

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



Διπλωματική εργασία

**ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ**  
**ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΔΟΚΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ**  
**ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ**

**ΧΑΤΖΗΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΙΟΡΔΑΝΙΑ**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των  
απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

**2023**

**© 2023 Χατζηβασιλείου Ιορδανία**

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## **Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής: Δρ. Λάμπρος Κούτας

(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής: Δρ. Παπακωνσταντίνου Χρήστος

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Φράγκου Αθανάσιος

Μέλος Εργαστηριακού Διδακτικού Προσωπικού (ΕΔΙΠ), Τμήμα  
Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

*Στην μνήμη του πολυαγαπημένου μου πατέρα, Ιορδάνη  
και σε όλη την οικογένειά μου*

## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, κ. Κούτα Λάμπρο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Πάνω απ' όλα, θα ήθελα να εκφράσω την αμέριστη ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου, Αργυρώ και Ιορδάνη, στις αδερφές μου, Ελίνα και Έλενα και στον ανιψιό μου Θωμά - Χρήστο για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου, των οποίων η ηθική και ψυχολογική υποστήριξη συνετέλεσε και αυτή με την σειρά της στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής.

Χατζηβασιλείου Ιορδανία

# ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΔΟΚΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ

Χατζηβασιλείου Ιορδανία

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2023

Επιβλέπων Καθηγητής: Κούτας Λάμπρος, Επίκουρος Καθηγητής Π.Θ.

## Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε η ανάπτυξη ενός λογισμικού για τον υπολογισμό καμπτικής ενίσχυσης δοκού οπλισμένου σκυροδέματος (Ο.Σ.), χωρίς αξονικό φορτίο, με ινοπλισμένα πολυμερή (FRP's). Σημαντικό πλεονέκτημα του λογισμικού αποτελεί το γνώριμο και εύχρηστο περιβάλλον για τον χρήστη, αυτό του Excel. Αρχικά, αναλύονται τα είδη των ινοπλισμένων πολυμερών και οι τρόποι με τους οποίους έχουν την δυνατότητα να ενισχύσουν, τόσο τα δομικά μέλη μια κατασκευής, όσο και ειδικότερα να ενισχύσουν μια δοκό καμπτικά. Στην συνέχεια, αναφέρεται τι εκπροσωπεί και που αποσκοπεί η ομοσπονδία της fib, μαζί με τα πεδία που αυτή ασχολείται και εξελίσσεται. Ακολούθως, παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια ανάπτυξης του λογισμικού. Συγκεκριμένα, αναλύεται ο αλγόριθμος ανάλυσης της καμπτικής ενίσχυσης δοκού με FRP's, καθώς και της διαδικασίας επαλήθευσης της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, μέσω ελέγχου της ικανοποίησης της οριακής κατάστασης αστοχίας (Ο.Κ.Α.) για το σύνθετο υλικό σε δύο διαδοχικά σημεία της κρίσιμης διατομής της δοκού. Ο αλγόριθμος του λογισμικού στηρίχθηκε στις διατάξεις των Ευρωπαϊκών Κανονισμών (Ευρωκώδικας 2 και 8), καθώς και στις οδηγίες σχεδιασμού της fib (2019). Τέλος, παρουσιάζεται το λογισμικό μέσω αριθμητικού παραδείγματος, καθώς και σημαντικές παραμετρικές αναλύσεις, σχετικές με τον βαθμό που η ροπή αντοχής επηρεάζεται από το γεωμετρικό ποσοστό ενίσχυσης

εφελκυσμένου οπλισμού χάλυβα και σύνθετου υλικού, μέσω ποιοτικών διαγραμμάτων, που οδήγησαν σε χρήσιμα συμπεράσματα.

**Λέξεις Κλειδιά:** Λογισμικό ανάλυσης δοκού, οπλισμένο σκυρόδεμα, καμπτική ενίσχυση, ινοπλισμένα πολυμερή.

## Abstract

This thesis studies the development of a software for the flexural strengthening of reinforced concrete (R.C.) beam, without axial force, with use of FRP, using a familiar and wieldy user interface of Excel. Initially, are analyzed the types of FRP's and the ways they can strengthen, both the structural members of a structure, and especially strengthen a beam flexurally. In the following, is described what the fib federation represents and what it aims to do, along with the fields it deals with and develops. Subsequently, is presented the methodology followed for the development of the software. In specific, is analyzed the algorithm for the flexural strengthening of R.C. beam with use of FRP, as well as the process of verifying the reliability of the analysis results, through ultimate limit state (U.L.S.) control for FRP at critical cross section's consecutive points. The software's algorithm was based on the provisions of the Eurocodes (EC2 and EC8), as well as on the fib design guidelines (2019). Then, is presented the software through numerical example, as well as the significant parametric analyses, related to the percentage at which the moment of resistance is affected of the geometric percentage of steel reinforcement and strengthening with FRP's, through quality charts, which led to useful conclusions.

**Key Words:** Analysis beam software, reinforced concrete, flexural strengthening, Fibre - reinforced polymer (FRP).



## Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1 Περιγραφή ανάγκης ενίσχυσης των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα.....	1
1.2 Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας .....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	3
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	3
2.1 Ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) .....	3
2.2 Καμπτική ενίσχυση δοκού με ινοπλισμένα πολυμερή (FRP).....	10
2.3 Οδηγίες σχεδιασμού της fib (2019).....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	21
3. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ.....	21
3.1 Στάδια λειτουργίας – Γενικό διάγραμμα ροής προγράμματος .....	21
3.1.1 Εισαγωγή δεδομένων από τον χρήστη.....	21
3.1.2 Επεξεργασία δεδομένων.....	22
3.1.2.1 Ανάλυση επάρκειας δοκού σε κάμψη.....	22
3.1.2.2 Ανάλυση καμπτικής ενίσχυσης δοκού με ινοπλισμένα πολυμερή (FRP).....	25
3.1.2.3 Έλεγχος μεθόδου - Επαλήθευση.....	29
3.1.3 Αποτελέσματα Ανάλυσης.....	34
3.2 Αναλυτικό διάγραμμα ροής λογισμικού .....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	38
4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ .....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	44
5. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ – ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ .....	44

5.1 Σχέση $\rho_s - \mu R_d$ .....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	49
6. ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	49
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	51
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	53
A. Κώδικας λογισμικού σε Visual Basic for Applications .....	53
B. Κώδικας για τις παραμετρικές αναλύσεις σε Visual Basic for Applications .....	77

## Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 2.1:</b> Ενδεικτικές ιδιότητες ινών (Feldman 1989, Kim 1995).....	6
<b>Πίνακας 2.2:</b> Ενδεικτικές πειράματος των Fanning and Kelly (2001).....	18

## Κατάλογος Σχημάτων

<b>Σχήμα 2.1:</b> (α) Ελάσματα άνθρακα (Dongguan Juli Composite Technology Co., Ltd, 2021), (β) ύφασμα άνθρακα (CFRP) (Τριανταφύλλου, 2004).....	4
<b>Σχήμα 2.2:</b> Ύφασμα υάλου (GFRP) (alibaba.com, 2021).....	5
<b>Σχήμα 2.3:</b> Ύφασμα αραμιδίου (AFRP) (indiamart.com, 2021).....	5
<b>Σχήμα 2.4:</b> Μορφές αστοχίας δοκού σε καμπτική ενίσχυση με ινοπλισμένα πολυμερή (Τριανταφύλλου, 2004).....	11
<b>Σχήμα 2.5:</b> Αγκύρωση σύνθετων υλικών (Τριανταφύλλου, 2004).....	14
<b>Σχήμα 2.6:</b> Αποκόλληση FRP σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή δοκού (Quattlebaum, 2002)...	16
<b>Σχήμα 2.7:</b> Διάγραμμα Φορτίου – Ανηγγμένης θλιπτικής παραμόρφωσης σκυροδέματος (Fanning, Kelly 2001).....	17
<b>Σχήμα 3.1:</b> Γενικό διάγραμμα ροής λογισμικού.....	21
<b>Σχήμα 3.2:</b> Ανάλυση διατομής στην οριακή κατάσταση αντοχής. (α) Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομής, (β) Προφίλ παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής, (γ) Προφίλ εσωτερικών δυνάμεων (Τριανταφύλλου, 2004).....	23
<b>Σχήμα 3.3:</b> Ανάλυση διατομής στην οριακή κατάσταση αντοχής, παρουσία FRP. (α) Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομής, (β) Προφίλ παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής, (γ) Προφίλ εσωτερικών δυνάμεων (Τριανταφύλλου, 2004).....	27
<b>Σχήμα 3.4:</b> Αναλυτικό διάγραμμα ροής λογισμικού.....	37
<b>Σχήμα 4.1:</b> Εισαγωγή μήκος και φόρτιση δοκού από τον χρήστη.....	38
<b>Σχήμα 4.2:</b> (α) Εισαγωγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών διατομής και ποιότητας χάλυβα οπλισμού.....	38
<b>Σχήμα 4.2:</b> (β) Εισαγωγή ποιότητας χάλυβα οπλισμού.....	39
<b>Σχήμα 4.3:</b> Διάγραμμα δρωσών ροπών κάμψης $M_{Ed}$ .....	39
<b>Σχήμα 4.4:</b> Εμφάνιση μέγιστης τιμής δρώσας ροπής κάμψης $M_{Ed}$ .....	39
<b>Σχήμα 4.5:</b> Εισαγωγή δεδομένων FRP και $\epsilon_0$ από τον χρήστη.....	39
<b>Σχήμα 4.6:</b> Παράθυρο μηνύματος για απαίτηση ενίσχυσης της δοκού.....	40
<b>Σχήμα 4.7:</b> Παράθυρο μηνύματος για μη απαίτηση ενίσχυσης της δοκού.....	40
<b>Σχήμα 4.8:</b> Αποτελέσματα του λογισμικού εύρεσης ποσότητας ενίσχυσης δοκού με FRP....	41
<b>Σχήμα 4.9:</b> Επιλογή τιμής συντελεστών $K_{vb1}$ και $K_{vb2}$ .....	41
<b>Σχήμα 4.10:</b> Επιλογή είδους ράβδων.....	42

<b>Σχήμα 4.11:</b> Επιλογή είδους FRP.....	42
<b>Σχήμα 4.12:</b> Αποτελέσματα διαδικασίας ελέγχου μεθόδου.....	43
<b>Σχήμα 5.1:</b> Διάγραμμα ποιοτικής απεικόνισης της σχέσης $\rho_s - \mu_{Rd}$ .....	46
<b>Σχήμα 5.2:</b> Διάγραμμα ποιοτικής απεικόνισης της σχέσης $\rho_f - \mu_{Rd}$ για αποκόλληση FRP.....	47
<b>Σχήμα 5.3:</b> Διάγραμμα ποιοτικής απεικόνισης της σχέσης $\rho_f - \mu_{Rd}$ για θραύση FRP.....	48

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### 1.1 Περιγραφή ανάγκης ενίσχυσης των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα

Διαχρονικά αποτελεί μείζον πρόβλημα για τους μηχανικούς το ζήτημα της ανάγκης ενίσχυσης των κατασκευών. Ιδιαίτερως τις τελευταίες δεκαετίες, εγείρεται το θέμα της αναβάθμισης των διαφόρων κτιρίων και κατασκευών, καθώς έχει μειωθεί σημαντικά ο ρυθμός ανέγερσης νέων κτιρίων.

Στην χώρα μας, εξαιτίας της υψηλής σεισμικότητάς της και της ύπαρξης πολλών κτιρίων που επηρεάζονται αρκετά χρόνια από διαβρωτικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες, κρίνεται αναγκαία η μελέτη και η αναβάθμιση των τεχνικών ενίσχυσης των κατασκευών. Έχουν πλέον αναθεωρηθεί οι παλαιότεροι αντισεισμικοί κανόνες και έχουν θεσπιστεί νεότεροι και αυστηρότεροι κανονισμοί σχετικά με την ασφάλεια και την αντοχή των κτιρίων σε περιπτώσεις σεισμού. Συνεπώς, η ενίσχυση των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα με την χρήση κατάλληλων νέων τεχνικών, είναι ζωτικής σημασίας για την διάρκεια ζωής και την στατική επάρκεια των κτιρίων. Οι ελλείψεις και οι δομικές ανεπάρκειες των υφιστάμενων κτιρίων, έχουν δημιουργηθεί σταδιακά και ως αποτέλεσμα της διαβρωτικής επίδρασης από μηχανικούς, φυσικούς, χημικούς - βιοχημικούς παράγοντες, καθώς και από θερμοκρασιακές διαφορές, παγετούς και ξηράνσεις. (Δερουκάκη, 2020)

Η μελέτη και η έρευνα για την ενίσχυση των υφιστάμενων κτιρίων και κατασκευών θα είναι αδιάκοπη, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η παράταση του χρόνου ζωής τους και ο εκσυγχρονισμός των πρωτοκόλλου ασφαλείας τους.

## 1.2 Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας, αποτελεί η δημιουργία λογισμικού για τον υπολογισμό καμπτικής ενίσχυσης δοκού οπλισμένου σκυροδέματος, χωρίς αξονικό φορτίο, με ινοπλισμένα πολυμερή (FRP's). Η ανάλυση αφορά τις περιπτώσεις αστοχίας αμφιέριστης δοκού είτε για αποκόλληση του FRP σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή, είτε για θραύση του FRP, είτε για σύνθλιψη του σκυροδέματος. Η απαιτούμενη ποσότητα σύνθετου υλικού υπολογίζεται, με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι έλεγχοι για την (Ο.Κ.Α.). Επιπλέον, στο λογισμικό, γίνεται επαλήθευση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, μέσω διαδικασίας, η οποία βασίζεται στον έλεγχο της (Ο.Κ.Α.) του FRP μεταξύ δύο καμπτικών ρωγμών της δοκού με καθορισμένη απόσταση. Το υπολογιστικό εργαλείο αναπτύχθηκε με χρήση της Visual Basic for Applications, καθώς επίσης, η εισαγωγή των δεδομένων του χρήστη στο λογισμικό και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων βρίσκονται στο περιβάλλον του Excel. Τέλος, κρίθηκε αναγκαία η μελέτη σημαντικών παραμετρικών αναλύσεων, που αφορούν την σχέση του γεωμετρικού ποσοστού εφελκυσμένου οπλισμού χάλυβα και ενίσχυσης με ινοπλισμένα πολυμερή με την ανηγμένη ροπή αντοχής που αναπτύσσεται.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

#### 2.1 Ινοπλισμένα πολυμερή (FRP)

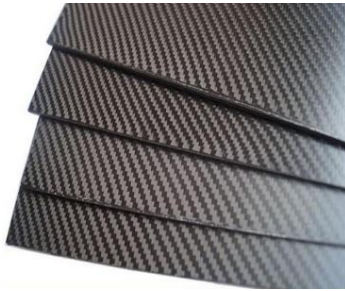
Τα ινοπλισμένα πολυμερή (FRP), καταλαμβάνουν τα τελευταία 15 χρόνια ένα πολύ σημαντικό κομμάτι στο πεδίο των ενισχύσεων και των επισκευών. Τα σύνθετα αυτά, προηγμένα υλικά αποτελούνται από τον συνδυασμό συνεχών ινών (π.χ. άνθρακα, γυαλιού, αραμιδίου), συνήθως μία διεύθυνσης, σε πολυμερική μήτρα, συχνότερα εποξειδικής ρητίνης. Η εφαρμογή τους ως οπλισμός ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, πραγματοποιείται με την επικόλληση των ινών, μέσω της εποξειδικής ρητίνης, σε εξωτερικές επιφάνειες δομικών στοιχείων (δοκοί, πλάκες, υποστυλώματα, τοιχοποιίες κ.τ.λ.), με κατάλληλο προσανατολισμό ινών, προκειμένου να παραλαμβάνουν τις εφελκυστικές δυνάμεις. Η μορφή στην οποία διατίθενται στην αγορά τα σύνθετα υλικά, είναι προκατασκευασμένα ελάσματα, ράβδοι και κελύφη ή εύκαμπτα υφάσματα με ίνες μία ή δύο διευθύνσεων.

Στον τομέα των ενισχύσεων, κυριότερα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών αποτελούν, η υψηλή εφελκυστική αντοχή τους (υπερτερεί από αυτή του χάλυβα), το χαμηλό βάρος τους (σχεδόν το ¼ του χάλυβα), η ανθεκτικότητα τους σε διαβρωτικούς παράγοντες στο πέρασμα του χρόνου, καθώς επίσης και η διαθεσιμότητα τους σε πολλές και διαφορετικές γεωμετρικές διαστάσεις υλικού. Ορισμένα μειονεκτήματά τους, είναι η χαμηλή αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες, το σχετικά υψηλό κόστος, και η ασυμβατότητα τους με το υπόστρωμα (σκυρόδεμα ή τοιχοποιία) που είναι πιθανό να προκύψει, εξαιτίας κακής ποιότητας του υποστρώματος.

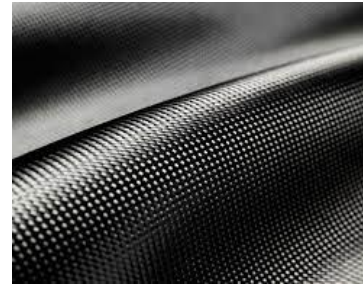
Οι ίνες διαμέτρου 5-25μm, αναλαμβάνουν τις δυνάμεις (κυρίως εφελκυστικές) παράλληλα στην διεύθυνση τους. Βασικό χαρακτηριστικό τους αποτελεί η εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή και η γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι την θραύση τους. Οι κυριότεροι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται στο πεδίο των ενισχύσεων είναι οι ίνες άνθρακα (ανθρακονήματα), οι ίνες υάλου (υαλονήματα) και οι ίνες αραμιδίου (Τριανταφύλλου, 2004).



Οι ίνες άνθρακα έχουν πυκνότητα  $1800-1900 \text{ kg/m}^3$  και παρασκευάζονται είτε από θερμική κατεργασία του πολυακρονιτριλίου, είτε μέσω απόσταξης κάρβουνου οι οποίες μειονεκτούν σε αντοχή από τις πρώτες. Δεν απορροφούν νερό και είναι χημικά αδρανείς στους περισσότερους διαλύτες. Διαθέτουν υψηλή ανθεκτικότητα σε κόπωση, ερπυσμό και διάβρωση (Χιώτης, 2012). Διατίθενται στην αγορά σε μορφή ελάσματος ή υφάσματος, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2.1α και Σχήμα 2.1β:



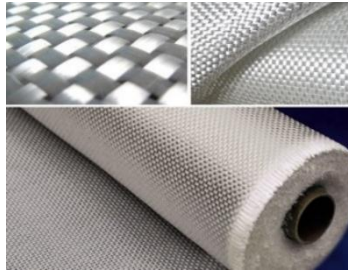
(α)



(β)

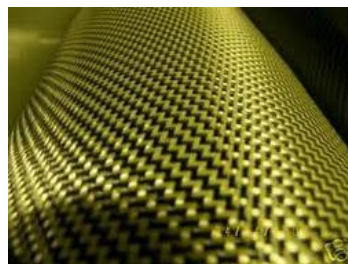
**Σχήμα 2.1:** (α) Ελάσματα άνθρακα (Dongguan Juli Composite Technology Co., Ltd, 2021), (β) υφάσμα άνθρακα (CFRP) (Τριανταφύλλου, 2004).

Οι ίνες υάλου έχουν πυκνότητα  $2300-2500 \text{ kg/m}^3$  και παρασκευάζονται από λιωμένο γυαλί. Διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, τις ίνες τύπου E, τις ίνες τύπου Z και τις ίνες τύπου S. Οι τύποι ινών που συμμετέχουν περισσότερο στις ενισχύσεις/επισκευές των κατασκευών είναι οι ίνες E και S. Οι ίνες τύπου E αποτελούν τον συνηθέστερο τύπο γυαλιού, ο οποίος όμως διαθέτει χαμηλότερη αντοχή σε αλκαλικό περιβάλλον (όπως το σκυρόδεμα), σε σχέση με αυτές των τύπων Z. Οι ίνες τύπου S παρουσιάζουν υψηλή αντοχή και μέτρο ελαστικότητας, αλλά είναι ακριβότερες των ινών E. Οι ίνες υάλου είναι ευαίσθητες στην παρουσία υγρασίας, αλλά είναι δυνατόν να προστατευθούν με την κατάλληλη επιλογή μήτρας. Επιπλέον, έχουν χαμηλή ανθεκτικότητα σε διάβρωση, χωρίς όμως να παρουσιάζουν ερπυστικές παραμορφώσεις. Η αντοχή τους σε κόπωση είναι μικρότερη από τα φύλλα άνθρακα ή αραμιδίου (Χιώτης, 2012). Διατίθενται στην αγορά σε μορφή υφάσματος, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2.2:



**Σχήμα 2.2:** Ύφασμα υάλου (GFRP) (alibaba.com, 2021)

Οι ίνες αραμιδίου που διατίθενται στην αγορά διακρίνονται σε αυτές οι οποίες προέρχονται από αρωματικό πολυαμίδιο (Kevlar) και σε εκείνες οι οποίες προέρχονται από αρωματικό πολυαιθεραμίδιο (Technora), με την πρώτη κατηγορία ινών να χρησιμοποιείται συχνότερα στην αγορά. Η πυκνότητα τους είναι  $1450 \text{ kg/m}^3$ . Κύριο πλεονέκτημα τους αποτελεί η εξαιρετική τους συμπεριφορά σε κρουστικά φορτία, γεγονός που τα συνιστά, τα τελευταία χρόνια, πρώτα σε προτίμηση για την κατασκευή μανδυών σε υποστηλώματα γεφυρών, όπου υπάρχει κίνδυνος πρόσκρουσης οχημάτων. Διαθέτουν μεγάλη ευαισθησία σε θερμό περιβάλλον με την υγρασία να βρίσκεται σε υψηλά ποσοστά και παρουσιάζουν ερπυστικές παραμορφώσεις υπό δεδομένη τάση. Η χρήση τους είναι λιγότερο συχνή στον τομέα των ενισχύσεων και των επισκευών, σε σχέση με την χρήση των ινών άνθρακα και υάλου (Τριανταφύλλου, 2004), (Χιώτης, 2012). Διατίθενται στην αγορά σε μορφή υφάσματος, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2.3.



**Σχήμα 2.3:** Ύφασμα αραμιδίου (AFRP) (indiamart.com, 2021)

Στον παρακάτω Πίνακα 2.1, δίνονται συνοπτικά οι διαφορετικές ιδιότητες των παραπάνω τύπων ινών. Οι τιμές αυτές έχουν προκύψει από δοκιμές μονοτονικής φόρτισης, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση εξωγενών παραγόντων (Τριανταφύλλου, 2004).

**Πίνακας 2.1:** Ενδεικτικές ιδιότητες ινών (Feldman 1989, Kim 1995)

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας (kN/mm <sup>2</sup> )	Εφελκυστική αντοχή (N/mm <sup>2</sup> )	Οριακή παραμόρφωση εφελκυστικής αστοχίας (%)
<b>Άνθρακας</b>			
Υψηλής αντοχής	215-235	3500-4800	1.4-2.0
Υπέρ-υψηλής αντοχής	215-235	3500-6000	1.5-2.3
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	350-500	2500-3100	0.5-0.9
Υπέρ-υψηλού μέτρου ελαστικότητας	500-700	2100-2400	0.2-0.4
<b>Γυαλί</b>			
E	70-75	1900-3000	3.0-4.5
Z	70-75	1900-3000	3.0-4.5
S	85-90	3500-4800	4.5-5.0
<b>Αραμίδιο</b>			
Χαμηλού μέτρου ελαστικότητας (Κέβλαρ 29)	70-80	3500-4100	4.3-5.0
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας (Κέβλαρ 29, Twaron)	115-130	3500-4000	2.5-3.5

Σε ότι αφορά την μήτρα των σύνθετων υλικών, αυτή αποτελεί την συγκολλητική ύλη μεταξύ των ινών. Ο ρόλος της είναι να προστατεύει τις ίνες από εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες και να εξασφαλίζει την μεταφορά δυνάμεων σε αυτές. Παράλληλα, καθορίζει αρκετές από τις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών, όπως είναι η αντοχή κάθετα στη διεύθυνση των ινών, η διατμητική και η θλιπτική αντοχή. Οι μήτρες, είναι περισσότερο ευάλωτες στην θερμότητα και στην παρουσία νερού σε σχέση με τις ίνες στις οποίες εμποτίζονται. Οι τύποι ρητινών που χρησιμοποιούνται ως μήτρες στα σύνθετα υλικά είναι οι εποξειδικές, οι πολυεστερικές και οι βινυλεστερικές, με τον πρώτο τύπο να αποτελεί τον πλέον χρησιμοποιούμενο, καθώς διαθέτει εξαιρετικά μηχανικά

χαρακτηριστικά και μεγάλη ανθεκτικότητα σε δυσμενείς περιβαλλοντικές επιδράσεις (Τριανταφύλλου, 2004), (Χιώτης, 2012).

Τα ινοπλισμένα πολυμερή χαρακτηρίζονται από υψηλή ανθεκτικότητα στις ηλεκτροχημικές διαβρώσεις και σημαντικά μεγάλο λόγο της αντοχής τους προς το βάρος τους. Το γεγονός αυτό, τα καθιστά εξαιρετικά χρήσιμα στις κατασκευές. Ειδικότερα, τα ινοπλισμένα πολυμερή χρησιμοποιούνται στην ενίσχυση των κατασκευών και στην επισκευή αστοχιών και βλαβών π.χ. στην όπλιση, στην προένταση και στην αντισεισμική ενίσχυση κατασκευών, τόσο από οπλισμένο σκυρόδεμα, όσο και από άοπλη τοιχοποιία. Επιπλέον, τα σύνθετα αυτά υλικά, εφαρμόζονται στην ενίσχυση κτιριακών κατασκευών και γεφυρών. Όσον αφορά την εφαρμογή τους, τοποθετούνται σε δοκούς και σε πλάκες για να αυξήσουν την καμπτική ικανότητά τους και την αντοχή τους σε διάτμηση. Καθώς επίσης και σε υποστυλώματα με σκοπό την βελτίωση της ικανότητας μεταφοράς φορτίων και της ολκιμότητας τους για αντισεισμική προστασία (Γεωργακόπουλος, 2017).

Τα ινοπλισμένα πολυμερή χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα ενισχύσεων, οι οποίες έχουν ως σκοπό στην αύξηση της καμπτικής αντίστασης, στην αύξηση της διατμητικής αντίστασης και στην περίσφιγξη.

Στην ενίσχυση σε κάμψη με σύνθετα υλικά, η μέθοδος που ακολουθείται βρίσκει εφαρμογή σε δοκούς και πλάκες και κάποιες φορές σε υποστυλώματα και τοιχώματα. Σε δοκούς και πλάκες, γίνεται επικόλληση των υφασμάτων ή των ελασμάτων στο εφελκυσμένο πέλμα με συγκεκριμένο συγκολλητικό υλικό (όπως εποξειδική ρητίνη). Επίσης, πέρα από την αύξηση της καμπτικής αντίστασης, επιτυγχάνεται αύξηση της δυσκαμψίας, περιορισμός των παραμορφώσεων και της ρηγμάτωσης, καθώς και μείωση της πλαστιμότητας. (Δρίτσος, 2005) Σε υποστυλώματα, όπου έχουμε κρίσιμες σε κάμψη ακραίες διατομές, η χρήση ινοπλισμένων πολυμερών μέσω ελασμάτων ή υφασμάτων παρουσιάζει κάποιες δυσχέρειες, καθώς είναι απαραίτητο να διασφαλισθεί η αγκύρωση των οπλισμών εντός των κόμβων. Αυτό επιτυγχάνεται στην περίπτωση που οι δοκοί διαθέτουν μικρότερο πλάτος σε σχέση με τα υποστυλώματα ή στην περίπτωση χρήσης οπλισμών σύνθετων υλικών με μικρό πλάτος. Σχετικά με την υπολογιστική διαδικασία που αφορά τους ελέγχους αντοχής και λειτουργικότητας για ενισχύσεις σε κάμψη, αυτή ακολουθεί παρόμοια διαδικασία υπολογισμών με αυτή των συμβατικά οπλισμένων μελών, με την διαφορά ότι λαμβάνονται υπόψη οι ιδιαιτερότητες της μηχανικής συμπεριφοράς

των σύνθετων υλικών και η πιθανότητα πρόωρης αποκόλλησης τους από το σκυρόδεμα. Όσον αφορά την τοιχοποιία, η ενίσχυση σε κάμψη γίνεται με βάση κυρίως, τους συνήθεις τύπους καταπόνησης τοιχοποιίας, οι οποίοι είναι η εκτός επιπέδου κάμψη και η εντός επιπέδου κάμψη. Βασικός στόχος είναι η τοποθέτηση των ινών κατά την χρήση των σύνθετων υλικών αυτών με διάταξη παράλληλη, όσο αυτό είναι εφικτό, στις τροχιές των κυρίων εφελκυστικών τάσεων. Στην εκτός επιπέδου κάμψη τα σύνθετα υλικά επικολλώνται στην επιφάνεια ή σε εγκλωπές, σε παράλληλη διάταξη με τις κύριες εφελκυστικές τάσεις. Στην εντός επιπέδου κάμψη λόγω της δύσκολης επικόλλησης των σύνθετων υλικών στα εφελκυσόμενα πέλματα, προτιμάται αυτά να τοποθετούνται στις πλευρές πολύ κοντά στα πέλματα, με αποτέλεσμα να έχουμε όμοια συμπεριφορά με αυτή της εκτός επιπέδου κάμψης (Τριανταφύλλου, 2004).

Η ενίσχυση σε διάτμηση με σύνθετα υλικά, βρίσκει εφαρμογή σε δοκούς, υποστυλώματα, κόμβους και τοιχοποιίες. Ειδικότερα, σε δοκούς και υποστυλώματα, τα υφάσματα ή σπανίως τα ελάσματα, επειδή των οποίων οι ίνες είναι αδύνατο να τοποθετηθούν στις εξωτερικές επιφάνειες με κάθετη διάταξη στις πιθανές ρωγμές, επικολλώνται με διάταξη ίδια με αυτή των συνδετήρων για την ανάληψη τέμνουσας, έτσι ώστε η διεύθυνση των ινών να είναι κάθετη στον άξονα των δομικών μελών. Κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας του μέλους σε τέμνουσα, αναπτύσσεται μια ορθή τάση στα σύνθετα υλικά, παράλληλη στην διεύθυνση των ινών, κατά μήκος της ρωγμής (με μέγιστη τιμή  $0,004E_f$ ) Η τιμή της, υπολογίζεται με βάση τον τύπο του μανδύα ενίσχυσης και το προσομοίωμα αποκόλλησης των σύνθετων υλικών. Υπάρχουν τρεις περιπτώσεις τύπου μανδύα ενίσχυσης, ο κλειστός, ο τρίπλευρος και ο δίπλευρος, με τον τελευταίο να αποφεύγεται η χρήση του, εξαιτίας του μικρότερου μήκους αγκύρωσης του σε σχέση με τους άλλους δύο. Στην περίπτωση μανδύα κλειστού τύπου, η αστοχία του μανδύα οφείλεται σε θραύση των ινών, ενώ στην περίπτωση τρίπλευρου ή δίπλευρου μανδύα, όπου η καλύτερη αγκύρωση επιτυγχάνεται στο κάτω τμήμα, η αποκόλληση των ινών αποτελεί την αιτία της αστοχίας του μανδύα.

Όσον αφορά την ενίσχυση κόμβων σε διάτμηση, έχει αποδειχθεί ότι και μικρές ποσότητες σύνθετων υλικών επαρκώς αγκυρωμένων εξωτερικά των κόμβων, αρκούν για να αυξήσουν την διατμητική αντοχή σε πολύ ικανοποιητικό ποσοστό. Η συνεισφορά των σύνθετων υλικών στην αύξηση της διατμητικής αντοχής κόμβων είναι δυνατόν να

υπολογιστεί θεωρώντας την παραμόρφωση των υλικών αυτών στην διεύθυνση της δοκού ίση με 0,004.

Σχετικά με την διάτμηση εντός επιπέδου τοιχοποιίας, η ενίσχυση με σύνθετα υλικά μπορεί να επιτευχθεί είτε με χιαστή, είτε με οριζόντια διάταξη ελασμάτων ή υφάσματος. Μία αξιόλογη λύση στην οριζόντια διάταξη των σύνθετων υλικών, αποτελεί η επικόλληση οπλισμών μορφής ελασμάτων μικρού πλάτους στις εγκοπές της τοιχοποιίας.

Τέλος, η ενίσχυση με περίσφιγξη, με χρήση ινοπλισμένων πολυμερών, εφαρμόζεται σε υποστυλώματα, κόμβους και τοιχοποιίες. Σε αξονικές φορτίσεις υποστυλωμάτων, έχουμε εγκάρσια διόγκωση σκυροδέματος, με συνέπεια ο μανδύας σύνθετων υλικών που το περιβάλλει, να αναπτύσσει εγκάρσιες θλιπτικές τάσεις κάθετα στον άξονα του μέλους, μέχρι την στιγμή της αστοχίας του. Μέσω αυτών των πλευρικών τάσεων περίσφιγξης, δημιουργείται αύξηση της θλιπτικής αντοχής και της αξονικής παραμόρφωσης αστοχίας του σκυροδέματος, αύξηση της γωνίας στροφής χορδής στην καμπτική αστοχία, άρα αυξάνεται και η μέγιστη παραμόρφωση του σκυροδέματος στην θλιβόμενη ζώνη, συνεπώς επέρχεται αύξηση της πλαστιμότητας. Επίσης αυξάνεται η διατμητική αντοχή του υποστυλώματος, χωρίς ωστόσο να αυξάνεται η δυσκαμψία. Επιπλέον, αυξάνονται οι τάσεις συνάφειας οπλισμού – σκυροδέματος σε περιοχές ματίσεων, με αποτέλεσμα να παρεμποδίζεται η ολίσθηση των διαμήκων ράβδων στα σημεία αυτά. Τέλος, με τις τάσεις περίσφιγξης, καθυστερείται ή ακόμα και αποφεύγεται ο λυγισμός των διαμήκων ράβδων οπλισμού σε σημεία με αραιή διάταξη συνδετήρων. (Τριανταφύλλου, 2004)

Η εξωτερική περίσφιγξη με σύνθετα υλικά, σε υποστυλώματα, επιτυγχάνεται με χρήση ινοπλισμένων πολυμερών σε μορφή λωρίδων, προεντεταμένων ταινιών “πακεταρίσματος”, σπειροειδούς οπλισμού, καθώς επίσης και σε μορφή ολόσωμου μανδύα από φύλλα, ο οποίος επικολλείται στις πλευρές του υποστυλώματος και αποτελεί τον δημοφιλέστερο τρόπο επιβολής της περίσφιγξης, εξαιτίας της εύκολης εφαρμογής του. Προκειμένου να επιτευχθεί αύξηση της διατμητικής και της καμπτικής αντοχής του υποστυλώματος, τα φύλλα εφαρμόζονται με τις ίνες τους σε οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση ινών, αντίστοιχα. Η επικόλληση του ολόσωμου μανδύα επιτυγχάνεται ευκολότερα σε κυκλικά υποστυλώματα, καθώς στα ορθογωνικά υποστυλώματα, πρέπει πρώτα να έχει γίνει εξομάλυνση των γωνιών, για να επιτευχθεί καμπυλότητα ακτίνας

τουλάχιστον 30mm, με σκοπό την ανάπτυξη μεγαλύτερων ενεργών τάσεων στο ινοπλισμένο πολυμερές της περίσφιγξης (Δρίτσος, 2005).

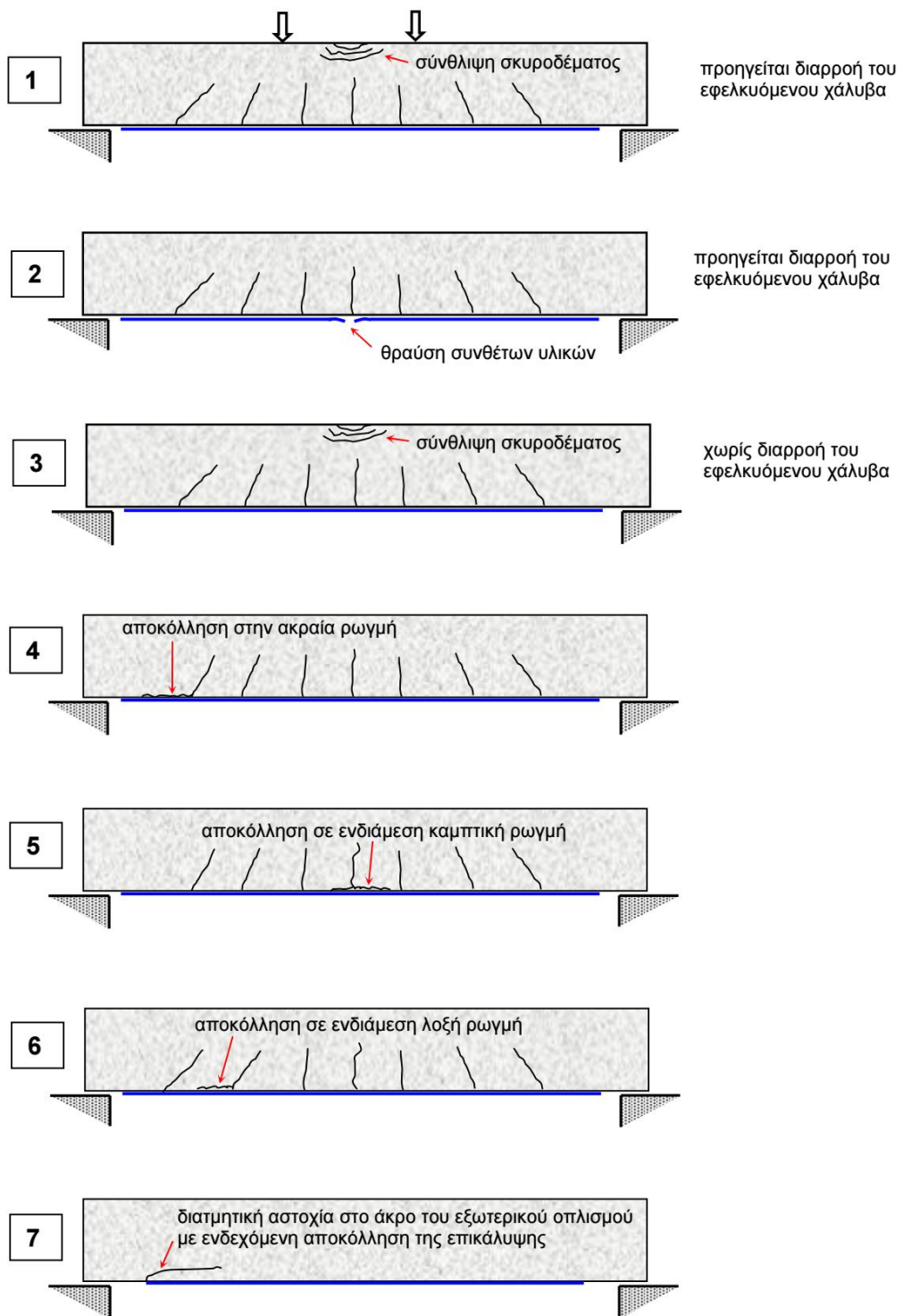
Όσον αφορά την ενίσχυση τοιχωμάτων με περίσφιγξη με χρήση ινοπλισμένων πολυμερών, αυτή έχει ως σκοπό την αύξηση της θλιπτικής, διατμητικής ή εφελκυστικής αντοχής καθώς και της πλαστιμότητας με βάση την παρεμπόδιση των παραμορφώσεων κάθετα στις τροχιές των κυρίων τάσεων θλίψης. Σαν τεχνική είναι παρόμοια με αυτή των υποστυλωμάτων. Πρέπει να σημειωθεί όμως, ότι η τεχνική της περίσφιγξης δεν αποδίδει αξιόλογα αποτελέσματα και δεν προτιμάται εξαιτίας του μεγάλου λόγου πλευρών των τοιχωμάτων. Η τεχνική περίσφιγξης που κρίνεται πιο κατάλληλη, είναι αυτή με χρήση μανδυνών από ινοπλισμένα πολυμερή με ίνες σε οριζόντια διάταξη. Βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνικής αποτελεί, το γεγονός ότι είναι εύχρηστη και η δυνατότητα της να αναλαμβάνει διατμητική και καμπτική ένταση. (Τριανταφύλλου, 2004), (Δρίτσος, 2005).

## 2.2 Καμπτική ενίσχυση δοκού με ινοπλισμένα πολυμερή (FRP)

Η καμπτική ενίσχυση σε δοκό πραγματοποιείται με την επικόλληση των ινοπλισμένων πολυμερών (ελάσματα, υφάσματα, ράβδοι με εγκοπές) στο εφελκυσμένο πέλμα της, με παράλληλη διεύθυνση των ινών στον άξονα της δοκού, με σκοπό να παραλαμβάνονται οι εφελκυστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω της κάμψης.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιθανές μορφές αστοχίας δοκών οπλισμένου σκυροδέματος, κατά την καμπτική ενίσχυση τους με ινοπλισμένα πολυμερή, στην οριακή κατάσταση αντοχής. Διακρίνονται σε επτά και φαίνονται στο Σχήμα 2.4:





**Σχήμα 2.4:** Μορφές αστοχίας δοκού σε καμπτική ενίσχυση με ινοπλισμένα πολυμερή (Τριανταφύλλου, 2004).



Οι μηχανισμοί αστοχίας ομαδοποιούνται σε 2 κατηγορίες, τους μηχανισμούς πλήρους συνεργασίας μεταξύ του σκυροδέματος και των εξωτερικών οπλισμών και στους μηχανισμούς με απώλεια της πλήρους συνεργασίας τους. Στην πρώτη κατηγορία, ανήκουν η αστοχία λόγω θραύσης σκυροδέματος μετά την διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα, η αστοχία λόγω θραύσης των σύνθετων υλικών μετά την διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα και η σύνθλιψη σκυροδέματος πριν την διαρροή εφελκυσμένου χάλυβα. Στην δεύτερη κατηγορία, ανήκουν η αστοχία της αποκόλλησης του σύνθετου υλικού σε ακραία ρωγμή, σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή, σε ενδιάμεση λοξή ρωγμή, καθώς και η αποκόλληση του σύνθετου υλικού λόγω διατμητικής αστοχίας στο άκρο του εξωτερικού οπλισμού με ενδεχόμενη αποκόλληση της επικάλυψης σκυροδέματος. Παρακάτω θα αναλυθούν αυτές οι μορφές αστοχίας, σύμφωνα με τον Τριανταφύλλου το 2004.

#### **1. Αστοχία λόγω θραύσης σκυροδέματος, μετά την διαρροή εφελκυσμένου χάλυβα.**

Στην συγκεκριμένη σπάνια μορφή αστοχίας, το σκυρόδεμα συνθλίβεται στην θλιβόμενη ζώνη μετά την διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα, χωρίς να έχει προηγηθεί θραύση ή αποκόλληση των ινοπλισμένων πολυμερών. Προκειμένου να υπολογιστεί η καμπτική αντίσταση στην κρίσιμη διατομή, καθορίζεται αρχικά το ύψος της θλιβόμενης ζώνης από την ισορροπία των εσωτερικών δυνάμεων της διατομής και έπειτα καθορίζονται οι παραμορφώσεις του άνω θλιβόμενου οπλισμού και του σύνθετου υλικού από τις αναλογίες που προκύπτουν από το συμβιβαστό των παραμορφώσεων. Δεδομένη για τους υπολογισμούς είναι η παραμόρφωση του σκυροδέματος, η οποία είναι ίση με την οριακή, δηλαδή 3,5 ‰, η τάση στον κάτω εφελκυσμένο χάλυβα, η οποία είναι ίση με την τάση διαρροής του χάλυβα, την απόσταση μεταξύ του σημείου εφαρμογής της δύναμης που ασκείται από το σκυρόδεμα και της άνω θλιβόμενης ίνας του σκυροδέματος  $d_6$ , καθώς και το ποσοστό του ύψους της θλιβόμενης ζώνης  $\psi$  που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της δύναμης του σκυροδέματος στην ισορροπία δυνάμεων της διατομής.

## 2. Αστοχία λόγω θραύσης του FRP, μετά την διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα.

Κατά τον μηχανισμό αστοχίας αυτόν, πρώτα διαρρέει ο εφελκυσμένος χάλυβας και έπειτα επέρχεται θραύση του οπλισμού ενίσχυσης από ινοπλισμένα πολυμερή, χωρίς να έχει προηγηθεί αστοχία στο σκυροδέμα. Η ανάλυση που ακολουθείται με σκοπό την εύρεση της καμπτικής αντίστασης είναι παρόμοια της πρώτης αστοχίας που αναφέρθηκε νωρίτερα, με τις διαφορές ότι η τάση των σύνθετων υλικών είναι δεδομένη και ίση με την οριακή τάση θραύσης (σχεδιασμού) ινών του σύνθετου υλικού, καθώς επίσης η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση δεν είναι δεδομένη του σκυροδέματος και η τιμή της υπολογίζεται μέσω των αναλογιών του συμβιβαστού των παραμορφώσεων. Τέλος, οι τιμές των  $\psi$  και  $\delta_G$  καθορίζονται αναλόγως της τιμής της παραμόρφωσης του σκυροδέματος.

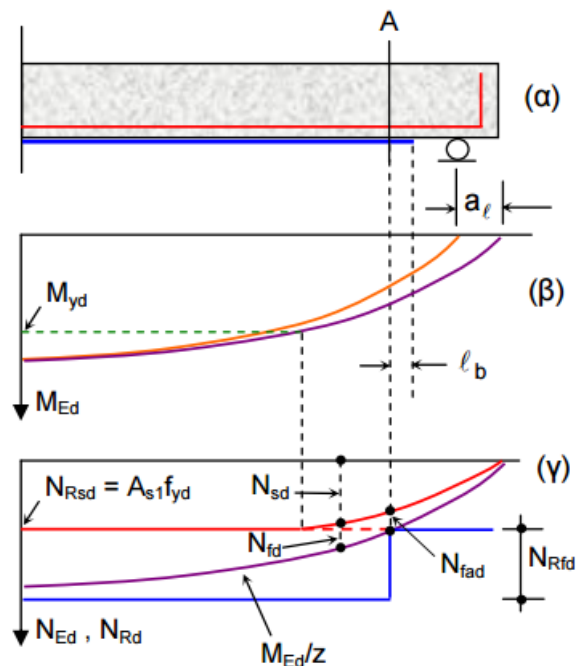
## 3. Σύνθλιψη σκυροδέματος πριν την διαρροή εφελκυσμένου χάλυβα και την αστοχία του FRP

Ο μηχανισμός αυτός δεν είναι αποδεκτός, καθώς σηματοδοτεί ψαθυρή συμπεριφορά. Επομένως, προκειμένου η διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα να διασφαλιστεί, γίνεται επιλογή κατάλληλου εμβαδού των σύνθετων υλικών έχοντας ως ανώτατο όριο μια κρίσιμη τιμή.

## 4. Αποκόλληση στην ακραία ρωγμή

Ο μηχανισμός αυτός, συμβαίνει μετά την διαρροή του χάλυβα και πριν την θραύση του σκυροδέματος. Η αποκόλληση του σύνθετου υλικού σε ακραία ρωγμή, οφείλεται στην υψηλή συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή της αγκύρωσης. Για να αποφευχθεί ο συγκεκριμένος τρόπος αστοχίας, υπολογίζεται το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης  $l_b$ , ώστε να βρεθεί η μέγιστη τιμή (σχεδιασμού) της δύναμη αγκύρωσης  $N_{fad}$ . Έχοντας ως παράδειγμα την δοκό του Σχήματος 2.5α, με διάγραμμα ροπών (δρώσας και διαρροής) το Σχήμα 2.5β, τότε σύμφωνα με το Σχήμα 2.5γ, το σημείο της επιθυμητής τιμής του  $l_b$  και  $N_{fad}$  είναι εκεί, όπου η καμπύλη της συνολικής εφελκυστικής δύναμης  $M_{Ed}/z$  (σε χαλύβδινο οπλισμό και σύνθετα υλικά) τέμνει την μέγιστη δύναμη που μπορεί να παραληφθεί μόνο από τον χάλυβα,  $N_{Rsd}$ . Η τιμή της  $N_{fad}$  μπορεί να καθοριστεί μέσω της ισορροπίας των εντατικών μεγεθών. Κατά τους υπολογισμούς, σε περίπτωση που η τιμή της  $N_{fad}$  προκύπτει

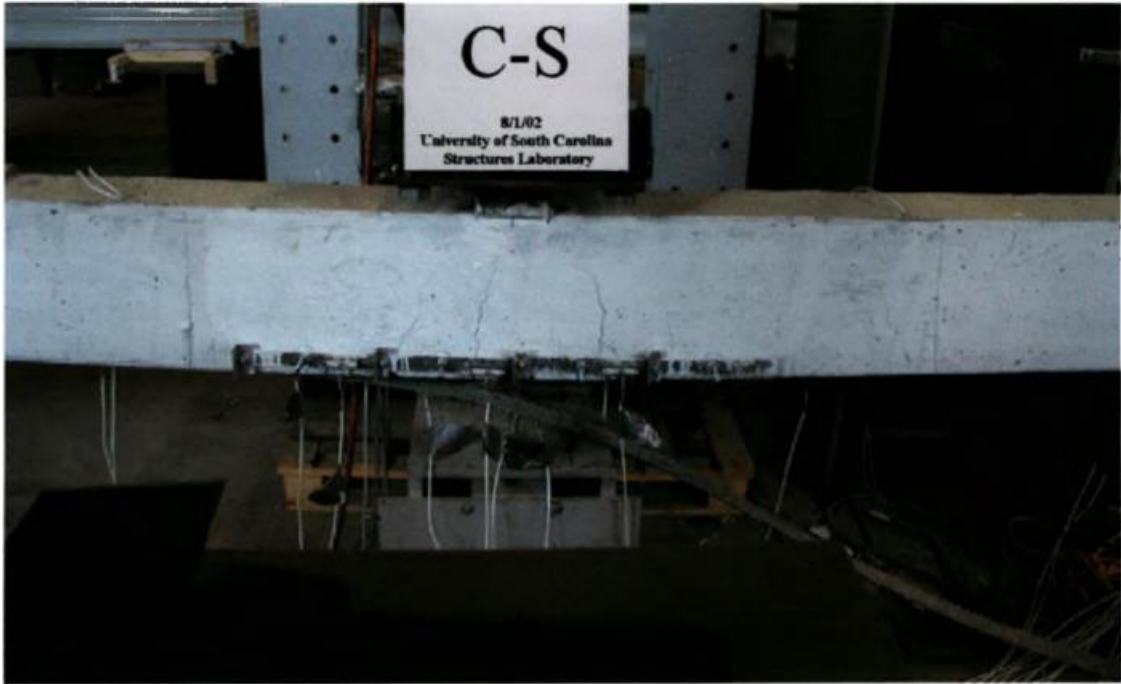
μεγαλύτερη της οριακής και όταν δεν υπάρχει επαρκής διαθέσιμος χώρος για το μήκος αγκύρωσης  $l_b$ , τότε θα γίνει εύρεση νέου ζεύγους τιμών μήκους αγκύρωσης  $l_b$  - δύναμης αγκύρωσης  $N_{fad}$ , σε διατομή πιο κοντά στη στήριξη. Αν το μήκος αγκύρωσης συνεχίζει να μην επαρκεί, τότε απαιτείται, είτε να γίνει επιλογή διαφορετικού ελάσματος με αυξημένο πλάτος και μειωμένο πάχος, είτε να γίνει μια πιο βελτιωμένη αγκύρωση με μηχανικό τρόπο.



Σχήμα 2.5: Αγκύρωση σύνθετων υλικών (Τριανταφύλλου, 2004).

## 5. Αστοχία λόγω αποκόλλησης του FRP σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή

Η αστοχία αυτή συμβαίνει μετά την διαρροή του χάλυβα και πριν επέλθει θραύση του σκυροδέματος. Η ανάλυση που ακολουθείται με σκοπό την εύρεση της καμπτικής αντίστασης είναι όμοια της αστοχίας 2 που αναφέρθηκε νωρίτερα, με την διαφορά ότι η τάση των σύνθετων υλικών είναι τάση αποκόλλησης αυτών, σε περιοχές καμπτικών ρωγμών και η τιμή της υπολογίζεται με διαφορετικό τύπο από αυτόν της θραύσης. Παρακάτω, στο Σχήμα 2.6 διακρίνεται μία τέτοια αστοχία, από πείραμα που πραγματοποιήθηκε από τον Quattlebaum, στο εργαστήριο κατασκευών του Πανεπιστημίου της Νότιας Καρολίνας, το 2002 (Φλασκή, 2004).



**Σχήμα 2.6:** Αποκόλληση FRP σε ενδιάμεση καμπτική ρωγή δοκού (Quattlebaum, 2002).

## **6. Αποκόλληση σε ενδιάμεση διατμητική ρωγή**

Και εδώ ο μηχανισμός αυτός επέρχεται μετά την διαρροή του χάλυβα και χωρίς να έχει προηγηθεί η θραύση του σκυροδέματος. Η διαδικασία για τον υπολογισμό της καμπτικής αντίστασης είναι ίδια με την προηγούμενη αστοχία, με την διαφορά ότι η προσαύξηση της δύναμης αποκόλλησης είναι μικρότερη.

## **7. Διατμητική αστοχία στο άκρο - αποκόλληση της επικάλυψης**

Ο μηχανισμός αστοχίας αυτός, οφείλεται στην ανάπτυξη, βαρύνουσας σημασίας, οριζόντιων διατμητικών αλλά και κάθετων τάσεων εφελκυσμού, στην στρώση επικάλυψης του σκυροδέματος. Προκειμένου να μην επέλθει η συγκεκριμένη αστοχία, θα πρέπει να ισχύουν δύο συνθήκες στην διατομή απόληξης των σύνθετων υλικών. Πρώτον, η δρώσα τέμνουσα οφείλει να μην ξεπερνά το 1,4 της διατμητικής αντοχής της δοκού (υπολογισμένη τιμή χωρίς την συνεισφορά των συνδετήρων) και αν δεν συμβεί αυτό, τότε είναι απαραίτητο να γίνει ενίσχυση της δοκού έναντι τέμνουσας, σε σημεία κοντά στα άκρα των σύνθετων υλικών. Δεύτερον, η δρώσα ροπή πρέπει να μην ξεπερνά το 67% της ελάχιστης ροπής αντοχής της δοκού που έχει προκύψει από τους μηχανισμούς 1, 2, 5 και 6 που

προαναφέρθηκαν, η οποία συνθήκη ικανοποιείται με την κατάλληλη θέση απόληξης των ινοπλισμένων πολυμερών.

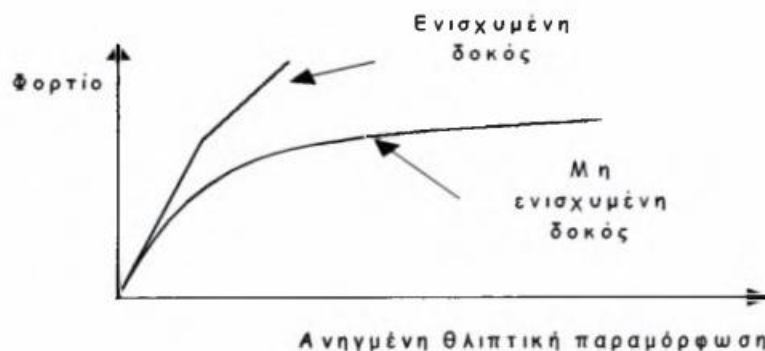
Οι υπολογισμοί για τους μηχανισμούς αστοχίας 1, 2, 5, θα αναλυθούν παρακάτω στο κεφάλαιο 3, καθώς γίνεται χρήση αυτών για το λογισμικό της παρούσας διπλωματικής.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί μία πειραματική έρευνα, που αφορά την καμπτική ενίσχυση δοκού με FRP. Ειδικότερα, οι Fanning και Kelly το 2001, παρατήρησαν την συμπεριφορά οκτώ δοκών με ενίσχυση από έλασμα ανθρακούφασμάτων (CFRP) διαφόρων κύριων διευθύνσεων, σε διαφορετικά μήκη, καθώς και δύο δοκών μη ενισχυμένων (control beams). Το μήκος των δοκών ήταν 3000mm και η διατομή ήταν πλάτους 155mm και ύψους 240mm. Έγινε χρήση 3 ράβδων Φ12 και 2 ράβδων Φ12 ως διαμήκη εφελκόμενο και θλιβόμενο οπλισμό, αντίστοιχα. Ως διατμητικός οπλισμός χρησιμοποιήθηκαν συνδετήρες Φ6 ανά 125mm. Η φόρτιση στο πείραμα έγινε από δύο δυνάμεις που ασκήθηκαν συμμετρικά σε σχέση με το μέσον του ανοίγματος. Το πάχος του ελάσματος CFRP ήταν 1,2mm και το πλάτος του ήταν 120mm. Το μέτρο ελαστικότητας του ελάσματος ήταν 155 GPa και εφελκυστική αντοχή 2400 MPa. Σε δύο από τις δοκούς έγινε επέκταση του ελάσματος σε όλο το μήκος της δοκού. Από το πείραμα αυτό προέκυψαν ορισμένα σημαντικά αποτελέσματα, τα οποία αναφέρονται παρακάτω:

- Με την ενίσχυση με τα ινοπλισμένα πολυμερή CFRP, αυξήθηκε η καμπτική αντοχή στην αστοχία της δοκού κατά 70%, καθώς επίσης μετά την ρηγμάτωση, σε ποσοστό 40% αυξήθηκε και η δυσκαμψία στις δοκούς στις οποίες το έλασμα ήταν επικολλημένο σε όλο το μήκος τους.
- Παρατηρήθηκε σημαντική μείωση στο άνοιγμα και στο μέγεθος των ρωγμών στις δοκούς που είχαν ενισχυθεί με CFRP, γεγονός που φανερώνει ανθεκτικότερη συμπεριφορά στην διάβρωση του οπλισμού χάλυβα.
- Όσο μικρότερο είναι το μήκος του ελάσματος που χρησιμοποιείται στην ενίσχυση, τόσο μικρότερη είναι και η συνεισφορά του στην αύξηση της αντοχής της δοκού.
- Στις δοκούς στις οποίες δεν υπήρξε επέκταση του ελάσματος σε όλο το μήκος τους, επήλθε αστοχία εξαιτίας αποκόλλησης του CFRP στο πέρας του, την στιγμή που οι διατμητικές τάσεις ήταν μεγαλύτερες της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας κόλλας – σκυροδέματος. Όμως, στις υπόλοιπες δοκούς με ενίσχυση, παρατηρήθηκε αστοχία που οφείλεται σε αποκόλληση του CFRP εξαιτίας μιας διατμητικής ρωγμής

που δημιουργήθηκε κοντά στο σημείο εφαρμογής του φορτίου. Συμπεραίνεται, λοιπόν, πως σε αυτό το πεδίο της αστοχίας απαιτείται επιπρόσθετη έρευνα.

- Από το διάγραμμα της ανηγμένης θλιπτικής παραμόρφωσης σκυροδέματος σε σχέση με το φορτίο που εφαρμόστηκε για κάθε δοκό, προκύπτουν διαφορετικές μορφές καμπυλών μεταξύ των ενισχυμένων και μη ενισχυμένων δοκών. Πιο αναλυτικά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7 για χαμηλά φορτία, παρατηρείται όμοια αύξηση στην παραμόρφωση των δοκών. Μετέπειτα της ρηγμάτωσης, οι παραμορφώσεις των ενισχυμένων και μη δοκών αυξάνονται γραμμικά, μέχρι το σημείο της διαρροής του χάλυβα. Από το σημείο αυτό και μετά, υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ των ενισχυμένων και μη δοκών, όπου η αύξηση της παραμόρφωσης συνεχίζει να είναι γραμμική στην πρώτη περίπτωση, ενώ στην δεύτερη η αύξηση είναι ραγδαία. Το γεγονός αυτό δεικνύει, πως η ενίσχυση της δοκού με τα ινοπλισμένα πολυμερή συνεισφέρει στην μείωση της ανηγμένης παραμόρφωσης του σκυροδέματος, διατηρώντας μεγαλύτερο το ύψος της θλιβόμενης ζώνης.



**Σχήμα 2.7:** Διάγραμμα Φορτίου – Ανηγμένης θλιπτικής παραμόρφωσης σκυροδέματος (Fanning, Kelly 2001).

Ως σπουδαιότερο συμπέρασμα από το πείραμα αυτό, προκύπτει το γεγονός πως η επέκταση του οπλισμού ενίσχυσης μέχρι και τις στηρίξεις της δοκού αποτελεί τον πλέον εύκολο και αποδοτικό τρόπο ενίσχυσης, όσο αφορά το μοντέλο αστοχίας και την πλαστιμότητα της ενισχυμένης δοκού (Φλασκή, 2004).

Τα αποτελέσματα του πειράματος παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω Πίνακα 2.2:

**Πίνακας 2.2:** Ενδεικτικές πειράματος των Fanning and Kelly (2001)

Δοκός	Μήκος CFRP(ρ) Mm	Απόσταση φορτίου Ρ από την στήριξη (α) mm	ρ/α λόγος	Φορτίο στην διαρροή KN	Φορτίο στην αστοχία KN	Πλαστιμότητα $\mu = \delta_u / \delta_y$	Μοντέλο αστοχίας
F1	Μη ενισχυμένη		0,00	53,0	68,3	3,86	Διαρροή χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος
F2	Μη ενισχυμένη		0,00	53,5	67,9	3,71	Διαρροή χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος
F3	3000	1100	1,00	82,9	110,9	1,84	Διατμητική αστοχία σκυροδέματος
F4	3000	1100	1,00	83,6	118,5	1,92	Διατμητική αστοχία σκυροδέματος
F5	2030	715	0,65	85,6	100	1,55	Αποκόλληση στο άκρο του FRP
F6	2030	715	0.65	85,6	103	1,57	Αποκόλληση στο άκρο του FRP
F7	1876	638	0,58	83,7	97,5	1,44	Αποκόλληση στο άκρο του FRP
F8	1876	638	0,58	-	64,0	1,15	Αποκόλληση στο άκρο του FRP
F9	1700	550	0,50	-	62,0	1,08	Αποκόλληση στο άκρο του FRP
F10	1700	550	0,50	78,3	82,0	1,22	Αποκόλληση στο άκρο του FRP

### 2.3 Οδηγίες σχεδιασμού της fib (2019)

Η fib (federation internationale du beton) αποτελεί μια διεθνή ομοσπονδία σκυροδέματος, η οποία περιλαμβάνει ατομικά και συλλογικά μέλη καθώς και δραστηριότητες και στις 5 ηπείρους, έχοντας ως κύρια βάση της την Ευρώπη. Ιδρύθηκε το 1998 από συγχώνευση των CEB (Ευρωδιεθνής Επιτροπή Σκυροδέματος) και FIP (Διεθνής Ομοσπονδία Προέντασης). Σκοπός της fib, είναι να αναπτύξει σε διεθνές επίπεδο, την μελέτη επιστημονικών και πρακτικών θεμάτων ικανών να εξελίξουν τις τεχνικές, οικονομικές, αισθητικές και περιβαλλοντικές επιδόσεις της κατασκευής από σκυρόδεμα. Η ανάπτυξη και η κοινοποίηση της όλης γνώσης γίνεται μέσω δελτίων, εκδηλώσεων, εργαστηρίων και σεμιναρίων της fib, διαδικασία η οποία επιτυγχάνεται αποκλειστικά από την παροχή εθελοντικής εργασία μελών της fib.

Οι κατηγορίες, για τις οποίες έχουν οριστεί επιτροπές, είναι οι εξής: Τα είδη κατασκευών σκυροδέματος αναλόγως τον κατασκευαστικό και αρχιτεκτονικό σχεδιασμό τους, η ανάλυση και ο σχεδιασμός που απαιτούνται για κατασκευές σκυροδέματος βάσει της φόρτισης και των περιβαλλοντικών συνθηκών που υπόκεινται, ο καθορισμός κατάλληλων διαδικασιών με σκοπό την αποτίμηση και ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών, η ασχολία με νέες τεχνολογίες και τεχνικές που αφορούν το σκυρόδεμα, σε σχέση με την συμπεριφορά του υπό φόρτιση και περιβαλλοντικών συνθηκών, με σκοπό την εύκολη κατηγοριοποίησή του σε είδη που θα διευκολύνουν στην εκάστοτε ανάλυση μιας κατασκευής. Επίσης είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα, οι προκατασκευασμένες κατασκευές, τα ζητήματα λειτουργικότητας και ανθεκτικότητας σχετικά με το σκυρόδεμα, την μετάδοση της όλης γνώσης που προκύπτει από τις μελέτες, και τους τρόπους που αυτή θα μεταδοθεί, την έκδοση μοντέλων κωδικών γύρω από το σκυρόδεμα και συναφή θέματα με αυτό, έτσι ώστε να συνεισφέρουν στην παγκόσμια κοινότητα μηχανικών, την δημιουργία ομάδας νέων μελών μηχανικών με σκοπό, τόσο να βελτιωθούν στο αντικείμενο τους, όσο και να διαδώσουν και να μοιραστούν τις δικές τους γνώσεις, ώστε να βοηθήσουν με τη σειρά τους φοιτητές μηχανικούς. Τέλος η δημιουργία βάσης δεδομένων, που αφορούν αναλύσεις για κατασκευές από σκυρόδεμα οργανωμένες σε κατηγορίες, ανοιχτές στο ερευνητικό κοινό, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν από αυτό.



Το δελτίο της fib που δημοσιεύτηκε το 2019, είναι βασισμένο σε αυτό του 2011 και περιέχει οδηγίες σχεδιασμού που αφορούν την εξωτερική ενίσχυση των κατασκευών από σκυρόδεμα με ινοπλισμένα πολυμερή (FRP), έχοντας ως καθοδηγό τους Ευρωκώδικες 2 και 8 (Federation, Commissions of fib, 2023).

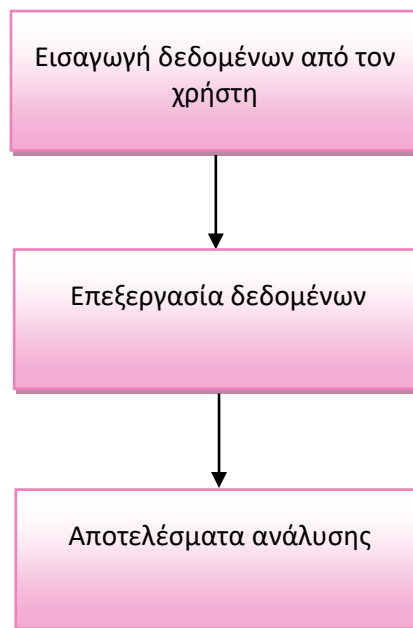
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

#### 3.1 Στάδια λειτουργίας – Γενικό διάγραμμα ροής προγράμματος

Το λογισμικό της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε στο περιβάλλον υπολογιστικού φύλλου του Excel, ένα περιβάλλον φιλικό προς τον εκάστοτε χρήστη. Η γλώσσα προγραμματισμού, μέσω της οποίας συγγράφηκε ο κώδικας, ήταν η Visual Basic for Applications (VBA), καθώς αποτελεί μια κατάλληλη αντικειμενοστραφή γλώσσα για την εκτέλεση προγραμμάτων που απαιτούν χρονοβόρες υπολογιστικές πράξεις.

Προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη οργάνωση στο λογισμικό, αυτό χωρίζεται σε στάδια λειτουργίας, τα οποία διαμορφώνουν το γενικό διάγραμμα ροής του λογισμικού, όπως παρουσιάζεται παρακάτω στο Σχήμα 3.1.



**Σχήμα 3.1:** Γενικό διάγραμμα ροής λογισμικού.

### 3.1.1 Εισαγωγή δεδομένων από τον χρήστη

Το πρώτο στάδιο λειτουργίας, αφορά την δυνατότητα του χρήστη να εισάγει σε δοσμένα κενά κελιά από το λογισμικό, τα απαραίτητα δεδομένα για την ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί έπειτα. Τα δεδομένα αυτά αφορούν το μήκος και την ομοιόμορφη φόρτιση της δοκού, την γεωμετρία της διατομής της δοκού και των ράβδων οπλισμού του, τα υλικά και τις ιδιότητές τους, την γεωμετρία και τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Επίσης, εισάγει και την αρχική παραμόρφωση  $\epsilon_0$  της κάτω εφελκυόμενης ίνας του σκυροδέματος της κρίσιμης διατομής δοκού, αν αυτή υπάρχει.

Πιο συγκεκριμένα, για την πρώτη επαναληπτική διαδικασία, όπου γίνεται ο έλεγχος επάρκειας της δοκού σε κάμψη, ο χρήστης επιλέγει την μορφή της δοκού που επιθυμεί (ορθογωνική ή πλακοδοκός) και στην συνέχεια, εισάγει το μήκος  $l$  σε  $m$  και την ομοιόμορφη φόρτιση  $q$  σε  $KN/m$  της δοκού, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής, δηλαδή το πλάτος  $b$  και το ύψος  $h$  σε  $mm$  στην περίπτωση της ορθογωνικής, και επιπρόσθετα για την περίπτωση της πλακοδοκού, εισάγει το συνεργαζόμενο πλάτος  $b_{eff}$ , το ύψος της πλάκας  $h_f$  και το πλάτος της κύριας δοκού  $b_w$  σε  $mm$ . Και για τις δύο περιπτώσεις, έπειτα εισάγει την απόσταση κέντρου βάρους διατομής εφελκυόμενου χάλυβα από την ακραία εφελκυόμενη ίνα  $d_1$ , την απόσταση κέντρου βάρους διατομής θλιβόμενου χάλυβα από την ακραία θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος  $d_2$ , καθώς και το πλήθος και την διάμετρο των κάτω και άνω χαλύβδινων ράβδων οπλισμού  $n_k - d_k$  και  $d_\alpha - n_\alpha$ , αντίστοιχα, σε  $mm$ . Στην συνέχεια, εισάγει τις τιμές μεγεθών που προσδιορίζουν την ποιότητα του χάλυβα οπλισμού και του σκυροδέματος. Όσον αφορά τον χάλυβα, είναι η χαρακτηριστική τάση διαρροής  $f_{yk}$  σε  $Mpa$  και το μέτρο ελαστικότητας  $E_s$  σε  $Gpa$ . Όσον αφορά το σκυρόδεμα, είναι η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος  $f_{ck}$  σε  $Mpa$ , καθώς και το πρίσμα του σκυροδέματος  $b_{pr}$  σε  $mm$ . Έπειτα εισάγει την δρώσα ροπή της αμφιέριστης δοκού  $M_{Ed}$  σε  $KNm$ .

Στη συνέχεια, για την δεύτερη επαναληπτική διαδικασία, όπου γίνονται οι υπολογισμοί για την ενίσχυση της υφιστάμενης δοκού σε κάμψη με σύνθετα υλικά FRP's, ο χρήστης εισάγει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του FRP που έχει επιλέξει, δηλαδή το πλάτος  $b_f$  (μικρότερο της δοκού αν είναι έλασμα, και ίσο με την δοκό αν είναι ύφασμα), το πάχος του  $t_f$  σε  $mm$ , το μέτρο ελαστικότητας του  $E_f$ , την μέγιστη τάση

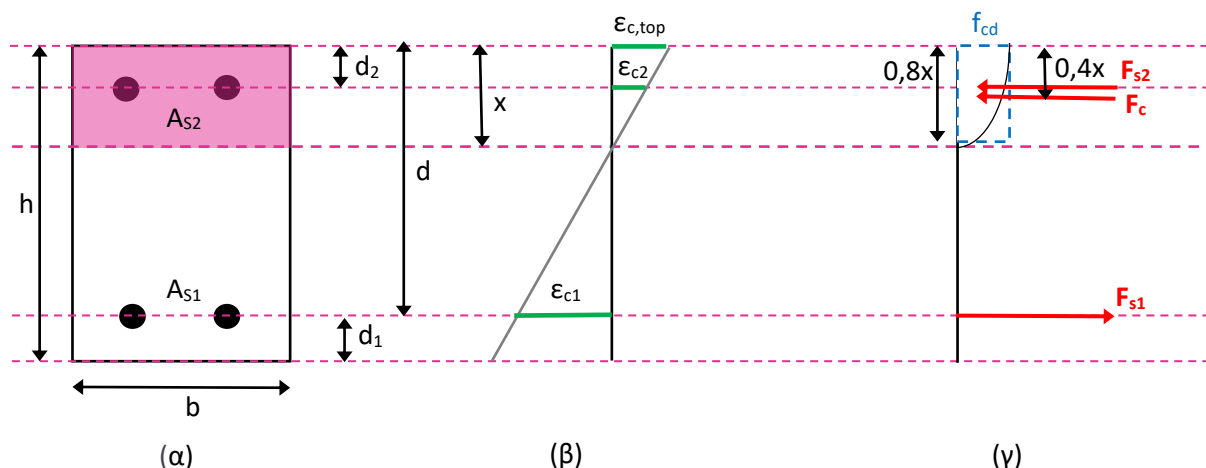
(σχεδιασμού) θραύσης ινών που διαθέτει το FRP  $f_{fd}$  και τέλος, την αρχική παραμόρφωση  $\epsilon_0$  της δοκού, που θα υποστεί το ινοπλισμένο πολυμερές κατά την ενίσχυση, αν αυτή υπάρχει.

### 3.1.2 Επεξεργασία δεδομένων

Το στάδιο αυτό, αποτελεί τον βασικό κορμό του λογισμικού. Με την χρήση των δεδομένων του πρώτου σταδίου, αναπτύχθηκε ο κώδικας με δύο επαναληπτικές διαδικασίες. Μέσω της πρώτης ελέγχεται η επάρκεια της αμφιέριστης δοκού σε καμπτική φόρτιση, και σε περίπτωση που αυτή δεν επαρκεί, ενεργοποιείται η δεύτερη επαναληπτική διαδικασία, μέσω της οποίας καθορίζεται ο αριθμός των στρώσεων ή ελασμάτων  $n$  του σύνθετου υλικού (FRP's) που θα ενισχύσει την υφιστάμενη δοκό σε όλο το μήκος της, έναντι της κάμψης.

#### 3.1.2.1 Ανάλυση επάρκειας δοκού σε κάμψη

Η πρώτη επαναληπτική διαδικασία αφορά την ανάλυση για την επάρκεια της αμφιέριστης δοκού σε καμπτική φόρτιση, χωρίς την ύπαρξη αξονικού φορτίου. Όλοι οι υπολογισμοί της ανάλυσης στηρίχθηκαν στις διατάξεις των Ευρωπαϊκών Κανονισμών. Η ανάλυση διατομής (Σχήμα 3.2), βασιζόμενη στην θεωρία ελαστικής συμπεριφοράς υλικών, ξεκινά με την λήψη των εσωτερικών δυνάμεων σκυροδέματος και χάλυβα, στην κρίσιμη διατομή (μέσον δοκού) (Εξ. 3.1).



**Σχήμα 3.2:** Ανάλυση διατομής στην οριακή κατάσταση αντοχής. (α) Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομής, (β) Προφίλ παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής, (γ) Προφίλ εσωτερικών δυνάμεων (Τριανταφύλλου, 2004).

$$\Sigma F_y = -F_c - F_{s2} + F_{s1} \quad (3.1)$$

Σκοπός της λήψης ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων είναι η εύρεση του βάθους του ουδέτερου άξονα  $x$  με διαδοχικές επαναλήψεις έως ότου προκύψει ισορροπία δυνάμεων, λαμβάνοντας στο λογισμικό ανώτατο όριο σφάλματος (tolerance) για το  $\Sigma F_y$ , ίσο με 0,5 KN και βήμα για το  $x$ , ίσο με 0,1 mm. Οι εσωτερικές δυνάμεις, υπολογίζονται, σε KN, από τις παρακάτω Εξ. (3.2), Εξ. (3.6) και Εξ. (3.7). Αρχικά η δύναμη του σκυροδέματος στην θλιβόμενη ζώνη είναι:

$$F_c = a_{cc} * \frac{f_{ck}}{\gamma_c} * A_c \quad (3.2)$$

Όπου  $a_{cc} = 0,85$ , ο συντελεστής που συνεκτιμά μακροχρόνιες επιδράσεις στην θλιπτική αντοχή και δυσμενείς επιρροές που προκύπτουν από τον τρόπο επιβολής του φορτίου,  $\gamma_c = 1,5$  (Ευρωκώδικας 2), ο συντελεστής ασφαλείας σχεδιασμού για το σκυρόδεμα για την οριακή κατάσταση αστοχίας και  $A_c =$  το εμβαδόν του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης, σε  $\text{mm}^2$ , το οποίο υπολογίζεται ξεχωριστά για διατομή ορθογωνική, σύμφωνα με την παρακάτω Εξ. (3.3) και πλακοδοκού, όπως φαίνεται στις παρακάτω Εξ. (3.4) και Εξ. (3.5), ανάλογα με την θέση ύψους της θλιβόμενης ζώνης. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, το παραβολικό διάγραμμα θλιπτικών τάσεων για το σκυρόδεμα, μετασχηματίζεται σε ισοδύναμο ορθογώνιο διάγραμμα καθ' ύψος της θλιβόμενης ζώνης του φορέα, οπότε για τον υπολογισμό του εμβαδού, λαμβάνεται το ύψος της θλιβόμενης ζώνης ίσο με το 80% του πραγματικού (Σχήμα 3.2γ).

$$A_c = 0,8 * x * b \quad (3.3)$$

$$A_c = 0,8 * x * b_{eff}, \text{ αν } 0,8 * x \leq h_f \quad (3.4)$$

$$A_c = h_f * b_{eff} + b_w * (0,8 * x - h_f), \text{ αν } 0,8 * x > h_f \quad (3.5)$$

Η δύναμη του κάτω εφελκόμενου και άνω θλιβόμενου χάλυβα είναι:

$$F_{s1} = \sigma_1 * A_{s1} \quad (3.6)$$

$$F_{s2} = \sigma_2 * A_{s2} \quad (3.7)$$

Όπου  $\sigma_1, \sigma_2$  οι τάσεις του κάτω εφελκόμενου και άνω θλιβόμενου οπλισμού χάλυβα, αντίστοιχα, οι οποίες καθορίζονται, σε MPa, μέσω των Εξ. (3.8), Εξ. (3.9), Εξ. (3.10) και Εξ. (3.11), όπως φαίνονται παρακάτω:

$$\sigma_1 = \varepsilon_1 * E_s, \text{ αν } \sigma_1 < \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (3.8)$$

$$\sigma_1 = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}, \text{ αν } \sigma_1 \geq \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (3.9)$$

$$\sigma_2 = \varepsilon_2 * E_s, \text{ αν } \sigma_2 < \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (3.10)$$

$$\sigma_2 = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}, \text{ αν } \sigma_2 \geq \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (3.11)$$

Όπου  $\gamma_s = 1,15$  (Ευρωκώδικας 2), ο συντελεστής ασφαλείας σχεδιασμού για τον χάλυβα για την οριακή κατάσταση αστοχίας και  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  είναι οι παραμορφώσεις του κάτω εφελκυόμενου και άνω θλιβόμενου οπλισμού χάλυβα, αντίστοιχα. Ως δεδομένη λαμβάνεται η αστοχία της σύνθλιψης του σκυροδέματος, οπότε η παραμόρφωση του σκυροδέματος στην άνω θλιβόμενη ίνα είναι ίση με  $\varepsilon_{c,top} = 3,5\%$ . Επομένως, οι  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  καθορίζονται μέσω αναλογιών, συναρτήσει των  $\varepsilon_{c,top}$  και  $x$ , που προκύπτουν βάσει του συμβιβαστού των παραμορφώσεων (Σχήμα 3.2β), όπως φαίνονται στις παρακάτω Εξ. (3.12) και (3.13).

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_{c,top} * (d - x)}{x} \quad (3.12)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_{c,top} * (d_2 - x)}{x} \quad (3.13)$$

Όπου  $d$  = το στατικό ύψος της διατομής, δηλαδή η απόσταση μεταξύ  $h$  και  $d_1$ . Στις Εξ. (3.6) και Εξ. (3.7), τα  $A_{s1}, A_{s2}$  αποτελούν το εμβαδόν του κάτω εφελκυόμενου και άνω θλιβόμενου οπλισμού χάλυβα, αντίστοιχα, σε  $\text{mm}^2$ , και υπολογίζονται με τις εξής Εξ. (3.14) και Εξ. (3.15):

$$A_{s1} = \pi * \frac{d_{\kappa}^2}{4} * n_{\kappa} \quad (3.14)$$

$$A_{s1} = \pi * \frac{d_{\alpha}^2}{4} * n_{\alpha} \quad (3.15)$$

Στη συνέχεια, από την ισορροπία ροπών, προσδιορίζεται η ροπή αντοχής (σχεδιασμού) σε κάμψη  $M_{Rd}$  της αμφιέρειστης δοκού, σε  $\text{KNm}$ , με μοχλοβραχίονες τις αποστάσεις  $(d - 0,4 * x)$  και  $(d - d_2)$  των ζευγών δυνάμεων  $F_c - F_{s1}$  και  $F_{s2} - F_{s1}$ , αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην παρακάτω Εξ. (3.16):

$$M_{Rd} = F_c * (d - 0,4 * x) - F_{s2} * (d - d_2) \quad (3.16)$$

Οπότε, γίνεται ο έλεγχος επάρκειας της διατομής έναντι κάμψης, συγκρίνοντας την τιμή της ροπής αντοχής  $M_{Rd}$  με την δρώσα ροπή κάμψης της δοκού  $M_{Ed}$ . Η  $M_{Ed}$  υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξ. (3.17):

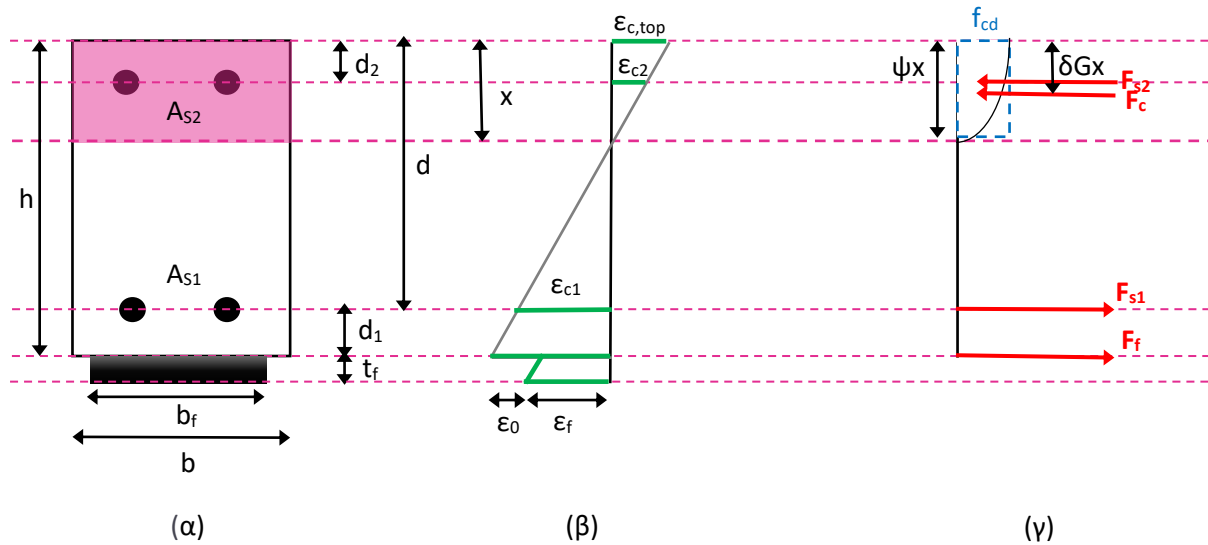
$$M_{Ed} = \left( q * \frac{l^2}{4} - \frac{q * \frac{l^2}{4}}{2} \right) \quad (3.17)$$

Στην περίπτωση, στην οποία η  $M_{Rd}$  είναι μεγαλύτερη της  $M_{Ed}$ , τότε η δοκός αντέχει την υπάρχουσα καμπτική φόρτιση και επομένως, δεν απαιτείται η εφαρμογή ενίσχυσης με σύνθετα υλικά στην δοκό, οπότε το λογισμικό σταματά την περαιτέρω ανάλυση. Αντίθετα, στην περίπτωση, όπου η  $M_{Rd}$  είναι μικρότερη της  $M_{Ed}$ , τότε η δοκός δεν αντέχει την υπάρχουσα καμπτική φόρτιση, οπότε χρειάζεται επιπλέον καμπτική αντοχή, η οποία θα καλυφθεί μέσω της ενίσχυσής της με σύνθετα υλικά (FRP's).

### 3.1.2.2 Ανάλυση καμπτικής ενίσχυσης δοκού με ινοπλισμένα πολυμερή (FRP)

Σε αυτή την φάση, ξεκινά η δεύτερη επαναληπτική διαδικασία, όπου γίνεται η ανάλυση της ενίσχυσης της αμφιέριστης δοκού σε κάμψη, με ινοπλισμένα πολυμερή. Όλοι οι υπολογισμοί της ανάλυσης στηρίχθηκαν στις διατάξεις των Ευρωπαϊκών Κανονισμών, καθώς και στις οδηγίες σχεδιασμού της fib (2019). Η ανάλυση διατομής (Σχήμα 3.3), βασισμένη στην θεωρία ελαστικής συμπεριφοράς υλικών, ξεκινά όπως και στην πρώτη επαναληπτική διαδικασία, με την λήψη των εσωτερικών δυνάμεων σκυροδέματος χάλυβα και σύνθετου υλικού (Σχήμα 3.3γ), στην κρίσιμη διατομή (μέσον δοκού) (Εξ. 3.18).

$$\Sigma F_y = -F_c - F_{s2} + F_f + F_{s1} \quad (3.18)$$



**Σχήμα 3.3:** Ανάλυση διατομής στην οριακή κατάσταση αντοχής, παρουσία FRP. (α) Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομής, (β) Προφίλ παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής, (γ) Προφίλ εσωτερικών δυνάμεων (Τριανταφύλλου, 2004).

Σκοπός της λήψης ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων είναι η εύρεση του βάθους του ουδέτερου άξονα  $x$ , με το ίδιο όριο σφάλματος (tolerance) για το  $\Sigma F_y$  και βήμα για το  $x$  της πρώτης επαναληπτικής διαδικασίας. Αρχική υπόθεση μηχανισμού αστοχίας είναι η αποκόλληση σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή ή η θραύση του σύνθετου υλικού, η οποία συμβαίνει μετά την διαρροή του χάλυβα και χωρίς να έχει επέλθει, προγενέστερα, αστοχία λόγω θραύσης του σκυροδέματος. Για αυτή την αστοχία θεωρείται δεδομένη η παραμόρφωση του FRP, σε αντίθεση με την μέγιστη παραμόρφωση του σκυροδέματος στην άνω θλιβόμενη ίνα η οποία πρέπει να υπολογιστεί, με όριο αυτό της θραύσης του, ίσο με 3,5%. Οι εσωτερικές δυνάμεις, σκυροδέματος και χάλυβα, υπολογίζονται, σε KN, μέσω των παραπάνω Εξ. (3.3), Εξ. (3.6) και Εξ. (3.7), με διαφορές στον υπολογισμό του εμβαδού του σκυροδέματος και στις παραμορφώσεις του οπλισμού χάλυβα. Το εμβαδόν του σκυροδέματος για ορθογωνική διατομή υπολογίζεται από την Εξ. (3.19), και για διατομή πλακοδοκού από τις Εξ. (3.20) και Εξ. (3.21), όπως φαίνονται παρακάτω:

$$A_c = \psi * x * b \quad (3.19)$$

$$A_c = \psi * x * b_{eff}, \text{ αν } \psi * x \leq h_f \quad (3.20)$$

$$A_c = h_f * b_{eff} + b_w * (\psi * x - h_f), \text{ αν } \psi * x > h_f \quad (3.21)$$



Όπου  $\psi$  = το ποσοστό του βάθους του ουδέτερου άξονα, το οποίο προσδιορίζεται ανάλογα με την τιμή της μέγιστης παραμόρφωσης του σκυροδέματος στην άνω θλιβόμενη ίνα,  $\varepsilon_{c,top}$ , σύμφωνα με τις παρακάτω Εξ. (3.22) και Εξ. (3.23):

$$\psi = 1000 * \varepsilon_{c,top} * \left( 0,5 - \frac{1000}{12} * \varepsilon_{c,top} \right), \text{για } \varepsilon_{c,top} \leq 2\text{‰} \quad (3.22)$$

$$\psi = 1 - \frac{2}{3000} * \varepsilon_{c,top}, \text{για } 2\text{‰} \leq \varepsilon_{c,top} \leq 3,5\text{‰} \quad (3.23)$$

Όπου η  $\varepsilon_{c,top}$  προσδιορίζεται μέσω της παρακάτω αναλογίας (Εξ. (3.24), συναρτήσει της παραμόρφωσης του ινοπλισμένου πολυμερούς  $\varepsilon_f$ , του  $\varepsilon_0$  και του βάθους του ουδέτερου άξονα  $x$ , που προκύπτει από το συμβιβαστό των παραμορφώσεων (Σχήμα 3.3β).

$$\varepsilon_{c,top} = \frac{(\varepsilon_f + \varepsilon_0) * x}{h - x} \quad (3.24)$$

Οι παραμορφώσεις του κάτω εφελκυσμένου και άνω θλιβόμενου σπλισμού χάλυβα  $\varepsilon_1$  και  $\varepsilon_2$ , αντίστοιχα, καθορίζονται μέσω αναλογιών που προκύπτουν βάσει του συμβιβαστού των παραμορφώσεων και εξαρτώνται από τις παραμορφώσεις  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_f$  και το  $x$ , σύμφωνα με τις παρακάτω Εξ. (3.25) και Εξ.(3.26):

$$\varepsilon_1 = \frac{(d - x) * (\varepsilon_0 + \varepsilon_f)}{h - x} \quad (3.25)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{(d - x) * (d_2 - x)}{h - x} \quad (3.26)$$

Η δύναμη του σύνθετου υλικού (FRP's)  $F_f$  στην Εξ. (3.17), υπολογίζεται σε KN, με την εξής Εξ. (3.27):

$$F_f = A_f * E_f * \varepsilon_f \quad (3.27)$$

Όπου,  $A_f$  και  $\varepsilon_f$  το εμβαδόν, σε mm<sup>2</sup> και η παραμόρφωση του σύνθετου υλικού, αντίστοιχα, τα οποία καθορίζονται μέσω των Εξ. (3.28) και Εξ. (3.29), όπως φαίνονται παρακάτω:

$$A_f = b_f * t_f * n \quad (3.28)$$

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_{fd}}{E_f} \quad (3.29)$$

Όπου  $\sigma_{fd}$  = η τάση σχεδιασμού που αφορά την αποκόλληση ή την θραύση του σύνθετου υλικού, η οποία προσδιορίζεται σε MPa, με την εξής Εξ. (3.30):

$$\sigma_{fd} = \min(f_{fbd,IC}, f_{fd}) \quad (3.30)$$

Όπου  $f_{fd}$  = η μέγιστη τάση (σχεδιασμού) θραύσης του FRP, οποία δίνεται από τον χρήστη, σε MPa και  $f_{fbd,IC}$  = η μέγιστη τάση (σχεδιασμού) αποκόλλησης του FRP σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή, η οποία υπολογίζεται σε MPa, σύμφωνα με τις οδηγίες σχεδιασμού της fib (2019), με την παρακάτω Εξ. (3.31):

$$f_{fbd,IC} = \frac{k_{cr,k} * k_k * k_b * \sqrt{\frac{2 * E_f}{t_f} * f_{cm}^{2/3}}}{\gamma_{fb}} \quad (3.31)$$

Όπου,  $k_{cr,k} = 1,8$  και  $k_k = 0,17$  οι χαρακτηριστικές τιμές διορθωτικών συντελεστών,  $f_{cm}$  = μέση εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος, η οποία ισούται με την  $f_{ck}$  αυξημένη κατά 8 MPa,  $\gamma_{fb} = 1,5$ , ο συντελεστής ασφαλείας του σύνθετου υλικού που αφορά το υπόστρωμα σκυροδέματος – σύνθετων υλικών και  $k_b = 0$  ο συντελεστής επιρροής του πλάτους επικόλλησης του FRP, ο οποίος υπολογίζεται μέσω της παρακάτω Εξ. (3.32):

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - b_f/b_{pr}}{1 + b_f/b_{pr}}} \quad (3.32)$$

Όπου  $b_{pr}$  = πλάτος διατομής πρίσματος σκυροδέματος, στο οποίο έχει επικολληθεί το έλασμα, σε mm.

Στη συνέχεια, από την ισορροπία ροπών, προσδιορίζεται η ροπή αντοχής (σχεδιασμού) σε κάμψη  $M_{Rd}$  της αμφιέριστης δοκού, σε KNm, σύμφωνα με την εξής Εξ. (3.33):

$$M_{Rd} = A_{s1} * \sigma_{s1} * (d - \delta_G * x) + A_f * \sigma_{fd} * (h - \delta_G) + A_{s2} * \sigma_{s2} * (\delta_G * x - d_2) \quad (3.33)$$

Όπου  $\delta_G$  = η απόσταση μεταξύ της άνω θλιβόμενης ίνας του σκυροδέματος και του σημείου εφαρμογής της δύναμης του σκυροδέματος, η οποία καθορίζεται ανάλογα με την τιμή της μέγιστης παραμόρφωσης του σκυροδέματος στην άνω θλιβόμενη ίνα,  $\varepsilon_{c,top}$ , σύμφωνα με τις παρακάτω Εξ. (3.34) και Εξ. (3.35):

$$\delta_G = \frac{8 - 1000 * \varepsilon_{c,top}}{4 * (6 - 1000 * \varepsilon_{c,top})}, \text{ για } \varepsilon_{c,top} \leq 2\% \quad (3.34)$$

$$\delta_G = \frac{1000 * \varepsilon_{c,top} * (3000 * \varepsilon_{c,top} - 4) + 2}{2000 * \varepsilon_{c,top} * (3000 * \varepsilon_{c,top} - 2)}, \text{ για } 2\% \leq \varepsilon_{c,top} \leq 3,5\% \quad (3.35)$$

Στην περίπτωση, όπου η παραμόρφωση της άνω θλιβόμενης ίνας του σκυροδέματος  $\varepsilon_{c,top}$  προκύπτει ίση με την οριακή, δηλαδή 3,5 ‰, τότε στο λογισμικό επιλέγεται η ανάλυση με μηχανισμό αστοχίας την θραύση του σκυροδέματος, μετά την διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα και χωρίς να έχει επέλθει προηγουμένως θραύση ή αποκόλληση του σύνθετου υλικού. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι όμοια με αυτή της αποκόλλησης ή θραύσης του σύνθετου υλικού, υπολογίζοντας την ροπή αντοχής  $M_{Rd}$  με την παραπάνω Εξ. (3.33), με τις εξής διαφορές: Η παραμόρφωση της άνω θλιβόμενης ίνας του σκυροδέματος είναι γνωστή και ίση με την οριακή, δηλαδή 3,5 ‰, σε αντίθεση με την παραμόρφωση του σύνθετου υλικού η οποία προσδιορίζεται μέσω της παρακάτω αναλογίας Εξ. (3.36), συναρτήσει της  $\varepsilon_{c,top}$ ,  $\varepsilon_0$  και  $x$ , που προκύπτει βάσει του συμβιβαστού των παραμορφώσεων.

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{c,top} * (h - x)}{x - \varepsilon_0} \quad (3.36)$$

Οι παραμορφώσεις  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ , υπολογίζονται σύμφωνα με τις παραπάνω Εξ. (3.14) και Εξ. (3.15) και όπου  $\delta_G = 0,4$  και  $\psi = 0,8$ .

Στην τελευταία φάση, εκτελείται η εξωτερική λούπα του λογισμικού, με την οποία ο αριθμός των στρώσεων  $n$  του FRP αυξάνεται μέχρι την στιγμή που η ροπή καμπτικής αντίστασης της δοκού  $M_{Rd}$  θα είναι είναι μεγαλύτερη ή ίση της δρώσας ροπής  $M_{Ed}$  της δοκού που έχει δώσει ο χρήστης.

### 3.1.2.3 Έλεγχος μεθόδου - Επαλήθευση

Μετά την εύρεση του αριθμού στρώσεων ή ελασμάτων  $n$  του FRP, στο λογισμικό πραγματοποιείται έλεγχος της μεθόδου που αναλύθηκε προγενέστερα, επαληθεύοντας την ορθή μεταφορά της δύναμης συνάφειας μεταξύ FRP και σκυροδέματος ανάμεσα σε δύο διαδοχικές καμπτικές ρηγματώσεις, με καθορισμένη απόσταση, στην κρίσιμη διατομή της δοκού. Αυτό επιτυγχάνεται, ελέγχοντας αν η διαφορά των εφελκυστικών δυνάμεων του FRP μεταξύ δύο διαδοχικών ρωγμών στην δοκό ( $\Delta F_{fEd}$ ), είναι μικρότερη ή ίση της διαφοράς δυνάμεων αντίστασης του FRP μεταξύ των σημείων αυτών ( $\Delta F_{fRd}$ ) (Ο.Κ.Α.) (Εξ. 3.37).

$$\Delta F_{fEd} \leq \Delta F_{fRd} \quad (3.37)$$

Η  $\Delta F_{fEd}$  υπολογίζεται, σε KN, μέσω της παρακάτω Εξ. (3.38):

$$\Delta F_{fEd} = F_{fEd}(x + s_r) - F_{fEd}(x) \quad (3.38)$$

Όπου  $s_r$  = η απόσταση μεταξύ των δύο διαδοχικών ρωγμών, η οποία προσδιορίζεται, σε m, σύμφωνα με την παρακάτω Εξ. (3.39):

$$s_r = 1,5 * l_{e,0} \quad (3.39)$$

Όπου  $l_{e,0}$  = το μήκος μεταφοράς του οπλισμού χάλυβα, το οποίο καθορίζεται, σε m, με την εξής Εξ. (3.40):

$$l_{e,0} = \frac{M_{cr}}{z_s * F_{bsm}} \quad (3.40)$$

Όπου  $z_s \approx 0,85h$  ο μοχλοβραχίονας,  $F_{bsm}$  = η δύναμη συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού χάλυβα και σκυροδέματος ανά μονάδα μέτρου και  $M_{cr}$  = η ροπή ρηγμάτωσης, η οποία υπολογίζεται, σε KNm, μέσω της παρακάτω Εξ. (3.41):

$$M_{cr} = k_{fl} * f_{ctm} * W_{c,0} \quad (3.41)$$

Όπου,  $k_{fl}$  υπολογίζεται με την παρακάτω Εξ. (3.42), με  $h$  σε mm:

$$k_{fl} = (1,6 - h/1000) \geq 1 \quad (3.41)$$

Όπου  $f_{ctm}$  = η μέση εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, η οποία υπολογίζεται, σε MPa, μέσω της παρακάτω Εξ. (3.42):

$$f_{ctm} = 0,3 * f_{ck}^{2/3} \quad (3.42)$$

Όπου  $W_{c,0}$  = η ροπή αντίστασης κατά τον άξονα  $x$ , η οποία προσδιορίζεται, σε  $mm^3$ , στον κώδικα του λογισμικού, ανάλογα την διατομή της δοκού (ορθογωνική ή πλακοδοκός) που έχει επιλέξει ο χρήστης. Η δύναμη συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και εφελκυσμένου οπλισμού χάλυβα  $F_{bsm}$  ανά μονάδα μέτρου, υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω Εξ. (3.43):

$$F_{bsm} = \sum_{i=1}^n n_{\kappa,i} * \pi * d_{\kappa,i} * f_{bsm} \quad (3.43)$$

Όπου  $f_{bsm}$  = η μέση τάση συνάφειας του οπλισμού χάλυβα, η οποία καθορίζεται, σε MPa, ανάλογα την μορφή των ράβδων που θα επιλέξει ο χρήστης, δηλαδή με ραβδώσεις ή λείες, όπως φαίνεται στην παρακάτω Εξ. (3.44):

$$f_{bsm} = \begin{cases} 0,43 * \kappa_{vb1} * f_{cm}^{2/3} & \text{για ράβδους με ραβδώσεις} \\ 0,28 * \kappa_{vb2} * \sqrt{f_{cm}} & \text{για λείες ράβδους} \end{cases} \quad (3.44)$$

Όπου  $\kappa_{vb1}$ ,  $\kappa_{vb2}$  = οι παράμετροι που η κάθε μία ισούται με την τιμή 1, για καλές συνθήκες συνάφειας ή με την τιμές 0,7 και 0,5, αντίστοιχα, για μέτριες συνθήκες συνάφειας, τις οποίες τιμές επιλέγει ο χρήστης.

Για τον υπολογισμό της  $\Delta F_{fRd}$ , χρησιμοποιούνται δύο διαδικασίες, μία αναλυτική και μία απλουστευμένη. Όσον αφορά την αναλυτική διαδικασία, η  $\Delta F_{fRd}$  προσδιορίζεται, σε KN, από τρεις συνιστώσες, μέσω της παρακάτω Εξ. (3.45). Οι συνιστώσες αυτές, προκύπτουν από το διγραμμικό διάγραμμα τάσεων – ολισθήσεων που αφορά την συνάφεια μεταξύ FRP και σκυροδέματος.

$$\Delta F_{fRd} = \frac{\Delta F_{fk,B} + \Delta F_{fk,F} + \Delta F_{fk,C}}{\gamma_{fb}} \quad (3.45)$$

Όπου  $\Delta F_{fk,B}$  = η διαφορά δυνάμεων αντίστασης του FRP που αφορά την συγκόλληση του FRP,  $\Delta F_{fk,F}$  = η διαφορά δυνάμεων αντίστασης του FRP εξαιτίας της τριβής που αναπτύσσεται και  $\Delta F_{fk,C}$  = η διαφορά δυνάμεων αντίστασης του FRP που οφείλεται σε σημείο της δοκού που υπάρχει καμπυλότητα. Η συνιστώσα διαφορά δύναμης  $\Delta F_{fk,B}$  υπολογίζεται, σε KN, σύμφωνα με την παρακάτω Εξ. (3.46).

$$\Delta F_{fk,B} = \begin{cases} \Delta F_{fk,B}^G - \frac{\Delta F_{fk,B}^G - \Delta F_{fk,B}^D}{F_{fk,B}^D} * F_{fEd} & \text{για } F_{fEd} \leq F_{fk,B}^D \\ \sqrt{b_f^2 * \tau_{b1k} * s_{0k} * E_f + F_{fEd}^2 - F_{fEd}} & \text{για } F_{fk,B}^D \leq F_{fEd} \leq F_{fd} \end{cases} \quad (3.46)$$

Όπου  $F_{fEd}$  = η εφελκυστική δύναμη του FRP στο πιο χαμηλό σημείο της δοκού που υπάρχει ρωγμή, και  $F_{fd}$  = η δύναμη σχεδιασμού θραύσης ινών του FRP, οι οποίες προσδιορίζονται, σε KN, με τις παρακάτω Εξ. (3.47) και Εξ. (3.48), αντίστοιχα:

$$F_{fEd} = \varepsilon_f * E_f * A_f \quad (3.47)$$

$$F_{fd} = f_{fd} * A_f \quad (3.48)$$

Όπου  $\tau_{b1k}$ ,  $s_{0k}$  είναι η διατμητική τάση και η οριακή ολίσθηση (χαρακτηριστικές τιμές), από το διγραμμικό διάγραμμα του καταστατικού νόμου συνάφειας μεταξύ FRP και σκυροδέματος και καθορίζονται σε MPa και mm, αντίστοιχα, ανάλογα με το είδος του FRP

(έλασμα, ύφασμα) που θα επιλέξει ο χρήστης, σύμφωνα με τις παρακάτω Εξ. (3.49), Εξ. (3.50), Εξ. (3.51) και Εξ. (3.52):

$$\tau_{b1k} = 0,37 * \sqrt{f_{cm} * f_{ctm}} \quad (3.49)$$

$$s_{0k} = 0,20 \quad (3.50)$$

$$\tau_{b1k} = 0,44 * \sqrt{f_{cm} * f_{ctm}} \quad (3.51)$$

$$s_{0k} = 0,23 \quad (3.52)$$

Όπου οι  $\Delta F_{fk,B}^G$ ,  $\Delta F_{fk,B}^D$  και  $F_{fk,B}^D$  υπολογίζονται, σε KN, σύμφωνα με τις παρακάτω Εξ. (3.53), Εξ. (3.54) και Εξ. (3.55):

$$\Delta F_{fk,B}^G = f_{fbk}(s_r) * b_f * t_f \quad (3.53)$$

$$\Delta F_{fk,B}^D = \sqrt{b_f^2 * \tau_{b1k} * s_{0k} * E_f * t_f + F_{fk,B}^D \cdot 2 - F_{fk,B}^D} \quad (3.54)$$

$$F_{fk,B}^D = \frac{s_{0k} * E_f * b_f * t_f}{s_r} - \tau_{b1k} * \frac{s_r * b_f}{4} \quad (3.55)$$

Όπου  $f_{fbk}(s_r)$  = η χαρακτηριστική τιμή της αντοχής συνάφειας μεταξύ FRP και σκυροδέματος, συναρτήσει της απόστασης μεταξύ 2 διαδοχικών ρωγμών  $s_r$ , η οποία καθορίζεται, σε ΜΡα, ανάλογα την σχέση μεταξύ των  $s_r$  και  $l_e$ , σύμφωνα με την παρακάτω Εξ. (3.56):

$$f_{fbk}(s_r) = \begin{cases} \sqrt{\frac{E_f * s_{0k} * \tau_{b1k}}{t_f}} * \frac{s_r}{l_e} * \left(2 - \frac{s_r}{l_e}\right) & \text{για } s_r < l_e \\ \sqrt{\frac{E_f * s_{0k} * \tau_{b1k}}{t_f}} & \text{για } s_r \geq l_e \end{cases} \quad (3.56)$$

Όπου το μήκος  $l_e$  υπολογίζεται, σε m, μέσω της εξής Εξ. (3.57):

$$l_e = \frac{\pi}{2} * \sqrt{\frac{E_f * t_f * s_{0k}}{\tau_{b1k}}} \quad (3.57)$$

Η συνιστώσα διαφορά δύναμης προσδιορίζεται, σε KN, σύμφωνα με την παρακάτω Εξ. (3.58):

$$\Delta F_{fk,F} = \begin{cases} 0 & \text{για } F_{fEd} \leq F_{fk,B}^D \\ \tau_{bFk} * b_f * \left[ s_r - \frac{2 * t_f * E_f}{\tau_{b1k}} * \left( \sqrt{\frac{\tau_{b1k} * s_{0k}}{E_f * t_f} + \frac{F_{fEd}^2}{b_f^2 * t_f^2 * E_f^2}} - \frac{F_{fEd}}{b_f * t_f * E_f} \right) \right] & \text{για } F_{fk,B}^D \leq F_{fEd} \leq F_{fd} \end{cases} \quad (3.58)$$

Όπου  $\tau_{bFk}$  = η χαρακτηριστική αντοχή που οφείλεται στην τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ FRP και σκυροδέματος και υπολογίζεται, σε MPa, μέσω της παρακάτω Εξ. (3.59):

$$\tau_{bFk} = 10,8 * a_{cc} * f_{cm}^{-0,89} \quad (3.59)$$

Η συνιστώσα διαφορά δύναμης  $\Delta F_{fk,C}$  προσδιορίζεται σε KN, σύμφωνα με την παρακάτω Εξ. (3.60):

$$\Delta F_{fk,F} = s_r * \kappa_k * \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_{c,top}}{h} * b_f \quad (3.60)$$

Όπου  $\kappa_k = 24,3 * 10^3$  συντελεστής βαθμονόμησης.

Στην απλουστευμένη διαδικασία, η διαφορά δύναμης αντίστασης του FRP μεταξύ δύο διαδοχικών ρωγμών για το χαμηλότερο σημείο της δοκού που υπάρχει ρωγμή,  $\Delta F_{fRd}$ , υπολογίζεται, σε KN, με την εξής Εξ. (3.61):

$$\Delta F_{fRd} = \frac{2,3 * \tau_{b1k} * \sqrt{s_r} + 0,1 * \tau_{bFk} * s_r^{4/3} + \frac{\kappa_h}{h} * s_r^{1/3}}{\gamma_{fb}} * b_f \quad (3.61)$$

Όπου  $\kappa_h = 2000$  επειδή το σκυροδέμα στην αμφιέριστη δοκό είναι οπλισμένο.

Η δύναμη  $F_{fEd}(x)$ , υπολογίζεται, σε KN, μέσω της παρακάτω Εξ. (3.62), για κάθε σημείο της δοκού. Στην προκειμένη περίπτωση έχει υπολογιστεί για το μέσον της αμφιέριστης δοκού, όπου η δοκός δέχεται την μεγαλύτερη καμπτική καταπόνηση. Η τιμή που θα λάβει εξαρτάται από το αν έχει επέλθει διαρροή του εφελκόμενου χαλύβδινου οπλισμού.

$$F_{fEd}(x) = \begin{cases} \frac{\Delta M_{Ed}(x)}{z_m} * \frac{d_f * E_f * A_f}{d_f * E_f * A_f + d_s * E_s * A_s} & \text{για } \sigma_s(x) < f_{yd} \\ \frac{M_{Ed}(x)}{z_m} - A_s * f_{yd} & \text{για } \sigma_s(x) = f_{yd} \end{cases} \quad (3.62)$$

Όπου,  $\Delta M_{Ed}(x) = M_{Ed}(x) - M_{E,0}(x)$ , σε KNm, η πρόσθετη δρώσα καμπτική ροπή,  $M_{Ed}(x) = \eta$  δρώσα ροπή κάμψης,  $M_{E,0}(x) = \eta$  ροπή κάμψης κατά την διάρκεια των εργασιών ενίσχυσης

της δοκού με οπλισμό χάλυβα,  $d_f = 0,9 \cdot d_s$  το συνεργαζόμενο ύψος του FRP,  $d_s = h - d_1$  το συνεργαζόμενο ύψος του εφελκυσμένου οπλισμού χάλυβα (στατικό ύψος διατομής δοκού),  $\sigma_s(x)$  = η τάση του εφελκυσμένου οπλισμού χάλυβα και  $z_m$  = σταθμισμένος μοχλοβραχίονας ο οποίος υπολογίζεται μέσω της παρακάτω Εξ. (3.63):

$$z_m = 0,8 * \frac{d_f * E_f * A_f}{E_f * A_f + E_s * A_s} \quad (3.63)$$

Η τάση του εφελκυσμένου οπλισμού χάλυβα  $\sigma_s(x)$  προσδιορίζεται, σε MPa, σύμφωνα με την παρακάτω Εξ. (3.64), για κάθε σημείο της δοκού. Όπως συνέβη και για την  $F_{fEd}(x)$ , η  $\sigma_s(x)$  έχει υπολογιστεί για το μέσον της αμφιέρειστης δοκού, όπου η δοκός δέχεται την μεγαλύτερη καμπτική καταπόνηση.

$$\sigma_s(x) = \sigma_{s,0}(x) + \frac{\Delta M_{Ed}(x)}{z_m} * \frac{d_s * E_s}{d_f * E_f * A_f + d_s * E_s * A_s} \leq f_{yd} \quad (3.64)$$

Όπου,  $\sigma_{s,0}(x)$  = η τάση του εφελκυσμένου οπλισμού χάλυβα κατά την διάρκεια των εργασιών ενίσχυσης της δοκού με οπλισμό χάλυβα, η οποία υπολογίζεται μέσω της Εξ. (3.65), για το μέσον της δοκού:

$$\sigma_{s,0}(x) = \frac{M_{E,0}(x)}{z_s * A_s} = \frac{M_{E,0}(x)}{0,85 * d_s * A_s} \leq f_{yd} \quad (3.65)$$

Όπου  $z_s$  = ο μοχλοβραχίονας του οπλισμού χάλυβα.

Έπειτα, τα μεγέθη  $F_{fEd}(x)$ ,  $\sigma_s(x)$  και  $\sigma_{s,0}(x)$ , υπολογίζονται εκ νέου για το σημείο  $x + s_r$ , με σκοπό την εύρεση της διαφοράς των εφελκυστικών δυνάμεων του FRP μεταξύ δύο διαδοχικών ρωγμών στην δοκό  $\Delta F_{fEd}$ . Οπότε, αν η  $\Delta F_{fEd}$  προκύπτει μικρότερη ή ίση της  $\Delta F_{FRD}$ , τότε συμπεραίνεται πως ο αριθμός στρώσεων που έχει βρεθεί προγενέστερα, για την ενίσχυση της αμφιέρειστης δοκού με οπλισμένα πολυμερή, είναι ορθός.

### 3.1.3 Αποτελέσματα Ανάλυσης

Μετά το στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων, όπου έγινε ο προγραμματισμός όλης της ανάλυσης που αναφέρθηκε παραπάνω, παρουσιάζονται στον χρήστη τα αποτελέσματα αυτής, στο περιβάλλον υπολογιστικού φύλλου στο Excel. Αρχικά, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη, εισάγοντας το μήκος και την ομοιόμορφη φόρτιση της δοκού, να



λάβει το διάγραμμα της δρώσας ροπής κάμψης  $M_{Ed}$ . Στην συνέχεια, πατά το κουμπί με την αναγραφή “Εύρεση στρώσεων ενίσχυσης δοκού με FRP”, οπότε εκτελείται η πρώτη επαναληπτική διαδικασία, όπου εξετάζεται η επάρκεια της δοκού σε κάμψη. Έπειτα, εμφανίζεται στον χρήστη μήνυμα, μέσω παραθύρου, το οποίο τον ενημερώνει αν η δοκός χρήζει επιπλέον ενίσχυσης έναντι κάμψης. Αν δεν απαιτείται επιπλέον ενίσχυση στον χρήστη, εμφανίζονται, σε κελιά, η δρώσα ροπή κάμψης  $M_{Ed}$  και η ροπή αντοχής  $M_{Rd}$ , χωρίς φυσικά την ενίσχυση των σύνθετων υλικών. Επιπλέον παρουσιάζονται και τα σημαντικά μεγέθη της ανάλυσης, τα οποία είναι το βάθος του ουδέτερου άξονα, οι τιμές των δυνάμεων που συμμετείχαν στην ισορροπία της διατομής, το σφάλμα στο οποίο κατέληξε το λογισμικό για την επίλυση ( $\Sigma F_y$ ), καθώς επίσης η τιμή της παραμόρφωσης της άνω θλιβόμενης ίνας του σκυροδέματος και οι τιμές των εμβαδών και παραμορφώσεων των οπλισμών χάλυβα.

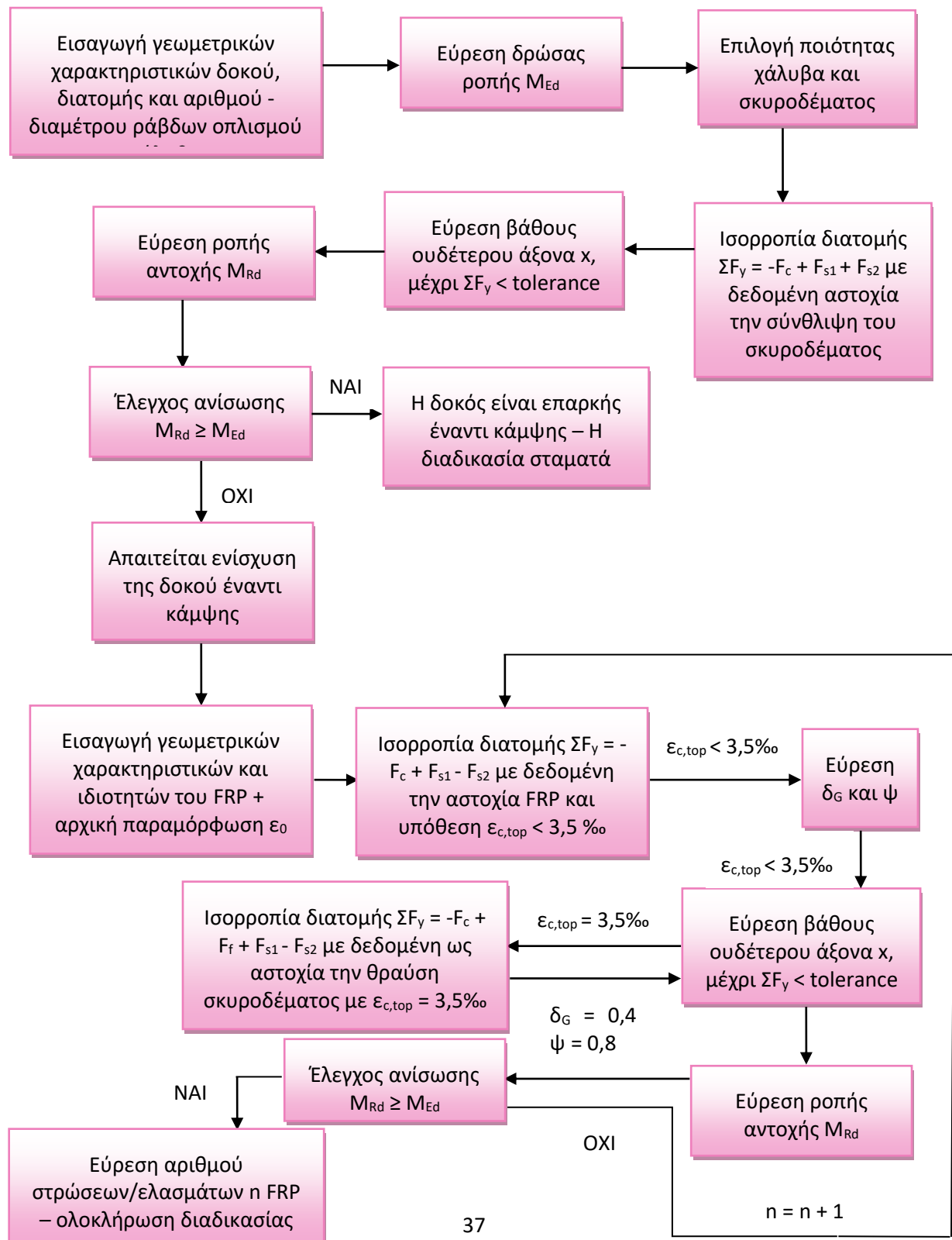
Αν απαιτείται επιπλέον ενίσχυση, ενεργοποιείται η δεύτερη επαναληπτική διαδικασία με το τέλος της οποίας, εμφανίζεται στον χρήστη, σε μήνυμα μέσω παραθύρου η ροπή που υπολείπεται, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της δρώσας ροπής κάμψης  $M_{Ed}$  και της ροπής αντοχής  $M_{Rd}$  της δοκού. Στην συνέχεια, εκτός από τα μεγέθη που αναφέρθηκαν παραπάνω ότι εμφανίζονται στον χρήστη, παρουσιάζεται, σε κελί, και το ζητούμενο του λογισμικού αυτού, δηλαδή ο αριθμός των στρώσεων ή ελασμάτων  $n$  του σύνθετου υλικού (FRP's). Επιπρόσθετα, εμφανίζονται το εμβαδόν του σύνθετου υλικού που χρειάζεται για την ενίσχυση, καθώς επίσης και η τάση (σχεδιασμού) θραύσης του FRP ή αποκόλλησης σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή της δοκού.

Στη τελευταία φάση, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ελέγξει την ορθότητα της ανάλυσης που εκτελέστηκε στο λογισμικό, μέσω της διαδικασίας που αναφέρθηκε παραπάνω, στην υποενότητα 3.1.2.3. Επομένως, πατώντας ο χρήστης το κουμπί με την αναγραφή “Έλεγχος μεθόδου – Επαλήθευση”, ενεργοποιείται η διαδικασία. Στην συνέχεια, εμφανίζεται, σε κελί, η αναγραφή “check”, στο διπλανό κελί που αναγράφεται η ανίσωση  $\Delta F_{fEd} \leq \Delta F_{fRd}$ , οπότε συμπεραίνεται πως η ανίσωση αυτή ικανοποιείται (για αναλυτική και απλουστευμένη διαδικασία υπολογισμού  $\Delta F_{fRd}$ ). Άρα, προκύπτει πως έχει εξαχθεί από το λογισμικό, ο σωστός αριθμός στρώσεων ή ελασμάτων  $n$  του FRP, ώστε να ενισχυθεί η αμφιέριστη δοκός έναντι κάμψης.

Ο κώδικας που αναπτύχθηκε για την δημιουργία του λογισμικού, παρατίθεται στο Παράρτημα Α.

### 3.2 Αναλυτικό διάγραμμα ροής λογισμικού

Στο παρακάτω Σχήμα 3.4, παρουσιάζεται το αναλυτικό διάγραμμα ροής του λογισμικού.



Σχήμα 3.4: Αναλυτικό διάγραμμα ροής λογισμικού.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το λογισμικό που δημιουργήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μέσω αριθμητικού παραδείγματος. Ο χρήστης, βρισκόμενος στο περιβάλλον υπολογιστικού φύλλου στο Excel, αρχικά εισάγει τα δεδομένα που απαιτούνται για την ανάλυση, σε κελιά, δηλαδή το μήκος και την κατανεμημένη φόρτιση της δοκού, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής της και την ποιότητα χάλυβα σπλισμού και σκυροδέματος, όπως αυτά φαίνονται στα παρακάτω Σχήμα 4.1, Σχήμα 4.2α και Σχήμα 4.2β.

Εισαγωγή δεδομένων από τον χρήστη	
Μήκος και Φόρτιση δοκού	
$l$ (m)	6
$q$ (KN/m)	38,25

**Σχήμα 4.1:** Εισαγωγή μήκος και φόρτιση δοκού από τον χρήστη.

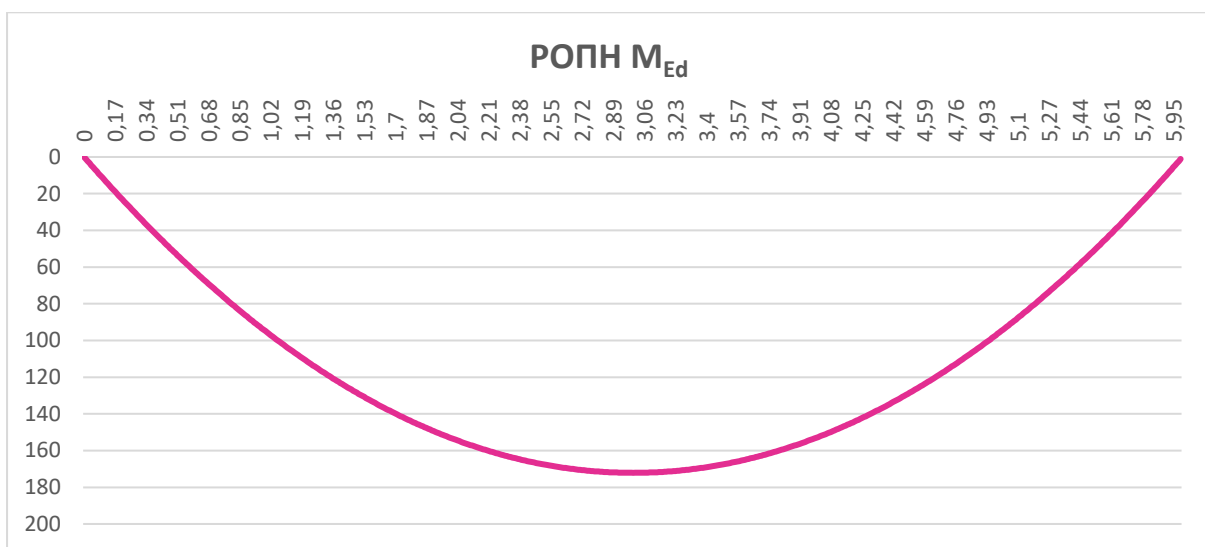
Εισαγωγή δεδομένων από τον χρήστη	
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομής	
$b$ (mm)	300
$h$ (mm)	500
$d_1$ (mm)	50
$d_2$ (mm)	40
$d_k$ (mm)	20
$d_a$ (mm)	16
$n_k$	3
$n_a$	2
$b_{eff}$ (mm)	1200
$h_f$ (mm)	150
$b_w$ (mm)	250
Ποιότητα χάλυβα σπλισμού	
$f_{yk}$ (MPa)	500
$E_s$ (GPa)	200
$\gamma_s$	1,15

**Σχήμα 4.2:** (α) Εισαγωγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών διατομής και ποιότητας χάλυβα σπλισμού.

Ποιότητα σκυροδέματος	
$a_{cc}$	0,85
$f_{ck}$ (MPa)	30
$\gamma_c$	1,5
$b_{pr}$ (mm)	100

Σχήμα 4.2: (β) Εισαγωγή ποιότητας χάλυβα οπλισμού.

Έπειτα ο χρήστης έχει την δυνατότητα να μελετήσει το διάγραμμα δρυσών ροπών κάμψης  $M_{Ed}$  της αμφιέριστης δοκού, όπως αυτό παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 4.3. Η μέγιστη τιμή της  $M_{Ed}$ , της κρίσιμης διατομής (για  $x = 3m$ ) εμφανίζεται σε κελί (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα δρυσών ροπών κάμψης  $M_{Ed}$ .

Δρώσα ροπή κάμψης	
$M_{Ed}$ (KNm)	172

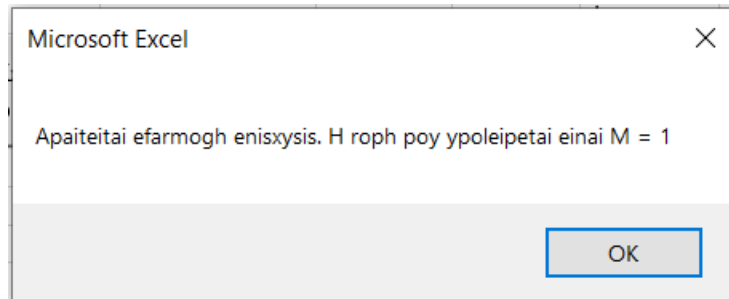
Σχήμα 4.4: Εμφάνιση μέγιστης τιμής δρώσας ροπής κάμψης  $M_{Ed}$ .

Στην συνέχεια, ο χρήστης εισάγει, σε κελιά, τα απαραίτητα χαρακτηριστικά του σύνθετου υλικού (FRP) που έχει επιλέξει, σε αυτή την περίπτωση ένα CFRP έλασμα, καθώς και την αρχική παραμόρφωση  $\epsilon_0$ , αν αυτή υπάρχει (Σχήμα 4.5).

Σύνθετο υλικό (FRP)	
$b_f$ (mm)	110
$b_{pr}$ (mm)	100
$t_f$ (mm)	1,1
$E_f$ (MPa)	180000
$f_{fd}$ (MPa)	3000
$\epsilon_0$ (m)	0,00064

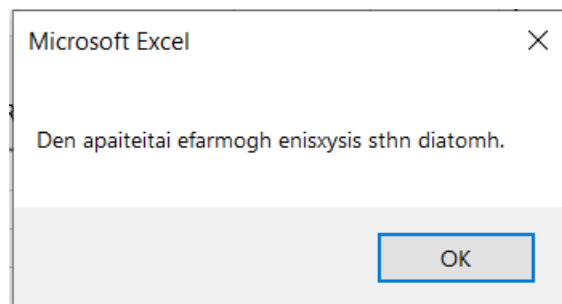
Σχήμα 4.5: Εισαγωγή δεδομένων FRP και  $\epsilon_0$  από τον χρήστη.

Έπειτα, πατώντας το κουμπί με την αναγραφή “Εύρεση στρώσεων ενίσχυσης με FRP”, εμφανίζεται σε μήνυμα, μέσω παραθύρου (Σχήμα 4.6), η ροπή που υπολείπεται για την οποία η δοκός δεν αντέχει έναντι κάμψης.



**Σχήμα 4.6:** Παράθυρο μηνύματος για απαίτηση ενίσχυσης της δοκού.

Σε διαφορετικό αριθμητικό παράδειγμα, όπου η διατομή δεν έχρηζε ενίσχυσης έναντι κάμψης, θα εμφανιζόταν μήνυμα, μέσω παραθύρου, με το οποίο ο χρήστης ενημερώνεται για την μη απαίτηση ενίσχυσης στην δοκό (Σχήμα 4.7), καθώς επίσης θα εμφανίζονταν, σε κελιά, και τα αποτελέσματα της ανάλυσης, χωρίς την χρήση FRP (Σχήμα 4.7).



**Σχήμα 4.7:** Παράθυρο μηνύματος για μη απαίτηση ενίσχυσης της δοκού.

Πατώντας την ένδειξη “OK”, εμφανίζονται, σε κελιά, τα αποτελέσματα της ανάλυσης (Σχήμα 4.8), δηλαδή όλα τα σημαντικά μεγέθη που αναφέρθηκαν στην υποενότητα 3.1.3, καθώς και το ζητούμενο του χρήστη, τον αριθμό των ελασμάτων ενίσχυσης της δοκού που απαιτούνται.

Ισορροπία διατομής ΣFY		Ε <sub>s1</sub>	0,0016966
x (mm)	170,9	Ε <sub>s2</sub>	-0,0007957
F <sub>c</sub> (KN)	-374,3509	Ε <sub>c,Top</sub>	0,0010389
F <sub>s1</sub> (KN)	319,8069	Ε <sub>f</sub>	0,0013606
F <sub>s2</sub> (KN)	-63,99652	σ <sub>fd</sub> (MPa)	244,90343
F <sub>f</sub> (KN)	118,53326	A <sub>s1</sub> (mm <sup>2</sup> )	942,4778
		A <sub>s2</sub> (mm <sup>2</sup> )	402,12386
		Tolerance	0,5
		χωρίς FRP	
		MRd (KNm)	
		με FRP	
		MRd (KNm)	176
		A <sub>frp</sub> (mm <sup>2</sup> )	484
		η στρώσεις FRP	4
		Εύρεση στρώσεων ενίσχυσης δοκού με FRP	

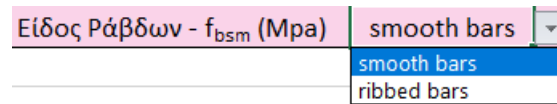
Σχήμα 4.8: Αποτελέσματα του λογισμικού εύρεσης ποσότητας ενίσχυσης δοκού με FRP.

Τέλος, ακολουθεί η δυνατότητα ελέγχου της μεθόδου εύρεσης ποσότητας ενίσχυσης της δοκού με FRP, που προηγήθηκε, μέσω της διαδικασίας επαλήθευσης της, σε δύο διαδοχικά σημεία καμπτικών ρωγμών στην κρίσιμη διατομή, δηλαδή στο μέσον της ( $x = 3m$ ). Αρχικά, ο χρήστης επιλέγει την τιμή των συντελεστών  $K_{vb1}$  και  $K_{vb2}$ , για καλές και μέτριες συνθήκες συνάφειας μεταξύ FRP και σκυροδέματος, αντίστοιχα (Σχήμα 4.9).

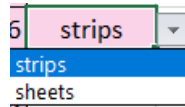
καλές συνθήκες συνάφειας	μέτριες συνθήκες συνάφειας
1	1
0,7	0,5
$K_{vb1}$	1
$K_{vb2}$	0,7
$K_{vb1}$	1
$K_{vb2}$	1
	0,5

Σχήμα 4.9: Επιλογή τιμής συντελεστών  $K_{vb1}$  και  $K_{vb2}$ .

Έπειτα, επιλέγει το είδος των ράβδων σπλισμού (λείες ή ραβδωτές) (Σχήμα 4.10) για την αντοχή  $f_{bsm}$  και το είδος του FRP (έλασμα ή φύλλα υφάσματος) για την διατμητική τάση  $\tau_{b1k}$  (Σχήμα 4.11).



**Σχήμα 4.10:** Επιλογή είδους ράβδων.



**Σχήμα 4.11:** Επιλογή είδους FRP.

Στην τελευταία φάση, ο χρήστης πατώντας το κουμπί με την αναγραφή “Έλεγχος μεθόδου – Επαλήθευση”, παρουσιάζονται, σε κελιά, τα μεγέθη που βρέθηκαν από αυτή την διαδικασία, με το τελευταίο κελί να εμφανίζει την ένδειξη “check” (Σχήμα 4.12). Η ένδειξη αυτή, εμφανίζεται όταν ικανοποιείται η ανίσωση  $\Delta F_{fed} \leq \Delta F_{FRd}$ , οπότε ο χρήστης είναι σίγουρος για την ορθότητα της ποσότητας σύνθετου υλικού, που προέκυψε από το λογισμικό, η οποία θα ενισχύσει καμπτικά την αμφιέρειστη δοκό.

Έλεγχος μεθόδου - Επαλήθευση		
$K_{vb1}$	1	
$K_{vb2}$	1	
Είδος Ράβδων - $f_{bsm}$ (MPa)	smooth bars	1,7260359
$F_{bsm}$ (KN/m)	976,0503184	
$M_{cr}$ (KNm)	39,82643711	
$l_{e,0}$ (m)	0,09600864	
$s_r$ (m)	0,14401296	
Υπολογισμός $\Delta F_{fRd}$		
$\tau_{b1k}$ (Mpa)	3,881753036	strips
$s_{0k}$ (mm)	0,2	
$l_e$ (m)	0,317309822	
$f_{fbk}(sr)$ (Mpa)	125,0566729	
$F_{fk,B}^D$ (KN)	105,6159853	
$\Delta F_{fk,B}^D$ (KN)	30,74625101	
$\Delta F_{fk,B}^G$ (KN)	60,5274297	
$z_m$ (m)	0,348620671	
$M_{E,0}(x)$ (KNm)	100	
$\sigma_{s,0}(x)$ (Mpa)	277,3942363	
$\sigma_s(x)$	432,4215857	
$F_{fEd}$ (KN)	118,5332614	
$F_{fd}$ (KN)	1452	
$\Delta F_{fk,B}$ (KN)	146,1900268	
$\tau_{bFk}$ (Mpa)	0,360441908	
$\Delta F_{fk,F}$ (KN)	5,709913682	
$\Delta F_{fk,C}$ (KN)	0,247663992	
$\Delta F_{fRd}$ (KN)	101,4317363	detailed
$\Delta F_{fRd}$ (KN)	402,4151448	simplified
$F_{fEd}(x)$ (KN)	206,8862592	
$M_{Ed}(x+sr)$ (KNm)	171,7283526	
$M_{E,0}(x+sr)$ (KNm)	95	
$\sigma_{s,0}(x+sr)$ (Mpa)	263,5245245	
$\sigma_s(x+sr)$ (Mpa)	428,4464396	
$F_{fEd}(x+sr)$ (KN)	220,0907015	
$\Delta F_{fEd}$ (KN)	13,20444231	
$\Delta F_{fEd} \leq \Delta F_{fRd}$	check	

Σχήμα 4.12: Αποτελέσματα διαδικασίας ελέγχου μεθόδου.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

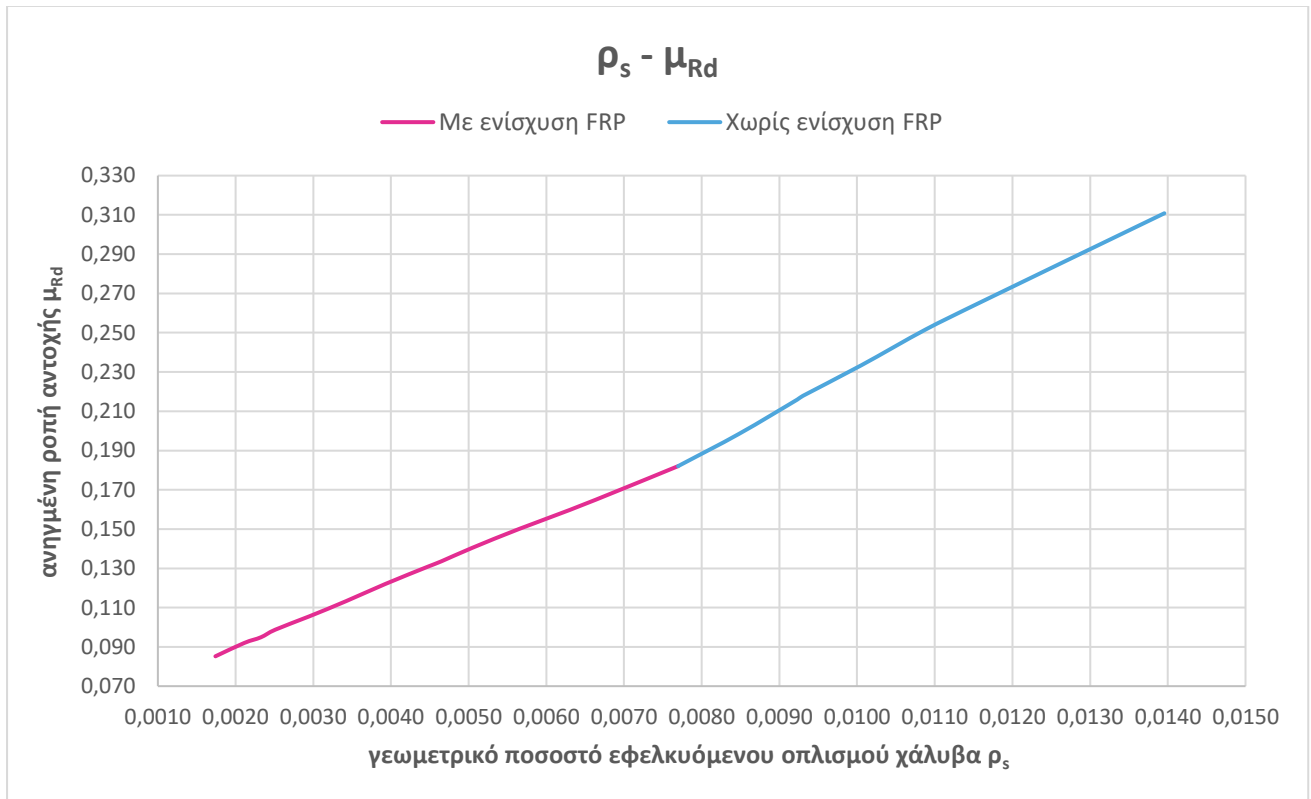
### 5. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ – ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν, μέσω διαγραμμάτων, αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων, με σκοπό να δειχθεί η ποιοτική σχέση αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραμέτρων αυτών και της ροπής αντοχής της δοκού ενισχυμένης με FRP's. Οι παράμετροι είναι το πλήθος και η διάμετρος ράβδων εφελκυσμένου οπλισμού χάλυβα καθώς και το πάχος του σύνθετου υλικού. Προκειμένου τα μεγέθη στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων να είναι αδιάστατα, οι παράμετροι έχουν επιλεγεί να είναι το γεωμετρικό ποσοστό εφελκυσμένου οπλισμού χάλυβα και ενίσχυσης του FRP, καθώς επίσης και η ροπή αντοχής να βρίσκεται στην ανηγμένη μορφή της.

Για τις αναλύσεις αυτές, η διαδικασία των υπολογισμών που ακολουθήθηκε στον κώδικα, είναι ίδια με αυτή που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, με την μόνη διαφορά ότι υπολογίζεται η ροπή αντοχής χωρίς να υπάρχει η εξωτερική λούπα που αυξάνει τον αριθμό στρώσεων του FRP σύμφωνα με την ανίσωση  $M_{Rd} \geq M_{Ed}$  (οριακή κατάσταση αντοχής), έτσι ώστε ο αριθμός των στρώσεων  $n$  του FRP να διατηρείται σταθερός και ίσος με 4. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα ίδια με αυτά του αριθμητικού παραδείγματος του Κεφαλαίου 4, για ορθογωνική διατομή.

Ο κώδικας που αναπτύχθηκε προκειμένου να εξαχθούν οι τιμές των ροπών  $M_{Rd}$ , ώστε να δημιουργηθούν αυτά τα διαγράμματα, παρατίθεται στο Παράρτημα Β.

## 5.1 Σχέση $\rho_s - \mu_{Rd}$



**Σχήμα 5.1:** Διάγραμμα ποιοτικής απεικόνισης της σχέσης  $\rho_s - \mu_{Rd}$ .

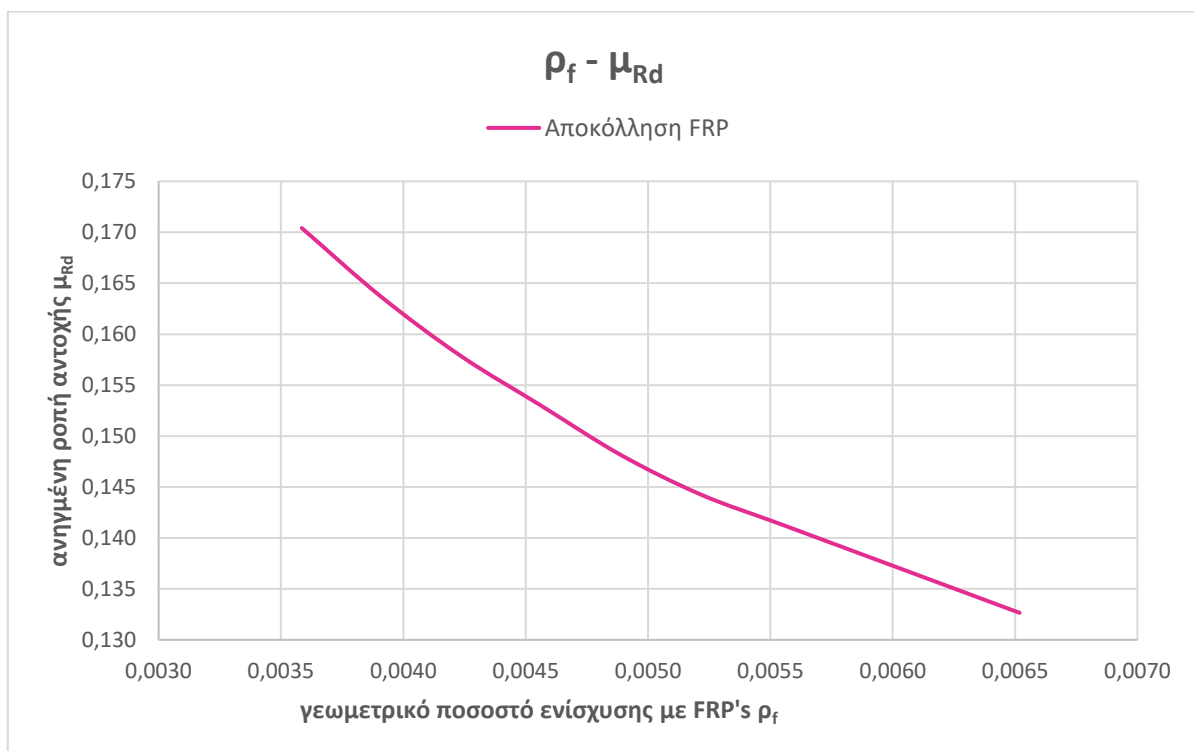
Στο παραπάνω Σχήμα 5.1, διαφαίνεται η ποιοτική απεικόνιση της σχέσης μεταξύ του γεωμετρικού ποσοστού εφελκόμενου οπλισμού χάλυβα  $\rho_s$  και της ανηγμένης ροπής αντοχής  $\mu_{Rd}$ . Για τον υπολογισμό αυτών των αδιάστατων μεγεθών, χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω Εξ. (5.1) και Εξ. (5.2).

$$\rho_s = A_{s1} * \frac{b}{d} \quad (5.1)$$

$$\mu_{Rd} = \frac{M_{Rd}}{b * d^2 * f_{cd}} \quad (5.2)$$

Όπως διαφαίνεται από το παραπάνω ποιοτικό διάγραμμα, με την αύξηση του γεωμετρικού ποσοστού εφελκόμενου οπλισμού του χάλυβα  $\rho_s$ , η ανηγμένη ροπή αντοχής  $\mu_{Rd}$  αυξάνεται επίσης. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς η ροπή αντοχής  $M_{Rd}$  εξαρτάται αναλογικά από το εμβαδόν του εφελκόμενου οπλισμού  $A_{s1}$ , όπως φαίνεται και στην Εξ. (3.5). Η αλληλεπίδραση αυτή, ουσιαστικά, δείχνει την σημαντική συνεισφορά του

εφελκυσμένου οπλισμού σε μια αμφιέριστη δοκό που κινδυνεύει από καμπτική αστοχία στο μέσον της, αφού ο χάλυβας παραλαμβάνει τις εφελκυστικές τάσεις, ενώ το σκυρόδεμα τις θλιπτικές. Επομένως, προκύπτει το συμπέρασμα πως η τοποθέτηση περισσότερου εφελκυσμένου οπλισμού (μέχρι του επιτρεπόμενου ορίου, βάσει του Ευρωκώδικα 2 ή 8) συμβάλλει στην ύπαρξη χαμηλότερου κόστους της κατασκευής, καθώς δεν απαιτείται χρήση μεγάλου ποσοστού ενίσχυσης με FRP's στις δοκούς, ή ακόμα και καθόλου χρήση ενίσχυσης με FRP's, όπως διακρίνεται και στο διάγραμμα από ένα σημείο ( $\rho_s = 0,0077$   $\mu_{Rd} = 0,182$ ) και μετά.

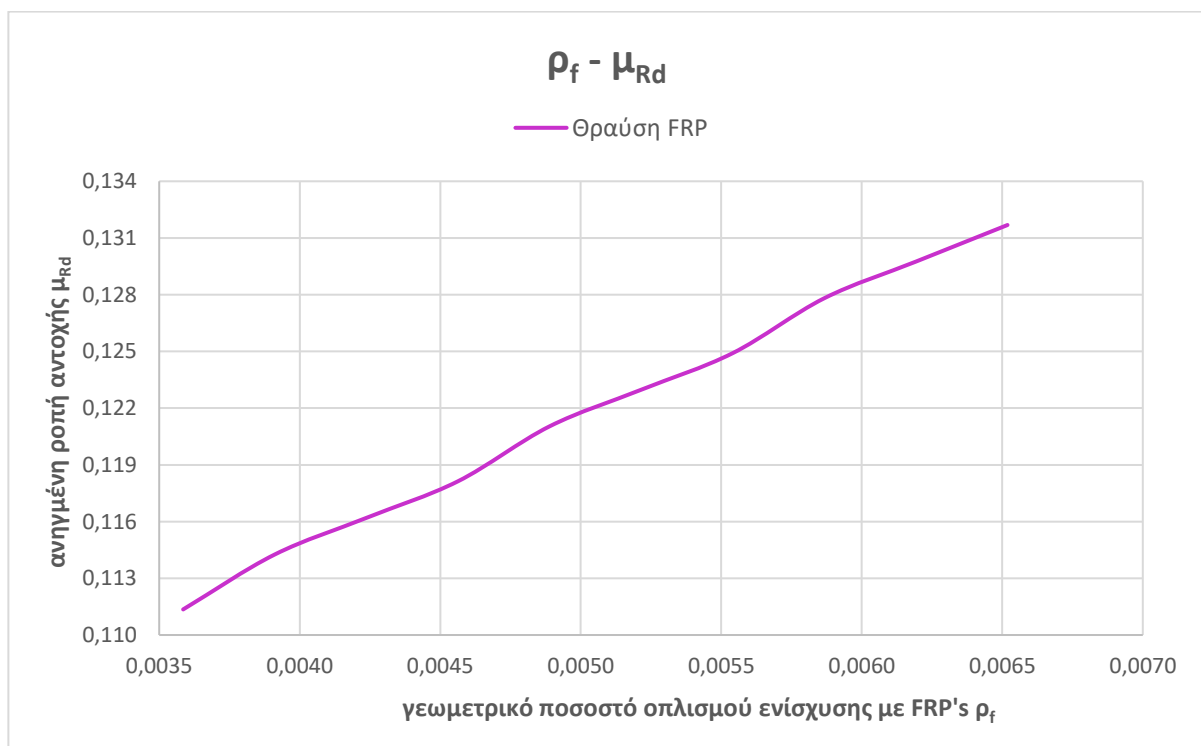


**Σχήμα 5.2:** Διάγραμμα ποιτικής απεικόνισης της σχέσης  $\rho_f - \mu_{Rd}$  για αποκόλληση FRP.

Στο παραπάνω Σχήμα 5.2, διαφαίνεται η ποιοτική απεικόνιση της σχέσης μεταξύ του γεωμετρικού ποσοστού οπλισμού ενίσχυσης με FRP's  $\rho_f$  και της ανηγμένης ροπής αντοχής  $\mu_{Rd}$ , σε ότι αφορά την μηχανισμό αστοχίας αποκόλλησης του σύνθετου υλικού. Για τον υπολογισμό αυτών των αδιάστατων μεγεθών, χρησιμοποιήθηκε η Εξ. (5.2) και η παρακάτω Εξ. (5.2), σύμφωνα με τον ΕΚΟΣ 2000 (Ευρωπαϊκός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος).

$$\rho_f = A_f * \frac{b}{d} \quad (5.3)$$

Όπως διαφαίνεται από το παραπάνω ποιοτικό διάγραμμα, για σταθερό αριθμό στρώσεων, με την αύξηση του γεωμετρικού ποσοστού οπλισμού ενίσχυσης με FRP's  $\rho_f$ , η ανηγμένη ροπή αντοχής  $\mu_{Rd}$  μειώνεται. Το γεγονός αυτό, οφείλεται στην μέγιστη τάση αποκόλλησης του FRP  $\sigma_{fd}$ , η οποία εξαρτάται από το πάχος του FRP  $t_f$  με αντιστρόφως ανάλογο τρόπο (Εξ. 3.1), και μειώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό από αυτόν της αύξησης του εμβαδού FRP  $A_f$ . Πρακτικά, το διάγραμμα αυτό συμβολίζει την ανάγκη χρήσης σύνθετου υλικού, όσο το δυνατόν, μικρού πάχους, καθώς με την ύπαρξη μεγάλου πάχους, η κάτω εφελκυσμένη ίνα του σύνθετου υλικού θα αποκτήσει γρηγορότερα την μέγιστη παραμόρφωση αποκόλλησης που διαθέτει, και επομένως αυτή η ίνα θα συμπαράσχει και τις υπόλοιπες στρώσεις, έτσι ώστε να επέλθει η αποκόλληση του.



**Σχήμα 5.3:** Διάγραμμα ποιοτικής απεικόνισης της σχέσης  $\rho_f - \mu_{Rd}$  για θραύση FRP.

Στο παραπάνω Σχήμα 5.3, διαφαίνεται η ποιοτική απεικόνιση της σχέσης μεταξύ του γεωμετρικού ποσοστού ενίσχυσης με FRP's  $\rho_f$  και της ανηγμένης ροπής αντοχής  $\mu_{Rd}$ , σε ότι αφορά την μηχανισμό αστοχίας θραύσης του σύνθετου υλικού. Ομοίως με τα

παραπάνω διαγράμματα, για την διαδικασία των υπολογισμών χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω Εξ. (5.1) και Εξ. (5.2).

Όπως παρατηρείται από το παραπάνω ποιοτικό διάγραμμα, για σταθερό αριθμό στρώσεων, με την αύξηση του γεωμετρικού ποσοστού οπλισμού ενίσχυσης με FRP's  $\rho_f$ , συνεπάγεται και η αύξηση της ανηγμένη ροπή αντοχής  $m_{Rd}$ . Γεγονός αναμενόμενο, καθώς όπως διακρίνεται στην Εξ.(3.1), η ροπή αντοχής  $M_{Rd}$  εξαρτάται με ανάλογο τρόπο από το εμβαδόν του FRP  $A_f$ , με την μέγιστη τάση θραύσης του FRP  $\sigma_{fd}$  να παραμένει σταθερή. Όμως, στα σύνθετα υλικά, η μέγιστη τάση θραύσης τους σπανίως είναι μικρότερη της μέγιστης τάσης αποκόλλησής τους, οπότε εμφανίζεται και συχνότερα ως αστοχία του σύνθετου υλικού η αποκόλληση του, στις δοκούς υπό κάμψη. Επομένως, σε ρεαλιστικό επίπεδο, συμπεραίνεται, ότι δεν μπορεί να τοποθετηθεί ενίσχυση σύνθετων υλικών μεγάλου πάχους, καθώς θα υπάρχει κίνδυνος αποκόλλησης του από την δοκό.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### 6. ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία, δημιουργήθηκε, μέσω ανάπτυξης κώδικα με γλώσσα προγραμματισμού την Visual Basic for Applications, λογισμικό εύρεσης της ποσότητας ενίσχυσης μιας αμφιέριστης οπλισμένης δοκού, με σύνθετα υλικά (FRP's), σε περιβάλλον για τον χρήστη, ένα υπολογιστικό φύλλο του Excel. Αξίζει να σημειωθεί, πως η δημιουργία ενός τέτοιου λογισμικού αποδεικνύεται αρκετά χρήσιμη, καθώς ο χρήστης, με ευκολία και μεγάλη ταχύτητα, λαμβάνει αποτελέσματα αναλύσεων που τον αφορούν, χωρίς τον κόπο των υπολογισμών που απαιτούνται, σε ένα περιβάλλον γνώριμο και εύχρηστο, για αυτόν.

Αναφορικά με την αποτελεσματικότητα του λογισμικού που αναπτύχθηκε, αυτή είναι αρκετά σημαντική, καθώς το αποτέλεσμα της ποσότητας ενίσχυσης που εξάγεται, συνοδεύει και διαδικασία ελέγχου της μεθόδου, επαληθεύοντας ότι η διαφορά δρυσών εφελκυστικών δυνάμεων του FRP είναι μικρότερη ή ίση της διαφοράς δυνάμεων αντίστασης του FRP (οριακή κατάσταση αστοχίας), μεταξύ δύο διαδοχικών καμπτικών ρωγμών της δοκού με καθορισμένη απόσταση. Επομένως ο χρήστης έχοντας εξασφαλίσει την ορθή ποσότητα σύνθετου υλικού, μπορεί να προχωρήσει σε ενίσχυση της δοκού έναντι κάμψης.

Στην συνέχεια, έγιναν μερικές παραμετρικές αναλύσεις, που παρουσιάστηκαν μέσω ποιοτικών διαγραμμάτων, που αφορούν την σχέση του οπλισμού χάλυβα και του οπλισμού ενίσχυσης με FRP με την ροπή αντοχής σε κάμψη που αναπτύσσεται από τις οποίες εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η ύπαρξη μεγάλου ποσοστού εφελκυσμένου οπλισμού ενίσχυσης της δοκού (μέχρι το επιτρεπόμενο όριο από τους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς), συμβάλλει στην μη απαίτηση μεγάλου ποσοστού ενίσχυσης με σύνθετα υλικά (FRP's), εξαιτίας της μεγάλης εφελκυστικής αντοχής που προσφέρουν στην δοκό. Επομένως, το γενικότερο κόστος της κατασκευής μειώνεται σημαντικά. Η συνεισφορά του άνω θλιβόμενου οπλισμού, στην αντοχή της δοκού έναντι κάμψης, είναι αρκετά μικρότερη.

- Η τάση θραύσης των ινοπλισμένων πολυμερών είναι συνήθως μεγαλύτερη της τάσης αποκόλλησης τους. Επομένως η συνηθέστερη αστοχία στα σύνθετα υλικά, κατά την καμπτική ενίσχυση μιας δοκού, αποτελεί η αποκόλληση τους. Από το γεγονός αυτό, συνεπάγεται πως σε ρεαλιστικό βαθμό, δεν είναι δυνατόν να γίνει χρήση μεγάλου πάχους σύνθετου υλικού για την ενίσχυση της δοκού σε κάμψη. Από ένα σημείο και μετά, με την αύξηση του πάχους του ινοπλισμένου πολυμερούς, υπάρχει κίνδυνος αποκόλλησης του από την δοκό, καθώς η κάτω εφελκυσόμενη ίνα του θα αποκτήσει γρηγορότερα την μέγιστη παραμόρφωση αποκόλλησης που διαθέτει, η οποία θα συμπαρασύρει και τις υπόλοιπες στρώσεις στην αποκόλλησή τους. Οπότε, η καλύτερη δυνατή λύση, είναι να χρησιμοποιηθεί το μέγιστο δυνατό ποσοστό FRP, το οποίο θα ενισχύσει την δοκό σε κάμψη, δίχως να αποκολληθεί, το οποίο καθορίζεται περίπου στις 4 – 5 στρώσεις, σύμφωνα με σχετική βιβλιογραφία και πειράματα.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Τριανταφύλλου Α. (2004). Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά (Ινοπλισμένα Πολυμερή), 2<sup>η</sup> έκδοση Πάτρα. Εκδόσεις Πανεπιστήμιο Πατρών.
2. Δρίτσος Σ.Η. (2005). Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα, 3<sup>η</sup> έκδοση, Πάτρα. Εκδόσεις Πανεπιστήμιο Πατρών.
3. Federation International du beton - fib (2019). Externally Applied FRP Reinforcement for Concrete Structures, Technical Report, Bulletin 90. Εκδόσεις DCC Document Competence Center Kastle e.K., Germany.
4. Federation, Commissions of fib (2023). fib-international, <https://www.fib-international.org>
5. Δερουκάκη Μ. (2020). Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα: Μηχανική Συμπεριφορά σε Εφελκυσμό με το Σκυρόδεμα, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.
6. Χιώτης Δ.Μ. (2012). Ενίσχυση Δομικών Μελών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα και Φέρουσα Τοιχοποιία με Ινοπλισμένα Πολυμερή, Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα.
7. Dongguan Juli Composite Technology Co., Ltd (2021). [gr.julicarbonfiber.org](http://gr.julicarbonfiber.org)
8. alibaba.com (2021). <https://www.alibaba.com>
9. indiamart.com (2021). <https://www.indiamart.com>
10. Feldman, D. (1989). Polymeric Building Materials, Elsevier Science Publishers Ltd., UK.
11. Kim, D.-H. (1995). Composite Structures for Civil and Architectural Engineering, E & FN Spon, London.
12. Γεωργακόπουλος Α. (2017). Ενίσχυση Δομικών Κατασκευών με FRP's, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, Πάτρα.
13. Φλασκή Ε. (2004). Ενίσχυση δοκών με Ινοπλισμένα Πολυμερή, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.
14. Quattlebaum, J.B. (2003). Comparison of three CFRP Flexural Retrofit Systems under Monotonic and Fatigue Loads, M.S. Thesis, University of South Carolina.



15. Fanning, P.J., and Kelly, O. (2001). Ultimate Response of RC Beams Strengthened with CFRP Plates. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 5, No. 2, pp 122-127.
16. EN 1992-1-1. (2004). Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1: General Rules and Rules for Buildings. Brussels: Comite Europeen de Normalisation
17. EN 1998-1. (2004). Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. Brussels: Comite Europeen de Normalisation.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

### A. Κώδικας λογισμικού σε Visual Basic for Applications

```
Dim b, h, d1, d2, dk, da, nk, na, beff, hf, bw, fyk, Es, gs, acc, fck, gc, bpr, fcm, MEd, bf, tf, Ef, ffd, eo As Double
```

```
Dim diatomi As String
```

```
Sub eparkeia_diatomis()
```

```
l = Range("L3").Value
```

```
q = Range("L4").Value
```

```
b = Range("B3").Value
```

```
h = Range("B4").Value
```

```
d1 = Range("B5").Value
```

```
d2 = Range("B6").Value
```

```
dk = Range("B7").Value
```

```
da = Range("B8").Value
```

```
nk = Range("B9").Value
```

```
na = Range("B10").Value
```

```
beff = Range("B11").Value
```

```
hf = Range("B12").Value
```

```
bw = Range("B13").Value
```

```
fyk = Range("B16").Value
```

```
Es = Range("B17").Value
```

gs = Range("B18").Value  
acc = Range("B21").Value  
fck = Range("B22").Value  
gc = Range("B23").Value  
bpr = Range("B24").Value  
bf = Range("B30").Value  
tf = Range("B31").Value  
Ef = Range("B32").Value  
ffd = Range("B33").Value  
eo = Range("B34").Value  
diatomi = Range("L2").Value

Range("B25").Value = ""

Range("B28").Value = ""

Range("F3").Value = ""

Range("F4").Value = ""

Range("F5").Value = ""

Range("F6").Value = ""

Range("F7").Value = ""

Range("I3").Value = ""

Range("I6").Value = ""

Range("I7").Value = ""

Range("I8").Value = ""

Range("F9").Value = ""

Range("F13").Value = ""

Range("F14").Value = ""

Range("F15").Value = ""

Range("F16").Value = ""

Range("F17").Value = ""

Range("F18").Value = ""

Range("F19").Value = ""

Range("F20").Value = ""

tolerance = 0.5

eCu3 = 35 / 10000

d = h - d1

Pi = 3.14159265358979

x = 0

Do

x = x + 0.1

If diatomi = "rectangular" Then

Ac = 0.8 \* x \* b

End If

If diatomi = "plakodokos" Then

If  $(0.8 * x) < hf$  Then

$$Ac = 0.8 * x * beff$$

Else

$$Ac = hf * beff + bw * (0.8 * x - hf)$$

End If

End If

$$Fc = -(acc * Ac * fck / gc) / 1000$$

$$As1 = Pi * (dk * dk) / 4 * nk$$

$$es1 = eCu3 * (d - x) / x$$

$$fyd = fyk / gs$$

$$FS1 = (es1 * Es * 1000 * As1) / 1000$$

If  $FS1 < (fyd * As1) / 1000$  Then

$$FS1 = (es1 * Es * 1000 * As1) / 1000$$

Elseif  $(es1 < 0)$  Then

$$FS1 = (-fyd * As1) / 1000$$

Else

$$FS1 = (fyd * As1) / 1000$$

End If

$$As2 = Pi * (da * da) / 4 * na$$

$$es2 = eCu3 * (d2 - x) / x$$

$$FS2 = (es2 * Es * 1000 * As2) / 1000$$

If FS2 < 0 And FS2 < (-fyd \* As2) / 1000 Then

$$FS2 = (-fyd * As2) / 1000$$

End If

If FS2 > 0 And FS2 > (fyd \* As2) / 1000 Then

$$FS2 = (fyd * As2) / 1000$$

End If

$$SFy = Fc + FS2 + FS1$$

Loop Until Abs(SFy) < tolerance

$$MRd = (Abs(Fc) * (d - 0.4 * x) - FS2 * (d - d2)) / 1000$$

$$MEd = (q * l / 2 * l / 2) - (q * (l / 2) ^ (2)) / 2$$

If MRd >= MEd Then

MsgBox "Den απαιτείται εφάρμογη ενίσχυση στην διατομή."

Range("I3").Value = Round(MRd)

End If

If MRd < MEd Then

```
MsgBox "Απαιτείται εfarmogh enisxysis. Η roph pou ypoleipetai einai M = " &  
Round(MEd) - Round(MRd)
```

```
kcr = 1.8
```

```
kk = 0.17
```

```
kb = Math.Sqrt((2 - bf / bpr) / (1 + bf / bpr))
```

```
fcm = fck + 8
```

```
gfb = 1.5
```

```
a = (kcr * kk * kb * Math.Sqrt(2 * Ef * (fcm * fcm) ^ (1 / 3)) / tf) / gfb
```

```
If a < ffd Then
```

```
sfd = a
```

```
End If
```

```
If a > ffd Then
```

```
sfd = ffd
```

```
End If
```

```
n = 1
```

```
eef = sfd / Ef
```

```
Do Until MRd >= MEd
```

```
n = n + 1
```

x = 0

Do

x = x + 0.1

If ecTop < eCu3 Then

ecTop = (eef + eo) \* x / (h - x)

If ecTop <= 0.002 Then

y = 1000 \* ecTop \* (0.5 - 1000 \* ecTop / 12)

Else

y = 1 - 2 / (3000 \* ecTop)

End If

If diatomi = "rectangular" Then

Ac = y \* x \* b

End If

If diatomi = "plakodokos" Then

If y \* x < hf Then

Ac = y \* x \* beff

Else

Ac = hf \* beff + bw \* (y \* x - hf)

End If

End If



$$F_c = -(acc * f_{ck} * A_c / g_c) / 1000 \text{ 'kN}$$

$$f_{yd} = f_{yk} / g_s$$

$$A_{s1} = \pi * n_k * (d_k * d_k) / 4$$

$$e_{s1} = (d - x) * (e_o + e_{ef}) / (h - x)$$

$$F_{S1} = (e_{s1} * E_s * 1000 * A_{s1}) / 1000$$

If  $F_{S1} < 0$  And  $F_{S1} < (-f_{yd} * A_{s1}) / 1000$  Then

$$F_{S1} = (-f_{yd} * A_{s1}) / 1000$$

End If

If  $F_{S1} > 0$  And  $F_{S1} > (f_{yd} * A_{s1}) / 1000$  Then

$$F_{S1} = (f_{yd} * A_{s1}) / 1000$$

End If

$$A_{s2} = \pi * (d_a * d_a) / 4 * n_a$$

$$e_{s2} = (e_{ef} + e_o) * (d_2 - x) / (h - x)$$

$$F_{S2} = (e_{s2} * E_s * 1000 * A_{s2}) / 1000$$

If  $F_{S2} < 0$  And  $F_{S2} < (-f_{yd} * A_{s2}) / 1000$  Then

$$F_{S2} = (-f_{yd} * A_{s2}) / 1000$$

End If

If  $F_{S2} > 0$  And  $F_{S2} > (f_{yd} * A_{s2}) / 1000$  Then

$$F_{S2} = (f_{yd} * A_{s2}) / 1000$$

End If

$$A_{frp} = b_f * t_f * n$$

$$F_{frp} = (A_{frp} * E_f * e_{ef}) / 1000$$

If  $ec_{Top} \leq 0.002$  Then

$$dGx = (8 - 1000 * ec_{Top}) / (4 * (6 - 1000 * ec_{Top}))$$

Else

$$dGx = (1000 * ec_{Top} * (3000 * ec_{Top} - 4) + 2) / (2000 * ec_{Top} * (3000 * ec_{Top} -$$

2))

End If

$$MRd = (FS1 * 1000 * (d - dGx * x) + Afrp * sfd * (h - dGx * x) + FS2 * 1000 * (dGx * x - d2)) / 1000000$$

Else

$$ec_{Top} = e_{Cu3}$$

$$y = 0.8$$

$$dGx = 0.4$$

If  $diatomi = "rectangular"$  Then

$$Ac = 0.8 * x * b$$

End If

If  $diatomi = "plakodokos"$  Then

If  $0.8 * x < hf$  Then

$$Ac = 0.8 * x * beff$$

Else

$$Ac = hf * beff + bw * (0.8 * x - hf)$$

End If

End If

$$F_c = -(acc * f_{ck} * A_c / g_c) / 1000$$

$$A_{s1} = \pi * (d_k * d_k) / 4 * n_k$$

$$e_{s1} = e_{Cu3} * (d - x) / x$$

$$F_{S1} = (e_{s1} * E_s * 1000 * A_{s1}) / 1000$$

$$f_{yd} = f_{yk} / g_s$$

If  $F_{S1} \geq f_{yd} * A_{s1}$  Then

  If  $e_{s1} < 0$  Then

$$F_{S1} = (-f_{yd} * A_{s1}) / 1000$$

  Else

$$F_{S1} = (f_{yd} * A_{s1}) / 1000$$

  End If

End If

$$A_{s2} = \pi * (d_a * d_a) / 4 * n_a$$

$$e_{s2} = e_{Cu3} * (d_2 - x) / x$$

$$F_{S2} = (e_{s2} * E_s * 1000 * A_{s2}) / 1000$$

If  $F_{S2} < 0$  And  $F_{S2} < (-f_{yd} * A_{s2}) / 1000$  Then

$$F_{S2} = (-f_{yd} * A_{s2}) / 1000$$

End If

If  $F_{S2} > 0$  And  $F_{S2} > (f_{yd} * A_{s2}) / 1000$  Then

$$F_{S2} = (f_{yd} * A_{s2}) / 1000$$

End If

$$A_{frp} = b_f * t_f * n$$

$$e_{ef} = (e_{cTop} * (h - x) / x) - e_o$$

$$F_{frp} = A_{frp} * E_f * e_{ef}$$

$$MR_d = (FS_1 * 1000 * (d - 0.4 * x) + A_{frp} * s_{fd} * (h - 0.4 * x) + FS_2 * 1000 * (0.4 * x - d_2)) / 1000000$$

End If

$$SF_y = F_c + F_{frp} + FS_2 + FS_1$$

Loop Until Abs(SF<sub>y</sub>) < tolerance

Loop

$$\text{Range}("I6").\text{Value} = \text{Round}(MR_d)$$

$$\text{Range}("I7").\text{Value} = A_{frp}$$

$$\text{Range}("I8").\text{Value} = n$$

$$\text{Range}("F7").\text{Value} = F_{frp}$$

End If

Range("B25").Value = fcm

Range("B28").Value = Round(MEd)

Range("F3").Value = x

Range("F4").Value = Fc

Range("F5").Value = FS1

Range("F6").Value = FS2

Range("F9").Value = SFy

Range("F13").Value = es1

Range("F14").Value = es2

Range("F15").Value = ecTop

Range("F16").Value = eef

Range("F17").Value = sfd

Range("F18").Value = As1

Range("F19").Value = As2

Range("F20").Value = tolerance

End Sub

Dim b, h, d1, d2, dk, da, nk, na, beff, hf, bw, fyk, l, q, Es, gs, acc, fck, gc, As1, Afrp, ecTop, eef, Ef, tf, bf, ffd, fcm, fctm, MEdx, kvb1, kvb2, s0k, ME0x As Double

Dim diatomi, ravdoi As String

Sub elegxos\_anisosis()

l = Range("L3").Value

q = Range("L4").Value

b = Range("B3").Value

h = Range("B4").Value

d1 = Range("B5").Value

d2 = Range("B6").Value

dk = Range("B7").Value

da = Range("B8").Value

nk = Range("B9").Value

na = Range("B10").Value

beff = Range("B11").Value

hf = Range("B12").Value

bw = Range("B13").Value

fyk = Range("B16").Value

Es = Range("B17").Value

gs = Range("B18").Value

acc = Range("B21").Value

fck = Range("B22").Value

fcm = Range("B25").Value

gc = Range("B23").Value

bf = Range("B30").Value

tf = Range("B31").Value

Ef = Range("B32").Value

ffd = Range("B33").Value

ecTop = Range("F15").Value

eef = Range("F16").Value

As1 = Range("F18").Value

Afrp = Range("I7").Value

n = Range("I8").Value

kvb1 = Range("Q6").Value

kvb2 = Range("Q7").Value

ME0x = Range("Q22").Value

ME0xsr = Range("Q35").Value

MEdxsr = Range("Q34").Value

diatomi = Range("D3").Value

ravdoi = Range("Q8").Value

FRP = Range("R14").Value

Range("B26").Value = ""

Range("R8").Value = ""

Range("Q9").Value = ""

Range("Q10").Value = ""

Range("Q11").Value = ""

Range("Q12").Value = ""

Range("Q14").Value = ""

Range("Q15").Value = ""

Range("Q16").Value = ""

Range("Q17").Value = ""

Range("Q18").Value = ""

Range("Q19").Value = ""

Range("Q20").Value = ""

Range("Q21").Value = ""

Range("Q23").Value = ""

Range("Q24").Value = ""

Range("Q25").Value = ""

Range("Q26").Value = ""

Range("Q27").Value = ""

Range("Q28").Value = ""

Range("Q29").Value = ""

Range("Q30").Value = ""

Range("Q31").Value = ""

Range("Q32").Value = ""

Range("Q33").Value = ""

Range("Q34").Value = ""

Range("Q36").Value = ""

Range("Q37").Value = ""



Range("Q38").Value = ""

Range("Q39").Value = ""

Range("Q40").Value = ""

Pi = 3.14159265358979

If ravdoi = "ribbed bars" Then

Fbsm = 0.43 \* kvb1 \* fcm ^ (2 / 3) 'MPa

End If

If ravdoi = "smooth bars" Then

Fbsm = 0.28 \* kvb2 \* Math.Sqrt(fcm) 'MPa

End If

Range("R8").Value = Fbsm

FFbsm = nk \* Pi \* nk \* dk \* Fbsm 'KN/m

Range("Q9").Value = FFbsm

If diatomi = "rectangular" Then

Wxx = (b \* h ^ (2)) / 6 'mm^3

End If

If diatomi = "plakodokos" Then

$$y_c = (((h - hf) + hf / 2) * h * beff + (h - hf) * bw) / ((beff * hf) + ((h - hf) * bw))$$

$$HH = h - hf$$

$$I_{xx} = (bw * HH * (y_c - HH / 2) ^ 2) + ((bw * HH ^ (3)) / 12) + (hf * beff * (HH + hf / 2 - y_c) ^ 2) + ((beff * hf ^ (3)) / 12)$$

$$W_{xx} = I_{xx} / y_c \text{ 'mm}^3$$

End If

$$f_{ctm} = 0.3 * (f_{ck} * f_{ck}) ^ (1 / 3)$$

$$k_{fl} = 1.6 - (h / 1000)$$

$$M_{cr} = (k_{fl} * f_{ctm} * W_{xx}) / 1000000 \text{ 'KNm}$$

$$l_{e0} = (M_{cr} / ((0.85 * h) * FF_{bsm})) * 1000 \text{ 'm}$$

$$s_r = 1.5 * l_{e0} \text{ 'm}$$

If FRP = "strips" Then

$$t_{b1k} = 0.37 * \text{Math.Sqrt}(f_{cm} * f_{ctm}) \text{ 'MPa}$$

$$s_{0k} = 0.2$$

End If

If FRP = "sheets" Then

$$t_{b1k} = 0.44 * \text{Math.Sqrt}(f_{cm} * f_{ctm}) \text{ 'MPa}$$

$$s_{0k} = 0.23$$

End If

```
tbFk = 10.8 * acc * fcm ^ -0.89 'Mpa
```

```
Range("B26").Value = fctm
```

```
Range("Q10").Value = Mcr
```

```
Range("Q11").Value = le0
```

```
Range("Q12").Value = sr
```

```
Range("Q14").Value = tb1k
```

```
Range("Q15").Value = s0k
```

```
Range("Q28").Value = tbFk
```

```
le = (Pi / 2) * Math.Sqrt(Ef * tf * n * s0k / tb1k) / 1000
```

```
Range("Q16").Value = le
```

```
If sr < le Then
```

```
ffbksr = Math.Sqrt(Ef * s0k * tb1k / (tf * n)) * (sr / le) * (2 - (sr / le)) 'MPa
```

```
End If
```

```
If sr >= le Then
```

```
ffbksr = Math.Sqrt(Ef * s0k * tb1k / (tf * n)) 'MPa
```

```
End If
```

Range("Q17").Value = ffbksr

$$FfkBD = (((s0k * Ef * bf * tf * n / sr)) / 1000000) - (tb1k * sr * bf / 4) 'ÊÍ$$

$$DFfkBD = \text{Math.Sqr}((bf / 1000) ^ (2) * tb1k * 1000 * (s0k / 1000) * Ef * 1000 * (tf * n / 1000) + FfkBD ^ (2)) - FfkBD 'ÊÍ$$

$$DFfkBG = ffbksr * bf * tf * n / 1000 'ÊÍ$$

$$FFfd = ffd * Afrp / 1000 'ÊÍ$$

$$FfEd = eef * Ef * Afrp / 1000 'ÊÍ$$

Range("Q18").Value = FfkBD

Range("Q19").Value = DFfkBD

Range("Q20").Value = DFfkBG

Range("Q25").Value = FfEd

Range("Q26").Value = FFfd

If FfEd <= FfkBD Then

$$DFfkB = DFfkBG - ((DFfkBG - DFfkBD) / FfkBD) * FfEd 'ÊÍ$$

End If

If FfkBD < FfEd <= FFfd Then

$$DFfkB = \text{Math.Sqr}(((bf / 1000) ^ (2)) * tb1k * 1000 * (s0k / 1000) * Ef * 1000 * (tf * n / 1000) + FfEd ^ (2) - FfEd) 'KN$$

End If

Range("Q27").Value = DFfkB

If FfEd <= FfkBD Then

DFfkF = 0

End If

If FfkBD < FfEd <= FFfd Then

a = FfEd / (bf / 1000) \* tf \* n \* Ef

b = a ^ 2

c = tb1k \* s0k / Ef \* tf \* n

d = b + c

e = Math.Sqrt(d)

f = e - a

g = (2 \* tf \* n \* Ef) / (tb1k \* 1000)

k = f \* g

p = sr - k

DFfkF = tbFk \* bf \* p 'KN

End If

Range("Q29").Value = DFfkF

kk = 24.3 \* 10 \* 10 \* 10

DFfkC = sr \* kk \* bf \* (eef - ecTop) / h 'KN

gfb = 1.5

DFfRdd = (DFfkB + DFfkF + DFfkC) / gfb 'KN

Range("Q30").Value = DFfkC

Range("Q31").Value = DFfRdd

gfb = 1.5

kh = 2000

DFfRds = (2.3 \* tb1k \* Math.Sqrt(sr) + 0.1 \* tbFk \* sr ^ (4 / 3) + (kh / h) \* (sr ^ (1 / 3))) \* bf  
/ gfb 'KN

Range("Q32").Value = DFfRds

fyd = fyk / gs

ds = h - d1

s0x = (ME0x / (0.85 \* ds \* As1)) \* 1000000

If s0x > fyd Then

s0x = fyd

End If

MEdx = (q \* l / 2 \* l / 2) - (q \* (l / 2) ^ (2)) / 2

DMEdx = MEdx - ME0x

df = 0.9 \* ds

$$zm = 0.8 * ((df / 1000) * (Ef * 1000) * (Afrp / 1000000) + (ds / 1000) * (Es * 1000000) * (As1 / 1000000)) / ((Ef * 1000) * (Afrp / 1000000) + (Es * 1000000) * (As1 / 1000000))$$

$$aa = ds * Es * 1000$$

$$bb = df * Ef * Afrp / 1000$$

$$cc = ds * Es * 1000 * As1 / 1000$$

$$sx = s0x + ((DMEdx / zm) * (aa / (bb + cc)))$$

If  $sx > fyd$  Then

$$sx = fyd$$

End If

$$\text{Range("Q21").Value} = zm$$

$$\text{Range("Q23").Value} = s0x$$

$$\text{Range("Q24").Value} = sx$$

If  $sx < fyd$  Then

$$FfEdx = (DMEdx / zm) * df * Ef * Afrp / (df * Ef * Afrp + (ds / 1000) * Es * As1)$$

End If

If  $sx = fyd$  Then

$$FfEdx = (MEdx / zm) - (As1 / 1000) * fyd$$

End If

```
Range("Q33").Value = FfEdx
```

```
k = l / 2
```

```
xsr = k + sr
```

```
MEdxsr = (q * l * xsr / 2) - (q * xsr ^ (2)) / 2
```

```
s0xsr = ME0xsr / (0.85 * ds * As1) * 1000000
```

```
If s0xsr > fyd Then
```

```
  s0xsr = fyd
```

```
End If
```

```
DMEdxsr = MEdxsr - ME0xsr
```

```
sxsr = s0xsr + ((DMEdxsr / zm) * (aa / (bb + cc)))
```

```
If sxsr > fyd Then
```

```
  sxsr = fyd
```

```
End If
```

```
Range("Q34").Value = MEdxsr
```

```
Range("Q36").Value = s0xsr
```

```
Range("Q37").Value = sxsr
```

```
If sxsr < fyd Then
```



$FfEdxsr = (DMEdxsr / zm) * df * Ef * Afrp / (df * Ef * Afrp + (ds / 1000) * Es * As1)$

End If

If  $sxsr = fyd$  Then

$FfEdxsr = (MEdxsr / zm) - (As1 / 1000) * fyd$

End If

Range("Q38").Value = FfEdxsr

$DFfEd = FfEdxsr - FfEdx$

Range("Q39").Value = DFfEd

If  $DFfEd \leq DFfRds$  And  $DFfEd \leq DFfRdd$  Then

Range("Q40") = "check"

End If

End Sub

## B. Κώδικας για τις παραμετρικές αναλύσεις σε Visual Basic for Applications

Dim b, h, d1, d2, dk, da, nk, na, beff, hf, bw, fyk, Es, gs, acc, fck, gc, bpr, fcm, MEd, bf, tf, Ef, ffd, eo As Double

Dim diatomi As String

Sub μπ16\_()

```
l = Range("L3").Value
q = Range("L4").Value
b = Range("B3").Value
h = Range("B4").Value
d1 = Range("B5").Value
d2 = Range("B6").Value
dk = Range("B7").Value
da = Range("B8").Value
nk = Range("B9").Value
na = Range("B10").Value
beff = Range("B11").Value
hf = Range("B12").Value
bw = Range("B13").Value
fyk = Range("B16").Value
Es = Range("B17").Value
gs = Range("B18").Value
acc = Range("B21").Value
fck = Range("B22").Value
gc = Range("B23").Value
bpr = Range("B24").Value
bf = Range("B30").Value
tf = Range("B31").Value
Ef = Range("B32").Value
ffd = Range("B33").Value
eo = Range("B34").Value
diatomi = Range("D3").Value
n = Range("I8").Value
```

```
Range("F3").Value = ""  
Range("F4").Value = ""  
Range("F5").Value = ""  
Range("F6").Value = ""  
Range("F7").Value = ""  
Range("I3").Value = ""  
Range("I6").Value = ""  
Range("I7").Value = ""
```

```
Range("F9").Value = ""  
Range("F13").Value = ""  
Range("F14").Value = ""  
Range("F15").Value = ""  
Range("F16").Value = ""  
Range("F17").Value = ""  
Range("F18").Value = ""  
Range("F19").Value = ""  
Range("F20").Value = ""
```

```
tolerance = 0.5
```

```
eCu3 = 35 / 10000
```

```
d = h - d1
```

```
Pi = 3.14159265358979
```

```
x = 0
```

```
Do
```

```
    x = x + 0.1
```

```
    If diatomi = "rectangular" Then
```

```
        Ac = 0.8 * x * b
```

End If

If diatomi = "plakodokos" Then

  If  $(0.8 * x) < hf$  Then

$$Ac = 0.8 * x * beff$$

  Else

$$Ac = hf * beff + bw * (0.8 * x - hf)$$

  End If

End If

$$Fc = -(acc * Ac * fck / gc) / 1000$$

$$As1 = Pi * (dk * dk) / 4 * nk$$

$$es1 = eCu3 * (d - x) / x$$

$$fyd = fyk / gs$$

$$FS1 = (es1 * Es * 1000 * As1) / 1000$$

If  $FS1 < (fyd * As1) / 1000$  Then

$$FS1 = (es1 * Es * 1000 * As1) / 1000$$

Elseif  $(es1 < 0)$  Then

$$FS1 = (-fyd * As1) / 1000$$

Else

$$FS1 = (fyd * As1) / 1000$$

End If

$$As2 = Pi * (da * da) / 4 * na$$

$$es2 = eCu3 * (d2 - x) / x$$

$$FS2 = (es2 * Es * 1000 * As2) / 1000$$

If  $FS2 < 0$  And  $FS2 < (-fyd * As2) / 1000$  Then

$$FS2 = (-fyd * As2) / 1000$$

End If

If  $FS2 > 0$  And  $FS2 > (fyd * As2) / 1000$  Then

$$FS2 = (fyd * As2) / 1000$$

End If

$$SFy = Fc + FS2 + FS1$$

Loop Until Abs(SFy) < tolerance

$$MRd = (Abs(Fc) * (d - 0.4 * x) - FS2 * (d - d2)) / 1000$$

$$MEd = (q * l / 2 * l / 2) - (q * (l / 2) ^ (2)) / 2$$

If MRd > MEd Then

MsgBox "Den apaiteitai efarmogh enisxysis sthn diatomh."

Range("I3").Value = Round(MRd)

End If

If MRd < MEd Then

MsgBox "Apaiteitai efarmogh enisxysis. H roph poy ypoleipetai einai M = " &  
Round(MEd) - Round(MRd)

$$kcr = 1.8$$

$$kk = 0.17$$

$$kb = \text{Math.Sqr}((2 - bf / bpr) / (1 + bf / bpr))$$

$$fcm = fck + 8$$

$$gfb = 1.5$$

$$a = (kcr * kk * kb * \text{Math.Sqr}(2 * Ef * (fcm * fcm) ^ (1 / 3)) / tf) / gfb$$

If a < ffd Then

$$sfd = a$$

End If

If  $a > ffd$  Then

$sfd = ffd$

End If

$eef = sfd / Ef$

$x = 0$

Do

$x = x + 0.1$

If  $ecTop < eCu3$  Then

$ecTop = (eef + eo) * x / (h - x)$

If  $ecTop \leq 0.002$  Then

$y = 1000 * ecTop * (0.5 - 1000 * ecTop / 12)$

Else

$y = 1 - 2 / (3000 * ecTop)$

End If

If  $diatomi = \text{"rectangular"}$  Then

$Ac = y * x * b$

End If

If  $diatomi = \text{"plakodokos"}$  Then

If  $y * x < hf$  Then

$Ac = y * x * beff$

Else

$Ac = hf * beff + bw * (y * x - hf)$

End If

End If

$$F_c = -(acc * f_{ck} * A_c / g_c) / 1000 \text{ 'kN}$$

$$f_{yd} = f_{yk} / g_s$$

$$A_{s1} = \pi * n_k * (d_k * d_k) / 4$$

$$e_{s1} = (d - x) * (e_o + e_{ef}) / (h - x)$$

$$F_{S1} = (e_{s1} * E_s * 1000 * A_{s1}) / 1000$$

If  $F_{S1} < 0$  And  $F_{S1} < (-f_{yd} * A_{s1}) / 1000$  Then

$$F_{S1} = (-f_{yd} * A_{s1}) / 1000$$

End If

If  $F_{S1} > 0$  And  $F_{S1} > (f_{yd} * A_{s1}) / 1000$  Then

$$F_{S1} = (f_{yd} * A_{s1}) / 1000$$

End If

$$A_{s2} = \pi * (d_a * d_a) / 4 * n_a$$

$$e_{s2} = (e_{ef} + e_o) * (d_2 - x) / (h - x)$$

$$F_{S2} = (e_{s2} * E_s * 1000 * A_{s2}) / 1000$$

If  $F_{S2} < 0$  And  $F_{S2} < (-f_{yd} * A_{s2}) / 1000$  Then

$$F_{S2} = (-f_{yd} * A_{s2}) / 1000$$

End If

If  $F_{S2} > 0$  And  $F_{S2} > (f_{yd} * A_{s2}) / 1000$  Then

$$F_{S2} = (f_{yd} * A_{s2}) / 1000$$

End If

$$A_{frp} = b_f * t_f * n$$

$$F_{frp} = (A_{frp} * E_f * e_{ef}) / 1000$$

If  $e_{cTop} \leq 0.002$  Then

$$d_{Gx} = (8 - 1000 * e_{cTop}) / (4 * (6 - 1000 * e_{cTop}))$$

Else

$$d_{Gx} = (1000 * e_{cTop} * (3000 * e_{cTop} - 4) + 2) / (2000 * e_{cTop} * (3000 * e_{cTop} -$$

2))

End If

$$MRd = (As1 * es1 * Es * 1000 * (d - dGx * x) + Afrp * sfd * (h - dGx * x) + As2 * es2 * Es * 1000 * (dGx * x - d2)) / 1000000$$

Else

$$ecTop = eCu3$$

$$\gamma = 0.8$$

$$dGx = 0.4$$

If diatomi = "rectangular" Then

$$Ac = 0.8 * x * b$$

End If

If diatomi = "plakodokos" Then

If  $0.8 * x < hf$  Then

$$Ac = 0.8 * x * beff$$

Else

$$Ac = hf * beff + bw * (0.8 * x - hf)$$

End If

End If

$$Fc = -(acc * fck * Ac / gc) / 1000$$

$$As1 = Pi * (dk * dk) / 4 * nk$$

$$es1 = eCu3 * (d - x) / x$$

$$FS1 = (es1 * Es * 1000 * As1) / 1000$$

$$fyd = fyk / gs$$

If  $FS1 \geq fyd * As1$  Then

If  $es1 < 0$  Then

$$FS1 = (-fyd * As1) / 1000$$

Else

$$FS1 = (fyd * As1) / 1000$$

End If

End If

$$As2 = Pi * (da * da) / 4 * na$$

$$es2 = eCu3 * (d2 - x) / x$$



$$FS2 = (es2 * Es * 1000 * As2) / 1000$$

If FS2 < 0 And FS2 < (-fyd \* As2) / 1000 Then

$$FS2 = (-fyd * As2) / 1000$$

End If

If FS2 > 0 And FS2 > (fyd \* As2) / 1000 Then

$$FS2 = (fyd * As2) / 1000$$

End If

$$Afrp = bf * tf * n$$

$$eef = ecTop * (h - x) / x - eo$$

$$Ffrp = Afrp * Ef * eef$$

$$MRd = (As1 * fyd * (d - 0.4 * x) + Afrp * sfd * (h - 0.4 * x) + As2 * es2 * Es * 1000 * (0.4 * x - d2)) / 1000000$$

End If

$$SFy = Fc + Ffrp + FS2 + FS1$$

Loop Until Abs(SFy) < tolerance

End If

$$\text{Range("B25").Value} = fcm$$

$$\text{Range("B28").Value} = \text{Round}(MEd)$$

$$\text{Range("F3").Value} = x$$

$$\text{Range("F4").Value} = Fc$$

$$\text{Range("F5").Value} = FS1$$

$$\text{Range("F6").Value} = FS2$$

$$\text{Range("F9").Value} = SFy$$

$$\text{Range("F13").Value} = es1$$

$$\text{Range("F14").Value} = es2$$

```
Range("F15").Value = ecTop  
Range("F16").Value = eef  
Range("F17").Value = sfd  
Range("F18").Value = As1  
Range("F19").Value = As2  
Range("F20").Value = tolerance  
Range("I6").Value = Round(MRd)  
Range("I7").Value = Afrp  
Range("F7").Value = Ffrp
```

End Sub