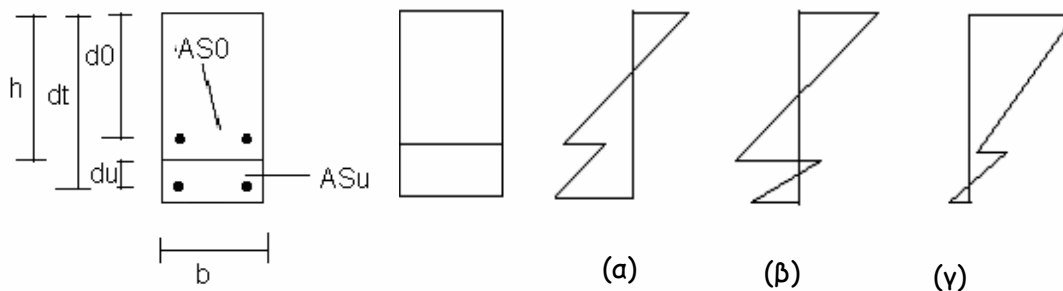


3.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΚΑΜΠΤΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΝΕΕΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

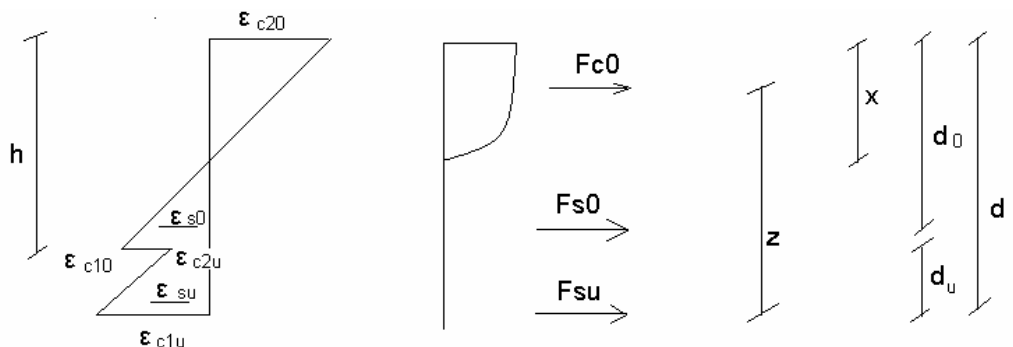
3.1.1 Αναλυτική Διαδικασία - Δημιουργία Προγράμματος FORTRAN

Οι πιθανές εικόνες κατανομής των παραμορφώσεων καθ' ύψος μιας καμπτόμενης διατομής ενισχυμένης με νέα στρώση σκυροδέματος είναι τρεις και φαίνονται στο Σχήμα 3.1.1.



Σχήμα 3.1.1: Πιθανές κατανομές των παραμορφώσεων σε διατομή ενισχυμένη με νέα στρώση σκυροδέματος

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ α



$$\text{Ισορροπία δυνάμεων : } F_c + F_{s0} + F_{su} = 0$$

$$\text{Ισορροπία ροπών : } M_u = F_c \cdot z + F_{s0} \cdot (d_t - d_0)$$

$$\text{Ισορροπία δυνάμεων στη διεπιφάνεια: } -F_c - F_{s0} = \int b \cdot \tau(\epsilon_L) \, dx$$

$$\epsilon_L = \epsilon_{c10} - \epsilon_{c2u}$$

$$\epsilon_t = \epsilon_{c20} + \epsilon_{c10} - \epsilon_{c2u} + \epsilon_{su}$$

$$F_c = 0,85 \cdot f_c \cdot b \cdot x \cdot a_0 = 0,85 \cdot f_c \cdot b \cdot (\epsilon_{c20} / \epsilon_t) \cdot d_t \cdot a_0$$

$$z = d_t - C_0 \cdot x = d_t - C_0 \cdot (\epsilon_{c20} / \epsilon_t) \cdot d_t = d_t \cdot [1 - C_0 \cdot (\epsilon_{c20} / \epsilon_t)]$$

$$P_0 = A_{s0}/(b \cdot d_t)$$

$$P_u = A_{su}/(b \cdot d_t)$$

$$F_{s0} = P_0 \cdot b \cdot d_t \cdot \sigma_{s0}$$

$$F_{su} = P_u \cdot b \cdot d_t \cdot \sigma_{su}$$

$$d_t - d = d_t - d_t \cdot ((\epsilon_{c20} + \epsilon_{s0}) / \epsilon_t) = d_t \cdot (1 - (\epsilon_{c20} + \epsilon_{s0}) / \epsilon_t)$$

Με αντικαταστάσεις παίρνω:

$$\begin{aligned} F_c = -F_{s0} - F_{su} &\Rightarrow 0,85 \cdot f_c \cdot b \cdot (\epsilon_{c20} / \epsilon_0) \cdot d_t \cdot a_0 \\ &= -P_0 \cdot b \cdot d_t \cdot \sigma_{s0} - P_u \cdot b \cdot d_t \cdot \sigma_{su} \Rightarrow \\ P_0 \cdot \sigma_{s0} / f_c + P_u \cdot \sigma_{su} / f_c &= -0,85 \cdot a_0 \cdot \epsilon_{c20} / \epsilon_t \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_u = F_c \cdot z + F_{s0} \cdot (d_t - d_0) &= 0,85 \cdot f_c \cdot b \cdot (\epsilon_{c20} / \epsilon_t) \cdot d_t^2 \cdot a_0 \cdot [1 - C_0 \cdot (\epsilon_{c20} / \epsilon_t)] \\ &+ P_0 \cdot b \cdot d_t^2 \cdot \sigma_{s0} \cdot (1 - (\epsilon_{c20} + \epsilon_{s0}) / \epsilon_t) \end{aligned}$$

$$\mu_u = M_u / (b \cdot d_t^2 \cdot f_c) \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \mu_u &= 0,85 \cdot (\epsilon_{c20} / \epsilon_t) \cdot a_0 \cdot [1 - C_0 \cdot (\epsilon_{c20} / \epsilon_t)] + P_0 \cdot (\sigma_{s0} / f_c) \cdot \\ &\quad (1 - (\epsilon_{c20} + \epsilon_{s0}) / \epsilon_t) \quad (2) \end{aligned}$$

$$-F_c - F_{s0} = \int b \cdot \tau(\epsilon_L) \, dx \Rightarrow$$

$$-0,85 \cdot f_c \cdot b \cdot (\epsilon_{c20} / \epsilon_t) \cdot d_t \cdot a_0 - P_0 \cdot b \cdot d_t \cdot \sigma_{s0} = \int b \cdot \tau(\epsilon_L) \, dx$$

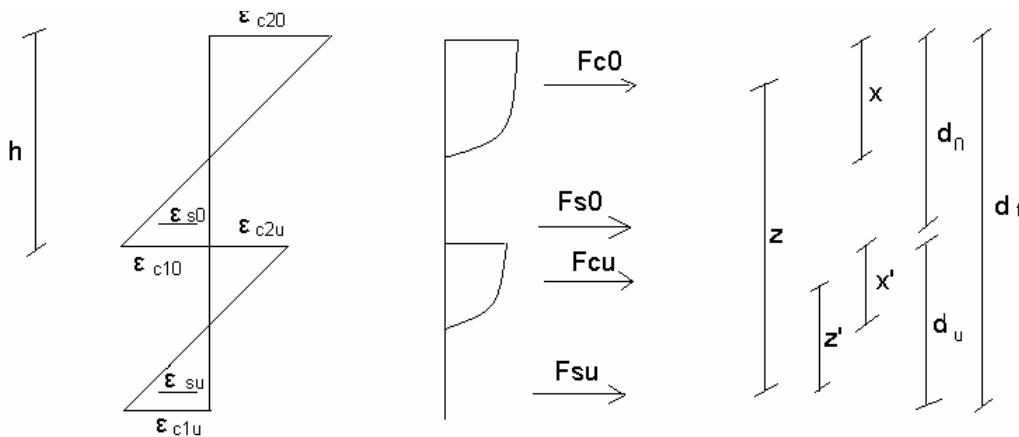
$$-0,85 \cdot (\epsilon_{c20} / \epsilon_t) \cdot d_t \cdot a_0 - P_0 \cdot d_t \cdot \sigma_{s0} / f_c = \int [\tau(\epsilon_L) / (f_c)] \, dx \quad (3)$$

ή

$$F_{su} = \int b \cdot \tau(\epsilon_L) \, dx \Rightarrow$$

$$P_u \cdot d_t \cdot \sigma_{su} / f_c = \int [\tau(\epsilon_L) / (f_c)] \, dx \quad (3b)$$

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ β



$$\text{Ισορροπία δυνάμεων : } F_{c0} + F_{cu} = -F_{s0} - F_{su}$$

$$\text{Ισορροπία ροπών : } M_u = F_{c0} \cdot z + F_{cu} \cdot z' + F_{s0} \cdot (d_t - d_0)$$

$$\text{Ισορροπία δυνάμεων στη διεπιφάνεια: } -F_{c0} - F_{s0} = \int b \cdot \tau(\epsilon_L) \, dx$$

$$\begin{aligned}\text{Από καμπυλότητες: } \chi/\varepsilon_{c20} &= d_t/\varepsilon_t \Rightarrow \chi = (\varepsilon_{c20}/\varepsilon_t) * d_t \\ \chi'/\varepsilon_{c2u} &= d_t/\varepsilon_t \Rightarrow \chi' = (\varepsilon_{c2u}/\varepsilon_t) * d_t \\ d_t/\varepsilon_t &= d_0/(\varepsilon_{c20} + \varepsilon_{s0}) \Rightarrow d_0 = (\varepsilon_{c20} + \varepsilon_{s0}) * d_t/\varepsilon_t\end{aligned}$$

$$\varepsilon_L = \varepsilon_{c10} - \varepsilon_{c2u}$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{c20} + \varepsilon_{c10} - \varepsilon_{c2u} + \varepsilon_{su}$$

$$F_{c0} = 0,85 * f_c * b * \chi * a_0$$

$$F_{cu} = 0,85 * f_c * b * \chi' * a_u$$

$$P_0 = A_{s0}/(b * d_t)$$

$$P_u = A_{su}/(b * d_t)$$

$$F_{s0} = P_0 * b * d_t * \sigma_{s0}$$

$$F_{su} = P_u * b * d_t * \sigma_{su}$$

$$z = d_t - C_0 * \chi = d_t * (1 - C_0 * \varepsilon_{c20}/\varepsilon_t)$$

$$z' = d_u - C_u * \chi' = d_t * (\varepsilon_{c2u} + \varepsilon_{su} - \varepsilon_{c2u} * C_u)/\varepsilon_t$$

$$d_t - d_0 = d_t * (1 - (\varepsilon_{c2u} + \varepsilon_{s0})/\varepsilon_t)$$

Με αντικαταστάσεις:

$$F_{c0} + F_{cu} = -F_{s0} - F_{su} \Rightarrow$$

$$-P_0 \sigma_{s0}/f_c - P_u \sigma_{su}/f_c = 0,85 * (a_0 * \varepsilon_{c20} + a_u * \varepsilon_{c2u})/\varepsilon_t \quad (1)$$

$$\begin{aligned}M_u = F_{c0} * z + F_{cu} * z' + F_{s0} * (d_t - d_0) &= 0,85 * f_c * b * d_t^2 * a_0 * \\ &\quad (1 - C_0 * \varepsilon_{c20}/\varepsilon_t)/\varepsilon_t \\ &\quad + 0,85 * f_c * b * d_t^2 * a_u * (\varepsilon_{c2u} + \varepsilon_{su} - \varepsilon_{c2u} * C_u)/(\varepsilon_t^2) \\ &\quad + P_0 * b * d_t^2 * \sigma_{s0} * (1 - (\varepsilon_{c20} + \varepsilon_{s0})/\varepsilon_t)\end{aligned}$$

$$\mu_u = M_u/(b * f_c * d_t^2)$$

$$\begin{aligned}\mu_u &= 0,85 * a_0 * (1 - C_0 * \varepsilon_{c20}/\varepsilon_t)/\varepsilon_t + 0,85 * a_u * (\varepsilon_{c2u} + \varepsilon_{su} - \varepsilon_{c2u} * C_u)/(\varepsilon_t^2) \\ &\quad + P_0 * (\sigma_{s0}/f_c) * (1 - (\varepsilon_{c20} + \varepsilon_{s0})/\varepsilon_t)\end{aligned}$$

(2)

$$-F_{c0} - F_{s0} = \int b * \tau(\varepsilon_L) dx \Rightarrow$$

$$-0,85 * f_c * b * d_t * a_0 * \varepsilon_{c20}/\varepsilon_t - P_0 * b * d_t * \sigma_{s0} = \int b * \tau(\varepsilon_L) dx$$

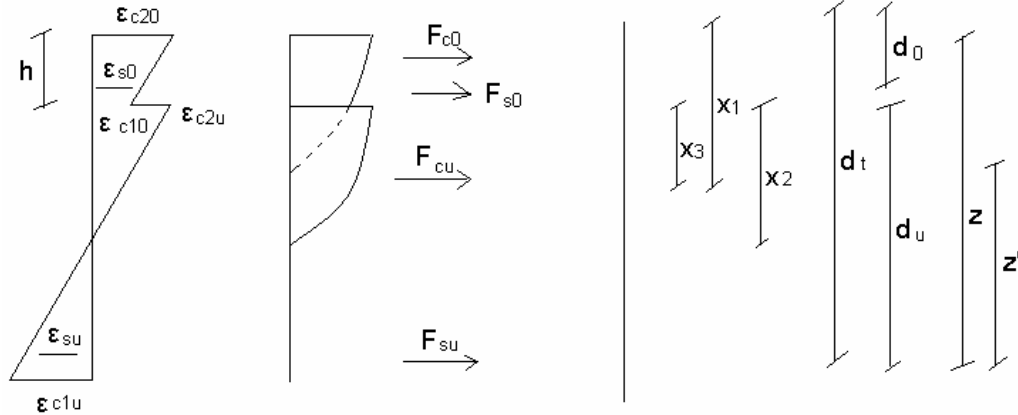
$$-0,85 * a_0 * \varepsilon_{c20}/\varepsilon_t - P_0 * \sigma_{s0}/f_c = \int \tau(\varepsilon_L)/(f_c * d_t) dx \quad (3a)$$

ή

$$F_{cu} + F_{su} = \int b * \tau(\varepsilon_L) dx \Rightarrow$$

$$0,85 * a_u * \varepsilon_{c2u}/\varepsilon_t + P_u * \sigma_{su}/f_c = \int \tau(\varepsilon_L)/(f_c * d_t) dx \quad (3b)$$

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ γ



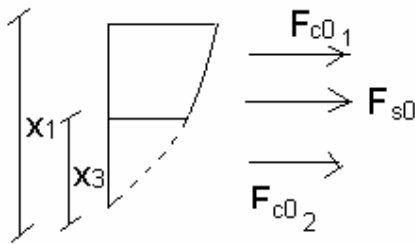
Ισορροπία δυνάμεων : $F_{c0} + F_{cu} = -F_{s0} - F_{su}$

Ισορροπία ροπών : $M_u = -F_{c01} \cdot z + F_{c02} \cdot z_1 + F_{cu} \cdot z' + F_{s0} \cdot (d_t - d_0)$

Ισορροπία δυνάμεων στη διεπιφάνεια: $F_{cu} + F_{su} = \int b \cdot \tau(\epsilon_L) dx$

Καμπυλότητα: $\epsilon_{c20}/x_1 = \epsilon_{c10}/x_3 \Rightarrow x_3 = (\epsilon_{c10}/\epsilon_{c20}) \cdot x_1$

$x_1 - x_3 = h$



$$F_{c01} = 0,85 \cdot a_0 \cdot b \cdot x_1 \cdot f_c = 0,85 \cdot a_0 \cdot b \cdot (\epsilon_{c20}/\epsilon_t) \cdot d_t \cdot f_c$$

$$F_{c02} = 0,85 \cdot a_1 \cdot b \cdot x_3 \cdot f_c = 0,85 \cdot a_1 \cdot b \cdot (\epsilon_{c10}/\epsilon_t) \cdot d_t \cdot f_c$$

$$F_{c0} = F_{c01} - F_{c02} = 0,85 \cdot b \cdot d_t \cdot f_c \cdot (a_0 \cdot \epsilon_{c20} - a_1 \cdot \epsilon_{c10}) / \epsilon_t$$

$$F_{cu} = 0,85 \cdot a_u \cdot b \cdot x_2 \cdot f_c = 0,85 \cdot b \cdot d_t \cdot f_c \cdot a_u \cdot \epsilon_{c2u} / \epsilon_t$$

$$P_0 = A_{s0} / (b \cdot d_t)$$

$$P_u = A_{su} / (b \cdot d_t)$$

$$F_{s0} = P_0 \cdot b \cdot d_t \cdot \sigma_{s0}$$

$$F_{su} = P_u \cdot b \cdot d_t \cdot \sigma_{su}$$

$$z = d_t - C_0 \cdot x = d_t (1 - C_0 \cdot \epsilon_{c20} / \epsilon_t)$$

$$z_1 = d_u - C_{01} \cdot x_1 = d_t \cdot (d_u / d_t - C_{01} \cdot \epsilon_{c10} / \epsilon_t)$$

$$z' = d_u - C_u \cdot x' = d_t \cdot (d_u / d_t - C_u \cdot \epsilon_{c2u} / \epsilon_t)$$

$$d_t - d_0 = d_t \cdot (1 - d_0 / d_t)$$

Με αντικαταστάσεις έχω:

$$F_{su} + F_{cu} = -F_{s0} - F_{c0} \Rightarrow$$

$$0,85 \cdot (a_0 \cdot \varepsilon_{c20} - a_1 \cdot \varepsilon_{c10} + a_u \cdot \varepsilon_{c2u}) / \varepsilon_t + (P_0 \cdot \sigma_{s0} + P_u \cdot \sigma_{su}) / f_c = 0 \quad (1)$$

$$M_u = -F_{c01} \cdot z + F_{c02} \cdot z_1 - F_{cu} \cdot z + F_{s0} \cdot (d_t - d_0) =$$

$$- 0,85 \cdot a_0 \cdot (\varepsilon_{c20} / \varepsilon_t) \cdot b \cdot d_t \cdot f_c \cdot d_t \cdot (1 + C_0 \cdot \varepsilon_{c20} / \varepsilon_t)$$

$$+ 0,85 \cdot a_1 \cdot b \cdot (\varepsilon_{c10} / \varepsilon_t) \cdot d_t \cdot f_c \cdot d_t \cdot (d_u / d_t + C_{01} \cdot \varepsilon_{c10} / \varepsilon_t)$$

$$- 0,85 \cdot b \cdot d_t \cdot f_c \cdot a_u \cdot \varepsilon_{c2u} / \varepsilon_t \cdot d_t \cdot (d_u / d_t + C_u \cdot \varepsilon_{c2u} / \varepsilon_t)$$

$$+ P_0 \cdot b \cdot d_t \cdot \sigma_{s0} \cdot d_t \cdot (1 - d_0 / d_t)$$

$$\mu_u = - 0,85 \cdot a_0 \cdot (\varepsilon_{c20} / \varepsilon_t) \cdot (1 + C_0 \cdot \varepsilon_{c20} / \varepsilon_t) + 0,85 \cdot a_1 \cdot (\varepsilon_{c10} / \varepsilon_t) \cdot (d_u / d_t + C_{01} \cdot \varepsilon_{c10} / \varepsilon_t) - 0,85 \cdot a_u \cdot \varepsilon_{c2u} / \varepsilon_t \cdot (d_u / d_t + C_u \cdot \varepsilon_{c2u} / \varepsilon_t) + P_0 \cdot \sigma_{s0} \cdot (1 - d_0 / d_t) / f_c \quad (2)$$

$$F_{cu} + F_{su} = \int b \cdot \tau(\varepsilon_L) dx \Rightarrow$$

$$0,85 \cdot b \cdot d_t \cdot f_c \cdot a_u \cdot \varepsilon_{c2u} / \varepsilon_t + P_u \cdot b \cdot d_t \cdot \sigma_{su} = \int b \cdot \tau(\varepsilon_L) dx \Rightarrow$$

$$0,85 \cdot a_u \cdot \varepsilon_{c2u} / \varepsilon_t + P_u \cdot \sigma_{su} / f_c = \int \tau(\varepsilon_L) / (d_t \cdot f_c) dx \quad (3)$$

Από σύνθεση των παραπάνω εξισώσεων προκύπτει:

$$P_0 \cdot (\sigma_{s0} / f_c) + P_u \cdot (\sigma_{su} / f_c) + 0,85 \cdot (a_0 \cdot \varepsilon_{c20} - a_1 \cdot \varepsilon_{c10} + a_u \cdot \varepsilon_{c2u}) / \varepsilon_t = 0$$

$$\mu_u = -0,85 \cdot a_0 \cdot (\varepsilon_{c20} / \varepsilon_t) \cdot (1 + C_0 \cdot \varepsilon_{c20} / \varepsilon_t)$$

$$+ 0,85 \cdot a_1 \cdot \varepsilon_{c10} \cdot (d_u / d_t + C_1 \cdot \varepsilon_{c10} / \varepsilon_t) / \varepsilon_t$$

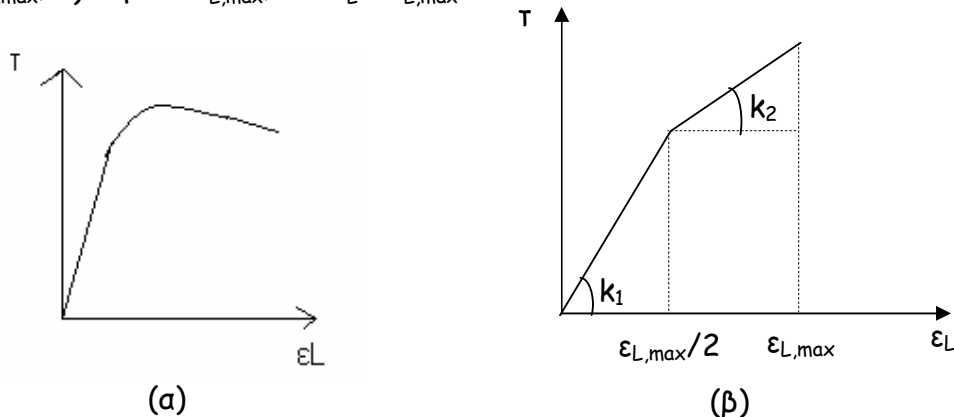
$$- 0,85 \cdot a_u \cdot \varepsilon_{c2u} \cdot (d_u / d_t + C_u \cdot \varepsilon_{c2u} / \varepsilon_t) / \varepsilon_t + P_0 \cdot \sigma_{s0} \cdot (1 - d_0 / d_t) / f_c$$

$$\varepsilon_L = \varepsilon_{c10} - \varepsilon_{c2u}$$

$$F_{cu} + F_{su} = \int b \cdot \tau(\varepsilon_L) dx \Rightarrow$$

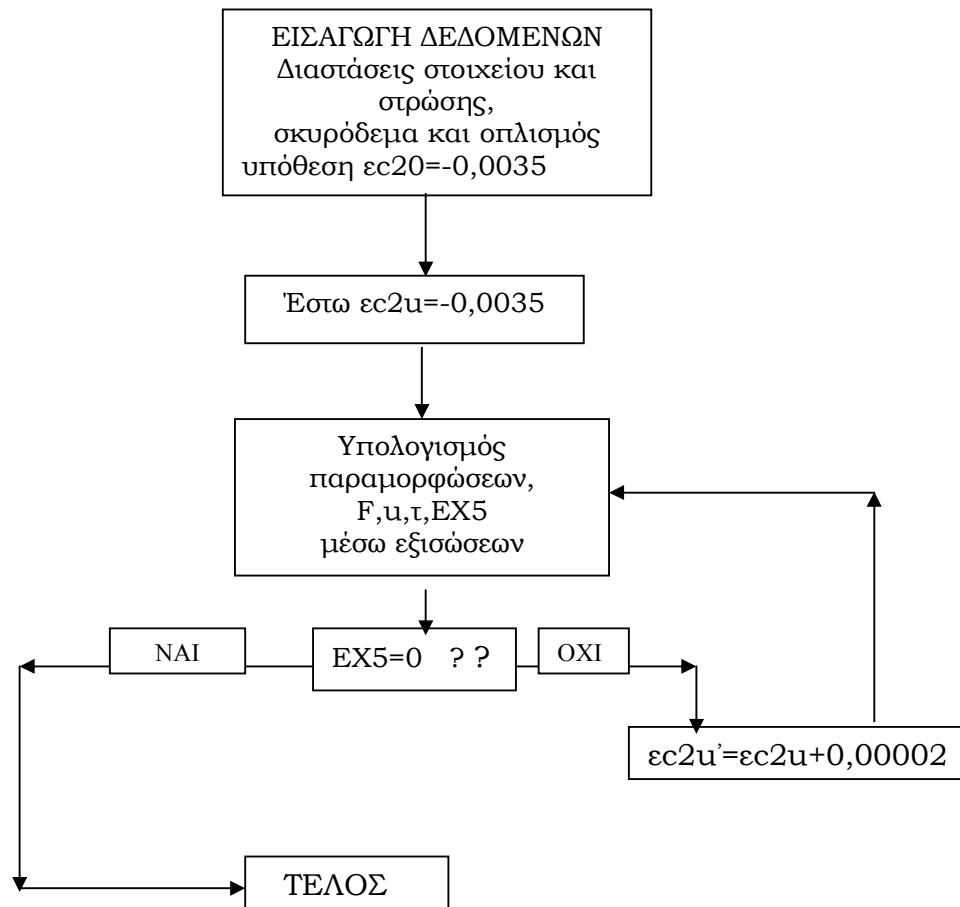
$$0,85 \cdot a_u \cdot \varepsilon_{c2u} / \varepsilon_t + P_u \cdot \sigma_{su} / f_c = \int \tau(\varepsilon_L) / (d_t \cdot f_c) dx$$

Το διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης στις διεπιφάνειες παλαιού-νέου σκυροδέματος έχει τη μορφή του Σχήματος 3.1.2 η οποία μας για λόγους απλοποίησης των υπολογιστικών διαδικασιών εξιδανικεύεται είτε σε γραμμική θεωρώντας $\tau = k_1 \cdot \varepsilon_L$ όπου $\varepsilon_L \leq \varepsilon_{L,max}$ είτε σε διγραμμική θεωρώντας $\tau = k_1 \cdot \varepsilon_L$ για παραμόρφωση στη διεπιφάνεια ε_L με $0 \leq \varepsilon_{L,max} \leq \varepsilon_L / 2$ και $\tau = K_1 \cdot \varepsilon_{L,max} / 2 + K_2 \cdot (\varepsilon_L - \varepsilon_{L,max} / 2)$ για $\varepsilon_{L,max} / 2 \leq \varepsilon_L \leq \varepsilon_{L,max}$



Σχήμα 3.1.2: Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης στη διεπιφάνεια
(α) Πειραματική καμπύλη, (β) Εξιδανικευμένη διγραμμική καμπύλη

Το πρόγραμμα που κατασκευάστηκε για τη μελέτη δοκού ενισχυμένης με νέες στρώσεις σκυροδέματος έχει το ακόλουθο διάγραμμα ροής (Σχήμα 3.1.3) και η διαχείριση του γίνεται ως εξής:



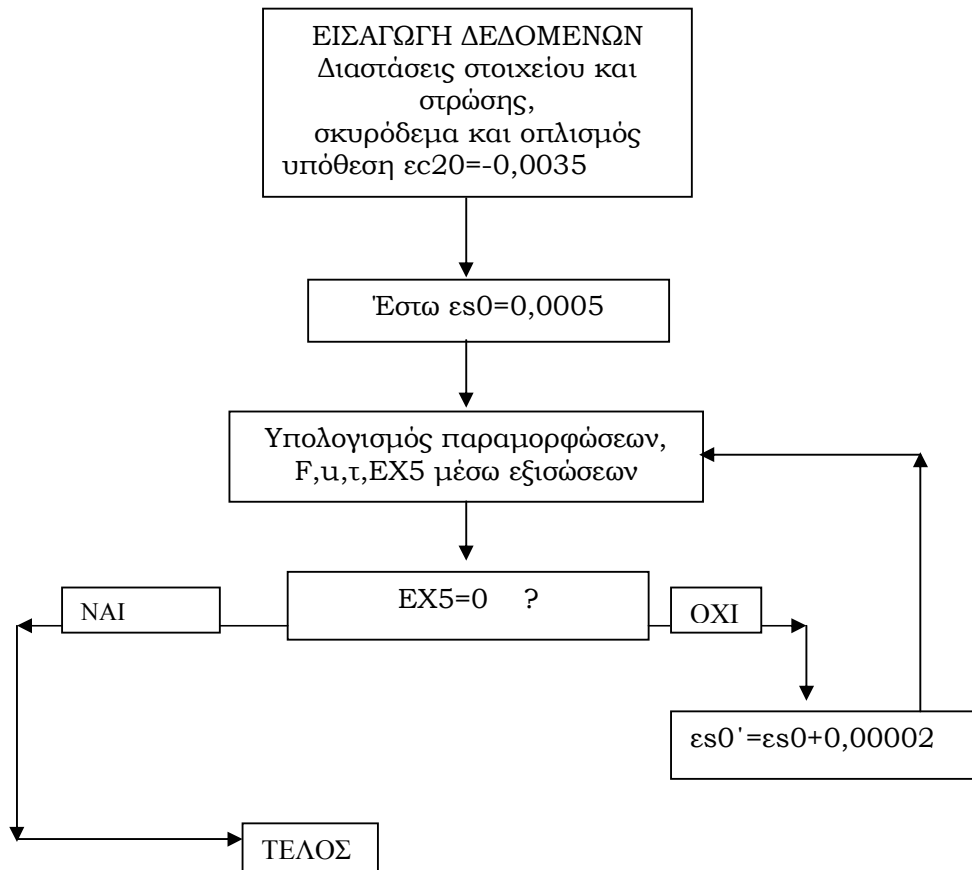
Σχήμα 3.1.3: Διάγραμμα ροής προγράμματος για επίλυση ενισχυμένης δοκού

1. Δίνονται οι διαστάσεις του στοιχείου και της πρόσθετης στρώσης.
2. Δίνονται ο οπλισμός αρχικού στοιχείου και στρώσης.
3. Δίνονται υλικά (αντοχή και μέτρο ελαστικότητας για χάλυβα και σκυρόδεμα).
4. Θεωρείται αστοχία σκυροδέματος θλιβόμενου πέλματος $\epsilon_{c20} = 0,35\%$.
5. Δίνονται σύστημα εξισώσεων (αναλυτικές εξισώσεις που περιγράφονται παραπάνω).
6. Δίνοντας εξίσωση $EX5 = (a_u \cdot \epsilon_{c2u}) / \epsilon_T + (p_u \cdot \sigma_{su}) / f_{cu} - (I_x \cdot \tau) / (2 \cdot d \cdot f_{cu})$ ζητείται από το πρόγραμμα να κάνει κύκλους υπολογισμών μέχρι λύση του συστήματος να οδηγήσει σε EX5 πάρα πολύ μικρό, σχεδόν μηδέν.

7. Σε κάθε κύκλο εκτός από τις παραμορφώσεις, υπολογίζεται η ροπή, η δύναμη $F=4*M/l_x$, η καμπυλότητα $\kappa= \epsilon_t/d_t$, το $EI_{ef}=M/\kappa$ και το βέλος κάμψης $u=F*l_x^3/(48*EI_{ef})$.

Με ανάλογο τρόπο δημιουργήθηκε ένα ακόμα πρόγραμμα σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN για την επίλυση μονολιθικών στοιχείων.

Στο Σχήμα 3.1.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του προγράμματος που κατασκευάστηκε για την επίλυση ενός μονολιθικού στοιχείου.



Σχήμα 3.1.4: Διάγραμμα ροής προγράμματος για επίλυση μονολιθικής δοκού

Για τη λύση του συστήματος των παραπάνω εξισώσεων υποθέτουμε ότι $\epsilon_{c20}=-0.0035$ και για διάφορες τιμές του ϵ_{c2u} από $-0,0035$ και πάνω, γίνονται μέσω του προγράμματος δοκιμές μέχρι η παράσταση

$$EX5 = a_u * (\epsilon_{c2u} / \epsilon_t) + A_{s0} * \sigma_{s0} / (b * d_t * f_{c0}) - \int \tau(\epsilon_L) / (d_t * f_c), \text{ να μηδενιστεί.}$$

Σε κάθε κύκλο που εκτελεί το πρόγραμμα, εκτός από τις παραμορφώσεις και τη ροπή αντοχής, υπολογίζεται η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια αφού έχει γίνει εισαγωγή της σχέσης $\tau = \tau(\epsilon_L)$, του μέγιστου φορτίου από τη σχέση $F = 4M/l_x$, του αντίστοιχου βέλους κάμψης από τη σχέση $u = F * l_x^3 / (48 * E * I_{ef})$.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αντίστοιχου προγράμματος που επιλύει μονολιθική δοκό είναι οι εξής:

$$M_{SD}=0.85 \cdot a_0 \cdot b \cdot d \cdot f_c \cdot \varepsilon_{c20} \cdot (1 - c_0 \cdot \varepsilon_{c20} / (\varepsilon_{c20} - \varepsilon_{s0})) / (\varepsilon_{c20} - \varepsilon_{s0})$$

$$EX5 = A_s \cdot \sigma_{s0} - 0.85 \cdot a_0 \cdot b \cdot d \cdot f_c \cdot \varepsilon_{c20} / (\varepsilon_{c20} - \varepsilon_{s0}) \quad (\text{από ισορροπία δυνάμεων})$$

Οι εξισώσεις για τα a , και για το σ_s είναι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στο ενισχυμένο στοιχείο.

ΣΥΜΒΟΛΑ

Συντελεστής πληρότητας a

$$a_0 = a(\varepsilon_{c20})$$

$$a_1 = a(\varepsilon_{c10})$$

$$a_u = a(\varepsilon_{c2u})$$

$$a_i = \begin{cases} 0 & , \text{αν } \varepsilon_{ci} \geq 0 \\ 500 \cdot \varepsilon_{ci} \cdot ((1000 \cdot \varepsilon_{ci}) / 6 + 1) & , \text{αν } -0,002 \leq \varepsilon_{ci} \leq 0 \\ 1 + 1 / (1500 \cdot \varepsilon_{ci}) & , \text{αν } -0,0035 \leq \varepsilon_{ci} \leq -0,002 \end{cases}$$

Συντελεστής θέσης C

$$C_0 = C(\varepsilon_{c20})$$

$$C_1 = C(\varepsilon_{c10})$$

$$C_u = C(\varepsilon_{c2u})$$

$$C_i = \begin{cases} 0 & , \text{αν } \varepsilon_{ci} \geq 0 \\ (1 + 125 \cdot \varepsilon_{ci}) / (3 + 500 \cdot \varepsilon_{ci}) & , \text{αν } -0,002 \leq \varepsilon_{ci} \leq 0 \\ (1000 \cdot \varepsilon_{ci} \cdot (3000 \cdot \varepsilon_{ci} + 4) + 2) / (2000 \cdot \varepsilon_{ci} \cdot (3000 \cdot \varepsilon_{ci} + 2)) & , \text{αν } -0,0035 \leq \varepsilon_{ci} \leq -0,002 \end{cases}$$

Παραμορφώσεις

ε_{c20} =παραμόρφωση θλιβόμενης ίνας σκυροδέματος

ε_{c2u} =παραμόρφωση σκυροδέματος αρχικού στοιχείου στη διεπιφάνεια

ε_{c2u} =παραμόρφωση σκυροδέματος νέας στρώσης στη διεπιφάνεια

ε_{c2u} =παραμόρφωση εφελκόμενης ίνας σκυροδέματος νέας στρώσης

ε_{s0} =παραμόρφωση χάλυβα αρχικού στοιχείου

ε_{su} = παραμόρφωση χάλυβα νέας στρώσης.

Αντοχές

f_c = αντοχή σκυροδέματος

σ_{s0} = τάση χάλυβα παλιού στοιχείου

σ_{su} = τάση χάλυβα νέας στρώσης

d_0 =στατικό ύψος αρχικού στοιχείου

d_u =στατικό ύψος νέας στρώσης

d_f =στατικό ύψος ενισχυμένου στοιχείου

h =ύψος αρχικού στοιχείου

b = πλάτος αρχικού στοιχείου

χ = απόσταση της περισσότερο θλιβόμενης ίνας από τον ουδέτερο άξονα

P_0 =γεωμετρικό ποσοστό οπλισμού αρχικού στοιχείου

P_u =γεωμετρικό ποσοστό οπλισμού νέας στρώσης

μ_u = ανηγμένη ροπή

M_u =ροπή

F_{c0} =δύναμη σκυροδέματος αρχικού στοιχείου

F_{cu} =δύναμη σκυροδέματος νέας στρώσης

F_{s0} =δύναμη χάλυβα αρχικού στοιχείου

F_{su} =δύναμη χάλυβα νέας στρώσης.

Επίσης $\epsilon_{c10}=n*\epsilon_t+\epsilon_{c20}$

$$\epsilon_{s0}=b_0*\epsilon_t+\epsilon_{c20}$$

$$\epsilon_{su}=b_u*\epsilon_t+\epsilon_{c2u} \quad \text{με } n=h/d_t, \quad b_0=d_0/d_t \quad \text{και } b_u=d_u/d_t.$$

Για την τάση του χάλυβα οπλισμού του παλιού στοιχείου και της ενίσχυσης έχουμε
ότι $\sigma_s = \epsilon_s * E_s$ αν $-f_y/E_s \leq \epsilon_s \leq f_y/E_s$

$$\sigma_s = F_y + E_s * (\epsilon_{su} - f_y/E_s) \quad \text{αν} \quad \epsilon_s \geq f_y/E_s \quad \text{και}$$

$$\sigma_s = -F_y - E_s * (\epsilon_{su} + f_y/E_s) \quad \text{αν} \quad \epsilon_s \leq -f_y/E_s \quad \text{και}$$

E_s είναι το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα, f_y είναι το όριο διαρροής του χάλυβα και E είναι το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα που προκύπτει για κράτυνση του χάλυβα που στο συγκεκριμένο παράδειγμα την παίρνουμε ίση με 5%.

Για τη λύση του συστήματος των παραπάνω εξισώσεων δίνεται ότι

$\epsilon_{c20} = -0.0035$ και για διάφορες τιμές του ϵ_{c2u} από -0.0035 και πάνω, γίνονται μέσω του προγράμματος δοκιμές μέχρι η παράσταση

$$EX5 = a_u * (\epsilon_{c2u} / \epsilon_t) + A_{s0} * \sigma_{s0} / (b * d_t * f_{c0}) - \int \tau(\epsilon_L) / (d_t * f_c), \quad \text{να μηδενιστεί.}$$

Σε κάθε κύκλο που εκτελεί το πρόγραμμα, εκτός από τις παραμορφώσεις και τη ροπή αντοχής, υπολογίζεται η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια αφού έχει γίνει εισαγωγή της σχέσης $\tau = \tau(\epsilon_L)$, του μέγιστου φορτίου από τη σχέση $F = 4M/l_x$, του αντίστοιχου βέλους κάμψης από τη σχέση $u = F * l_x^3 / (48 * E * I)$.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αντίστοιχου προγράμματος που επιλύει μονολιθική δοκό είναι οι εξής:

$$M_{SD} = 0.85 * a_0 * b * d * d * f_c * \epsilon_{c20} * (1 - c_0 * \epsilon_{c20} / (\epsilon_{c20} - \epsilon_{s0})) / (\epsilon_{c20} - \epsilon_{s0})$$

$$EX5 = A_s * \sigma_{s0} - 0.85 * a_0 * b * d * f_c * \epsilon_{c20} / (\epsilon_{c20} - \epsilon_{s0}) \quad (\text{από ισορροπία δυνάμεων})$$

Οι εξισώσεις για τα a , και για το σ_s είναι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στο ενισχυμένο στοιχείο.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο κώδικας του προγράμματος FORTRAN που κατασκευάστηκε για την επίλυση ενισχυμένων δοκών.

PROGRAM EX

real h,dt,ec20,d0,du,fcu,lx,Es2,Es1,Fy2,Fy1,Asu,As0,a0,b,
fc0,EI,ka,el,Es,t

real pu,ec10,ec2u,esu,et,es0,elast2,elast1,min,
global,p0,cu,M,F,c00,c11,u

```

real au,a1,Ssu,Ss0,c0,c1
real EX5
integer i1
WRITE (*,*) 'dose ypsos h = '
READ (*,*) h
WRITE (*,*) 'dose platos b = '
READ (*,*) b
WRITE (*,*) 'dose mikos lx = '
READ (*,*) lx
WRITE (*,*) 'dose oplismo arxikou dokimiou As0 = '
READ (*,*) As0
WRITE (*,*) 'dose oplismo enisxysis Asu = '
READ (*,*) Asu
WRITE(*,*) ' dose statiko ypsos dt = '
READ (*,*) dt
WRITE(*,*) ' dose statiko ypsos d0 = '
READ (*,*) d0
WRITE(*,*) ' dose statiko ypsos du = '
READ (*,*) du
WRITE(*,*) ' dose antoxi paliou skyrodematos fc0 = '
READ (*,*) fc0
WRITE(*,*) ' dose antoxi neou skyrodematos fcu = '
READ (*,*) fcu
WRITE(*,*) ' dose metro elastikotitas paliou xalyva Es0 = '
READ (*,*) Es0
WRITE(*,*) ' dose metro elastikotitas neou xalyva Esu = '
READ (*,*) Esu
WRITE(*,*) ' dose orio diarois paliou xalyva Fy1 = '
READ (*,*) Fy1
WRITE(*,*) ' dose orio diarois neou xalyva Fy2 = '
READ (*,*) Fy2
WRITE(*,*) ' dose kratinsi xalyva Es = '
READ (*,*) Es
WRITE(*,*) ' dose ec20 = '
READ (*,*) ec20
WRITE(*,*) ' dose syntelesth K1 = '
READ(*,*) K1
WRITE(*,*) ' dose syntelesth K2 = '
READ(*,*) K2
elast2=Fy2/Es2

```

```

elast1=Fy1/Es1
pu=Asu/(b*dt)
p0=As0/(b*dt)
if (ec20.GE.0) a0=0
if (ec20.LT.0.AND.ec20.GE.-0.002) a0=-500*ec20*((1000*ec20)/6+1)
if (ec20.LT.-0.002.AND.ec20.GE.-0.0035) a0=1+1/(1500*ec20)
if (ec20.GE.0) c00=0
if (ec20.LT.0.and.ec20.GE.-0.002) c00=(1+125*ec20)/(3+500*ec20)
if(ec20.LT.-0.002.AND.ec20.GE.-0.0035)
c00=(1000*ec20*(3000*ec20+4)+2)/(2000*ec20*(3000*ec20+2))
write(*,*) ' a0 = ', a0
write(*,*) ' c00 = ', c00
min=10
do i1=0,10e6,1
ec2u=-0.0035+0.00002*i1
ec10=(h/dt)*et+ec20
es0=(d0/dt)*et+ec20
esu=(du/dt)*et+ec2u
if (ec10.GE.0) a1=0
if (ec10.LT.0.AND.ec10.GE.-0.002) a1=-500*ec10*((1000*ec10)/6+1)
if (ec10.LT.-0.002) a1=1+1/(1500*ec10)
if (ec2u.GE.0) au=0
if (ec2u.LT.0.AND.ec2u.GE.-0.002) au=-500*ec2u*((1000*ec2u)/6+1)
if (ec2u.LT.-0.002) au=1+1/(1500*ec2u)
if (ec10.gt.0.) c11=0
if (ec10.le.0.and.ec10.ge.-0.002) c11=(1+125*ec10)/(3+500*ec10)
if(ec10.le.-0.002.and.ec10.ge.-0.0035)
c11=(1000*ec10*(3000*ec10+4)+2)/(2000*ec10*(3000*ec10+2))
if (ec2u.gt.0.00) cu=0
if (ec2u.le.0.and.ec2u.ge.-0.002) cu=(1+125*ec2u)/(3+500*ec2u)
if(ec2u.le.-0.002.and.ec2u.ge.-0.0035)
cu=(1000*ec2u*(3000*ec2u+4)+2)/(2000*ec2u*(3000*ec2u+2))
if (esu.GT.-elast2.AND.esu.LT.elast2) Ssu=esu*Es2
if (esu.GE.elast2) Ssu=Fy2+abs(Es*(esu-elast2))
if (esu.LE.-elast2) Ssu=-Fy2-abs(Es*(esu+elast2))
if (es0.GT.-elast1.AND.es0.LT.elast1) Ss0=es0*Es1
if (es0.GE.elast1) Ss0=Fy1+abs(Es*(es0-elast1))
if (es0.LE.-elast1) Ss0=-Fy1-abs(Es*(es0+elast1))
c0=-0.85*(a0*ec20-a1*ec10+au*ec2u)
c1=((p0*Ss0)/fc0)+((pu*Ssu)/fcu)

```

```

    el=ec10-ec2u
    if(el.lt.0.0008) t=k1*el
    if(el.ge.0.0008) t=k1*0.0008+k2*(el-0.0008)
    if (c0.ne.0.and.c1.ne.0.) then
    et=-0.85*b*dt*fc0*(a0*ec20-a1*ec10+au*ec2u)/(As0*Ss0+Asu*Ssu)
    EX5=(au*ec2u)/et+(pu*Ssu)/fcu-(lx*t)/(2*dt*fcu)
    endif
    global=abs(EX5)
    if (global.LT.min) then
    min=global
    write(*,*)
    write(*,*) ' min = ' , min
    write(*,*)
    write(*,*) ' a0 = ' , a0
    write(*,*) ' a1 = ' , a1
    write(*,*) ' au = ' , au
    write(*,*) ' c00 = ' , c00
    write(*,*) ' c11 = ' , c11
    write(*,*) ' cu = ' , cu
    write(*,*)
    write(*,*) ' ec10 = ' , ec10
    write(*,*) ' ec2u = ' , ec2u
    write(*,*) ' esu = ' , esu
    write(*,*) ' et = ' , et
    write(*,*) ' es0 = ' , es0
    write(*,*) ' el = ' , el
    write(*,*) ' t = ' , t
    ka=et/dt
    M=(-0.85*a0*(ec20/et)*(1+c00*ec20/et)
    +0.85*a1*(ec10/et)*((du/dt)+c11*(ec10/et))
    -0.85*au*(ec2u/et)*((du/dt)+cu*(ec2u/et))
    -As0*Ss0*(1-d0/dt)/(b*dt*fc0))*b*dt*dt*fc0

    F=4*M/lx
    EI=M/ka
    u=-F*lx*lx*lx/(48*EI)
    write(*,*)
    write(*,*) ' M = ' , M
    write(*,*) ' EI = ' , EI
    write(*,*) ' F = ' , F
    write(*,*) ' u = ' , u

```

```

endif
end do
STOP
END

```

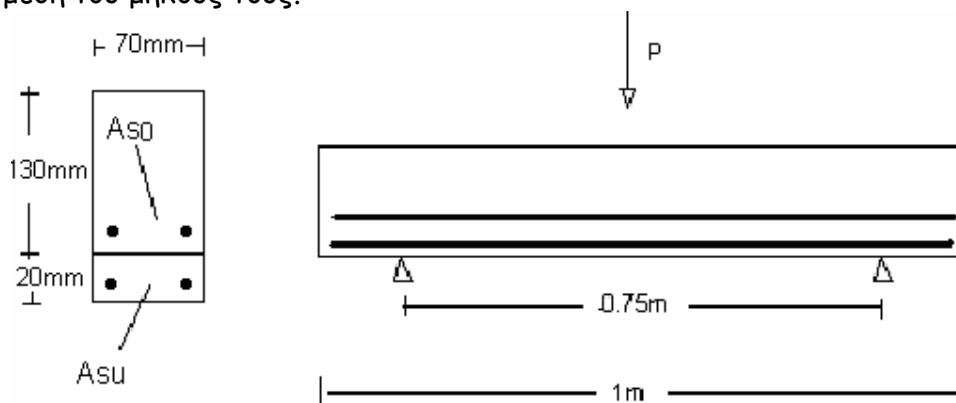
3.1.2 Αξιολόγηση Αξιοπιστίας Αποτελεσμάτων Αναλυτικού Προγράμματος

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων του αναλυτικού προγράμματος και την βαθμονόμηση των συντελεστών δυσκαμψίας $K1$ και $K2$ του διαγράμματος $\tau - \varepsilon_c$ χρησιμοποιούνται πειραματικά αποτελέσματα δύο δοκιμών δοκών τα οποία συγκρίνονται με τις προβλέψεις του προγράμματος.

Το πρώτο δοκίμιο (Σχ. 3.1.5) είναι μια αμφιπροέχουσα δοκός μήκους 1,0 m με άνοιγμα 0,75 m και ορθογωνική διατομή διαστάσεων 0,13m x 0,07m. Είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα κατηγορίας C25 και είχε οπλισμό στο εφελκυσμένο πέλμα της 2 Φ 6 S220 με επικάλυψη 0,01m. Η δοκός αυτή ενισχύθηκε στο εφελκυσμένο πέλμα με πρόσθετη στρώση οπλισμένου σκυροδέματος πάχους 0,02m, ίδιας κατηγορίας σκυροδέματος με την αρχική δοκό και οπλισμό επίσης 2 Φ 6 S220.

Το δεύτερο δοκίμιο είναι το αντίστοιχο μονολιθικό και έχει τα εξής χαρακτηριστικά: Είναι μια αμφιπροέχουσα δοκός μήκους 1,0 m και 0,75m και ορθογωνική διατομή διαστάσεων 0,15m x 0,07m. Η δοκός είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα κατηγορίας C25 κι έχει οπλισμό στο εφελκυσμένο πέλμα της 4 Φ 6 χάλυβα κατηγορίας S220, με επικάλυψη 0,02m.

Κάθε μία από αυτές τις δοκούς φορτίζεται με συγκεντρωμένο κατακόρυφο φορτίο στη μέση του μήκους τους.



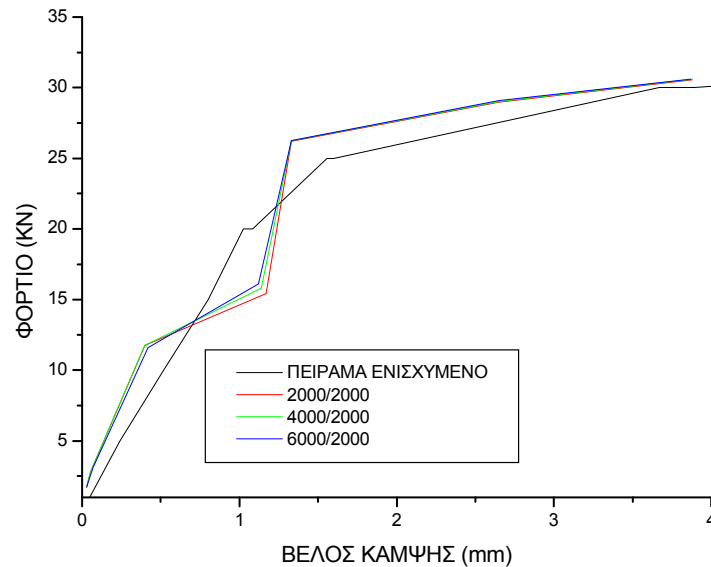
Σχήμα 3.1.5: Διατομή και φόρτιση ενισχυμένης δοκού

Τα αναλυτικά αποτελέσματα εξάγονται με υπόθεση διγραμμικής σχέσης $\tau - \varepsilon_c$ αξιολογώντας ένα εύρος τιμών των συντελεστών δυσκαμψίας του διαγράμματος

$\tau - \varepsilon_c$ (K_1 και K_2). Οι τιμές του K_2 θεωρούνται 2000 MPa ενώ του K_1 κυμαίνονται από 600 έως 6000 MPa.

α) Έστω $K_2=2000$ MPa

Για την περίπτωση αυτή θεωρήσαμε το K_2 σταθερό και ίσο με 2000 MPa και εξετάσαμε τις περιπτώσεις που το K_1 παίρνει τις τιμές 2000, 4000 και 6000 MPa και πήραμε το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 3.1.6).

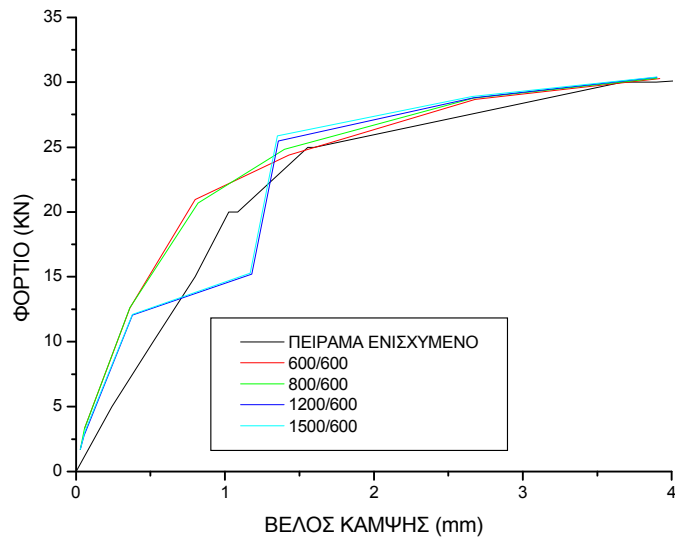


Σχήμα 3.1.6: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης της ενισχυμένης δοκού, για διγραμμική σχέση $\tau - \varepsilon_L$ και $K_2=2000$ MPa

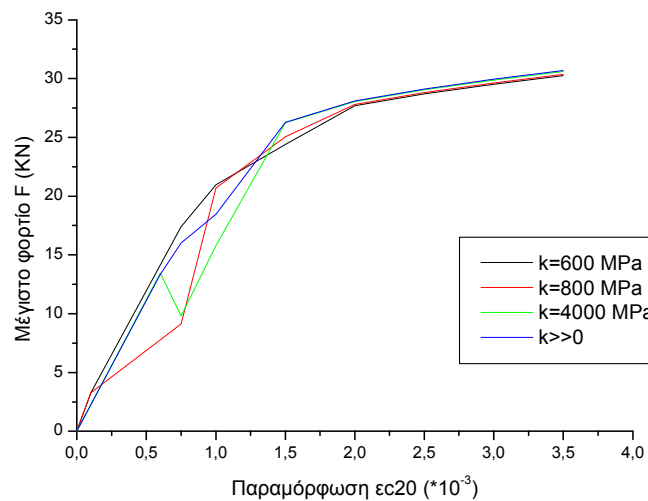
Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα για τις τρεις διαφορετικές τιμές του K_2 που εξετάστηκαν σχεδόν ταυτίζονται μεταξύ τους. Επομένως όταν υποτεθεί $K_2=2000$ MPa, δεν φαίνεται να υπάρχει ουσιαστική διαφορά στο διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης ανάλογα με την υποτιθέμενη τιμή του K_1 . Συγχρόνως είναι σαφές ότι οι αναλυτικές καμπύλες αποκλίνουν σημαντικά από τα πειραματικά αποτελέσματα. Ως εκ τούτου η σύγκλιση αναζητείται σε διαφορετική τιμή του K_2 .

β) Έστω $K_2=600$ MPa

Για την περίπτωση αυτή θεωρήθηκε το K_2 σταθερό και ίσο με 600 MPa και εξετάστηκαν οι περιπτώσεις που το K_1 παίρνει τιμές 600, 800, 1200 και 1500 MPa. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 3.1.7)



Σχήμα 3.1.7: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης της ενισχυμένης δοκού, για διγραμμική σχέση τ - ϵ_L και $K_2=600$ MPa



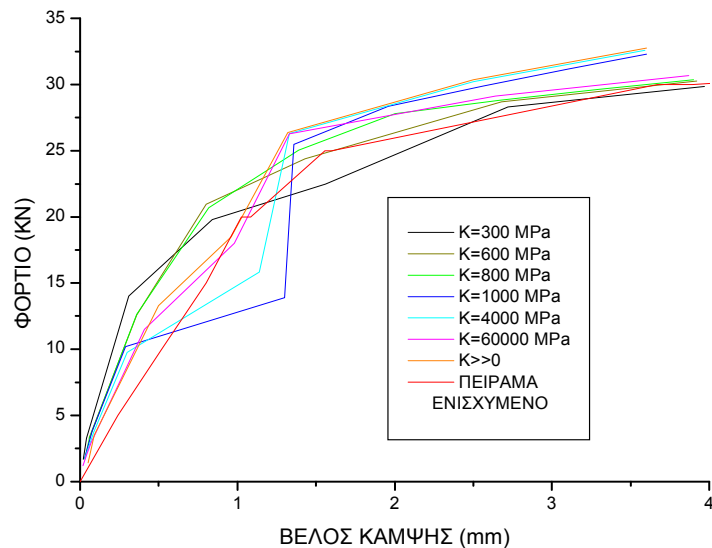
Σχήμα 3.1.8: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - παραμόρφωσης ϵ_{c20} , για γραμμική σχέση τ - ϵ_L και $K_2=600$ MPa

Από το διάγραμμα του Σχήματος 3.1.7 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το K_1 η κλίση στο τελευταίο τμήμα του διαγράμματος μικραίνει ελαφρώς, καθώς και ότι τα διαγράμματα για $K_1 = 1200$ και 1500 MPa παρουσιάζουν απότομη αλλαγή της κλίσης τους για φορτίο 11 και 13 KN.

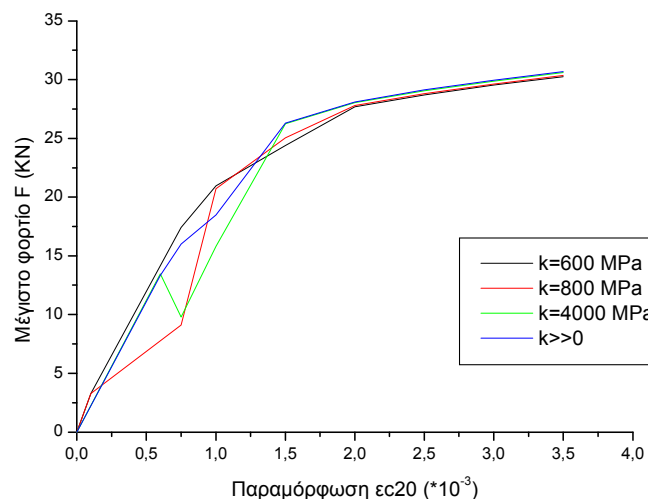
Το διάγραμμα για $K_1=K_2 = 600$ MPa παρατηρούμε πως προσεγγίζει αρκετά καλά αυτό του πειραματικού.

Ως εκ τούτου φαίνεται σκόπιμο στην συνέχεια η διερεύνηση της δυνατότητας προσομοίωσης της καμπύλης $\tau - \varepsilon_c$ μία απλή γραμμική σχέση της μορφής $\tau = K * \varepsilon_L$.

Η σύγκριση των αναλυτικών αποτελεσμάτων (για ένα εύρος τιμών $K=300$ MPa έως 100.000 MPa) με τα αντίστοιχα πειραματικά απεικονίζονται στο παρακάτω διαγράμματα (Σχήματα 3.1.9 και 3.1.10):



Σχήμα 3.1.9: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης της ενισχυμένης δοκού, για γραμμική σχέση $\tau - \varepsilon_L$



Σχήμα 3.1.10: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - παραμόρφωσης ε_{c20} , για γραμμική σχέση $\tau - \varepsilon_L$

Από το διάγραμμα του σχήματος 3.1.9, συμπεραίνεται ότι όσο αυξάνεται η τιμή του K , η κλίση του διαγράμματος φορτίου - βέλους κάμψης στο αρχικό του τμήμα μικραίνει, ενώ το μέγιστο φορτίο, εν γένει αυξάνεται και υπερβαίνει σημαντικά τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές. Η καλύτερη σύγκλιση φαίνεται να παρουσιάζεται για μικρές τιμές του K . Η περίπτωση $K=600$ MPa είναι αυτή που φαίνεται να προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα του δοκιμίου και κατά συνέπεια η τιμή του K που τελικά υιοθετείται στο πρόγραμμα για τις συγκρίσεις με το αντίστοιχο πειραματικό και για την περαιτέρω διερεύνηση είναι $K=600$ MPa. Στην συνέχεια ακολουθεί μία παραμετρική διερεύνηση για διάφορες τιμές του συντελεστή K προκειμένου να αξιολογηθεί η επιρροή του K στα αποτελέσματα που αφορούν την κατανομή των τάσεων στη θλιβόμενη ζώνη, την ροπή αντοχής της διατομής και το μέγεθος των διατμητικών τάσεων στην διεπιφάνεια.

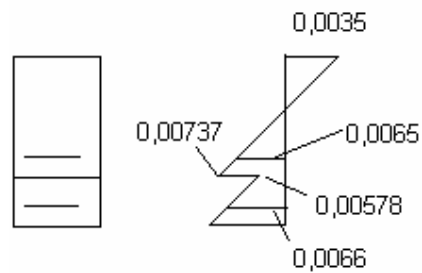
Αναλυτικά Αποτελέσματα για την Ενισχυμένη και την Μονολιθική Δοκό - Τελικές Συγκρίσεις με Πειραματικά Αποτελέσματα

α) ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗ ΔΟΚΟΣ

Με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε, θεωρώντας ότι στην διεπιφάνεια η σχέση διάτμητικής τάσης - παραμόρφωσης ολίσθησης είναι $\tau = K * \varepsilon_c$ όπου $K=600$ MPa, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το πρόγραμμα για την ενισχυμένη στο εφελκυσμένο πέλμα δοκό, παρουσιάζονται στον παρακάτω 3.1.1 και το Σχήμα 3.1.11:

ε_{c20}	-0,0035	
ε_{c10}	0,00737	
ε_{c2u}	0,00578	
ε_L	0,0016	
ε_{s0}	0,0065	
ε_{su}	0,0066	
M	5,67	KNm
F	30,26	KN
u	3,92	mm
τ	0,96	MPa
$1/r$	0,0836	1/m

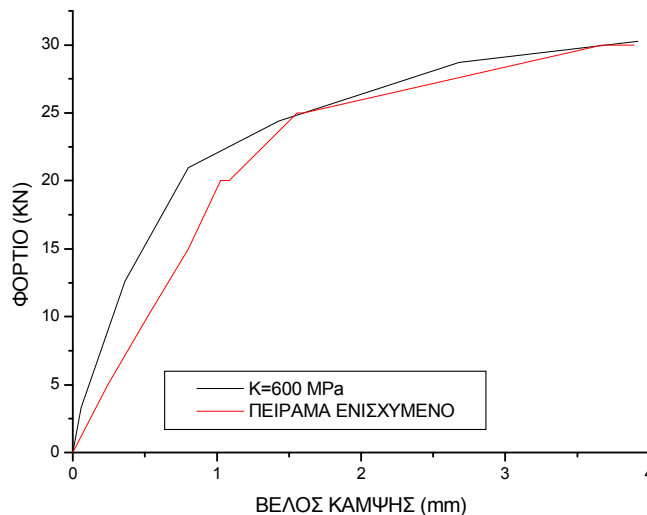
Πίνακας 3.1.1: Αναλυτικά αποτελέσματα για την ενισχυμένη δοκό



Σχήμα 3.1.11: Κατανομή παραμορφώσεων στην μεσαία διατομή της ενισχυμένης δοκού

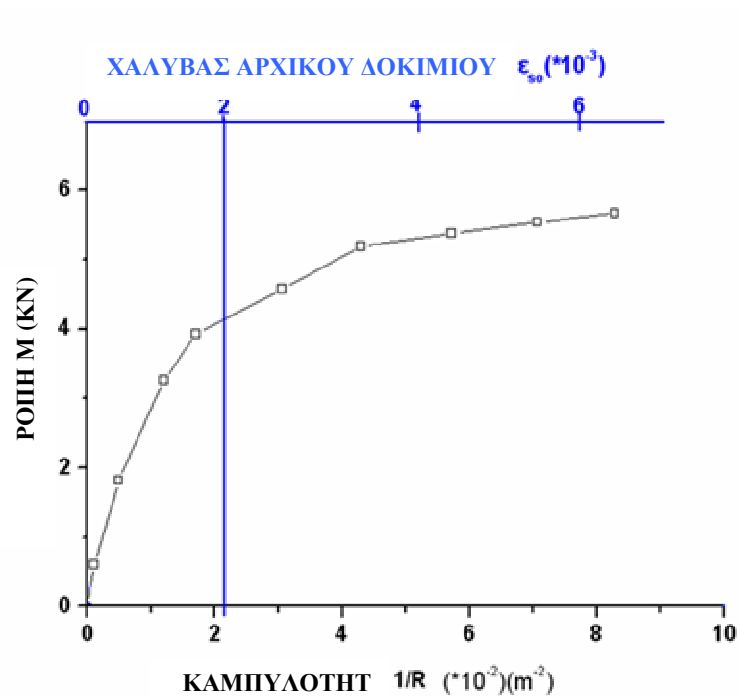
Η καμπύλη φορτίου - βέλους κάμψης που προκύπτει από την ανάλυση σε σύγκριση με την αντίστοιχη πειραματική φαίνεται Σχήμα 3.1.12.

Είναι σαφές ότι η πρόβλεψη της συμπεριφοράς του δοκιμίου στην μετ' ελαστική του περιοχή είναι αρκετά ικανοποιητική ενώ υπολείπεται στα αρχικά στάδια της φόρτισης.

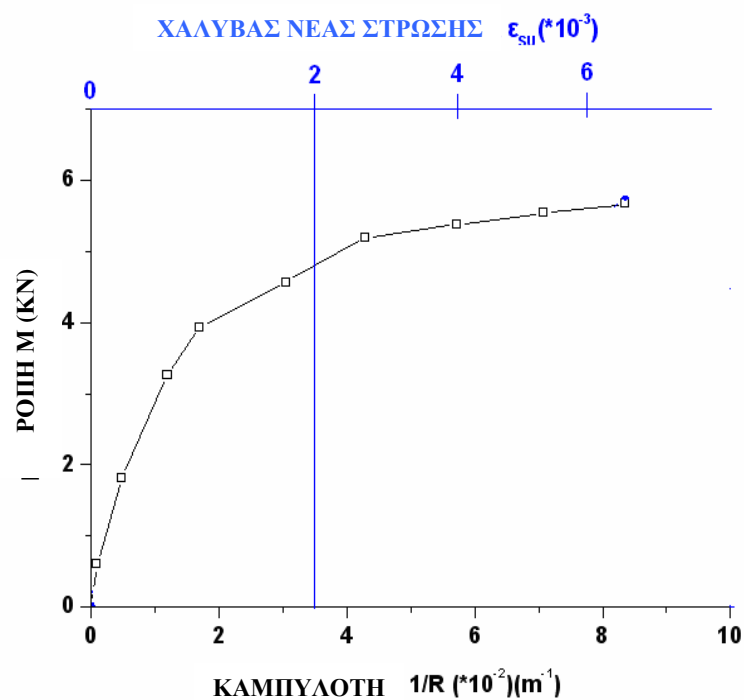


Σχήμα 3.1.12: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης της ενισχυμένης δοκού, με το αντίστοιχο πειραματικό.

Ακολουθούν τα διαγράμματα της ροπής κάμψης με την καμπυλότητα και την παραμόρφωση του χάλυβα του αρχικού δοκιμίου καθώς και με την πρόσθετη στρώση (Σχήματα 3.1.13 και 3.1.14).



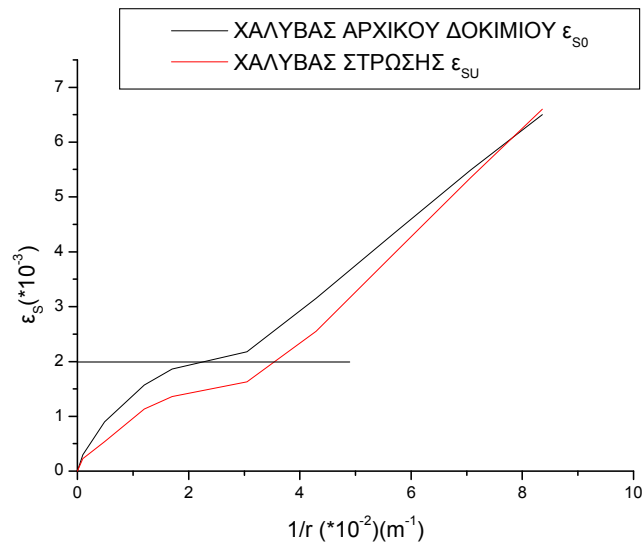
Σχήμα 3.1.13: Διάγραμμα ροπής - καμπυλότητας και παραμόρφωσης χάλυβα αρχικού δοκιμίου



Σχήμα 3.1.14: Διάγραμμα ροπής - καμπυλότητας και παραμόρφωσης χάλυβα πρόσθετης στρώσης

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι η ροπή μεταβάλλεται σχεδόν παραβολικά με την καμπυλότητα και η κλίση του διαγράμματος αυτού παρουσιάζει την αναμενόμενη αλλαγή όταν η παραμόρφωση του χάλυβα φτάνει το 0,2%.

Στο Σχήμα 3.1.15 παρουσιάζεται ένα συγκριτικό διάγραμμα παραμόρφωσης χάλυβα - καμπυλότητας, για το χάλυβα της πρόσθετης στρώσης και για το χάλυβα του αρχικού δοκιμίου.



Σχήμα 3.1.15: Συγκριτικό διάγραμμα παραμόρφωσης χάλυβα - καμπυλότητας, για το χάλυβα της πρόσθετης στρώσης και για το χάλυβα του αρχικού δοκιμίου

Από το συγκριτικό αυτό διάγραμμα είναι φανερό πως ο χάλυβας της πρόσθετης στρώσης διαρρέει «καθυστερημένα», δηλαδή σε μεγαλύτερες τιμές καμπυλότητας σε σχέση με τον χάλυβα του αρχικού δοκιμίου.

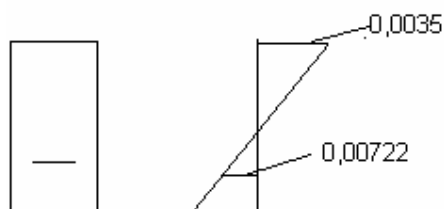
β) ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟ

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αναλυτικά αποτελέσματα για το μονολιθικό δοκίμιο και συγκρίνονται τα αποτελέσματα με ένα ενισχυμένο στο οποίο ο συντελεστή δυσκαμψίας στην διεπιφάνεια Κ έχει λάβει πολύ μεγάλες τιμές, αναμένοντας ως ένδειξη ορθής κατασκευής των προγραμμάτων, την σύγκλιση των αποτελεσμάτων τους καθώς και την σύγκλιση με τα πειραματικά αποτελέσματα του μονολιθικού.

Συνολικά τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα (πίνακας 3.1.2).

	ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟ FORTRAN	Θεώρηση ενισχυμένου με $K \gg 0$
ϵ_{c20}	-0,0035	-0,0035
ϵ_{s0}	0,00722	0,00722
M	5,751 KNm	5,741 KNm
F	30,676 KN	30,623 KN
U	3,865 mm	3,865 mm
T	0 MPa	0,058 MPa
1/r	0,0825 1/m	0,0825 1/m

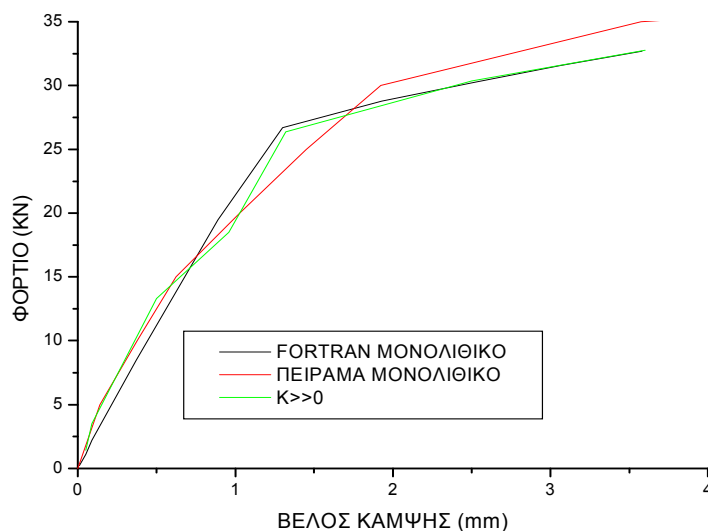
Πίνακας 3.1.2: Αποτελέσματα των δύο προγραμμάτων FORTRAN για τη μονολιθική δοκό



Σχήμα 3.1.16: Κατανομή παραμορφώσεων στην μεσαία διατομή της μονολιθικής δοκού

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τις τιμές που παρουσιάζονται στον Πιν. 3.1.2 τα αποτελέσματα των δύο προγραμμάτων συμπίπτουν.

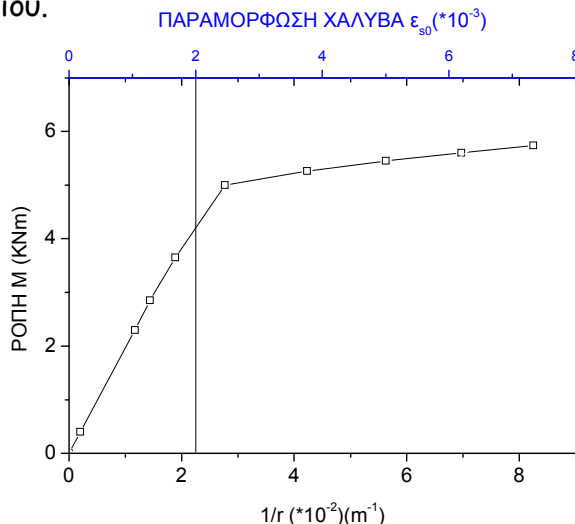
Η σύγκριση των αναλυτικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.17.



Σχήμα 3.1.17: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης της μονολιθικής δοκού με το αντίστοιχο πειραματικό

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί και από το διάγραμμα, αν στην περίπτωση του ενισχυμένου δοκιμίου το K θεωρηθεί πάρα πολύ μεγάλο, σχεδόν άπειρο, τότε προσεγγίζει με πάρα πολύ μεγάλη ακρίβεια το μονολιθικό.

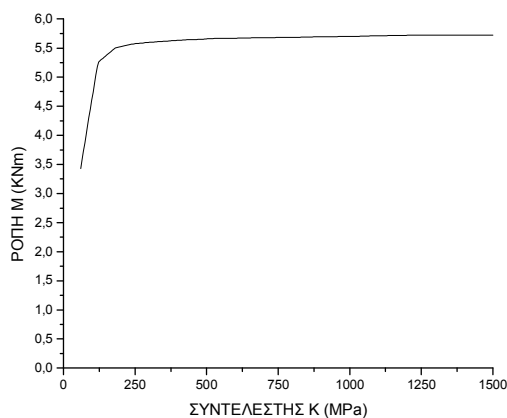
Στο διάγραμμα του Σχήματος 3.1.18 παρουσιάζεται η καμπύλη μεταβολής της ροπής κάμψης με την καμπυλότητα και την παραμόρφωση του χάλυβα του μονολιθικού δοκιμίου.



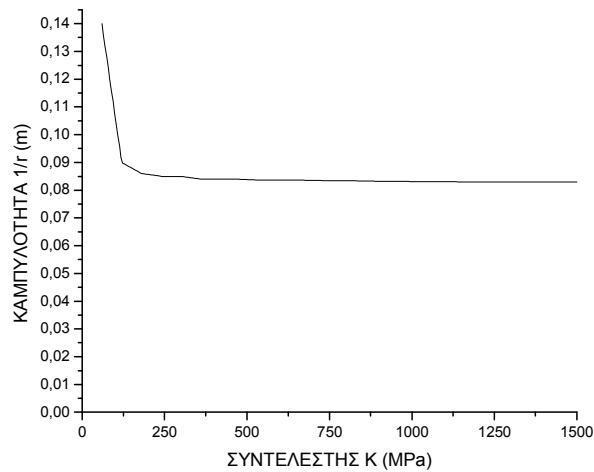
Σχήμα 3.1.18: Διάγραμμα ροπής - καμπυλότητας-παραμόρφωσης χάλυβα μονολιθικού δοκιμίου

Επιρροή του Συντελεστή Δυσκαμψίας Διεπιφάνειας

Θεωρώντας ότι η σχέση διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης στη διεπιφάνεια δίνεται από τη σχέση $\tau = K * \epsilon_L$ για διάφορες τιμές του Συντελεστή Δυσκαμψίας Διεπιφάνειας K με τη βοήθεια του προγράμματος που κατασκευάστηκε, υπολογίζονται οι καμπύλες της ροπής αντοχής και της αντίστοιχης καμπυλότητας συναρτήσει του συντελεστή K , παρουσιάζονται στα σχ. 3.1.19 και 3.1.20.



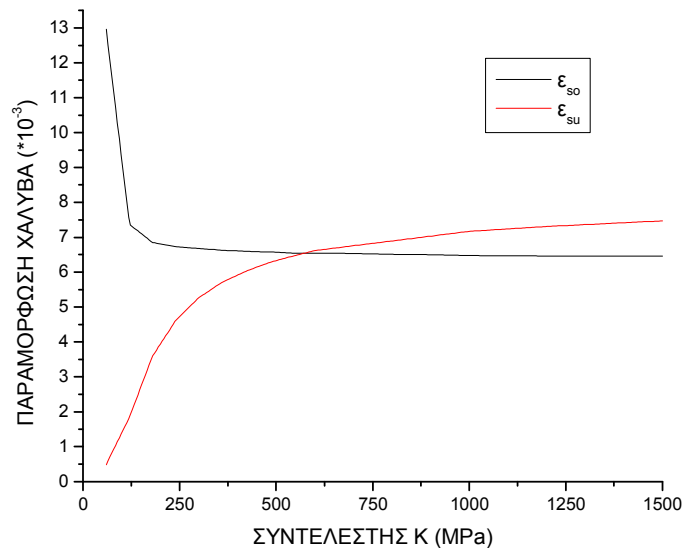
Σχήμα 3.1.19: Μεταβολή της ροπής αντοχής συναρτήσει του συντελεστή K



Σχήμα 3.1.20: Μεταβολή της καμπυλότητας αστοχίας συναρτήσει του συντελεστή K

Όπως είναι φανερό από τα διαγράμματα των Σχημάτων 3.1.19 και 3.1.20, η επιρροή του συντελεστή K στην οριακή κατάσταση αστοχίας, περιορίζεται σε τιμές που δεν ξεπερνούν τα 200 MPa. Για τιμές του συντελεστή K μέχρι περίπου 200 MPa, παρατηρείται σημαντική αύξηση της ροπής αντοχής ενώ για $K \geq 200$ MPa, η ροπή αντοχής παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητη.

Αντίστοιχα η καμπυλότητα αστοχίας για τιμές του συντελεστή K μέχρι 200 MPa, μειώνεται όσο αυξάνει το K, και για $K \geq 200$ MPa, η τιμή της παραμένει ουσιαστικά σταθερή.



Σχήμα 3.1.21: Μεταβολή της παραμόρφωσης του χάλυβα στο αρχικό δοκίμιο και στην στρώση ενίσχυσης, με τον συντελεστή K

Στο Σχήμα 3.1.21 παρουσιάζεται η επίδραση του συντελεστή K στην παραμόρφωση του χάλυβα στην φάση αστοχίας του δοκιμίου. Παρατηρείται ότι: για $K \leq 200 \text{ MPa}$ η παραμόρφωση του χάλυβα του αρχικού δοκιμίου φθίνει απότομα, σε αντίθεση με την παραμόρφωση του χάλυβα της στρώσης ενίσχυσης η οποία αυξάνεται απότομα. Για τιμές του συντελεστή K μεγαλύτερες από 200 MPa , οι τιμές και των δύο παραμορφώσεων σχεδόν σταθεροποιούνται. Είναι χαρακτηριστικό ότι για μικρές τιμές του συντελεστή K η ενεργοποίηση του χάλυβα της ενίσχυσης είναι πολύ μικρή και υπολείπεται της αντίστοιχης ενεργοποίησης του αρχικού χάλυβα. Η εικόνα αντιστρέφεται όταν ο συντελεστής K ξεπερνά την τιμή $K \approx 600 \text{ MPa}$.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις αναλύσεις που προηγήθηκαν και τις συγκρίσεις που έγιναν με τα πειραματικά αποτελέσματα προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Το πρόγραμμα για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένο με νέες στρώσεις, που αναπτύχθηκε σε γλώσσα FORTRAN, μπορεί να είναι ένα καλό αναλυτικό εργαλείο, που προσπαθεί την τροφοδοσία του με μια ακριβή σχέση διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης στην διεπιφάνεια.
2. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με βάση το παραπάνω πρόγραμμα, για δοκίμιο ενισχυμένο με πρόσθετη στρώση οπλισμένο σκυροδέματος στο εφελκόμενο πέλμα, παρουσιάζουν αρκετά καλή σύγκλιση με τα αντίστοιχα πειραματικά.
3. Στη περίπτωση της ενισχυμένης δοκού (με στρώση οπλισμένου σκυροδέματος στο εφελκόμενο πέλμα), που εξετάστηκε, παρατηρήθηκε ότι για τιμές του συντελεστή K μέχρι περίπου 200 MPa , η ροπή αντοχής και η παραμόρφωση του χάλυβα του αρχικού δοκιμίου αυξάνεται ενώ μειώνεται η καμπυλότητα αστοχίας και η παραμόρφωση του χάλυβα της στρώσης ενίσχυσης. Για $K > 200 \text{ MPa}$, οι τιμές των παραπάνω μεγεθών παραμένουν ουσιαστικά αμετάβλητες.
Για μικρές τιμές του συντελεστή K η ενεργοποίηση του χάλυβα της ενίσχυσης είναι πολύ μικρή και υπολείπεται της αντίστοιχης ενεργοποίησης του αρχικού χάλυβα. Η εικόνα αντιστρέφεται όταν ο συντελεστής K ξεπερνά την τιμή $K \approx 600 \text{ MPa}$.
4. Η καλύτερη προσέγγιση της σχέσης διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης στη διεπιφάνεια της συγκεκριμένης δοκού που μελετήθηκε, είναι γραμμική και συγκεκριμένα είναι $\tau = 600 \cdot \varepsilon_L \text{ (MPa)}$.
5. Το πρόγραμμα που κατασκευάστηκε για την επίλυση ενισχυμένης στο εφελκόμενο πέλμα δοκού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την επίλυση μονολιθικής δοκού υποθέτοντας στη σχέση $\tau = K \cdot \varepsilon_L$, $K \gg 0$.

Βιβλιογραφία

- 3.1-1 **Δρίτσος Σ.** (2002), "Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα", Εκδ. Πανεπ. Πατρών, Πάτρα.
- 3.1-2 **Ζερβός Ν., Μπερδέκας Β.** (1995), " Πειραματική Μελέτη Ενίσχυσης Δοκών με Νέες Στρώσεις Σκυροδέματος", Διπλωματική εργασία, Πάτρα.
- 3.1-3 **Φαρδής Μ.** (2000), " Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος ", Πάτρα.
- 3.1-4 **Dritsos S.** (1994) "Ultimate Strength of Flexurally Strengthened R.C. Members", Proc. of 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, Vol. 3, pp. 1637-1642.
- 3.1-5 **Saiidi M. , Vrontinos S. & Douglas B.** (1990), "Model for the Response of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Concrete Overlays", ACI Structural, Vol.87, No 6, p.p.687-695.