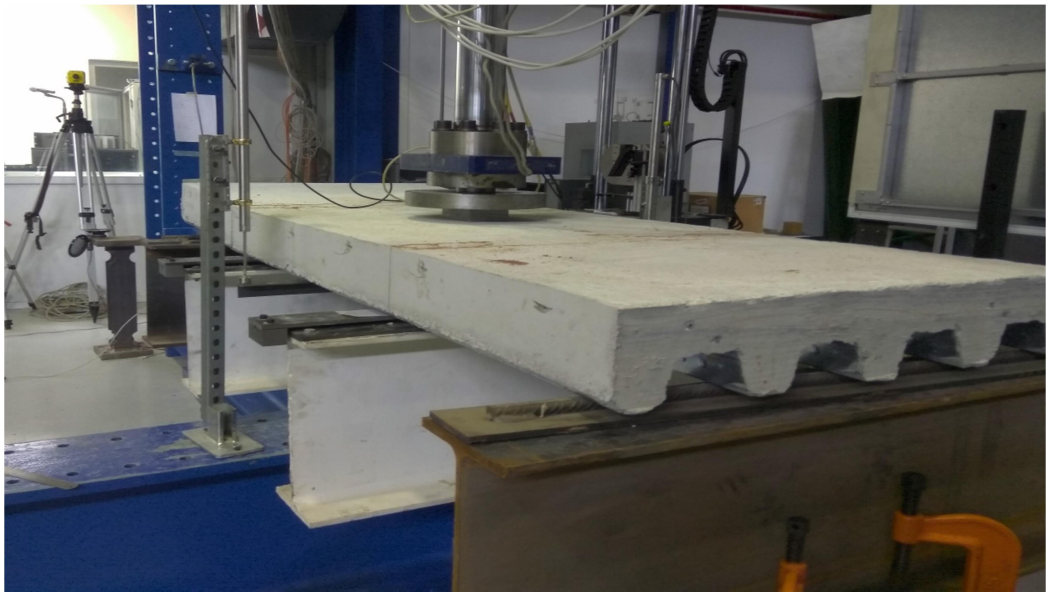
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Πειραματική Διερεύνηση Σύμμικτων Πλακών υπό Συγκεντρωμένο Φορτίο



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλέξανδρος Τσαντουλής

Επιβλέπων: Ιωάννης Βάγιας

Αθήνα, Ιούλιος 2018

ΕΜΚ ΔΕ 2018/21

Τσαντουλής Α. (2018).

Πειραματική διερεύνηση σύμμικτων πλακών υπό συγκεντρωμένο φορτίο

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2018/21

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Tsantoulis A. (2018).

Experimental investigation of composite slabs under concentrated load

Diploma Thesis EMK ΔE 2018/21

Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη 5

Abstract 6

Ευχαριστίες 7

1. Εισαγωγή 9

1.1 – Ιστορική αναδρομή 9

1.2 – Σύμμικτες πλάκες 10

1.3 – Η σπουδαιότητα της συνάφειας σκυροδέματος – χαλυβδόφυλλου 11

1.4 – Συμπεριφορά και τύποι αστοχίας 12

1.5 – Κρίσιμο διατμητικό μήκος L_s 14

2. Υλικά και πειραματική διάταξη 16

2.1 – Κατασκευή και συντήρηση των δοκιμίων σύμμικτων πλακών σκυροδέματος 16

2.2 Υλικά 17

2.2.1 Σκυρόδεμα 17

2.2.2 Χαλυβδόφυλλο 19

2.3 Πειραματική διάταξη 21

2.4 Διαδικασία Φόρτισης 26

3. Αντοχές Σύμμικτων πλακών κατά τον Ευρωκώδικα 2 και 4 27

3.1 Αντοχή έναντι θετικών ροπών κάμψης 30

3.1.1 Ουδέτερος άξονας πάνω από τα χαλυβδόφυλλα 30

3.1.2 Ουδέτερος άξονας μέσα στα χαλυβδόφυλλα 31

3.1.3 Αντοχές έναντι θετικών ροπών κάμψης των υπό εξέταση δοκιμίων 32

3.2 Αντοχή έναντι εγκάρσιας διάτμησης - τέμνουσας 33

3.2.1 Αντοχές έναντι εγκάρσιας διάτμησης - τέμνουσας των υπό εξέταση δοκιμίων 34

3.3 Αντοχή έναντι διαμήκους διάτμησης 34

3.3.1 Σύμμικτες πλάκες χωρίς ακραία αγκύρωση με τη μέθοδο m-k 35

3.3.2 Σύμμικτες πλάκες χωρίς ακραία αγκύρωση με τη μέθοδο μερικής διατμητικής σύνδεσης 39

3.3.2 Αντοχές έναντι διαμήκους διάτμησης των υπό εξέταση δοκιμίων 43

3.4 Αντοχή έναντι διάτρησης 48

3.4.1 Αντοχές έναντι διάτρησης των υπό εξέταση δοκιμίων 52

4. Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών 54

4.1 Αποτελέσματα $1^{ης}$ ομάδας δοκιμών 54

4.1.1 Δοκίμιο B15-3/1 54

4.1.2 Δοκίμιο B20-3/1 58
4.1.3 Δοκίμιο B20-2/1 63
4.1.4 Δοκίμιο B15-2/1 68
4.2 Αποτελέσματα 2ης ομάδας δοκιμών..... 73
4.2.1 Δοκίμιο B15-1/2 73
4.2.2 Δοκίμιο B20-1/2 78
5. Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραματικών δοκιμών..... 83
5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων 1ης ομάδας 83
5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων 2ης ομάδας 84
5.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα και για τις δύο ομάδες..... 85
5.4 Σύγκριση των πειραματικών αντοχών με τις αντίστοιχες που προβλέπει ο Ευρωκώδικας 4..... 86
5.5 Συμπεράσματα..... 87
6. Βιβλιογραφία..... 88

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2018/21

Πειραματική διερεύνηση σύμμικτων πλακών υπό συγκεντρωμένο φορτίο

Τσαντουλής Α. (Επιβλέπων: Βάγιας Ι.)

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων της διερεύνησης σύμμικτων πλακών υπό συγκεντρωμένο φορτίο. Στόχος της είναι η προσέγγιση ενός μοτίβου αστοχίας λόγω συγκεντρωμένου φορτίου με πλακίδιο επαφής-πίεσης με συγκεκριμένες διαστάσεις στο κέντρο μίας αμφιέρειστης σύμμικτης πλάκας.

Αρχικά, γίνεται μια σύντομη περιγραφή της παγκόσμιας ιστορίας, της χρησιμότητας και ιδιαιτερότητας των σύμμικτων πλακών, με τα όποια πλεονεκτήματα παρέχουν στις κατασκευές έναντι των συνηθισμένων πλακών από σκυρόδεμα.

Στη συνέχεια, περιγράφεται όλη η διαδικασία κατασκευής, συντήρησης των πλακών και η μέτρηση των αντοχών των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Ύστερα, παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη, καθώς και η διαδικασία φόρτισης που εφαρμόσθηκε.

Ακολούθως, προσδιορίσθηκαν μέσω του προγράμματος Microsoft Excel οι αντοχές έναντι κάμψης, εγκάρσιας και διαμήκους διάτμησης και διάτρησης των υπό εξέταση πλακών με βάση τις μεθοδολογίες που περιγράφονται στους Ευρωκώδικες 2 και 4 για τις σύμμικτες πλάκες.

Κατόπιν, παρατίθενται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών με τη μορφή διαγραμμάτων δύναμης-βέλους κάμψεως, καθώς και φωτογραφιών των ρηγματωμένων δοκιμίων.

Εν κατακλείδι, συγκρίνονται οι πειραματικές αντοχές με τις θεωρητικές των Ευρωκωδίκων που υπολογίσθηκαν με σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων ως προς τη συμπεριφορά των δοκιμίων.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2018/21

Experimental investigation of composite slabs under concentrated load

Tsantoulis A. (supervised by Vayas I.)

Abstract

Purpose of this thesis is the presentation and investigation of the experimental results of composite slabs under concentrated load. Main target is the approach of a failure pattern due to concentrated load with a contact plate of specific dimensions in the center of a simply supported composite slab.

At first, there is a short description of the worldwide history, usage and peculiarity of composite slabs, with all the benefits that they provide over the commonly-used concrete slabs.

Then, the whole procedure of construction and maintenance of the slabs is described, as well as the calculation of the strength of the materials used. Afterwards, the experimental layout and the loading procedure are displayed.

Moreover, the resistances against sagging bending moments, vertical, longitudinal and punching shear where determined, according to the methodologies described in Eurocodes 2,4 concerning composite slabs.

The experimental results are also provided in the form of force-displacement graphs, so as pictures of the cracked specimens.

Last but not least, the experimental resistances are compared to the theoretical ones computed according to the Eurocodes, in order to reach some useful conclusions concerning the behavior of the specimens.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βάγια Ι. για την συνεχή βοήθεια και καθοδήγησή του σε κάθε απορία μου και κυρίως που μου εμπιστεύθηκε να ασχοληθώ με ένα θέμα που περιελάμβανε πειραματικές δοκιμές μεγάλης κλίμακας, πράγμα το οποίο μπορεί να μην ξανά έχω την ευκαιρία να ασχοληθώ στο μέλλον! Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Λιγνό Ξ. και κ. Κατσατσίδη Σ. για την συνεχή βοήθεια και την καθημερινή συνεργασία στο εργαστήριο σε ιδιαίτερα ευχάριστο κλίμα.

Δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω την Εύα, για την συμπαράσταση και την εμψύχωση σε όλα τα χρόνια της κοινή μας πορείας στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλη μου την οικογένεια και ιδιαίτερα τον παππού μου τον Νίκο, που δυστυχώς δεν βρίσκεται πλέον εν ζωή, για τη συνεχή ψυχολογική υποστήριξη σε όλα αυτά τα δύσκολα και πιεστικά χρόνια των σχολικών και φοιτητικών μου χρόνων.

1. Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων της διερεύνησης της συμπεριφοράς σύμμικτων πλακών υπό συγκεντρωμένο φορτίο. Σκοπός των πειραμάτων ήταν ο προσδιορισμός του τύπου και των μεγεθών αστοχίας ανάλογα με την επιφάνεια επαφής του δοκιμίου – πλακιδίου.

1.1 – Ιστορική αναδρομή

Τα σύμμικτα δομικά στοιχεία εμφανίζονται για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1920 στην Ιαπωνία, όπου ηλωτές δικτυωτές δοκοί και ηλωτά υποστυλώματα σύνθετων διατομών από γωνιακά, εγκιβωτίζονταν σε σκυρόδεμα. Στην Ευρώπη, η χρήση σύμμικτων δοκών ξεκίνησε στη Γερμανία στα τέλη του 1940, σε μια εποχή ανεπάρκειας του χάλυβα. Το 1956 εκδόθηκε και ο πρώτος σχετικός κανονισμός DIN 4239 "Σύμμικτες δοκοί σε κτίρια" βασιζόμενος στην ελαστική θεωρία και τη μέθοδο των επιτρεπομένων τάσεων. Η χρήση όμως σύμμικτων στοιχείων σε κτίρια, γνώρισε μεγάλη άνθηση κυρίως στη δεκαετία του 80 με προεξέχουσα τη Βρετανία, στην οποία οι κατασκευές αυτές κατέχουν το 60% της αγοράς σε κτιριακά έργα. Στην Ιαπωνία, τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 64%, στις ΗΠΑ 50%, ενώ στην υπόλοιπη Ευρώπη περίπου 33%.

Σήμερα, έχει συνταχθεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN), ο Ευρωκώδικας 4, που αφορά αποκλειστικά στις σύμμικτες κατασκευές και στους οποίους περιέχονται οι κανόνες σχεδιασμού και εκτέλεσης δομικών έργων από σύμμικτα στοιχεία. Πρόκειται για ένα Κανονισμό, στον οποίο έχει ενσωματωθεί η γνώση και η εμπειρία των τελευταίων δεκαετιών, τεχνικών και επιστημόνων που έχουν ασχοληθεί με τέτοιου είδους κατασκευές.

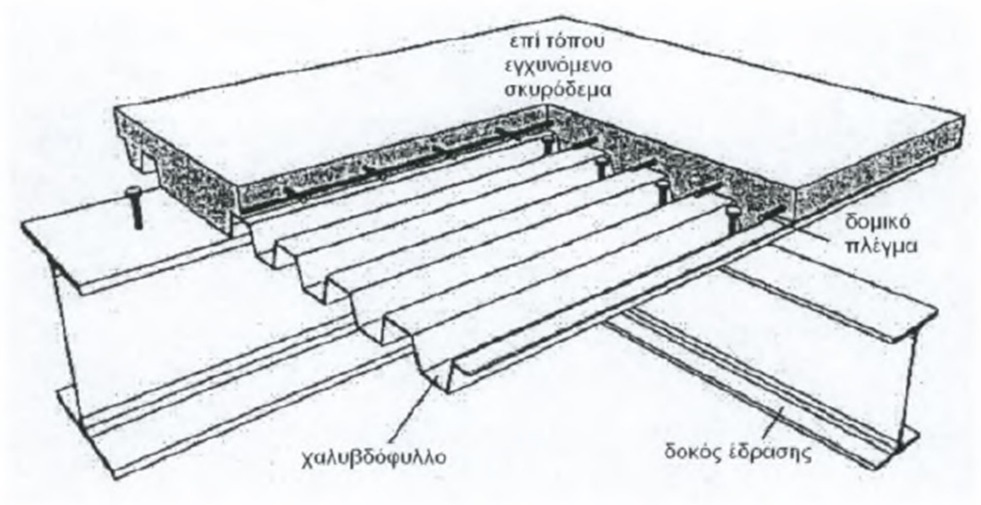
Στον ελλαδικό χώρο οι σύμμικτες κατασκευές δεν είναι διαδεδομένες, κυρίως λόγω της έλλειψης σε γνώση και εμπειρία τόσο των μελετητών όσο και των κατασκευαστών και του εργατοτεχνικού δυναμικού. Παρ' όλα αυτά, η διάδοση των σύμμικτων κατασκευών και στην Ελλάδα, αποτελεί θα λέγαμε μονόδρομο, τόσο για λόγους λειτουργικότητας, αλλά κυρίως για λόγους ταχύτητας ανέγερσης και οικονομίας. Μπορούμε λοιπόν να πούμε πως είναι καθαρά θέμα χρόνου, το είδος αυτό των κατασκευών, να γνωρίσει στην Ελλάδα την αποδοχή που έχει όχι μόνο στην υπόλοιπη Ευρώπη, αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο.

Όσον αφορά τις σύμμικτες πλάκες, πρώτοι οι Loucks και Giller περιέγραψαν ένα σύστημα με κατάστρωμα από χάλυβα το 1926. Σε αυτό το πρώιμο στάδιο ο μεταλλότυπος παρείχε όλες τις κατασκευαστικές αντοχές, ενώ το σκυρόδεμα που είχε προστεθεί αποτελούσε απλά ένα δάπεδο για βάδισμα και πυρασφάλεια. Οι πρώτες σύμμικτες πλάκες με οπλισμό αναπτύχθηκαν στην Αμερική το 1950 από την εταιρία Granco Steel Products. Αργότερα με σκοπό να επιτευχθεί η σύμμικτη λειτουργία μεταξύ σκυροδέματος και μεταλλικού φύλλου, η εταιρία Inland-Ryerson κατασκεύασε ένα τραπεζοειδές χαλυβδόφυλλο με κατάλληλες εγκοπές το 1961. Το 1968, το Αμερικάνικο ίδρυμα σιδήρου και χάλυβα (AISI) ξεκίνησε ένα πρόγραμμα

βελτίωσης του σχεδιασμού των σύμμικτων καταστρωμάτων, καταλήγοντας έτσι στο σήμερα που έχουν κατασκευασθεί χαλυβδόφυλλα με κατάλληλα διαμορφωμένες αυλακώσεις κατά τη μία διεύθυνση και τη δημιουργία μηχανικής εμπλοκής μέσω εσοχών, προεκβολών και εγκάρσιων καλωδίων που παρέχουν καλύτερη μεταφορά δυνάμεων στη διεπιφάνεια μεταξύ σκυροδέματος και μεταλλικού φύλλου.

1.2 – Σύμμικτες πλάκες

Οι σύμμικτες πλάκες σκυροδέματος αποτελούνται από χαλυβδόφυλλο τυποποιημένης διατομής και από επί τόπου εγχυόμενο σκυρόδεμα. Κατασκευαστικά χρησιμοποιείται δομικό πλέγμα για την αποφυγή ρηγματώσεων κατά την μεταφορά (αν πρόκειται για προκατασκευασμένες πλάκες) και λόγω συστολής ξήρανσης. Πρόσθετα στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται μεταλλικοί ήλοι υψηλής αντοχής σε διάτμηση για την ενίσχυση του φέροντος στοιχείου στη λειτουργία του ως σύμμικτο.



Σχήμα 1.1: Σύμμικτη πλάκα σκυροδέματος εδραζόμενη σε μεταλλική κατασκευή.

Τα χαλυβδόφυλλα αποτελούν ένα βασικό συστατικό στοιχείο των πλακών και ικανοποιούν μία σειρά από απαιτήσεις, όπως:

- Χρησιμεύουν ως επιφάνεια εργασίας και τύπος για τη πλάκα, παραλαμβάνοντας τα φορτία διάστρωσης του σκυροδέματος
- Λειτουργούν ως διαφράγματα κατά τη διάρκεια της συναρμολόγησης και ευσταθοποιούν τις σιδηροδοκούς έναντι πλευρικού λυγισμού
- Με το μεγάλο μήκος τους επί περισσότερων δοκών εξασφαλίζουν τη λειτουργία μίας συνεχούς δοκού

- Δημιουργούν μία σύμμικτη δράση με τη πλάκα και παραλαμβάνουν από κοινού τα ωφέλιμα φορτία
- Χρησιμοποιούνται για την ανάρτηση διαφόρων στοιχειών
- Κατανέμουν τις παραμορφώσεις λόγω συστολής ξήρανσης και εμποδίζουν μία εκτεταμένη ρηγμάτωση

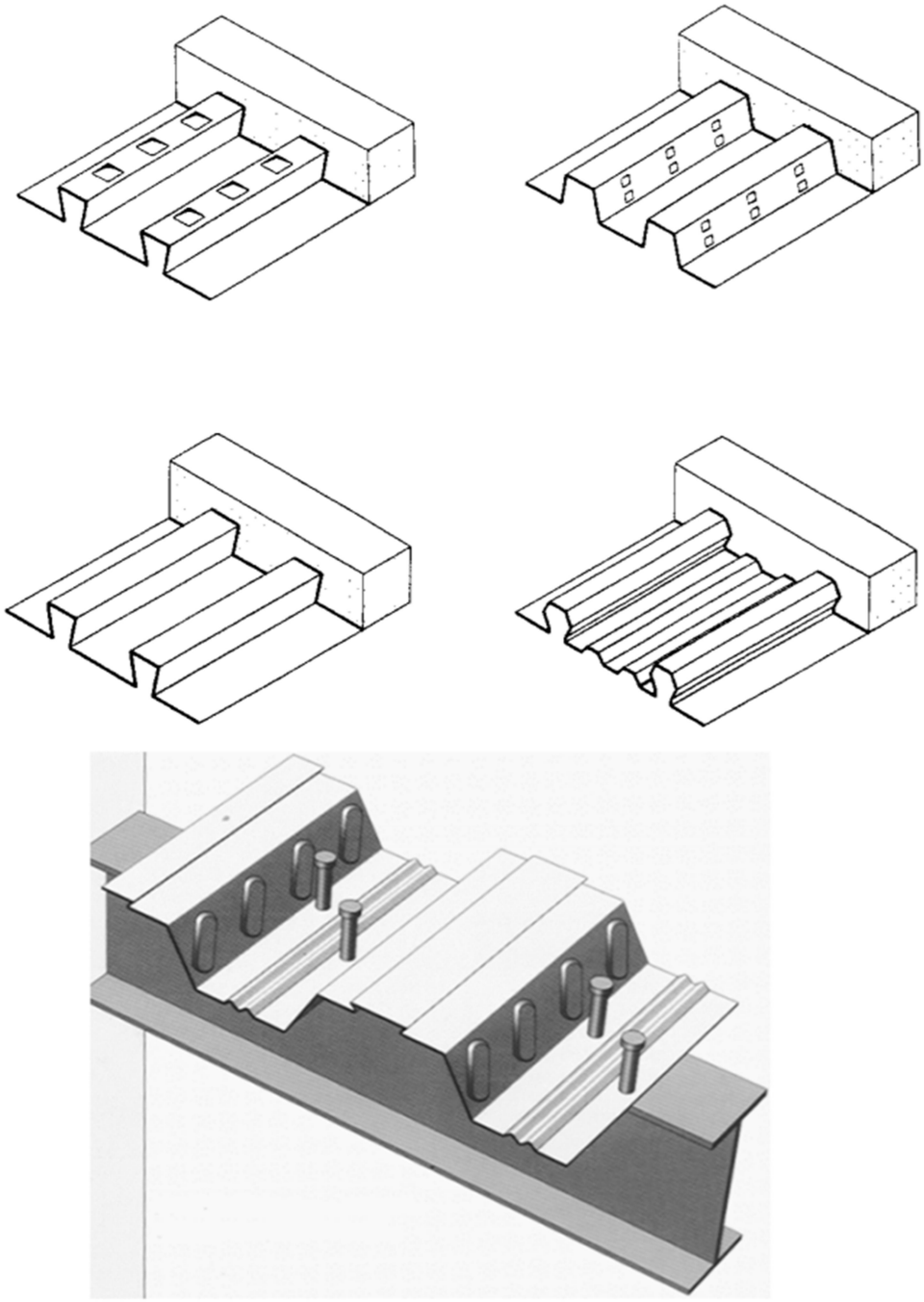
Τα κύρια πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συνήθεις πλάκες από σκυρόδεμα είναι:

- Μικρότεροι χρόνοι κατασκευής
- Αποφυγή χρήσης ξυλοτύπου
- Επίτευξη μεγαλύτερων ανοιγμάτων
- Επίτευξη μικρότερων στατικών υψών
- Αυξημένη αντοχή έναντι πυρκαγιάς

1.3 – Η σπουδαιότητα της συνάφειας σκυροδέματος – χαλυβδόφυλλου

Η συνεργασία των δύο υλικών σημαίνει αλληλεπίδραση μεταξύ τους και μεταφορά διατμητικών δυνάμεων στη διεπιφάνεια σκυροδέματος – χαλυβδόφυλλου. Κατά συνέπεια εξασφάλιση της συνεργασίας σημαίνει και ασφαλή σύνδεση μεταξύ των δύο υλικών. Αυτό πραγματοποιείται είτε με μηχανικό τρόπο μέσω πρόβλεψης κατάλληλων εγκοπών στα μεταλλικά φύλλα ή, σπανιότερα, συγκόλληση χαλύβδινου πλέγματος στα φύλλα, είτε μέσω τριβής όπου όμως θα πρέπει η αυλάκωση των φύλλων να είναι τέτοια, ώστε να περιορίζεται το σκυρόδεμα μεταξύ των αυλακώσεων για να αποφεύγεται η αποκόλληση του από την πλάκα. Στα άκρα της πλάκας αναπτύσσονται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διαμήκους διάτμησης, η αγκύρωση της οποίας ενισχύεται είτε με πρόσθετους διατμητικούς συνδέσμους(διατμητικοί ήλοι), είτε με κατάλληλη παραμόρφωση του μεταλλικού φύλλου.

Η σπουδαιότητα της συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και χαλυβδόφυλλου γίνεται πιο κατανοητή συγκρίνοντας πειραματικά τις συμπεριφορές σύμμικτων δοκών όπου τα δύο υλικά συνδέονται στη μία περίπτωση μόνο με τη συνάφεια και στην άλλη χρησιμοποιώντας μεταλλικά βλήτρα.



Σχήμα 1.2 : Εξασφάλιση διατμητικής σύνδεσης μεταλλικών φύλλων – σκυροδέματος στις σύμμικτες πλάκες

1.4 – Συμπεριφορά και τύποι αστοχίας

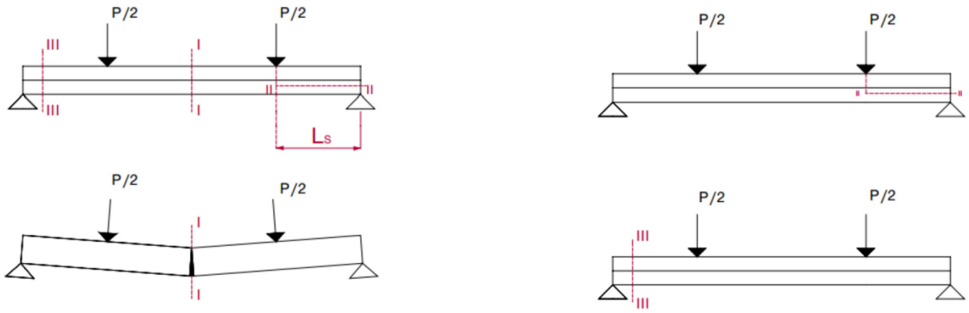
Οι σύμμικτες πλάκες πρέπει να είναι σχεδιασμένες επαρκώς έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι δεν θα αστοχήσουν λόγω των παρακάτω μορφών αστοχίας :

1. Σε καμπτική αστοχία (κρίσιμη διατομή I στο μέσον του ανοίγματος για αμφιέρειστη πλάκα)

   Η συγκεκριμένη μορφή αστοχίας θα είναι κρίσιμη εφόσον είναι εξασφαλισμένη η πλήρης διατμητική σύνδεση μεταξύ του χαλυβδόφυλλου και του σκυροδέματος. Καμπτική αντοχή της διατομής κατά τον κανονισμό ορίζεται ως $M_{pl,Rd}$. Κατά την καμπτική αστοχία παρατηρούνται κατακόρυφες καμπτικές ρωγμές (κάθετα στις κύριες εφελκυστικές τάσεις) στο μέσον του ανοίγματος.

2. Σε διατμητική αστοχία κατά μήκος της διεπιφάνειας του σκυροδέματος και του χαλυβδόφυλλου (κρίσιμη διατομή II κοντά σε μία από τις στηρίξεις)

   Στη συγκεκριμένη μορφή αστοχίας το μέγιστο φορτίο προσδιορίζεται από την αντοχή της διατμητικής σύνδεσης και όχι από την καμπτική αντοχή της, (δηλαδή στη διατομή I δεν φτάνουμε στο όριο της καμπτικής αντοχής $M_{pl,Rd}$). Διατμητική αντοχή κατά μήκος της διεπιφάνειας ορίζεται κατά τον EC4 ως $V_{l,Rd}$. Η διατμητική αστοχία κατά μήκος της διεπιφάνειας εκδηλώνεται ως σχετική ολίσθηση μεταξύ των δύο υλικών (χαλυβδόφυλλο, σκυρόδεμα) στις άκρες του δοκιμίου της πλάκας, για φορτίο μικρότερο αυτού που προκαλεί καμπτική αστοχία. Η απουσία σχετικής ολίσθησης δηλώνει πλήρη διατμητική σύνδεση και καμπτική αστοχία (I).



Σχήμα 1.3 : Κρίσιμη διατομή ανάλογα με τον τύπο αστοχίας σε σύμμικτες πλάκες σκυροδέματος.

3. Σε διατμητική αστοχία (κρίσιμη διατομή III σε μία από τις στηρίξεις)

   Η συγκεκριμένη μορφή αστοχίας θεωρείται κρίσιμη σε ειδικές περιπτώσεις, όπως σε μεγάλου πάχους και μικρού ανοίγματος πλάκες με σχετικά μεγάλου μεγέθους φορτία. Διατμητική και αντοχή σε διάτρηση κατά τον EC4 ορίζεται ως $V_{v,Rd}$ και $V_{p,Rd}$.

1.5 – Κρίσιμο διατμητικό μήκος L_s

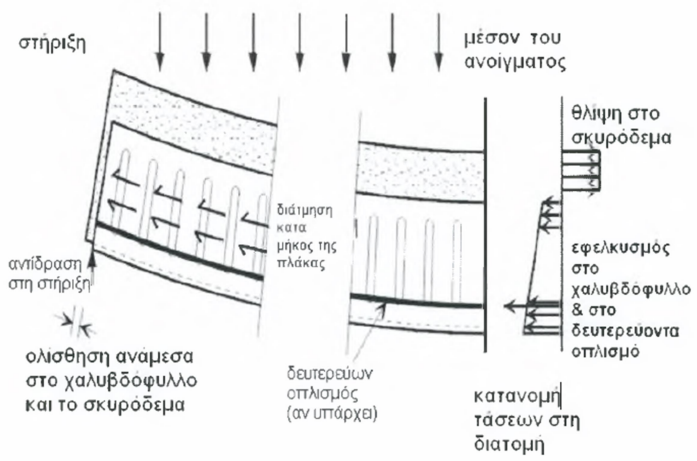
Το διατμητικό μήκος είναι ένα ισοδύναμο μήκος του φορέα στο οποίο αναπτύσσεται σταθερά τέμνουσα, έτσι ώστε σε κάθε κρίσιμο μήκος του φορέα το εμβαδόν του ισοδύναμου διαγράμματος τεμνουσών να είναι ίσο με το εμβαδόν του πραγματικού διαγράμματος τεμνουσών. Έτσι το «κρίσιμο διατμητικό μήκος μήκος», L_s, λαμβάνεται ως η απόσταση :

- L/4 από τις στηρίξεις της πλάκας όταν η πλάκα φορτίζεται με κατανεμημένο φορτίο q, στην οποία το κρίσιμο μήκος είναι ίσο με το μισό άνοιγμα και έτσι το διατμητικό άνοιγμα προσδιορίζεται από τη σχέση:

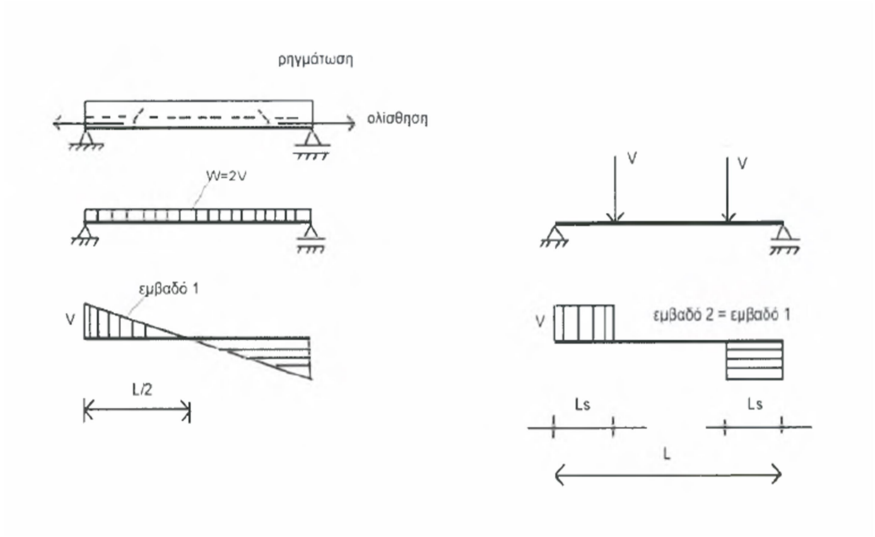
$$Ls \times \frac{(q \times L)}{2} = \frac{1}{2} \times \left(\frac{q \times L}{2}\right) \times \frac{L}{2} \rightarrow Ls = \frac{L}{4}$$

- Για δύο ίσα, συμμετρικά τοποθετημένα συγκεντρωμένα φορτία, το διατμητικό μήκος είναι ίσο με την απόσταση των φορτίων από το πλησιέστερο στήριγμα.

- Για διαφορετικές διατάξεις επιβολής του φορτίου, συμπεριλαμβανομένης της περιπτώσεως συνδυασμού κατανεμημένου φορτίου με μη συμμετρικά συγκεντρωμένα φορτία, η εκτίμηση του «κρίσιμου διατμητικού μήκους», L_s, θα προκύπτει ως αποτέλεσμα πειραμάτων ή ως η μέγιστη ροή διαιρεμένη με τη μεγαλύτερη τέμνουσα στην περιοχή του στηρίγματος για το υπόψη άνοιγμα.

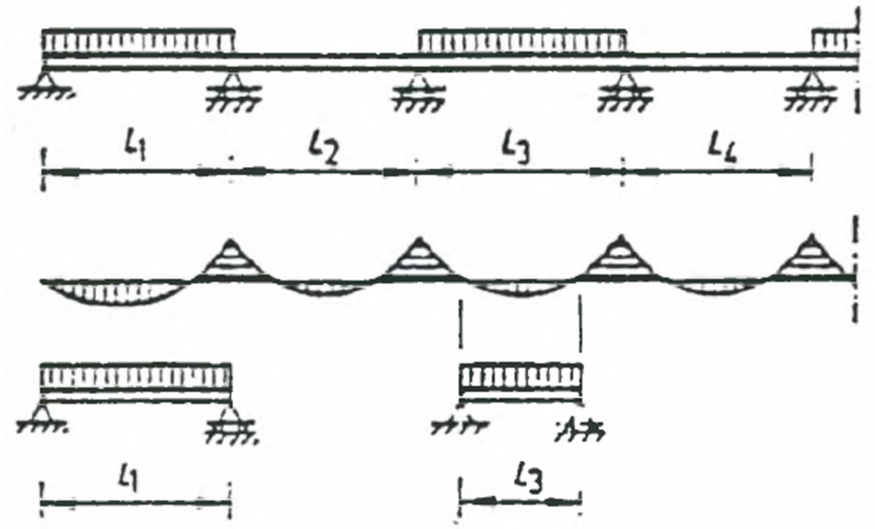


Σχήμα 1.4 : Κατανομή των τάσεων στο επίπεδο της διατομής



Σχήμα 1.5: Προσδιορισμός κρίσιμου διατμητικού μήκους L_s

Σε στατικά συστήματα πολλαπλών ανοιγμάτων επιτρέπεται για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής να χρησιμοποιούμε το ισοδύναμο μήκος αμφιέρειστης πλάκας, a*l, μεταξύ των σημείων μηδενισμού του διαγράμματος των καμπτικών ροπών, όπου l το μήκος του ανοίγματος της πλάκας και συντελεστής a=0,6 (για εσωτερικά ανοίγματα). Ωστόσο, για τα εξωτερικά ανοίγματα θα πρέπει να χρησιμοποιείται ολόκληρο το μήκος του ανοίγματος όπως φαίνεται στο σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6 : Προσδιορισμός L_s σε συνεχές στατικό σύστημα

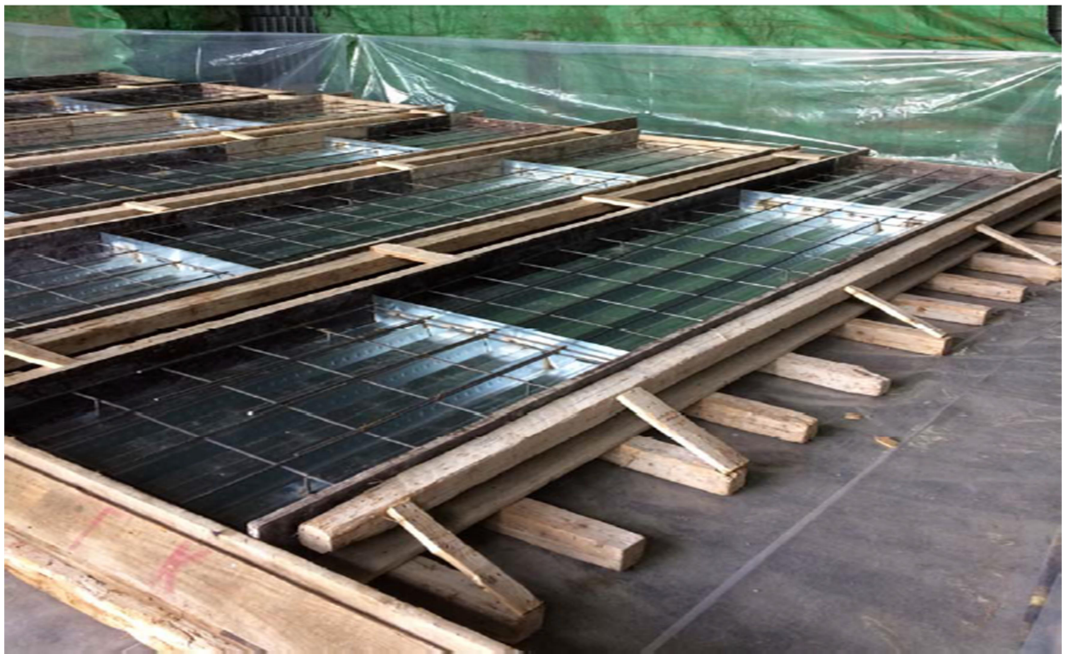
2. Υλικά και πειραματική διάταξη

2.1 – Κατασκευή και συντήρηση των δοκιμίων σύμμικτων πλακών σκυροδέματος

Η επιφάνεια του χαλυβδόφυλλου, καθώς και το πλέγμα οπλισμού Φ8/20 (S 500) με επικάλυψη 2 cm ευρίσκεται στο Σχήμα 2.1 στην «μετά την εξέλαση» κατάσταση με τοποθετημένο τον πλευρικό ξυλότυπο, χωρίς να έχει γίνει καμία προσπάθεια βελτίωσης της συνάφειας μέσω απολίπανσης της επιφάνειας. Το σχήμα και τα εξογκώματα του χαλυβδόφυλλου αντιπροσωπεύουν επακριβώς τα φύλλα που χρησιμοποιήθηκαν στην πράξη.

Σε απόσταση L/4 από κάθε άκρο είναι εμφανής η τοποθέτηση λαμαρίνας – κόφτη που εκτεινόταν σε όλο το πλάτος του χαλυβδόφυλλου και εξυπηρετούσε τους σκοπούς του πειράματος προσδιορισμού των συντελεστών m και k που προηγήθηκε, δίχως όμως να επηρεάσει το τμήμα της πλάκας (το ενδιάμεσο) που ασχοληθήκαμε σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

Η συντήρηση των δοκιμίων ξεκίνησε αμέσως μετά τη σκυροδέτηση για να αποφευχθεί η διάνοιξη ρωγμών λόγω της συστολής ξήρανσης του σκυροδέματος. Τοποθετήθηκε λινάτσα σε όλα τα δοκίμια η οποία διαβρεχόταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα, ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη συντήρηση των δοκιμίων.



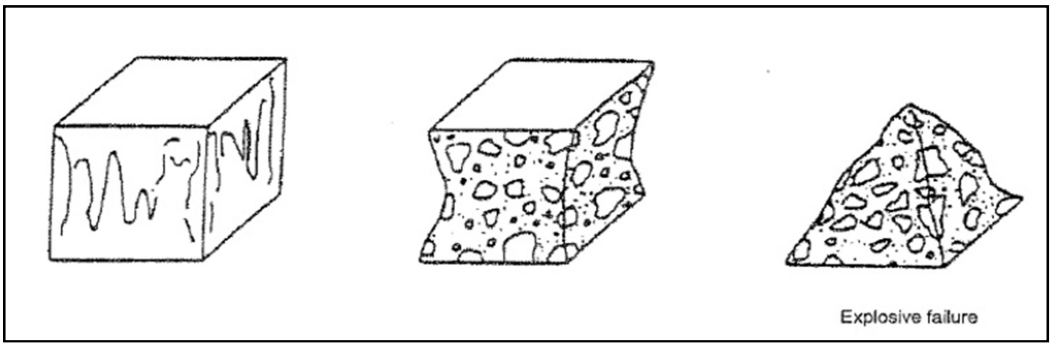
Σχήμα 2.1 **:** Τα δοκίμια πριν τη σκυροδέτηση

2.2 Υλικά

2.2.1 Σκυρόδεμα

Κατά τον χρόνο χύτευσης των προς δοκιμή πλακών ετοιμάστηκαν κυβικά δοκίμια σκυροδέματος μήκους πλευράς 15cm προς προσδιορισμό της πραγματικής αντοχής του. Το σκυρόδεμα των κύβων ήταν από το ίδιο μείγμα και σκληρύνθηκε κάτω από τις ίδιες συνθήκες όπως των πλακών.

Οι δοκιμές διεξήχθησαν σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 12390(Testing hardened concrete – Part 3 : Compressive strength of test specimens) με ικανοποιητικούς τύπους αστοχίας όπως στο Σχήμα 1.8.



Σχήμα 2.2 : Ικανοποιητικοί τύποι αστοχίας κυβικών δοκιμίων

Οι 9 από τις 12 πλάκες σκυροδετήθηκαν στις 30/11/2017 , ενώ οι υπόλοιπες τρεις στις 26/01/2018 . Από τις πλάκες της 1ης σκυροδέτησης προσδιορίστηκε η θλιπτική αντοχή 6 κύβων στις 28 ημέρες ($f_{cm,cube}$) και άλλων 6 κατά τη χρονική στιγμή διεξαγωγής των δοκιμών. Από τις πλάκες της 2ης σκυροδέτησης προσδιορίστηκε η θλιπτική αντοχή 6 κύβων στις 28 ημέρες που ήταν και η χρονική στιγμή διεξαγωγής των δοκιμών.

Οι αντοχές των δοκιμών και ο μέσος όρος αυτών δίνονται στον Πίνακα 1 . Το ειδικό βάρος των δοκιμών σε ξηρά κατάσταση μετρήθηκε ως 23,8 kN/m^3 .

Πίνακας 2.1 : Θλιπτικές αντοχές κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος πλακών

ΑΑ Δοκιμίου	1	2	3	4	5	6	ΜΟ
Ημερομηνία σκυροδέτησης 30.11.2017		Ημερομηνία δοκιμής 28.12.2017			Ηλικία σκυροδέματος 28 ημέρες		
$f_{c,cube}$	35,3	40,3	36,2	33,2	36,6	36,3	36,3

ΑΑ Δοκιμίου	1	2	3	4	5	6	ΜΟ
Ημερομηνία σκυροδέτησης 30.11.2017		Ημερομηνία δοκιμής 24.1.2018			Ηλικία σκυροδέματος 51 ημέρες		
$f_{c,cube}$	40,3	37,6	39,9	41,2	33,5	40,1	38,8

ΑΑ Δοκιμίου	1	2	3	4	5	6	ΜΟ
Ημερομηνία σκυροδέτησης 26.01.2018		Ημερομηνία δοκιμής 21.02.2018			Ηλικία σκυροδέματος 28 ημέρες		
$f_{c,cube}$	40,2	32,7	38,6	44,8	42,5	42,3	40,1

Τελικά προκύπτει μία μέση θλιπτική αντοχή των κυβικών δοκιμίων $f_{cm,cube}$= (36,3+38,8+40,1)=38,4 MPa με τυπική απόκλιση δείγματος s=3,356 MPa και χαρακτηριστική τιμή $f_{ck,cube}$=32,9 MPa

fck, cube = fcm, cube - 1.64*s

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})^2}{n}}$$

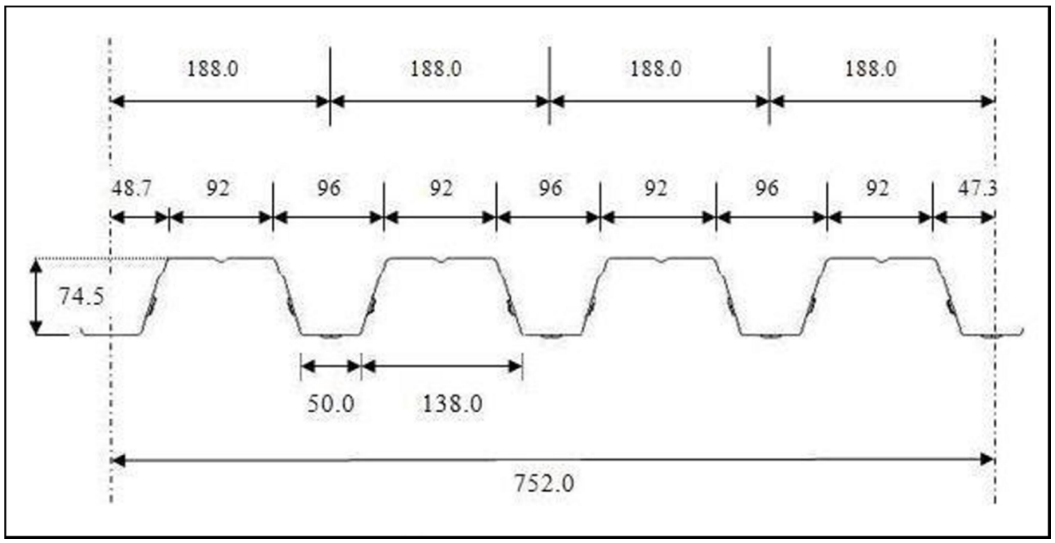
x̄ =fcm,cube μέση τιμή αντοχής

xi=fci,cube αντοχή κάθε δοκιμίου

n= 18 πλήθος δοκιμίων

Παρόλα αυτά, η χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος σχετίζεται με τη μέση θλιπτική αντοχή των κυλινδρικών δοκιμίων. Σύμφωνα με τον EN206-1 και ανάλογα με τις διαστάσεις των υπό εξέταση δοκιμίων, στην περίπτωση μας 150x150x150mm για τα κυβικά δοκίμια, καταλήγουμε ότι f_{ck}= $f_{ck,cylinder}$= 0,80 x $f_{ck,cube}$= 26,3MPa. Επομένως πρόκειται για σκυρόδεμα ποιότητας C25/30 .

2.2.2 Χαλυβδόφυλλο



Σχήμα 2.3 : Διαστάσεις διατομής του χαλυβδόφυλλου που εξετάσθηκε (σε mm)

Τα φύλλα είναι κατηγορίας δομικού χάλυβα S 320 με γαλβανική επίστρωση Z275 σύμφωνα με τον EN 10152. Για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του χάλυβα των φύλλων κατασκευάστηκαν 8 δοκίμια εφελκυσμού μορφής dogbone με διαστάσεις σύμφωνα με το EN ISO 6892-1. Τα δοκίμια αποκόπησαν από τα φύλλα που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα. Μετρήθηκε το πάχος των δοκιμίων σε 7 θέσεις και το πάχος της γαλβανικής επίστρωσης σε 10 θέσεις κάθε επιφάνειας.

Οι ονομαστικές διαστάσεις των δοκιμίων ήταν οι ακόλουθες:

- Πλάτος λαιμού b = 20 mm
- Πλάτος άκρων B = 27 mm
- Μήκος λαιμού L_c = 120 mm
- Συνολικό μήκος L_t = 314 mm

Πλην αυτών μετρήθηκε το πάχος των δοκιμίων σε 7 θέσεις και το πάχος της γαλβανικής επίστρωσης σε 10 θέσεις της άνω και κάτω επιφάνειας.

Η εκτέλεση των δοκιμών έγινε σε μηχανή τύπου INSTRON 300LX. Οι μέτρηση των ανηγμένων παραμορφώσεων έγινε με μικροκλίπ τύπου Instron 2630-113 σε μήκος αναφοράς 50/+50mm. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 2.4 .

Σχήμα 2.4: Διάταξη δοκιμών εφελκυσμού χάλυβα

Οι τιμές που αφορούν τα πάχη του μετάλλου, το όριο διαρροής, την εφελκυστική αντοχή και την ψευδαργυρικής επίστρωσης δίνονται στον Πίνακα 2.1 . Για τα πάχη δίνεται η μέση τιμή που προέκυψε από τις μετρήσεις κάθε δοκιμίου. Στον ίδιο Πίνακα δίνονται οι τιμές υπολογισμού αν ληφθεί υπόψη μόνο το πάχος του μετάλλου, όταν αφαιρεθεί το πάχος της επίστρωσης.

Πίνακας 2.1 : Μηχανικά χαρακτηριστικά του χάλυβα των φύλλων

	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	Μέση τιμή
Τιμές μετρήσεων	t [mm]	0,757	0,769	0,761	0,763	0,764	0,764	0,766	0,764	0,763
	f_y [MPa]	307,1	329,1	284,4	333,6	312,5	312,1	306,4	311,0	312,0
	f_u [MPa]	339,5	333,1	323,1	374,0	349,8	354,3	341,7	354,5	346,2
	t_{zinc} [μm]	27,69	29,26	28,91	29,17	28,56	29,63	27,04	26,10	28,30
Τιμές υπολογισμού	t_{core} [mm]	0,729	0,740	0,732	0,734	0,735	0,734	0,739	0,735	0,735
	f_{ypm} [MPa]	318,8	342,1	295,6	346,9	324,6	324,7	317,6	324,3	324,3
	f_u [MPa]	352,4	346,3	335,9	388,9	363,4	368,6	354,2	358,5	358,5

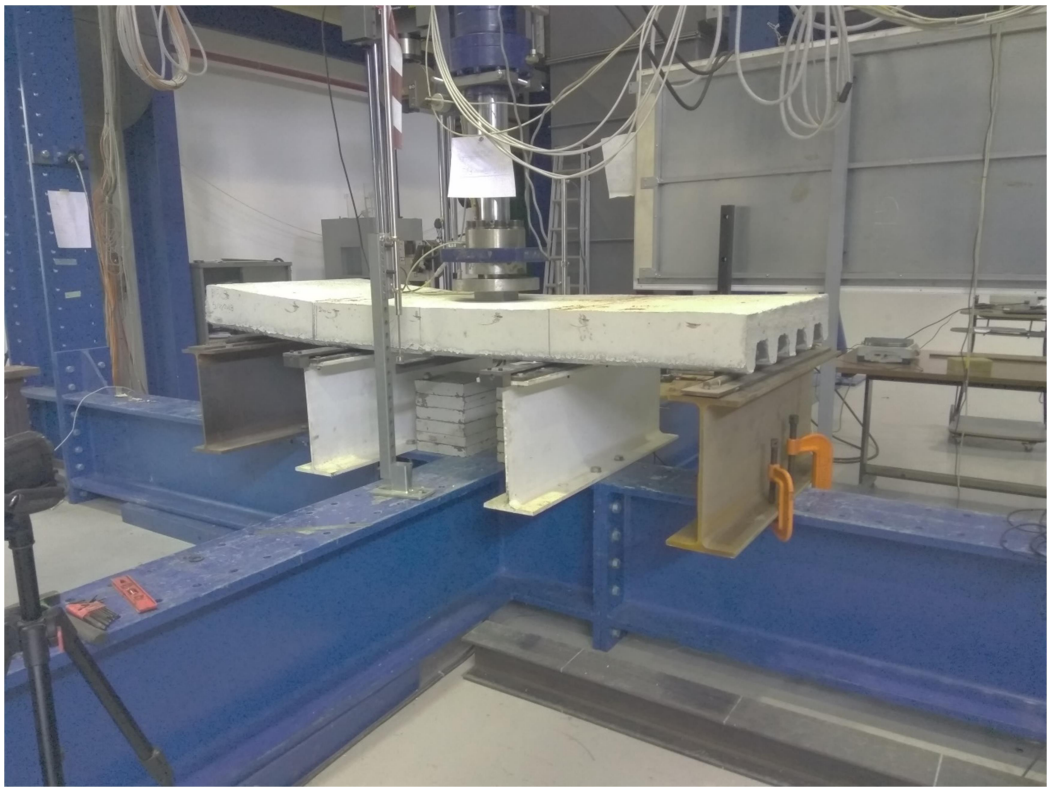
Επομένως, το χαρακτηριστικό όριο διαρροής του χάλυβα σύμφωνα με τις τιμές υπολογισμού δίνεται από τη σχέση $f_{ypk}=f_{ypm} - s$ με πλήθος δείγματος 8, τυπική απόκλιση s= 14,69 MPa και f_{ypm}= 324,3MPa . Τελικά f_{ypk}=309,6MPa

2.3 Πειραματική διάταξη

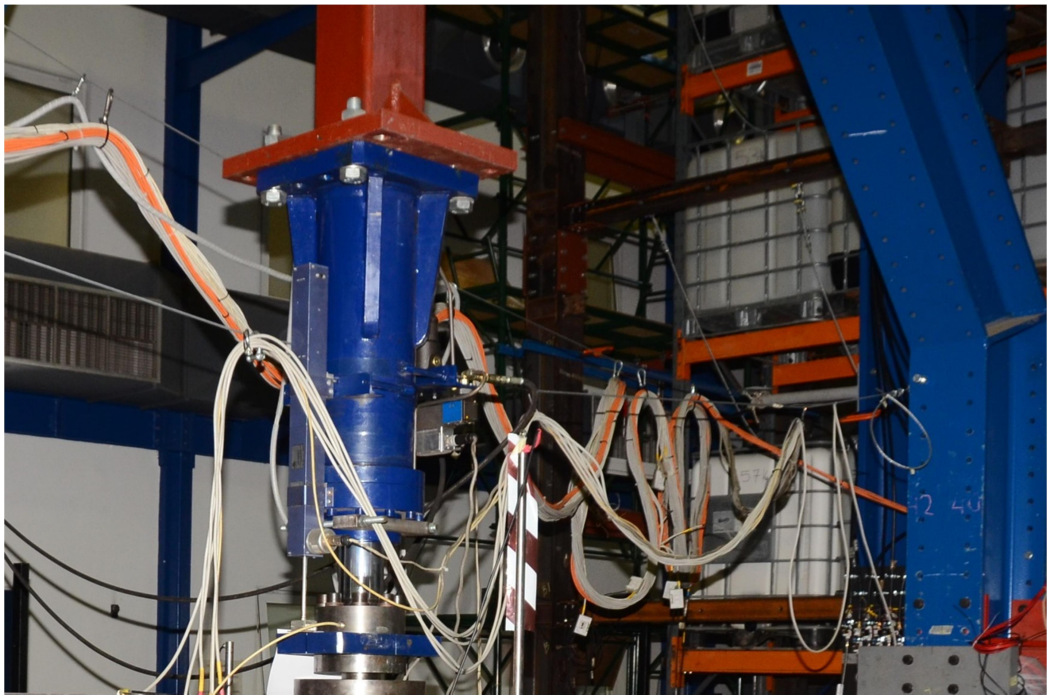
Τα πειραματικά δοκίμια ήταν σύμμικτες πλάκες με τραπεζοειδή χαλυβδόφυλλα γεωμετρίας όπως στο Σχήμα 2.3. Εκτελέσθηκαν 2 ομάδες δοκιμών, ομάδα 1 και 2, με διαστάσεις πλακιδίων επαφής διαστάσεων 130x100mm και 42x42mm αντιστοίχως (Σχήμα 2.7 & 2.8) . Σε κάθε σειρά εξετάσθηκαν και τα δύο πάχη πλακών 15 και 20 cm εντός μήκους πλάκας 840mm .

Τα πειράματα εκτελέστηκαν στο πλαίσιο δοκιμών του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών ΕΜΠ (Σχ. 2.5). Το κατακόρυφο φορτίο επιβάλλεται από υδραυλικό έμβολο ικανότητας 600 kN τύπου MALVASIA μέσω άκαμπτης μεταλλικής πλάκας κυκλικού σχήματος (Σχ. 2.6) σε μεταλλικά πλακίδια επαφής (Σχ. 2.7&2.8), το οποίο είναι τοποθετημένο στο κέντρο της πλάκας, σε περιοχή η οποία θεωρείται αδιατάραχτη και αυτό τονίζεται διότι είχαν προηγηθεί δοκιμές προσδιορισμού των συντελεστών m-k για τον υπολογισμό της αντοχής σε διαμήκη διάτμηση. Η στήριξη του δοκιμίου πραγματοποιείται αμφιέρειστα, αγνοώντας τα ακριανά εκατέρωθεν τμήματα που θεωρούνται ανενεργά λόγω αποκόλλησης, σχεδόν στα L/4 από κάθε άκρο όπως φαίνεται στο Σχ. 2.5 και υλοποιείται μέσω ειδικής κατασκευής που προσομοιώνει την άρθρωση, πάνω στην οποία τοποθετείται μία πλάκα τεφλόν επί της οποίας ολισθαίνει ελεύθερα το δοκίμιο (Σχ. 2.9). Να σημειωθεί ότι οι δύο ακριανές στηρίξεις που φαίνονται στο Σχήμα 2.5 δεν έρχονται σε επαφή με το δοκίμιο, ώστε να μην του αλλάξουν το στατικό προσομοίωμα, και απλά αποτελούν μία δικλείδα ασφαλείας των περιμετρικών οργάνων σε περίπτωση ψαθυρής αστοχίας.

Η φόρτιση επιβάλλεται οιονεί στατικά με ελεγχόμενη κατακόρυφη παραμόρφωση. Προς τούτο προσαρμόζεται ένα ηλεκτρονικό βελόμετρο στην πρέσα, το οποίο συνδέεται με Η/Υ . Μέσω του Η/Υ προγραμματίζεται η ιστορία φόρτισης και δίνονται οι απαιτούμενες εντολές για την επιβολή της παραμόρφωσης.

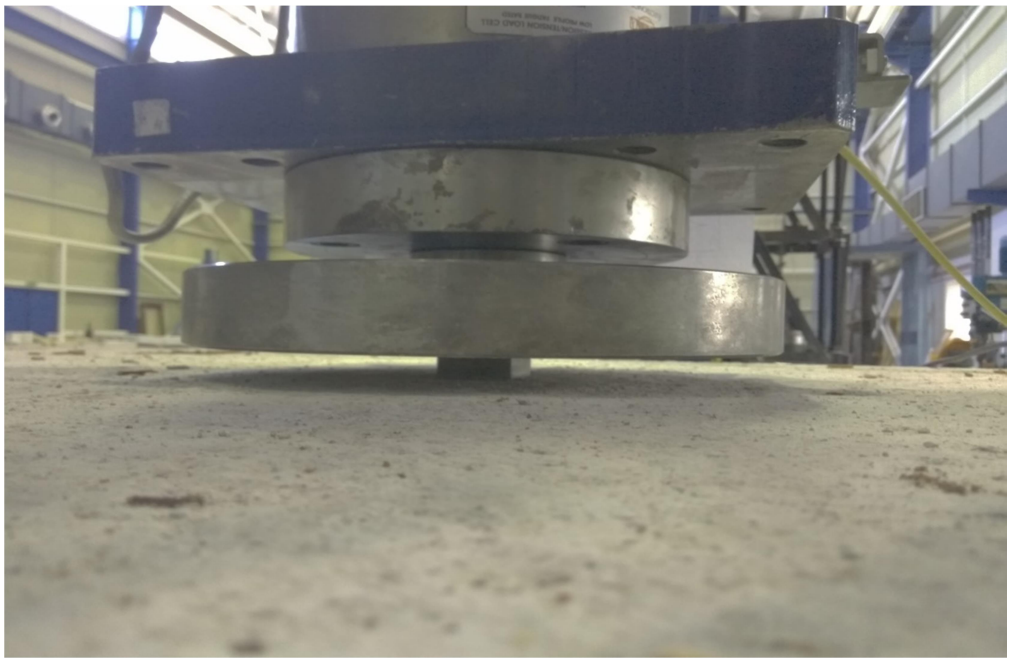


Σχήμα 2.5 : Γενική διάταξη πειράματος



Σχήμα 2.6 : Πρέσα, δυναμοκυψέλη και πλάκα εφαρμογής φορτίου

Σχήμα 2.7 : πλακίδιο επαφής διαστάσεων 130x100mm ($1^{η}$ ομάδα πειραμάτων)



Σχήμα 2.8 : Πλακίδιο επαφής διαστάσεων 42x42mm ($2^{η}$ ομάδα πειραμάτων)

Σχήμα 2.9 : Υλοποίηση αρθρωτής στήριξης

Η μετρική διάταξη περιλαμβάνει (Σχ. 5) :

- Μία δυναμοκυψέλη (load cell) ευαισθησίας 5 N προσαρμοσμένη στη πρέσα προς μέτρηση της επιβαλλόμενης δύναμης (Σχ. 6)
- Δύο ηλεκτρονικά βελόμετρα LVDT, που μετρούν το μεσαίο βέλος και από τις δύο μεριές του δοκιμίου (Σχ. 7)

Όλα τα όργανα είναι συνδεδεμένα με Η/Υ προς αυτόματη καταγραφή και αποθήκευση των μετρήσεων (Σχ. 8).

Το συνολικό βάρος της διάταξης επιβολής φορτίου είναι 31,6 kg (0,316 kN) ή 28,1 kg (0,281 kN) , αναλυόμενο ως ακολούθως :

- Μεταλλική πλάκα άρθρωσης : 27,8 kg
- Πλακίδιο επαφής διαστάσεων 130x100mm : 3,8 kg
- Πλακίδιο επαφής διαστάσεων 40x40mm : 0,3 kg

Σχήμα 2.10 : Μέτρηση βέλους στο μέσον του δοκιμίου με LVDT

Σχήμα 2.11 : Η/Υ ελέγχου, καταγραφής και αποθήκευσης

2.4 Διαδικασία Φόρτισης

Τα δοκίμια χωρίζονται σε δύο ομάδες ανάλογα με τα πλακίδια εφαρμογής του φορτίου (Σχήμα 2.7&2.8) . Στη πρώτη ομάδα με πλακίδιο διαστάσεων 130x100mm εξετάσθηκαν συνολικά τέσσερις πλάκες, δύο πάχους 15cm και δύο 20cm . Αντίστοιχα για τη δεύτερη ομάδα με πλακίδιο διαστάσεων 42x42mm εξετάσθηκε μία πλάκα για τα δύο διαθέσιμα πάχη .

Κάθε δοκίμιο υποβάλλεται σε στατική φόρτιση με προοδευτικά αυξανόμενο φορτίο μέχρι αστοχίας. Ως αστοχία ορίσθηκε ο συνδυασμός αδυναμίας παραλαβής μεγαλύτερης δύναμης από αυτή που σημειώθηκε αρχικά και η ανάπτυξη μεγάλων πλαστικών στροφών περί το κέντρο του δοκιμίου, με αποτέλεσμα την εκτεταμένη ανάπτυξη κατακόρυφων ρωγμών. Από τη δοκιμή αυτή προσδιορίζεται το φορτίο αστοχίας P_u (=επιβαλλόμενο φορτίο υδραυλικού εμβόλου). Το φορτίο αστοχίας P_u=P_{max} ορίζεται ως το μέγιστο φορτίο του πειράματος.

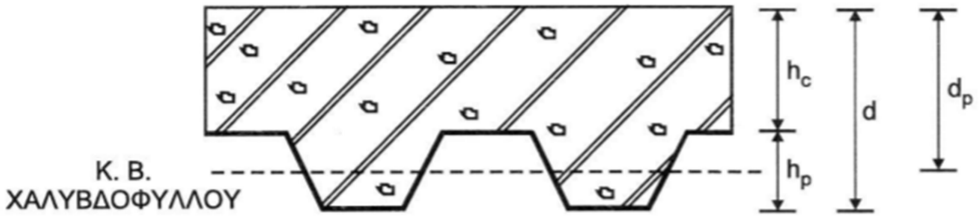
Πίνακας 2.2 : Η διαδικασία φόρτισης και η ονομασία των δοκιμίων με τη σειρά που εξετάσθηκαν, καθώς και οι παράμετροι m-k που τους αντιστοιχούν

Ονομασία δοκιμίου	Μήκος	Πάχος	Ομάδα	Τύπος Φόρτισης	Παράμετροι (m , k)
B15-3/1	840mm	15cm	$1^η$	Στατική	(78.50 , 0.00)
B20-3/1	840mm	20cm	$1^η$	Στατική	(96.30 , -0.04)
B20-2/1	840mm	20cm	$1^η$	Στατική	(96.30 , -0.04)
B15-2/1	840mm	15cm	$1^η$	Στατική	(78.50 , 0.00)
B15-1/2	840mm	15cm	$2^η$	Στατική	(78.50 , 0.00)
B20-1/2	840mm	20cm	$2^η$	Στατική	(96.30 , -0.04)

3. Αντοχές Σύμμικτων πλακών κατά τον Ευρωκώδικα 2 και 4

Οι σύμμικτες πλάκες υποβάλλονται σε φορτία τόσο κάθετα όσο και παράλληλα στο επίπεδο τους. Στην πρώτη περίπτωση λειτουργούν ως «πλάκες», στη δεύτερη περίπτωση ως «διαφράγματα». Για φορτία κάθετα στο επίπεδο τους λειτουργούν ως διέρειστες πλάκες. Από στατική άποψη συμπεριφέρονται ως «δοκοί» για τις οποίες πρέπει να προσδιοριστούν οι ροπές και τέμνουσες αντοχής καθώς και επειδή πρόκειται για σύμμικτα στοιχεία, η μεταφορά της διαμήκους διάτμησης. Στην περίπτωση επιβολής σημαντικών συγκεντρωμένων δυνάμεων υπάρχει κίνδυνος διάτρησης της πλάκας, έναντι της οποίας πρέπει να προσδιοριστεί η αντίσταση.

Για τα ελάχιστα πάχη σύμμικτων πλακών ισχύουν οι εξής περιορισμοί :



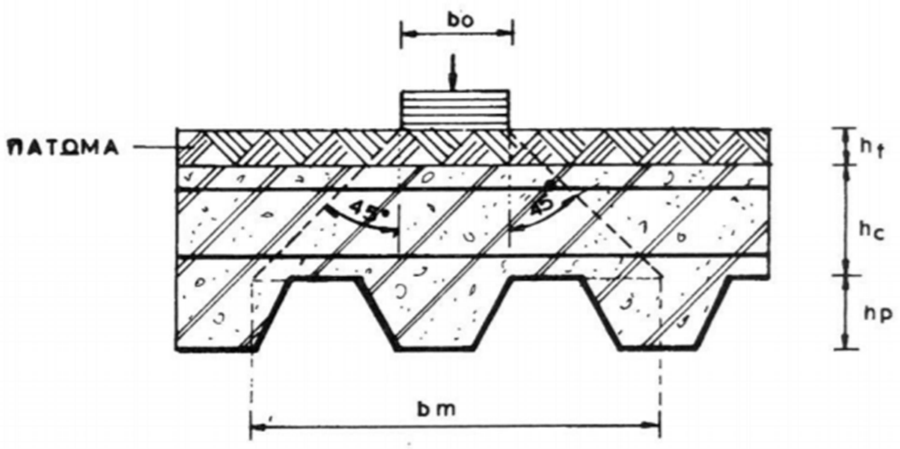
Σχήμα 3.1 : Ελάχιστα πάχη σύμμικτων πλακών

- Συνολικό ελάχιστο πάχος: min d = 80mm
- Ελάχιστο πάχος πάνω από το χαλυβδόφυλλο: min h_c = 40mm
- Εάν οι αυλακώσεις της πλάκας είναι παράλληλες στη διεύθυνση της σιδηροδοκού και η πλάκα συμμετέχει στη λειτουργία της δοκού, ή αν η πλάκα πρέπει να εξασφαλίζει διαφραγματική λειτουργία – πράγμα που ισχύει πάντα στα κτίρια – τότε τα αντίστοιχα ελάχιστα πάχη είναι:

min d = 90mm, min h_c = 50mm

Επίσης, ο κανονισμός επιβάλλει όπλιση της πλάκας με εσχάρα με στόχο την ισότροπη κατανομή των φορτίων και προς τις δύο διευθύνσεις. Συνίσταται ο οπλισμός αυτός να είναι στην περιοχή της άνω παρειάς της πλάκας προς αποφυγή μικρορηγματώσεων λόγω ρεολογικών φαινομένων, υγρασίας κλπ. Συχνά όμως για λόγους κατασκευαστικής απλότητας ο οπλισμός εδράζεται επί των χαλυβδόφυλλων. Έτσι εντός του ύψους h_c του σκυροδέματος πρέπει να τοποθετείται διαμήκης και εγκάρσιος οπλισμός, ελάχιστου εμβαδού 80 mm^2/m ανά κατεύθυνση. Η ελάχιστη απόσταση των ράβδων είναι η ελάχιστη τιμή μεταξύ 2h και 350mm.

Για κατανεμημένα φορτία, η ανάλυση βασίζεται σε πλάτος πλάκας ίσο με το ένα φάτνωμα του χαλυβδόφυλλου. Συγκεντρωμένα φορτία κατανέμονται υπό γωνία 45°. Το πλάτος κατανομής τους στην άνω στάθμη του χαλυβδόφυλλου είναι συνεπώς ίσο με :



Σχήμα 3.2 : Κατανομή συγκεντρωμένων φορτίων

$b_m = b_0 + 2(h_c + h_f)$

όπου :

b_0 = πλάτος συγκεντρωμένου φορτίου

h_c,h_f = ύψος πλάκας πάνω από το χαλυβδόφυλλο και το ύψος πατώματος (επίστρωσης) αντιστοίχως

Αν $\frac{hp}{h} \leq 0{,}6$ το ανωτέρω πλάτος αυξάνεται περαιτέρω ως ακολούθως :

α) για τις ροπές κάμψης και την διαμήκη διάτμηση :

- Αμφιέρειστες δοκοί και ακραίο φάτνωμα συνεχών δοκών :

$b_{em} = b_m + 2\ L_p[1-(L_p/L)] \leq$ πλάτος πλάκας

- Εσωτερικά φατνώματα συνεχώς δοκών :

$b_{em} = b_m + 1{,}33\ L_p[1-(L_p/L)] \leq$ πλάτος πλάκας

β) για τις τέμνουσες :

$b_{ev} = b_m + L_p[1-(L_p/L)] \leq$ πλάτος πλάκας

όπου :

L_p = απόσταση συγκεντρωμένου φορτίου από το πλησιέστερο στήριγμα.

L = άνοιγμα πλάκας στο υπόψη φάτνωμα.

Σε περίπτωση που συγκεντρωμένα ή κατανεμημένα φορτία με χαρακτηριστικές τιμές μικρότερες από 7,5 kN και 5,0 kN/m^2 αντίστοιχα τοποθετείται χωρίς περαιτέρω υπολογισμούς εγκάρσιος οπλισμός με ελάχιστο ποσοστό 0,2%, ανηγμένο στο πάχος της πλάκας πάω από το χαλυβδόφυλλο. Ο οπλισμός αυτός εκτείνεται σε πλάτος b_{em} και έχει μήκη αγκύρωσης πέραν του πλάτους αυτού ίσα με lb. Τυχόν υπάρχω εγκάρσιος οπλισμός πλάκας από άλλους λόγους συνυπολογίζεται στον ανωτέρω ελάχιστο οπλισμό. Για μεγαλύτερα φορτία γίνεται ακριβέστερος υπολογισμός του εγκάρσιου οπλισμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.

Στις επόμενες υποπαραγράφους θα παρουσιασθεί η μεθοδολογία προσδιορισμού των σχετικών αντοχών και ο υπολογισμός τους για τις υπό εξέταση πλάκες στη βάση των προδιαγραφών του Ευρωκώδικα 2&4 εντός των πλατών κατανομής(b_{em},b_{ev}) των πλακών που υπολογίσθηκαν σύμφωνα με τα παραπάνω.

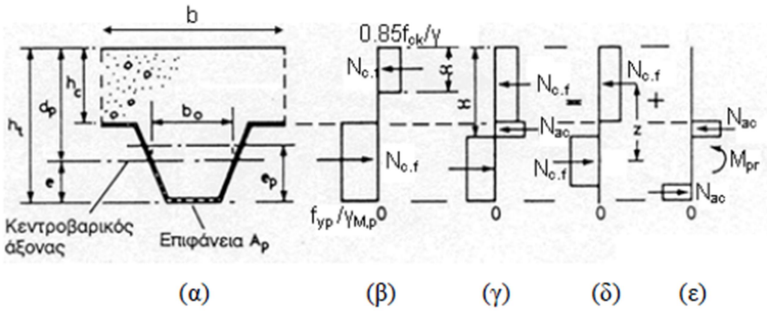
Πίνακας 3.1 : Πλάτη κατανομής φορτίων λόγω συγκεντρωμένων φορτίων

	B15-3/1		B20-3/1		B20-2/1		B15-2/1		B15-1/2		B20-1/2	
h_p(mm)	74,5		74,5		74,5		74,5		74,5		74,5	
h_c (mm)	82,5		127,5		135		75,5		83		125,5	
h(mm)	157		202		209,5		150		157,5		200	
h_p/h	0,47		0,37		0,36		0,50		0,47		0,37	
πλάτος πλάκας b (mm)	820,00		822,50		819,00		816,50		818,50		820,00	
L (mm)	840		840		840		840		840		840	
L_p (mm)	420		420		420		420		420		420	
b_m (mm) 1^η σειρα δοκιμών	265		355		370		251					
b_m (mm) 2^η σειρά δοκιμών									208		293	
b_{em} (mm) 1^η σειρα δοκιμών	685	< b	775	< b	790	< b	671	< b				
b_{em} (mm) 2^η σειρα δοκιμών									628	< b	713	< b
b_{ev} (mm) 1^η σειρα δοκιμών	475	< b	565	< b	580	< b	461	< b				
b_{ev} (mm) 2^η σειρα δοκιμών									418	< b	503	< b

Όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 2.3 το πλάτος του συγκεντρωμένου φορτίου b_o κάθετα στη διεύθυνση του ανοίγματος για την 1^η και 2^η σειρά δοκιμών είναι 100mm και 42mm αντιστοίχα.

3.1 Αντοχή έναντι θετικών ροπών κάμψης

Η παραλαβή θετικών ροπών κάμψης γίνεται μέσω θλίψης του σκυροδέματος και εφελκυσμού του χαλυβδόφυλλου. Η σχετική πλαστική ροπή αντοχής βρίσκεται εξετάζοντας ένα φάτνωμα πλάτους b ίσο με ένα "μήκος κύματος" των αυλακωτών χαλυβδόφυλλων. Για πλήρη διατμητική σύνδεση ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται συνήθως στο σκυρόδεμα, ενώ για μερική σύνδεση υπάρχει πάντα ένας ουδέτερος άξονας στο χαλυβδόφυλλο. Στην τελευταία περίπτωση μάλιστα τμήμα των χαλυβδόφυλλων είναι υπό θλίψη και ενδέχεται να υποστεί τοπικό λυγισμό, για αυτό και στο τμήμα αυτό τα επίπεδα στοιχεία των χαλυβδόφυλλων λαμβάνονται με ισοδύναμα πλάτη.

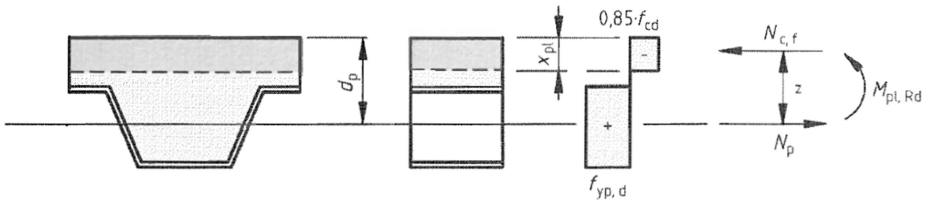


Σχήμα 3.3 : Υπολογισμός σύμμικτης πλάκας σε κάμψη

Για λόγους όπως οι παραπάνω, τόσο η ισοδύναμη επιφάνεια ανά μέτρο μήκους των χαλυβδόφυλλων, A_p, όσο και η απόσταση του κέντρου βάρους από την κάτω ακραία ίνα, e, καθορίζονται συνήθως από πειράματα, από τα οποία προκύπτει επιπλέον και το ύψος του πλαστικού ουδέτερου άξονα, e_p

3.1.1 Ουδέτερος άξονας πάνω από τα χαλυβδόφυλλα

Αποτελεί την πιο συνηθισμένη περίπτωση σύμμικτων πλακών, ιδιαίτερα όταν το ύψος του χαλυβδόφυλλου είναι μικρό.



Σχήμα 3.4 : Κατανομή τάσεων στη διατομή σύμμικτης πλάκας για θετικές ροπές. Ουδέτερος άξονας πάνω από τα χαλυβδόφυλλα.

Θλιπτική δύναμη σκυροδέματος : $N_{cf} = b \cdot x_{pl} \cdot 0,85 \cdot f_{cd}$

Εφελκυστική δύναμη χαλυβ/λλων : $N_p = A_p \cdot f_{yp}$

Θέση ούδετερου άξονα από τη συνθήκη ισοδυναμίας των εσωτερικών δυνάμεων :

$$N_{cf} = N_p \rightarrow x_{pl} = \frac{Ap \cdot fyp,d}{b \cdot 0,85 \cdot fcd} \leq h_c$$

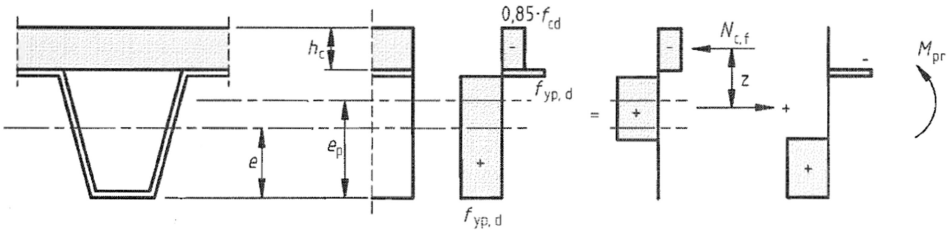
Πλαστική ροπή αντοχής : $M_{pl,Rd}^{+} = N_p \cdot \left(dp - \frac{xpl}{2}\right)$

Όπου :

Ap = εμβαδό χάλυβα χαλυβδόφυλλων

dp = θέση κέντρου βάρους χαλυβδόφυλλου από την άνω θλιβόμενη ίνα

3.1.2 Ουδέτερος άξονας μέσα στα χαλυβδόφυλλα



Σχήμα 3.5 : Κατανομή τάσεων στη διατομή σύμμικτης πλάκας για θετικές ροπές και τον ουδέτερο άξονα μέσα στο χαλυβδόφυλλο.

Ο υπολογισμός γίνεται με βάση το διάγραμμα τάσεων του σχήματος 3.5. Τα μεγέθη z και Mpr προσδιορίζονται προσεγγιστικός από τις ακόλουθες σχέσεις :

$$z = h - 0{,}5h_c - e_p + (e_p - e)\cdot\frac{Ncf}{Np}$$

$$M_{pr} = 1{,}25 \cdot M_{pa} \cdot \left(1 - \frac{Ncf}{Np}\right) \leq M_{pa}$$

Όπου:

N_{cf} , N_p : από τις εξισώσεις παραπάνω (με $x_{pl} = h_c$)

M_{pa} : πλαστική ροπή χαλυβδόφυλλου

Η πλαστική οριακή ροπή είναι τότε ίση με:

$$M_{pl.Rd}^{+} = N_{cf} \cdot z + M_{pr}$$

3.1.3 Αντοχές έναντι θετικών ροπών κάμψης των υπό εξέταση δοκιμίων

Για τον υπολογισμό των αντοχών σε κάμψη των δοκιμίων εισήχθησαν τα δεδομένα των υπό εξέταση σύμμικτων πλακών του πίνακα 3.2 στο πρόγραμμα Microsoft Excel. Με χρήση των κατάλληλων ανωτέρω εξισώσεων προέκυψαν τα αποτελέσματα όπως φαίνονται στον πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.2 : Δεδομένα των σύμμικτων πλακών που απαιτούνται για την κάμψη

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΩΝ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΠΛΑΚΩΝ										
	A_p(cm^2/m)	f_{yk}(MPa)	f_{ck}(MPa)	h_c(cm)	h_p(cm)	h_{tot}(cm)	d_p(cm)	e(cm)	I_y (cm^4/m)	b_{em} (cm)
B15-3/1	12,76	309,61	26,31	8,25	7,45	15,70	11,98	3,73	110,01	68,50
B20-3/1	12,76	309,61	26,31	12,75	7,45	20,20	16,48	3,73	110,01	77,50
B20-2/1	12,76	309,61	26,31	13,50	7,45	20,95	17,23	3,73	110,01	79,00
B15-2/1	12,76	309,61	26,31	7,55	7,45	15,00	11,28	3,73	110,01	67,10
B15-1/2	12,76	309,61	26,31	8,30	7,45	15,75	12,03	3,73	110,01	62,80
B20-1/2	12,76	309,61	26,31	12,55	7,45	20,00	16,28	3,73	110,01	71,30

Πίνακας 3.3 : Υπολογισμός αντοχών έναντι κάμψεως των υπό εξέταση δοκιμίων

1η Περίπτωση: Ουδέτερος άξονας πάνω από τα χαλυβδόφυλλα(συνηθέστερο)														
		B15-3/1		B20-3/1		B20-2/1		B15-2/1		B15-1/2		B20-1/2	
Θλιπτική δύναμη σκυρ/τος	Ncf (kN) =	270,62		306,17		312,10		265,09		248,10		281,68	
Εφελκυστική δύναμη	Np (kN) =	270,62		306,17		312,10		265,09		248,10		281,68	
Θέση ουδέτερου άξονα από την πάνω θλιβόμενη ίνα :	x_{pl}(cm) =	1,77	8,25	1,77	12,75	1,77	13,5	1,77	7,55	1,77	8,3	1,77	12,6
		σωστό	< h_c	σωστό	< h_c	σωστό	< h_c	σωστό	< h_c	σωστό	< h_c	σωστό	< h_c
Πλαστική ροπή αντοχής :	$M_{pl,Rd}$ (kNm) =	30,02		47,74		51,00		27,55		27,64		43,36	

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονισθεί ότι για τον υπολογισμό των πιο πάνω μεγεθών αλλά και των αντοχών που θα ακολουθήσουν δεν χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές

ασφαλείας των υλικών, με σκοπό να προσεγγιστούν οι πραγματικές αντοχές σε κάμψη, καθότι δεν υπεισέρχεται πρόβλημα σχεδιασμού αλλά σύγκρισης αυτών των τιμών με τις πειραματικές που θα παρουσιαστούν στο Κεφ.5

3.2 Αντοχή έναντι εγκάρσιας διάτμησης - τέμνουσας

Η εγκάρσια τέμνουσα σε σύμμικτες πλάκες παραλαμβάνεται κυρίως από τις νευρώσεις του σκυροδέματος, για αυτό και οι σχετικές μέθοδοι υπολογισμού βασίζονται σε αυτές που αφορούν σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος μορφής Τ. Για τον υπολογισμό της τέμνουσας δύναμης σχεδιασμού ανά μονάδα πλάτους b , $V_{v,Rd}$, ο Ευρωκώδικας 4 παραπέμπει στον Ευρωκώδικα 2 για μέλη χωρίς οπλισμό διάτμησης, βάσει του οποίου προκύπτει :

$$V_{v.Rd} = \frac{b_o d_p}{b}\left[\frac{0.18}{\gamma_c} k(100\rho_1 f_{ck})^{1/3}\right] \geq \frac{b_o d_p}{b} 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$$

όπου

$$k = \min\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d_p\,(mm)}}, 2\right) \qquad \rho_1 = \min\left(\frac{A_{po}}{b_o d_p}, 0.02\right)$$

Υπενθυμίζεται ότι b_o = μέσο πάχος νευρώσεων, b = απόσταση νευρώσεων, d_p = απόσταση κεντροβαρικού άξονα χαλυβδόφυλλου από την ακραία θλιβόμενη ίνα και f_{ck} = χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος (σε N/mm2). Επίσης, στην παραπάνω σχέση A_{po} = ενεργή επιφάνεια των χαλυβδόφυλλων σε εφελκυσμό εντός του πλάτους b_o (συνήθως ίση με την επιφάνεια εντός του πλάτους αυτού). Η αντοχή των σύμμικτων πλακών σε εγκάρσια διάτμηση είναι κρίσιμη σε σπάνιες περιπτώσεις, όπως θα μπορούσαν να είναι π.χ. αυτές που αντιστοιχούν σε πλάκες με μικρό λόγο μήκους προς πάχος.

3.2.1 Αντοχές έναντι εγκάρσιας διάτμησης - τέμνουσας των υπό εξέταση δοκιμίων

Πίνακας 3.4 : Αντοχές των υπό εξέταση σύμμικτων πλακών έναντι τέμνουσας

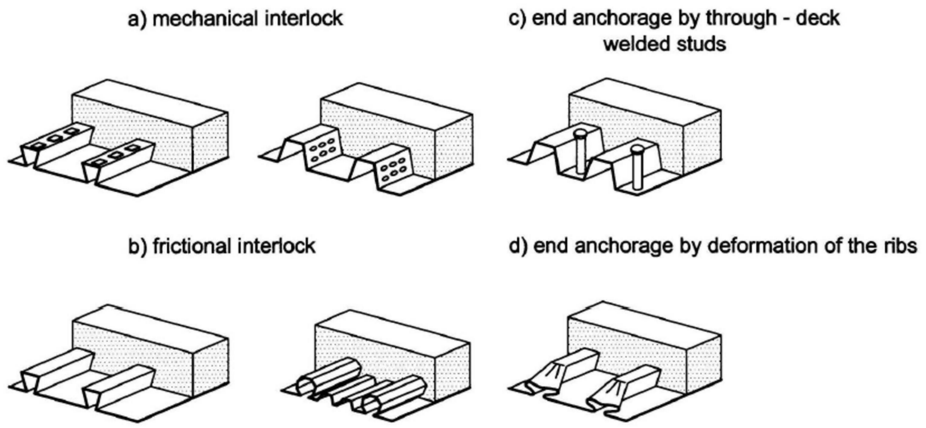
Αντοχή έναντι τέμνουσας $V_{v,Rd}=V_{Rd,c}$							
		B15-3/1	B20-3/1	B20-2/1	B15-2/1	B15-1/2	B20-1/2
Μέσο πλάτος κυψέλης	b_o (mm):	73	73	73	73	73	73
Θέση Κ.Β χαλυβδόφυλλου από την ακραία θλιβόμενη ίνα	d_p (mm):	119,75	164,75	172,25	112,75	120,25	162,75
Πλάτος αναφοράς χαλυβ/λου	b (m):	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188
Συντελεστής k	k :	2	2	2	2	2	2
Ποιότητα σκυροδέματος	f_{ck} (MPa):	26,31	26,31	26,31	26,31	26,31	26,31
Εμβαδόν χαλυβδόφυλλου εντός του b_o	A_{po} (mm^2):	95,98	95,98	95,98	95,98	95,98	95,98
Ποσοστό εφελκυόμενου οπλισμού	ρ_l :	0,01098	0,00798	0,00763	0,01166	0,01093	0,00808
Αντοχή έναντι τέμνουσας $V_{v,Rd}=V_{Rd,c}$	$V_{v,Rd}$ (N/m) :	51361,8	63534,1	65448,0	49340,2	51504,7	63018,9
πλάτος κατανομής των υπό εξέταση πλακών	b_{ev} (m) :	0,4750	0,5650	0,5800	0,4610	0,4180	0,5030
Αντοχή έναντι τέμνουσας $V_{v,Rd}=V_{Rd,c}$ (σε μία διατομή της πλάκας κατά μήκος)	$V_{v,Rd}$ (kN) :	24,40	35,90	37,96	22,75	21,53	31,70

3.3 Αντοχή έναντι διαμήκους διάτμησης

Στη διεπιφάνεια χαλυβδόφυλλου – σκυροδέματος σε μία σύμμικτη πλάκα αναπτύσσεται διαμήκης διάτμησης, η παραλαβή της οποίας είναι απαραίτητη προϋπόθεση για να μην υπάρχει ολίσθηση μεταξύ των στοιχείων σύμμιξης και να εξασφαλίζεται η κοινή σύμμικτη λειτουργία.

Η διαμήκης διάτμηση μεταξύ ενός χαλυβδόφυλλου και της πλάκας από σκυρόδεμα επηρεάζεται από τρείς παράγοντες. Αρχικά, η συνάφεια μεταξύ των δύο υλικών, δηλαδή η φυσική τους συνεργασία συνεισφέρει σημαντικά στην αντοχή έναντι διαμήκους διάτμησης. Αυτή όμως δεν μπορεί να είναι αξιόπιστη εκτός εάν αποφευχθεί η αποκόλληση της διεπιφάνειας των δύο υλικών μέσω κατάλληλων σχηματισμών στο χαλυβδόφυλλο. Αυτός ο τύπος διατμητικής σύνδεσης είναι γνωστός ως «σύνδεσμος τριβής» (‘frictional’ interlock). Ο δεύτερος παράγοντας είναι γνωστός ως «μηχανικός σύνδεσμος» (‘mechanical’ interlock), που παρέχεται μέσω πρεσσαριστών αυλακώσεων (εγκάρσιων ή λοξών) ή εξογκωμάτων (embossments) στα επάνω πέλματα ή/και τις παρειές του χαλυβδόφυλλου. Η αποτελεσματικότητα αυτών των αναγλύφων εξαρτάται αποκλειστικά από το βάθος τους, το οποίο πρέπει

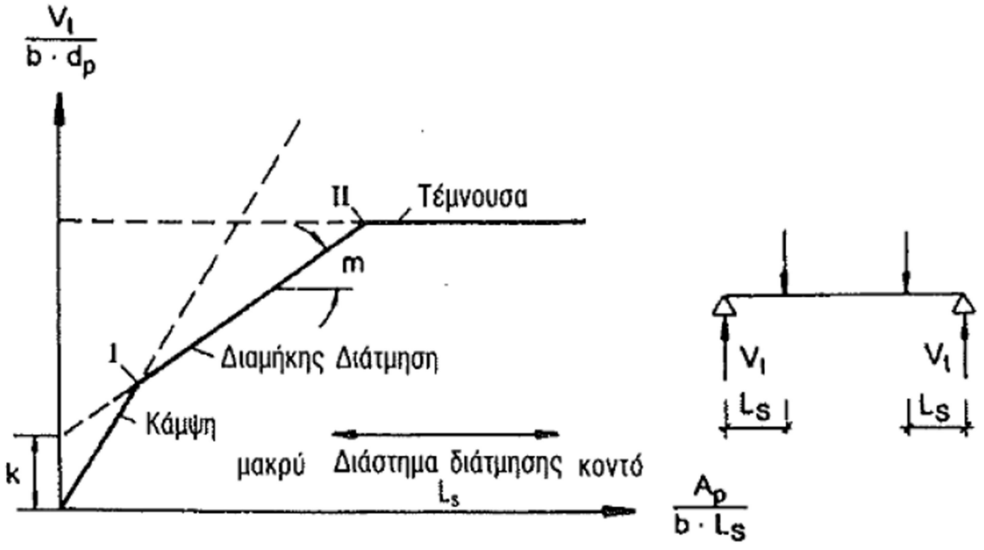
να ελέγχεται με ακρίβεια κατά την κατασκευή. Ο τρίτος τύπος διαμήκους σύνδεσης των σύμμικτων πλακών είναι η «ακραία αγκύρωση» (end anchorage). Αυτή βρίσκεται στο άκρο της πλάκας, όπου το χαλυβδόφυλλο εδράζεται πάνω στην μεταλλική δοκό, και αγκυρώνεται σε αυτή με συγκολλημένους ήλους κεφαλής, ή με σφυρήλατα άκρα (μόνο στην περίπτωση χαλυβδόφυλλων φατνώματος «χελιδονοουράς»)



Σχήμα 3.6 : Διάφοροι τρόποι εξασφάλισης διατμητικού συνδέσμου μεταξύ χαλυβδόφυλλων – σκυροδέματος.

3.3.1 Σύμμικτες πλάκες χωρίς ακραία αγκύρωση με τη μέθοδο m-k

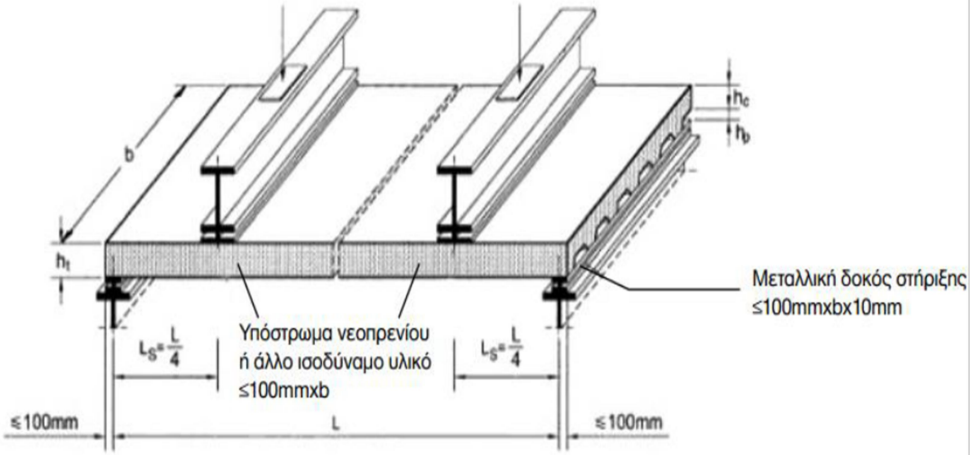
Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 4, μία από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο αντοχής σε διαμήκη διάτμηση σύμμικτων πλακών είναι η μέθοδος «m-k». Πρόκειται για ημι-εμπειρική μέθοδο, η οποία δεν βασίζεται σε κάποιο μηχανικό μοντέλο αντοχής ή αριθμητική ανάλυση. Στο Σχήμα 3.7 απεικονίζονται οι τρείς κυριότερες μορφές αστοχίας σύμμικτων πλακών, για τις οποίες απαιτείται έλεγχος αντοχής.



Σχήμα 3.7 : Πιθανές μορφές αστοχίας και η μέθοδος «m-k».

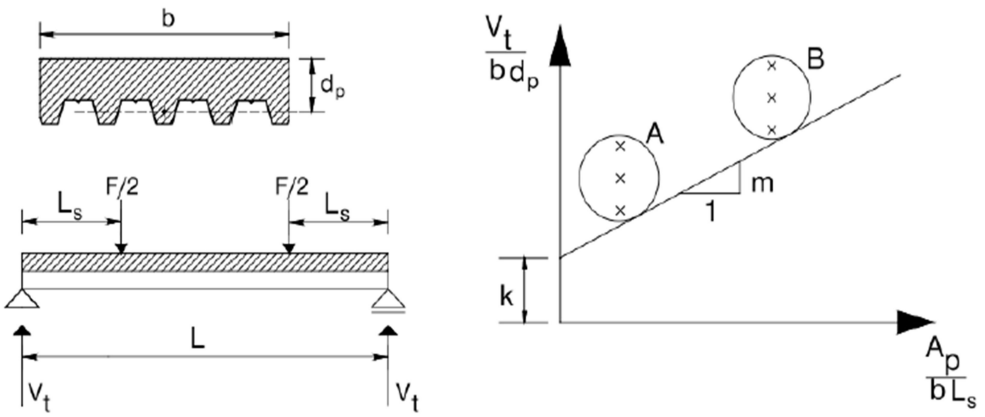
Στο παραπάνω σχήμα η ευθεία I-II αναπαριστά απλουστευτικά την περιοχή αντοχής σε διαμήκη διάτμηση, από όπου παίρνουμε τις παραμέτρους m και k. Το m είναι η κλίση της ευθείας αυτής ενώ το k το σημείο τομής αυτής με τον άξονα των τεταγμένων. Η ευθεία αυτή, άρα και οι τιμές των παραμέτρων, προκύπτουν από εργαστηριακές δοκιμές, οι οποίες αναλύονται στη συνέχεια, και έχουν άμεση εφαρμογή στα πλαίσια της διαστασιολόγησης. Η καμπύλη του Σχήματος 3.7 λαμβάνει υπόψη την επίδραση της διαμήκους ολίσθησης για αυτό και δεν είναι ίση με την διατμητική αντοχή V_{Rd}.

Η πειραματική διαδικασία για τον προσδιορισμό των παραμέτρων m-k είναι συγκεκριμένη και περιγράφεται αναλυτικά στον Ευρωκώδικα 4. Τα δοκίμια είναι σύμμικτες πλάκες σε κλίμακα 1:1, με διαστάσεις που προκύπτουν από το Σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8 : Πειραματική διάταξη για τον υπολογισμό των συντελεστών m & k.

Η αμφιέρειστη πλάκα φορτίζεται με δύο συγκεντρωμένα φορτία σε ίση απόσταση από τις στηρίξεις, ούτως ώστε το διατμητικό άνοιγμα του φορέα να είναι L_s=L/4. Διεξάγονται δύο σειρές πειραμάτων (A,B), κάθε μία από τις οποίες περιλαμβάνει τρία δοκίμια. Ένα από τα τρία δοκίμια της κάθε σειράς υποβάλλεται σε δοκιμή με στατική φόρτιση (χωρίς την κυκλική φόρτιση) ώστε να προσδιοριστεί η τιμή του κυκλικού φορτίου W_t για τα άλλα δύο δοκίμια. Στη σειρά A τα δοκίμια έχουν μεγάλο διατμητικό άνοιγμα ενώ στη σειρά B μικρό διατμητικό άνοιγμα. Έτσι οι πλάκες που δεν αντιστοιχούν στην στατική φόρτιση υποβάλλονται κατ' αρχήν σε 5000 κύκλους φόρτισης που διαρκούν περίπου 21 ώρες, δηλαδή έχουν κύκλο T=16sec(4sec φόρτιση ~ 4sec σταθεροποίηση ~ 4sec αποφόρτιση ~ 4sec σταθεροποίηση στην αρχική θέση), με άνω και κάτω όριο του επιβαλλόμενου φορτίου το 0,2W_t και 0,6W_t αντίστοιχα, όπου W_t το φορτίο αστοχίας που έχει μετρηθεί σε προκαταρκτική στατική δοκιμή όπως περιγράφηκε. Σκοπός των πειραμάτων είναι η εύρεση των χαρακτηριστικών τάσεων m και k, οι τιμές των οποίων αφενός καθορίζουν τη μορφή αστοχίας της σύμμικτης πλάκας και αφετέρου χρησιμοποιούνται στις αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της αντοχής της, έναντι διαμήκους διάτμησης. Με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων προσδιορίζεται η ευθεία του Σχήματος 3.9 από την οποία υπολογίζονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι m και k, σύμφωνα με τις οποίες εκδίδονται πιστοποιητικά καταλληλότητας για τα διάφορα χαλυβδόφυλλα.



Σχήμα 3.9 : Προσδιορισμός των παραμέτρων m & k.

Έτσι εφόσον έχει γίνει προσδιορισμός των παραμέτρων m και k (από κάποιο πιστοποιημένο εργαστήριο) η διαδικασία διαστασιολόγησης πραγματοποιείται μέσω της αναλυτικής σχέσης που δίνει ο Ευρωκώδικας 4 για προσδιορισμό της αντίστασης σε διαμήκη διάτμηση :

$$V_{l,Rd} = \frac{b \cdot d_p}{\gamma_{vs}} \left(\frac{m \cdot A_p}{b \cdot L_s} + k \right)$$

όπου:

b = χαρακτηριστικό πλάτος της πλάκας (mm)

d_p = θέση κέντρου βάρους χαλυβδόφυλλου (mm)

A_p = εμβαδόν χαλυβδόφυλλου (mm^2)

γ_{vs} = 1,25 επιμέρους συντελεστής ασφαλείας

L_s = διατμητικό άνοιγμα πλάκας (mm)

m,k = σταθερές από πειράματα (MPa)

Οι τιμές των συντελεστών υπολογίζονται μετά από σειρά πειραματικών δοκιμών σε σύμμικτες πλάκες και ισχύουν για τις εξής συνθήκες :

1. Για πάχη πλάκας ίσα ή μικρότερα από αυτά των δοκιμών
2. Για πάχη χαλυβδόφυλλων ίσα ή μεγαλύτερα από αυτά των δοκιμών
3. Για σκυροδέματα με $f_{ck} \geq 20$ MPa (C20/25 και άνω)
4. Για χαλυβδόφυλλα με fy ≥ 293 MPa (πρακτικά Fe320G και άνω)

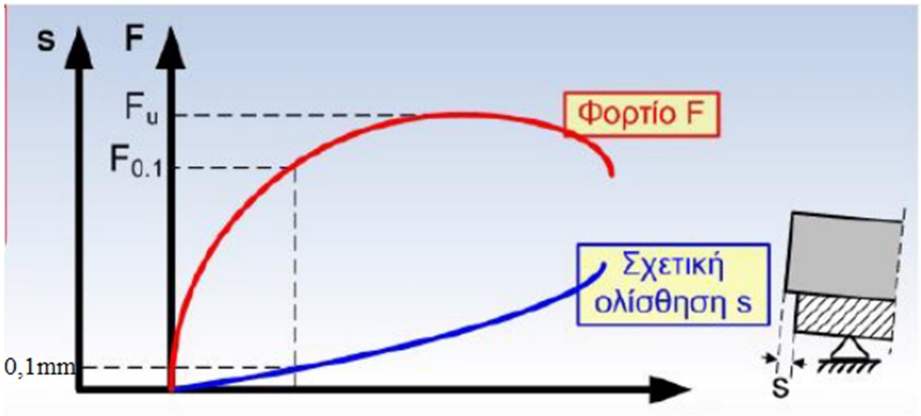
Παρόλα αυτά, η μέθοδος m-k έχει αποδειχθεί ότι είναι επαρκής για το σχεδιασμό σύμμικτων πλακών με μικρά ανοίγματα και ψαθυρή συμπεριφορά. Για να μπορέσουμε να μελετήσουμε πλήρως όμως και σύμμικτες πλάκες με όλκιμη συμπεριφορά, με μεγαλύτερα ανοίγματα και καλή μηχανική σύνδεση, κρίνεται απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο της μερικής διατμητικής σύνδεσης όπως περιγράφεται παρακάτω. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου m-k είναι τα εξής :

1) Οι παράμετροι m και k προκύπτουν από εργαστηριακές δοκιμές συνεχών σύμμικτων πλακών ενός ανοίγματος σε κλίμακα σχεδόν 1:1 και όχι από κάποιο μηχανικό μοντέλο. Για το λόγο αυτό τα εργαστηριακά αποτελέσματα εμπεριέχουν τις επιμέρους επιδράσεις όλων των μεγεθών των ελεγχόμενων σύμμικτων πλακών, όπως πχ το υλικό, την γεωμετρία, τη σύμμικτη δράση και την συνεργία των «εταίρων σύμμιξης», χωρίς την δυνατότητα διαχωρισμού ή απομόνωσης των επιμέρους επιρροών. Συγκεκριμένα, εάν πρέπει να τροποποιηθεί ή να επεκταθεί το πεδίο εφαρμογής, απαιτούνται νέες εργαστηριακές δοκιμές αντοχής. Αυτό ισχύει την περίπτωση π.χ αλλαγής πάχους του χαλυβδόφυλλου ή της πλάκας, ή της προσθήκης οπλισμού ή ακραίων αγκυρίων.
2) Στην περίπτωση αποκλίσεων του πραγματικού συστήματος και των φορτίων αυτού από τις εργαστηριακές συνθήκες (συνεχεία πλάκες, μικτά συγκεντρωμένα και ισο-γραμμικά φορτία), απαιτούνται πρόσθετες μελέτες.
3) Η μέθοδος της αξιολόγησης των δεδομένων των εργαστηριακών δοκιμών είναι η ίδια ανεξάρτητα αν η αστοχία είναι όλκιμη ή ψαθυρή. Η χρήση ενός συντελεστή 0,8 σε περιπτώσεις ψαθυρής συμπεριφοράς σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα, δεν αποδίδει επαρκώς το πλεονέκτημα χρήσης φύλλου με καλή μηχανική σύνδεση καθώς αυτό αυξάνει με το άνοιγμα.

3.3.2 Σύμμικτες πλάκες χωρίς ακραία αγκύρωση με τη μέθοδο μερικής διατμητικής σύνδεσης

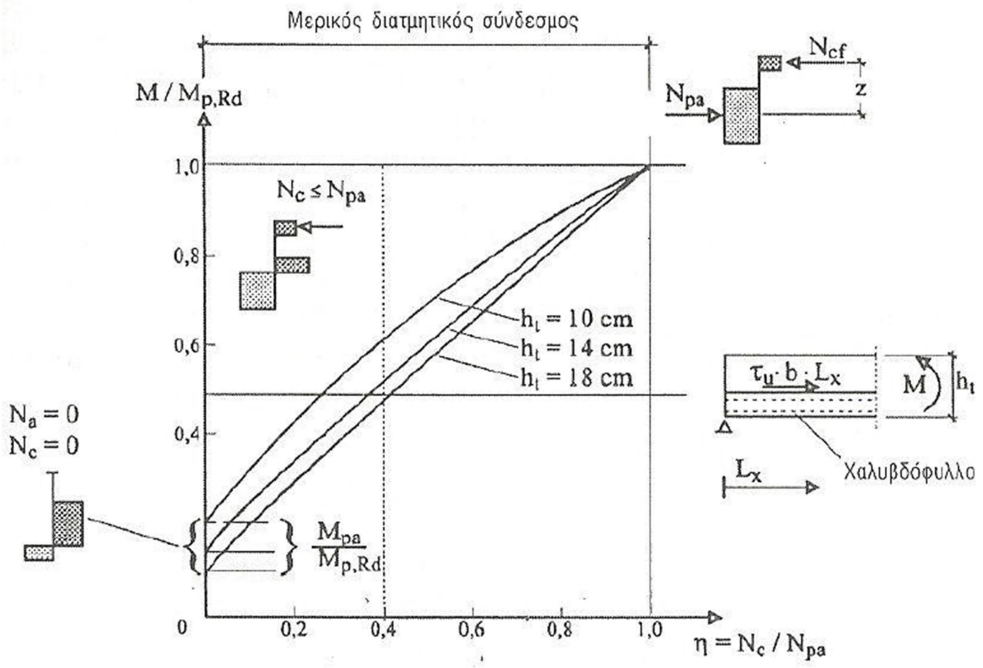
Με στόχο την ακριβέστερη μελέτη σύμμικτων πλακών με όλκιμη φέρουσα συμπεριφορά και συμπεριφορά αστοχίας, ο Ευρωκώδικας 4 προτείνει τη διαδικασία ελέγχου διαμήκους διατμητικής αντοχής σύμφωνα με τη μέθοδο «μερικού διατμητικού συνδέσμου». Η μέθοδος βασίζεται σε ένα αποτελεσματικό μηχανικό μοντέλο, στο οποίο θεωρούμε μερική συνεργία μεταξύ χαλυβδόφυλλου και σκυροδέματος και μεγάλες σχετικές διολισθήσεις στην διεπιφάνεια σύμμιξης, όπως περιγράφεται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

Η μέθοδος μερικής διατμητικής σύνδεσης χρησιμοποιείται μόνο σε σύμμικτες πλάκες με όλκιμη συμπεριφορά σε διαμήκη διάτμηση. Η πλάκα θεωρείται ότι έχει όλκιμη συμπεριφορά όταν το φορτίο αστοχίας ξεπερνάει το φορτίο στο οποίο παρατηρείται σχετική ολίσθηση 0,1mm περισσότερο από 10%. Αν κατά το μέγιστο φορτίο το βέλος κάμψης ξεπεράσει το L/50, τότε φορτίο αστοχίας θεωρείται αυτό το φορτίο σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 4. Τα παραπάνω φαίνονται και στο Σχήμα 3.10 .



Σχήμα 3.10 : Διάγραμμα φορτίου και σχετικής ολίσθησης ως προς το βέλους κάμψης

Έτσι στη μέθοδο του «μερικού διατμητικού συνδέσμου» λαμβάνεται υπόψη ότι στην εξεταζόμενη διατομή οι παράγοντες που παραλαμβάνουν τη διαμήκη διάτμηση (σύνδεσμος τριβής, μηχανικός σύνδεσμος) δεν είναι αρκετά ανθεκτικοί να παραλάβουν το φορτίο, που αντιστοιχεί στην πλήρη καμπτική αντοχή της πλάκας. Το άθροισμα των επιμέρους αντοχών αυτών στην περιοχή της διατμητικής καταπόνησης δεν επαρκεί να διοχετεύσει στο σκυρόδεμα την θλιπτική δύναμη, η οποία αντιστοιχεί στην πλήρη καμπτική αντοχή της πλάκας. Σε όλκιμες σύμμικτες πλάκες, μέχρι να επέλθει αστοχία, παρουσιάζονται στην διεπιφάνεια σύμμιξης μεγάλες σχετικές διολισθήσεις με μόνιμη τελική διολίσθηση. Η υπόθεση Bernoulli περί επιπεδότητας της διατομής δεν ισχύει πλέον για την συνολική διατομή, ισχύει όμως για τις επιμέρους διατομές. Επιπλέον, εμφανίζονται δύο ουδέτεροι άξονες, οι οποίοι καθορίζουν τις αντίστοιχες πλαστικές κατανομές τάσεων, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11 : Διάγραμμα μερικού διατμητικού συνδέσμου (Παράδειγμα: Holorib 51/150/0.88)

Η φέρουσα ικανότητα της σύμμικτης πλάκας είναι δυνατόν να υπολογισθεί από την εξής σχέση :

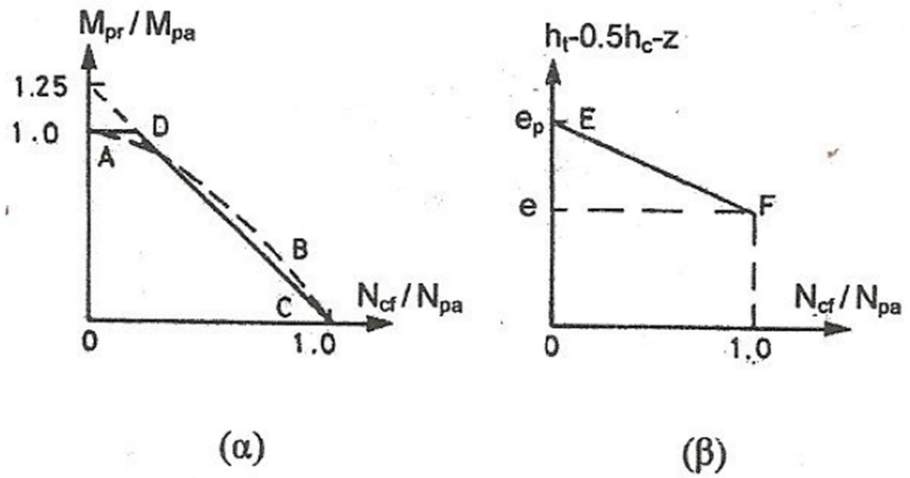
$M_{pl,Rd} = N_{cf} \cdot z + M_{pr}$

Για καθαρή κάμψη χωρίς τέμνουσα δύναμη, η εφελκυστική δύναμη στο χαλυβδόφυλλο $N_a = \eta \cdot N_{pa}$ ισούται με την θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος Nc και δρουν με μοχλοβραχίονα z. Για την περίπτωση πλήρους διατμητικής σύνδεσης, δηλαδή όταν η = 100%, τότε το ζεύγος δυνάμεων που υπολογίζει τη φέρουσα ικανότητα σε κάμψη είναι $| N_{cf} | = N_{pa}$ (όπου ο δείκτης f δηλώνει πλήρη σύνδεση και Npa η δύναμη που αντιστοιχεί στη διαρροή των χαλυβδόφυλλων) και για η = 0% η φέρουσα ικανότητα κάμψης δίνεται αποκλειστικά από την φέρουσα ικανότητα του χαλυβδόφυλλου Mpa. Για μερική διατμητική σύνδεση ισχύει ≤ η ≤100%, και οι τιμές που μπορεί να πάρει ο λόγος η εξαρτώνται από την αποτελεσματικότητα της διατμητικής σύνδεσης. Επομένως η δύναμη εφελκυσμού Na είναι μικρότερη από την N_{pa} με αποτέλεσμα το χαλυβδόφυλλο να μην φτάνει στο όριο διαρροής του και να μπορεί να παραλάβει επιπλέον καμπτική ροπή M_{pa},N. Η μορφή της καμπύλης της μεθόδου μερικού διατμητικού συνδέσμου εξαρτάται από το πάχος και τη γεωμετρία του χαλυβδόφυλλου (Σχήμα 3.12 (α)) και μπορεί να προσεγγιστεί από την εξίσωση:

$M_{pr} = 1,25 \cdot M_{pa} \cdot (1 - \eta) \leq M_{pa}$

Και ο μοχλοβραχίονας z μπορεί να υπολογιστεί βάσει της γραμμής EF του Σχήματος 3.12 (β) ή ισοδύναμα μέσω της σχέσης:

$$z = h + 0{,}5h_c - e_p + (e_p - e)\cdot\frac{Ncf}{Np}$$



Σχήμα 3.12 : α) καμπύλη της μεθόδου διατμητικού συνδέσμου, β) εξίσωση τιμών μοχλοβραχίονα

Στην εναλλακτική αυτή μέθοδο ελέγχεται ότι σε κάθε διατομή της σύμμικτης πλάκας ισχύει η ανίσωση:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd}$$

όπου:

M_{Ed} είναι η δρώσα ροπή και M_{Rd} η ροπή αντοχής σχεδιασμού. Η ροπή M_{Rd} βρίσκεται από τις σχέσεις που προαναφέρθηκαν με αντικατάσταση της δύναμης N_{cf} (= $b\cdot x_{pl}\cdot 0{,}85\cdot f_{cd}$) με τη δύναμη N_c με σχέση:

$$N_c = \tau_{u,Rd}\cdot b\cdot L_x \leq N_{cf}$$

όπου:

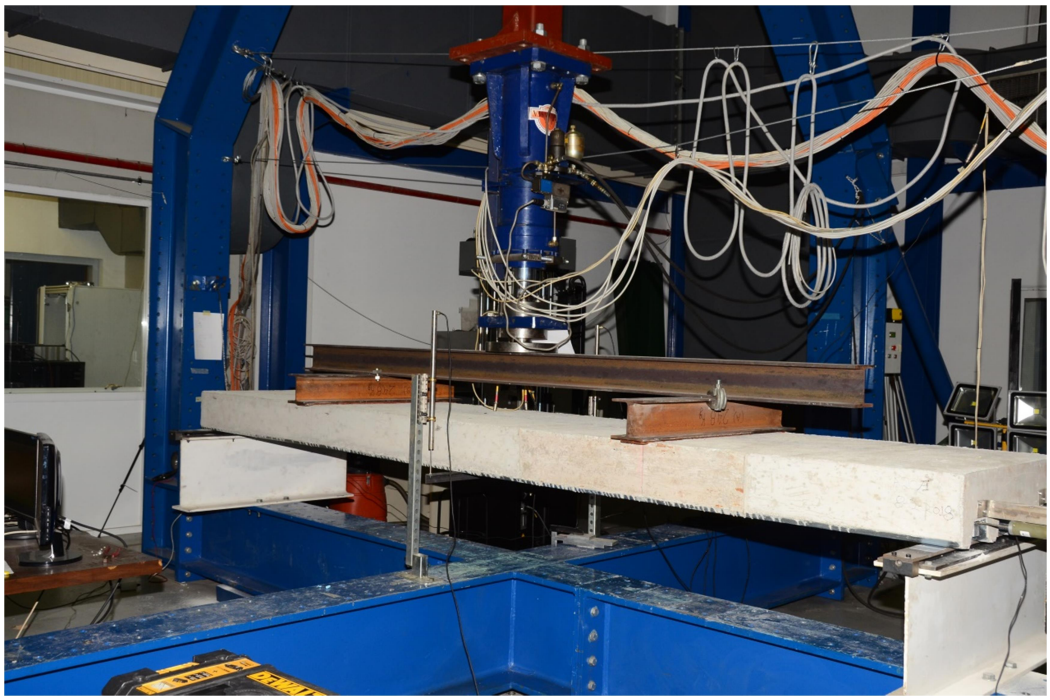
$$\tau_{u,Rd} = \frac{\tau u,Rk}{\gamma v}$$

$\tau_{u,Rd}$: η διατμητική αντοχή σχεδιασμού, όπως προσδιορίζεται πειραματικά

L_x : η απόσταση της εξεταζόμενης διατομής από το κοντινότερο στήριγμα

3.3.2 Αντοχές έναντι διαμήκους διάτμησης των υπό εξέταση δοκιμίων

Όπως περιγράφηκε και στο υποκεφάλαιο 3.3.1 για να προσδιοριστεί η αντοχή των υπό εξέταση δοκιμίων έναντι διαμήκους διάτμησης έπρεπε να πραγματοποιηθούν μία σειρά πειραμάτων με τελικό σκοπό τον προσδιορισμό των σταθερών m – k. Στα παρακάτω Σχήματα παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που ακολουθήθηκε κατά τον Κανονισμό και για τα δύο πάχη πλακών (15cm&20cm).



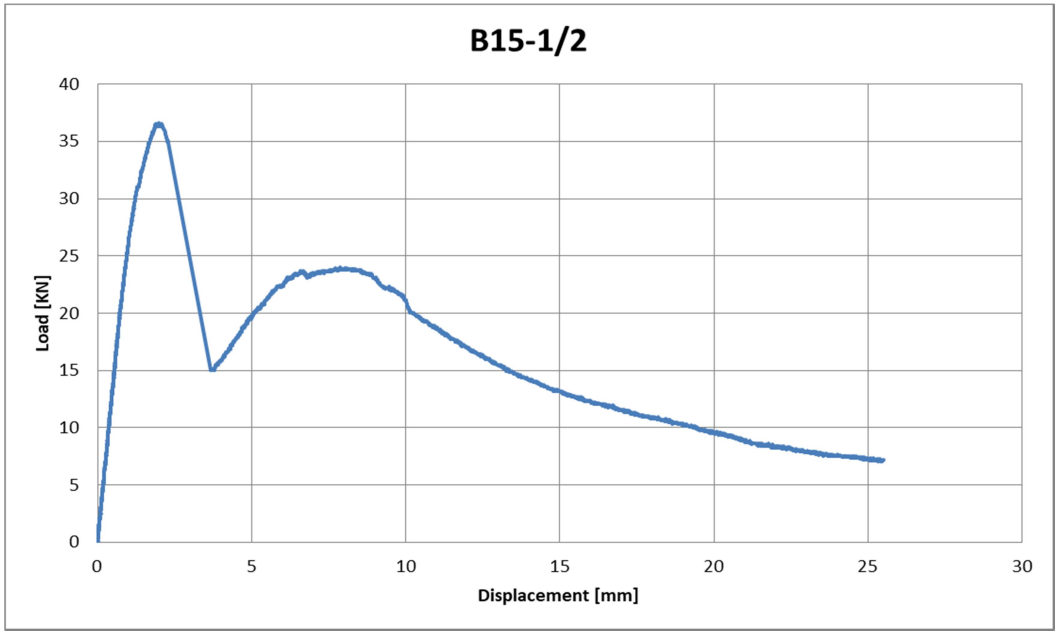
Σχήμα 3.13 : Πειραματική διάταξη προσδιορισμού των σταθερών m – k

Σχήμα 3.14 : Ηλεκτρονικά βελόμετρα LVDT που μετρούν διαρκώς τη σχετική ολίσθηση μεταξύ σκυροδέματος και χαλυβδόφυλλου

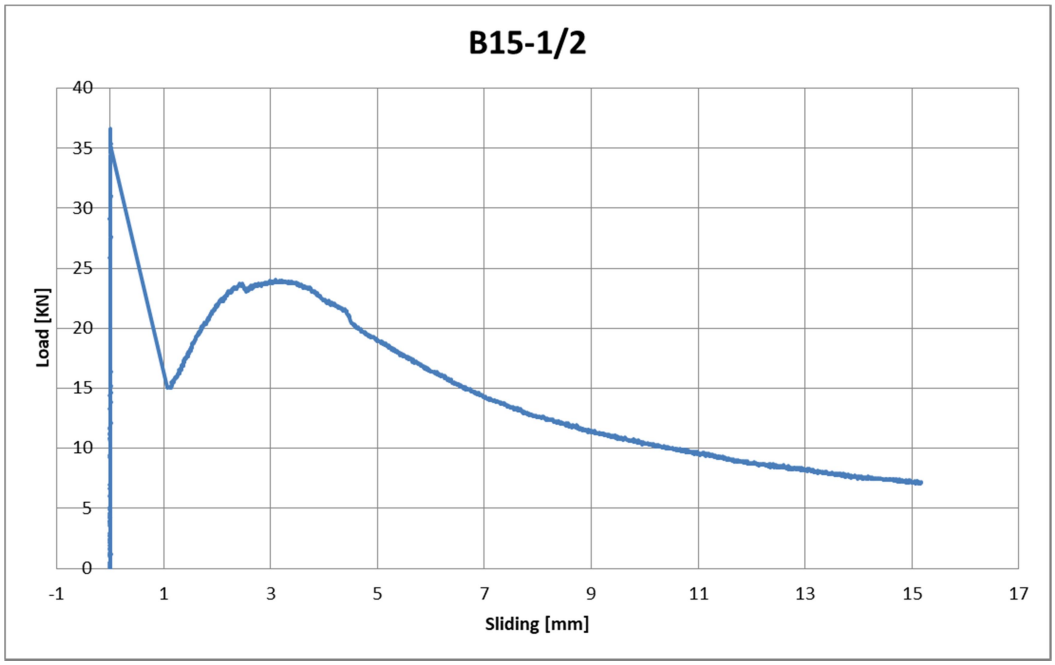
Σχήμα 3.15 : Ηλεκτρονικά βελόμετρα LVDT που μετρούν διαρκώς το βέλος κάμψης της πλάκας

Ενδεικτικά ακολουθούν σε σχήματα τα διαγράμματα φορτίου – βέλους κάμψης και φορτίου – ολίσθησης για δύο εκ των πλακών που εξετάσθηκαν σε στατική και

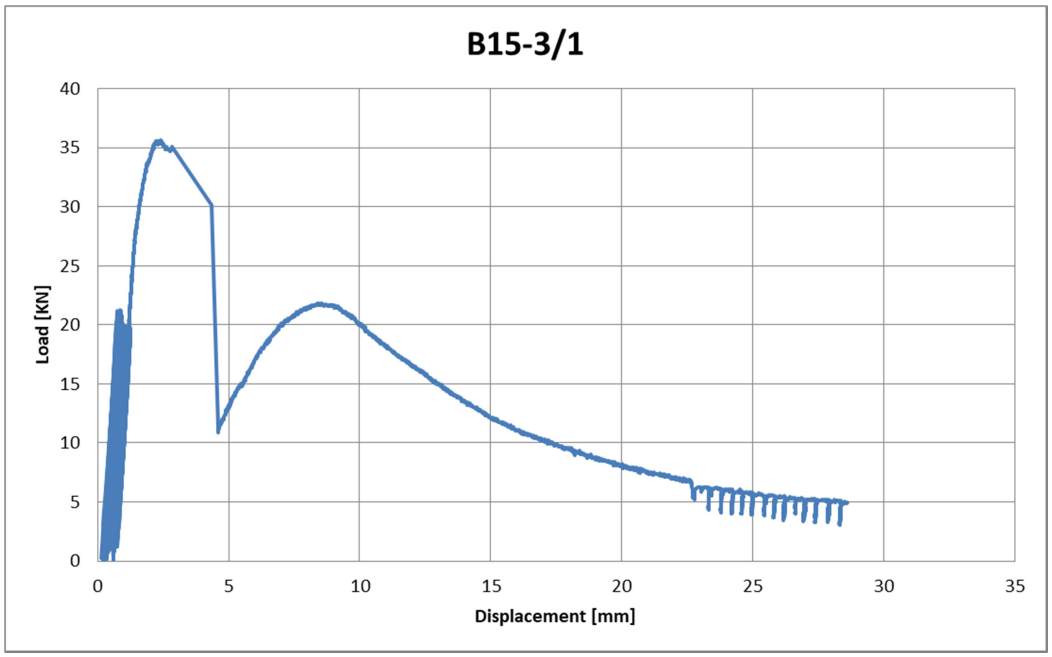
κυκλική φόρτιση (στο τέλος της κυκλικής πραγματοποιήθηκε στατική φόρτιση μέχρι αστοχίας) αντίστοιχα.



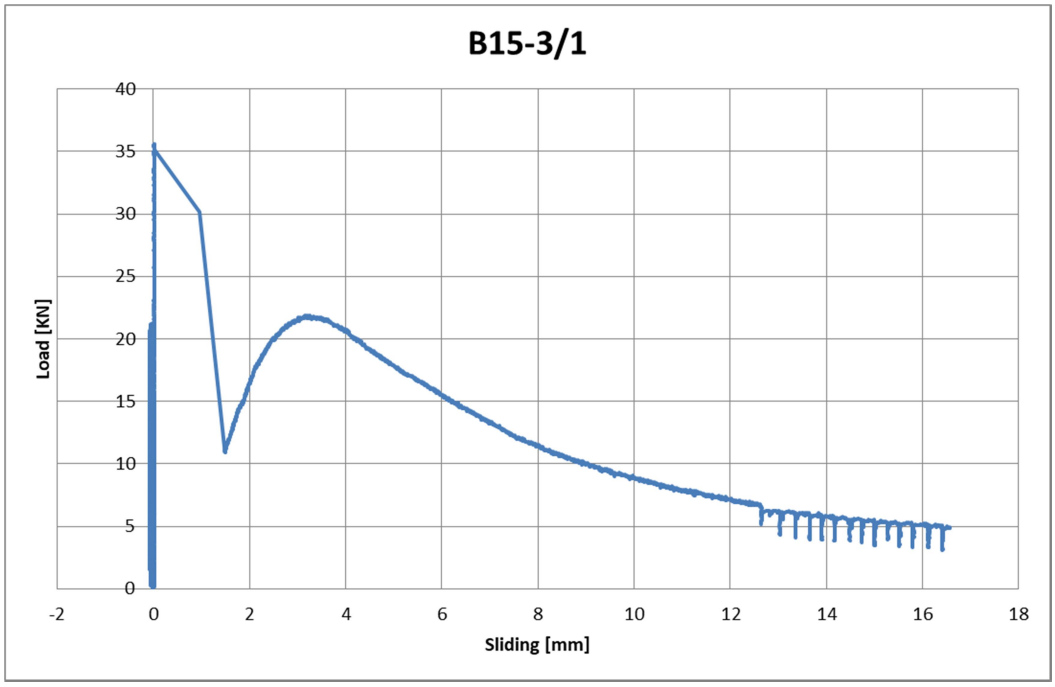
Σχήμα 3.16 : Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης της πλάκας B15-1/2 υπό στατική φόρτιση



Σχήμα 3.17 : Διάγραμμα φορτίου – ολίσθησης της πλάκας B15-1/2 υπό στατική φόρτιση

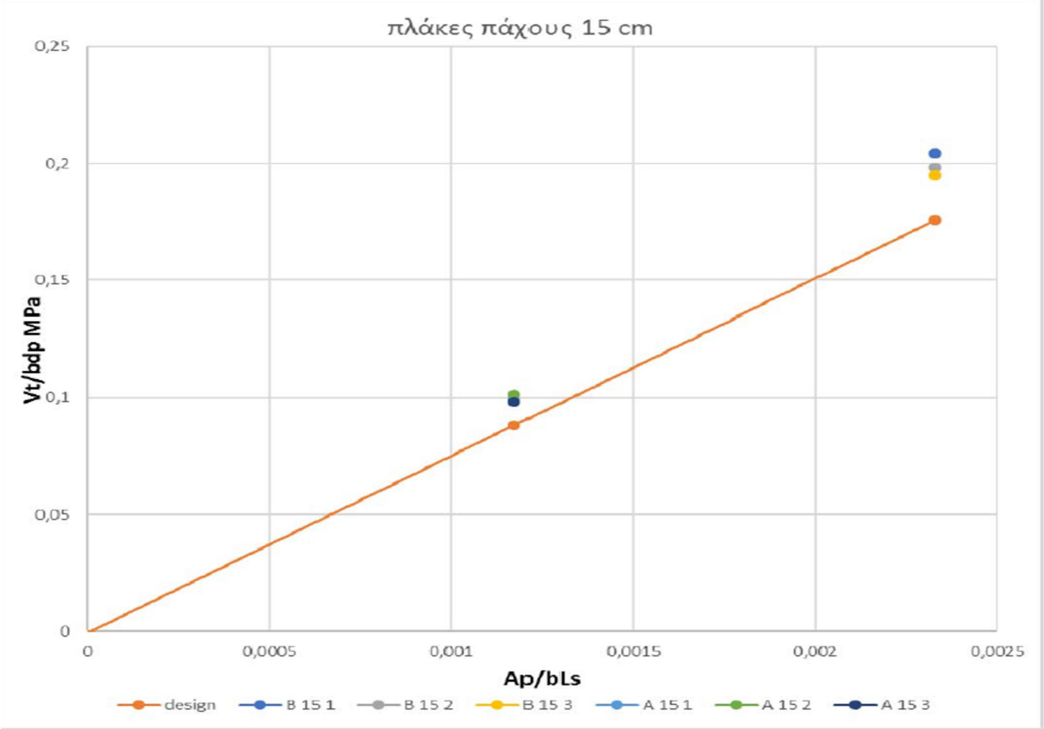


Σχήμα 3.18 : Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης της πλάκας B15-3/1 υπό κυκλική φόρτιση

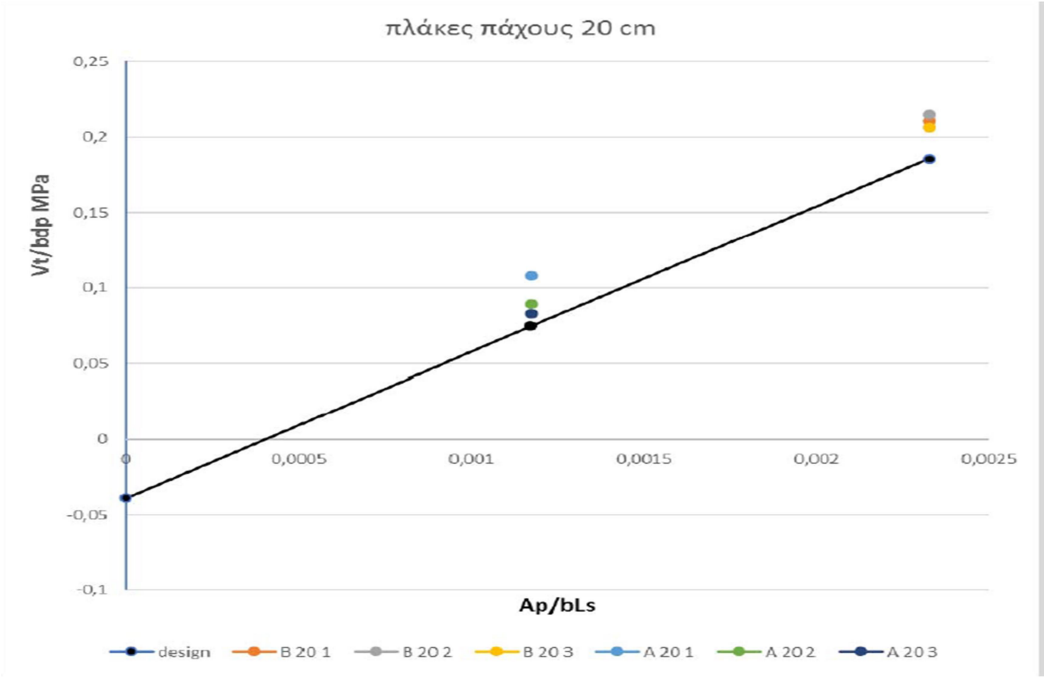


Σχήμα 3.19 : Διάγραμμα φορτίου – ολίσθησης της πλάκας B15-3/1 υπό κυκλική φόρτιση

Έτσι με την συγκέντρωση και την επεξεργασία όλων των αποτελεσμάτων για τα δύο είδη πλακών διαμορφώθηκαν οι ευθείες (γραμμές παλινδρόμησης-regression lines) των παρακάτω σχημάτων από όπου εξήχθησαν οι σταθερές m και k.



Σχήμα 3.20 : Προσδιορισμός των m-k για πάχος πλάκας 15cm



Σχήμα 3.21: Προσδιορισμός των m-k για πάχος πλάκας 20cm

Από τα διαγράμματα προκύπτουν οι παρακάτω τιμές :

- Πλάκες 15 cm

m= 75,8 MPa k = 0,00 MPa

- Πλάκες 20 cm

m = 96,3 MPa k = -0,04 MPa

Με τις τιμές αυτές να καλύπτουν σύμμικτες πλάκες με τα ίδια ή μεγαλύτερα χαρακτηριστικά από αυτά που περιγράφθηκαν για τις υπό εξέταση πλάκες στο υποκεφάλαιο 2.2

Πίνακας 3.5 : Συνοπτική παρουσίαση των m και k των υπό εξέταση πλακών

	B15-3/1	B20-3/1	B20-2/1	B15-2/1	B15-1/2	B20-1/2
m (MPa)	75,8	96,3	96,3	75,8	75,8	96,3
k (MPa)	0	-0,04	-0,04	0	0	-0,04

Πίνακας 3.6 : Αντοχές έναντι διαμήκους διάτμησης των υπό εξέταση πλακών

		B15-3/1	B20-3/1	B20-2/1	B15-2/1	B15-1/2	B20-1/2
Χαρακτηριστικό πλάτος πλάκας	b (mm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Θέση κέντρου βάρους χαλυβδόφυλλου από την ακραία θλιβόμενα ίνα	d_p (mm)	119,75	164,75	172,25	112,75	120,25	162,75
Εμβαδόν χαλυβδόφυλλου	Ap (mm^2/m)	1276	1276	1276	1276	1276	1276
Επιμέρους συντελεστής ασφαλείας	γ_{vs}	1	1	1	1	1	1
Διατμητικό άνοιγμα πλάκας	L_s (mm)	420	420	420	420	420	420
Ανά μέτρο αντοχής έναντι διαμήκους διάτμησης	$V_{l,Rd}$ (kN/m)	27,58	41,61	43,50	25,96	27,69	41,11
πλάτος κατανομής συγκεντρωμένου φορτίου	b_{em} (m)	0,685	0,775	0,79	0,671	0,628	0,713
Αντοχή έναντι διαμήκους διάτμησης ανά διατομή	$V_{l,Rd}$ (kN)	18,89	32,25	34,37	17,42	17,39	29,31

3.4 Αντοχή έναντι διάτρησης

Οι σύμμικτες πλάκες κινδυνεύουν από διάτρηση αποκλειστικά στην περιοχή εφαρμογής συγκεντρωμένων φορτίων. Ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας σε διάτρηση γίνεται κατ' αναλογία με την περίπτωση πλακών οπλισμένου σκυροδέματος. Εδώ και πάλι ο Ευρωκώδικας 4 παραπέμπει στον Ευρωκώδικα 2, βάσει του οποίου προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις :

$$V_{p,Rd} = C_p \cdot d_p \cdot v_{Rd,c}$$

$$v_{Rd,c} = C_{Rk,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} > v_{min}$$

Όπου $V_{Rd,c}$ αποτελεί την τιμή σχεδιασμού της αντοχής διάτρησης μιας πλάκας χωρίς οπλισμό διάτρησης

$$v_{min}=0,035*k^{3/2}*f_{ck}{}^{1/2}$$

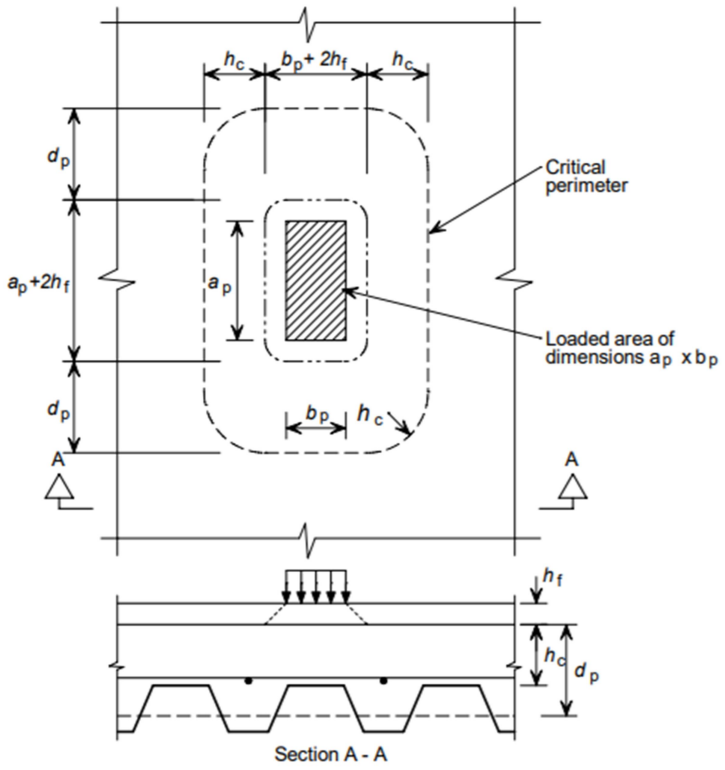
$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_p}} \leq 2 \text{ (} d_p \text{ σε mm)}$$

$$\rho_l = \sqrt{\rho_{ly} \cdot \rho_{lz}} \leq 0,02$$

ρ_{ly}, ρ_{lz} ποσοστά διαμήκους οπλισμού πλάκας στις δύο διευθύνσεις

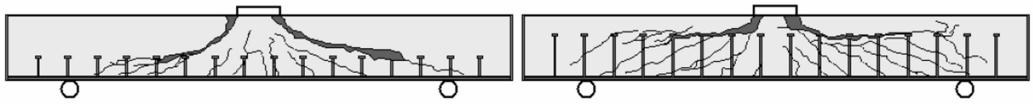
Η αντοχή έναντι διάτρησης $V_{p,Rd}$ πρέπει να υπολογίζεται σύμφωνα με τον EN 1992-1-1, χρησιμοποιώντας την κρίσιμη περίμετρο c_p του σχήματος 3.22. Για μία φορτιζόμενη επιφάνεια διαστάσεων a_p x b_p που είναι μακριά από ελεύθερο άκρο και εφαρμόζεται σε επίχρισμα δαπέδου με πάχος h_f, τότε η κρίσιμη περίμετρος δίνεται από τη σχέση :

$$c_p = 2\,\pi\, h_c + 2\,(b_p + 2\,h_f) + 2\,(a_p + 2\,h_f + 2d_p - 2h_c)$$

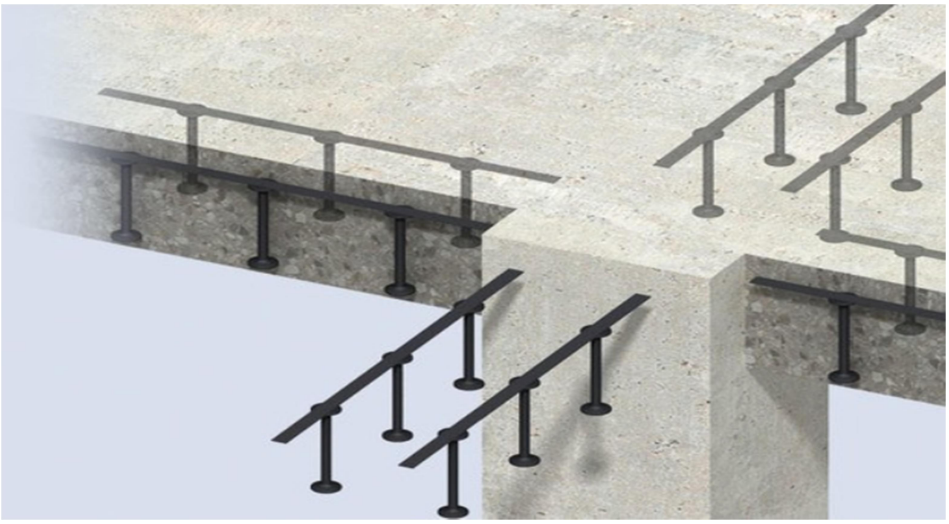


Σχήμα 3.22: Κρίσιμη περίμετρος ελέγχου Cp

Σε περίπτωση που κριθεί ότι κατά το σχεδιασμό της σύμμικτης πλάκας ότι η διάτρηση είναι κρίσιμη σε κάποιο σημείο της, τότε μπορούν να τοποθετηθούν διατμητικοί ήλοι κατάλληλου ύψους όπως στο Σχ. 3.23 ανάλογα με τις απαιτήσεις αντοχών της πλάκας. Κατά αντιστοιχία στο Σχ. 3.24 φαίνεται και η όπλιση για αποφυγή διάτρησης σε πλάκες σκυροδέματος.



Σχήμα 3.23: Όπλιση σύμμικτων πλακών έναντι διάτρησης



Σχήμα 3.24: Όπλιση πλακών σκυροδέματος έναντι διάτρησης

3.4.1 Αντοχές έναντι διάτρησης των υπό εξέταση δοκιμίων

Παρακάτω στον Πίν. 3.7 φαίνονται τα αποτελέσματα των αντοχών σε διάτρηση των υπό εξέταση πλακών ακολουθώντας τη μεθοδολογία που παρουσιάσθηκε πιο πάνω.

Πίνακας 3.7: Υπολογισμός έναντι διάτρησης τον υπό εξέταση σύμμικτων πλακών στην κρίσιμη περίμετρο c_p

Αντοχή έναντι διάτρησης $V_{p,Rd}$							
		B15-3/1	B20-3/1	B20-2/1	B15-2/1	B15-1/2	B20-1/2
Μέσο πλάτος κυψέλης	b_o (mm) :	73	73	73	73	73	73
Θέση Κ.Β χαλυβδόφυλλου από την ακραία θλιβόμενη ίνα	d_p (mm) :	119,75	164,75	172,25	112,75	120,25	162,75
Πλάτος αναφοράς χαλυβ/λου	b (m) :	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188
Συντελεστής k	k :	2	2	2	2	2	2
Ποιότητα σκυροδέματος	fck (MPa) :	26,31	26,31	26,31	26,31	26,31	26,31
Εμβαδόν χαλυβδόφυλλου εντός του bo	Apo (mm^2) :	95,98	95,98	95,98	95,98	95,98	95,98
Ποσοστό εφελκυόμενου οπλισμού	ρ_l :	0,0110	0,0080	0,0076	0,0117	0,0109	0,0081
	v_{min}(MPa) :	0,508	0,508	0,508	0,508	0,508	0,508
Αντοχή πλάκας χωρίς οπλισμό διάτρησης	$v_{Rd,c}$(MPa) :	1,105	0,993	0,979	1,127	1,103	0,997
Διαστάσεις συγκεντρωμένου φορτίου	a_p (mm)	130	130	130	130	42	42
	b_p (mm)	100	100	100	100	42	42
Ύψος πλάκας	h_c (mm)	82,5	127,5	135	75,5	83	125,5
Κρίσιμη περίμετρος ελέγχου	c_p (mm) :	1127,4	1410,1	1457,2	1083,4	838,5	1105,5
Αντοχή έναντι διάτρησης στην περίμετρο ελέγχου c_p	$V_{p,Rd}$ (kN) :	149,12	230,72	245,62	137,66	111,22	179,42

Επίσης παρακάτω έγινε προσπάθεια υπολογισμού των αντοχών έναντι διάτρησης σε ίσες αποστάσεις a από τις παρειές του συγκεντρωμένου φορτίου (a_p,b_p), μικρότερες από $2h_c$ & $2d_p$, με τις σχέσεις που περιγράφηκαν παραπάνω να μεταβάλλονται ως εξής :

$$v'_{Rd,c} = C_{Rd,c}k\left(100\rho_l f_{ck}\right)^{1/3} * \left({}^{2hc}/_{a}\right) \geq v_{min} * \left({}^{2hc}/_{a}\right)$$

$$V'_{p,Rd} = C'_p \cdot d_p \cdot v'_{Rd,c}$$

$$c'_p = 2\,\pi a + 2\,(b_p + 2\,h_f) + 2\,(a_p + 2\,h_f + 2a - 2a)$$

$$\text{άρα } c'_p = 2\pi a + 2b_p + 2a_p\text{, αν } h_f = 0$$

Στα αποτελέσματα που ακολουθούν Πίνακα 3.8 φαίνεται η αύξηση της άοπλης έναντι διάτρησης πλάκας ($v'_{Rd,c}$), καθώς και η μείωση της περιμέτρου ελέγχου c'_p, όσο η απόσταση a μειώνεται ολόενα και περισσότερο προς τις παρειές του συγκεντρωμένου φορτίου. Για αυτό και είναι εμφανές, λόγω της συνεχούς αύξησης της αντοχής έναντι

διάτρησης $V'_{p,Rd}$, ότι ο έλεγχος στην κρίσιμη περίμετρο c_p είναι ο μοναδικός που απαιτείται.

Πίνακας 3.8 : Υπολογισμός έναντι διάτρησης τον υπό εξέταση σύμμικτων πλακών σε περιμέτρους c'_p μικρότερες της κρίσιμης περιμέτρου c_p.

		B15-3/1	B20-3/1	B20-2/1	B15-2/1	B15-1/2	B20-1/2
Απόσταση ελέγχου από τις παρειά του συγκεντρωμένου φορτίου(a_p & b_p)	a (mm)<$2h_c$,$2d_p$	135	225	240	121	136	221
		105	195	210	91	106	191
		75	165	180	61	76	161
		45	135	150	31	46	131
		15	105	120	1	16	101
Νέα περίμετρος ελέγχου	c'_p (mm)	1308,23	1873,72	1967,964	1220,265	1022,513	1556,584
		1119,734	1680,22	1779,469	1031,77	834,0176	1368,088
		931,2389	1491,73	1590,973	843,2743	645,5221	1179,593
		742,7433	1303,23	1402,478	654,7787	457,0265	991,0973
		554,2478	1114,734	1213,982	466,2832	268,531	802,6017
Αυξημένη αντόχη πλάκας έναντι διάτρησης	$v_{Rd',c}$ (MPa)	1,35005	1,125574	1,100841	1,406407	1,346374	1,132573
		1,735779	1,29874	1,258103	1,870058	1,727424	1,310464
		2,430091	1,534874	1,467787	2,789758	2,409301	1,554649
		4,050151	1,875957	1,761345	5,489524	3,980585	1,910676
		12,15045	2,411945	2,201681	170,1753	11,44418	2,478204
Αντοχή έναντι διάτρησης στην εκάστοτε περίμετρο c'_p	$V'_{p,Rd}$ (kN)	211,4996	347,459	373,165	193,5004	165,5464	286,9192
		232,7475	359,5125	385,6257	217,5477	173,2444	291,7831
		270,9936	377,2134	402,24	265,2479	187,0197	298,4596
		360,2347	402,7814	425,5001	405,2713	218,7627	308,1941
		806,4398	442,9597	460,3901	8946,697	369,5423	323,7115

4. Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών

4.1 Αποτελέσματα 1ης ομάδας δοκιμών

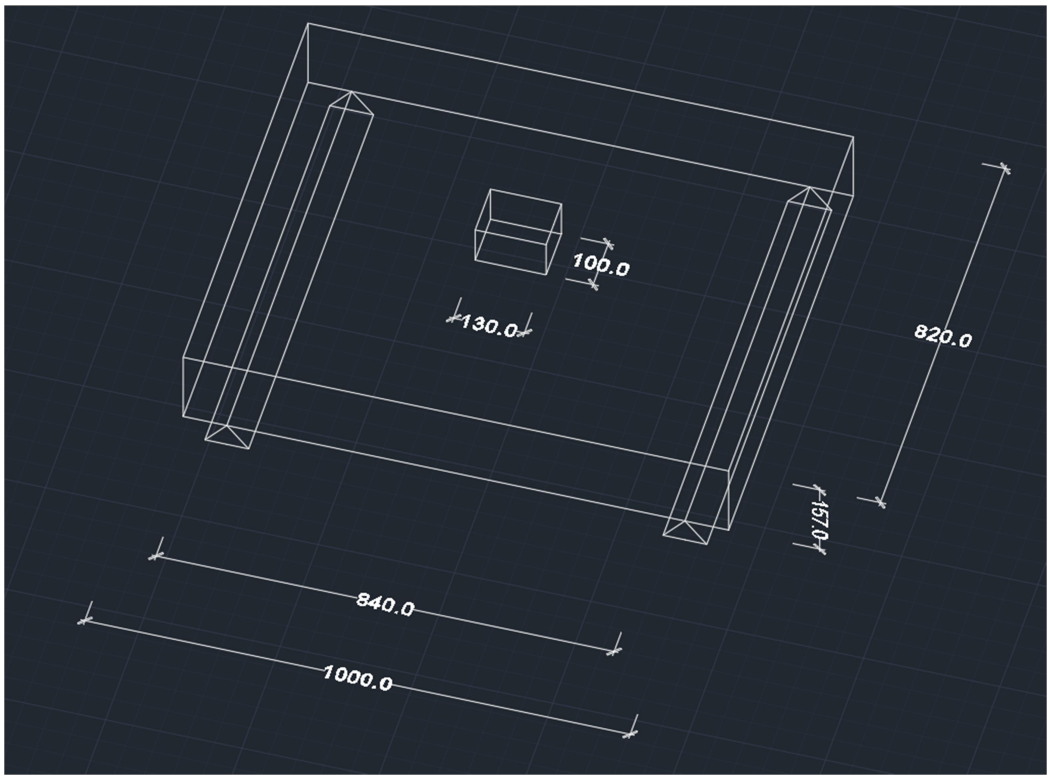
4.1.1 Δοκίμιο B15-3/1

ΔΟΚΙΜΙΟ Β 15-3/1

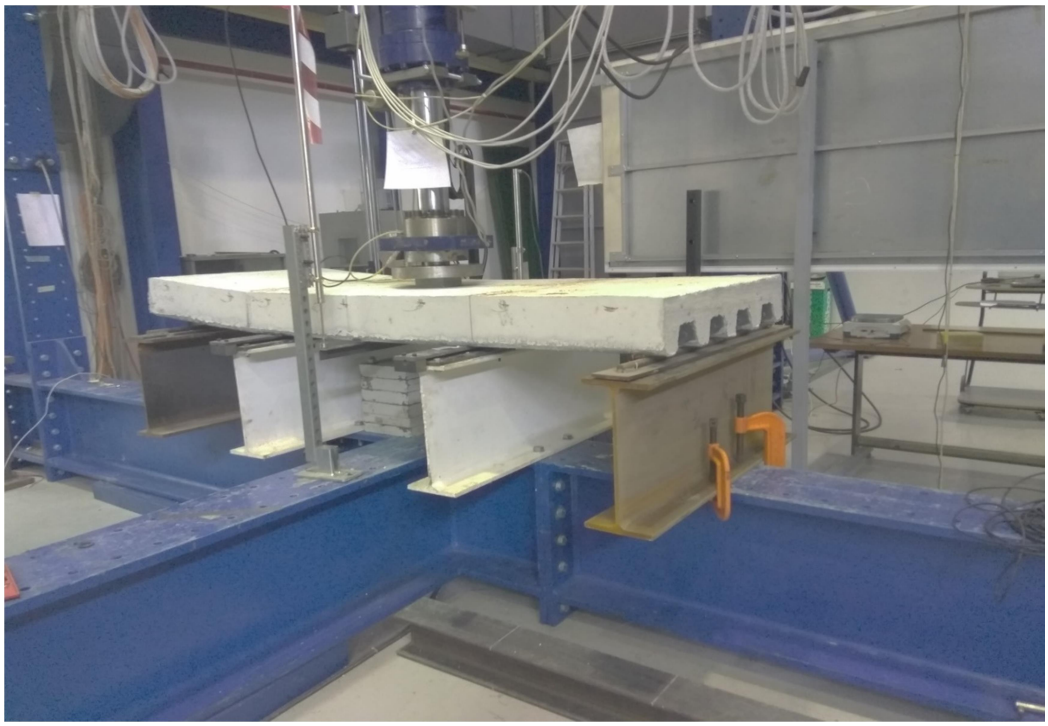
Α) Περιγραφή πειράματος δοκιμίου

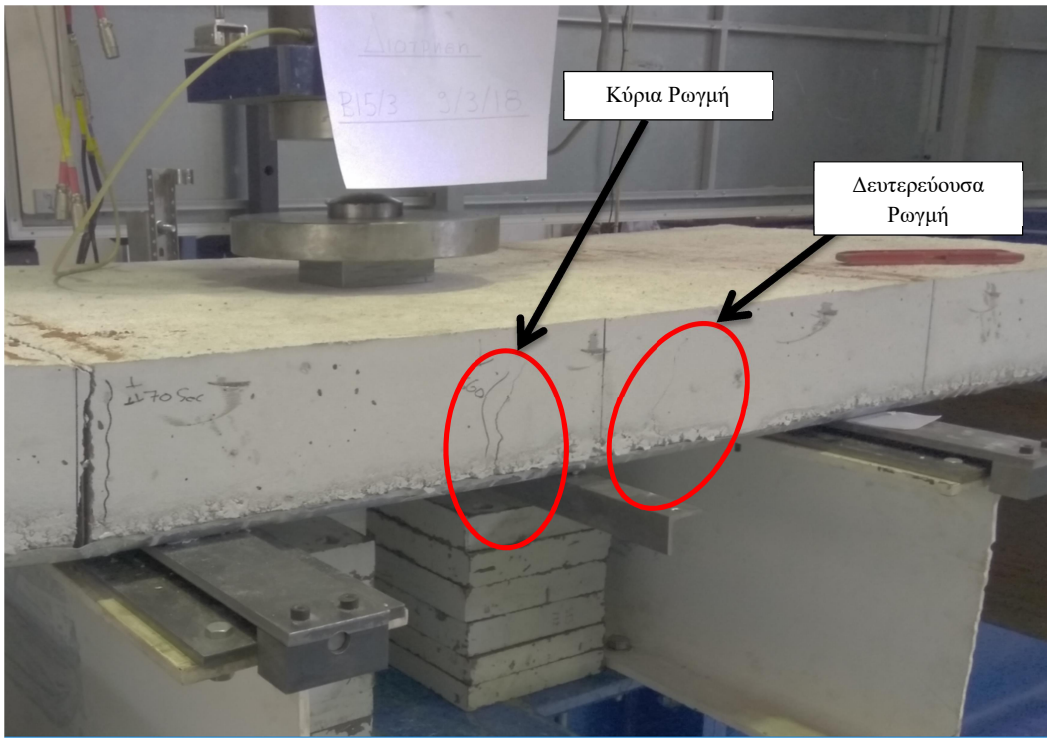
Ονομασία δοκιμίου	B15-3/1
Ομάδα δοκιμίου	1η
Ημερομηνία Διεξαγωγής Πειράματος	09/03/2018
Ύψος πλάκας [mm]	157,00
Μήκος πλάκας [mm]	1000,00
Πλάτος πλάκας [mm]	820,00
Απόσταση στηρίξεων [mm]	840,00
Ίδιο Βάρος Πλάκας (εντός των στηρίξεων) [kN]	1,89
Μόνιμα Βάρη – Μηχανισμού Φόρτισης & Πλάκας [kN]	2,21
Παρατηρήσεις επί της γεωμετρίας του δοκιμίου	
Ως δοκίμιο για το συγκεκριμένο πείραμα θεωρήθηκε το μέρος της πλάκας που βρισκόταν εντός των στηρίξεων, καθώς λόγω στατικών και κυκλικών φορτίσεων που είχαν προηγηθεί για τον προσδιορισμό των συντελεστών m-k των πλακών τα τμήματα εκατέρωθεν αγνοήθηκαν ως πλήρως καταπονημένα και ρηγματωμένα.	
Φορτίο Εμφάνισης Πρώτης Ρωγμής [kN]	57,40
Χρόνος Εμφάνισης Πρώτης Ρωγμής [sec]	660
Μέγιστο Φορτίο Pmax [kN]	89,55
Φορτίο Αστοχίας Pu [kN]	89,55
Μέγιστο Μέσο Βέλος δmax [mm]	12,08
Εκτιμώμενη Οπτικά Μορφή Αστοχίας	Διάτρηση

Β) Στατικό προσομοίωμα του συγκεκριμένου δοκιμίου με τις διαστάσεις σε mm

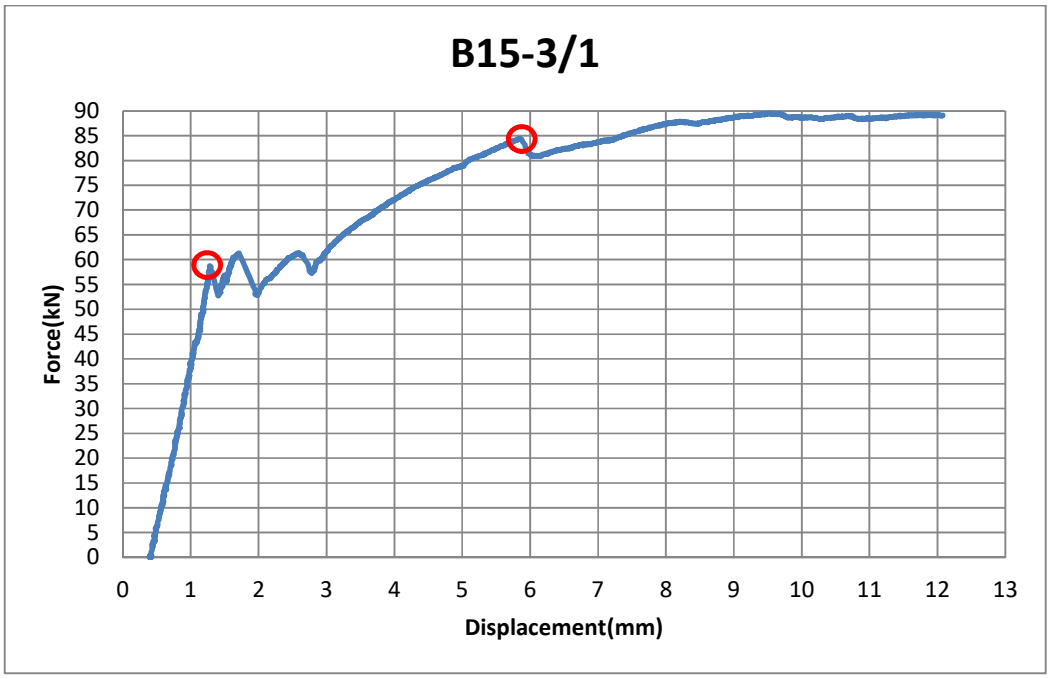


Γ) Φωτογραφίες Πειράματος





Δ) Διάγραμμα Πειράματος



Ε) Σχολιασμός ως προς το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης του πειράματος

Αρχικά πρέπει να σημειωθεί ότι το διάγραμμα αυτό, καθώς και κάποια από τα υπόλοιπα που θα ακολουθήσουν για άλλα δοκίμια, προσεγγίζουν αρκετά σε μορφή τη δοκιμή εφελκυσμού του χάλυβα, πράγμα το οποίο μας υποδεικνύει ότι η πρώτη ρωγμή της σύμμικτης πλάκας ενδεχομένως να ταυτίζεται με την πρώτη του χάλυβα του χαλυβδόφυλλου. Με τους κόκκινους κύκλους σημειώθηκαν οι δυνάμεις και τα αντίστοιχα βέλη κάμψεως στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι ρωγμές που φαίνονται στην πιο πάνω φωτογραφία με πρώτη στο διάγραμμα την κύρια ρωγμή για δύναμη P_1=57,88kN και αντίστοιχο βέλος κάμψεως δ_1=1,28mm, ενώ για τη δεύτερη P_2=83,66kN και δ_2=5,735mm. Παρόλα αυτά, η πλάκα μέσω των εσωτερικών ανακατανομών της καταφέρνει και φτάνει σε μια P_{max}=89,55kN για δ_{Pmax}=9,52mm υποδεικνύοντας έτσι μία πλάστιμη συμπεριφορά. Οι ρωγμές που εμφανίστηκαν έχουν κλίση 30-45^0 ως προς την οριζόντιο, καθώς και οι αποστάσεις τον ρωγμών από την θέση εφαρμογής του φορτίου, υποδηλώνουν ένα πρότυπο αστοχίας που ταιριάζει σε αυτό της διάτρησης.

Όσον αφορά την δυσκαμψία της πλάκας, η οποία ταυτίζεται με την κλίση του διαγράμματος, είναι εμφανές ότι μετά την κύρια ρωγμή στο τέλος του ελαστικού κλάδου επέρχεται μία τεράστια μείωσή της, ενώ στην πλαστική περιοχή ακολουθείται από μία μικρότερη μείωσή της, μέχρι που τελικά μηδενίζεται και το πείραμα τερματίζεται. Έτσι πλέον η πλάκα αδυνατεί να παραλάβει επιπλέον φορτίο και το ύψος και εύρος των ρωγμών που είχαν δημιουργηθεί ολοένα και αυξάνεται μέχρι αστοχίας. Τέλος, η απορρόφηση ενέργειας της πλάκας για δ_{max}=12,08mm ανέρχεται περίπου στα 879 Joule.

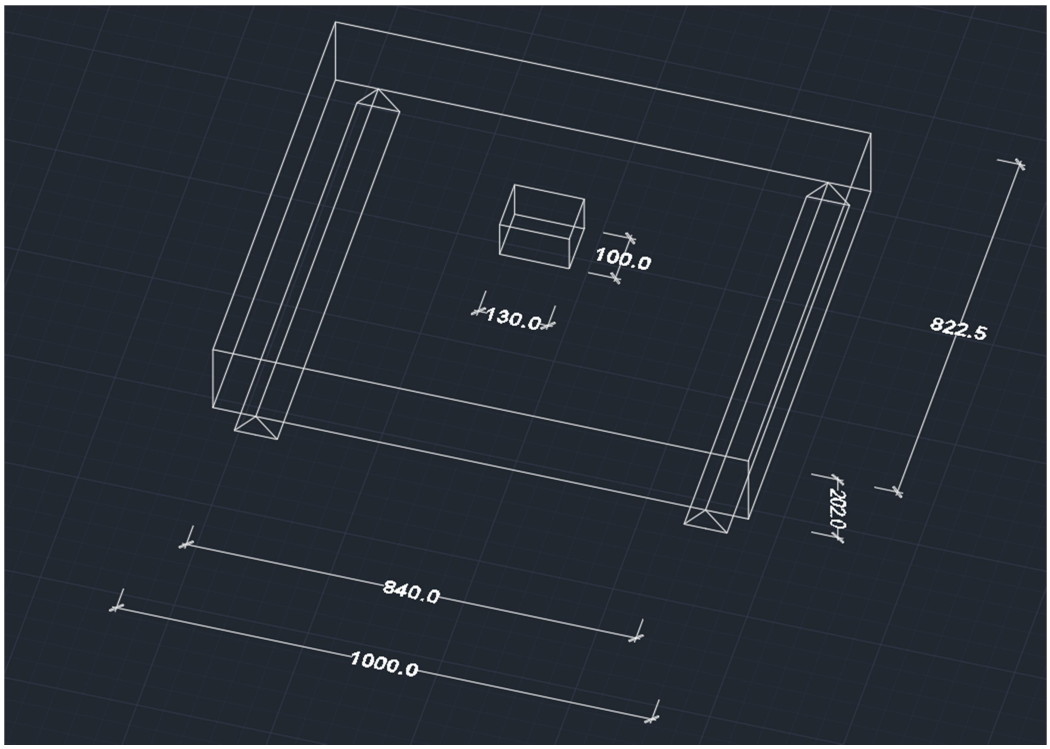
4.1.2 Δοκίμιο Β20-3/1

ΔΟΚΙΜΙΟ Β 20-3/1

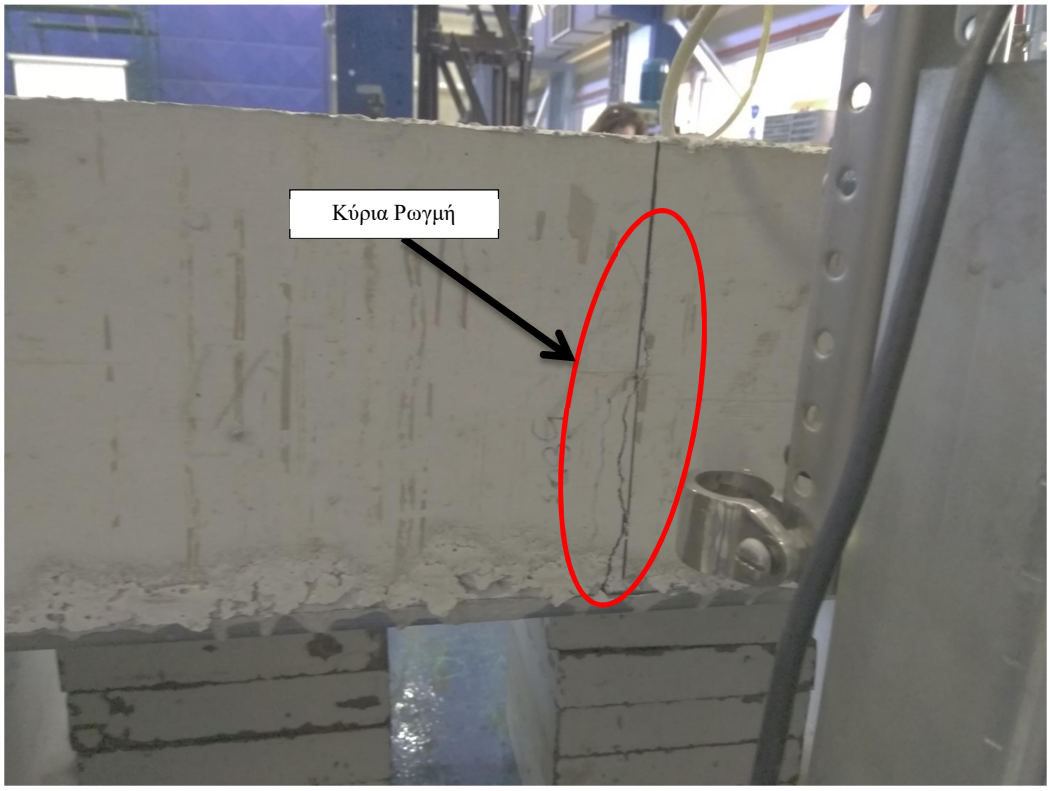
Α) Περιγραφή πειράματος δοκιμίου

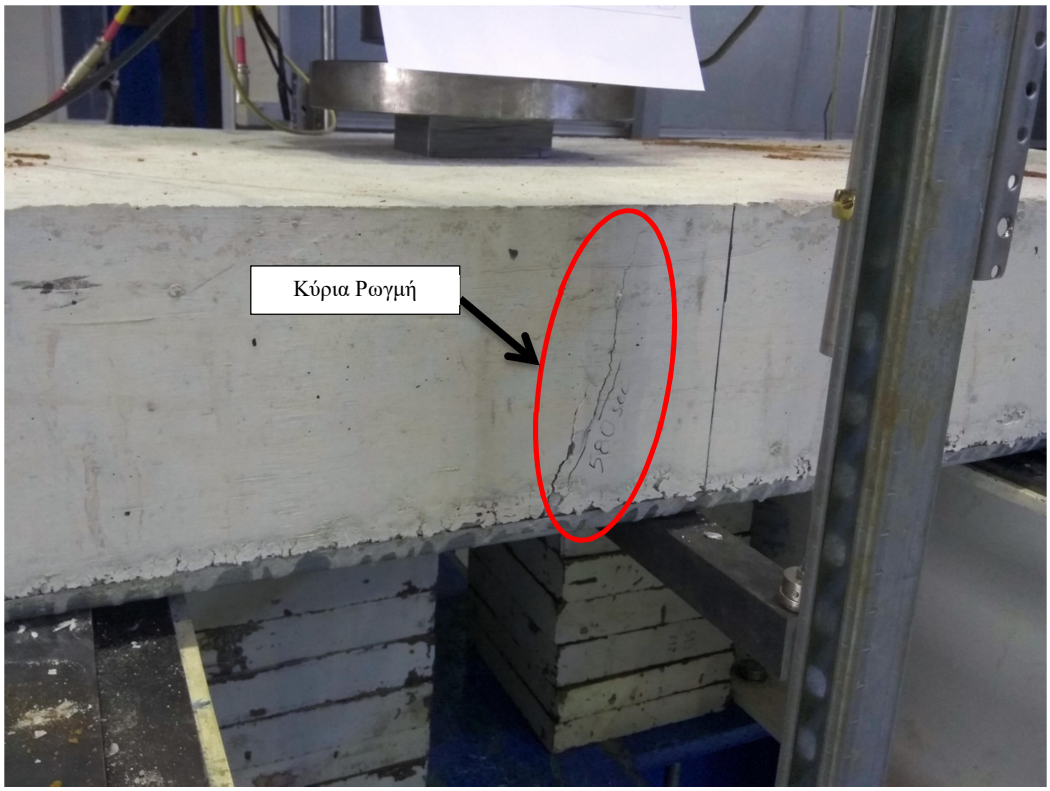
Ονομασία δοκιμίου	Β20-3/1
Ομάδα δοκιμίου	1η
Ημερομηνία Διεξαγωγής Πειράματος	12/03/2018
Μέσο ύψος πλάκας [mm]	202,00
Μέσο μήκος πλάκας [mm]	1000,00
Μέσο πλάτος πλάκας [mm]	822,50
Μέση απόσταση στηρίξεων [mm]	840,00
Ίδιο Βάρος Πλάκας (εντός των στηρίξεων) [kN]	2,43
Μόνιμα Βάρη – Μηχανισμού Φόρτισης & Πλάκας [kN]	2,75
Παρατηρήσεις επί της γεωμετρίας του δοκιμίου	
Ως δοκίμιο για το συγκεκριμένο πείραμα θεωρήθηκε το μέρος της πλάκας που βρισκόταν εντός των στηρίξεων, καθώς λόγω στατικών και κυκλικών φορτίσεων που είχαν προηγηθεί για τον προσδιορισμό των συντελεστών m-k των πλακών τα τμήματα εκατέρωθεν αγνοήθηκαν ως πλήρως καταπονημένα και ρηγματωμένα.	
Φορτίο Εμφάνισης Πρώτης Ρωγμής [kN]	136,78
Χρόνος Εμφάνισης Πρώτης Ρωγμής [sec]	580
Μέγιστο Φορτίο Pmax [kN]	136,78
Φορτίο Αστοχίας Pu [kN]	136,78
Μέγιστο Μέσο Βέλος δmax [mm]	7,78
Εκτιμώμενη Οπτικά Μορφή Αστοχίας	Διαμήκης Διάτμηση

Β) Καταγεγραμμένη όψη πειράματος του συγκεκριμένου δοκιμίου με τις διαστάσεις σε mm.

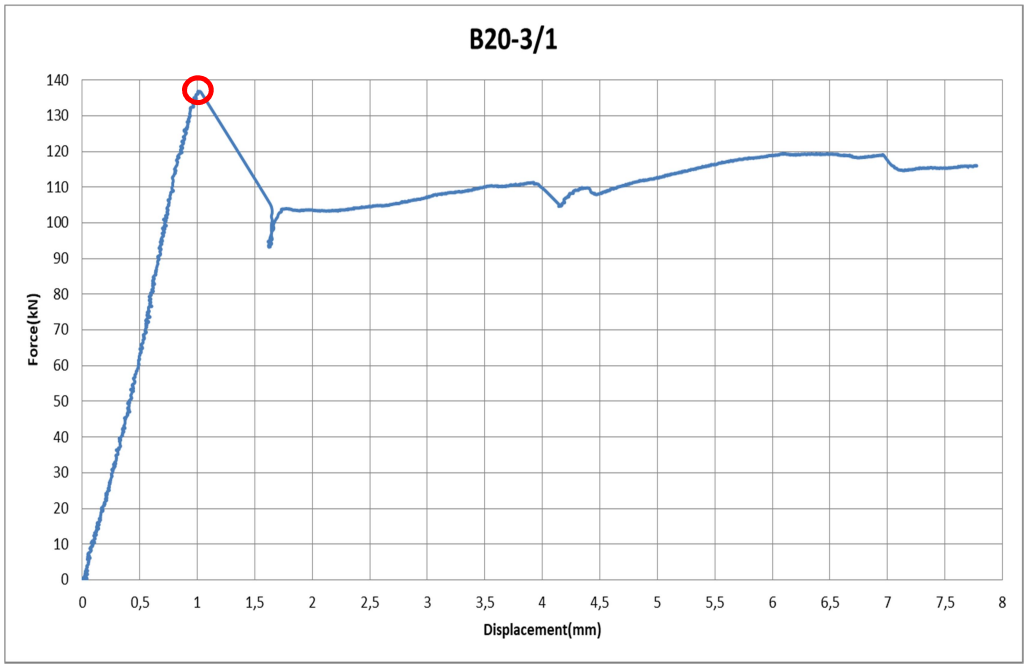


Γ) Φωτογραφίες Πειράματος





Δ) Διάγραμμα Πειράματος



Ε) Σχολιασμός ως προς το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης του πειράματος

Με τον κόκκινο κύκλο σημειώθηκε η δύναμη και το αντίστοιχο βέλος κάμψεως στα οποία πραγματοποιήθηκαν ταυτόχρονα οι ρωγμές εκατέρωθεν της πλάκας που φαίνονται στις πιο πάνω φωτογραφίες για δύναμη $P=P_{max}=136,78kN$ και αντίστοιχο βέλος κάμψεως $\delta=1,0mm$. Οι ρωγμές που εμφανίστηκαν έχουν κλίση $80\text{-}90^0$ ως προς την οριζόντιο, καθώς και η εμφάνιση των ρωγμών ακριβώς στη θέση εφαρμογής του φορτίου, υποδηλώνουν ένα πρότυπο αστοχίας που ταιριάζει σε αυτό της διαμήκους διάτμησης.

Όσον αφορά την δυσκαμψία της πλάκας, η οποία ταυτίζεται με την κλίση του διαγράμματος, είναι εμφανές ότι μετά την κύρια ρωγμή στο τέλος του ελαστικού κλάδου επέρχεται σχεδόν μηδενισμός της, αφού ο μετελεστικός κλάδος είναι σχεδόν οριζόντιος. Έτσι πλέον η πλάκα αδυνατεί να παραλάβει επιπλέον φορτίο και η συμπεριφορά της μπορεί να χαρακτηριστεί ως ψαθυρή. Τέλος, η απορρόφηση ενέργειας της πλάκας για $\delta_{max}=7,78mm$ ανέρχεται περίπου στα 828Joule.

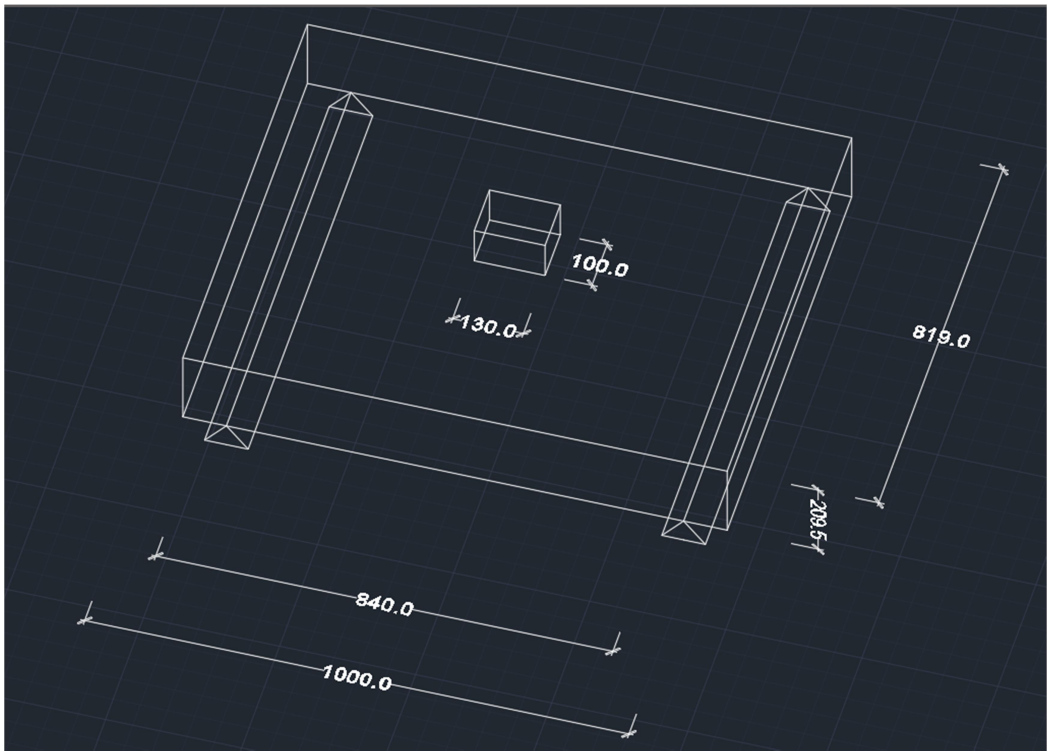
4.1.3 Δοκίμιο Β20-2/1

ΔΟΚΙΜΙΟ Β 20-2/1

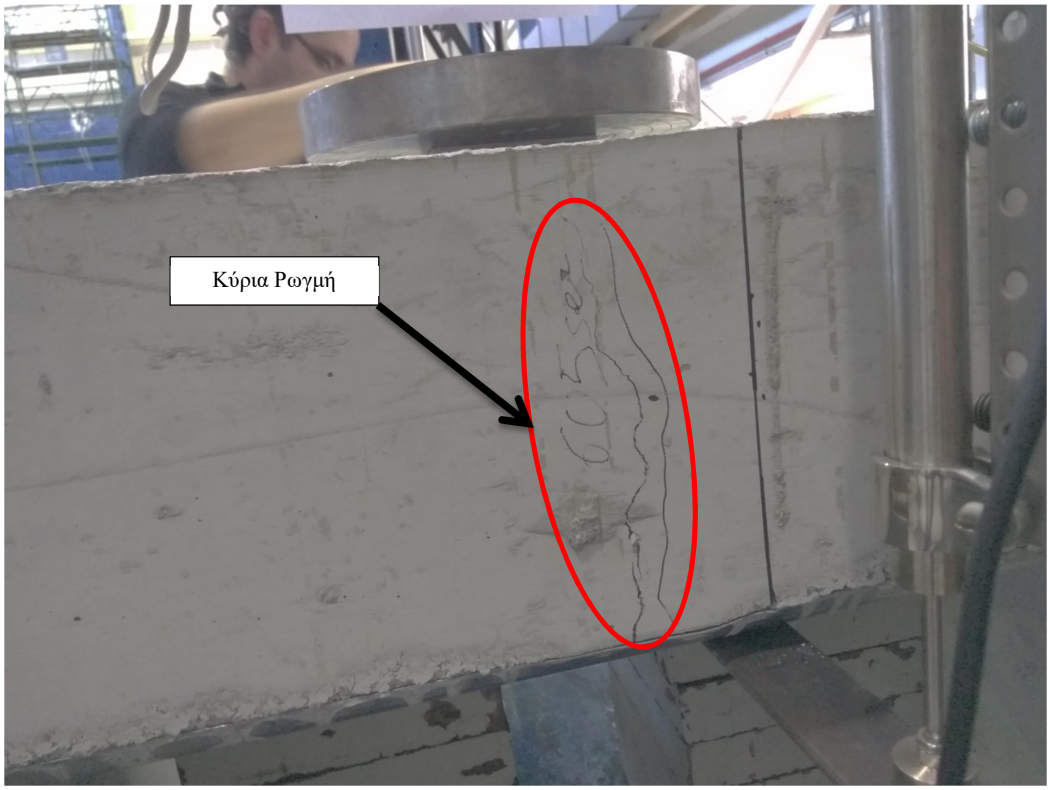
Α) Περιγραφή πειράματος δοκιμίου

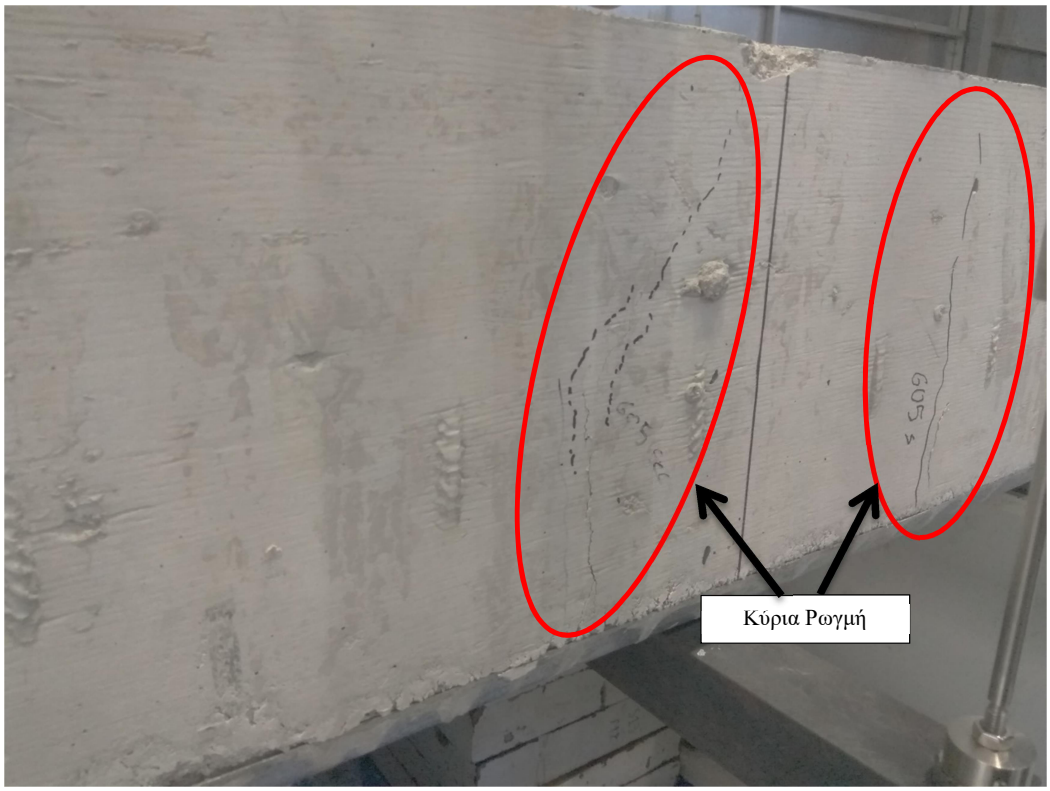
Ονομασία δοκιμίου	Β20-2/1
Ομάδα δοκιμίου	$1^{η}$
Ημερομηνία Διεξαγωγής Πειράματος	12/03/2018
Μέσο ύψος πλάκας [mm]	209,50
Μέσο μήκος πλάκας [mm]	1000,00
Μέσο πλάτος πλάκας [mm]	819,00
Μέση απόσταση στηρίξεων [mm]	840,00
Ίδιο Βάρος Πλάκας (εντός των στηρίξεων) [kN]	2,51
Μόνιμα Βάρη – Μηχανισμού Φόρτισης & Πλάκας [kN]	2,83
Παρατηρήσεις επί της γεωμετρίας του δοκιμίου	
Ως δοκίμιο για το συγκεκριμένο πείραμα θεωρήθηκε το μέρος της πλάκας που βρισκόταν εντός των στηρίξεων, καθώς λόγω στατικών και κυκλικών φορτίσεων που είχαν προηγηθεί για τον προσδιορισμό των συντελεστών m-k των πλακών τα τμήματα εκατέρωθεν αγνοήθηκαν ως πλήρως καταπονημένα και ρηγματωμένα.	
Φορτίο Εμφάνισης Πρώτης Ρωγμής [kN]	126,80
Χρόνος Εμφάνισης Πρώτης Ρωγμής [sec]	605
Μέγιστο Φορτίο Pmax [kN]	133,49
Φορτίο Αστοχίας Pu [kN]	133,49
Μέγιστο Μέσο Βέλος δmax [mm]	6,00
Εκτιμώμενη Οπτικά Μορφή Αστοχίας	Διαμήκης Διάτμηση

Β) Καταγεγραμμένη όψη πειράματος του συγκεκριμένου δοκιμίου με τις διαστάσεις σε mm

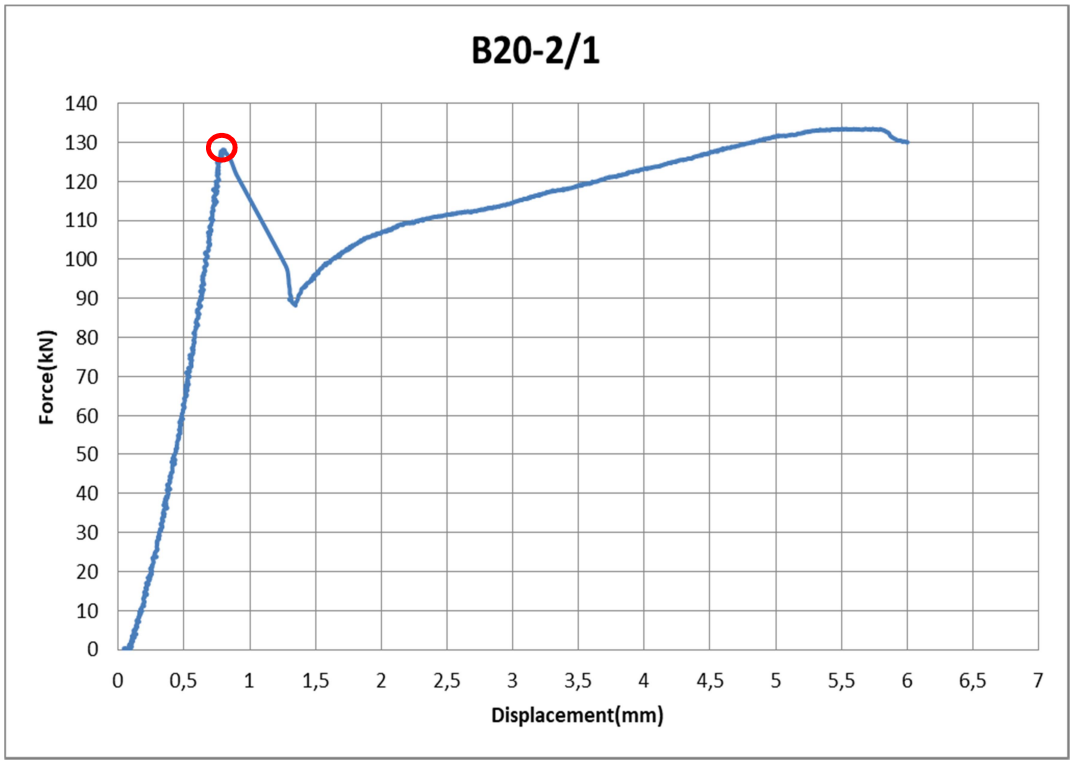


Γ) Φωτογραφίες Πειράματος





Δ) Διάγραμμα Πειράματος



Ε) Σχολιασμός ως προς το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης του πειράματος

Με τον κόκκινο κύκλο σημειώθηκε η δύναμη και το αντίστοιχο βέλος κάμψεως στα οποία πραγματοποιήθηκαν ταυτόχρονα οι ρωγμές εκατέρωθεν της πλάκας που φαίνονται στις πιο πάνω φωτογραφίες για δύναμη P=126,11kN και αντίστοιχο βέλος κάμψεως δ=0,79mm. Οι ρωγμές που εμφανίστηκαν έχουν κλίση $80\text{-}90^0$ ως προς την οριζόντιο, καθώς και η εμφάνιση των ρωγμών ιδιαίτερα κοντά στη θέση εφαρμογής του φορτίου, υποδηλώνουν ένα πρότυπο αστοχίας που ταιριάζει σε αυτό της διαμήκους διάτμησης.

Όσον αφορά την δυσκαμψία της πλάκας, η οποία ταυτίζεται με την κλίση του διαγράμματος, είναι εμφανές ότι μετά τις κύριες ρωγμές στο τέλος του ελαστικού κλάδου επέρχεται ένα διάστημα ανακατανομής στην πλάκα και ύστερα σταδιακή μείωση της εναπομένουσας δυσκαμψίας . Έτσι πλέον η πλάκα αδυνατεί να παραλάβει επιπλέον φορτίο και η συμπεριφορά της μπορεί να χαρακτηριστεί ως πλάστιμη. Τέλος, η απορρόφηση ενέργειας της πλάκας για δ_{max}=6,0mm ανέρχεται περίπου στα 656,5Joule.

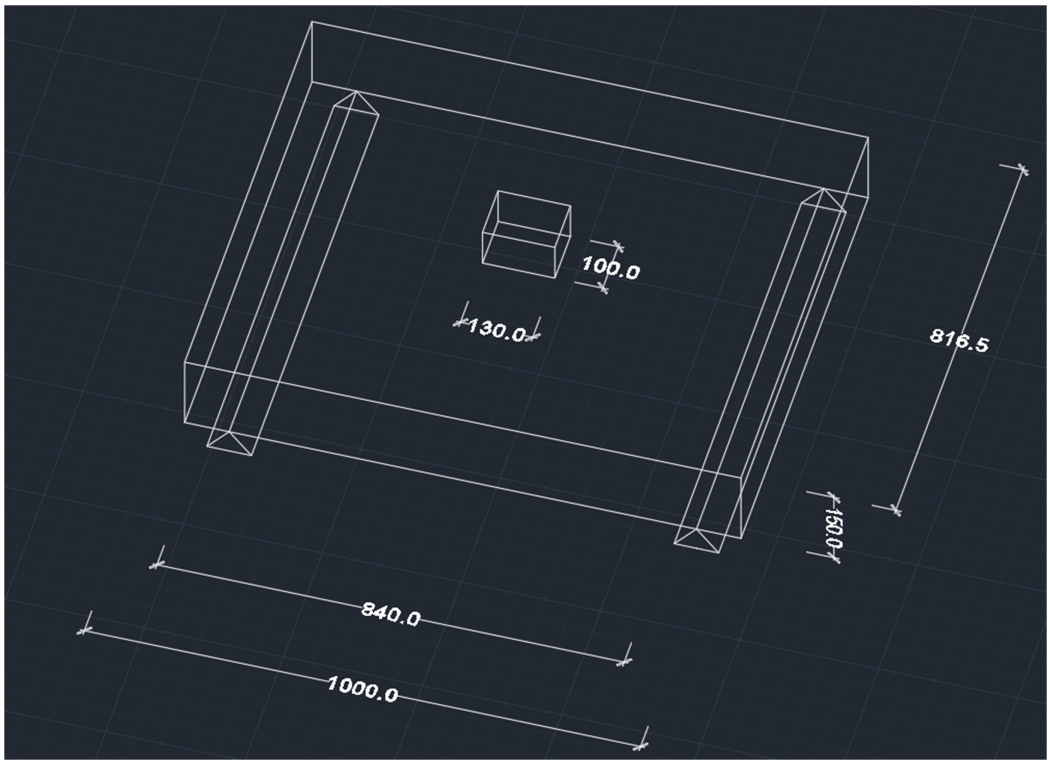
4.1.4 Δοκίμιο B15-2/1

ΔΟΚΙΜΙΟ B 15-2/1

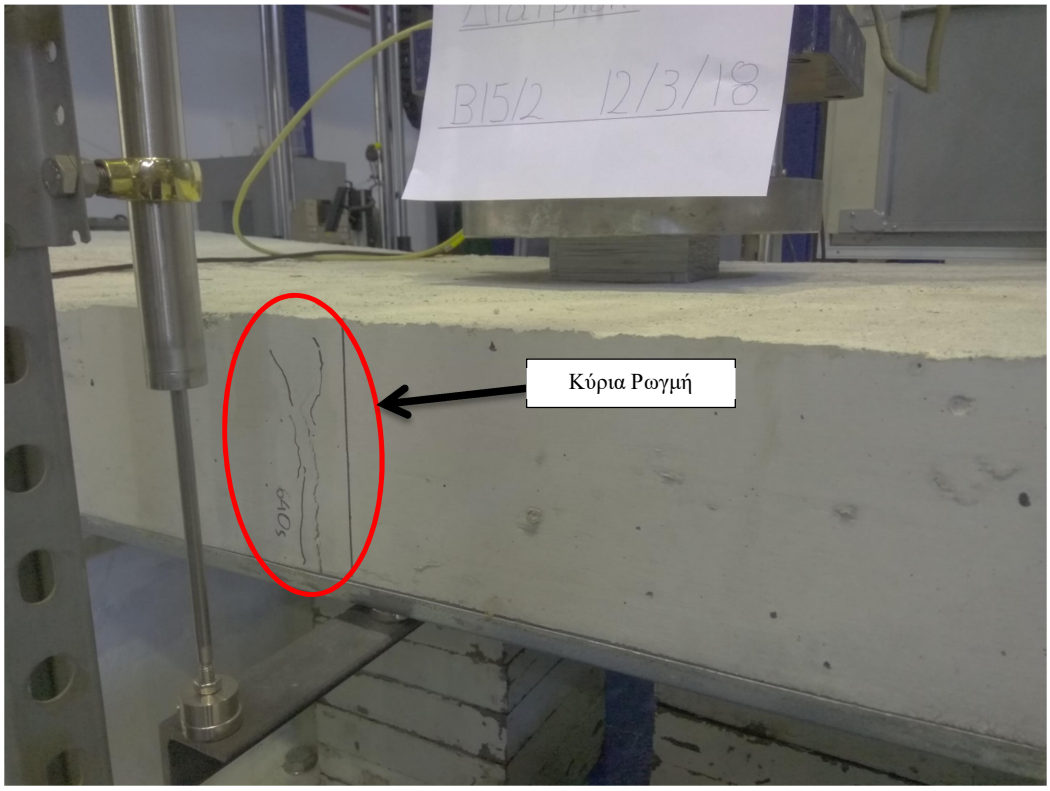
Α) Περιγραφή πειράματος δοκιμίου

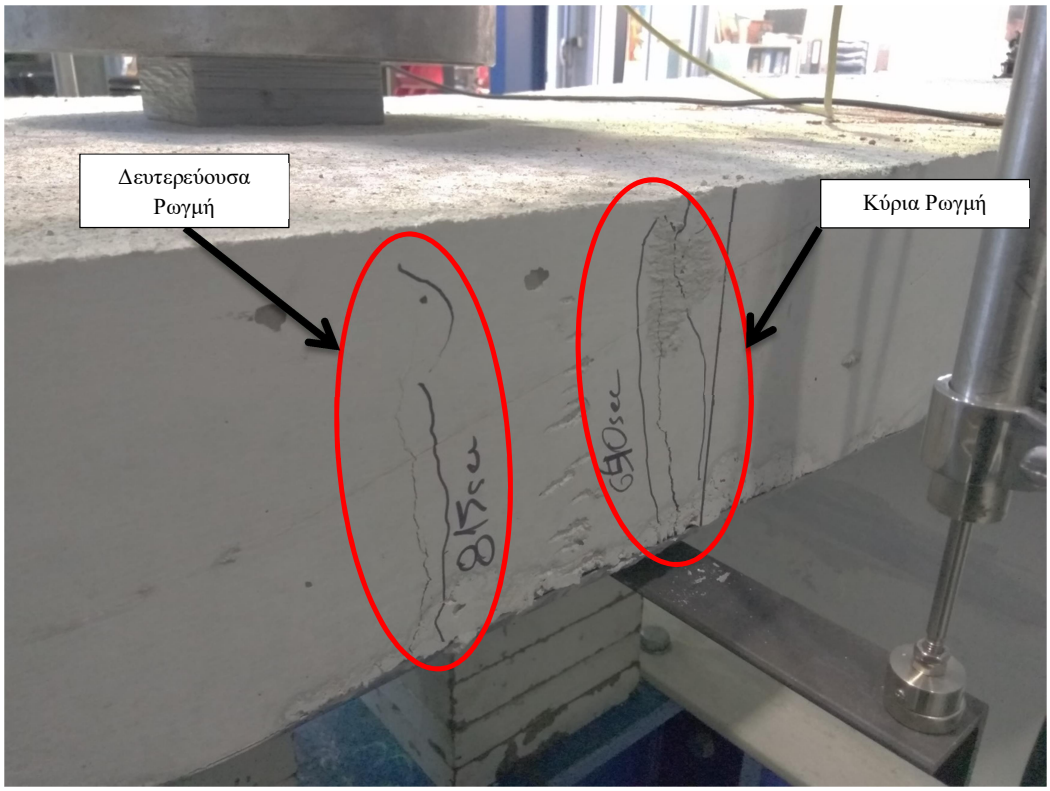
Ονομασία δοκιμίου	B15-2/1
Ομάδα δοκιμίου	$1^{η}$
Ημερομηνία Διεξαγωγής Πειράματος	12/03/2018
Μέσο ύψος πλάκας [mm]	150,00
Μέσο μήκος πλάκας [mm]	1000,00
Μέσο πλάτος πλάκας [mm]	816,50
Μέση απόσταση στηρίξεων [mm]	840,00
Ίδιο Βάρος Πλάκας (εντός των στηρίξεων) [kN]	1,79
Μόνιμα Βάρη – Μηχανισμού Φόρτισης & Πλάκας [kN]	2,11
Παρατηρήσεις επί της γεωμετρίας του δοκιμίου	
Ως δοκίμιο για το συγκεκριμένο πείραμα θεωρήθηκε το μέρος της πλάκας που βρισκόταν εντός των στηρίξεων, καθώς λόγω στατικών και κυκλικών φορτίσεων που είχαν προηγηθεί για τον προσδιορισμό των συντελεστών m-k των πλακών τα τμήματα εκατέρωθεν αγνοήθηκαν ως πλήρως καταπονημένα και ρηγματωμένα.	
Φορτίο Εμφάνισης Πρώτης Ρωγμής [kN]	63,20
Χρόνος Εμφάνισης Πρώτης Ρωγμής [sec]	640
Μέγιστο Φορτίο Pmax [kN]	94,88
Φορτίο Αστοχίας Pu [kN]	94,88
Μέγιστο Μέσο Βέλος δmax [mm]	9,69
Εκτιμώμενη Οπτικά Μορφή Αστοχίας	Διαμήκης Διάτμηση

Β) Καταγεγραμμένη όψη πειράματος του συγκεκριμένου δοκιμίου με τις διαστάσεις σε mm

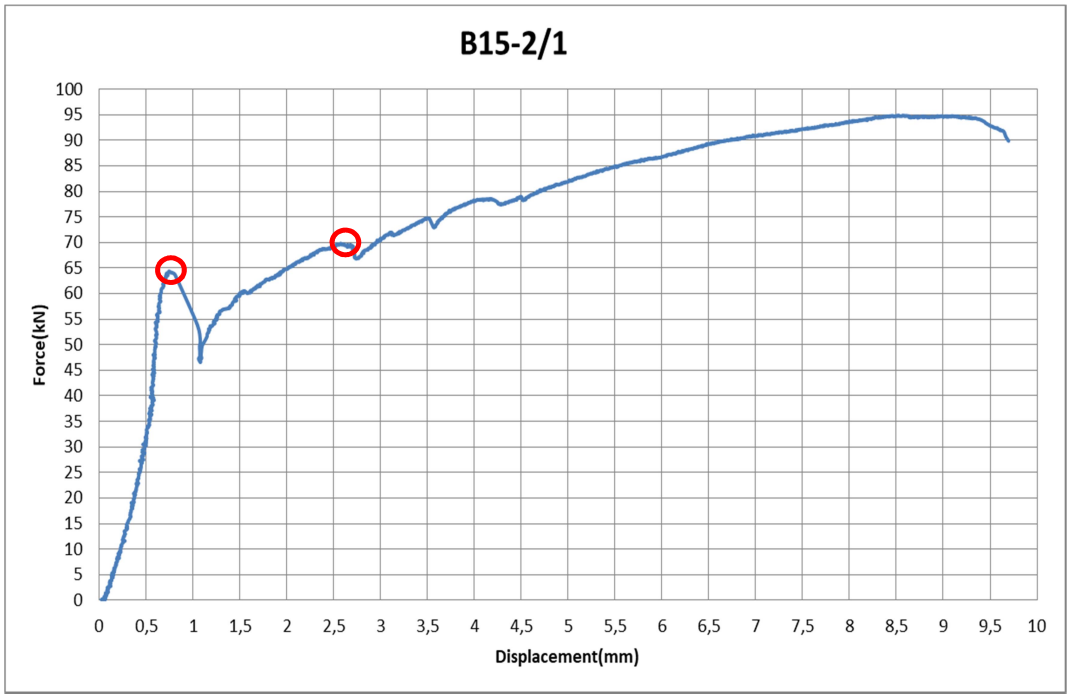


Γ) Φωτογραφίες Πειράματος





Δ) Διάγραμμα Πειράματος



Ε) Σχολιασμός ως προς το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης του πειράματος

Με τους κόκκινους κύκλους σημειώθηκαν οι δυνάμεις και τα αντίστοιχα βέλη κάμψεως στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι ρωγμές που φαίνονται στις πιο πάνω φωτογραφίες με πρώτη στο διάγραμμα την κύρια ρωγμή για δύναμη P_1=63,0kN και αντίστοιχο βέλος κάμψεως δ_1=0,70mm, ενώ για τη δεύτερη P_2=69,62kN και δ_2=2,54mm. Παρόλα αυτά, η πλάκα μέσω των εσωτερικών ανακατανομών της καταφέρνει και φτάνει σε μια P_{max}=94,89kN για δ_{Pmax}=8,52mm υποδεικνύοντας έτσι μία πλάστιμη συμπεριφορά. Οι ρωγμές που εμφανίστηκαν έχουν κλίση 80-90^0 ως προς την οριζόντιο, καθώς και η εμφάνιση των ρωγμών ιδιαίτερα κοντά στη θέση εφαρμογής του φορτίου, υποδηλώνουν ένα πρότυπο αστοχίας που ταιριάζει σε αυτό της διαμήκους διάτμησης.

Όσον αφορά την δυσκαμψία της πλάκας, η οποία ταυτίζεται με την κλίση του διαγράμματος, είναι εμφανές ότι μετά τις κύριες ρωγμές στο τέλος του ελαστικού κλάδου επέρχεται ένα διάστημα ανακατανομής στην πλάκα και ύστερα σταδιακή μείωση της εναπομένουσας δυσκαμψίας, μέχρι που τελικά μηδενίζεται και το πείραμα τερματίζεται. Έτσι πλέον η πλάκα αδυνατεί να παραλάβει επιπλέον φορτίο και το ύψος και εύρος των ρωγμών που είχαν δημιουργηθεί ολοένα και αυξάνεται μέχρι αστοχίας. Τέλος, η απορρόφηση ενέργειας της πλάκας για δ_{max}=9,70mm ανέρχεται περίπου στα 740,4 Joule.

4.2 Αποτελέσματα 2ης ομάδας δοκιμών

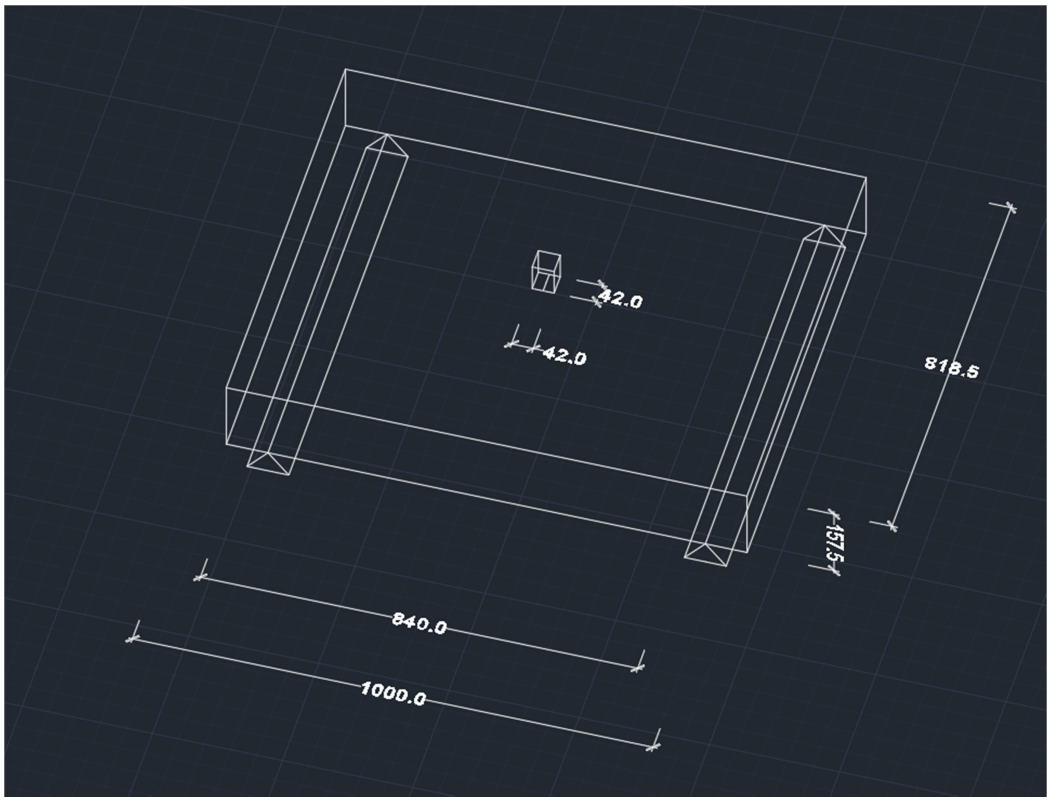
4.2.1 Δοκίμιο B15-1/2

ΔΟΚΙΜΙΟ Β 15-1/2

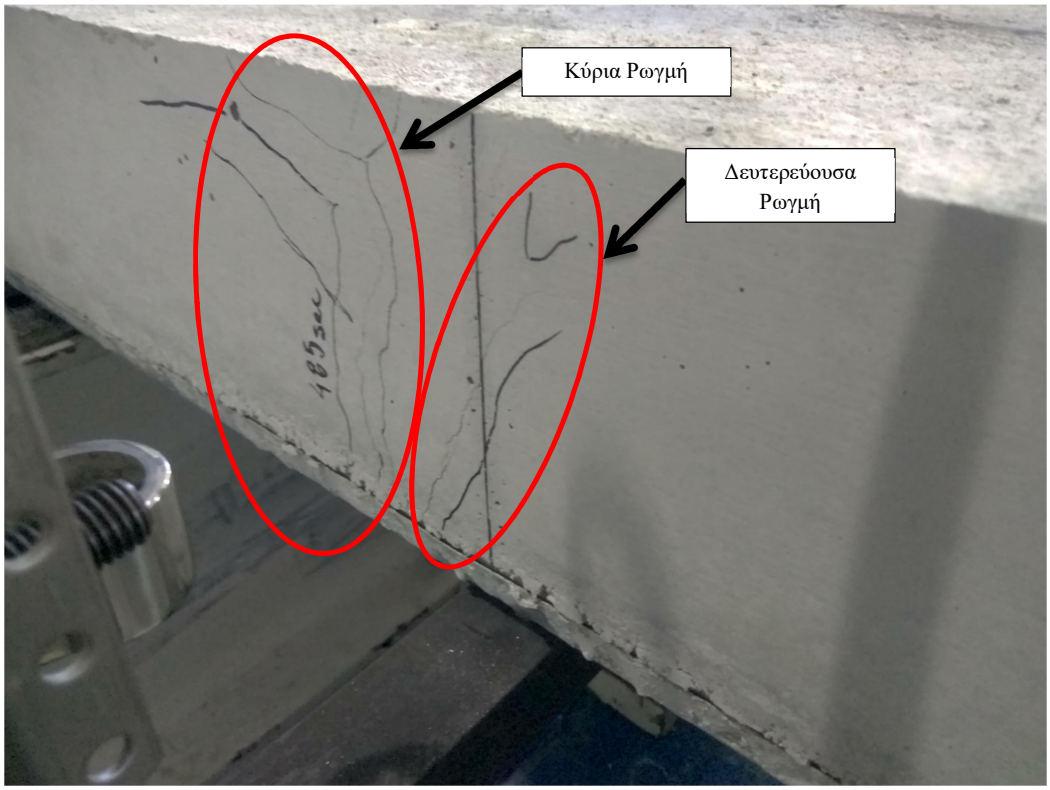
Α) Περιγραφή πειράματος δοκιμίου

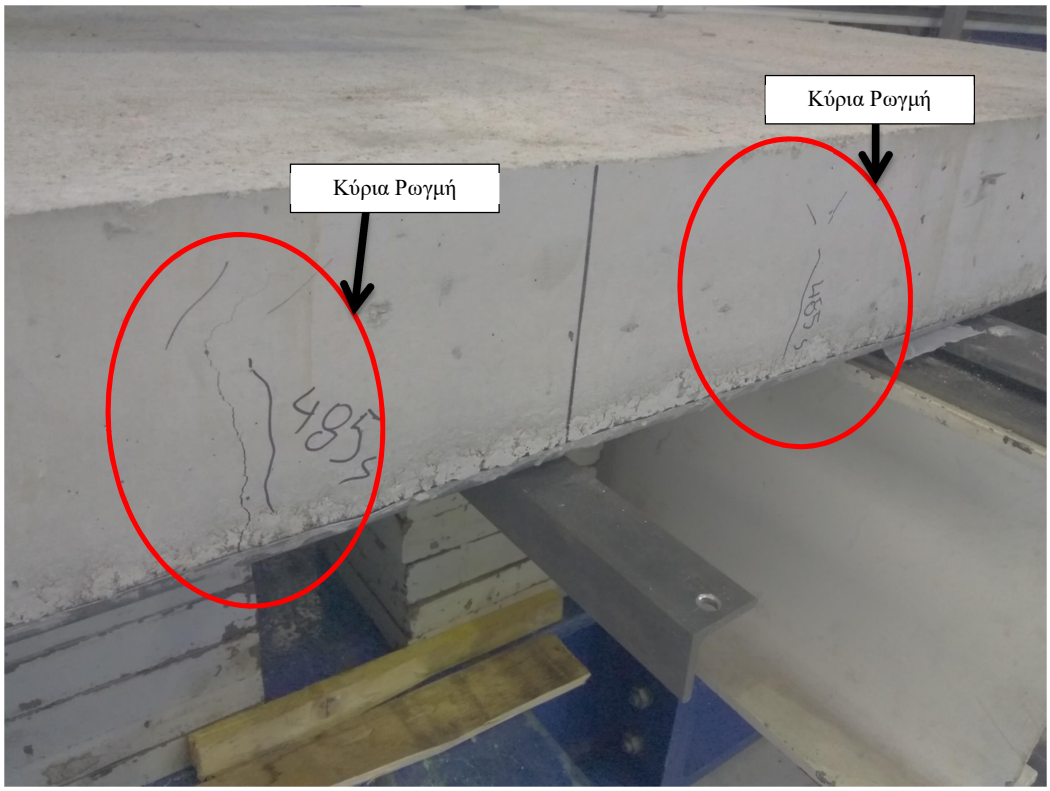
Ονομασία δοκιμίου	B15-1/2
Ομάδα δοκιμίου	2η
Ημερομηνία Διεξαγωγής Πειράματος	13/03/2018
Μέσο ύψος πλάκας [mm]	157,50
Μέσο μήκος πλάκας [mm]	1000,00
Μέσο πλάτος πλάκας [mm]	818,50
Μέση απόσταση στηρίξεων [mm]	840,00
Ίδιο Βάρος Πλάκας (εντός των στηρίξεων) [kN]	1,88
Μόνιμα Βάρη – Μηχανισμού Φόρτισης & Πλάκας [kN]	2,16
Παρατηρήσεις επί της γεωμετρίας του δοκιμίου	
Ως δοκίμιο για το συγκεκριμένο πείραμα θεωρήθηκε το μέρος της πλάκας που βρισκόταν εντός των στηρίξεων, καθώς λόγω στατικών και κυκλικών φορτίσεων που είχαν προηγηθεί για τον προσδιορισμό των συντελεστών m-k των πλακών τα τμήματα εκατέρωθεν αγνοήθηκαν ως πλήρως καταπονημένα και ρηγματωμένα.	
Φορτίο Εμφάνισης Πρώτης Ρωγμής [kN]	52,18
Χρόνος Εμφάνισης Πρώτης Ρωγμής [sec]	485
Μέγιστο Φορτίο Pmax [kN]	81,24
Φορτίο Αστοχίας Pu [kN]	81,24
Μέγιστο Μέσο Βέλος δmax [mm]	7,40
Εκτιμώμενη Οπτικά Μορφή Αστοχίας	Διάτρηση

B) Καταγεγραμμένη όψη πειράματος του συγκεκριμένου δοκιμίου με τις διαστάσεις σε mm

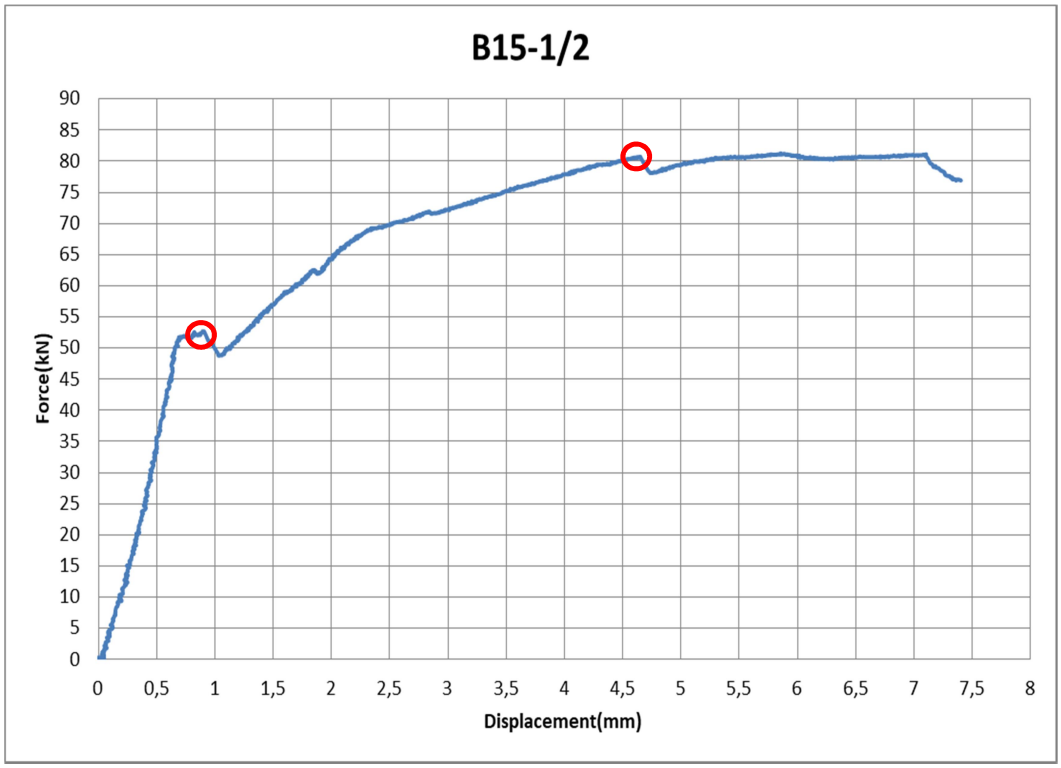


Γ) Φωτογραφίες Πειράματος





Δ) Διάγραμμα Πειράματος



Ε) Σχολιασμός ως προς το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης του πειράματος

Με τους κόκκινους κύκλους σημειώθηκαν οι δυνάμεις και τα αντίστοιχα βέλη κάμψεως στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι ρωγμές που φαίνονται στις πιο πάνω φωτογραφίες με πρώτη στο διάγραμμα τις τρεις κύριες ρωγμές για δύναμη P_1=52,18kN και αντίστοιχο βέλος κάμψεως δ_1=0,83mm, ενώ για τη τέταρτη (δευτερεύουσα) P_2=80,57kN και δ_2=4,60mm. Παρόλα αυτά, η πλάκα μέσω των εσωτερικών ανακατανομών της καταφέρνει και φτάνει σε μια P_{max}=81,24kN για δ_{Pmax}=5,86mm υποδεικνύοντας έτσι μία πλάστιμη συμπεριφορά. Οι ρωγμές που εμφανίστηκαν έχουν κλίση 60-70^0 ως προς την οριζόντιο, καθώς και η εμφάνιση των ρωγμών ιδιαίτερα σε απόσταση από τη θέση εφαρμογής του φορτίου, υποδηλώνουν ένα πρότυπο αστοχίας που ταιριάζει σε αυτό της διάτρησης.

Όσον αφορά την δυσκαμψία της πλάκας, η οποία ταυτίζεται με την κλίση του διαγράμματος, είναι εμφανές ότι μετά τις κύριες ρωγμές στο τέλος του ελαστικού κλάδου επέρχεται ένα μικρό διάστημα ανακατανομής στην πλάκα και ύστερα σταδιακή αύξηση της εναπομένουσας δυσκαμψίας, μέχρι που τελικά πραγματοποιείται και η τελευταία ρωγμή και η δυσκαμψία μηδενίζεται και το πείραμα τερματίζεται. Έτσι πλέον η πλάκα αδυνατεί να παραλάβει επιπλέον φορτίο και το ύψος και εύρος των ρωγμών που είχαν δημιουργηθεί ολοένα και αυξάνεται μέχρι αστοχίας. Τέλος, η απορρόφηση ενέργειας της πλάκας για δ_{max}=7,40mm ανέρχεται περίπου στα 505,16 Joule.

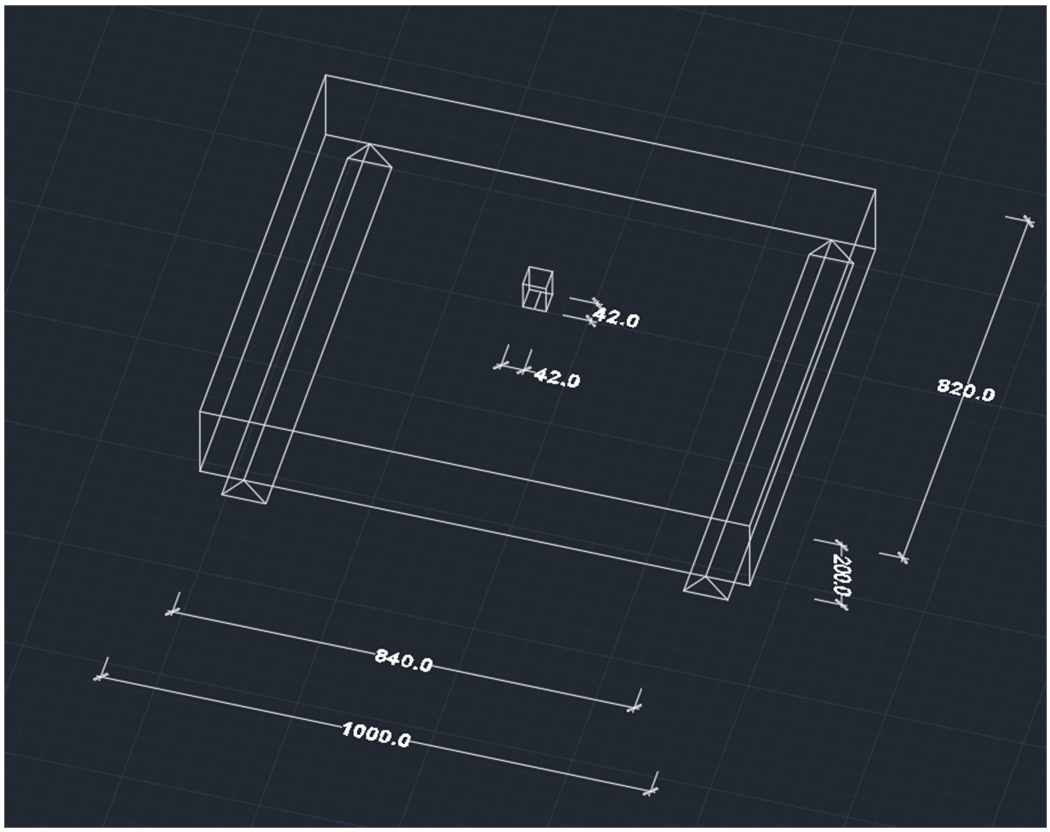
4.2.2 Δοκίμιο Β20-1/2

ΔΟΚΙΜΙΟ Β 20-1/2

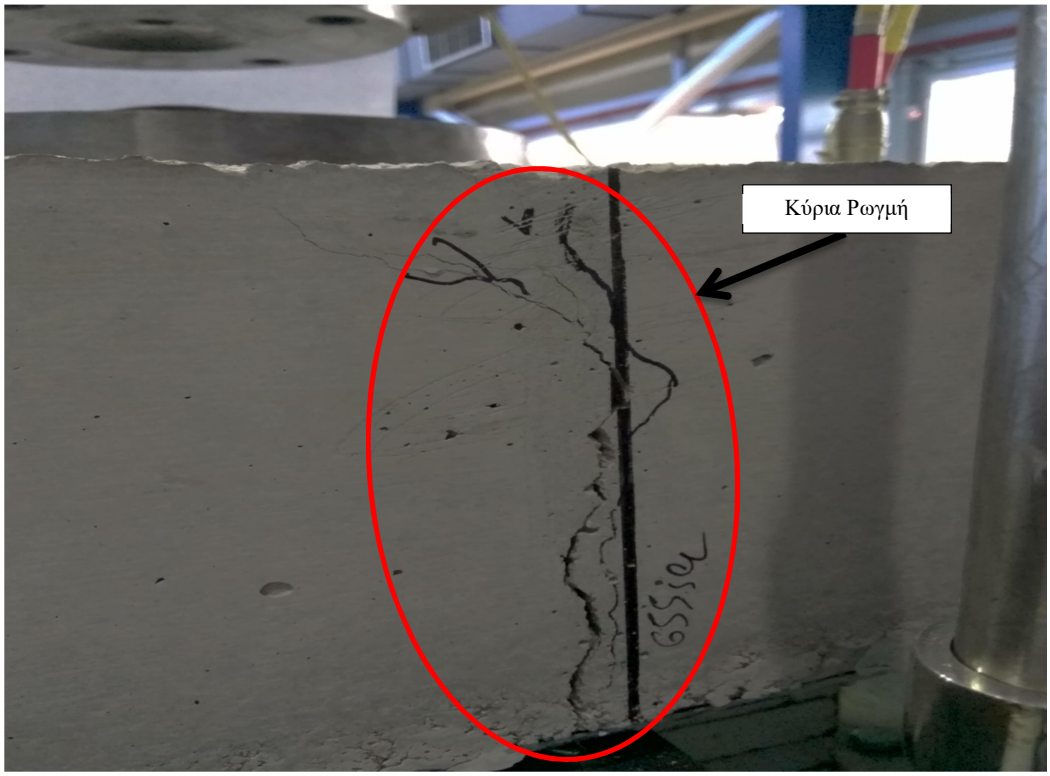
Α) Περιγραφή πειράματος δοκιμίου

Ονομασία δοκιμίου	Β20-1/2
Ομάδα δοκιμίου	$2^{η}$
Ημερομηνία Διεξαγωγής Πειράματος	13/03/2018
Μέσο ύψος πλάκας [mm]	200,00
Μέσο μήκος πλάκας [mm]	1000,00
Μέσο πλάτος πλάκας [mm]	820,00
Μέση απόσταση στηρίξεων [mm]	840,00
Ίδιο Βάρος Πλάκας (εντός των στηρίξεων) [kN]	2,39
Μόνιμα Βάρη – Μηχανισμού Φόρτισης & Πλάκας [kN]	2,67
Παρατηρήσεις επί της γεωμετρίας του δοκιμίου	
Ως δοκίμιο για το συγκεκριμένο πείραμα θεωρήθηκε το μέρος της πλάκας που βρισκόταν εντός των στηρίξεων, καθώς λόγω στατικών και κυκλικών φορτίσεων που είχαν προηγηθεί για τον προσδιορισμό των συντελεστών m-k των πλακών τα τμήματα εκατέρωθεν αγνοήθηκαν ως πλήρως καταπονημένα και ρηγματωμένα.	
Φορτίο Εμφάνισης Πρώτης Ρωγμής [kN]	92,68
Χρόνος Εμφάνισης Πρώτης Ρωγμής [sec]	550
Μέγιστο Φορτίο Pmax [kN]	110,80
Φορτίο Αστοχίας Pu [kN]	110,80
Μέγιστο Μέσο Βέλος δmax [mm]	9,44
Εκτιμώμενη Οπτικά Μορφή Αστοχίας	Διαμήκη Διάτμηση

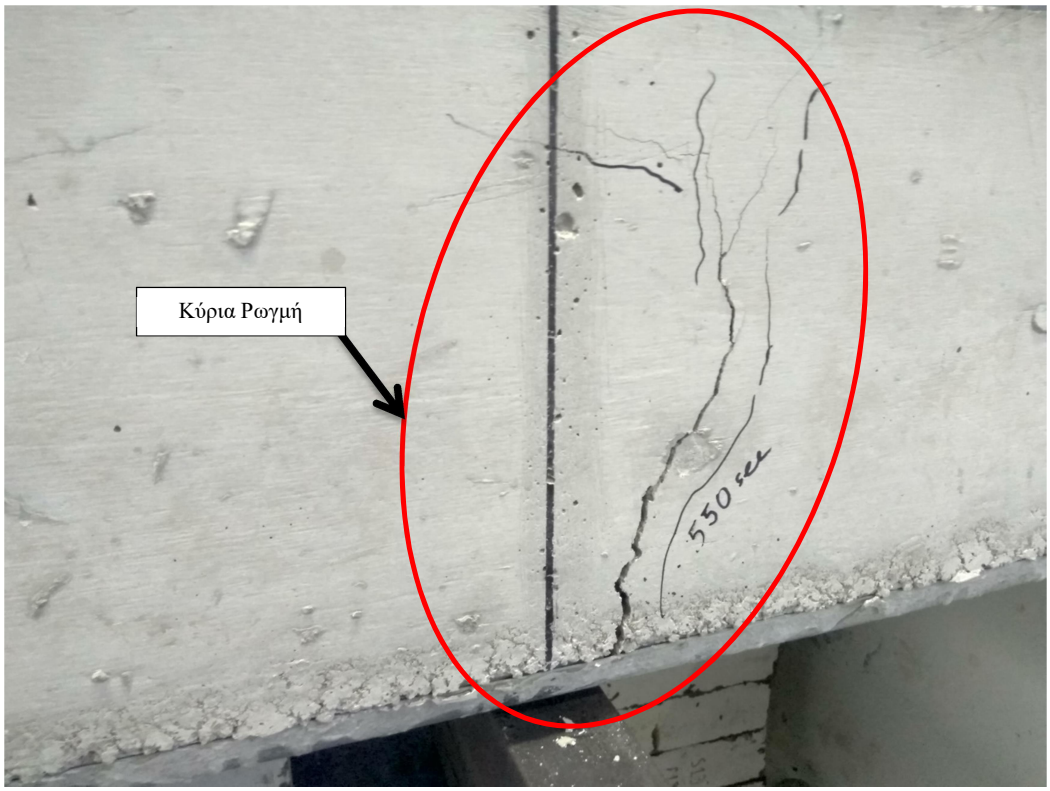
Β) Καταγεγραμμένη όψη πειράματος του συγκεκριμένου δοκιμίου με τις διαστάσεις σε mm.



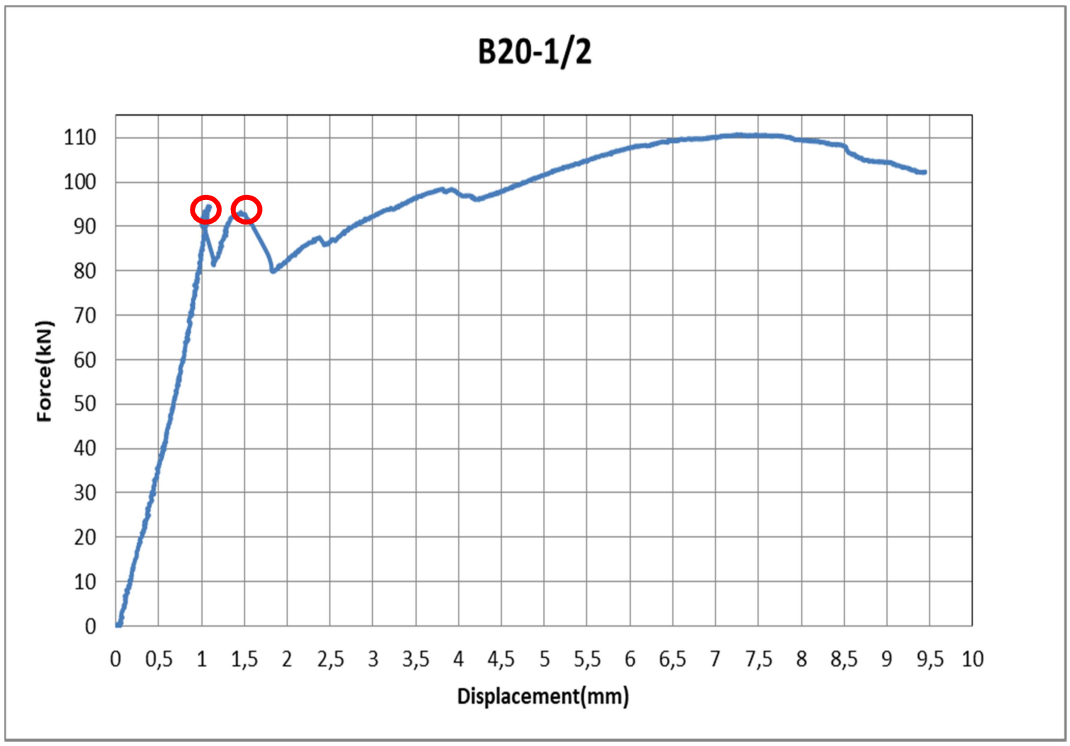
Γ) Φωτογραφίες Πειράματος



1170 sec


Κύρια Ρωγμή
550 sec

Δ) Διάγραμμα Πειράματος



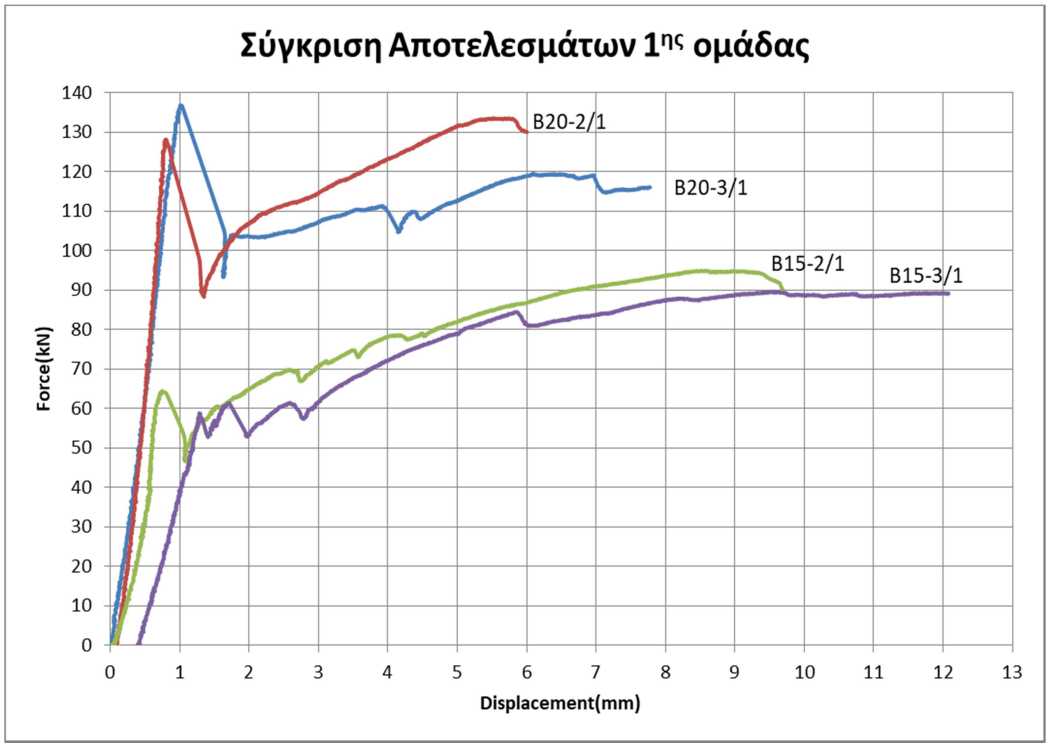
Ε) Σχολιασμός ως προς το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης του πειράματος

Με τους κόκκινους κύκλους σημειώθηκαν οι δυνάμεις και τα αντίστοιχα βέλη κάμψεως στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι κύριες ρωγμές που φαίνονται στις πιο πάνω φωτογραφίες με πρώτη από τη μία μεριά της πλάκας στο διάγραμμα για δύναμη P_1=92,69kN και αντίστοιχο βέλος κάμψεως δ_1=1,07mm, ενώ για τη δεύτερη P_2=91,94kN και δ_2=1,34mm. Παρόλα αυτά, η πλάκα μέσω των εσωτερικών ανακατανομών της καταφέρνει και φτάνει σε μια P_{max}=110,80kN για δ_{Pmax}=7,25mm υποδεικνύοντας έτσι μία πλάστιμη συμπεριφορά. Οι ρωγμές που εμφανίστηκαν έχουν κλίση 80-90^0 ως προς την οριζόντιο, καθώς και η εμφάνιση των ρωγμών στη θέση εφαρμογής του φορτίου, υποδηλώνουν ένα πρότυπο αστοχίας που ταιριάζει σε αυτό της διαμήκους διάτμησης.

Όσον αφορά την δυσκαμψία της πλάκας, η οποία ταυτίζεται με την κλίση του διαγράμματος, είναι εμφανές ότι μετά τις κύριες ρωγμές στο τέλος του ελαστικού κλάδου επέρχεται ένα διάστημα ανακατανομής στην πλάκα και ύστερα σταδιακή μείωση της εναπομένουσας δυσκαμψίας, μέχρι που τελικά μηδενίζεται και το πείραμα τερματίζεται. Έτσι πλέον η πλάκα αδυνατεί να παραλάβει επιπλέον φορτίο και το ύψος και εύρος των ρωγμών που είχαν δημιουργηθεί ολοένα και αυξάνεται μέχρι αστοχίας. Επίσης, στην τελευταία φωτογραφία παρατηρείται η επιρροή της ολίσθησης στη κατακόρυφη μεταλλική πλάκα. Τέλος, η απορρόφηση ενέργειας της πλάκας για δ_{max}=9,44mm ανέρχεται περίπου στα 882,57 Joule.

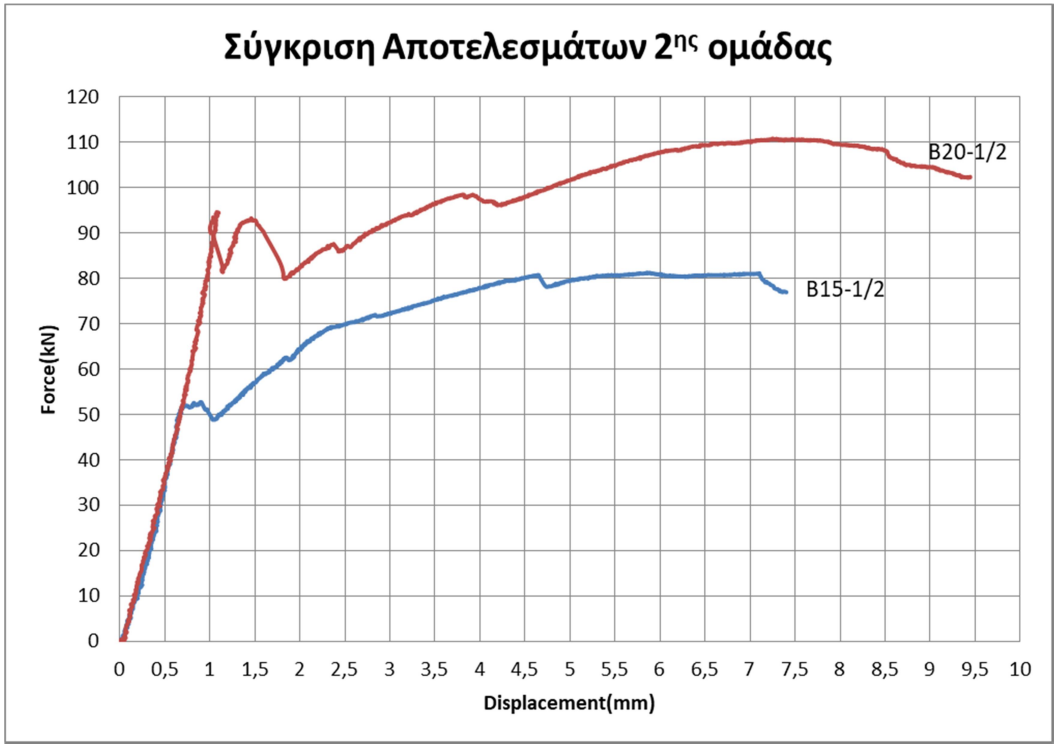
5. Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραματικών δοκιμών

5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων 1ης ομάδας



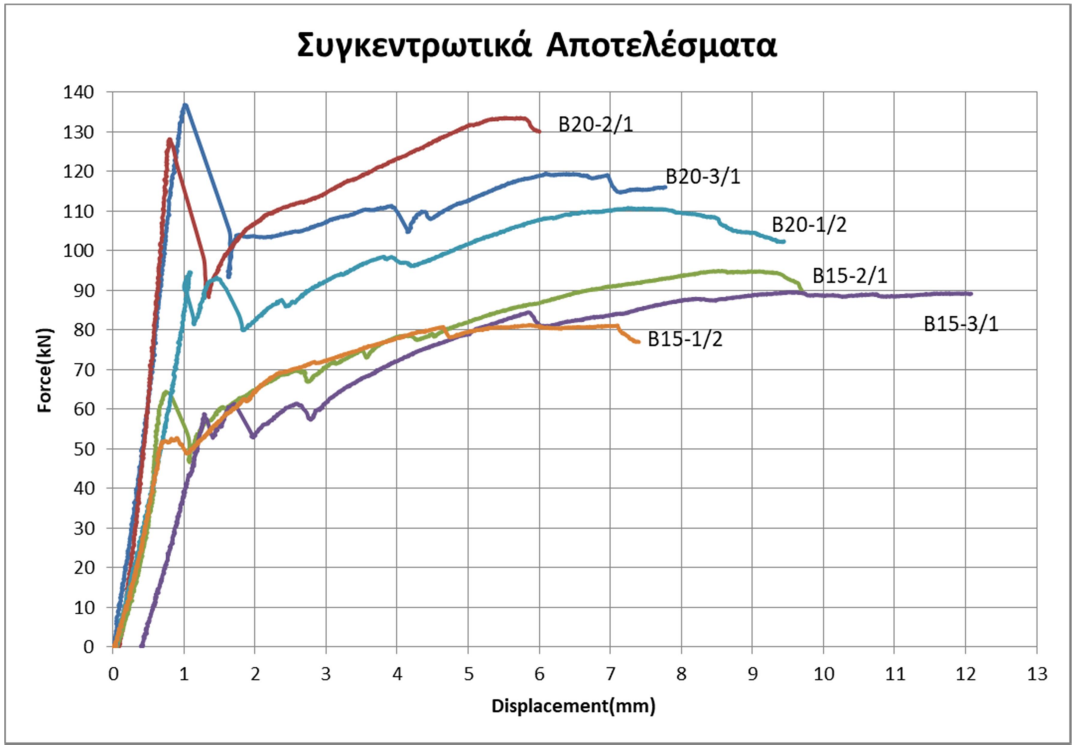
Οι πρώτες ρωγμές σε όλες τις πλάκες της πρώτης ομάδας δοκιμών πραγματοποιήθηκαν στο διάστημα βέλους κάμψεως δ=0,70-1,35mm και για δυνάμεις σχεδόν αντίστοιχες για κάθε πάχος πλάκας, δηλαδή $P_{1,B20-2/1} \approx P_{1,B20-3/1} \approx 130kN$ και $P_{1,B15-2/1} \approx P_{1,B15-3/1} \approx 60kN$. Όσον αφορά τις μέγιστες δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατ' αντιστοιχία με την προηγούμενη παρατήρηση ισχύει ότι $P_{max,B20-2/1} \approx P_{max,B20-3/1} \approx 134kN$ και $P_{max,B15-2/1} \approx P_{max,B15-3/1} \approx 90kN$. Γενικά, οι πλάκες με πάχος 20cm παρουσίασαν υψηλές αρχικές αντοχές αλλά είχαν μετελαστικά ιδιαίτερα ψαθυρή συμπεριφορά. Σε αντίθεση οι πλάκες των 15cm παρότι ανέπτυξαν πολύ μικρότερες δυνάμεις, είχαν γενικά πλάστιμη συμπεριφορά και εν γένει απορρόφησαν μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας από ότι οι πρώτες.

5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων 2ης ομάδας



Οι πρώτες ρωγμές και στις δύο πλάκες της δεύτερης ομάδας δοκιμών πραγματοποιήθηκαν στο διάστημα βέλους κάμψεως δ=0,80-1,10mm και για δυνάμεις $P_{1,B20-1/2}$=92,69kN και $P_{1,B15-1/2}$=52,18kN. Όσον αφορά τις μέγιστες δυνάμεις που αναπτύχθηκαν ισχύει ότι $P_{max,B20-1/2}$=110,80kN και $P_{max,B15-1/2}$=81,24kN . Γενικά, η πλάκα με πάχος 20cm παρουσίασε υψηλές αρχικές αντοχές και είχε μετελαστικά πλάστιμη συμπεριφορά. Ομοίως, η πλάκα των 15cm παρότι ανέπτυξε πολύ μικρότερες δυνάμεις, είχε παρόμοια πλάστιμη συμπεριφορά και εν γένει απορρόφησε μικρότερη ποσότητα ενέργειας από ότι η πρώτη.

5.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα και για τις δύο ομάδες



Με βάση και τις πιο πάνω συγκρίσεις τα δοκίμια της 1^{ης} ομάδας παρουσίασαν συγκριτικά με της 2^{ης} μεγαλύτερες αντοχές, ειδικά στις πλάκες με ύψος 20cm. Παρόλα αυτά, η 2^{η} ομάδα έδειξε μία πιο σταθερή-πλάστιμη συμπεριφορά πλακών, αφού στην 1^{η} υπήρχε διαχωρισμός σε αυτό το κομμάτι ανάλογα με το ύψος της πλάκας.

5.4 Σύγκριση των πειραματικών αντοχών με τις αντίστοιχες που προβλέπει ο Ευρωκώδικας 4

Πίνακας 5.1: Σύγκριση τιμών πειράματος με τις αντίστοιχες αντοχές από τους Ευρωκώδικες

		B15-3/1	B20-3/1	B20-2/1	B15-2/1	B15-1/2	B20-1/2
Pmax (πειράματος)	kN	89,55	136,78	133,50	94,89	81,24	110,80
δ_{Pmax}	mm	9,52	1,00	5,51	8,52	5,86	7,25
δ_{max}	mm	12,08	7,78	6,00	9,70	7,40	9,44
Απορρόφηση Ενέργειας	J(N·m)	879,04	828,16	656,50	740,40	505,16	882,57
$M_{pl,Rd}^{+}$	kNm	30,02	47,74	51,00	27,55	27,64	43,36
$V_{v,Rd}$	kN	24,40	35,90	37,96	22,75	21,53	31,70
$V_{l,Rd}$	kN	18,89	32,25	34,37	17,42	17,39	29,31
$V_{p,Rd}$	kN	149,12	230,72	245,62	137,66	111,22	179,42
$V_{Ed,max}$	kN	44,775	68,39	66,75	47,445	40,62	55,4
$M_{Ed,max}$	kNm	18,8055	28,7238	28,035	19,9269	17,0604	23,268

Από το Κεφάλαιο 4 είναι εμφανές ότι για κάθε δοκίμιο η πραγματική δύναμη για την οποία αστόχησε είναι διπλάσια από την ελάχιστη αντοχή, η οποία σε όλες τις περιπτώσεις είναι η αντίσταση σε διαμήκη διάτμηση, που υπολογίστηκε μέσω της μεθόδου «m-k».

Πίνακας 5.2 : Μορφές αστοχίας που προέκυψαν λόγω των Ευρωκωδίκων 2&4

$P_{evaluation}$	B15-3/1	B20-3/1	B20-2/1	B15-2/1	B15-1/2	B20-1/2
Κάμψη	142,93	227,32	242,87	131,18	131,63	206,45
Εγάρσια Διάτμηση	48,79	71,79	75,92	45,49	43,06	63,40
Διαμήκη Διάτμηση	37,78	64,50	68,74	34,84	34,78	58,62
Διάτρηση	89,55	136,78	133,50	94,89	81,24	110,80

Στον παραπάνω πίνακα φαίνεται η ακριβής δύναμη που πρέπει να ασκήσει το έμβολο στις πλάκες ώστε να αστοχήσουν με τις συγκεκριμένες μορφές αστοχίας.

Πίνακας 5.3 : Εκτιμώμενες μορφές αστοχίας λόγω μορφής ρηγματώσεων (Κεφ.4)

Μορφή Αστοχίας	B15-3/1	B20-3/1	B20-2/1	B15-2/1	B15-1/2	B20-1/2
Κάμψη						
Εγάρσια Διάτμηση						
Διαμήκη Διάτμηση		x	x	x		x
Διάτρηση	x				x	

5.5 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα του Κεφ.4 και τις συγκρίσεις στο Κεφ.5 είναι εμφανές ότι η κρισιμότερη μορφή αστοχίας στις υπό εξέταση σύμμικτες πλάκες υπό συγκεντρωμένο φορτίο είναι η διαμήκης διάτμηση ανεξάρτητα το πάχος της πλάκας. Παρόλα αυτά, η απόκλιση των πραγματικών αντοχών από τα πειράματα με τις υπολογιζόμενες αντοχές $V_{l,Rd}$ σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 4 (εδώ χωρίς τον συντελεστή γ_{vs}=1,25 , με σκοπό την προσέγγιση τον πραγματικών αντοχών σε διαμήκη διάτμηση), υποδεικνύει ότι η διαστασιολόγηση σύμμικτων πλακών με τη μέθοδο «m-k» είναι ιδιαίτερα αυστηρή και αντιοικονομική. Επιπρόσθετα, η εμφάνιση χαρακτηριστικών ρωγμών που ταιριάζουν σε μορφή αστοχίας διάτρησης σε κάποιες από τις υπό εξέταση πλάκες, καθώς και η εν μέρει μικρή απόσταση της μέγιστης δύναμης P_{max} από την αντοχή έναντι διάτρησης $V_{p,Rd}$, υποδεικνύουν ότι υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ της διαμήκους διάτμησης και διάτρησης στις συγκεκριμένες πλάκες με συγκεντρωμένο φορτίο. Έτσι, μία πρόταση για ενίσχυση αυτών των πλακών και την αύξηση της αντοχής του έναντι αυτών των δύο μηχανισμών αστοχίας θα ήταν η κατά μήκος των αυλακώσεων τοποθέτηση διατμητικών ήλων, με μία μικρή πύκνωση μέσα στην περιοχή επιρροής του συγκεντρωμένου φορτίου.

6. Βιβλιογραφία

1. Βάγιας Ι. (2010). «Σύμμικτες Κατασκευές από Χάλυβα και Οπλισμένο Σκυρόδεμα». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.

2. Βάγιας Ι. , Dubina D. (2004). «Σιδηρές Κατασκευές από Λεπτότοιχες Διατομές Ψυχρής Διαμόρφωσης». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.

3. Βάγιας Ι. , Ερμόπουλος Ι. , Ιωαννίδης Γ. (2004). «Σιδηρές κατασκευές, παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Τόμος ΙΙ». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.

4. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (2005α). «Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, 2η έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.

5. Bode H. (2005). «Ευρωπαϊκές Σύμμικτες Κατασκευές, Εκτέλεση και Διαστασιολόγηση Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 4 και άλλα Συναφή Πρότυπα». Εκδόσεις Γκιούρδας, Αθήνα.

6. Τάσιος Θ. Π., Γιαννόπουλος Π. Ι., Τρέζος Κ. Γ., Τσουκαντάς Σ. Γ., (2005). «Ωπλισμένο Σκυρόδεμα με Βάση τον Νέο Ελληνικό Κανονισμό Σκυροδέματος». Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου.

7. Τριανταφύλλου Α. (2007). «Σύμμικτες Κατασκευές». Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα.

8. Rackham J. W., Couchman G.H., Hicks S.J., (2009). «Composite slabs and beams using steel decking: Best practice for design and construction», published by: The metal cladding & roofing manufacturers association in partnership with SCI.

9. Xiao-Qing Xu, Yu-Qing Liu (2013). «Punching shear behavior of steel-concrete composite decks with different shear connectors», Presented in: The 2013 World congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics.

10. Ryosuke Takahashi, Yasuhiko Sato, Katsuyuki Konno, Tamon Ueda (2005) «3D Nonlinear Punching Shear Simulation of Steel-Concrete Composite Slab», Scientific paper.

11. Eurocode 0.” Bases of structural design”. EN1990:2001 E. Brussels.

12. Eurocode 1. “Actions on structures”. EN1992-1-1:2004 E. Brussels.

13. Eurocode 2. “Design of Concrete Structures”. EN1994-1-1:2004 E. Brussels.

14. Eurocode 3. “Design of Steel Structures”. EN1993:2005 E. Brussels.

15. Eurocode 4. “Design of Composite Steel and Concrete Structures”. EN1994-1-1:2004 E. Brussels.