

# Εφαρμογές σκυροδεμάτων υψηλής επιτελεστικότητας σε νέες κατασκευές η στην ενίσχυση υφισταμένων

A. Κανελλόπουλος  
*Dr.sc.techn. ETH Zuerich, CUBUS HELLAS Ltd*

E. Μυστακίδης  
*Αναπληρωτής Καθηγητής. Εργαστήριο ανάλυσης και σχεδιασμού κατασκευών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας*

*Λέξεις κλειδιά:* ινοπλισμένο σκυρόδεμα, σκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας, λυγηροί στύλοι, προεντεταμένες δοκοί, σύμμικτες πλάκες, ενισχύσεις με μανδύες

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Στην εργασία παρουσιάζονται εφαρμογές σκυροδεμάτων υπερυψηλής αντοχής. Οι εφαρμογές αναφέρονται τόσο σε νέες όσο και σε υφιστάμενες κατασκευές και περιλαμβάνουν προκατασκευή λυγηρών στύλων, προκατασκευή δοκών, σύμμικτες πλάκες και ενίσχυση φορέων μέσω εφαρμογής μανδύων μικρών παχών με υψηλή αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό.

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως σκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας (Σ.Υ.Ε.), χαρακτηρίζεται οποιοδήποτε σκυρόδεμα ικανοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια που προτείνονται προκειμένου να αρθούν οι περιορισμοί των συμβατικών σκυροδεμάτων. Η κατηγορία των σκυροδεμάτων υψηλής επιτελεστικότητας περιλαμβάνει σκυροδέματα που παρέχουν βελτιωμένη αντοχή στις περιβαλλοντικές επιρροές, αισθητά αυξημένες αντοχές, ανθεκτικότητα στο χρόνο κλπ. Επίσης περιλαμβάνει σκυροδέματα που μειώνουν σημαντικά το χρόνο κατασκευής και επιτρέπουν την ταχύτατη επισκευή υφιστάμενων στοιχείων. Επομένως δεν είναι δυνατό να δοθεί ένας μοναδικός ορισμός των Σ.Υ.Ε. χωρίς να εξετασθούν όλα τα διαφορετικά χαρακτηριστικά και οι παράμετροι που καθορίζουν την επιτελεστικότητα του σκυροδέματος. Ο Forster (Foster 1994) όρισε το Σ.Υ.Ε. ως «ένα σκυρόδεμα που παρασκευάζεται με κατάλληλα υλικά που συνδυάζονται σύμφωνα με ένα επιλεγμένο σχέδιο μιγμάτων και αναμιγνύονται κατάλληλα, μεταφέρονται, τοποθετούνται, στερεοποιούνται, και συντηρούνται, έτσι ώστε το προκύπτον υλικό να επιδείξει άριστη απόδοση στην κατασκευή για την οποία προορίζεται και για τα φορτία στα οποία θα υποβληθεί για τον προβλεπόμενο χρόνο ζωής του». Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών το ενδιαφέρον βαθμιαία έχει μετατοπιστεί από τη θλιπτική δύναμη σε άλλες ιδιότητες του υλικού, όπως το υψηλό μέτρο ελαστικότητας, η υψηλή πυκνότητα, η χαμηλή διαπερατότητα και η αντίσταση σε διάφορες μορφές προσβολής (Aitein και Neville 1993). Ένας ευρύτερος ορισμός του Σ.Υ.Ε. υιοθετήθηκε από το American Concrete Institute. Το Σ.Υ.Ε. ορίστηκε ως το σκυρόδεμα που καλύπτει τις ειδικές απαιτήσεις απόδοσης και ομοιομορφίας που δεν μπορούν πάντα να επιτευχθούν με τη χρήση μόνο των συμβατικών υλικών. Οι απαιτήσεις μπορούν να περιλάβουν βελτίωση διάφορων χαρακτηριστικών όπως π.χ. της σκυροδέτησης χωρίς διαχωρισμό, τις μακροπρόθεσμες μηχανικές ιδιότητες, την πρόωρη αντοχή, τη σταθερότητα του όγκου, ή το χρόνο ζωής σε δύσκολες συνθήκες περιβάλλοντος. Τα σκυροδέματα που διαθέτουν πολλά από αυτά τα χαρακτηριστικά επιτυγχάνουν συχνά και την υψηλότερη αντοχή. Επομένως τα Σ.Υ.Ε. είναι συχνά υψηλής αντοχής, αλλά το σκυρόδεμα υψηλής αντοχής μπορεί να μην είναι απαραίτητως υψηλής επιτελεστικότητας.

Στο εξωτερικό, τα σκυροδέματα υψηλής επιτελεστικότητας έχουν αποκτήσει ευρύτατη χρήση εδώ και αρκετές δεκαετίες. Στην Ελλάδα, τα πρώτα βήματα για την παραγωγή σκυροδεμάτων υψηλής

επιτελεστικότητα έχουν ήδη γίνει από την εταιρεία ΑΓΕΤ-Ηρακλής, στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος που συγχρηματοδοτείται από τη Γ.Γ.Ε.Τ, την ΑΓΕΤ-Ηρακλής και την CUBUS Hellas και υλοποιείται σε συνεργασία με το Εργαστήριο Ανάλυσης και Σχεδιασμού Κατασκευών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το υλικό που αναπτύσσεται στα πλαίσια του προαναφερθέντος προγράμματος είναι ινοπλισμένο κονίαμα θλιπτικής αντοχής της τάξης των 110Μρα και υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τεχνολογικά προβλήματα και εφαρμογές όπου το όφελος από τη χρήση σκυροδεμάτων υψηλής επιτελεστικότητας μπορεί να είναι ουσιώδες. Οι εφαρμογές που θα παρουσιασθούν είναι οι παρακάτω:

- Προκατασκευή λυγηρών στύλων .
- Προκατασκευασμένα στοιχεία με ή χωρίς προένταση.
- Σύμμικτες κατασκευές.
- Ενίσχυση και αποκατάσταση φορέων μέσω εφαρμογής μανδυνών μικρών παχών με υψηλή αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό, ενίσχυση διατομών ή προσθήκη οπλισμών μέσω συνάφειας και πρόσφυσης.

Επιπροσθέτως το συγκεκριμένο υλικό μπορεί να βρει και άλλες εφαρμογές όπως

- Σε περιοχές εισαγωγής συγκεντρωμένων δυνάμεων (προένταση) όπου εμφανίζονται υψηλές τάσεις διάρρηξης.
- Σε επικαλύψεις έναντι διαβρωτικών μέσων (σωλήνες, σήραγγες, φρεάτια).
- Σε εφαρμογές προστασίας από εκρηκτικές ύλες όπου απαιτείται υψηλή εφελκυστική αντοχή.

## 2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Για το νέο υλικό τέθηκαν εξ αρχής υψηλοί στόχοι, που αφορούσαν στο σύνολο των ιδιοτήτων του υλικού ούτως ώστε να μπορεί πράγματι να χαρακτηριστεί ως «σκυροδέμα υψηλής επιτελεστικότητας» και όχι απλώς «σκυροδέμα υψηλής αντοχής». Ο σχεδιασμός ξεκίνησε από τις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος και επεκτάθηκε στις ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος.

### 2.1 Ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος

Οι βασικές απαιτήσεις για το νέο υλικό εστιάστηκαν κυρίως στα παρακάτω:

- **Εργασιμότητα**

Λόγω της σχεδιαζόμενης χρήσης του νέου υλικού σε αντισεισμικές εφαρμογές ενισχύσεων υφιστάμενων κατασκευών, απαιτήθηκε υψηλή εργασιμότητα, παραπλήσια με αυτήν των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων (βλέπε Σχήμα 1).

- **Χρόνος πήξης**

Ο χρόνος πήξης του νέου υλικού πρέπει να επιτρέπει ικανό χρόνο επεξεργασίας ειδικά τις θερμότερες περιόδους του έτους. Απ' την άλλη πλευρά, λόγω της σχεδιαζόμενης εφαρμογής σε υφιστάμενες κατασκευές απαιτήθηκε η δυνατότητα ταχείας αφαίρεσης των ξυλοτύπων.

- **Συντήρηση**

Το νέο υλικό πρέπει να δίνει τη δυνατότητα για εφαρμογές και εκτός εργοστασίων προκατασκευής, όπου υπάρχει γενικώς η δυνατότητα προσεκτικής συντήρησης.

- **Αντοχή σε απόμιξη**

Λόγω της χρήσης ινών για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του υλικού, λήφθηκε ιδιαίτερη μέριμνα ούτως ώστε να μην παρατηρείται απόμιξη των ινών και γενικώς το υλικό να διατηρεί την ομοιογένειά του μετά από τη διέλευσή του από τους συνήθεις μηχανισμούς άντλησης.

### 2.2 Ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος

Οι βασικές απαιτήσεις για το νέο υλικό εστιάστηκαν κυρίως στα παρακάτω:

- **Θλιπτική αντοχή**

Για τη θλιπτική αντοχή τέθηκε εξ' αρχής ο στόχος των 100MPa. Ήδη το υλικό που αναπτύχθηκε διαθέτει θλιπτική αντοχή μεγαλύτερη των 110 MPa.



Σχήμα 1: Εργασιμότητα του νέου ινοπλισμένου σκυροδέματος

- **Εφελκυστική – καμπτική αντοχή**

Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος παίζει πρωταρχικό ρόλο για εφαρμογές όπου αναπτύσσονται σημαντικά εφελκυστικά πεδία τάσεων, όπως σε κόμβους πλαισίων, σε θέσεις εισαγωγής συγκεντρωμένων δυνάμεων, σε βλητρώσεις, στις θέσεις των διατμητικών ήλων σύμμικτων κατασκευών κλπ. Επίσης, η αυξημένη εφελκυστική αντοχή οδηγεί και σε αυξημένη αντοχή σε διάτμηση.

- **Συνάφεια παλαιού-νέου σκυροδέματος**

Η δυνατότητα του νέου σκυροδέματος να συνδυάζεται με υφιστάμενο σκυρόδεμα θεωρήθηκε εξ' αρχής ως θεμελιώδης, αφού ένας από τους πρωταρχικούς στόχους της ερευνητικής ομάδας ήταν η εφαρμογή σε αντισεισμικές ενισχύσεις υφιστάμενων κατασκευών.

- **Ικανότητα παραμόρφωσης**

Η ικανότητα παραμόρφωσης είναι μέγεθος που επηρεάζει αποφασιστικά την καταλληλότητα του υλικού για χρήση σε αντισεισμικές εφαρμογές. Ο κυρίαρχος παράγοντας για την παράμετρο αυτή είναι το ογκομετρικό ποσοστό και ο τύπος των ινών που χρησιμοποιούνται. Στο συγκεκριμένο υλικό χρησιμοποιούνται ίνες με αγκύρωση ούτως ώστε να αναπτύσσεται σύνθετος μηχανισμός εξόλκευσης με τριβή – θραύση των ινών και να αυξάνεται η ικανότητα παραμόρφωσης. Στα σχήματα 2 και 3 δίνονται τυπικά διαγράμματα επιβαλλομένης δύναμης – βέλους κάμψης καμπτόμενων δοκιμίων διαστάσεων 10x10x50cm. Το διάγραμμα του σχήματος 2 αντιστοιχεί σε δοκίμιο από ινοπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ το διάγραμμα του σχήματος 3 αντιστοιχεί σε δοκίμιο από τη τσιμεντοειδή μήτρα χωρίς ίνες. Η βελτίωση της ικανότητας παραμόρφωσης στο ινοπλισμένο δοκίμιο είναι θεαματική.

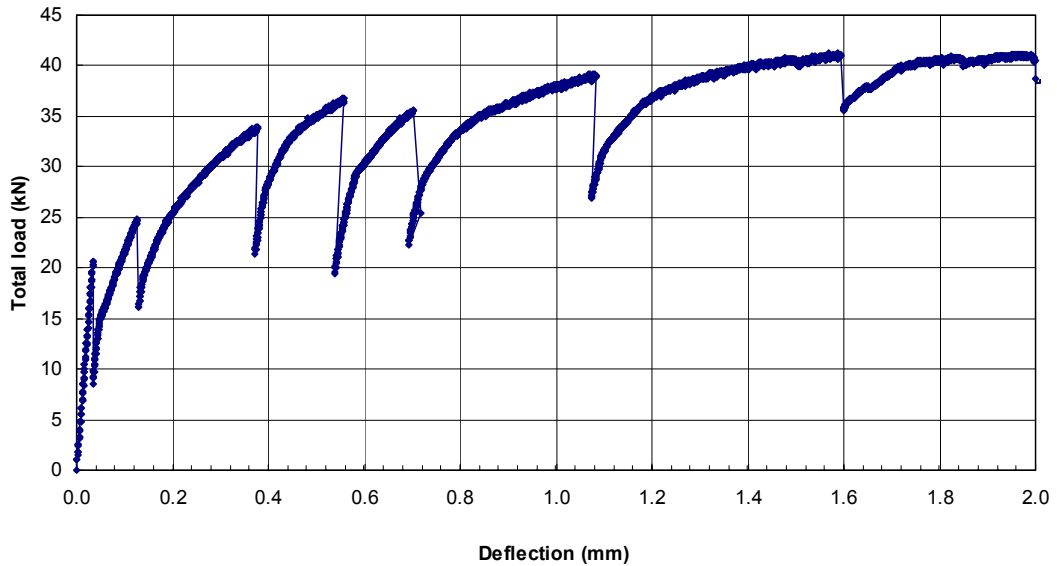
- **Συρρίκνωση**

Το θέμα της συρρίκνωσης είναι πολύ μεγάλης σημασίας όταν πρόκειται για εφαρμογές σε υφιστάμενα κτίρια. Εάν το νέο υλικό συρρικνώνεται σημαντικά, το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την υψηλή εφελκυστική αντοχή, πιθανόν να οδηγήσει σε πλήθος προβλημάτων, όπως η εισαγωγή παρασιτικών αυτογενών εντάσεων στα υφιστάμενα στοιχεία, ρηγματώσεις κλπ. Τελικά η

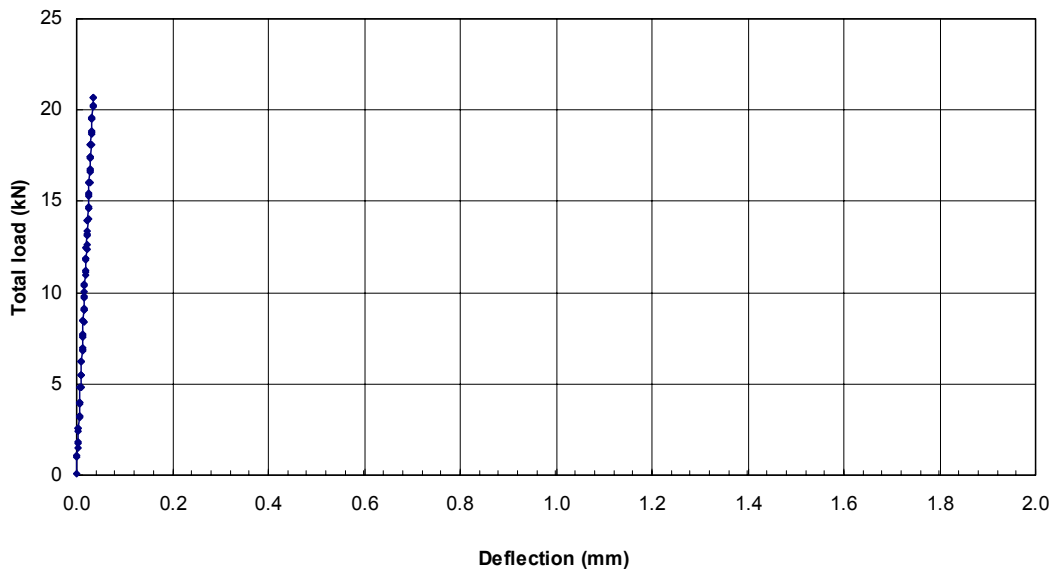
ερευνητική ομάδα κατάφερε να προσδώσει στο νέο ινοπλισμένο υλικό εξαιρετικές ιδιότητες σε ότι αφορά τη συρρίκνωση (σχεδόν μηδενική).

#### ▪ Ανθεκτικότητα

Η ανθεκτικότητα του νέου ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι εξαιρετική καθώς διαθέτει ελάχιστο πορώδες,



Σχήμα 2: Διάγραμμα επιβαλλόμενης δύναμης – βέλους κάμψης σε καμπτόμενο δοκίμιο ινοπλισμένου σκυροδέματος



Σχήμα 3: Διάγραμμα επιβαλλόμενης δύναμης – βέλους κάμψης σε καμπτόμενο δοκίμιο χωρίς ίνες.

### 3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

#### 3.1 Κατασκευή λυγηρών στύλων $\Phi=30\text{ cm}$ και $l=10\text{ m}$

Στόχος του παραδείγματος είναι η εφαρμογή Σ.Υ.Ε για την κατασκευή λυγηρού στύλου. Διερευνώνται τα παρακάτω θέματα:

- Η επιρροή της μειωμένης πλαστιμότητας του C100/115 ( $\epsilon_{cu}=-2.2\%$ ) έναντι του C25/30 ( $\epsilon_{cu}=-3.5\%$ ) καθώς και του συντελεστή ασφάλειας του σκυροδέματος  $\gamma_c \cdot \gamma_c' = 1.67$  (C100/115) έναντι του  $\gamma_c = 1.50$  (C25/30).
- Η επιρροή της χρήσης ινών στο σκυρόδεμα C100/115 προς αύξηση της πλαστιμότητας και τη συνεισφορά σε ανάληψη εφελκυστικών τάσεων ( $f_{ctm} = 10.0\text{ N/mm}^2$ ).
- Η βελτίωση της αντοχής και πλαστιμότητας καθώς και της δυσκαμψίας με χρήση μεταλλικού μανδύα (κοιλοδοκός ROR 298.5/2.9) 22.2 kg/m.

Παραδοχές : πάκτωση κάτω – οριζόντια στήριξη άνω, ύψος 10 m, διατομή κυκλική  $\Phi 30\text{ cm}$ .

Ύψος στύλου :  $l=10\text{m}$

Διατομή στύλου : κυκλική διαμέτρου  $D=30\text{cm}$

Ποιότητες σκυροδέματος: C25/30, C100/115

Χάλυβας οπλισμού : BSt 500.

Χάλυβας δομικός : FeE 235.

Φορτία : Ίδιο βάρος στύλου 500kN (Μόνιμα), 200kN (Ωφέλιμα).

Προπαραμόρφωση : 5%, δηλ. 50mm.

Μέθοδος υπολογισμού : Μη γραμμική ανάλυση και ως προς το νόμο του υλικού (ρηγματωμένη διατομή), και ως προς την παραμόρφωση (στατική ανάλυση με θεωρία 2<sup>ης</sup> τάξης).

Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Pyrus 5 της εταιρείας Cubus.

#### **Αποτελέσματα υπολογισμών**

1<sup>η</sup> περίπτωση : Σκυρόδεμα C25/30

Διαστασιολόγηση κατά DIN 1045-1

Οριζόντιο βέλος : 78.52 mm

Βράχυνση : 12.83 mm

Αξονική δύναμη / Ροπή N/M: -976 kN / 91.2 kNm

Λόγος φορτίου θλίψης οπλ./σκυροδέματος : 1.72

Απαιτούμενος οπλισμός : 48.9 cm<sup>2</sup> ( $\rho=6.9\%$ ), Μάζα 384 kg

Έλεγχος σε θραύση :  $\gamma_k=1.0$

2<sup>η</sup> περίπτωση : Σύμμεικτη διατομή με C25/30

Διαστασιολόγηση κατά DIN 1045-1 : Μάζα κοιλοδοκού : 222 kg

Οριζόντιο βέλος : 58.3 mm

Βράχυνση : 11.0 mm

Αξονική δύναμη / Ροπή N/M: -976 kN / 75.9 kNm

Λόγος φορτίου θλίψης οπλ./σκυροδέματος : 1.44

Απαιτούμενος οπλισμός : 23.0 cm<sup>2</sup> ( $\rho=3.4\%$ ), Μάζα 180.3 kg

Έλεγχος σε θραύση :  $\gamma_k=1.0$

3<sup>η</sup> περίπτωση : Σκυρόδεμα C100/115

Διαστασιολόγηση κατά DIN 1045-1 :

Οριζόντιο βέλος : 26.0 mm

Βράχυνση : 4.3 mm

Αξονική δύναμη / Ροπή N/M: -975 kN / 53.0 kNm

Λόγος φορτίου θλίψης οπλ./σκυροδέματος : 0.05

Απαιτούμενος οπλισμός : 10.0 cm<sup>2</sup> ( $\rho=1.4\%$ )

Έλεγχος σε θραύση :  $\gamma_k=1.0$

4<sup>η</sup> περίπτωση : Σύμμεικτη διατομή με C100/115

Διαστασιολόγηση κατά DIN 1045-1 :

Οριζόντιο βέλος : 15.2 mm

Βράχυνση : 3.57 mm

Αξονική δύναμη / Ροπή N/M: -976 kN / 45.0 kNm

Λόγος φορτίου θλίψης οπλ./σκυροδέματος : 0.23

Έλεγχος σε θραύση :  $\gamma_k=2.06$

5<sup>η</sup> περίπτωση : Σκυρόδεμα C100/115 ινοπλισμένο ( $f_{ctm} = 10 \text{ N/mm}^2$ )

Διαστασιολόγηση κατά DIN 1045-1 :

Οριζόντιο βέλος : 20.0 mm

Βράχυνση : 4.27 mm

Αξονική δύναμη / Ροπή N/M: -976 kN / 50.0 kNm

Λόγος φορτίου θλίψης οπλ./σκυροδέματος : 0.01

Έλεγχος σε θραύση :  $\gamma_k=1.81$

6<sup>η</sup> περίπτωση : Σύμμεικτη διατομή με C100/115 ινοπλισμένο

Διαστασιολόγηση κατά DIN 1045-1 :

Οριζόντιο βέλος : 14.4 mm

Βράχυνση : 3.60 mm

Αξονική δύναμη / Ροπή N/M: -975 kN / 45.0 kNm

Λόγος φορτίου θλίψης οπλ./σκυροδέματος : 0.23

Έλεγχος σε θραύση :  $\gamma_k=2.03$

Τα παραπάνω αποτελέσματα συγκεντρώνονται στον πίνακα 1

Περίπτωση	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>	6 <sup>η</sup>
DX (mm)	79	58	26	15	20	14
DZ (mm)	13	11	4.3	3.6	4.3	3.6
M (kNm)	91	76	53	45	50	45
$F_s / F_c$	1.72	1.44	0.05	0.23	0.01	0.23
$\rho$ (%)	6.9	3.4	1.4	0.0	0.0	0.0
$\gamma_k$	1.0	1.0	1.0	2.06	1.81	2.03

Πίνακας 1. Αποτελέσματα των υπολογισμών για τον στύλο με  $l=10\text{m}$  και  $D=30\text{cm}$

Παρατηρούμε ότι :

1. Το C25/30 δεν είναι κατάλληλο για τη συγκεκριμένη εφαρμογή διότι οδηγεί σε μεγάλες παραμορφώσεις και πολύ υψηλό ποσοστό οπλισμού  $\rho=6.9\%$ .
2. Το C25/30 με σύμμεικτη λειτουργία επίσης οδηγεί σε υψηλό ποσοστό οπλισμού  $\rho=3.4\%$ .
3. Το C100/115 οδηγεί σε μειωμένες παραμορφώσεις και λογικό οπλισμό  $1.4\%$ , αλλά δεν διαθέτει απόθεμα αντοχής λόγω αστάθειας (λυγισμού).
4. Το C100/115 με σύμμεικτη λειτουργία οδηγεί σε μειωμένες παραμορφώσεις, καθόλου οπλισμό και διαθέτει απόθεμα αντοχής (2.06). Πρόκειται για μια ενδιαφέρουσα τεχνική λύση.
5. Το C100/115 με ίνες οδηγεί επίσης σε μειωμένη παραμόρφωση (διαθέτει δυσκαμψία), σχεδόν καθόλου οπλισμό και διαθέτει απόθεμα αντοχής (1.81). Πρόκειται για μια ενδιαφέρουσα τεχνική λύση.
6. Ο συνδυασμός C100/115 με ίνες και σύμμεικτη λειτουργία δεν φαίνεται να προσφέρει επιπλέον πλεονεκτήματα.

### 3.2 Προένταση προκατασκευασμένων δοκών

Μέσω της προέντασης μειώνονται ως γνωστόν οι εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα. Έτσι αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της χαμηλής σχετικά εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Μέσω έκκεντρης προέντασης και καμπύλων χαράξεων δημιουργούνται αντιβέλη και ελέγχονται οι παραμορφώσεις σε μεγάλα ανοίγματα. Το Σ.Υ.Ε ενδείκνυται για προεντεταμένους φορείς μεγάλης λυγηρότητας και χαμηλού βάρους και λόγω της αυξημένης ανθεκτικότητας στο χρόνο και έναντι διαβρωτικών μέσων. Στη Γαλλία, Νορβηγία, Καναδά και αλλού χρησιμοποιείται ήδη στη γεφυροποιία από τη δεκατία του 1980. Άλλο πλεονέκτημα ειδικά για την προκατασκευή είναι η πρόωμη απόκτηση υψηλής αντοχής. Οι περιοχές αγκύρωσης των τενόντων, όπου αναπτύσσονται υψηλές θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις αντιμετωπίζονται επίσης ευκολότερα με το Σ.Υ.Ε. Μειωμένες είναι επίσης οι ερπυστικές παραμορφώσεις στα Σ.Υ.Ε.

Όλα τα ανωτέρω πλεονεκτήματα αλλά και η δυνατότητα μείωσης του βάρους οδηγούν σε πολύ ενδιαφέρουσες τεχνικές λύσεις στην προκατασκευή. Βεβαίως τα πλεονεκτήματα οφείλουν να αξιολογούνται λαμβάνοντας υπόψη και το αυξημένο κόστος των Σ.Υ.Ε.

Με την εισαγωγή του νέου DIN 1045-1 στη Γερμανία καλύπτεται η εφαρμογή Σ.Υ.Ε μέχρι C100/115 στο οπλισμένο και προεντεταμένο σκυρόδεμα, τα οποία αντιμετωπίζονται πλέον με ενιαία μεθοδολογία υπολογισμού.

Στόχοι του σχεδιασμού είναι :

- Περιορισμός των ρωγμών σε λειτουργία.
- Προστασία τενόντων από διάβρωση.
- Περιορισμός των παραμορφώσεων (βελών) λόγω αυξημένης δυσκαμψίας (αρηγμάτωτο)
- Εφελκυστικές τάσεις επιτρέπονται υπό διάφορους συνδυασμούς ωφέλιμων φορτίων (μη συχνούς) στην περιορισμένη προένταση, αρκεί το εύρος των ρωγμών να είναι κάτω από 0.2 mm.
- Στη μερική προένταση δεν απαιτείται έλεγχος απόθλιψης για κανένα συνδυασμό φορτίων, παρά μόνο έλεγχος ρηγμάτωσης και ενίοτε κόπωσης. Επιτρέπεται σε εσωτερικά στοιχεία για κατηγορία απαιτήσεων D.
- Ο έλεγχος του εύρους των ρωγμών οφείλει να γίνεται και για αυτεντατικές καταστάσεις και να τοποθετείται πάντοτε ο ελάχιστος οπλισμός.

Στη συνέχεια θα συγκριθεί το απαιτούμενο βάρος προκατασκευασμένων δοκών σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί σκυρόδεμα ποιότητας C45/55 ή εναλλακτικά C100/115. Το άνοιγμα των αμφιερείστων δοκών είναι 14.20 m και το ύψος της διατομής 1m. Η προένταση θα είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις δηλαδή επί κλίνης με συνολικό φορτίο  $P_0=3600$  kN.

Κριτήριο θα είναι ο περιορισμός της θλιπτικής τάσης του σκυροδέματος σε  $\sigma_c = -22\text{N/mm}^2$  για το C45/55 και  $\sigma_c = -44\text{N/mm}^2$  για το C100/115. Σε εφελκυσμό θα μελετηθούν για το ίδιο ωφέλιμο φορτίο απόθλιψης.

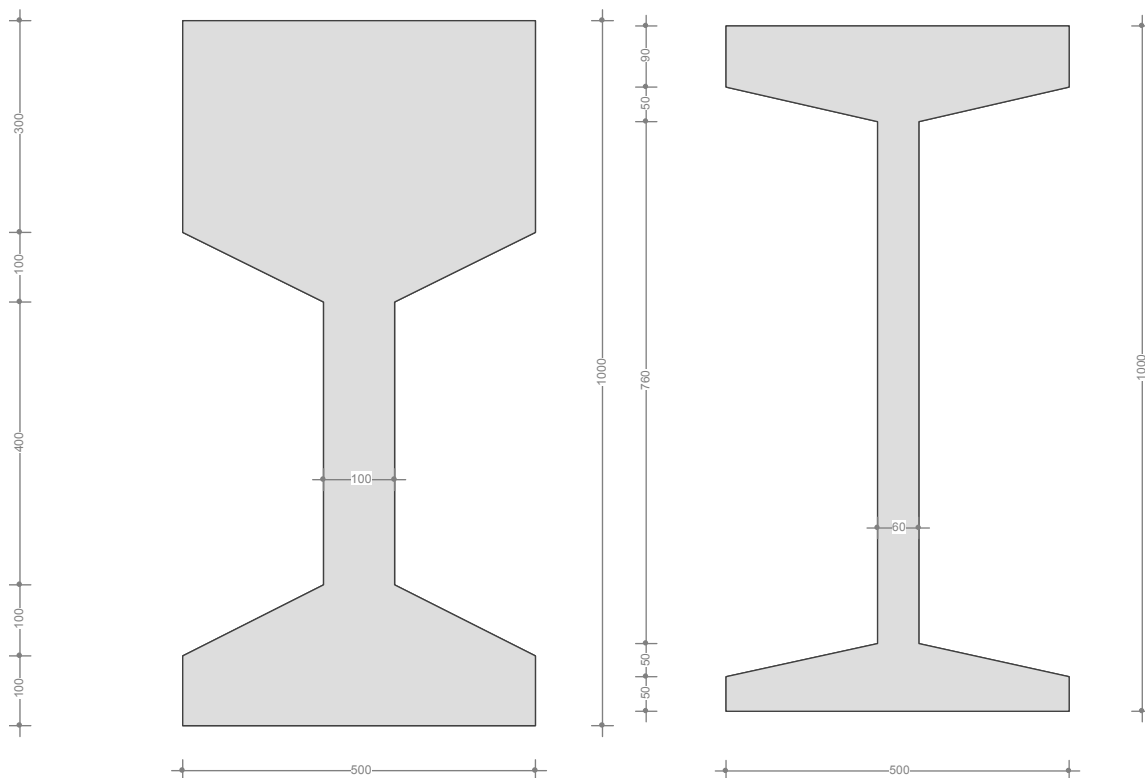
Φορτία : Ίδιο βάρος δοκού

Πρόσθετα μόνιμα  $g' = 40$  kN /m

(απόθλιψης) κινητό  $p_a=15$  kN /m

Χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα Statik-5 και Fagus-5 της cubus.

Οι διατομές που προέκυψαν για την προεντεταμένη δοκό για τις δύο περιπτώσεις (C45/55 και C110/115) φαίνονται στο σχήμα 4. Το βάρος της δοκού με σκυρόδεμα C100/115 είναι περίπου το μισό σε σχέση με αυτό που προκύπτει για σκυρόδεμα C45/55. Επομένως, η χρήση σκυροδέματος υψηλής αντοχής μπορεί να οδηγήσει σε πολύ ενδιαφέρουσες λύσεις από τεχνική και οικονομική πλευρά.



Σχήμα 4. Προεντεταμένη δοκός επί κλίνης με σκυρόδεμα C45/55 και ινοπλισμένο C100/115.

### 3.3 Σύμμεικτες πλάκες υψηλής αντοχής

Στην παράγραφο αυτή διερευνάται η χρήση του Σ.Υ.Ε. για την κατασκευή λεπτών σύμμεικτων πλακών υψηλής αντοχής. Ως γνωστόν οι σύμμεικτες πλάκες δύναται να αστοχήσουν με μια από τις παρακάτω μορφές αστοχίας (βλέπε σχήμα 5):

#### **Καμπτική αστοχία**

Η καμπτική μορφή αστοχίας επιτυγχάνεται μόνο όταν είναι εξασφαλισμένη η πλήρης διατμητική σύνδεση μεταξύ του χαλυβδόφυλλου και του σκυροδέματος. Σ' αυτή την περίπτωση κρίσιμη είναι η διατομή στο άνοιγμα (διατομή I) καθ' ύψος της οποίας εκδηλώνονται κατακόρυφες ρωγμές.

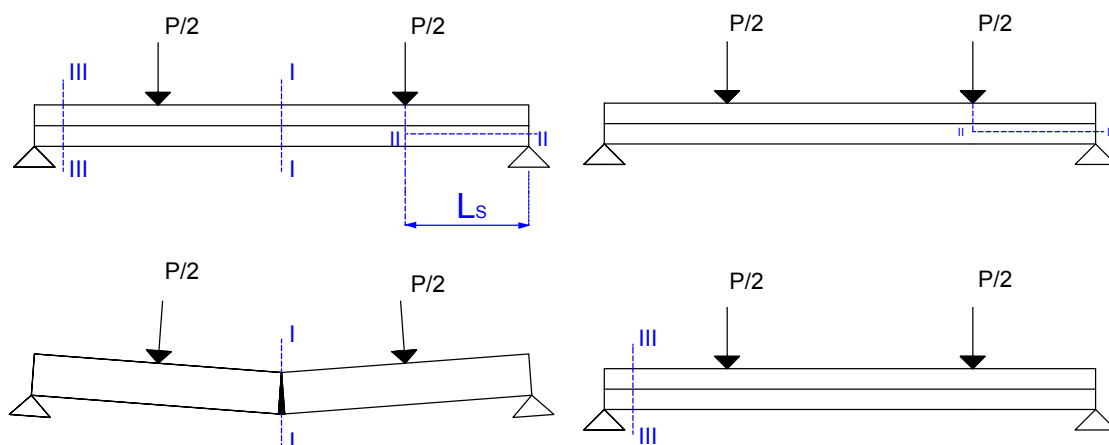
#### **Αστοχία σε διαμήκη διάτμηση**

Όταν οι δυνάμεις διαμήκους διάτμησης που εμφανίζονται στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-χαλυβδόφυλλου, δεν παραλαμβάνονται επαρκώς, τότε η διατομή στο άνοιγμα της πλάκας (διατομή I) πάει να είναι κρίσιμη. Αντιθέτως κρίσιμη είναι η οριζόντια διατομή κατά μήκος του διατμητικού μήκους  $L_s$  σε μια από δύο τις στηρίξεις (διατομή II) στην οποία εμφανίζεται σχετική ολίσθηση μεταξύ χαλυβδόφυλλου και σκυροδέματος. Προφανώς η αστοχία σ' αυτή την περίπτωση επέρχεται για φορτίο μικρότερο αυτού για το οποίο επέρχεται καμπτική αστοχία.

#### **Αστοχία σε κατακόρυφη διάτμηση (τέμνουσα)**

Η κατακόρυφη διατμητική αστοχία είναι καθοριστική σε σύμμεικτες πλάκες με μεγάλο ύψος, μικρό άνοιγμα και σχετικά μεγάλα φορτία. Κρίσιμη διατομή είναι η διατομή III.

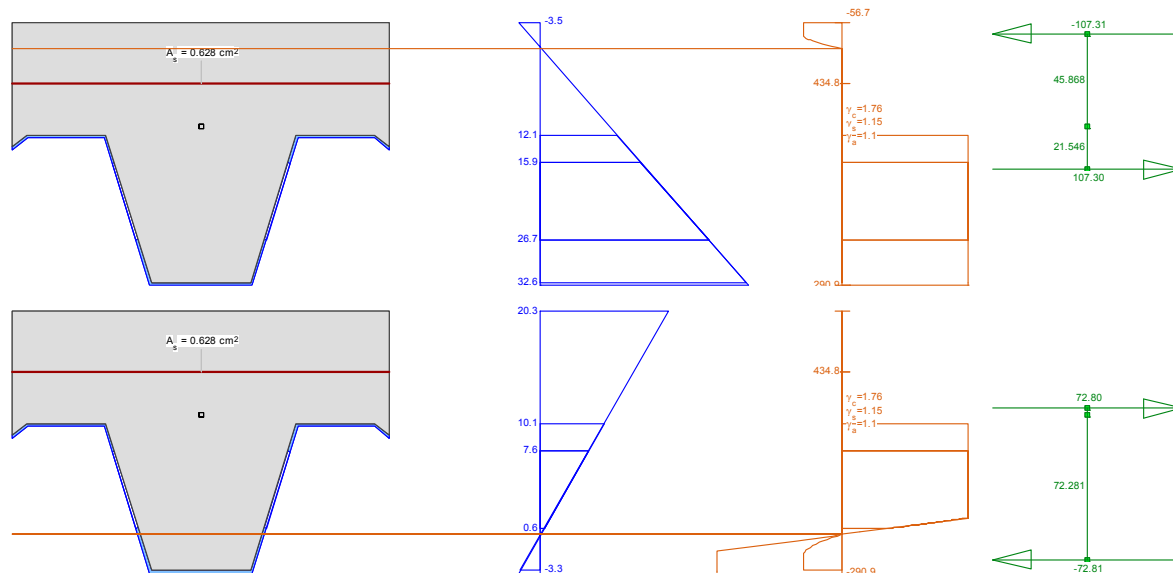




Σχήμα 5. Μορφές αστοχίας σύμμεικτων πλακών.

Στα παρακάτω, θα εξεταστούν μόνον η καμπτική αστοχία και η αστοχία από κατακόρυφη διάτμηση, καθώς η αστοχία σε διαμήκη διάτμηση απαιτεί την εκτέλεση πειραμάτων. Θα εξεταστεί η αύξηση του ωφέλιμου φορτίου που μπορεί να φέρει πλάκα στατικού συστήματος συνεχούς δοκού τριών ανοιγμάτων και πλάτους 1.0m με C100/115 σε σχέση με την ίδια πλάκα από σκυρόδεμα C25/30. Για τους υπολογισμούς θεωρείται το ευρέως διαδεδομένο χαλυβδόφυλλο SYMDECK 73 με πάχος 1.25mm, ποιότητας Fe320G. Το συνολικό ύψος της σύμμικτης πλάκας λαμβάνεται ίσο με 130mm και στις δύο περιπτώσεις (C25/30 και C100/115).

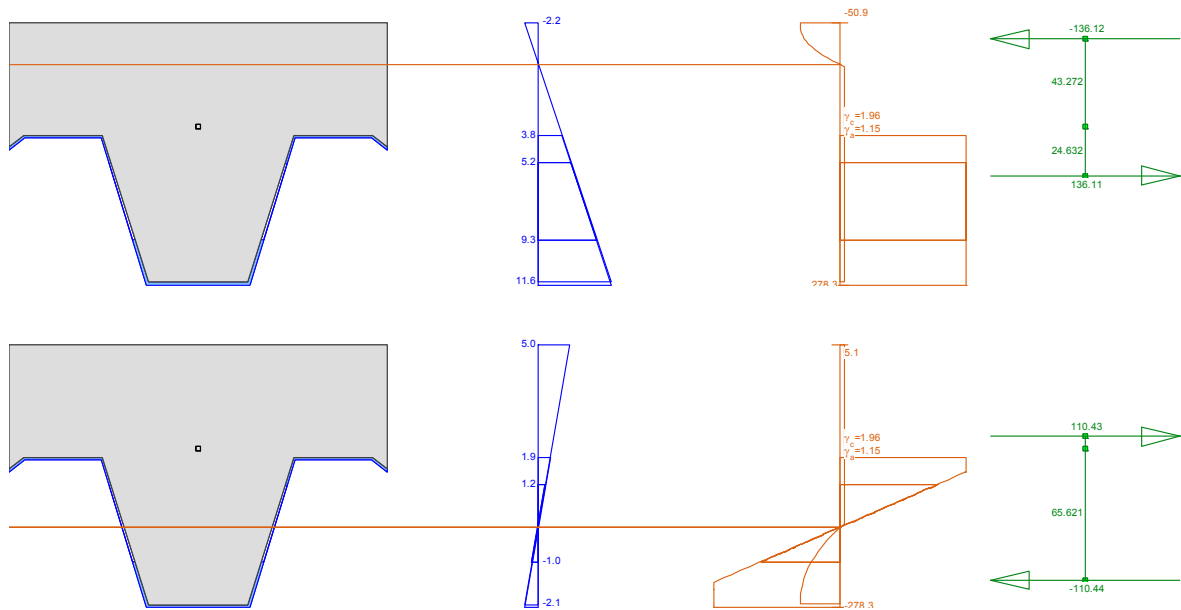
Η αντοχή σε θετικές ροπές της διατομής με το C25/30 είναι ίση με 30.75 kNm. Για να αποκτήσει η διατομή ικανοποιητική αντοχή σε αρνητικές ροπές απαιτείται η τοποθέτηση εφελκόμενου άνω οπλισμού. Για οπλισμό S500 Φ8/15, η αντοχή σε αρνητικές ροπές είναι ίση με -25.92 kNm. Με τα στοιχεία αυτά, υπολογίζεται ότι η δοκός μπορεί να φέρει ωφέλιμο φορτίο ίσο με 5.00 kN/m



Σχήμα 6. Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων σύμμεικτης πλακών με C25/30

Η αντοχή σε θετικές ροπές της διατομής με το Σ.Υ.Ε. C100/115 με εφελκυστική αντοχή  $f_{ctm}=10\text{N/mm}^2$  είναι ίση με 49.28 kNm. Η αντοχή σε αρνητικές ροπές χωρίς επιπλέον οπλισμό,

είναι ίση με  $-42.02 \text{ kNm}$ . Με τα στοιχεία αυτά, υπολογίζεται ότι η πλάκα μπορεί να φέρει ωφέλιμο φορτίο ίσο με  $9.50 \text{ kN/m}$  δηλαδή, το φορτίο είναι αυξημένο κατά 90%.



Σχήμα 7. Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων σύμμεικτης πλακών με Σ.Υ.Ε. C100/115

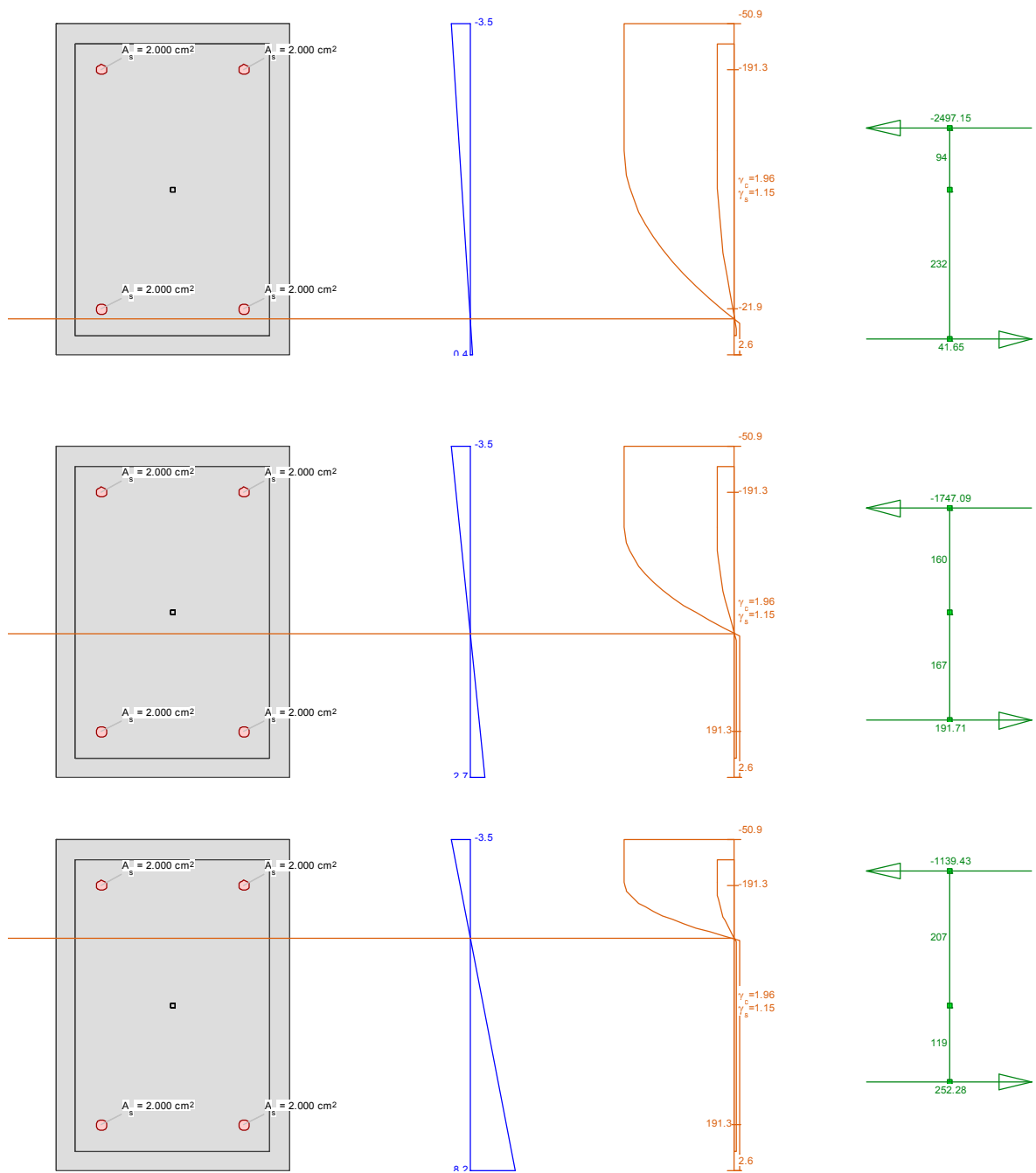
### 3.4 Μανδύες για ενίσχυση υποστλωμάτων

Στύλοι pilotis και άλλες περιπτώσεις στύλων μπορούν να ενισχυθούν εύκολα με εφαρμογή μανδύα από C100/115 κατά προτίμηση ινοπλισμένου, προς αύξηση της πλαστιμότητας. Στο παρόν παράδειγμα θα υπολογισθεί η βελτίωση της αντοχής σχεδιασμού υπό έκκεντρη θλίψη (κάμψη με αξονική δύναμη). Σαν παράδειγμα θα εξεταστεί η περίπτωση υποστλώματος διαστάσεων  $30 \times 45 \text{ cm}$  από σκυρόδεμα C16/20 με οπλισμό  $4\Phi 16\text{-S220}$ , που ενισχύεται με μανδύα πάχους  $3 \text{ cm}$  από C100/115 ινοπλισμένου με αντοχή σε εφελκυσμό ( $f_{ctm} = 10.0 \text{ N/mm}^2$ ).

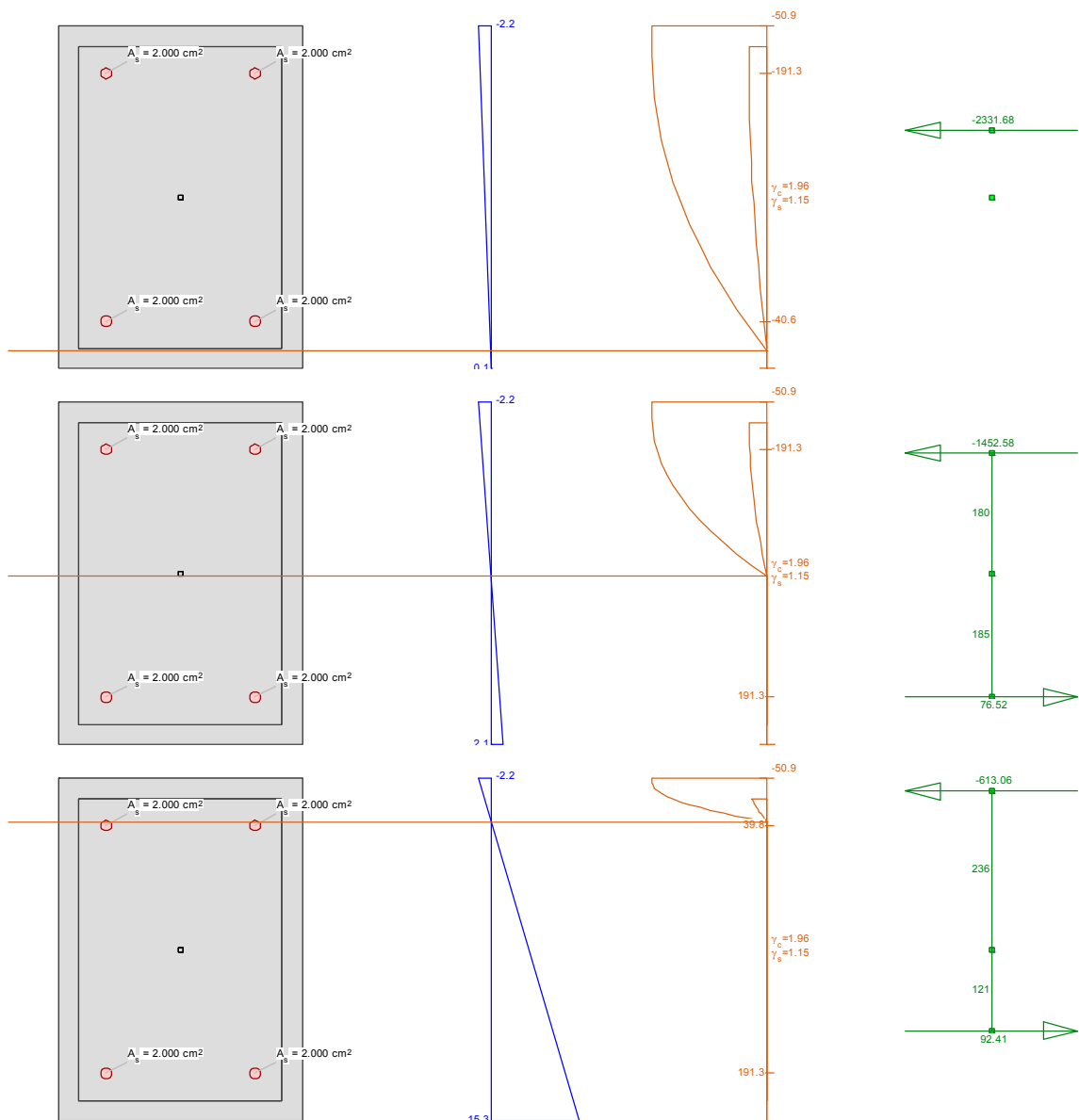
Εξετάζονται τρεις περιπτώσεις έκκεντρης θλίψης, με εκκεντρότητες 10, 20 και 30 cm. Χρησιμοποιείται το πρόγραμμα FAGUS-5 της cubus κατά DIN 1045-1 και προκύπτουν τα αποτελέσματα του πίνακα 2. Τα αντίστοιχα διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων παρουσιάζονται στα σχήματα 8 και 9.

M/N (cm)	10	20	30
Υποστώμα 30X45	815	456	236
Υποστώμα 30X45 με ινοπλισμένο μανδύα από C100/110 και $\epsilon_c = -3.5$	2468	1570	892
Υποστώμα 30X45 με μανδύα από C100/110 χωρίς προσθήκη ινών και $\epsilon_c = -2.2$	2331	1376	520

Πίνακας 2 : Φορτία αστοχίας σε έκκεντρη θλίψη N (kN)



Σχήμα 8. Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων για ενίσχυση διατομής 30x45 με μανδύα από ινοπλισμένο C100/115 για εκκεντρότητα  $M/N$  : α) 10cm, β) 20cm, γ) 30cm.



Σχήμα 9. Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων για ενίσχυση διατομής 30x45 με μανδύα από C100/115 χωρίς προσθήκη ινών για εκκεντρότητα  $M/N$  : α) 10cm, β) 20cm, γ) 30cm.

Παρατηρούμε ότι η αντοχή σε θλίψη με 3 cm μανδύα αυξάνεται από 2.85 έως 3 φορές ανάλογα με τις παραδοχές. Όταν αυξάνεται η εκκεντρότητα ( $M/N = 30$  cm), η συνεισφορά των ινών σε εφελκυσμό αποδίδει καλύτερα και ο λόγος βελτίωσης της αντοχής φθάνει μέχρι 3.78.

#### 4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Forster, S. W. 1994. High-Performance Concrete — Stretching the Paradigm. Concrete International, Oct, Vol. 16, No. 10, pp. 33-34.

Aitcin, P.-C. and Neville, A. 1993. High-Performance Concrete Demystified. Concrete International, Jan, Vol. 15, No. 1, pp. 21-26.