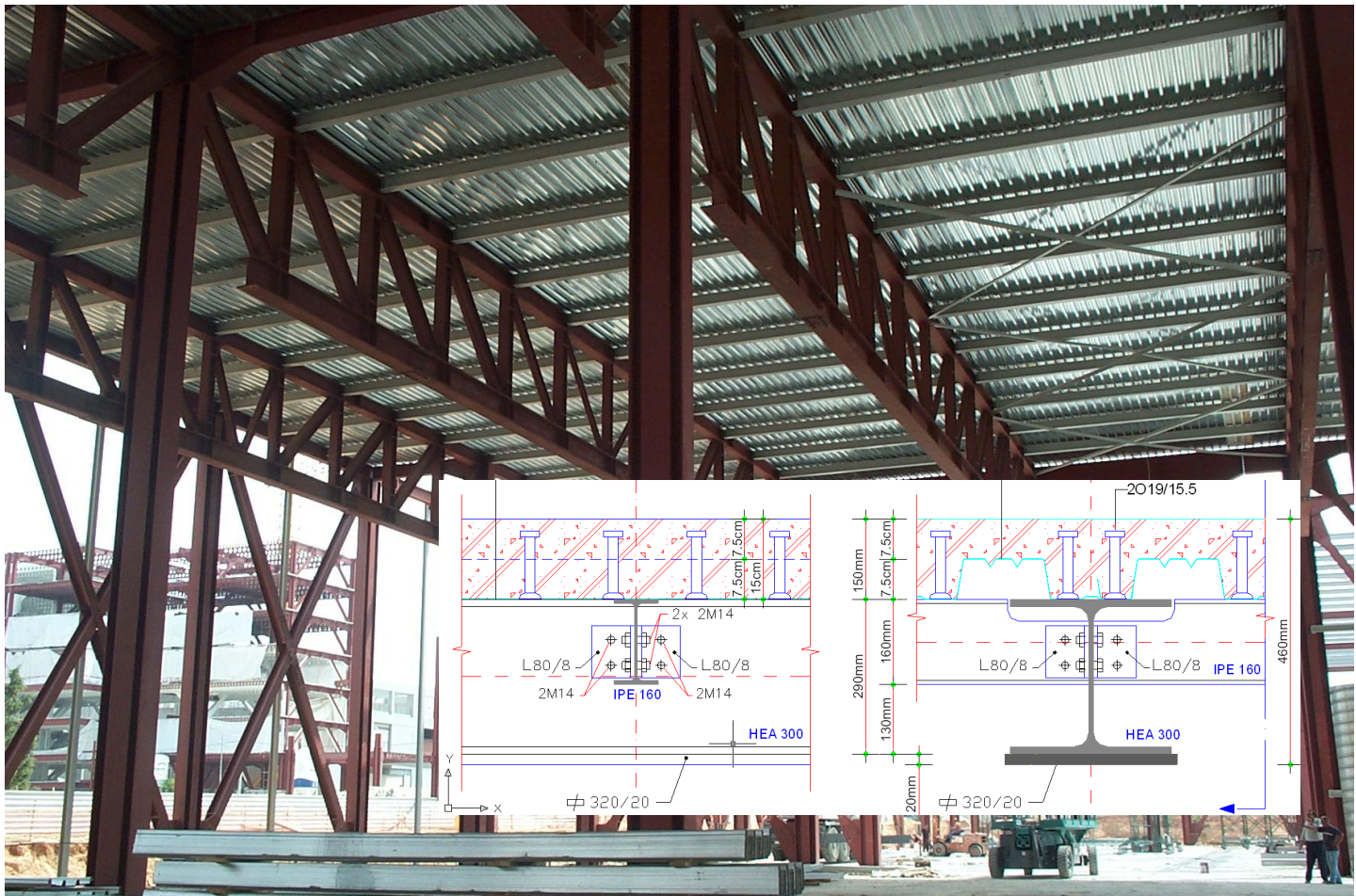


Σχεδιασμός συμμίκτων δομικών στοιχείων σύμφωνα με τον EC4



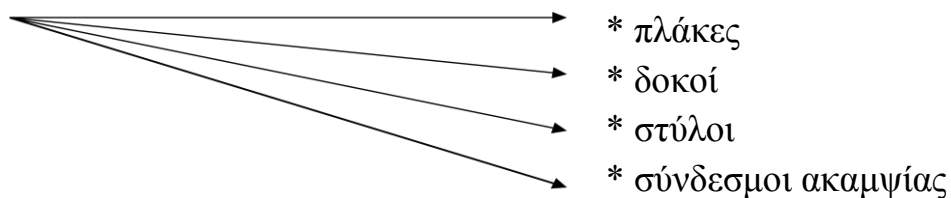
Φαίδων Σ. Καρυδάκης

Οι σύμμικτες κατασκευές είναι:

- κατασκευές από συνεργαζόμενα στοιχεία χάλυβα και σκυροδέματος.
- στα οποία έχει εξασφαλιστεί η συνεργασία των δύο υλικών και η διαμήκης διατμητική τους σύνδεση με μηχανικά μέσα (διατμητικούς συνδέσμους) και όχι με συνάφεια,
- ώστε να αποφεύγεται η σχετική ολίσθηση στην διεπιφάνεια των υλικών και να διατηρείται η επιπεδότητα των διατομών στην καμπτική (κύρια) αλλά και την θλιπτική λειτουργία.

Οι σύμμικτοι φορείς, που θα αντιμετωπίζονταν στο σύνολο τους από έναν κανονισμό, θα αποτελούντο:

από τα επί μέρους σύμμικτα δομικά στοιχεία



και τους σύμμικτους κόμβους.

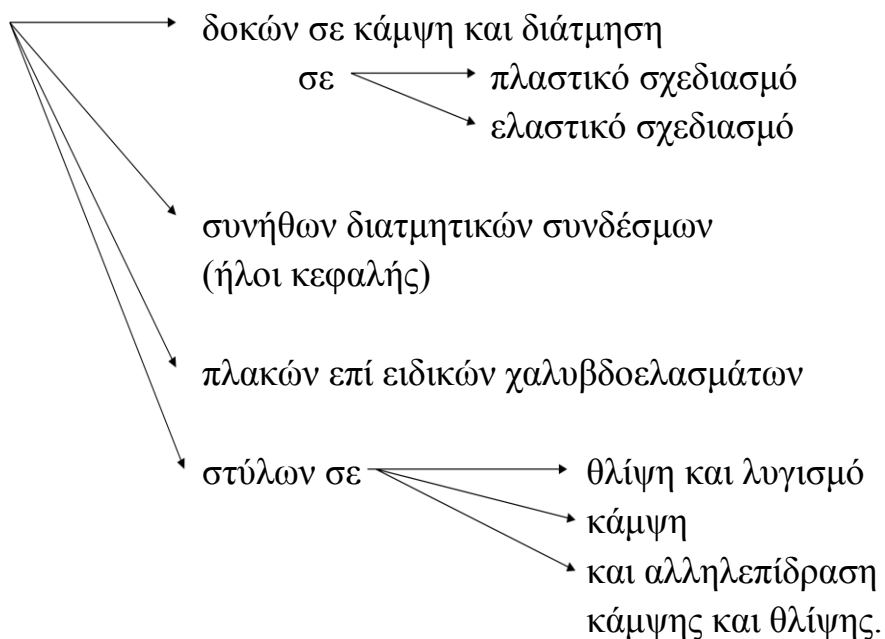
Στην σημερινή του μορφή, ο EC4, δεν καλύπτει το θέμα των κόμβων,

και γενικότερα η έννοια του σύμμικτου κόμβου, με συνεργασία χάλυβα και σκυροδέματος αντιμετωπίζεται σε ειδικές μόνο περιπτώσεις σε ερευνητικό επίπεδο,

επομένως όταν αναφερόμαστε σε σύμμικτες κατασκευές, εννοούμε κατασκευές με μεταλλικούς κόμβους και σύμμικτα συνδεδεμένα στοιχεία

και σπανιότερα, σύμμικτα δομικά στοιχεία συνδεδεμένα με κόμβους από σκυρόδεμα.

Στον χρόνο που έχουμε σήμερα στην διάθεση μας, θα ασχοληθούμε με τον σχεδιασμό (ανάλυση και διαστασιολόγηση) των βασικών επί μέρους δομικών στοιχείων:



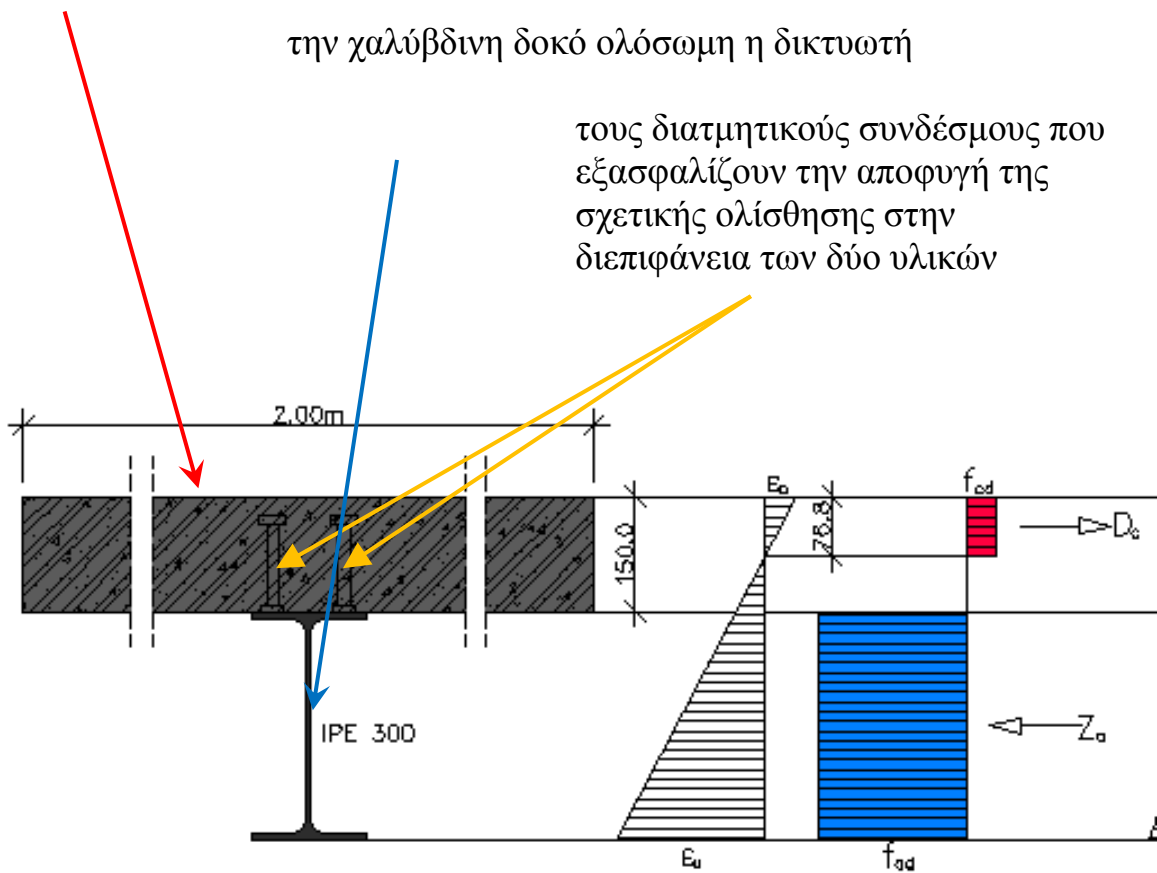
Σύμμικτες δοκοί (τυπικές μορφές):

οι σύμμικτες δοκοί αποτελούνται από:

την συνεργαζόμενη πλάκα σκυροδέματος
συνήθως στο πάνω πέλμα της δοκού ή σε κάποια απόσταση από αυτό
(που συνήθως δημιουργείται από το χαλυβδοέλασμα)

την χαλύβδινη δοκό ολόσωμη ή δικτυωτή

τους διατμητικούς συνδέσμους που
εξασφαλίζουν την αποφυγή της
σχετικής ολίσθησης στην
διεπιφάνεια των δύο υλικών

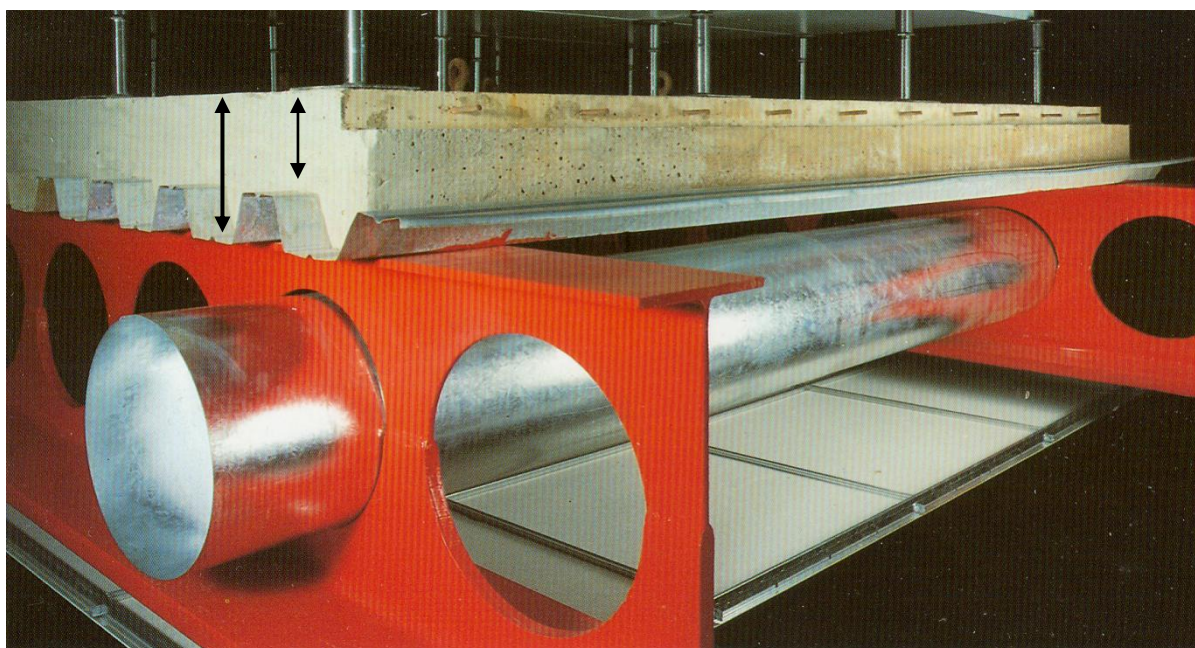


Σύμμικτες δοκοί (τυπικές μορφές):

Σε μια τυπική διάταξη σύμμικτης δοκού, πάνω στην μεταλλική δοκό, εδράζεται η σύμμικτη πλάκα από σκυρόδεμα σε χαλυβδοέλασμα (που λειτουργεί σαν παραμένον ξυλότυπος και συνελκόμενος οπλισμός)

Στην περίπτωση αυτή, στην εγκάρσια διεύθυνση,

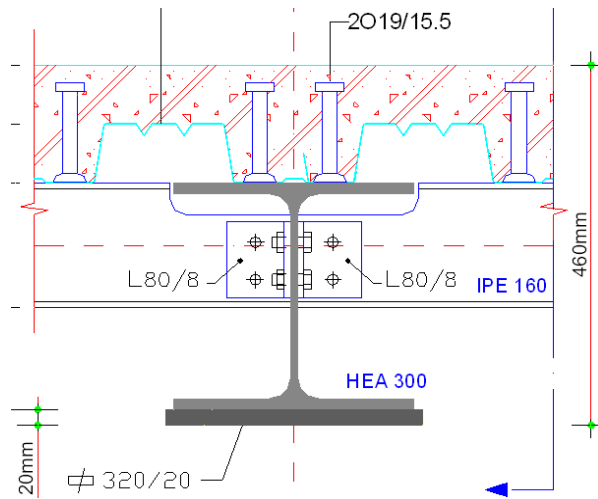
1. η πλάκα έχει ενεργό πάχος σκυροδέματος το σύνολο του ύψους του σκυροδέματος,
2. ενώ στην διαμήκη διεύθυνση της δοκού μόνο το συμπαγές πάχος πάνω από το χαλυβδοέλασμα.



Σύμμικτες δοκοί (τυπικές μορφές):

Σε μια τυπική διάταξη ενός μεταλλικού δαπέδου, με:

- τις κύριες δοκούς στην μία διεύθυνση.
- τις διαδοκίδες στην άλλη, τοποθετείται ένα :



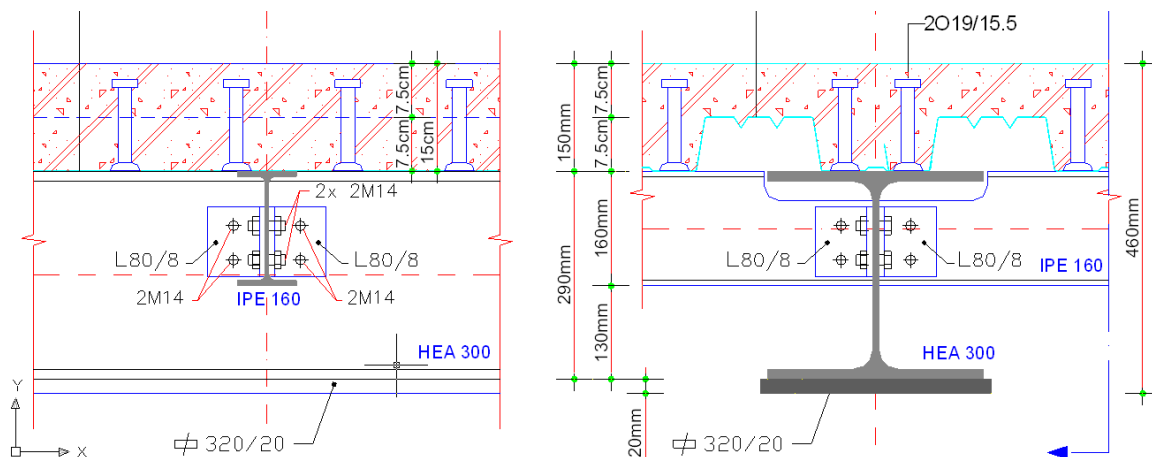
- τραπεζοειδές χαλυβδοέλασμα, και γεμίζει με σκυρόδεμα,

Αν τοποθετήσουμε διατμητικούς συνδέσμους, και εξασφαλίσουμε μηχανικά την διαμήκη διατμητική σύνδεση,

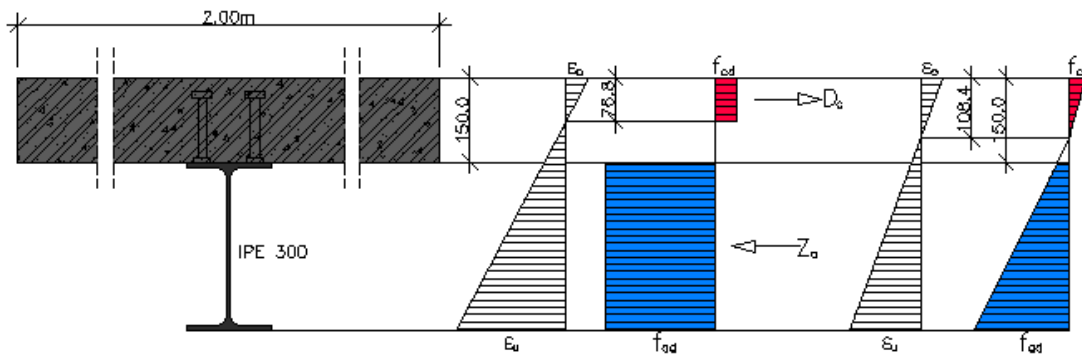
η λειτουργία των δοκών και των δοκίδων γίνεται σύμμικτη και η αντοχή αλλά και η ακαμψία αυξάνεται σημαντικά.

Και εκτός από την αύξηση της αντοχής σε κάμψη, έχουμε την εξασφάλιση σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό των δοκών και δοκίδων και την πρόσθετη διαφραγματική λειτουργία.

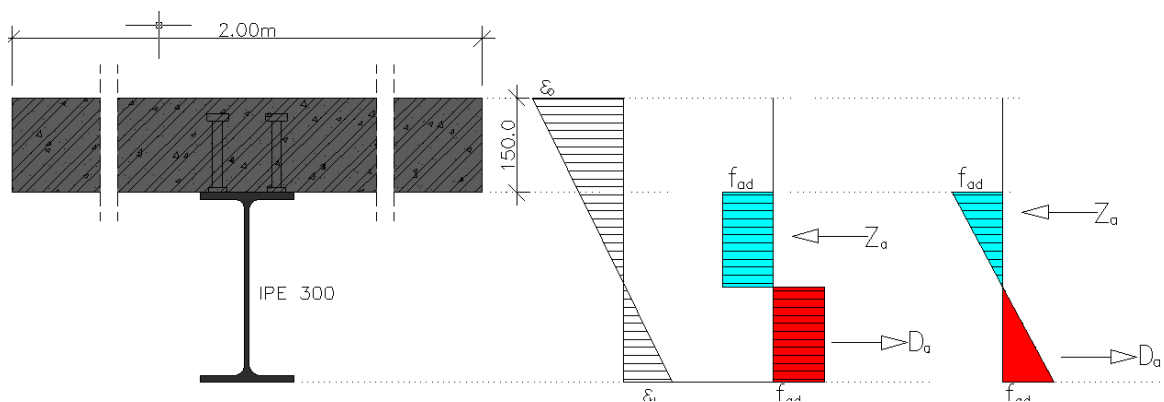
Οι διατμητικοί σύνδεσμοι ηλεκτροσυγκολλώνται στις δοκούς, συνήθως και με το χαλυβδοέλασμα, και παρέχουν την απαιτούμενη σύνδεση για την σύμμικτη λειτουργία.



Σύμμικτες δοκοί (τυπικές μορφές):



Για θετικές ροπές, όπου το σκυρόδεμα θλίβεται, και με την διατμητική διασύνδεση εξασφαλίζεται η επιπεδότητα της καμπτόμενης διατομής, η δοκός συμπεριφέρεται σαν σύμμικτη με την συνεργασία των δύο υλικών.



Αντίθετα όταν το σκυρόδεμα εφελκύεται, ρηγματώνεται, δεν μπορεί να μεταφέρει εφελκυστικές δυνάμεις, και δεν συμμετέχει στην διατομή, οπότε η ενεργός διατομή είναι μόνη της η μεταλλική δοκός.

Σύμμικτες δοκοί (διαστασιολόγηση σε πλαστική ροπή):

οι τάσεις σχεδιασμού που μπορούν να αναπτυχθούν στα υλικά που απαρτίζουν μια σύμμικτη δοκό, σύμφωνα με τον ισχύοντα EC4, είναι:

για την χαλύβδινη διατομή:

$$f_{ad} = f_y / 1.1 \quad (\text{π.χ. για χάλυβα S355,} \\ f_{ad} = 35.5 / 1.1 = 32.28 \text{ kN/cm}^2)$$

για τον συνελκόμενο χάλυβα:

$$f_{sd} = f_{sy} / 1.15 \quad (\text{π.χ. για χάλυβα S500,} \\ f_{ad} = 50 / 1.15 = 43.47 \text{ kN/cm}^2)$$

για το σκυρόδεμα:

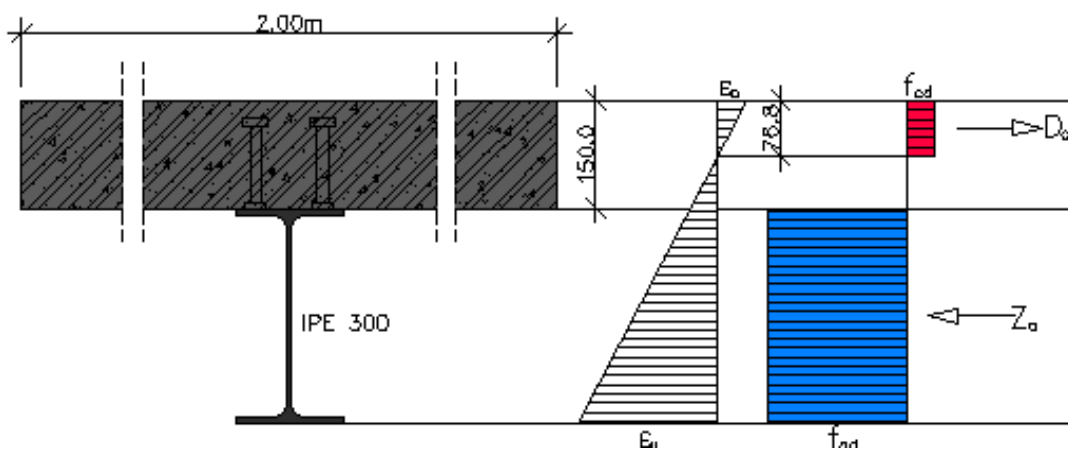
$$f_{cd} = 0.85 * f_{ck} / 1.5 \quad (\text{π.χ. για σκυρόδεμα C20/25,} \\ f_{cd} = 0.85 * 2.0 / 1.5 = 1.13 \text{ kN/cm}^2)$$

Σύμμικτες δοκοί (διαστασιολόγηση σε πλαστική ροπή):
(εφ όσον οι διατομή είναι κατηγορία 1 η 2)

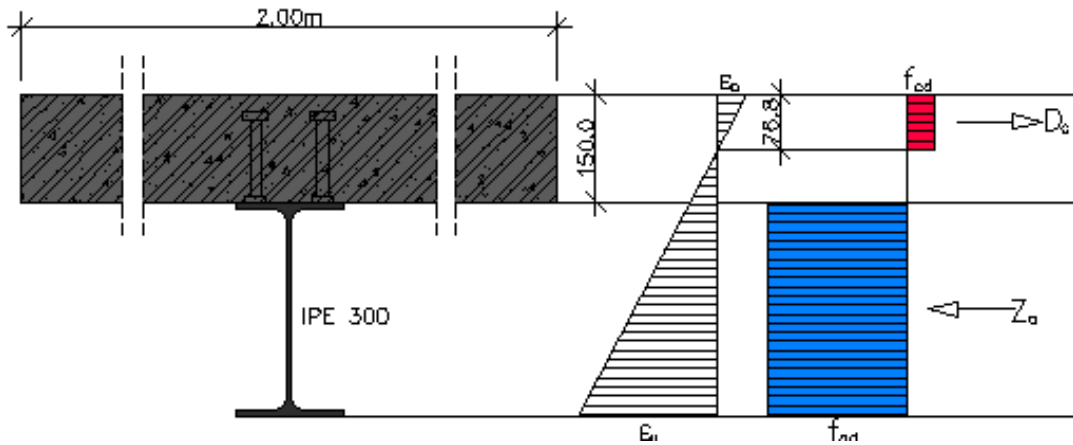
Η διατομή, διατηρώντας την επιπεδότητα της και την κοινή μετακίνηση, χωρίς σχετική ολίσθηση, στην διεπιφάνεια των δύο υλικών, παραμορφώνεται μέχρι να ισορροπήσουν:

- η εφελυστική δύναμη του εφελκυόμενου τμήματος της χαλύβδινης διατομής (P_{Za}) και
- η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος, και του συνελκόμενου οπλισμού (P_{Dc})
- και η θλιπτική δύναμη του θλιβόμενου τμήματος της χαλύβδινης διατομής (εφ όσον υπάρχει) (P_{Da})

οπότε η περιστροφή της διατομής για την ανάπτυξη της πλήρους πλαστικής ροπής, έχει ολοκληρωθεί, περί τον πλαστικό ουδέτερο άξονα.



Σύμμικτες δοκοί (διαστασιολόγηση σε πλαστική ροπή):
(εφ' όσον οι διατομή είναι κατηγορία 1 η 2)



$$P_{Dc} = P_{Za}$$

$$P_{Za} = A_a * f_{ad}$$

$$P_{Dc} = A_c * f_{cd} = z_e * b_c * f_{cd}$$

$$z_e = A_a * f_{ad} / b_c * f_{cd}$$

για το παράδειγμα

$$\text{IPE300} \quad A_a = 53.8 \text{ cm}^2 \quad I_a = 8360 \text{ cm}^4 \quad W_{ael} = 557 \text{ cm}^3 \quad W_{apl} = 628 \text{ cm}^3$$

$$P_{dc}^{\max} = (200 * 15) * 1.13 = 3390 \text{ kN}$$

$$P_{za}^{\max} = 53.8 * 32.28 = 1736 \text{ kN} (< P_{dc}^{\max})$$

$$P_{dc} = P_{za}^{\max} = 1736 \text{ kN}$$

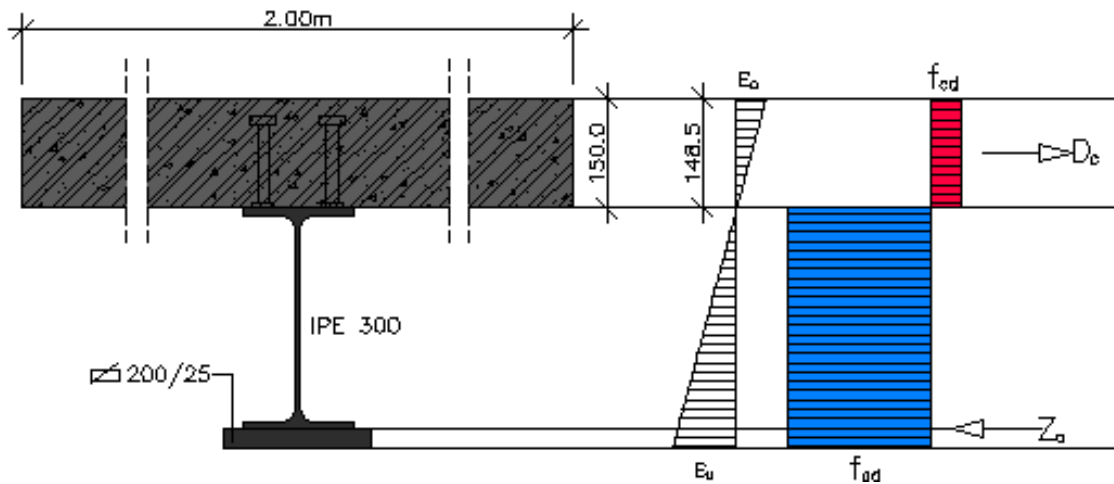
$$z_e = 1736 / (200 * 1.13) - 7.68 \text{ cm}$$

$$M_{plrde} = 1736 * (15.0 + 30.0/2 - 7.68/2) = 45409 \text{ kNcm} = 454 \text{ kNm}$$

$$M_{plrda} = 625 * 32.28 = 17979 \text{ kNcm} = 179.8 \text{ kNm}$$

Βλέπουμε ότι σημαντικό μέρος του σκυροδέματος μένει ανενεργό και ο μοχλοβραχίονας για την ροπή είναι μικρός

Σύμμικτες δοκοί (διαστασιολόγηση σε πλαστική ροπή):



αν στην χαλύβδινη δοκό προσθέσουμε ένα έλασμα στο κάτω πέλμα, (όπως στο σχήμα) οι αντίστοιχες τιμές γίνονται:

$$A_a = A_{a0} + A_f = 53.8 + 2.0 \cdot 25.0 = 53.8 + 50.0 = 103.8 \text{ cm}^2$$

$$z_a = (53.8 \cdot 30 + 50 \cdot (45 + 2.5/2)) / 103.8 = 37.82 \text{ cm}$$

$$P_{dc}^{\max} = 3390 \text{ kN}$$

$$P_{za}^{\max} = 103.8 \cdot 32.28 = 3350 \text{ } (< P_{dc}^{\max} = 3390 \text{ kN})$$

$$z_e = 3350 / (200 \cdot 1.13) = 14.85 \text{ cm } (< h_c)$$

$$M_{pllrde} = 3350 \cdot (37.82 - 14.85/2) = 101368 \text{ kNcm} = 1013 \text{ kNm}$$

η διατομή του σκυροδέματος είναι (σχεδόν) όλη ενεργή,
ο μοχλοβραχίονας αυξάνει
και η ροπή υπερδιπλασιάζεται ($M_{plrd}=1013 \text{ kN}$ αντί 454 kN)

Σύμμικτες δοκοί (διαστασιολόγηση σε πλαστική ροπή):

για την σύμμικτη διατομή του παραδείγματος:

η μέγιστη πλαστική ροπή με την αρχική διατομή του χάλυβα IPE300 είναι:

$$M_{plrd}=454 \text{ kNm}$$

ενώ η αντίστοιχη πλαστική ροπή μόνον για την χαλύβδινη διατομή (χωρίς την συνεργασία της πλάκας σκυροδέματος) είναι:

$$M_{aplrd}=202 \text{ kNm}$$

$$M_{plrd}/M_{aplrd}=2.24 \text{ kNm (αύξηση 2.24 φορές)}$$

για την ενισχυμένη με έλασμα διατομή η πλαστική ροπή για την σύμμικτη διατομή είναι:

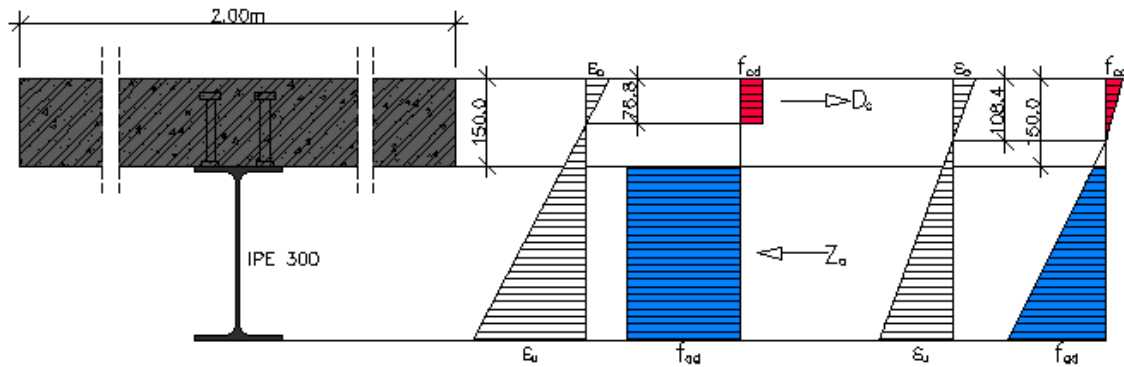
$$M_{plrd}=1018 \text{ kNm}$$

ενώ η αντίστοιχη πλαστική ροπή μόνον για την χαλύβδινη διατομή είναι:

$$M_{aplrd}=262 \text{ kNm} \quad M_{plrd}/M_{aplrd}=3.88 \text{ kNm (αύξηση 3.88 φορές)}$$

**Σύμμικτες δοκοί (διαστασιολόγηση σε ελαστική ροπή):
(εφ όσον οι διατομή είναι κατηγορία 3)**

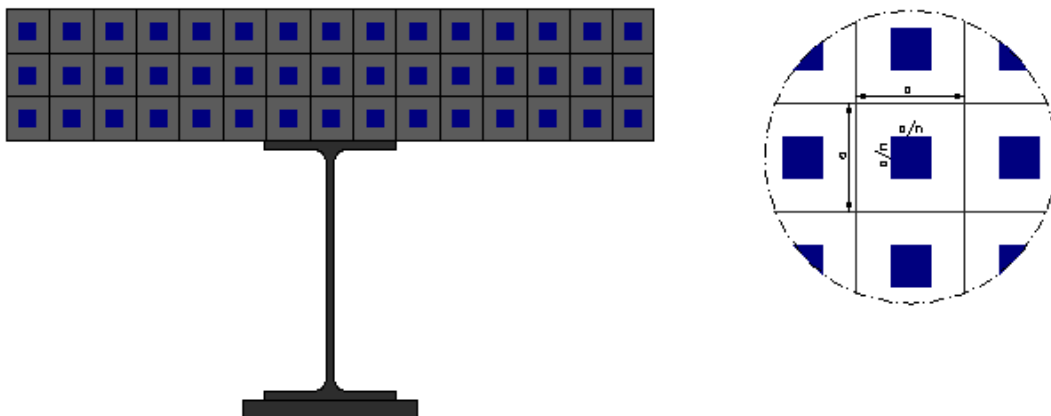
Η διατομή, διατηρώντας πάλι την επιπεδότητα της και την κοινή μετακίνηση στην διεπιφάνεια των δύο υλικών, παραμορφώνεται περί το κέντρο βάρους μιας ισοδύναμης διατομής, που αποτελείται από ένα υλικό (συνήθως τον χάλυβα).



Για να είναι ισοδύναμη η διατομή, κρατώντας τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, πρέπει η διατομή του σκυροδέματος να αντικατασταθεί με μία ισοδύναμη χαλύβδινη διατομή, που θα καταλαμβάνει την συνολική επιφάνεια του σκυροδέματος, αλλά με μία πιο «αραιή» πυκνότητα υλικού, ώστε να δίνει για την πραγματική παραμόρφωση την αντίστοιχη δύναμη που θα έδινε το αρχικό υλικό.

η διατομή του σκυροδέματος αντικαθίσταται με μία αραιότερη διάταξη χάλυβα, με τα ίδια όμως γεωμετρικά χαρακτηριστικά (επιφάνεια, κέντρο βάρους, ροπή αδρανείας)

όπου η ισοδύναμη επιφάνεια του, δίνει την δύναμη που θα έδινε το σκυρόδεμα για την αντίστοιχη παραμόρφωση:



Σύμμικτες δοκοί (διαστασιολόγηση σε ελαστική ροπή):

Φανταστείτε ότι ο ισοδύναμος χάλυβας καταλαμβάνει όλη την επιφάνεια του σκυροδέματος, με ένα αραιότερο “raster”, κατά n φορές

Αρχική επιφάνεια σκυροδέματος (σε κάθε σημείο) A_c

Αρχική δύναμη σκυροδέματος (στο ίδιο σημείο) $P_{Dc}=A_c * E_c * \varepsilon$

Ισοδύναμη δύναμη χάλυβα (στο ίδιο σημείο) $P_{Da}=A_{ac} * E_a * \varepsilon$

$$P_{Da} = P_{Dc} \text{ άρα}$$

$$A_c * E_c * \varepsilon = A_{ac} * E_a * \varepsilon$$

και

$$A_c * E_c = A_{ac} * E_a \text{ και } A_c = A_{ac} * E_a / E_c \text{ και } A_{ac} = A_c / (E_a / E_c)$$

$$(E_a / E_c) = n \text{ και τέλος } A_{ac} = A_c / n$$

Η συνολική ισοδύναμη επιφάνεια της διατομής ανηγμένη σε χάλυβα γίνεται:

$$A_e = A_{ao} + A_{ac} = A_{ao} + A_c / n \text{ (όπου } n = E_a / E_c)$$

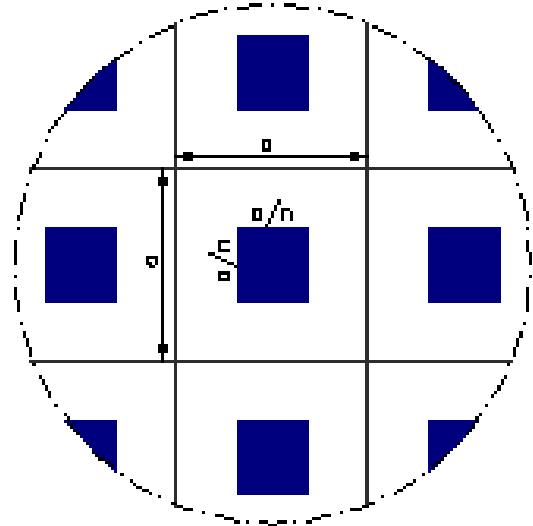
Η θέση του κέντρου βάρους της ισοδύναμης διατομής:

$$z_e = (A_{ao} * z_a + A_{ac} * z_c) / A_e$$

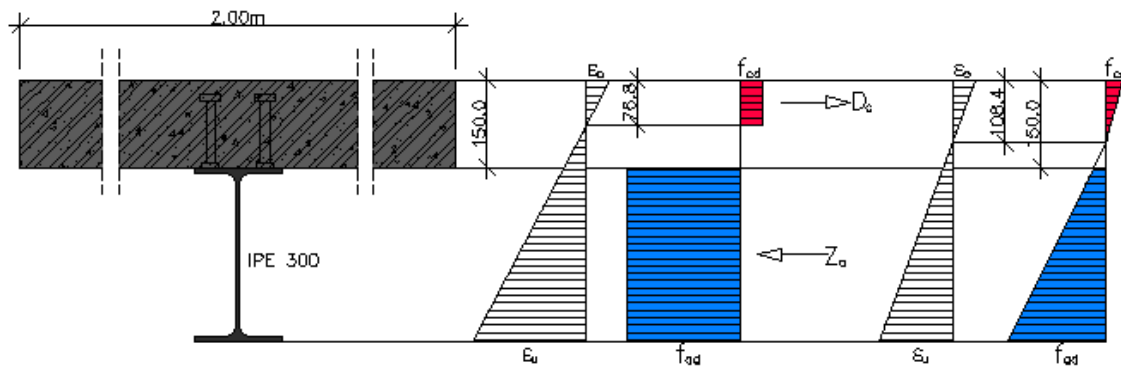
Και η ισοδύναμη ροπή αδρανείας αντίστοιχα:

$$I_e = I_{ao} + I_{aco} + A_{ao} * (z_e - z_{ao})^2 + A_{ac} * (z_e - z_c)^2$$

$$I_e = I_{ao} + I_{co} / n + A_{ao} * (z_e - z_{ao})^2 + (A_c / n) * (z_e - z_c)^2$$



Σύμμικτες δοκοί (διαστασιολόγηση σε ελαστική ροπή)



$$\text{IPE300} \quad A_a=53.8 \text{ cm}^2 \quad I_a=8360 \text{ cm}^4 \quad W_{ael}=557 \text{ cm}^3 \quad W_{apl}=628 \text{ cm}^3$$

$$E_a = 21000 \text{ kN/cm}^2 \quad E_a / E_c = 21000/2900 = n = 7.24$$

$$E_c = 2900 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_e = A_c/n + A_s = (200 \cdot 15)/7.24 + 53.8 = 414.3 + 53.8 = 468.1 \text{ cm}^2$$

$$z_e = ((414.3 \cdot 15/2) + (53.8 \cdot (15+30/2))) / 468.1 = 4720 / 468.1 = 10.08 \text{ cm}$$

$$I_e = ((15^3 \cdot 200)/12)/7.24 + 8360 + 414.3 \cdot (10.08 - 15/2)^2 + 53.8 \cdot (10.08 - 30)^2$$

$$= 7769 + 8360 + 2757 + 21348 = 40325 \text{ cm}^4$$

$$W_o^a = 40325/10.08 = 3991 \text{ cm}^3 \quad W_o^c = W_o^a \cdot n = 3991 \cdot 7.24 = 28994 \text{ cm}^3$$

$$W_u^a = 40325/(45-10.08) = 1152 \text{ cm}^3$$

Για την διατομή που εξετάσαμε προηγούμενα, εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία της ισοδύναμης διατομής έχουμε:

$$A_e=468 \text{ cm}^2, z_e=10.08 \text{ cm και } I_e=40325 \text{ cm}^4$$

Η ροπή αδρανείας της διατομής αυξήθηκε από 8360 cm^4 , για την αμιγώς χαλύβδινη διατομή, σε 40325 cm^4 για την σύμμικτη, **4.8 φορές**.

Για την ροπή αντιστάσεως αυτή είναι:

$$W_{eo}^a = I_e/z_e \text{ (ανηγμ. σε χάλυβα) και } W_{eo}^c = (I_e/z_e) \cdot n \text{ (αν. σε σκυρόδεμα)}$$

$$W_{eu}^a = I_e/(h_{tot}-z_e) \text{ στην κάτω ίνα της χαλύβδινης διατομής}$$

Σύμμικτες δοκοί (διαστασιολόγηση σε ελαστική ροπή):

Είναι προφανές ότι η μέγιστη ελαστική ροπή είναι αυτή που οδηγεί την δυσμενέστερη ακραία ίνα στην αντίστοιχη τάση σχεδιασμού:

είτε την πάνω ίνα του σκυροδέματος: $\sigma_o^c = f_{cd}$

είτε την κάτω ίνα του χάλυβα: $\sigma_u^a = f_{ad}$

Η μέγιστη ροπή για εξάντληση της αντοχής της ακραίας άνω ίνας του σκυροδέματος είναι:

$$M_{\max o}^c = 327 \text{ kNm}$$

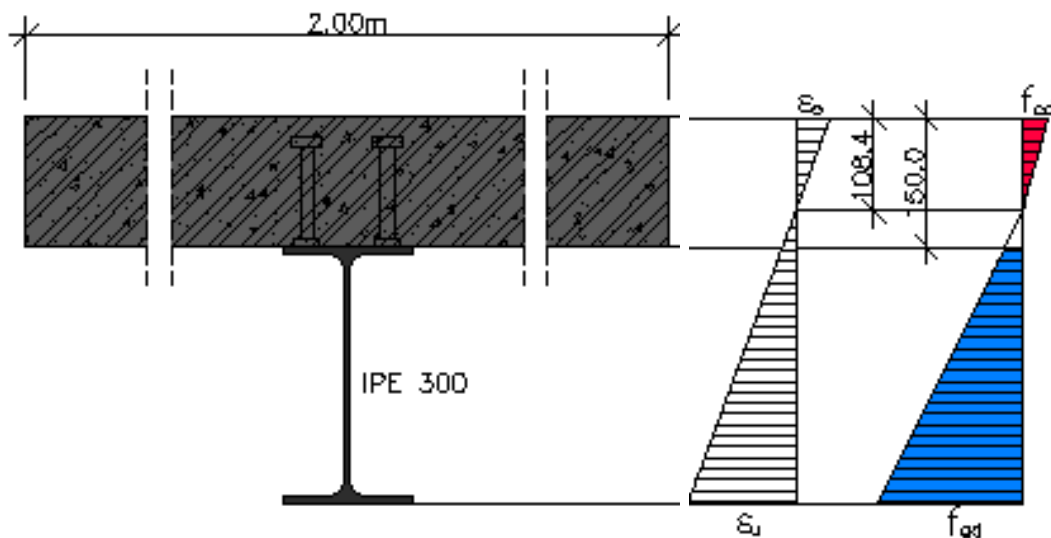
Και για εξάντληση της αντοχής της ακραίας κάτω ίνας του σκυροδέματος:

$$M_{\max u}^a = 371 \text{ kNm}$$

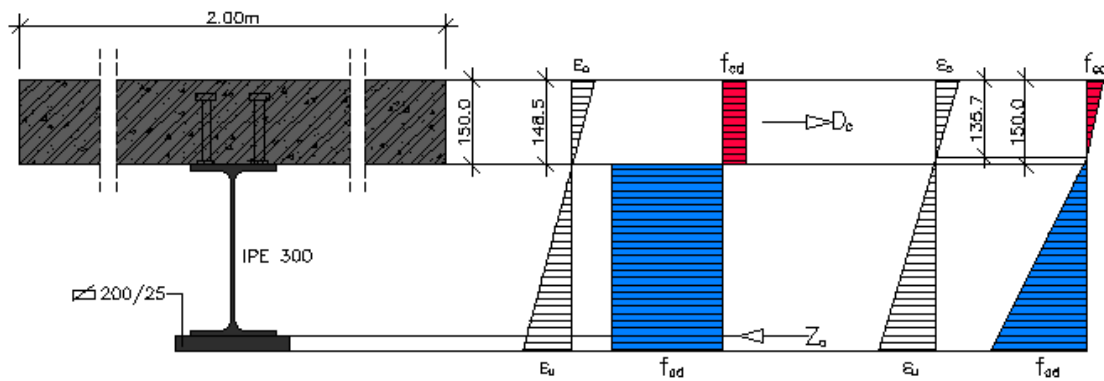
Η διατομή αστοχεί ελαστικά σε 327 kNm, λόγω εξάντλησης της ελαστικής αντοχής του σκυροδέματος.

Η αντίστοιχη πλαστική αντοχή της διατομής ήταν 454 kNm

η μέγιστη ελαστική αντοχή της μεταλλικής δοκού είναι 180 kNm.



Σύμμικτες δοκοί (διαστασιολόγηση σε ελαστική ροπή):



Για την ενισχυμένη με έλασμα διατομή έχουμε:

$$A_e = 518 \text{ cm}^2, z_e = 13.56 \text{ cm} \text{ και } I_e = 98897 \text{ cm}^4$$

Η ροπή αδρανείας της διατομής αυξήθηκε από 15124 cm⁴, για την αμιγώς χαλύβδινη διατομή,

σε 98897 cm⁴ για την σύμμικτη, **6.5 φορές**.

Η μέγιστη ροπή για εξάντληση της αντοχής της ακραίας άνω ίνας του σκυροδέματος είναι:

$$M_{\max o}^c = 596 \text{ kNm (ροπή αστοχίας)}$$

Και για εξάντληση της αντοχής της ακραίας κάτω ίνας του σκυροδέματος $M_{\max u}^a = 940 \text{ kNm}$

Η αντίστοιχη πλαστική αντοχή της διατομής ήταν 1018 kNm.

όπως φάνηκε στις προηγούμενες αναλύσεις:

- η αντοχή μιας σύμμικτης δοκού αυξάνεται σημαντικά (2.5-5.0 φορές),
- και η ακαμψία ακόμη περισσότερο (4,0-7,5 φορές).

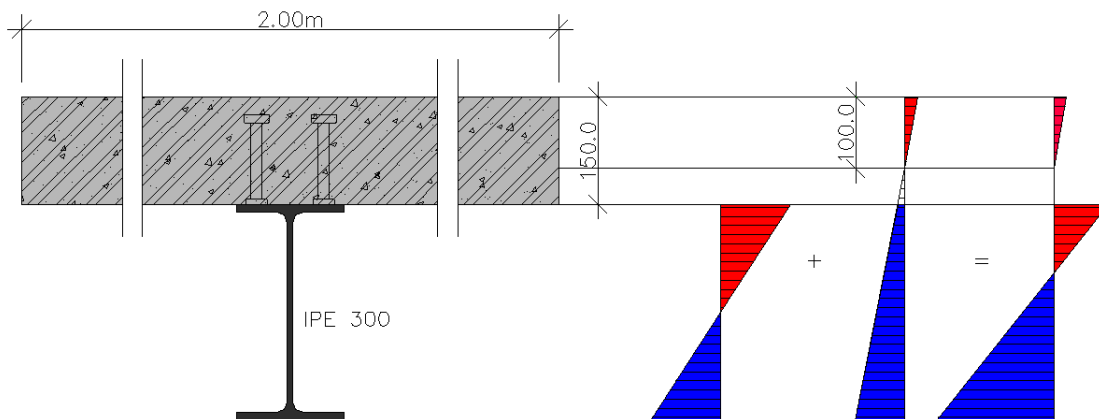
Με δεδομένη την σύμμικτη λειτουργία μόνον στις θετικές ροπές και την λειτουργία στις αρνητικές ροπές, μόνον της μεταλλικής διατομής σε υπερστατικούς φορείς, στα σημεία που αναπτύσσονται οι μέγιστες ροπές (στηρίξεις) έχουμε την ελάχιστη αντοχή, και τα πλεονεκτήματα τω σύμμικτων διατομών εξαφανίζονται, σε απλές ελαστικές αναλύσεις.

Σύμμικτες δοκοί (διαστασιολόγηση σε ελαστική ροπή):

Στην ελαστική ανάλυση, παίζει σημαντικό ρόλο η ιστορία της φόρτισης, κάτι που δεν συμβαίνει στην πλαστική ανάλυση.

Περίπτωση 1.

Σκυροδέτηση σε μη υποστηριζόμενο ξυλότυπο που φέρεται από την μεταλλική δοκό



Αρχικά η μεταλλική δοκός ανεγείρεται και επάνω της τοποθετείται ο παραμένον ξυλότυπος, και γίνεται η σκυροδέτηση.

Τα αρχικά φορτία παραλαμβάνονται από την μεταλλική δοκό μόνο. (φάση 1)

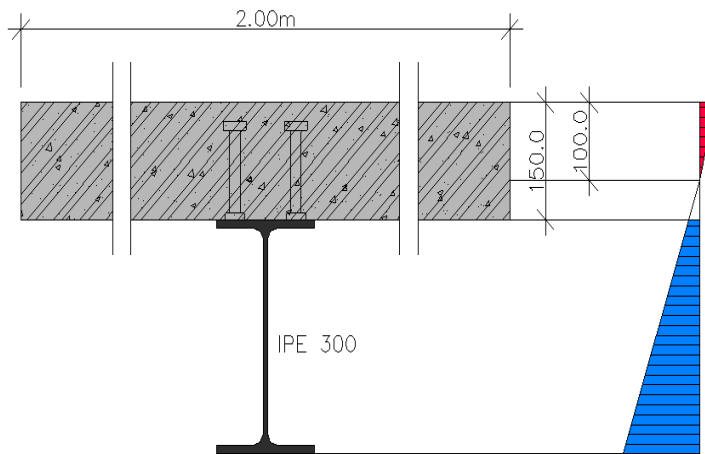
Στην συνέχεια η δοκός λειτουργεί σαν σύμμικτη, και τα υπόλοιπα φορτία, πρόσθετα μόνιμα, και κινητά παραλαμβάνονται από την σύμμικτη πια δοκό. (φάση 2)

Τα τελικά εντατικά μεγέθη, προκύπτουν από το άθροισμα των δύο φάσεων.

Σύμμικτες δοκοί (διαστασιολόγηση σε ελαστική ροπή):

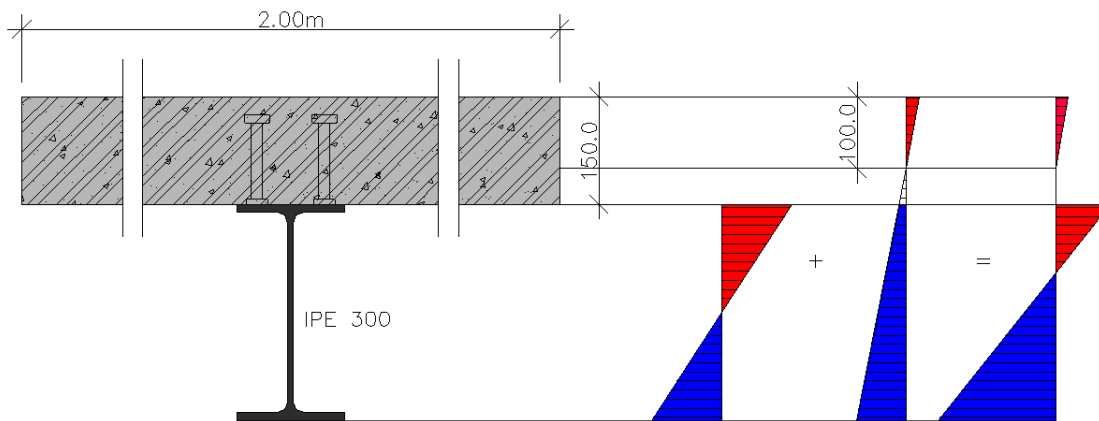
Περίπτωση 2.

Σκυροδέτηση σε υποστηριζόμενο ξυλότυπο που δεν φέρεται από την μεταλλική δοκό



Αντίθετα αν η δοκός και ο ξυλότυπος υποστηριχθεί στην αρχική φάση, η δοκός για το σύνολο των φορτίων λειτουργεί σαν σύμμικτη και η τελική εικόνα είναι πολύ διαφορετική.

Σύμμικτες δοκοί (διαστασιολόγηση σε ελαστική ροπή):



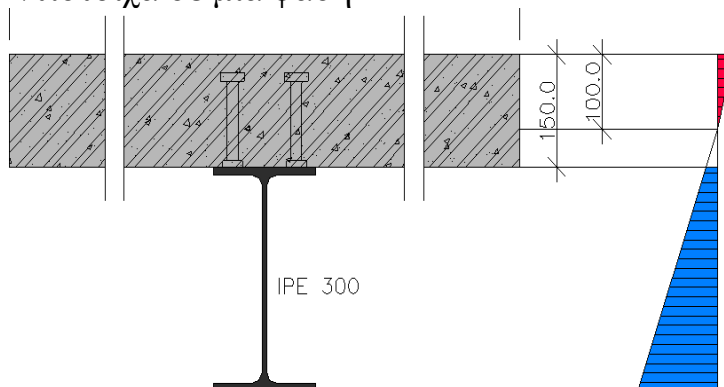
Έστω ότι έχουμε την δοκό του σχήματος, αμφιέρειστη με άνοιγμα 10 m:

$$\begin{array}{ll}
 g_a = 0.41 \text{ kN/m} & \Sigma g = 8.0 \text{ kN/m} \rightarrow g_{sd} = 10.8 \text{ kN/m} \\
 g_c = 7.50 \text{ kN/m} & g_l = 3.0 \text{ kN/m} \rightarrow g_{l,sd} = 4.05 \text{ kN/m} \\
 g_1 = 3.0 \text{ kN/m} & q = 8.0 \text{ kN/m} \rightarrow q_{sd} = 15.0 \text{ kN/m} \\
 q = 8.0 \text{ kN/m} & \Sigma p_{sd} = 26.85 \text{ kN/m}
 \end{array}$$

$$\text{Φάση 1} \quad \sigma_o = \sigma_u = 24.3 \text{ kN/cm}^2$$

$$\begin{array}{ll}
 \text{Φάση 2} \quad \Delta \sigma_o = 0.69 \text{ kN/cm}^2 & \Delta \sigma_{ua} = 17.43 \text{ kN/cm}^2 \\
 \Sigma \sigma_o = 0.69 \text{ kN/cm}^2 & \\
 \Sigma \sigma_{oa} = 19.0 \text{ kN/cm}^2 & \Sigma \sigma_{ua} = 41.0 \text{ kN/cm}^2
 \end{array}$$

Αντίστοιχα σε μία φάση



$$\begin{array}{l}
 \Sigma \sigma_{oc} = 1.16 \text{ kN/cm}^2 \\
 \Sigma \sigma_{oa} = 4.19 \text{ kN/cm}^2 \\
 \sigma_{ua} = 29.13 \text{ kN/cm}^2
 \end{array}$$

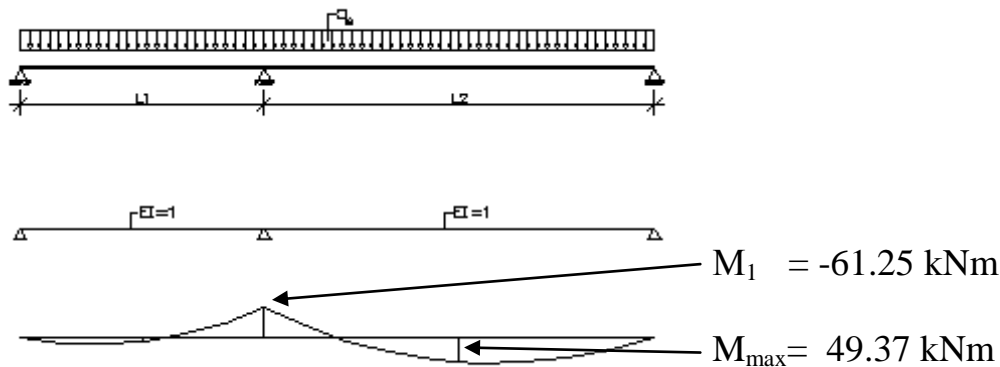
Θέλει ιδιαίτερη προσοχή η λειτουργικότητα (βέλος) αλλά κύρια η ευστάθεια της μεταλλικής δοκού στις φάσεις πριν την σκυροδέτηση.

Η σωστή σύνδεση με το χαλυβδοέλασμα προσφέρει σημαντική πρόσθετη ευστάθεια.

Σύμμικτες δοκοί

(πλαστική και ελαστική ανάλυση, ανακατανομή ροπών):

Σε μια συνεχή δοκό δύο ανοιγμάτων, με απλή ελαστική ανάλυση, με EI σταθερό σε όλο το μήκος της δοκού (όπως στο σχήμα) έχουμε για ομοιόμορφο φορτίο 10 kN/m :



Αντίστοιχα για μία δοκό με την διατομή που εξετάσαμε πριν οι αντίστοιχες αντοχές είναι:

$$M_{\text{plrda}} = 262 \text{ kNm} \quad (=4.27 \cdot 61,25)$$

$$M_{\text{plrde}} = 1018 \text{ kNm} \quad (=20.61 \cdot 49,37)$$

Η εξάντληση της αντοχής της δοκού θα γίνει για φορτίο $q_{\text{sd}}=42.7 \text{ kN/m}$,

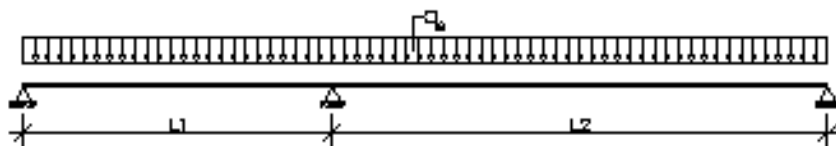
Οπότε η ροπή της στήριξης φτάνει στην ροπή αντοχής της μεταλλικής διατομής.

την ίδια στιγμή για το άνοιγμα έχουμε:

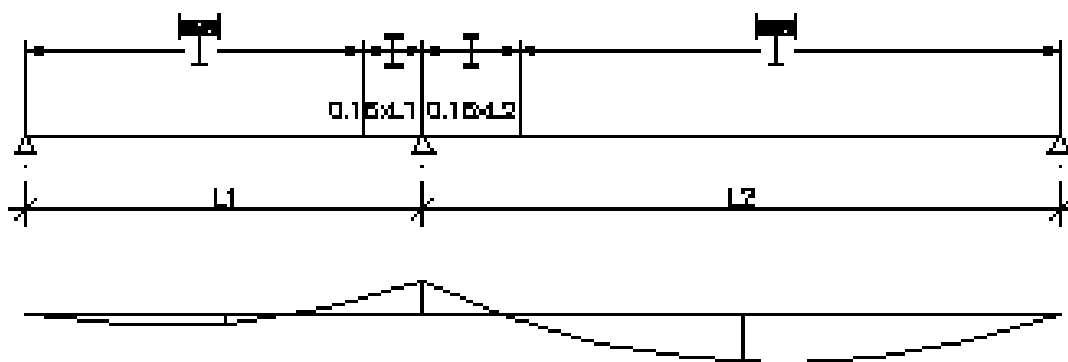
$$M_{\max}=211 \text{ kNm} \ll M_{\text{eplrd}}= 1018 \text{ kNm}$$

Η αντοχή της δοκού εξαντλείται στην στήριξη και η δοκός στο άνοιγμα υπολειτουργεί σχεδόν στο 20% της σύμμικτης αντοχής

**Σύμμικτες δοκοί
(πλαστική και ελαστική ανάλυση, ανακατανομή ροπών):**



Στην ίδια δοκό μπορούμε να κάνοντας μια πιο ακριβή ανάλυση, την «ρηγματωμένη ανάλυση», όπου η ακαμψία κατά μήκος της δοκού μεταβάλλεται ανάλογα με το αν συμμετέχει το σκυρόδεμα, η αν λόγω εφελκυσμού έχει ρηγματωθεί.



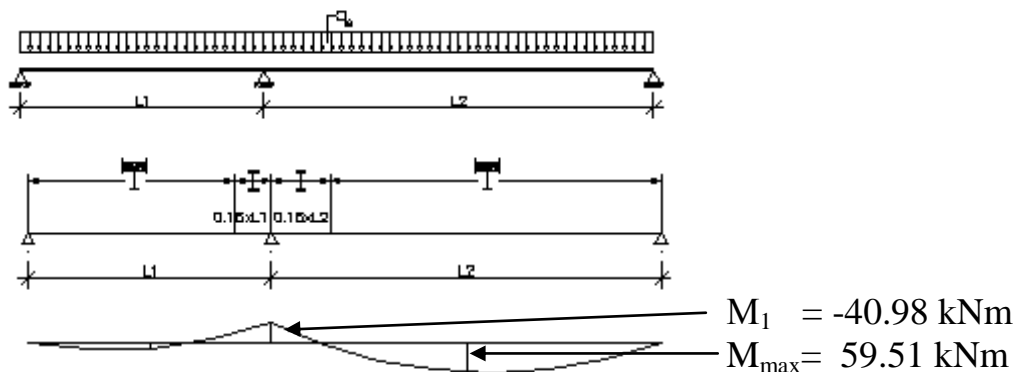
Σύμφωνα με τον EC4, σε αποστάσεις $0.15L$, εκατέρωθεν των στηριγμάτων θεωρούμε αμιγώς μεταλλική διατομή λόγω ρηγματώσεων, και στην υπόλοιπη την ακαμψία της σύμμικτης διατομής.

Σύμμικτες δοκοί

(πλαστική και ελαστική ανάλυση, ανακατανομή ροπών):

Κάνοντας «ρηγματωμένη ανάλυση», με EI που αντιστοιχούν:

1. στην μεταλλική σταθερό στην περιοχή της στήριξης
2. στην σύμμικτη δοκό στο υπόλοιπο μήκος (όπως στο σχήμα) έχουμε:



Αντίστοιχα για μία δοκό με την διατομή που εξετάσαμε πριν η αντίστοιχες αντοχές είναι:

$$M_{\text{plrda}} = 262 \text{ kNm} \quad (=6.37 \cdot 61,25)$$

$$M_{\text{plrde}} = 1018 \text{ kNm} \quad (=17.10 \cdot 49,37)$$

Η εξάντληση της αντοχής της δοκού θα γίνει για φορτίο $q_{\text{sd}}=63.7 \text{ kN/m}$, οπότε η ροπή της στήριξης φτάνει στην ροπή αντοχής της μεταλλικής διατομής.

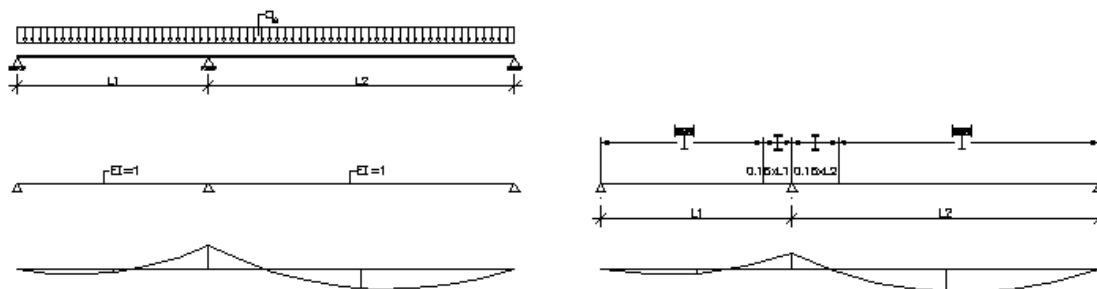
και στο άνοιγμα έχουμε πάλι:

$$M_{\max}=379 \text{ kNm} \ll M_{\text{eplrd}}= 1018 \text{ kNm}$$

Η αντοχή της δοκού εξαντλείται στην στήριξη και η δοκός στο άνοιγμα υπολειτουργεί σχεδόν στο 37% της σύμμικτης αντοχής

Σύμμικτες δοκοί

(πλαστική και ελαστική ανάλυση, ανακατανομή ροπών):

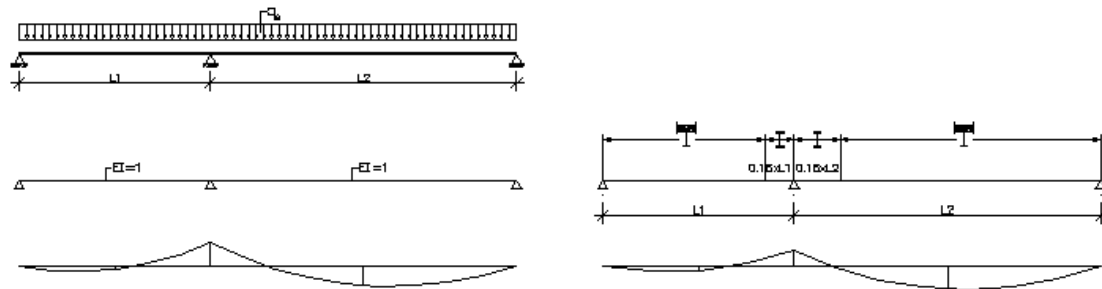


Για να καλύψει το πρόβλημα αυτό ο EC4 επιτρέπει την ανακατανομή των ροπών, ανάλογα με την κατηγορία της δοκού σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα:

Κατηγορία	Αρηγμάτωτη ανάλυση	Ρηγματωμένη ανάλυση
1	40%	25%
2	30%	15%
3	20%	10%
4	10%	0 %

Σύμμικτες δοκοί

(πλαστική και ελαστική ανάλυση, ανακατανομή ροπών):



Αντίστοιχα το μέγιστο φορτίο της δοκού για τις αντίστοιχες περιπτώσεις θα ήταν:

Κατηγορία	Αρηγμάτωτη ανάλυση	Ρηγματωμένη ανάλυση
Χωρίς ανακατανομή	(0%) 42.7 kN/m	(0%) 62.7 kN/m
1	(40%) 71.2 kN/m	(25%) 85.2 kN/m
2	(30%) 61.1 kN/m	(15%) 75.2 kN/m
3	(20%) 53.4 kN/m	(10%) 71.0 kN/m
4	(10%) 47.5 kN/m	(0 %) 62.7 kN/m

Η οικονομικότερη ανάλυση είναι: για ρηγματωμένη ανάλυση, με ανακατανομή 25%, και φορτίο σχεδιασμού 85.2 kN/m, πάλι αφήνει την σύμμικτη δοκό να αναπτύσσει ροπή στο άνοιγμα $M_{\max}=748$ kNm, έναντι της αντίστοιχης ροπής αντοχής $M_{plrd}=1018$ kNm, ακόμη και με την ευμενέστερη ανακατανομή,

η σύμμικτη δοκός υπολειτουργεί στο 73%.

**Σύμμικτες δοκοί
(πλαστική και ελαστική ανάλυση, ανακατανομή ροπών):**

Εφ' όσον η δοκός μας είναι (στο σημείο ανακατανομής) κατηγορία 1,

τότε είναι δυνατόν να κάνουμε **πλήρη πλαστική ανάλυση**,

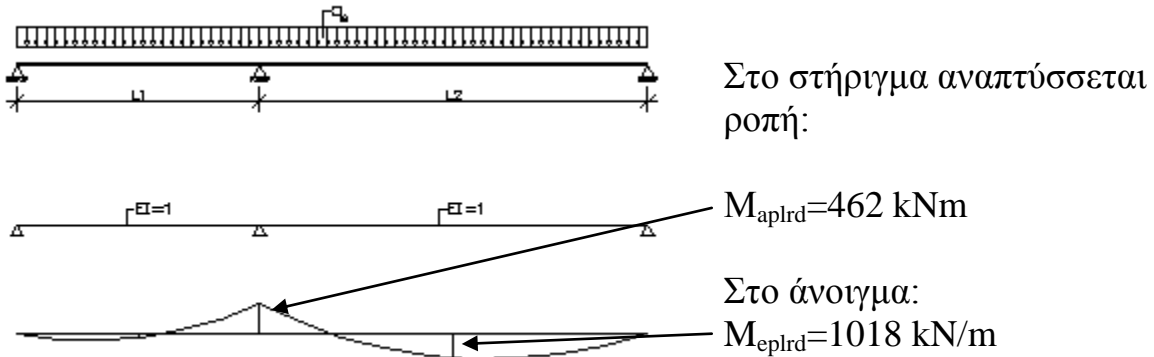
και όχι ελαστική ανάλυση με ανακατανομή και πλαστική διαστασιολόγηση όπως μέχρι τώρα.

Στην πλαστική ανάλυση, το στήριγμα αναπτύσσει την πλαστική ροπή και δημιουργεί πλαστική άρθρωση

και αφήνει την δοκό να λειτουργεί για τα επιπλέον φορτία σαν δύο αμφιέριστες,

μέχρι να δημιουργηθεί πρόσθετη πλαστική άρθρωση στο άνοιγμα

και ο φορέας να γίνει μηχανισμός, εξαντλώντας το σύνολο της αντοχής του, και στο άνοιγμα και το στήριγμα.

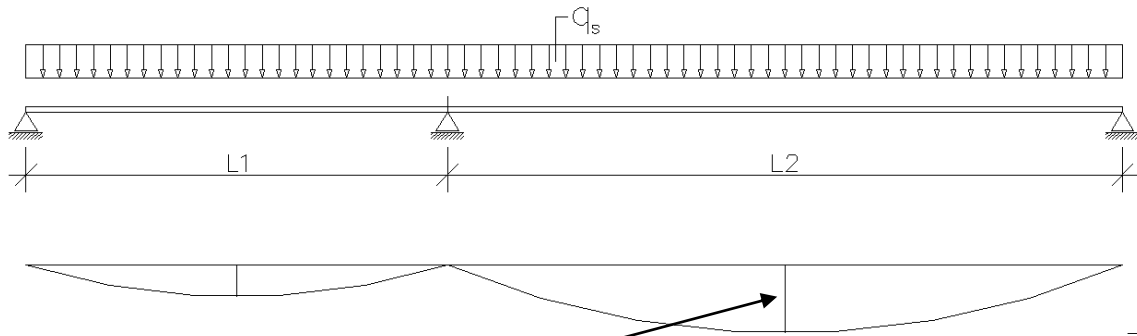


Και το αντίστοιχο φορτίο σχεδιασμού

$$P_{sd} = 143 \text{ kN/m (68% περισσότερο)}$$

**Σύμμικτες δοκοί
(πλαστική και ελαστική ανάλυση, ανακατανομή ροπών):**

Πιο ριζοσπαστικά,
αν σχεδιάσουμε από την αρχή τις δύο δοκούς χωρίς συνέχεια,
σαν δύο αμφιέρειστες,
τότε η ροπή στο άνοιγμα μπορεί ανεξάρτητα της κατηγορίας στο στήριγμα να
φτάσει την πλαστική ροπή αντοχής,



Στο άνοιγμα:

$$M_{\text{eplrd}} = 1018 \text{ kN/m}$$

Και το αντίστοιχο φορτίο σχεδιασμού

$$P_{\text{sd}} = 127 \text{ kN/m} \text{ (49\% περισσότερο) (πολύ κοντά στην πλήρη πλαστική ανάλυση)}$$

**Είναι λοιπόν συνήθης πρακτική στις σύμμικτες δοκούς
(όπως και στις σύμμικτες πλάκες)
να σχεδιάζουμε αμφιέρειστα δομικά στοιχεία.**

Σύμμικτες δοκοί (τυπικές μορφές):

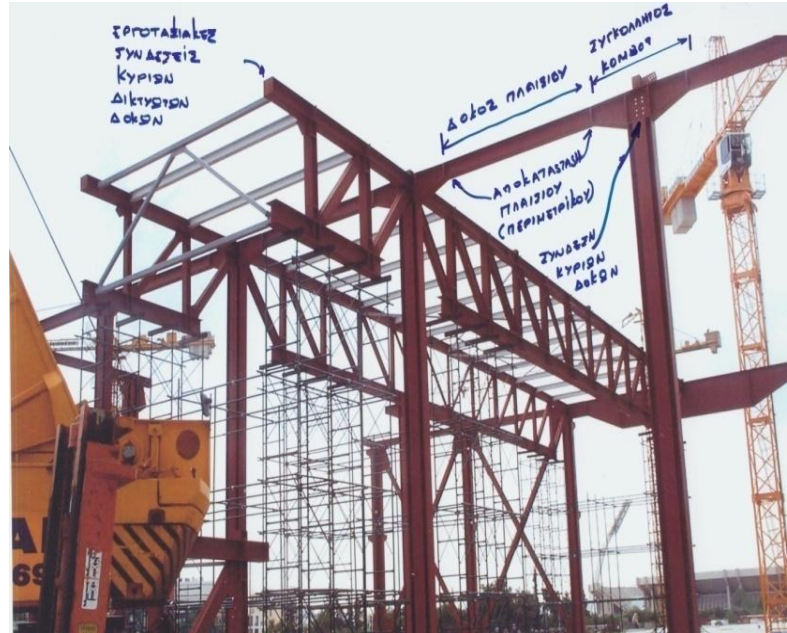
Εφαρμογή συμμίκτων ολόσωμων και δικτυωτών δοκών και τεγίδων, στην φάση της ανέγερσης

Διάταξη συμμίκτου φορέα, με:

Αμφιέριστες τεγίδες (χωρίς ιδιαίτερη μόρφωση άρθρωσης)

Αμφιέριστες κύριες δοκοί (με ειδική διαμόρφωση άρθρωσης)

Πλαισιακές κύριες δοκούς με μικρή σύμμικτη λειτουργία για κατακόρυφα φορτία και σημαντική μεταλλική κομβική σύνδεση για σεισμικά φορτία.



Εφαρμογή συμμίκτων ολόσωμων και δικτυωτών δοκών και τεγίδων, και σύμμικτης πλάκας, στην φάση της ανέγερσης και σκυροδέτησης.



Σύμμικτη πλάκα επί συνεργαζόμενου τραπεζοειδούς χαλυβδοελάσματος.

Σύμμικτες τεγίδες υποστηρίζονται στην φάση της σκυροδέτησης έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού από την διαφραγματική αλλά και την καμπτική λειτουργία του χαλυβδοελάσματος.

Αμφιαρθρωτές σύμμικτες δικτυωτές κύριες δοκοί υποστηρίζονται στην φάση της

σκυροδέτησης έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού από προσωρινούς οριζόντιους χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας.

Σύμμικτες δοκοί (κατηγορίες διατομών):

Μια σύντομη αναφορά στις κατηγορίες διατομών, όπως ισχύει τόσο στον EC3, όσο και στον EC4:

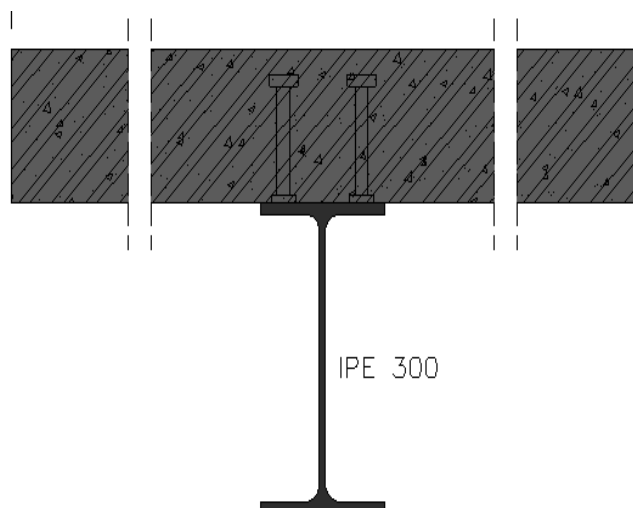
<ul style="list-style-type: none"> στην κατηγορία 1, 	η διατομή είναι τόσο συμπαγής (compact) που μπορεί να στραφεί μέχρι την πλήρη πλαστική ροπή, και μετά να συνεχίσει να στρέφεται σαν πλαστική άρθρωση, μέχρι την τελική πλαστική κατάρρευση του φορέα, χωρίς φαινόμενα τοπικού λυγισμού.
<ul style="list-style-type: none"> στην κατηγορία 2 	η διατομή μπορεί να στραφεί μόνον μέχρι την ανάπτυξη της πλήρους πλαστικής ροπής, αλλά δεν δημιουργεί πλαστική άρθρωση.
<ul style="list-style-type: none"> στην κατηγορία 3 	η διατομή μπορεί να στραφεί μέχρι το σημείο που η δυσμενέστερη ακραία ίνα φτάσει το όριο διαρροής, δηλαδή αναπτυχθεί η ελαστική ροπή αντοχής.
<ul style="list-style-type: none"> στην κατηγορία 4 	ήδη στην ελαστική ροπή, τμήματα των θλιβομένων στοιχείων (άκρα πελμάτων, τμήμα του κορμού), έχουν εκτραπεί σε τοπικό λυγισμό, και είναι ανενεργά.

Στις σύμμικτες δοκούς τα πράγματα είναι πιο απλά:

Για θετικές ροπές, που η δοκός λειτουργεί σαν σύμμικτη

Η ύπαρξη της πλάκας σκυροδέματος, εξασφαλίζει (και λόγω της ύπαρξης των διατμητικών συνδέσμων) το άνω πέλμα από εκτροπή και τοπικό λυγισμό.

Η διατομή είναι πάντοτε σχεδόν κατηγορίας 1, γιατί η μόνη αντίθετη περίπτωση είναι να εκτραπεί τμήμα του θλιβόμενου κορμού, (σπάνιο σε οικοδομικά έργα, συχνότερο στην γεφυροποιία)



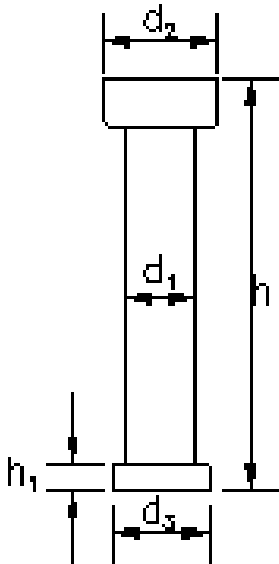
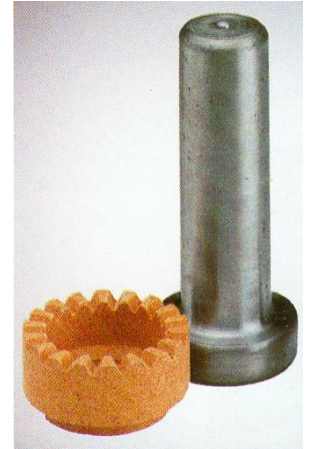
Για τις αρνητικές ροπές όπου η διατομή σκυροδέματος δεν λαμβάνεται υπ' όψη, ισχύουν οι διατάξεις του EC3

Σύμμικτες δοκοί (διαμήκης διατμητική σύνδεση) διατμητικοί ήλοι κεφαλής:

Για να ισχύουν όλα αυτά που αναφέρθηκαν, πρέπει να εξασφαλίζεται:

- η συνεργασία των δύο υλικών
- η αποφυγή της σχετικής ολίσθησης στην διεπιφάνεια
- η διατήρηση της επιπεδότητας των διατομών

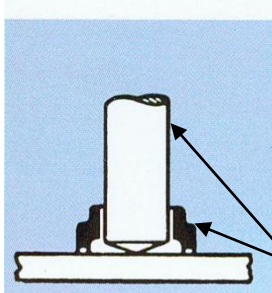
Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση διατμητικών συνδέσμων, και ο συνηθέστερος τύπος σήμερα είναι οι ήλοι κεφαλής.



Οι διατμητικοί ήλοι κεφαλής, χαρακτηρίζονται από:

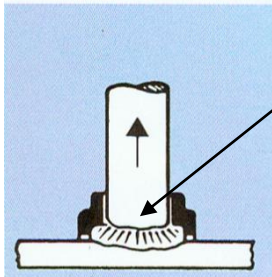
- την διάμετρο τους d_1 , (συνήθεις διάμετροι $\Phi 13, \Phi 16, \Phi 19, \Phi 22$)
- το ύψος τους h
- η κεφαλή τους είναι ανάλογα μεγαλύτερη (d_2)
- και στον πόδα τους φέρουν μία ακίδα που βοηθά στην διαδικασία συγκόλλησης
- συνοδεύονται από ένα κεραμικό δακτυλίδι, που προφυλάσσει από την οξείδωση στην υψηλής θερμοκρασία της τήξης και της συγκόλλησης και βοηθάει στην διαμόρφωση της τελικής επιφανείας συγκόλλησης.

**Σύμμικτες δοκοί (διαμήκης διατμητική σύνδεση)
διατμητικοί ήλοι κεφαλής:**

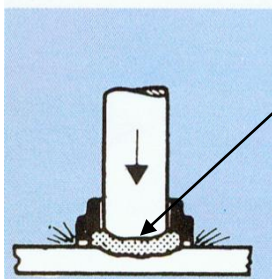


Στην διαδικασία συγκόλλησης, που γίνεται με ειδικό συνήθως εργαλείο (πιστόλι).

Στην άκρη του οποίου τοποθετείται ο ήλος με το κεραμικό δακτυλίδι.

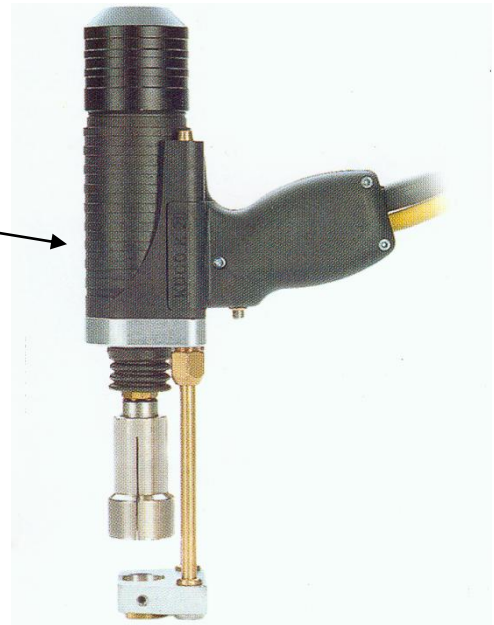
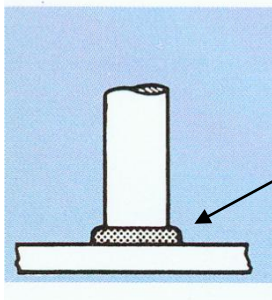


Με την έναρξη της συγκόλλησης ο ήλος απομακρύνεται όσο χρειάζεται για την δημιουργία βολταϊκού τόξου.

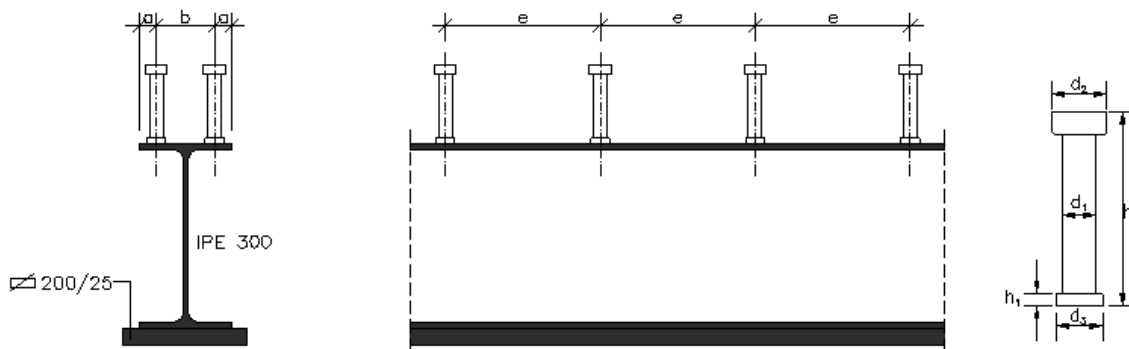


Στην συνέχεια ο ήλος και το δακτυλίδι πιέζονται στο λιωμένο μέταλλο

για την τελική μορφοποίηση της συγκόλλησης.



**Σύμμικτες δοκοί (διαμήκης διατμητική σύνδεση)
διατμητικοί ήλοι κεφαλής:**



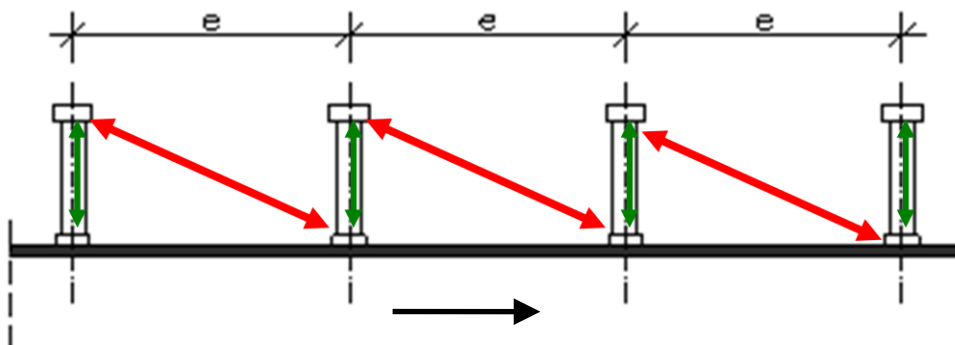
Οι διατμητικοί σύνδεσμοι διατάσσονται σε μία ή περισσότερες σειρές, κατά μήκος της δοκού.

Γενικά οι διατμητικοί σύνδεσμοι ισοκατανέμονται κατά μήκος της δοκού, σε αποστάσεις μεταξύ τους, που πρέπει να είναι:

$$e > 5 \cdot d_1 \qquad e < 6 \cdot d_c \qquad b > 2.5 \cdot d_1 \qquad a < 9 \cdot t_f \cdot \epsilon \quad (\epsilon = (235/f_y)^{1/2})$$

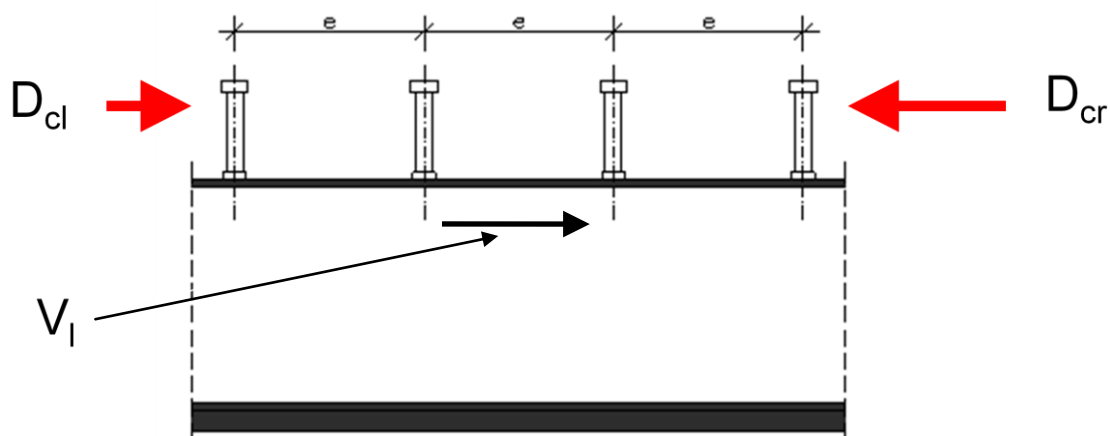
$$e < 80 \text{ cm}$$

Το ύψος των συνδέσμων επιλέγεται λίγο μικρότερο από το πάχος της πλάκας σκυροδέματος, ώστε να φτάνει μέσα στην ενεργό θλιβόμενη ζώνη, αλλά να αφήνει την κατάλληλη επικάλυψη (αντίστοιχη με αυτή των ράβδων οπλισμού)



Η λειτουργία των διατμητικών συνδέσμων προσομοιάζει με αυτή των συνδετήρων, που μεταφέρουν την διαμήκη διάτμηση με μία πριονωτή τροχιά, εφελκυστικών δυνάμεων στους ήλους και θλιβόμενων διαγωνίων στο σκυρόδεμα.

**Σύμμικτες δοκοί (διαμήκης διατμητική σύνδεση)
διατμητικοί ήλοι κεφαλής:**



Οι διαμήκης διατμητική δύναμη που αναπτύσσεται σε κάθε τμήμα της δοκού, είναι αυτή που απαιτείται για να εξισορροπηθεί η μεταβολή της ενεργού θλιπτικής δύναμης του σκυροδέματος σ αυτό το τμήμα.

$$V_l = P_{Dcr} - P_{Dcl}$$

Η δύναμη αυτή πρέπει να παραληφθεί από το άθροισμα των διατμητικών συνδέσεων.

Ο αριθμός των απαιτούμενων διατμητικών συνδέσεων είναι:

$$n = V_l / P_{rd}^{(min)}$$

Μπορούμε να έχουμε **πλήρη διατμητική κάλυψη**,

αν η διαμήκης διατμητική δύναμη επαρκεί για να αναπτυχθεί η θλιπτική δύναμη στο σκυρόδεμα που απαιτείται για την ανάπτυξη της πλήρους πλαστικής ροπής.

Αντίθετα μπορούμε να έχουμε **μερική διατμητική κάλυψη**,

αν η διαμήκης διατμητική δύναμη επαρκεί για να αναπτυχθεί η θλιπτική δύναμη στο σκυρόδεμα που απαιτείται για την ανάπτυξη της ροπής σχεδιασμού.

$$n_{μδκ} = n_{πδκ} * (M_{sd} / M_{plrd})$$

**Σύμμικτες δοκοί (διαμήκης διατμητική σύνδεση)
διατμητικοί ήλοι κεφαλής:**

Έστω σύμμικτη δοκός του σχήματος με $P_{Dc}=3350$ kN

Διατμητικοί ήλοι κεφαλής: $\Phi 22$, S235, $l=12.5$ cm

$$P_{rd}=0.8 \cdot (\pi \cdot d_s^2 / 4) \cdot f_{ua} / \gamma_{\mu 2} \text{ (αντοχή ήλου σε διάτμηση (;))}$$

$$P_{rd}=0.8 \cdot (3.14 \cdot 2.2^2 / 4) \cdot (36 / 1.25) = 87.53 \text{ kN}$$

$$P_{rd}=0.29 \cdot \alpha \cdot (d_s^2) \cdot (E_c \cdot f_{ck})^{1/2} / \gamma_{\mu 2} \text{ (αντοχή ήλου σε}$$

σύνθλιψη άντυγος-beton)

$$\alpha=1 \text{ (για } h/d_s > 4)$$

$$P_{rd}=0.29 \cdot 1.0 \cdot (2.2^2) \cdot (2900 \cdot 2.0)^{1/2} / 1.25 = 85.51 \text{ kN}$$

$$\min P_{rd} = 85.51 \text{ kN}$$

$$n = P_{Dc} / \min P_{rd}$$

$$n = 3350 / 85.51 = 39.1 = 40 \text{ ήλοι}$$

για αμφιέρειστοι δοκό μήκους 10 m, 40 ήλοι, σε κάθε μισή δοκό

σε απόσταση $(1000/2)/40 = 0,125$ m

$$\Delta l = 12.5 \text{ cm} > 5 \cdot d_s = 5 \cdot 2.2 = 11 \text{ cm} \text{ απόσταση από το άκρο}$$

$$< 6 \cdot d_c = 6 \cdot 15 = 90 \text{ cm} > 9 \cdot t_f \cdot \epsilon = 9 \cdot 1,07 \cdot 81 = 7,8 \text{ cm}$$

$$< 80 \text{ cm}$$

εναλλακτικά θα μπορούσε να είχαν τοποθετηθεί:

$$2 \text{ ήλοι ανά } 25 \text{ cm} > 5 \cdot d_s = 5 \cdot 2.2 = 11 \text{ cm} \text{ εγκάρσια απόσταση}$$

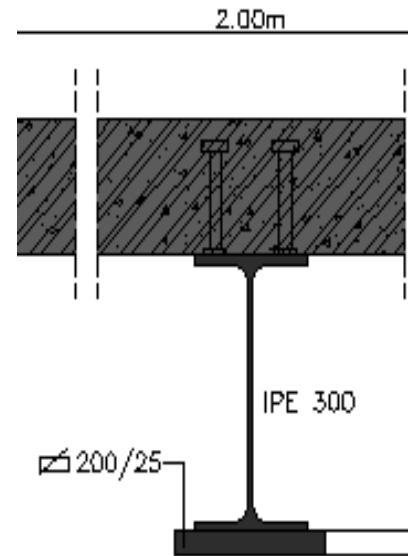
$$< 6 \cdot d_c = 6 \cdot 15 = 90 \text{ cm} > 2.5 \cdot d_s = 2.5 \cdot 2.2 = 5.5 \text{ cm}$$

$$< 80 \text{ cm}$$

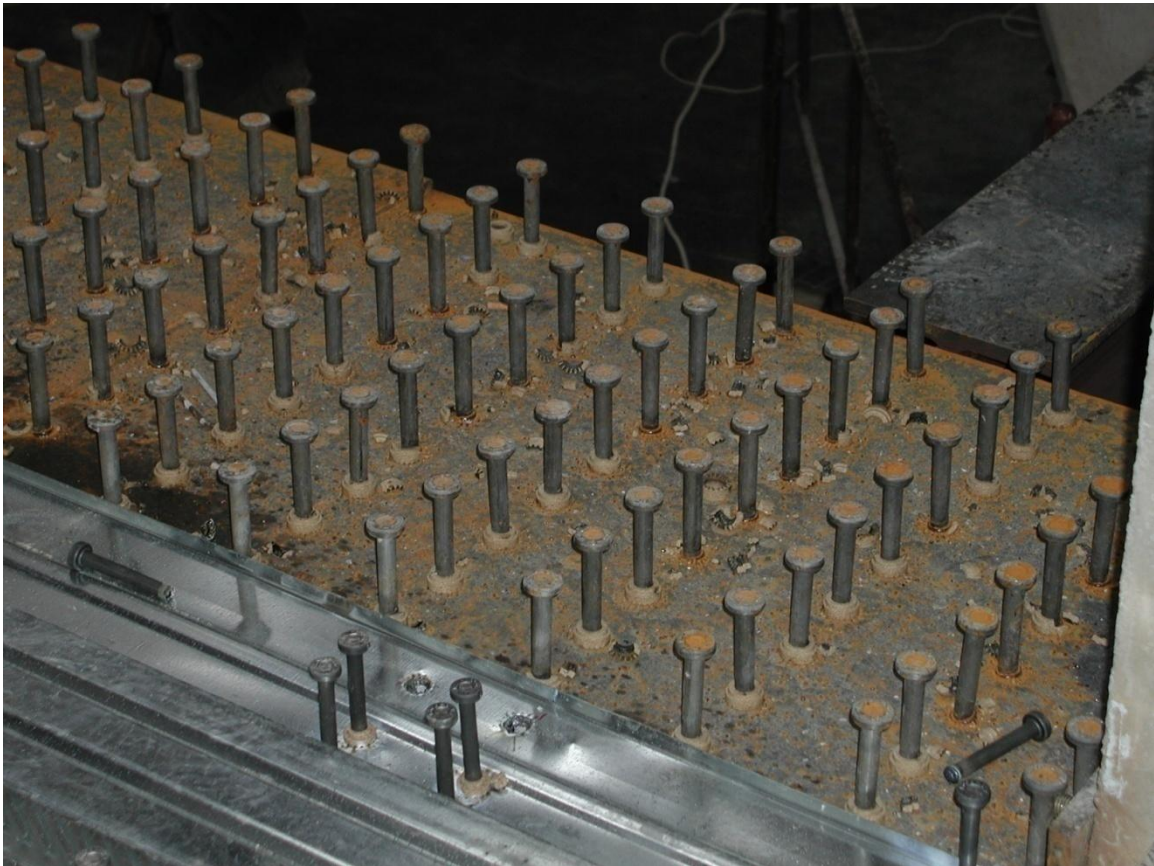
$$3 \text{ ήλοι ανά } 37.5 \text{ cm} > 5 \cdot d_s = 5 \cdot 2.2 = 11 \text{ cm} \text{ εγκάρσια απόσταση}$$

$$< 6 \cdot d_c = 6 \cdot 15 = 90 \text{ cm} > 2.5 \cdot d_s = 2.5 \cdot 2.2 = 5.5 \text{ cm}$$

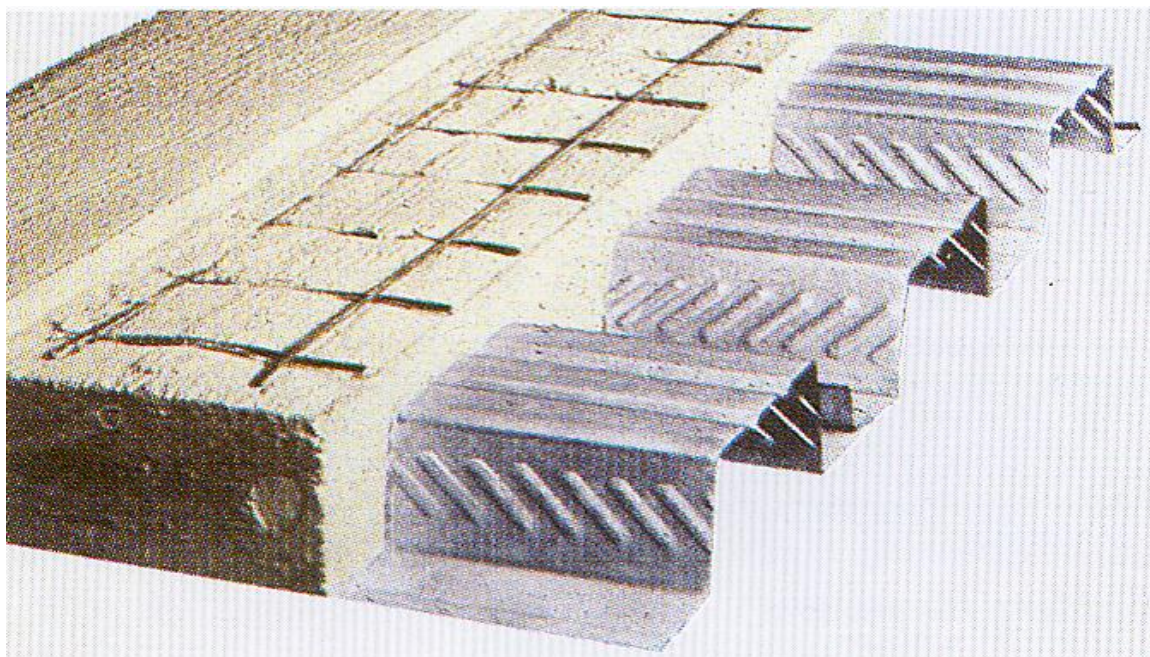
$$< 80 \text{ cm}$$



Σύμμικτες δοκοί (διαμήκης διατμητική σύνδεση)
διατμητικοί ήλοι κεφαλής:

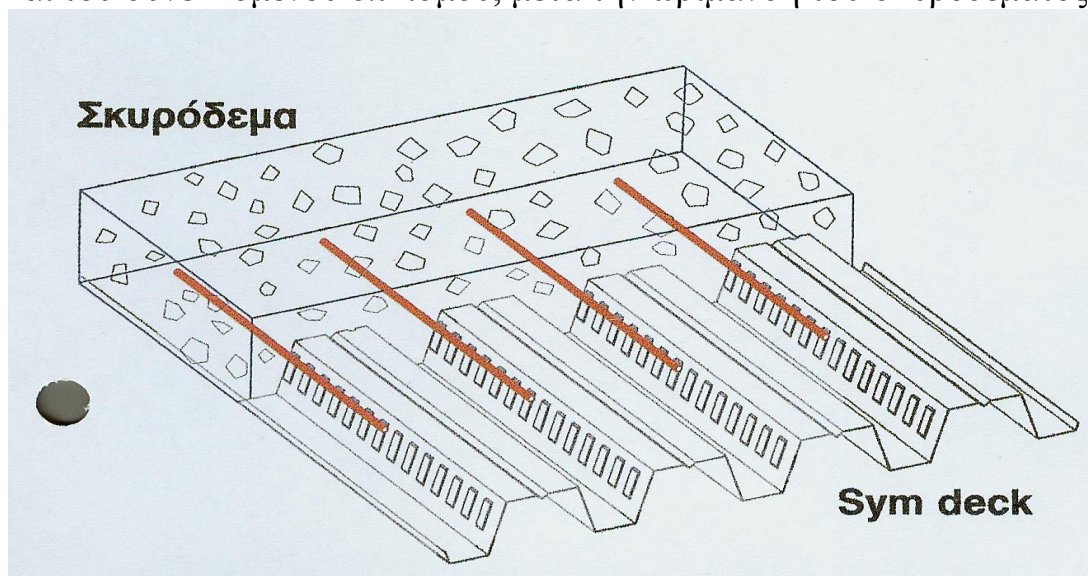


Σύμμικτες πλάκες (τυπικές μορφές)



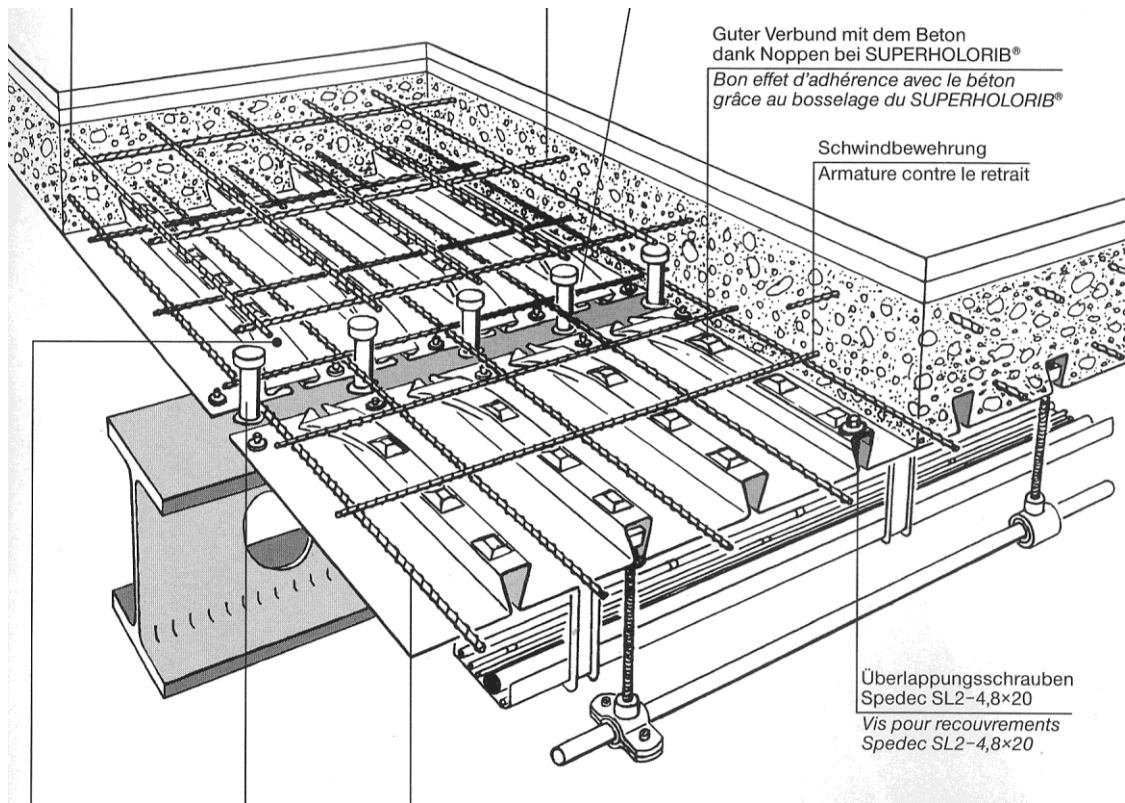
Ο συνήθης τύπος των συμμίκτων πλακών αποτελείται από ένα τραπεζοειδές χαλυβδοέλασμα, με κάποιο σύστημα εγκαρσίων νευρώσεων που παρέχουν διαμήκη διατμητική σύνδεση στην διεπιφάνεια σκυροδέματος χαλυβδοελάσματος.

Το χαλυβδοέλασμα έχει την διπλή λειτουργία του παραμένουτος ξυλοτύπου, στην φάση της σκυροδέτησης και του συνελκόμενου οπλισμού, μετά την ωρίμανση του σκυροδέματος.



Υπάρχουν διάφοροι τύποι ειδικών χαλυβδοελασμάτων, μερικά από τα οποία πλέον παράγονται και στην Ελλάδα, με πάχη ελάσματος από 0,6 - 1,5 mm.

Σύμμικτες πλάκες (τυπικές μορφές)



Τα χαλβδοελάσματα σαν καμπτόμενα στοιχεία, είναι συνήθως κατηγορία 4, και γιατί ο έλεγχος τους σε αντοχή και λειτουργικότητα γίνεται συνήθως με την βοήθεια πινάκων που παρέχουν οι κατασκευαστές.

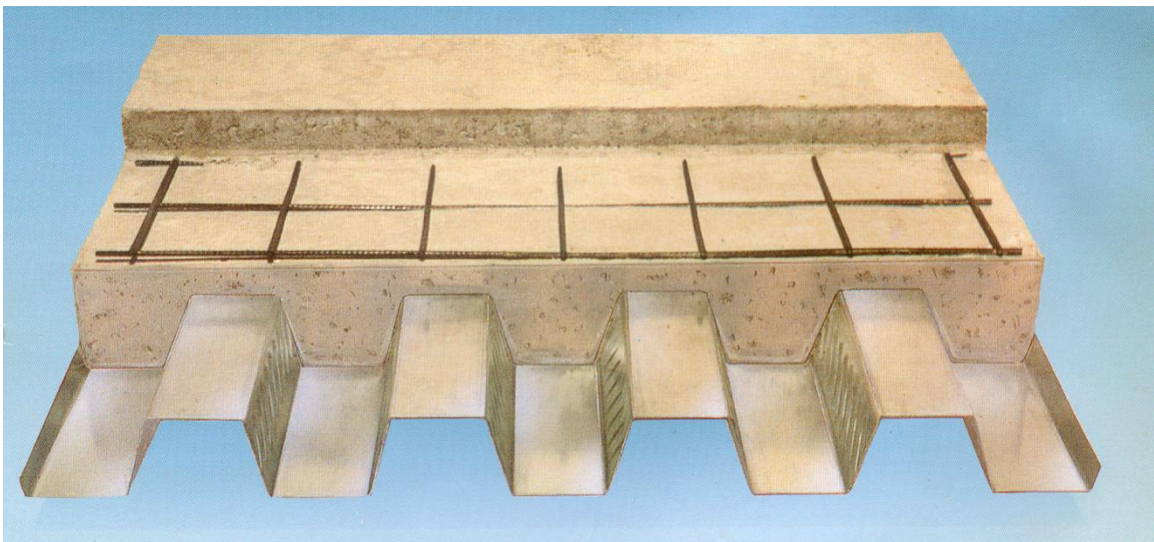
Σύμμικτες πλάκες (τυπικές μορφές)

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην φάση της σκυροδέτησης, που συνήθως είναι και η δυσμενέστερη φάση για το χαλυβδοέλασμα να περιοριστούν τα βέλη, ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο της συσσώρευσης του σκυροδέματος (ponding).

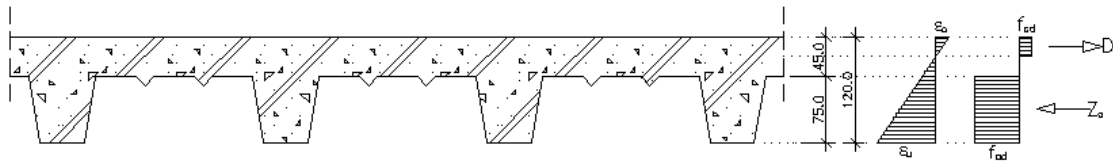
Το μέγιστο βέλος πρέπει να είναι $f_{\max} < 1/250$ η $f_{\max} < 20 \text{ mm}$

Στον έλεγχο αυτό, όπως και στον έλεγχο αντοχής, λαμβάνονται υπ' όψη οι δυσμενέστεροι συνδυασμοί φορτίσεων, και πρόσθετα φορτία σκυροδέτησης,

0.75 kN/m^2 , σε όση επιφάνεια είναι δυσμενές,
και επιπρόσθετα φορτίο 0.75 kN/m^2 ,
σε μία επιφάνεια $3.0 \times 3.0 \text{ m}$, στην δυσμενέστερη θέση.



Σύμμικτες πλάκες (κάμψη – πλαστική ανάλυση)



Ο υπολογισμός των πλακών σε κάμψη, είναι αντίστοιχος με αυτόν των δοκών:

Η θλιπτική δύναμη της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος, εξισορροπεί την εφελκυστική δύναμη του εφελκυόμενου χαλυβδοελάσματος.

$$P_{Dc} = A_c * f_{cd} \quad A_c = b_c * z_c \quad P_{Dc} = P_{Za} \rightarrow z_e = A_{ap} * f_{adp} / b_c * f_{cd}$$

$$P_{Za} = A_{ap} * f_{adp}$$

$$M_{plrd} = A_{ap} * f_{adp} * (d - z_e / 2 - z_{ap})$$

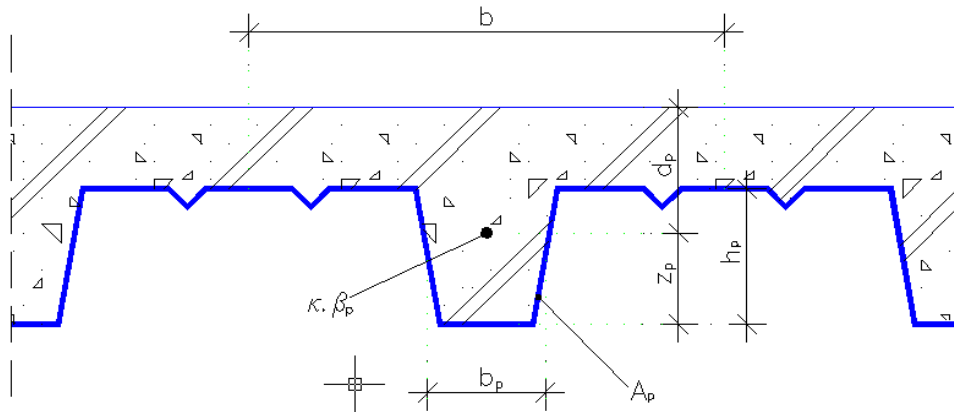
Στις περισσότερες περιπτώσεις, κρίσιμη για την επιλογή του χαλυβδοελάσματος είναι η φάση της σκυροδέτησης,

και στην κάμψη το χαλυβδοέλασμα, σαν συνελκόμενος οπλισμός υπερεπαρκεί.

Ακόμη συνήθως υπερεπαρκεί και η θλίψη του σκυροδέματος με αποτέλεσμα μικρά πάχη θλιβόμενης ζώνης.

Σύμμικτες πλάκες (διαμήκης διάτμηση)

Σε διαμήκη διάτμηση, πρέπει οι μηχανική σύνδεση να επαρκεί για την αποφυγή της ολίσθησης στην διεπιφάνεια.



Η αντίσταση σε διαμήκη διάτμηση δίνεται από την σχέση:

$$V_{rd} = (b \cdot d_p) \cdot ((m \cdot A_p / b \cdot I_s) + k) / \gamma_v$$

όπου b : το πλάτος της πλάκας
 d_p : το στατικό ύψος της πλάκας
 A_p : το εμβαδόν του χαλυβδόφυλλου
 $\gamma_v = 1.25$
 I_s : το διατμητικό άνοιγμα της πλάκας

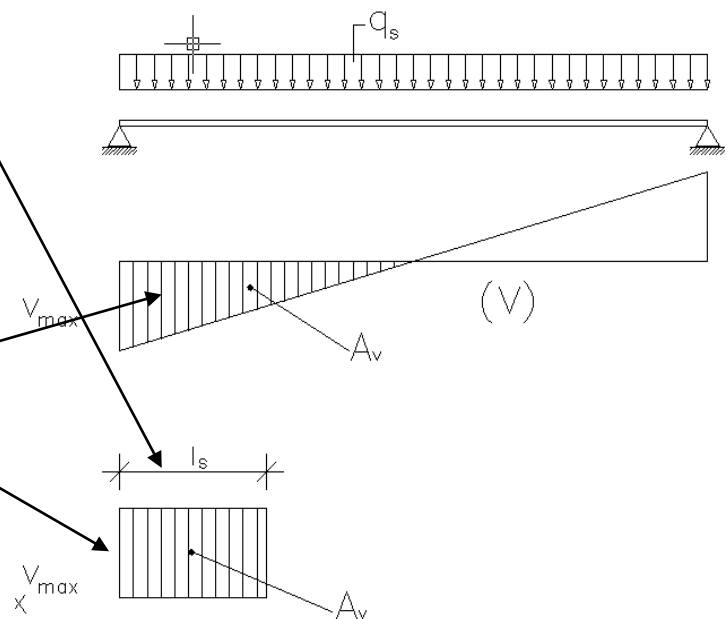
m και k δύο χαρακτηριστικές τιμές, που προσδιορίζονται πειραματικά, και χαρακτηρίζουν τον τύπο του χαλυβδοελάσματος

Το διατμητικό άνοιγμα πλάκας, I_s

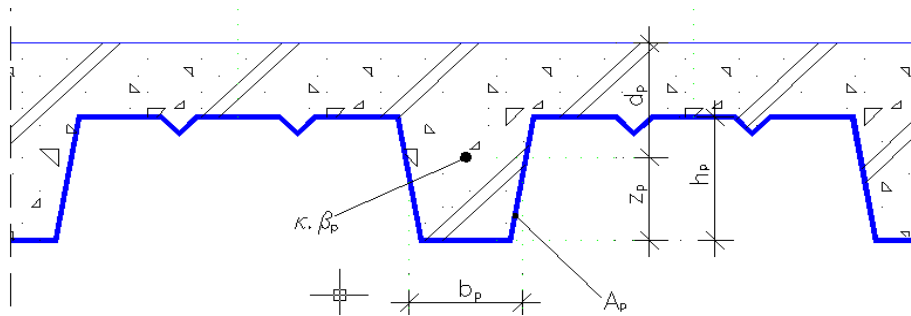
είναι το μήκος στο οποίο:

έχουμε την ίδια επιφάνεια με το πραγματικό διάγραμμα διατμητικών δυνάμεων (A_v),

με σταθερή τέμνουσα την V_{max}



Σύμμικτες πλάκες (εγκάρσια διάτμηση)



Σε εγκάρσια διάτμηση η αντοχή της πλάκας δίνεται από:

$$V_{rd} = b_p \cdot d_p \cdot \tau_{rd} \cdot k_v \cdot (1.2 + 40 \cdot \rho)$$

όπου b_p : το πλάτος της κυψέλης
 d_p : το στατικό ύψος της πλάκας
 $\tau_{rd} = 0.25 \cdot f_{ctk0.05} / \gamma_c$
 $\rho = A_p / (b_p \cdot d_p) < 2\%$
 ποσοστό διαμήκη οπλισμού
 $k_v = 1.6 - d_p$ σε μέτρα (m)



Τυπική διάταξη σύμμικτης πλάκας, με τραπεζοειδές χαλυβδοέλασμα, και διατμητικούς ήλους κεφαλής, συγκολλημένους στην κύρια δοκό, αλλά και στις δοκίδες, μαζί με το χαλυβδοέλασμα.

υ

Υποστυλώματα (τυπικές μορφές)

Σε αντίθεση με τις δοκούς και τις πλάκες, όπου τα δύο υλικά:

Χάλυβας και σκυρόδεμα,
χρησιμοποιούνται ανάλογα με την μεγάλη οικονομική τους απόδοση:

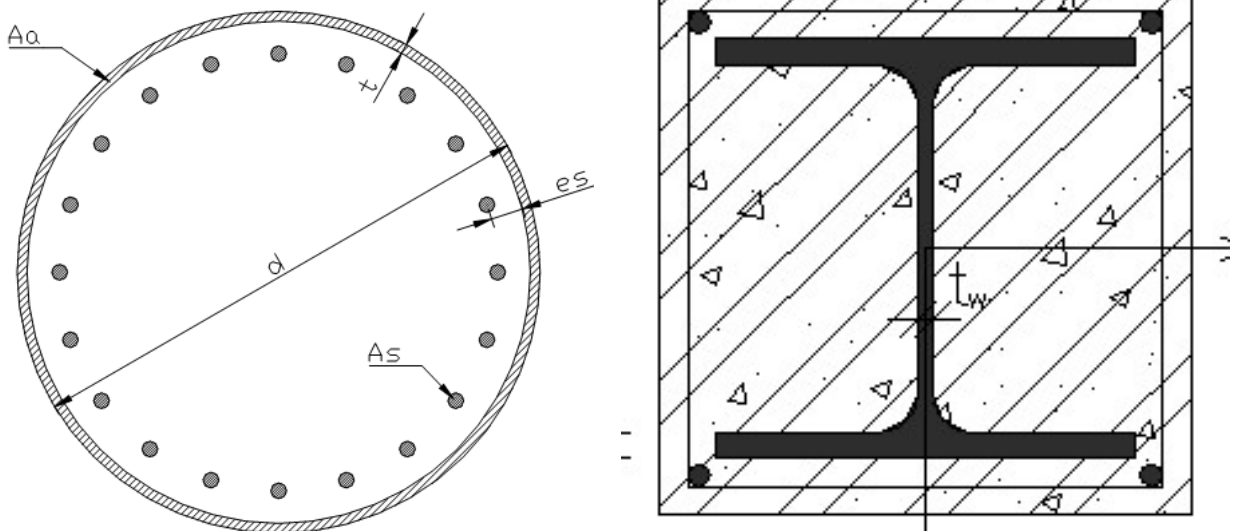
χάλυβας	→	εφελκυσμός
σκυρόδεμα	→	θλίψη

Στη περίπτωση των υποστυλωμάτων, (ακόμη και σε κάμψη)
σημαντικό τμήμα του χάλυβα συμμετέχει στην παραλαβή θλιπτικών δυνάμεων.

Ξεκινάμε λοιπόν με την βασική παρατήρηση ότι τα σύμμικτα υποστυλώματα,
σε αντίθεση με τις δοκούς και τις πλάκες,
δεν έχουν οικονομικά πλεονεκτήματα,
σε σχέση με αντίστοιχα από σκυρόδεμα και τον ελάχιστο συνελκόμενο οπλισμό.

Η χρήση τους λοιπόν, πρέπει να αιτιολογείται από άλλους λόγους, όπως ανάγκη
μεγάλων φορτίων με μικρές διαστάσεις κλπ

Οι συνηθέστερες περιπτώσεις συμμίκτων υποστυλωμάτων είναι:

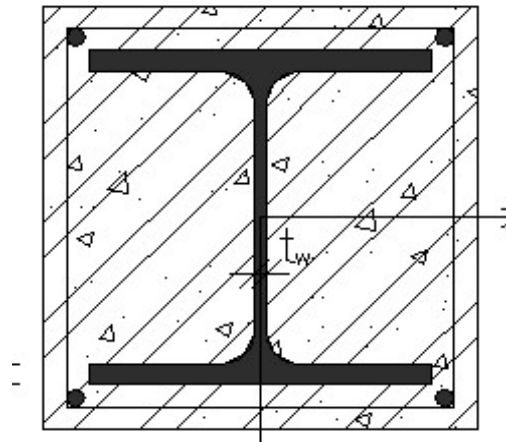


Χαλύβδινές διατομές διπλού T,
ενσωματωμένες σε σκυρόδεμα, με η χωρίς συνελκόμενο οπλισμό.

Κυκλικοί χαλύβδινοι σωλήνες,
πληρωμένοι με σκυρόδεμα, με η χωρίς συνελκόμενο οπλισμό.

Υποστυλώματα (τυπικές μορφές)

Τα πλεονεκτήματα σε κάθε περίπτωση είναι σημαντικά, σε σχέση με τα αντίστοιχα σκέτα μεταλλικά υποστυλώματα:



Στην περίπτωση των εγκιβωτισμένων σε σκυρόδεμα χαλύβδινων διατομών,

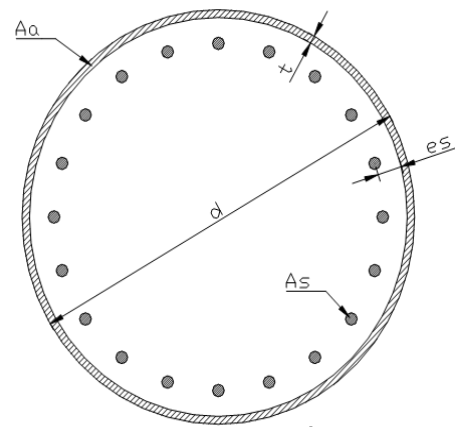
αυτές προστατεύονται από τοπικό λυγισμό, και αποκτούν ικανό δείκτη πυραντίστασης.

Στην περίπτωση των πληρωμένων με σκυρόδεμα σωλήνων,

αυτοί προστατεύονται από τοπικό λυγισμό,

περισφίγγουν τέλεια το σκυρόδεμα, αυξάνοντας την αντοχή τους,

η πλήρωση με σκυρόδεμα τους δίνει μεγάλη θερμοχωρητικότητα και εν πάσει περιπτώσει μπορεί να τοποθετηθεί πρόσθετος οπλισμός για την φωτιά,



Ο σωλήνας λειτουργεί και σαν ξυλότυπος,

είναι εύκολη η σύνδεση με δοκούς ή άλλα μεταλλικά στοιχεία (πχ δακτυλίδια για στήριξη πλακών)

Ιδανικοί για Top down κατασκευή.

Υποστυλώματα (τυπικές μορφές)

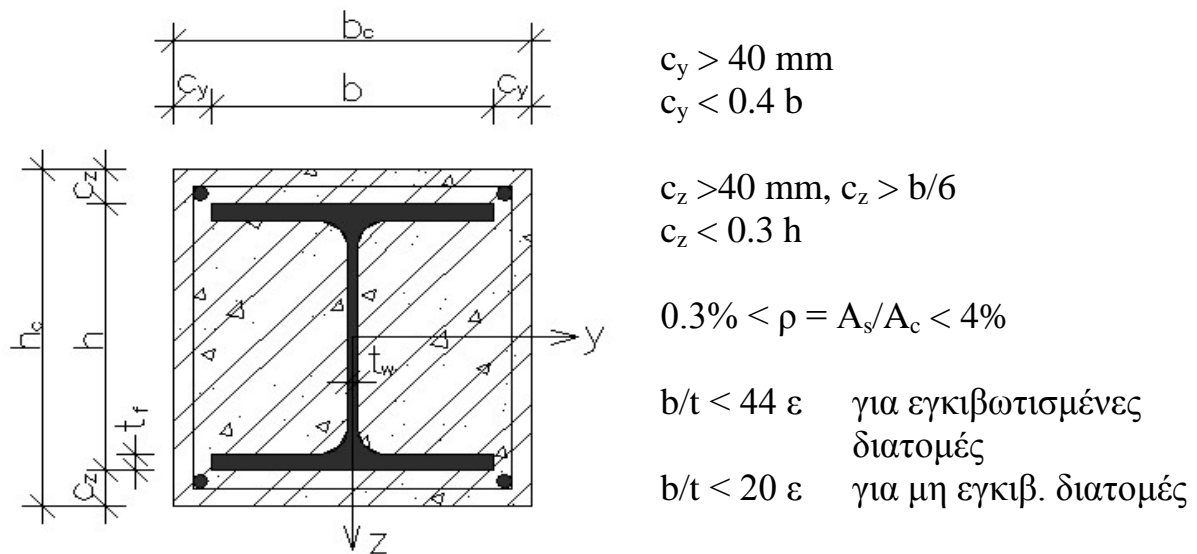
Σύμμικτα κυκλικά υποστυλώματα, σε σύστημα κατασκευής “top down”.

Κατασκευάζονται στο χώμα σαν πάσσαλοι, και φέρουν την πρώτη πλάκα που σκυροδετείται επί εδάφους, και ακολουθεί η εκσκαφή.



Στην συνέχεια είναι εύκολο να τοποθετηθούν δακτυλίδια για την, χωρίς δοκούς, σύνδεση των ενδιάμεσων πλακών, η συνδέσεις με μεταλλικές δοκούς

Υποστυλώματα (περιορισμοί διαστάσεων)



οι τάσεις σχεδιασμού που μπορούν να αναπτυχθούν στα υλικά σύμφωνα με τον ισχύοντα EC4, είναι:

για την χαλύβδινη διατομή:

$$f_{ad} = f_y / 1.1 \quad (\text{π.χ. για χάλυβα S355, } f_{ad} = 35.5 / 1.1 = 32.28 \text{ kN/cm}^2)$$

για τον συνελκόμενο χάλυβα:

$$f_{sd} = f_{sy} / 1.15 \quad (\text{π.χ. για χάλυβα S500, } f_{sd} = 50 / 1.15 = 43.47 \text{ kN/cm}^2)$$

για το σκυρόδεμα:

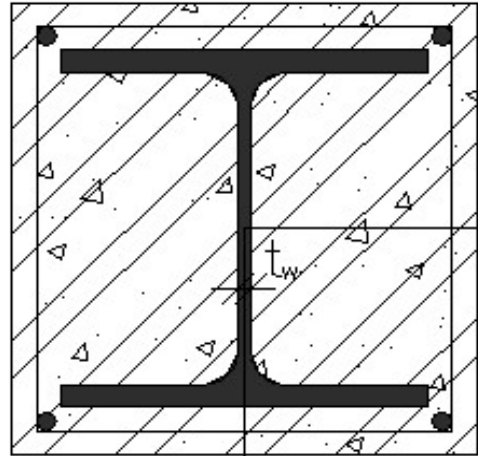
$$f_{cd} = 0.85 * f_{ck} / 1.5 \quad (\text{π.χ. για σκυρόδεμα C20/25, } f_{cd} = 0.85 * 2.0 / 1.5 = 1.13 \text{ kN/cm}^2)$$

Υποστυλώματα (θλίψη και λυγισμός)

Η αντοχή σε θλίψη ενός σύμμικτου υποστυλώματος, (σαν αυτό του σχήματος) είναι το άθροισμα των επι μέρους θλιπτικών αντοχών των υλικών που το συνθέτουν:

$$N_{plrd} = N_{aplrd} + N_{splrd} + N_{cplrd}$$

$$N_{plrd} = A_a * f_{ac} + A_s * f_{sd} + A_c * f_{cd}$$



Η αντοχή σε λυγισμό ενός συμμίκτου υποστυλώματος εξαρτάται από την ενεργό δυσκαμψία του:

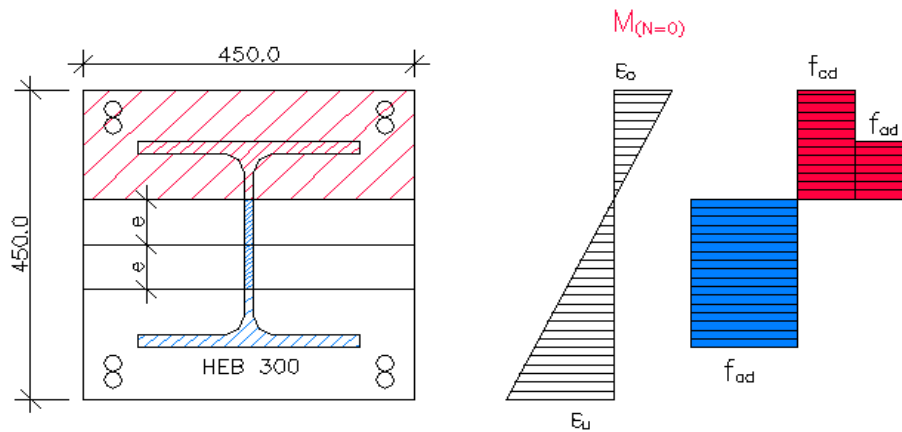
$$(EI)_e = E_a * I_a + (0.8/1.35) * E_c * I_c + E_s * I_s$$

$$N_{cr} = \pi^2 * (EI)_e / lk^2 \quad \text{και} \quad \lambda = (N_{plrd}/N_{cr})^{1/2}$$

Ο μειωτικός συντελεστής χ , για τον λυγισμό προκύπτει:

από την καμπύλη b (συντελεστής ατέλειας 0.34) για τον ισχυρό άξονα y-y
από την καμπύλη c (συντελεστής ατέλειας 0.49) για τον ασθενή άξονα z-z

Υποστυλώματα (κάμψη M_{pl} , $N=0$)

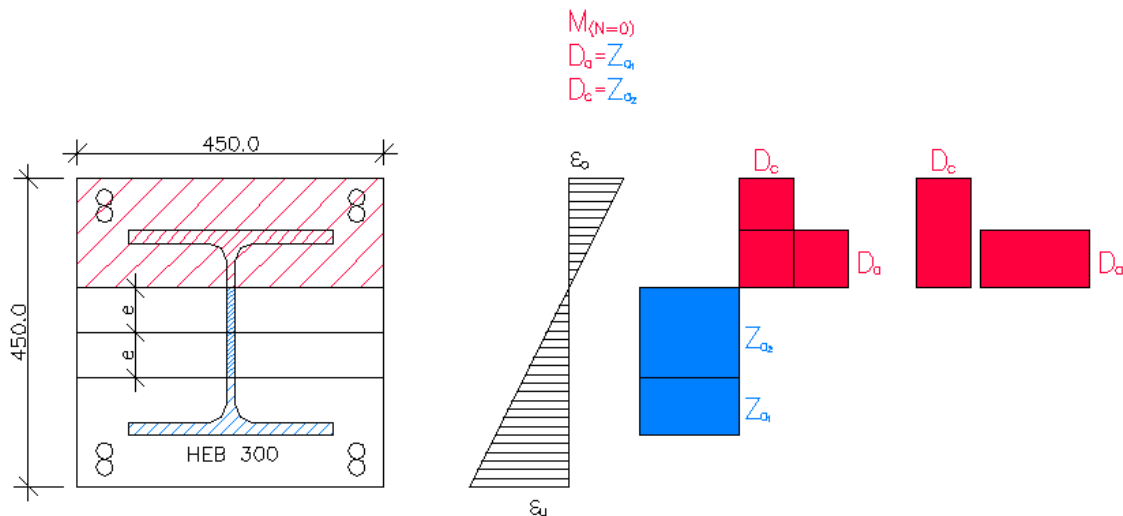


Ένα υποστύλωμα καταπονείται σε καθαρή ροπή, ($N=0$)

Στρέφεται περί τον πλαστικό ουδέτερο άξονα,
σε απόσταση e , από τον άξονα συμμετρίας.

Υπάρχει θλιβόμενο τμήμα σκυροδέματος,
θλιβόμενο τμήμα χάλυβα, και
εφελκυόμενο τμήμα χάλυβα.

Το εφελκυόμενο τμήμα σκυροδέματος θεωρείται αδρανές.



Το θλιβόμενο τμήμα του χάλυβα D_a ,

δίνει δύναμη ίση με το Z_{a1} ,

και το θλιβόμενο τμήμα του σκυροδέματος δίνει δύναμη ίση με το Z_{a2} .

$$P_{Da} + P_{Dc} = P_{Za1} + P_{Za2},$$

$$P_{Da} = P_{Za1} \rightarrow P_{Dc} = P_{Za2}$$

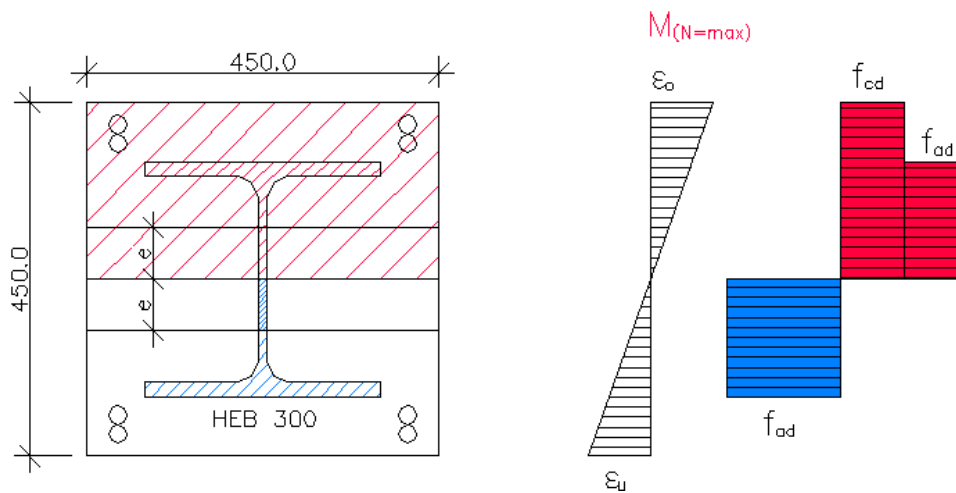
$$P_{Dc} = (A_c / 2 - e * (b - t_w)) * f_{cd}$$

$$P_{Za2} = 2e * t_w * f_{ad} \rightarrow$$

$$e = (A_c * f_{cd}) / (2 * (2 * t_w * f_{ad} + (b - t_w) * f_{cd}))$$

$$M_{plrd} = (W_{apl} - t_w * 2e^2 / 4) * f_{ad} + P_{Dc} * ((h/2 - e) / 2 + e)$$

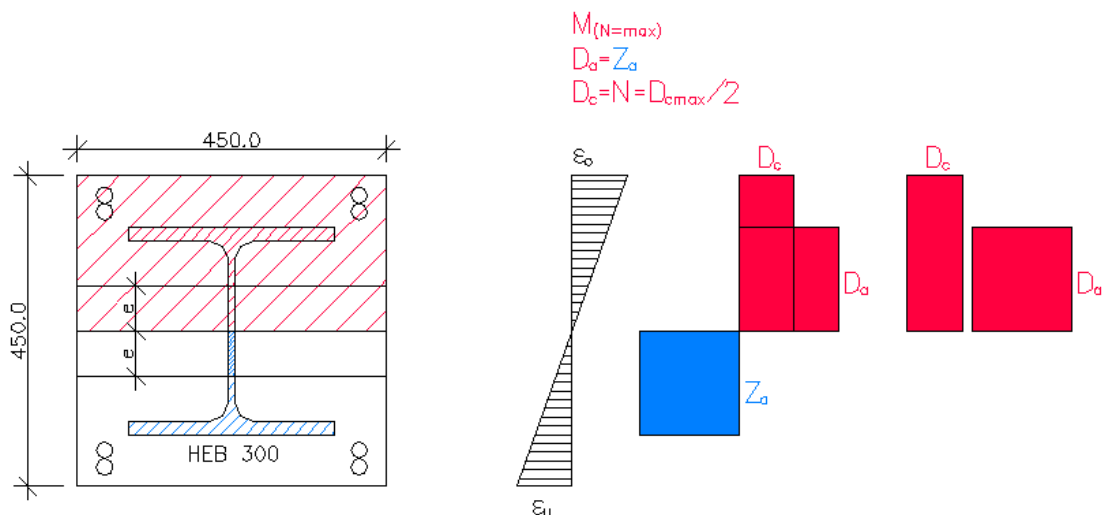
Υποστυλώματα (κάμψη $M=M_{max}$)



Ένα υποστυλώμα καταπονείται και στρέφεται με τον πλαστικό ουδέτερο άξονα, να ταυτίζεται με τον άξονα συμμετρίας.

Υπάρχει θλιβόμενο τμήμα σκυροδέματος, θλιβόμενο τμήμα χάλυβα, και εφελκόμενο τμήμα χάλυβα.

Το εφελκόμενο τμήμα σκυροδέματος θεωρείται αδρανές.



Το θλιβόμενο τμήμα του χάλυβα P_{Da} ,
δίνει δύναμη ίση με το P_{Za} , και
το θλιβόμενο τμήμα του σκυροδέματος δίνει δύναμη ίση με το $P_{Dc}/2$.

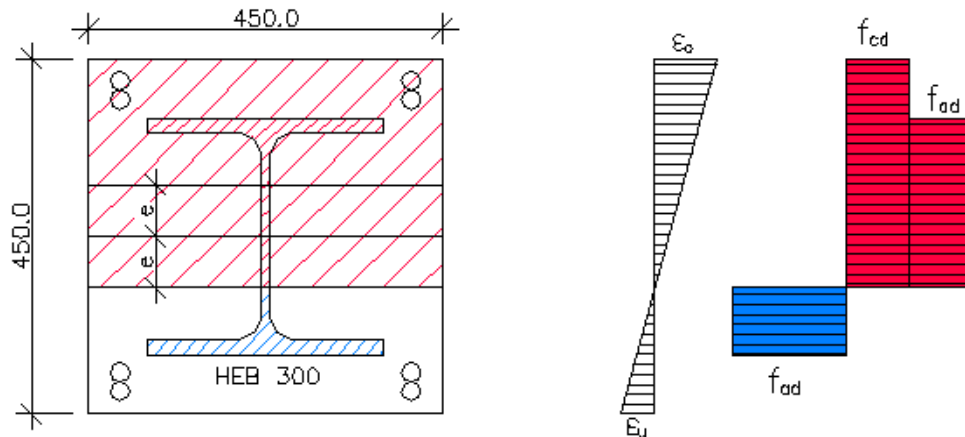
$$P_{Da} = P_{Za}$$

$$M_{max} = W_{apl} * f_{ad} + (W_c * /2) * f_{cd}$$

$$P_{Dc} = (A_c / 2) * f_{cd}$$

$$N = (A_c / 2) * f_{cd}$$

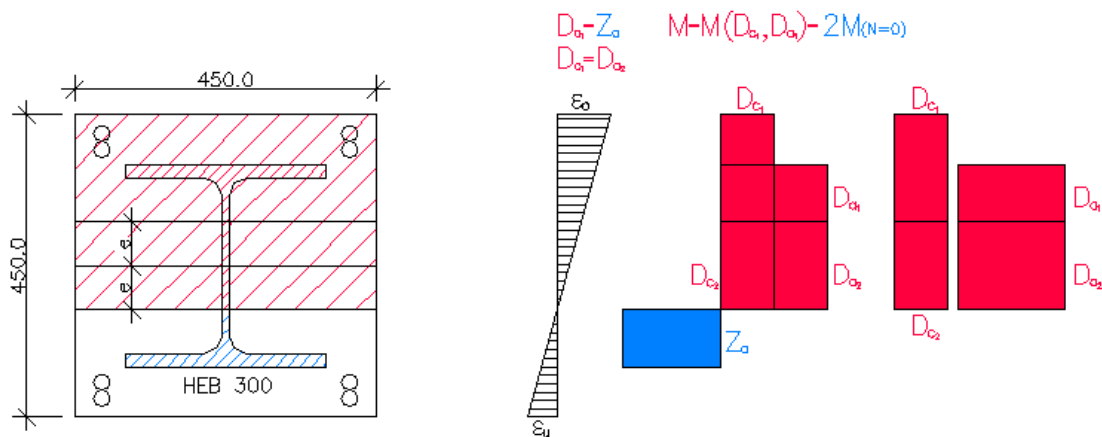
Υποστυλώματα (κάμψη)



Ένα υποστυλώμα καταπονείται και στρέφεται με τον πλαστικό ουδέτερο άξονα, συμμετρικό με τον πλαστικό άξονα της καθαρής κάμψης.

Υπάρχει θλιβόμενο τμήμα σκυροδέματος, θλιβόμενο τμήμα χάλυβα, και εφελκυσμένο τμήμα χάλυβα.

Το εφελκυσμένο τμήμα σκυροδέματος θεωρείται αδρανές.



Το θλιβόμενο τμήμα του χάλυβα P_{Da1} , δίνει δύναμη ίση με το P_{Za} , και το θλιβόμενο τμήμα του χάλυβα P_{Da2} δύναμη ίση με την θλιβόμενη δύναμη του σκυροδέματος για την καθαρή πλαστική ροπή. $P_{Dc}/2$.

$$P_{Da1} = P_{Za1}$$

$$M = M(P_{Dc1}, P_{Da}, P_{Za}) = M_{plrd}$$

$$P_{Dc1} = P_{Da2} \quad (P_{Dc1} = P_{Dc} \text{ πλαστικής ροπής})$$

$$N = 2 * N(M_{max})$$

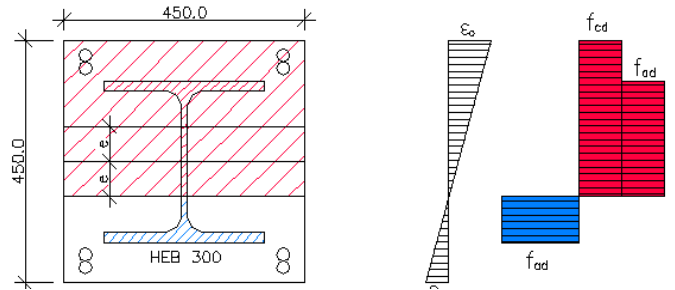
$$N = P_{Dc1} + P_{Dc2} + P_{Da2} =$$

$$= (P_{Dc1} + P_{Dc2}/2) + (P_{Dc2}/2 + P_{Dc1}) = 2*(P_{Dc1} + P_{Dc2}/2) = 2*N(M_{max})$$

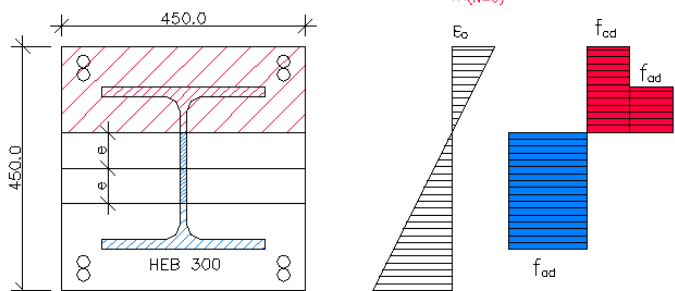
Υποστυλώματα (αλληλεπίδραση κάμψης και θλίψης)

Συγκεντρώνοντας όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις έχουμε το διάγραμμα αλληλεπίδρασης του EC4:

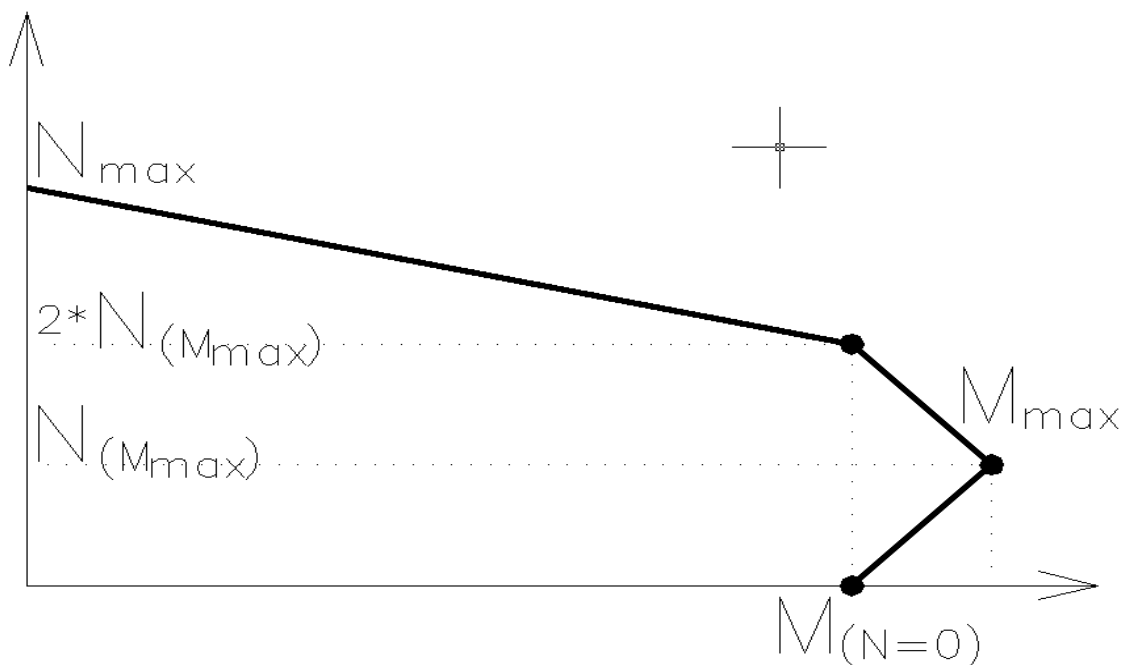
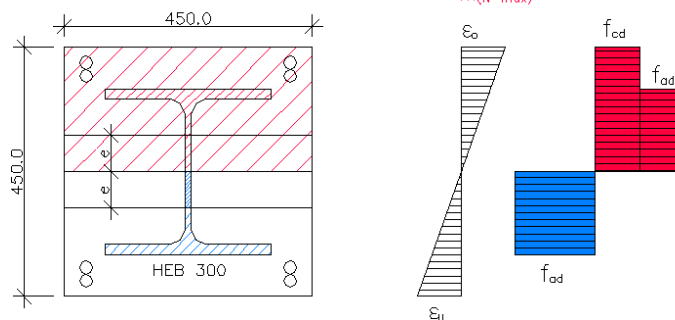
- για καθαρή θλίψη την $N_{plrd} = N_{max}$



- για κάμψη M_{plrd}
- και $N=2N(M_{max})$



- για κάμψη M_{max}
- για καθαρή κάμψη M_{plrd}



Σύμμικτα στοιχεία – δοκοί (συμπεριφορά σε φωτιά)

Στην φωτιά (όπως και στον σεισμό),

οι σύμμικτες κατασκευές συμπεριφέρονται αντίστοιχα με τις μεταλλικές, αφού: το μεταλλικό τμήμα χάνει ανάλογα με την έκθεση της επιφάνειας του σε θερμοκρασία, την αντοχή του.

Το ενδιαφέρον στις σύμμικτες προκύπτει, από την ενίοτε υπερδιαστασιολόγηση του μεταλλικού τμήματος, από την αρχική φάση της σκυροδέτησης χωρίς ακόμη την σύμμικτη λειτουργία.

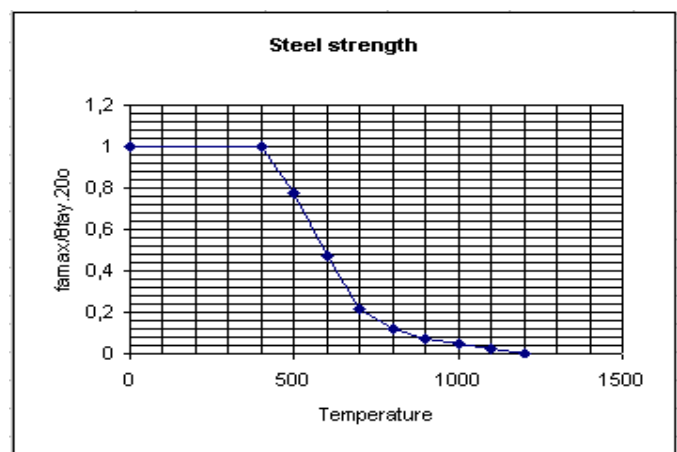
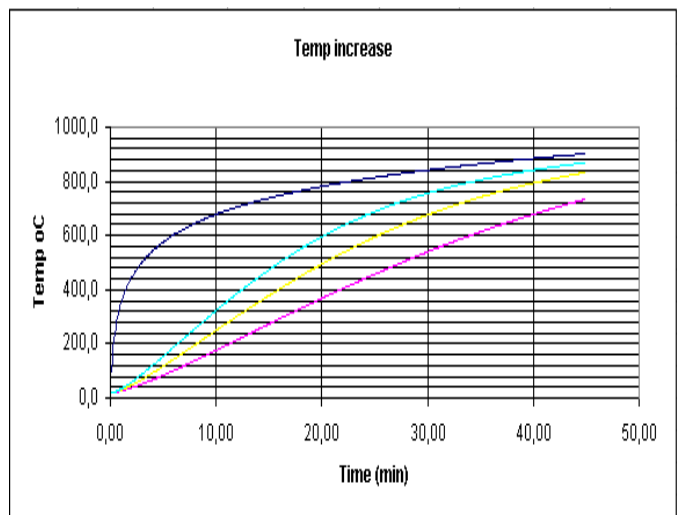
Η υπερδιαστασιολόγηση αυτή, μαζί με την μειωμένη φόρτιση του τυχηματικού χαρακτήρα της φωτιάς, μπορεί να δώσει ικανοποιητική επάρκεια στο σύμμικτο στοιχείο.

Μια σύμμικτη δοκός (σε πλήρη επαφή με την πλάκα από σκυρόδεμα), έχει για την μεταβολή της αύξησης της θερμοκρασίας του αέρα σε κλειστό χώρο, διάφορη σε κάθε στοιχείο, λόγω διαφορετικής επιφανειακής έκθεσης στο περιβάλλον:

- κάτω πέλμα (σχετικά παχύ)
- κορμός (λεπτός)
- άνω πέλμα, (μερικά προστατευμένο από την επαφή με το σκυρόδεμα)

Για μικρούς χρόνους είναι δυνατό η αύξηση της θερμοκρασίας Διαφορετική σε κάθε τμήμα:

- κάτω πέλμα
- κορμός
- άνω πέλμα



Να οδηγήσει σε απώλεια αντοχής,
που καλύπτει τις ανάγκες του έργου για τις μειωμένες απαιτήσεις της
τυχηματικής φόρτισης της φωτιάς.

Συντελεστές για φορτία:

Μόνιμα 1 (αντί 1.35)

Κινητά ψ_2 (αντί 1.5)

Σύμμικτα στοιχεία – δοκοί (συμπεριφορά σε σεισμό)

Για την σεισμική φόρτιση:

Σε σύμμικτες κατασκευές
εφ' όσον δεν υπάρχουν σύμμικτοι κόμβοι, που είναι τα κατ'εξοχή
καταπονούμενα σε σεισμό στοιχεία μιας κατασκευής,
ίσχύουν ότι περιλαμβάνεται αντίστοιχα στους ευρωκώδικες:

κύρια των μεταλλικών κατασκευών (EC3),
και λιγότερο του σκυροδέματος (EC2).

Αυτό που έχει νόημα να κρατήσουμε
είναι η ιδιότητα των συμμίκτων να έχουν σημαντικά μεγάλη αντοχή στο κέντρο
των δοκών,

που μας επιτρέπει να αφήνουμε τους κόμβους με σημαντικά περιθώρια
ανακατανομής που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σεισμικές φορτίσεις.