



«**ΦΑΕΘΩΝ**: Λογισμικό για Ανάλυση Κρίσιμων Διατμητικά Υποστυλωμάτων Οπλισμένου Σκυροδέματος»

Κωνσταντίνος Γ. Μεγαλοικονόμου

Ερευνητής Μηχανικός

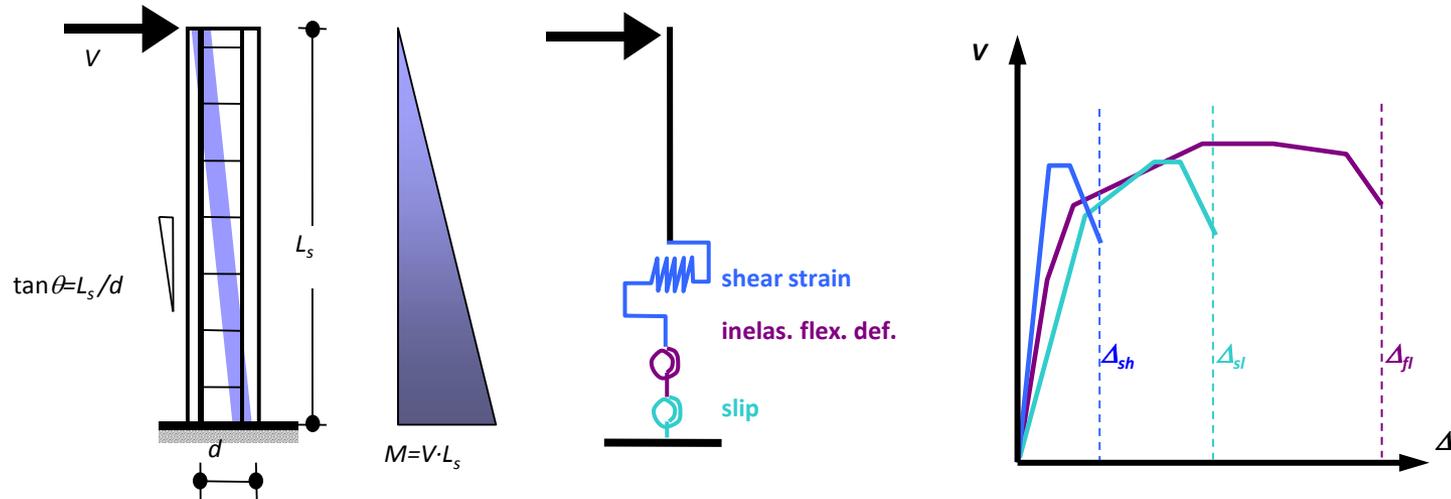
Κέντρο Συστημάτων Έγκαιρης Προειδοποίησης

Γερμανικό Ερευνητικό Κέντρο για Γεωεπιστήμες (GFZ)

kmegal@gfz-potsdam.de

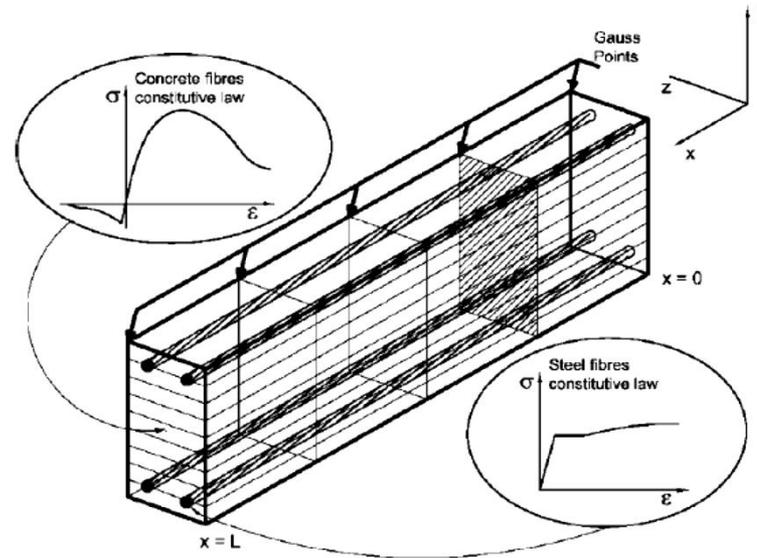


Αναγκαία η προσομοίωση υποστυλωμάτων για όλους τους τύπους αστοχίας:



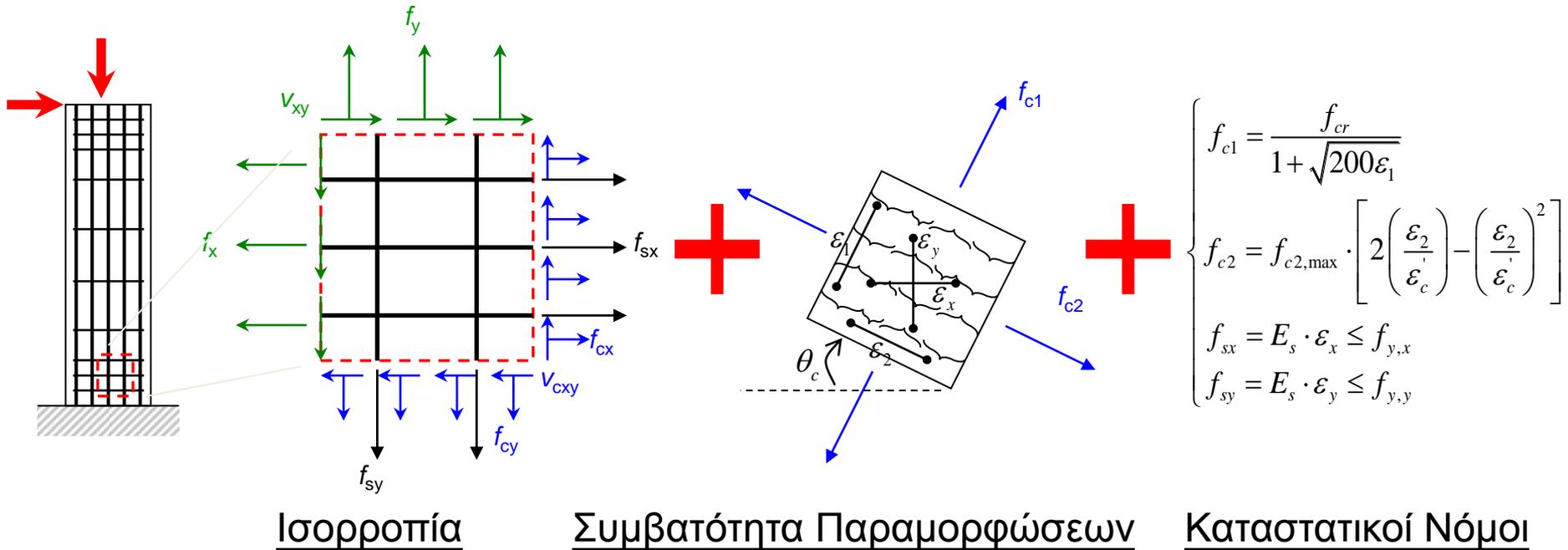
- Η στατική σχέση μεταξύ τέμνουσας και καμπτικής ροπής στο διατμητικό άνοιγμα ενός προβόλου είναι παρόμοια με αυτή που εμφανίζεται κατά μήκος ενός δομικού αμφίπακτου στοιχείου πλαισίου που εκτείνεται από το σημείο μηδενισμού της ροπής μέχρι την πάκτωση.
- Οι παραμορφώσεις οφείλονται σε κάμψη, διάτμηση και ολίσθηση λόγω εξόλκευσης του οπλισμού από την στήριξη ή την μάτιση. Αυτοί οι μηχανισμοί θεωρούνται ότι ενεργούν σε σειρά με αποτέλεσμα οι επιδράσεις τους να θεωρούνται προσθετικές όπως υποδεικνύεται στο σχήμα.

Προσομοίωση της διάτμησης με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία με «ίνες»:

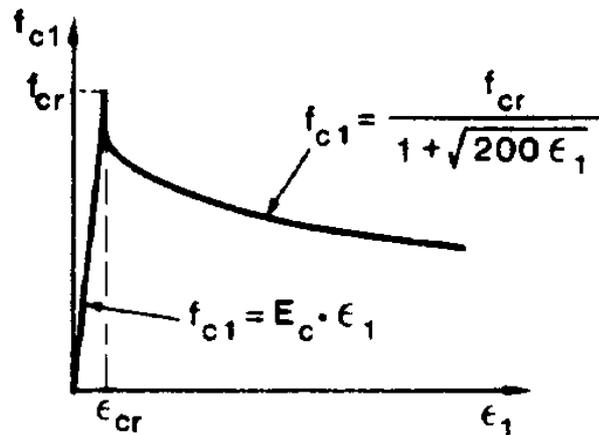
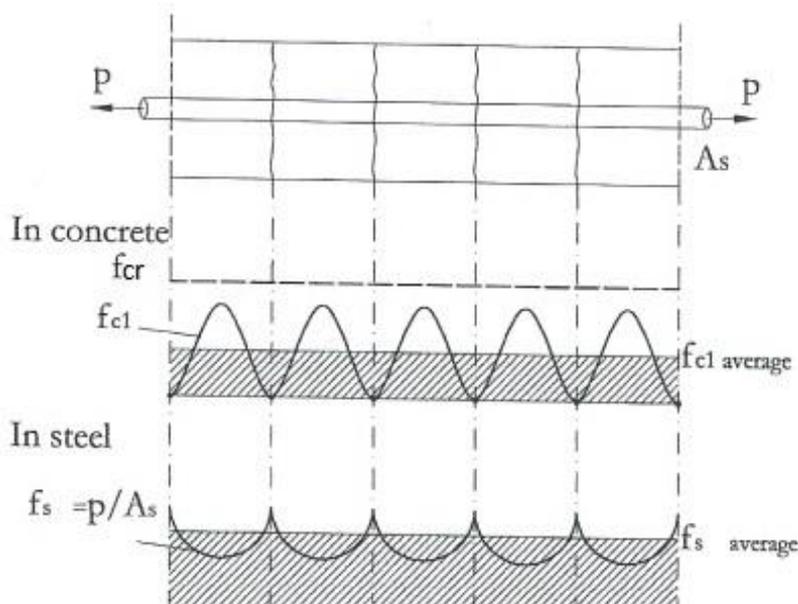


- Το στοιχείο δοκού - υποστυλώματος είναι διακριτοποιημένο σε σημεία ολοκλήρωσης - διατομές.
- Βασίζεται στην διακριτοποίηση των διατομών του στοιχείου σε φέτες / ίνες όπου με κατάλληλους καταστατικούς νόμους υλικού υπολογίζονται οι δυνάμεις της διατομής.
- Είναι στοιχεία κατανεμημένης ανελαστικότητας και βασίζονται είτε στην μέθοδο δυσκαμψίας είτε στην μέθοδο ευκαμψίας.

Σκυρόδεμα -Θεωρία Διαγώνιου Θλιπτικού Πεδίου (MCFT – Vecchio & Collins 1986):



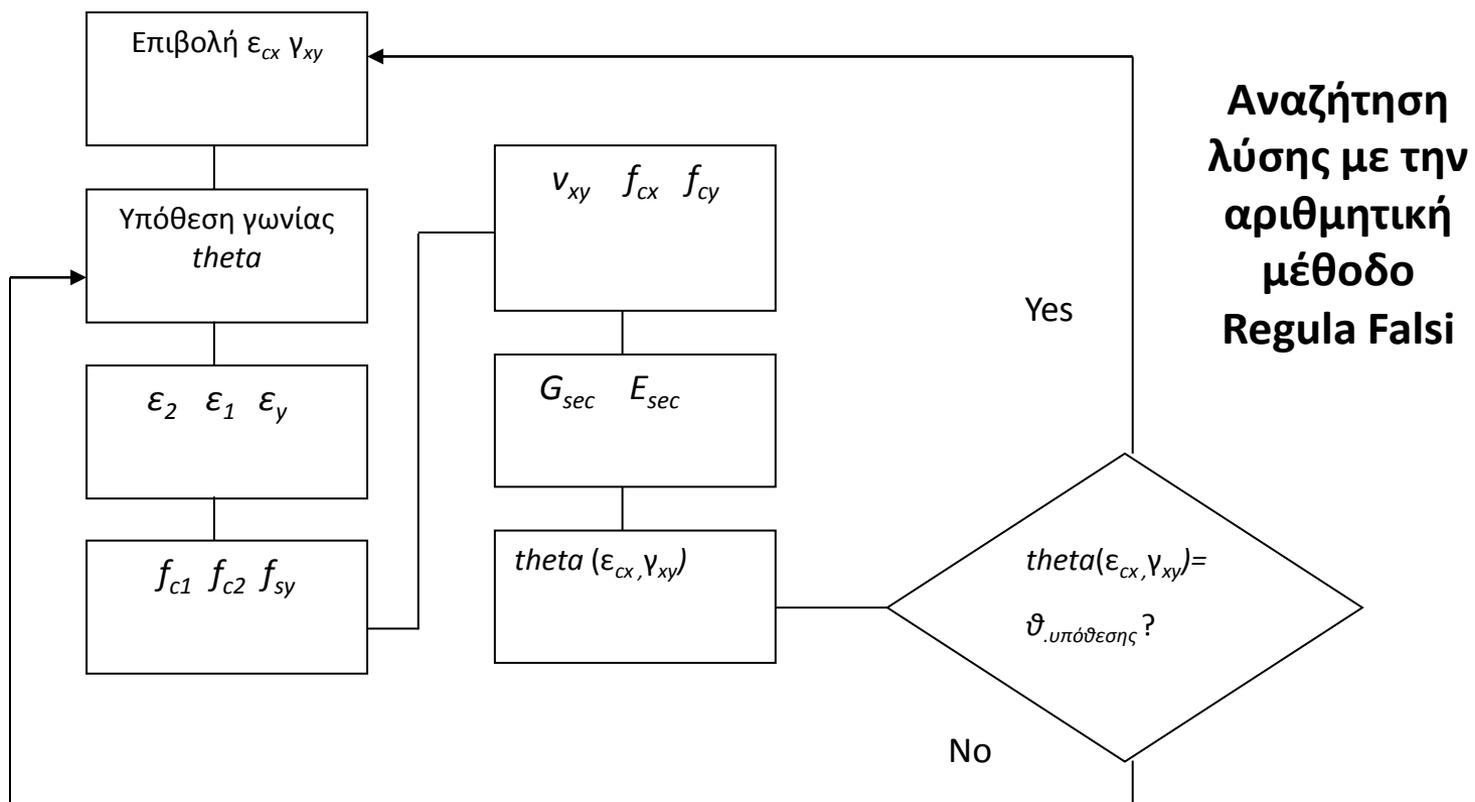
Συνάφεια -Θεωρία Διαγώνιου Θλιπτικού Πεδίου (MCFT – Vecchio & Collins 1986):



- Λόγω της επιρροής της συνάφειας, εφελκυστικές τάσεις αναπτύσσονται στο σκυρόδεμα μεταξύ των ρωγμών. Στην MCFT το φαινόμενο αυτό γνωστό και ως εφελκυστική δυσκαμψία μοντελοποιείται με την εφελκυστική αντοχή να μειώνεται με την αύξηση της κύριας εφελκυστικής παραμόρφωσης.

- Με βάση την θεώρηση της MCFT μια μέση εφελκυστική τάση σκυροδέματος μεταδίδεται στην περιοχή των ρωγμών. Αυτή η εφελκυστική τάση περιορίζεται από την διαρροή του οπλισμού στην περιοχή των ρωγμών.

Τάσεις στις «ίνες» της διατομής - Καταστατικός νόμος με βάση την MCFT:



Προσδιορισμός δυνάμεων και δυσκαμψίας διατομής:

Δυνάμεις Διατομής

$$f_s(x) = \int B_s^T(y) \cdot \sigma(x, y) dA$$

$$f_s(x) = \begin{Bmatrix} N \\ M \\ V \end{Bmatrix} \quad \sigma(x, y) = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

$$B_s(y) = \begin{bmatrix} 1 & -y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$N = \int \sigma_x dA = \text{Αξονική Δύναμη}$$

$$V = \int \tau_{xy} dA = \text{Τέμνουσα}$$

$$M = - \int y \sigma_x dA = \text{Ροπή}$$

Δυσκαμψία Διατομής

$$k_s = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{s1}}{\partial e_1} & \frac{\partial f_{s1}}{\partial e_2} & \frac{\partial f_{s1}}{\partial e_3} \\ \frac{\partial f_{s2}}{\partial e_1} & \frac{\partial f_{s2}}{\partial e_2} & \frac{\partial f_{s2}}{\partial e_3} \\ \frac{\partial f_{s3}}{\partial e_1} & \frac{\partial f_{s3}}{\partial e_2} & \frac{\partial f_{s3}}{\partial e_3} \end{bmatrix}$$

$$\sigma(x, y) = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

$$\varepsilon(x, y) = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

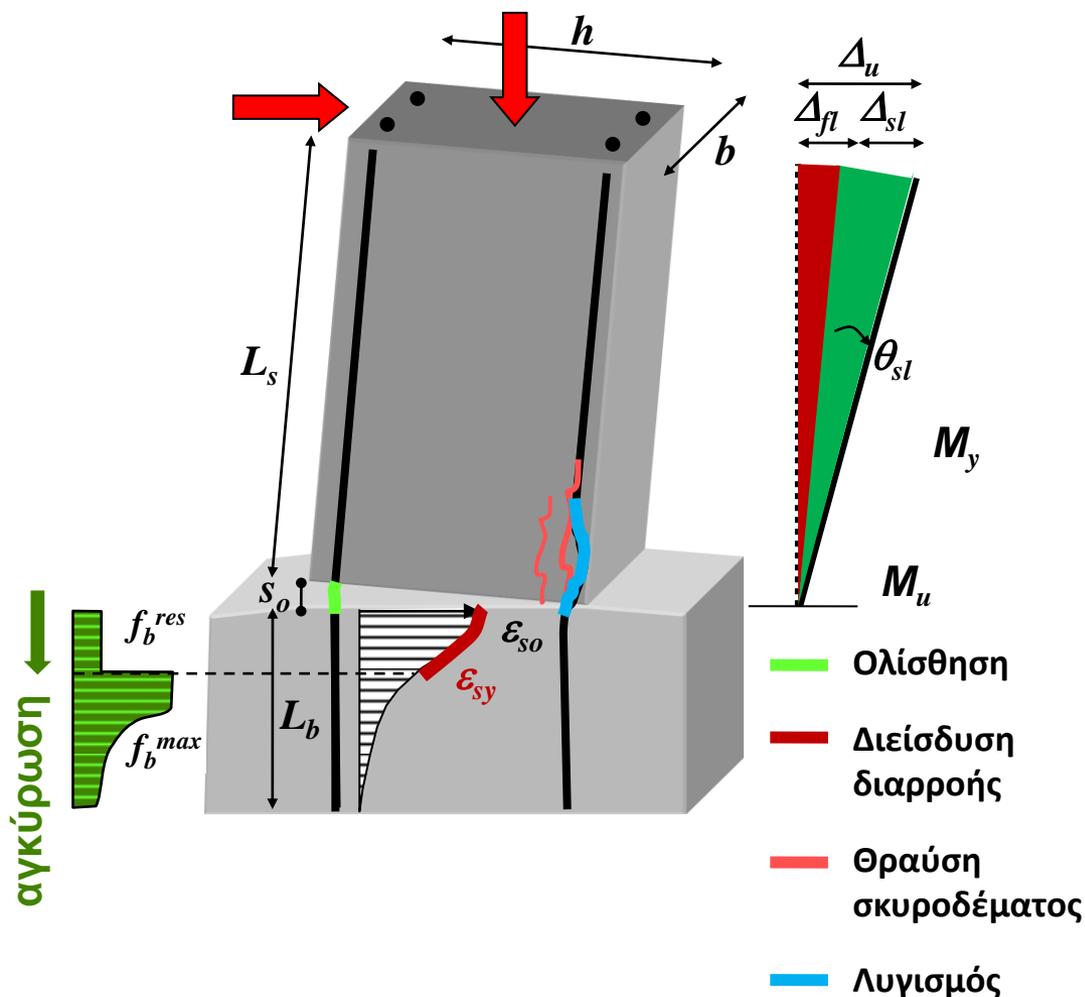
$$\frac{d\sigma(x, y)}{d\varepsilon(x, y)} = \begin{bmatrix} E_m & 0 \\ 0 & G_m \end{bmatrix}$$

$$k_s = \frac{\partial f_s}{\partial e} = \int B_s^T(y) \cdot \frac{d\sigma(x, y)}{d\varepsilon(x, y)} \cdot \frac{\partial \varepsilon(x, y)}{\partial e} dA = \int B_s^T(y) \cdot \frac{d\sigma(x, y)}{d\varepsilon(x, y)} B_s(y) dA$$

$$N = \sum_{i=1}^{n.layer} \sigma_x^i A^i \text{ and } V = \sum_{i=1}^{n.layer} \tau_{xy}^i A_s^i \text{ and } M = - \sum_{i=1}^{n.layer} \sigma_x^i y^i A^i$$

Σημείωση: Παραβολικό διάγραμμα διατμητικών παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής με την μέγιστη τιμή (γ_{xy}) στον ουδέτερο άξονα.

Στροφή του υποστυλώματος λόγω εξόλκευσης των εφελκόμενων ράβδων



αγκύρωση

- Η ανάπτυξη της καμπτικής ροπής διαρροής στις πλαστικές αρθρώσεις των στοιχείων πλαισίου είναι συνώνυμη με την **διείσδυση της παραμόρφωσης διαρροής στην αγκύρωση.**

- Η διείσδυση της διαρροής καταστρέφει την διεπιφάνεια της συνάφειας ράβδου – σκυροδέματος:

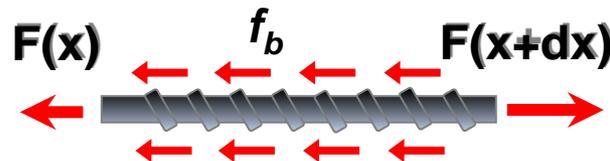
→ **Μείωση της πλαστικής στρώσης του στοιχείου λόγω κάμψης (μείωση της ικανότητας παραμόρφωσης του οπλισμού)**

→ **και αύξηση την συνεισφορά της εξόλκευσης ράβδου στην συνολική στρώση του στοιχείου.**

Συνάφεια οπλισμού-σκυροδέματος:

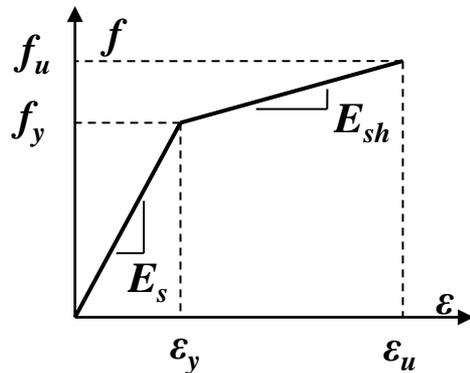
Οι βασικές εξισώσεις που διέπουν το πρόβλημα της συνάφειας:

- ισορροπία δυνάμεων σε στοιχειώδες τμήμα ράβδου μήκους dx
- Κινηματική σχέση: Η ολίσθηση της ράβδου ως η διαφορά της συσσωρευμένης παραμόρφωσης των δύο υλικών (Tassios and Yannopoulos 1981, Filippou et. al. 1983):

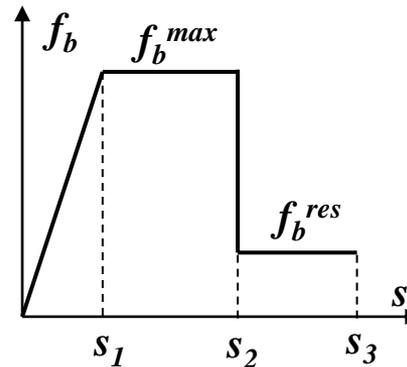


$$\frac{df}{dx} = -\frac{4}{D_b} f_b \quad + \quad \frac{ds}{dx} = -(\varepsilon - \varepsilon_c) \cong -\varepsilon$$

Καταστατικοί Νόμοι

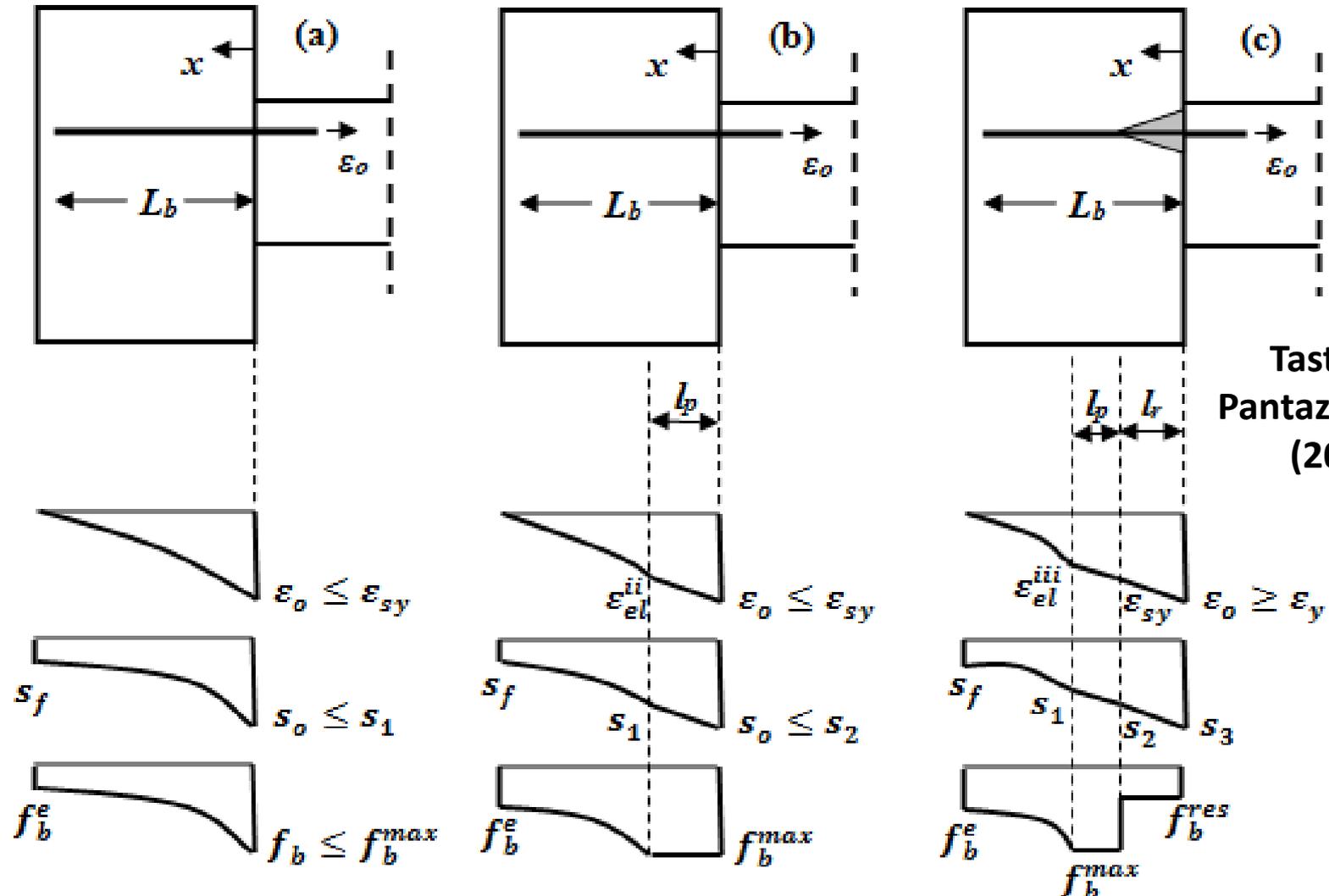


χαλύβδινης ράβδου οπλισμού



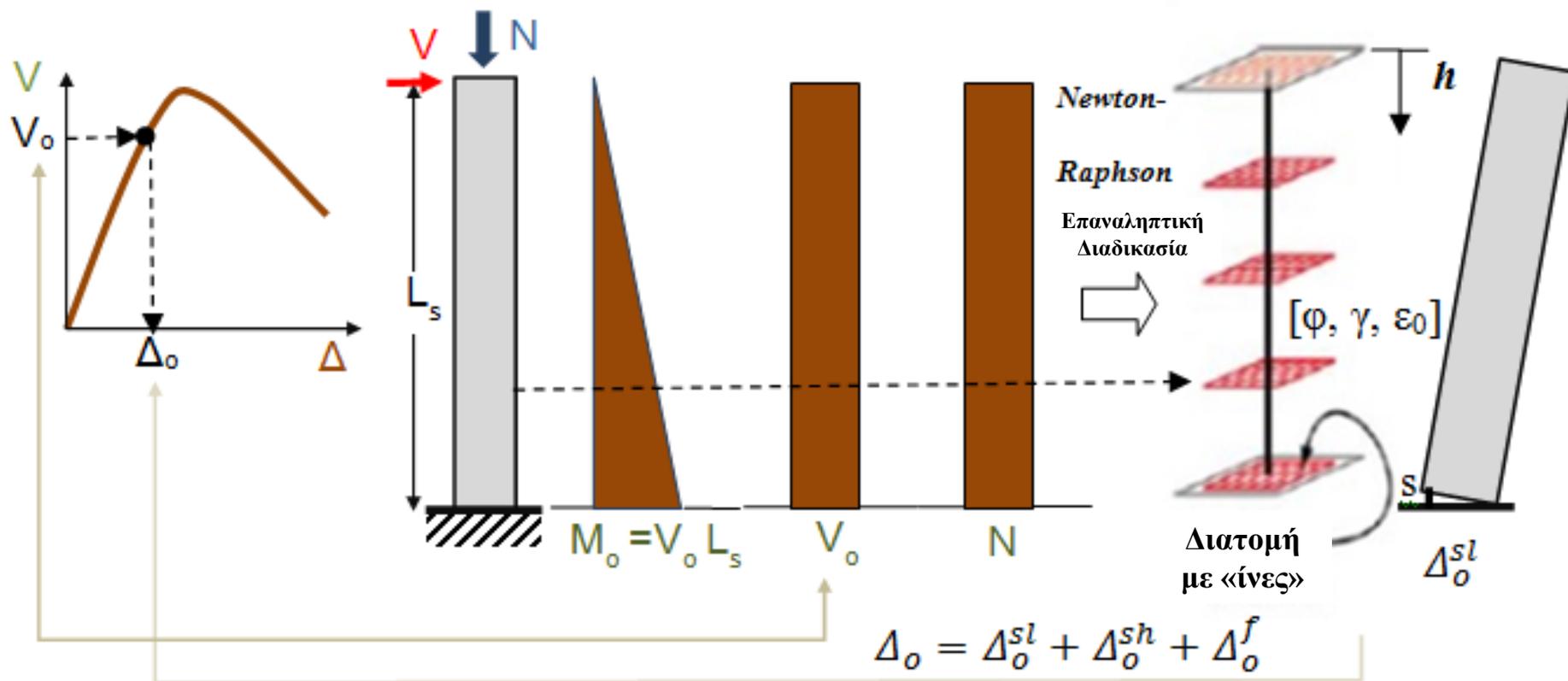
τοπικής συνάφειας – ολίσθησης

Κατανομές Παραμόρφωσης, Ολίσθησης και Συνάφειας στην Αγκύρωση :



Tastani &
Pantazopoulou
(2013)

Καμπύλη Αντίστασης Κρίσιμου Διατμητικά Υποστυλώματος Ο.Σ. - ΦΑΕΘΩΝ:

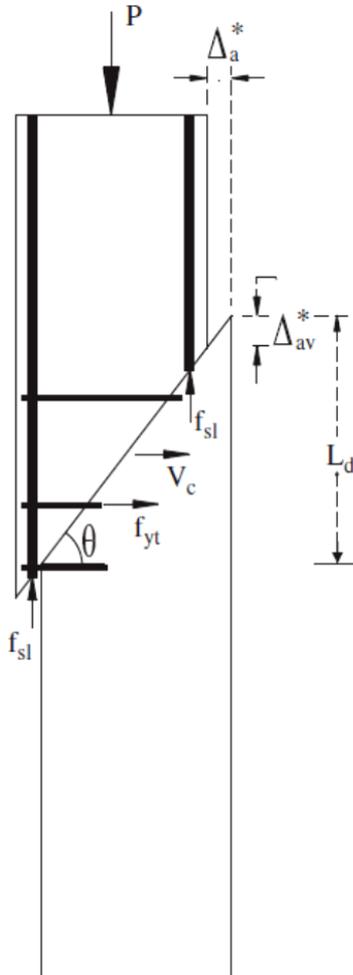


$$\Delta_o^{sh} = \int_0^{L_s} \gamma(h) \cdot dh$$

$$\Delta_o^f = \int_0^{L_s} \varphi(h) \cdot h \cdot dh$$

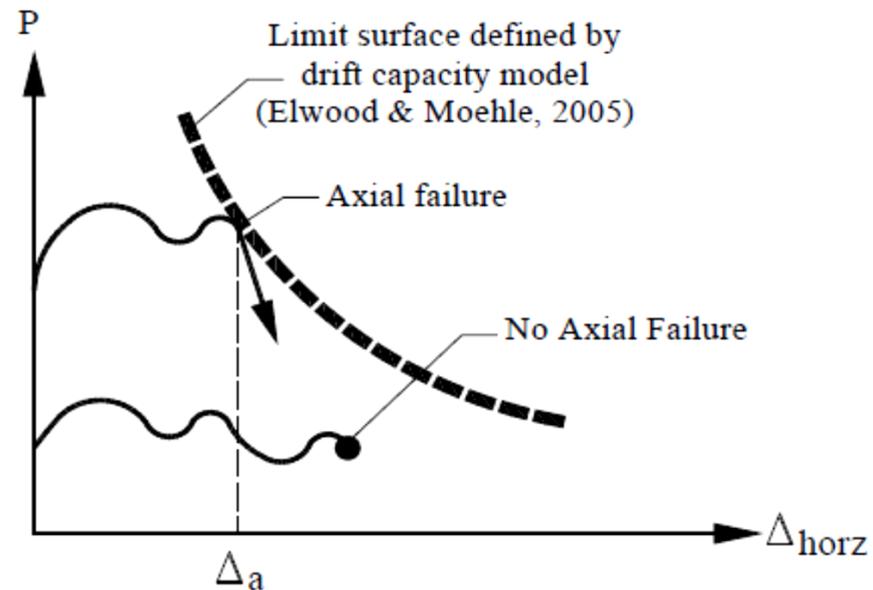
$$\Delta_o^{sl} = \frac{s}{(d - 0.4c_x)} \cdot L_s$$

Μετατόπιση απώλειας παραλαβής αξονικού φορτίου:



- Elwood and Moehle (2005)

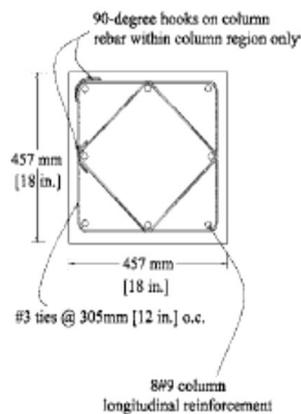
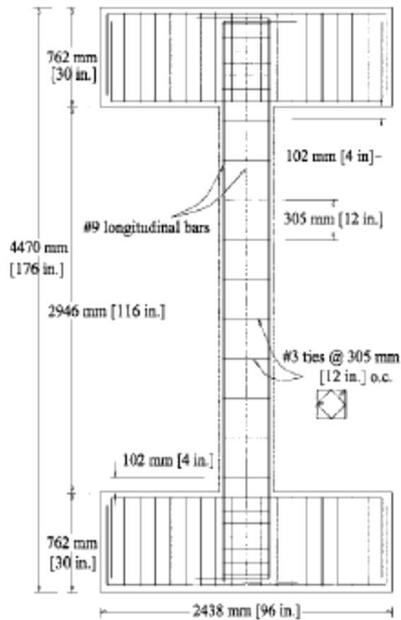
$$\left(\frac{\Delta}{L}\right)_{axial} = \frac{4}{100} \frac{1 + (\tan 65^\circ)^2}{\left[\tan 65^\circ + P \cdot \left(\frac{s}{A_{st} \cdot f_{yt} \cdot d_c \cdot \tan 65^\circ}\right)\right]}$$



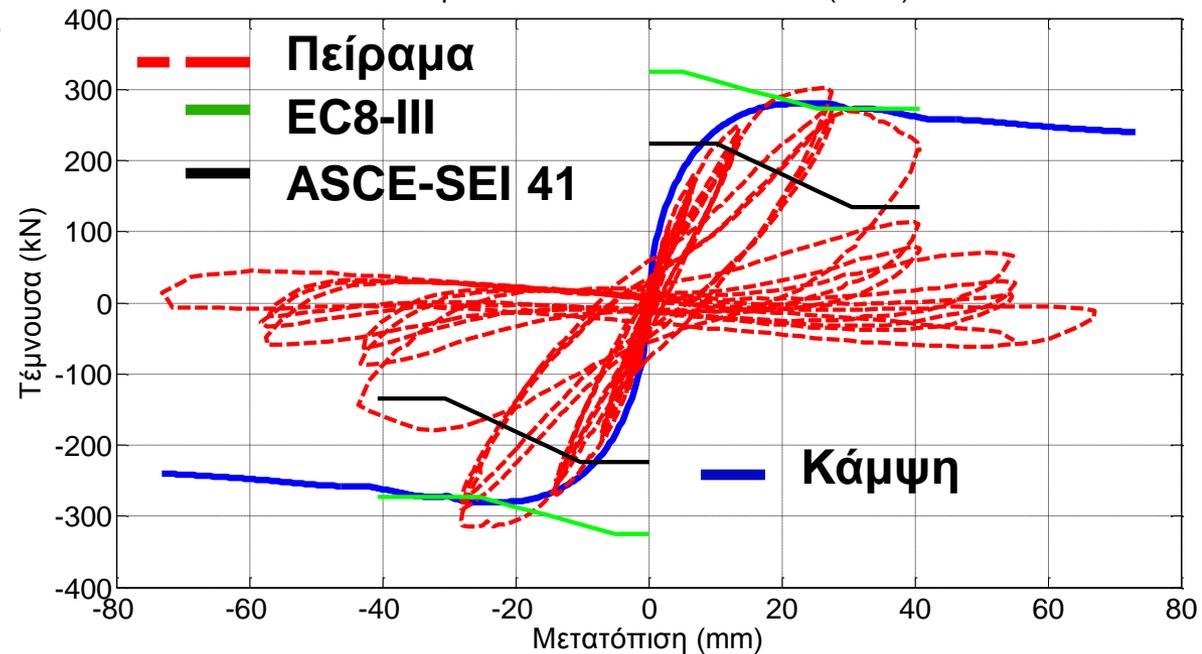
Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα:

Πρόβολος

Δοκίμιο 1 από Sezen and Moehle (2006)



**Sezen &
Moehle
(2006)**



Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα:

Phaethon

File About

Geometry

Cross-Section Type
 Rectangular Circular

h (mm) = 457.2 D (mm) =

b (mm) = 457.2

Concrete

fc (MPa) = 21.1 fcr (MPa) = 1.516

epc0 = 0.002 ecr = 0.00007184

Reinforcement

Longitudinal

n.Mid = 1 nBars = 4

Area of section reinforcement layers

Dbar (mm) =

Es (MPa) = 200000

fy (MPa) = 434 Eh (MPa) = 0.0 Cov (mm) = 65.13

Transversal

rsy = 0.0025

fyy (MPa) = 476

Sp (mm) = 304.8

n.StLegs = 3.41

Dt (mm) = 9.525

Solution Procedures

nIP.Sec = 10 IntTyp.Sec = Midpoint N (kN) = 667 Compressive N Tensile N

Pushover **Moment - Curvature**

Ls (mm) = 1473 nIP.Ls = 5

NoPushSteps = 65 IntTyp.Ls = Gauss-Lobatto

PushStep (kN) = 5

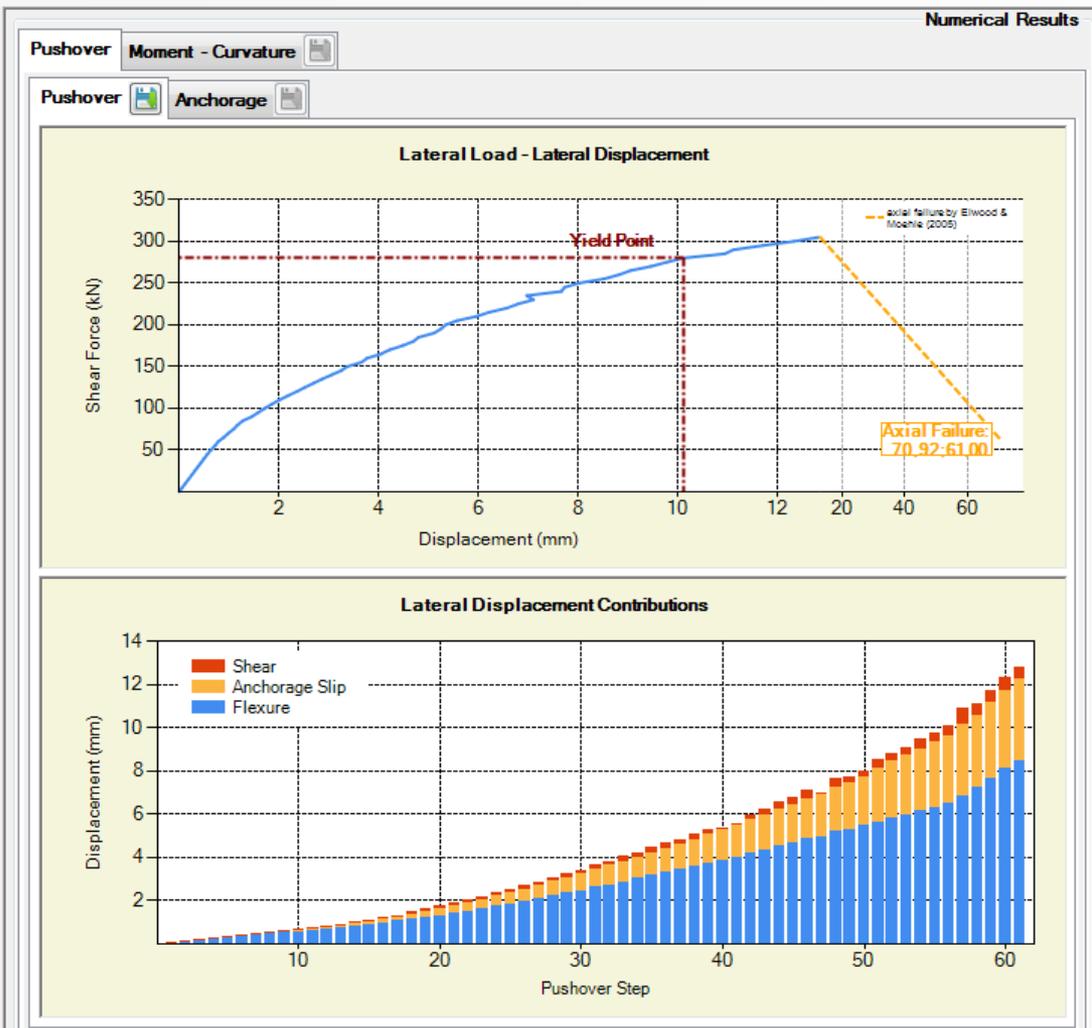
Anchorage

fc (MPa) = 21.1

Db (mm) = 28.7

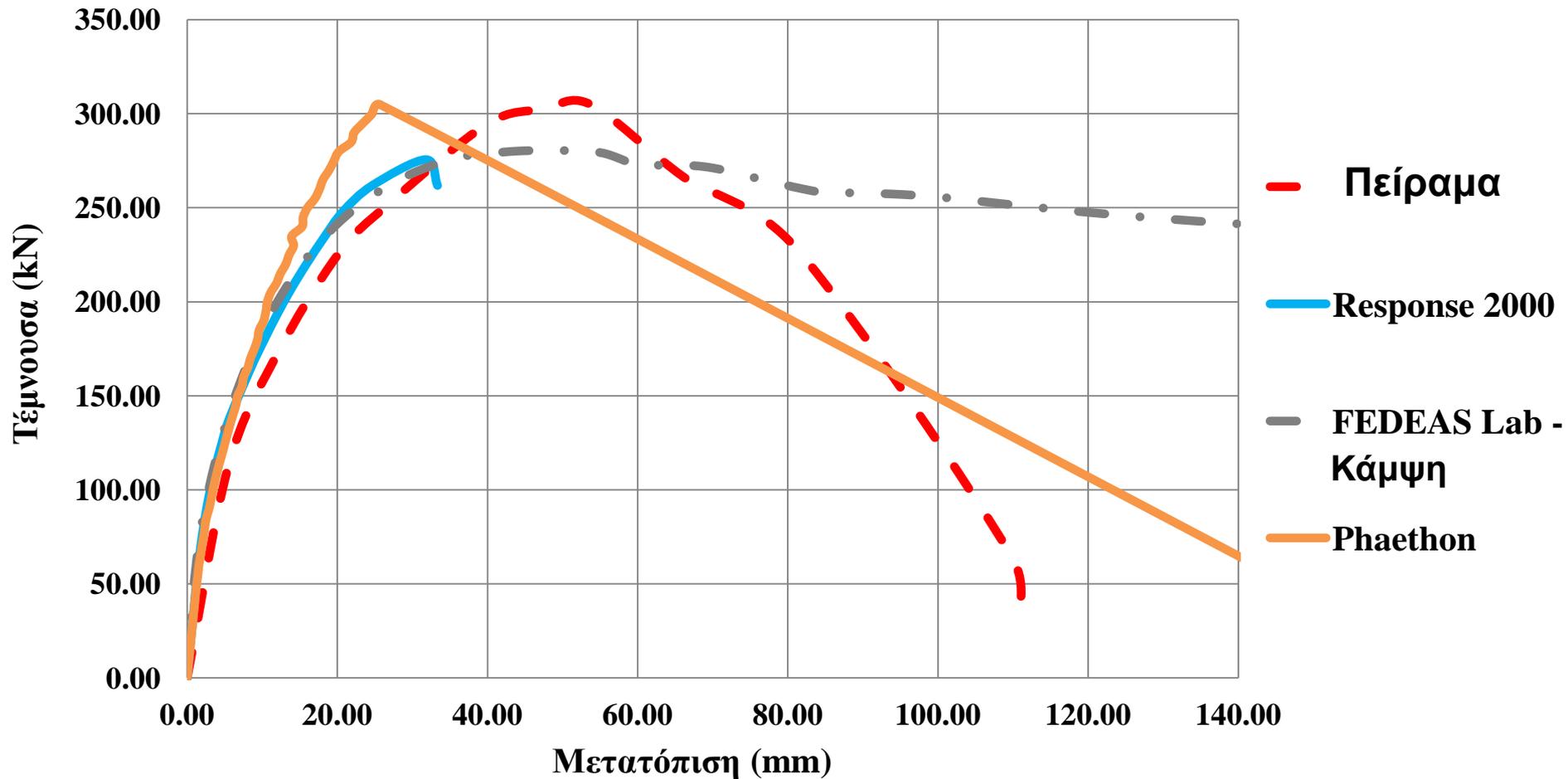
Lb (mm) = 1121

Solve

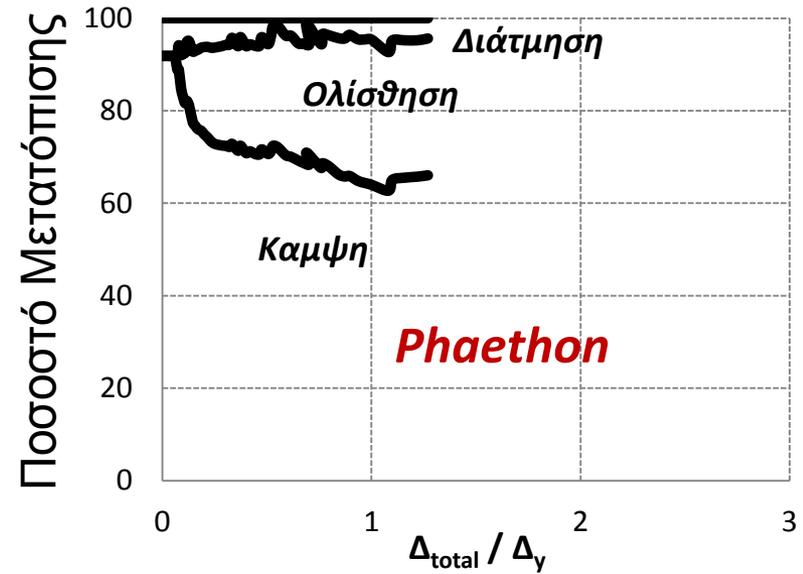
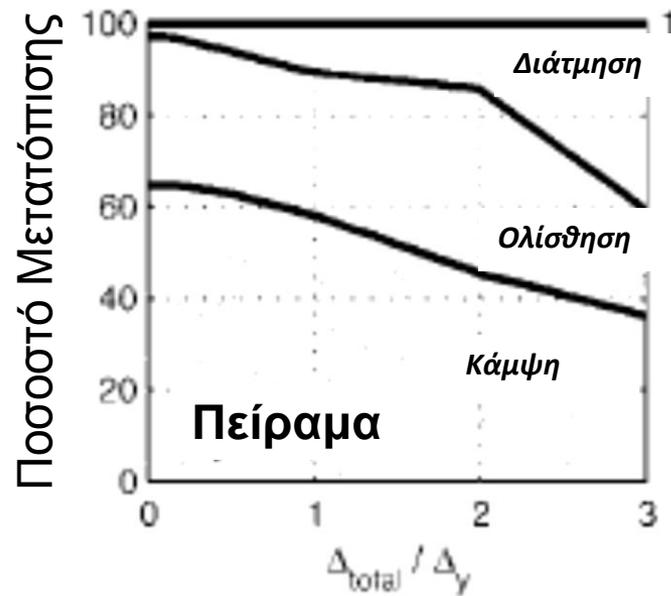


Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα:

Δοκίμιο 1 από Sezen & Moehle (2006) (Αμφίπακτο)



Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα:



ΦΑΕΘΩΝ - Αγκύρωση:

Phaethon

File About

Geometry

Cross-Section Type
 Rectangular Circular

h (mm) = 457.2 D (mm) =

b (mm) = 457.2

Concrete

fc (MPa) = 21.1 fcr (MPa) = 1.516

epc0 = 0.002 ecr = 0.00007184

Reinforcement

Longitudinal

n.Mid = 1 nBars = 4

Es (MPa) = 200000

fy (MPa) = 434

Eh (MPa) = 0.0

Cov (mm) = 65.13

Area of section reinforcement layers

Dbar (mm) =

Transversal

rsy = 0.0025

fy (MPa) = 476

Sp (mm) = 304.8

n.StLegs = 3.41

Dt (mm) = 9.525

Solution Procedures

nIP.Sec = 10 IntTyp.Sec = Midpoint N (kN) = 667

Compressive N Tensile N

Pushover **Moment - Curvature**

Ls (mm) = 1473 nIP.Ls = 5

NoPushSteps = 65 IntTyp.Ls = Gauss-Lobatto

PushStep (kN) = 5

Anchorage

fc (MPa) = 21.1

Db (mm) = 28.7

Lb (mm) = 1121

Solve

Numerical Results

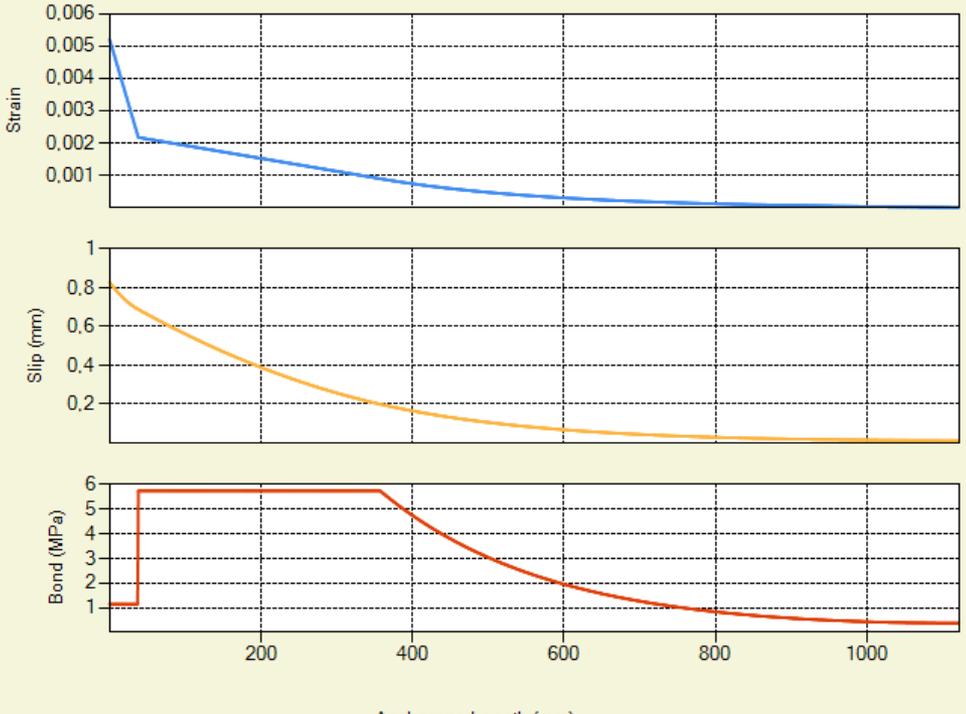
Pushover Moment - Curvature

Pushover Anchorage

Κουμπί
Αποθήκευσης
Αποτελεσμάτων

Pushover Step 61

— Strain — Slip — Bond



Anchorage Length (mm)	Strain	Slip (mm)	Bond (MPa)
0	0.005	0.8	1.0
100	0.002	0.6	5.5
200	0.0015	0.4	5.5
400	0.001	0.2	5.5
600	0.0008	0.15	2.0
800	0.0007	0.12	1.0
1000	0.0006	0.1	0.8

Ανάλυση Διατομής : Ροπή – Καμυλότητα & Τέμνουσα- Διατμητική Παραμόρφωση

Phaethon

File About

Geometry

Cross-Section Type

Rectangular Circular

h (mm) = 457.2 D (mm) =

b (mm) = 457.2

Concrete

fc (MPa) = 21.1 fcr (MPa) = 1.516

epc0 = 0.002 ecr = 0.00007184

Reinforcement

Longitudinal

n.Mid 1

nBars 4

Es (MPa) = 200000

fy (MPa) = 434

Eh (MPa) = 0.0

Cov (mm) = 65.13

Area of section reinforcement layers

Dbar (mm)

Transversal

rsy = 0.0025

fyy (MPa) = 476

Sp (mm) = 304.8

n.StLegs 3.41

Dt (mm) = 9.525

Solution Procedures

nIP.Sec 10

IntTyp.Sec Midpoint

N (kN) = 667

Compressive N

Tensile N

Pushover Moment - Curvature

phi Incr. (1/mm) = 0.000001

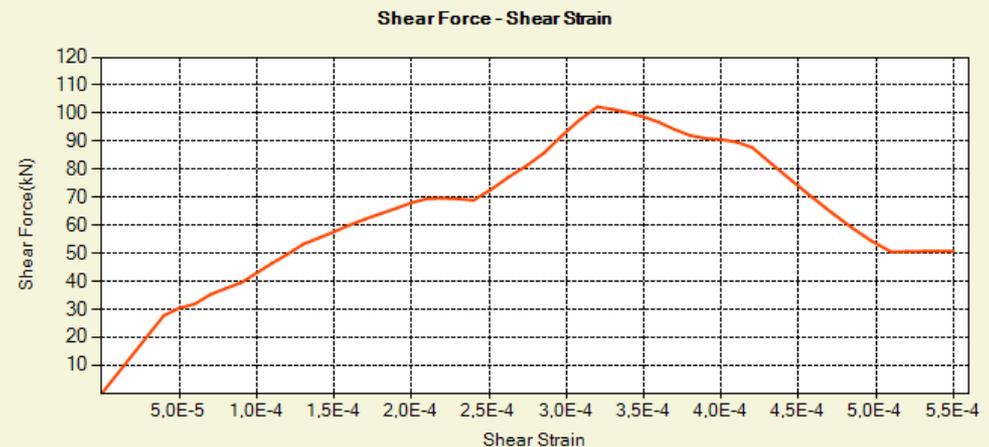
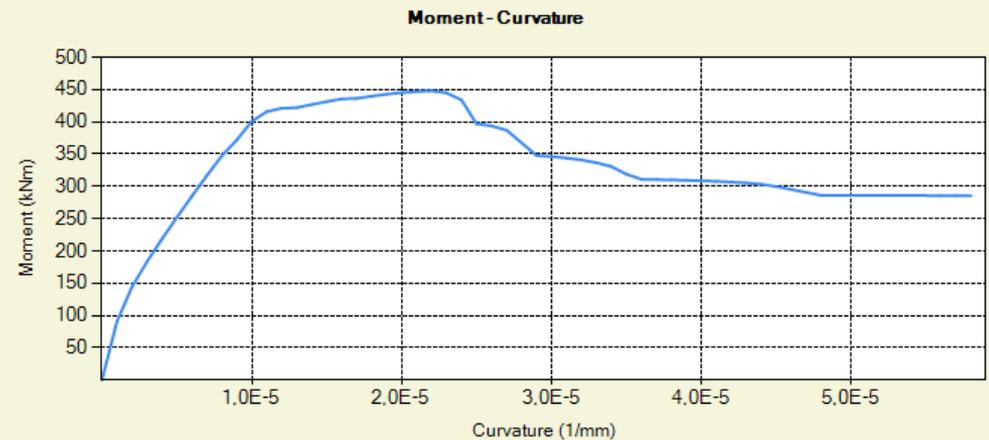
gamma Incr. = 0.00001

NoSteps 65

Solve

Numerical Results

Pushover Moment - Curvature

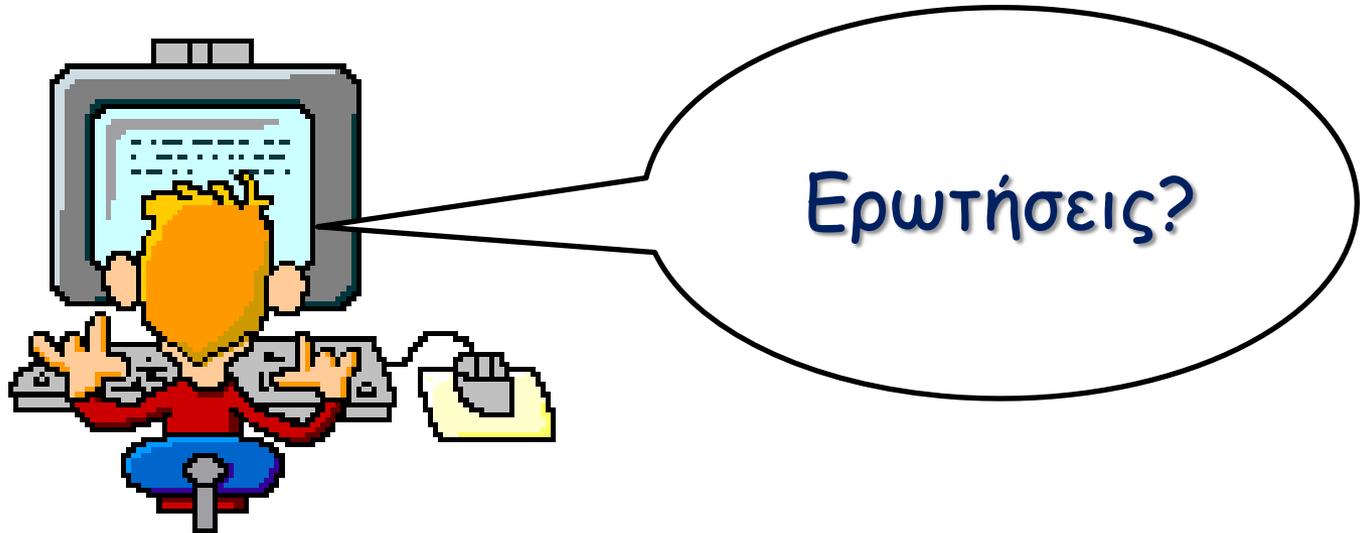


ΦΑΕΘΩΝ: Λογισμικό για Ανάλυση Κρίσιμων Διατμητικά Υποστυλωμάτων Ο.Σ.

Μπορείτε να κατεβάσετε το λογισμικό δωρεάν:

www.bigeconomy.gr/phaethon/

Σας ευχαριστώ!



Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω το Κοινωφελές Ίδρυμα Αλέξανδρος Σ. Ωνάσης για την οικονομική υποστήριξη για την ανάπτυξη του παρόντος λογισμικού στα πλαίσια της εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής στο Πανεπιστήμιο Κύπρου.