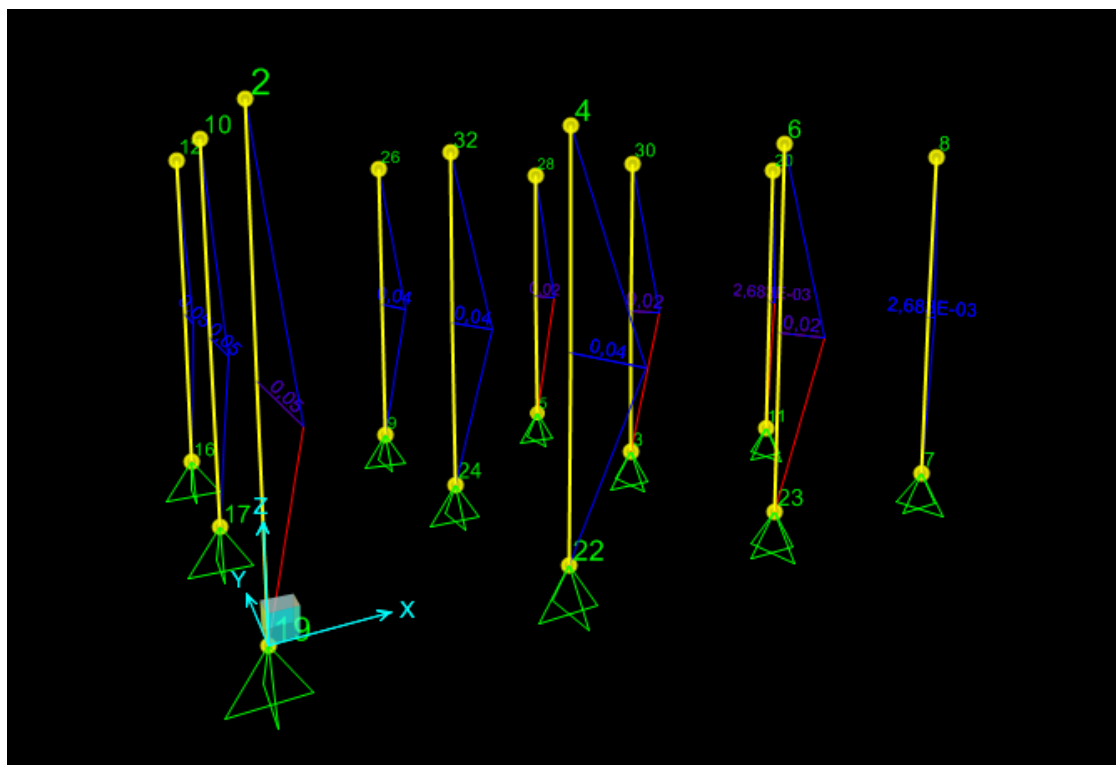
- Έλεγχος αστοχίας υλικού σε θλίψη
- Έλεγχος καμπτικού λυγισμού μέλους
- Έλεγχος στρεπτικού λυγισμού του μέλους για διατομές ανοιχτές ως ευαίσθητες
- Έλεγχος τοπικού λυγισμού των πελμάτων ή του κορμού με θεώρηση συμπεριφοράς τους ως πλάκες

Ο κρίσιμος συνδυασμός που μας έδωσε την μέγιστη καταπόνηση στο μεσαίο υποστύλωμα είναι $1,35 \cdot G + 1,50 \cdot Q + 0,75 \cdot S + 0,3 \cdot W$ (Σχ. 5.7). Επίσης παρατηρήθηκε ότι το συγκεκριμένο υποστύλωμα στους συνδυασμούς φορτίσεων με κύριο κινητό τον άνεμο καταπονήθηκε με αμελητέες ροπές της τάξεως των 0,5 kNm οι οποίες αμελήθηκαν. Επομένως το υποστύλωμα ελέγχεται σε αστοχία μόνο για δράση συγκεντρωμένου φορτίου.

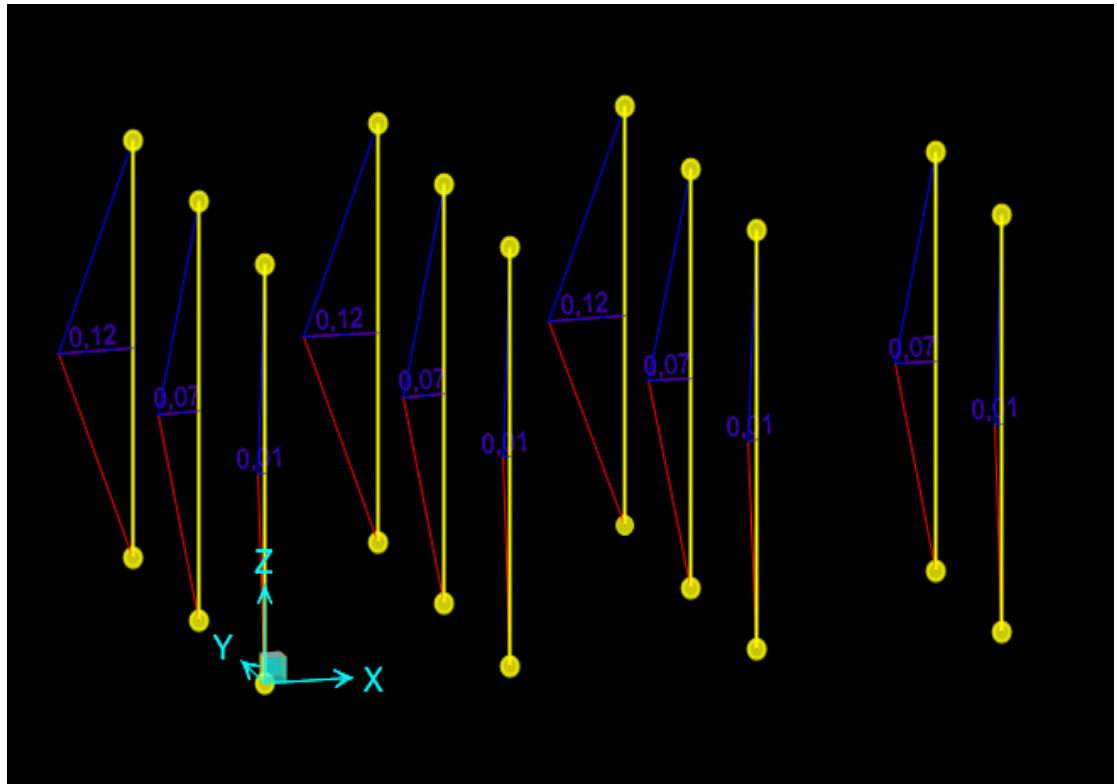




Σχ. 5.7. Μέγιστη αξονική δύναμη στο μεσαίο υποστύλωμα

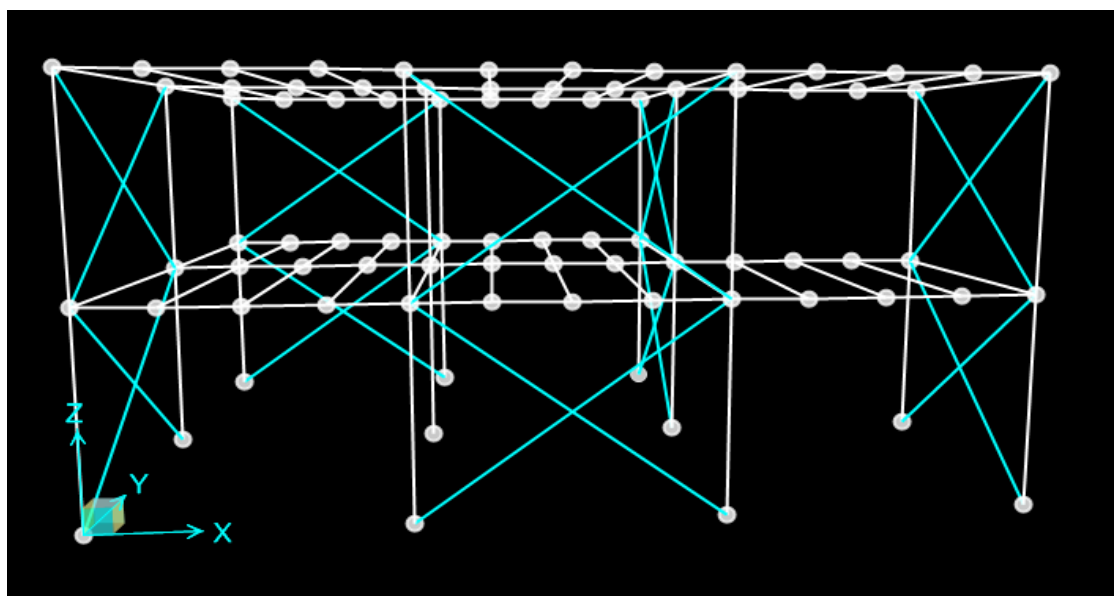


Σχ. 5.8a. Μέγιστη ροπή περί τον τοπικό y-y' για το υποστύλωμα 24-32



Σχ.5.8b. Μέγιστη ροπή περί τον τοπικό z-z' για το υποστύλωμα 24-32

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7 το μέγιστο αξονικό θλιπτικό φορτίο που καταπονεί το υποστύλωμα είναι $N_{Ed} = -113,72 \text{ kN}$. Το σύστημα των κατακόρυφων χιαστί συνδέσμων δυσκαμψίας τοποθετήθηκε ομοιόμορφα στη περίμετρο του κτιρίου για την άμεση παραλαβή των οριζοντίων συνδέσμων. Επίσης συμβάλλει στην διασφάλιση του μήκους λυγισμού των υποστυλωμάτων στην στάθμη του ορόφου με την απαραίτητη συνδρομή της πλάκας και των δοκών. Η κατανομή των χιαστί φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχ.5.9. Περιμετρική τοπθέτηση κατακόρυφων χιαστί

Η διαστασιολόγηση ξεκινάει από μια προεπιλεγμένη διατομή για το μεσαίο υποστύλωμα η οποία θα τοποθετηθεί και στα υπόλοιπα υποστυλώματα εφόσον διαπιστωθεί ότι επαρκεί. Η εταιρεία Creative Pultrusions, της οποίας τα υλικά χρησιμοποιούνται στην συγκεκριμένη εργασία, διαθέτει πίνακες με την αντοχή ορισμένων διατομών της σε θλιπτικά φορτία και στα οποία παρουσιάζεται και τι είδους αστοχία θα προκύψει (καμπτικός λυγισμός ή τοπικός). Οι Πίνακες αυτοί (Παράρτημα), δημιουργήθηκαν από την Creative Pultrusions ως εξής:

1. Οι τιμές είναι αποτελέσματα πειραμάτων
2. Τα πειράματα έγιναν σε θερμοκρασία 25°C
3. Ο συντελεστής ασφαλείας (SF) λαμβάνεται ίσος με 3,00
4. Ο συντελεστής κ λυγισμού του πρότυπου υποστυλώματος λαμβάνεται 1,00
5. Μέτρο ελαστικότητας κατά όλες τις διευθύνσεις $E = 3 \times 10^6 \text{ psi}$
6. Λόγος Poisson για όλες τις διευθύνσεις $\nu = 0,36$
7. Οι Πίνακες παρουσιάζουν τιμές του λόγου δυσκαμψίας KL / r μέχρι το 200. Συνίσταται η χρήση των τιμών μέχρι 120.
8. Δεν δημιουργήθηκε καμία αστοχία στα υποστυλώματα πριν το όριο της τάσης

Ένας από αυτούς τους πίνακες φαίνεται παρακάτω για μια πλατύπελμη διατομή $8 \times 8 \times 0.5 \text{ in}$. Στον πίνακα αυτόν (Πίνακας 5.10), στην πρώτη στήλη φαίνεται το κρίσιμο μήκος λυγισμού. Στην δεύτερη στήλη ο λόγος δυσκαμψίας kL/r , όπου r το μήκος καμπύλωσης στην τομή κορμού πέλματος. Στην τρίτη στήλη είναι η κρίσιμη τάση αστοχίας και στην τέταρτη το φορτίο αστοχίας, ενώ τέλος στην πέμπτη στήλη το είδος αστοχίας. Για αστοχία σε τοπικό λυγισμό αναφέρεται short column, ενώ για αστοχία σε καμπτικό ή στρεπτικό long column.

Διαστασιολόγηση του υποστυλώματος:

Το ισοδύναμο μήκος λυγισμού του υποστυλώματος λαμβάνεται ίσο με $k \cdot L = L = 3,00 \text{ m} = 9,84 \text{ ft}$. Το αξονικό φορτίο που ασκείται στο μεσαίο υποστύλωμα είναι $N_{Ed} = -113,732 = -25073,6 \text{ lb}$. Βλέπουμε ότι $kL = 9,84 \approx 10$ και το αντίστοιχο φορτίο $N_{b,rd} = 28875 \text{ lb}$. Επομένως επιλέγουμε την διατομή αυτή και ελέγχουμε αν όντως επαρκεί.



Pultex® Standard Structural Profiles
Wide Flange Sections

8" x 8" x 1/2" (Part# IW 880) Pultex® 1500/1525/1625 Series A = 11.67 in ² , r = 1.90 in Allowable Axial Stresses and Loads				
Effective Column Length (KL) (ft.)	KL/r	Fa (psi)	Pa (lbs.)	
1.0	6.3	5906	68921	Short Column
1.5	9.5	5906	68921	Short Column
2.0	12.6	5906	68921	Short Column
2.5	15.8	5906	68921	Short Column
3.0	18.9	5906	68921	Short Column
3.5	22.1	5906	68921	Short Column
4.0	25.3	5906	68921	Short Column
4.5	28.4	5906	68921	Short Column
5.0	31.6	5906	68921	Short Column
5.5	34.7	5906	68921	Short Column
6.0	37.9	5906	68921	Short Column
6.5	41.1	5856	68342	Short Column
7.0	44.2	5050	58928	Long Column
7.5	47.4	4399	51333	Long Column
8.0	50.5	3866	45117	Long Column
8.5	53.7	3425	39965	Long Column
9.0	56.8	3055	35648	Long Column
9.5	60.0	2742	31994	Long Column
10.0	63.2	2474	28875	Long Column
11.0	69.5	2045	23863	Long Column
12.0	75.8	1718	20052	Long Column
13.0	82.1	1464	17086	Long Column
14.0	88.4	1262	14732	Long Column
15.0	94.7	1100	12833	Long Column
16.0	101.1	967	11279	Long Column
17.0	107.4	856	9991	Long Column
18.0	113.7	764	8912	Long Column
19.0	120.0	685	7999	Long Column
20.0	126.3	619	7219	Long Column
21.0	132.6	561	6548	Long Column
22.0	138.9	511	5966	Long Column

Πίνακας 5.11. Κρίσιμα φορτία λυγισμού διατομών υπολογισμένα από τον κατασκευαστή 5.4.

Έλεγχος σε καμπτικό λυγισμό:

Ο καμπτικός ή καθολικός λυγισμός των συμβατικών προφίλ από fpr μπορεί να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας το κρίσιμο φορτίο P_{cr} του Euler όπως στα ομογενείς δομικά στοιχεία. Όμως επειδή τα συνήθη υποστυλώματα από fpr είναι μήκους από 3-4 m και ταυτοχρόνως, ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας προς μέτρο διάτμησης είναι πολύ μικρότερος από τον αντίστοιχο την ισότροπων υλικών συνιστάται η απομείωση του P_{cr} λόγω διάτμησης.

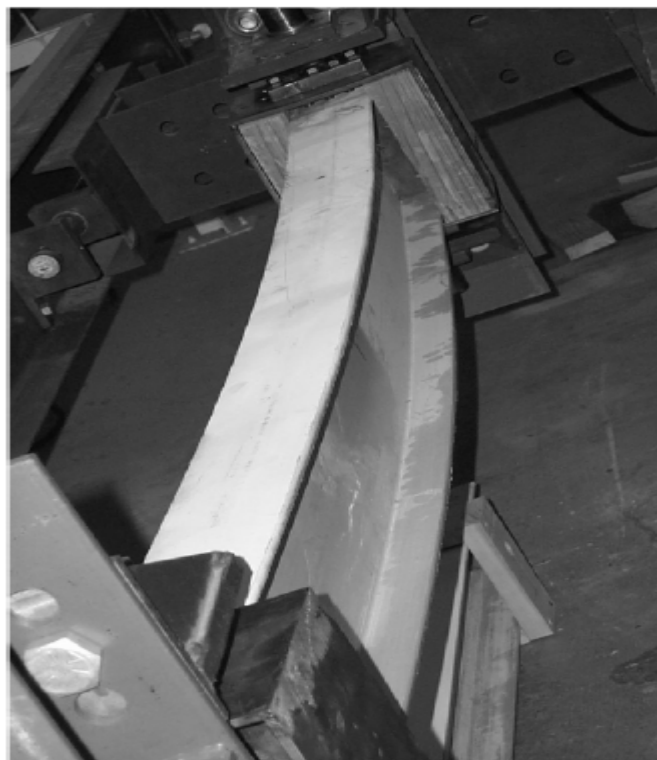
Άρα, $P_{cr} = \frac{P_{Euler}}{1 + P_{Euler} / (k_{tim} AG_{LT})}$ όπου, $k_{tim} AG_{LT} \approx A_{web} G_{LT(web)}$ και η αντίστοιχη κρίσιμη τάση, $\sigma_{cr}^{flex} = \left[\frac{\pi^2 E_L}{(kL/r)_{max}^2} \left[\frac{1}{1 + (1/k_{tim} G_{LT})(\pi^2 E_L / (kL/r)_{max}^2)} \right] \right]$.

Για την επιλεγμένη διατομή IW880 έχουμε:

h	b	tf=t w	Area	Weigh t	Y-Y'		Z-Z'		It	Iw
					I		I	W		
in	in	in	in ²	Lb/ft	in ⁴	in ³	in ⁴	in ³	in ⁴	in ⁶
8	8	0.5	11.67	10.39	128.81	2.30	42.09	10.52	1.00	673.41
cm	cm	mm	cm ²	Kg/m	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm ⁶
20.3 2	20.3 2	12.7	11.67	15.46	5361.48	529	1751.9 2	172.3 9	41.62	18034.74

Ο $k_{tim} = 0,4135$ για την δεδομένη διατομή από τον Πίνακα 2.16.

Άρα, $\sigma_{cr}^{flex} = 9502,98 \text{ lb/in}^2$ και $P_{cr} = \sigma_{cr} \cdot A = 110899,89 \text{ lb/in}^2 = 504,090 \text{ kN} > N_{Ed} = 113,72 \text{ kN}$.



Σχ. 5.12. Καμπτικός λυγισμός κεντρικά θλιβόμενου στοιχείου

Έλεγχος σε στρεπτικό λυγισμό:

Οι ανοιχτές διατομές διπλού I είναι ευαίσθητες σε στρεπτικό λυγισμό και η κρίσιμη τάση για ένα μέλος ομογενούς υλικού δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_{cr}^{tors} = \frac{1}{I_p} \left[\frac{\pi^2 E_L C_W}{(k_w L)^2} + G_{LT} J \right] \text{ όπου } I_p = (I_{yy} + I_{zz})^{0,5}$$

και το αντίστοιχο φορτίο $P_{cr}^{tor} = \sigma_c^{tor} A = 170355,25 \text{ lb} = 774,32 \text{ kN}$ και αν λάβουμε υπόψιν την επιρροή της διάτμησης τότε:

$$P_{cr}^{tor, shear} = \frac{P_{cr}^{tor}}{1 + P_{cr}^{tor} / (kAG)} = 723,27 \text{ kN}$$

Έλεγχος σε τοπικό λυγισμό:

Ο έλεγχος σε τοπικό λυγισμό του κορμού ή του πέλματος γίνεται σύμφωνα με την προσέγγιση του Kollar ή οποία αναλύθηκε προηγουμένως (Βλέπε Κεφάλαιο 5.2.3).

Η μόνη διαφορά στην προσέγγιση για τα στοιχεία δοκών έγκειται στο γεγονός ότι στα θλιβόμενα υποστυλώματα και τα δύο πέλματα θλίβονται ταυτόχρονα όταν αστοχήσουν ενώ στη δοκό αστοχούσε το ένα αφού το έτερο εφελκυόταν στην καθαρή κάμψη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να μειώνεται η στήριξη που προσφέρει ο κορμός στα πέλματα. Όπως και στις δοκούς θεωρούμε ότι τα πέλματα και ο κορμός λειτουργούν ως πλάκες.

Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

- Ένα τοίχωμα που στηρίζεται απλά στο άκρο του και το οποίο θλίβεται υπό ομοιόμορφη τάση. Έτσι υπολογίζεται η κρίσιμη τάση τοπικού λυγισμού στο πέλμα.

$$(\sigma_{free}^{ss})_f = \frac{\pi^2}{t_f (b_f/2)^2} \left[D_L \left(\frac{b_f/2}{a} \right)^2 + \frac{12}{\pi^2} D_S \right]$$

- Ένα τοίχωμα που στηρίζεται απλά στα δύο άκρα του και θλίβεται με ομοιόμορφη τάση. Αυτή η θεώρηση αναφέρεται στην κρίσιμη τάση που εμφανίζεται στο κορμό μιας διατομής I και στον κορμό και στα πέλματα μιας κοίλης ορθογωνικής διατομής.

$$(\sigma_{ss})_i = \frac{2\pi^2}{t_i b_i^2} (\sqrt{D_L D_T} + D_{LT} + 2D_S)$$

Έπειτα ελέγχεται ποιο από τα μέλη της διατομής αστοχεί πρώτο σε λυγισμό, από την συνθήκη: $(\sigma_{free}^{ss})_f (E_L^c)_f < (\sigma_{ss}^{ss})_w (E_L^c)_w$ αν λυγίζει πρώτο πέλμα και αντιστρόφως αν λυγίσει ο κορμός

Υπολογίζονται οι δυσκαμψίες των πελμάτων:

$$D_L^f = D_{11} = \frac{E_L^c t_f^3}{12(1 - \nu_L \nu_T)} = \frac{38,5 \cdot 10^5 \cdot 0,5^3}{12(1 - 0,35 \cdot 0,12)} = 41862,38 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$D_T^f = D_{22} = \frac{E_T^c}{E_L^c} \cdot D_L = \frac{19 \cdot 10^5}{28 \cdot 10^5} \cdot 41862,38 = 20659,36 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$D_{LT}^f = D_{12} = D_T \cdot \nu_T = 5023,49 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$D_S^f = \frac{t_w^3 G_{LT}}{12} = 5208,33 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

Υπολογίζονται οι δυσκαμψίες του κορμού:

$$D_L^w = D_{11} = \frac{E_L^c t_w^3}{12(1-\nu_L \nu_T)} = \frac{28 \cdot 10^5 \cdot 0,5^3}{12(1-0,35 \cdot 0,12)} = 30445,37 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$D_T^w = D_{22} = \frac{E_T^c}{E_L^c} \cdot D_L = \frac{19 \cdot 10^5}{28 \cdot 10^5} \cdot 30445,37 = 20659,36 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$D_{LT}^w = D_{12} = D_T \cdot \nu_T = 3653,44 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$D_S^w = \frac{t_w^3 G_{LT}}{12} = 5208,33 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

Βλέπουμε ότι τα πέλματα είναι πιο ανισότροπα από τον κορμό αφού έχουν μεγαλύτερες τιμές δυσκαμψιών. Κρίσιμες τάσεις στα τοιχώματα κορμού και πελμάτων:

$$(\sigma_{free}^{ss})_f = 7812,5 \text{ lb/in}^2$$

$$(\sigma_{ss}^{ss})_w = 48298,91 \text{ lb/in}^2$$

Όμως προκύπτει ότι:

$$(\sigma_{free}^{ss})_f \cdot E_{L,f}^c = 3,01 \cdot 10^{11} < (\sigma_{ss}^{ss})_w \cdot E_{L,w}^c = 1,35 \cdot 10^{12}$$

Άρα αστοχούν πρώτα τα πέλματα σε τοπικό λυγισμό.

$$\text{Στροφική δυσκαμψία ελατηρίου: } k = \frac{D_T^w}{d_w} \left[1 - \frac{(\sigma_{free}^{ss})_f \cdot E_{L,w}^c}{(\sigma_{ss}^{ss})_w \cdot E_{L,f}^c} \right] = 2604 \text{ lb}$$

Συντελεστής

ζ

στήριξης:

$$\zeta_{I-flange} = \frac{D_T^w}{k \cdot (b_f / 2)} = 1,9833$$

$$\sigma_{cr}^{local,I-flange} = \frac{1}{(b_f / 2)^2 t_f} \left(7 \sqrt{\frac{D_L^f D_T^f}{1 + 4,12 \zeta_{I-flange}}} + 12 D_S \right)$$

$$P_{cr}^{local,I-flange} = \sigma_{cr}^{local,I-flange} \cdot A_{flange} + \sigma_{cr}^{local,I-flange} \cdot A_{web} = \sigma_{cr}^{local,I-flange} \cdot A$$

Και κρίσιμη τάση:

$$\sigma_{cr}^{local,I-flange} = \frac{1}{(b_f / 2)^2 t_f} \left(7 \sqrt{\frac{D_L^f D_T^f}{1 + 4,12 \zeta_{I-flange}}} + 12 D_S \right) = 16309,47 \text{ psi}$$

Επομένως το κρίσιμο φορτίο τοπικού λυγισμού είναι:

$$P_{cr}^{local,I-flange} = \sigma_{cr}^{local,I-flange} \cdot A_{flange} + \sigma_{cr}^{local,I-flange} \cdot A_{web} = \sigma_{cr}^{local,I-flange} \cdot A$$

$$= 190331,5 \text{ lb} = 865,14 \text{ Kn} > P_{cr}^{flex} > N_{Ed} = 113,7 \text{ Kn.}$$

Έλεγχος αστοχίας υλικού:

Ελέγχονται η τάση αστοχίας του κορμού και η τάση αστοχίας του πέλματος υπό την δρώσα αξονική θλιπτική τάση, $\sigma_{\chi,Ed} = N_{Ed} / A = 25073,61 / 11,67 = 2148,55$ psi < $\sigma_{ult,f} = 45770$ psi

και $\sigma_{\chi,Ed} < \sigma_{ult,w} = 37500$ psi.

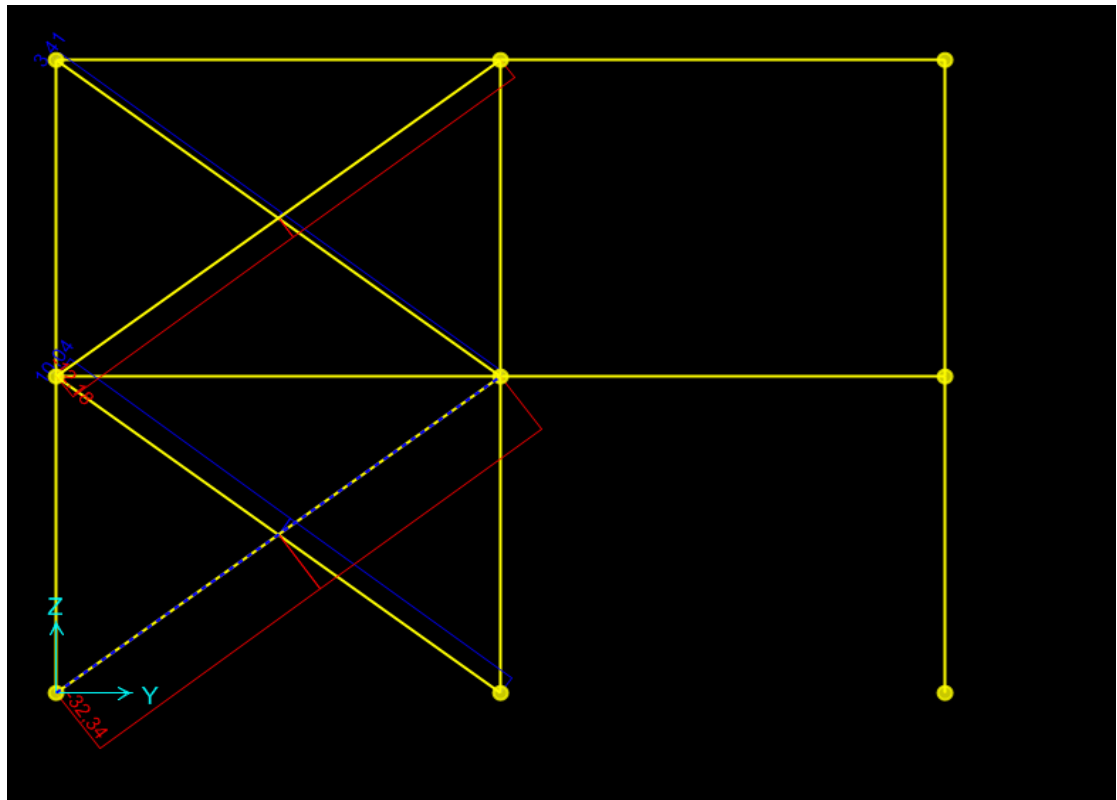
Είδος αστοχίας	Ονομαστική αντοχή	Προτεινόμενος SF	Αντοχή σχεδιασμού	Αναπτυσσόμενα Μεγέθη	Έλεγχος
Καμπτικός λυγισμός	504,090 kN	3,00	168,03	113,72 kN	OK
Στρεπτικός Λυγισμός	723,27 kN	3,00	241,09	113,72 kN	OK
Τοπικός λυγισμός	865,14 kN	3,00	288,38	113,72 kN	OK
Αστοχία υλικού κορμού	32,18 kN/cm ²	3,00	10,73	1,51 kN/cm ²	OK
Αστοχία υλικού πέλμα	26,36 kN/cm ²	3,00	8,79	1,51 kN/cm ²	OK

5.5.1 Έλεγχος κατακόρυφων συνδέσμων δυσκαμψίας:

Οι κατακόρυφοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας (χιαστί) τοποθετήθηκαν για την παραλαβή των οριζόντιων φορτίων (σεισμός, άνεμος) αλλά και για την μείωση του μήκους λυγισμού του υποστυλώματος. Μέσω της ενεργοποίησής τους κατά την δράση των οριζόντιων φορτίων συμβάλλουν στην ανάπτυξη της διαφραγματικής λειτουργίας της ανωδομής, κάτι το οποίο βέβαια διασφαλίζεται και από την πλάκα.

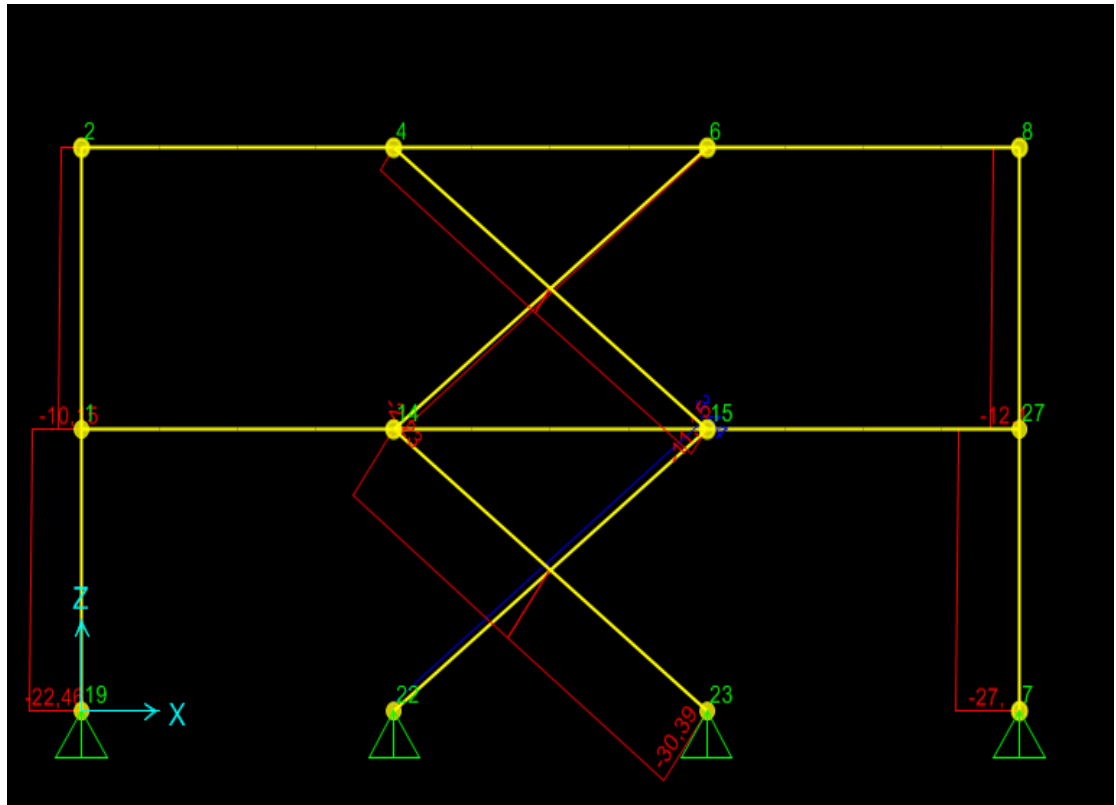
Στην ανάλυση, η μέγιστη καταπόνηση των συνδέσμων χιαστί διαμορφώθηκε από την δράση των φορτίων του ανέμου. Η διατομή των χιαστί συνδέσμων υπολογίστηκε για την δυσμενέστερη ένταση τους και τοποθετήθηκε παντού η ίδια διατομή για να κατανεμηθεί ομοιόμορφα η δυσκαμψία που προσφέρουν.

Ο συνδυασμός που έδωσε μέγιστη ένταση στους χιαστί συνδέσμους ήταν όπως αναμενόταν ο συνδυασμός με κύριο κινητό φορτίο τον άνεμο κατά την διεύθυνση Y ($\theta=90^\circ$), $1,35*G+1,05*Q+1,5*W+0,3*S$, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.12.



Σχ. 5.13. Μέγιστη φόρτιση στους χιαστί συνδέσμους ($\theta=90^\circ$)

Αντίθετα, για άνεμο κατά την X διεύθυνση η αξονική δύναμη των χιαστί φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.13.



Σχ. 5.14. Μέγιστη φόρτιση των χιαστί για ($\theta=180^\circ$)

Συνεπώς το μέγιστο αξονικό θλιπτικό φορτίο που ασκείται στους χιαστοί συνδέσμους είναι $N_{Ed} = -32,34$ kN και σύμφωνα με αυτό διαστασιολογήθηκαν. Κατά τη αντίθετη φορά του ανέμου ου σύνδεσμοι χιαστοί εφελκύνονται με μέγιστη εφελκυστική δύναμη $N_{Ed} = +10,04$ Kn. Η διαστασιολόγηση τους έγινε πρώτα για το αξονικό θλιπτικό φορτίο και μετά ελέγχθηκε η επάρκεια τους σε εφελκυσμό που είναι ευμενέστερη φόρτιση.

Έλεγχος σε καμπτικό λυγισμό:

Οι συνδέσμοι χιαστοί θεωρούνται ότι συνδέονται αμφιαρθρωτά στους κόμβους τομής τους με τα υποστυλώματα και έχουν ισοδύναμο μήκος καθολικού λυγισμού $L = 5,00$ m. Όπως αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, επιλέγεται η διατομή IW 860 (8x8x0,375 in).

Άρα,
$$P_{cr} = \frac{P_{Euler}}{1 + P_{Euler} / (k_{tim} AG_{LT})}$$
 όπου, $k_{tim} AG_{LT} \approx A_{web} G_{LT(web)}$ και η

αντίστοιχη κρίσιμη τάση,
$$\sigma_{cr}^{flex} = \left[\frac{\pi^2 E_L}{(kL/r)_{max}^2} \left[\frac{1}{1 + (1/k_{tim} G_{LT})(\pi^2 E_L / (kL/r)_{max}^2)} \right] \right]$$
.

Για την επιλεγμένη διατομή IW860 έχουμε:

h	b	f=tw	rea	Weigh t	Y-Y'		Z-Z'		It	Iw
					I	W	I	W		
in	in	in	in ²	Lb/ft	in ⁴	in ³	in ⁴	in ³	in ⁴	in ⁶
8	8	0.375	8.82	7.77	100.35	25.09	31.65	7.91	0.422	506.46
cm	cm	mm	cm ²	Kg/m	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm ⁶
20.32	20.32	9.25	56.9	11.45	4176.88	411.15	1317.37	129.62	17.56	136002.675

Ο $k_{tim} = 0, 4135$ για την δεδομένη διατομή από Πίνακα 2.16

Άρα, $\sigma_{cr}^{flex} = 3524,77 \text{ lb/in}$ και $P_{cr} = \sigma_{cr} \cdot A = 31088,46 \text{ lb/in}^2 = 141 \text{ kN} > NEd = 32,34 \text{ kN}$.

Έλεγχος σε στρεπτικό λυγισμό:

Οι ανοιχτές διατομές διπλού I είναι ευαίσθητες σε στρεπτικό λυγισμό και η κρίσιμη τάση για ένα μέλος ομογενούς υλικού δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_{cr}^{tors} = \frac{1}{I_p} \left[\frac{\pi^2 E_L C_W}{(k_w L)^2} + G_{LT} J \right] = 6562 \text{ lb / in}^2, \text{ όπου } I_p = (I_{yy} + I_{zz})^{0,5}$$

και το αντίστοιχο φορτίο $P_{cr}^{tor} = \sigma_{cr}^{tor} \cdot A = 56097,1 \text{ lb} = 263,07 \text{ kN}$ και αν λάβουμε υπόψιν την επιρροή της διάτμησης τότε:

$$P_{cr}^{tor, shear} = \frac{P_{cr}^{tor}}{1 + P_{cr}^{tor} / (kAG)} = 254,98 \text{ kN}$$

Έλεγχος σε τοπικό λυγισμό:

Υπολογίζονται οι δυσκαμψίες των πελμάτων:

$$D_L^f = D_{11} = \frac{E_L^c t_f^3}{12(1 - \nu_L \nu_T)} = \frac{38,5 \cdot 10^5 \cdot 0,375^3}{12(1 - 0,35 \cdot 0,12)} = 17660,7 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$D_T^f = D_{22} = \frac{E_T^c}{E_L^c} \cdot D_L = \frac{19 \cdot 10^5}{28 \cdot 10^5} \cdot 17660,7 = 8715,67 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$D_{LT}^f = D_{12} = D_T \cdot \nu_T = 2119,28 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$D_S^f = \frac{t_f^3 G_{LT}}{12} = 2197,27 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

Υπολογίζονται οι δυσκαμψίες του κορμού:

$$D_L^w = D_{11} = \frac{E_L^c t_w^3}{12(1 - \nu_L \nu_T)} = \frac{28 \cdot 10^5 \cdot 0,5^3}{12(1 - 0,35 \cdot 0,12)} = 12844,14 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$D_T^w = D_{22} = \frac{E_T^c}{E_L^c} \cdot D_L = \frac{19 \cdot 10^5}{28 \cdot 10^5} \cdot 12844,14 = 8715,67 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$D_{LT}^w = D_{12} = D_T \cdot \nu_T = 1541,30 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$D_S^w = \frac{t_w^3 G_{LT}}{12} = 2197,27 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

Βλέπουμε ότι τα πέλματα είναι πιο ανισότροπα από τον κορμό αφού έχουν μεγαλύτερες τιμές δυσκαμψιών. Κρίσιμες τάσεις στα τοιχώματα κορμού και πελμάτων:

$$(\sigma_{free}^{ss})_f = 4394,53 \text{ lb/in}^2$$

$$(\sigma_{ss}^{ss})_w = 27168,14 \text{ lb/in}^2$$

Όμως προκύπτει ότι:

$$(\sigma_{free}^{ss})_f \cdot E_{L,f}^c = 1,69 \cdot 10^{11} < (\sigma_{ss}^{ss})_w \cdot E_{L,w}^c = 7,6 \cdot 10^{11}$$

Άρα αστοχούν πρώτα τα πέλματα σε τοπικό λυγισμό.

$$\text{Στροφική δυσκαμψία ελατηρίου: } k = \frac{D_T^w}{d_w} \left[1 - \frac{(\sigma_{free}^{ss})_f \cdot E_{L,w}^c}{(\sigma_{ss}^{ss})_w \cdot E_{L,f}^c} \right] = 1098,62 \text{ lb}$$

Συντελεστής ζ στήριξης:

$$\zeta_{I-flange} = \frac{D_T^w}{k \cdot (b_f / 2)} = 1,9833$$

$$\sigma_{cr}^{local,I-flange} = \frac{1}{(b_f / 2)^2 t_f} \left(7 \sqrt{\frac{D_L^f D_T^f}{1 + 4,12 \zeta_{I-flange}}} + 12 D_S \right) \quad \text{Και}$$

$$P_{cr}^{local,I-flange} = \sigma_{cr}^{local,I-flange} \cdot A_{flange} + \sigma_{cr}^{local,I-flange} \cdot A_{web} = \sigma_{cr}^{local,I-flange} \cdot A$$

κρίσιμη τάση:

$$\sigma_{cr}^{local,I-flange} = \frac{1}{(b_f / 2)^2 t_f} \left(7 \sqrt{\frac{D_L^f D_T^f}{1 + 4,12 \zeta_{I-flange}}} + 12 D_S \right) = 9174 \text{ psi}$$

Επομένως το κρίσιμο φορτίο τοπικού λυγισμού είναι:

$$P_{cr}^{local,I-flange} = \sigma_{cr}^{local,I-flange} \cdot A_{flange} + \sigma_{cr}^{local,I-flange} \cdot A_{web} = \sigma_{cr}^{local,I-flange} \cdot A \\ = 80675 \text{ lb} = 366 \text{ kN} > P_{cr}^{plex} > N_{Ed} = 32,34 \text{ Kn.}$$

Έλεγχος αστοχίας υλικού:

Ελέγχονται η τάση αστοχίας του κορμού και η τάση αστοχίας του πέλματος υπό την δρώσα αξονική θλιπτική τάση, $\sigma_{\chi,Ed} = N_{Ed} / A = 7130 / 8,82 = 808,39 \text{ psi} < \sigma_{ult,f} = 45770 \text{ psi}$

και $\sigma_{\chi,Ed} \ll \sigma_{ult,w} = 37500 \text{ psi}$. Άρα δεν αστοχεί το υλικό,

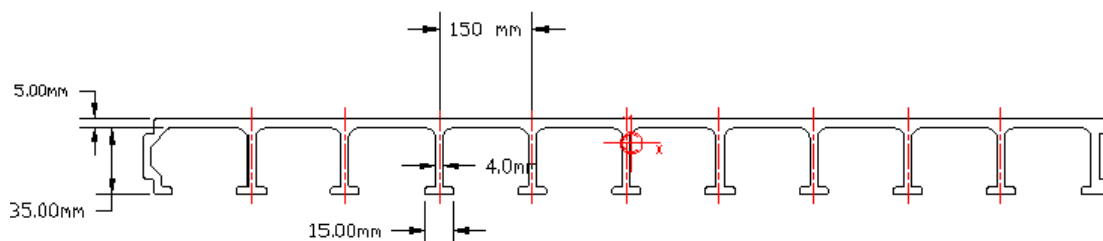
Έλεγχος εφελκόμενου χιαστί:

$$P_{cr}^{tension} = \sigma_{cr}^{tension,web} \cdot A_{web} + \sigma_{cr}^{tension,flange} \cdot A_{flange} \gg N_{Ed}^{tension} = 10,04 \text{ Kn.}$$

Είδος αστοχίας	Ονομαστική αντοχή	Προτεινόμενος SF	Αντοχή σχεδιασμού	Αναπτυσσόμενα Μεγέθη	Έλεγχος
Καμπτικός λυγισμός	141	3,00	47 kN	32,34 kN	OK
Στρεπτικός Λυγισμός	254,98 kN	3,00	85 kN	32,34 kN	OK
Τοπικός λυγισμός	366 kN	3,00	122 kN	32,34 kN	OK
Αστοχία υλικού κορμού θλίψη/εφελκυσμό	32,18/+21,30 kN/cm ²	3,00/1.1	10,73/+19,36 kN/cm ²	0,568/+0,176 kN/cm ²	OK
Αστοχία υλικού πέλμα θλίψη/εφελκυσμό	26,36/+28,12 kN/cm ² /	3,00/1.1	8,79/+25,56 kN/cm ²	0,568/+0,176 kN/cm ²	OK

5.5 Έλεγχος της πλάκας καταστρώματος (flooring deck):

Για την πλάκα ορόφου επιλέγεται το Fiberline Plank HD της εταιρίας Fiberline.



Για τον έλεγχο του στα φορτία της κατασκευής απομονώνουμε μία διατομή διπλού ταυ και την ελέγχουμε σε κάμψη.

Τα πέλματα και ο κορμός έχουν συνολικό πάχος $h=20 \cdot t=40$ mm. Επειδή η διαστρωμάτωση πελμάτων και κορμού είναι συμμετρική ως προς το μέσο επίπεδο τους δεν εμφανίζεται δευτερογενής κάμψη και τα εντατικά μεγέθη παραλαμβάνονται αποκλειστικά μέσω μεμβρανικών δράσεων. Το κατάστρωμα κατασκευάζεται από την εταιρεία Fiberline με χρήση σύνθετου υλικού Scotchply 1002. Για το υλικό E-glass/Epoxy αυτό, γνωρίζουμε τα μέτρα ελαστικότητας $E_1=40\text{GPa}$, $E_2=8\text{GPa}$, το λόγο Poisson $\nu=0.24$ και το μέτρο διάτμησης $G_{12}=4\text{GPa}$. Από αυτά υπολογίζεται πρώτα ο λόγος Poisson ν_{21} από τη σχέση

$$\nu_{21} = E_2 \frac{\nu_{12}}{E_1} = 8 \frac{0.24}{40} = 0.048$$

και κατόπιν οι δυσκαμψίες $[Q]$ στο σύστημα του υλικού 1-2

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{40}{1 - 0.24 \cdot 0.048} = 40.47\text{GPa}$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{8}{1 - 0.24 \cdot 0.048} = 8.09\text{GPa}$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{0.24 \cdot 8}{1 - 0.24 \cdot 0.048} = 1.94\text{GPa}$$

$$Q_{66} = G_{12} = 4.0\text{GPa}$$

Η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων στο σύστημα του υλικού 1-2 είναι

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 40.47 & 1.94 & 0 \\ 1.94 & 8.09 & 0 \\ 0 & 0 & 4.0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [Q] \{ \varepsilon \} = [\bar{Q}]^0 \{ \varepsilon \}$$

Στη συνέχεια, κάνουμε μετασχηματισμό της σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων αναφορικά με τις στρώσεις υπό γωνία 90° . Η μετασχηματισμένη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων ειδικά για $\theta=90^\circ$ προκύπτει απλώς αντιμεταθέτοντας τους όρους Q_{11} και Q_{22} στο μητρώο $[Q]$ και είναι:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.09 & 1.94 & 0 \\ 1.94 & 40.47 & 0 \\ 0 & 0 & 4.0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [\overline{Q}]^{90} \{\varepsilon\}$$

Στη συνέχεια μορφώνουμε το μητρώο μεμβρανικής δυσκαμψίας $[A]$ για πάχος στρώσεων $t=0.2\text{mm}$ και κώδικα $[0_4/90_2/0_4/90]_s$ με βάση τη γενική σχέση

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N \overline{Q}_{ij} t_k$$

Πχ. Για τον όρο A_{11} θα έχουμε:

$$A_{11} = 16t\overline{Q}_{11}^0 + 6t\overline{Q}_{11}^{90} = 16 \times 0.2 \times 40.47 + 6 \times 0.2 \times 8.09 = 192.14 \text{ kN/mm}$$

Και με όμοιο τρόπο υπολογίζουμε και τους λοιπούς όρους A_{ij} . Επομένως συνολικά έχουμε

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 139.20 & 8.55 & 0 \\ 8.55 & 74.46 & 0 \\ 0 & 0 & 17.60 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix}$$

Αντιστρέφοντας την παραπάνω σχέση λαμβάνουμε

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.235 & -0.830 & 0 \\ 8.55 & 13.526 & 0 \\ 0 & 0 & 56.818 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix}$$

Όπου οι όροι ενδιαφέροντος είναι οι $a_{11}=7.235 \times 10^{-3} \text{ mm/kN}$ και $a_{66}=56.818 \times 10^{-3} \text{ mm/kN}$. Η ισοδύναμη αξονική δυσκαμψία EA της διατομής είναι

$$EA = \frac{2 \cdot b + h}{a_{11}} = \frac{2 \cdot 150 + 250}{0.007235} = 76022 \text{ kN}$$

Η ισοδύναμη καμπτική δυσκαμψία EI_y της διατομής είναι

$$EI_y = \left(\frac{b \cdot h^2}{2} + \frac{h^3}{12} \right) \frac{1}{a_{11}} = \left(\frac{150 \cdot 250^2}{2} + \frac{250^3}{12} \right) \frac{1}{0.007235} = 827896029 \text{ kNmm}^2$$

Η ισοδύναμη καμπτική δυσκαμψία EI_z της διατομής είναι

$$EI_z = \frac{2 \cdot b^3}{12} \cdot \frac{1}{a_{11}} = \frac{2 \cdot 150^2}{12} \cdot \frac{1}{0.007235} = 77750236 \text{ kNmm}^2$$

Η ισοδύναμη διατμητική δυσκαμψία GA_z της διατομής είναι

$$GA_z = \frac{h}{a_{66}} = \frac{250}{0.056818} = 4400kN$$

Η ισοδύναμη διατμητική δυσκαμψία GA_y της διατομής είναι

$$GA_y = \frac{2 \cdot b}{a_{66}} = \frac{2 \cdot 150}{0.056818} = 5280kN$$

Η ισοδύναμη στρεπτική δυσκαμψία GJ της διατομής είναι αμελητέα διότι πρόκειται για ανοικτή διατομή. Τα πέλματα και ο κορμός καταπονούνται ως πλάκες και συνεπώς απαιτείται ο υπολογισμός του όρου d_{66} . Είναι

$$GJ = 4 \cdot \frac{2 \cdot b + h}{d_{66}}$$

Η ισοδύναμη δυσκαμψία στρέβλωσης EC_w της διατομής είναι

$$EC_w = \frac{b^3 \cdot h^2}{24 \cdot a_{11}} = \frac{150^3 \cdot 250^2}{24 \cdot 0.007235} = 1.2148 \cdot 10^{12} kNmm^4$$

Όταν η διατομή καταπονείται αξονικά ή καμπτικά, τα πέλματα και ο κορμός καταπονούνται μεμβρανικά με κατανεμημένη δύναμη N_x είτε εφελκυστική ή θλιπτική. Συνεπώς, επιλύονται τα εξής δύο προβλήματα

1. Εφαλκυστική $N_x = 1.0 \text{ kN/mm}$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.235 & -0.830 & 0 \\ 8.55 & 13.526 & 0 \\ 0 & 0 & 56.818 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.007235 \\ -0.00083 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Οι τάσεις που αναπτύσσονται στις στρώσεις 0° είναι

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 40.47 & 1.94 & 0 \\ 1.94 & 8.09 & 0 \\ 0 & 0 & 4.0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0.007235 \\ -0.00083 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.2911 \\ 0.0073 \\ 0 \end{Bmatrix} \text{ GPa}$$

Το κριτήριο μέγιστης τάσης δίδει συντελεστές ασφαλείας

$$\frac{1.0}{0.2911} = 3.43 \qquad \frac{0.08}{0.0073} = 10.91$$

Οι τάσεις που αναπτύσσονται στις στρώσεις 90° είναι

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.09 & 1.94 & 0 \\ 1.94 & 40.47 & 0 \\ 0 & 0 & 4.0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0.007235 \\ -0.00083 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.0569 \\ -0.0196 \\ 0 \end{Bmatrix} \text{ GPa}$$

Ο μετασχηματισμός των τάσεων στο σύστημα 1-2 δίδει

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -0.0169 \\ 0.0569 \\ 0 \end{Bmatrix} \text{ GPa}$$

Το κριτήριο μέγιστης τάσης δίδει συντελεστές ασφαλείας

$$\frac{-0.90}{-0.0196} = 46.03 \qquad \frac{0.08}{0.0596} = 1.405$$

Συνεπώς, η μέγιστη εφελκυστική δύναμη που αντέχει μια διαστρωμάτωση είναι $N_x=1.405 \text{ kN/mm}$

2. Θλιπτική $N_x=1.0 \text{ kN/mm}$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.235 & -0.830 & 0 \\ 8.55 & 13.526 & 0 \\ 0 & 0 & 56.818 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \begin{Bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -0.007235 \\ 0.00083 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Οι τάσεις που αναπτύσσονται στις στρώσεις 0° είναι

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 40.47 & 1.94 & 0 \\ 1.94 & 8.09 & 0 \\ 0 & 0 & 4.0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -0.007235 \\ 0.00083 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -0.2911 \\ -0.0073 \\ 0 \end{Bmatrix} \text{ GPa}$$

Το κριτήριο μέγιστης τάσης δίδει συντελεστές ασφαλείας

$$\frac{0.90}{0.2911} = 3.09 \qquad \frac{-0.24}{-0.0073} = 32.73$$

Οι τάσεις που αναπτύσσονται στις στρώσεις 90° είναι

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.09 & 1.94 & 0 \\ 1.94 & 40.47 & 0 \\ 0 & 0 & 4.0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -0.007235 \\ 0.00083 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -0.0569 \\ 0.0196 \\ 0 \end{Bmatrix} \text{ GPa}$$

Ο μετασχηματισμός των τάσεων στο σύστημα 1-2 δίδει

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.0169 \\ -0.0569 \\ 0 \end{Bmatrix} \text{ GPa}$$

Το κριτήριο μέγιστης τάσης δίδει συντελεστές ασφαλείας

$$\frac{1}{0.0196} = 51.15 \qquad \frac{-0.24}{-0.0596} = 4.21$$

Συνεπώς, η μέγιστη θλιπτική δύναμη που αντέχει μια διαστρωμάτωση είναι $N_x=3.09 \text{ kN/mm}$

Όταν η διατομή κάμπτεται, αστοχία συμβαίνει πρώτα στο εφελκυσμένο πέλμα στη στρώση 90° και οι ροπές αντοχής είναι

$$M_x = \left(b \cdot h + \frac{h^2}{6} \right) \cdot N_x = \left(150 \cdot 250 + \frac{250^2}{6} \right) \cdot 1.405 = 67323 \text{ kNmm} = 67.32 \text{ kNm}$$

$$M_y = \frac{2 \cdot b^2}{6} \cdot N_x = \frac{2 \cdot 150^2}{6} \cdot 1.405 = 10538 \text{ kNmm} = 10.54 \text{ kNm}$$

Η δρώσα ροπή που ασκείται $M_{Ed} = qed \cdot l^2 / 8 = 1.578 \cdot 4.00^2 / 8 = 3.155 \text{ kNm}$

Αφού $q_{ed} = 1,35(g_{επικ} \cdot b + g_{πλ} \cdot b) + 1,50(q_k) = 1.578$ (θεωρήσαμε πλάτος που ασκούνται τα διανεμημένα φορτία ίσο με το πλάτος της απομονωμένης διατομής b)

Άρα, η πλάκα ορόφου επαρκεί σε κάμψη.

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έχοντας ολοκληρώσει την ανάλυση μπορούμε επιγραμματικά να σταθούμε στα συγκεκριμένα σημεία:

- Τα σύνθετα υλικά ως καμπτόμενα μέλη του φορέα είναι ευαίσθητα στην διάτμηση λόγω του χαμηλού μέτρου διάτμησης αλλά και της μικρής διατμητικής αντοχής τους κάθετα στο προφίλ των διαστρωματώσεων.
- Είναι ευαίσθητα σε παραμορφώσεις λόγω του χαμηλού μέτρου ελαστικότητας αλλά και λόγω των ερπυστικών τάσεων. Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στον έλεγχο των παραμορφώσεων γιατί παίζει σημαντικότατο ρόλο στην διαστασιολόγηση της δοκού. Ουσιαστικά είναι ο κρίσιμος έλεγχος. Είδαμε ότι οι κύριες δοκοί στο κτίριο αναπτύσσουν βέλη υπό τις ερπυστικές τάσεις τα οποία φθάνουν κοντά στα όρια.
- Η αστοχία των μελών σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν δεν θα προέλθει από αστοχία υλικού αλλά από απώλεια της ευστάθειας τους.
- Οι κατασκευές από FRP συμπεριφέρονται εντελώς ελαστικά υπό την δράση σεισμού. Τα μέλη αναπτύσσουν ελαστικές παραμορφώσεις μέχρι την αστοχία του υλικού. Παρόλο αυτά, πραγματοποιήθηκε φασματική ανάλυση με το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού του EC8, τα αποτελέσματα της οποίας δεν έδωσαν την δυσμενέστερη φόρτιση στην κατασκευή. Στην περίπτωση μας, εφόσον το βάρος της κατασκευής είναι μικρό, δυσμενέστερη μη στατική φόρτιση προέκυψε ο άνεμος.
- Δεν υπάρχει ένας ευρέως αποδεκτός κώδικας για την διαστασιολόγηση και τον έλεγχο των μελών από FRP και πολλοί έλεγχοι βασίζονται σε εύλογες παραδοχές ή προσεγγιστικές μεθόδους. Αυτό οδηγεί στην τήρηση μεγάλων συντελεστών ασφαλείας, λόγω της αβεβαιότητας ως προς την συμπεριφορά του υλικού.
- Δεν υπάρχει μεγάλη ποικιλία σε πρότυπες διατομές (συγκριτικά με τις μεταλλικές κατασκευές). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την υπερδιαστασιολόγηση του φορέα η οποία ενισχύεται με την τήρηση μεγάλων συντελεστών ασφαλείας.

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΤΑΙΡΕΙΑ
CREATIVE PULTRUSIONS**

Pultex[®] Fiber Reinforced Polymer **SuperStructural** Profiles

Wide Flange Sections and I-Sections

1500 Series - Thermoset Polyester – Olive Green

1525 Series - Thermoset Polyester Class 1 FR – Slate Gray (Dark Gray)

1625 Series - Thermoset Vinyl Ester Class 1 FR – Beige

Pultex[®] **SuperStructural** Profiles are identified with imprinted veil.

The following data was derived from ASTM coupon and full section testing. The results are average values based on random sampling and testing of production lots. Composite materials are not homogeneous; and therefore, the location of the coupon extraction can cause variances in the coupon test results. Creative Pultrusions publishes an average value of random samples from production lots.

Property (coupon values)	ASTM Test	Units	1500/1525 Series	1625 Series
Full Section				
Modulus of Elasticity (1/2" thick profiles)	Full Section ²	10 ⁶ psi	3.9-4.0	3.9-4.0
(1/4" & 3/8" thick profiles)	Full Section ²	10 ⁶ psi	3.9	3.9
Shear Modulus (Modulus of Rigidity)	Full Section ²	10 ⁶ psi	4.0	4.0
Flexural Strength	Full Section ²	10 ⁶ psi	0.50	0.50
		psi	33,000	33,000
Flange Section - Mechanical				
Tensile Strength (LW)	D638	psi	40,000	46,000
Tensile Modulus (LW)	D638	10 ⁶ psi	4.16	4.16
Compressive Strength (LW)	D695	psi	45,770	52,500
Compressive Strength (CW)	D695	psi	17,800	20,400
Compressive Modulus (LW)	D695	10 ⁶ psi	3.85	3.85
Compressive Modulus (CW)	D695	10 ⁶ psi	1.9	1.9
Flexural Strength (LW)	D790	psi	42,800	49,200
Flexural Modulus (LW)	D790	10 ⁶ psi	2.0	2.0
Interlaminar Shear (LW) ⁵	D2344	psi	4,000	4,500
Shear Strength By Punch (PF)	D732	psi	5,500	6,000
Notched Izod Impact (LW)	D256	ft-lbs/in	28	32
Notched Izod Impact (CW)	D256	ft-lbs/in	21	24
Maximum Bearing Strength (LW)	D953	psi	33,000	38,000
Maximum Bearing Strength (CW) ³	D953	psi	23,000	26,500
Poisson's Ratio (LW)	D3039	in/in	0.35	0.35
Poisson's Ratio (CW)	D3039	in/in	0.12	0.12
Web Section - Mechanical				
Tensile Strength (LW)	D638	psi	30,300	35,000
Tensile Strength (CW)	D638	psi	10,500	12,000
Tensile Modulus (LW)	D638	10 ⁶ psi	3.1	3.1
Tensile Modulus (CW)	D638	10 ⁶ psi	1.4	1.4
Compressive Strength (LW)	D695	psi	37,500	43,125
Compressive Strength (CW)	D695	psi	14,200	16,330

Web Section - Mechanical				
Compressive Modulus (LW)	D695	10 ⁶ psi	2.8	2.8
Compressive Modulus (CW)	D695	10 ⁶ psi	1.9	1.9
Flexural Strength (LW)	D790	psi	43,320	49,800
Flexural Strength (CW)	D790	psi	17,360	19,900
Flexural Modulus (LW)	D790	10 ⁶ psi	1.9	1.9
Flexural Modulus (CW)	D790	10 ⁶ psi	1.75	1.75
Interlaminar Shear (LW) ⁵	D2344	psi	3,400	3,900
Shear Strength By Punch (PF)	D732	psi	5,500	6,000
Notched Izod Impact (LW)	D256	ft-lbs/in	38	43
Notched Izod Impact (CW)	D256	ft-lbs/in	19	22
Maximum Bearing Strength (LW)	D953	psi	33,980	39,000
Maximum Bearing Strength (CW) ³	D953	psi	30,000	34,500
Poisson's Ratio (LW)	D3039	in/in	0.35	0.35
Poisson's Ratio (CW)	D3039	in/in	0.12	0.12
In-plane Shear (LW)	Modified D2344 ⁴	psi	7,000	7,000
Physical				
Barcol Hardness ¹	D2583		33	39
Water Absorption	D570	% Max	0.6	0.6
Density	D792	lbs/in ³	0.060-0.070	0.060-0.070
Specific Gravity	D792		1.66-1.93	1.66-1.93
Coefficient of Thermal Expansion (LW)	D696	10 ⁻⁶ in/in/°F	4.4	4.4
Thermal Conductivity (PF)	C177	BTU-in/ft ² /hr/°F	4	4
Electrical				
Arc Resistance (LW)	D495	seconds	120	120
Dielectric Strength (LW)	D149	KV/in	40	40
Dielectric Strength (PF)	D149	volts/mil	200	200
Dielectric Constant (PF)	D150	@60Hz	5.2	5.2

LW = lengthwise

CW = crosswise

PF = perpendicular to laminate face

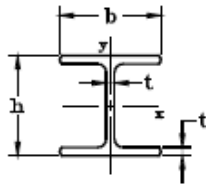
¹Pultex® uses a synthetic veil that reduces the Barcol Hardness, but does not reflect lack of cure.

²Full section testing is based on a 3-point bend with simply supported end conditions (Reference *The New and Improved Pultex® Pultrusion Global Design Manual* Appendix for details).

³Crosswise bearing strength of the Web sections of 1/4" profiles = 20,500 psi.

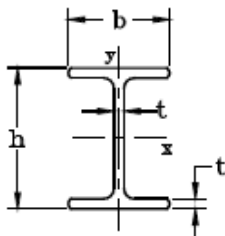
⁴Follow ASTM D2344, but rotate coupon 90° (cut section of coupon length faces up).

⁵Tested on a 3:1, span to depth ratio.



Pultex® Wide Flange Sections

Part Number	Depth(h) in	Width(b) in	Thick-ness(t) in	Area in ²	Weight lb/ft	X-X axis			Y-Y axis			Design	
						I in ⁴	S in ³	r in	I in ⁴	S in ³	r in	J in ⁴	C _w in ⁶
IW340	3.00	3.00	.25	2.17	1.85	3.23	2.15	1.22	1.11	0.74	0.71	0.047	2.49
IW440	4.00	4.00	.25	2.92	2.86	8.05	4.03	1.66	2.63	1.32	0.95	0.063	10.52
IW640	6.00	6.00	.25	4.42	3.83	28.58	9.53	2.54	8.91	4.46	1.42	0.094	80.21
IW660	6.00	6.00	.375	6.57	5.79	40.76	13.59	2.49	13.32	4.44	1.42	0.316	119.84
IW860	8.00	8.00	.375	8.82	7.77	100.35	25.09	3.37	31.65	7.91	1.90	0.422	506.46
IW880	8.00	8.00	.50	11.67	10.39	128.81	32.20	3.32	42.09	10.52	1.90	1.000	673.41
IW960	10.00	10.00	.375	11.07	9.59	200.45	40.09	4.26	61.94	12.39	2.37	0.527	1548.59
IW980	10.00	10.00	.50	14.67	12.92	259.36	51.87	4.20	82.38	16.48	2.37	1.250	2059.52
IW982	12.00	12.00	.50	17.67	15.65	457.26	76.21	5.09	142.59	23.77	2.84	1.500	5133.35



Pultex® I-Sections

Part Number	Depth(h) in	Width(b) in	Thick-ness(t) in	Area in ²	Weight lb/ft	X-X axis			Y-Y axis			Design	
						I in ⁴	S in ³	r in	I in ⁴	S in ³	r in	J in ⁴	C _w in ⁶
IB340	3.00	1.50	.25	1.42	1.22	1.803	1.202	1.178	0.140	0.186	0.314	0.031	0.315
IB440	4.00	2.00	.25	1.92	1.65	4.530	2.265	1.537	0.329	0.329	0.414	0.042	1.316
IB640	6.00	3.00	.25	2.92	2.49	16.17	5.39	2.35	1.11	0.74	0.62	0.063	9.99
IB660	6.00	3.00	.375	4.32	3.67	22.93	7.64	2.31	1.67	1.11	0.62	0.211	15.00
IB860	8.00	4.00	.375	5.82	5.17	56.71	14.18	3.12	3.95	1.97	0.82	0.281	63.12
IB880	8.00	4.00	.50	7.67	6.81	72.48	18.12	3.07	5.27	2.63	0.82	0.667	84.26
IB960	10.00	5.00	.375	7.32	6.43	113.55	22.71	3.94	7.71	3.08	1.03	0.352	192.80
IB980	10.00	5.00	.50	9.67	8.51	146.45	29.29	3.89	10.27	4.11	1.03	0.833	256.84
IB982	12.00	6.00	.50	11.67	10.31	258.76	43.13	4.71	17.76	5.92	1.23	1.000	639.33

Βιβλιογραφία

1. Ιωάννης Γ. Ραυτογιάννης (2013), «Σύνθετα Υλικά», Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ
2. Lawrence C. Bank, «Composites for Construction», «Structural Design with FRP materials»
3. Creative Pultrusions Inc. (2004). The Pultex Pultrusion Design Manual. Creative Pultrusions.
4. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (2005). « Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, 2^η έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
5. Ερμόπουλος Ι. (2005). « Ευρωκώδικας 1, 2^η έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
6. Μιχάλτσος Γ. (2008). « Ελαφρές μεταλλικές κατασκευές. Μέθοδοι υπολογισμού, 2^η έκδοση», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
7. Μιχάλτσος Γ. (2009). « Ελαφρές μεταλλικές κατασκευές. Θεωρία και εφαρμογές, 3^η έκδοση», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
8. Βάγιας Ι. (2003). « Σιδηρές κατασκευές – Ανάλυση και διαστασιολόγηση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
9. ASCE Committee on Composite Construction Task Group on Steel-FRP Composite Construction STEEL-FRP ‘COMPOSITE STRUCTURAL
10. Clarke, J. L. (1996). Structural Design of Polymer Composites -
11. Creative Pultrusions Inc. (2004). The Pultex Pultrusion Design Manual. Creative Pultrusions.
12. Campbell, F. (2010). Structural Composite Materials. ASM International.
13. Clarke, J. L. (1996). Structural Design of Polymer Composites - EUROCOMP Design Code and Handbook.
14. National Research Council of Italy, “Guide for the Design and Construction of Structures made of FRP Pultruded Elements