

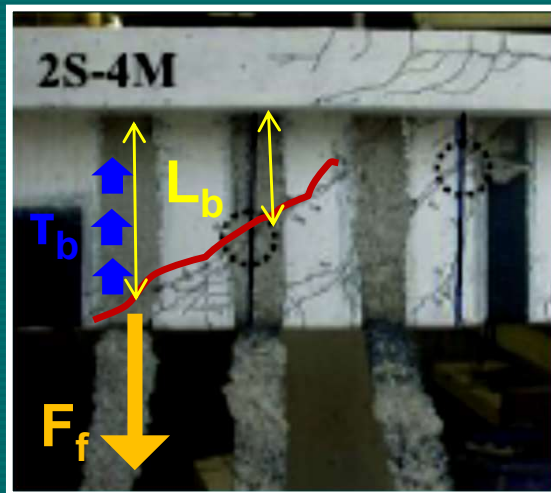
Σύνθετα Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ)

7^ο μάθημα – ενεργός παραμόρφωση εξωτερικά επικολλούμενου ΙΟΠ

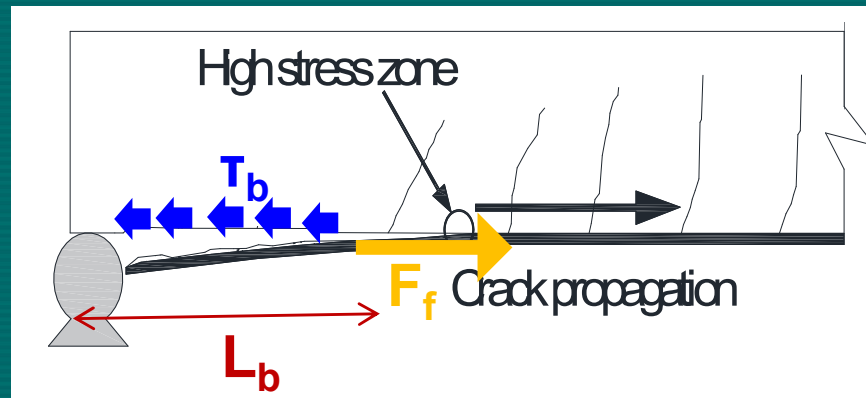


Επικόλληση ΙΟΠ οπλισμού → 1. Εξωτερικά επικολλούμενος

Από την θέση της ρωγμής (ή πιο κοντινής στην στήριξη) και μέχρι το ελεύθερο άκρο του ΙΟΠ χρειάζεται ένα ελάχιστο μήκος αγκύρωσης L_b



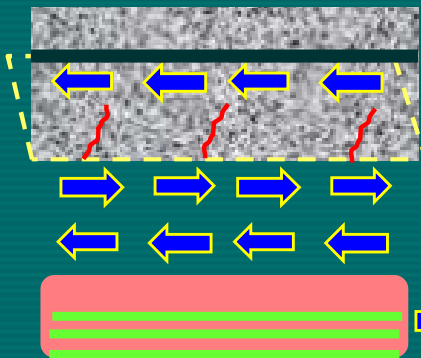
Περίπτωση διατμητικής ενίσχυσης μορφής λωρίδων σε σχήμα U



Περίπτωση καμπτικής ενίσχυσης με διαμήκεις λωρίδες στην εφελκόμενη παρειά

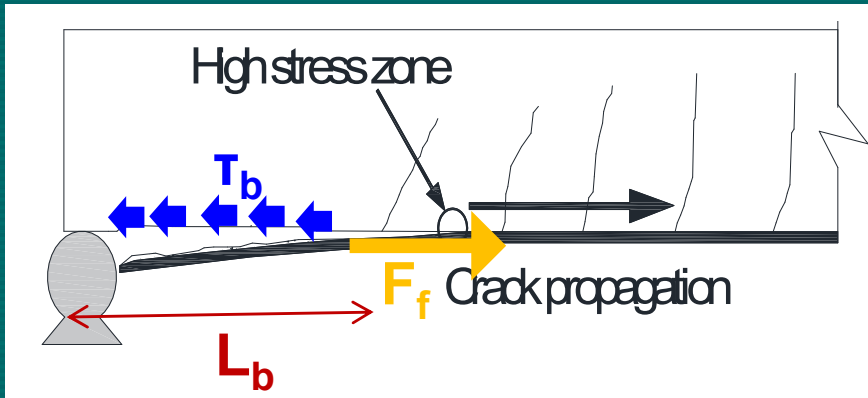
$$L_b = \sqrt{3 \frac{E_f \cdot n \cdot t_f \cdot s_o}{\tau_b}}$$

E_f = μέτρο ελαστικότητας του ΙΟΠ,
 η και t_f = αριθμός στρώσεων και
 πάχος στρώσης ΙΟΠ
 Ολίσθηση: $s_o \leq 0.5\text{mm}$



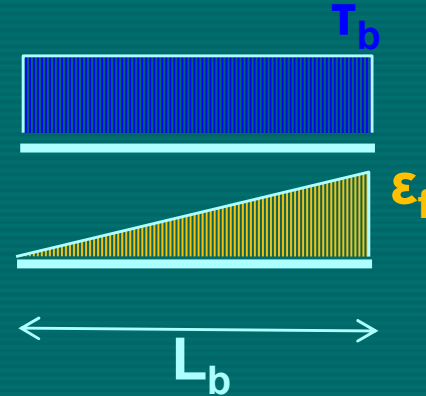
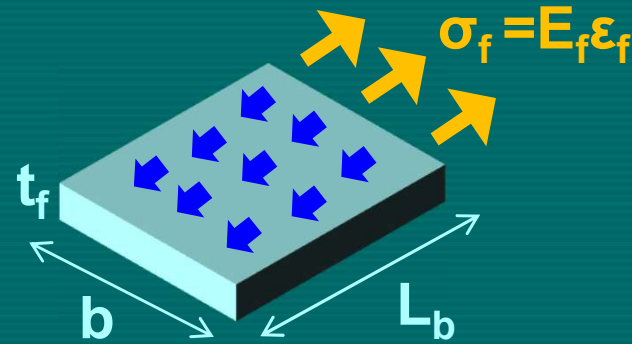
Επειδή η συνάφεια της κόλλας $\tau_{b,r}$ είναι ισχυρότερη της διατμητικής αντοχής σκυροδέματος (διαγώνιος εφελκυσμός, $f_{ct} = 0.3 \div 0.5 f_c^{0.5}$) συνήθως η λωρίδα αποκολλάται παρασέρνοντας σκυρόδεμα → $\tau_b = \min(\tau_{b,r}, f_{ct})$

Επικόλληση ΙΟΠ σπλισμού → 1. Εξωτερικά επικολλούμενος



Περίπτωση καμπτικής ενίσχυσης με διαμήκεις λωρίδες στην εφελκόμενη παρειά

$$L_b = \sqrt{3 \frac{E_f \cdot n \cdot t_f \cdot s_0}{\tau_b}}$$

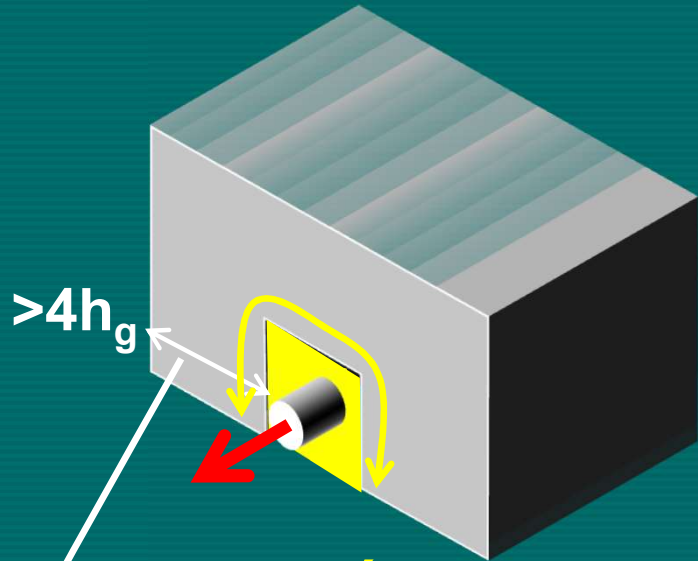


ε_f : παραμόρφωση του ΙΟΠ στην θέση ρωγμής

Ολίσθηση s_0 :

$$s_0 = \int_0^{L_b} \varepsilon \cdot dx = 0.5 L_b \varepsilon_f$$

Επικόλληση ΙΟΠ οπλισμού → 2. Τεχνική ένθετου οπλισμού σε επιφανειακές εγκοπές (NSM)



p : περίμετρος εγκοπής

Η εγκοπή πρέπει να απέχει από την ελεύθερη πλευρά κατά τουλάχιστον $4h_g$ για αποφυγή απόσχισης

Μήκος αγκύρωσης:

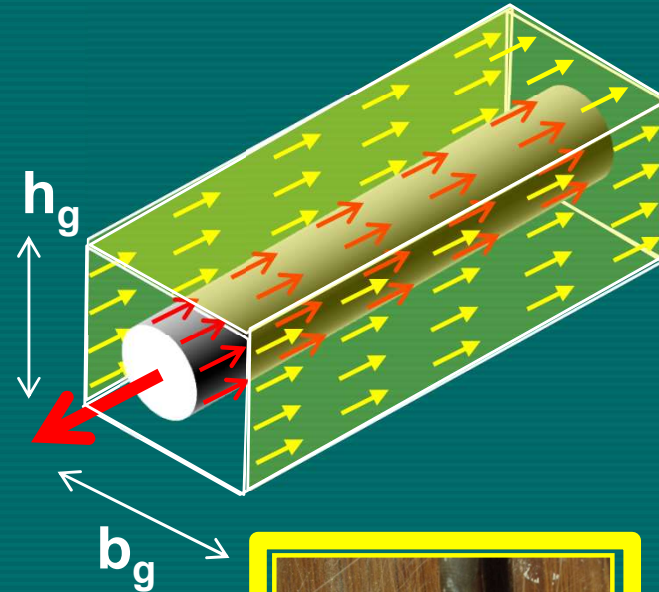
A_f = εμβαδόν διατομής ένθετου οπλισμού

$$L_b = \sqrt{3 \frac{E_f * A_f * s_o}{p * \tau_b}}$$

Ύψος εγκοπής / πάχος ελασμ. ΙΟΠ (ή διάμετρος ΙΟΠ ράβδου)

$$k = \frac{h_g}{d_f} \quad k > 2.0$$

Πειραματικά $\approx 300\text{mm}$



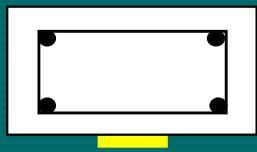
ΑΣΤΟΧΙΑ: ΔΙΕΠΙΦ. ΡΗΤΙΝΗΣ - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ



ΑΣΤΟΧΙΑ: ΔΙΕΠΙΦ. ΡΑΒΔΟΥ - ΡΗΤΙΝΗΣ

Παράδειγμα αγκύρωσης:

1. Εξωτερικά επικολλούμενος



$$L_b = \sqrt{3 \frac{E_f * n * t_f * s_o}{\tau_b}}$$

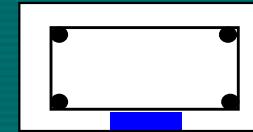


$$L_b = 385\text{mm}$$

2. Τεχνική ένθετου οπλισμού σε επιφανειακές εγκοπές (NSM)

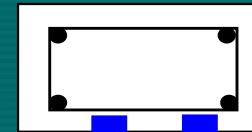
$$L_b = \sqrt{3 \frac{E_f * A_f * s_o}{p * \tau_b}}$$

➤ Πλάτος εγκοπής 50mm
Βάθος εγκοπής 10mm ($p=70\text{mm}$)



$$L_b = 325\text{mm}$$

➤ Πλάτος εγκοπής 25mm
(δύο ελάσματα, ίδιο A_f)
Βάθος εγκοπής 10mm ($p=90\text{mm}$)



$$L_b = 290\text{mm}$$

Δεδομένα:

Πάχος / πλάτος ελάσματος:

1.2mm / 50 mm

Μέτρο ελαστικότητας ελάσματος:

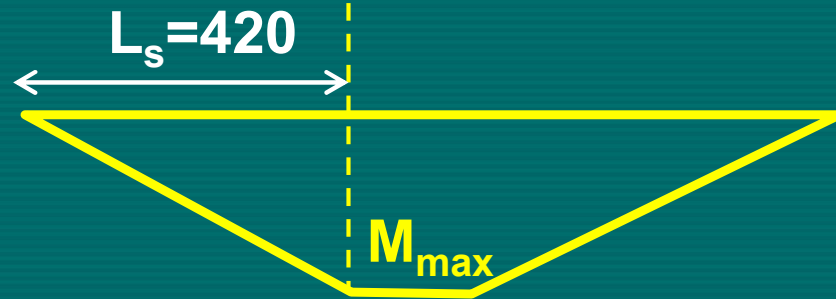
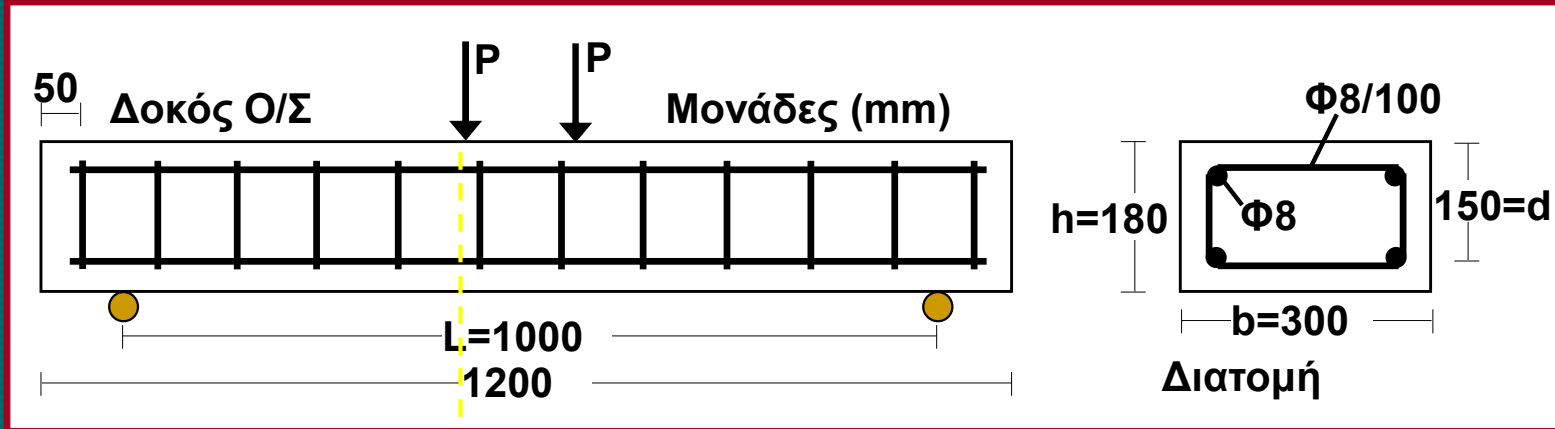
$E_f=165\text{GPa}$

Ολίσθηση: $s_o=0.5\text{mm}$

Συνάφεια: $T_b=f_{ct}=2\text{MPa}$

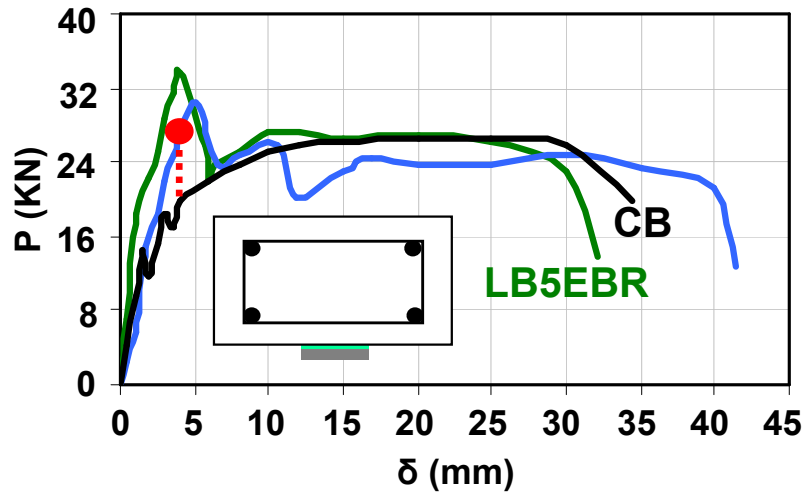
Πειραματικά $\approx 300\text{mm}$

Νοβίδης Δ. Διδακτορική Διατριβή (2009)



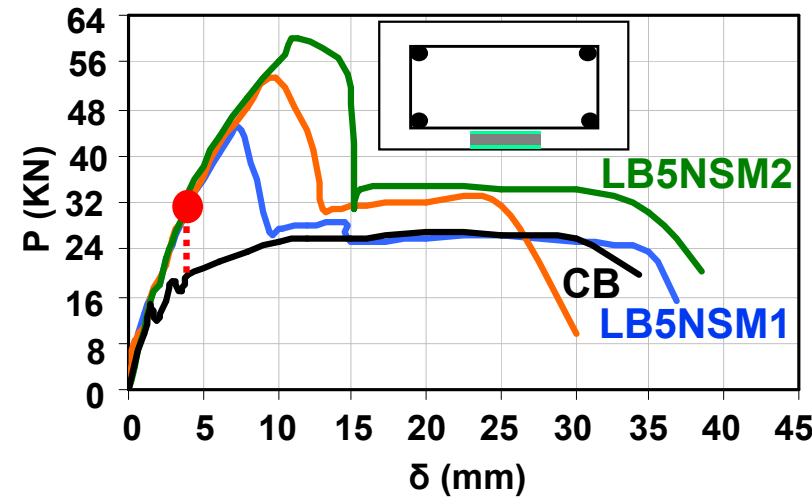
Παράμετροι μελέτης το πλάτος και το βάθος εγκοπής
Ίδιο μήκος αγκύρωσης ($L_b=390\text{mm}$)

Έλασμα εξωτερικά επικολλούμενο



Από ανάλυση διατομής (excel) : $\epsilon_f = 16\% \epsilon_{f,u}$

Έλασμα εσωτερικά επικολλούμενο



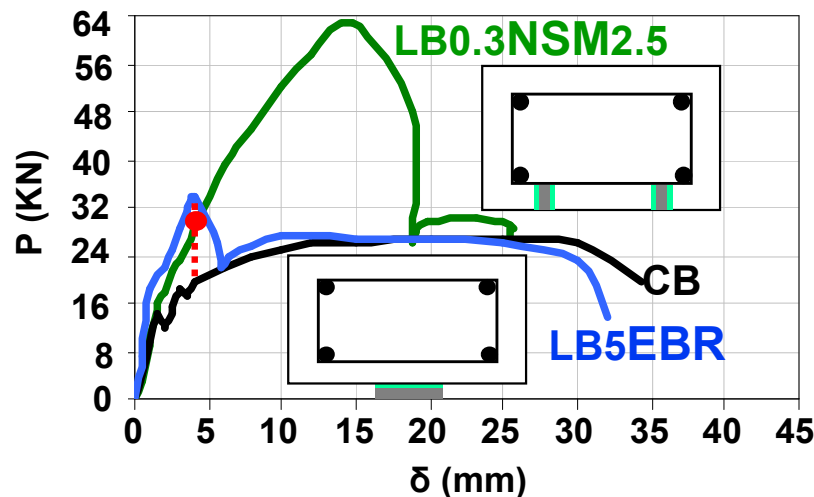
Πλάτος εγκοπής 50mm

Βάθος εγκοπής 10mm (p=70mm)

20mm (p=90mm)

$\epsilon_f = 29\% \epsilon_{f,u}$

$\epsilon_f = 50\% \epsilon_{f,u}$



$\epsilon_f = 57\% \epsilon_{f,u}$

Πλάτος εγκοπής 3mm

Βάθος εγκοπής 25mm (p_{tot}=100mm)

Ίδιο εμβαδόν ελάσματος (πάχος ελ. 1.2mm) εσωτερικά επικολλούμενο σε κατακόρυφη διάταξη

Γιατί μας ενδιαφέρει πόση παραμόρφωση αναπτύσσει το ΙΟΠ;

Αποδίδει την αύξηση της αντοχής του δομικού στοιχείου δεδομένου ότι έχει εξασφαλισθεί η αναγκαία αγκύρωση

Παραμόρφωση σχεδιασμού ΙΟΠ

Νόμος τάσεων – παραμορφώσεων:
ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ

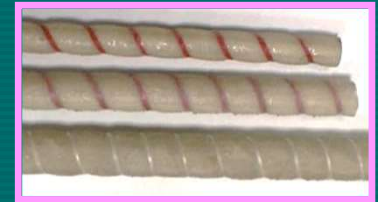
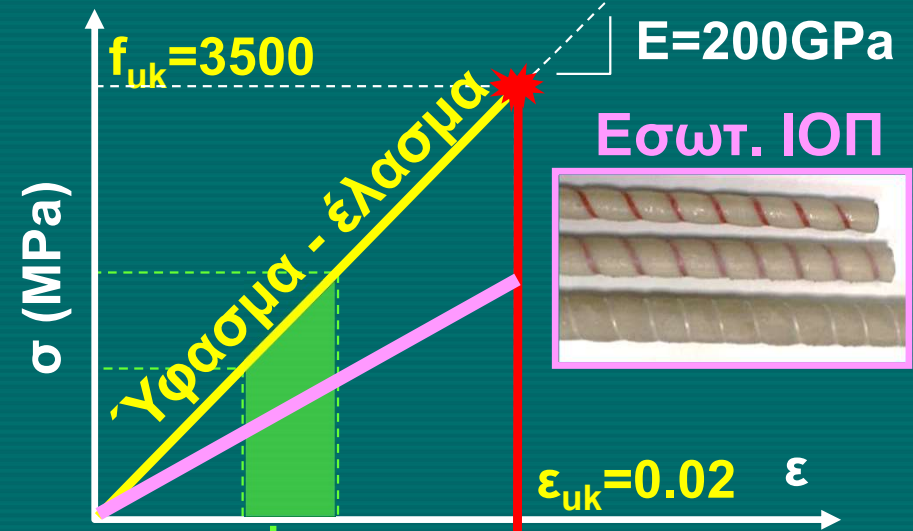
$$f_{uk} = E \cdot \varepsilon_{uk}$$

Χαρακτηριστική παραμόρφωση θραύσης

Ενεργός παραμόρφωση σχεδιασμού

$$\varepsilon_{u,d} \cong 35\% - 60\% \varepsilon_{uk}$$

Συστάσεις: FIB TG 5.1-2, ACI 440



Παραμόρφωση θραύσης

➤ Για εξωτερικά επικ. ΙΟΠ – ως διαμήκης οπλισμός (οι ίνες παράλληλα στον άξονα του δομικού στοιχείου)



➤ Για εξωτερικό επικ. ΙΟΠ – ως μανδύας (οι ίνες κάθετα στον διαμήκη άξονα του στοιχείου)



Παραμόρφωση σχεδιασμού ΙΟΠ

Νόμος τάσεων – παραμορφώσεων:
ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ

$$f_{uk} = E \cdot \varepsilon_{uk}$$

Χαρακτηριστική παραμόρφωση θραύσης



➤ Για εξωτερικά επικ. ΙΟΠ – ως διαμήκης οπλισμός
(οι ίνες παράλληλα στον άξονα του δομικού στοιχείου)

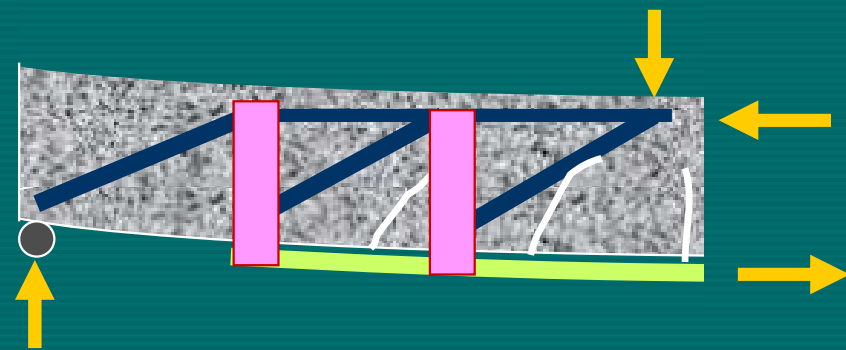
$$\varepsilon_{u,d} = n_1 n_2 \frac{\varepsilon_{uk}}{\gamma_f}$$

γ_f : συντελεστής ασφάλειας $\rightarrow \gamma_f=3$ (επικόλληση σε ψαθυρό υπόστρωμα)

Άρα ξεκινάμε με διαθέσιμη $1/3 \varepsilon_{uk} = 33\% \varepsilon_{uk}$

n_1 : συντελεστής καλής πρακτικής (εξωτερικά ή μέσα σε εγκοπές)

n_2 : συντελεστής ενίσχυσης (με εγκάρσιες λωρίδες ή άλλα μέσα, π.χ. βλήτρα)

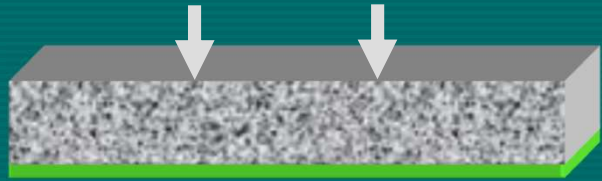


Λειτουργία κατακόρυφου ορθοστάτη \Rightarrow
αγκύρωση στη θλιβόμενη ζώνη

η_2 : συντελεστής ενίσχυσης (με εγκάρσιες λωρίδες ή άλλα μέσα, π.χ. βλήτρα)

➤ Για εξωτερικά επικ. ΙΟΠ – ως διαμήκης οπλισμός

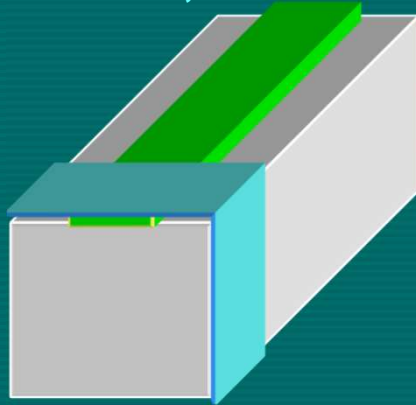
καμπτική ενίσχυση



Καμπτική ενίσχυση:
Έλασμα ή ύφασμα

$$\epsilon_{u,d} = 33\% \epsilon_{uk}$$

$$\epsilon_{u,d} = 47\% \epsilon_{uk}$$



$$n_1 = 1 \quad n_2 = 1$$

$$n_2 = 1.4$$

$$\epsilon_{u,d} = 47\% \epsilon_{uk}$$

$$\epsilon_{u,d} = 65\% \epsilon_{uk}$$

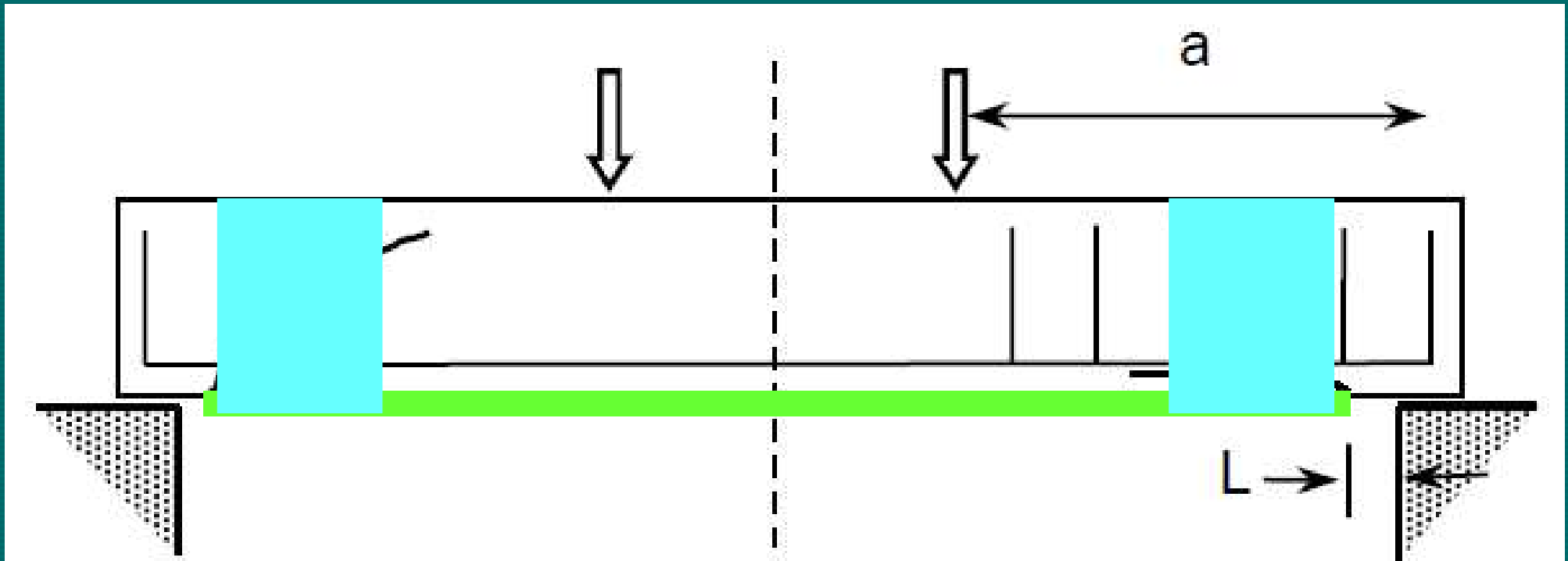


$$n_1 = 1.4 \quad n_2 = 1$$

$$n_2 = 1.4$$

← Με εγκάρσιες λωρίδες

$$\epsilon_{u,d} = n_1 n_2 \frac{\epsilon_{uk}}{\gamma_f}$$



➤ Παράδειγμα καμπτική ενίσχυση δοκού με έλασμα

$$f_c = 20 \text{MPa}, f_y = 400 \text{MPa}$$

Επικάλυψη μέχρι το κ.β. του οπλισμού 35mm



$$\text{CFRP: } b_f = 100/50 \text{mm}, t_f = 1.2 \text{mm}$$

$$f_u = 2600 \text{MPa}, E_f = 160 \text{GPa} \rightarrow \epsilon_{uk} = 0.016$$

Διαθέσιμη καμπτική αντοχή (κρίσιμο υλικό το σκυρόδεμα, $\epsilon_c = 0.003$):

$$M_y = A_s \cdot f_y \cdot jd, \quad jd \approx 0.9d \text{ ο εσωτερικός μοχλοβραχίονας μεταξύ εφελκόμενου}$$

$$A_s = \frac{n_s \pi D_b^2}{4} = 4 \times \pi * \frac{14^2}{4} = 615 \text{ mm}^2,$$

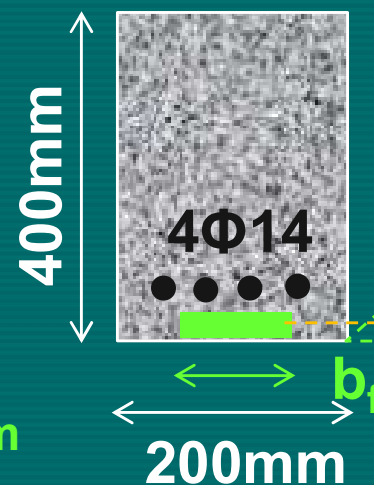
$$d = 400 - 35 = 365 \text{mm} \text{ στατικό ύψος}$$

$$M_y = 615 \times 400 \times 0.9 \times 365 \approx 80.8 \text{ kNm}$$

Ή από ανάλυση διατομής (excel):

$$M_y = 80 \text{kNm} \text{ με } \epsilon_c = 0.003, \epsilon_s = 0.0083 \text{ με}$$

$$x = d * \epsilon_c / (\epsilon_c + \epsilon_s) = 97 \text{mm}$$



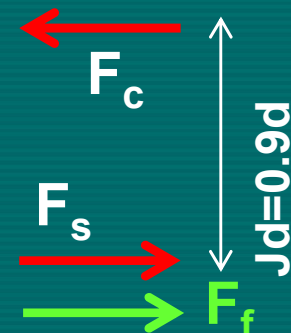
$$x = 97 \text{mm} \quad \epsilon_c = 0.003$$

$$\epsilon_s = 0.0083$$

$$\epsilon_f = 0.00906$$

$$\epsilon_f = 0.0094 \leftarrow \text{από όμοια τρίγωνα}$$

Επειδή $\epsilon_f < f_u / E_f = 2600 / 165000 = 0.016$, θεωρητικά μπορεί να αναπτυχθεί η ϵ_f αφού είναι μικρότερη της τιμής θραύσης!



όμως

$$\epsilon_f \leq \epsilon_{u,d} = n_1 n_2 \frac{\epsilon_{uk}}{\gamma_f}$$

Μπορεί να επιτευχθεί αν $n_1 = 1.4$ & $n_2 = 1.4 \rightarrow \epsilon_{u,d} = 1.4 \times 1.4 \times 0.016 / 3 = 0.01$
Θέλω να αυξήσω την καμπτική αντοχή κατά $M_f = 30 \text{kNm}$. Πόσο ΙΟΠ χρειαζομαι;

$$M_f = F_f \cdot (0.9d + 25) \rightarrow F_f = 85 \text{kN}$$

Εγκοπή βάθους 10mm

$$F_f = A_f E_f \epsilon_f \text{ με } \epsilon_f = 0.00906 \text{ (διόρθωση)}$$

$$A_f = 85 \times 1000 / (160000 \times 0.00906) = 59 \text{mm}^2$$

$$A_f = n t f b_f \rightarrow n = 59 / (1.2 \times 50) = 0.98, \text{ 1 έλασμα}$$

καμπτική ενίσχυση δοκού με εξωτερικό έλασμα

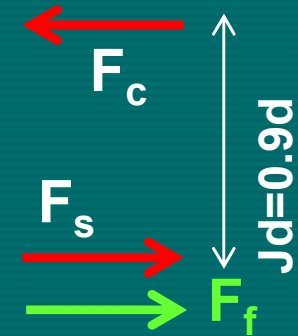
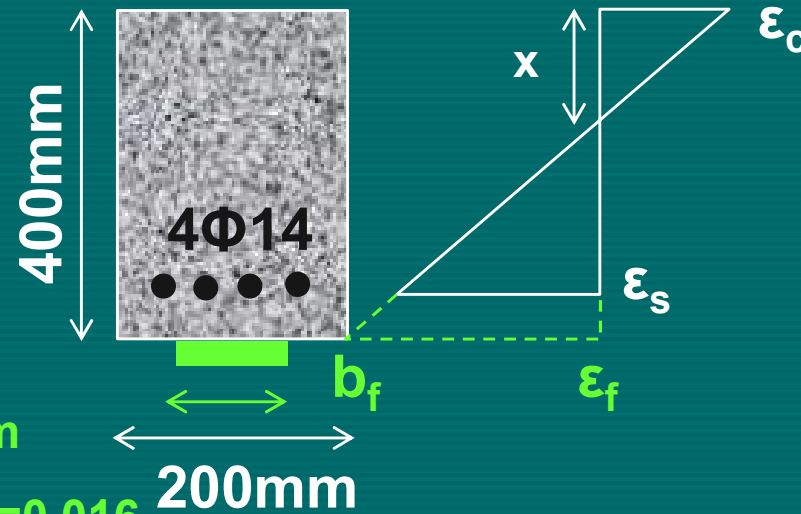
$f_c=20\text{MPa}$, $f_y=400\text{MPa}$

Επικάλυση μέχρι το κ.β.
του οπλισμού 35mm



CFRP: $b_f=100/50\text{mm}$, $t_f=1.2\text{mm}$

$f_u=2600\text{MPa}$, $E_f=160\text{GPa} \rightarrow \epsilon_{uk}=0.016$



Άσκηση 5: Να λύσετε την ίδια περίπτωση (αύξηση δηλαδή της καμπτικής αντοχής κατά 30kNm) με $n_1=1$ και $n_2=1$. Πόσο ΙΟΠ χρειαζομαι;

➤ Για εξωτερικά επικ. ΙΟΠ – ως μανδύας
(οι ίνες κάθετα στον διαμήκη άξονα του στοιχείου)



$$\epsilon_{u,d} = n_1 n_2 n_3 \frac{\epsilon_{uk}}{\gamma_f}$$

γ_f : συντελεστής ασφάλειας → $\gamma_f=3$ (αν δεν περιβάλλει το στοιχείο, πχ. Σχήμα U)
→ $\gamma_f=1.5$ (αν περιβάλλει το στοιχείο, πχ. σχήμα O)

n_1 : συντελεστής καλής πρακτικής: στρογγύλευμα γωνιών

n_2 : συντελεστής επάρκειας μήκους αγκύρωσης της τελικής στρώσης

n_3 : συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την αποκόλληση από το υπόστρωμα

➤ Για εξωτερικά επικ. ΙΟΠ – ως μανδύας
(οι ίνες κάθετα στον διαμήκη άξονα του στοιχείου)

$$\varepsilon_{u,d} = n_1 n_2 n_3 \frac{\varepsilon_{uk}}{\gamma_f}$$

1. μανδύας περίσφιγξης υποστηλωμάτων

γ_f : συντελεστής ασφάλειας $\rightarrow \gamma_f=1.5$ (περιβάλλει το στοιχείο, πχ. σχήμα 0)

n_1 : συντελεστής καλής πρακτικής: στρογγύλευμα γωνιών

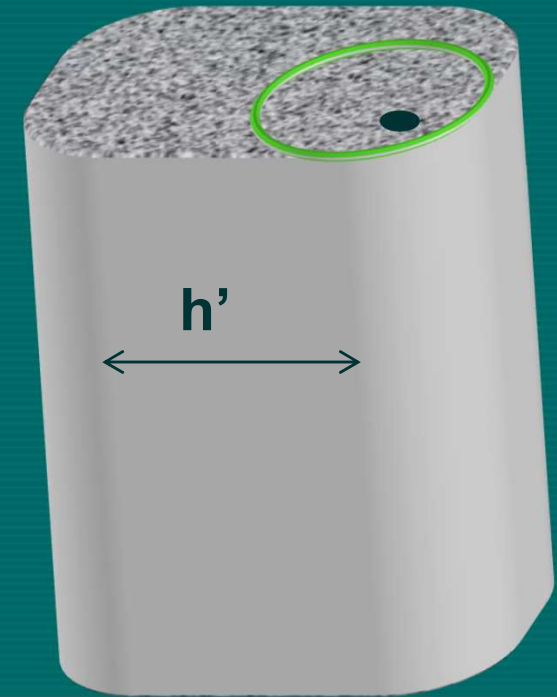
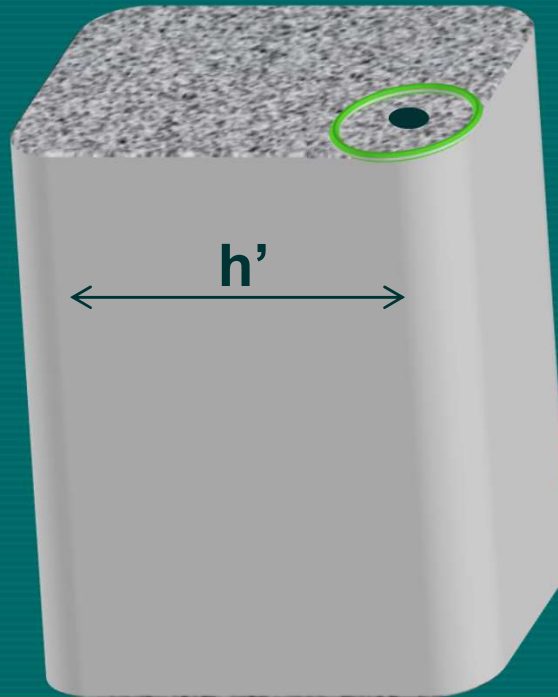
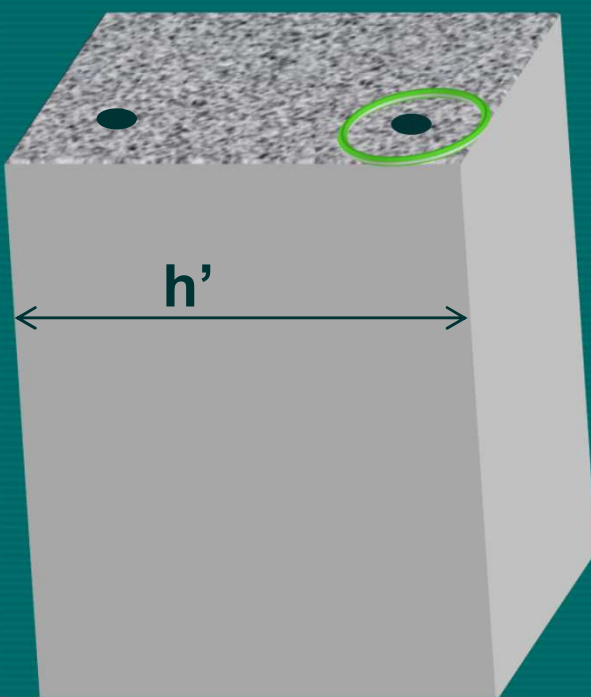
$$n_1 = 0.25 + \frac{2(2R+D_b)}{h'} \leq 1.0, \quad h' \text{ η μεγαλύτερη πλευρά διατομής}$$

Υποστήλωμα 400x400 με διαμήκεις οπλισμούς $D_b=20\text{mm}$

Για $R=0$: $h'=400$,
 $n_1=0.25+2*20/400=0.35$

Για $R=20$: $h'=360$,
 $n_1=0.25+2(2*20+20)/360=0.58$

Για $R=50$: $h'=300$,
 $n_1=0.88$



➤ Για εξωτερικά επικ. ΙΟΠ – ως μανδύας
(οι ίνες κάθετα στον διαμήκη άξονα του στοιχείου)

$$\varepsilon_{u,d} = n_1 n_2 n_3 \frac{\varepsilon_{uk}}{\gamma_f}$$

1. μανδύας περίσφιγξης υποστηλωμάτων

γ_f : συντελεστής ασφάλειας $\rightarrow \gamma_f=1.5$ (περιβάλλει το στοιχείο, πχ. σχήμα 0)

n_1 : συντελεστής καλής πρακτικής: στρογγύλευμα γωνιών

n_2 = διαθέσιμο / απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης τελικής στρώσης (<1)

ΜΗΚΟΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ



➤ Για εξωτερικά επικ. ΙΟΠ – ως μανδύας
(οι ίνες κάθετα στον διαμήκη άξονα του στοιχείου)

$$\epsilon_{u,d} = n_1 n_2 n_3 \frac{\epsilon_{uk}}{\gamma_f}$$

1. μανδύας περίσφιγξης υποστηλωμάτων

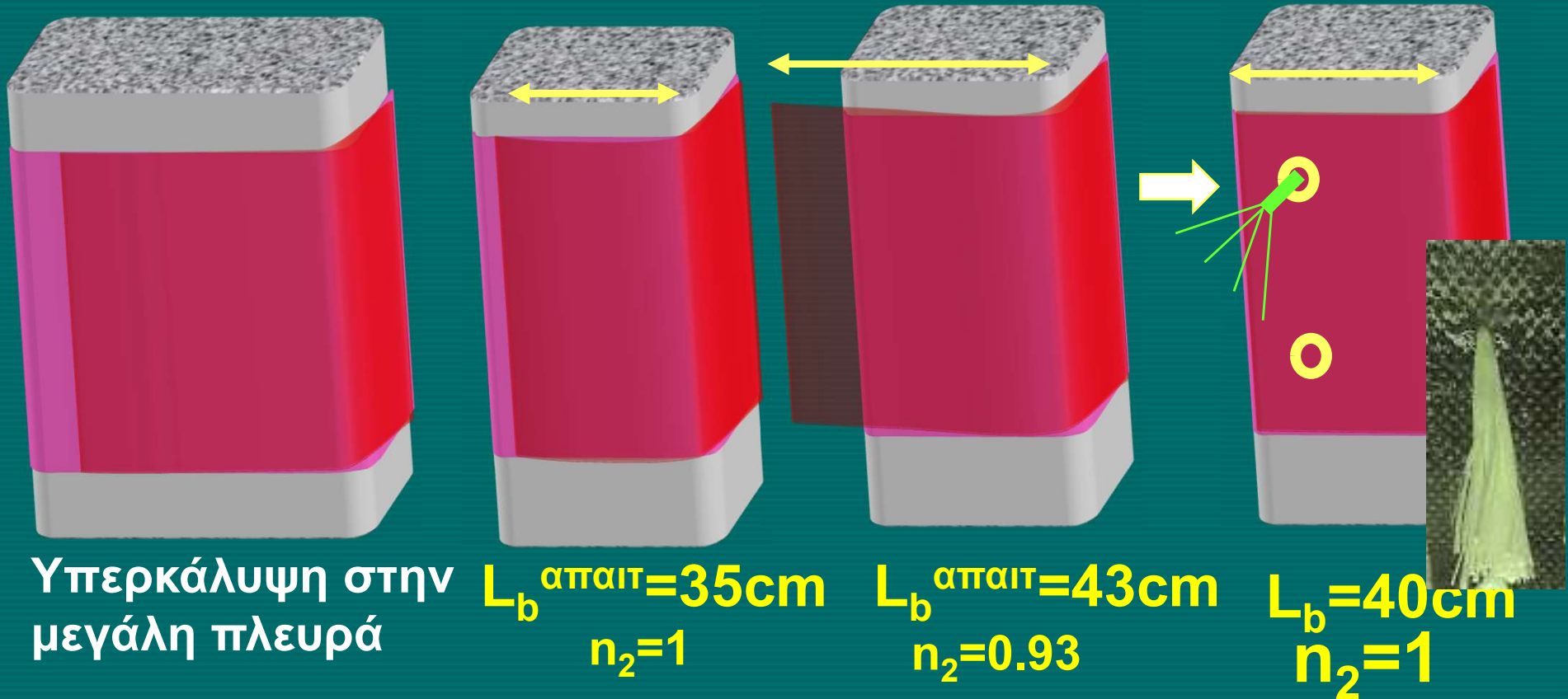
γ_f : συντελεστής ασφάλειας $\rightarrow \gamma_f=1.5$ (περιβάλλει το στοιχείο, πχ. σχήμα 0)

n_1 : συντελεστής καλής πρακτικής: στρογγύλευμα γωνιών

n_2 = διαθέσιμο / απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης τελικής στρώσης (<1)

Υποστήλωμα 400x400 με απαιτούμενο L_b (έστω γνωστό)

ΜΗΚΟΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ



- Για εξωτερικά επικ. ΙΟΠ – ως μανδύας
(οι ίνες κάθετα στον διαμήκη άξονα του στοιχείου)

$$\varepsilon_{u,d} = n_1 n_2 n_3 \frac{\varepsilon_{uk}}{\gamma_f}$$

1. μανδύας περίσφιγξης υποστηλωμάτων

γ_f : συντελεστής ασφάλειας $\rightarrow \gamma_f=1.5$ (περιβάλλει το στοιχείο, πχ. σχήμα 0)

n_1 : συντελεστής καλής πρακτικής: στρογγύλευμα γωνιών

n_2 = διαθέσιμο / απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης τελικής στρώσης (<1)

n_3 : **συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την αποκόλληση από το υπόστρωμα**

Για την περίπτωση μανδύα που περιβάλλει υποστύλωμα $n_3=1$

Διότι εδώ το υπόστρωμα δεν είναι σκυρόδεμα αλλά η από κάτω στρώση του ΙΟΠ

Υποστήλωμα 400x400 με διαμήκεις οπλισμούς $D_b=20mm$

Για $R=30$: $h'=340 \rightarrow n_1=0.72$

$L_b^{απαιτ}=38cm \rightarrow n_2=1$ και $n_3=1 \rightarrow \varepsilon_{u,d} = 0.72/1.5\varepsilon_{uk} \rightarrow \varepsilon_{u,d} = 48\%\varepsilon_{uk}$

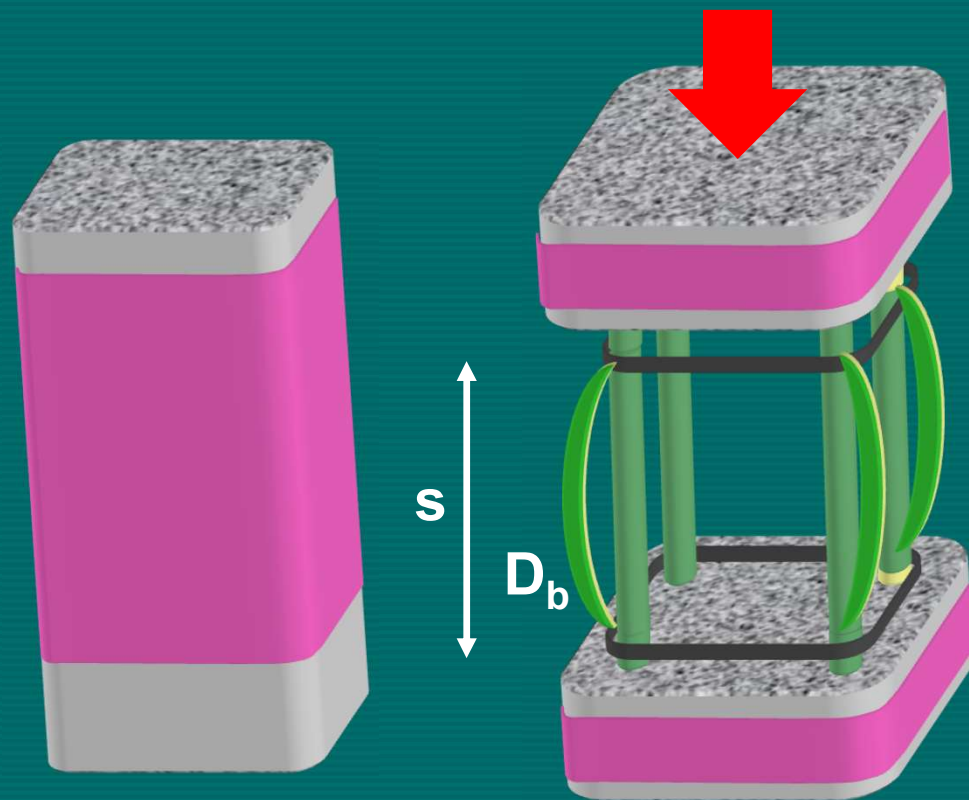
Όμως πειράματα έχουν δείξει ακόμη χαμηλότερα μεγέθη της $\varepsilon_{u,d}$. Γιατί;

- Επειδή η παρουσία διαμηκών ράβδων, που όταν τεθούν σε θλίψη κινδυνεύουν από λυγισμό, ενέχει τον κίνδυνο απόσχισης του μανδύα.
- Όταν η γεωμετρία της διατομής έχει μεγάλο λόγο πλευρών



Λαμβάνονται υπόψη μέσω $k * \varepsilon_{u,d}$

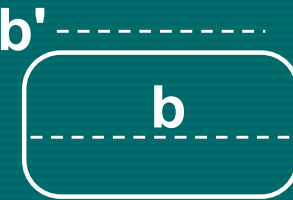
➤ μανδύας περίσφιγξης & ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΟΠΛΙΣΜΩΝ



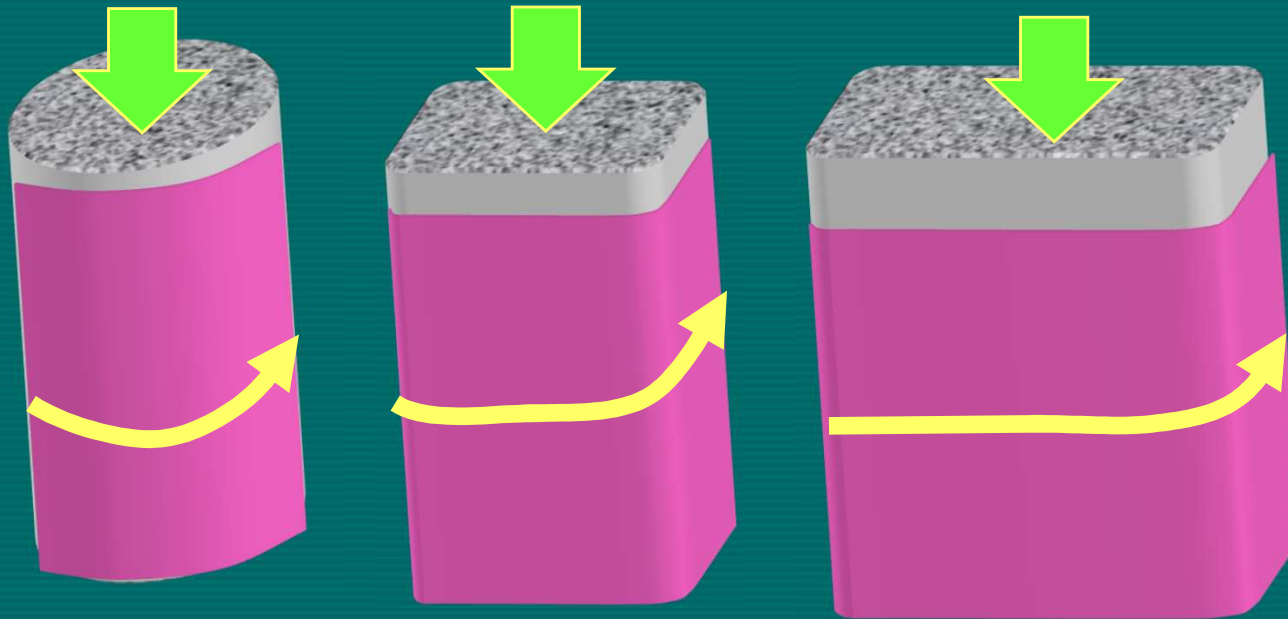
➤ μανδύας περίσφιγξης & ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ b'

$$\epsilon_{u,d} = n_1 n_2 n_3 \frac{\epsilon_{uk}}{\gamma_f} \longrightarrow k * \epsilon_{u,d}$$

$$k \approx 1 - \frac{(b - 2R)^2 + (h - 2R)^2}{3bh(1 - \rho_g)} = 1 - \frac{(b')^2 + (h')^2}{3bh(1 - \rho_g)}$$



Όσο η διατομή αποκλίνει από τον κύκλο τόσο οι τάσεις (και άρα οι παραμορφώσεις) στο ΙΟΠ γίνονται ανομοιόμορφες κατά μήκος της περιφέρειας



Για $R=30$: $h'=340$

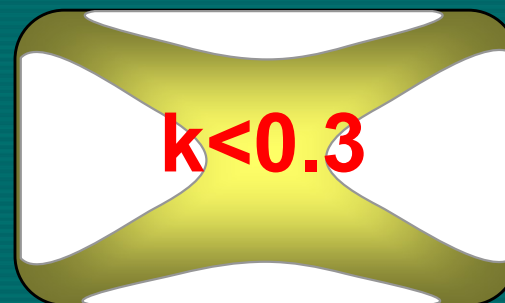
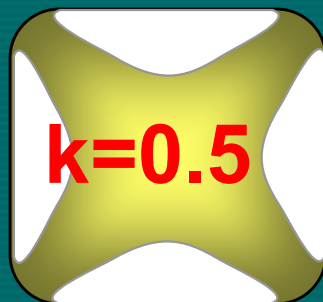
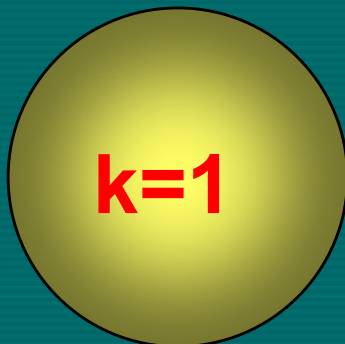
→ $\epsilon_{u,d} = 48\% \epsilon_{uk}$

$A_s \rightarrow 4\Phi 20$

($\rho_g = A_s/bh = 0.0079$)

$k=0.51 \rightarrow$

$k * \epsilon_{u,d} \approx 0.25 \epsilon_{uk}$



με λευκό δηλώνεται η περιοχή που δεν περισφίγγεται μέσω ΙΟΠ

➤ Για εξωτερικά επικ. ΙΟΠ – ως μανδύας
(οι ίνες κάθετα στον διαμήκη άξονα του στοιχείου)

$$\epsilon_{u,d} = n_1 n_2 n_3 \frac{\epsilon_{uk}}{\gamma_f}$$

2. μανδύας σε δοκούς – διατμητική ενίσχυση

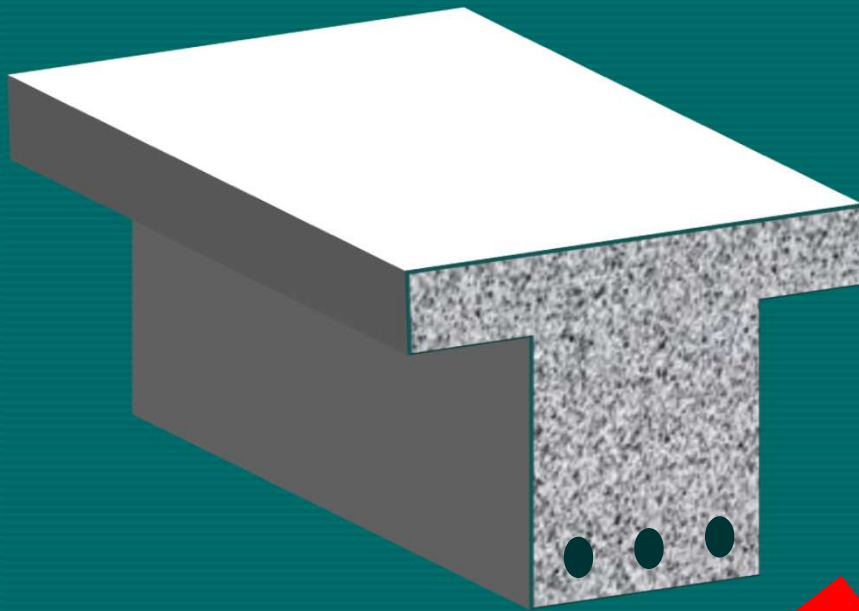
γ_f : συντελεστής ασφάλειας → $\gamma_f=3$ (αν δεν περιβάλλει το στοιχείο, πχ. Σχήμα U)

→ $\gamma_f=1.5$ (αν περιβάλλει το στοιχείο, πχ. σχήμα O)

n_1 : συντελεστής καλής πρακτικής: στρογγύλευμα γωνιών

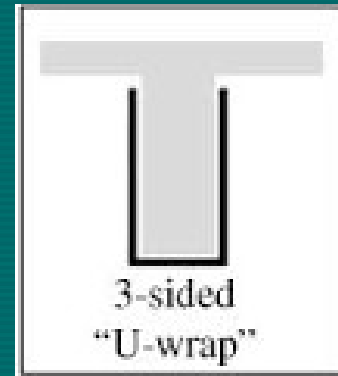
n_2 : συντελεστής επάρκειας μήκους αγκύρωσης της τελικής στρώσης

n_3 : συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την αποκόλληση από το υπόστρωμα



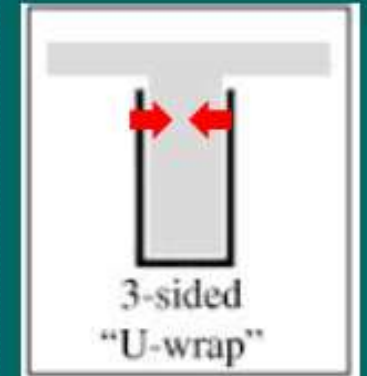
Completely wrapped

$\eta_3=1.0$



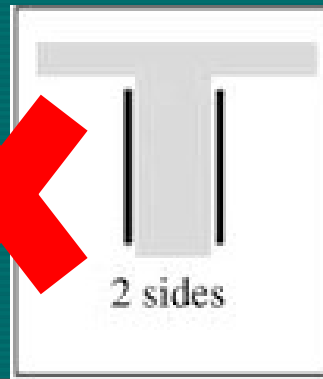
3-sided "U-wrap"

$\eta_3=0.85$



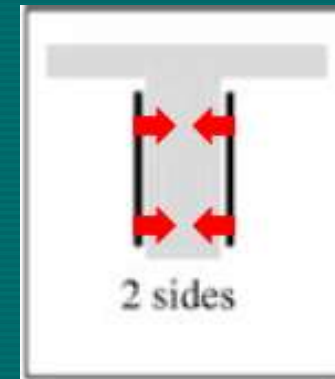
3-sided "U-wrap"

$\eta_3=1$



2 sides

$\eta_3=0.6$



2 sides

$\eta_3=0.9$

Δεν ενδείκνυται

➤ Για εξωτερικά επικ. ΙΟΠ – ως μανδύας
 (οι ίνες κάθετα στον διαμήκη άξονα του στοιχείου)

$$\epsilon_{u,d} = n_1 n_2 n_3 \frac{\epsilon_{uk}}{\gamma_f}$$

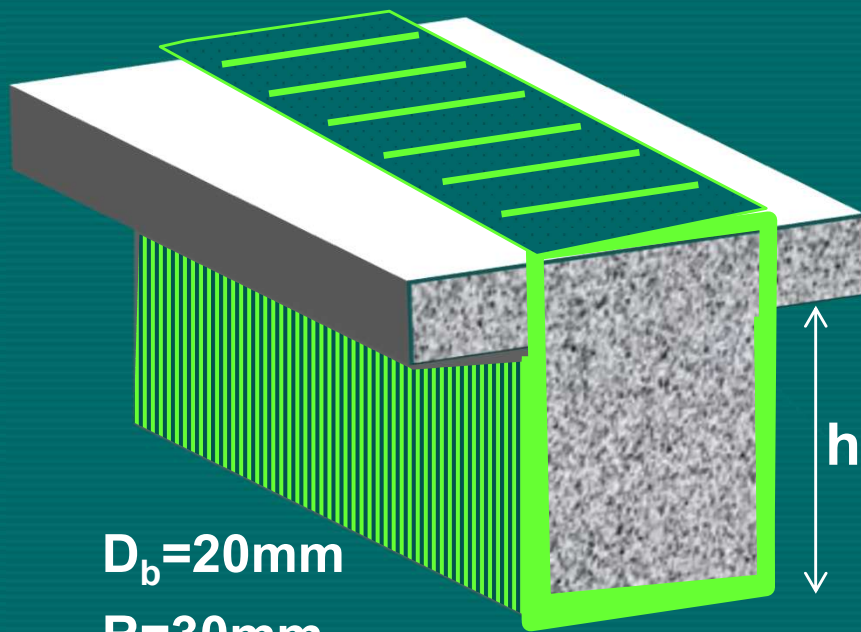
2. μανδύας σε δοκούς – διατμητική ενίσχυση

γ_f : συντελεστής ασφάλειας → $\gamma_f=3$ (αν δεν περιβάλλει το στοιχείο, πχ. Σχήμα U)
 → $\gamma_f=1.5$ (αν περιβάλλει το στοιχείο, πχ. σχήμα O)

n_1 : συντελεστής καλής πρακτικής: στρογγύλευμα γωνιών

n_2 : συντελεστής επάρκειας μήκους αγκύρωσης της τελικής στρώσης

n_3 : συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την αποκόλληση από το υπόστρωμα

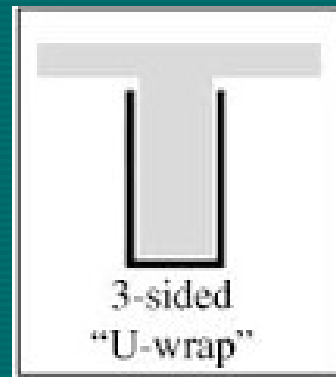


$D_b=20\text{mm}$

$R=30\text{mm}$

$h=400\text{mm}$

$L_b=350\text{mm}$



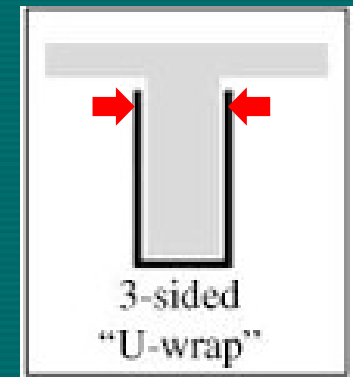
3-sided
"U-wrap"

$\gamma_f=3$



Completely
wrapped

$\gamma_f=1.5$



3-sided
"U-wrap"

$\gamma_f=3$

Κοινό: $n_1 = 0.25 + \frac{2(2 \cdot 30 + 20)}{340'} = 0.72$

Κοινό: $n_2=1$ (επειδή $L_b < h$)

$n_3=0.85$

$n_3=1$

$n_3=1$

$\epsilon_{u,d} = 20\% \epsilon_{uk}$

$\epsilon_{u,d} = 48\% \epsilon_{uk}$

$\epsilon_{u,d} = 24\% \epsilon_{uk}$

Άσκηση 6

Σε στοιχείο 30x50εκ, πανταχόθεν ελεύθερο πλευρικά, απαιτείται ΙΟΠ μανδύας (κλειστός).

Υφασμα GFRP με $t_f=0.15\text{mm}$, $E_f=100\text{GPa}$, $\varepsilon_{uk}=0.03$

Αν η δύναμη που χρειάζεται να αναπτύξει το ΙΟΠ είναι $F=250\text{Nt/mm}$ (ανά τρέχον mm καθ' ύψος), πόσες στρώσεις χρειαζόμαστε;

Σημείωση: $F=n*t_f*E_f*k*\varepsilon_{fu,d}$

Αντίστοιχα, αν πρόκειται για ανοικτό μανδύα.

Επιλέξτε R δεδομένου ότι η καθαρή επικάλυψη (εκτός συνδετήρων) είναι 30mm.

