



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ
ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΕΩΣ ΚΑΙ ΥΠΕΡ-ΥΨΗΛΗΣ
ΑΝΤΟΧΗΣ / ΑΠΟΔΟΣΗΣ**



Διπλωματική Εργασία
Βασιλική Μαρκεσίνη

Επιβλέπων: Χρήστος Ζέρης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ
ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΕΩΣ ΚΑΙ ΥΠΕΡ-ΥΨΗΛΗΣ
ΑΝΤΟΧΗΣ / ΑΠΟΔΟΣΗΣ**



Διπλωματική Εργασία

Βασιλική Μαρκεσίνη

Επιβλέπων: Χρήστος Ζέρης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2016

Copyright © Βασιλική Μαρκεσίνη, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια της συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς την συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Vasiliki Markesini, 2016

All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Βασιλική Μαρκεσίνη (2016)

ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΕΩΣ ΚΑΙ ΥΠΕΡ-ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ
/ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Vasiliki Markesini (2016)

Diploma Thesis

Optimized design of structural reinforced concrete elements from normal to ultra-high performance
concrete

Institute of Reinforced Concrete, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Στο πέρας της παρούσας εργασίας ενός έτους, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ζέρη Χρήστο, ως άνθρωπο και καθηγητή, για το έμπρακτο ενδιαφέρον και την παρουσία του σε όλα τα κρίσιμα στάδια εκπόνησης αυτής της δουλειάς. Τον ευχαριστώ για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί του και για το παράδειγμα το οποίο υπήρξε για μένα, ήδη από το 9^ο εξάμηνο των σπουδών μου, παράδειγμα εύρους και βάθους των γνώσεων που μπορεί να κατέχει ένας επιστήμονας και άνθρωπος, γεγονός που μου έδινε κίνητρο και έμπνευση να συνεχίσω.

Ευχαριστώ τους γονείς μου για όσα μου έχουν προσφέρει, για τις διαρκείς θυσίες, την αγάπη και την ισορροπία που καλλιέργησαν στη ζωή μου. Ευχαριστώ τον αδελφό μου για τη λακωνική υποστήριξη και ένδειξη της αγάπης του.

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους λίγους και καλούς φίλους που στέκονται δίπλα μου, με στηρίζουν και μου δίνουν θάρρος να συνεχίσω. Είμαι ευγνώμων για την παρουσία τους, τη συντροφικότητα και την αγάπη τους και αναγνωρίζω την επιμονή και υπομονή που απαιτήθηκε από μέρος τους στα χρόνια των σπουδών μου.

Τέλος, ευχαριστώ την εξεταστική επιτροπή που αποτέλεσαν οι καθηγητές Κ.Τρέζος και Ε.Βουγιούκας, τόσο για την προσοχή τους, όσο και για την ακαδημαϊκή τους προσφορά τα προηγούμενα έτη.

Βασιλική Μαρκεσίνη

Νοέμβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΕΩΣ ΚΑΙ ΥΠΕΡ-ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ / ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Βασιλική Μαρκεσίνη

Επιβλέπων: Χρήστος Ζέρης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αποτελεί το προϊόν προβληματισμού με κύριο άξονα την συμπεριφορά του υλικού του ωπλισμένου, μη-προεντεταμένου σκυροδέματος στη γεφύρωση μεγάλων ανοιγμάτων. Η γενική αυτή προβληματική οδήγησε στην εστίαση στο προσομοίωμα απλής αμφιέριστης δοκού ως θεμελιώδους δομικού στοιχείου για την επίτευξη της προαναφερόμενης γεφύρωσης. Στην ερευνητική διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την πορεία της εργασίας, ήρθα σε επαφή με την μελέτη ενός νέου τεχνολογικού υλικού για την υλοποίηση φορέων μεγάλων ανοιγμάτων και «κομψών» διατομών, ιδιαίτερα διαδεδομένου στο εξωτερικό και με προοπτική εγκαθίδρυσης ως λύση για κατασκευές ειδικών απαιτήσεων. Το υλικό αυτό αποτελεί το ινοπλισμένο σκυροδέμα υπέρ-υψηλής αντοχής, με ιδιότητες τόσο μηχανικές, όσο και απόδοσης, εξέχουσες και άξιες προβληματισμού και σύγκρισης με τα συνήθη σκυροδέματα των οποίων γίνεται χρήση στον ελληνικό χώρο.

Έτσι, υλοποιήθηκε μια βελτιστοποιητική πορεία κατά την οποία επιλύθηκε στατικά τόσο με φορτία αστοχίας, όσο και με φορτία λειτουργικότητας, το μοντέλο της αμφιέριστης δοκού. Αρχικά παραμετροποιήθηκαν όλα τα χαρακτηριστικά που συνθέτουν τη δοκό, με στόχο την εποπτική παρατήρηση, τόσο της φέρουσας ικανότητας, όσο και του κόστους υλοποίησης μιας τέτοιας λύσης. Συγκεκριμένα επιλύθηκαν δοκοί διαφόρων ανοιγμάτων, κρέμασης και πλάτους διατομής, οπλισμού και κατηγορίας αντοχής σκυροδέματος. Οι κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος που ερευνήθηκαν ξεκινούν από τις τιμές του συνήθους αντοχής σκυροδέματος C20/25 φτάνουν μέχρι και τις τιμές των θεωρούμενων υψηλής αντοχής σκυροδεμάτων C90 κατά EN1992-1-1, ενώ στη μελέτη εισήχθη και ανάλυση του μοντέλου με σκυροδέμα υπέρ-υψηλής αντοχής με χαρακτηριστική αντοχή C150.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η αναζήτηση της τεχνικά εφικτής λύσης που προκύπτει από τους παραπάνω συνδυασμούς, η επισήμανση της κρίσιμης κατάστασης στην οποία μπορούν να υλοποιηθούν αυτοί, καθώς λόγω της παραδοχής μεγάλων ανοιγμάτων, σχηματίζονται φορείς με σημαντική λυγηρότητα οπότε και παρουσιάζεται ως κρίσιμη η λειτουργικότητα του φορέα. Τέλος γίνεται μια προσπάθεια προσέγγισης του κόστους των εφικτών λύσεων που προέκυψαν, με απώτερο στόχο την εκτίμηση της επιλογής των σκυροδεμάτων υπέρ-υψηλής αντοχής ως βέλτιστη λύση σε ορισμένες περιπτώσεις όπου ο συνδυασμός απαιτούμενης φέρουσας ικανότητας, οικονομίας υλικού σε όγκο και κόστους μας οδηγεί σε αυτή την κατεύθυνση.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF REINFORCED CONCRETE

DIPLOMA THESIS

OPTIMIZED DESIGN OF STRUCTURAL REINFORCED CONCRETE ELEMENTS FROM NORMAL TO ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE

Vasiliki Markesini

Supervisor: Christos A. Zeris , Dr. Civil Engineer, Professor N.T.U.A.

ABSTRACT

This work is the result of reviewing primarily the behavior of reinforced non-prestressed concrete as a material for bridging wide spans. The general discussion at first led to a specification into a simulated simply supported beam as a fundamental structural element for achieving the said bridging. During the research procedure followed in the course of this study, I came across a new technological material for the implementation of wide-span carriers and "elegant" cross-sections, which is particularly widespread abroad and has a perspective of getting established as a solution to constructions of special requirements: ultra-high-strength fiber-reinforced concrete with outstanding mechanical and performance properties which are worth considering and comparing to the standard types of concrete used in Greece.

In that context, I followed an optimization approach to statically solve the model of the simply supported beam using both failure loads and operational loads. In the beginning I had to parameterize all of the features that build a beam in order to be able to monitor both the load-bearing capacity and the implementation cost of this solution. More specifically I made calculations on beams of various spans, heights and cross-section widths, reinforcement types and class of concrete strength. The classes of concrete strength researched range from the values of the common C20/25 strength concrete to the values of the accepted as high-strength C90 concrete according to EN1992-1-1. The study included an analysis of the model with ultra-high strength concrete of the C150 class.

This work is aimed at searching for the technically feasible solution that results from the above combinations and at underlining the critical condition under which these combinations can be implemented, since, given the long spans, carriers of significant slenderness are formed and therefore the functionality of the carrier is deemed critical. Finally, this work attempts to outline the cost of the feasible solutions that came out, eventually aiming at appraising the selection of ultra-high strength concrete as the optimal solution in certain cases where the combination of required load-bearing capacity and material scaling-down in terms of volume and cost points to that direction.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΘΕΩΡΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΥΝΗΘΟΥΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	1
1.1	ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	1
1.2	ΤΙΜΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	2
1.3	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	4
1.3.1	Θλιπτική Αντοχή	4
1.3.2	Εφελκυστική Αντοχή	9
1.4	ΚΑΤΑΠΟΝΙΣΗ ΣΕ ΟΡΘΗ ΕΝΤΑΣΗ	10
1.5	ΚΑΤΑΠΟΝΙΣΗ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ	12
1.6	ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ	15
1.6.1	Γενικά	15
1.6.2	Ερπυσμός.....	16
2	ΘΕΩΡΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΚΑΙ ΥΠΕΡ-ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.....	19
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	19
2.2	ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ. ΠΑΡΕΛΘΟΝ-ΠΑΡΟΝ-ΜΕΛΛΟΝ	20
2.2.1	Αλληλεπίδραση μεταξύ υλικών και δομικής μορφής	21
2.2.2	Εφαρμογές	22
2.3	ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΕΡ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.....	31
2.4	ΕΙΔΗ UHPC ΣΤΗΝ ΑΓΟΡΑ	32
2.5	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	33
2.5.1	Θλιπτική Αντοχή	33
2.5.2	Εφελκυστική Αντοχή	36
2.5.3	Στατικό Μέτρο Ελαστικότητας.....	51
2.5.4	Λόγος Poisson.....	52
2.5.5	Συντελεστής θερμικής διαστολής.....	52
2.5.6	Επίδραση θερμικής επεξεργασίας.....	52
2.6	ΣΥΣΤΟΛΗ -ΕΡΠΥΣΜΟΣ	54
2.6.1	Συστολή	54
2.6.2	Ερπυσμός	55
2.7	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ	56
2.8	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΡΟΥΣΗ	57
2.9	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΕΡ-ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	57
2.10	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΧΥΤΕΥΣΗ ΤΟΥ UHPC.....	60
2.10.1	Μελέτη Σύνθεσης Σκυροδέματος.....	61
2.10.2	Παραγωγή του UHPC.....	61

2.10.3	Μεταφορά UHPFRC	62
2.10.4	Χύτευση του UHPFRC	62
3	ΓΕΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΟΡΕΝΣΕΕΣ	65
4	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΩΔΙΚΑ ΟΡΕΝΣΕΕΣ.....	69
4.1	ΜΟΡΦΩΣΗ ΔΟΚΟΥ-ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ	69
4.1.1	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκού.....	69
4.1.2	Χαρακτηριστικά Αντοχής.....	71
4.1.3	Διακριτοποίηση σε κόμβους.....	72
4.2	ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	72
4.3	ΔΙΑΤΟΜΕΣ	72
4.4	ΥΛΙΚΑ	73
4.5	ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΑ ΦΟΡΤΙΑ	77
5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	79
5.1	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	79
5.1.1	Παράθεση και Σύγκριση ΟΚΑ και ΟΚΛ	79
5.1.2	Παράθεση και Σύγκριση του Είδους της Αστοχίας	82
5.1.3	Μηδενική Δυνατότητα Ανάληψης Πρόσθετου Φορτίου	83
5.1.4	ΠΡΟΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ.....	90
5.2	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ Ρ-δ (ΦΟΡΤΙΟΥ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ)	92
5.2.1	Ορθογωνική Διατομή	93
5.2.2	Διατομή Πλακοδοκού	100
5.3	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΩΦΕΛΙΜΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΚΟΣΤΟΥΣ.....	105
5.4	ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΩΦΕΛΙΜΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΚΟΣΤΟΥΣ-ΟΓΚΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	112
5.5	ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΥΠΕΡ-ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	115
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	ΣΦΑΛΜΑ! ΔΕΝ ΕΧΕΙ ΟΡΙΣΤΕΙ ΣΕΛΙΔΟΔΕΙΚΤΗΣ.
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	127
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΚΩΔΙΚΑΣ 1	129
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΚΩΔΙΚΑΣ 2	139

1 ΘΕΩΡΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΥΝΗΘΟΥΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

1.1 ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Ο σχεδιασμός ενός δομικού συστήματος γίνεται για να εξασφαλιστεί η αντοχή, η λειτουργικότητα και η ανθεκτικότητα του. Για το σκοπό αυτό εξετάζονται δύο κατηγορίες οριακών καταστάσεων, οι οριακές καταστάσεις αστοχίας και οι οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας.

Ο έλεγχος στην οριακή κατάσταση αστοχίας γίνεται συγκρίνοντας ένα εντατικό μέγεθος που προκύπτει από φόρτιση του δομικού συστήματος με δράσεις σχεδιασμού Sd , με την αντίστοιχη αντίσταση σχεδιασμού Rd , δηλαδή την τιμή του παραπάνω εντατικού μεγέθους μέχρι την οποία ικανοποιείται η αρχή της ισορροπίας εξωτερικών δράσεων-εσωτερικών αντιδράσεων (εξισώσεις ισοδυναμίας).

$$Sd \leq Rd \quad (1 - 1)$$

Στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας ελέγχεται το εύρος της ρωγμής και ο περιορισμός των παραμορφώσεων και σε ορισμένες περιπτώσεις οι αναπτυσσόμενες τάσεις.

ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ (ΟΚΑ)

Οριακές καταστάσεις αστοχίας είναι εκείνες από τις οποίες συνάγεται η μέγιστη φέρουσα ικανότητα-αντοχή. Διακρίνονται στις ακόλουθες:

- Απώλεια στατικής ισορροπίας ενός στοιχείου ή του συνόλου της κατασκευής θεωρούμενης ως στερεού σώματος.
- Μετατροπή του φορέα σε μηχανισμό
- Οριακές καταστάσεις αντοχής σε κρίσιμες διατομές:
 - a) Έναντι ορθών εντατικών μεγεθών (ροπή κάμψης και/ή αξονική δύναμη)
 - b) Έναντι διατμητικών καταπονήσεων, δηλαδή:
 - Τέμνουσα
 - Στρέψη
 - Διάτρηση
 - Συνάφεια, αγκύρωση

- Οριακές καταστάσεις λυγισμού και ύβωσης, φαινόμενα που προκύπτουν λόγω υπέρβασης της ευστάθειας του φορέα (αστοχία λόγω παραμόρφωσης από την οριακή θέση ισορροπίας). Σε λυγισμό εξετάζονται οι γραμμικοί φορείς και σε ύβωση οι επιφανειακοί.
- Οριακές καταστάσεις κόπωσης

ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ (ΟΚΛ)

Οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας είναι εκείνες που συνδέονται με κριτήρια που διέπουν την κανονική χρήση. Διακρίνονται σε:

- Ρηγμάτωση ή υπέρβαση των επιτρεπόμενων τάσεων
Σε διατομές μικρή περιοχή των οποίων υποβάλλεται σε υψηλές θλιπτικές τάσεις (περιοχές εδράσεων ή θλιβόμενη ζώνη καμπτόμενων στοιχείων με υψηλό ποσοστό εφελκυσμένου οπλισμού) ενδέχεται να είναι απαραίτητος ο περιορισμός των θλιπτικών τάσεων ή η διάταξη κατάλληλου κλειστού οπλισμού.
- Υπέρβαση των αποδεκτών παραμορφώσεων
Εκτός από τον περιορισμό των βελών κάμψης, ενδέχεται να είναι απαραίτητος κι ο περιορισμός των θλιπτικών τάσεων για να προληφθούν μεγάλες ερπυστικές παραμορφώσεις.

1.2 ΤΙΜΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Τιμή σχεδιασμού ονομάζεται η τιμή με την οποία οι δράσεις ή οι αντοχές εισάγονται στη βασική ανίσωση σχεδιασμού (Εξ. (1-1)). Οι τιμές σχεδιασμού μιας βάσης προκύπτουν από τον πολλαπλασιασμό της αντιπροσωπευτικής τιμής S_k επί τους επιμέρους συντελεστές ασφαλείας γ_f :

$$S_d = \gamma_f \cdot S_k \quad (1 - 2)$$

Οι τιμές σχεδιασμού R_d ενός μεγέθους αντοχής προκύπτουν από την διαίρεση της αντιπροσωπευτικής του τιμής R_k με τους επιμέρους συντελεστές ασφαλείας γ_m :

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_m} \quad (1 - 3)$$

Οι δράσεις που ασκούνται σε μια κατασκευή μπορούν να είναι:

- Δυνάμεις συγκεντρωμένες ή κατανεμημένες ή/και
- Παρεμποδιζόμενες και επιβαλλόμενες παραμορφώσεις (προερχόμενες από θερμοκρασιακή μεταβολή, συστολή ξήρανσης, ερπυσμό, μεταβολές συνθηκών στήριξης- διαφορικές καθιζήσεις στηρίξεων κλπ.)

που διακρίνονται σε μόνιμες, μεταβλητές και τυχηματικές.

ΜΟΝΙΜΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ

Στις μόνιμες δράσεις με αντιπροσωπευτική τιμή G_k περιλαμβάνονται:

- Το ιδιοβάρος της φέρουσας κατασκευής υπολογιζόμενο βάσει των ονομαστικών διαστάσεων,
- Το βάρος του οργανισμού πλήρωσης, των επιστρώσεων και επικαλύψεων και γενικά το βάρος κάθε πρόσθετης κατασκευής που θα παραμείνει μόνιμως στο έργο,
- Οι δράσεις που οφείλονται στην παρουσία υγρών (ή άλλων υλικών) με πρακτικά σταθερή στάθμη.

Οι τιμές σχεδιασμού G_d των μόνιμων δράσεων δίνονται από τη σχέση:

$$G_d = \gamma_g \cdot G_k \quad (1 - 4)$$

Οι επιμέρους συντελεστές ασφαλείας γ_g των μονίμων δράσεων για τις εξεταζόμενες οριακές καταστάσεις δίνονται στον Πίνακα 1.1.

Οριακές καταστάσεις	Συνδυασμοί	Επιρροή δράσης	
		δυσμενής	ευμενής
Αστοχίας	Βασικοί	1.35	1.00
	Τυχηματικοί	1.00	1.00
Λειτουργικότητας	Βασικοί	1.00	1.00

Πίνακας 1.1: Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας γ_g

ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ

Οι αντιπροσωπευτικές τιμές των μεταβλητών δράσεων δίνονται από τους Κανονισμούς Φορτίσεων. Για ειδικές κατασκευές άμεσα εκτεθειμένες στις περιβαλλοντικές δράσεις (άνεμος, χιόνι, θερμοκρασία) επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν, μετά από σύμφωνη γνώμη της Ελεγκτικής αρχής, ακριβέστερες αντιπροσωπευτικές τιμές εφόσον υπάρχουν τα απαραίτητα στατιστικά στοιχεία.

Όταν δρουν ταυτόχρονα περισσότερες της μίας μεταβλητές δράσεις πρέπει να εξετάζονται κατάλληλοι συνδυασμοί δράσεων.

Οι τιμές σχεδιασμού των μεταβλητών δράσεων είναι:

- Για τη δράση με τη μεγαλύτερη επιρροή στη οριακή κατάσταση (κύρια δράση):

$$Q_d = \gamma_q \cdot Q_k \quad \text{ή} \quad Q_d = \gamma_q \cdot \psi_1 \cdot Q_k \quad (1 - 5)$$

- Για όλες τις υπόλοιπες δράσεις:

$$Q_d = \gamma_q \cdot \psi_1 \cdot Q_k \quad \text{ή} \quad Q_d = \gamma_q \cdot \psi_2 \cdot Q_k \quad (1 - 6)$$

Για τους βραχυχρόνιους (πρώτη εξίσωση) ή μακροχρόνιους (δεύτερη εξίσωση) συνδυασμούς αντιστοίχως.

Οι επιμέρους συντελεστές ασφαλείας γ_q των μεταβλητών δράσεων για τις εξεταζόμενες οριακές καταστάσεις δίνονται στον Πίνακα 2.2

Οριακές καταστάσεις	Συνδυασμοί	Επιρροή δράσης	
		δυσμενής	ευμενής
Αστοχίας	Βασικοί	1.50	0.00
	Τυχηματικοί	1.00	0.00
Λειτουργικότητας	Βασικοί	1.00	0.00

Πίνακας 1.2: Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας γ_q

Οι συντελεστές συνδυασμού ψ είναι διαφορετικοί για τις διάφορες δράσεις και εξαρτώνται από τη μακροχρόνια ή βραχυχρόνια επίδραση τους στην εξεταζόμενη οριακή κατάσταση. Τιμές του ψ δίνονται στον Πίνακα 1.3.

ΔΡΑΣΕΙΣ		Τιμή συνδυασμού για σύνοδες δράσεις υπό συνδυασμό	
		Βραχυχρόνιο ψ_1	Μακροχρόνιο ψ_2
Ωφέλιμα φορτία	Κατοικίες	0.60	0.30
	Γραφεία, καταστήματα, ξενοδοχεία, νοσοκομεία	0.70	0.30
	Χώροι συνάθροισης κοινού (στάδια, σχολεία, θέατρα κλπ.)	0.80	0.50
	Χώροι μακροχρόνιας αποθήκευσης (βιβλιοθήκες, δεξαμενές, σιλό κλπ.)	1.00	0.80
	Χώροι στάθμευσης	0.90	0.60
Περιβ. Δράσεις	Άνεμος	0.60	0.00
	Χιόνι	0.60	0.00/0.30
Έμμεσες δράσεις / παρεμποδιζόμενες και επιβαλλόμενες παραμορφώσεις (διαφορικές καθιζήσεις, θερμοκρασία, συστολή ξηράνσεως κλπ.)		0.00	0.00
Πλευρικές τάσεις ή πιέσεις		1.00	1.00

Πίνακας 1.3: Συντελεστές συνδυασμού ψ των μεταβλητών δράσεων για τις οριακές καταστάσεις αστοχίας και λειτουργικότητας

1.3 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

1.3.1 Θλιπτική Αντοχή

Χαρακτηριστική τιμή αντοχής f_{ck} είναι η τιμή εκείνη που έχει πιθανότητα υποσκελισμού 5%. Κατά τον ακόλουθο συμβολισμό των αντοχών σκυροδέματος ανά κατηγορίες αντοχής, ο πρώτος αριθμός αποτελεί την εργαστηριακά μετρούμενη αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου στις 28 μέρες, υποβαλλόμενου σε κεντρική θλίψη, ενώ ο δεύτερος στην χαρακτηριστική αντοχή κύβου με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά. Οι χαρακτηριστικές τιμές αντοχής f_{ck} , καθώς και αντίστοιχα μηχανικά χαρακτηριστικά για το σχεδιασμό φαίνονται στον Πίνακα 1.5 (Πίνακας 3.1 / EN1992-1-1 (EC2,2004))

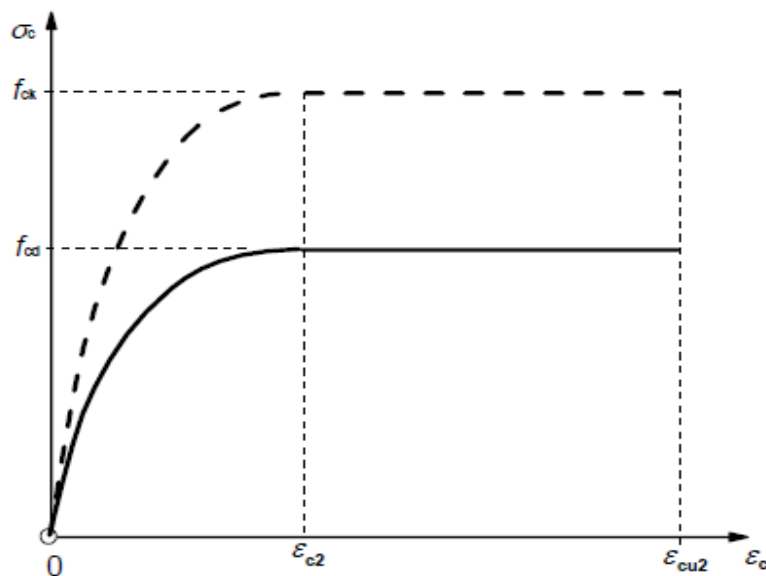
Ο λόγος Poisson για αρηγμάτωτο σκυροδέμα λαμβάνεται ίσος με $\nu=0.2$ ενώ για ρηγματωμένο σκυροδέμα ίσως με $\nu=0.0$.

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής του σκυροδέματος λαμβάνεται ίσος με $10 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$.

Το φαινόμενο βάρος άοπλου σκυροδέματος λαμβάνεται ίσο με 24 kN/m^2 και το φαινόμενο βάρος ωπλισμένου ή προεντεταμένου σκυροδέματος λαμβάνεται ίσο με 25 kN/m^2 σε περίπτωση συνήθων ποσοστών οπλισμού.

ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ως καταστατικός νόμος σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε αυτός της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του υλικού μέχρι το σημείο ϵ_{c2} (παραβολικό διάγραμμα) και γραμμικής συμπεριφοράς μέχρι την αστοχία ϵ_{cu} (ορθογωνικό διάγραμμα) (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 : Καταστατικός Νόμος σκυροδέματος

Αναλυτικότερα η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων περιγράφεται από τις εξής εξισώσεις :

$$\sigma_c = f_{cd} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}} \right)^n \right], \quad \text{για } 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{c2} \quad (1-7)$$

$$\sigma_c = f_{cd} \quad , \quad \text{για } \epsilon_{c2} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \quad (1-8)$$

όπου, f_{cd} η τιμή σχεδιασμού της αντοχής σκυροδέματος η οποία υπολογίζεται ως :

$$f_{cd} = acc \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (1-9)$$

Όπου :

acc συντελεστής που λαμβάνει υπόψιν την δυσμενή επιρροή της βραδείας επιβολής φορτίου επί πραγματικών συνθηκών σκυροδέτησης

γ_c συντελεστής ασφαλείας υλικού ο οποίος λαμβάνεται από τον Πίνακα 1.4.

Υλικό	γ	Οριακή Κατάσταση	Δυσμενής επιρροή	Ευμενής επιρροή
Σκυρόδεμα	γ_c	Αστοχίας	1.50	1.00
		Λειτουργικότητας	1.00	1.00
Χάλυβας	γ_s	Αστοχίας	1.15	1.00
		Λειτουργικότητας	1.00	1.00

Πίνακας 1.4: Συντελεστές ασφαλείας σκυροδέματος και χάλυβα για ΟΚΑ και ΟΚΛ

n : εκθέτης που λαμβάνεται από τον Πίνακα 1.5

ϵ_{c2} : παραμόρφωση κατά την πρώτη επίτευξη της τιμής σχεδιασμού f_{cd} σύμφωνα με τον Πίνακα 1.5

ϵ_{cu} : μέγιστη παραμόρφωση αστοχίας σύμφωνα με τον Πίνακα 1.5

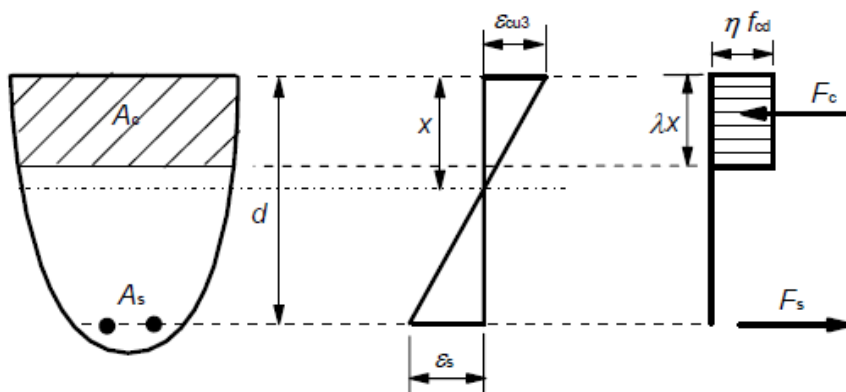
Η κατανομή των τάσεων λαμβάνεται ορθογωνική, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2, όπου:

$$\lambda = 0.8 \quad , \quad \text{για } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (1 - 10)$$

$$\lambda = 0.8 - \frac{(f_{ck} - 50)}{400} \quad , \quad \text{για } 50 \leq f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \quad (1 - 11)$$

$$n = 1.0 \quad , \quad \text{για } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (1 - 12)$$

$$n = 1.0 - \frac{(f_{ck} - 50)}{200} \quad , \quad \text{για } 50 \leq f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \quad (1 - 13)$$



Σχήμα 1.2 : Παραδοχή ορθογωνικής κατανομής των τάσεων σε τυχαία διατομή.

Κατηγορίες Αντοχών Σκυροδέματος															Αναλυτική σχέση/ επεξήγηση
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm}=f_{ck}+8$ (MPa)
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm}=0,3*f_{ctk}^{(2/3)} \leq C50/60$ $f_{ctm}=2,12*\ln(1+(f_{cm}/10)) > C50/60$
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk,0,05}=0,7*f_{ctm}$ 5% fractile
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk,0,95}=1,3*f_{ctm}$ 95% fractile
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm}=22*((f_{cm})/10)^{0,3}$
ϵ_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	$\epsilon_{c1(0/100)}=0,7f_{cm}^{0,31} < 2,8$
ϵ_{cu1} (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	for $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu1(0/100)}=2,8+27((98-f_{cm})/100)^4$
ϵ_{c2} (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	for $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{c2(0/100)}=2,0+0,085((f_{ck}-50)^{0,53})$
ϵ_{cu2} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	for $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu2(0/100)}=2,6+35((90-f_{ck})/100)^4$
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	for $f_{ck} \geq 50$ MPa $n=1,4+23,4((90-f_{ck})/100)^4$
ϵ_{c3} (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	for $f_{ck} > 50$ MPa $\epsilon_{c3(0/100)}=1,75+0,55((f_{ck}-50)/40)$
ϵ_{cu3} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	for $f_{ck} > 50$ MPa $\epsilon_{cu3(0/100)}=2,6+35((90-f_{ck})/100)^4$

Πίνακας 1.5: Αντοχή και παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά σκυροδέματος(Πίνακας 3.1 / EN1992-1-1:2004)

1.3.2 Εφελκυστική Αντοχή

Η εφελκυστική αντοχή του ωπλισμένου σκυροδέματος της παρούσας εργασίας λαμβάνεται κατά κύριο λόγο από τον χάλυβα ωπλισμού. Η αποδεκτή τάση διαρροής χάλυβα ωπλισμού κατά τον EN1992-1-1:2004 κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 400-600 MPa ενώ ο πλέον αποδεκτός τύπος είναι οι χάλυβες υψηλής συνάφειας (νευροχάλυβες).

Χαρακτηριστική αντοχή f_{yk} , θεωρείται εκείνη η τιμή του ορίου διαρροής f_y ή του συμβατικού ορίου διαρροής $f_{0.2}$ (που αντιστοιχεί σε παραμένουσα παραμόρφωση 0.2%) κάτω της οποίας υπάρχει 5% πιθανότητα να βρεθεί η αντοχή ενός τυχαίου δοκιμίου.

Οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται στο ωπλισμένο σκυρόδεμα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

Χάλυβες υψηλής πλαστιμότητας (H), όταν :

$$- \epsilon_{uk} > 5.0 \% \quad (1 - 14)$$

και

$$- (f_t/f_y)_k > 1.08 \quad (1 - 15)$$

Χάλυβες συνήθους πλαστιμότητας (N), όταν :

$$- \epsilon_{uk} > 2.5 \% \quad (1 - 16)$$

και

$$- (f_t/f_y)_k > 1.05 \quad (1 - 17)$$

Όπου:

ϵ_{uk} χαρακτηριστική τιμή της ανηγμένης παραμόρφωσης υπό το μέγιστο φορτίο, η οποία εκτιμάται με πιθανότητα υπέρβασης 10%

f_{tk} χαρακτηριστική τιμή της εφελκυστικής αντοχής

Το μέτρο ελαστικότητας χάλυβα λαμβάνεται ίσο με $E_s = 200 \text{ GPa}$.

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής λαμβάνεται ίσος με $\alpha = 10 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$.

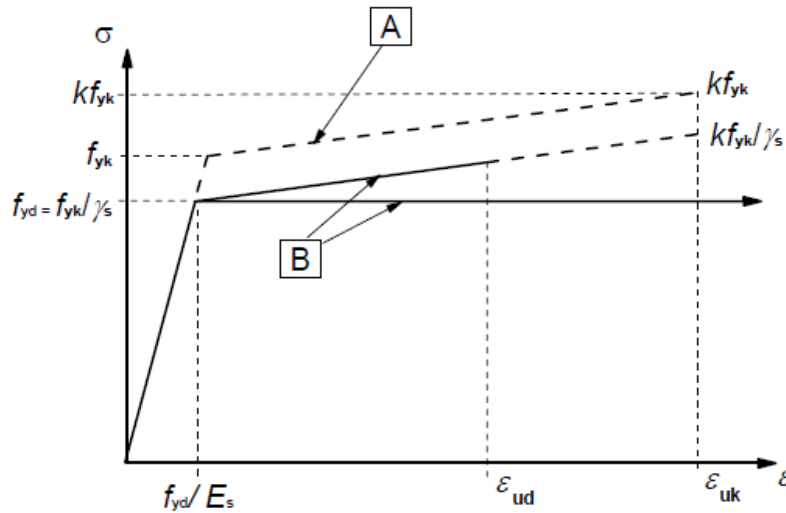
Τέλος το μέσον φαινόμενο βάρος του χάλυβα ισούται με 7850 kg/m^3 .

ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ ΧΑΛΥΒΑ

Οι παραδοχές που έγιναν κατά τον παρόν σχεδιασμό αφορούν στα εξής: Θεωρήθηκε κρατυνόμενη συμπεριφορά χάλυβα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3 με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Μέγιστη παραμόρφωση σχεδιασμού χάλυβα με τιμή $\epsilon_{ud} = \epsilon_{uk}/\gamma_s$ (προτείνεται η τιμή $0.9 \cdot \epsilon_{uk}$)
- Κλίση αύξοντος κλάδου ίση με $k = f_{tk}/f_{yk}$

- γ_s συντελεστής ασφαλείας υλικού ο οποίος λαμβάνεται από τον Πίνακα 1.4.



Σχήμα 1.3: Ελαστοπλαστική συμπεριφορά χάλυβα (A: ιδεατή συμπεριφορά κρατυνόμενου χάλυβα, B: τιμές σχεδιασμού κρατυνόμενου/μη κρατυνόμενου χάλυβα)

1.4 ΚΑΤΑΠΟΝΙΣΗ ΣΕ ΟΡΘΗ ΕΝΤΑΣΗ

Καταπόνηση υπό μεγέθη ορθής έντασης προκύπτει από εφαρμογή καμπτικών είτε αξονικών φορτίων, είτε συνδυασμού τους. Τόσο για το έλεγχο αντοχής έναντι ορθών μεγεθών, όσο και για το σχεδιασμό διατομών, η κρίσιμη διατομή την οποία μελετάμε είναι η διατομή όπου δρα ο συνδυασμός $\max M$ και $\min N$. Ο σχεδιασμός των διατομών που καταπονούνται στα παραπάνω μεγέθη βασίζεται στις εξής παραδοχές:

- Ισχύει η επιπεδότητα των διατομών. Διατμητικές παραμορφώσεις αγνοούνται.
- Ο οπλισμός υφίσταται τις ίδιες ανηγμένες παραμορφώσεις με το περιβάλλον σκυροδέμα $\epsilon_c = \epsilon_s$. Κατά την παραδοχή αυτή πλήρους συνάφειας χάλυβα οπλισμού και σκυροδέματος αμελείται οποιαδήποτε σχετική ολίσθηση μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα.
- Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος αγνοείται $f_{ct} = 0$. (ενδεχόμενη εξάντλησης της μικρής εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος από φαινόμενα δευτέρας τάξεως όπως συστολή ξήρανσης και παραμόρφωσης λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών, φαινόμενα που δεν λαμβάνονται υπόψιν κατά τους ελέγχους έναντι αστοχίας).
- Η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση του σκυροδέματος λαμβάνεται ίση με ϵ_{c2} σε κάμψη (βλέπε Πίνακα 1.5) και ϵ_{c1} σε αξονική (κεντρική) θλίψη. Γενικότερα οι τάσεις του σκυροδέματος υπό θλίψη λαμβάνονται από τις Εξ. (1-7), (2-8).
- Οι τάσεις του χάλυβα οπλισμού λαμβάνονται από το διάγραμμα του σχήματος Σχήμα 1.3

Περιοχή 3 : Η παραμόρφωση του εφελκυσμένου χάλυβα βρίσκεται μεταξύ της οριακής τιμής $\epsilon s1 = 0.020$ και της παραμόρφωσης διαρροής του χάλυβα ϵsy υπολογιζόμενη ως $\epsilon sy = f_{yd}/E_s$.

Περιοχή 4 : Η παραμόρφωση του εφελκυσμένου χάλυβα βρίσκεται μεταξύ 0 (πλήρως θλιβόμενη διατομή) και της τιμής διαρροής ϵsy . Συνεπώς ο χάλυβας βρίσκεται κάτω από το όριο διαρροής του.

Περιοχή 4^α : Όλοι οι οπλισμοί θλιβονται ενώ μόνο ένα μικρό κομμάτι της διατομής (η επικάλυψη του κάτω οπλισμού) εφελκύεται.

Εντατική περιοχή 5

Σημείο περιστροφής των περιοχών αυτών ορίζεται το C ενώ η διατομή σε αυτή την περίπτωση είναι πλήρως θλιβόμενη. Το εύρος των τιμών που λαμβάνει η άνω θλιβόμενη ίνα κυμαίνεται μεταξύ $\epsilon c2 = -0.0035$ (έκκεντρη θλίψη) και $\epsilon c2 = -0.002$ (κεντρική θλίψη). Το σημείο C είναι το σημείο τομής των γραμμών BO (όριο μεταξύ περιοχών σε εν μέρει εφελκυσμό και σε πλήρη θλίψη) και ΔΕ (περίπτωση κεντρικής θλίψης). Η απόσταση του σημείου περιστροφής C από την ανώτερη ίνα σκυροδέματος ορίζεται ως $3 * h/7$ και επαληθεύεται από όμοια τρίγωνα για την περίπτωση BO.

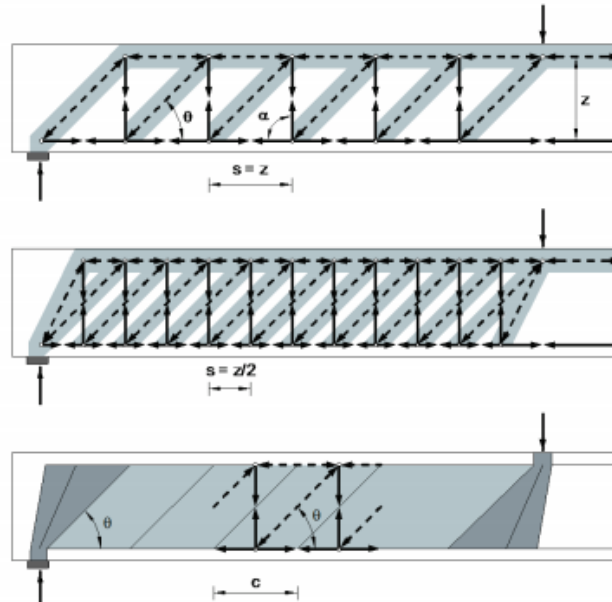
1.5 ΚΑΤΑΠΟΝΙΣΗ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ

Εκτός από την ανάπτυξη ορθών εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων κατά μήκος της διατομής λόγω καταπόνησεων ορθής έντασης, μια ακόμα σημαντική καταπόνηση συντελείται από τη δράση τεμνουσών δυνάμεων, οι οποίες προκαλούν την ανάπτυξη διατμητικών τάσεων κατά τη διεύθυνση επιβολής της φόρτισης. Σε αυτή την καταπόνηση, κρίσιμη διατομή προς εξέταση αποτελεί προφανώς η διατομή στην οποία δρα η Q_{max} .

Ένας τρόπος εκτίμησης του φαινομένου της διάτμησης είναι η παρατήρηση των ρωγμών που σχηματίζονται στο παράδειγμα μιας απλής αμφιέριστης δοκού. Στην περιοχή των μέγιστων ροπών οι ρωγμές εμφανίζονται κάθετα προς το εφελκυσμένο πέλμα ή ακριβέστερα, κάθετα προς τη διεύθυνση των κυρίων εφελκυστικών τάσεων κατά μήκος της δοκού. Περί την περιοχή των στηριγμάτων, η απόσταση μεταξύ των ρωγμών μεγαλώνει ενώ η κλίση τους αυξάνεται σε σχέση με το εφελκυσμένο πέλμα (κύριες τάσεις στις κρίσιμες διατομές των στηριγμάτων κλίνουν υπό γωνία ϕ ως προς το εφελκυσμένο πέλμα).

Αιτία για την αλλαγή κλίσης των ρωγμών στην περιοχή των στηριγμάτων είναι η δράση της τέμνουσας. Ο σχεδιασμός οφείλει να εξασφαλίζει αντοχή έναντι του αναπτυσσόμενου λοξού εφελκυσμού, γεγονός που επιτυγχάνεται με χρήση κατάλληλα τοποθετημένου εγκάρσιου οπλισμού.

Η θεωρία του γεικευμένου δικτυώματος Moersch η οποία εκτιμά τη λειτουργία της δοκού σε διάτμηση ως δικτύωμα αποτελούμενο από την ανώτερη θλιβόμενη ζώνη σκυροδέματος, τους εγκάρσιους θλιπτήρες και ελκυστήρες, καθώς και την κατώτερη εφελκυσμένη ίνα την οποία αποτελεί ο διαμήκης οπλισμός για παραλαβή εφελκυσμού από κάμψη εικονίζεται στην Εικόνα 1.1.



Εικόνα 1.1 : θεωρία γενικευμένου δικτύωματος Moersch

Ως θλιπτήρες στο παραπάνω δικτύωμα εκτιμώνται οι θλιβόμενες ζώνες αρηγμάτωτου σκυροδέματος (γωνία κλίσεως θ), η αντοχή των οποίων, $V_{Rd,max}$, καθορίζει την επάρκεια της διατομής έναντι διάτμησης.

Ως ελκυστήρες στο παραπάνω δικτύωμα εκτιμώνται οι εφελκυόμενες ράβδοι χάλυβα (γωνία κλίσεως α), η αντοχή των οποίων, $V_{Rd,s}$, προσδίδει την απαιτούμενη ποσότητα οπλισμού διατμήσεως.

Συνοπτικά, τα στάδια ελέγχου διατομής έναντι τέμνουσας ακολουθούν τους εξής ελέγχους:

- Στην περίπτωση $V_{Ed} < V_{Rd,c}$ δεν απαιτείται έλεγχος έναντι διάτμησης, ενώ τίθεται ο ελάχιστος οπλισμός διατμήσεως.
- Εάν $V_{Ed} > V_{Rd,c}$ τότε ολόκληρη η τέμνουσα παραλαμβάνεται από συνδετήρες, ενώ θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι το σκυρόδεμα δε θα αστοχήσει σε λοξή θλίψη, δηλαδή εξασφάλιση των εξής :
 - $V_{Ed} < V_{Rd,max}$ Σε περίπτωση μη ικανοποίησης απαιτείται η αλλαγή διαστάσεων της διατομής.
 - $V_{Ed} < V_{Rd,s}$ για τον υπολογισμό του διατμητικού οπλισμού.

Τέμνουσα Αντοχής Άοπλου Σκυροδέματος

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d \quad (1 - 18)$$

Όπου: $C_{Rd,c} = \frac{0.18}{\gamma_c} = 0.12$

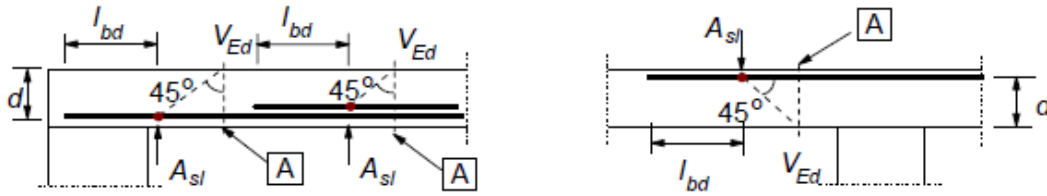
$$k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2.0 \quad (d \text{ [mm]})$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b \cdot d} < 0.02 \quad \text{όπου } A_{sl} \text{ όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2}$$

$$k_1 = 0.15$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{ed}}{A_c} < 0.2 \cdot f_{cd} \quad (N_{Ed} \text{ [N]} \quad [MPa])$$

f_{ck} [MPa]
 $b_w \cdot$ ελάχιστο πλάτος διατομής στην εφελκυσμένη ζώνη [mm]
 $C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} \geq v \min (0.035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2})$



Εικόνα 1.2: οπλισμός Asl που λαμβάνεται υπόψιν στην Εξ. (1-18), [A] εξεταζόμενη διατομή

Τέμνουσα Συνδετήρων

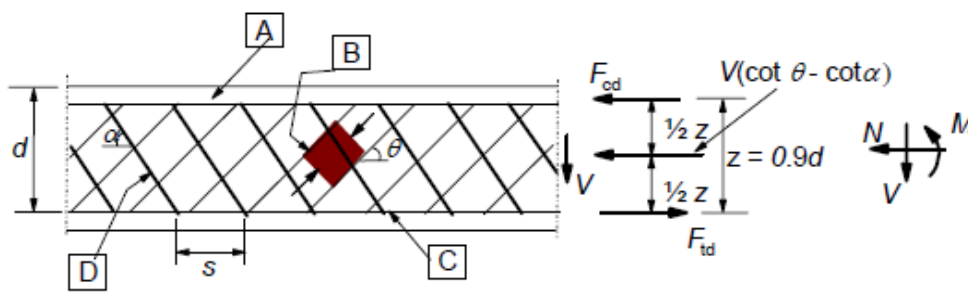
$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot (\cot \theta + \tan \theta) \cdot \sin \alpha \quad (1-19)$$

Όπου: A_{sw} συνολικό εμβαδόν σκελών συνδετήρων
 s απόσταση μεταξύ συνδετήρων κατά μήκος του στοιχείου
 $z = 0.9 \cdot d$ μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων
 f_{ywd} τάση διαρροής χάλυβα οπλισμού διάτμησης
 θ $21.8^\circ < \theta < 45^\circ$ κλίση θλιπτήρων σκυροδέματος
 α $45^\circ < \alpha < 90^\circ$ κλίση οπλισμού διατμήσεων, όπου θ, α γωνίες που επισημαίνονται στην Εικόνα 1.3

Μέγιστη Τέμνουσα

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot (\cot \theta + \tan \theta) / (1 + \cot^2 \theta) \quad (1-20)$$

$\alpha_{cw} = 1$ για μη προεντεταμένα στοιχεία
 $z = 0.9 \cdot d$ μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων
 $v_1 = 0.6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]$ μειωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψιν τη μείωση της θλιπτικής αντοχής λόγω διαξονικής έντασης, f_{ck} [MPa]



Εικόνα 1.3: προσομοίωση δοκού ως γενικευμένο δικτύωμα Moersch

1.6 ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ

1.6.1 Γενικά

Η οριακή κατάσταση λειτουργικότητας καθορίζεται από την ικανοποίηση τριών ελέγχων:

- τον έλεγχο
- Τον έλεγχο εύρους ρηγμάτωσης και
- Τον έλεγχος βελών

Παρακάτω θα αναλυθεί η οριακή κατάσταση λειτουργικότητας με έλεγχο των βελών κάμψης.

Ο έλεγχος (περιορισμός) των παραμορφώσεων πρέπει να γίνεται, ώστε :

- Να εξασφαλιστεί η χρήση για την οποία προβλέπεται το έργο,
- Να αποφευχθούν οι βλάβες,
- Να προβλεφθούν στη φάση της κατασκευής αρνητικά βέλη (υπερυψώσεις), όταν τούτο κρίνεται σκόπιμο.

Τα υπολογιζόμενα βέλη κάμψης οριζόντιων δομικών στοιχείων για τα συνήθη δομικά έργα πρέπει να μην υπερβαίνουν τις τιμές του Πίνακα 1.6, όπου l γενικώς είναι η απόσταση μεταξύ των στηρίξεων του στοιχείου (καθαρό άνοιγμα), που για αμφιέριστες δοκούς $l = l_0$ και για προβόλους $l = 2.4 \cdot l_0$

Κριτήριο	Φόρτιση	Συνδυασμός	Όριο
Εμφάνιση-χρηστικότητα	Υπό το σύνολο των φορτίων	Μακροχρόνιος	$l/250$
Βλάβη διαχωριστικών	Μετά την τοποθέτηση των διαχωριστικών	Μακροχρόνιος	$l/500$

Πίνακας 1.6: Μέγιστες τιμές βελών κάμψης οριζόντιων δομικών στοιχείων οικοδομικών έργων από σκυρόδεμα

Ο περιορισμός των βελών κάμψης μπορεί να επιτευχθεί με τους παρακάτω τρόπους:

- Μικρές τιμές του λόγου l/h
- Στατικά συστήματα που παρεμποδίζουν τις στροφές στις στηρίξεις, π.χ συνεχείς δοκούς. Η μελετημένη περίπτωση αμφιέριστης δοκού αποτελεί τη δυσμενέστερη παραδοχή για ανάπτυξη κρίσιμων βελών κάμψης σε μεγάλα ανοίγματα.
- Σκυροδέματα υψηλής κι υπερ-υψηλή αντοχής με μικρό λόγου νερού προ τσιμέντο, χαμηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο, καλή συντήρηση του σκυροδέματος και επαρκή σκλήρυνση πριν από την επιβολή φορτίων με αποφυγή υπερβολικών φορτίσεων κατά τις φάσεις κατασκευής.
- Περιορισμός του μήκους των τμημάτων που βρίσκονται σε ρηγματωμένη κατάσταση με τη βοήθεια προέντασης
- Πρόσθετοι διαμήκεις θλιβόμενοι οπλισμοί
- Μείωση τάσεων με πρόσθετους διαμήκεις οπλισμούς

Για την περίπτωση της δοκού, αμφιέριστης είτε προβόλου, ο έλεγχος βελών κάμψης μπορεί να αμεληθεί στην περίπτωση που ισχύει το όριο λυγηρότητας : $\alpha \cdot \frac{l}{d} \leq 20$

1.6.2 Ερπυσμός

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΕΡΠΥΣΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ϕ (ANNEX B/ EN 1992-1-1:2004)

Ο ερπυστικός συντελεστής $\phi(t, t_0)$ υπολογίζεται από τα εξής :

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t, t_0) \quad (1 - 21)$$

Όπου ϕ_0 ονομαστικός ερπυστικός συντελεστής που υπολογίζεται ως :

$$\phi_0 = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$$

Και :

ϕ_{RH} παράμετρος που εισάγει την επίδραση του ποσοστού σχετικής υγρασίας στον υπολογισμό του ονομαστικού ερπυστικού συντελεστή και υπολογίζεται ως:

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/100}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \quad \text{για } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$$

$$\phi_{RH} = [1 + \frac{1 - RH/100}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot a_1] \cdot a_2 \quad \text{για } f_{cm} > 35 \text{ MPa}$$

Όπου RH, το ποσοστό της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος (%).

$\beta(f_{cm})$ παράμετρος που εισάγει το φαινόμενο της σκλήρυνσης του σκυροδέματος στον υπολογισμό του ονομαστικού ερπυστικού συντελεστή κι υπολογίζεται ως:

$$\beta(f_{cm}) = 16.8 / \sqrt{f_{cm}}$$

f_{cm} μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος στις 28 μέρες

$\beta(t_0)$ παράμετρος που εισάγει την επίδραση της ηλικίας του σκυροδέματος στον υπολογισμό του ονομαστικού ερπυστικού συντελεστή και υπολογίζεται ως :

$$\beta(t_0) = 1 / (0.1 + t_0^{0.20})$$

h_0 ονομαστικό μέγεθος του μέλους σε mm όπου :

$$h_0 = \frac{2 \cdot Ac}{u}$$

Ac επιφάνεια της διατομής

u περίμετρος του μέλους που έρχεται σε επαφή με το περιβάλλον

$\beta_c(t, t_0)$ συντελεστής που περιγράφει την εξέλιξη του ερπυσμού εν χρόνω μετά τη φόρτιση και εκτιμάται με την παρακάτω σχέση :

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{(\beta_H + t + t_0)} \right]^{0.3}$$

- t ηλικία του σκυροδέματος σε μέρες τη θεωρούμενη στιγμή
 t_0 ηλικία του σκυροδέματος σε μέρες κατά τη στιγμή της φόρτισης
 $t - t_0$ μη-προσαρμοσμένη διάρκεια της φόρτισης σε μέρες
 β_H συντελεστής που εξαρτάται από τη σχετική υγρασία (RH σε %) και το ονομαστικό ύψος της διατομής (h_0 σε mm). Μπορεί να εκτιμηθεί από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\beta_H = 1,5 [1 + (0,012 RH)_{18}] h_0 + 250 \leq 1500 \quad \text{για } f_{cm} \leq 35$$

$$\beta_H = 1,5 [1 + (0,012 RH)_{18}] h_0 + 250 \alpha_3 \leq 1500 \alpha_3 \quad \text{για } f_{cm} \geq 35$$

- $\alpha_{1/2/3}$ συντελεστές που λαμβάνουν υπόψη την επιρροή της αντοχής του σκυροδέματος και υπολογίζονται ως :

$$\alpha_1 = [35/f_{cm}]^{0.7} \quad \alpha_2 = [35/f_{cm}]^{0.2} \quad \alpha_3 = [35/f_{cm}]^{0.5}$$

2 ΘΕΩΡΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΚΑΙ ΥΠΕΡ-ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

ΟΡΟΛΟΓΙΑ-ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ

UHPC, UHPFRC, HPC

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σκυρόδεμα υπερ-υψηλής αντοχής, διεθνώς γνωστό ως Ultra High Performance Concrete και εφεξής επικαλούμενο για λόγους συντομίας ως UHPC, με υψηλή θλιπτική αντοχή που υπερβαίνει τα 200 MPa και βελτιωμένη ανθεκτικότητα, σηματοδοτεί ένα ποιοτικό άλμα στην τεχνολογία του σκυροδέματος. Αυτό το υψηλής απόδοσης υλικό, προσφέρει μία ποικιλία από ενδιαφέρουσες εφαρμογές. Επιτρέπει την κατασκευή βιώσιμων και οικονομικών κτηρίων με εξαιρετικά λεπτό σχεδιασμό. Η υψηλή αντοχή και η πλαστιμότητα του, το καθιστούν ένα ιδανικό κατασκευαστικό υλικό π.χ. για καταστρώματα γεφυρών, αίθουσες αποθήκευσης, λεπτότοιχες κελυφωτές κατασκευές και υψηλού φορτίου υποστυλώματα. Πέρα από τις βελτιωμένες ιδιότητες αντοχής τόσο σε θλίψη, όσο και σε εφελκυσμό, η εξαιρετική αντοχή του έναντι όλων των ειδών διάβρωσης είναι ένα επιπλέον βήμα προς την εξέλιξη κατασκευών χωρίς απαιτήσεις συντήρησης. Το UHPC έχει πολύ ιδιαίτερες ιδιότητες που είναι εμφανώς διαφορετικές από τις ιδιότητες του απλού και υψηλής αντοχής σκυροδέματος. Για την πλήρη αξιοποίηση των ανώτερων ιδιοτήτων, απαιτούνται ειδικές γνώσεις για την παραγωγή, την κατασκευή και τον σχεδιασμό του υλικού. Παγκοσμίως αυτό το υλικό βρίσκεται υπό λεπτομερή έρευνα.

Πολλοί ερευνητές σε όλο τον κόσμο έχουν αναπτύξει σκυροδέματα που θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως υπέρ-υψηλής αντοχής. Παρόλο που υπάρχουν διαφορές μεταξύ των τύπων UHPC, υπάρχουν επίσης πολλές γενικές ομοιότητες. Το έγγραφο του γαλλικού οργανισμού Association Française de Génie Civil (AFGC) με τίτλο Προσωρινές Συστάσεις-Σκυρόδεμα Υπέρ-υψηλής Αντοχής, καταδεικνύει τις ακόλουθες ιδιότητες για το UHPC:

- αντοχή σε θλίψη μεγαλύτερη από 150 MPa,
- εσωτερική ενίσχυση με ίνες που εξασφαλίζει μη ψαθυρή συμπεριφορά και

- συνδυασμό υψηλής περιεκτικότητας σε συνδετικό υλικό και ειδικών αδρανών
- Επιπλέον, τείνει να έχει μία πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό (πολύ μικρό λόγο νερού προς τσιμέντο) επιτυγχάνοντας επαρκείς ρεολογικές ιδιότητες μέσω ενός συνδυασμού βελτιστοποιημένης διαβάθμισης αδρανών και προσθήκης υψηλής τεχνολογίας ρευστοποιητών (χημικών προσθέτων).

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται και εφαρμόζεται η θεωρία του ινοπλισμένου σκυροδέματος υπερ-υψηλής αντοχής (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete), συντομογραφικά επικαλούμενο ως UHPFRC ή απλοποιητικά UHPC, έχοντας πάντα ως ισχύουσα συνθήκη την ινόπλιση.

Οι διαφορές μεταξύ ινοπλισμένου και μη-ινοπλισμένου σκυροδέματος υπερ-υψηλής αντοχής συνοψίζονται στις εξής:

- Υψηλή εφελκυστική αντοχή μετά τη ρηγμάτωση, που επιτυγχάνεται από τη συστηματική χρήση υψηλού ποσοστού ινών από χάλυβα (περισσότερο από 2% κατ' όγκο) με στόχο να επιτευχθεί πλάστιμη συμπεριφορά υπό ένταση, απαλλάσσοντας σε πολλές περιπτώσεις από τη χρήση διαμήκους οπλισμού κάμψης.
- Η μελέτη της σύνθεσης και η περιεκτικότητα σε υψηλό συνδετικό υλικό που περιορίζει την δημιουργία τριχοειδούς πορώδους με αποτέλεσμα την καλή ανθεκτικότητα των ινών εσωτερικά του UHPFRC. Η αυτό-ίαση των ρωγμών εξασφαλίζει τη μακροπρόθεσμη διατήρηση του εφελκυσμού δεδομένου ότι επαληθεύονται συγκεκριμένα όρια για το εύρος-άνοιγμα των ρωγμών.
- Η άμεση αντοχή σε εφελκυσμό του πυρήνα σκυροδέματος η οποία είναι συστηματικά μεγαλύτερη από 7 MPa.

Συγκεντρωτικά, όλοι οι ελάχιστοι απαιτούμενοι οπλισμοί και κάποιοι από τους δευτερεύοντες, π.χ. ο ελάχιστος οπλισμός διάτμησης, μειώνονται, διατηρώντας είτε μόνο τους κύριους και δευτερεύοντες προεντεταμένους τένοντες, είτε χαλαρό οπλισμό χάλυβα, ως απαιτούμενους σε περιπτώσεις που οι δυνάμεις σχεδιασμού δεν μπορούν να αναληφθούν μόνο από τις ίνες οπλισμού.

2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ. ΠΑΡΕΛΘΟΝ-ΠΑΡΟΝ-ΜΕΛΛΟΝ

Η ιστορία δείχνει ότι υπάρχει μια αλληλεπίδραση μεταξύ ενός νέου υλικού και της μορφής της κατασκευής στην οποία χρησιμοποιείται. Πρώιμα τόξα χτίστηκαν με λίθους. Ο χάλυβας επέτρεψε τη δημιουργία δικτυωμάτων και δοκών μεγάλων ανοιγμάτων. Καλλώδια υψηλής αντοχής κατέστησαν δυνατή την κατασκευή καλλωδιωτών γεφυρών μεγάλων ανοιγμάτων. Το σκυροδέμα υπερ-υψηλής αντοχής με την εξαιρετικά υψηλή αντοχή και την ανθεκτικότητά του, είναι ουσιαστικά ένα νέο υλικό, ακόμα κι αν αυτό υπάγεται στην κατηγορία σκυροδέματος. Η εφαρμογή του ωστόσο, προορίζεται για κατασκευές ειδικών απαιτήσεων, οι οποίες και θα εκμεταλλευτούν το πλήθος των εξεχουσών ιδιοτήτων του.

Από τα αρχαία χρόνια, το ανθρώπινο είδος έψαχνε για κατασκευαστικά υλικά με συνεχώς υψηλότερη απόδοση ώστε να μπορούν να χτίσουν μεγαλύτερης κλίμακας και καλύτερες κατασκευές. Πιθανώς να ξεκίνησαν με τη λάσπη, το άχυρο και το ξύλο λόγω της μεγάλης διαθεσιμότητάς τους. Τούβλα από λάσπη και πλινθοδομές εξακολουθούν να κατασκευάζονται από ιθαγενείς σε πολλά μέρη του κόσμου. Στην πραγματικότητα, μπορούν να αντέξουν για μεγάλο διάστημα, δεδομένου του ευνοϊκού ξηρού καιρού σε αυτές τις περιοχές.

Τόσο οι Μίνωες όσο και οι Έλληνες ξεκίνησαν να χρησιμοποιούν ασβεστοκονιάματα περίπου το 2000 π.Χ. Ωστόσο, το υλικό αυτό διαλύεται στο νερό οπότε και καθίσταται μη-ανθεκτικό σε κακές καιρικές συνθήκες. Οι Ρωμαίοι έκαναν μια σημαντική βελτίωση σε σχέση με αυτό προσθέτοντας μία ηφαιστειακή

τέφρα προερχόμενη από την πόλη Pozzuoli (εξ 'ου και το όνομα ποζολάνη). Με τη διάθεση των πρώτων εργαλείων, η πέτρα χρησιμοποιήθηκε ευρέως από τους Έλληνες, τους Αιγύπτιους και τους Ρωμαίους.

Οι Ρωμαίοι ήταν μεγάλοι χτίστες που είχαν αφήσει το σημάδι τους σε μια μεγάλη μερίδα του κόσμου, καλύπτοντας το μεγαλύτερο τμήμα της σημερινής Ευρώπης και της Μέσης Ανατολής. Εφηύραν το τόξο, το θόλο και τη συνέχεια τον τρούλο και έχτισαν πολλά εντυπωσιακά υδραγωγεία για να μεταφέρουν νερό από το βουνό προς τις πόλεις. Το σκυρόδεμα εκείνα τα χρόνια, ένα μείγμα από ασβέστη, άμμο, πέτρα και νερό, ήταν πρακτικά το ίδιο με αυτό που χρησιμοποιούνταν σε πολλές περιοχές του αρχαίου κόσμου ή ακόμα και σήμερα σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες. Η υψηλή θλιπτική αντοχή του τσιμέντου, σε συνδυασμό με τούβλα και πέτρα, τους επέτρεψε να χτίσουν μεγάλα τόξα και μεγάλους θόλους. Μία πέτρινη δοκός είχε άνοιγμα έως 5 μέτρα. Ένα τόξο, αντίθετα, μπορεί να εκτείνεται σε μήκος μεγαλύτερο των 50 μέτρων. Το Πάνθεον της Ρώμης, κτισμένο γύρω στο 128 μ.Χ, έχει ένα θόλο που εκτείνεται στα 43,3 μέτρα από πέτρες και ρωμαϊκό σκυρόδεμα, ο οποίος ήταν ο μεγαλύτερος θόλος στον κόσμο για περίπου 1900 χρόνια.

Το τσιμέντο Portland εισήχθη επίσημα από τον Joseph Aspdin το 1824, ενώ το οπλισμένο σκυρόδεμα παράχθηκε αρχικά από τον W.B. Wilkinson το 1854. Συνεπώς, η ιστορία του οπλισμένου σκυροδέματος μετρά περίπου 160 χρόνια.

2.2.1 Αλληλεπίδραση μεταξύ υλικών και δομικής μορφής

Υπάρχει μια στενή σχέση μεταξύ του διαθέσιμου κατασκευαστικού υλικού και του τύπου της κατασκευής. Ορισμένες κατασκευές κατέστησαν υλοποιήσιμες μετά την ανάπτυξη του κατάλληλου κατασκευαστικού υλικού. Σε κάποιες σπάνιες περιπτώσεις, οι μηχανικοί οραματίζονται καινοτόμες κατασκευαστικές ιδέες, με την προοπτική μελλοντικής ανάπτυξης του κατάλληλου μέσου-υλικού για την υλοποίησή τους. Αυτό είναι ένα παράδειγμα όπου η ιδέα προπορεύεται πολύ της εποχής της. Ωστόσο, οι περισσότεροι μηχανικοί είναι συντηρητικοί και πιο πρακτικοί. Αντίθετα με τους επιστήμονες που μπορούν να αφιερώσουν όσο χρόνο χρειάζεται προς αναζήτηση της αλήθειας στη φύση, είτε αυτό είναι χρήσιμο, είτε όχι, οι μηχανικοί καλούνται να λύσουν πραγματικά προβλήματα και να παράξουν ό,τι χρειάζεται τη δεδομένη στιγμή. Πρέπει να χρησιμοποιήσουν οποιοδήποτε διαθέσιμο μέσο παρά την ατέλεια του. Η πέτρα, το ρωμαϊκό σκυρόδεμα και το τούβλο είναι υλικά με καλή, αμιγώς θλιπτική συμπεριφορά, κατάλληλα για κατασκευές όπως τόξα, θόλους και βαρέλια. Ο σίδηρος έχει πολύ μεγαλύτερη αντοχή αλλά επίσης υστερεί σε εφελκυσμό. Με την εισαγωγή του σιδήρου επιτεύχθηκαν τόξα με μεγαλύτερα ανοίγματα, παρά την ίδια γενικά μορφή. Η υψηλή εφελκυστική αντοχή του χάλυβα άλλαξε το τοπίο στις κατασκευές, επιτρέποντας την κατασκευή δοκών μεγάλων ανοιγμάτων και δικτυωμάτων, τα οποία οδήγησαν σε γέφυρες ακόμα μεγαλύτερων ανοιγμάτων και ψηλότερα κτήρια. Η μεγάλη εφελκυστική αντοχή των συρμάτων ψυχρής έλασης έκανε δυνατή την κατασκευή καλωδιωτών γεφυρών μεγάλων ανοιγμάτων. Ακόμα μία χρήση του χάλυβα υψηλής αντοχής είναι σε τένοντες προεντάσεως. Με την εισαγωγή έκκεντρης ή κεντρικής θλίψης εσωτερικά της διατομής, η οποία δημιουργείται ως εσωτερικό εντατικό μέγεθος (τάση που εκφυλλίζεται σε ένταση) αντιδρώντας στην επιβαλλόμενη τάση των τενόντων, το σκυρόδεμα ενισχύεται με μια εφελκυστική δύναμη που επιτρέπει την κατασκευή γεφυρών από σκυρόδεμα με πολύ μεγαλύτερα ανοίγματα.



Εικόνα 2.1: North Bridge



Εικόνα 2.2: Telford's Iron Bridge

Τη δεκαετία του 1960 αναπτύχθηκαν και παράχθηκαν, υπό ειδικές εργαστηριακές συνθήκες, σκυροδέματα με θλιπτική αντοχή έως και 800 MPa. Σκυροδετήθηκαν υπό υψηλή πίεση, με χρήση θερμικής κατεργασίας. Στις αρχές του 1980, γεννήθηκε η ιδέα της ανάπτυξης λεπτόκοκκων σκυροδεμάτων με πολύ πυκνό και ομοιογενές πυρήνα τσιμέντου, εμποδίζοντας την ανάπτυξη μικρορωγμών μέσα στη δομή του κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Λόγω του περιορισμένου μεγέθους αδρανών με μέγιστη διάσταση κόκκου κάτω του 1 mm, καθώς και της υψηλής πυκνότητας λόγω της χρήσης διαφορετικών αδρανών και αντιδρόντων ορυκτών προσμίκτων, καλούνταν "Reactive Powder Concretes (RPC)". Στο μεταξύ υπήρχε μία ευρύτερη ποικιλία συνθέσεων και ο όρος "Ultra-High-Performance Concrete" ή συντομογραφικά – UHPC καθιερώθηκε παγκοσμίως για σκυροδέματα με ελάχιστη θλιπτική αντοχή 150 MPa.

Οι πρώτες εμπορικές εφαρμογές ξεκίνησαν περί το 1980, και βασίζονταν στην ανάπτυξη των περιφρημων κονιαμάτων D.S.P. στη Δανία (Buitelaar 2004). Αρχικά χρησιμοποιήθηκε για ειδικές εφαρμογές στις βιομηχανίες προστασίας – όπως σε θησαυροφυλάκια, υψηλής αντοχής θαλάμους και προστατευτικές-αμυντικές κατασκευές.

Οι πρώτες έρευνες που στόχευαν στην εφαρμογή του UHPC σε κατασκευές ξεκίνησαν περί το 1985. Από τότε, αναπτύχθηκαν διάφορες τεχνικές λύσεις για βαριά, συμβατικά ωπλισμένα, προκατασκευασμένα μέλη από UHPC για καταστρώματα γεφυρών, επί τόπου εφαρμογές αποκατάστασης ακατάλληλου σκυροδέματος σε γέφυρες και βιομηχανικά δάπεδα, παράγοντας πλάστιμα, λεπτόκοκκα και ινοπλισμένα Reactive Powder Concretes (RPC), είτε του τύπου Ductal από τη γαλλική εταιρία Lafarge, είτε του δανέζικου τύπου Densit. Τα παραπάνω σκυροδέματα υπερ-υψηλής αντοχής, άοπλα είτε με συμβατική όπλιση, χρησιμοποιήθηκαν σε προκατασκευασμένα στοιχεία ως λύσεις σε έργα ανοιχτής θαλάσσης, υποστυλώματα υψηλής απαίτησης σε αξονική φέρουσα ικανότητα καθώς και ψηλά κτήρια.

2.2.2 Εφαρμογές

Μέχρι σήμερα, η πιο διαδεδομένη δομική εφαρμογή του σκυροδέματος υπερ-υψηλής αντοχής είναι στην κατασκευή πεζογεφυρών που καλύπτουν μεγάλα ανοίγματα με ιδιαίτερα κομψές διατομές.

Καινοτόμες εφαρμογές ήταν η πρώτη προεντεταμένη, σύμμικτη πεζογέφυρα στο Shebrooke του Καναδά το 1997, η αντικατάσταση των μεταλλικών τμημάτων του πύργου ψύξης στο Cattenom και δύο οδογεφυρών 20.50 και 22.50 μέτρων μήκους στο Bourg-lès-Valence, στη Γαλλία το 2001 (Εικόνα 2.3). Οι γέφυρες στο Bourg-lès-Valence αποτελούνται από πέντε προκατασκευασμένες δοκούς οι οποίες προεντάθηκαν, τοποθετήθηκαν στο εργοτάξιο και εν συνεχεία συνδέθηκαν με επί τόπου εγχυόμενο UHPC.

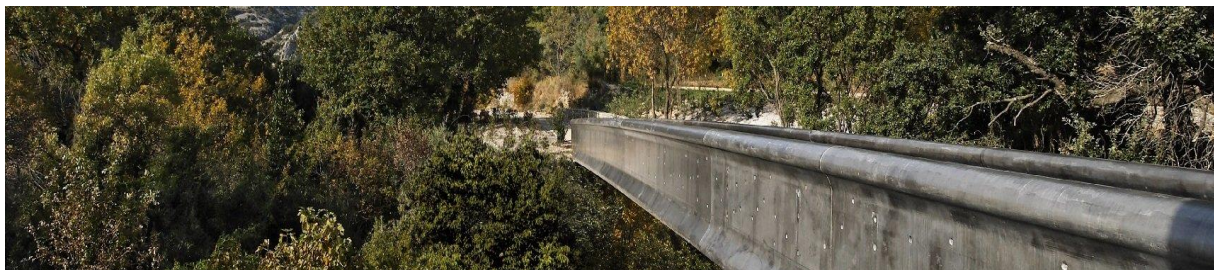


Εικόνα 2.3: *Bourg-lès-Valence, Γαλλία, 2001*

Για τα παραπάνω έργα, το σκυρόδεμα UHPC ενισχύθηκε με μεταλλικές ίνες 2.5-3.0 % κατ' όγκο, διαφόρων σχημάτων. Άλλο ένα έργο που αποτελεί πρότυπο χρήσης ινοπλισμένου σκυροδέματος υπερ υψηλής αντοχής είναι η πεζογέφυρα Seonju στην Κορέα (Εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4: *Seonju, Κορέα*





Εικόνα 2.5: The Passerelle des Anges Footbridge, Γαλλία,
Pont du Diable, 2008

Η πεζογέφυρα μήκους 70 m. (Εικόνα 2.5) αποτελείται από δυο διαμήκεις αμφιέριστες δοκούς, ύψους 1.80m που συντέθηκαν από προκατασκευασμένα στοιχεία τα οποία προεντάθηκαν και αποκαταστάθηκε η συνέχεια τους επί τω έργω. Για τον περιορισμό των δονήσεων από ανεμοπιέσεις, εγκαταστάθηκαν αποσβεστήρες λόγω της ιδιαίτερα χαμηλής δυσκαμψίας τους (μικρό βάρος). Συγκεκριμένα, ο φορέας συντέθηκε από 15 προκατασκευασμένα στοιχεία διατομής Π από Ductal® 1.80m ύψους, 1.88m πλάτους και 4.60m μήκους, χωρίς συμβατικό οπλισμό. Το κατάστρωμα της γέφυρας περιορίστηκε σε πάχος 3cm, στο οποίο προσδόθηκε οριζόντια δυσκαμψία μέσω χιαστί συνδέσεων δυσκαμψίας που εισάχθηκαν στο κατάστρωμα. (Rudy Ricciotti Architecte)



Εντυπωσιακό παράδειγμα αξιοποίησης των σκυροδεμάτων υπερ-υψηλής αντοχής (συγκεκριμένα της εταιρίας Lafarge) αποτελεί η παγκοσμίως γνωστή για την αισθητική και την καινοτομία της γέφυρα του Millau Viaduct στη Γαλλία, που ενώνει τις πόλεις Béziers και Clermont-Ferrand. Αποτελεί την ψηλότερη καλωδιωτή γέφυρα παγκοσμίως, διαστάσεων: 2460m μήκους, 343m ύψους, βάρους καταστρώματος 36.000 tη και συνολικού όγκου σκυροδέματος πάνω από 85000 m³.

Εικόνα 2.6: Millau Viaduct bridge, Béziers-Clermont-Ferrand, Γαλλία, 2004

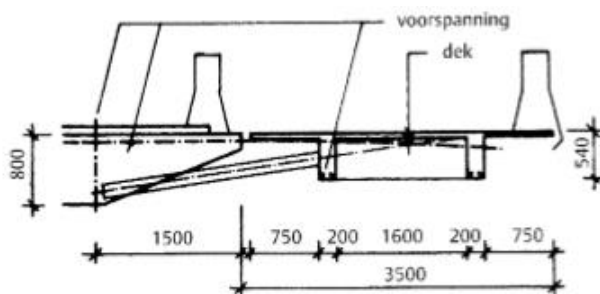
Ωστόσο το UHPC κερδίζει έδαφος και σε άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Στη Γερμανία ύστερα από εκτεταμένη έρευνα, αναπτύχθηκαν τεχνικά κριτήρια και κανονισμοί χρήσης τοπικά διαθέσιμων αδρανών για τη σύνθεση λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων UHPC, ώστε να μειωθεί η περιεκτικότητα σε τσιμέντο και να γίνει χρήση ινοπλισμένων μιγμάτων και υψηλής αντοχής πλαστικών ινών, ώστε να ρυθμίζεται η αντοχή και η πλαστιμότητα ανάλογα με τις ζητούμενες απαιτήσεις κάθε έργου. Ως πρώτη εφαρμογή, κατασκευάστηκε μία σύμμικτη πεζογέφυρα, συνολικού μήκους 135 m και μέγιστου ανοίγματος 40 m., η οποία αποτελείται από προκατασκευασμένους προενταταμένους τένοντες και προκατασκευασμένο από UHPC, μέγιστης διάστασης κόκκου αδρανών 2 mm και τοπικά αδρανή, στοιχεία καταστρώματος (Εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7: σύμμικτη πεζογέφυρα Gaertnerplatzbrücke, Kassel, Γερμανία

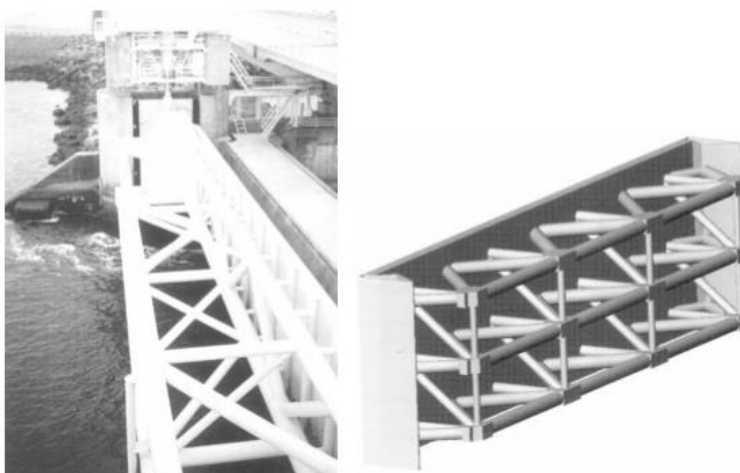
Εμπνεόμενος από τις πρώτες εφαρμογές σε Καναδά, Νότια Κορέα και Ευρώπη και μέσω συστηματικής έρευνας και ανάπτυξης σε διάφορα πανεπιστήμια και τσιμεντοβιομηχανίες, ο οργανισμός DAfStB (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton im DIN Deutsches Institut für Normung/German Association for Reinforced Concrete within DIN, German Institute for Standardisation, Berlin, 10th draft, 2003), δημιούργησε έναν οδηγό σκυροδεμάτων UHPC. Ο DAfStB είναι μέρος του γερμανικού οργανισμού κανονισμών DIN, ο οποίος είναι υπεύθυνος για όλες τις τυπικές και τεχνικές απαιτήσεις που συσχετίζονται με το προϊόν και την εφαρμογή του σκυροδέματος και θέτουν τους κανόνες σχεδιασμού των κατασκευών από σκυρόδεμα. Ο γερμανικός κώδικας καλύπτει το τεχνικό know-how και την παγκόσμια διαδεδομένη εμπειρία με UHPC. Καλύπτει σχεδόν όλες τις εφαρμογές που υπήρχαν μέχρι πρότινος – με έμφαση στις εμπορικά διαθέσιμες συνθέσεις UHPC- τις κύριες αρχές και τα κριτήρια χαρακτηριστικής συμπεριφοράς, τις ιδιότητες ανθεκτικότητας και αντοχής έναντι πυρκαγιάς. Ένα δεύτερο μέρος του κώδικα αναφέρεται στον επαρκή σχεδιασμό και κατασκευή κτηρίων με χρήση UHPC. Ο κώδικας αποτελεί ένα πρώτο βήμα προς έναν αξιόπιστο τεχνικό κανονισμό.

Πολλές φορές ζητούμενο είναι η επισκευή και η αναβάθμιση των κατασκευών, καθώς επίσης η ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας των υφιστάμενων κατασκευών. Ένα πραγματικό παράδειγμα αποτελεί το πρόβλημα της αύξησης της κυκλοφοριακής συμφόρησης- διεύρυνση των υφιστάμενων οδογεφυρών με μία πρόσθετη λωρίδα κυκλοφορίας. Το πρόβλημα που ανακύπτει είναι ότι οι γέφυρες αυτές δεν έχουν σχεδιαστεί για μελλοντική επέκταση. Συνεπώς, πρέπει να ενισχυθούν ώστε να μπορούν να φέρουν το πρόσθετο φορτίο. Προσβλέποντας στην διατήρηση όσο το δυνατόν μικρότερου πρόσθετου νεκρού φορτίου, ενδείκνυται η χρήση UHPC. Στην Εικόνα 2.8 απεικονίζεται σχέδιο από την επέκταση υφιστάμενης γέφυρας με πρόσθετη λωρίδα κυκλοφορίας για κυκλοφοριακή κλάση 30.



Εικόνα 2.8: Διεύρυνση υφιστάμενης γέφυρας με UHPC

Άλλο παράδειγμα πιθανής εφαρμογής αφορά τις χαλύβδινες θύρες του τεράστιου κυματοθραύστη "Oosterscheldekering" στην Ολλανδία, κατασκευασμένες την περίοδο 1980-1986 ώστε να αποφευχθεί μία πιθανή μελλοντική καταστροφή από πλημμύρα, όπως αυτή του 1953. Το έργο αποτελεί ένα φράγμα από 65 ανυψούμενες θύρες κατασκευασμένες από χάλυβα, οι οποίες κλείνουν ύστερα από πρόβλεψη καταιγίδας. Οι θύρες έχουν πλάτος 45 μέτρων και ύψος περίπου 15 μέτρων. Λόγω του πολύ διαβρωτικού θαλάσσιου περιβάλλοντος, οι θύρες έχουν επιχρισθεί με κατάλληλη επικάλυψη ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα διάβρωσης. Ωστόσο, η επιθεώρηση του έργου στις αρχές της δεκαετίας του '90 κατέδειξε την σημαντική ανάπτυξη διάβρωσης-η επικάλυψη κρίθηκε προς αντικατάσταση, κάτι που αύξησε σημαντικά το κόστος συντήρησης. Δύο διδακτορικές διατριβές στο πανεπιστήμιο του Delft αφιερώθηκαν στην μελέτη της πιθανής αντικατάστασης των θυρών από θύρες κατασκευασμένες από UHPC (κλάση αντοχής C200) (Εικόνα 2.9). Από άποψη ανθεκτικότητας, η παραπάνω κρίθηκε ιδανική λύση.

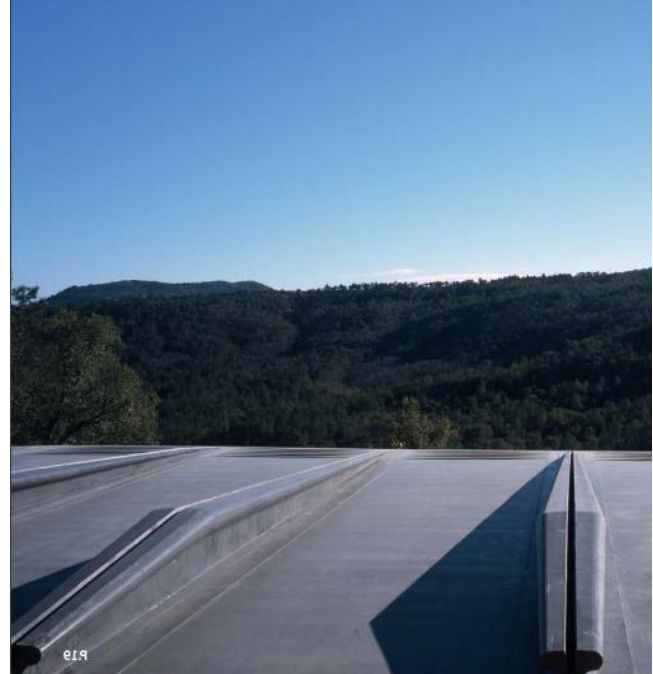


Εικόνα 2.9: Σχέδιο της θύρας από UHPC του κυματοθραύστη Oosterscheldekering, Ολλανδία

Καινοτόμος εφαρμογή του υλικού σε πλέον δομικά στοιχεία αποτελεί ο πρόβολος της Villa Navarra στην περιοχή Le Muy της Νότιας Γαλλίας, του αρχιτέκτονα Rudy Ricciotti. Ο Mouloud Behloui, υπεύθυνος μηχανικός της ανάπτυξης του σκυροδέματος Ductal® από τη Lafarge, επισημαίνει ότι «Η οροφή αποτέλεσε την ευκαιρία για όλους εμάς να οδηγηθούμε σε μία κατασκευή που θα λειτουργεί κυρίως υπό κάμψη, χάρη στην λειτουργία του προβόλου και χωρίς καμία προένταση, επιτρέποντας στην προσέγγιση του μηχανικού να ελέγξει σχολαστικά τις ιδιότητες του υλικού.»

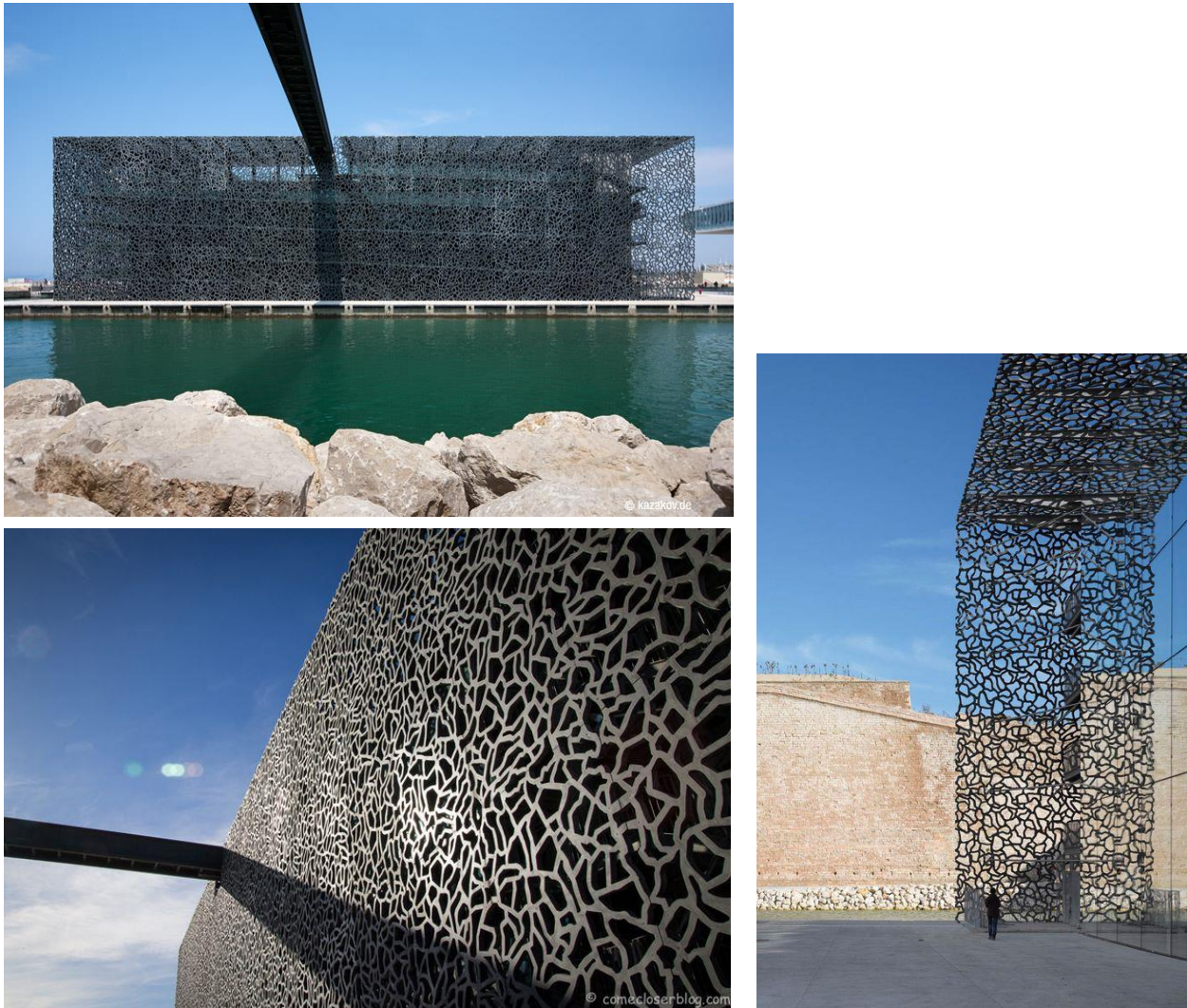


Η στέγη της βίλλας αυτής συντίθεται από 17 πάνελα διαστάσεων 9.25m*2.35m, βάρους περίπου 3 τόνων έκαστο. Κατά τη συνεργαζόμενη έννοια (εγκάρσια) το στατικό προσομοίωμα αποτελείται από πρόβολο μήκους 7.80m (ανεστραμμένη δοκό μεταβλητού ύψους και πλάτους) που καταλήγει σε πάχος 3cm. Στηρίζεται σε δυο διαμήκη τοιχία. (Rudy Ricciotti Architecte)



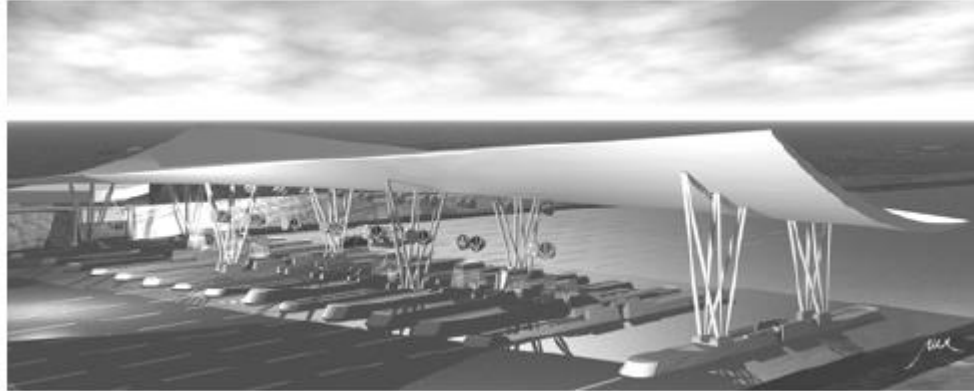
Εικόνα 2.10: Villa Navara, France, 2007

Πολλές είναι τέλος και οι αρχιτεκτονικές εφαρμογές του υλικού αυτού, κυρίως στην περιοχή της Γαλλίας. Η χρήση ενός υλικού με τις μηχανικές ιδιότητες και τη μονολιθικότητα του σκυροδέματος, αλλά με σχεδόν απεριόριστες δυνατότητες στην εμφάνιση, στην υφή και το χρώμα έχει επιτρέψει στους αρχιτέκτονες πρόσβαση σε νέα σχήματα και όγκους. Το Ductal® χρησιμοποιήθηκε σε διάφορα έργα με έμφαση στην αρχιτεκτονική, όπως οι στάσεις των λεωφορείων στο Tucson (ΗΠΑ), δημόσια επίπλωση στη Rennes (Γαλλία), καμπίνες ντους, σκίαστρα, πάνελ πρόσοψης στο Μονακό και τον πύργο του ρολογιού στο Κιότο της Ιαπωνίας. Ωστόσο, ιδιαίτερης ομορφιάς χρήζουν τα παραδείγματα των πάνελ σε δημόσια κτήρια κυρίως στην περιοχή της Γαλλίας, όπου κυριαρχεί η λογική και αισθητική του διάτρητου στοιχείου σκυροδέματος ιδιαίτερα λεπτού πάχους (της τάξεως των 5 cm). (Rudy Ricciotti Architecte)



Εικόνα 2.11: Museum of European and Mediterranean Civilizations, Marseille, Γαλλία, 2015

Εντυπωσιακό παράδειγμα αρχιτεκτονικής αξιοποίησης των σπουδαίων ιδιοτήτων του UHPC είναι ο σταθμός διοδίων Millau Viaduct στη Γαλλία. Η Εικόνα 2.12 δείχνει το κομψό στέγαστρο – σαν μία τεράστια στριμμένη κόλλα χαρτιού, μήκους 98 μέτρων και πλάτους 28 μέτρων, με μέγιστο πάχος 85 cm στο κέντρο. Κατασκευάστηκε από ειδικά καλουπωμένα προκατασκευασμένα μέλη πλάτους 2m., συνδεδεμένα εσωτερικά με διαμήκη προένταση.

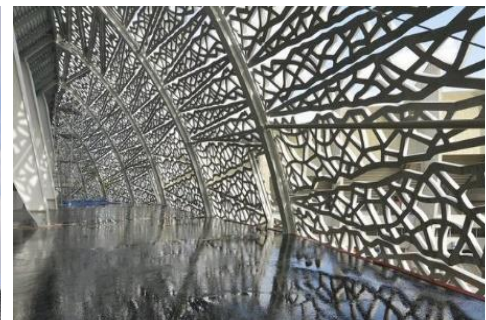


Εικόνα 2.12: σταθμός διοδίων Millau Viaduct, Γαλλία

Τέλος αξίζει να αναφερθούν δύο ακόμα εφαρμογές διάτρητων πανέλων από Ductal®, αυτή της κάλυψης του σταδίου rugby Stade Jean Bouin στο Παρίσι (Εικόνα 2.13) καθώς και τα πανέλα πρόσοψης στο μουσείο μοντέρνας τέχνης στη Lille της Γαλλίας (Εικόνα 2.14).



Η επίτευξη των εντυπωσιακών καμπυλωτών (λόγοι καλής ακουστικής του σταδίου) για την κάλυψη του σταδίου, επιφάνειας 12000 m², πραγματοποιήθηκε με την παράθεση 36000 αυτοφερόμενων διάτρητων πανέλων από Ductal® υπό τριγωνικό κάναβο, 8-9m μήκους και 2m πλάτους. Η προκατασκευή των πανέλων έγινε από την εταιρία Bonna Sabla. Η συνολική επιφάνεια που καλύπτουν τα πανέλα περιμετρικά του σταδίου είναι 23000 m². (Rudy Ricciotti Architecte)



Εικόνα 2.13: Stade Jean Bouin, Παρίσι, Γαλλία, 2007



Εικόνα 2.14: Μουσείο μοντέρνας τέχνης, Lille, Γαλλία,

2.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΕΡ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Στις Η.Π.Α., ο ορισμός του σκυροδέματος ως υψηλής αντοχής (High Performance Concrete) από τη Federal Highway Administration περιλαμβάνει οκτώ χαρακτηριστικά απόδοσης: ανθεκτικότητα, αντίσταση στην απολέπιση, αντίσταση στη διάβρωση, αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων, θλιπτική αντοχή, μέτρο ελαστικότητας, συστολή και ερπυσμό.

Για τις σημερινές κατασκευές, αναζητούμε υλικά με τέσσερα διακριτά χαρακτηριστικά: αντοχή, εργασιμότητα, ανθεκτικότητα και οικονομικότητα. Οι τρεις πρώτες ιδιότητες πρακτικά συμπεριλαμβάνουν τις παραπάνω οκτώ προδιαγραφές.

Λέγοντας σκυρόδεμα υψηλής αντοχής, αναφερόμαστε στη βελτίωση κάποιων ή όλων των τριών παραπάνω ιδιοτήτων, γνωρίζοντας ότι για να 'κερδίσουμε' σε μια ιδιότητα, αποδεχόμαστε χαμηλότερα ποσοστά βελτίωσης σε κάποια από τις άλλες (συνεχής βελτιστοποίηση). Ωστόσο, σε γενικές γραμμές όλες οι παραπάνω ιδιότητες βελτιώνονται.

Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά και οι τέσσερις ιδιότητες:

1) ΑΝΤΟΧΗ

Η επίτευξη υψηλότερης αντοχής αρχικά εξασφαλίζει οικονομία υλικού και συνεπαγόμενα μικρότερο ιδιοβάρους-νεκρό φορτίο, το οποίο κατά τη φάση του σχεδιασμού αποτελεί την κύρια επιφόρτιση της κατασκευής (dead loads-G). Αντίστροφα, μικρότερο φορτίο σχεδιασμού συνεπάγεται μικρότερη απαίτηση δομικού υλικού που καλείται να 'φέρει' το φορτίο αυτό. Με θλιπτική αντοχή της τάξης των 200 MPa, το σκυρόδεμα υπερ υψηλής αντοχής (UHPC) προσεγγίζει την αντοχή του χάλυβα, με τη διαφορά ότι η εφελκυστική του αντοχή είναι συγκριτικά χαμηλή οπότε και δεν μπορεί να υποκαταστήσει τη χρήση του, ακόμα κι αν αυτή είναι πολλαπλάσια από την εφελκυστική αντοχή του κοινού σκυροδέματος (~50 MPa).

2) ΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ

Εκτός από το σχεδιασμό και τη μελέτη μιας κατασκευής, σημασία έχει και η σωστή υλοποίηση της, η οποία επηρεάζεται χρονικά και οικονομικά από την εργασιμότητα του υλικού κατασκευής. Είναι προφανές ότι ο χρόνος και το κόστος κατασκευής είναι δύο θεμελιώδεις παράγοντες που καθορίζουν αν θα κτιστεί μια γέφυρα ή ο συγκεκριμένος τύπος κτηρίου. Επιπλέον η εργασιμότητα συνεπάγεται τη συνέπεια και την αξιοπιστία του υλικού. Χρειαζόμαστε καλύτερο εξοπλισμό για να το επιτύχουμε σε βιομηχανική κλίμακα.

Ένα νέο υλικό, όπως το UHPC, υστερεί στο κομμάτι της εργασιμότητας καθώς απαιτείται χρόνος ώστε να αναπτυχθούν νέες μέθοδοι κατασκευής.

3) ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

Παρατηρώντας παλιές κατασκευές από τη Ρωμαϊκή και Βυζαντινή περίοδο που εξακολουθούν να στέκονται, αναρωτιόμαστε ποια θα είναι η διάρκεια ζωής των σύγχρονων κατασκευών. Οι παλαιότεροι μηχανικοί έκτιζαν μεγάλης κλίμακας έργα βασιζόμενοι απλά στις καλύτερες γνώσεις τους και ελπίζοντας ότι οι κατασκευές θα ζήσουν για πάντα. Σήμερα, γνωρίζοντας ότι τίποτα δεν διαρκεί αιωνίως όντας πιο συντηρητικοί, σχεδιάζουμε τα κτήρια και τις γέφυρες μας λαμβάνοντας υπόψιν ένα συγκεκριμένο χρόνο ζωής σχεδιασμού του έργου. Με το χρόνο ζωής σχεδιασμού μιας μεγάλης γέφυρας να κυμαίνεται μεταξύ 100 και 150 χρόνων, χρειαζόμαστε ανθεκτικά υλικά, εύκολα να συντηρηθούν. Το σκυρόδεμα υπερ-υψηλής αντοχής έχει καλές προοπτικές προς αυτή την κατεύθυνση, καθώς ένα από τα προτερήματα του είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής του, που το καθιστά κατάλληλο για μνημειακού χαρακτήρα κατασκευές.

4) ΚΟΣΤΟΣ

Αντιπαραβάλλοντας το UHPC με το συμβατικό σκυρόδεμα, είναι σημαντικό να γίνει σύγκριση του κόστους σε πλήρη βάση. Παρότι η τιμή ενός κυβικού μέτρου σκυροδέματος UHPC είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή του συμβατικού σκυροδέματος (3,5-5 φορές ακριβότερο από ένα συμβατικό σκυρόδεμα κατηγορίας C30/37), πρέπει να ληφθεί υπόψιν η ανάγκη πολύ λιγότερου υλικού σε μία κατασκευή, καθώς και μελλοντικά η διατήρηση πολύ μικρότερου κόστους συντήρησης. Αυτό θα αποτελεί σημαντικό κριτήριο στο μέλλον, καθώς οι μελλοντικοί κώδικες θα τοποθετούν το σχεδιασμό του κύκλου ζωής του έργου στο ίδιο επίπεδο με το σχεδιασμό της δομικής ασφάλειας και λειτουργικότητας.

Προς το παρόν, το υψηλό κόστος του υλικού είναι ένα βασικό εμπόδιο στη διάδοση του. Αρχικά, το UHPC απαιτεί πολύ περισσότερη προσοχή και εξειδικευμένο εξοπλισμό για να εξασφαλιστεί η ποιότητά του. Επιπλέον, στις σύγχρονες κατασκευές, η υψηλή αντοχή δεν αποτελεί σημαντική απαίτηση καθώς υπάρχει περιορισμός στις ελάχιστες διαστάσεις ενός δομικού μέλους από σκυρόδεμα ώστε να εξασφαλίζεται η εργασιμότητα του.

Συνεπώς, για να αξιοποιηθεί πλήρως η αντοχή του σκυροδέματος υπέρ-υψηλής αντοχής, νέες εφαρμογές πρέπει να αναπτυχθούν. Η πολύ υψηλή αντοχή του UHPC δεν θα αξιοποιηθεί εάν αυτό εξακολουθήσει να χρησιμοποιείται σε υπάρχοντες τύπους έργων.

2.4 **ΕΙΔΗ UHPC ΣΤΗΝ ΑΓΟΡΑ**

Οι διάφοροι τύποι σκυροδέματος που εμπίπτουν στην κατηγορία ινοπλισμένου σκυροδέματος υπέρ υψηλής αντοχής και κυκλοφορούν στη Γαλλία είναι :

- Οι διάφοροι τύποι σκυροδέματος Ductal®, συμπεριλαμβανομένου και του RPC (Reactive Powder Concrete), αποτέλεσμα κοινής έρευνας που διεξήχθη από τις εταιρίες Bouygues, Lafarge και Rhodia και διατίθεται στη γαλλική αγορά από τη Lafarge.
- Το σκυρόδεμα BSI / CERACEM® που αναπτύχθηκε από κοινού από την Eiffage και τη Sika

- Το σκυρόδεμα BCVR ανεπτυγμένο από τη βιομηχανία τσιμέντου Vicat και την κατασκευαστική κοινοπραξία Vinci.

Επιπλέον τύποι ινοπλισμένου σκυροδέματος υπέρ-υψηλής αντοχής (UHPFRC) ανεπτυγμένοι για πολυάριθμες εφαρμογές:

- Το σκυρόδεμα CEMTEC-multiscaler, ανεπτυγμένο από την LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) (πλέον IFSTTAR: Institut Français de Sciences et Technologies de Transport) και χρησιμοποιημένο σε ένα μεγάλο αριθμό κατασκευαστικών έργων στην Ελβετία, τη Σλοβενία και τον Καναδά.
- Υλικά εργαστηρίων που αναπτύχθηκαν από τις EDF (Electricité de France) και CERIB (Centre d'études et des Recherches de l'Industrie du Béton).

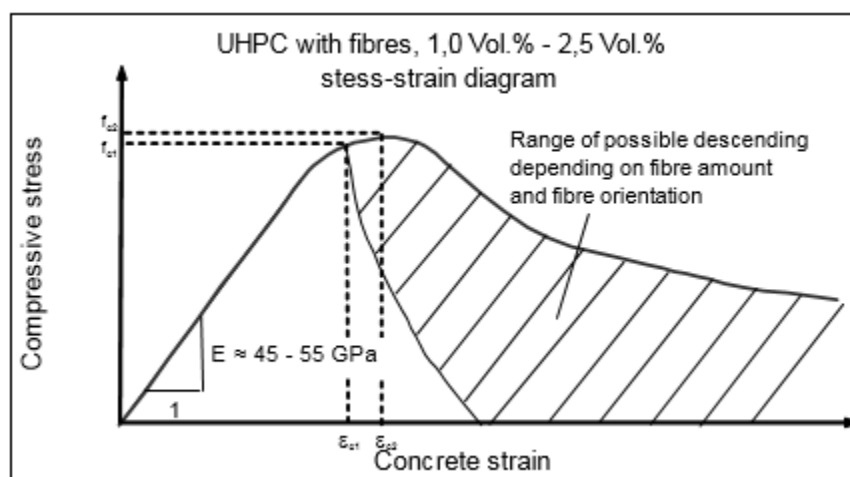
Ένα παράδειγμα τεχνολογίας ανεπτυγμένης εκτός της Γαλλίας είναι το CRC (Concrete Raising Corporation), σκυρόδεμα που παράγεται από την εταιρία Aalborg Portland Cement (Densit) στη Δανία. Αρκετά προϊόντα αναπτύσσονται στη Γερμανία, ωστόσο οι BSI / CERACEM® και Ductal® είναι οι κύριες τεχνολογίες UHPC που χρησιμοποιούνται στη Δυτική Ευρώπη, ενώ η Ductal® είναι η κύρια τεχνολογία που χρησιμοποιείται στην Ασία, την Αυστραλία και τη Βόρεια Αμερική (ΗΠΑ, Καναδάς).

Άλλα προϊόντα UHPFRC λανσαρίστηκαν επίσης στην Ιαπωνική αγορά. Πρέπει να αναφερθεί ότι ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπέρ-υψηλής αντοχής χρησιμοποιείται και σε μη δομικές εφαρμογές με μικρή ή μηδενική περιεκτικότητα σε ίνες χάλυβα (ωστόσο μπορούν ακόμα να περιέχουν ορυκτά και οργανικές ίνες).

2.5 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

2.5.1 Θλιπτική Αντοχή

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπέρ-υψηλής αντοχής (UHPFRC) επιδεικνύει ελαστική συμπεριφορά μέχρι περίπου το 70-80% της θλιπτικής αντοχής f_{ck} , γεγονός που αποδεικνύεται πειραματικά για UHPFRC μέγιστου δυνατού κόκκου αδρανούς. Στο Σχήμα 2.1 παρατηρείται η μη-γραμμική συμπεριφορά του υλικού και ο φθίνων κλάδος μετά την αστοχία.

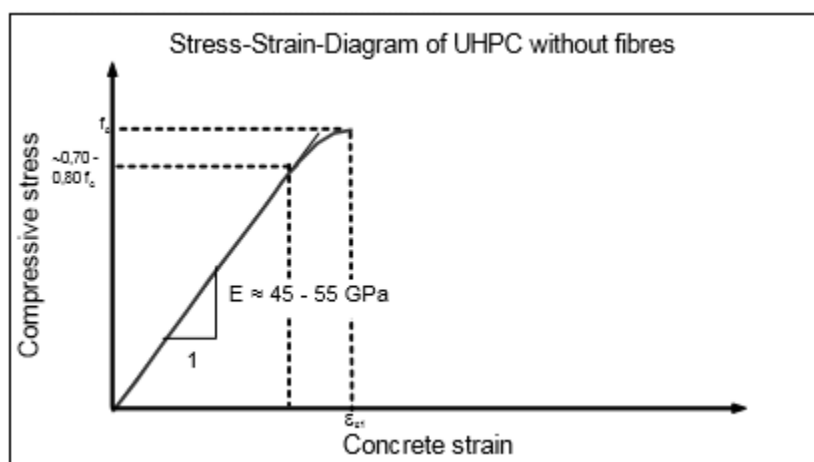


Σχήμα 2.1: Καταστατικός νόμος θλίψης UHPFRC (Ekkehard Fehling, 2004)

Η παραμόρφωση στο σημείο μέγιστης τάσης με λεπτόκοκκα αδρανή εκτιμάται περίπου στο 4.4 ‰. Για βασालτικά αδρανή ή π.χ. για το είδος UHPC-DENSIT με βοξίτη, πρέπει να αναμένονται χαμηλότερες τιμές παραμόρφωσης. Η κλίση του φθίνοντα κλάδου εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε ίνες, την γεωμετρία τους (μήκος, διάμετρος), το μήκος τους σε συνάρτηση με το μέγιστο κόκκο αδρανών, τη δυσκαμψία τους (σε περίπτωση συνδυασμού διαφόρων υλικών ινών) και τον προσανατολισμό τους. Παρότι σε γενικές γραμμές η επίδραση των ινών στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι χαμηλή, χάρη σε μία περιεκτικότητα της τάξης του 2.5% κατ' όγκο, παρατηρείται αύξηση της θλιπτικής αντοχής της τάξης του 15%, γεγονός που οφείλεται στην επίτευξη τριαξονικότητας καθότι η παρουσία ινών δρα ως περίσφιξη για τον πυρήνα.

Για το UHPC, η γεωμετρία των δοκιμών φαίνεται να έχει μικρότερη επιρροή στη θλιπτική αντοχή. Ωστόσο, υφίστανται αντικρουόμενα αποτελέσματα από διαφορετικές πηγές όσον αφορά το παραπάνω ζήτημα. Η θερμική επεξεργασία μπορεί να επιταχύνει την ανάληψη της μέγιστης θλιπτικής αντοχής. Στους 250°C, παρατηρείται μία σημαντική αύξηση της ειλημμένης αντοχής, καθώς η υψηλή θερμοκρασία αφενός επιταχύνει την χημική αντίδραση, αφετέρου οδηγεί σε βελτίωση της μικροδομής

Η αστοχία του μη ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι ψαθυρής μορφής, χωρίς φθίνοντα κλάδο (Σχήμα 2-2). Αυτό ωστόσο παρατηρείται και για σκυροδέματα υψηλής αντοχής με θλιπτική αντοχή $f_c > 90$ MPa.



Σχήμα 2.2: Καταστατικός νόμος θλίψης για UHPC χωρίς ίνες (Ekkehard Fehling, 2004)

Η κλίση του φθίνοντα κλάδου εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε ίνες, την γεωμετρία τους (μήκος, διάμετρος), το μήκος τους σε συνάρτηση με το μέγιστο κόκκο αδρανών, τη δυσκαμψία τους (σε περίπτωση συνδυασμού διαφόρων υλικών ινών) και τον προσανατολισμό τους. Παρότι σε γενικές γραμμές η επίδραση των ινών στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι χαμηλή, χάρη σε μία περιεκτικότητα της τάξης του 2.5% κατ' όγκο, παρατηρείται αύξηση της θλιπτικής αντοχής της τάξης του 15% [3]. Για το σκυροδέμα υπέρ-υψηλής αντοχής, η γεωμετρία των δοκιμών φαίνεται να έχει μικρότερη επιρροή στη θλιπτική αντοχή. Ωστόσο, υφίστανται αντικρουόμενα αποτελέσματα από διαφορετικές πηγές όσον αφορά το παραπάνω ζήτημα. Η θερμική επεξεργασία μπορεί να επιταχύνει την ανάληψη της μέγιστης θλιπτικής αντοχής. Στους 250°C, παρατηρείται μία σημαντική αύξηση της ειλημμένης αντοχής, καθώς η υψηλή θερμοκρασία αφενός επιταχύνει την χημική αντίδραση, αφετέρου οδηγεί σε βελτίωση της μικροδομής. Σύμφωνα με [1,3], ακόμα και σε θερμική επεξεργασία 90°C και διάρκειας 48 ωρών επιτυγχάνεται υψηλότερη θλιπτική αντοχή σε σύγκριση με την κλασική ωρίμανση των 28 ημερών με υγρή συντήρηση.

Η θλιπτική αντοχή μιας χαρακτηριστικής σύνθεσης κυμαίνεται μεταξύ των τιμών (A F G C Groupe de travail BFUP Recommendations / recommendations, 2003):

$$150 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 250 \text{ MPa}$$

Η παραπάνω αντοχή εξαρτάται κυρίως από το λόγο νερού προς τσιμέντο (w/c), ο οποίος μπορεί να ποικίλει στην περίπτωση οργανικών ινών καθώς και από την ύπαρξη ή μη θερμικής επεξεργασίας.

Η χαρακτηριστική τιμή f_{ck} της θλιπτικής αντοχής (στατιστική διαδικασία προσδιορισμού της) λαμβάνεται πειραματικά για κάθε ξεχωριστή σύνθεση UHPC που επιτυγχάνεται. Η μικρότερη διάσταση του φ (διάμετρος κυλινδρικού δείγματος) πρέπει να ικανοποιεί τα εξής (A F G C Groupe de travail BFUP Recommendations / recommendations, 2003):

$$\varphi > 5 l_f \text{ και } \varphi > 6 D_{max}$$

Όπου, l_f : μήκος ινών και D_{max} : διάσταση μέγιστου κόκκου αδρανών

Το αναφερόμενο κυλινδρικό δοκίμιο έχει διαστάσεις $\varnothing 11 \times 22$ cm. Η δοκιμή συμπίεσης εκτελείται με σταθερό ρυθμό φόρτισης. Εάν πρέπει να καθοριστεί ο καταστατικός νόμος του υλικού μετά τη θραύση εφαρμόζεται και έλεγχος παραμόρφωσης, επιβάλλοντας ένα σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης του εμβόλου. Δεδομένων των αναμενόμενων υψηλών επιπέδων αντοχής, η επιφάνεια του δοκιμίου θα πρέπει να εδραστεί προσεκτικά ώστε να διενεργηθεί σωστά η δοκιμή.

Οι δοκιμές μπορούν να πραγματοποιηθούν σε κυλινδρικά ή κυβικά δοκίμια διαφορετικών διαστάσεων, υπό την προϋπόθεση ότι ο συντελεστής συσχέτισης συναρτήσει της προσδιορισμένης τιμής του δοκιμίου προσδιορίζεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής του σχεδιασμού είτε στην τεχνική περιγραφή του UHPFRC.

Η αρχική πειραματική προσέγγιση της θλιπτικής αντοχής, μπορεί να επαληθευτεί προσεγγιστικά από τις εξής θεωρητικές σχέσεις:

$$\sigma_c = -f_{cd} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \text{ για } 0 \geq \varepsilon_c \geq \varepsilon_{c2} \quad (2-1)$$

Όπου ε_{c2} ανηγμένη παραμόρφωση στη μέγιστη τάση
 ε_{c2u} ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας σχεδιασμού

Ο εκθέτης n στην εξίσωση Εξ. (2-1) μπορεί να ληφθεί από τον Πίνακα 2.1. Ο ρόλος του είναι η μετάβαση στους νόμους του σκυροδέματος υψηλής αντοχής (HSC/HPC). Για σκυροδέματα υπέρ-υψηλής αντοχής κατηγορίας UHPC 210 και άνω, χρησιμοποιείται γραμμική σχέση. Επιπλέον, για σκυροδέματα UHPC χωρίς ίνες ή με ανεπαρκή περίσφιξη, θεωρείται $\varepsilon_{c2} = \varepsilon_{c2u}$, ώστε να ληφθεί υπόψιν η ψαθυρότητα αυτών των περιπτώσεων.

$f_{ck}[N/mm^2]$	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210
N	1,50	1,45	1,40	1,35	1,30	1,25	1,20	1,15	1,10	1,05	1,00

Πίνακας 2.1: τιμές εκθέτη n για υπολογισμό θλιπτικής αντοχής

Η τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής αντοχής ακολουθεί στην Εξ. (2-2).

$$f_{cd} = 0.85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c \cdot \gamma_c} \quad (2-2)$$

Όπου γ_c τοπικός συντελεστής ασφαλείας (κατά EN1992-1-1 $\gamma_c = 1.50$)

γ_c' πρόσθετος τοπικός συντελεστής ασφαλείας που λαμβάνει υπόψιν την ευαισθησία αποκλίσεων κατά την παραγωγική διαδικασία, καθώς και την ψαθυρή αστοχία των σκυροδεμάτων υψηλής αντοχής. Λαμβάνεται ως :

$$1.00 \leq \gamma_c' = \frac{1}{1.1 - \frac{f_{ck}}{500}} \leq 1.25$$

Η ανηγμένη παραμόρφωση στη μέγιστη τάση μπορεί να υποτεθεί στα $\epsilon_{c2} = 2,2\%$ ξεκινώντας από δύναμη κατηγορίας C100/115 σύμφωνα με το EN 206. Για σκυροδέματα UHPC με ίνες ή επαρκή οπλισμό, ένας πλαστικός κλάδος μέχρι την ανηγμένη παραμόρφωση ϵ'_{c2u} μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να ληφθεί υπόψιν η βελτιωμένη πλαστιμότητα. Η τιμή του ϵ'_{c2u} μπορεί να καθοριστεί με τέτοιο τρόπο ώστε η καμπτική φέρουσα ικανότητα να προσαρμοστεί στην ειλημμένη καμπτική φέρουσα ικανότητα από τον καταστατικό νόμο τάσεων-παραμορφώσεων μέσω ενός καθοδικού κλάδου και υποθέτοντας διαρροή χάλυβα στην εφεκλούμενη ζώνη. Ωστόσο, εφόσον η επιρροή του καθοδικού κλάδου είναι ελάχιστος σημασίας, η πρόσθετη παραμόρφωση (μήκος του οριζώντιου κλάδου στην καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων) μπορεί να θεωρηθεί ως οικονει γραμμική.

2.5.2 Εφελκυστική Αντοχή

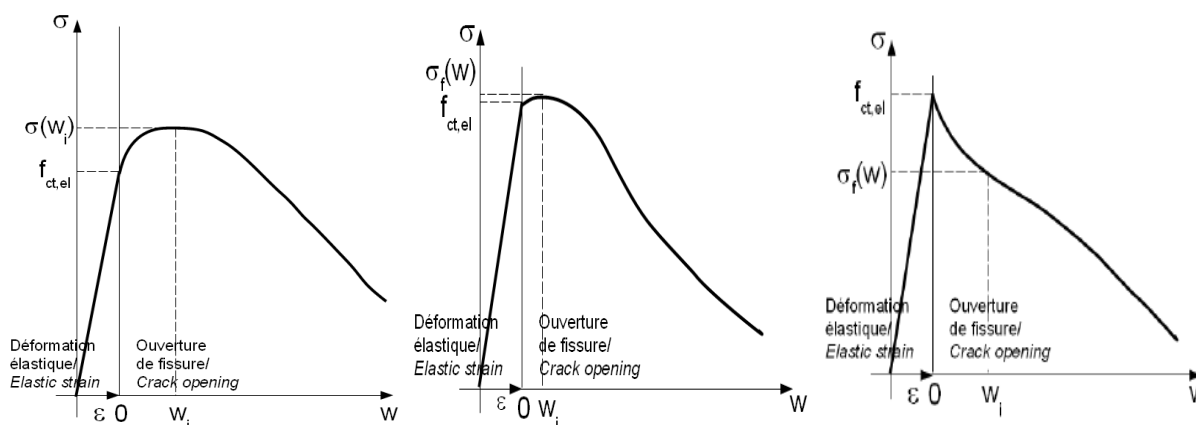
Όπως και το σύνηθες σκυρόδεμα, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπέρ-υψηλής αντοχής παρουσιάζει γραμμικώς ελαστική εφελκυστική συμπεριφορά μέχρι την οριακή τιμή $f_{ct,el}$ με σταθερό μέτρο ελαστικότητας (Young) τόσο σε θλίψη, όσο και σε εφελκυσμό. Ωστόσο, αντίθετα από το σύνηθες σκυρόδεμα, η τάση δεν μηδενίζεται αφότου το υλικό φτάσει το όριο του $f_{ct,el}$ χάρη στην ύπαρξη των ινών. Αυτό συμβαίνει καθώς, ύστερα από τη μερική θραύση του πυρήνα οι τάσεις πλέον αναλαμβάνονται από τις ίνες. Το εφελκυστικό φορτίο που αναλαμβάνεται από τις ίνες εκφυλίζεται σε τάση σ_f ίση με το λόγο της ασκούμενης δύναμης διά της επιφάνειας της διατομής σκυροδέματος. Καθώς το εύρος της(των) ρωγμής(ων) μεγαλώνει, οι ίνες σταδιακά εξολκεύονται, γεγονός που μειώνει την αρχική τάση (λόγω πολύ υψηλής αντοχής των χαλύβδινων ινών, κρίσιμος μηχανισμός αστοχίας αποδεικνύεται η συνάφεια ινών-σκυροδέματος και όχι η διαρροή των ινών).

Η ποσότητα των ινών, το μήκος τους και ο λόγος μήκους/διαμέτρου, οδηγεί σε διαφορετικούς τύπους καταστατικών εξισώσεων εφελκυσμού. Για παράδειγμα, κρατυνόμενη συμπεριφορά μπορεί να

προκύπτει όταν η αντοχή μετά τη θραύση είναι μεγαλύτερη από την αντοχή του πυρήνα σκυροδέματος. Διαφορετικά προκύπτει μη κρατυνόμενη συμπεριφορά όταν η αντοχή μετά τη θραύση παραμένει μικρότερη από την αντοχή του πυρήνα σκυροδέματος (Σχήμα 2.3).

Συνοπτικά, ο καταστατικός νόμος εφελκυσμού για τα ινοπλισμένα σκυροδέματα υπέρ-υψηλής αντοχής (UHPRFC) χαρακτηρίζεται από:

- Μία γραμμικώς ελαστική περιοχή μέχρι την τιμή του $f_{ct,el}$.
- Μία μετελαστική περιοχή μετά τη θραύση που γενικώς χαρακτηρίζεται από έναν νόμο τάσης-ανοίγματος ρωγμής ($\sigma_f - w$), είτε από έναν νόμο τάσης-παραμόρφωσης ($\sigma_f - \varepsilon$). Η τάση σ_f είναι συμβατικά ίση με το λόγο δύναμης προς επιφάνεια σκυροδέματος.



(a): αύξων ρυθμός ανάπτυξης παραμορφώσεων (κράτυση)

(b): χαμηλός αύξων ρυθμός ανάπτυξης παραμορφώσεων

(c): φθίνων ρυθμός ανάπτυξης παραμορφώσεων

Σχήμα 2.3: Καταστατικός νόμος εφελκυσμού UHPFRC (A F G C Groupe de travail BFUP Recommendations / recommendations, 2003)

Παρότι ο επαρκής χρόνος ανάμειξης και οι παραδοσιακές συνθήκες τοποθέτησης διασφαλίζουν χαμηλή διασπορά στην αντοχή διαρροής $f_{ct,el}$, η μετελαστική αντοχή (μετά τη θραύση) σ_f , στην οποία συμβάλλουν οι ίνες, εξαρτάται σε έναν μεγάλο βαθμό, τόσο από τη διαδικασία χύτευσης του UHPFRC, όσο και από τον τύπο και τον προσανατολισμό των ινών.

Κάθε ροή κατά τη διαδικασία της χύτευσης τείνει να ευθυγραμμίσει τις ίνες με τη διεύθυνση της λόγω της φυσικής συμπεριφοράς των ινών στην υδαρή-ρευστή φάση του σκυροδέματος πριν την πλήρωση του καλουπιού. Οι ίνες που βρίσκονται κοντά στις παρειές του καλουπιού είναι φυσικά διατεταγμένες παράλληλα σε αυτές. Αυτό προκύπτει μόνο όταν η απόσταση από την παρεία είναι μικρότερη ή ίση από το μήκος μιας ίνας. Ωστόσο, όσο το πάχος του μέλους από UHPFRC πλησιάζει το μήκος των ινών, τόσο μεγαλύτερη είναι η συνεισφορά τους στην εφελκυστική αντοχή των μελών. Λίγες είναι οι φορές που μπορεί να προκύψει ο προτιμώμενος προσανατολισμός των ινών. Στον Πίνακα 2.2 φαίνεται η αναλυτική επίδραση της διεύθυνσης χύτευσης στην εφελκυστική αντοχή του υλικού.

Test specimens	Age	Axial tension				Bending tension						
		M1Q		B3Q		Prism 160 * 40 * 40		Beam 700 * 150 * 150				
Concrete		M1Q		B3Q		M1Q		M1Q		B3Q		
Curing		90°		90°		90°		WL	90°		WL	90°
Pouring direction		horizontal	vertical	horizontal	horizontal	vertical	horizontal	vertical	horizontal	horizontal	horizontal	
Fracture energy	7d	16757	9993	-	20100	15097	-	20355	14543	-	-	
	28d	14555	-	12932	18052	-	-	19892	-	-	-	
$G_{F,10\%}$ [N/m]	28d*	17014	-	-	19820	-	-	-	-	-	-	
Tensile strength	7d	14,2	7,9	-	34,0	22,5	11,1	22,1	17,6	18,3	18,0	
	28d	13,3	-	7,0	35,7	-	13,3	22,2	-	20,4	17,9	
f_{ct} [N/mm ²]	56d	17,7	-	-	36,3	-	16,2	22,1	-	24,2	18,1	

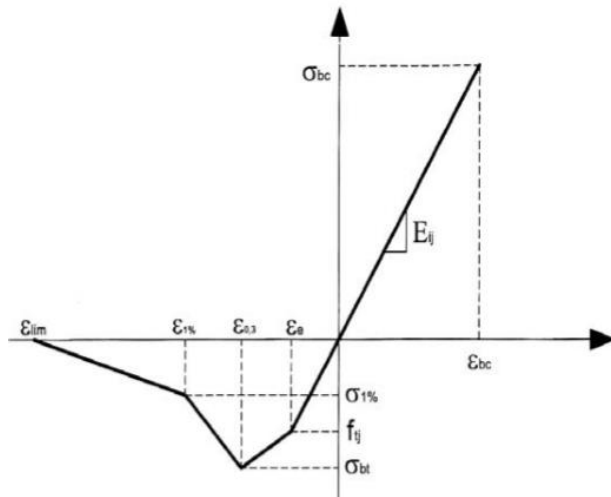
Πίνακας 2.2: Επίδραση της διεύθυνσης σκυροδέτησης στην εφελκυστική αντοχή και στην εκλυόμενη ενέργεια κατά τη ρηγμάτωση (Ekkehard Fehling, 2004)

Η αρχικά πειραματική προσέγγιση των τάσεων του καταστατικού νόμο, επαληθεύεται θεωρητικά από την ακόλουθη Εξ. (2-3), η οποία αφορά ινοπλισμένο σκυρόδεμα, χρησιμοποιώντας καταστατικό νόμο τάσης- εύρους ρωγμής $\sigma = f(w)$. Επιπλέον εισάγεται ως έννοια το χαρακτηριστικό μήκος l_c , ώστε να γίνει αναγωγή εύρους ρωγμής w - παραμόρφωσης ε (RESPLENDINO, 2004):

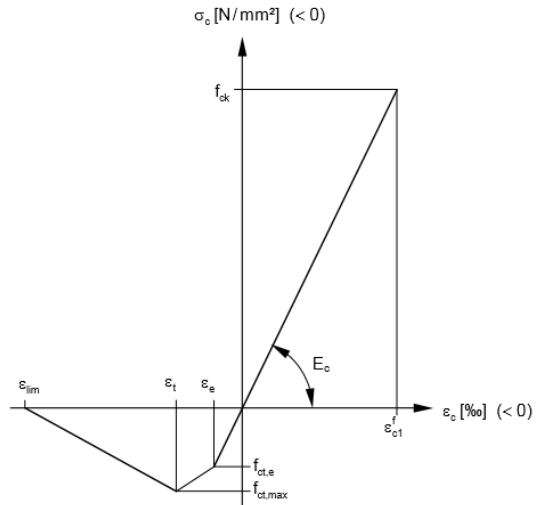
$$\varepsilon = \frac{f_{tj}}{E_{ij}} + \frac{w}{l_c} \quad (2-3)$$

Η τιμή του l_c εξαρτάται από τη διατομή. Για ορθογωνική ή διατομή πλακοδοκού T $l_c = \frac{2}{3} \cdot h$, όπου ύψος διατομή.

Η ανάλυση για τυπικές διατομές βασίζεται στις εξής παραδοχές: επιπεδότητα διατομών και συμπεριφορά σκυροδέματος σύμφωνα με τον καταστατικό νόμο του Σχήμα 2.4a που ακολουθεί. Οι οριακές τάσεις σε λειτουργικότητα είναι κοινές με το συμβατικά οπλισμένο και προεντεταμένο σκυρόδεμα : 0.3 mm για κανονική θραύση στάθμης επιτελεστικότητας A (περιορισμός βλαβών) και 0.1 mm για θραύση στάθμης επιτελεστικότητας B (σημαντικές βλάβες)



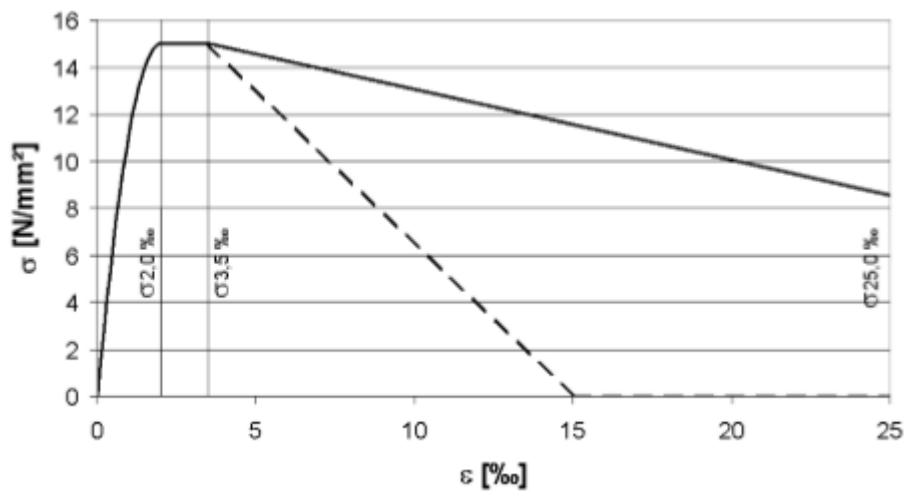
Σχήμα 2.4α: Καταστατικός νόμος UHPC σε σε ελέγχους ΟΚΛ (Michael Schmidt)



Σχήμα 2.4b απλοποιημένος καταστατικός νόμος σε ελέγχους ΟΚΛ (RESPLENDINO, 2004)

Για τον υπολογισμό της Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας (ΟΚΛ), μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια κάπως απλοποιημένη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4b, σύμφωνα με τις συστάσεις του DAfStb UHPC 2003.

Παρακάτω παρατίθεται ο τρόπος υπολογισμού των σημείων της καμπύλης για την κρατυνόμενη περίπτωση (Σχήμα 2.3α και Σχήμα 2.5)

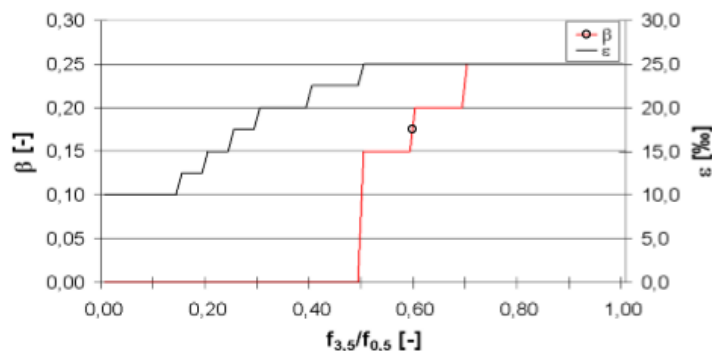


Σχήμα 2.5: Απλοποιημένη σχέση εφελκυστικών τάσεων- παραμορφώσεων (Michael Schmidt)

$$\sigma_{2.0 - 3.5 \%_0} = f_{ctk0.5} \cdot 0.37 \tag{2-4}$$

$$\sigma_{25\%_0} = \beta \cdot f_{ctk3,5} \tag{2-5}$$

Ο συντελεστής β καθώς και ο συντελεστής 0.37 καθιερώθηκαν επαν-υπολογίζοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών. Όσον αφορά το συμβατικό σκυρόδεμα, ο συντελεστής β εξαρτάται από το λόγο $f_{ctk, 3.5} / f_{ctk, 0.5}$. λαμβάνεται από το Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Προσδιορισμός συντελεστή β (Michael Schmidt)

Συνήθως ένας περιορισμός τάσεων της τάξης του 25%ο είναι επαρκής. Ωστόσο επανυπολογισμοί των αποτελεσμάτων κατέδειξαν πως για λόγους $f_{3.5} / f_{0.5} < -0,5$, ο σχεδιασμός μπορεί να ξεπερνά τα ασφαλή όρια, οπότε και ορίζεται νέα απομειωμένη καμπύλη (Σχήμα 2.6).

ΣΥΝΘΗΚΗ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ

Για να εξασφαλιστεί η επαρκής πλαστιμότητα του υλικού σε κάμψη, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το ακόλουθο κριτήριο που αφορά, τόσο φθίνοντα ρυθμό ανάπτυξης παραμορφώσεων, όσο και υλικά με χαμηλό ποσοστό κράτυνσης:

$$\frac{1}{w_{lim}} \cdot \int_0^{w_{lim}} \frac{\sigma(w)}{K_{global}} dw \geq \max(0.4 \cdot f_{ctm,el} : 3 \text{ MPa}) \quad (2-6)$$

Όπου:

- w_{lim} μπορεί να ληφθεί ως $w_{lim} = 0.3 \text{ mm}$
- $f_{ctm,el}$ μέση ελαστική εφελκυστική αντοχή
- $\sigma(w)$ χαρακτηριστική τάση μετά τη θραύση
- K_{global} ...όπως ορίζεται παρακάτω, στην Εξ. 2-8.

ΣΥΝΘΗΚΗ ΜΗ ΨΑΘΥΡΟΤΗΤΑΣ

Η μη ψαθυρότητα της διατομής πρέπει να διασφαλίζεται με το να ελέγχεται ότι το φορτίο αστοχίας να υπερβαίνει το φορτίο που οδηγεί σε ρηγμάτωση.

2.5.2.1 Συνεισφορά της ινόπλισης

Για να προσδιοριστεί η επίδραση του προσανατολισμού των ινών, χρησιμοποιείται ένα σύνολο από συντελεστές K προσδιοριζόμενους κατά τη διάρκεια δοκιμών καταλληλότητας που πραγματοποιούνται σε συνθήκες σκυροδέτησης που προσομοιάζουν τις πραγματικές συνθήκες του έργου. Οι διάφορες τιμές του συντελεστή K καθορίζονται θεωρώντας εφελκυστική αντοχή του υλικού στις κύριες διευθύνσεις τάσεων του δοκιμίου (Εικόνα 2.15).

Συγκεκριμένα, ο συντελεστής K αποτελεί έναν απομειωτικό συντελεστή που λαμβάνει υπόψη την απόκλιση του μελετημένου σε ιδανικές συνθήκες πειράματος προσανατολισμού των ινών σε ένα δοκίμιο, σε σχέση με τον πραγματικό προσανατολισμό που οι ίνες θα λάβουν κατά την χύτευση.

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η πιθανή αδυναμία ανακατανομής έντασης λόγω των διαστάσεων της διατομής, διακρίνουμε μία τοπική (*local*) και μία καθολική τιμή (*global*) του συντελεστή K .

- Ο συντελεστής K_{local} αντιστοιχεί σε τοπικές τάσεις που απαιτούν καλή αντοχή των ινών σε κρίσιμες περιοχές (κατανομή τάσεων προέντασης). Υπολογίζεται ως ο λόγος της μέσης μέγιστης τιμής των διαγραμμάτων $F-w$ ή $M-W$ που λαμβάνετε από σκυροδετημένες δοκούς υπό δοκιμή καταλληλότητας, προς τη μέση ελάχιστη τιμή των διαγραμμάτων $F-w$ ή $M-W$ που λαμβάνετε από δοκίμια υπό δοκιμή καταλληλότητας.

$$K_{local} = \frac{\overline{M_{m,max,j}}}{M_{(s,max,i)min}} \quad (2-7)$$

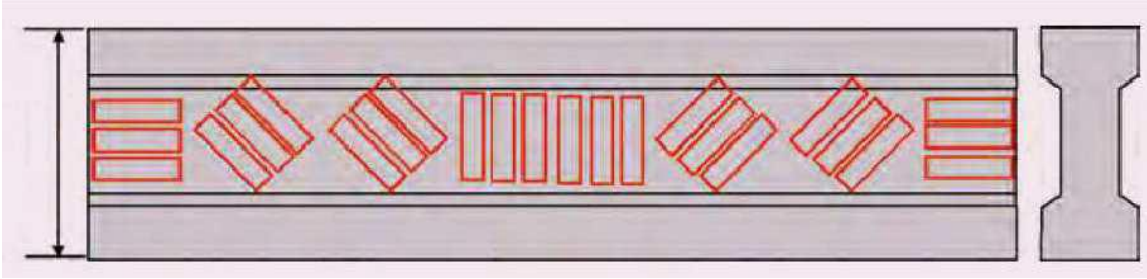
- Ο συντελεστής K_{global} αφορά τις συνολικές επιπτώσεις στις τάσεις οι οποίες απαιτούν καλή αντοχή των ινών σε ευρείες περιοχές που δεν θα επηρεαστούν από μία τοπική στέλεια (διατμητική ή καμπτική αντοχή πλάκας). Υπολογίζεται ως ο λόγος της μέσης μέγιστης τιμής των διαγραμμάτων $F-w$ ή $M-W$ που λαμβάνετε από σκυροδετημένες δοκούς υπό δοκιμή καταλληλότητας, προς τη μέση μέγιστη τιμή των διαγραμμάτων $F-w$ ή $M-W$ που λαμβάνετε από δοκίμια υπό δοκιμή καταλληλότητας.

$$K_{global} = \frac{\overline{M_{m,max,j}}}{M_{s,max,j}} \quad (2-8)$$

Μια πρώτη εκτίμηση των συντελεστών K σε περίπτωση αρχικού σχεδιασμού είναι $K_{local} = 1.75$ και

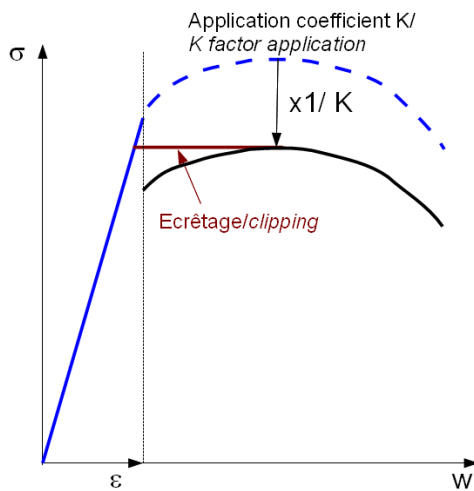
$K_{global} = 1.25$.

Ο συντελεστής $1/K$ εφαρμόζεται αποκλειστικά στην μετελαστική (μετά τη θραύση) περιοχή του εφελκυστικού καταστατικού νόμου (Σχήμα 2.7).

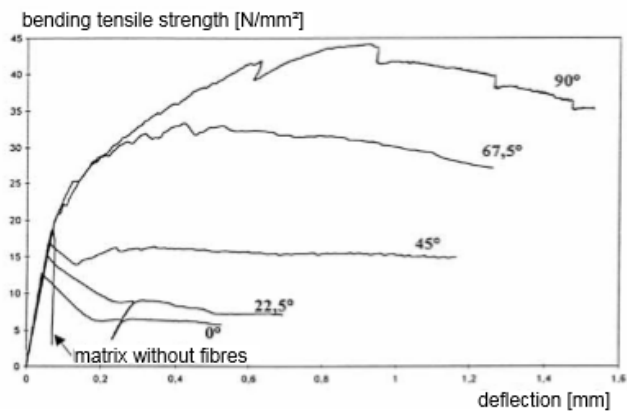


Εικόνα 2.15: παράδειγμα δείγματος (διαμήκης διατομή) για τον προσδιορισμό του K σε διάφορες διευθύνσεις (A F G C Groupe de travail BFUP Recommendations / recommendations, 2003)

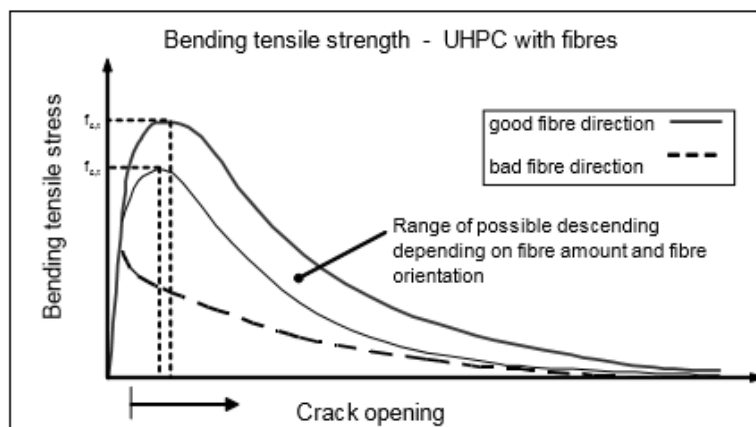
Εποπτικά, η επιρροή της κλίσης των ινών στην καμπτική αντοχή του ινοπλισμένου UHPC φαίνεται στο Σχήμα 2.8(a,b).



Σχήμα 2.7: παράδειγμα εφαρμογής του συντελεστή K στο μετελαστικό κλάδο του καταστατικού νόμου εφελκυσμού



Σχήμα 2.8a: Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στην καμπτική συμπεριφορά ($f_{ctb-\epsilon}$) (Ekkehard Fehling, 2004) (Jörg Jungwirth, 2004)



Σχήμα 2.8b: Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στην καμπτική συμπεριφορά (f_{ctb-w}) (Ekkehard Fehling, 2004)

2.5.2.2 Πειραματικός προσδιορισμός εφελκυσμού (Jörg Jungwirth, 2004)

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η συνεργασία των ινών στη συμπεριφορά του UHPC στην πράξη. Για το λόγο αυτό, παρατίθεται η πειραματική προσέγγιση της εφελκυστικής αντοχής δείγματος UHPFRC που διενεργήθηκε στο εργαστήριο δομικού σκυροδέματος (IS BETON-EPFL) του École polytechnique fédérale de Lausanne.

Το χρησιμοποιούμενο για τις δοκιμές υλικό είναι το CERACEM (BFM-Millau), παρεχόμενο ως μίγμα. Η σύνθεση του δίνεται παρακάτω στον Πίνακα 1. Ο τύπος σκυροδέματος CERACEM (BFM-Millau) ανήκει στην κατηγορία υλικών BSI®/CERACEM, που έχει αναπτυχθεί από τις εταιρίες SIKA και EIFFAGE. Το υλικό χαρακτηρίζεται από μία σχετικά χονδρόκοκκη σύνθεση συγκριτικά με άλλα σκυροδέματα υπέρ-υψηλής αντοχής, εμπεριέχοντας στη μήτρα του αδρανή έως και 7 mm. Επίσης, η διάμετρος των προστιθέμενων ινών, της τάξης των 0.3 mm, θεωρείται σχετικά μεγάλη.

Components		Quantity
Premix (cement, silica fume, sand and granular 0 - 7 mm)	kg/m ³	2355
Steel fibers ($l_f = 20$ mm, $\varnothing_f = 0.3$ mm, $\rho_f = 2.5$ vol. %)	kg/m ³	195
SIKA specific superplasticizer	kg/m ³	44.6
Water	kg/m ³	195

Πίνακας 2.3: Σύνθεση σκυροδέματος υπέρ-υψηλής αντοχής (UHPC)

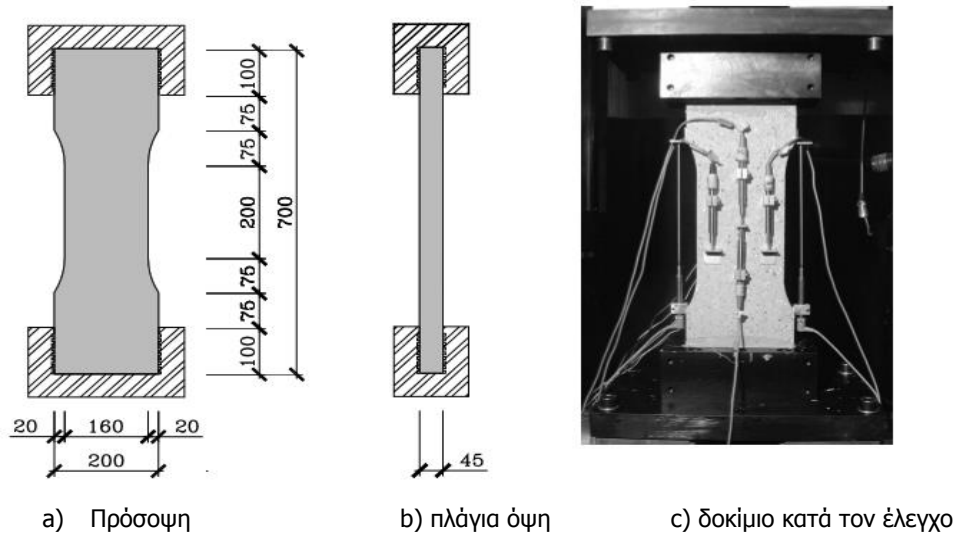
Με στόχο την επίτευξη μιας αξιόπιστης αντοχής, πρέπει να ακολουθείται μια αυστηρή διαδικασία ανάμιξης. Τα μίγματα αναμιγνύονται σε αναμικτήρα κατακόρυφου άξονα που εξασφαλίζει υψηλή απόδοση. Για τη σκλήρυνση, τα δείγματα καλύπτονται με πλαστικό έλασμα ώστε να αποφευχθεί η ξήρανση τους μετά την χύτευση. Το καλούπι αφαιρείται ύστερα από τρεις μέρες και τα δείγματα φυλάσσονται υπό συνθήκες υγρής συντήρησης μέχρι τη δοκιμή. Παράλληλα, στα σκληρυμένα δείγματα πραγματοποιούνται συστηματικοί ποιοτικοί έλεγχοι ώστε να εξασφαλιστεί η σταθερή απόδοση του UHPC. Όλες δοκιμές πραγματοποιούνται μετά το πέρας των 28 ημερών.

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΛΙΚΟΥ

Για να ληφθούν υπόψιν οι τοπικές επιδράσεις της ρηγμάτωσης, η εφελκυστική αντοχή του υλικού αναλύθηκε μέσω δύο διαφορετικών δοκιμαστικών σειρών. Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια σταθερής διατομής ώστε να μελετηθεί η ομοιογενώς κατανομημένη συμπεριφορά του υλικού μέχρι τη ρηγμάτωση. Οι τοπικές επιδράσεις της ρηγμάτωσης διερευνώνται με τη βοήθεια δοκιμών με εντοπισμένη τοπική ατέλεια (εγκοπή).

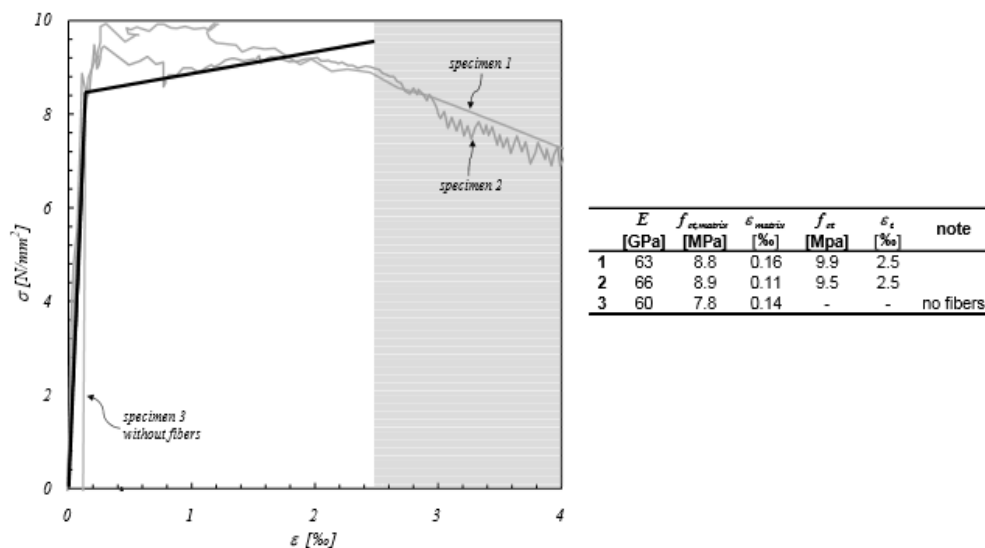
ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

Οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιούνται σε διατομές σχήματος I (τύπου dogbone), μήκους 700 mm, πάχους 45 mm και πλάτους 160 mm στη μετρούμενη ζώνη (Εικόνα 2.2). Η δοκιμή πραγματοποιείται όπως μία δοκιμή εφελκυσμού σε περισφιγμένο δοκίμιο. Το δοκίμιο σταθεροποιείται με κόλλα στο σημείο σφήνωσης ώστε να αποφευχθεί τυχόν εκκεντρότητα και περιστροφή. Η δοκιμή πραγματοποιείται υπό σταθερό ρυθμό φόρτισης της τάξης των 0.33 mm/min. Οι παραμορφώσεις μετρούνται από τέσσερα μετρητικά παραμόρφωσης LVDT (displacement transducer) στην μπροστινή πλευρά και από 5 μηχανοσκόπια στην πίσω πλευρά. Για να αναλυθεί η συνεισφορά των δύο υλικών (μήτρα σκυροδέματος και ίνες), ελέγχονται τόσο ινοπλισμένα δοκίμια όσο και μη ινοπλισμένα δοκίμια.



Εικόνα 2.16: Δοκίμιο διατομής dogbone για τη δοκιμή εφελκυσμού (διαστάσεις σε mm)

Πραγματοποιήθηκαν δυο σειρές δοκιμών, με και χωρίς ίνες. Το Σχήμα 2.9 δείχνει το συνεπαγόμενο διάγραμμα $\sigma - \varepsilon$. Τόσο τα ινοπλισμένα δοκίμια 1 & 2, όσο και το μη ινοπλισμένο δοκίμιο 3 δείχνουν μια αρχική ελαστική συμπεριφορά με μέτρο ελαστικότητας της τάξεως των 60 MPa (τέμνον μέτρο ελαστικότητας για $0-1/3 f_{ct}$). Σε αυτή τη φάση οι ίνες δεν έχουν σχεδόν καμία επιρροή και η συμπεριφορά καθορίζεται αποκλειστικά από τη μήτρα σκυροδέματος. Όταν η μέση τάση φτάνει την τιμή των 8.5 MPa περίπου, εμφανίζεται μια αρχική ρηγμάτωση. Για το μη ινοπλισμένο δοκίμιο (δοκίμιο 3), το παραπάνω οδηγεί σε ψαθυρή αστοχία. Ωστόσο, η τάση στα ινοπλισμένα δοκίμια 1 και 2 ελαφρώς αυξάνεται έως και 10 MPa. Αυτό συμβαίνει χάρη στην ύπαρξη υψηλού ποσοστού ινών. Οι ίνες που διαπερνούν τη ρωγμή παραλαμβάνουν μεγαλύτερη συνολική δύναμη από τη μήτρα τσιμέντου. Η συμπεριφορά είναι ανάλογη αυτής του συμβατικού σκυροδέματος, που χαρακτηρίζεται από αύξηση της φέρουσας ικανότητας μετά τη θραύση. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης πραγματοποιείται πολλαπλή ρηγμάτωση. Αυτό το φαινόμενο κατανέμεται συστηματικά σε όλο το μήκος του δοκιμίου, οπότε και η ρηγμάτωση λαμβάνεται ως κατανεμημένη. Το πολύ μικρό άνοιγμα των ρωγμών (micro-cracks) είναι επαρκές ώστε να ενεργοποιήσει τη λειτουργία των ινών επιτρέποντας τη διάδοση της έντασης από τη μήτρα. Σε μία παραμόρφωση ε της τάξης των 2.5 ‰, έχουν διαμορφωθεί όλες οι ρωγμές και η αντοχή συνάφειας των ινών που διαπερνούν τη ρωγμή έχει επιτευχθεί σε μια ίνα. Η παραμόρφωση συγκεντρώνεται σε αυτή τη ρωγμή (κύρια), η οποία και μεταπίπτει σε κανονική ρωγμή (macro-crack). Σταδιακά οι ίνες αποσπώνται από τη μήτρα σκυροδέματος στην περιοχή της ρωγμής.



a) Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων, και b) Αποτελέσματα

Σχήμα 2.9: συμπεριφορά UHPC προ-θραύσης

Πολλές πηγές προτείνουν διγραμμική σχέση για να προσεγγίσουν τη συμπεριφορά των σκυροδεμάτων υπέρ-υψηλής αντοχής.

1. Ελαστική απόκριση της μήτρας σκυροδέματος που χαρακτηρίζεται από το μέτρο ελαστικότητας (Young) και την εφελκυστική αντοχή.
2. Γραμμική προσέγγιση της φάσης πολλαπλής ρηγμάτωσης μέχρι μία ανώτατη αντοχή συνάφειας των ινών που διαπερνούν τις ρωγμές.

Για το υπό δοκιμή UHPC, όπου η διαφορά μεταξύ της αντοχής της μήτρας σκυροδέματος και της τελικής φέρουσας ικανότητας (f_{ult}) είναι αρκετά μικρή, η γραμμική προσέγγιση του σταδίου πολλαπλής ρηγμάτωσης δεν αποτελεί ιδανική λύση. Καθώς ο μικρός αριθμός των εξεταζόμενων δοκιμών δεν επιτρέπει μια λεπτομερή ανάλυση, η διγραμμική σχέση υιοθετείται ως πρώτη προσέγγιση.

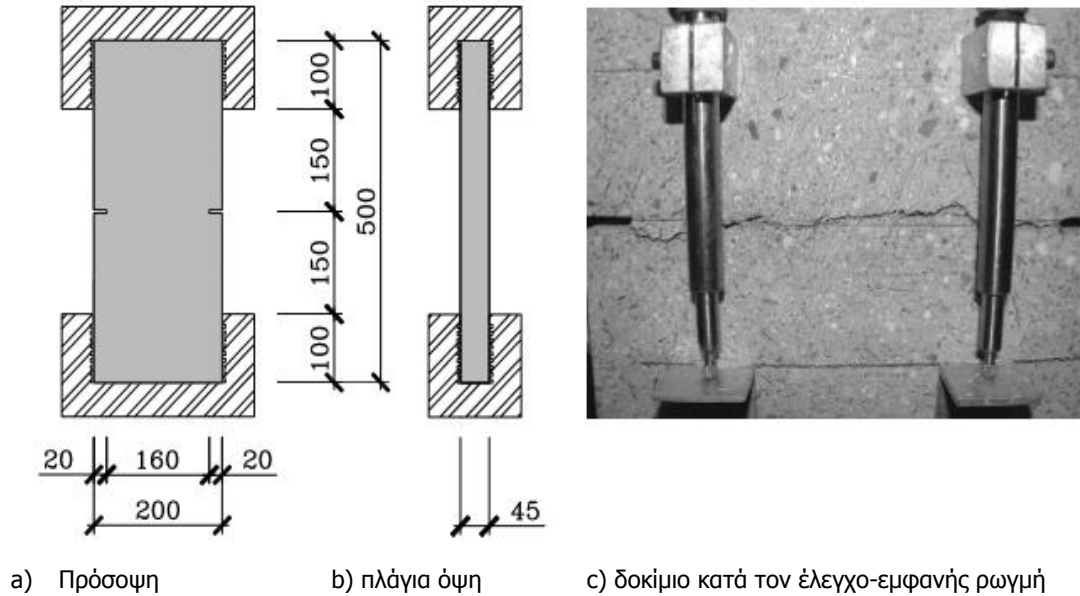
Το εύρος των ρωγμών στο στάδιο της ρηγμάτωσης μπορεί να εκτιμηθεί, χρησιμοποιώντας μεθοδολογία ίδια με αυτή του συμβατικού σκυροδέματος. Με την παραδοχή της πλήρους μετάδοσης των τάσεων από τις ίνες (μήκους $l_f=20$ mm) που διαπερνούν τη ρωγή στη μήτρα σκυροδέματος μέχρι την απόσταση των $l_f/2$, το μέγιστο εύρος ρωγμής είναι $s_{max} = 2 * l_f/2 = 20$ mm. Εάν υπάρχουν δύο ρωγμές με εύρος-άνοιγμα μεγαλύτερο από τη μέγιστη απόσταση μεταξύ ινών, εμφανίζεται εκ νέου ρωγή. Συνεπώς, το ελάχιστο εύρος ρωγμής είναι $s_{min} = l_f/2 = 10$ mm. Τελικά, το μέσο εύρος ρωγμής μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$sr = \frac{3}{4} l_f = 15 \text{ mm}, \text{ εύρος το οποίο συνάδει με τα αποτελέσματα των δοκιμών.}$$

ΡΗΓΜΑΤΩΣΗ

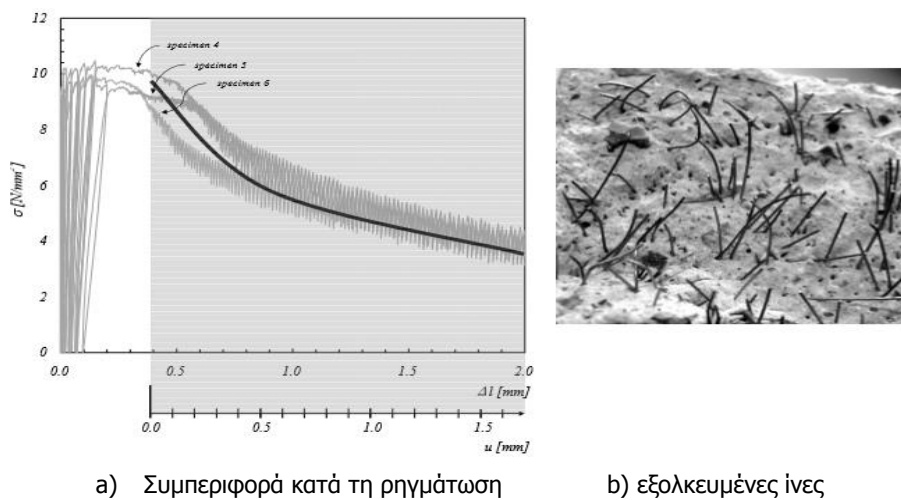
Η πειραματική συμπεριφορά κατά τη ρηγμάτωση του UHPC μετά το σχηματισμό της κύριας ρωγμής μπορεί να παρατηρηθεί μέσω μιας δοκιμής εφελκυσμού σε δοκίμιο με αρχική ατέλεια (Εικόνα 2.17). Η διατομή του δοκιμίου αποκτά μία αρχική εγκοπή στο πλάτος των 160 mm ούτως ώστε να προδιαγραφεί η θέση του σχηματισμού της ρωγμής. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της δοκιμής παραμένουν σταθερά. Η ανάπτυξη της ρωγμής παρατηρείται μέσω μηχανοσυόμετρων στην πίσω πλευρά ενώ το άνοιγμα της ρωγμής μετράται με τη βοήθεια δύο LVDT στην μπροστινή πλευρά του δοκιμίου. Η ρωγή αναπτύσσεται καθ'όλο το πλάτος του δοκιμίου μετά από αρκετούς κύκλους προ-φόρτισης. Οι κύκλοι προ-φόρτισης ξεκινούν από μία αρχική ονομαστική τάση των 5 MPa. Σε κάθε μεταγενέστερο κύκλο φόρτισης η μέγιστη δύναμη

αυξάνεται κατά 0.5 MPa μέχρι το μηκυσιόμετρο που βρίσκεται πάνω από τη ρωγμή στο πίσω μέρος του δοκιμίου να σημάνει την αρχή της διάνοιξης της ρωγμής. Ακολούθως, η διάνοιξη των ρωγμών καθοδηγείται από ένα κύκλο φόρτισης με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης της τάξης των 0.08 mm/min.



Εικόνα 2.17: δοκίμιο με αρχική ατέλεια- εγκοπή για τη δοκιμή εφελκυσμού

Για να ληφθεί το πραγματικό άνοιγμα-εύρος της ρωγμής από τη μέτρηση, η οποία εκτείνεται σε μήκος 100 mm, πρέπει να υπολογισθεί και να περιορισθεί η συμβολή από τα μη ρηγματωμένα τμήματα του δοκιμίου εκατέρωθεν της ρωγμής, με την παραδοχή ότι η ελαστική μη-ρηγματωμένη συμπεριφορά μπορεί να αναχθεί από την τάση, λόγω της παραμονής του επιπέδου τάσης κάτω από τη αντοχή του πυρήνα στο αέριο μέρος του δοκιμίου. Στο Σχήμα 2.10 φαίνεται το διάγραμμα της μέσης ανεπτυγμένης τάσης προς το εύρος διάνοιξης των ρωγμών (διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων) και για τα τρία δοκίμια.

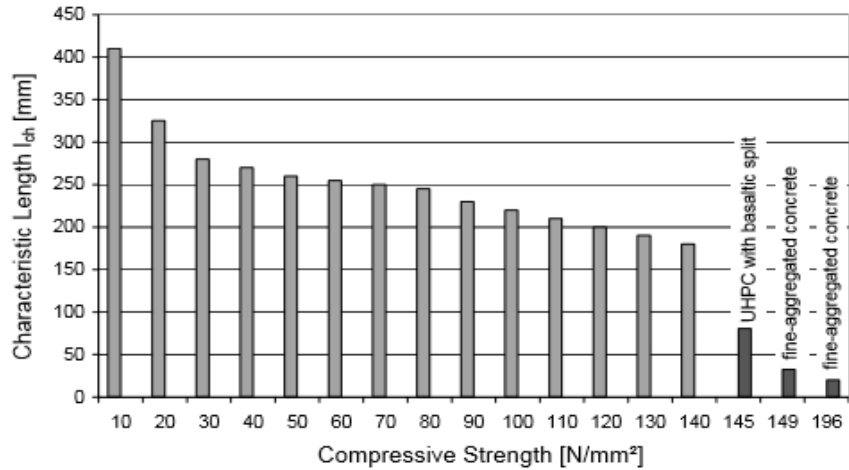


Σχήμα 2.10: Συμπεριφορά κατά τη ρηγμάτωση

Η διάνοιξη των ρωγμών συνοδεύεται από μείωση της μέσης αξονικής τάσης. Η παραπάνω μείωση είναι σημαντικά μεγάλη και γίνεται μειούμενη, για μεγαλύτερα ανοίγματα ρωγμών. Η επιφάνεια θραύσης δείχνει πως όλες οι ίνες εξολκεύονται και καμία δεν αστοχεί σε θραύση, φτάνοντας το όριο διαρροής της (Εικόνα 2.10b).

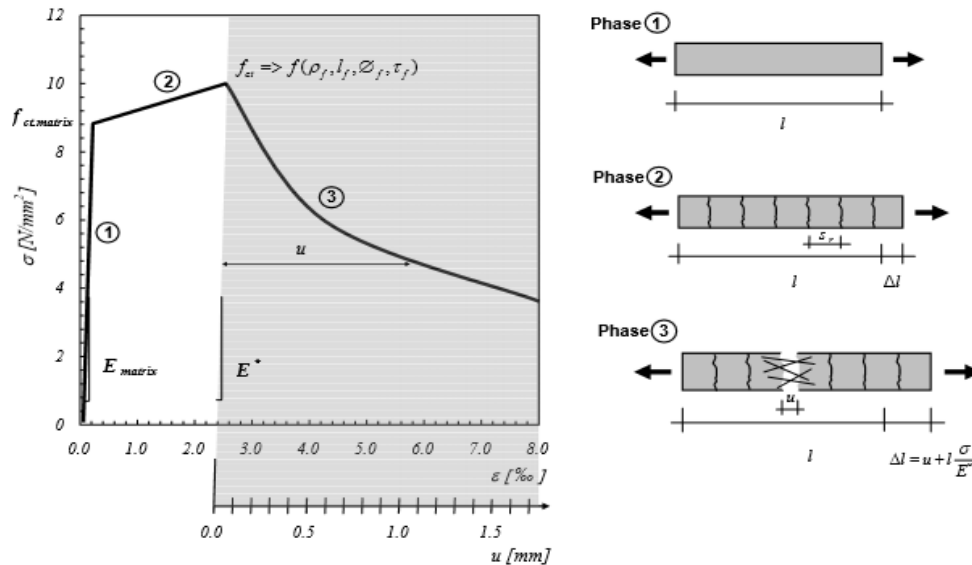
ΜΗΚΟΣ ΡΩΓΜΩΝ

Το Σχήμα 2.11 δείχνει την απομείωση του χαρακτηριστικού μήκους των ρωγμών συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής για σκυροδέματα συνήθους ποιότητας, υψηλής αντοχής και υπέρ-υψηλής αντοχής.



Σχήμα 2.11: Χαρακτηριστικό μήκος l_{ch} προς θλιπτική αντοχή

Συμπερασματικά, η εφελκυστική συμπεριφορά ενός εφελκυσμένου μέλους από UHPC συνοψίζεται από τρεις φάσεις, την ελαστική φάση (phase 1), τη φάση πολλαπλής ρηγμάτωσης (phase 2) και τη τελική συγκεντρωμένη ρηγμάτωση (εξόλκευση ινών) (phase 3). (Σχήμα 2.12)



a) Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων

b) απεικόνιση φάσης πολλαπλής ρηγμάτωσης

Σχήμα 2.12: σχηματική απεικόνιση της εφελκυστικής συμπεριφοράς του UHPC

Η παραμόρφωση μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με το υποθετικό μοντέλο θραύσης του Hillerborg ως άθροισμα του ανοίγματος των ρωγμών u και της ελαστικής παραμόρφωσης του υπόλοιπου δοκιμίου Εξ. (2-9). Ως E^* ορίζεται το μέτρο ελαστικής αποφόρτισης, και εξαρτάται από τη δυσκαμψία της μήτρας σκυροδέματος και την ολική ελαστική παραμόρφωση των μικρό-ρωγμών.

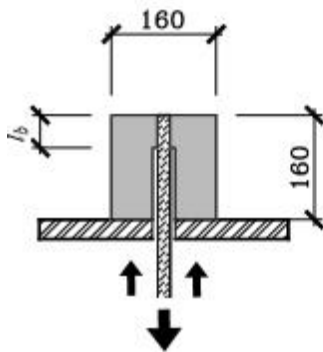
$$\Delta l = u + \sigma/E^* \quad (2-9)$$

Για τους διάφορους τύπους UHPC, το γράφημα είναι πρακτικά το ίδιο. Η κλίση και το μήκος του γραφήματος κάθε διαφορετικής φάσης εξαρτώνται ελάχιστα από τη σύνθεση του UHPC. Η ελαστική φάση εξαρτάται άμεσα από τα χαρακτηριστικά της μήτρας σκυροδέματος ($f_{ct,matrix}$, E_{matrix}). Οι φάσεις 2 και 3 εξαρτώνται από το μήκος, τη διάμετρο και το ποσοστό των ινών καθώς και από τη συνάφεια μεταξύ ινών και μήτρας.

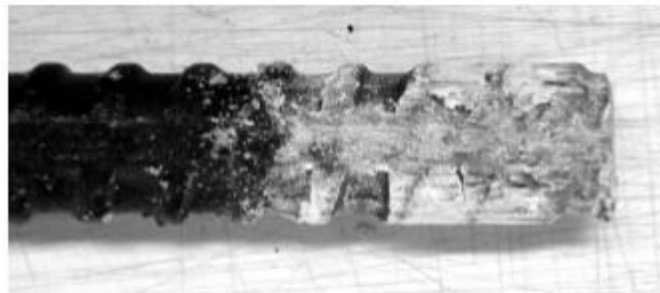
2.5.2.3 Πειραματικός προσδιορισμός εφελκυσμού συμβατικά ωπλισμένων UHPC (Jörg Jungwirth, 2004)

ΣΥΝΑΦΕΙΑ

Η συνάφεια μεταξύ ράβδων οπλισμού και ινοπλισμένης μήτρας σκυροδέματος διερευνάται μέσω δοκιμών εξόλκευσης της ράβδου οπλισμού. Η γνώση της αντοχής συνάφειας επιτρέπει τον προσδιορισμό του μήκους αγκύρωσης και του εύρους της ρωγμής. Το δοκίμιο συντίθεται από ένα κύβο 160 mm με μία ράβδο οπλισμού τοποθετημένη στο κέντρο (Εικόνα 2.18). Ελέγχονται έξι δοκίμια με διαφορετικό μήκος αγκύρωσης l_b που κυμαίνεται μεταξύ 20 και 50 mm και δύο διαφορετικές διαμέτρους οπλισμού ($\phi 12$ και $\phi 20$ mm). Το δοκίμιο φορτίζεται εξολκεύοντας τη ράβδο οπλισμού και υπολογίζοντας τη μέση διατμητική αντίσταση, χρησιμοποιώντας μία μεταλλική πλάκα με μια κεντρική οπή, η οποία εξυπηρετεί ως στήριξη. Η ολίσθηση μετράται στη άνω παρειά του δοκιμίου ως η σχετική μετατόπιση του πέρατος της ράβδου και της επιφάνειας σκυροδέματος.



a) Διάταξη δοκιμής

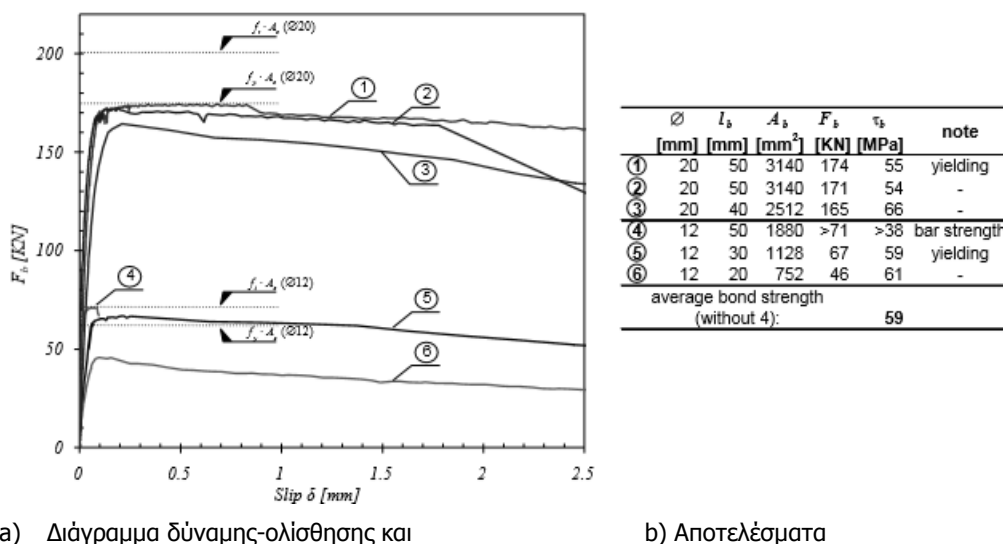


b) εξολκευμένη ράβδος

Εικόνα 2.18: Δοκιμή εξόλκευσης (διαστάσεις σε mm)

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.18b, η αστοχία προκύπτει λόγω εξάντλησης της διατμητικής αντοχής της μήτρας τσιμέντου. Κατά την εξόλκευση παρατηρείται μια λεπτή στρώση σκυροδέματος μεταξύ των νευρώσεων της ράβδου.

Στο Σχήμα 2.13 φαίνεται η σχέση μεταξύ συνάφειας και ολίσθησης για δύο διαφορετικές διαμέτρους ράβδων ($\phi 12$ mm και $\phi 20$ mm). Επιπλέον προσδιορίζεται η τάση διαρροής και η εφελκυστική αντοχή των ράβδων.



Σχήμα 2.13: Αποτελέσματα της δοκιμής εξόλκευσης (η ολίσθηση υπολογίζεται στο αφόρτιστο άκρο)

Σε πρώτη φάση η συμπεριφορά είναι σχεδόν γραμμική. Όταν επιτευχθεί η αντοχή συνάφειας, η ολίσθηση αυξάνεται ενώ η αναπτυσσόμενη τάση μειώνεται λόγω του απομειωμένου μήκους αγκύρωσης και της μη πλαστικής συμπεριφοράς. Στο δοκίμιο 4 ($\phi = 12$ mm, $l_b = 50$ mm) η αντοχή της ράβδου οπλισμού επετεύχθη λόγω του πολύ μεγάλου μήκους αγκύρωσης. Υποθέτοντας σταθερή μετάδοση της τάσης συνάφειας, η αντοχή συνάφειας μπορεί να υπολογιστεί ως ο λόγος της δύναμης εξόλκευσης προς την επιφάνεια συνάφειας:

$$\tau_b = \frac{F_b}{\phi \pi l_b} \quad (2-10)$$

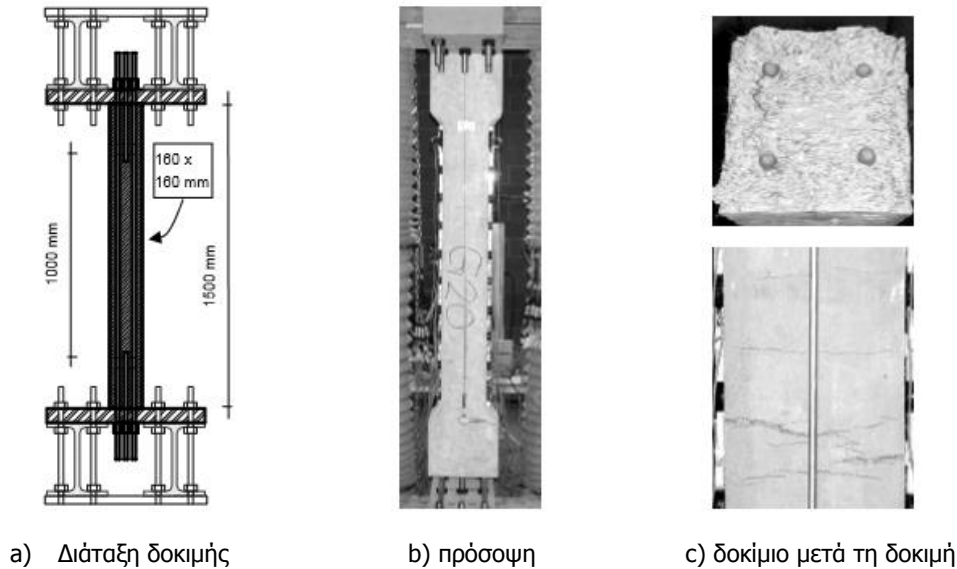
Η μέση τιμή της τάσης συνάφειας από τις δοκιμές προκύπτει: $\tau_b = 59$ MPa.

Αυτή η τάση συνάφειας είναι περίπου 10 φορές υψηλότερη από την τάση συνάφειας του συμβατικού σκυροδέματος. Το θεωρητικό μήκος αγκύρωσης είναι κατά συνέπεια πολύ μικρότερο και υπολογίζεται ως:

$$l_b = \frac{f_y \phi s}{4 \tau_b} = 2.4 \phi s \quad (2-11)$$

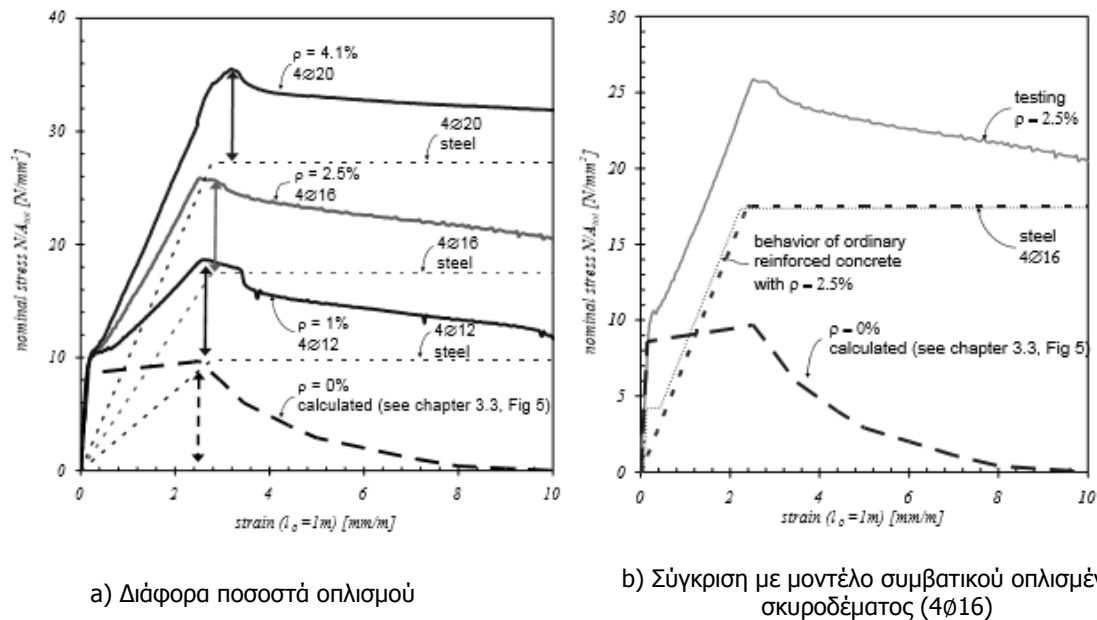
ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΥΗΡC

Με σκοπό την κατανόηση της συμπεριφοράς των δομικών μελών από ΥΗΡC, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κανονικής κλίμακας προσομοιάζοντας τις συνθήκες πραγματικών κατασκευών. Ελέγχθηκαν τρία δοκίμια με διαφορετικό ποσοστό οπλισμού μεταξύ 1% και 4.8% (χάλυβας με νευρώσεις, $f_y = 559$ MPa). Οι διαστάσεις των δοκιμών ήταν 160 x 160 x 1500 mm, με ελεγχόμενο μήκος 1000 mm (Εικόνα 2.19a,b). Η παραμόρφωση μετρήθηκε καθ' όλο το μήκος του δοκιμίου με μηχανοκίνητα μήκους μέχρι 100 mm.



Εικόνα 2.19: δοκιμή εφελκυσμού σε δομικά μέλη

Τα δοκίμια δείχνουν μια συμπεριφορά πολλαπλής ρηγμάτωσης (Εικόνα 2.19c). Στην επιφάνεια αστοχίας παρατηρούνται, τόσο οι εξολκευμένες ίνες όσο και η πλαστική παραμόρφωση των ράβδων οπλισμού.



Σχήμα 2.14: Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων δοκιμών σε οπλισμένα (ράβδοι) δομικά μέλη από UHPC

Το διάγραμμα ονομαστικής τάσης-παραμόρφωσης για τρία διαφορετικά ποσοστά οπλισμού ($\rho = 1\%$, 2.5% και 4.5%) φαίνεται το Σχήμα 2.11 (μετρούμενο μήκος δοκιμίου 1000 mm). Συγκρίνεται η συμπεριφορά του χάλυβα για τις τρεις αυτές περιπτώσεις και μια υπολογιζόμενη καμπύλη, για το άοπλο δοκίμιο. Το Σχήμα 3.7b επικεντρώνεται στο οπλισμένο δοκίμιο με 4φ16 και συγκρίνει την πειραματικά μετρούμενη συμπεριφορά του UHPC με το μοντέλο της συμπεριφοράς του συμβατικού οπλισμένου

σκυροδέματος. Παρατηρείται πως, αντίθετα με την περίπτωση του συμβατικού σκυροδέματος, η αντοχή συντίθεται από την αντοχή του χάλυβα και τη συμβολή του UHPC. Η συμβολή του σκυροδέματος στη δυσκαμψία του στοιχείου (εφελκυστική δυσκαμψία) είναι πολύ μεγάλη χάρη στην υψηλή τάση συνάφειας και στην σχετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Χάρη στην ύπαρξη των ινών και τη συμβολή τους στην εφελκυστική συμπεριφορά του UHPC παρατηρείται μια διαφορετική εφελκυστική συμπεριφορά σε σχέση με το συμβατικό σκυροδέμα. Το παραπάνω έχει σημαντική επιρροή στο σχεδιασμό των κατασκευών από UHPC. Συμπεραίνεται ότι:

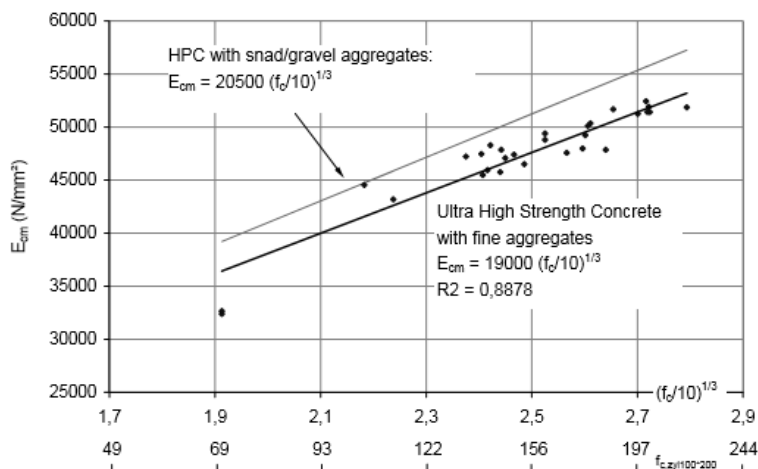
- Σημαντικό ποσοστό των εφελκυστικών τάσεων θα πρέπει να λαμβάνεται από ράβδους άτονου οπλισμού είτε προεντεταμένους τένοντες, ώστε να εξασφαλίζεται μια αξιόπιστη και αποτελεσματική εφελκυστική φέρουσα ικανότητα.
- Η ιδιότητα της κράτυνσης κατά την παραμόρφωση, που προκαλείται από τις ίνες, οδηγεί σε μία ομοιόμορφα κατανομημένη ρηγμάτωση. Αυτό περιορίζει την ανάγκη τοποθέτησης ελάχιστου διατμητικού άτονου οπλισμού για την κατανομή της ρηγμάτωσης.
- Η καλή συνάφεια μεταξύ του οπλισμού και της μήτρας σκυροδέματος οδηγεί στην ανάπτυξη μικρού μήκους αγκύρωσης. Αυτό κάνει τη σύνδεση προκατασκευασμένων μελών πολύ εύκολη.
- Ο διατμητικός οπλισμός και ο οπλισμός διάτρησης δεν είναι πλέον αναγκαίοι για ελάχιστες διατμητικές τάσεις χάρη στην υψηλή εφελκυστική αντοχή που συνεπάγεται υψηλή διατμητική αντοχή.

Αυτό σημαίνει πως οι κατασκευές που σχεδιάζονται αποκλειστικά από UHPC και προεντεταμένους τένοντες είτε άτονο οπλισμό μπορούν να φέρουν την πλειοψηφία των εφελκυστικών φορτίων. Κανένας επιπλέον οπλισμός δεν απαιτείται.

2.5.3 Στατικό Μέτρο Ελαστικότητας

Χάρη στην πυκνή δομή του, το μέτρο ελαστικότητας του UHPC είναι μεγαλύτερο από αυτό των σκυροδεμάτων συνήθους ποιότητας και υψηλής αντοχής με πανομοιότυπα αδρανή. Αν δεν υπάρχουν γνωστά δεδομένα στο πρωταρχικό στάδιο του σχεδιασμού, μπορεί να ληφθεί ως αρχική προσέγγιση η τιμή $E_{cm} = 50 \text{ GPa}$. Κατά τη διάρκεια των λεπτομερέστερων σταδίων του σχεδιασμού, το μέτρο ελαστικότητας οφείλει να προκύπτει από κάποια δοκιμή.

Μία πειραματική συσχέτιση του μέσου στατικού μέτρου ελαστικότητας και της θλιπτικής αντοχής από το Πανεπιστήμιο του Leirzig φαίνεται στο Σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15: Μέτρο ελαστικότητας (μέσο) προς θλιπτική αντοχή (Ekkehard Fehling, 2004)

Όπως και στο συμβατικό σκυρόδεμα, ο ερπυσμός μπορεί να ληφθεί υπόψη απευθείας στον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητάς χρησιμοποιώντας το ενεργό μέτρο ελαστικότητάς $E_{c,eff}$:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi} \quad , \varphi \text{ ερπυστικός συντελεστής} \quad (2-12)$$

2.5.4 Λόγος Poisson

Ο λόγος Poisson για την κάθε σύνθεση UHPC οφείλει να προσδιορίζεται πειραματικά. Σε περίπτωση αρχικού σχεδιασμού, μπορεί να λαμβάνεται με τιμή $\nu = 0,2$.

2.5.5 Συντελεστής θερμικής διαστολής

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής για την κάθε σύνθεση UHPC οφείλει να προσδιορίζεται πειραματικά. Εάν δεν υπάρχει γνωστή τιμή, ο συντελεστής θερμικής διαστολής μπορεί να λαμβάνεται με τιμή $\alpha = 1.1 \cdot 10^{-5} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$.

2.5.6 Επίδραση θερμικής επεξεργασίας

Κάποια από τα σκυροδέματα υπέρ-υψηλής αντοχής υποβάλλονται σε θερμική επεξεργασία (heat treatment) της οποίας τα κύρια οφέλη είναι τα εξής:

- Σημαντική αύξηση στη θλιπτική αντοχή και λιγότερο της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος, με μόνο μικρή αύξηση του μέτρου ελαστικότητας (Πίνακας 2.4)
- Τα θερμικά επεξεργασμένα μέλη φτάνουν στην τελική τους ωρίμανση με αποτέλεσμα να μην απαιτείται το χρονικό διάστημα των 28 και πλέον ημερών για να ληφθεί η τελική τους αντοχή, όπως συμβαίνει με τα συμβατικά σκυροδέματα. Το παραπάνω συμβαίνει χάρης στην επίτευξη μεγαλύτερης ταχύτητας και απόδοσης της αντίδρασης ενυδάτωσης των προϊόντων τσιμέντου.
- Μείωση των ερπυστικών φαινομένων και της χρόνιας συστολής (ενδογενούς και ξήρανσης) ύστερα από το πέρας της θερμικής επεξεργασίας
- Βελτίωση της ανθεκτικότητας

Στις σημερινές εφαρμογές, δύο είδη θερμικής επεξεργασίας ξεχωρίζουν και εφαρμόζονται ξεχωριστά:

- 1) Ο πρώτος τύπος θερμικής επεξεργασίας εφαρμόζεται κατά τις πρώτες ώρες και αντιστοιχεί στη θερμική ωρίμανση (heat curing/ accelerated hydration by heat treatment) που περιγράφεται στο EN1992-1-1. Στοχεύει στην πρόβλεψη του αρχικού σταδίου πήξης του UHPFRC καθώς και στην επιτάχυνση της αρχικής σκλήρυνσης. Πραγματοποιείται σε μια μέτρια θερμοκρασία (~65°C) ώστε να αποτραπεί ο κίνδυνος καθυστερημένου σχηματισμού ετρινγκίτη σε βάθος χρόνου (φαινόμενο DEF).
- 2) Ο δεύτερος τύπος θερμικής επεξεργασίας εφαρμόζεται στο σκληρυμένο σκυρόδεμα. Ο στόχος του είναι η δημιουργία νέων ενυδρίτων για περαιτέρω αύξηση της μηχανικής αντοχής του πυρήνα σκυροδέματος και η μείωση των χρόνιων παραμορφώσεων. Για αυτόν τον τύπο θερμικής επεξεργασίας, τα μέλη θερμαίνονται σε σχετικά υψηλό επίπεδο (~90°C) και σε επίπεδο υγρασίας κοντά στον κορεσμό λίγες ώρες μετά την πήξη του σκυροδέματος. Σε αυτή την περίπτωση, τα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας βελτιώνονται και υπάρχει μία σημαντική μείωση των χρόνιων παραμορφώσεων. Πιθανότητα ανάπτυξης ετρινγκίτη εν χρόνω οφείλει επίσης να αποφεύγεται. Επομένως, απαιτείται καλή γνώση του χρόνου πήξης και ένα αξιόπιστο μέσο για την παρακολούθηση της.

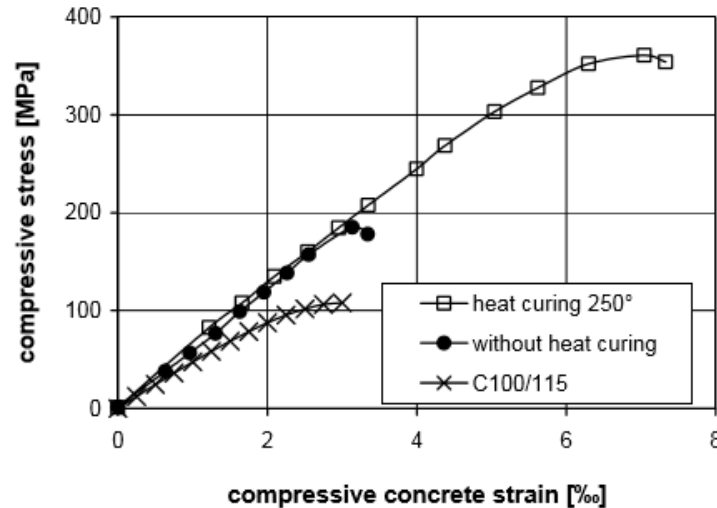
Η θερμική επεξεργασία επιλέγεται και βελτιστοποιείται για κάθε σύνθεση σκυροδέματος. Η τεχνική περιγραφή του σκυροδέματος θα φανερώσει εάν πραγματοποιήθηκε ή όχι θερμική επεξεργασία και αν ναι, τη συνιστώμενη μέθοδο.

Γενικά θα πρέπει να γίνεται ένας συμβιβασμός μεταξύ πρώιμης και τελικής αντοχής, καθώς η θερμική επεξεργασία που πραγματοποιείται στο αρχικό στάδιο της σκυροδέτησης περιορίζει την τελική αντοχή που θα αναπτύξει το υλικό.

		Type of heat curing			
			90° C H ₂ O 24 h	250° C 24 h	
Compressive concrete strength	$f_{c, cube 100}$	MPa	202	260	360
Tensile strength of concrete fiber length 6 mm	$f_{ct, fl}$	MPa	34,6	42,2	43,3
Tensile strength of concrete fiber length 13 mm	$f_{ct, fl}$	MPa	52,2	-	56,4
Modulus of elasticity	E_c	MPa	50 000	-	57 000

Πίνακας 2.4: Αντοχή σκυροδέματος και μέτρο ελαστικότητας για διάφορους τύπους θερμικής επεξεργασίας (Josef Hegger, 2004)

Το Σχήμα 2.16 δείχνει την υφιστάμενη αστοχία σε δοκίμιο που δεν έχει υποστεί σκλήρυνση καθώς και αυτή ενός δοκίμιου σκληρυμένου στους 250 °C. Επιπρόσθετα παρουσιάζεται η ανάπτυξη της θλιπτικής αντοχής ως συνάρτηση της ανηγμένης θλιπτικής παραμόρφωσης ενός σκυροδέματος υψηλής αντοχής, κατηγορίας C100/115 (HSC).



Σχήμα 2.16: Σύγκριση ανηγμένης θλιπτικής παραμόρφωσης κατά την αστοχία για σκυροδέματος UHPC και HSC (High Strength Concrete)
(Josef Hegger, 2004)

2.6 ΣΥΣΤΟΛΗ -ΕΡΠΥΣΜΟΣ

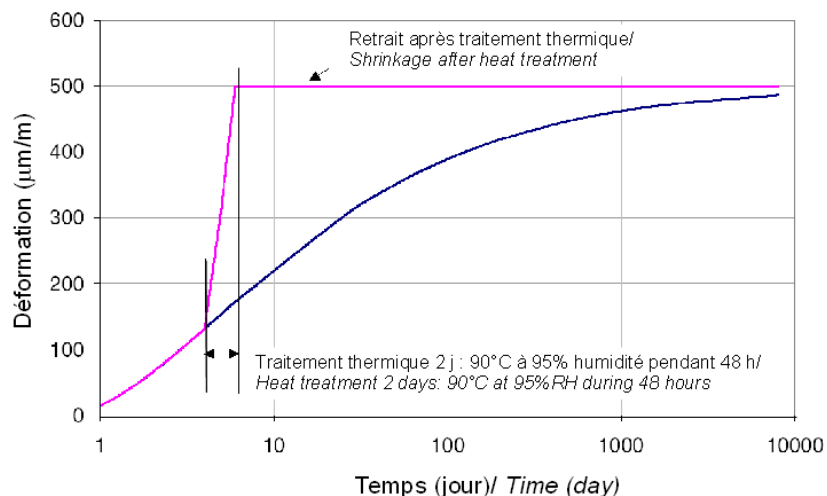
2.6.1 Συστολή

Στην περίπτωση του ινοπλισμένου σκυροδέματος υπέρ-υψηλής αντοχής, η συστολή είναι κυρίως ενδογενής, δεδομένης επαρκούς υγρασίας κατά τη διάρκεια πήξης. Στην περίπτωση θερμικής επεξεργασίας πρώτου τύπου, η συστολή προκύπτει μερικώς κατά τη διάρκεια θερμικής επεξεργασίας. Στην περίπτωση θερμικής επεξεργασίας δεύτερου τύπου, γίνεται η παραδοχή μη περαιτέρω συστολής ξήρανσης μετά το τέλος της επεξεργασίας.

Αν δεν υπάρχει κάποιο γνωστό δεδομένο κατά την αρχική φάση σχεδιασμού, η παρακάτω τιμή θα λαμβάνεται για χρόνια φαινόμενα:

- Για μη-ύπαρξη θερμικής επεξεργασίας: 550 $\mu\text{m}/\text{m}$ για ενδογενή συστολή και 150 $\mu\text{m}/\text{m}$ για συστολή ξήρανσης σε εξωτερικό περιβάλλον με μία μέση σχετική υγρασία της τάξης του 50%-70%.
- Για θερμική επεξεργασία πρώτου τύπου: 550 $\mu\text{m}/\text{m}$ συνολικής συστολής, για εξωτερικό περιβάλλον με σχετική υγρασία 50%-70%.
- Για θερμική επεξεργασία δεύτερου τύπου: συνολική συστολή της τάξεως των 550 $\mu\text{m}/\text{m}$ πριν το τέλος της θερμικής επεξεργασίας, μετά την οποία η συνολική συστολή είναι μηδαμινή.

Στο Σχήμα 2.14 φαίνεται ένα παράδειγμα σύγκρισης μεταξύ θερμικής επεξεργασίας δεύτερου τύπου και μη-επεξεργασίας.



Σχήμα 2.17 (Josef Hegger, 2004): παράδειγμα της συστολής σε σκυρόδεμα UHPFRC με και χωρίς θερμική επεξεργασία (A F G C Groupe de travail BFUP Recommandations / recommendations, 2003)

2.6.2 Ερπυσμός

Ο ερπυσμός του ινοπλισμένου σκυροδέματος υπέρ-υψηλής αντοχής (UHPFRC) είναι παρόμοιος με αυτόν του σκυροδέματος υψηλής αντοχής (HPC) εφόσον δεν υπάρχει θερμική επεξεργασία, καθώς σε περίπτωση θερμικής επεξεργασίας δεύτερου τύπου είναι σημαντικά μειωμένος.

Αν δεν υπάρχει κάποιο γνωστό δεδομένο κατά την αρχική φάση σχεδιασμού του έργου, οι ακόλουθες τιμές του συντελεστή χρόνιου ερπυσμού θα υιοθετούνται:

- $\Phi=0.8$ σε περίπτωση μη ύπαρξης θερμικής επεξεργασίας,
- $\Phi=0.4$ σε περίπτωση θερμικής επεξεργασίας πρώτου τύπου,
- $\Phi=0.2$ σε περίπτωση θερμικής επεξεργασίας δεύτερου τύπου.

Σε γενικότερο πλαίσιο, για κατασκευές ευαίσθητες σε ερπυσμό (παραμορφώσεις δευτέρας τάξεως και ανάλογη ανακατανομή έντασης, απώλειες προέντασης, κλπ.), πρέπει να γίνεται μια ποσοτική αναγνώριση της χρονοεξαρτώμενης παραμόρφωσης, σύμφωνα με το τύπο του UHPFRC που επιλέγεται και το βαθμό ωρίμανσής του κατά τη φόρτιση υπό αντιπροσωπευτικές συνθήκες για την κατασκευή. Η αναγνώριση αυτή θα μπορούσε να οδηγήσει σε προσαρμογή των νόμων συστολής σύμφωνα με τις οδηγίες του EN1992-1, Παράρτημα Β

ΧΡΟΝΙΑ ΑΝΤΟΧΗ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ

Εκτιμάται ότι η χρόνια μείωση της αντοχής υπό σταθερά υψηλό φορτίο είναι της ίδιας τάξης μεγέθους όπως στα συνήθη και στα υψηλής αντοχής σκυροδέματα, γεγονός που οδηγεί σε μείωση του συντελεστή ερπυσμού σε $\Phi=0,85$ στους γαλλικούς κανονισμούς BAEL και BPEL.

2.7 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

Για τον καθορισμό του πιθανώς απαιτούμενου οπλισμού έναντι διατμητικής έντασης, η αντίσταση του άοπλου σκυροδέματος, ο διατμητικός οπλισμός (π.χ. συνδετήρες) και η επιρροή των ινών προστίθενται σύμφωνα με τους κανονισμούς της SETRA- AFGC ως εξής (A F G C Groupe de travail BFUP Recommendations / recommendations, 2003):

$$V_u = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f} \quad (2-13)$$

Όπου: $V_{Rd,c}$ διατμητική αντίσταση του άοπλου σκυροδέματος
 $V_{Rd,s}$ διατμητική αντίσταση του διακριτού οπλισμού
 $V_{Rd,f}$ διατμητική αντίσταση των ινών

Η αντίσταση του άοπλου σκυροδέματος μπορεί να καθοριστεί ως ακολούθως :

$$V_{Rd,c} = \frac{0.21}{\gamma_{cf} \cdot \gamma_E} \cdot k \cdot f_{ck}^{1/2} \cdot b_w \cdot d \quad (2-14)$$

Όπου :

$$k = 1 + 3 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{ck}} \quad \sigma_{cp} \geq 0 \text{ (θλιπτική)}$$

$$k = 1 + 0.7 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{ctk,0.05}} \quad \sigma_{cp} < 0 \text{ (εφελκυστική)}$$

$$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c$$

N_{Ed} αξονική δύναμη που ασκείται στη διατομή είτε λόγω φορτίου, είτε λόγω προέντασης

A_c διατομή του σκυροδέματος

$\gamma_{cf} \cdot \gamma_E = 1.50$, επιμέρους συντελεστές ασφαλείας

Η αντίσταση του διατμητικού οπλισμού υπολογίζεται ως και στο συμβατικό σκυρόδεμα:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot (\cot\theta + \tan\theta) \cdot \sin\alpha \quad (2-15)$$

Όπου: A_{sw} συνολικό εμβαδόν σκελών συνδετήρων
 s απόσταση μεταξύ συνδετήρων κατά μήκος του στοιχείου
 $z = 0.9 \cdot d$ μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων
 f_{ywd} τάση διαρροής χάλυβα οπλισμού διάτμησης
 θ $21.8^\circ < \theta < 45^\circ$ κλίση θλιπτήρων σκυροδέματος
 α $45^\circ < \alpha < 90^\circ$ κλίση οπλισμού διατμήσεως, όπου θ , α γωνίες που επισημαίνονται στο Σχήμα 2.6

Η αντίσταση των ινών μπορεί να καθοριστεί ως ακολούθως :

$$V_{Rd,f} = \frac{S \cdot \sigma_p}{\gamma_{bf} \cdot \tan\beta_u} \quad (2-16)$$

Όπου : σ_p παραμένουσα εφελκυστική δύναμη : $\sigma_p = \frac{1}{K} \frac{1}{w_{lim}} \int \sigma(w) dw$

K συντελεστής προσανατολισμού των ινών

$w_{lim} = \max(w_u ; 0,3 \text{ mm})$, όπου $w_u = l_c * \varepsilon_u$ και l_c το χαρακτηριστικό μήκος της ίνας

$\sigma(w)$ χαρακτηριστική αντοχή μετά θραύσης για εύρος ρωγμής w (σύμφωνα με δοκιμές)

S επιφάνεια επιρροής των ινών :

$$S = 0.9 * b_0 * d * b_{zw} * b_0 * z$$

για ορθογωνικές και ταυφ διατομές

$$S = 0.8 * (0.9 d) * 2 * b_{zw} * 0.8 * z^2$$

για κυκλικές διατομές

γ_{bf} συντελεστής ασφαλείας για ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπό εφελκυσμό

β_u γωνία των θλιπτήρων

Μέγιστη Τέμνουσα

$$V_{Rd,max} = 2 \cdot 1,14 \cdot \frac{acc}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} / (\cot\theta + \tan\theta) \quad (2-17)$$

2.8 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΡΟΥΣΗ

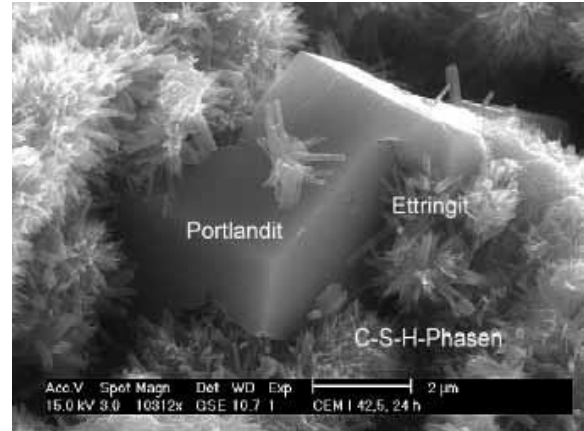
Όπως και τα περισσότερα ινοπλισμένα σκυροδέματα, τα ινοπλισμένα σκυροδέματα υπέρ-υψηλής αντοχής (UHPRFC) έχουν πολύ καλή ικανότητα ενεργειακής εκτόνωσης σε συνδυασμό με τη μετάδοση-ανακατανομή των εφελκυστικών τάσεων μετά τη ρηγμάτωση, ενδιαφέρουσες ιδιότητες κατά την επιβολή σημαντικού κρουστικού φορτίου για το οποίο και εξετάζεται η συνολική αντοχή. Η υψηλή εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος σημαίνει επίσης ότι η ρηγμάτωση μπορεί να είναι ελεγχόμενη, ακόμα και στην περίπτωση ενός μέτριου κρουστικού φορτίου.

2.9 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΕΡ-ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Η ικανότητα επίτευξης τόσο θλιπτικών και εφελκυστικών αντοχών τέτοιας κλίμακας όσο και των υπολοίπων εξεχουσών ιδιοτήτων που αναπτύχθηκαν στα παραπάνω υποκεφάλαια, οφείλεται στην προηγμένη σύνθεση του UHPC που συνοψίζεται σε ειδικές κοκκομετρικές αδρανών, τεχνολογικά προηγμένες συνθέσεις τσιμέντου και προσμίκτων σε συνδυασμό με την προσθήκη ειδικών χημικών προσθέτων με αποτέλεσμα την εντυπωσιακή μείωση του λόγου νερού προς τσιμέντο, κάρριο χαρακτηριστικό ου καθορίζει την αντοχή, ανθεκτικότητα και συμπεριφορά σε ερπυσμό και συστολή του σκληρυμένου σκυροδέματος.

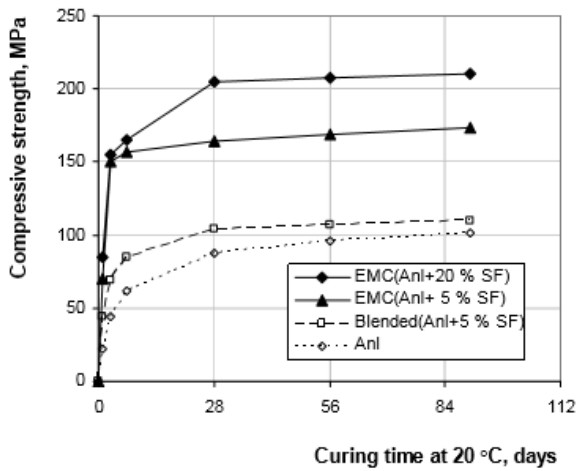
Ενας νέος τύπος τσιμέντου δίνει τη δυνατότητα να επιτευχθεί, τόσο η ζητούμενη εργασιμότητα του σκυροδέματος μέσω χαμηλών ποσοστών νερού προς συνδετικό υλικό ($w/B < 0.4$ water to Binders), όσο και αυξημένη αντοχή της τάξης των 200 MPa με περιεκτικότητα συνδετικού υλικού μη υπερβαίνουσα τα 550 kg/m³.

Το ενεργειακά τροποποιημένο Τσιμέντο (ENC) παράγεται από πολύ έντονη άλεση του συμβατικού τσιμέντου Portland (OPC) σε συνδυασμό με διάφορους τύπους fillers (υλικά πλήρωσης). Η μηχανική ενεργοποίηση μετά την άλεση διαφόρων τύπων fillers αφορά στην διασπορά των στερεών του τσιμέντου (κλίνκερ) και σε πλαστική παραμόρφωση, αναδιατάσσοντας τα συστατικά του μείγματος και αυξάνοντας έτσι τις επιφάνειες επαφής μεταξύ τους. Όλοι αυτοί οι παράγοντες οδηγούν στη χημική αλληλεπίδραση μεταξύ των στερεών που μετέχουν λόγω της αποτελεσματικής μηχανικής κατεργασίας που λαμβάνει χώρα στις μηχανές ανάδευσης, όπου εφαρμόζονται κρουστικά και διατμητικά φορτία κατά τη στερεά φάση. Τα ακόλουθα μπορούν να επιτευχθούν κατά τη διαδικασία ανάδευσης (L. Elfgrén, 2004):

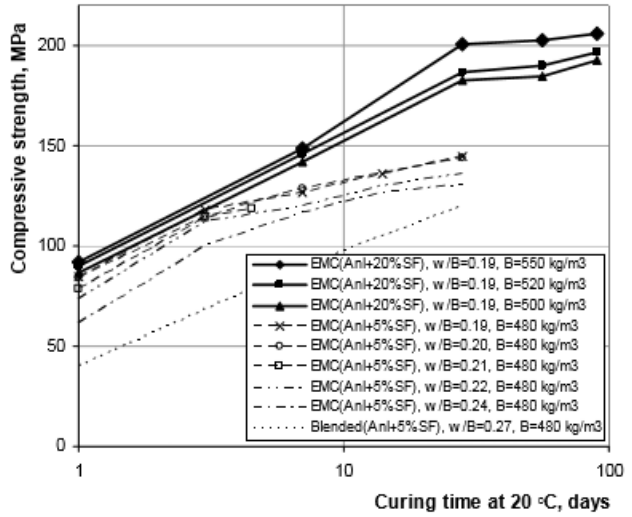


1. Βελτιωμένη ικανότητα συνδετικότητας του τσιμέντου Portland σε συνδυασμό με
2. Αυξημένη ποζολανικότητα της ιπτάμενης τέφρας (ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΟΤΗΤΑ: η ικανότητα των ποζολανικών ορυκτών να αντιδρούν με το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ και να παράγουν φύλλα C-S-H (ένυδρων πυριτικών ενώσεων άνθρακα), κρίσιμο προϊόν κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου που επιτρέπει την καθυστέρηση και καλύτερη απόδοση της αντίδρασης ενυδάτωσης και μετέπειτα την επίτευξη της μέγιστης αντοχής σκυροδέματος) και/ή
3. Βελτιωμένη χημική αντιδραστικότητα της σκωρίας υψικαμίνου (blast furnace slag), και/ή
4. Δημιουργία υδραυλικότητας του σκυροδέματος χάρις στο άνοιγμα των μη-ενυδατωμένων κόκκων του τσιμέντου Portland.

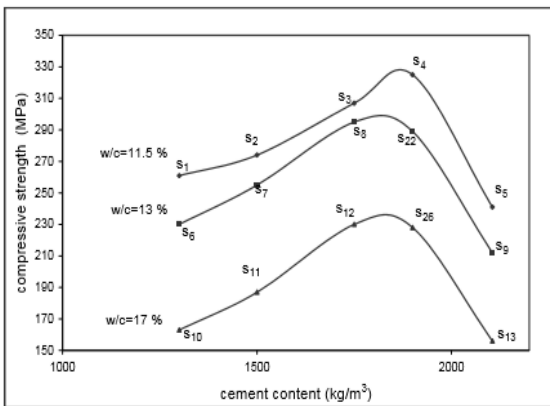
Στο Σχήμα 2.18 παρουσιάζεται η επιρροή του EMC στην τελική θλιπτική αντοχή, σε σύγκριση με συμβατικά τσιμέντα, ενώ στο Σχήμα 2.19 προστίθεται και η επιρροή διαφορετικών λόγων νερού προς τσιμέντο. Η συμπεριφορά αυτή είναι ιδιαίτερα προφανής σε πρώιμη ηλικία (1, 3, 7 μέρες), όπου η τιμή της θλιπτικής αντοχής της πάστας EMC ξεπερνά τη δύναμη του συμβατικού μείγματος κατά 1.8-2.0 φορές. Η κύρια αιτία της δράσης αυτής είναι πιθανόν η αλλαγή της μορφολογίας των προϊόντων ενυδάτωσης, της ενεργούς συμπύκνωσης των ασβεστοπυριτικών ενυδρίτων καθώς και η σημαντική μείωση του πορώδους της τσιμεντόπαστας. Πρόσθετος λόγος της εντυπωσιακής αύξησης της θλιπτικής αντοχής είναι η μείωση του λόγου w/B από 0.18 σε 0.16.



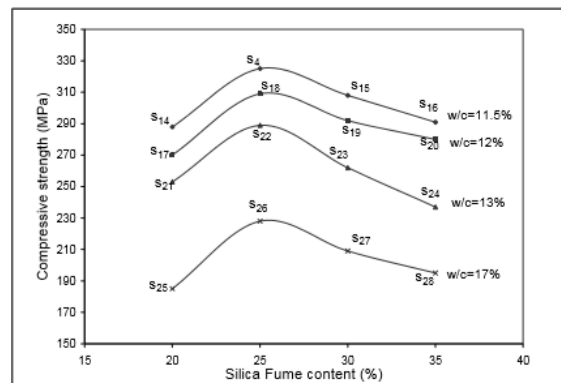
Σχήμα 2.18: επιρροή του EMC στην τελική αντοχή του μίγματος



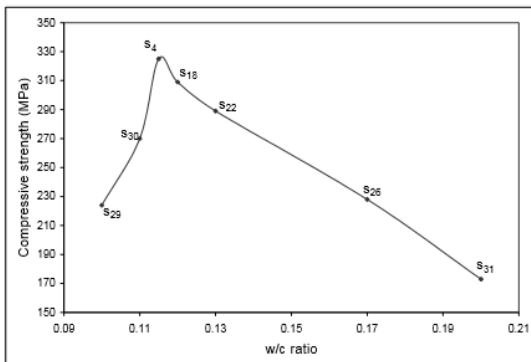
Σχήμα 2.19: επιρροή του EMC σε συνδυασμό με διαφορετικούς λόγους w/c



(a) Επιρροή της πυκνότητας του τσιμέντου



(b) Επιρροή του ποσοστού της παπαλής



(c) Επιρροή του λόγου νερού προς τσιμέντου

Specimen	S ₃₈	S ₃₇	S ₃₈	S ₄
Type of Curing	1	2	3	4
f _c (Mpa)	152	233	249	325

(d) Επιρροή του είδους συντήρησης (θερμοκρασία)

Σχήμα 2.20: παράγοντες που επηρεάζουν στην τελική αντοχή του ΥΗΡC

Από το Σχήμα 2.20a φαίνεται ότι η πυκνότητα τσιμέντου που κυμαίνεται μεταξύ 1700 και 2000 kg/m³ οδηγεί στις υψηλότερες αντοχές. Αν και φαινομενικά θα έπρεπε η αντοχή του σκυροδέματος να αυξάνει με την αύξηση της πυκνότητας τσιμέντου, μετά από μια συγκεκριμένη τιμή η αντοχή φθίνει καθώς τα αδρανή δεν μπορούν να συμμετέχουν στην συμπύκνωση του RPC, ενώ παρατηρείται ελλιπής διαβάθμιση. Αντίθετα, πυκνότητες τσιμέντου μικρότερες από τις ενδεικνυόμενες οδηγούν σε μεγαλύτερη συμμετοχή στην ανάληψη των φορτίων των αδρανών, και δεδομένης της πολύ μικρότερης αντοχής του σε σχέση με το μίγμα της τσιμεντοπαστας, η τελική αντοχή του RRPC μειώνεται.

Σε μεγάλες θερμοκρασίες ενυδάτωσης-σκλήρυνσης (Σχήμα 2.20d), ευνοείται ο σχηματισμός ισχυρών χημικών ενώσεων C-S-H (ένυδρες πυριτικές ενώσεις άνθρακα (ΠΗΓΜΑ: προϊόν ενυδάτωσης τσιμέντου που σχηματίζεται γύρω από τους κόκκους των αδρανών, λόγω του μεγάλου πορώδους του απορροφά μόρια νερού συμβάλλοντας στην μείωση του λογού νερού προς τσιμέντου και κα επέκταση στην αύξηση των πρωίμων και τελικών αντοχών)). Η σκλήρυνση σε ζεστό νερό τελικώς συντελεί στην αύξηση της ποζολανικότητας του σκυροδέματος, καθώς και στην επιτάχυνση της αντίδρασης ενυδάτωσης οδηγώντας σε μεγαλύτερες πρώιμες αντοχές.

Ο κύριος ρόλος της πυριτικής παιπάλης περιγράφεται από την χημική αντίδραση ενυδάτωσης κατά τη φάση σκλήρυνσης του σκυροδέματος, όπου οι χαμηλής αντοχής ενώσεις C-H συνδυάζονται με πυριτική παιπαλη οδηγώντας στη σύνθεση του C-S-H (Σχήμα 2.20b). Η βέλτιστη ποσότητα πυριτικής παιπαλης εξαρτάται από το λόγο w/c. Πειραματικά προκύπτει ότι η βέλτιστη περιεκτικότητα σε silica fume είναι της τάξης του 30-35% κατά βάρος RPC με αντοχή της τάξης των 200 MPa.

Αποδεικνύεται ότι ο σημαντικότερος παράγοντάς που επηρεάζει την αντοχή του RPC είναι ο λόγος νερού προς τσιμέντο (Σχήμα 2.20c). Χαρακτηριστικά αναφέρεται ως συμπέρασμα πειραματικών δοκιμών ότι για την ίδια σύνθεση μείγματος και μεθόδου σκλήρυνσης, μείωση του w/c από 20% σε 11,5% αυξάνουν την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος κατά περίπου 46%. Τέλος στην Σχήμα 2.20c φαίνεται πως για λόγους w/c μικρότερους του 10% η θλιπτική αντοχή σταδιακή φθίνει. Αυτό οφείλεται στην ανεπαρκή ποσότητα νερού για την πλήρη ενυδάτωση των συστατικών του τσιμέντου. Επιπλέον συνέπεια των μικρών λόγων w/c είναι η απώλεια της απαιτούμενης εργασιμότητας καθώς και την ανεπαρκή λειτουργία της περίσφιγξης που εφαρμόζεται κατά τη χύτευση του RPC (απώλεια αυτής της ιδιότητας μας στερεί σημαντική προσαύξηση της τελικής αντοχής του σκυροδέματος).

2.10 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΧΥΤΕΥΣΗ ΤΟΥ UHPFRC

Λόγω της χρήσης προσθέτων-βελτιστοποιητών όπως είναι τα ρευστοποιητικά/ μείωσης ποσότητας νερού και τα υπερρευστοποιητικά, οι συνθέσεις των UHPFRC έχουν γενικά μικρό λόγο νερού προς συνδετικό υλικό (πχ τσιμέντο, άλλα τσιμεντοειδή, πχ πυριτική παιπάλη), $W_{eff} / (C + kA)$ (όπου W_{eff} :μάζα νερού, C : μάζα τσιμέντου, kA : μάζα προσθέτων). Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στον έλεγχο των ποσοτήτων του προστιθέμενου νερού, μέσω των διαφόρων υλικών (νερού του μείγματος, νερό στους πόρους των αδρανών, και των προσθέτων). Τα UHPFRC χρησιμοποιούνται είτε στη μορφή προ-αναμεμειγμένων ξηρών συστατικών, είτε ως ξεχωριστά συστατικά, με ίδιο τρόπο με τη σύνθεση σκυροδεμάτων HPC. Σε όλες τις περιπτώσεις η ακεραιότητα των παρεχόμενων συστατικών πρέπει να εξετάζεται συστηματικά.

2.10.1 Μελέτη Σύνθεσης Σκυροδέματος

Καθορίζεται μια μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος UHPFRC από την οποία να προκύπτει υλικό για ποσότητα σκυροδέματος ενός κυβικού μέτρου, η οποία προτείνεται από τον παραγωγό που δεσμεύεται για την απόδοση-βάσει απαιτήσεων επιτελεστικότητας που προδιαγράφονται στο συμβόλαιο. Η μελέτη σύνθεσης καθορίζεται:

- Είτε από τη συνολική ποσότητα του έτοιμου μείγματος, συμπληρωματικά πρόσθετα-βελτιστοποιητές, το νερό, και τις ίνες στην περίπτωση του UHPFRC,
- Είτε με τις ποσότητες των επιμέρους συστατικών, που στην περίπτωση του UHPFRC γίνονται χωρίς προαναμεμιγμένα συστατικά

Στην τελευταία περίπτωση, η ονομαστική μελέτη της σύνθεσης του μείγματος δίνει:

- Την κατάταξη και το βάρος κάθε κλάσης αδρανούς (ξηρά συστατικά),
- Την κατάταξη και το βάρος του τσιμέντου (προσδιορίζοντας την ποσότητα πυριτικής παιπάλης στην περίπτωση τσιμέντου με προαναμεμιγμένη παιπάλη),
- Την κατάταξη και το ξηρό βάρος κάθε πρόσμεικτου υλικού (παιπάλη, υλικά πλήρωσης, ηφαιστειακή τέφρα, σκωρία/λάβα),
- Το συνολικό όγκο νερού: όγκος νερού του μείγματος και όγκος νερού στα επιμέρους συστατικά (αδρανή, οποιοδήποτε πρόσμεικτο, πρόσθετα),
- Την κατάταξη και το βάρος των ξηρών παραγώγων οποιουδήποτε προσθέτου-βελτιστοποιητή

2.10.2 Παραγωγή του UHPFRC

Ανοχές για την προανάμειξη

Οι ανοχές για τις προαναμεμιγμένες συνθέσεις σκυροδέματος καθορίζονται και ελέγχονται από το έγγραφο του ελέγχου ποιότητας κάθε κατασκευαστή που παραδίδεται μαζί με την ποσότητα του μείγματος σκυροδέματος.

Προτείνεται να φυλάσσονται δείγματα από κάθε αποστολή των παραπάνω ποσοτήτων.

Ανοχές για τις πρώτες ύλες

Η ποιότητα των υλικών του μείγματος και των χρησιμοποιούμενων μεθόδων επιτρέπει μία ανοχή της τάξεως του $\pm 2\%$ που πρέπει να τηρείται για κάθε ζυγισμένο συστατικό.

Για τις σκόνες, η ανοχή αυτή πρέπει να περιορίζεται σε $\pm 1\%$ στα στάδια των δοκιμών-σχεδιασμού εάν ο παραγωγός της προαναμεμιγμένης σύνθεσης μπορεί να εγγυηθεί το επίπεδο ακρίβειας για κάθε χρησιμοποιούμενο συστατικό του μείγματος.

Ειδικές απαιτήσεις για τον εξοπλισμό παραγωγής

Στην περίπτωση σχεδιασμού ενός μείγματος που δεν περιέχει προαναμεμιγμένα υλικά, η περιεκτικότητα νερού στην άμμο αλλά και σε άλλα αδρανή πρέπει να μετράται σε συστηματική βάση ώστε οι ποσότητες του συνολικώς προστιθέμενου νερού να είναι οι σωστές. Ο κορεσμός των χονδρόκοκκων αδρανών (σε αντίθεση με την άμμο) μπορεί να διευκολύνει τον έλεγχο της περιεκτικότητας σε νερό.

Η περιεκτικότητα των συστατικών του UHPC εκπεφρασμένη ως ποσοστό του τσιμέντου C του μείγματος σε κυβικά μέτρα προσδιορίζεται ως εξής:

- Για τα αδρανή, το τσιμέντο, το νερό και τα πρόσμικτα, η προκύπτουσα τιμή πρέπει να έχει ακρίβεια της τάξης του $\pm 2\%$
- Η πυριτική παιπάλη πρέπει να ζυγίζεται ξεχωριστά: 0.1C
- Οποιοσδήποτε άλλες προσθήκες επίσης πρέπει να ζυγίζονται ξεχωριστά: 0.15C
- Το άθροισμα του τσιμέντου και άλλης μίας εκ των προσμείκτων (σε αυτή την περίπτωση, πρώτο τοποθετείται στη ζυγαριά το τσιμέντο) : 0.6C

2.10.3 Μεταφορά UHPFRC

Ο χρόνος μεταξύ της παραγωγής και της χύτευσης του UHPFRC πρέπει να συνάδει με τους περιορισμούς-απαιτήσεις τόσο της διαδικασίας παραγωγής των παρτίδων όσο και της χύτευσης, καθώς και με τις συνθήκες συμπύκνωσης οι οποίες απαιτείται να βελτιστοποιούνται ώστε να αποφεύγονται οι επιπτώσεις της ευθυγράμμισης των ινών κατά την επί-τόπου χύτευση του UHPFRC.

Μετά την παραγωγή του σκυροδέματος απαγορεύεται η προσθήκη, τόσο νερού όσο και προσθέτων.

2.10.4 Χύτευση του UHPFRC

Χύτευση-Συμπύκνωση μέσω δόνησης

Τα UHPFRC θα πρέπει να χυτεύονται με προσοχή, λόγω της μεγάλης ρευστότητας κάποιων συνθέσεων (πχ self-compacting/ αυτοσυμπυκνούμενων). Ύψη πτώσης μεγαλύτερα από 0.5 m δεν συστήνονται. Εάν δεν μπορούν να αποφευχθούν, θα πρέπει να πραγματοποιείται κατάλληλη δοκιμή σε προηγούμενο στάδιο για να καταδειχθεί ο μη διαχωρισμός των ινών από την τσιμεντόπαστα καθώς και η αποφυγή δημιουργίας συμπλεγμάτων ινών (σβώλιασμα). Τα συστήματα συμπύκνωσης μέσω δόνησης θα πρέπει να προσαρμόζονται στην υψηλή ρευστότητα και την ειδική σύσταση των σκυροδεμάτων UHPFRC. Επίσης, προτείνεται η συνεχόμενη χύτευση του σκυροδέματος. Σε περίπτωση διακοπής των εργασιών σκυροδέτησης ή στην περίπτωση μεγάλης χρονικής διαφοράς μεταξύ των παρτίδων, ελλοχεύει ο κίνδυνος σχηματισμού επιδερμικής στρώσης στην τελευταία σκυροδετηθείσα επιφάνεια. Ακόμα, πρέπει να αποφεύγεται η ξήρανση της επιφανειακής στρώσης ενώ πρέπει να διασφαλίζεται η συνέχεια των ινών μέσω σύνδεσης των στρώσεων διαφορετικών παρτίδων σκυροδέτησης.

Σκυροδέτηση υπό χαμηλές θερμοκρασίες

Όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι μικρότερη των $+ 5^{\circ} \text{C}$, δεν συστήνεται σκυροδέτηση εκτός αν πραγματοποιηθούν ειδικές τροποποιήσεις όπως:

- Η θέρμανση των αδρανών και/ή του νερού του μείγματος,
- Η χρήση χοντρής ξυλείας είτε πλήρως στεγανών καλουπιών
- Η χρήση προσθέτων-επιταχυντών πήξης και σκλήρυνσης,

Όταν η εξωτερική θερμοκρασία βρίσκεται μεταξύ των $+ 5^{\circ} \text{C}$ και $+ 10^{\circ} \text{C}$ τη στιγμή της σκυροδέτησης, σκυροδετούνται επίσης μεμονωμένα δοκίμια τα οποία διατηρούνται σε περιβαλλοντικές συνθήκες πανομοιότυπες με αυτές του έργου (δοκίμια έργου). Η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων αυτών ελέγχεται λίγο πριν το ξεκαλούπωμα, οπότε και αυτό επιτρέπεται μόνο στην περίπτωση που προκύψει η κατάλληλη τιμή αντοχής από τον έλεγχο του δοκιμίου. Η δοκιμή επαναλαμβάνεται και σε άλλα δοκίμια αν κριθεί απαραίτητο.

Όλα τα προϊόντα πρέπει να φυλάσσονται σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή.

Όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι υψηλότερη των 35° C, πρέπει να λαμβάνονται ειδικές προφυλάξεις για την αποφυγή ανάπτυξης μεγάλων θερμοκρασιών στο εσωτερικό στοιχείων με μεγάλο πάχος. Αυτές οι προφυλάξεις είναι αντίστοιχες αυτών που λαμβάνονται και για τα συνήθη σκυροδέματα (ψύξη του νερού του μείγματος κλπ.). Ειδικότερα, πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν η ευαισθησία των υπερρρευστοποιητών στη θερμοκρασία, η οποία οδηγεί σε σημαντικές αλλαγές των ιδιοτήτων πριν την χύτευση.

Σκλήρυνση σκυροδέματος

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στη σκλήρυνση του UHPFRC λόγω της πολύ χαμηλής είτε ανύπαρκτης εξίδρωσης. Τα ειλημμένα μέτρα πρέπει να πιστοποιούνται από δοκιμές καταλληλότητας σκυροδέματος. Οι κατασκευαστικοί αρμοί πρέπει να φροντίζονται συστηματικά, κυρίως ώστε να αποφευχθεί η ξήρανση του σκυροδέματος πριν την χύτευση και οι μικρο-ρηγματώσεις κατά τη σκυροδέτηση. Η σκλήρυνση πρέπει να πραγματοποιείται προσεκτικά και να πιστοποιείται από ελέγχους καταλληλότητας.

Ωρίμανση σκυροδέματος

Η παρακολούθηση της ωρίμανσης υλοποιείται ελέγχοντας την αυξανόμενη αντοχή του UHPFRC. Τα σκυροδέματα αυτά παρουσιάζουν μια λανθάνουσα περίοδο η οποία μπορεί να είναι μεγάλη και εξαρτάται στενά από τις εξωτερικές συνθήκες. Όταν απαιτείται αντοχή σε σύντομο χρόνο, η παρακολούθηση της ωρίμανσης του σκυροδέματος αποτελεί καίρια λύση.

3 ΓΕΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ OPENSEES

Για τη στατική επίλυση του προβλήματος της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Opensees.

Το OpenSees (Open System for Earth-quake Engineering Simulation), αποτελεί μια πλατφόρμα εργασίας για την στατική και δυναμική επίλυση προσομοιωμάτων δομοστατικού είτε γεωτεχνικού αντικείμενου, με δυνατότητα εκπόνησης μη-γραμμικών στατικών είτε εν χρόνω δυναμικών επιλύσεων σε συνδυασμό με το εκάστοτε μοντέλο επεξεργασίας των εξαγόμενων αποτελεσμάτων. Ο στόχος του OpenSees είναι να υποστηρίξει ένα ευρύ πεδίο από εφαρμογές προσομοίωσης φορέων για επίλυση κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό.

Η προσομοίωση πραγματοποιείται μέσω της γλώσσας προγραμματισμού Tcl/Tk η οποία επεκτείνεται ώστε να ενσωματώνει αντικείμενα (objects) του OpenSees. Καθώς αναπτύσσονται νέα αντικείμενα, όπως μοντέλα προσομοίωσης υλικών, στοιχείων, μέθοδοι επίλυσης κλπ, η γλώσσα προγραμματισμού επεκτείνεται ώστε να τα συμπεριλάβει. Η γλώσσα αυτή ενδείκνυται για επεξεργασία μεταβλητών, εντολών, βρόχων (loops), κατασκευή δεδομένων και στοιχείων input/output τα οποία είναι χρήσιμα για την προσομοίωση.

Για τη διεξαγωγή μιας προσομοίωσης απαιτούνται στοιχεία από το χρήστη για τους παρακάτω τρεις σκοπούς:

1. Προσομοίωση: Ο χρήστης αρχικά δημιουργεί ένα στοιχείο **ModelBuilder** το οποίο καθορίζει τον τύπο του προσομοιώματος, καθώς και τις διαθέσιμες εντολές για το εκάστοτε προσομοίωμα. Με καθορισμένο το ModelBuilder, ο χρήστης δημιουργεί αντικείμενα που περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων:
 - i. Πεπερασμένα στοιχεία (**Element**),
 - ii. Κόμβους (**Node**),
 - iii. Μάζες (**Mass**),
 - iv. Μοντέλα Φόρτισης (**LoadPattern**) και
 - v. Τρόπο στήριξης-δέσμευσης των επικόμβιων βαθμών ελευθερίας (**constraint** object).
2. Ανάλυση: μετά τον προσδιορισμό του μοντέλου προσομοίωσης, το επόμενο βήμα είναι η επιλογή της μεθόδου ανάλυσης ώστε να επιλυθεί το προσομοίωμα. Αυτή μπορεί να είναι από μια απλή γραμμική στατική ανάλυση μέχρι μη γραμμική δυναμική ανάλυση. Στο OpenSees ο προσδιορισμός

του τύπου της ανάλυσης που θα πραγματοποιηθεί γίνεται με τον ορισμό των εξής επιμέρους εντολών: ***SolutionAlgorithm***, ***Integrator***, ***ConstraintHandler***, ***DOF_Numberer***, ***SystemOfEqn***, ***Solver***, and ***AnalysisModel***.

Η παραπάνω προσέγγιση παρέχει μια μεγάλη ποικιλία τρόπων διεξαγωγής μιας ανάλυσης,

- ***ConstraintHandler*** -- καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η διαχείριση των τυχόν δεσμεύσεων των βαθμών ελευθερίας κατά την επίλυση (συννοριακές συνθήκες, διαφραγματική λειτουργία, επιβολή παραμορφώσεων κλπ).
 - ***DOF_Numberer*** – καθορίζει την απεικόνιση μεταξύ του αριθμού εξισώσεων και των βαθμών ελευθερίας.
 - ***Integrator*** – καθορίζει το προβλεπόμενο βήμα για το χρόνο $t+dt$
 - ***SolutionAlgorithm*** – προσδιορίζει την αλληλουχία των απαιτούμενων βημάτων ώστε να επιλυθεί η μη-γραμμική εξίσωση στο τρέχον βήμα.
 - ***SystemOfEqn/Solver*** – μέσα στον αλγόριθμο επίλυσης *SolutionAlgorithm*, η εντολή αυτή καθορίζει πώς να αποθηκευτεί και να επιλυθεί το σύστημα εξισώσεων κατά την ανάλυση.
 - ***Convergence Test*** – προσδιορίζει το πότε επιτυγχάνεται η σύγκλιση.
3. Προσδιορισμός εξαγόμενων αποτελεσμάτων: μετά τον προσδιορισμό του στατικού μοντέλου προσομοίωσης και του τύπου της ανάλυσης που θα πραγματοποιηθεί, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα προγραμματισμού των εξαγόμενων αποτελεσμάτων κατά την ανάλυση. Για παράδειγμα, αυτό θα μπορούσε να είναι η χρονοιστορία των μετατοπίσεων ενός κόμβου ή η εσωτερική εντατική κατάσταση ενός στοιχείου κατά τη διάρκεια μιας δυναμικής ανάλυσης, είτε ολόκληρη η κατάσταση ενός μοντέλου σε κάθε βήμα της διαδικασίας επίλυσης. Διάφορα αντικείμενα ***Recorder objects*** είναι διαθέσιμα για τον προσδιορισμό από τον χρήστη των στοιχείων που επιθυμεί να εξαγονται-αποτυπώνονται κατά την ανάλυση.

Πιο συγκεκριμένα:

Η επιβολή φορτίων στο Opensees είναι μία διαδικασία αποτελούμενη από τρία βήματα:

1. Αρχικός προσδιορισμός των φορτίων σε ένα load-pattern.
2. Κατά δεύτερον, προσδιορισμός της ανάλυσης και των χαρακτηριστικών της.
3. Η άσκηση των φορτίων πραγματοποιείται κατά την εκτέλεση της ανάλυσης.

1) ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

Τα φορτία καθορίζονται χρησιμοποιώντας την εντολή ***pattern***. Τρεις τύποι είδους φόρτισης είναι προς το παρόν διαθέσιμοι :

- a) ***Plain pattern*** – ο τύπος αυτός φόρτισης χρησιμοποιείται για να καθορίσει τα ακόλουθα:
 - i) Επικόμβια φορτία, όπως φορτία βαρύτητας ή οριζόντια φορτία (εναλλακτικά οριζόντιες μετατοπίσεις μέσω ελεγχόμενης επιβολής φορτίου)
 - ii) Δεσμεύσεις ενός βαθμού ελευθερίας, όπως ο έλεγχος μετατόπισης σε κόμβο (συνήθως χρησιμοποιούμενος σε σταθερή μετατόπιση κόμβου)
 - iii) Φορτία εσωτερικά των πεπερασμένων στοιχείων, όπως καταναμημένα φορτία βαρύτητας κατά μήκος ενός ραβδόμορφου στοιχείου (αυτό είναι μια νέα εκδοχή, η οποία ακόμα χρήζει έρευνας).

- b) ***UniformExcitation Pattern*** – αυτό το είδος επιφόρτισης επιβάλλει την εισαγωγή καταγεγραμμένης επιτάχυνσης (acceleration record), σε όλους τους δεσμευμένους βαθμούς ελευθερίας, κατά μία συγκεκριμένη διεύθυνση (ανάλογα με τους βαθμούς ελευθερίας του προβλήματος).
- c) ***MultipleSupport Pattern*** – αυτού του είδους ο τύπος φόρτισης επιβάλλει την εισαγωγή μιάς ιστορίας μετατόπισης (displacement record) σε προδιαγεγραμμένους κόμβους, σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση, είτε την εισαγωγή group-motion record.

2) ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΥΠΟΥ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Το κομμάτι του προσδιορισμού της ανάλυσης στο Opensees επιτρέπει στο χρήστη να καθορίσει τα διάφορα διαθέσιμα εργαλεία για την υλοποίηση γραμμικής ή μη-γραμμικής ανάλυσης. Για κάθε ανάλυση, απαιτούνται τα ακόλουθα στοιχεία, κατά προτίμηση με την παρακάτω σειρά :

<p>Constraints</p> <p>ConstraintHandler (ΔΕΣΜΕΥΣΕΙΣ ΒΑΘΜΩΝ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ)</p>	<p>Η εντολή constraints χρησιμοποιείται για την σύσταση του αντικειμένου ConstraintHandler. Το Constraints επιβάλλει την συσχέτιση μεταξύ βαθμών ελευθερίας. Η εντολή ConstaintHandler καθορίζει πως οι εξισώσεις των δεσμεύσεων των βαθμών ελευθερίας επιβάλλονται στην ανάλυση.</p>
<p>Numberer</p>	<p>Η εντολή numberer χρησιμοποιείται για την σύσταση του αντικειμένου DOF_Numberer, η οποία καθορίζει την απεικόνιση μεταξύ του αριθμού των εξισώσεων και των βαθμών ελευθερίας – πώς δηλαδή αριθμούνται οι βαθμοί ελευθερίας και μορφώνεται το μητρώο δυσκαμψίας.</p>
<p>System</p>	<p>Η εντολή system χρησιμοποιείται για την σύσταση των εντολών LinearSOE και LinearSolver για την αποθήκευση και επίλυση του συστήματος των εξισώσεων στην ανάλυση.</p>
<p>Test</p>	<p>Η εντολή test χρησιμοποιείται για τη σύσταση του αντικειμένου ConvergenceTest. Ορισμένες εντολές SolutionAlgorithm προϋποθέτουν μια εντολή ConvergenceTest, ώστε να προσδιοριστεί εάν επιτεύχθηκε η σύγκλιση στο τέλος των επαναληπτικών βημάτων.</p>
<p>Algorithm</p>	<p>Η εντολή algorithm χρησιμοποιείται για να συσταθεί το αντικείμενο SolutionAlgorithm, η οποία καθορίζει την αλληλουχία των βημάτων που απαιτούνται ώστε να επιλυθεί μια μη-γραμμική εξίσωση.</p>
<p>Integrator</p>	<p>Η εντολή integrator χρησιμοποιείται για να συσταθεί το αντικείμενο Integrator, το οποίο καθορίζει τους όρους επίλυσης, στο σύστημα εξισώσεων του αντικειμένου επίλυσης (Analysis). Το στοιχείο Integrator χρησιμοποιείται για τα ακόλουθα:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Καθορίζει το προβλεπόμενο βήμα για χρόνο $t+dt$ • Προσδιορίζει το εφαπτομενικό μητρώο K_t και το εναπομένον διάνυσμα αντίστασης dR σε κάθε επαναληπτική δοκιμή επίλυσης • Καθορίζει το διορθωτικό βήμα βάσει του προσαυξητικού βήματος μετατόπισης dU
<p>Analysis</p>	<p>Η εντολή Analysis χρησιμοποιείται για τη σύσταση του αντικειμένου Analysis, το οποίο συντίθεται από τα συστατικά στοιχεία που δημιουργήθηκαν προηγουμένως από το χρήστη. Σε όλα τα διαθέσιμα είδη ανάλυσης εφαρμόζονται λύσεις προσαυξητικών αριθμητικών μεθόδων. Υπάρχουν τρεις διαθέσιμοι τύποι ανάλυσης:</p> <p><u>Static Analysis:</u> Στατική ανάλυση <u>Transient Analysis:</u> Εν χρόνω ανάλυση <u>VariableTransient Analysis:</u> Μεταβλητή εν χρόνω ανάλυση</p>

3) ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η ανάλυση εκτελείται χρησιμοποιώντας την εντολή analyze. Η παραπάνω εντολή εκκινεί την ανάλυση σύμφωνα με τον προσδιορισμένο αριθμό βημάτων.

4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΩΔΙΚΑ ΟΡΕΝΣΕΕΣ

4.1 ΜΟΡΦΩΣΗ ΔΟΚΟΥ-ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

4.1.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκού

Για την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη πληρότητα και διερεύνηση της κλιμακούμενης επίδρασης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διατομής που συνθέτουν τις διαστάσεις της, τόσο στη φέρουσα ικανότητα του ισοστατικού φορέα, όσο και στο ογκομετρικό του αποτύπωμά και κατ' επέκταση στην κοστολόγηση του, επιλέχθηκε ο ορισμός των L (μήκος δοκού), h (συνολική κρέμαση δοκού), b (πλάτος κορμού της δοκού) και επιπρόσθετα για την περίπτωση διατομής πλακοδοκού, των b_{eff} (ενεργό – ισοδύναμο πλάτος θλιβόμενης παρειάς της πλακοδοκού) και h_f (πάχος συνεργαζόμενης πλάκας πλακοδοκού) ως παραμέτρων.

Η παραμετροποίηση επιλέχτηκε ως εξής με έμφαση στην επιλογή μέσω των έως μεγάλων ανοιγμάτων και αντίστοιχη επιλογή χαμηλών (σχετικά προς; το άνοιγμα) κρεμάσεων των δοκών, ώστε να διερευνηθεί και να αναδειχθεί η δυνατότητα – ωφέλεια της χρήσης σκυροδεμάτων HSC και UHPC στην κάλυψη μεγάλων ανοιγμάτων:

$$- \quad l = [5.0 \text{ m}, 10.0 \text{ m}, 15.0 \text{ m}, 20.0 \text{ m}, 25.0 \text{ m}, 30.0 \text{ m}]$$

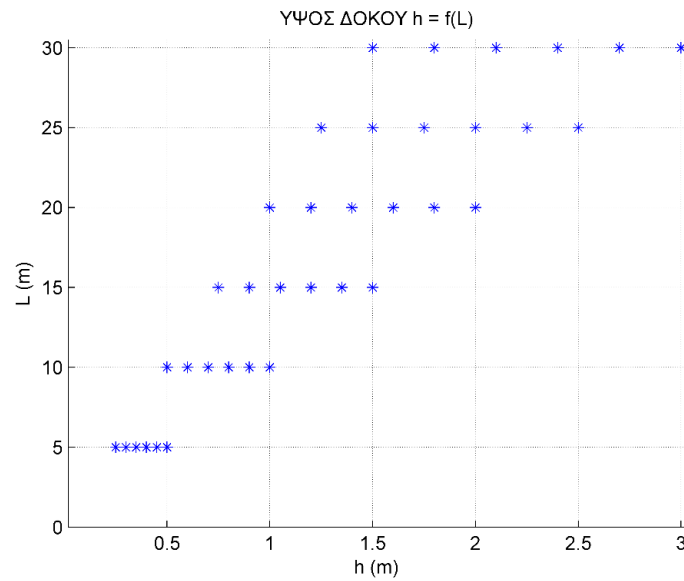
ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ

$$- \quad h = f(l) = [0.05 * l, 0.06 * l, 0.07 * l, 0.08 * l, 0.09 * l, 0.1 * l]$$

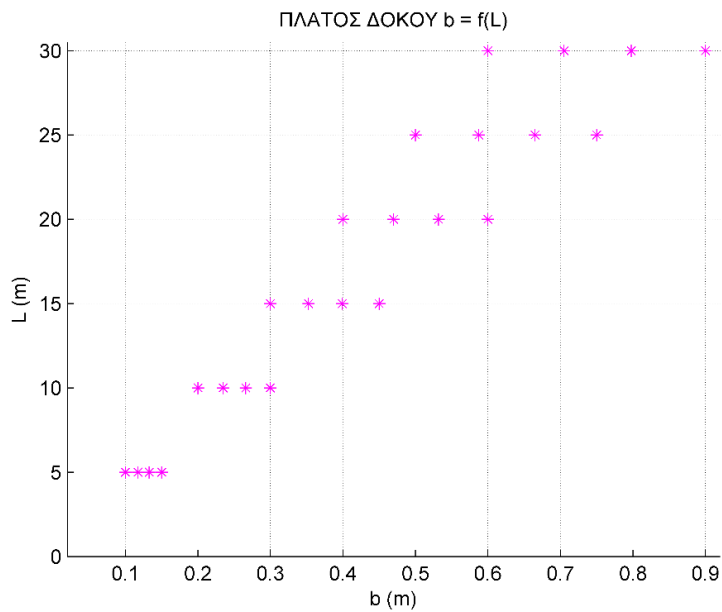
$a * L_o/d \leq 20$ (όπου $a = 1$ για $L_o = l$: καθαρό μήκος μεταξύ στηρίξεων αμφιερίστου) κατά EN1992-1-1

$$- b = f(l) = [0.02 * l, 0.0233 * l, 0.0266 * l, 0.03 * l]$$

$$b_w > L_o/50 \ \& \ b_w > h_b/8 \ (h_b: \text{ύψος δοκού κατά EN1992-1-1})$$



Σχήμα 4.1: Τιμές ύψους h που λήφθηκαν υπόψη στο σχεδιασμό συναρτήσεως κάθε ανοίγματος



Σχήμα 4.2: Τιμές ύψους b που λήφθηκαν υπόψη στο σχεδιασμό συναρτήσεως κάθε ανοίγματος

ΔΙΑΤΟΜΗ ΠΛΑΚΟΔΟΚΟΥ

$$- h = f(l) = [0.05 * l, 0.06 * l, 0.07 * l, 0.08 * l, 0.09 * l, 0.1 * l]$$

- $b = f(l) = [0.02 * l, 0.0233 * l, 0.0266 * l, 0.03 * l]$
- $b_{eff} = f(b, l) = b + 0.2 * l$
- $h_f = f(l) = 0.01 * l$

4.1.2 Χαρακτηριστικά Αντοχής

Για τους προαναφερθέντες λόγους πληρότητας της διερεύνησης καθώς και την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού εφικτής γεωμετρικά λύσης και απαιτούμενης αντοχής για την υλοποίηση της, η παράμετρος της αντοχής του σκυροδέματος καθώς και το ποσοστό διαμήκους οπλισμού έναντι κάμψης (εδώ αναγόμενο σε συνολικό απαιτούμενο εμβαδό οπλισμού σε cm^2), έλαβαν επίσης μια σειρά από διαφορετικές τιμές ως εξής :

Ο σχεδιασμός της δοκού έγινε λαμβάνοντας υπόψη τον Πίνακα 3.1 κατά EN 1992-1-1:2004 (κατηγορίες αντοχής συμβατικού σκυροδέματος και ανηγμένων παραμορφώσεων του). (Πίνακας 2.5) Χαρακτηριστικά μελετήθηκαν οι εξής αντοχές συμβατικού σκυροδέματος :

- $f_{ck} = [20 \ 25 \ 30 \ 35 \ 40 \ 45 \ 50 \ 55 \ 60 \ 70 \ 80 \ 90] \text{ MPa}$

Επίσης, μελετήθηκαν οι εξής αντοχές σκυροδέματος UHPC:

- $f_{ck} = [150] \text{ MPa}$

ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΜΨΗΣ

Τοποθετήθηκε ο ακόλουθος εφελκόμενος διαμήκης οπλισμός ενώ για λόγους σύμπραξης με τον Ευρωκώδικα τοποθετήθηκε ως θλιβόμενος διαμήκης οπλισμός ο μισός του εφελκόμενου. Χαρακτηριστικά οι τιμές που έλαβε :

- $A_{s.min} = 0.26 \cdot f_{ct} \cdot b \cdot d / f_{yk}$ (EN1992-1-1:2004 / Εξίσωση 9.2.1.1 (1))
- $A_{s.max} = 0.04 \cdot b \cdot d$ (EN1992-1-1:2004 / Εξίσωση 9.2.1.1 (3))

Βάσει του παραπάνω μέγιστου και ελάχιστου επιτρεπόμενου διαμήκους οπλισμού, διακριτοποιήθηκε το εύρος τιμών διαμήκους οπλισμού κάμψης που χρησιμοποιήθηκε στην στατική επίλυση σε διαστήματα $dA = (A_{s.max} - A_{s.min}) / 10$ λαμβάνοντας έως 10 τιμές μεταξύ των παραπάνω ορίων.

Ο συνδυασμός των παραπάνω παραμέτρων μεταξύ τους και συγκεκριμένα : έξη λύσεις για το άνοιγμα της δοκού (l), έξη λύσεις για την κρέμαση της δοκού (h), τέσσερις λύσεις για το πλάτος της δοκού (b), δώδεκα λύσεις για την αντοχή του συμβατικού σκυροδέματος (f_{ck}) συν μία για το σκυρόδεμα υπέρ-υψηλής αντοχής, δέκα λύσεις για τον διαμήκη οπλισμό (A_s) οδήγησε στον συνολικό αριθμό των 17583 συνδυασμών για το παραμετροποιημένο πρόβλημα γεωμετρίας και αντοχής.

Επιπλέον ίσοι συνδυασμοί επιλύθηκαν για την περίπτωση της διατομής μορφής πλακοδοκού (T).

4.1.3 Διακριτοποίηση σε κόμβους

Για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας στην προσέγγιση της στατικής λύσης ανάλυσης, η αμφιέριστη δοκός διακριτοποιήθηκε σε 20 ίσα τμήματα (ανά $L/20$) με τον ορισμό 21 κόμβων ίδιων ιδιοτήτων με την εξαίρεση των ακριανών, στους οποίους και επιβλήθηκαν οι συνοριακές συνθήκες περιορισμού της κατακόρυφης μετατόπισης, της αξονικής παραμόρφωσης, ενώ δόθηκε ελευθερία στροφής-μηδενική στροφική δυσκαμψία.

4.2 Στοιχεία

Για την προσομοίωση του φορέα της αμφιέριστης δοκού χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία δοκού υποστυλώματος ελέγχου μετατόπισης (**displacement Based Beam-Column Element**) στα οποία ορίστηκαν τρία σημεία ολοκλήρωσης (**integration points** κατά Gauss-Lobatto). Σε κάθε ένα από τα παραπάνω στοιχεία ορίζεται κοινή διατομή εφόσον ο οπλισμός αμφιέριστου παραμένει σταθερός κατά μήκος (εφελκούμενος διαμήκης οπλισμός-κάτω ίνα και θλιβόμενος διαμήκης οπλισμός-άνω ίνα ως ο μισός της εφελκούμενης).

Η γεωμετρική διακριτοποίηση σε 20 τμήματα εκατέρωθεν των κόμβων επιλέχθηκε για την όσο το δυνατόν ακριβέστερη προσέγγιση της λύσης.

4.3 Διατομές

Όλες οι διατομές που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της δοκού (ορθογωνική, πλακοδοκού) έχουν διακριτοποιηθεί σε κανάβο αποτελούμενο από ίνες (**section fiber**). Αυτή η επιλογή έγινε ώστε να προσομοιωθεί όσο γίνεται ακριβέστερα ο χαρακτήρας των διατομών ωπλισμένου σκυροδέματος ο οποίος αποτελείται από τμήματα διατομών που διέπονται από διαφορετικά χαρακτηριστικά (καταστατικούς νόμους). Συγκεκριμένα ο πυρήνας που περικλείεται από τον εγκάρσιο οπλισμό διάτμησης (περισφιγμένο σκυροδέμα), οι επιφανειακές στρώσεις απερίσφιγκτου σκυροδέματος καθώς και ο διαμήκης οπλισμός κάμψης άνω και κάτω. Επισημαίνεται ότι στην προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε αγνοήθηκε η περίσφιξη του σκυροδέματος λόγω μικρής σημασίας στον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας έναντι καθαρής κάμψης. (σε περίπτωση που λαμβανόταν υπόψη, η περίσφιξη που επιτυγχάνεται χάρη στο διατμητικό οπλισμό, θα αύξανε την αντοχή σε f_{ck} λόγω επίτευξης τριαξονικότητας).

Επιπλέον, η διακριτοποίηση των διατομών σε ίνες θεμελιώνεται στην κλασική θεωρία μονοαξονικής κάμψης (Βαρδουλάκης, 1999) σύμφωνα με την οποία ισχύουν τα εξής:

1. Η παραδοχή Euler-Bernoulli περί επιπεδότητας των διατομών, από την οποία λαμβάνεται επίσης η αξονική παραμόρφωση κάθε σημείου κατά μήκος του άξονα x από τα εξής :

$$\varepsilon(x,y) = \varepsilon_0 - \varphi y * z + \varphi z * y$$

όπου: ε_0 η παραμόρφωση στο κέντρο βάρους της διατομής

φy η καμπυλότητα περί τον άξονα z

φz η καμπυλότητα περί τον άξονα y

2. Η παραδοχή της καθετότητας των διατομών στον παραμορφωμένο φορέα.
3. Η μετατόπιση κατά τον κατακόρυφο άξονα εξαρτάται μόνο από τη θέση χ που σημαίνει ότι όλα τα σημεία μιας ορθής διατομής υφίστανται την ίδια κατακόρυφη μετατόπιση.

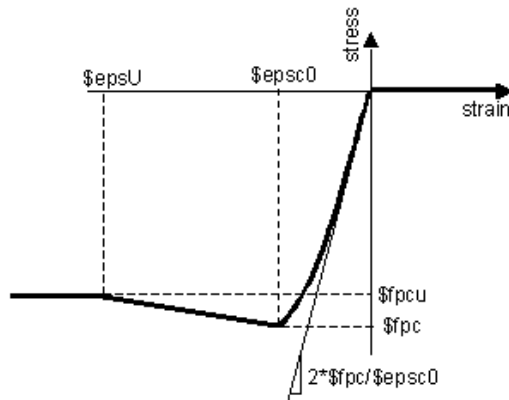
4. Τα επιμέρους τεμάχια της σύνθετης διατομής είναι άρρηκτα συνδεδεμένα μεταξύ τους ώστε να μη λαμβάνει χώρα ολίσθηση μεταξύ των διεπιφανειών τους.

Κάνοντας την παραδοχή της μονοαξονικής καταπόνησης και συγκεκριμένα της κάμψης περί τον y (ανηγμένες παραμορφώσεις κατά τον x , βέλη κατά τον z), κατά την εγκάρσια έννοια- y - θεωρούμε μηδενική την καμπτική παραμόρφωση. Ως συνέπεια του παραπάνω, η διακριτοποίηση της διατομής σε ίνες κατά τη διεύθυνση y αποτελείται από μια ίνα (παραδοχή μηδενικής κάμψης περί τον z), ενώ για την αξιόπιστη απόδοση της μονοαξονικής κάμψης περί τον y άξονα, η διακριτοποίηση της διατομής κατά τη διεύθυνση z αποτελείται από 150-250 ίνες.

4.4 ΥΛΙΚΑ

Οι καταστατικοί νόμοι των υλικών μονοαξονικής καταπόνησης (*uniaxialMaterial*) που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση, αναλύονται ως εξής :

- 1) Σκυροδέμα συνήθους αντοχής στην οριακή κατάσταση αστοχίας



Σχήμα 4.3:
Καταστατικός νόμος
υλικού Concrete01
(Mc Kenna et al..
2007)

Από τα διατιθέμενα υλικά σκυροδέματος που προσφέρει το λογισμικό Opensees χρησιμοποιήθηκε το **Concrete01** των Kent-Scott-Park, του οποίου ο καταστατικός νόμος φαίνεται στο Σχήμα 5-1. Αποτελεί μονοαξονικό υλικό που προσεγγίζει την θεωρητική συμπεριφορά του σκυροδέματος σε θλίψη κατά τον EN1992-1-1 (2004). Αγνοείται πλήρως η εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος (μηδενική εφελκυστική αντοχή). Τα χαρακτηριστικά σημεία που λαμβάνει ως παραμέτρους το πρόγραμμα αποτελούνται:

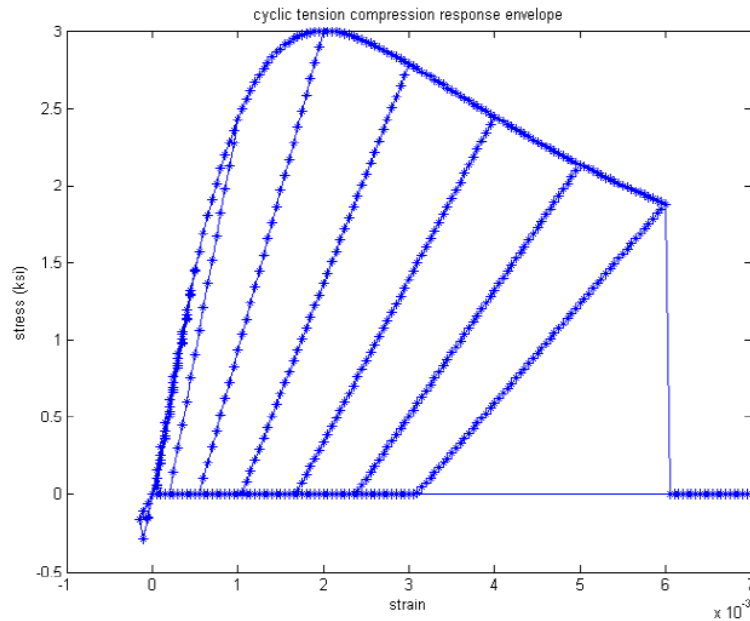
$$f_{pc} = f_{cd} = 0.85 \cdot f_{ck} / \gamma_c$$

$f_{pcu} = f_{pc} = f_{cd}$ παραδοχή διγραμμικής συμπεριφοράς σκυροδέματος (πλατώ μετά το πέρας της ελαστικής περιοχής και μέχρι την αστοχία)

$$\epsilon_{ps0} = \epsilon_{c0}$$

$$\epsilon_{psu} = \epsilon_{cu}$$

2) Σκυρόδεμα συνήθους αντοχής στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας



Σχήμα 4.4: καταστατικός νόμος υλικού Concrete04
(Mc Kenna et al.. 2007)

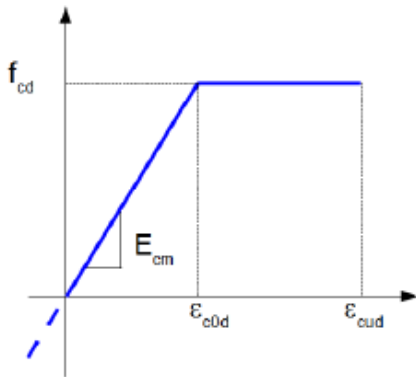
Η διαφοροποίηση στη θεώρηση υλικών κατά την κατάσταση αστοχίας και λειτουργικότητας έγινε με στόχο την συμπερίληψη στην περίπτωση της λειτουργικότητας, της εφελκυστικής αντοχής της εκάστοτε κατηγορίας αντοχής του σκυροδέματος, καθώς η ελάχιστη εφελκυστική συνεισφορά του σκυροδέματος λαμβάνεται υπόψιν για τον υπολογισμό της αντοχής ρηγμάτωσης. Χρησιμοποιήθηκε το μη-γραμμικό, ελαστοπλαστικό διάγραμμα του προσομοιώματος Poronics

Τα στοιχεία για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών σημείων του καταστατικού νόμου δεν διαφοροποιούνται από το παραπάνω υλικό, καθώς μόνη προσθήκη είναι η τιμή ρηγμάτωσης του σκυροδέματος $\langle f_{ct}, et \rangle$

3) Σκυρόδεμα υπέρ-υψηλής αντοχής

Η επιλογή που έγινε για τον καταστατικό νόμο που διέπει τα σκυροδέματα υπερ-υψηλής αντοχής, βασίστηκε στους απλοποιητικούς νόμους που εντοπίζονται στον τροποποιημένο κανονισμό για τα UHPC από τη γαλλική Association Française de Génie Civil (AFGC-Recommandations, BFUP Juin 2003) στο Κεφάλαιο Σχεδιασμού και Υλικών.

Απλοποιητικός Νόμος σε Θλίψη



Όπου :

$$e_{c0} = f_{ck} / E_{cm}$$

$$f_{cd} = a_{cc} f_{ck} / \gamma_c$$

$$e_{c0d} = f_{cd} / E_{cm}$$

$$e_{cud} = [1 + 14 (f_{ctfm} / f_{cm})] \cdot e_{c0d}$$

γ_c συντελεστής ασφαλείας υλικού, ορισμένος κατά τον EN1992-1 για τα συνήθη σκυροδέματα

a_{cc} μειωτικός συντελεστής επιρροής της δυσμενούς επιβολής φόρτισης. Για τα UHPFRC συστήνεται η τιμή 0.85.

f_{ctfm} μέγιστη μέση τιμή εφελκυστικής αντοχής μετά θραύσης

f_{cm} μέγιστη μέση τιμή θλιπτικής αντοχής

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι προτεινόμενες τιμές για προκαταρκτικό σχεδιασμό, δεδομένου της δυσκολίας εύρεσης χαρακτηριστικών κατηγοριών αντοχών σκυροδεμάτων υπερ-υψηλής αντοχής, καθώς αυτές προκύπτουν από την εκάστοτε σύνθεση και μετέπειτα επεξεργασία των εργαστηρίων και δεν προτυποποιούνται.

Οι τιμές αυτές είναι:

$$f_{ck} = 150 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} = 180 \text{ MPa}$$

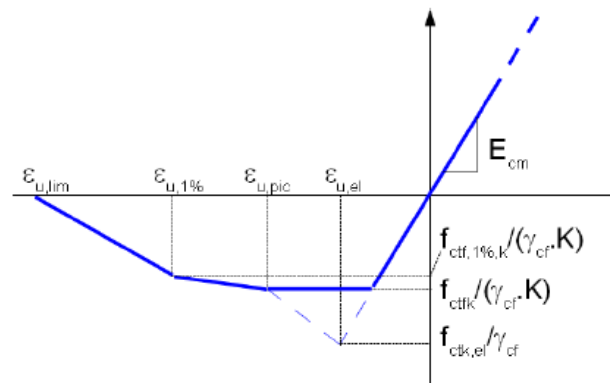
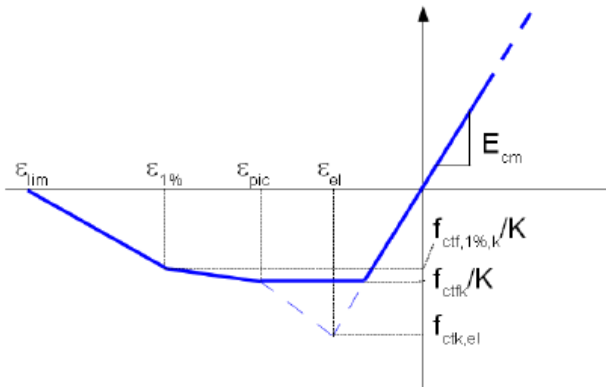
$$f_{cd} = 85 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 9 \text{ MPa} , f_{ct,k} = 9 \text{ MPa}$$

$$e_{cud} = 2,7 \cdot 10^{-3}$$

$$K = 1.25$$

Απλοποιητικός Νόμος σε Εφελκυσμό (περίπτωση strain softening)



Καταστατικός νόμος ΟΚΛ

$$\epsilon_{peak} = \frac{w_{peak}}{l_c} + \frac{f_{ctk,el}}{E_{c,eff}}$$

$$\epsilon_{1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \frac{f_{ctk,el}}{E_{c,eff}}$$

$$\epsilon_{u,lim} = \epsilon_{lim} = \frac{l_f}{4 \cdot l_c} \leq 2,5\%$$

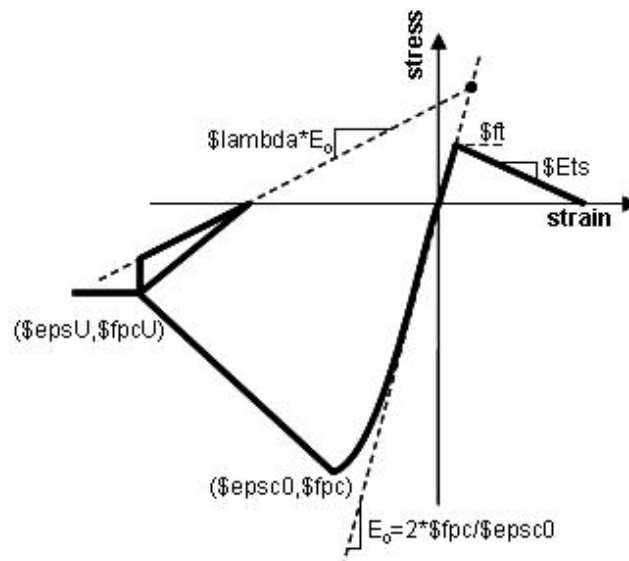
Καταστατικός νόμος ΟΚΑ

$$\epsilon_{u,peak} = \frac{w_{peak}}{l_c} + \frac{f_{ctk,el}}{\gamma_{cf} \cdot E_{c,eff}} \quad \text{όπου } w_{peak} = 0.3 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{u,1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \frac{f_{ctk,el}}{\gamma_{cf} \cdot E_{c,eff}} \quad \text{όπου } w_{1\%} = 0.01 \cdot H$$

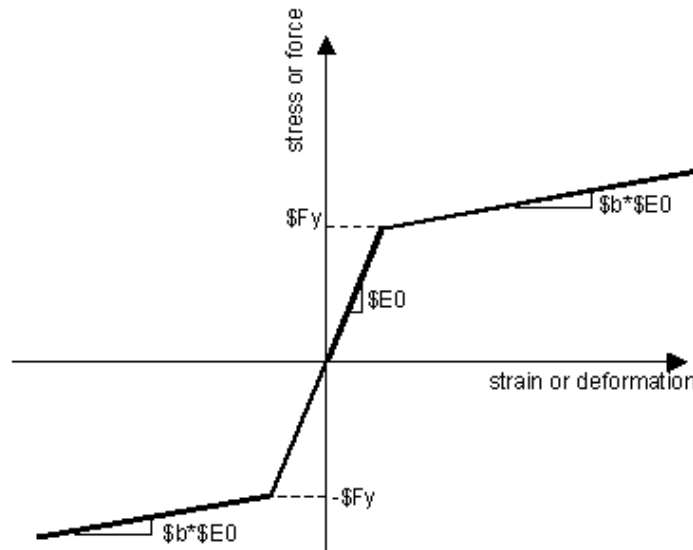
$$l_f \quad \text{μήκος ίνας}$$

$$l_c = 2 \cdot \frac{h}{3} \quad \text{χαρακτηριστικό μήκος}$$



Σχήμα 4.5: Καταστατικός νόμος υλικού **Concrete02**
(Mc Kenna et al., 2007)

4) Χάλυβας



Σχήμα 4.6: Καταστατικός νόμος υλικού **Steel01**
(Mc Kenna et al., 2007)

Ο χάλυβας του διαμήκουσ οπλισμού κάμψης που χρησιμοποιήθηκε θεωρήθηκε κατηγορίας B500c με μέτρο ελαστικότητας $E_0 = 200 \text{ GPa}$ και κράτυνση ίση με $k = b = 0.01$.

4.5 ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΑ ΦΟΡΤΙΑ

Μετά την προσομοίωση του φορέα, επιλέχθηκε γραμμική κατανομή του κατανεμημένου ιδίου βάρους της κάθε λύσης επικόμβια στους παραπάνω ορισμένους κόμβους (*loadPattern Plain Linear*). Ανάλογα με την ανάλυση με φορτία αστοχίας ή λειτουργικότητας, τα φορτία σχεδιασμού που ασκήθηκαν, προσαυξήθηκαν με τον εκάστοτε συντελεστή κατά EN1992-1 (Πίνακας 1.2).

Για την περίπτωση μελέτης σε οριακή κατάσταση αστοχίας το φορτίο επιβλήθηκε επαυξητικά με βήμα $dR=0.1$ σε 2000 βήματα ανάλυσης (επιβλήθηκε φορτίο ίσο με $200 \cdot 100\%$ του ιδιοβάρους του φορέα), με στόχο την αστοχία όλων των συνδυασμών (~ 17000). Η επαυξητική εφαρμογή του φορτίου πραγματοποιήθηκε με έλεγχο του επιβαλλόμενου φορτίου (***Integrator LoadControl***).

Για την περίπτωση μελέτης σε οριακή κατάσταση λειτουργικότητας, το φορτίο επίσης επιβλήθηκε επαυξητικά, με τη διαφορά πώς εδώ κρίσιμες και ελεγχόμενες ήταν οι μετακινήσεις και συγκεκριμένα το βέλος στην μεσαία διατομή της δοκού (***Integrator DisplacementControl***). Ως προσαυξητικό βήμα των μετακινήσεων, ορίστηκε υποπολλαπλάσιο του μέγιστου ανεκτού βέλους για την ΟΚΛ, προσαυξημένο στην περίπτωση μακροχρόνιας αστοχίας σε λειτουργικότητα και του συνυπολογιζόμενου ερπυσμού.

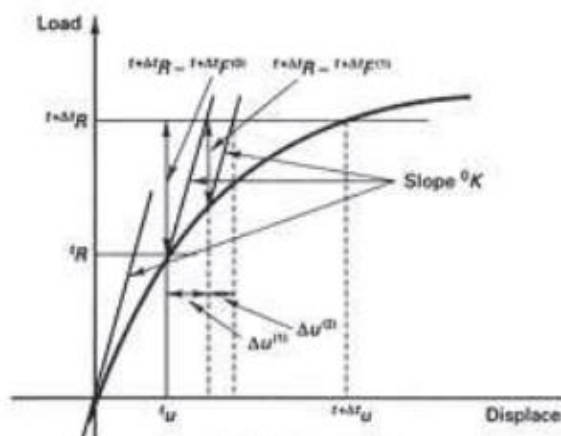
Συγκεκριμένα :

<u>Παραδοχές ανάλυσης</u>	<u>Προσαυξητικό βήμα</u>
ΟΚΛ βραχυχρόνια φορτία ($\varphi=0$)	$L/(250 \cdot N)$
ΟΚΛ μακροχρόνια φορτία ($\varphi f(RH=80\%)$)	$L/(500 \cdot N \cdot (1+\varphi))$

Η χρησιμοποιούμενη αριθμητική μέθοδος σύγκλισης στο φορτίο αστοχίας και λειτουργικότητας για κάθε συνδυασμό που επιλέχθηκε είναι η Newton-Raphson, στην οποία ορίστηκε αριθμός εσωτερικών επαναλήψεων για ακρίβεια σύγκλισης, ίσος με 100 εσωτερικά βήματα (iterations).

Στην παραπάνω μέθοδο ελέγχου του επιβαλλόμενου φορτίου, ο φορέας επιφορτίζεται με το φορτίο $dP_i=P/N$, όπου N ο αριθμός των βημάτων στα οποία διακριτοποιήσαμε το φορτίο.

Διατηρώντας σταθερό κάθε φορά το εφαπτομενικό μέτρο δυσκαμψίας K του φορέα, υπολογίζεται η προκαλούμενη μετατόπιση du_i και στη συνέχεια η εσωτερική αντίσταση που αναπτύσσεται στο φορέα λόγω επιβολής φορτίου μέσω εφαρμογής της εσωτερικής ισορροπίας. Ο ορισμός των εσωτερικών διορθωτικών επαναλήψεων που προαναφέρθηκε, έγκειται στον επανυπολογισμό της παραπάνω διαδικασίας στην περίπτωση που η απόκλιση εξωτερικά επιβαλλόμενης φόρτισης και εσωτερικής αντίστασης για το βήμα i είναι μεγαλύτερη της αποδεκτής που έχει ορισθεί μέσω της ακρίβειας σύγκλισης.



Σχήμα 4.7: μέθοδος Newton-Raphson με έλεγχο φορτίου

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1.1 Παράθεση και Σύγκριση ΟΚΑ και ΟΚΛ

Η διαχείριση των αποτελεσμάτων της στατικής επίλυσης από το Orpensees έγινε με τη χρήση κώδικα matlab.

Στο παραπάνω προσομοίωμα με τα αναφερόμενα χαρακτηριστικά ανάλυσης, στόχος ήταν η εύρεση της φέρουσας ικανότητας κάθε συνδυασμού. Με τον όρο φέρουσα ικανότητα εννοούμε το ποσοστό υπέρβασης του ιδίου βάρους ως συνολικό φορτίο που μπορεί να φέρει το προσομοίωμα πριν αστοχήσει. Δεδομένης της αναζήτησης αυτής, οι συνδυασμοί φορτίσεων που ασκήθηκαν στη δοκό, απαλλάσσονται από το άγνωστο για μας ωφέλιμο φορτίο εφεξής καλούμενο ως $q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron}$ (live load), το οποίο και αποτελεί το ζητούμενο των υπολογισμών μας εκ των υστέρων. Πιο συγκεκριμένα, οι επιβαλλόμενοι συνδυασμοί φορτίσεων για τις οριακές καταστάσεις αστοχίας και λειτουργικότητας (2 περιπτώσεις) έχουν ως εξής :

ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

ΟΚΑ

$$q = 1,35 \cdot g + 1,50 \cdot q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron}$$

ΟΚΛ (βραχυχρόνια $t=t_0$)

$$q = 1,00 \cdot g + 1,00 \cdot q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron}$$

ΟΚΛ (μακροχρόνια $t=\infty$)

$$q = 1,00 \cdot g + 0,30/0,60 \cdot q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron}$$

Θέτοντας ως συνθήκη : $q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron}=0$, επιβάλουμε φορτίο ίσο με $g = \gamma_c \cdot A_c$ (ίδιο βάρος) όπου:

$\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$ για συμβατικά ωπλισμένα σκυροδέματα και

$\gamma_c = 19 \text{ kN/m}^3$ για σκυροδέματα υπερυψηλής αντοχής

A_c εμβαδόν διατομής δοκού ($A_c = b \cdot h$ για ορθογωνική διατομή και $A_c = b_{eff} \cdot h_f + b_w \cdot h_w$ για διατομή πλακοδοκού)

Σε πλαίσια προμέτρησης η παραπάνω προσέγγιση του ίδιου βάρους της κατασκευής είναι επαρκής. Ωστόσο, εφόσον είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά οπλισμού της διατομής (παράμετρος των δοκιμών), γίνεται ακριβής υπολογισμός του ίδιου βάρους τόσο του αόπλου σκυροδέματος, όσο και του χάλυβα.

Στη συνέχεια μέσω της επαυξητικής μεθόδου επιφόρτισης με έλεγχο φορτίου (load Control) ή έλεγχο βέλους (displacement Control) βρίσκεται το τελικό φορτίο αστοχίας για κάθε συνδυασμό ως ηλικό ενός φορτιστικού συντελεστή λ και του επιβαλλόμενου ιδιοβάρους του. Συγκεκριμένα, το λ (load increment dR) εκφράζει το ποσοστό (%) της υπέρβασης του νεκρού φορτίου που θα έφερε κάθε αυτοφερόμενο δομικό στοιχείο. Προκύπτει λοιπόν το φορτίο κατανεμημένο στο μήκος της δοκού που αντιστοιχεί στην αναζητούμενη φέρουσα ικανότητα της.

Για τον υπολογισμό του πρόσθετου-ωφέλιμου φορτίου $q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron}$, ανάλογα με την κατάσταση αστοχίας ή λειτουργικότητας την οποία μελετάμε, ακολουθούνται οι εξής πορείες:

$$q_{bearing} = \lambda \cdot 1.35 \cdot g \quad (5-1)$$

$$q = 1,35 \cdot g + 1,50 \cdot q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron} \quad \text{υυ}(5-2)$$

$$q = 1,00 \cdot g + 1,00 \cdot q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron} \quad (5-3)$$

$$q = 1,00 \cdot g + 0,30/0,60 \cdot q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron} \quad (5-4)$$

Εξισώνοντας τις (5-1) και (5-2) προκύπτει:

$$q_{bearing} = 1,35 \cdot g + 1,50 \cdot q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron} \rightarrow$$

$$1,50 \cdot q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron} = (\lambda - 1) \cdot 1,35 \cdot g \rightarrow$$

$$q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron} = \frac{(\lambda - 1) \cdot 1,35 \cdot g}{1,50}$$

Ομοίως για ΟΚΛ (βραχυχρόνια, αγνοώντας ερπυστικά φαινόμενα) από εξίσωση των (5-1), (5-3) προκύπτει:

$$q_{bearing} = 1,00 \cdot g + 1,00 \cdot q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron} \rightarrow$$

$$1,00 \cdot q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron} = (\lambda - 1,00) \cdot g \rightarrow$$

$$q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron} = \frac{(\lambda - 1) \cdot g}{1,00}$$

Για ΟΚΛ μακροχρόνια, λαμβάνοντας υπόψη ως κύρια επίδραση του εν χρόνω ελέγχου βέλους τον ερπυσμό, χρησιμοποιούμε την εξίσωση των (5-1), (5-4) :

$$q_{bearing} = 1,00 \cdot g + 0,30/0,60 \cdot q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron} \rightarrow$$

$$0,30/0,60 \cdot q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron} = (\lambda - 1,00) \cdot g \rightarrow$$

$$q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron} = \frac{(\lambda - 1) \cdot g}{0,30/0,60}$$

Από τις παραπάνω δύο καταστάσεις λειτουργικότητας (βραχυχρόνια και μακροχρόνια), επιλέγεται η δυσμενέστερη, δηλαδή εκείνη που δίνει το μικρότερο $q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron}$. Εκτιμήθηκε ότι δυσμενέστερος συνδυασμός στον έλεγχο λειτουργικότητας ήταν αυτός στον οποίο λήφθηκαν υπόψη τα ερπυστικά βέλη (στον οποίο έλεγχο το φορτίο αστοχίας αντιστοιχεί σε βέλος $l/500$ όπως ορίζει ο κανονισμός EN1992-1.

Στη συνέχεια, γίνεται σύγκριση μεταξύ των ωφέλιμων φορτίων που προκύπτουν από τις οριακές καταστάσεις αστοχίας και λειτουργικότητας και επιλέγεται εκ νέου το μικρότερο $q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron}$. Η κριτική προσέγγιση του ελέγχου αυτού και της λήψης του μικρότερου $q_{\Omega\Phi\epsilon\lambda\iota\mu\omicron}$ κάνει εμφανές το γεγονός ότι σε μεγάλα ανοίγματα ραβδωτών, στην περίπτωση μας, φορέων η λυγνότητα που προκύπτει ως αναπόφευκτο αποτέλεσμα υλοποίησης μεγάλων λόγων l_0/h , είναι κρίσιμη και καθοριστική, ακόμα κι αν αυτός ο λόγος ακολουθεί τις διατάξεις του ευρωκώδικα που ορίζει $d = l/20 \cdot K$ όπου K λαμβάνεται από τον Πίνακα 7.4N του EN1992-1 και αποτελεί συνάρτηση του στατικού συστήματος και του γεωμετρικού ποσοστού οπλισμού. Για το στατικό προσομοίωμα της αμφιέριστης δοκού όπου το καθαρό μήκος ανοίγματος (l_0) ταυτίζεται με το άνοιγμα της δοκού (l), το σχετικό τμήμα του Πίνακα 7.4 φαίνεται στον Πίνακα 5-1.

Δομικό σύστημα	K	Σκυρόδεμα υπό υψηλή τάση $\rho=1,5\%$	Σκυρόδεμα υπό χαμηλή τάση $\rho=0,5\%$
Αμφιέριστη δοκός ή πλάκα κατά μία ή δύο διευθύνσεις	1,0	14	20

Πίνακας 5.1: εύρεση συντελεστή K για τον υπολογισμό του ελάχιστου απαιτούμενου στατικού ύψους

Ακριβέστερα, ο υπολογισμός του στατικού ύψους οφείλει να γίνεται από τις σχέσεις 7.16 του EN1992-1.

$$\frac{l}{d} = K \cdot \left[11 + 1,5 \cdot \sqrt{fck} \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right) + 3,2 \cdot \sqrt{fck} \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad \text{εάν } \rho < \rho_0 \quad (7.16\alpha)$$

$$\frac{l}{d} = K \cdot \left[11 + 1,5 \cdot \sqrt{fck} \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho - \rho'} \right) + \frac{1}{12} \cdot \sqrt{fck} \cdot \sqrt{\frac{\rho'}{\rho_0}} \right] \quad \text{εάν } \rho > \rho_0 \quad (7.16\beta)$$

l/d οριακός λόγος ανοίγματος/στατικό ύψος

K συντελεστής που λαμβάνει υπόψη το δομικό σύστημα

ρ_0 το γεωμετρικό ποσοστό αναφοράς που αντιστοιχεί σε \sqrt{fck} 10-3

ρ το απαιτούμενο γεωμετρικό ποσοστό εφελκόμενου διαμήκη οπλισμού στην μεσαία κρίσιμη διατομή αμφιέριστης δοκού από φορτία σχεδιασμού

ρ' το απαιτούμενο ποσοστό θλιβόμενου διαμήκη οπλισμού για την παραπάνω περίπτωση
 f_{ck} σε MPa

Για δοκούς (στοιχεία) των οποίων το άνοιγμα υπερβαίνει τα 7m ο ευρωκώδικας ορίζει απομείωση του υπολογιζόμενου από τη σχέση 7.16 λόγου l/d κατά $7/l_{eff}$, όπου $l_{eff} = ln$ για δοκούς.

Δεδομένης της παράβλεψης αυτής της υπόδειξης στο δικό μας σχεδιασμό, είναι αναμενόμενο ότι τα ανοίγματα του προβλήματος μας σε συνδυασμό με τις ορισμένες διαστάσεις της διατομής που χρησιμοποιήθηκαν οδηγούν σε ένα σημαντικό ποσοστό αστοχίας λόγω υπέρβασης του επιτρεπόμενου βέλους, ποσοστό που αναλύεται παρακάτω.

5.1.2 Παράθεση και Σύγκριση του Είδους της Αστοχίας

Για τους συνδυασμούς εκείνους που περνούν τον έλεγχο λειτουργικότητας, οπότε και τους δεχόμαστε ως υλοποιήσιμους και πιθανούς συνδυασμούς λύσης της γεφύρωσης των εκάστοτε ανοιγμάτων, οφείλει επιπλέον να επισημανθεί ο τύπος αστοχίας που αποτελεί τον κρίσιμο έλεγχο που προσδίδει την φέρουσα ικανότητα. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1, κρίσιμοι έλεγχοι μπορεί να είναι είτε αυτοί που προκύπτουν από τα ορθά εντατικά μεγέθη, είτε εκείνοι που προκύπτουν από τα διατμητικά εντατικά μεγέθη (τέμνουσα).

Στο πρόβλημα μας, έλεγχος των ορθών εντατικών μεγεθών, δηλαδή της καθαρής κάμψης που καταπονεί τη διατομή (δεδομένης μηδενικής αξονικής έντασης - ή αμελούμενης λόγω της φύσης του στοιχείου-δοκού) πραγματοποιείται παρακολουθώντας τις τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων, που λαμβάνουν η πλέον θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος και αντίστοιχα η πλέον εφελκούμενη. Λόγω παραδοχής πλήρους συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα, η παραπάνω πλέον εφελκούμενη ίνα εντοπίζεται στη ζώνη του εφελκούμενου οπλισμού.

Σφάλμα που οφείλει να επισημανθεί εδώ, είναι το γεγονός της απόκλισης της θεωρούμενης πλέον εφελκούμενης ίνας ως αυτής που αντιστοιχεί στην ίνα του εφελκούμενου οπλισμού, καθώς αυτή η παραδοχή προϋποθέτει πως η υλοποίηση του ποσοστού οπλισμού σε κάθε περίπτωση συμβαίνει σε μια μόνο στρώση. Το παραπάνω, λόγω των μεγάλων ποσοστών οπλισμού που κατά πλειοψηφία απαιτούνται για να σταθεί η αμφιέριστη λύση, καθώς και λόγω της δυσμενούς υπόθεσης ορθογωνικής διατομής, οδηγούν την πλειοψηφία των λύσεων να υλοποιείται σε τουλάχιστον δύο στρώσεις, αν όχι παραπάνω (συνάρτηση του μέγιστου κόκκου αδρανούς και της επιλεγόμενης διαμέτρου προς υλοποίηση του υπολογισθέντος A_s). Η ορθότερη προσέγγιση μετά τον υπολογισμό των απαιτούμενων στρώσεων υλοποίησης και της παραδοχής τύπου αδρανούς και διαμέτρου οπλισμού, θα ήταν ο υπολογισμός του κέντρου βάρους του συνολικού εφελκούμενου οπλισμού και η λήψη της ανηγμένης παραμόρφωσης προς έλεγχο σ αυτή τη στάθμη.

Συγκεντρωτικά, οι έλεγχοι παραμορφώσεων για μεγέθη ορθής έντασης είναι:

1. $\epsilon_{c2} \leq \epsilon_{cu}$ όπου ϵ_{cu} η ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην αστοχία της θλιβόμενης ίνας

2. $\varepsilon_{s1} \leq \frac{\varepsilon_{ud}}{\gamma_s}$ όπου ε_{uk} η μέγιστη παραμόρφωση σχεδιασμού χάλυβα που αντιστοιχεί στην αστοχία του διαμήκουσ εφελκόμενου οπλισμού (εξάντληση της ολκιμότητας του χάλυβα). Η ολκιμότητα του χάλυβα η οποία λήφθηκε υπόψη στο σχεδιασμό είναι $\varepsilon_{uk} = 0.06$ και αντιστοιχεί σε χάλυβα υψηλής πλαστιμότητας, κατηγορίας (H) κατά Ευρωκώδικα, και γ_s συντελεστής ασφαλείας του υλικού, λαμβάνεται κατά EN1992-1 ίσος με $\gamma_s = 1,15$.

Ο έλεγχος που πραγματοποιήθηκε για τα διατμητικά εντατικά μεγέθη αποτελεί την επάρκεια της διατομής σκυροδέματος σε ανάληψη τεμνουσών δυνάμεων με τον έλεγχο μη υπέρβασης της μέγιστης τέμνουσας από την δρώσα τέμνουσα στη δυσμενέστερη διατομή (στήριξη).

3. $V_{Ed} < V_{Rd,max}$ όπου $V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot (\cot\theta + \tan\theta) / (1 + \cot\theta^2)$ (Σχέση 2-20)

Παρουσιάζονται παρακάτω τα ποσοστά αστοχίας σε καθαρή κάμψη και τέμνουσα σε συγκεντρωτικά στατιστικά διαγράμματα (bars) για κάθε ένα από τα επιλεχθέντα ανοίγματα ξεχωριστά.

5.1.3 Μηδενική Δυνατότητα Ανάληψης Πρόσθετου Φορτίου

Λόγω της αρκετά 'ανοιχτής' διερεύνησης του συνδυασμού γεωμετρικών χαρακτηριστικών, ποσοστού οπλισμού και χαρακτηριστικής αντοχής σκυροδέματος που δοκιμάζονται για την τελική συγκριτική παρουσίαση και κλίση προς την καταλληλότερη από άποψη φέρουσας ικανότητας και οικονομικότητας λύση για κάθε άνοιγμα, είναι λογικό κάποιες από τις δοκιμές που έγιναν να μην ευσταθούν και να απορρίπτονται ως μη-εφικτές.

Το κριτήριο που οδηγεί σε αυτό το συμπέρασμα αποτελεί η μηδενική δυνατότητα ανάληψης από το φορέα επιπλέον φορτίου του ιδιοβάρους του. Δεδομένου του ότι αναφερόμαστε σε φέροντα στοιχεία κάποιο τέτοιο συμπέρασμα είναι λόγος αποκλεισμού σειράς λύσεων, που λόγω πληρότητας της διερεύνησης επιλύθηκαν. Σε μηδενικό πρόσθετο κατανεμημένο φορτίο οδηγούνται οι λύσεις με πολύ χαμηλή αντοχή σκυροδέματος, μη επαρκείς γεωμετρικές διαστάσεις, με καίρια διάσταση αυτή του ύψους τη διατομής (δεδομένης της διάθεσης μεγάλων αντοχών υλικού που καθιστούν εφικτά μικρά πλάτη δοκού).

Κλείνοντας οφείλει να επισημανθεί ότι στις λύσεις που πέρασαν τον έλεγχο βελών και απορρίφθηκαν στη φάση αστοχίας λόγω μηδενικής ανοχής σε πρόσθετο φορτίο ($q_{\Omega\Phi EΛΙΜΟ} < 0$), έχει ληφθεί υπόψη και ο υπερασχεδιασμός για λόγους ασφαλείας μέσω του συντελεστή ασφαλείας $\gamma_g = 1.35$ συνεπώς ο φορτιστικός συντελεστής λ προέκυψε ($\lambda < 1,00$), όπως προκύπτει από την σχέση:

$$q_{\Omega\Phi EΛΙΜΟ} = \frac{(\lambda - 1,00) \cdot 1.35 \cdot g}{1,50}$$

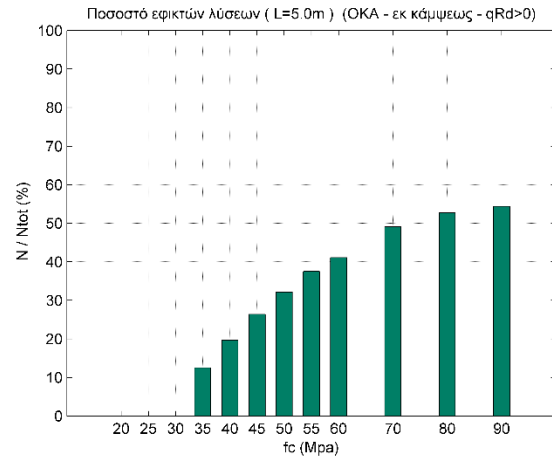
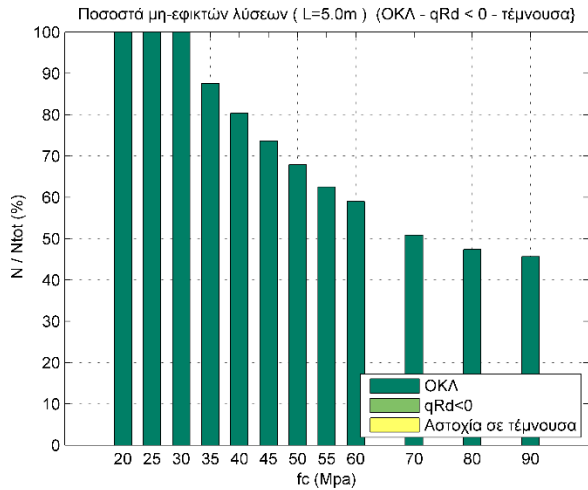
Χαρακτηριστικά και για κάθε άνοιγμα και τύπο διατομής (ορθογωνικής και ταυ), παρουσιάζονται με τη μορφή στατιστικών μπαρών, τα ποσοστά των συνδυασμών επί του συνόλου των ερευνημένων, που μπορούν να αποτελέσουν λύση στο πρόβλημα αμφέριστης δοκού ανά άνοιγμα.

$$l = 5.0m$$

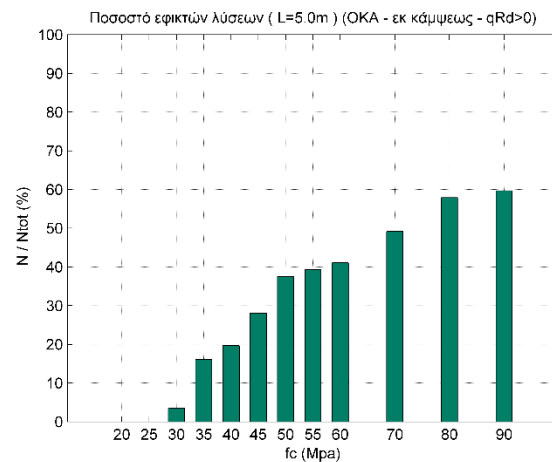
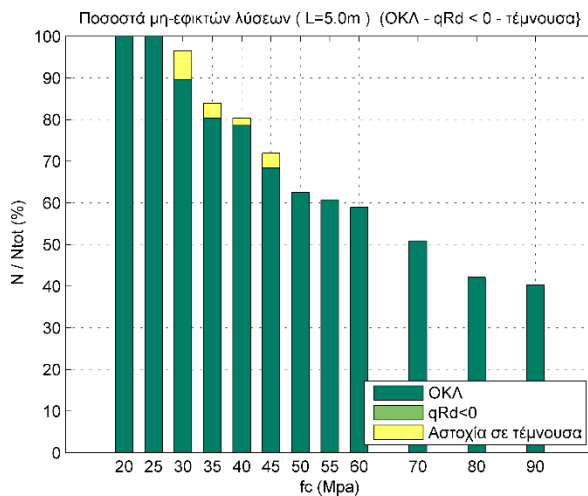
ΜΗ ΕΦΙΚΤΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

ΕΦΙΚΤΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ



ΔΙΑΤΟΜΗ ΠΛΑΚΟΔΟΚΟΥ



Σχήμα 5.1: Συγκριτική παρουσίαση ποσοστών αστοχίας σε λειτουργικότητα ή έλεγχο τέμνουσας των λύσεων με ορθογωνική διατομή και πλακοδοκό (εύρος h=0.25-0.50m).

- Τα παραπάνω ποσοστιαία αποτελέσματα αφορούν τις λύσεις όλων των συνδυασμών γεωμετρικών διαστάσεων που έγιναν για το άνοιγμα των $l=5.0m$. Συγκεκριμένα οι κρεμάσεις που λύθηκαν ήταν $h=0.25-0.50m$. Παρατηρούμε ότι για τη δεδομένη επιλογή μας, όλες οι λύσεις γεφύρωσης με σκυρόδεμα αντοχής C20-C30 είναι ανέφικτες, και συγκεκριμένα είναι κρίσιμες σε λειτουργικότητα, οπότε και απορρίπτονται. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η λυγηρότητα στην οποία οδηγηθήκαμε με τις μικρές αυτές κρεμάσεις ήταν εξαιρετικά δυσμενής για τις συνήθεις αντοχές που θα μπορούσαν να γεφυρώσουν ένα τέτοιο άνοιγμα. Εάν το εύρος

των επιλογών μας μεγάλωνε προς το άνω όριο ($h > 0.50m$), θα αναμενόταν επιλογή εφικτών λύσεων και με μικρότερες αντοχές σκυροδέματος.

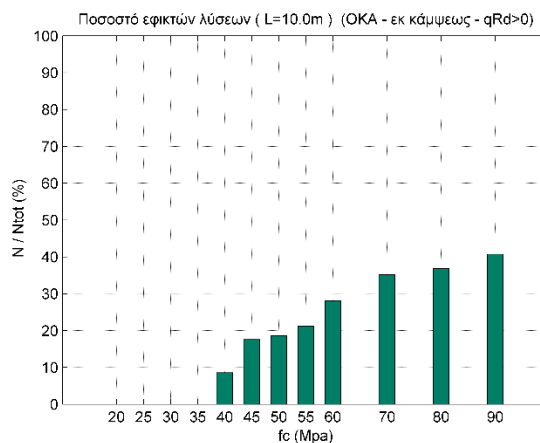
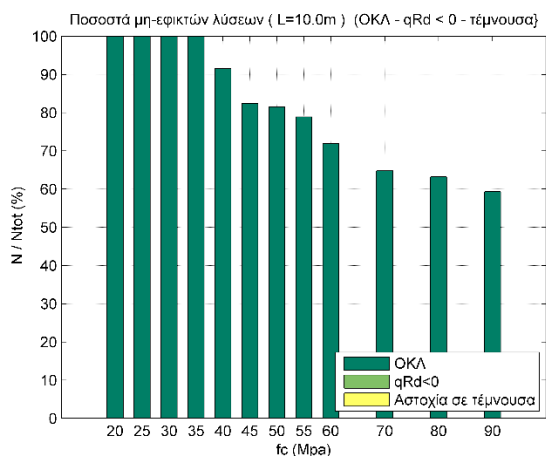
- Οφείλει επίσης να επισημανθεί ότι η λήψη προς σύγκριση της δυσμενέστερης εκ των δύο καταστάσεων λειτουργικότητας (οιωνεί μόνιμη κατάσταση), λαμβάνοντας υπόψη τον ερπυσμό, αποτελεί επίσης δυσμενή παραδοχή. Σε περίπτωση σύγκρισης με τον έλεγχο λειτουργικότητας για βραχυχρόνια βέλη θα αναμενόταν μεγαλύτερο ποσοστό εφικτών λύσεων με μικρότερα C.
- Τέλος, δυσμενής παραδοχή που λήφθηκε για λόγους απλοποίησης ήταν η θεώρηση ανάληψης από τον φορέα μας όλων των φορτίων του (μονίμων και κινητών), κατά την 28^η μέρα. Συγκεκριμένα στον υπολογισμό της ερπυστικής παραμόρφωσης θεωρήθηκε χρόνος επιβολής του ερπυστικού φορτίου η 28^η μέρα, ενώ πιο ευμενής και ρεαλιστική θεώρηση θα ήταν ο υπολογισμός του t_0 ως $4 \cdot 30$ μέρες (4 μήνες). Τονίζεται επομένως ότι ο ειλημμένος ερπυσμός αφορά $\varphi(t, t_0) = \varphi(\infty, 28)$
- Σε ότι αφορά την πλακοδοκό και την συγκριτική τους παράθεση, παρατηρούμε, τόσο για το μήκος των $l=5.0m$, όσο και για τα μεγαλύτερα ακόλουθα ανοίγματα, την εμφάνιση του ελέγχου σε τέμνουσα ως κρίσιμου για ένα μικρό ποσοστό των λύσεων που περνούν την ΟΚΛ. Το παραπάνω, δεδομένου ότι συγκρίνουμε ίδιες διαστάσεις κορμών (ορθογωνικής και πλακοδοκού), όποτε και η διατμητική φέρουσα ικανότητα είναι σταθερή, δικαιολογείται ως μεγαλύτερη ένταση στην περίπτωση της πλακοδοκού. Πράγματι, στη λειτουργία πλακοδοκού (συνεργαζόμενου πλάτους πλάκας), ο ουδέτερος άξονας ανεβαίνει πολύ, η θλιβόμενη ζώνη περιορίζεται εντός πλάκας και αυτό προσφέρει μεγάλο μοχλοβραχίονα και κατ'επέκταση μεγάλη φέρουσα ροπή (ροπή αντοχής MRd). Η αύξηση της δρώσας ροπής που αναλαμβάνει το σύστημα συνεπάγεται με τη σειρά της αύξηση της δρώσας τέμνουσας (ζεύγος δυνάμεων) στα στηρίγματα, η οποία από ένα σημείο και μετά υπερβαίνει την μέγιστη αντοχή σε τέμνουσα της δοκού.

$$l = 10.0m$$

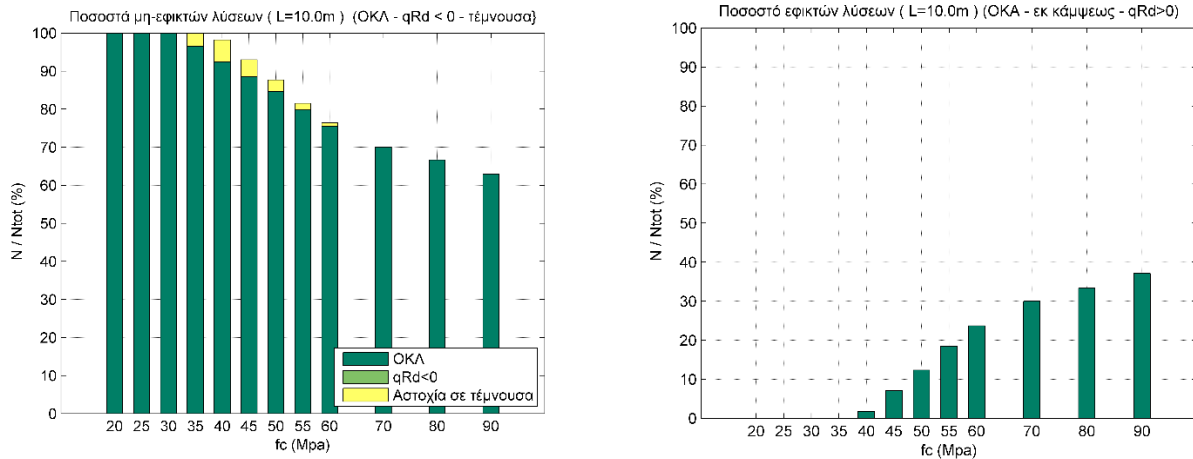
ΜΗ ΕΦΙΚΤΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

ΕΦΙΚΤΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ



ΔΙΑΤΟΜΗ ΠΛΑΚΟΔΟΚΟΥ



Σχήμα 5.2: Συγκριτική παρουσίαση ποσοτών αστοχίας σε λειτουργικότητα ή έλεγχο τέμνουσας των λύσεων με ορθογωνική διατομή και πλακοδοκό (εύρος $h=0.50-1.00m$).

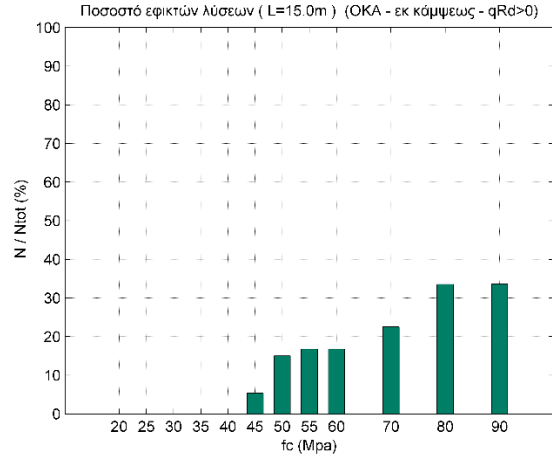
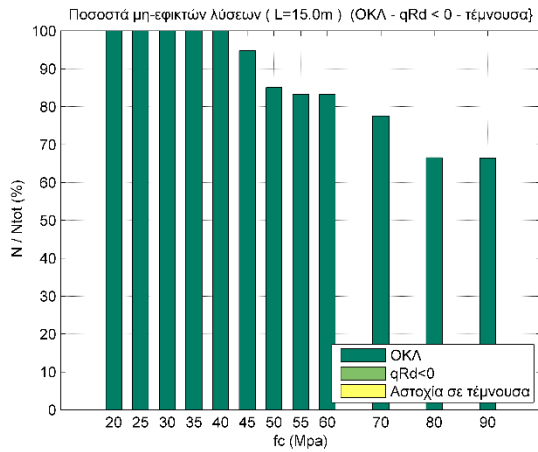
- Ερμηνεία της εμφάνισης αστοχίας λόγω υπέρβασης της VRd, max στην περίπτωση της πλακοδοκού δίνεται παραπάνω. (όμοια με τα σχόλια του Σχήματος 5.1)
- Επιπλέον επισήμανση που οφείλεται στην παρατήρηση ότι, όσο μεγαλώνει το άνοιγμα της δοκού, η πλακοδοκός αποδεικνύεται δυσμενέστερη επιλογή (λιγότεροι συνδυασμοί από αυτούς που δοκιμάστηκαν περνούν τον έλεγχο της λειτουργικότητας) είναι η εξής : το πολύ μικρό ύψος θλιβόμενης ζώνης (εντός πάχους πλάκας $hf = 0.2 * h$), συνεπάγεται πολύ μεγάλο ύψος εφελευόμενης ζώνης το οποίο μετά τη υπέρβαση της αντοχής ρηγμάτωσης, επιτρέπει τη δημιουργία εξαιρετικά βαθιών ρωγμών που απομειώνουν αισθητά τη διαθέσιμη μεγάλη αρχική δυσκαμψία της πλακοδοκού. Αποτέλεσμα αυτού είναι ένα εύκαμπτο δομικό στοιχείο που οδηγείται στην αστοχία λόγω υπέρβασης των επιτρεπών βελών.

$l = 15.0m$

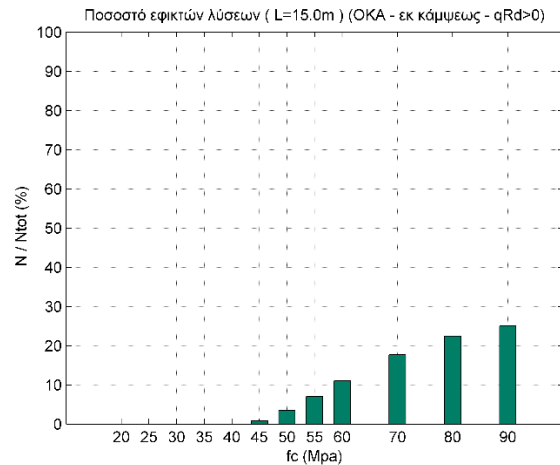
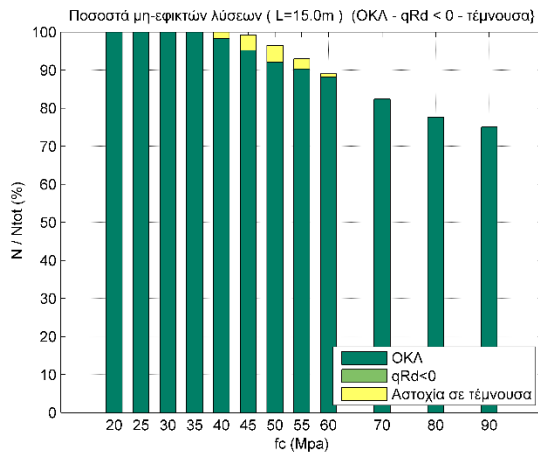
ΜΗ ΕΦΙΚΤΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

ΕΦΙΚΤΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ



ΔΙΑΤΟΜΗ ΠΛΑΚΟΔΟΚΟΥ



Σχήμα 5.3: Συγκριτική παρουσίαση ποσοστών αστοχίας σε λειτουργικότητα ή έλεγχο τέμνουσας των λύσεων με ορθογωνική διατομή και πλακοδοκό (εύρος h=0.75-1.50m).

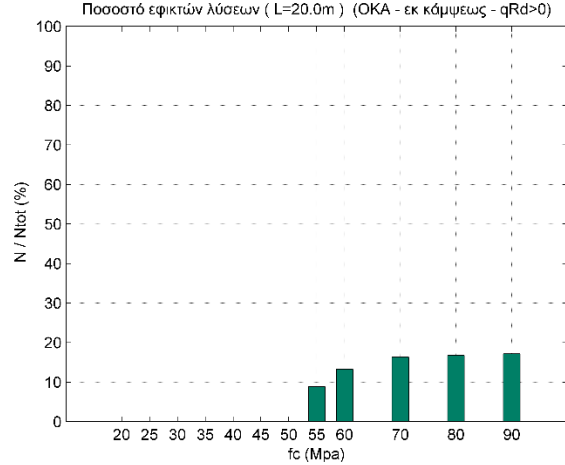
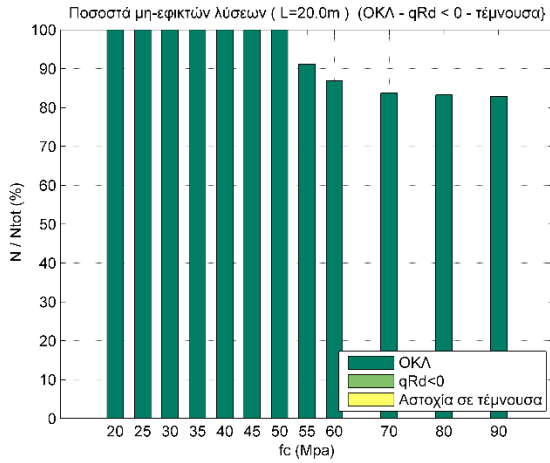
Ερμηνεία της εμφάνισης αστοχίας λόγω υπέρβασης της VRd,max στην περίπτωση της πλακοδοκού δίνεται παραπάνω. (όμοια με τα σχόλια του Σχήματος 5.1)

$$l = 20.0m$$

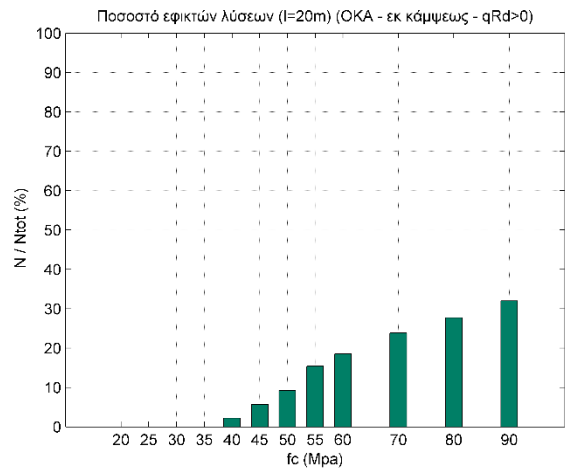
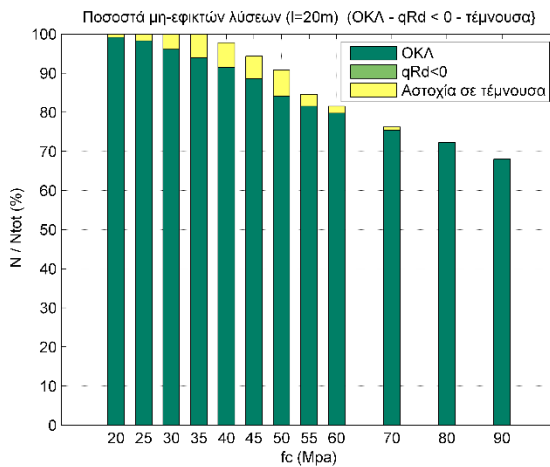
ΜΗ ΕΦΙΚΤΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

ΕΦΙΚΤΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ



ΔΙΑΤΟΜΗ ΠΛΑΚΟΔΟΚΟΥ



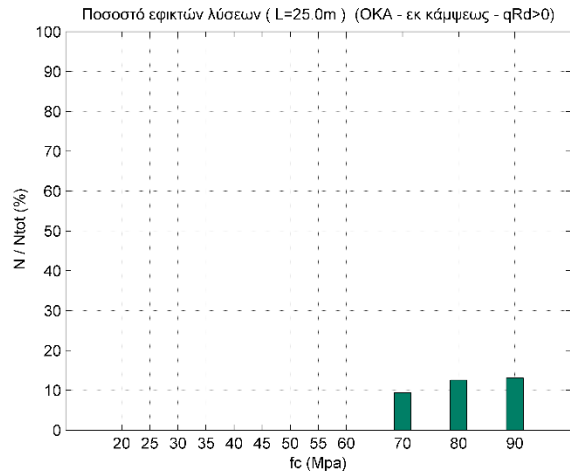
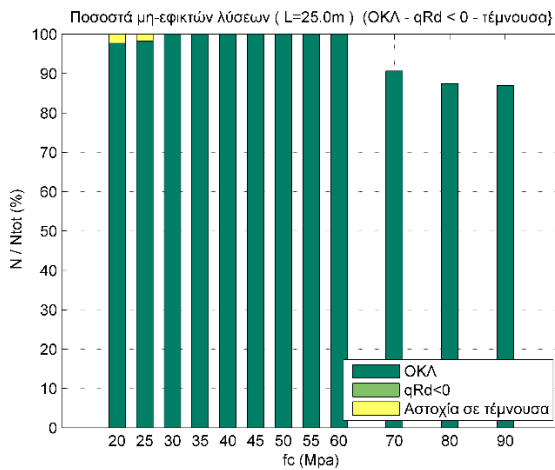
Σχήμα 5.4: Συγκριτική παρουσίαση ποσοτών αστοχίας σε λειτουργικότητα ή έλεγχο τέμνουσας των λύσεων με ορθογωνική διατομή και πλακοδοκό (εύρος h=1.00-2.00m).

$$l = 25.0m$$

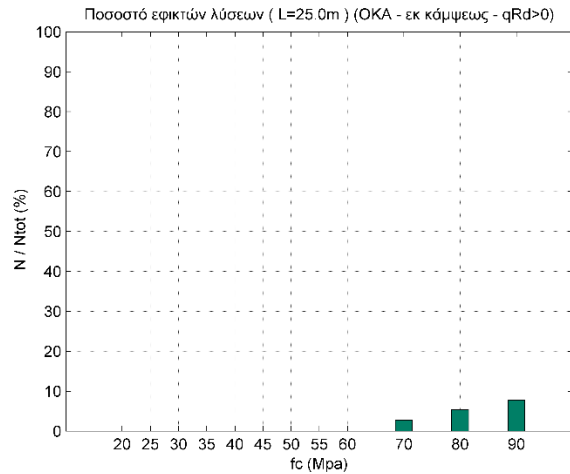
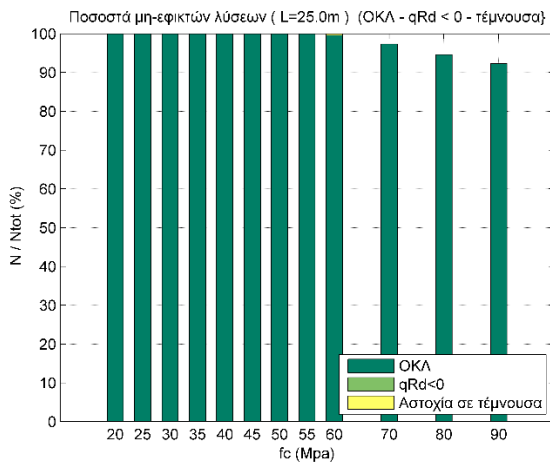
ΜΗ ΕΦΙΚΤΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

ΕΦΙΚΤΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ



ΔΙΑΤΟΜΗ ΠΛΑΚΟΔΟΚΟΥ



Σχήμα 5.5: Συγκριτική παρουσίαση ποσοστών αστοχίας σε λειτουργικότητα ή έλεγχο τέμνουσας των λύσεων με ορθογωνική διατομή και πλακοδοκό (εύρος h=1.25-2.50m).

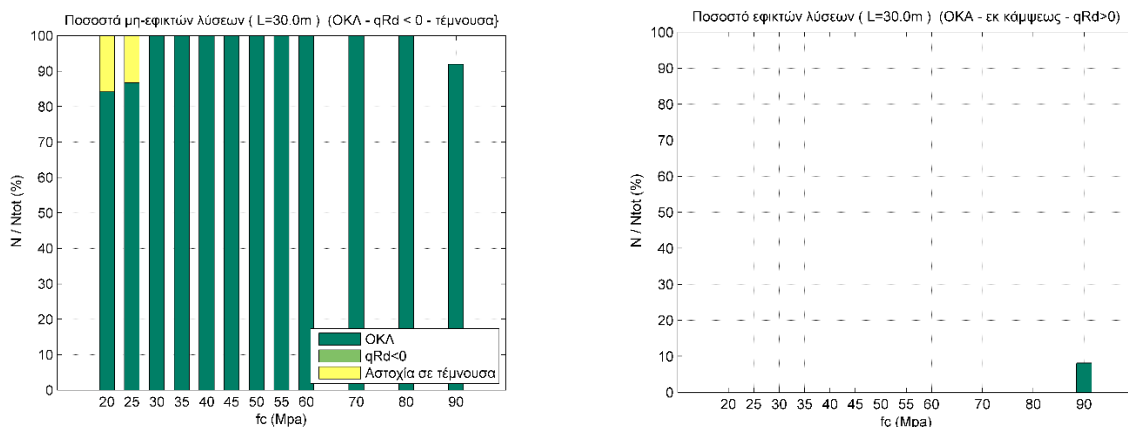
- Παρατηρούμε ότι όσο τα ανοίγματα των δοκών αυξάνουν, τόσο μειώνουν και οι διαθέσιμοι συνδυασμοί γεωμετρικών μεγεθών διατομής που περνούν τον έλεγχο λειτουργικότητας και τον έλεγχο τέμνουσας και αποτελούν τις εφικτές επιλογές μας. Ωστόσο, πρέπει να επισημανθεί ότι οι διατομές που επιλέχθηκαν είναι εμφανώς λυγρές και για αυτό το λόγο γεφύρωση ανοιγμάτων που αναμενόταν εφικτή με αρκετά χαμηλότερες αντοχές σκυροδέματος προκύπτει κρίσιμη σε ΟΚΛ και απορρίπτεται.

$$l = 30.0m$$

ΜΗ ΕΦΙΚΤΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

ΕΦΙΚΤΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ



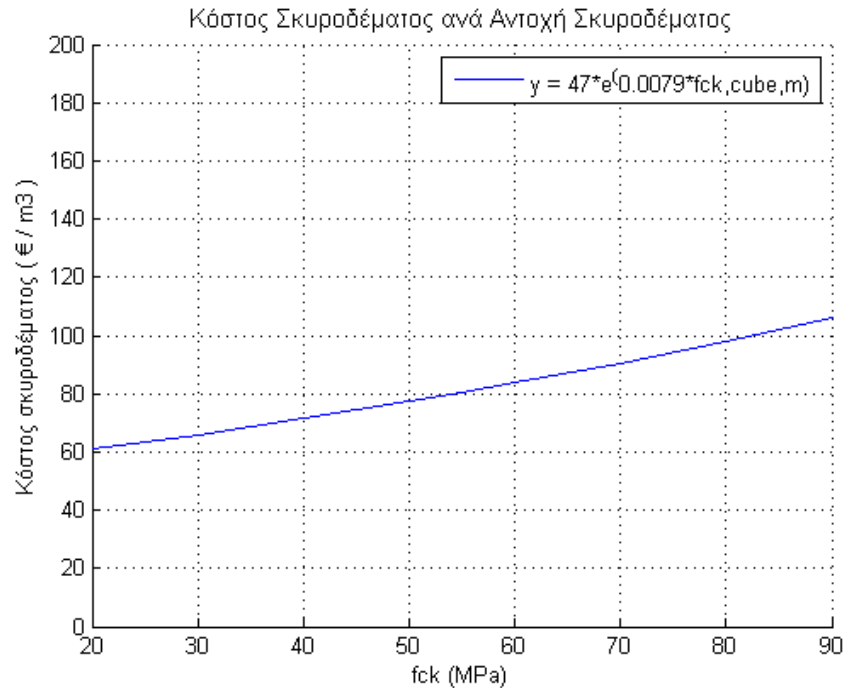
Σχήμα 5.6: Συγκριτική παρουσίαση ποσοστών αστοχίας σε λειτουργικότητα ή έλεγχο τέμνουσας των λύσεων με ορθογωνική διατομή και πλακοδοκό (εύρος $h=1.50-3.00m$).

- Ειδικά για το άνοιγμα των 30.0m παρατηρείται μοναδική επιλογή από άποψη δυνατής κατηγορίας αντοχής σκυροδέματος η λήψη της μέγιστης κατηγορίας αντοχής συμβατικών σκυροδεμάτων κατά EN1992-1-1 (EC2,2004).

5.1.4 ΠΡΟΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ

Στον ενδεικτικό υπολογισμό κόστους που παρατίθεται στη συνέχεια, έγινε προσπάθεια για την όσο το δυνατόν ακριβέστερη προσέγγιση της μέσης κοστολόγησης καθεμίας από τις παρακάτω παραμέτρους που αθροιστικά ορίζουν το κόστος του ωπλισμένου σκυροδέματος ανά μονάδα όγκου, λαμβάνοντας υπόψη τις ενδεικτικές τιμές που συναντώνται στον ελληνικό χώρο κατά την περίοδο συγγραφής της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα λήφθηκαν υπόψη οι εξής παράμετροι κόστους :

- Προμήθεια και μεταφορά σκυροδέματος ($Cost_{concrete}$) :
Η παραπάνω τιμή εκτιμήθηκε μέσω εκθετικής συνάρτησης που περιγράφει την αύξηση του κόστους προμήθειας σκυροδέματος συνάρτηση της χαρακτηριστικής μέσης αντοχής κύβου σκυροδέματος ως εξής : $y = 47 \cdot e^{0.0079 \cdot f_{ck, cube, m}}$. Επομένως για όλες τις κατηγορίες αντοχής που λήφθηκαν υπόψη στην διερεύνηση μας, η εκθετική αύξηση του κόστους σκυροδέματος φαίνεται στο Σχήμα 6.7.
- Κόστος προμήθειας διαμορφωμένου χάλυβα ($Cost_{steel}$) : $\sim 750\text{€} / \text{tn} = 0.75\text{€} / \text{kg}$
- Κόστος καλουπώματος και διάστρωσης ($Cost_{form}$) : $\sim 60\text{€} / \text{m}^3$



Σχήμα 5.7: Σχέση κόστους σκυροδέματος συναρτήσει της κατηγορίας αντοχής του

Επιπλέον παράμετροι που θα καθιστούσαν πληρέστερη την προμελέτη, αλλά επιλέχθηκε να αγνοηθούν για λόγους απλοποίησης και ενδεικτικής προσέγγισης είναι οι εξής :

- Κόστος τοποθέτησης διαμήκους χάλυβα : $\sim 19\text{€} / \text{m}^3$
- Κόστος πρέσας 32m : $(\sim 6\text{€} / \text{m}^3)$

Το συνολικό κόστος σε € εκτιμήθηκε ως :

$$TotalCost = Cost_{concrete} * V_c + Cost_{steel} * \gamma_{steel} * V_s + Cost_{form} * V_c$$

- Όπου V_c όγκος σκυροδετηθείσας επιφάνειας · μήκος δοκού $V_c = b \cdot h \cdot l$
- V_s όγκος διαμήκους οπλισμού εφελκόμενου και θλιβόμενου (50% του εφελκόμενου), λαμβάνοντας υπόψη και μια αύξηση της τάξης του 10% για τα ματίσματα
- $$V_s = 1,5 \cdot 1,1 \cdot A_s \cdot l$$
- γ_{steel} ειδικό βάρος χάλυβα $\gamma_{steel} = 7850 \text{ kg} / \text{m}^3$

5.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ P-δ (ΦΟΡΤΙΟΥ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ)

Παρακάτω παρουσιάζονται λεπτομερώς τα διαγράμματα επιβαλλόμενου φορτίου συναρτήσει της μετατόπισης στο μέσον του ανοίγματος.

Η επιλογή της παρουσίασης αυτών των διαγραμμάτων με τελικό σκοπό την σύγκριση και παράθεση τους, ακολούθησε τον εξής άξονα :

- Βάσει τύπου διατομής (ορθογωνική ή ταυ)
- Βάσει ανοίγματος (L)
- Βάσει διαστάσεων της διατομής

Όσον αφορά στην οργάνωση βάσει διαστάσεων της διατομής, οι συνδυασμοί που ερευνήθηκαν για κάθε άνοιγμα βάσει της διακριτοποίησης που περιγράφηκε στην Παράγραφο 5.1.1 (Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκού) ήταν οι ακόλουθοι (6 τιμές για την παράμετρο της κρέμασης, 4 τιμές για την παράμετρο του πλάτους → 24 συνδυασμοί κρέμασης (h) - πλάτους (b) για κάθε άνοιγμα ξεχωριστά):

- $h = f(L) = [0.05 * L, 0.06 * L, 0.07 * L, 0.08 * L, 0.09 * L, 0.1 * L]$
- $b = f(L) = [0.02 * L, 0.0233 * L, 0.0266 * L, 0.03 * L]$

Δεδομένου του μεγάλου αριθμού των ερευνητικών εξαχθέντων, κρίθηκε φρόνιμο να επισυναφθούν μόνο οι οριακοί συνδυασμοί $\{h_{max} - b_{max}\}$ και $\{h_{min} - b_{min}\}$ για κάθε άνοιγμα όπου :

$$h_{max} = 0.1 \cdot L \quad \& \quad b_{max} = 0.03 \cdot L$$

$$h_{min} = 0.05 \cdot L \quad \& \quad b_{min} = 0.02 \cdot L$$

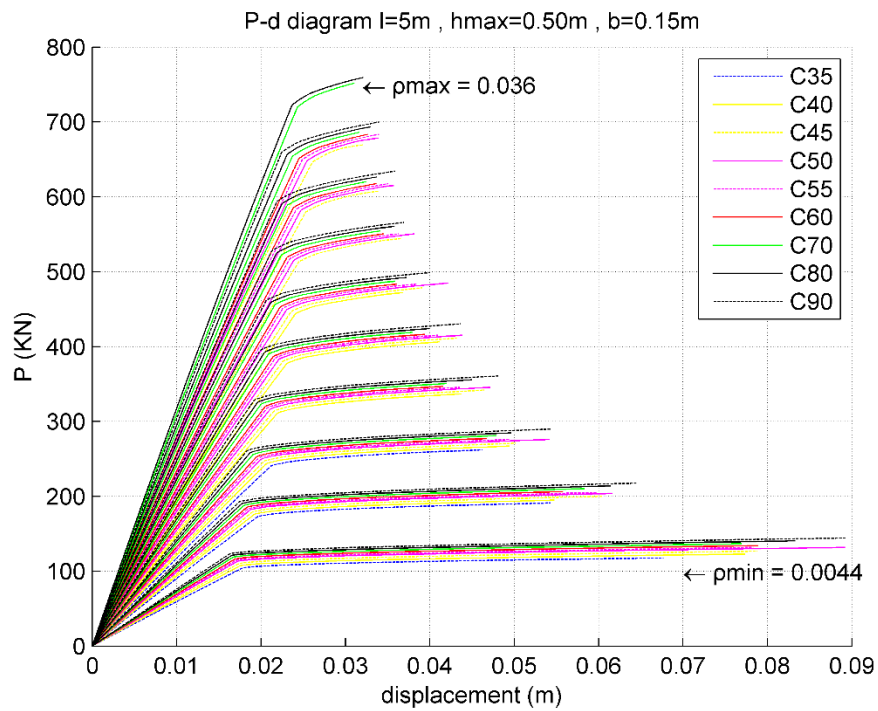
Καίρια επισήμανση αποτελεί επίσης ότι τα παρακάτω παρουσιαζόμενα αποτελέσματα συνολικώς επιβαλλόμενου φορτίου (φέρουσα ικανότητα), το οποίο ορθότερα ανάγεται σε καταναμημένο για το εκάστοτε μήκος της δοκού, αποτελούν την απόρροια μόνο των εφικτών συνδυασμών, δηλαδή εκείνων που ευσταθούν σε βέλος και δεν αστοχούν σε τέμνουσα.

Ακόμα επισημαίνεται ότι, δεδομένων των λυγερών φορέων που προκύπτουν από τις γεωμετρικές διατομές που λαμβάνουμε υπόψη, σε πολλές από τις ακόλουθες περιπτώσεις ανοιγμάτων και καθώς αυτά αυξάνουν η λύση των ελάχιστων διαστάσεων δεν επαρκεί και απορρίπτεται ως υπερ-λυγερή καθώς αστοχεί σε βέλος. Συνεπώς στη θέση αυτών παρουσιάζεται ο επόμενος μεγαλύτερος και εφικτός συνδυασμός $\{h, b\}$, για τον οποίο ισχύει $h > h_{min}$ ή $b > b_{min}$.

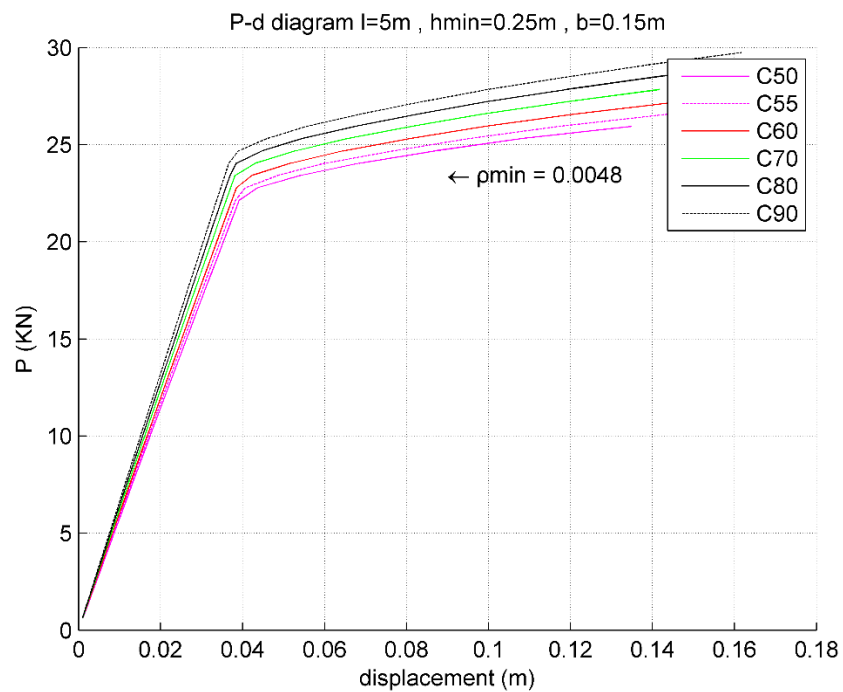
Καθώς η διάσταση της κρέμασης αποτελεί κυριότερο παράγοντα στην τελική φέρουσα ροπή (μοχλοβραχίονας) σε σχέση με το πλάτος της δοκού (διαθέσιμο πλάτος για ανάπτυξη της έντασης ($F_c = b \cdot (0.8x) \cdot f_{cd}$), οι περιπτώσεις των ελάχιστων γεωμετρικών διατομών είναι αυτές στις οποίες δεν επαρκεί η κρέμαση και επιλέγεται η αμέσως μεγαλύτερη επαρκής.

5.2.1 Ορθογωνική Διατομή

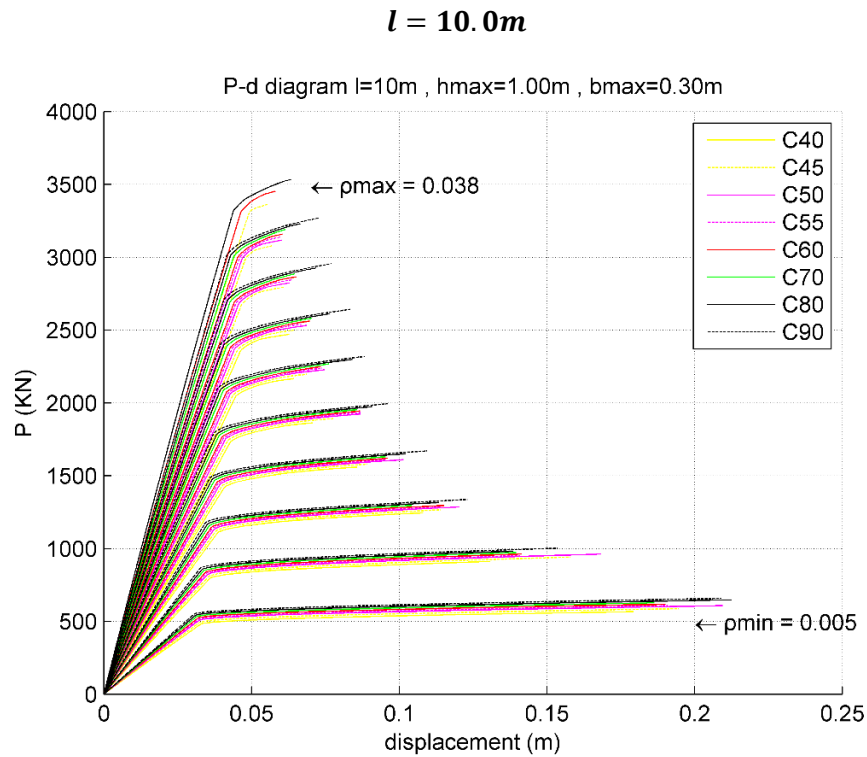
$$l = 5.0m$$



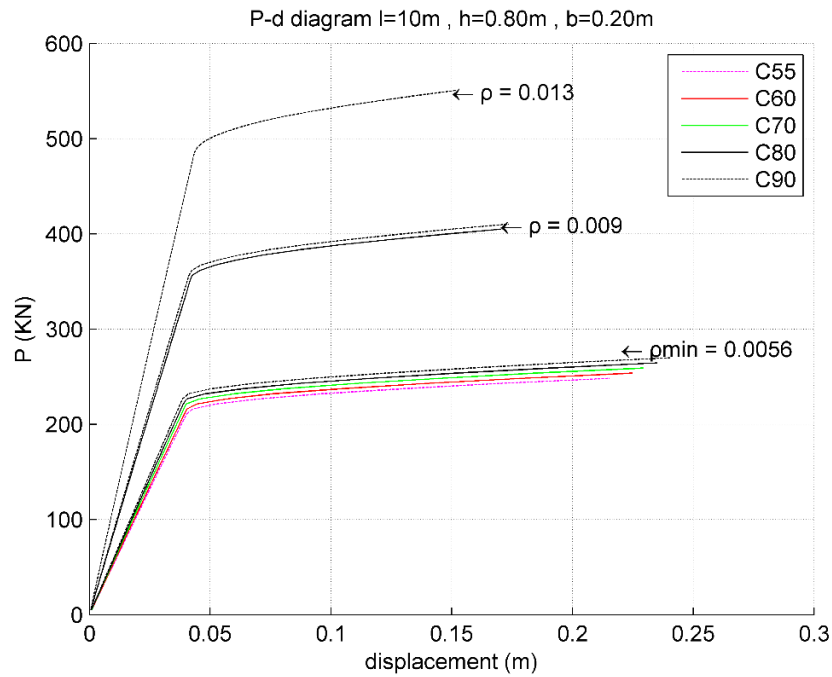
Σχήμα 5.8: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 5.0m$, $h = 0,5m$, $b = 0,15m$)



Σχήμα 5.9: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 5.0m$, $h = 0,25m$, $b = 0,15m$) για ποσοστό οπλισμού ρ_{min} και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος f_{ck}

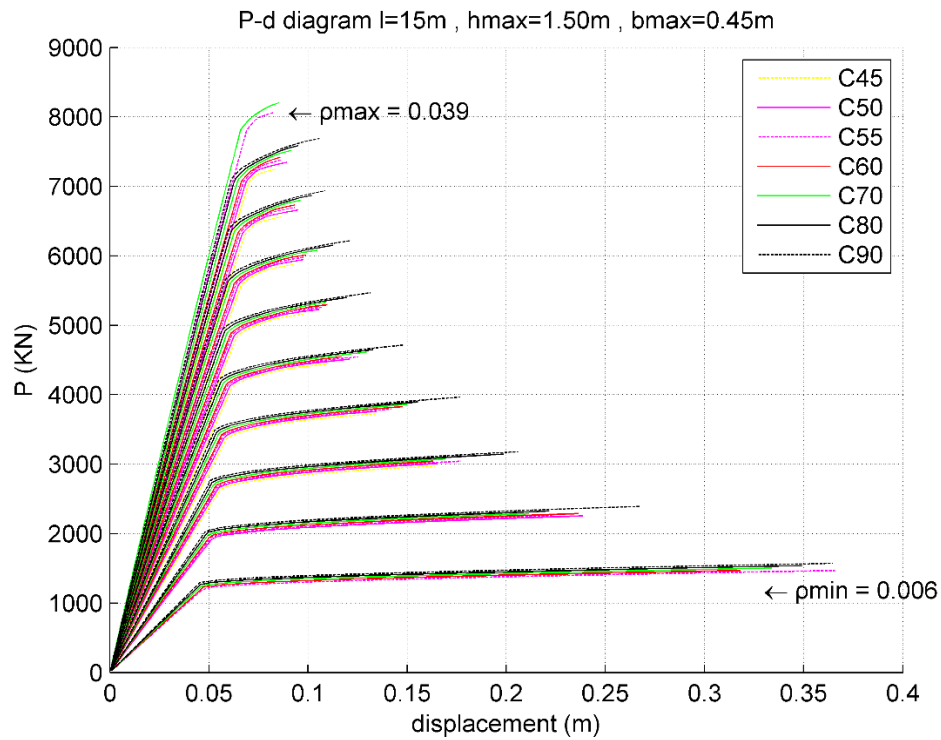


Σχήμα 5.10: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 10.0m$, $h = 1.00m$, $b = 0,30m$)

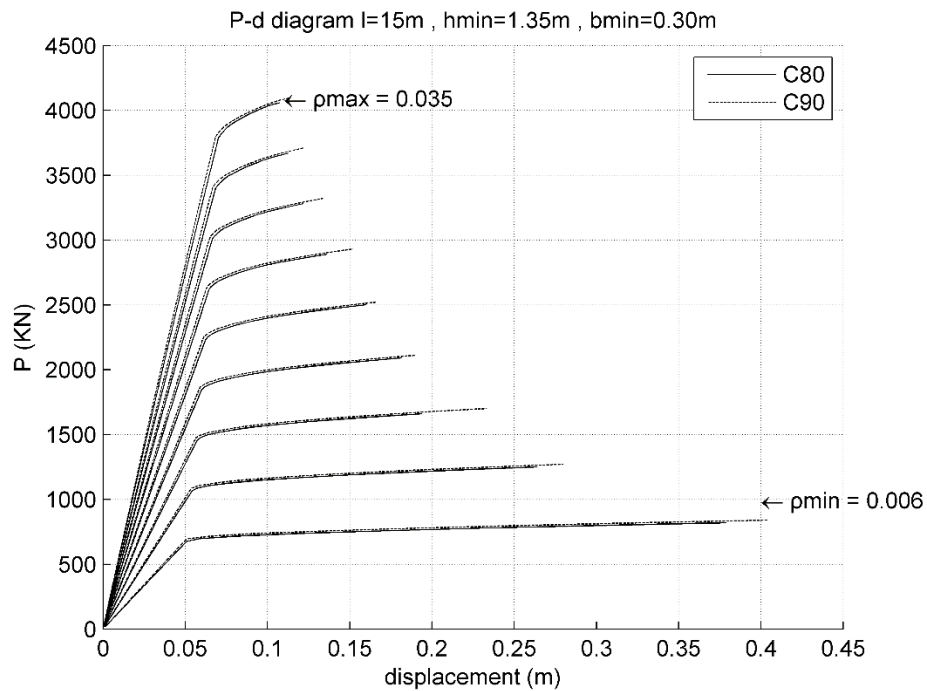


Σχήμα 5.11: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 10.0m$, $h = 0,80m$, $b = 0,20m$) για όλα τα ποσοστά οπλισμού ($\rho_{min} - \rho_{max}$) και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος f_{ck}

$l = 15.0m$

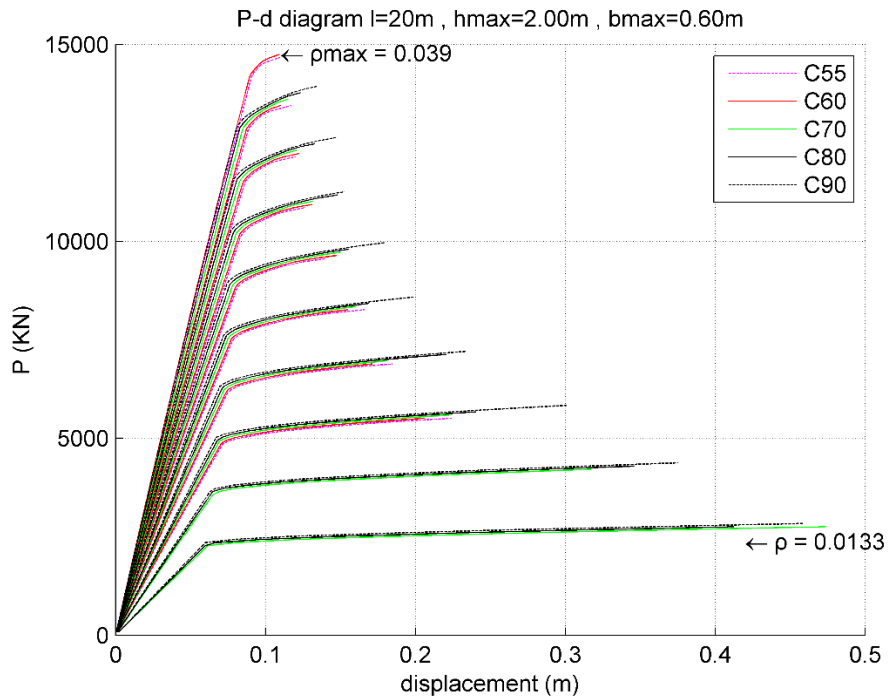


Σχήμα 5.12: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 15.0m$, $h = 1.5m$, $b = 0.45m$)

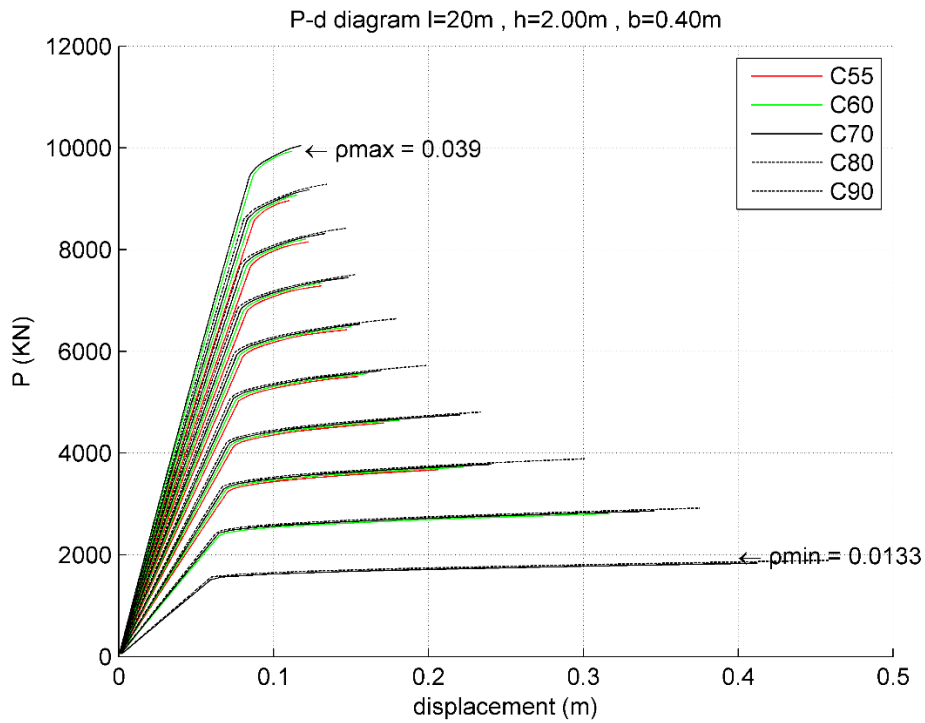


Σχήμα 5.13: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 15.0m$, $h_{min} = 1,35m$, $b = 0,30m$) για όλα τα ποσοστά οπλισμού ($\rho_{min} - \rho_{max}$) και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος f_{ck}

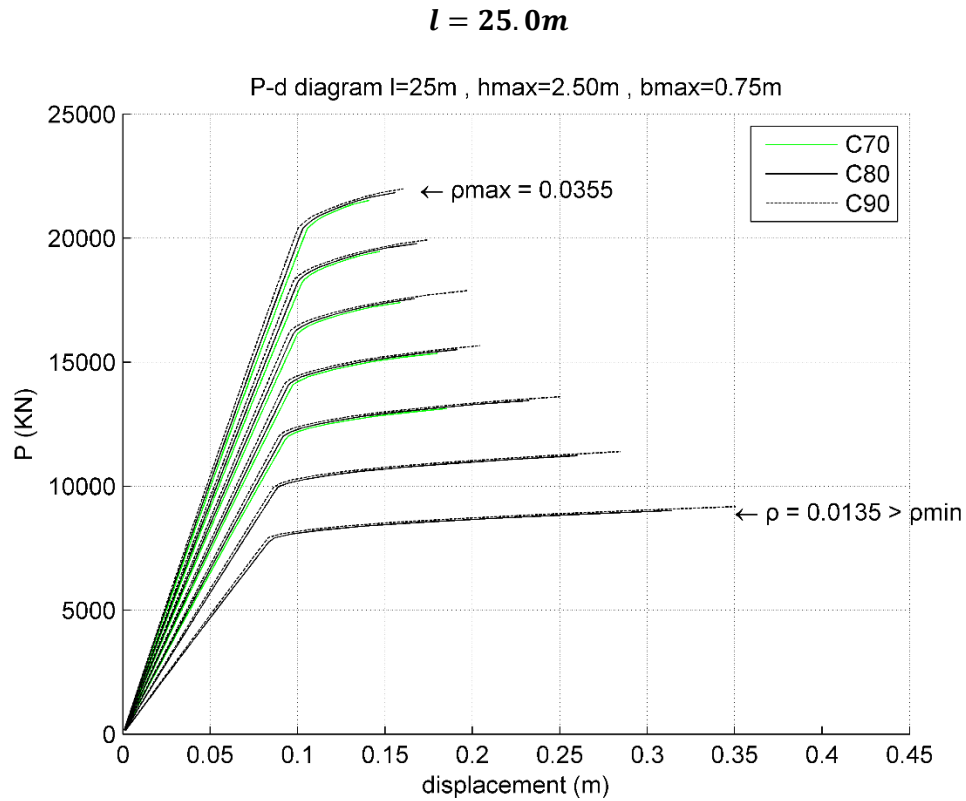
$l = 20.0m$



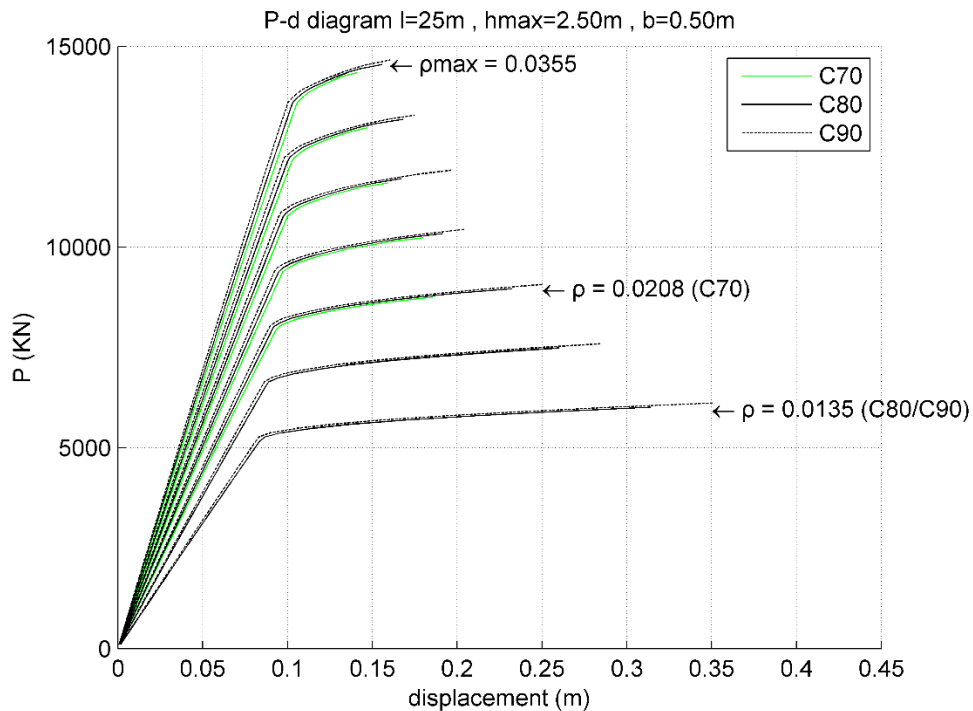
Σχήμα 5.14: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 20.0m$, $h = 2,00m$, $b = 0,60m$)



Σχήμα 5.15: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($L = 20.0m$, $h = 2,00m$, $b = 0,40m$) για όλα τα ποσοστά οπλισμού ($\rho_{min} - \rho_{max}$) και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος f_{ck}

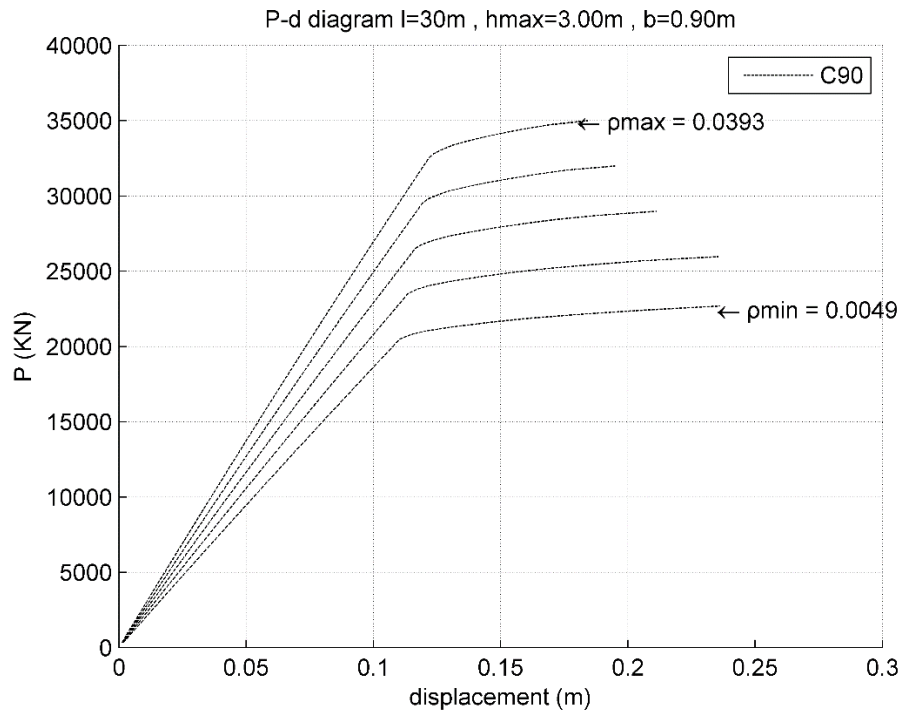


Σχήμα 5.16: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 25.0m$, $h = 2,5m$, $b = 0,75m$)

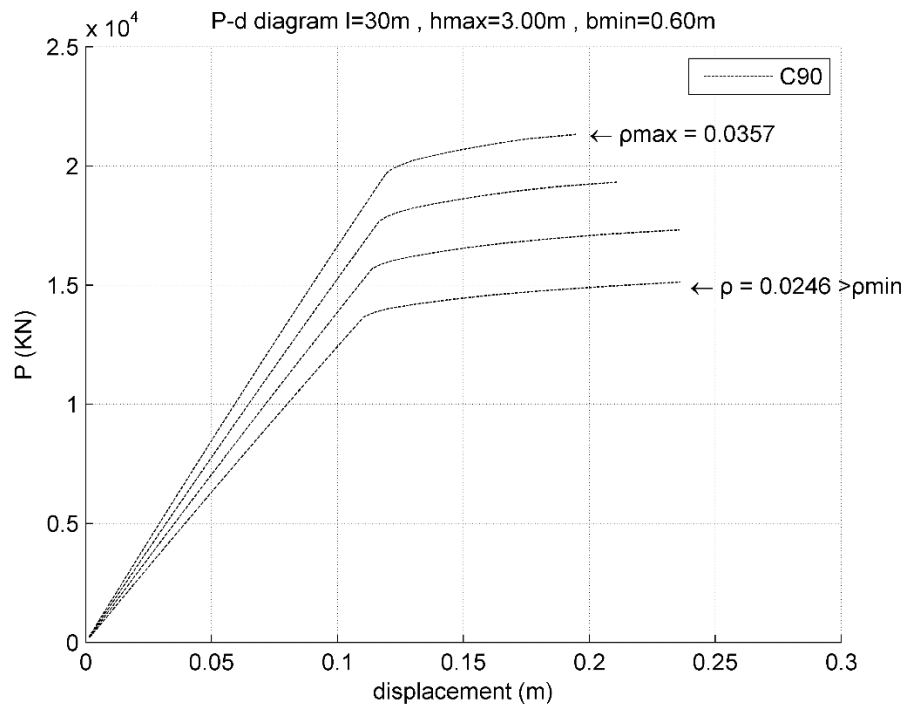


Σχήμα 5.17: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($L = 25.0m$, $h = 2,50m$, $b = 0,50m$) για όλα τα ποσοστά οπλισμού ($\rho_{min} - \rho_{max}$) και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος f_{ck}

$l = 30.0m$



Σχήμα 5.18: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 30.0m$, $h = 3.00m$, $b = 0.90m$)



Σχήμα 5.19: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 30.0m$, $h = 3.00m$, $b = 0.60m$) για όλα τα ποσοστά οπλισμού ($\rho_{min} - \rho_{max}$) και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος f_{ck}

Τα σχήματα 5.17 και 5.19 αποτελούν ενδεικτικές περιπτώσεις για τις οποίες ισχύει η παραπάνω αναλυμένη ανεπάρκεια των ελάχιστων κρεμάσεων, ώστε να περάσουν τον έλεγχο λειτουργικότητας. Χαρακτηριστικά, και για τα δύο διαγράμματα ως πρώτη και μοναδική επιλογή κρέμασης που καθιστά εφικτή την γεφύρωση μεγάλων ανοιγμάτων ($l = 25m, l = 30m$) με στατικό σύστημα αμφιέριστης δοκού (και δεδομένης της παραδοχής των συγκεκριμένων κι περιορισμένων επιλογών κρεμάσεων) αποτελεί το $h = h_{max}$ ($h = 2,50m$ και $h = 3,00m$ αντίστοιχα).

Ακόμα, στα παραπάνω δύο σχήματα επισημαίνετε και ο περιορισμός των επαρκών ποσοστών οπλισμών με άμεση παρατήρηση την πρώτη λύση για τις μικρότερες διαστάσεις ως μεγαλύτερη από το ελάχιστο ποσοστό οπλισμού που ελέγχθηκε και η λύση του αποδείχτηκε κρίσιμη σε βέλος.

Για τις τελευταίες δύο ομάδες διαγραμμάτων που αφορούν τα μήκη $l = 25,0m$ και $l = 30,0m$ παρατηρείται επίσης ο περιορισμός των δυνατών κατηγοριών αντοχής σκυροδέματος στις δύο τελευταίες κατηγορίες υψηλής αντοχής.

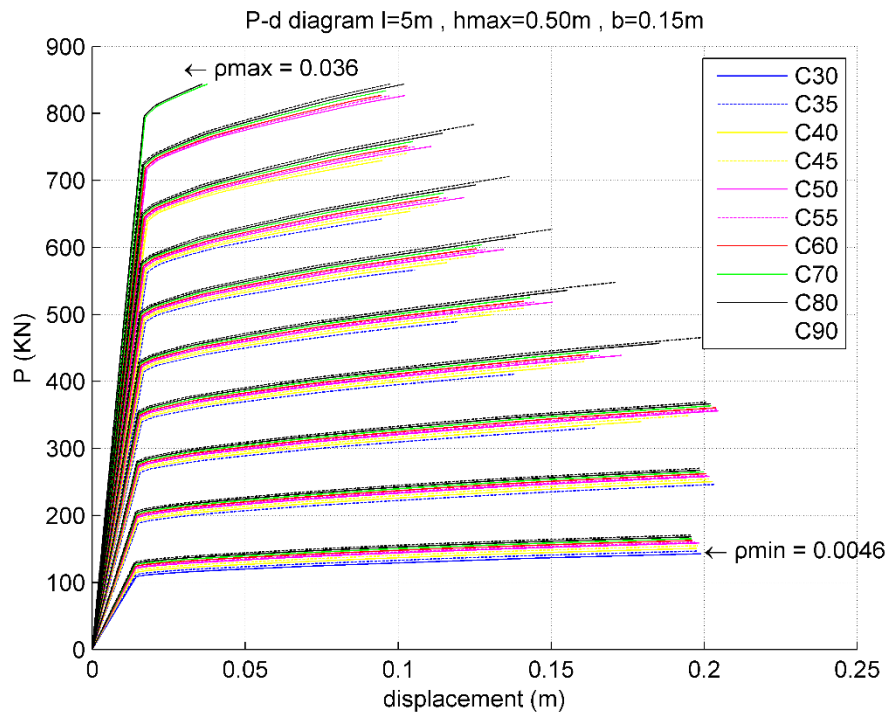
Τέλος, γενική παρατήρηση που αφορά όλα τα διαγράμματα P-δ είναι τόσο η αλλαγή της κλίσης της καμπύλης ικανότητας, όσο και η ελαφριά μετατόπιση του σημείου διαρροής του συστήματος όσο αυξάνεται το ποσοστό οπλισμού.

Η αύξηση στην κλίση του διαγράμματος που πρακτικά αποτελεί τη δυσκαμψία του συστήματος, είναι η απόρροια του αυξανόμενου ποσοστού οπλισμού που αυξάνει τη φέρουσα ικανότητα του στοιχείου. Ωστόσο, αυξάνοντας το ποσοστό οπλισμού, οπότε και την συνολική εφελκυσμένη επιφάνεια, ο υπάρχον χάλυβας λειτουργεί σε χαμηλότερες τάσεις, μη εκμεταλλευόμενος το περιθώριο ολκιμότητας του. Αυτό έχει ως αντίκτυπο και τελικά συνέπεια στην συνολική συμπεριφορά του συστήματος τη μείωση της πλαστιμότητας του.

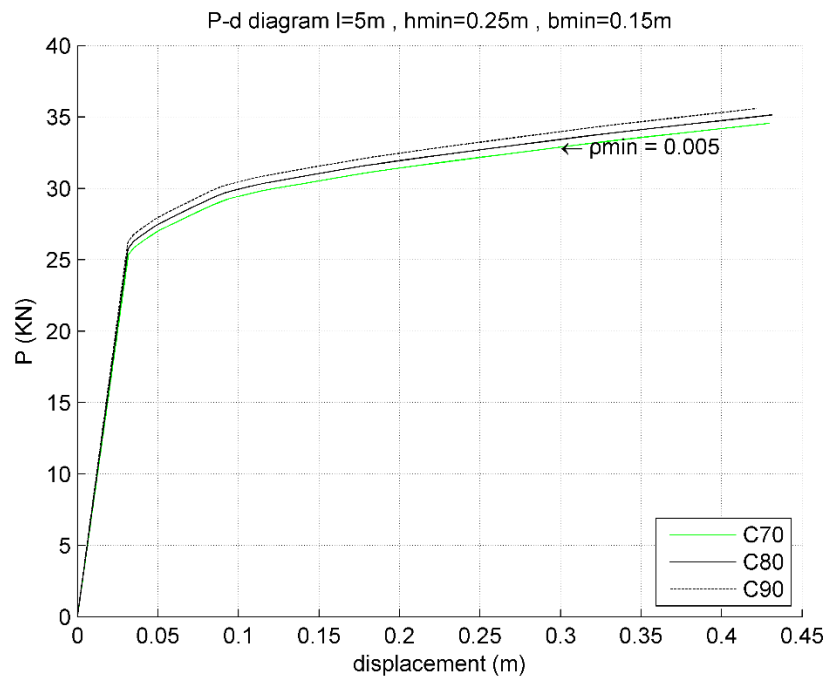
Τέλος, η μικρή αύξηση της μετατόπισης στην οποία διαρρέει το σύστημα (διαρροή οπλισμού-ρηγμάτωση σκυροδέματος), οφείλεται ξανά στο γεγονός της μεγαλύτερης διαθέσιμης εφελκυσμένης επιφάνειας οπότε και στην άφιξη στο σημείο διαρροής του.

5.2.2 Διατομή Πλακοδοκού

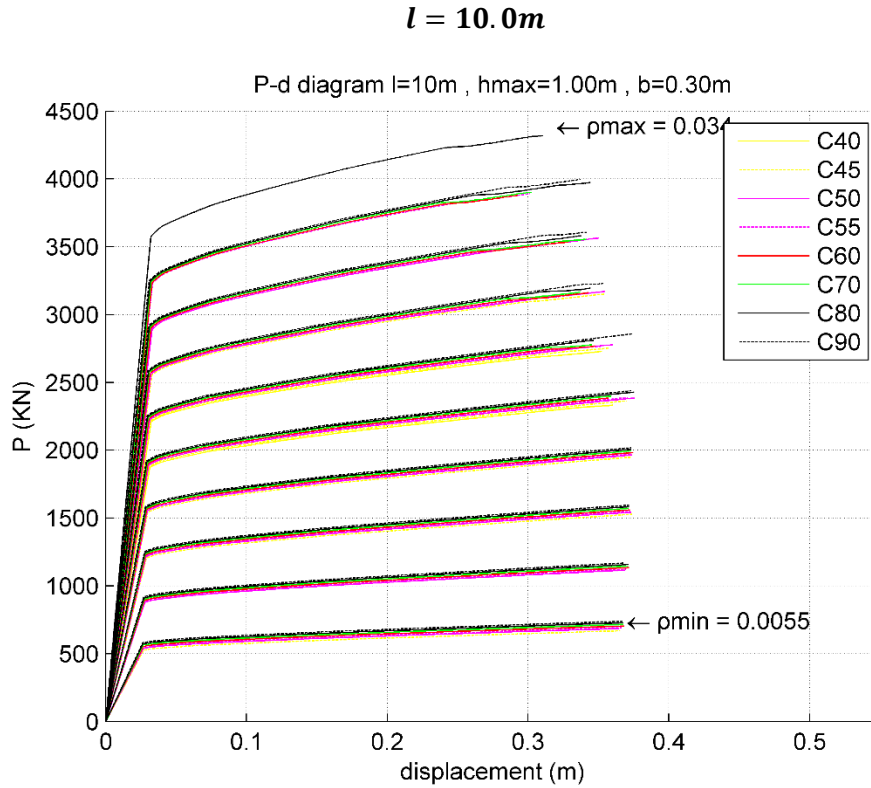
$$l = 5.0m$$



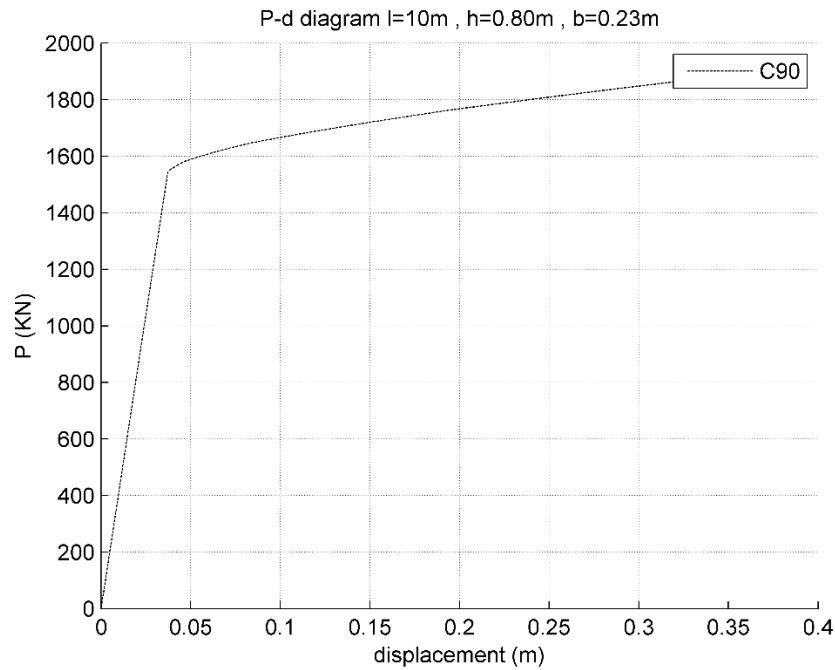
Σχήμα 5.20: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 5.0m$, $h = 0,5m$, $b = 0,15m$, $beff = 1,15m$)



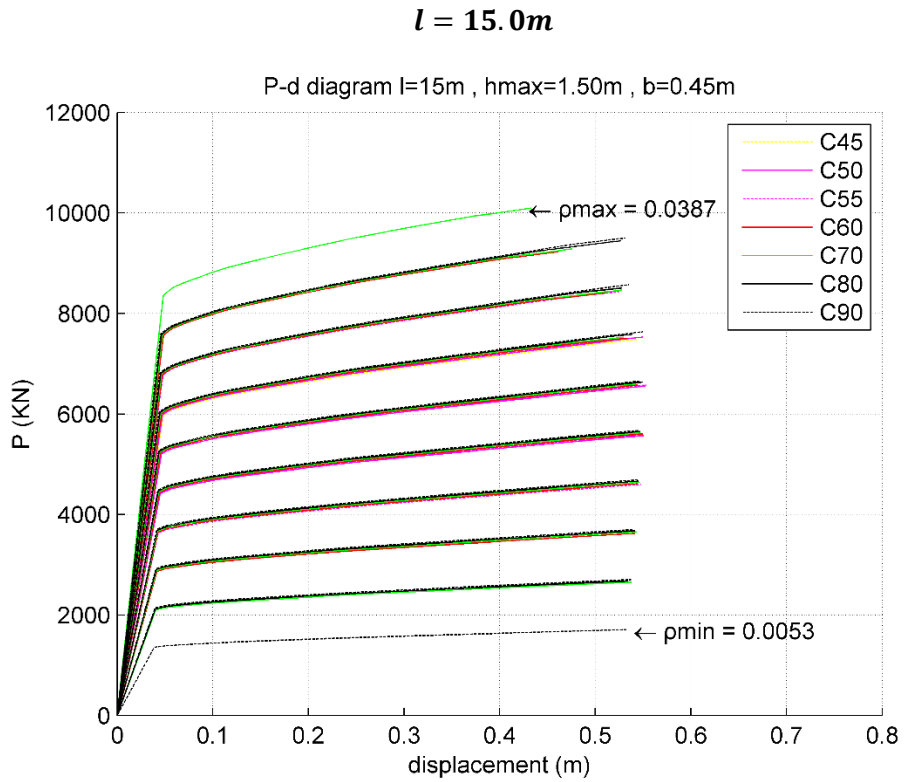
Σχήμα 5.21: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 5.0m$, $h = 0,25m$, $b = 0,15m$, $beff = 1,15m$) για όλα τα ποσοστά οπλισμού ($\rho_{min} - \rho_{max}$) και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος f_{ck}



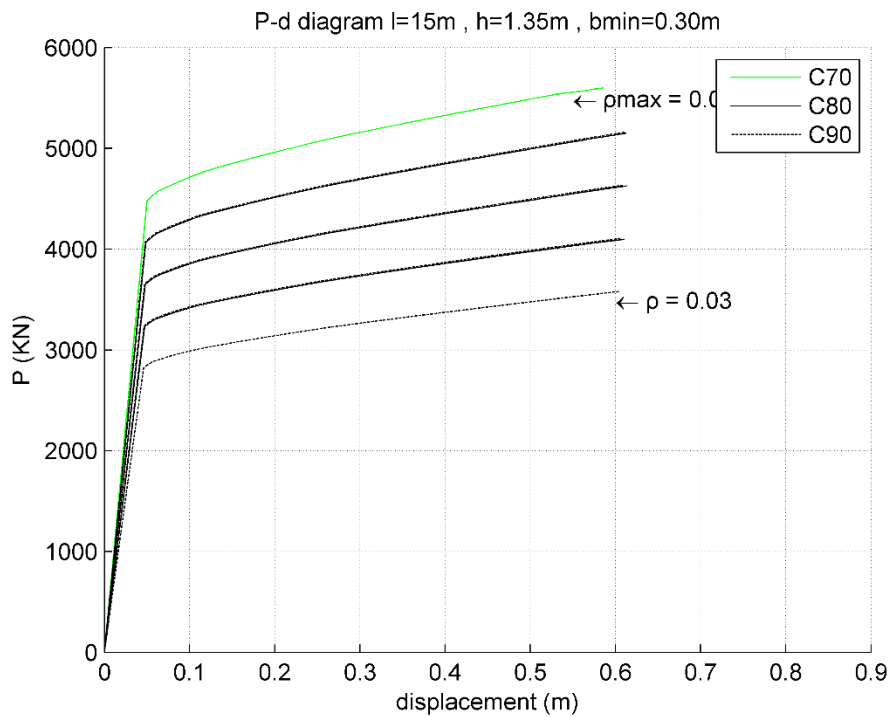
Σχήμα 5.22: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 10.0m$, $h = 1.00m$, $b = 0.30m$, $b_{eff} = 2.30m$)



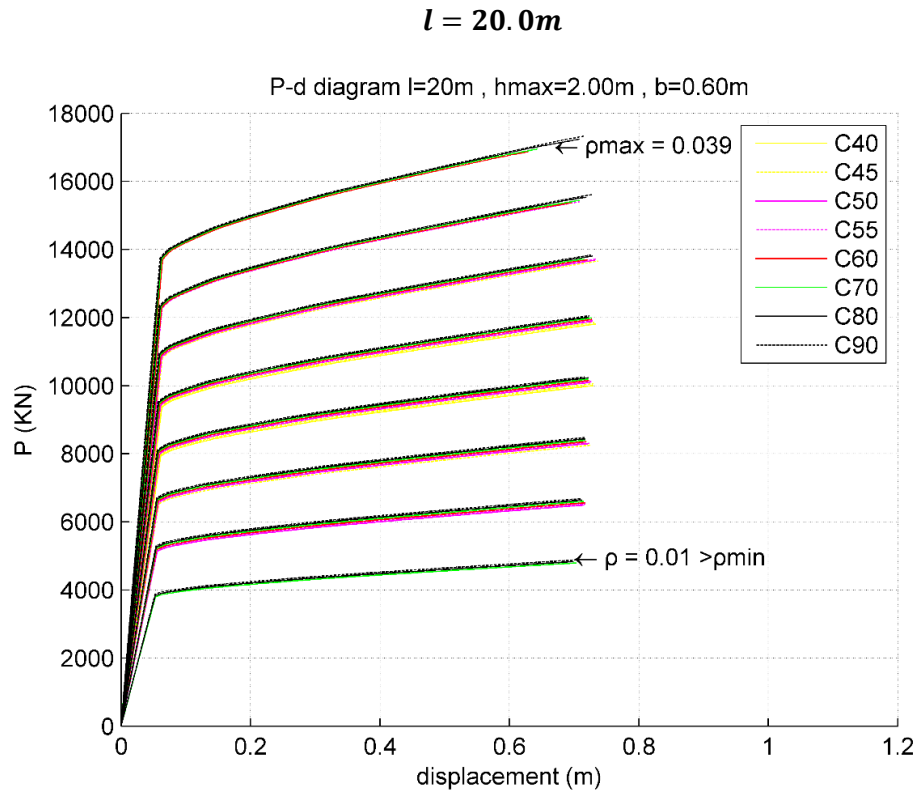
Σχήμα 5.23: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 10.0m$, $h = 0.80m$, $b = 0.23m$, $b_{eff} = 2.30m$) για όλα τα ποσοστά οπλισμού ($\rho_{min} - \rho_{max}$) και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος f_{ck}



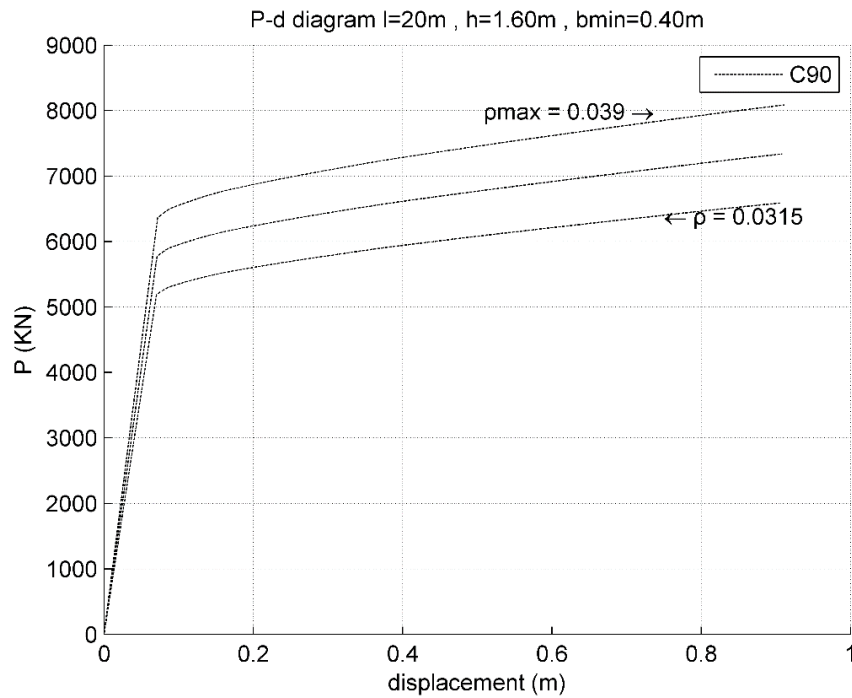
Σχήμα 5.24: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($L = 15.0m$, $h = 1,5m$, $b = 0,45m$, $beff = 3,45m$)



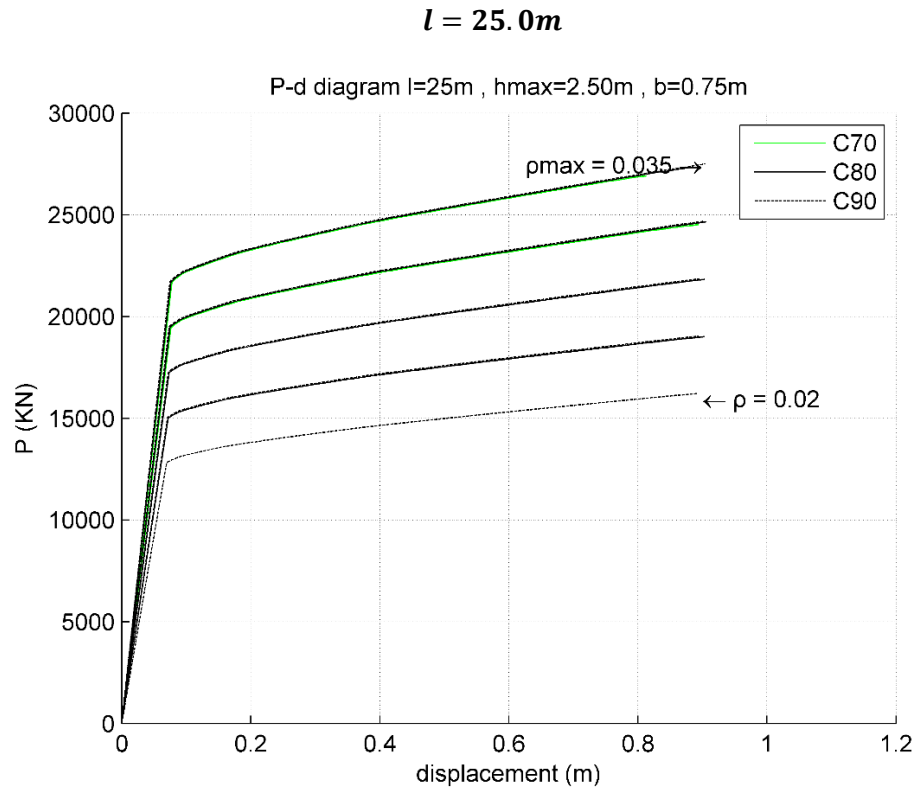
Σχήμα 5.25: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού $l = 15.0m$, $h = 1,35m$, $b = 0,30m$, $beff = 3,30m$) για όλα τα ποσοστά οπλισμού ($\rho_{min} - \rho_{max}$) και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος f_{ck}



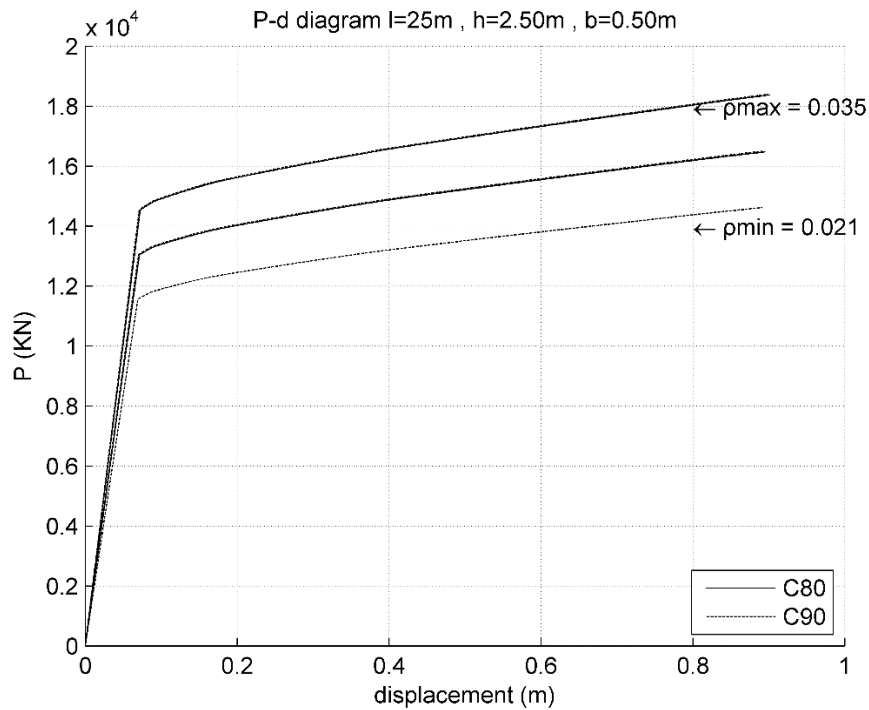
Σχήμα 5.26: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 20.0m$, $h = 2,00m$, $b = 0,60m$, $beff = 4,60m$)



Σχήμα 5.27: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 20.0m$, $h = 1,60m$, $b = 0,40m$, $beff = 4,40m$) για όλα τα ποσοστά οπλισμού ($\rho_{min} - \rho_{max}$) και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος f_{ck}



Σχήμα 5.28: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 25.0m$, $h = 2,50m$, $b = 0,75m$, $beff = 5,75m$)



Σχήμα 5.29: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 25.0m$, $h = 2,50m$, $b = 0,50m$, $beff = 5,75m$) για όλα τα ποσοστά οπλισμού ($\rho_{min} - \rho_{max}$) και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος f_{ck}

Σε ότι αφορά τις καμπύλες ικανότητας της πλακοδοκού παρατηρείται μια εντυπωσιακή αύξηση της συνολικής πλαστιμότητας του συστήματος της τάξεως του 200% σε σχέση με τη λύση της ορθογωνικής διατομής για όλες τις επιλογές ποσοστού οπλισμού και αντοχών σκυροδέματος. Το παραπάνω οφείλεται στο πλεονέκτημα της πλακοδοκού έναντι της ορθογωνικής διατομής, περιορισμού της θλιβόμενης ζώνης εντός της πλάκας σκυροδέματος, γεγονός που ενεργοποιεί μεγαλύτερη επιφάνεια σκυροδέματος (*beff*). Το μεγάλο αυτό εύρος συνεργαζόμενης επιφάνειας, καθυστερεί έως αποτρέπει την αστοχία του σκυροδέματος λόγω υπέρβασης της αντοχής του, γεγονός που επιτρέπει στο χάλυβα να αναπτύξει την ολκιμότητα του έως ότου την εξαντλήσει.

Η σημαντική αύξηση της πλαστιμότητας του φορέα, σε συνεργασία και με την αύξηση της φέρουσας ικανότητας του, καθιστά την επιλογή της πλακοδοκού ως βέλτιστης λύσης στη γεφύρωση ανοιγμάτων μεγάλου εύρους. Υπενθυμίζεται ότι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας (της τάξεως του 25%), οφείλεται στο μεγαλύτερο διαθέσιμο μοχλοβραχίονα που συντελεί σε μεγαλύτερη φέρουσα ροπή και κατ'επέκταση σε τέμνουσα.

Επιπλέον βελτιστοποίηση που θα μπορούσε να διερευνηθεί, λαμβάνοντας υπόψη των σημείων που υπερτερεί η διατομή Τα, θα ήταν η διερεύνηση της συμπεριφοράς μιας διατομής Ι, της οποίας το πλάτος του άνω πέλματος, εφόσον αναφερόμαστε σε συνεχείς φορείς, θα ταυτιζόταν με το συνεργαζόμενο πλάτος της πλακοδοκού, ενώ το πλάτος του κάτω πέλματος, πέραν της πρόσθετης φέρουσας ικανότητας που θα προσέδιδε στο φορέα, θα αποτελούσε και αναγκαία, σε ορισμένες περιπτώσεις, λύση ώστε να καταστεί δυνατή η υλοποίηση μεγάλων ποσοστών οπλισμού, όπως αυτά που λήφθηκαν υπόψη στη μελέτη.

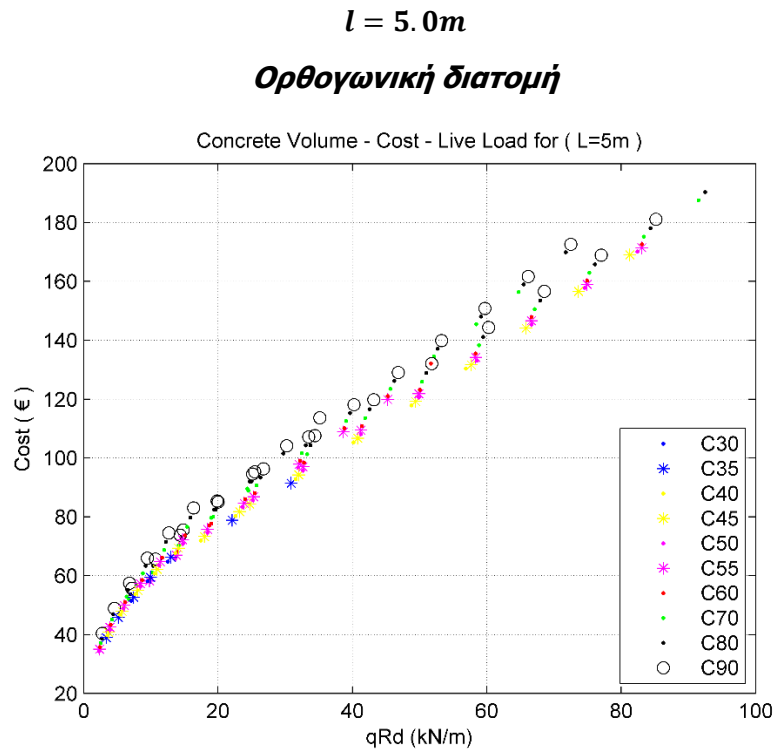
5.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΩΦΕΛΙΜΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΚΟΣΤΟΥΣ

Εισάγοντας στη διερεύνηση διαφόρων συνδυασμών γεωμετρικών διατομών, ποσοστό οπλισμού και κατηγοριών αντοχής και τον παράγοντα του κόστους υλοποίησης κάθε συνδυασμού, εντάχθηκε στην μελέτη μια εποπτική παρουσίαση σε τρισδιάστατα γραφήματα, των παραμέτρων κόστους, τού προκύπτοντος πρόσθετου φορτίου (κατ'απόρροια της φέρουσας ικανότητας) και συνολικώς απαιτούμενου όγκου σκυροδέματος προς υλοποίηση της εκάστοτε λύσης. Το αποτέλεσμα αυτής της παράθεσης είναι scatter plots (εκτύπωση σημείων), το καθένα από τα οποία αποτελεί ένα εφικτό συνδυασμό (περνάει έλεγχο ΟΚΛ και τέμνουσας). Τα παραπάνω συνθέτουν ένα «σύννεφο» λύσεων, όπου το χρώμα του αποδεικνύει την κατηγορία αντοχής σκυροδέματος.

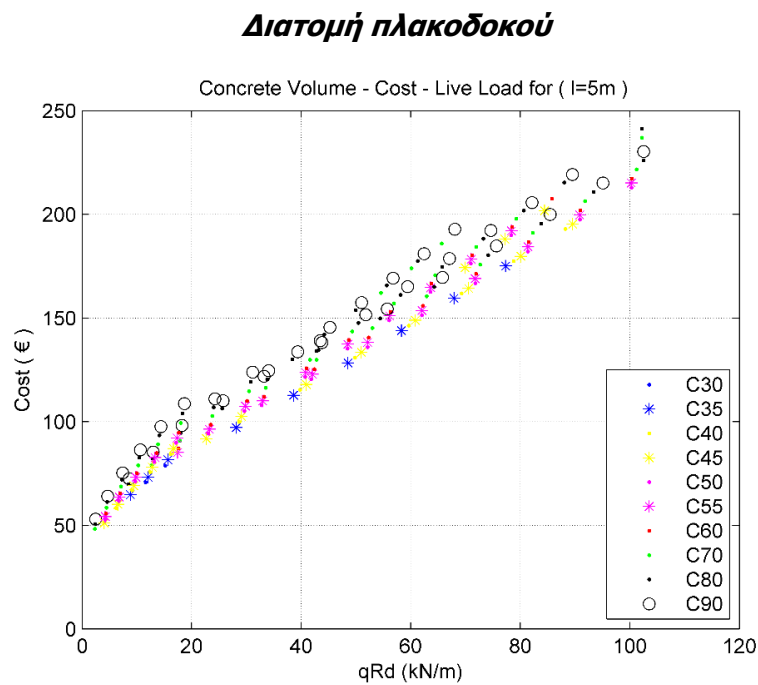
Η αξιοποίηση των παρακάτω αποτελεσμάτων θα μπορούσε να περιγραφεί από δύο κριτήρια:

- Σε περίπτωση που ζητούμενη είναι η απαιτούμενη φέρουσα ικανότητα του στοιχείου και κατ'επέκταση το πρόσθετο φορτίο του, η κίνηση στα παρακάτω διαγράμματα γίνεται κατακόρυφα, ελέγχοντας τις παρεχόμενες λύσεις διαφορετικών ποιοτήτων σκυροδέματος και διαφορετικών τελικών όγκων που τις υλοποιούν. Τελική πληροφορία που εξάγεται από τον τρόπο προσέγγισης του διαγράμματος είναι το συνολικό κόστος κατασκευής μιας τέτοιας λύσης.
- Σε περίπτωση που κρίσιμο μέγεθος είναι το κόστος της επιλεγείσας λύσης, η κίνηση στα παρακάτω διαγράμματα γίνεται οριζόντια, όπου και εξετάζονται οι επιλογές που μπορούν να γίνουν καθώς και τα αντίστοιχα πρόσθετα φορτία που προσφέρουν.

Τέλος, μια άμεση συγκριτική παρατήρηση των παρακάτω μαρτυρά την λογική απομείωσης του όγκου (άνοιγμα «σύννεφου») των εφικτών λύσεων που αντιστοιχούν σε κάθε άνοιγμα.



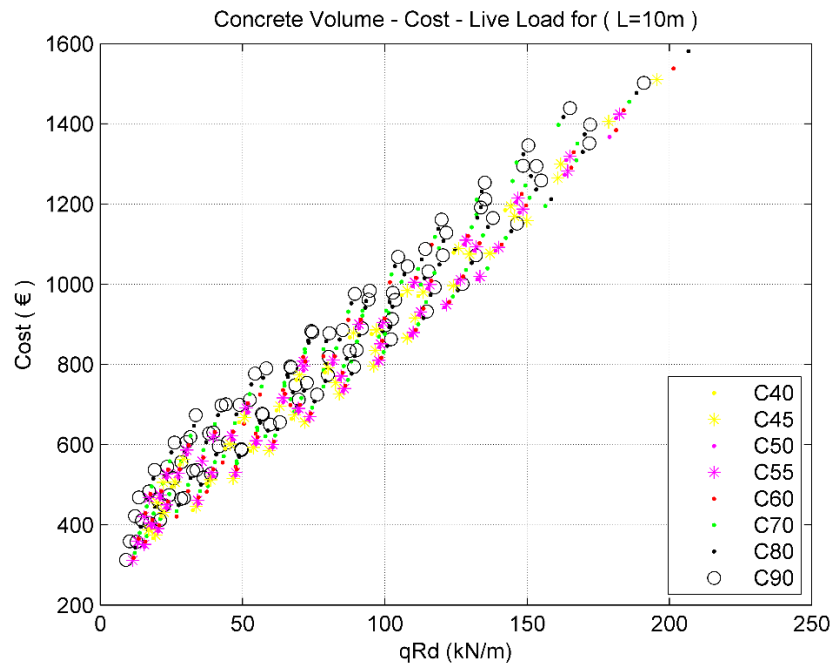
Σχήμα 5.32: Σχέση ωφέλιμου φορτίου (ανά τρέχον μέτρο) -κόστους κατασκευής δοκού ορθογωνικής διατομής για $l = 5.0m$ και όλες τις εφικτές κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος



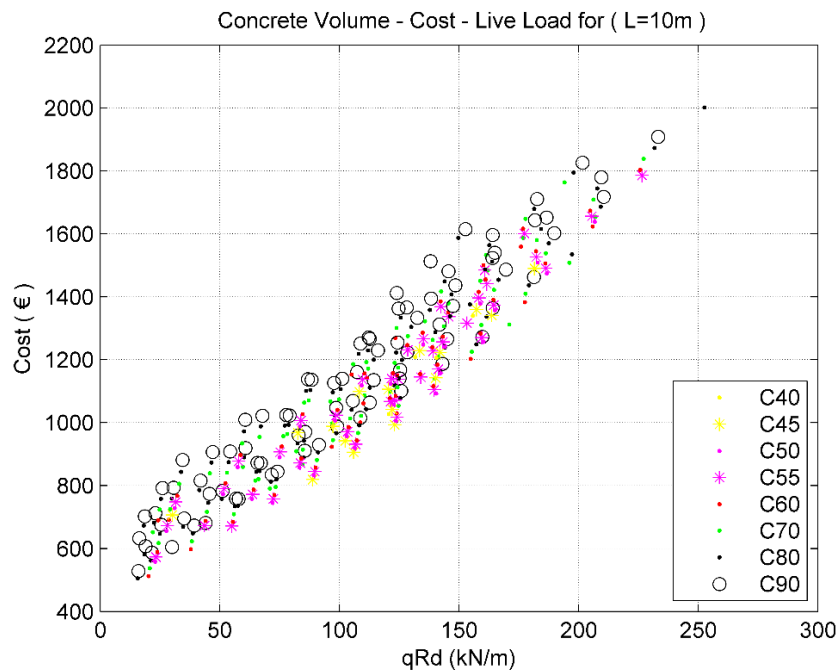
Σχήμα 5.33: Σχέση ωφέλιμου φορτίου-κόστους υλοποίησης πλακοδοκού διατομής T για $L = 5.0m$ και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος

$$l = 10.0m$$

Ορθογωνική διατομή



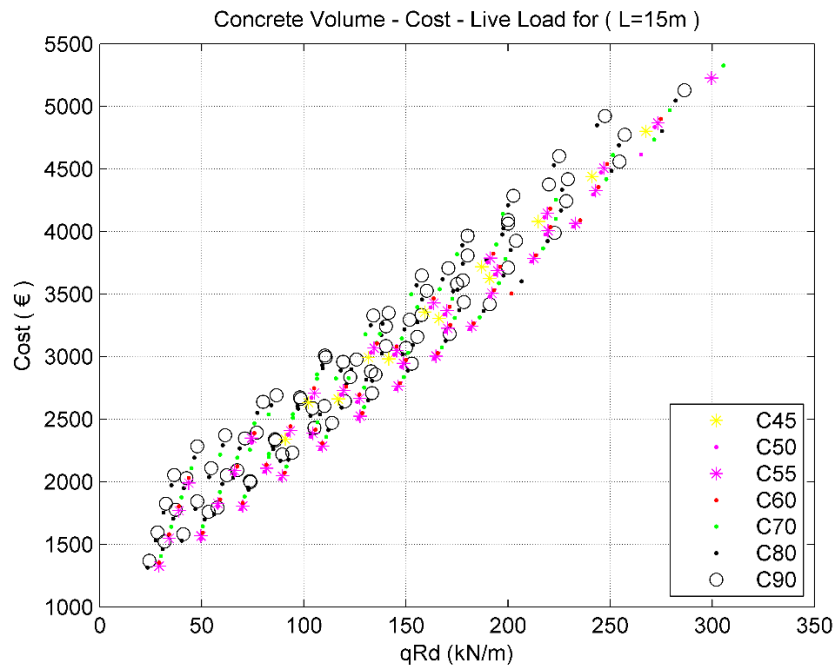
Διατομή πλακοδοκού



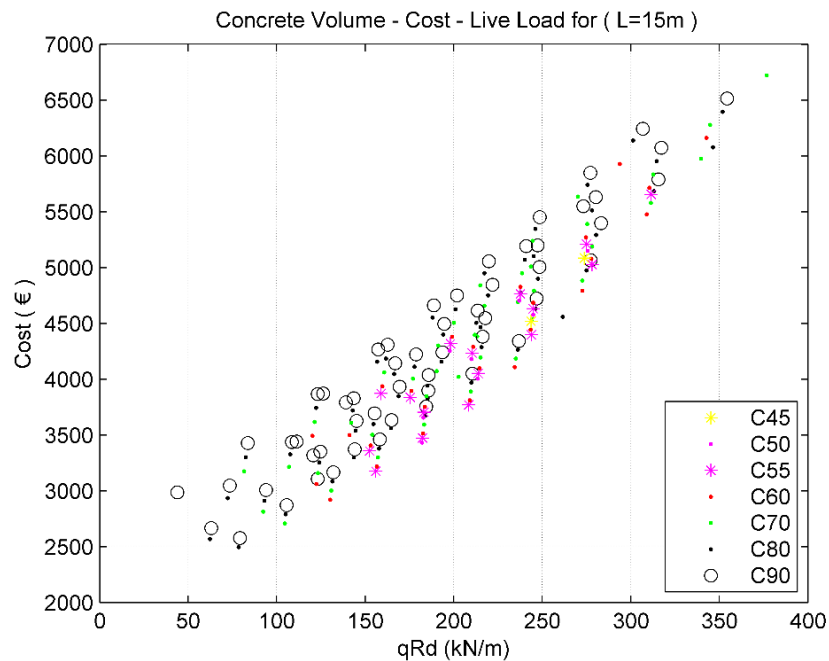
Σχήμα 5.34/35: Σχέση ωφέλιμου φορτίου-κόστους υλοποίησης δοκού διατομής ορθογωνικής/T για $l = 10.0m$ και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος

$$l = 15.0m$$

Ορθογωνική διατομή



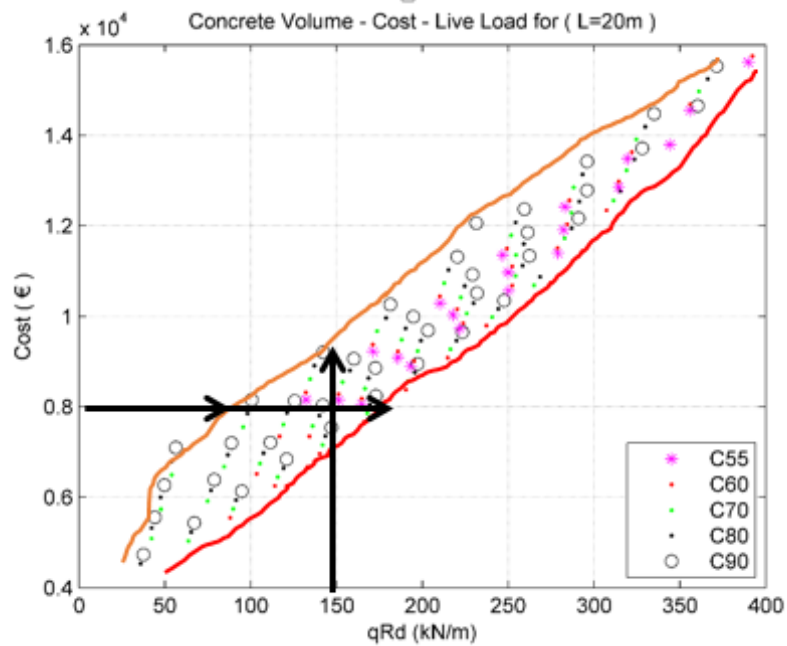
Διατομή πλακοδοκού



Σχήμα 5.36/37: Σχέση ωφέλιμου φορτίου-κόστους υλοποίησης πλακοδοκού διατομής T για $l = 15.0m$ και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος

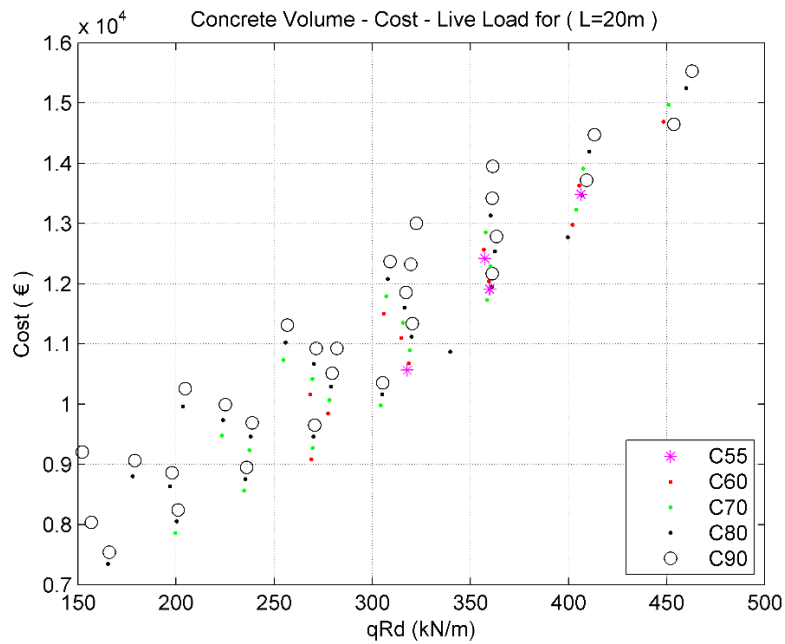
$$l = 20.0m$$

Ορθογωνική διατομή



Σχήμα 5.38: Σχέση ωφέλιμου φορτίου-κόστους υλοποίησης δοκού ορθογωνικής διατομής για $l = 20.0m$ και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος

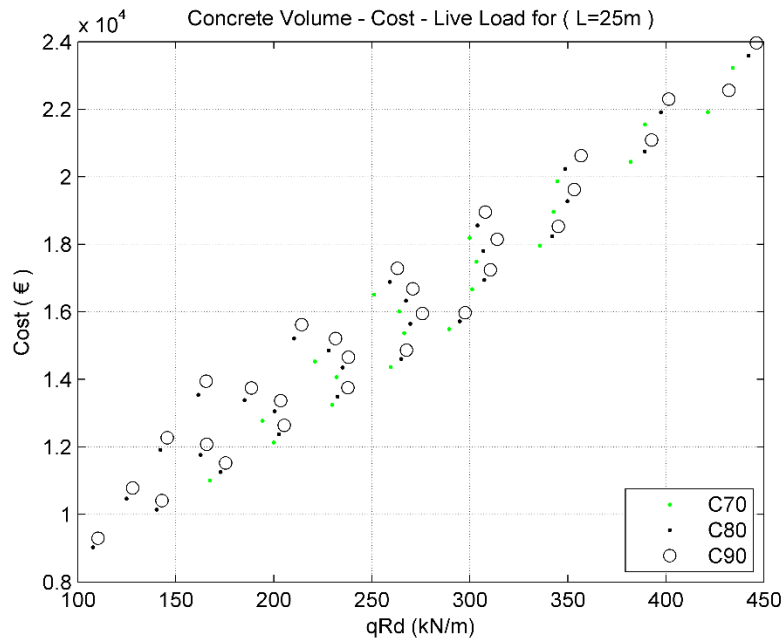
Διατομή πλακοδοκού



Σχήμα 5.39: Σχέση ωφέλιμου φορτίου-κόστους υλοποίησης πλακοδοκού διατομής T για $l = 20.0m$ και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος

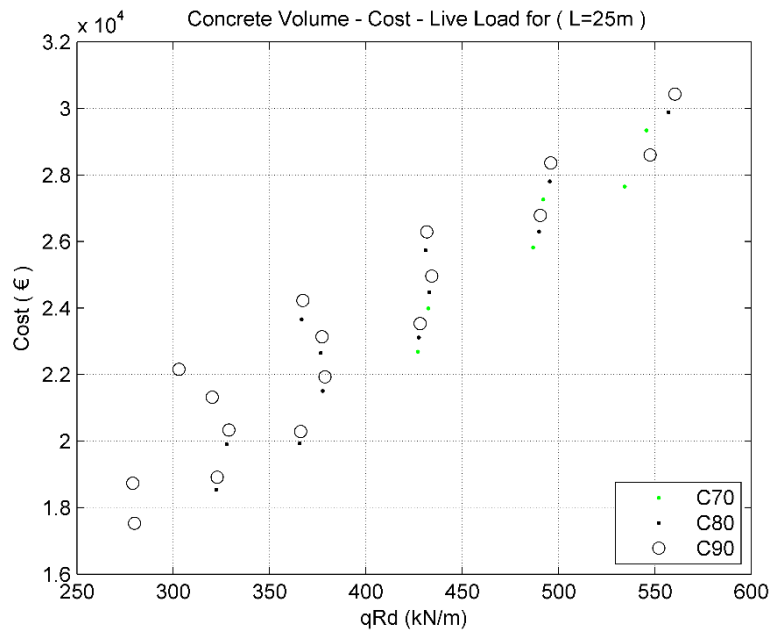
$$l = 25.0m$$

Ορθογωνική διατομή

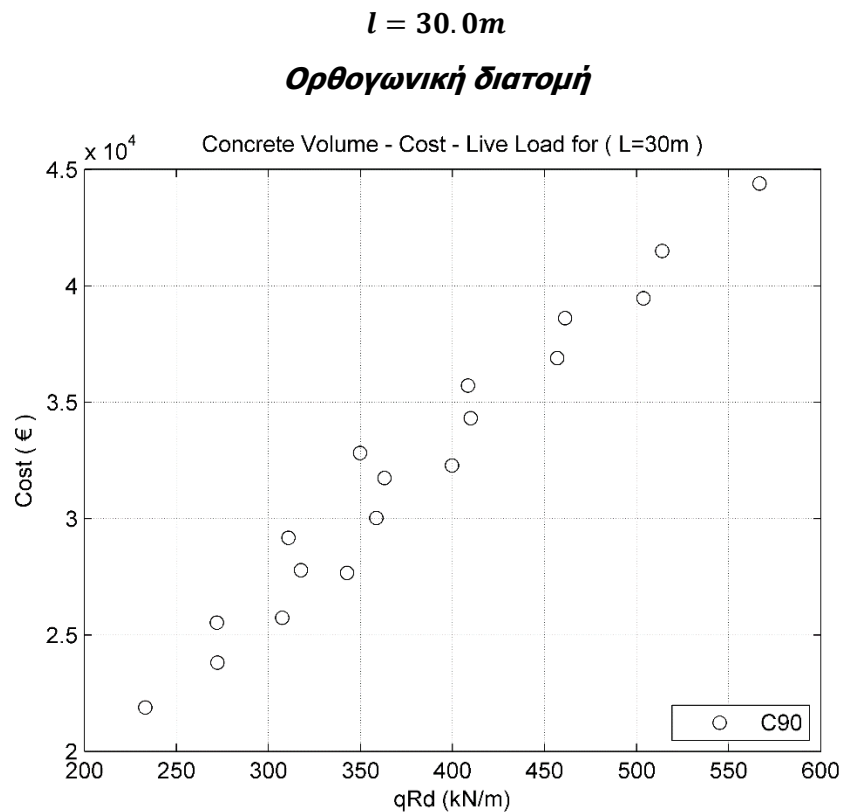


Σχήμα 5.40: Σχέση ωφέλιμου φορτίου-κόστους υλοποίησης δοκού ορθογωνικής διατομής για $l = 25.0m$ και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος

Διατομή πλακοδοκού



Σχήμα 5.41: Σχέση ωφέλιμου φορτίου-κόστους υλοποίησης πλακοδοκού διατομής T για $l = 25.0m$ και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος



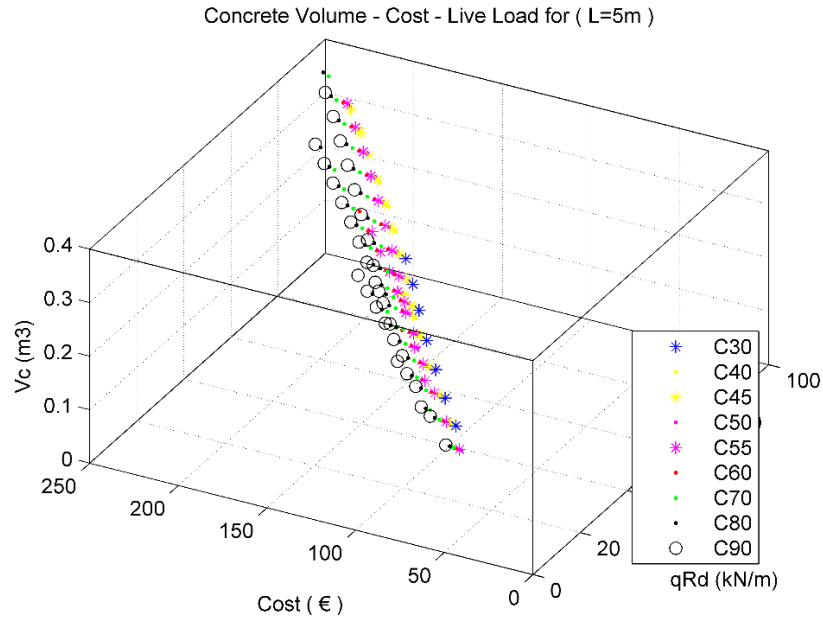
Σχήμα 5.42: Σχέση ωφέλιμου φορτίου-κόστους υλοποίησης δοκού ορθογωνικής διατομής για $L = 30.0m$ και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος

Για μια συγκριτική παρουσίαση των ανωτέρω αλλά και παρακάτω διαγραμμάτων όσον αφορά στο αν τελικά αξίζει να οδηγούμαστε σε μικρότερους όγκους και μεγαλύτερες αντοχές ή το αντίστροφο από άποψη φέρουσας ικανότητας αλλά και κόστους, οφείλει να γίνει περαιτέρω διερεύνηση στην οποία η βέλτιστη λύση θα προκύπτει από βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στη παρούσα εργασία.

5.4 ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΩΦΕΛΙΜΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΚΟΣΤΟΥΣ-ΟΓΚΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

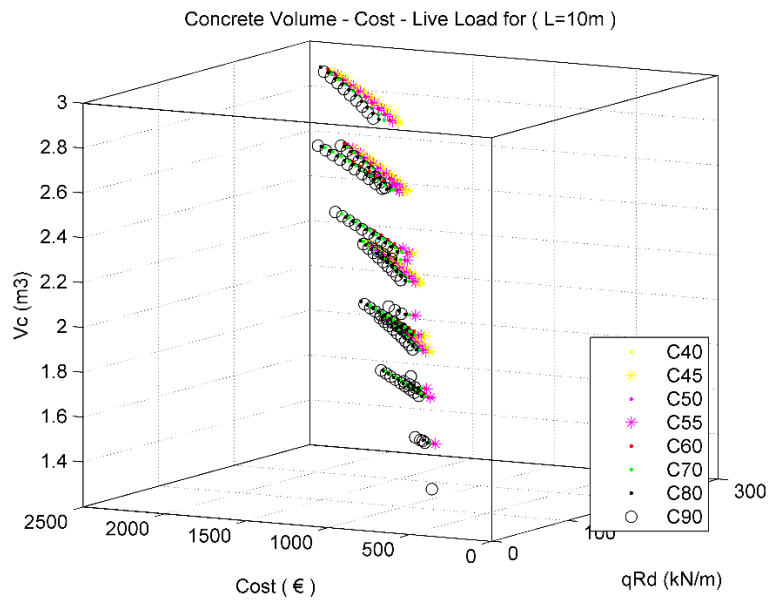
Ορθογωνική Διατομή

$$l = 5.0m$$

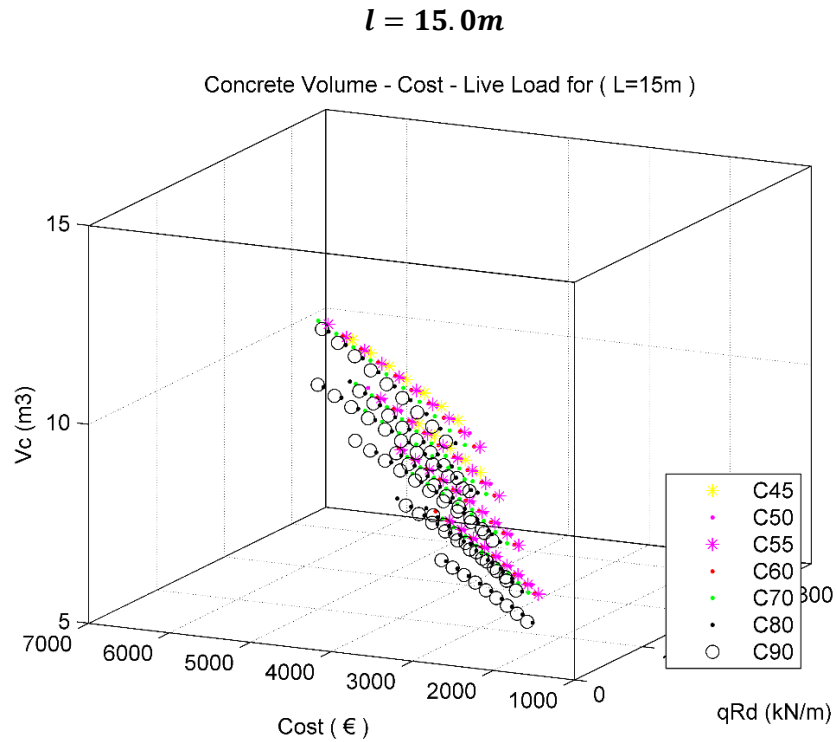


Σχήμα 5.43: Σχέση ωφέλιμου φορτίου-κόστους-απαιτούμενου όγκου για $l = 5.0m$ και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος

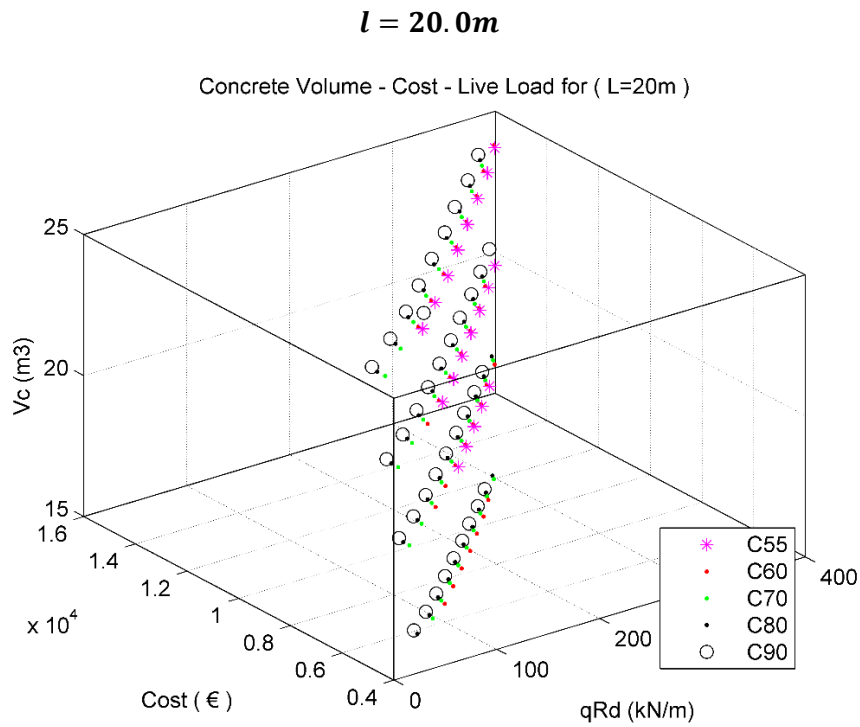
$$l = 10.0m$$



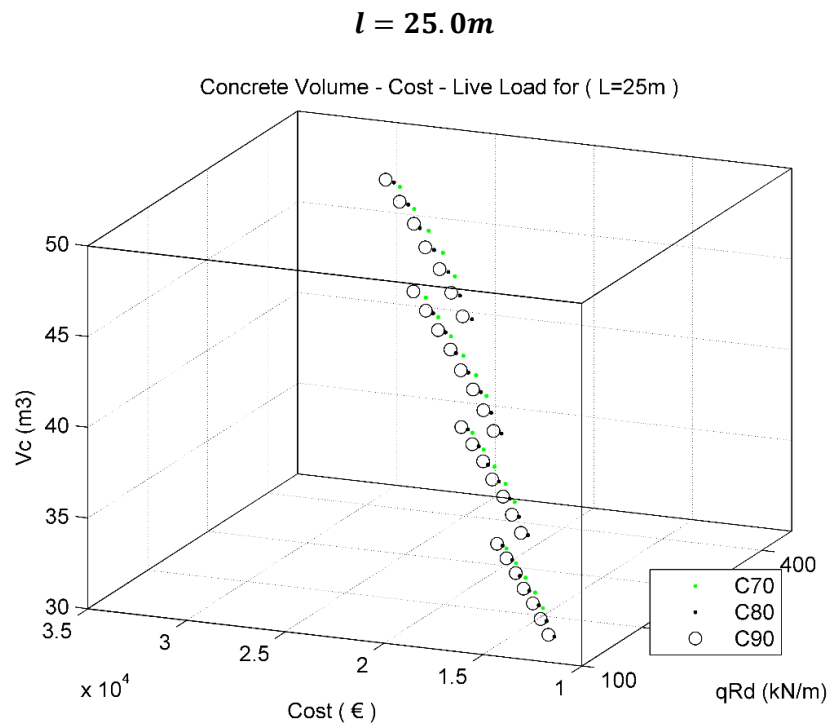
Σχήμα 5.44: Σχέση ωφέλιμου φορτίου-κόστους-απαιτούμενου όγκου για $l = 10.0m$ και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος



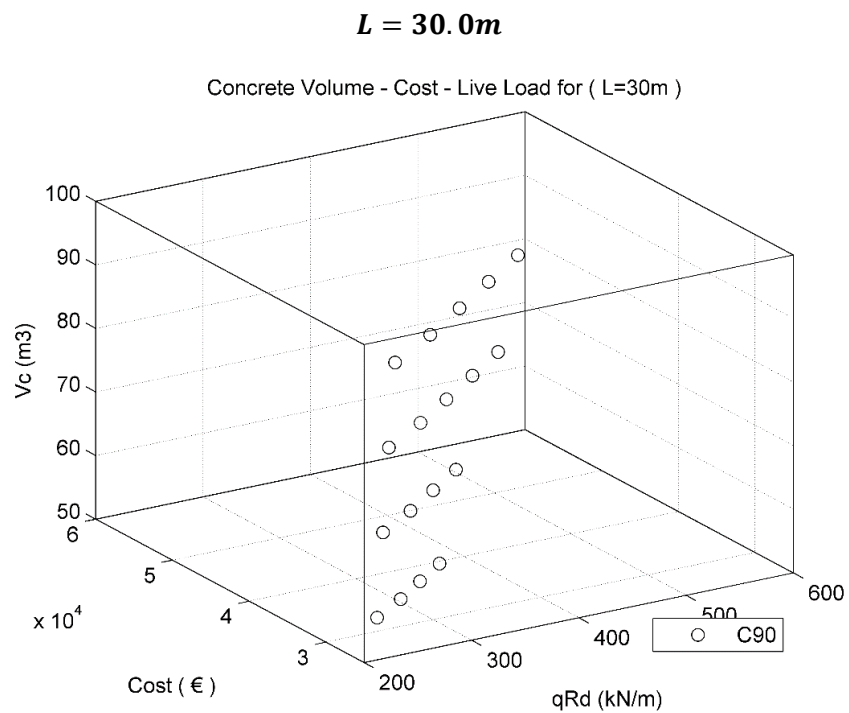
Σχήμα 5.45: Σχέση ωφέλιμου φορτίου-κόστους-απαιτούμενου όγκου για $l = 15.0m$ και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος



Σχήμα 5.46: Σχέση ωφέλιμου φορτίου-κόστους-απαιτούμενου όγκου για $l = 20.0m$ και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος



Σχήμα 5.47: Σχέση ωφέλιμου φορτίου-κόστους-απαιτούμενου όγκου για $l = 25.0m$ και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος



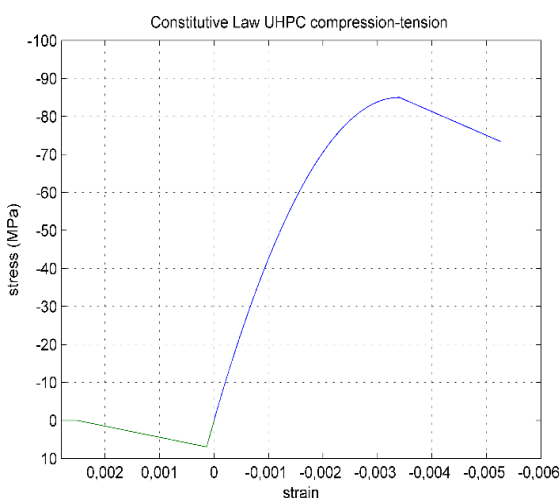
Σχήμα 5.48: Σχέση ωφέλιμου φορτίου-κόστους-απαιτούμενου όγκου για $L = 30.0m$ και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος

5.5 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΥΠΕΡ-ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

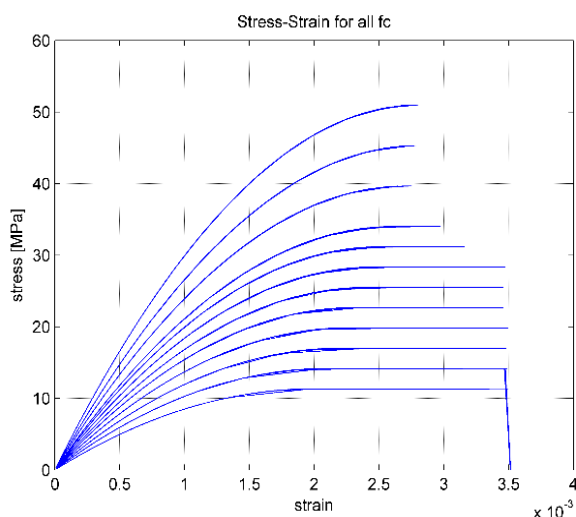
Για τις ίδιες παραμέτρους σχεδιασμού, έγινε μια προσπάθεια εξέτασης του ανωτέρω ανεπτυγμένου νέου υλικού υπερ-υψηλής αντοχής, με απώτερο στόχο τη διερεύνηση και συγκριτική παρουσίαση της συμπεριφοράς αυτού στη γεφύρωση μεγάλων ανοιγμάτων με ιδιαίτερα κομψές λύσεις (που ενδεχομένως συνεπάγονται μεγάλη λυγρότητα).

Οι παραδοχές που αφορούν στο υλικό αναπτύχθηκαν εκτενώς στο Κεφάλαιο της περιγραφής του κώδικα OpenSees (Κεφάλαιο 4.4 ΥΛΙΚΑ, 3) σκυρόδεμα υπερ-υψηλής αντοχής)

Αρχικά παρατίθεται το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων που προέκυψε από την στατική ανάλυση σύμφωνα με την παραδοχή καταστατικού νόμου όπως αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 4.4.3. Επίσης παρατίθεται προς σύγκριση η σχέση τάσεων παραμορφώσεων που προέκυψε από την ανάλυση του προσομοιώματος μας για όλες τις κατηγορίες συμβατικών σκυροδεμάτων. Επισημαίνεται ότι στα διαγράμματα φαίνονται οι τιμές σχεδιασμού της αντοχής των υλικών, όπως και λήφθηκαν για την ανάλυση. ($f_{cd} = 0.85 \cdot f_{ck}/1.50$)



Σχήμα 5.49: Καταστατικός νόμος σκυροδέματος UHPFRC όπως προέκυψε από την ανάλυση (C150).



Σχήμα 5.50: Καταστατικός νόμος συμβατικού σκυροδέματος όπως προέκυψε από την ανάλυση (όλες οι κατηγορίες αντοχής, από C20-C90).

Παρατηρώντας συγκριτικά τους παραπάνω καταστατικούς νόμους, είναι εμφανής η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος υπερ-υψηλής αντοχής ($E_{cm} = 50GPa$) σε σχέση με αυτό του συνήθους αντοχής σκυροδέματος που ακολουθεί αυξητική τάση σύμφωνα με τον Πίνακα 1.5 όπου το μέσο μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $E_{cm} = (27 \div 44)GPa$.

Εμφανής είναι επίσης η εφελκυστική αντοχή που έχει το UHPFRC, αντοχή την οποία οφείλει στο ποσοστό χαλύβδινων ινών που εμπεριέχει (ποσοστό ινών ~1% κ.ο και συντελεστής κατανομής ινών $K=1.25$).

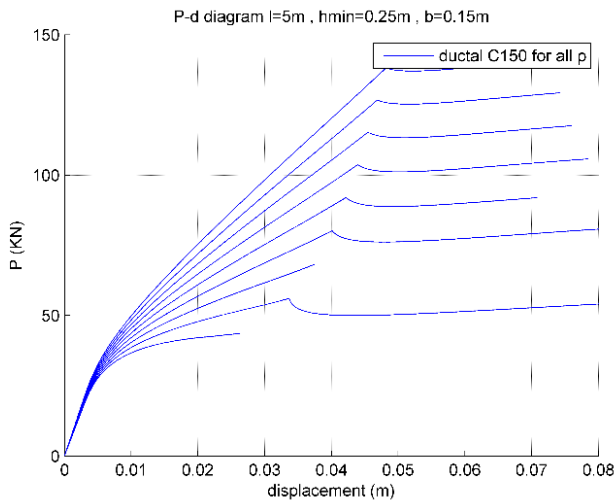
Τέλος παρατηρείται η αύξηση της παραμόρφωσης θραύσης καθώς αναγόμαστε από το συμβατικό σκυρόδεμα στο υπερ-υψηλής αντοχής. Αυτό οφείλεται στην προσδιδόμενη πλαστιμότητα από τις

κατανεμημένες στη μάζα του φορέα ίνες. Αντιθέτως, μιλώντας για τις κατηγορίες συμβατικού σκυροδέματος, παρατηρείται μια μείωση στην ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας του θλιβόμενου σκυροδέματος (κατά Πίνακα 1.5), η οποία δικαιολογείται καθώς, αυξανόμενης της κατηγορίας αντοχής, η οποία συμβαίνει χρησιμοποιώντας διαφορετικές συνθέσεις αδρανών και τσιμέντου με συνολικά μεγαλύτερη πυκνότητα, η ψαθυρότητα του προκύπτοντος σκυροδέματος αυξάνει.

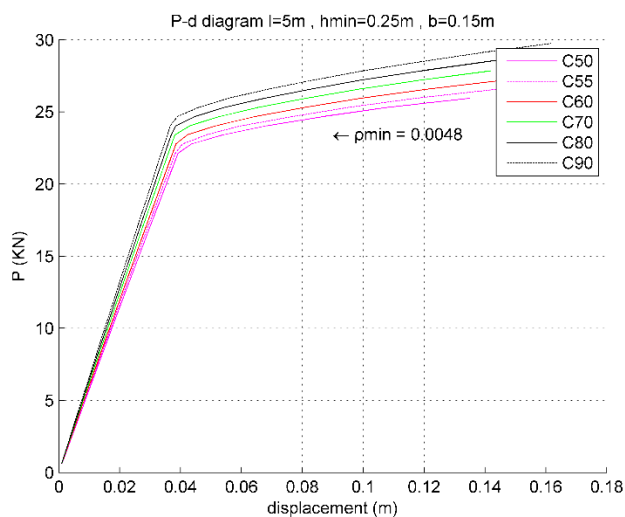
Συμπερασματικά, φαίνεται η εμφανής υπεροχή της συμπεριφοράς του UHPFRC, τόσο σε θλίψη, όσο και σε εφελκυσμό.

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα P-δ που προέκυψαν από την ίδια ανάλυση της οποίας τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν παραπάνω. Επιλέχθηκε ως τρόπος παρουσίασης αυτών, η αντιπαράθεση τους με τις αντίστοιχες καμπύλες ικανότητας που προέκυψαν για το ίδιο άνοιγμα και τις ίδιες διαστάσεις διατομής.

Μια επιπλέον κατηγοριοποίηση των αποτελεσμάτων είναι η παρουσίαση των διαγραμμάτων P-δ της λύσης με UHPFRC για τις περιπτώσεις εκείνες (ελάχιστες γεωμετρικές διαστάσεις h, b που ερευνήθηκαν) για τις οποίες το συμβατικό σκυρόδεμα παρουσιάζει ανεπάρκεια λύσεων που να περνούν τον έλεγχο λειτουργικότητας.



Σχήμα 5.51: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 5.0m, h = 0,25m, b = 0,15m$) για UHPFRC C150 .



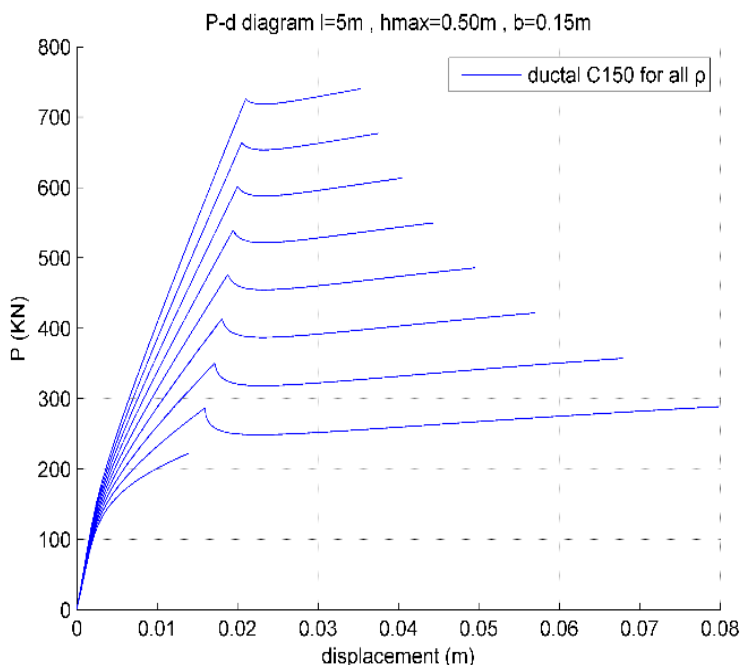
Σχήμα 5.9: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 5.0m, h = 0,25m, b = 0,15m$) για όλα τα ποσοστά οπλισμού ρ_{min} και όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος f_{ck}

Για τα παραπάνω Σχήματα 5.51 και 5.9 παρατηρούμε την σημαντικά μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα στοιχείου από UHPFRC σε σχέση με αυτό από συμβατικά σκυροδέματα.

Αυτό οφείλεται αρχικά στο ότι για το συμβατικό σκυρόδεμα και τις κατηγορίες C50-C90 οι συνδυασμοί που περνούν τον έλεγχο βέλους και θεωρούνται εφικτοί (εικονιζόμενοι στο Σχήμα 5.9), έχουν το ελάχιστο ποσοστό οπλισμού. Συνεπώς οφείλουν να συγκριθούν οι καμπύλες ικανότητας του συμβατικού σκυροδέματος με την κατώτερη καμπύλη του υπερ-υψηλής που αντιστοιχεί επίσης σε οπλισμό κοντά στον ελάχιστο.

Επίσης οφείλει να επισημανθεί ότι το στοιχείο από UHPFRC είναι λιγότερο εύκαμπτο από αυτό με συμβατικό (μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας), ενώ τα ερπυστικά φαινόμενα δευτέρας τάξεως έχουν πολύ μικρότερη επιρροή καθώς ερμηνεύτηκε στο Κεφάλαιο 2.9 της τεχνολογίας σκυροδέματος (χαμηλός λόγος w/c). Συγκεκριμένα και σύμφωνα με τις υποδείξεις του γαλλικού κανονισμού (A F G C Groupe de travail BFUP Recommendations / recommendations, 2003), ως συντελεστής ερπυσμού λήφθηκε η τιμή $\varphi = 0.8$.

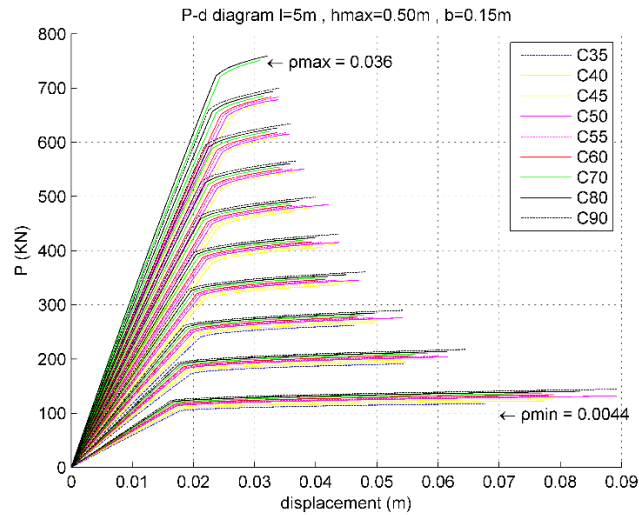
Τέλος, οι επιλογές σε υλικό υπερ-υψηλής αντοχής υπερτερούν σε προσφορά πρόσθετου φορτίου (απόρροια της φέρουσας ικανότητας) καθώς το ειδικό βάρος του νέου αυτού υλικού είναι αρκετά μικρότερο του συμβατικού ($\gamma_{UHPFC} = 19kN/m^2$). Συνεπώς στις ακόλουθες περιπτώσεις που το άνοιγμα υλοποιείται και με επιλογές αντοχών συμβατικού σκυροδέματος, για ίσα φορτία αστοχίας, το πρόσθετο που προσφέρεται στην περίπτωση του υπερ-υψηλής είναι μεγαλύτερο. («κερδίζουμε» σε ίδιο βάρος)



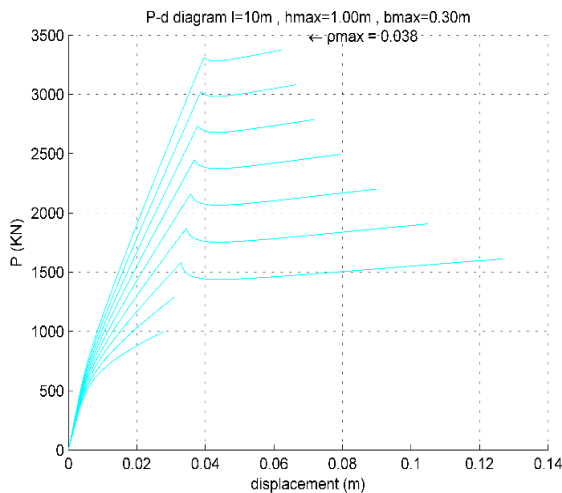
Σχήμα 5.52: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 5.0m$, $h = 0,50m$, $b = 0,15m$) για UHPFRC C150 .

Η καμπύλη ικανότητας του νέου αυτού υλικού χαρακτηρίζεται από τρία στάδια που αφορούν τη λειτουργία τριών υλικών (σκυροδέματος, ινών και συμβατικού χάλυβα οπλισμού). Συνεπώς, η πρώτη ελαστική περιοχή αφορά στη λειτουργία του σύνθετου αυτού υλικού μέχρι την πρώτη διαρροή των χαλύβδινων ινών. Η σταδιακή εξόλκευση του που συματοδοτεί την αρχή της ρηγμάτωσης φαίνεται στο διάγραμμα στην περιοχή εκείνη που η κλίση μειώνεται ($EI = EI_{crack}$). Τέλος η περιοχή του πλατώ αφορά

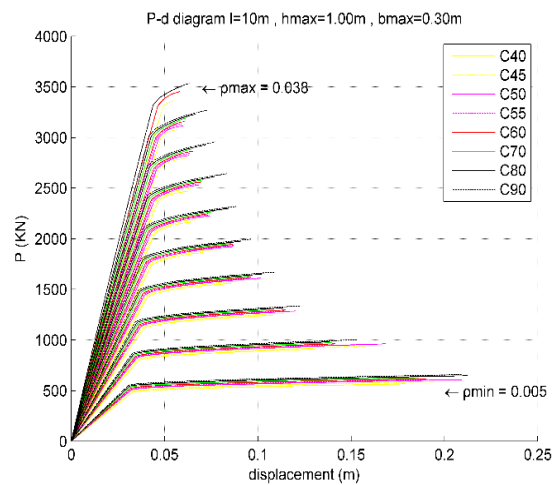
τη λειτουργία του υπό διαρροή χάλυβα οπλισμού, μέχρι την εξάντληση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος.



Σχήμα 5.9: Καμπύλη ικανότητας συνδυασμού ($l = 5.0m$, $h = 0,25m$, $b = 0,15m$) για όλα τα ποσοστά οπλισμού ρ_{min} και όλες τις κατηγορίες αντοχής συμβατικού σκυροδέματος

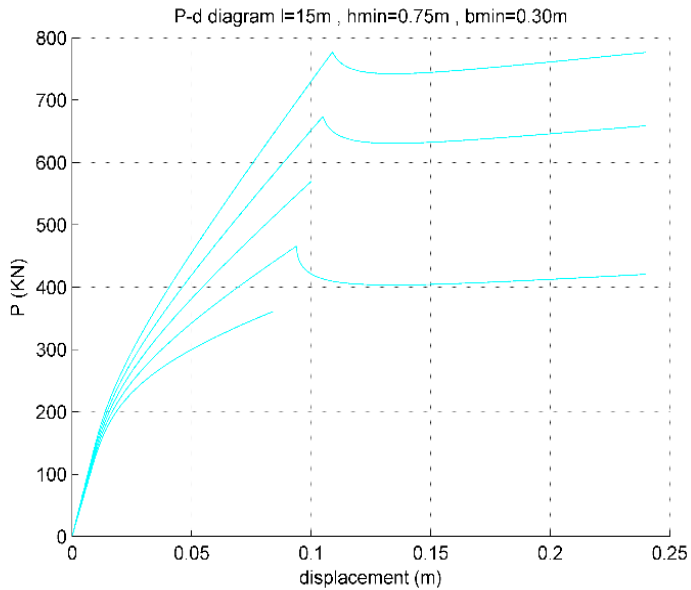


Σχήμα 5.53: Καμπύλη ικανότητας UHPFRC συνδυασμού ($l = 10.0m$, $h = 1,00m$, $b = 0,30m$)



Σχήμα 5.11: Καμπύλη ικανότητας NSC (Normal Strength Concrete) συνδυασμού ($l = 10.0m$, $h = 1,00m$, $b = 0,30m$)

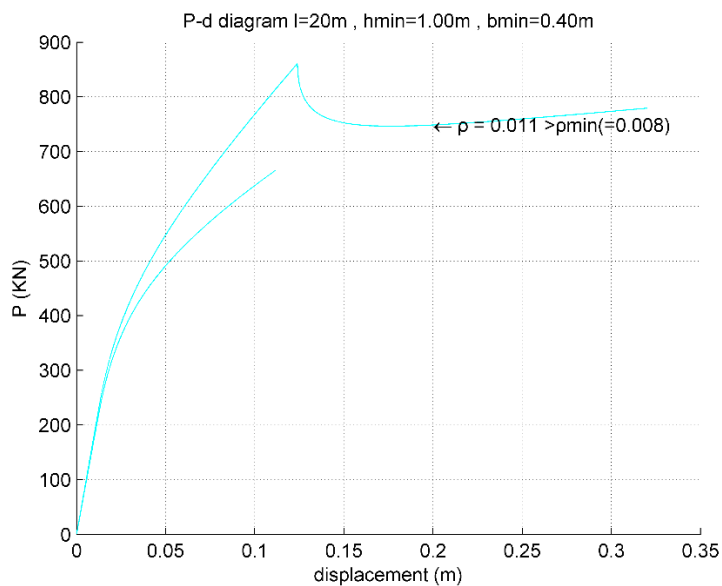
Η σύγκριση των παραπάνω διαγραμμάτων συνοψίζει την περίπτωση που αναλύθηκε παραπάνω στην οποία, για ίδια φέρουσα ικανότητα προκύπτει μεγαλύτερο προσφερόμενο πρόσθετο φορτίο για την περίπτωση του UHPFRC.



Σχήμα 5.54: Καμπύλη ικανότητας UHPFRC συνδυασμού ($l = 15.0m$, $h = 0,75m$, $b = 0,30m$)

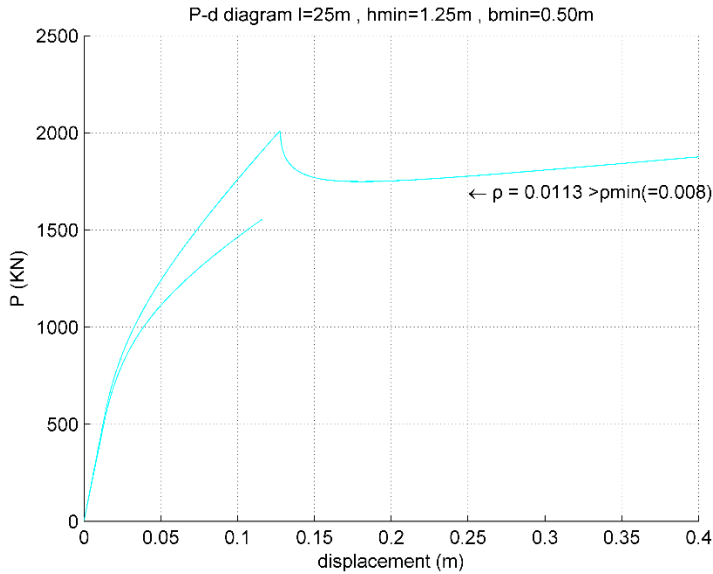
Στη διερεύνηση που έγινε με όλες τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος για τις δεδομένες επιλογές μας, (όπως αποδείχτηκε μελετήθηκαν πλέον λυγρές δοκοί) φάνηκε ότι η minimum απαιτούμενη κρέμαση για να δοθούν λύσεις που περνούν τον έλεγχο βέλους στο άνοιγμα των

$l = 15.0m$ ήταν η $h = 1.35m$. Στο Σχήμα 5.53 παρατηρούμε ότι το UHPFRC δίνει λύση ακόμα και με την ελάχιστη κρέμαση $h_{min} = 0.75m$ που καλύπτει το κριτήριο βέλους.



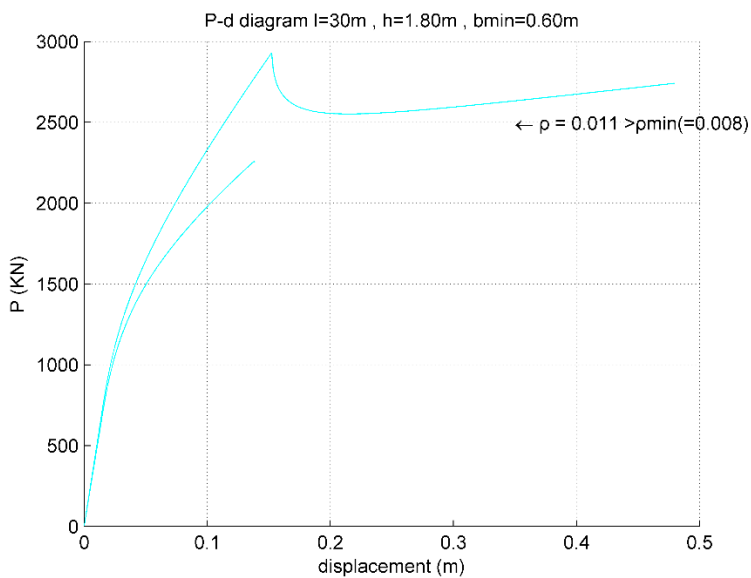
Σχήμα 5.55: Καμπύλη ικανότητας UHPFRC συνδυασμού ($l = 20.0m$, $h = 1,00m$, $b = 0,40m$)

Από την διερεύνηση που προηγείται στο Κεφάλαιο 5.2.1 για το άνοιγμα των $l = 20.0m$, προκύπτει ότι για σκυροδέματα που υπάγονται στην κατηγορία των συμβατικών και για τις επιλογές που έγιναν σε διαστάσεις διατομής, η ελάχιστη απαιτούμενη κρέμαση για μια ευσταθή λύση είναι τα $h = 2.50m$. Αντιθέτως, με χρήση UHPFRC βρίσκεται εφικτή λύση μη κρίσιμη σε βέλος για $h = 1,00m$.



Από την διερεύνηση που προηγείται στο Κεφάλαιο 5.2.1 για το άνοιγμα των $l = 25.0m$, προκύπτει ότι για σκυροδέματα που υπάγονται στην κατηγορία των συμβατικών και για τις επιλογές που έγιναν σε διαστάσεις διατομής, η ελάχιστη απαιτούμενη κρέμαση για μια ευσταθή λύση είναι τα $h = 2.50m$. Αντιθέτως, με χρήση UHPFRC βρίσκεται εφικτή λύση μη κρίσιμη σε βέλος για $h = 1,50m$.

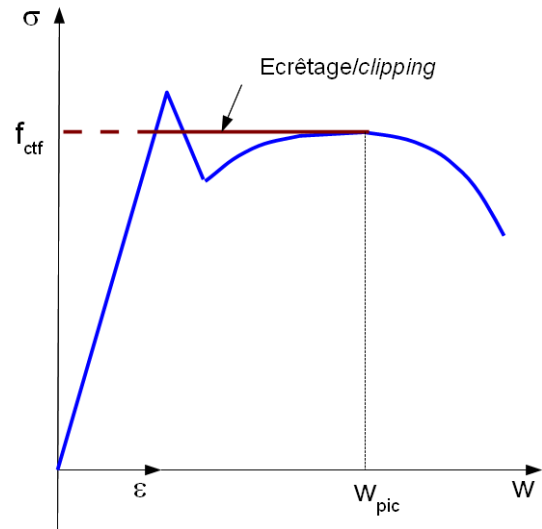
Σχήμα 5.56: Καμπύλη ικανότητας UHPFRC συνδυασμού ($l = 25.0m$, $h = 1,50m$, $b = 0,50m$)



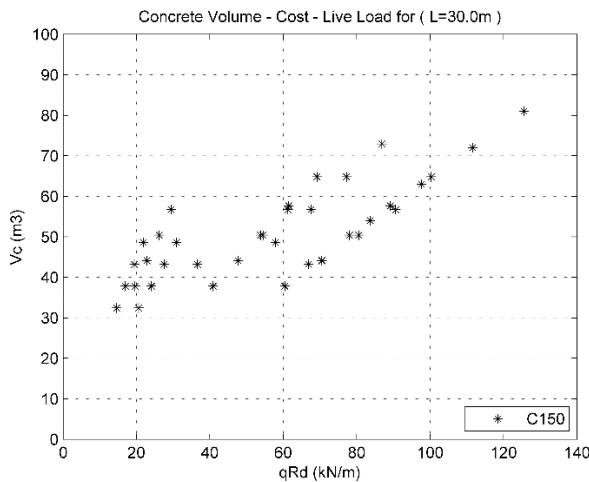
Από την διερεύνηση που προηγείται στο Κεφάλαιο 5.2.1 για το άνοιγμα των $l = 30.0m$, προκύπτει ότι για σκυροδέματα που υπάγονται στην κατηγορία των συμβατικών και για τις επιλογές που έγιναν σε διαστάσεις διατομής, η ελάχιστη απαιτούμενη κρέμαση για μια ευσταθή λύση είναι τα $h = 3.00m$. Αντιθέτως, με χρήση UHPFRC βρίσκεται εφικτή λύση μη κρίσιμη σε βέλος για $h = 1,80m$.

Σχήμα 5.57: Καμπύλη ικανότητας UHPFRC συνδυασμού ($l = 30.0m$, $h = 1,80m$, $b = 0,60m$)

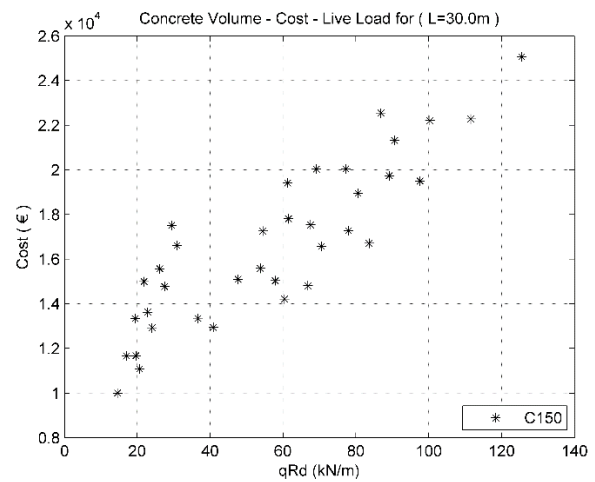
Τέλος , σχολιάζοντας τη μορφή της καμπύλης ικανότητας του νέου αυτού υλικού, επισημαίνουμε ότι η ειλημμένη πλαστιμότητα στον εφελκυσμό , οφείλεται στη σταδιακή διαρροή των ινών και κατ' επέκταση στην εξόλκευση τους από τη μήτρα σκυροδέματος, γεγονός που επιτρέπει ανακατανομή των εντάσεων εντός της μήτρας και κατά συνέπεια πλαστική συμπεριφορά του υλικού. Στο διάγραμμα που παρατίθεται από τη βιβλιογραφία, επιβεβαιώνεται η παραπάνω συμπεριφορά. (A F G C Groupe de travail BFUP Recommendations / recommendations, 2003)



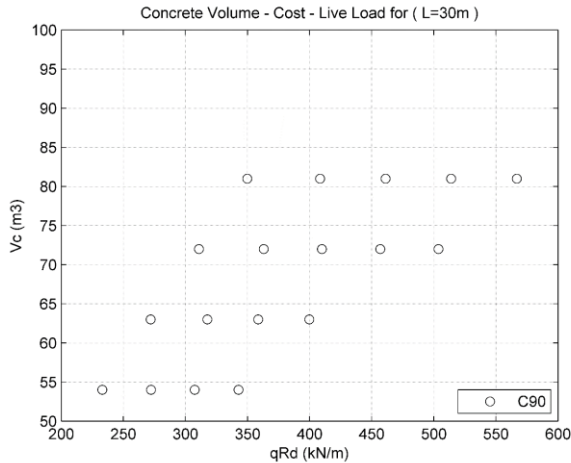
Όπου : f_{ctf} εφελκυστική αντοχή των ινών.



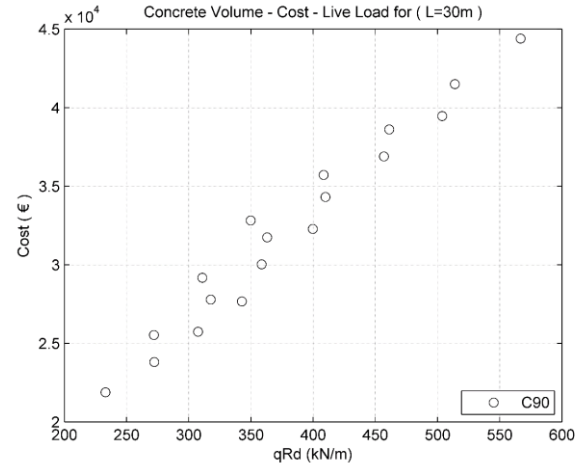
Σχήμα 5.58: Σχέση προκύπτοντος πρόσθετου φορτίου και απαιτούμενου όγκου υλοποίησης της λύσης



Σχήμα 5.59: Σχέση προκύπτοντος πρόσθετου φορτίου και κόστους υλοποίησης της λύσης



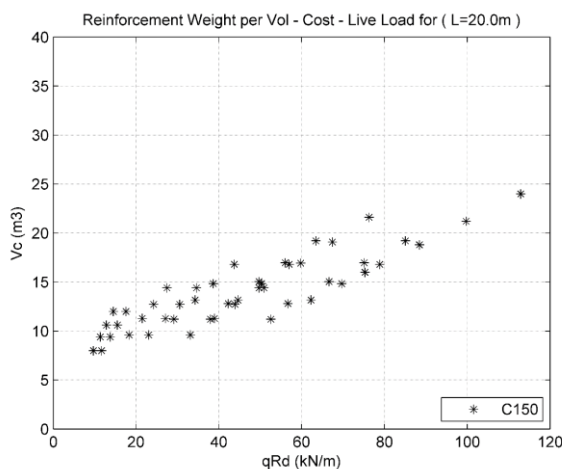
Σχήμα 5.59: Σχέση προκύπτοντος πρόσθετου φορτίου και απαιτούμενου όγκου υλοποίησης της λύσης



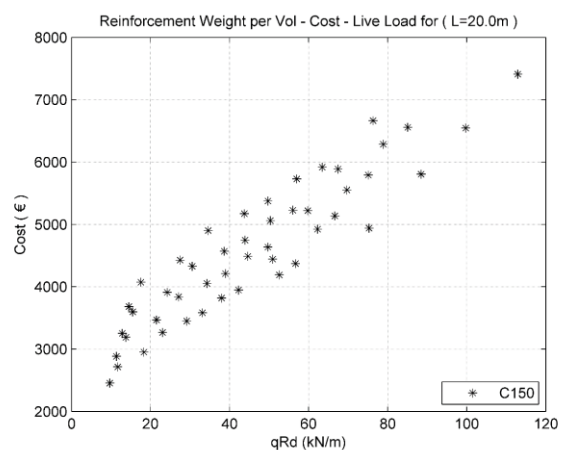
Σχήμα 5.42: Σχέση προκύπτοντος πρόσθετου φορτίου και κόστους υλοποίησης της λύσης

Παραπάνω παρουσιάζεται η σχέση του προκύπτοντος πρόσθετου φορτίου που μπορεί να φέρει ο φορέας με σκυρόδεμα υπερ-υψηλής αντοχής συναρτήσε, τόσο του συνολικού κόστους υλοποίησης του, όσο και του συνολικού όγκου του φορέα που αντιστοιχεί σε κάθε λύση που περνά τον έλεγχο λειτουργικότητας. Το κόστος μιας εφαρμογής από ένα ενδεικτικό είδος σκυροδέματος αυτής της κατηγορίας (Ductal®, Lafarge) ενδεικτικά λήφθηκε ως 3,5 φορές το κόστος ενός συμβατικού σκυροδέματος χαρακτηριστικής αντοχής C30. Όπως γίνεται αντιληπτό, μια τέτοια προηγμένη τεχνολογικά επιλογή συνεπάγεται αυξημένο κόστος. Ωστόσο, σε αντιπαράθεση με την λύση που δίνεται παραπάνω για γεφύρωση του ανοίγματος των 30m με σκυρόδεμα υψηλής αντοχής C90, το υψηλό κόστος της γαλλικής πατέντας τείνει να αντισταθμιστεί καθώς κερδίζουμε σε όγκο απαιτούμενου υλικού για να ευσταθεί η λύση.

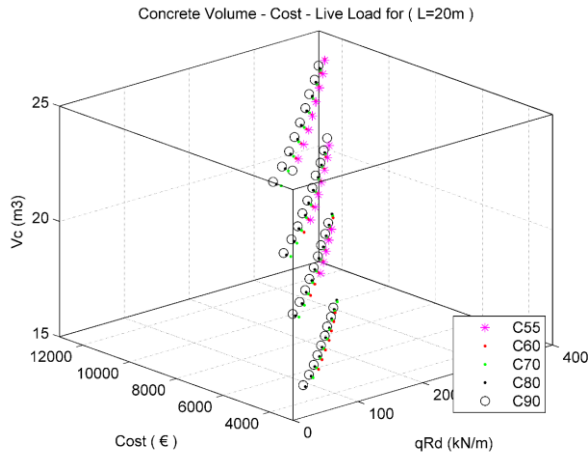
Συγκεκριμένα, η επαρκής διατομή για γεφύρωση των 30.0m με Ductal® αντιστοιχεί σε όγκο $V_c = 1,80 * 0,60 * 30 = 32.40 \text{ m}^3$ οπότε η τιμή υλοποίησης ανά μέτρο (δεδομένης μιας ενδεικτικής τιμής για το νέο υλικό να ανέρχεται σε 230 €/m^3) ανέρχεται σε 250 €/m ενώ για την ελάχιστη επαρκή διατομή για επίλυση με συμβατικό σκυρόδεμα C90 και προκύπτοντα όγκο $V_c = 3,00 * 0,6 * 30 = 54 \text{ m}^3$ ανέρχεται σε 200 €/m .



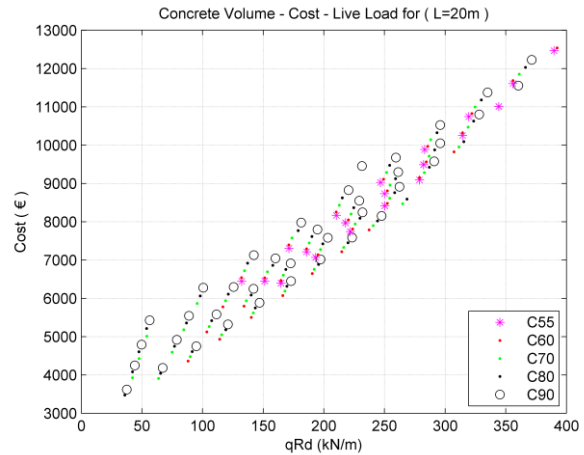
Σχήμα 5.58: Σχέση προκύπτοντος πρόσθετου φορτίου και απαιτούμενου όγκου υλοποίησης της λύσης με C150



Σχήμα 5.59: Σχέση προκύπτοντος πρόσθετου φορτίου και κόστους υλοποίησης της λύσης με C150



Σχήμα 5.46: Σχέση προκύπτοντος πρόσθετου φορτίου και απαιτούμενου όγκου υλοποίησης της λύσης



Σχήμα 5.38: Σχέση προκύπτοντος πρόσθετου φορτίου και κόστους υλοποίησης της λύσης

Αντίστοιχα, η επαρκής διατομή για γεφύρωση των 20.0m με Ductal® αντιστοιχεί σε όγκο $V_c = 1,00 \cdot 0,40 \cdot 30 = 12 \text{ m}^3$ οπότε η τιμή υλοποίησης ανά μέτρο (δεδομένης μιας ενδεικτικής τιμής για το νέο υλικό να ανέρχεται σε 230 €/m^3) ανέρχεται σε $92,40 \text{ €/m}$ ενώ για την ελάχιστη επαρκή διατομή για επίλυση με συμβατικό σκυροδέμα C90 και προκύπτοντα όγκο $V_c = 1,80 \cdot 0,6 \cdot 30 = 32,40 \text{ m}^3$ ανέρχεται σε 120 €/m . Δηλαδή οικονομικότερη λύση αυτή του υπερ-υψηλής αντοχής σκυροδέματος.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την ευρεία διερεύνηση κατά πλειοψηφία λυγηρών, όπως αποδείχτηκε, λύσεων ορθογωνικής διατομής για γεφύρωση μεσαίων και μεγάλων ανοιγμάτων με αμφιέριστο προσομοίωμα, οδηγηθήκαμε σε λύσεις που για να ξεπεράσουν τον έλεγχο της λειτουργικότητας, καίριος για τόσο μεγάλα ανοίγματα, περιορίζονταν σε λυγηρότητες κοντά στο $\frac{l}{h} = 10$. Οι λύσεις αυτές έθεταν ως προϋπόθεση σημαντικά μεγάλα ποσοστά οπλισμού (κοντά στο ρ_{max}), γεγονός που σε συνδυασμό με το μεγάλο διαθέσιμο μοχλοβραχίονα μας οδηγούσε σε μεγάλες φέρουσες ικανότητες. Επαναλαμβάνεται ότι οι μικρότερες κρεμάσεις απορρίπτονταν λόγω βέλους. Επιπλέον, λόγω της απαίτησης μεγάλου ποσοστού οπλισμού για τη ευστάθεια της λύσης, υπήρχε σημαντική απώλεια σε πλαστιμότητα.

Ωστόσο μια λύση ορθογωνικής διατομής αποτελεί στην πραγματικότητα επιλογή που λαμβάνεται στην περίπτωση προκατασκευασμένων μελών και συνεπάγεται μη συνεργασία (συνέχεια) με την πλάκα. Για ακριβέστερη προσέγγιση του πραγματικού προβλήματος συνεργασίας δοκού και υπερκείμενης πλάκας, η διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε για διατομή πλακοδοκού T αποδείχθηκε δυσμενέστερη από αυτή της ορθογωνικής διατομής, όσον αφορά στις τελικά εφικτές λύσεις γεωμετρικών διαστάσεων που περνούν τον έλεγχο λειτουργικότητας. Το παραπάνω αποδόθηκε στο γεγονός της δυνατότητας παραλαβής από την πλακοδοκό μεγαλύτερων εξωτερικών ροπών λόγω αύξησης του μοχλοβραχίονα των εσωτερικών δυνάμεων, γεγονός που μας οδηγούσε σε μεγαλύτερες φέρουσες ικανότητες, μεγαλύτερα βέλη που τελικά ξεπερνούσαν το όριο που θέτει ο EN1992-1.

Οφείλει επίσης να σημειωθεί ότι σε τέτοιες τάξης μεγέθους διατομές και κατ' επέκταση μέγιστου επιτρεπόμενου οπλισμού, θα ήταν παράληψη να μην επισημανθεί το θέμα της υλοποίησης αυτού στο εφελκόμενο πέλμα. Η απαίτηση υλοποίησης του οπλισμού σε τουλάχιστον δύο ή τρεις στρώσεις οδηγεί σε κάποια απομείωση στη ροπή αντοχής, λόγω μείωσης του μοχλοβραχίονα ως προς την απόσταση του κέντρου βάρους των στρώσεων οπλισμού και της πλέον εφελκόμενης ίνας.

Λύση που θα αποτελούσε βελτιστοποίηση τόσο στο πρόβλημα της υπερ-λυγηρότητας των επιλεχθέντων ορθογωνικών διατομών, όσο και στο πρακτικό πρόβλημα της υλοποίησης του απαιτούμενου οπλισμού, είναι η χρήση διατομής γιώτα (I) ή προσέγγιση αυτής (dogbone). Μία τέτοια λύση θα αύξανε σημαντικά τη δυσκαμψία του φορέα μας, επιβαρύνοντας τον με κάποιο μικρό πρόσθετο ίδιο βάρος.

Επιπλέον λύση στη δυσμενή παραδοχή αμφιέριστου στατικού συστήματος για τη γεφύρωση μεγάλων ανοιγμάτων, θα ήταν η αλλαγή στατικού προσομοιώματος σε μονόπακτη ή αμφίπακτη, με άμεση

επιρροή στη μέγιστη ένταση(ροπή) που καταπονεί τη μεσαία διατομή. Η λύση του τόξου ακόμα θα ήταν μια εύλογη αλλαγή στον τρόπο λειτουργίας του φορέα που θα εκμεταλλευόταν την καλή λειτουργία σε θλίψη ενός συστήματος που θα λειτουργούσε κυρίως σε αυτή. Τέλος, βέλτιστη λύση θα ήταν η χρήση προέντασης ,για την αντιμετώπιση του καιρίου ζητήματος των βελών σε μεγάλα ανοίγματα.

Ωστόσο, η παραδοχή και επίλυση των ανοιγμάτων αυτών με τις συγκεκριμένες κρεμάσεις κατέδειξε ως βέλτιστη λύση, στην περίπτωση μεγάλων ανοιγμάτων, την επιλογή σκυροδεμάτων υπερ-υψηλής αντοχής, των οποίων τη χρήση σκοπεύαμε να αναδείξουμε. Οι εξέχουσες ιδιότητες αυτών αναφορικά με την παρεχόμενη αντοχή, πλαστιμότητα (σε περίπτωση ινόπλισης) και κυρίως επιτελεστικότητας , αντισταθμίζουν το μεγάλο μειονέκτημα της πατέντας αυτής που αποτελεί το κόστος. Τρόπος αντιστάθμισης του κόστους ο οποίος και αποδείχτηκε , είναι η επάρκεια μικρότερων κρεμάσεων αλλά και διατομών στο σύνολο τους , για τη γεφύρωση των ίδιων ανοιγμάτων στα οποία οι επιλογές λύσεων με συμβατικό σκυρόδεμα υστερούσαν.

Εφόσον λοιπόν πρόσθετο κριτήριο στο σχεδιασμό μας τίθεται η «κομψή» λύση του φέροντος οργανισμού , αρχιτεκτονικοί λόγοι που οδήγησαν και στα παραδείγματα ιδιαίτερα λυγρών και εντυπωσιακών κατασκευών στη Γαλλία, χώρα προέλευσης του εξέχοντος αυτού υλικού, η παραμονή μας στη λύση ορθογωνικής διατομής (ή πλακοδοκού T) και η αντιστάθμιση του κόστους της λύσης που δόθηκε με το νέο αυτό υλικό, σε σχέση με συμβατικά υψηλής αντοχής με μεγαλύτερη απαίτηση όγκου αποδεικνύονται ορθές.

Τέλος, η αντιστάθμιση του κόστους της λύσης με σκυρόδεμα υπερ-υψηλής αντοχής σε σχέση με συμβατικά σκυροδέματα υψηλής αντοχής έχει ενδιαφέρον να διερευνηθεί περαιτέρω προς την κατεύθυνση της προσφερόμενης επιτελεστικότητας (αύξηση της διάρκειας ζωής του έργου σε συνδυασμό με ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης-Life Cycle Cost Analysis), ιδιότητα που καθιστά το νέο αυτό υλικό ιδανικό για έργα μεγάλης σπουδαιότητας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- (2003). *A F G C Groupe de travail BFUP Recommendations / recommendations.*
- Ekkehard Fehling, K. B. (2004). *Design relevant properties. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, Germany.*
- Jörg Jungwirth, A. M. (2004). *Structural Behavior of Tension Members in UHPC. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, Germany.*
- Josef Hegger, D. T. (2004). *Bond Anchorage Behavior and Shear Capacity of Ultra. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, Germany.*
- L. Elfgren, J.-E. J. (2004). *High Performance Concretes with Energetically Modified Cement (EMC). Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, Germany.*
- Michael Schmidt, E. F. (n.d.). *Ultra-High-Performance Concrete: Research, Development and Application in Europe.*
- RESPLENDINO, J. (2004). *First recommendations for Ultra-High-Performance. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, Germany.*
- Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings , EN1992-1-1 (EC2, 2004) , CEN (Comité Européen de Normalisation), 2004*
- Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος ΕΚΩΣ 2000, ΟΑΣΠ-ΣΠΜΕ*
- Θ.Π. Τάσιος, Π.Ι Γιαννόπουλος, Κ.Γ Τρέζος, Σ.Γ. Τσουκαντάς ΩΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ, ΕΜΠ, 2005*
- McKenna F., Fenves G., Jeremic B., Scott M., (2007), OpenSees Command Language Manual*

Για τη συγγραφή του Κεφαλαίου 2 (ΘΕΩΡΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΕΡ-ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ) έγινε σύνθεση από τις εξής συμπληρωματικές πηγές:

Ultra High Performance Concrete (UHPC), Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, September 13-15, 2004

Ricardo S. Davila, Recommendations for the Design of Ultra-High Performance Concrete Structures, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, June 2007

Prabhat Ranjan Prem, B.H.Bharatkumar, Nagesh R Iyer, Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete, World Academy of Science, Engineering and Technology

International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering Vol:6, No:8, 2012

Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC), Japan Society of Civil Engineers , March 2008

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΚΩΔΙΚΑΣ 1

ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΜΦΙΕΡΙΣΤΗΣ ΔΟΚΟΥ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ/ ΤΑΥΦ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

```
-----  
# define UNITS -----  
# kN, m , (kPa)  
set matTag 1  
set secTag 1  
set combnum 0  
# define DATA -----  
set dl 0.05  
set euk 0.06  
set fyk 500000  
set E0 2e8  
set acc 0.85  
set gamac_oka 1.5  
set gamas_oka 1.15  
set gamacf_oka_fiber_UHPFRC 1.30  
set gamacf_okl_fiber_UHPFRC 1.0  
set gamas_okl 1.0  
set gamac_okl 1.0  
set psi2 0.3  
set gamaq_oka 1.35  
set gamaq_oka 1.5  
set gamaq_okl 1.0  
set gamaq_okl 1.0  
set RH_ins 40 ;# RH=40%  
set RH_outs 80 ;# RH=80%  
#  
# define OUTPUT FILES -----  
set dataDir Data_okaAnalysis ; file mkdir $dataDir/ ; # set up name for data directory # create data directory  
#  
set outfile [open "index_matrix.txt" "w"]  
set outfile [open "printout.txt" "w"]  
set outfile1 [open "disp_max.txt" "w"]  
#set outfile2 [open "resmom.txt" "w"]  
#set outfile3 [open "reaction.txt" "w"]  
set outfile4 [open "resmom_max.txt" "w"]  
set outfile5 [open "sectionAnalysis.txt" "w"]  
#  
puts $outfile " DATA : \n"
```

```

#puts $outfile1 " l h b fc As disp:d total=d_ok1*(1+phi) /env_disp "
#puts $outfile4 " l h b fc As |N1_max| |Q1_max| |M1_max| |N10_max| |Q10_max| |M10_max| |N11_max| |Q11_max| |M11_max| |N20_max| |Q20_max|
#puts $outfile5 " l h b fc As maxload_factor maxEpsilon_c2 maxSigma_c2 maxEpsilon_s1 maxSigma_s1"
#
# Hinge Section GEOMETRY -----
#
# loop on beam length
set l_val {5.0 10.0 15.0 20.0 25.0 30.0} ; # BEAM LENGTH
for {set index_l 0} {$index_l<=5} {incr index_l 1} {
  set l [lindex $l_val $index_l]
  #puts " l = $l m"
#
# loop on beam height
set hperc_val {0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.10} ; # BEAM HEIGHT
for {set index_h 0} {$index_h<=5} {incr index_h 1} {
  set h_perc [lindex $hperc_val $index_h]
  set h [format {%4.2f} [expr $l*$h_perc]]
  set d [expr $h-$d1]
  #puts " h = $h m"
#
# loop on beam width
set bperc_val {0.02 0.0233 0.0266 0.03} ; # BEAM WIDTH
for {set index_b 0} {$index_b<=3} {incr index_b 1} {
  set b_perc [lindex $bperc_val $index_b]
  set b [format {%4.2f} [expr $l*$b_perc]]
  if {$b< 0.15} {set b 0.15}
  #puts " b = $b m"
#
# DATA for Normal Performance Concrete fck {C20-C90} # CONCRETE DATA (EN 1992-1-1:2004/Table 3.1)
#
set fc_val {20000 25000 30000 35000 40000 45000 50000 55000 60000 70000 80000 90000}
set ec_val {0.002 0.0021 0.0022 0.00225 0.0023 0.0024 0.00245 0.0025 0.0026 0.0027 0.0028 0.0028}
set ecu_val {0.0035 0.0035 0.0035 0.0035 0.0035 0.0035 0.0035 0.0035 0.0032 0.003 0.0028 0.0028}
set Ec_val {30000000 31000000 33000000 34000000 35000000 36000000 37000000 38000000 39000000 41000000 42000000 44000000}
set fct_val {2200 2600 2900 3200 3500 3800 4100 4200 4400 4600 4800 5000}
#
# loop on concrete force and properties
for {set index_fc 0} {$index_fc<=11} {incr index_fc 1} {
  set fc [lindex $fc_val $index_fc]
  set fcd [expr $acc*$fc/$gamac_oka]
  #puts " fc = $fc kPa"
#
  set ec [lindex $ec_val $index_fc]
  set ecu [lindex $ecu_val $index_fc]
  set Ec [lindex $Ec_val $index_fc]
  set fct [lindex $fct_val $index_fc]
  set et [expr $fct/$Ec]
  puts "ec ecu Ec fct et $ec $ecu $Ec $fct $et \n"
#
# DATA for Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete fck {C150-C250} # CONCRETE DATA (AFGC Chapter 1/2) -----
#
set index_fc 12
set lc [expr 2*$h/3.] ; # characteristic length (h:depth of cross section) for strain softening
set lf 0.02 ; # fiber length (20mm)
set fc 150000 ; # characteristic strength in compression
set fcd [expr $acc*$fc/$gamac_oka] ; # design <<
set fcd_u [expr 0.25*$fcd]
set fct 9000 ; # characteristic elastic strength in tension (tag: fctd_el / AFGC)
set fctd_el [expr $fct/$gamacf_oka_fiber_UHPFRC] ; # design <<
set epsc0 0.0034
set epscu [expr 4*$epsc0]
set Ecm 50000000
set epst_el [expr $fctd_el/$Ecm]
set epst_lim [expr $lf/(4*$lc)] ; if {$epst_lim > 0.0025} {set epst_lim 0.0025}
set Ect [expr $fctd_el / ($epst_lim - $epst_el)]
set lambda [expr $fctd_el / ($epscu + $epst_el)]
#
puts "epsc0 epscu Ecm fct epst_el epst_lim $epsc0 $epscu $Ecm $fct $epst_el $epst_lim "
#
#
# loop on concrete reinforcement
set eyd [expr ($fyk/$gamas_oka)/$E0]
set Asmin [expr (0.26*$fct*$b*$d*le4)/$fyk] ; # BEAM REINFORCEMENT (As)

```

```

set Asmax [expr 0.04*$b*$d*1e4]
set dA [expr ($Asmax-$Asmin)/10]
set As [format {%6.4f} $Asmin]
set i -1
#
while {$As < $Asmax} {
  set As [format {%6.4f} [expr $As + $dA]]
  incr i
  if {$As >= $Asmax} {
    set As [format {%6.4f} $Asmax]
    break
  }
  if {$As <= $Asmin} {set As [format {%6.4f} $Asmin]}
  #puts " As = $As cm^2 \n"
#
set combnum [expr $combnum + 1] ; # (DEFINITION OF COMBINATIONS NUMBERER)
if {$combnum > 16240} {exit}
puts " **combination number $combnum** "
puts " l $l (m), h $h (m), b $b (m), fo $fc (kPa), As $As (cm^2) \n"
#
# Shear force control
set acw 1.0
set bw $b
set nil [expr 0.6*(1-$fc/250000)]
set z [expr 0.9*$d]
set theta_a 0.5
set VRd_max [expr $acw*$bw*$nil*(0.85*$fc/$gamac_oka)*$z*$theta_a] ; # for theta = 45degrees / a = 90degrees
#
# SET UP -----
wipe
# model BasicBuilder $spatial dimension of problem $dof/node
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
# Define Geometric Transformation: performs a linear geometric transformation of beam stiffness and resisting force from the basic system
# the global-coordinate system
}

geomTransf Linear 1
#
# Define Nodes
# tag X-coord Y-coord
node 1 0.0 0.0
node 2 [expr $l/20] 0.0
node 3 [expr 2*$l/20] 0.0
node 4 [expr 3*$l/20] 0.0
node 5 [expr 4*$l/20] 0.0
node 6 [expr 5*$l/20] 0.0
node 7 [expr 6*$l/20] 0.0
node 8 [expr 7*$l/20] 0.0
node 9 [expr 8*$l/20] 0.0
node 10 [expr 9*$l/20] 0.0
node 11 [expr 10*$l/20] 0.0
node 12 [expr 11*$l/20] 0.0
node 13 [expr 12*$l/20] 0.0
node 14 [expr 13*$l/20] 0.0
node 15 [expr 14*$l/20] 0.0
node 16 [expr 15*$l/20] 0.0
node 17 [expr 16*$l/20] 0.0
node 18 [expr 17*$l/20] 0.0
node 19 [expr 18*$l/20] 0.0
node 20 [expr 19*$l/20] 0.0
node 21 $l 0.0
#
# Define Restraints
# tag DX DY RZset {0_free 1_fixed {axial shear bending}}
fix 1 1 1 0
fix 21 0 1 0
#
# MATERIAL parameters -----
# uniaxialMaterial Steel01 $matTag $Fy $E0 $b # STEEL DATA
uniaxialMaterial Steel01 2 [expr $fyk/$gamas_okl] $E0 0.01
#

```

```

# uniaxialMaterial Concrete02 $matTag $fpc $eps0 $fpcu $epsu $lambda $ft $Ets # DUCTAL CONCRETE DATA
# uniaxialMaterial Concrete02 3 -$fcd -$eps0 -$fcd - $fcd - $eps0 $lambda $fctd_el $Ect
#
# uniaxialMaterial Concrete01 $matTag $fpc $eps0 $fpcu $epsu # NORMAL STRENGTH CONCRETE
uniaxialMaterial Concrete01 3 [expr -1.0*$fcd] [expr -1.0*$sec] [expr -1.0*$fcd] [expr -1.0*$sec]
#
# uniaxialMaterial Multi-Linear Material $matTag -strain $strainPoints -stress $stressPoints
uniaxialMaterial ElasticMultiLinear 4 -strain [expr -100*$secu] [expr -1.0*$secu] [expr -1.0*$secu] 0.0 -stress $fcd $fcd 0.0 0.0
uniaxialMaterial Parallel 1 3 4
#
# section Fiber $secTag { ; # CROSS-SECTIONAL GEOMETRY DEFINITION
# #
# # patch quad $matTag $numSubdivIJ $numSubdivJK $yI $zI $yJ $zJ $yK $zK $yL $zL
# # unconfined concrete
# # patch quad 1 1 200 [expr -$h/2] [expr $b/2] [expr -$h/2] [expr $b/2 - $d1] [expr $h/2] [expr $b/2 - $d1] [expr $h/2] [expr $b/2]
# # patch quad 1 1 200 [expr -$h/2] [expr -$b/2 + $d1] [expr -$h/2] [expr -$b/2] [expr $h/2] [expr -$b/2] [expr $h/2] [expr -$b/2 + $d1]
# # patch quad 1 1 20 [expr $h/2 - $d1] [expr $b/2 - $d1] [expr $h/2 - $d1] [expr -$b/2 + $d1] [expr $h/2] [expr -$b/2 + $d1] [expr $h/2] [expr $b/2 + $d1]
# # patch quad 1 1 20 [expr -$h/2] [expr $b/2 - $d1] [expr -$h/2] [expr -$b/2 + $d1] [expr -$h/2 + $d1] [expr -$b/2 + $d1] [expr -$h/2 + $d1] [expr -$b/2 + $d1]
# #
# # confined concrete
# # patch quad 1 1 110 [expr -$h/2 + $d1] [expr $b/2 - $d1] [expr -$h/2 + $d1] [expr -$b/2 + $d1] [expr $h/2 - $d1] [expr -$b/2 + $d1]
# #
# # layer straight $matTag $numFiber $areaFiber $yStart $zStart $yEnd $zEnd
# # reinforcement steel
# # layer straight 2 1 [expr $As/(10000)] [expr -$h/2 + $d1] [expr $b/2 - $d1] [expr -$h/2 + $d1] [expr -$b/2 + $d1] ; #katw
# # layer straight 2 1 [expr $As/(10000*2)] [expr $h/2 - $d1] [expr $b/2 - $d1] [expr $h/2 - $d1] [expr -$b/2 + $d1] ; #anw
# }
#
#
# DIATOMH FLAKODOKOY
set beff [expr $b + 0.2*$l] ; puts "beff = $beff , bw = $b"
set hf [expr 0.01*$l]
set bw $b
set hw [expr $h - $hf] ; puts "hw = $hw"
set yc [format {%4.2f} [expr (0.5*(Shw*2.)*$bw + ($h-$hf/2)*$hf*$beff)/(Shw*$bw + $hf*$beff)]] ; puts "yc= $yc"
#
#
# section Fiber $secTag { ; # CROSS-SECTIONAL GEOMETRY DEFINITION
# #
# # patch quad $matTag $numSubdivIJ $numSubdivJK $yI $zI $yJ $zJ $yK $zK $yL $zL
# # patch quad 3 1 50 [expr $hw - $yc] [expr $beff/2] [expr $hw - $yc] [expr -$beff/2] [expr $h - $yc] [expr -$beff/2] [expr $h - $yc]
# # patch quad 3 1 200 [expr -$yc] [expr $bw/2] [expr -$yc] [expr -$bw/2] [expr $hw - $yc] [expr -$bw/2] [expr $hw - $yc] [expr $bw/2]
# #
# # layer straight $matTag $numFiber $areaFiber $yStart $zStart $yEnd $zEnd
# # reinforcement steel
# # layer straight 2 1 [expr $As/(10000)] [expr -$yc + $d1] [expr $bw/2 - $d1] [expr -$yc + $d1] [expr -$bw/2 + $d1] ;
# # layer straight 2 1 [expr $As/(2*10000)] [expr $h - $yc - $d1] [expr $beff/2 - $d1] [expr $h - $yc - $d1] [expr -$beff/2 + $d1] ;
# }
#
#puts "section defined \n"
#
#
# element dispBeamColumn
# element dispBeamColumn $eleTag $iNode $jNode $numIntgrPts $secTag $transfTag <-mass $massDens> <-cMass> <-integration $intType>
element dispBeamColumn 1 1 2 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 2 2 3 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 3 3 4 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 4 4 5 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 5 5 6 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 6 6 7 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 7 7 8 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 8 8 9 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 9 9 10 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 10 10 11 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 11 11 12 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 12 12 13 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 13 13 14 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 14 14 15 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 15 15 16 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 16 16 17 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 17 17 18 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 18 18 19 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 19 19 20 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 20 20 21 3 $secTag 1

```

```

#
# Create load pattern for durable/transcient load -----
#
set Q 0
set G [expr 25*$b*$h]
#set G [format {%6.4f} [expr 25*($bw*$hw + $beff*$hf)]] ; puts "G= $G" ; #idiovaros plakodokol
set q_oka [format {%6.4f} [expr $gamaq_oka*$G + $gamaq_oka*$Q*$b]]
puts $outfile "q_oka= $q_oka (kN/m)"
#
# set q_okl [format {%6.4f} [expr $gamaq_okl*$G + $gamaq_okl*$psi2*$Q*$b]]
# puts $outfile "q_okl= $q_okl (kN/m)"
#
pattern Plain 1 Linear {
  load 1 0.0 -[expr $q_oka*$l/40] 0.0;
  load 2 0.0 -[expr $q_oka*$l/20] 0.0
  load 3 0.0 -[expr $q_oka*$l/20] 0.0
  load 4 0.0 -[expr $q_oka*$l/20] 0.0
  load 5 0.0 -[expr $q_oka*$l/20] 0.0
  load 6 0.0 -[expr $q_oka*$l/20] 0.0
  load 7 0.0 -[expr $q_oka*$l/20] 0.0
  load 8 0.0 -[expr $q_oka*$l/20] 0.0
  load 9 0.0 -[expr $q_oka*$l/20] 0.0
  load 10 0.0 -[expr $q_oka*$l/20] 0.0
  load 11 0.0 -[expr $q_oka*$l/20] 0.0
  load 12 0.0 -[expr $q_oka*$l/20] 0.0
  load 13 0.0 -[expr $q_oka*$l/20] 0.0
  load 14 0.0 -[expr $q_oka*$l/20] 0.0
  load 15 0.0 -[expr $q_oka*$l/20] 0.0
  load 16 0.0 -[expr $q_oka*$l/20] 0.0
  load 17 0.0 -[expr $q_oka*$l/20] 0.0
  load 18 0.0 -[expr $q_oka*$l/20] 0.0
  load 19 0.0 -[expr $q_oka*$l/20] 0.0
  load 20 0.0 -[expr $q_oka*$l/20] 0.0
  load 21 0.0 -[expr $q_oka*$l/40] 0.0
}
puts "Model built \n"
#
# Define Recorders -----
#
recorder Node <-file $fileName> <-time> <-node $node1 $node2 ...> -dof ($dof1 $dof2 ...) $respType'
recorder EnvelopeNode -file env_disp11\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -node 11 -dof 2 disp
recorder Node -file $dataDir/disp11\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -node 11 -dof 2 disp
recorder Node -file $dataDir/reaction\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -node 1 21 -dof 2 reaction
#
recorder (Envelope)Element <-file $fileName> <-time> <-ele ($ele1 $ele2 ...)> (section $secNum force/deformation/stiffness/stressStrain)
recorder EnvelopeElement -file envNM_Forces\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -ele 1 10 11 20 force
recorder Element -file $dataDir/NM_Forces\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -ele 1 10 11 20 localFor
recorder Element -file $dataDir/sectiondeform\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -ele 10 section 3 deform
#
recorder EnvelopeElement -file diagrams\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -ele all localForce
#
recorder Element -file envNM_sectiondeform\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -ele 10 section 3 deformation
recorder Element -file $dataDir/s_e_tension_anal\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -ele 10 section 3 0
...[expr (-1.0*$h/2)+$d1] 1 stressStrain
recorder Element -file $dataDir/s_e_compression_anal\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -ele 10 section 3 0
...[expr $h/2] 1 stressStrain
#
recorder EnvelopeElement <-file > <-time> <-ele > (section $secNum fiber $y $z <matID> stressStrain)
recorder EnvelopeElement -file s_e_tension\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -ele 10 section 3 0
...[expr (-1.0*$h/2)+$d1] 1 stressStrain ; #constitutive law under tension
recorder EnvelopeElement -file s_e_compression\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -ele 10 section 3 0
...[expr $h/2] 1 stressStrain ; #constitutive law under stress
#
recorder plot $fileName $windowTitle $xLoc $yLoc $xPixels $yPixels -columns $xCol0 $yCol0
recorder plot s_e_compression_anal\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out sigma_epsilon_diagram 10 10 200 200 -columns 1 2
recorder plot disp11\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out dF_displacement 30 30 200 200 -columns 1 2

```

```

# Set Analysis parameters -----
#
set analysis_steps 2000
constraints Plain
numberer RCM
system BandGeneral
test NormDispIncr 1.0e-6 6 0
algorithm Newton
integrator LoadControl 0.1
#integrator DisplacementControl 11 2 -[expr 0.0004*$l]
analysis Static
analyze $analysis_steps
#loadConst -time 0.0
#
# -----
#
puts "End of Static Analysis for comb: no.$combnun \n"
set secTag [expr $secTag+1]
wipe
#
# Read results from recorders -----
#
#set input1 [open "s_e_compression_anal\_ $index_l\_ $index_h\_ $index_b\_ $index_fc\_ $i.out" "r"]
#set input2 [open "s_e_tension_anal\_ $index_l\_ $index_h\_ $index_b\_ $index_fc\_ $i.out" "r"]
#set input3 [open "reaction\_ $index_l\_ $index_h\_ $index_b\_ $index_fc\_ $i.out" "r"]
#set input4 [open "s_e_compression\_ $index_l\_ $index_h\_ $index_b\_ $index_fc\_ $i.out" "r"]
#set input5 [open "s_e_tension\_ $index_l\_ $index_h\_ $index_b\_ $index_fc\_ $i.out" "r"]
#set input6 [open "displ1\_ $index_l\_ $index_h\_ $index_b\_ $index_fc\_ $i.out" "r"]
#set input7 [open "env_displ1\_ $index_l\_ $index_h\_ $index_b\_ $index_fc\_ $i.out" "r"]
#set input8 [open "NM_Forces\_ $index_l\_ $index_h\_ $index_b\_ $index_fc\_ $i.out" "r"]
#set input9 [open "envNM_Forces\_ $index_l\_ $index_h\_ $index_b\_ $index_fc\_ $i.out" "r"]
#
#
#set contents1 [split [read $input1] \n]
#set contents2 [split [read $input2] \n]
#set contents3 [split [read $input3] \n]
#
# set ii -1 ; #critical capacity test no.1 (epsilon cu)
# foreach line $contents1 {
#   # if {$line == {}} {
#     # puts "end of epsilon c2 file \n"
#     # break
#   }
#   # incr ii
#   # set load_factor_compr [lindex $contents1 $ii 0]
#   # set sigma_c2 [lindex $contents1 $ii 1]
#   # set epsilon_c2 [lindex $contents1 $ii 2]
#   #puts "epsilon_c2 = $epsilon_c2 , ii=$ii"
#   # if {$epsilon_c2 <= [expr -$secu] } {
#     # puts "epsilon_c2 < -$secu at iteration no.$ii , load_factor = $load_factor_compr"
#     # set compression_crit $sigma_c2
#     # break
#   }
# }
# }
# set jj -1 ; #critical capacity test no.2 (epsilon ud)
# foreach line $contents2 {
#   # if {$line == {}} {
#     # puts "end of epsilon s1 file \n"
#     # break
#   }
#   # incr jj
#   # set load_factor_tens [lindex $contents2 $jj 0]
#   # set sigma_s1 [lindex $contents2 $jj 1]
#   # set epsilon_s1 [lindex $contents2 $jj 2]
#   #puts "epsilon_s1 = $epsilon_s1 , jj=$jj"
#   # set epsilon_ud [format {%6.4f} [expr $euk/$gamas_oka]]
#   # if {$epsilon_s1 >= $epsilon_ud} {
#     # puts "epsilon_s1 > $epsilon_ud at iterarion no.$jj , load_factor = $load_factor_tens"
#     # break
#   }
# }
# }
# }

```



```

# set kk -1 ; #critical capacity test no.3 (VRd_max)
# foreach line $contents3 {
# if {$line == {}} {
# puts "end of reaction file \n"
# break
# }
# incr kk
# set load_factor_shear [lindex $contents3 $kk 0]
# set R1 [lindex $contents3 $kk 1]
# set R21 [lindex $contents3 $kk 2]
# puts "R1 = $R1 , kk=$kk"
# if {$R1 >= $VRd_max} {
# puts "R1 > VRd_max at iteration no.$kk , load_factor = $load_factor_shear"
# break
# }
# }
#
#
set contents4 [split [read $input4] \n] ; #read the maximum load factor
set maxload_factor [format {%6.2f} [lindex $contents4 2 2]]
set maxEpsilon_c2 [format {%8.6f} [lindex $contents4 2 3]]
set maxSigma_c2 [format {%7.1f} [lindex $contents4 2 1]]
#
set contents5 [split [read $input5] \n]
set maxEpsilon_s1 [format {%8.6f} [lindex $contents5 2 3]]
set maxSigma_s1 [format {%7.1f} [lindex $contents5 2 1]]
#
# if {$Epsilon_c2 <= $Ecu} {
# if {$Epsilon_s1 >= $Epsu_ud} {
# if {$R1 >= $VRd_max} {
# set load_factor [expr {min ($load_factor_compr , $load_factor_tens , $load_factor_shear)}]
# } else {
# set load_factor [expr {min ($load_factor_compr , $load_factor_tens)}]
# }
# } elseif {$R1 >= $VRd_max} {
# set load_factor [expr {min ($load_factor_compr , $load_factor_shear)}]
# } else {
# set load_factor $load_factor_compr
# }
# }
# } elseif {$Epsilon_s1 >= $Epsu_ud} {
# if {$R1 >= $VRd_max} {
# set load_factor [expr {min ($load_factor_tens , $load_factor_shear)}]
# } else {
# set load_factor $load_factor_tens
# }
# } elseif {$R1 >= $VRd_max} {
# set load_factor $load_factor_shear
# } else {
# puts "none failure condition is reached \n"
# set load_factor $maxload_factor
# }
# set j [expr {min ($i1, $jj, $kk)}] ; puts "j=$j"
#
# set contents6 [split [read $input6] \n] ; #read the displacement at critical load step
# set load_factor [lindex $contents6 $j 0]
# set real_disp [expr {abs ([lindex $contents6 $j 1 ])}]
# puts "real_disp= $real_disp (m)"
#
set contents7 [split [read $input7] \n] ; #read the envelope displacement
set env_disp [lindex $contents7 2 1]
#
# set contents8 [split [read $input8] \n] ; #read the section forces at critical load step
# set Qi_1 [lindex $contents8 $j 2]
# set Mi_1 [expr {abs ([lindex $contents8 $j 3])}]
# set Qj_1 [lindex $contents8 $j 5]
# set Mj_1 [expr {abs ([lindex $contents8 $j 6])}]
# set Qi_10 [lindex $contents8 $j 8]
# set Mi_10 [expr {abs ([lindex $contents8 $j 9])}]
# set Qj_10 [lindex $contents8 $j 11]
# set Mj_10 [expr {abs ([lindex $contents8 $j 12])}]
# set Qi_11 [lindex $contents8 $j 14]
# set Mi_11 [expr {abs ([lindex $contents8 $j 15])}]
# set Qj_11 [lindex $contents8 $j 17]
# set Mj_11 [expr {abs ([lindex $contents8 $j 18])}]

```

```

# set Qi_21 [lindex $contents8 $j 20]
# set Mi_21 [expr {abs([lindex $contents8 $j 21])}]
# set Qj_21 [lindex $contents8 $j 23]
# set Mj_21 [expr {abs([lindex $contents8 $j 24])}]
# puts "Mi_1 = $Mi_1 (kNm)"
# puts "Mj_10= $Mj_10 (kNm)"
# puts "Mi_11= $Mi_11 (kNm)"
# puts "Mj_21= $Mj_21 (kNm) \n"
#
set contents9 [split [read $input9] \n] ; #read the envelope section forces
set N1_absmax [lindex $contents9 2 1]
set Q1_absmax [lindex $contents9 2 3]
set M1_absmax [lindex $contents9 2 5]
set N10_absmax [lindex $contents9 2 19]
set Q10_absmax [lindex $contents9 2 21]
set M10_absmax [lindex $contents9 2 23]
set N11_absmax [lindex $contents9 2 25]
set Q11_absmax [lindex $contents9 2 27]
set M11_absmax [lindex $contents9 2 29]
set N20_absmax [lindex $contents9 2 43]
set Q20_absmax [lindex $contents9 2 45]
set M20_absmax [lindex $contents9 2 47]
puts "Q1_absmax= $Q1_absmax , M10_absmax= $M10_absmax , M11_absmax= $M11_absmax , Q20_absmax= $Q20_absmax \n"
#
#close $input1
#close $input2
#close $input3
close $input4
close $input5
#close $input6
close $input7
#close $input8
close $input9
#
#file delete -force $input1
#file delete -force $input2
# file delete -force $input3
file delete -force $input4
file delete -force $input5
#file delete -force $input6
file delete -force $input7
#file delete -force $input8
file delete -force $input9
#
# INPUT OF index_matrix.txt FILE -----
puts $outfile1 " $index_l $l $index_h $h $index_b $b $index_fc $fc $i $As "
#
# INPUT OF printout.txt FILE
puts $outfile " **combination number $combnm** "
puts $outfile " l $l (m), h $h (m), b $b (m), fc $fc (kPa), As $As (cm^2)"
puts $outfile "indexes : $index_l $index_h $index_b $index_fc $i "
#
# INPUT OF resdisp_max.txt FILE
puts $outfile1 " $index_l $index_h $index_b $index_fc $i $env_disp "
#puts $outfile2 " $combnm $index_l $index_h $index_b $index_fc $i $Qi_1 $Mi_1 $Qj_1 $Mj_1 $Qi_10 $Mi_10 $Qj_10 $Mj_10 $Qi_11 $Mi_11 $Qj_11 $Mi_11 $Qj_11"
#
# INPUT OF reaction.txt FILE
#puts $outfile3 " $index_l $index_h $index_b $index_fc $i $R1 $R21"
#
# INPUT OF resmom_max.txt FILE
puts $outfile4 " $index_l $index_h $index_b $index_fc $i $N1_absmax $Q1_absmax $M1_absmax $N10_absmax $Q10_absmax $M10_absmax
...$N11_absmax $Q11_absmax $M11_absmax $N20_absmax $Q20_absmax $M20_absmax"
#
# INPUT OF sectionAnalysis.txt FILE
puts $outfile5 " $index_l $index_h $index_b $index_fc $i $maxload_factor $q_oka $maxEpsilon_c2 $maxSigma_c2 $maxEpsilon_s1 $maxSigma_s1"
#if {$load_factor_compr != $load_factor_tens && $load_factor_tens != $load_factor_shear} {
#   #if {$load_factor == $load_factor_compr} {
#       puts $outfile5 " l h b fc As Crit_loadfactor q_oka disp@crit_loadfactor ($i $j $k) (1/2/3 indicating the cause of failure)"
#       puts $outfile5 " $index_l $index_h $index_b $index_fc $i $q_oka $load_factor $real_disp $i $j $k 1 "
#   }
#   # if {$load_factor == $load_factor_tens} {
#       puts $outfile5 " $index_l $index_h $index_b $index_fc $i $q_oka $load_factor $real_disp $i $j $k 2 "
#   }
#   # if {$load_factor == $load_factor_shear} {
#       puts $outfile5 " $index_l $index_h $index_b $index_fc $i $q_oka $load_factor $real_disp $i $j $k 3 "
#   }
# }
#
#file delete -force "disp11\ $index_l\ $index_h\ $index_b\ $index_fc\ $i.out"
file delete -force "env_disp11\ $index_l\ $index_h\ $index_b\ $index_fc\ $i.out"
#file delete -force "reaction\ $index_l\ $index_h\ $index_b\ $index_fc\ $i.out"
#file delete -force "NM_Forces\ $index_l\ $index_h\ $index_b\ $index_fc\ $i.out"
file delete -force "envNM_Forces\ $index_l\ $index_h\ $index_b\ $index_fc\ $i.out"
file delete -force "s_e_tension\ $index_l\ $index_h\ $index_b\ $index_fc\ $i.out"
file delete -force "s_e_compression\ $index_l\ $index_h\ $index_b\ $index_fc\ $i.out"
#file delete -force "s_e_tension_anal\ $index_l\ $index_h\ $index_b\ $index_fc\ $i.out"
#file delete -force "s_e_compression_anal\ $index_l\ $index_h\ $index_b\ $index_fc\ $i.out"

```

```
} ;           # end of As loop
} ;           # end of fc loop
} ;           # end of width loop (b)
} ;           # end of height loop (h)
} ;           # end of length loop (l)
#
close $outfile1
close $outfile2
close $outfile3
close $outfile4
close $outfile5
puts "End of Static Analysis for all set combinations \n"
wipe
#exit
```


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΚΩΔΙΚΑΣ 2

ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΜΦΙΕΡΙΣΤΗΣ ΔΟΚΟΥ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ/ ΤΑΥΦ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ

```

# define UNITS -----
# kN, m , (kPa)
set matTag 1
set secTag 1
set combnum 0
# define DATA -----
set d1 0.05
set euk 0.06
set fyk 500000
set E0 2e8
set acc 0.85
set gamac_oka 1.5
set gamas_oka 1.15
set gamacf_oka_fiber_UHPFRC 1.30
set gamacf_okl_fiber_UHPFRC 1.0
set gamas_okl 1.0
set gamac_okl 1.0
set psi2 0.3
set gamaq_oka 1.35
set gamaq_oka 1.5
set gamaq_okl 1.0
set gamaq_okl 1.0
set RH_ins 40 ;# RH=40%
set RH_outs 80 ;# RH=80%
#
# define OUTPUT FILES -----
set dataDir Data_oklAnalysis ; file mkdir $dataDir/ ; # set up name for data directory # create data director:
#
set outfile [open "index_matrix.txt" "w"]
set outfile [open "printout.txt" "w"]
set outfile1 [open "disp_okl.txt" "w"]
set outfile4 [open "resmom_max_okl.txt" "w"]
set outfile5 [open "sectionAnalysis.txt" "w"]
#
puts $outfile " DATA : \n"
#puts $outfile1 " l h b fc As disp:d_total=d_okl*(1+phi) /env_disp "
#puts $outfile4 " l h b fc As |N1 max| |Q1 max| |M1 max| |N10 max| |Q10 max| |M10 max| |N11 max| |Q11 max| |M11 max| |N20 max| |Q20 max|

```

```

#puts $outfile5 " 1 h b fc As maxload_factor maxEpsilon_c2 maxSigma_c2 maxEpsilon_s1 maxSigma_s1"
#
# Hinge Section GEOMETRY -----
# loop on beam length
set l_val {5.0 10.0 15.0 20.0 25.0 30.0} ; # BEAM LENGTH
for {set index_l 0} {$index_l<=5} {incr index_l 1} {
  set l [lindex $l_val $index_l]
  #puts " l = $l m"
}
# loop on beam height
set hperc_val {0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.10} ; # BEAM HEIGHT
for {set index_h 0} {$index_h<=5} {incr index_h 1} {
  set h_perc [lindex $hperc_val $index_h]
  set h [format {%4.2f} [expr $l*$h_perc]]
  set d [expr $h-$d1]
  #puts " h = $h m"
}
# loop on beam width
set bperc_val {0.02 0.0233 0.0266 0.03} ; # BEAM WIDTH
for {set index_b 0} {$index_b<=3} {incr index_b 1} {
  set b_perc [lindex $bperc_val $index_b]
  set b [format {%4.2f} [expr $l*$b_perc]]
  if {$b< 0.15} {set b 0.15}
  #puts " b = $b m"
}
#
# DATA for Normal Performance Concrete fck {C20-C90} # CONCRETE DATA (EN 1992-1-1:2004/Table 3.1)
#
set fc_val {20000 25000 30000 35000 40000 45000 50000 55000 60000 70000 80000 90000}
set ec_val {0.002 0.0021 0.0022 0.00225 0.0023 0.0024 0.00245 0.0025 0.0026 0.0027 0.0028 0.0028}
set ecu_val {0.0035 0.0035 0.0035 0.0035 0.0035 0.0035 0.0035 0.0035 0.0032 0.003 0.0028 0.0028}
set Ec_val {30000000 31000000 33000000 34000000 35000000 36000000 37000000 38000000 39000000 41000000 42000000 44000000}
set fct_val {2200 2600 2900 3200 3500 3800 4100 4200 4400 4600 4800 5000}
#
# loop on concrete force and properties
for {set index_fc 0} {$index_fc<=11} {incr index_fc 1} {
  set fc [lindex $fc_val $index_fc]
  set fcd [expr $acc*$fc/$gamac_okl]
  #puts " fc = $fc kPa"
  #
  set ec [lindex $ec_val $index_fc]
  set ecu [lindex $ecu_val $index_fc]
  set Ec [lindex $Ec_val $index_fc]
  set fct [lindex $fct_val $index_fc]
  set et [expr $fct/$Ec]
  puts "ec ecu Ec fct et $ec $ecu $Ec $fct $et \n"
}
#
# DATA for Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete fck {C150-C250} # CONCRETE DATA (AFGC Chapter 1/2) -----
#
set index_fc 12
# set lc [expr 2*$h/3.] ; # characteristic length (h:depth of cross section) for strain softening
# set lf 0.02 ; # fiber length (20mm)
# set fc 150000 ; # characteristic strength in compression
# set fcd [expr $acc*$fc/$gamac_okl] ; # design <<
# set fcd_u [expr 0.25*$fcd]
# set fct 9000 ; # characteristic elastic strength in tension (tag: fctk_el / AFGC)
# set fctd_el [expr $fct/$gamacf_okl_fiber_UHPFRC] ; # design <<
# set epsc0 0.0034
# set epscu [expr 4*$epsc0]
# set Ecm 50000000
# set epst_el [expr $fctd_el/$Ecm]
# set epst_lim [expr $lf/(4*$lc)] ; if {$epst_lim > 0.0025} {set epst_lim 0.0025}
# set Ect [expr $fctd_el / ($epst_lim - $epst_el)]
# set lambda [expr $fctd_el / ($epscu + $epst_el)]
#
puts "epsc0 epscu Ecm fct epst_el epst_lim $epsc0 $epscu $Ecm $fct $epst_el $epst_lim "
#
# loop on concrete reinforcement
set eyd [expr ($fyk/$gamas_oka)/$E0]
set Asmin [expr (0.26*$fct*$b*$d*1e4)/$fyk] ; # BEAM REINFORCEMENT (As)
set Asmax [expr 0.04*$b*$d*1e4]
set dA [expr ($Asmax-$Asmin)/10]

```

```

set As [format {%6.4f} $Asmin]
set i -1
#
while {$As < $Asmax} {
set As [format {%6.4f} [expr $As + $dA]]
incr i
if {$As >= $Asmax} {
set As [format {%6.4f} $Asmax]
break
}
if {$As <= $Asmin} {set As [format {%6.4f} $Asmin]}
# #puts " As = $As cm^2 \n"
#
set combnum [expr $combnum + 1] ; # (DEFINITION OF COMBINATIONS NUMBERER)
if {$combnum > 16240} {exit}
puts " **combination number $combnum** "
puts " l $l (m), h $h (m), b $b (m), fc $fc (kPa), As $As (cm^2) \n"
#
# creep coefficient definition (ANNEX B/EN 1992-1-1:2004 (E))-----
set Ac [expr $b*$h]
set u [expr 2*($b+$h)]
set h0 [expr 2.*$Ac*1000/$u]
set t0 28
set t 365
set fcm [expr 8 + ($fc/1000)]
set beta_fcm [expr 16.8/($fcm**0.5)]
set beta_t0 [expr 1 / (0.1 + $t0**0.2)]
set RH 80.
if {$fcm <= 35} {
set phi_RH [expr 1 + (1 - $RH/100) / (0.1*$h0**(1/3.0)) ]
set beta_H [expr 1.5*(1 + (0.012*$RH)**18)*$h0 + 250]
if {$beta_H > 1500} {set beta_H 1500}
} else {
set a1 [expr (35./$fcm)**0.7]
set a2 [expr (35./$fcm)**0.2]
set a3 [expr (35./$fcm)**0.5]
set phi_RH [expr (1 + $a1*(1 - $RH/100) / (0.1*$h0**(1/3.0)) ) * $a2 ]
set beta_H [expr 1.5 * (1 + (0.012*$RH)**18) * $h0 + 250*$a3]
if {$beta_H > [expr 1500*$a3]} {
set beta_H [expr 1500*$a3]
}
}
set beta_c [expr ( ($t-$t0)/($beta_H + $t-$t0) )**0.3]
set phi_0 [format {%#.3g} [expr $phi_RH*$beta_fcm*$beta_t0*$beta_c]]
puts "creep coefficient for RH = $RH % is $phi_0 \n"
puts $outfile "creep coefficient for RH = $RH % is $phi_0 \n"
#
# SET UP -----
wipe
# model BasicBuilder $spatial dimension of problem $dof/node
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
# Define Geometric Transformation: performs a linear geometric transformation of beam stiffness and resisting force from the
# basic system to the global-coordinate system
geomTransf Linear 1
#
# Define Nodes
# tag X-coord Y-coord
node 1 0.0 0.0
node 2 [expr $l/20] 0.0
node 3 [expr 2*$l/20] 0.0
node 4 [expr 3*$l/20] 0.0
node 5 [expr 4*$l/20] 0.0
node 6 [expr 5*$l/20] 0.0
node 7 [expr 6*$l/20] 0.0
node 8 [expr 7*$l/20] 0.0
node 9 [expr 8*$l/20] 0.0
node 10 [expr 9*$l/20] 0.0
node 11 [expr 10*$l/20] 0.0
node 12 [expr 11*$l/20] 0.0
node 13 [expr 12*$l/20] 0.0
node 14 [expr 13*$l/20] 0.0
node 15 [expr 14*$l/20] 0.0
node 16 [expr 15*$l/20] 0.0

```

```

node 17 [expr 16*$l/20] 0.0
node 18 [expr 17*$l/20] 0.0
node 19 [expr 18*$l/20] 0.0
node 20 [expr 19*$l/20] 0.0
node 21 $l 0.0
#
# Define Restraints
# tag DX DY RZset {0_free 1_fixed {axial shear bending}}
fix 1 1 1 0
fix 21 0 1 0
#
#
# MATERIAL parameters -----
# uniaxialMaterial Steel01 $matTag $fy $E0 $b # STEEL DATA
uniaxialMaterial Steel01 2 [expr $fyk/$gamas_oka] $E0 0.01
#
# uniaxialMaterial Concrete04 $matTag $fc $ec $ecu $Ec <$fct $et> <$beta>
uniaxialMaterial Concrete04 3 [expr -1.0*$fcd] [expr -1.0*$ec] [expr -1.0*$ecu] $Ec $fct $et 0.1
#
# uniaxialMaterial Concrete02 $matTag $fpc $eps0 $fpcu $epsu $lambda $ft $Ets # DUCTAL CONCRETE DATA
uniaxialMaterial Concrete02 3 -$fcd -$eps0 -$fpcu -$epsu $lambda $fctd_el $Ect
#
# uniaxialMaterial Concrete01 $matTag $fpc $eps0 $fpcu $epsu # NORMAL STRENGTH CONCRETE
uniaxialMaterial Concrete01 3 [expr -1.0*$fcd] [expr -1.0*$ec] [expr -1.0*$fcd] [expr -1.0*$ecu]
#
# uniaxialMaterial Multi-Linear Material $matTag -strain $strainPoints -stress $stressPoints
uniaxialMaterial ElasticMultiLinear 4 -strain [expr -100*$ecu] [expr -1.0*$ecu] [expr -1.0*$ecu] 0.0 -stress $fcd $fcd 0.0 0.0
uniaxialMaterial Parallel 1 3 4
#
section Fiber $secTag { ; # CROSS-SECTIONAL GEOMETRY DEFINITION
#
# patch quad $matTag $numSubdivIJ $numSubdivJK $yI $zI $yJ $zJ $yK $zK $yL $zL
# unconfined concrete
# patch quad 1 1 200 [expr -$h/2] [expr $b/2] [expr -$h/2] [expr $b/2 - $d1] [expr $h/2] [expr $b/2 - $d1] [expr $h/2] [expr $b/2]
# patch quad 1 1 200 [expr -$h/2] [expr -$b/2 + $d1] [expr -$h/2] [expr -$b/2] [expr $h/2] [expr -$b/2] [expr $h/2] [expr -$b/2 + $d1]
# patch quad 1 1 20 [expr $h/2 - $d1] [expr $b/2 - $d1] [expr $h/2 - $d1] [expr -$b/2 + $d1] [expr $h/2] [expr -$b/2 + $d1]
# patch quad 1 1 20 [expr -$h/2] [expr $b/2 - $d1] [expr -$h/2] [expr -$b/2 + $d1] [expr -$h/2 + $d1] [expr -$b/2 + $d1]
# patch quad 1 1 20 [expr -$h/2] [expr $b/2 - $d1] [expr -$h/2] [expr -$b/2 + $d1] [expr -$h/2 + $d1] [expr -$b/2 + $d1]
# patch quad 1 1 20 [expr -$h/2] [expr $b/2 - $d1] [expr -$h/2] [expr -$b/2 + $d1] [expr -$h/2 + $d1] [expr -$b/2 + $d1]
#
# confined concrete
# patch quad 1 1 110 [expr -$h/2 + $d1] [expr $b/2 - $d1] [expr -$h/2 + $d1] [expr -$b/2 + $d1] [expr $h/2 - $d1] [expr -$b/2 + $d1]
# patch quad 1 1 110 [expr -$h/2 + $d1] [expr $b/2 - $d1] [expr -$h/2 + $d1] [expr -$b/2 + $d1] [expr $h/2 - $d1] [expr -$b/2 + $d1]
#
# layer straight $matTag $numFiber $areaFiber $yStart $zStart $yEnd $zEnd
# reinforcement steel
# layer straight 2 1 [expr $As/(10000)] [expr -$h/2 + $d1] [expr $b/2 - $d1] [expr -$h/2 + $d1] [expr -$b/2 + $d1] ; #katw ina
# layer straight 2 1 [expr $As/(10000*2)] [expr $h/2 - $d1] [expr $b/2 - $d1] [expr $h/2 - $d1] [expr -$b/2 + $d1] ; #anw ina
}
#
#
# # DIATOMH PLAKODOKOY
# set beff [expr $b + 0.2* $l] ; puts "beff = $beff , bw = $b"
# set hf [expr 0.2*$h]
# set bw $b
# set hw [expr $h - $hf] ; puts "hw = $hw"
# set yc [format {%4.2f} [expr (0.5*($hw**2)*$bw + ($h-$hf/2)*$hf*$beff )/($hw*$bw + $hf*$beff)]] ; puts "yc = $yc"
#
#
# section Fiber $secTag { ; # CROSS-SECTIONAL GEOMETRY DEFINITION
#
# patch quad $matTag $numSubdivIJ $numSubdivJK $yI $zI $yJ $zJ $yK $zK $yL $zL
# patch quad 3 1 50 [expr $hw - $yc] [expr $beff/2] [expr $hw - $yc] [expr -$beff/2] [expr $h - $yc] [expr -$beff/2]
# patch quad 3 1 200 [expr -$yc] [expr $bw/2] [expr -$yc] [expr -$bw/2] [expr $hw - $yc] [expr -$bw/2] [expr $hw - $yc] [expr $bw/2]
#
# layer straight $matTag $numFiber $areaFiber $yStart $zStart $yEnd $zEnd
# reinforcement steel
# layer straight 2 1 [expr $As/(10000)] [expr -$yc + $d1] [expr $bw/2 - $d1] [expr -$yc + $d1] [expr -$bw/2 + $d1]
# layer straight 2 1 [expr $As/(2*10000)] [expr $h - $yc - $d1] [expr $beff/2 - $d1] [expr $h - $yc - $d1] [expr -$beff/2 + $d1]
#
#

```



```

#puts "section defined \n"
#
# element dispBeamColumn
# element dispBeamColumn $eleTag $iNode $jNode $numIntgrPts $secTag $transfTag <-mass $massDens> <-cMass> <-integration $intType>
element dispBeamColumn 1 1 2 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 2 2 3 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 3 3 4 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 4 4 5 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 5 5 6 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 6 6 7 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 7 7 8 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 8 8 9 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 9 9 10 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 10 10 11 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 11 11 12 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 12 12 13 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 13 13 14 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 14 14 15 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 15 15 16 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 16 16 17 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 17 17 18 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 18 18 19 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 19 19 20 3 $secTag 1
element dispBeamColumn 20 20 21 3 $secTag 1
#
# Create load pattern for durable/transcient load -----
#
set Q 0
set G [expr 25*$b*$h]
#set G [format {%6.4f} [expr 25*($bw*$hw + $beff*$hf)]]; puts "G= $G" ; #idiovaros plakodokou
set q_okl [format {%6.4f} [expr $gamag_okl*$G + $gamag_okl*$psi2*$Q*$b]]
#
pattern Plain $combnun Linear {
  load 1 0.0 -[expr $q_okl*$l/40] 0.0;
  load 2 0.0 -[expr $q_okl*$l/20] 0.0
  load 3 0.0 -[expr $q_okl*$l/20] 0.0
  load 4 0.0 -[expr $q_okl*$l/20] 0.0

  load 5 0.0 -[expr $q_okl*$l/20] 0.0
  load 6 0.0 -[expr $q_okl*$l/20] 0.0
  load 7 0.0 -[expr $q_okl*$l/20] 0.0
  load 8 0.0 -[expr $q_okl*$l/20] 0.0
  load 9 0.0 -[expr $q_okl*$l/20] 0.0
  load 10 0.0 -[expr $q_okl*$l/20] 0.0
  load 11 0.0 -[expr $q_okl*$l/20] 0.0
  load 12 0.0 -[expr $q_okl*$l/20] 0.0
  load 13 0.0 -[expr $q_okl*$l/20] 0.0
  load 14 0.0 -[expr $q_okl*$l/20] 0.0
  load 15 0.0 -[expr $q_okl*$l/20] 0.0
  load 16 0.0 -[expr $q_okl*$l/20] 0.0
  load 17 0.0 -[expr $q_okl*$l/20] 0.0
  load 18 0.0 -[expr $q_okl*$l/20] 0.0
  load 19 0.0 -[expr $q_okl*$l/20] 0.0
  load 20 0.0 -[expr $q_okl*$l/20] 0.0
  load 21 0.0 -[expr $q_okl*$l/40] 0.0
}
puts "Model built \n"
#
# Define Recorders -----
#
recorder Node <-file $fileName> <-time> <-node $model $node2 ...> -dof ($dof1 $dof2 ...) $respType'
recorder EnvelopeNode -file env_disp11\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -node 11 -dof 2 disp
recorder Node -file $dataDir/disp11\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -node 11 -dof 2 disp
recorder Node -file $dataDir/reaction\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -node 1 21 -dof 2 reaction
#
recorder (Envelope)Element <-file $fileName> <-time> <-ele ($ele1 $ele2 ...)> (section $secNum force/deformation/stiffness/stressStrai
recorder EnvelopeElement -file envNM_Forces\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -ele 1 10 11 20 force
recorder Element -file $dataDir/NM_Forces\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -ele 1 10 11 20 localForce
#
recorder EnvelopeElement -file diagrams\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -ele all localForce
#
recorder Element -file envNM_sectiondeform\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -ele 10 section 3 deformation
recorder Element -file $dataDir/s_e_tension_anal\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -ele 10 section 3 0
...[expr (-1.0*$h/2)+$d1] 1 stressStrain
recorder Element -file $dataDir/s_e_compression_anal\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -ele 10 section 3 0

```

```

...[expr $h/2] 1 stressStrain
# recorder EnvelopeElement <-file > <-time> <-ele > (section $secNum fiber $y $z <matID> stressStrain)
recorder EnvelopeElement -file s_e_tension\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -ele 10 section 3 0
...[expr (-1.0*$h/2)+$d1] 1 stressStrain ; #constitutive law under tension
recorder EnvelopeElement -file s_e_compression\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out -time -ele 10 section 3 0
...[expr $h/2] 1 stressStrain ; #constitutive law under stress
#
# recorder plot $fileName $windowTitle $xLoc $yLoc $xPixels $yPixels -columns $xCol0 $yCol0
# recorder plot s_e_compression_anal\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out sigma_epsilon_diagram 10 10 200 200 -columns 1 2
# recorder plot disp11\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out dF_displacement 30 30 200 200 -columns 1 2
#
# Set Analysis parameters -----
#
set analysis_steps 100
# CONSTRAINTS handler -- Determines how the constraint equations are enforced in the analysis
# Plain Constraints -- Removes constrained degrees of freedom from the system of equations (only for homogeneous equations)
constraints Plain
#
# DOF NUMBERER (number the degrees of freedom in the domain):
# determines the mapping between equation numbers and degrees-of-freedom
# Plain -- Uses the numbering provided by the user
# RCM -- Renumbers the DOF to minimize the matrix band-width using the Reverse Cuthill-McKee algorithm
numberer RCM
#
# SYSTEM
# Linear Equation Solvers (how to store and solve the system of equations in the analysis)
# -- provide the solution of the linear system of equations Ku = P. Each solver is tailored to a specific matrix topology.
system BandGeneral
#
# TEST: # convergence test to
# Convergence TEST
# -- Accept the current state of the domain as being on the converged solution path
# -- determine if convergence has been achieved at the end of an iteration step
# NormDispIncr -- Specifies a tolerance on the norm of the displacement increments at the current iteration
set Tol 1.e-6 ; # Convergence Test: tolerance
set maxNumIter 100; # Convergence Test: maximum number of iterations that will be performed before "failure to converge" is return
set printFlag 0 ; # Convergence Test: flag used to print information on convergence (optional)
test NormDispIncr $Tol $maxNumIter $printFlag
#
# Solution ALGORITHM: -- Iterate from the last time step to the current
# Newton -- Uses the tangent at the current iteration to iterate to convergence
# ModifiedNewton -- Uses the tangent at the first iteration to iterate to convergence
algorithm Newton
#
# Static INTEGRATOR: -- determine the next time step for an analysis
# LoadControl -- Specifies the incremental load factor to be applied to the loads in the domain
# DisplacementControl -- Specifies the incremental displacement at a specified DOF in the domain
set dU [expr $1/(250*$analysis_steps*(1 + $phi_0))]
integrator DisplacementControl 11 2 -9dU
# ANALYSIS -- defines what type of analysis is to be performed
# Static Analysis -- solves the KU=R problem, without the mass or damping matrices.
analysis Static
#
analyze $analysis_steps
#loadConst -time 0.0
#
# -----
#
puts "End of Static Analysis for comb: no.$combnum \n"
set secTag [expr $secTag+1]
wipe
#
# Read results from recorders
#
#set input1 [open "s_e_compression_anal\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out" "r"]
#set input2 [open "s_e_tension_anal\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out" "r"]
#set input3 [open "reaction\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out" "r"]
#set input4 [open "s_e_compression\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out" "r"]
#set input5 [open "s_e_tension\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out" "r"]
#set input6 [open "disp11\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out" "r"]
#set input7 [open "env_disp11\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out" "r"]
#set input8 [open "NM Forces\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out" "r"]

```

```

set input9 [open          "envNM_Forces\_ $index_l\_ $index_h\_ $index_b\_ $index_fc\_ $i.out" "r"]
#
#
#set contents1 [split [read $input1] \n]
#set contents2 [split [read $input2] \n]
#set contents3 [split [read $input3] \n]
#
#
set contents4          [split [read $input4] \n]          ;          #read the maximum load factor
set maxload_factor [format {%6.2f} [lindex $contents4 2 2]]
set maxEpsilon_c2 [format {%8.6f} [lindex $contents4 2 3]]
set maxSigma_c2 [format {%7.1f} [lindex $contents4 2 1]]
#
set contents5 [split [read $input5] \n]
set maxEpsilon_s1 [format {%8.6f} [lindex $contents5 2 3]]
set maxSigma_s1 [format {%7.1f} [lindex $contents5 2 1]]
#
set contents7 [split [read $input7] \n]          ;          #read the envelope displacement
set env_disp [lindex $contents7 2 1]
#
set contents9 [split [read $input9] \n]          ;          #read the envelope section forces
set N1_absmax [lindex $contents9 2 1]
set Q1_absmax [lindex $contents9 2 3]
set M1_absmax [lindex $contents9 2 5]
set N10_absmax [lindex $contents9 2 19]
set Q10_absmax [lindex $contents9 2 21]
set M10_absmax [lindex $contents9 2 23]
set N11_absmax [lindex $contents9 2 25]
set Q11_absmax [lindex $contents9 2 27]
set M11_absmax [lindex $contents9 2 29]
set N20_absmax [lindex $contents9 2 43]
set Q20_absmax [lindex $contents9 2 45]
set M20_absmax [lindex $contents9 2 47]
puts "Q1_absmax= $Q1_absmax , M10_absmax= $M10_absmax , M11_absmax= $M11_absmax , Q20_absmax= $Q20_absmax \n"
#
#close $input1
#close $input2

#close $input3
close $input4
close $input5
#close $input6
close $input7
#close $input8
close $input9
#
#file delete -force $input1
#file delete -force $input2
#file delete -force $input3
file delete -force $input4
file delete -force $input5
#file delete -force $input6
file delete -force $input7
#file delete -force $input8
file delete -force $input9
#
# INPUT OF index_matrix.txt FILE -----
puts $outfile " $index_l $l $index_h $h $index_b $b $index_fc $fc $i $As "
#
# INPUT OF printout.txt FILE
puts $outfile " **combination number $combnun** "
puts $outfile " l $l (m), h $h (m), b $b (m), fc $fc (kPa), As $As (cm^2)"
puts $outfile "indexes : $index_l $index_h $index_b $index_fc $i "
#
# INPUT OF disp_ok1.txt FILE
#puts $outfile1 " l h b fc As disp:d_total=d_ok1*(1+phi) "
puts $outfile1 " $index_l $index_h $index_b $index_fc $i $env_disp $RH $phi_0"
#
# INPUT OF reaction.txt FILE
#puts $outfile3 " $index_l $index_h $index_b $index_fc $i $R1 $R21"
#
# INPUT OF resmom_max.txt FILE
puts $outfile4 " $index_l $index_h $index_b $index_fc $i $N1_absmax $Q1_absmax $M1_absmax $N10_absmax $Q10_absmax $M10_absmax $N11_absmax
#
# INPUT OF sectionAnalysis.txt FILE

```

```
puts $outfile5 " $index_l $index_h $index_b $index_fc $i $maxload_factor $q_okl $maxEpsilon_c2 $maxSigma_c2 $maxEpsilon_s1 $maxSigma_s1"

#file delete -force "disp11\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out"
#file delete -force "env disp11\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out"
#file delete -force "reaction\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out"
#file delete -force "NM_Forces\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out"
file delete -force "envNM_Forces\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out"
file delete -force "s_e_tension\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out"
file delete -force "s_e_compression\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out"
#file delete -force "s_e_tension_anal\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out"
#file delete -force "s_e_compression_anal\_index_l\_index_h\_index_b\_index_fc\_i.out"

};           # end of As loop
};           # end of fc loop
};           # end of width loop (b)
};           # end of height loop (h)
};           # end of length loop (l)
#
close $outf1
close $outfile
close $outfile1
close $outfile4
close $outfile5
wipe
#exit
```