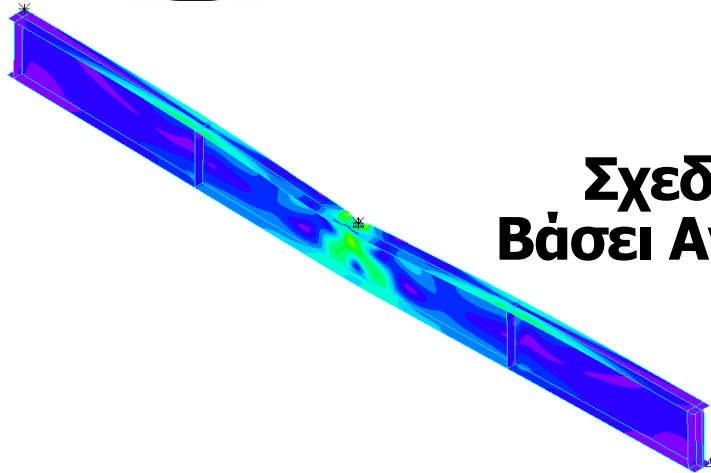




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



Σχεδιασμός Μεταλλικών Κατασκευών Βάσει Αναλύσεων Πεπερασμένων Στοιχείων




Διπλωματική Εργασία
Μιχαήλ Τσαγκαράκη

Επιβλέπων
Χάρης Γαντές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
EMK ΔΕ 2023 8, Αθήνα Ιούλιος 2023

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή - Στόχος Διπλωματικής
2. Βασικές Αρχές Προσομοίωσης (ιδιότητες γεωμετρίας, υλικών, ατελειών κ.α.)
3. Ανάλυση Φορέα (τύποι αναλύσεων)
4. Έλεγχος Αξιοπιστίας Προσομοιώματος και Αποτελεσμάτων
5. Μεθοδολογία Σχεδιασμού βάσει αποτελεσμάτων
6. Παραδείγματα Εφαρμογής
7. Συμπεράσματα



Θεωρητικό υπόβαθρο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

- Γιατί υπάρχει απαίτηση για αναλύσεις FE στις μεταλλικές κατασκευές;
 - Ακριβής - ασφαλής - βελτιστοποιημένος σχεδιασμός
 - Εξέλιξη της υπολογιστικής ισχύς
- Ποια τα οφέλη των FEM;
 - Προσομοίωση μη γραμμικών παραμέτρων / σύνθετων φορέων (υλικό, γεωμετρία, ατέλειες)
 - Ακριβής πρόβλεψη απόκρισης (κρίσιμο φορτίο, μορφή αστοχίας)
- Ποιοι κανονισμοί καλύπτουν τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων;
 - EN 1993-1-14 & 1-141 (Μέρος τροποποιήσεων νέου ΕΚ3)
Καλύπτουν: - προσομοίωση - ανάλυση - έλεγχος
 - EN 1993-1-141 = επιστημονικό υπόβαθρο και επεξηγήσεις του 1-14
- Τελικά αξίζει;

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

▪ Γενικές Απαιτήσεις Κανονισμών

- Εναρμόνιση με απαιτήσεις υπαρχόντων κανόνων σχεδιασμού – ελέγχου (π.χ. καμπύλες λυγισμού)
- Το επίπεδο ασφάλειας και αξιοπιστίας υφιστάμενων κατασκευών δεν τροποποιείται
- Εφαρμογή ευρείας χρήσης (απλά καθημερινά παραδείγματα)

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

5 Βασικές ενότητες των EN3-1-14 και 1-141

- Ιδιότητες και τρόποι εισαγωγής:
 - προσομοίωσης γεωμετρίας φορέα
 - πεπερασμένων στοιχείων
 - στηρίξεων και φόρτισης προσομοιώματος
 - προσομοίωσης υλικών
 - προσομοίωσης αρχικών ατελειών

Διάκριση στόχων τύπων αναλύσεων

Αριθμητικοί υπολογισμοί για σχεδιασμό

Υπολογισμοί μέσω γραμμικών ή μη γραμμικών προσομοιωμάτων για καθορισμό των παραμέτρων απόκρισης του συστήματος ή των αντοχών σχεδιασμού

Αναλύσεις που απαιτούν πρόσθετους υπολογισμούς σχεδιασμού

(LA, LBA, GNA, GNIA, MNA)

- Γραμμικά ελαστικό υλικό
- Αποτελέσματα για παραμέτρους απόκρισης συστήματος.
- χρησιμοποιούνται ως βάση για έλεγχο του φορέα

Αναλύσεις για απευθείας έλεγχο αντίστασης

(MNA, GMNA, GMNIA)

- Μη γραμμικό υλικό
- Παρέχουν πληροφορίες για την τελική αντίσταση της κατασκευής.

Γίνεται χρήση των ονομαστικών τιμών για ιδιότητες γεωμετρίας και υλικού

Αριθμητική προσομοίωση

Αντικατάσταση ή επέκταση των πειραματικών δεδομένων για απευθείας υπολογισμό της τελικής αντίστασης κατασκευής

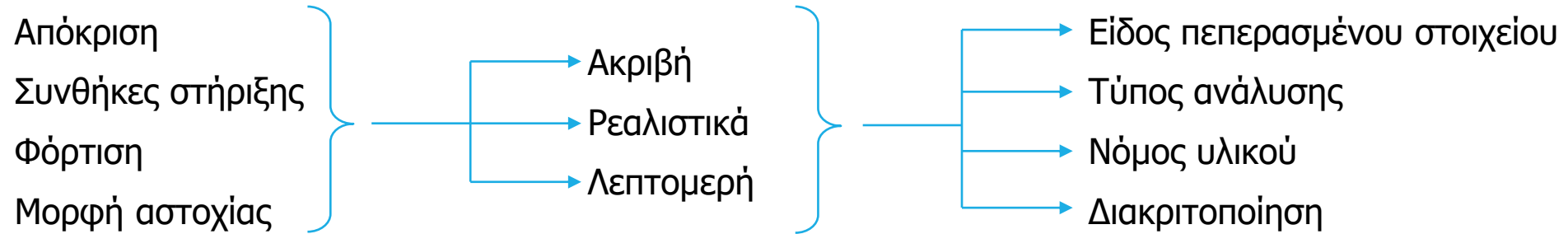
- Μη γραμμικό υλικό
- Μη γραμμική γεωμετρία
- Παρέχουν πληροφορίες για την τελική αντίσταση της κατασκευής.

Γίνεται χρήση των μετρημένων ή μέσων τιμών για ιδιότητες γεωμετρίας και υλικού

Μετρημένες/μέσες τιμές : πειραματικά δεδομένα
Ονομαστικές τιμές: προδιαγραφές υλικού

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

▪ Ιδιότητες προσομοίωσης γεωμετρίας φορέα



Πηγές σφαλμάτων:

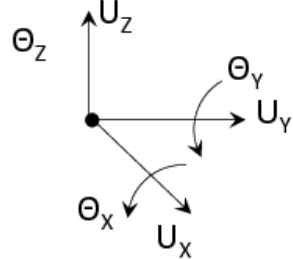
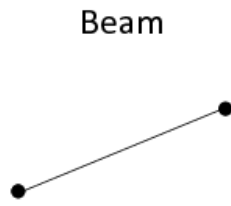
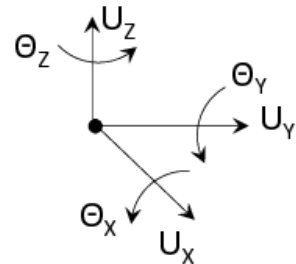
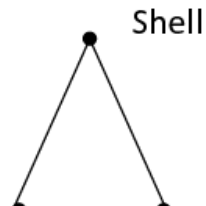
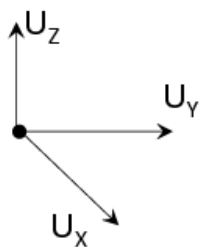
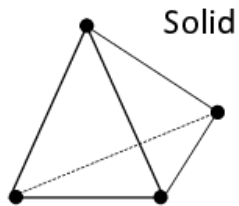
1. Κατά την εισαγωγή (διαφοροποιήσεις μεγεθών, αδυναμία λογισμικού κ.α.)
2. Κατά την διακριτοποίηση (ανεπαρκής πυκνότητα)
3. Στην γεωμετρία (μόρφωση φορέα, περιγραφή διακριτοποίησης)

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

▪ Ιδιότητες πεπερασμένων στοιχείων

Κατηγορίες πεπερασμένων στοιχείων

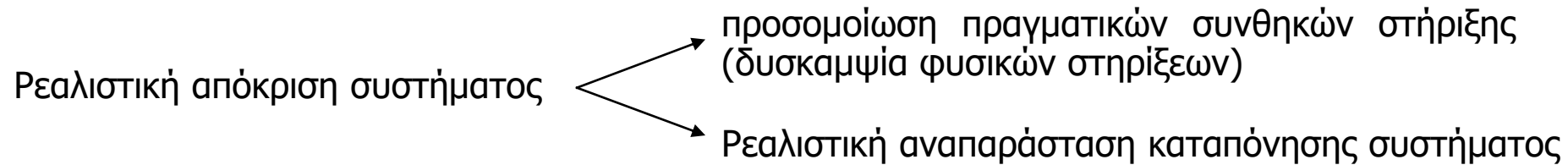
1. Στοιχεία δοκού (beam)
2. Επιφανειακά στοιχεία (plate/shell)
3. Συμπαγή (solid)



1. Μέλος = άξονας διατομής
2. Μέλος = μέση επιφάνεια
3. Περίπλοκη μαθηματική μορφή επιφανειακών

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

- Ιδιότητες στηρίξεων και φόρτισης προσομοιώματος



1. Ανεπιθύμητες συγκεντρώσεις τάσεων
2. Λανθασμένη δυσκαμψία
3. Παρεμπόδιση στροφής

Σημείωση: Επιλογή τρόπου εφαρμογής φορτίου ανάλογα με τον φορέα και την αναμενόμενη απόκριση.

(επιβολή φορτίου / επιβολή μετατόπιση)

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

▪ Ιδιότητες προσομοίωσης υλικών

Γενικές Απαιτήσεις

Δεν σημειώνονται ουσιαστικές διαφορές από τα άλλα μέρη των ΕΚ. (εναρμόνιση μερών 1-14 και 1-141)

Σωστή λειτουργία προσομοιωμάτων \Leftrightarrow ορθή εισαγωγή των υλικών του φορέα

Τρόποι εισαγωγής: Μετρημένες/μέσες τιμές: πειραματικά δεδομένα
 Ονομαστικές τιμές: προδιαγραφές υλικού

Κατηγορίες υλικών: **1.** Θερμής έλασης (ελαστικό-πλήρως πλαστικό, ελαστικό κρατυνόμενα πλαστικό κ.λπ.)
 2. Ψυχρής έλασης (Ramberg-Osgood)
 3. «Προχωρημένα» (advanced) (ενσωμάτωση κριτηρίων ασφαλείας)

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

▪ Ιδιότητες προσομοίωσης αρχικών ατελειών

Σημασία ατελειών

Επηρεάζουν:

- a) την απόκριση του φορέα
- b) την τελική αντοχή

- Υπάρχουν αναπόφευκτα στους μεταλλικούς φορείς
- Λαμβάνονται πάντα υπόψη

Προσομοίωση ατελειών:

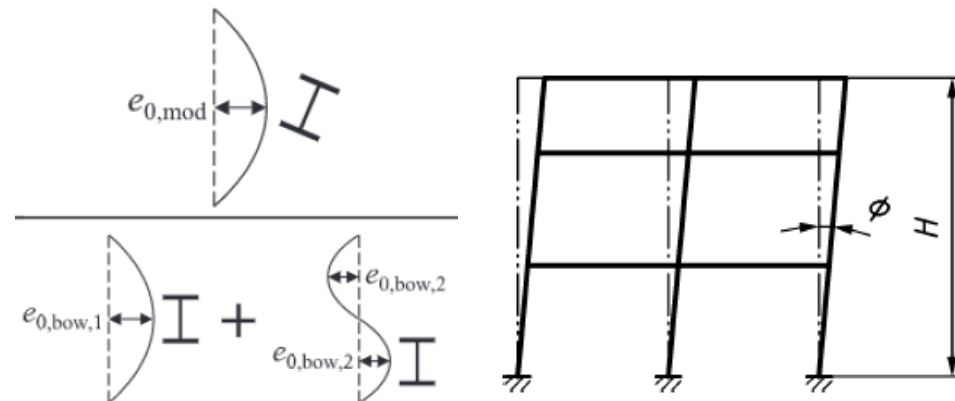
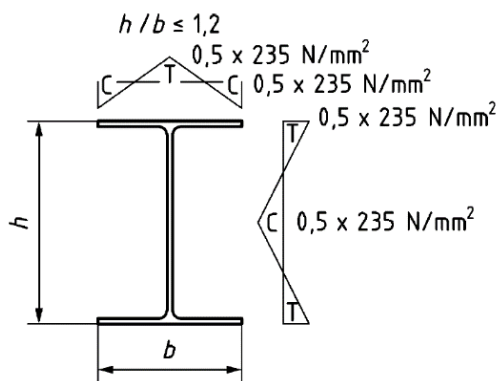
1. Ανεξάρτητες τιμές (γεωμετρικές ατέλειες / παραμένουσες τάσεις)
2. Ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες (ενσωμάτωση πολλών μορφών ταυτόχρονα)
 - a) Για τον καθολικό φορέα (global structures) (π.χ. πλαίσια)
 - b) Για δομικά μέλη
 - c) Για διατομές (μορφής πλάκας)

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

▪ Ιδιότητες προσομοίωσης αρχικών ατελειών

Τρόποι ενσωμάτωσης:

- Μετρημένη τιμή και σχήμα ατελειών (ανεξάρτητες γεωμετρικές ατέλειες)
- Σχήμα και πλάτος ατελειών βάσει προκαθορισμένων τιμών και συναρτήσεων (και για τους δύο τύπους)
- Σχήμα ατελειών βάσει ιδιομορφών λυγισμού (και για τους δύο τύπους)



Type of imperfection	Component
longitudinal stiffener with length a	
panel or sub-panel	

ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ

Γραμμική σχέση φόρτισης-απόκρισης συστήματος \Leftrightarrow Γραμμική ανάλυση

Μη γραμμική σχέση φόρτισης-απόκρισης συστήματος \Leftrightarrow Μη γραμμική ανάλυση

Βασικές ρυθμίσεις επίλυσης:

- Ενεργοποίηση μεγάλων μετατοπίσεων και παραμορφώσεων
- Εφαρμογή ιδιοτήτων μη γραμμικών υλικών
- Καθορισμός τρόπου εφαρμογής φορτίου (βήμα άσκησης)

κ.α.

Βασικές πηγές μη γραμμικής συμπεριφοράς:

- Γεωμετρική μη γραμμικότητα (μεγάλες παραμορφώσεις ή ατέλειες)
- Μη γραμμικότητα υλικού (σ - ϵ)
- Τοπολογική μη γραμμικότητα (αλλαγή συνθηκών στήριξης)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ

- Τύποι αναλύσεων

Τύποι αναλύσεων	Παραμορφώσεις	Νόμος Υλικού	Γεωμετρία
Γραμμική Ανάλυση (LA)	Γραμμικές	Γραμμικός ελαστικός	Τέλεια
Γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA)	Γραμμικές	Γραμμικός ελαστικός	Τέλεια
Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού (MNA)	Γραμμικές	Ελαστο-πλαστικός	Τέλεια
Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας (GNA)	Μη γραμμικές	Γραμμικός ελαστικός	Τέλεια

Τύποι αναλύσεων	Παραμορφώσεις	Νόμος Υλικού	Γεωμετρία
Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας και Υλικού (GMNA)	Μη γραμμικές	Μη γραμμικός	Τέλεια
Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας και αρχικές ατέλειες (GNIA)	Μη γραμμικές	Γραμμικός ελαστικός	Ατελής
Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας και Υλικού με αρχικές ατέλειες (GMNIA)	Μη γραμμικές	Μη γραμμικός	Ατελής

ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ

▪ Τύποι αναλύσεων

Περιγραφή των δύο σημαντικότερων

Γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA):

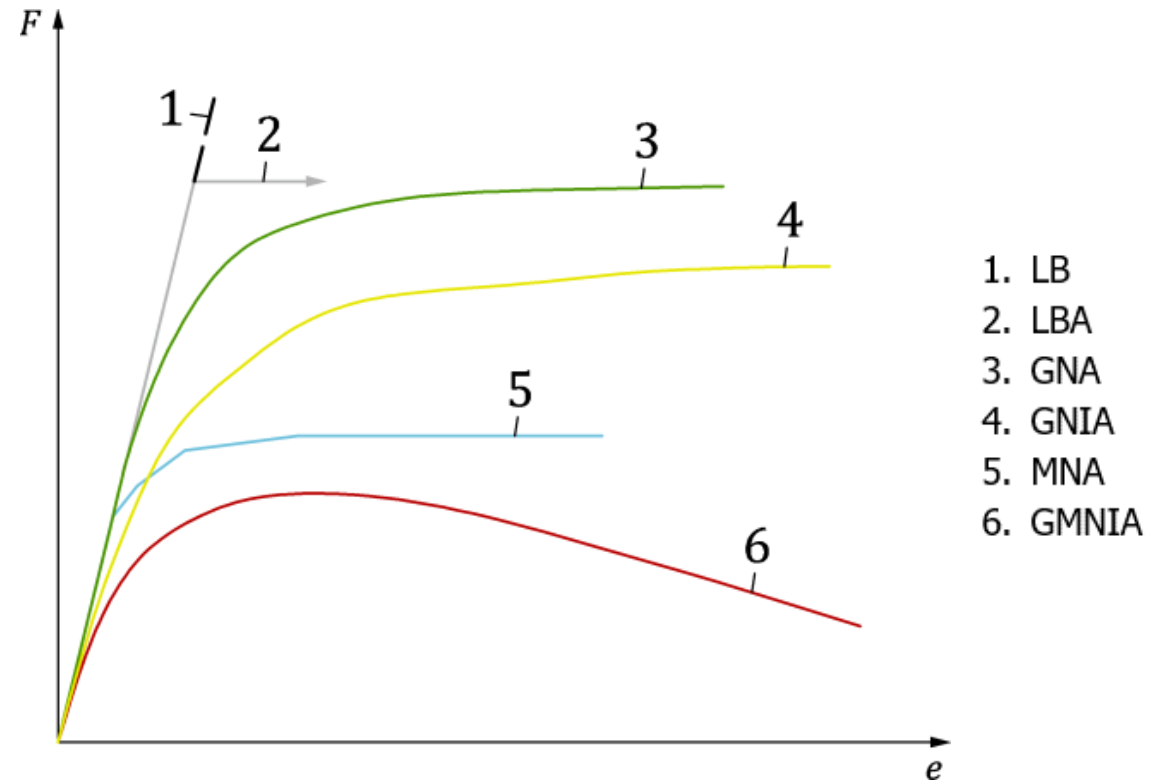
- Γραμμική ανάλυση (παραμορφώσεις, υλικό)
- «Τέλεις» φορέας
- Πρόβλεψη ιδιομορφών και ιδιοτιμών
- Δεν δίνει αποτελέσματα για την αντοχή

Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας και Υλικού με αρχικές ατέλειες (GMNIA):

- Μη γραμμική ανάλυση (παραμορφώσεις, υλικό)
- Ατελής φορέας
- Η πιο «ρεαλιστική» απόκριση
- Απευθείας εύρεση τελικής αντίστασης

ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ

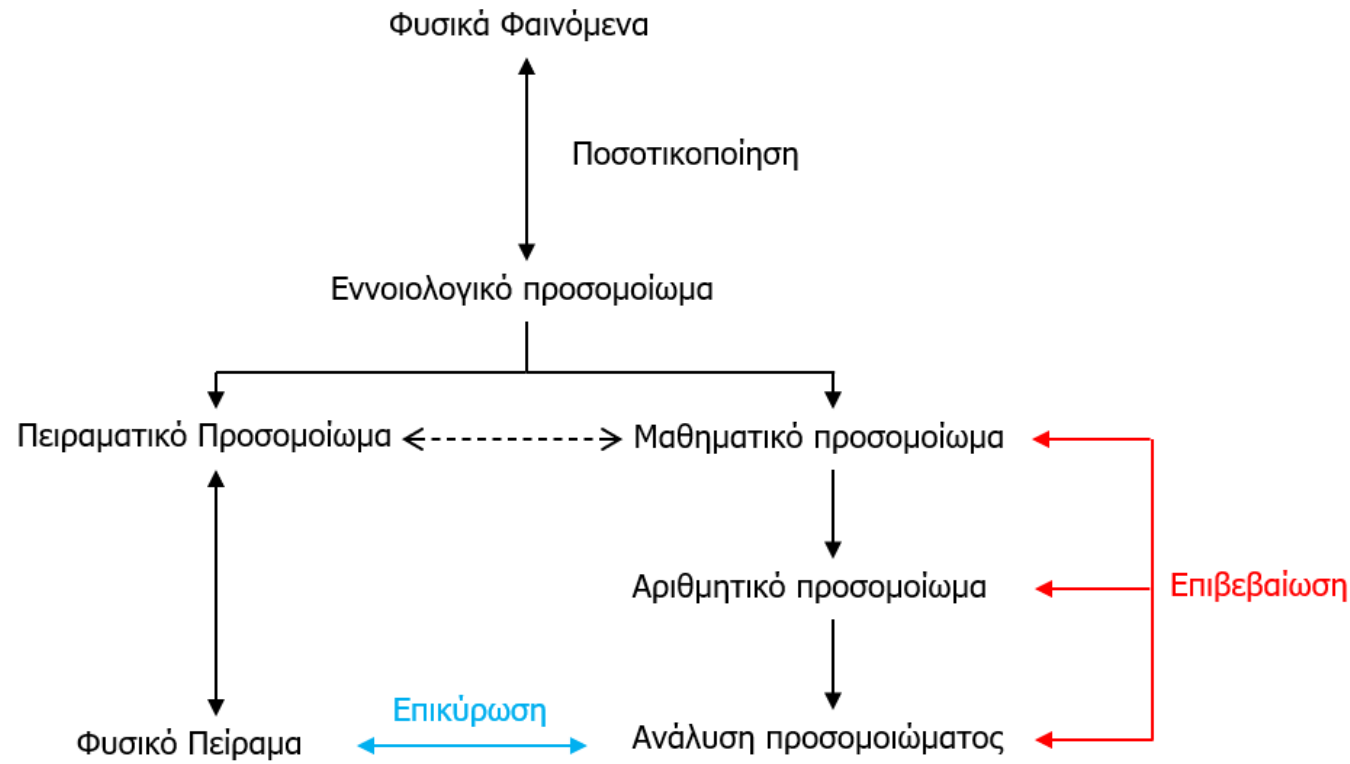
- Τύποι αναλύσεων



Γραφική αναπαράσταση αποτελεσμάτων τύπων αναλύσεων

ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ & ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

- Διάκριση εννοιών «Επιβεβαίωση» / «Επικύρωση»



Πρακτική σημασία:

- Έλεγχος ακρίβειας και ορθότητας προσομοιώματος
- Ρεαλιστική αναπαράσταση απόκρισης συστήματος
- Ανάδειξη αναπόφευκτων αποκλίσεων
- Επαρκής διακριτοποίηση
- Σύγκριση αποτελεσμάτων

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Έλεγχος φορέα σε Οριακές Καταστάσεις

Τρόποι ελέγχου:

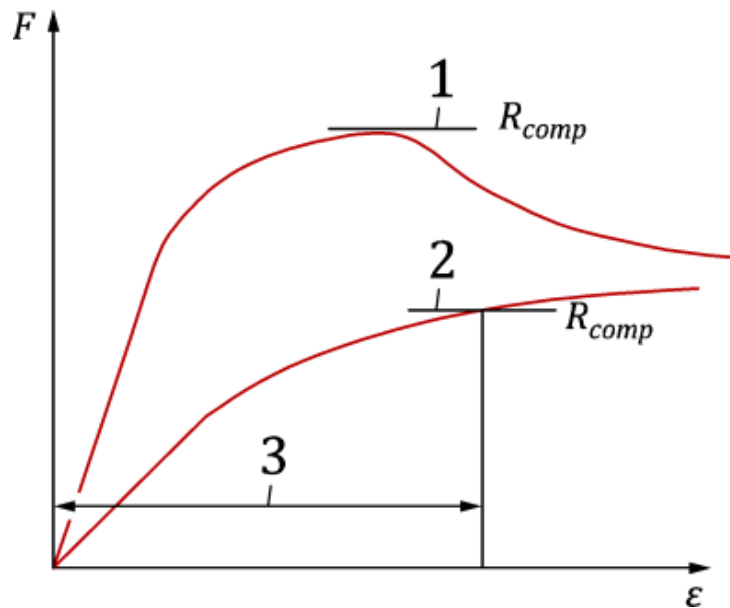
- a) Έλεγχος τάσεων (μέσω LA ή GNA)
- b) Έλεγχος πλαστικής αντοχής (μέσω MNA ή GMNA)
- c) Έλεγχος αντοχής έναντι λυγισμού
 - LA/MNA με LBA
 - GNIA με LBA
 - GNIA με έλεγχο διατομής
 - GMNIA

Στα b,c: Τελική αντοχή από δρόμο ισορροπίας

Ικανοποίηση κριτηρίων C1, C2

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Έλεγχος φορέα σε Οριακές Καταστάσεις



Υπόμνημα

- 1 Κριτήριο C1
- 2 Κριτήριο C2
- 3 Μέγιστη αποδεκτή παραμόρφωση
- F Ασκούμενο φορτίο
- ε Παραμόρφωση

C1: Κρίσιμο φορτίο = $\max(F)$

C2: Κρίσιμο φορτίο = $F(\max(\epsilon))$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

- Καλύτερη κατανόηση
- Πρακτική εφαρμογή των θεωρητικών στοιχείων
- Ανάδειξη χρήσης πεπερασμένων
- Ενσωματώνονται συνολικά:
 - 3 προσομοιώσεις πειραμάτων (σύγκριση αποτελεσμάτων)
 - 3 παραδείγματα σχεδιασμού
- Έγινε ανάλυση:
 - 2 εκ των πειραμάτων
 - 1 (x2) παραδείγματος σχεδιασμού
- Γενικές Πληροφορίες:
 - Ανάλυση μέσω του ADINA Structures
 - Παραδείγματα βασισμένα σε εκτενείς έρευνες

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

➤ Παράδειγμα Σύγκρισης – Αμφιαρθρωτό υποστύλωμα διατομής RHS σε θλίψη

- Γενικές Πληροφορίες:
- Αμφιαρθρωτό κοντό υποστύλωμα υπό μονο-αξονική θλίψη
 - Χάλυβας ψυχρής έλασης
 - Αστοχεί σε καμπτικό λυγισμό
 - Χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων (shell elements)

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

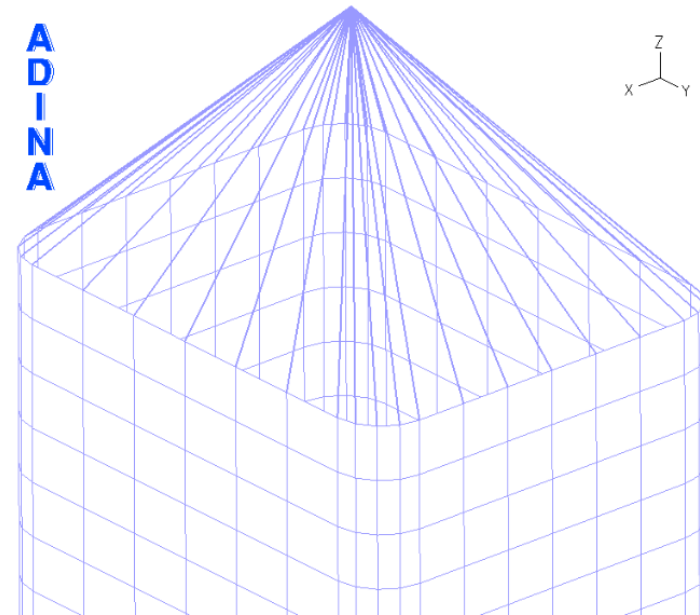
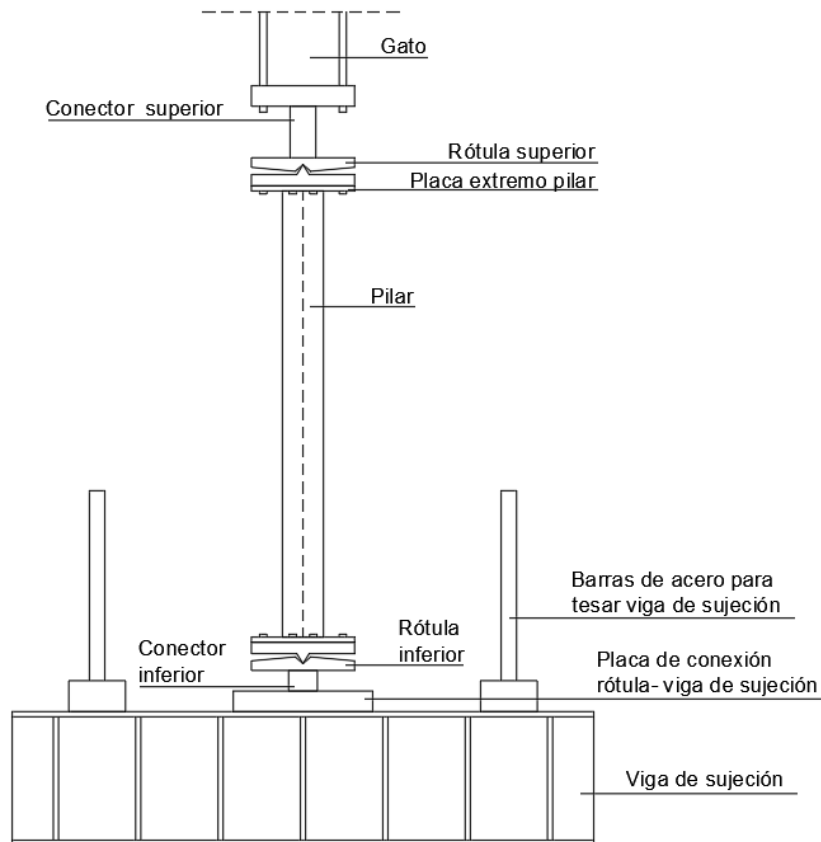
H	B	t	R_{ext}	L	w_g	e_m
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
99.5	80.0	3.9	11.4	1500.0	1.04	1.93

Στόχος ανάλυσης:

Ανάδειξη καταλληλότητας FEM και πρόβλεψης απόκρισης έναντι καμπτικού λυγισμού

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

- Παράδειγμα Σύγκρισης – Αμφιαρθρωτό υποστυλώμα διατομής RHS σε θλίψη



Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών μέσω rigid link (master point/slave)

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

- Παράδειγμα Σύγκρισης – Αμφιαρθρωτό υποστυλώμα διατομής RHS σε θλίψη

Υλικό διατομής
(μετρημένες παράμετροι)

Coupon	E [MPa]	f_y [MPa]	f_u [MPa]	ϵ_u [mm/mm]	n	m
Flat region	183,098	398	622	0.36	7.1	2.3
Corner region	181,345	539	746	0.45	5.6	7.0

Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού διαγράμματος σ - ϵ : Διβάθμιος νόμος υλικού Ramberg-Osgood
(παραπομπή στις σχέσεις του ΕΚ1993-1-1)

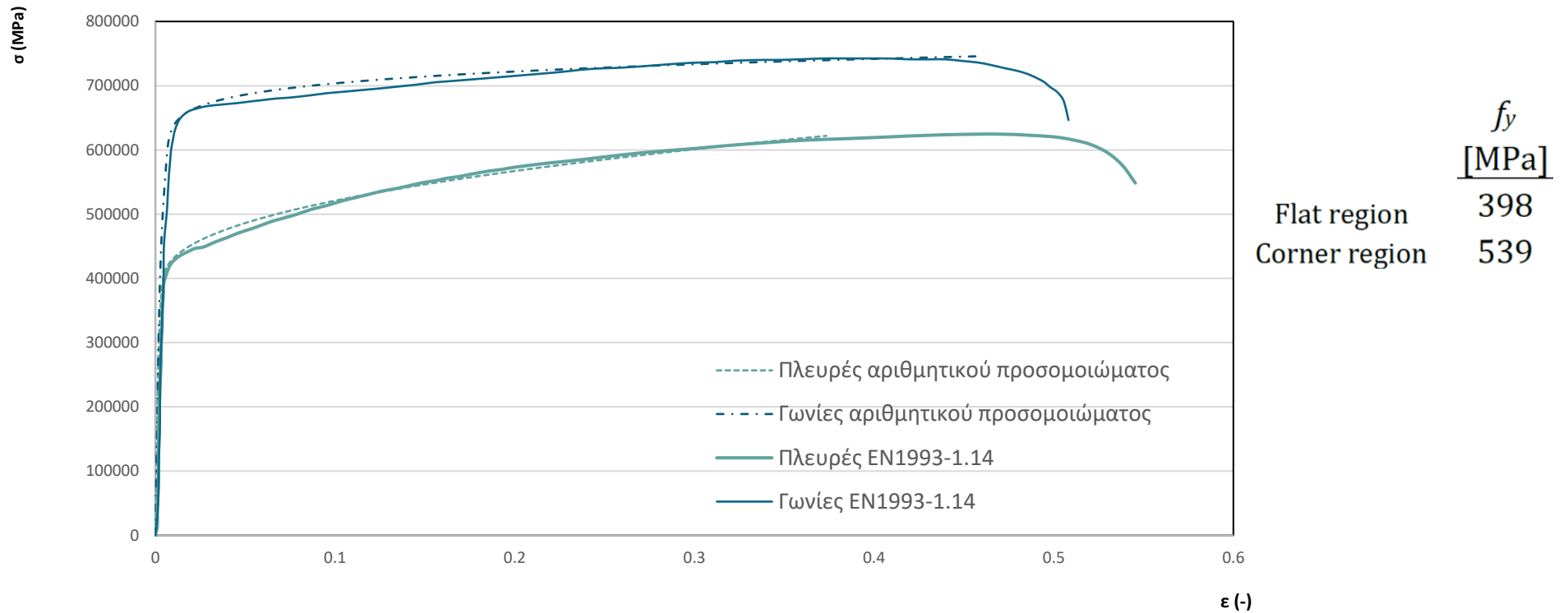
Μετατροπή μηχανικών τάσεων-παραμορφώσεων σε πραγματικές τάσεις και ανηγμένες παραμορφώσεις

$$\sigma_{\text{true}} = \sigma \cdot (1 - \epsilon)$$

$$\epsilon_{\text{true}} = -\ln(1 - \epsilon)$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

➤ Παράδειγμα Σύγκρισης – Αμφιαρθρωτό υποστυλωμα διατομής RHS σε θλίψη



Σύγκριση νόμου υλικού

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

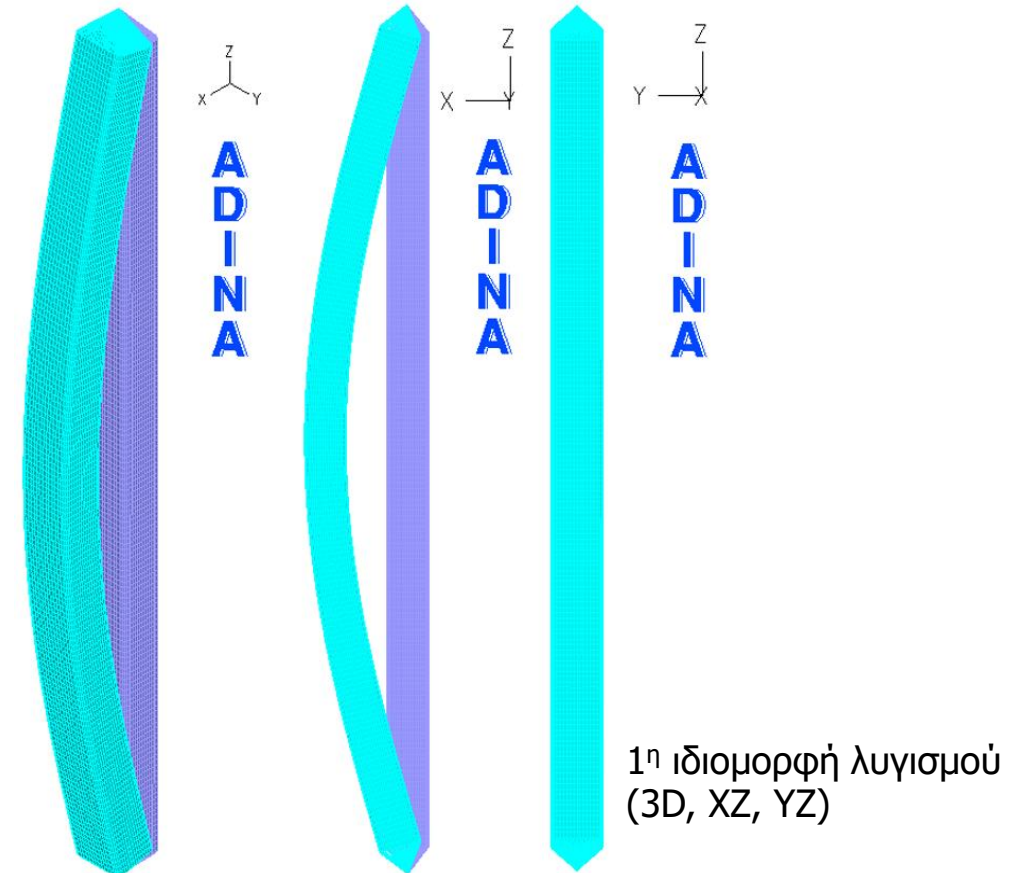
➤ Παράδειγμα Σύγκρισης – Αμφιαρθρωτό υποστύλωμα διατομής RHS σε θλίψη

Εισαγωγή αρχικών ατελειών:

Χρήση ανεξάρτητων τιμών αρχικών ατελειών

- Παραμένουσες τάσεις (μέσω του νόμου υλικού)
- Γεωμετρικές ατέλειες (βάσει 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού)

Μετρημένο πλάτος αρχικής ατέλειας: $\frac{w_g}{[mm]} = 1.04$



ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

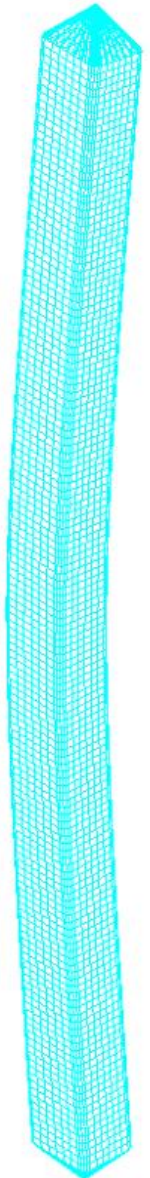
- Παράδειγμα Σύγκρισης – Αμφιαρθρωτό υποστύλωμα διατομής RHS σε θλίψη

Αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν:

- 1) LBA – εξαγωγή 1^{ης} ιδιομορφής
- 2) GMNIA – τελική αντίσταση υποστυλώματος

Αποτελέσματα αναλύσεων

- Παραμόρφωση φορέα:
 - 1) Συμβαδίζει με τα πειραματικά αποτελέσματα
 - 2) Το προσομοίωμα κρίνεται κατάλληλο για ακριβή και ρεαλιστική αναπαράσταση της μορφής αστοχίας.



ADINA

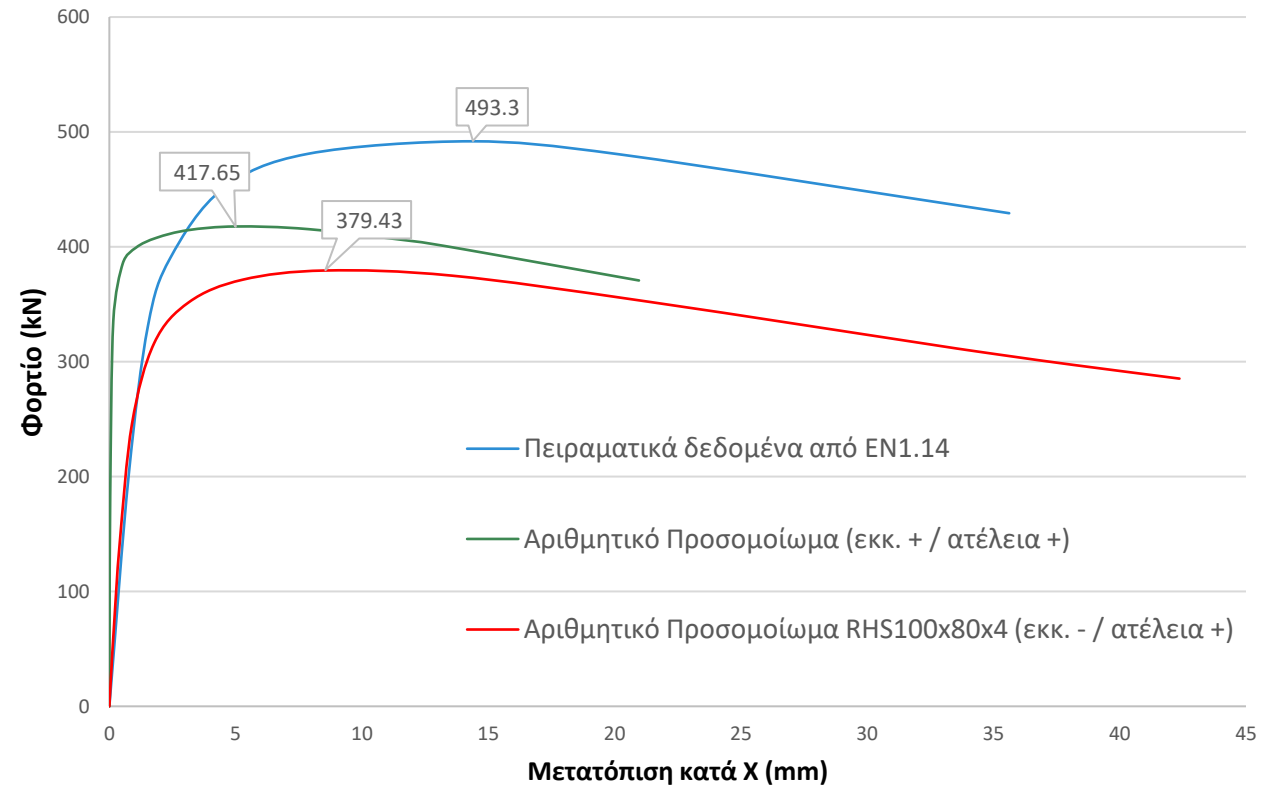
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

- Παράδειγμα Σύγκρισης – Αμφιαρθρωτό υποστύλωμα διατομής RHS σε θλίψη
Αποτελέσματα αναλύσεων

- Υπολογισμένη αντοχή:

- $F_{exp} = 493.3 \text{ kN}$
- $F_{FEM} = 379.43 \text{ kN}$

Που οφείλεται η απόκλιση;



ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

- Παράδειγμα Σύγκρισης – Αμφιαρθρωτό υποστύλωμα διατομής RHS σε θλίψη
Έλεγχοι αξιοπιστίας προσομοιώματος και αποτελεσμάτων:

Διερεύνηση:

- Συνδυασμού φοράς ατελειών με πρόσημο εκκεντρότητας επιβολής φορτίου
 - ομόσημα -> υψηλότερη αντοχή (417 kN)
 - ετερόσημα -> ίδια αντοχή (380 kN)
- Διαστάσεων διατομής (RHS 100x80x4 / RHS 99.5x80x3.9)
 - ελαφρώς μικρότερη αντοχή
- Πυκνότητας πλέγματος
 - αρχικά 10mm*10mm
 - έπειτα 10mm*5mm -> ίδια αποτελέσματα
- Νόμου υλικού (μηχανικές/πραγματικές τάσεις και σύγκριση νόμων υλικού)
 - ίδια αντοχή

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

- Παράδειγμα Σύγκρισης – Αμφιαρθρωτό υποσύλωμα διατομής RHS σε θλίψη

Έλεγχος θλιβόμενης διατομής έναντι καμπτικού λυγισμού σύμφωνα με τις καμπύλες λυγισμού

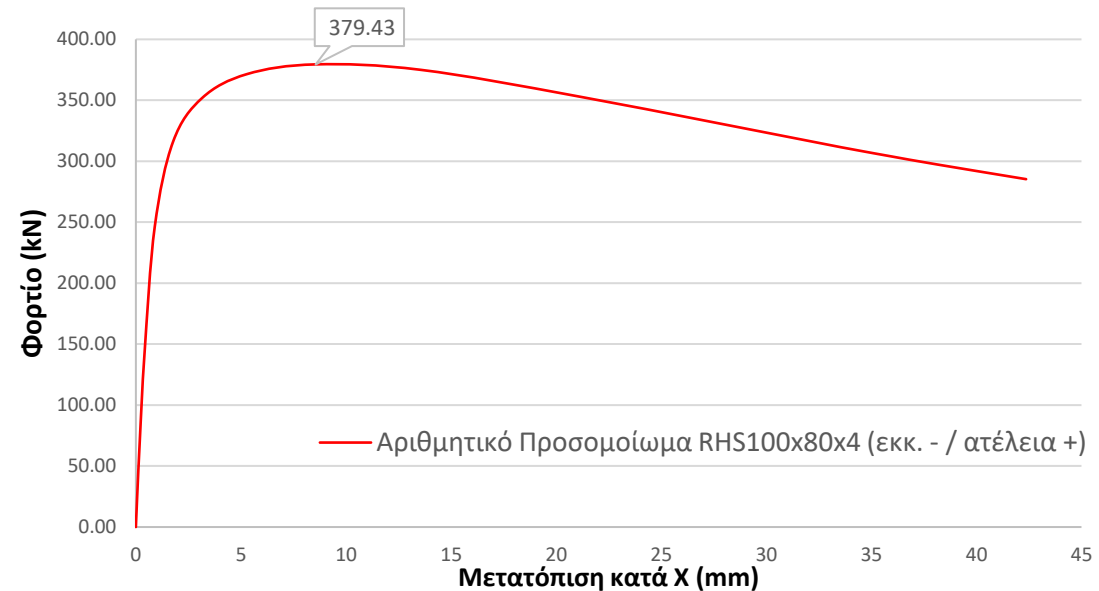
Αντοχή $N_{b,Rd}$:
$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot f_y \cdot A}{\gamma_{M1}}$$
 όπου
$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$\Phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1}$$

Τελικά προκύπτει

$$N_{b,Rd} = 379.43 \text{ kN}$$



ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

- Παράδειγμα Σύγκρισης – Αμφιαρθρωτό υποστύλωμα διατομής RHS σε θλίψη

Σύγκριση αποτελεσμάτων:

- Προσομοίωμα – υπολογισμός «στο χέρι»: συμβαδίζουν απόλυτα
- Πειραματικά – αριθμητικά: δεν συμβαδίζουν

Συμπερασματικά

- Ρεαλιστική πρόβλεψη της απόκρισης και της μορφής αστοχίας
- Ακριβής πρόβλεψη του κρίσιμου φορτίου συγκριτικά με την §8.3.1 του EN1993-1-1.
- Σημαντική απόκλιση μεταξύ αρχικής έρευνας και αριθμητικού προσομοιώματος

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

➤ Παράδειγμα Σύγκρισης – Πλευρικός λυγισμός συγκολλητής διατομής

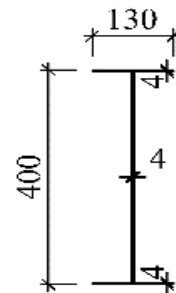
- Γενικές Πληροφορίες:
- Απλώς εδραζόμενη συγκολλητή δοκός χάλυβα ψυχρής έλασης
 - Εγκάρσιες ενισχύσεις σε 4 σημεία
 - Σημειακή καταπόνηση σε 2 σημεία
 - Αστοχία έναντι καθολικού στρεπτικού λυγισμού
 - Χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων (shell elements)

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

Συνολικό μήκος $L=5.40\text{m}$

Μήκος μεταξύ ενισχύσεων $L_1=2.50\text{m}$

Section A

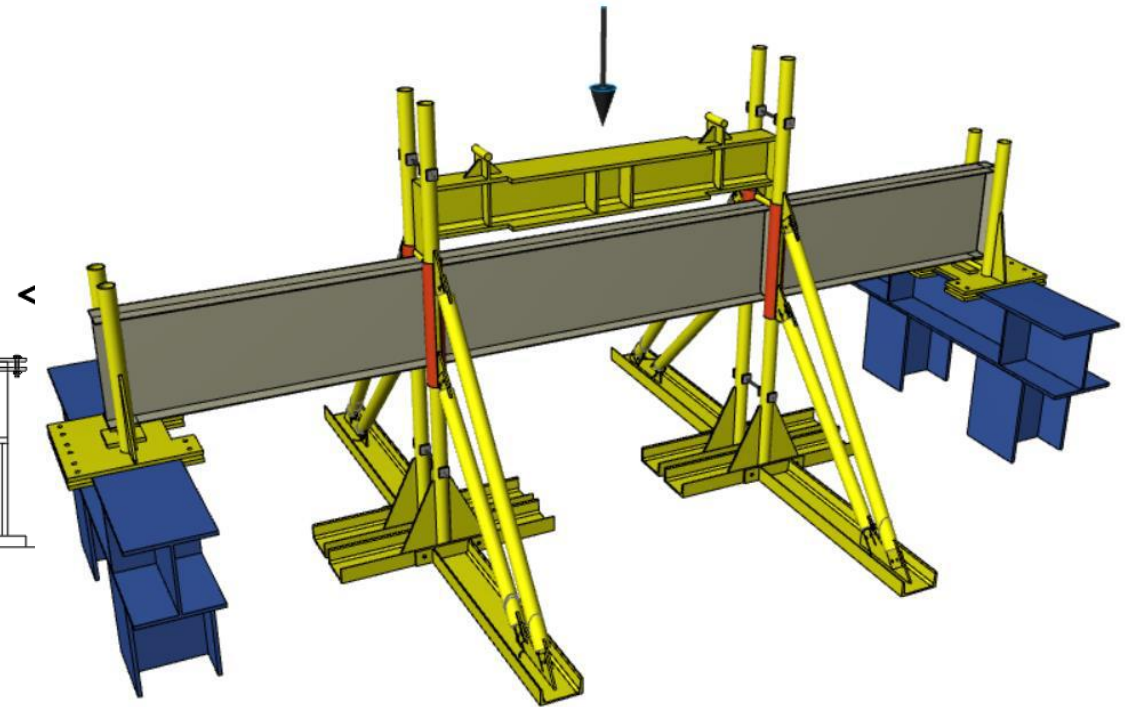
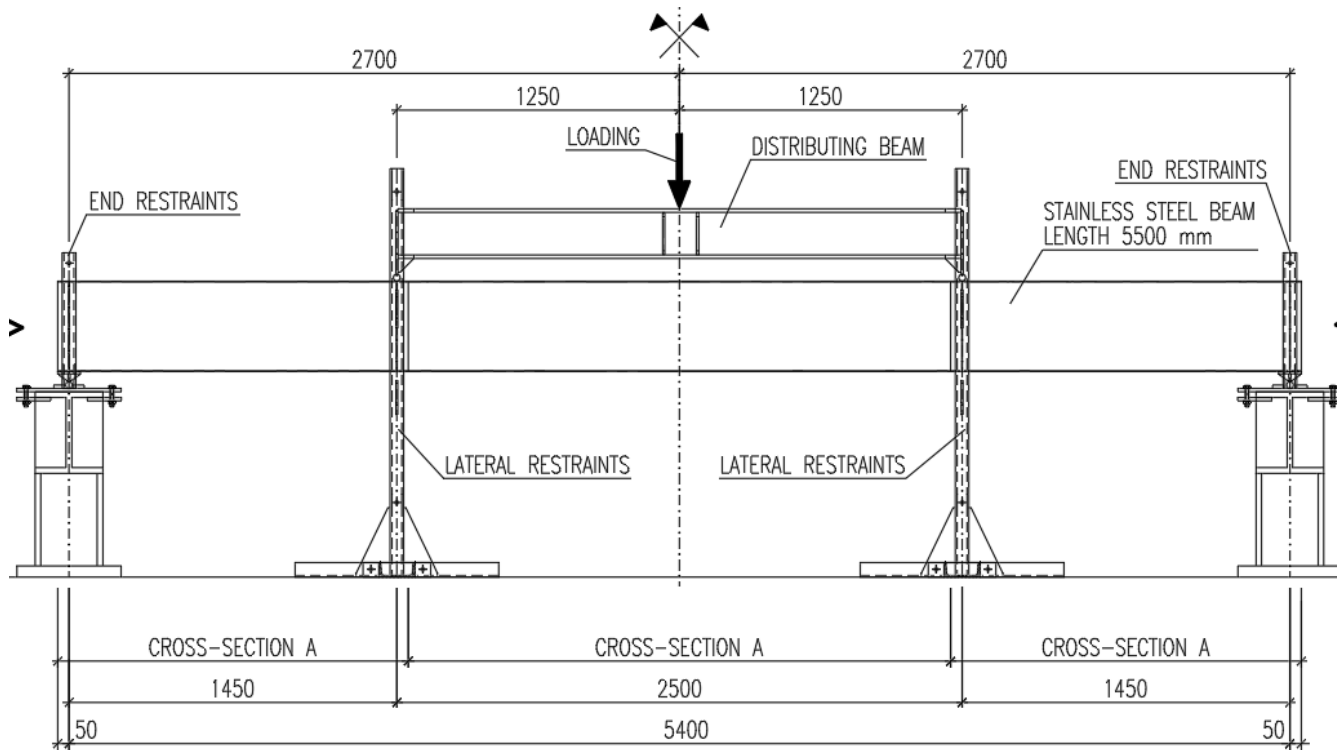


Στόχος ανάλυσης:

Ρεαλιστική αναπαράσταση και ακριβής πρόβλεψη της απόκρισης και του στρεπτικού λυγισμού.

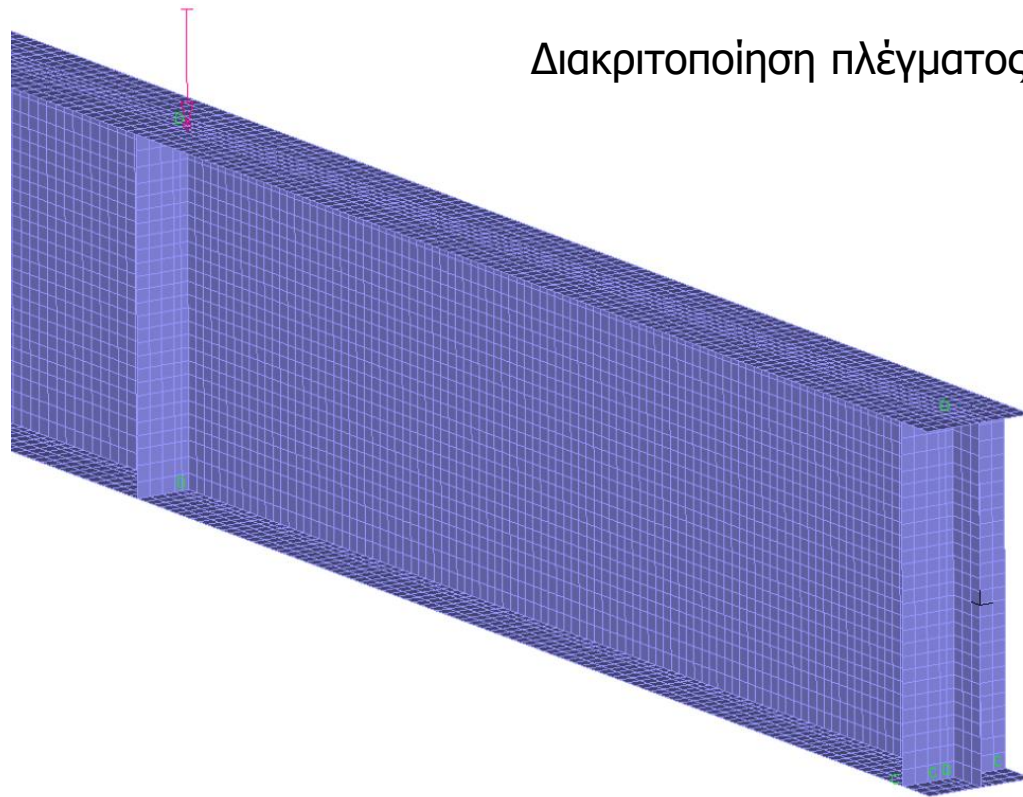
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

➤ Παράδειγμα Σύγκρισης – Πλευρικός λυγισμός συγκολλητής διατομής



ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

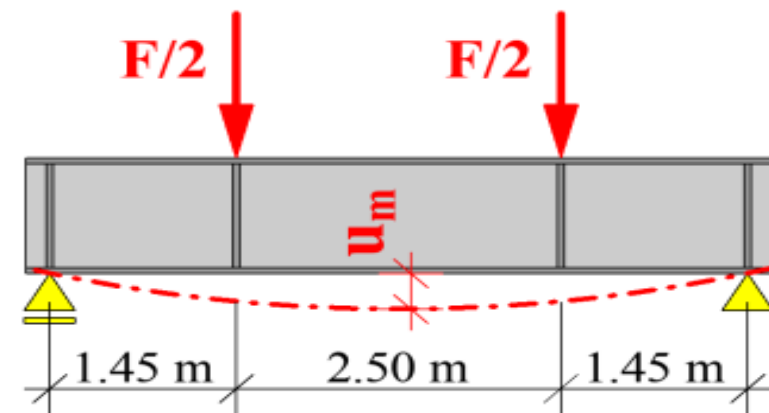
- Παράδειγμα Σύγκρισης – Πλευρικός λυγισμός συγκολλητής διατομής



Διακριτοποίηση πλέγματος: Πέλματα: 15mm*16mm (άκρα)
9mm*16mm (κέντρο)

Κορμός: 14mm*15mm (σε όλο το ύψος)

Ενισχύσεις: 14mm*15mm

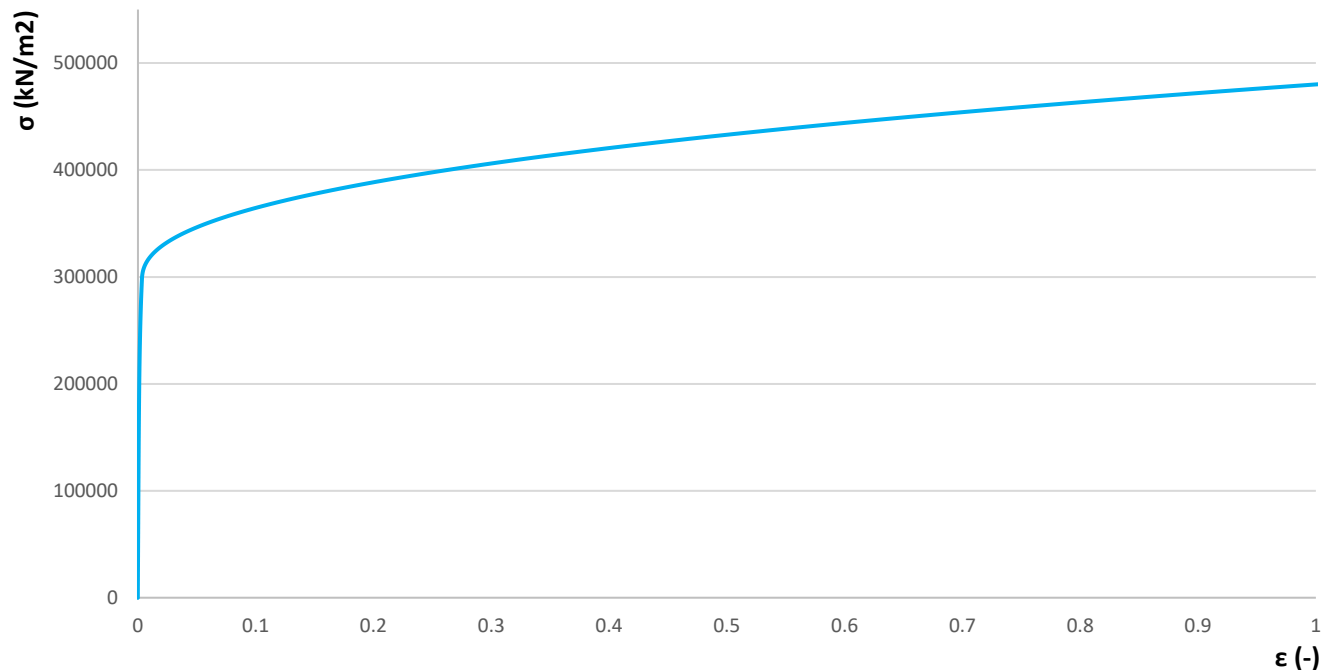


ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

➤ Παράδειγμα Σύγκρισης – Πλευρικός λυγισμός συγκολλητής διατομής

Υλικό διατομής
(μέση τιμή 3 δοκιμίων)

	f_y [MPa]	f_u [MPa]	E [GPa]	n [-]	$n'_{0.2,1,0}$ [-]
Μέση τιμή	298.0	632.5	196.1	5.63	2.34



Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού διαγράμματος σ - ϵ (δίνονταν μέσω του παραδείγματος):

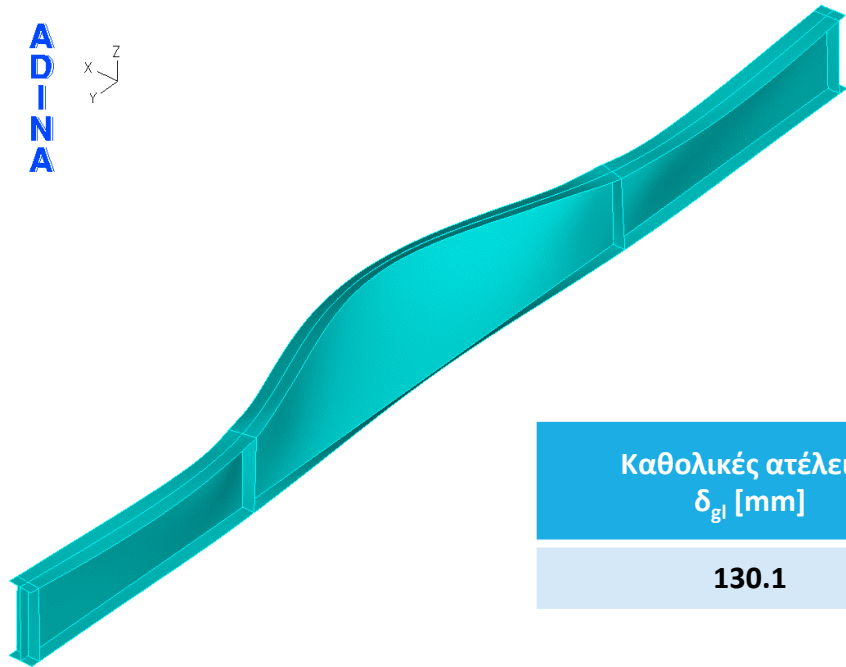
Διβάθμιος νόμος υλικού Ramberg-Osgood
Παραδοχή των Gardner & Nethercot

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

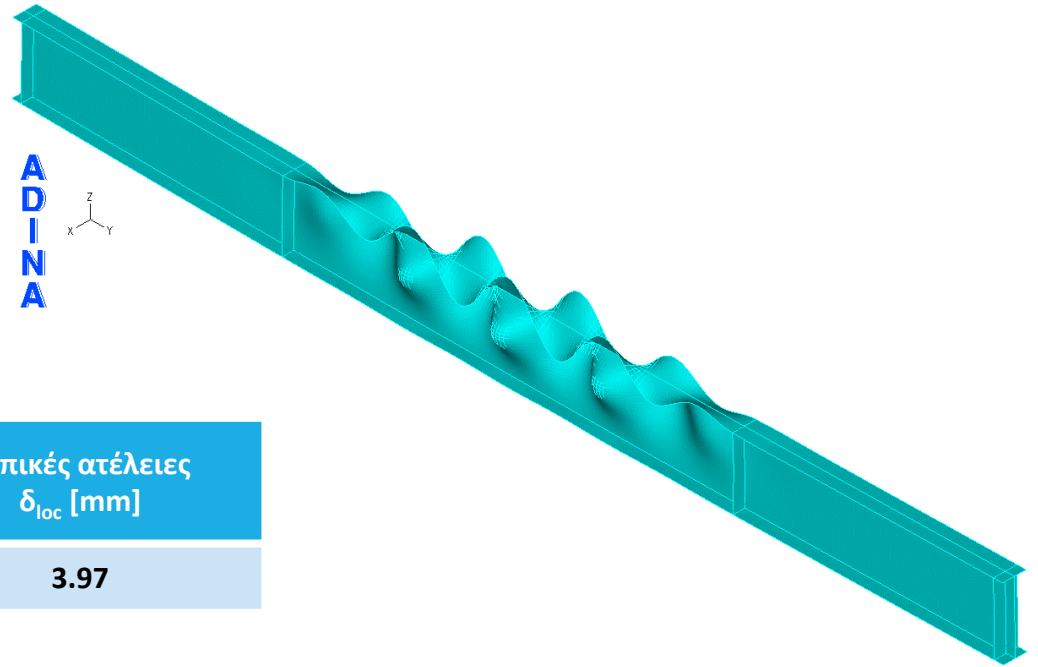
- Παράδειγμα Σύγκρισης – Πλευρικός λυγισμός συγκολλητής διατομής

Εισαγωγή αρχικών ατελειών:

A
D
I
N
A



1^η ιδιομορφή (καθολικός λυγισμός)



Γεωμετρικές ατέλειες

A
D
I
N
A



Καθολικές ατέλειες δ_{gl} [mm]	Τοπικές ατέλειες δ_{loc} [mm]
130.1	3.97

2^η ιδιομορφή (τοπικός λυγισμός)

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

- Παράδειγμα Σύγκρισης – Πλευρικός λυγισμός συγκολλητής διατομής

Εισαγωγή αρχικών ατελειών:

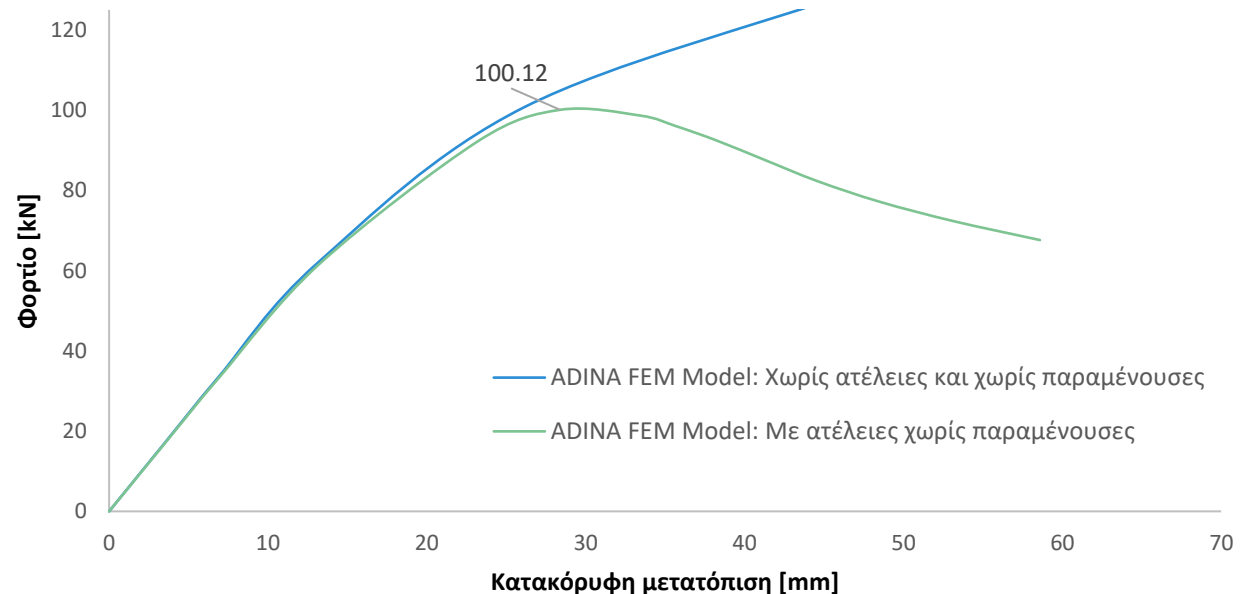
Στο πείραμα λαμβάνονται υπόψη

Στο αριθμητικό προσομοίωμα δεν λήφθηκαν υπόψη
(αδυναμία λογισμικού)

Παραμένουσες τάσεις

Ποσοστιαία απόκλιση χωρίς π.τ. = 5%

Αποτελέσματα αναλύσεων:



ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

- Παράδειγμα Σύγκρισης – Πλευρικός λυγισμός συγκολλητής διατομής

Αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν:

- 1) LBA – χρήση 2 πρώτων ιδιομορφών
- 2) GMNIA – τελική αντίσταση υποστυλώματος (με ατέλειες χωρίς παραμένουσες)

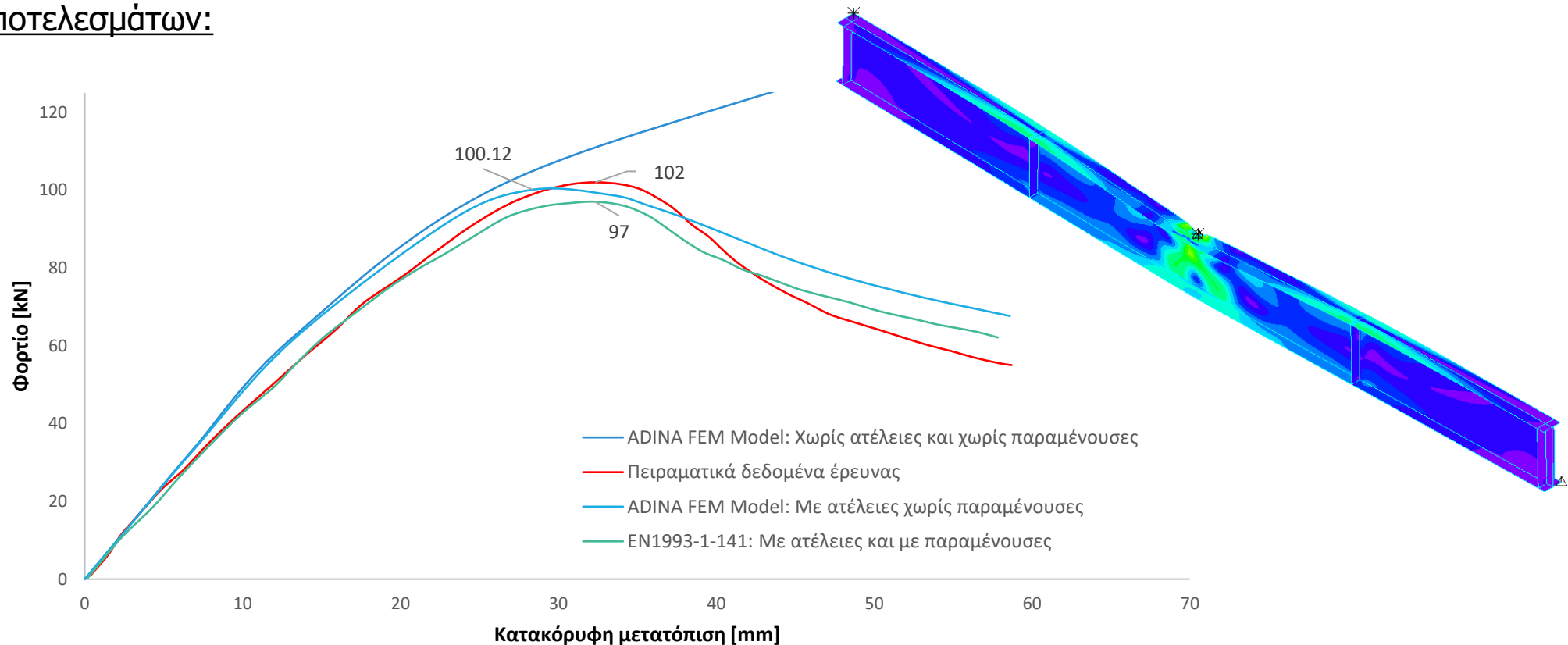
Σύγκριση αποτελεσμάτων:

- Χωρίς ατέλειες και χωρίς παραμένουσες τάσεις: —————> Αναξιόπιστα αποτελέσματα – μη ρεαλιστική απόκριση
- Με ατέλειες και χωρίς παραμένουσες τάσεις: —————> Αξιόπιστα αποτελέσματα – ρεαλιστική απόκριση (απόκλιση 2%)

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

- Παράδειγμα Σύγκρισης_ Πλευρικός λυγισμός συγκολλητής διατομής

Σύγκριση αποτελεσμάτων:



ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

➤ Παράδειγμα Σύγκρισης_– Πλευρικός λυγισμός συγκολλητής διατομής

Συμπερασματικά:

- Ρεαλιστική πρόβλεψη της απόκρισης και της μορφής αστοχίας
- Ακριβής πρόβλεψη του κρίσιμου φορτίου συγκριτικά με τα πειραματικά δεδομένα
- Σημαντικότερη παράμετρος οι αρχικές γεωμετρικές ατέλειες (ευαισθησία φορέα)
- Υπερεκτίμηση χωρίς παραμένουσες τάσεις, αλλά σχεδόν αμελητέες

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

➤ Παράδειγμα Σχεδιασμού – Αντοχή πλαισίου, πρώτη παραδοχή

Γενικές Πληροφορίες:

- Τυπικό μεταλλικό πλαίσιο με κεκλιμένη στέγη
- Πρότυπες διατομές ΗΕΒ 340, χάλυβας S235
- Σημειακή κατακόρυφη καταπόνηση στις κορυφές των υποστυλωμάτων
- Χρήση πεπερασμένων στοιχεία δοκού (beam elements)

Στόχος ανάλυσης:

Εύρεση τελικής αντοχής, διερευνώντας την επιρροή του συνδυασμού ιδιομορφών του πλαισίου

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

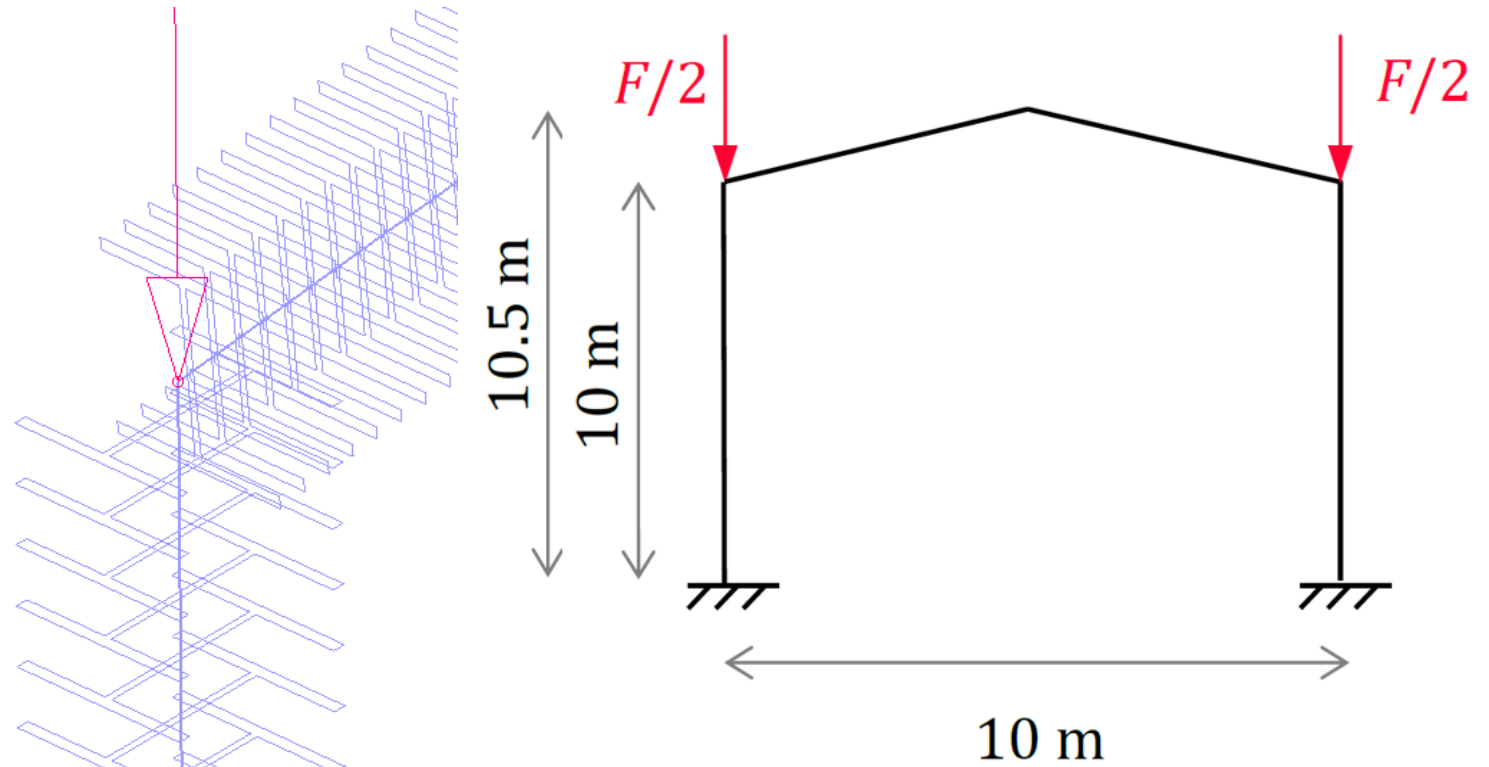
- Παράδειγμα Σχεδιασμού – Αντοχή πλαισίου, πρώτη παραδοχή

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

Ύψος $L_1=10\text{m}$, $L_2=10.5\text{m}$

Άνοιγμα πλαισίου 10m

Η διατομή κάμπτεται περί τον ισχυρό της άξονα



ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

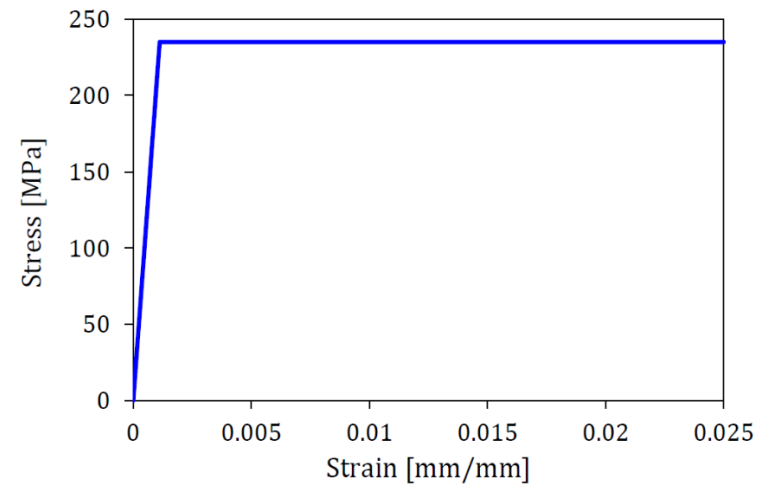
- Παράδειγμα Σχεδιασμού – Αντοχή πλαισίου, πρώτη παραδοχή

Διακριτοποίηση μελών:

Κάθε μέλος σε 100 στοιχεία

Νόμος υλικού:

Χάλυβας S235



Αρχικές ατέλειες:

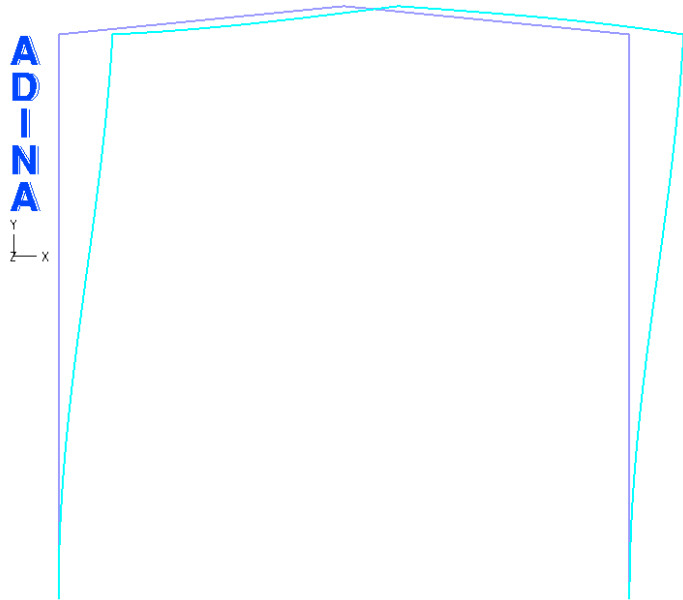
Παραμένουσες τάσεις αμελούνται

Γεωμετρικές αρχικές ατέλειες → Βάσει 3 πρώτων ιδιομορφών

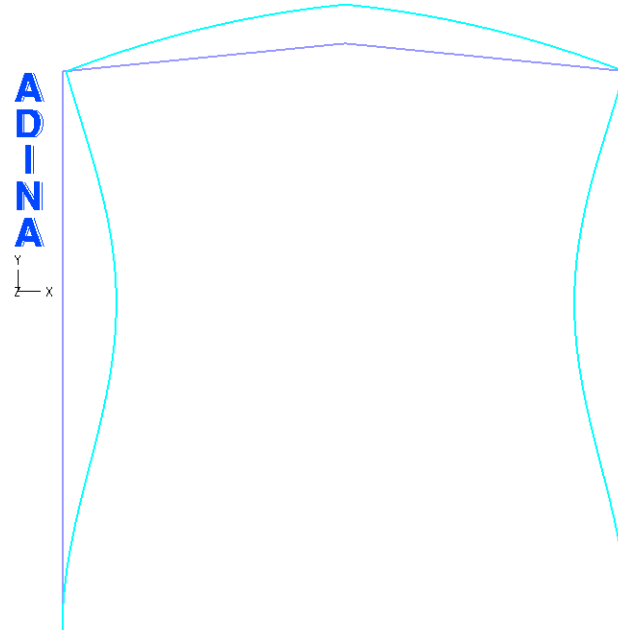
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

- Παράδειγμα Σχεδιασμού – Αντοχή πλαισίου, πρώτη παραδοχή

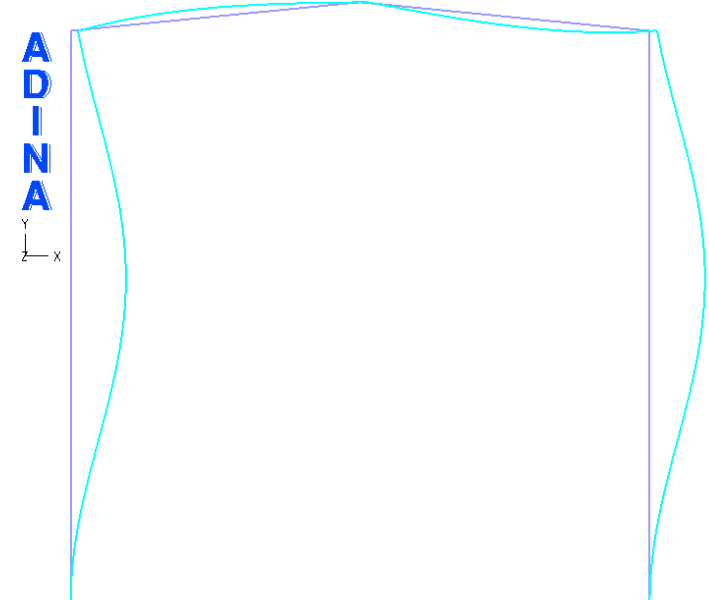
Αρχικές ατέλειες:



1η ιδιομορφή, καθολικές ατέλειες



2η ιδιομορφή, τοπικές ατέλειες



3η ιδιομορφή, τοπικές ατέλειες

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

- Παράδειγμα Σχεδιασμού – Αντοχή πλαισίου, πρώτη παραδοχή

Αρχικές ατέλειες:

Καθολική ατέλεια Φ_0	Τοπική ατέλεια e_0	Τοπική ατέλεια υποστυλώματος K_1	Τοπική ατέλεια υποστυλώματος K_2
1/200	L/1000	+/-	+/-
1/5000	L/1000	+/-	+/-
1/200	L/200	+/-	+/-
1/5000	L/200	+/-	+/-

Καθολική ατέλεια:

1^η ιδιομορφή

Ετερόσημη τοπική ατέλεια:

2^η ιδιομορφή

Ομόσημη τοπική ατέλεια:

3^η ιδιομορφή



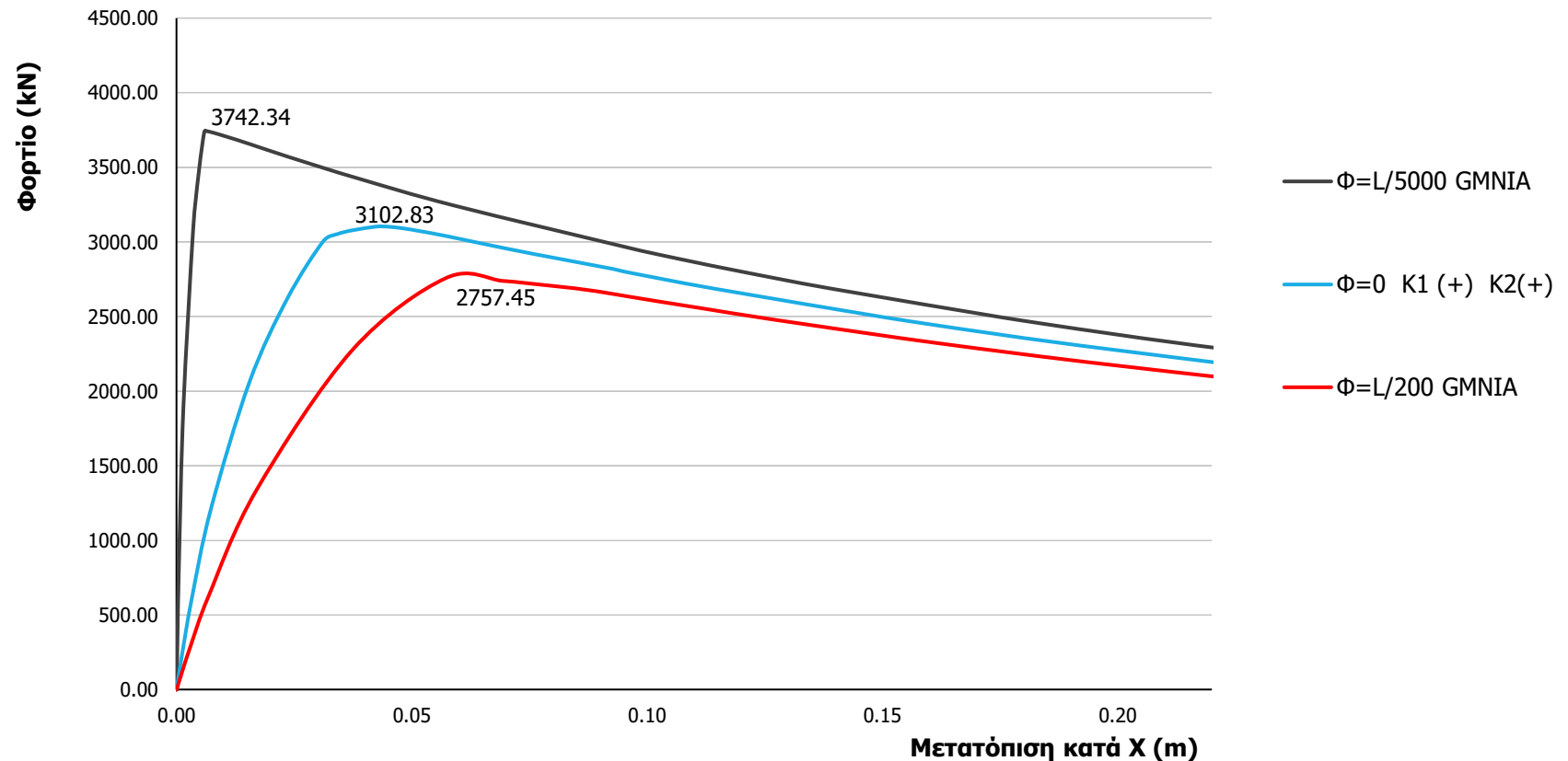
Συνδυασμός: 1^η-2^η και 1^η-3^η

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

- Παράδειγμα Σχεδιασμού – Αντοχή πλαισίου, πρώτη παραδοχή

Αποτελέσματα:

$$F_{cr} = 2757.45 \text{ kN}$$







ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

➤ Παράδειγμα Σχεδιασμού – Αντοχή πλαισίου, πρώτη παραδοχή

Σύγκριση αποτελεσμάτων:

Table B.2.1: Influence of direction of sway and member imperfections on frame capacity.

Shapes and sign of member geometric imperfections	Ultimate loads F_u (kN)	
	Sway imperfection amplitude $\phi = 1/200$	Sway imperfection amplitude $\phi = 1/5000$
 Left column: + Right column: +	281.4	335.6
 Left column: + Right column: -	282.9	337.0
 Left column: - Right column: -	281.1	334.8
 Left column: - Right column: +	282.5	336.2

Αποτελέσματα έρευνας Arrayago και Rasmussen

Αντοχή θλιβόμενης διατομής ΗΕΒ340 – «στο χέρι»

Υπολογισμός βάσει νομογραφημάτων και συντελεστών συμμετοχής, για μεταθετό πλαίσιο

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot f_y \cdot A}{\gamma_{M1}} \rightarrow N_{b,Rd} = 2749.1 \text{ kN}$$

$$F_{FEM} = 2757.45 \text{ kN} \quad / \quad F_{study} = 281.1 \text{ kN}$$

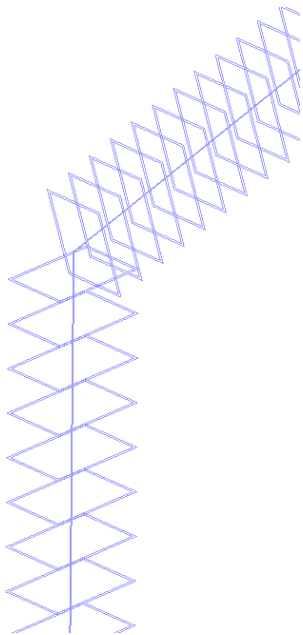


ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

➤ Παράδειγμα Σχεδιασμού – Αντοχή πλαισίου, **δεύτερη** παραδοχή

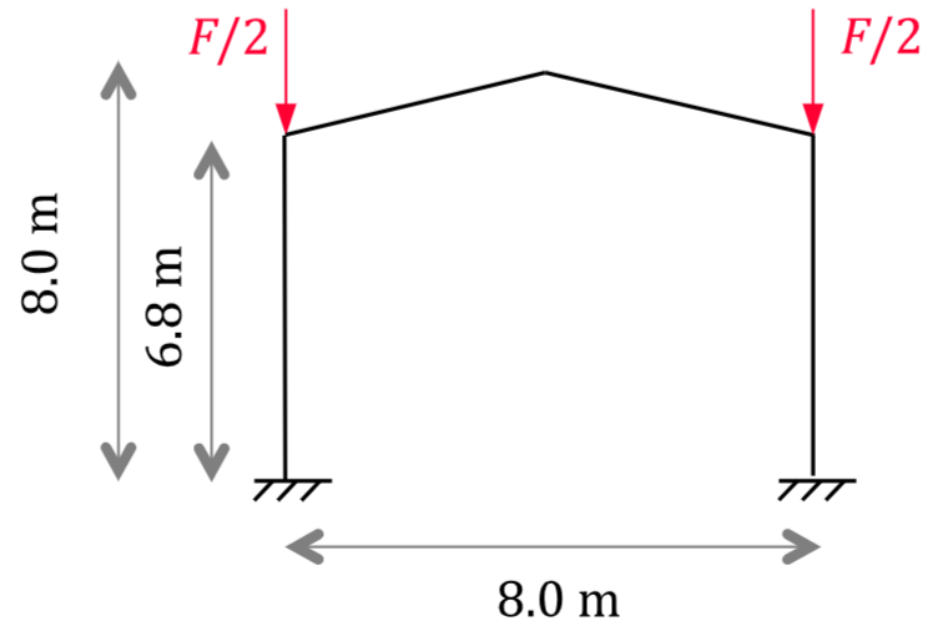
I have finally had the time to do some file archaeology and a few additional FE models, and I think I have the frame geometry to which the results reported in the example correspond. It seems that my Master student mislabelled the files and, as you suggested in your first email, the results did not match the geometry and materials given in the example description.

**A
D
I
N
A**



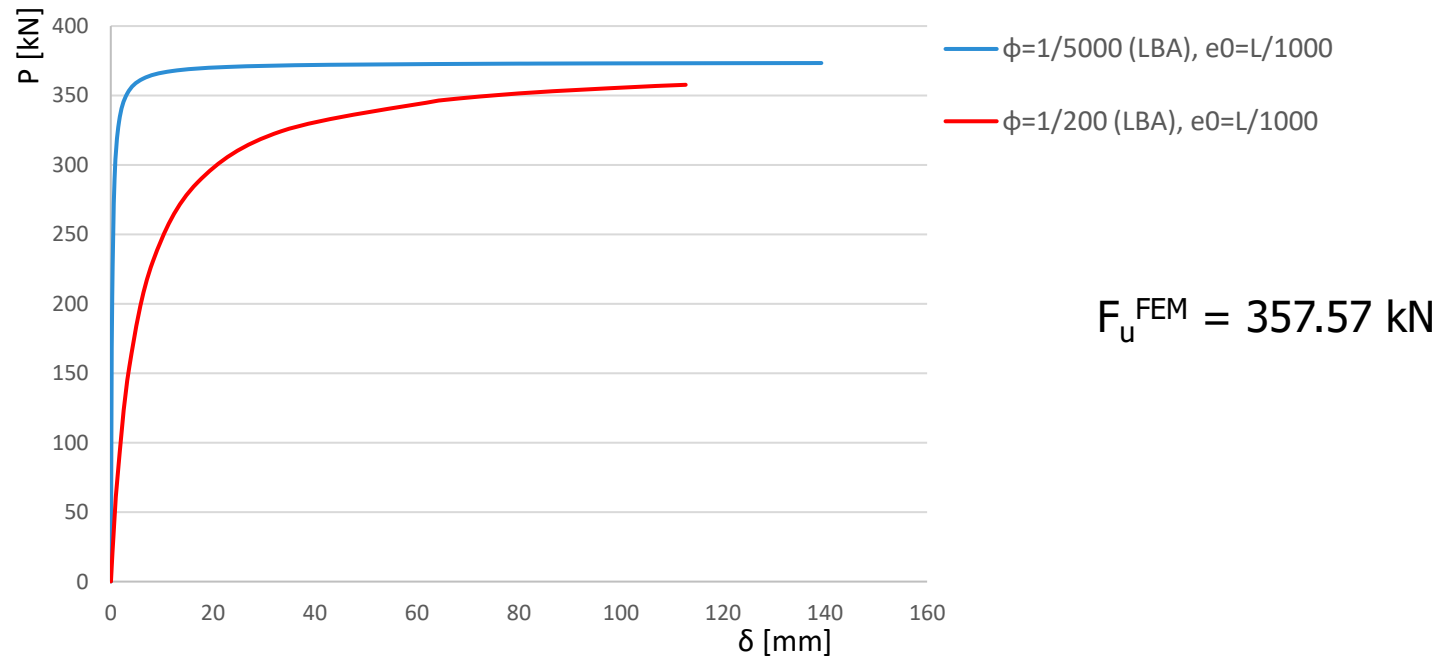
RHS150x100x4 / όχι HEB340

Διγραμμικός χάλυβας
 $f_y=352$ Mpa / όχι S235



ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

- Παράδειγμα Σχεδιασμού – Αντοχή πλαισίου, **δεύτερη** παραδοχή



ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

➤ Παράδειγμα Σχεδιασμού – Αντοχή πλαισίου, **δεύτερη** παραδοχή





Cases 1) $\varphi=1/200 + e_0=L/1000$

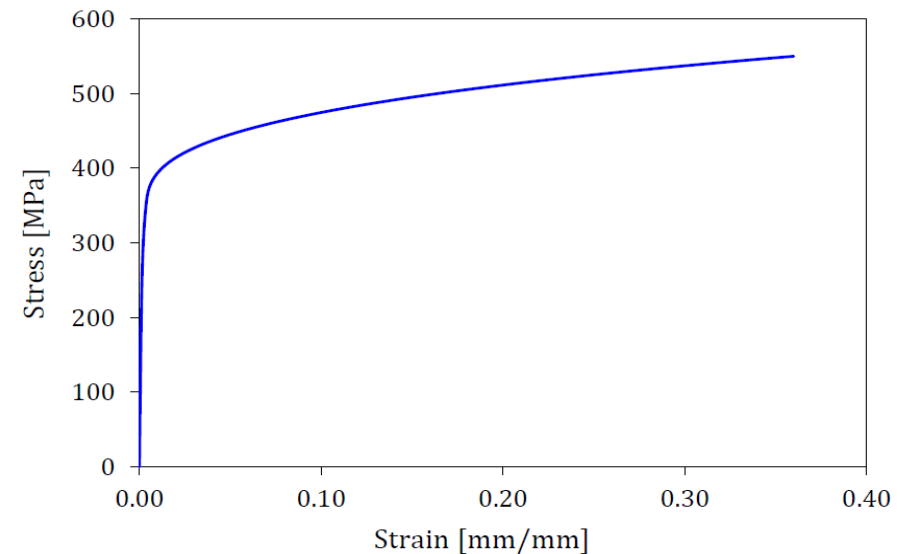
Cases 2) $\varphi=1/5000 + e_0=L/1000$

Cases 3) $\varphi=0 + e_0=L/1000$

Αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε υλικό Multilinear

E [MPa]	f_y [MPa]	f_u [MPa]	ϵ_u [mm/mm]	n	m
200,000	352	550	0.36	7	2.8

	Case 1	Case 2	Case 3	
	Comb 1	324	366	364
	Comb 2	324	362	990
	Comb 3	324	358	364
	Comb 4	324	362	988



ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

- Παράδειγμα Σχεδιασμού – Αντοχή πλαισίου, **δεύτερη** παραδοχή

The values I get (using the elastic-plastic material, as you did) for $\varphi=0.005$ and a member imperfection of $L/1000$ are around 362kN, which are indeed very close to the 357kN value you obtain.

$$F_u^{\text{FEM}} = 357.57 \text{ kN} \quad / \quad F_u^{\text{EXAMPLE}} = 362 \text{ kN}$$

Συμπερασματικά:

- Ρεαλιστική πρόβλεψη της απόκρισης και της μορφής αστοχίας
- Ακριβής πρόβλεψη του κρίσιμου φορτίου συγκριτικά με τα πειραματικά δεδομένα
- Σημαντικότερη παράμετρος οι αρχικές καθολικές γεωμετρικές ατέλειες (ευαισθησία φορέα)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Στόχος των 1-14 & 1-141 → απλούστευση & πλήρης καθοδήγηση προσομοίωσης μεταλλικών φορέων
- FEM → αναπόφευκτα και ταυτόχρονα χρήσιμα (ακρίβεια, περιπλοκότητα γεωμετρίας)
- Ρεαλιστική πρόβλεψη της απόκρισης και των παραμορφώσεων
- Επαρκής διακριτοποίηση = κλειδί
- Το επίπεδο ασφαλείας δεν τροποποιείται βάσει των 1-14 & 1-141
- Κρίση μηχανικού (ερμηνεία & αξιολόγηση αποτελεσμάτων)
- Ιδιαίτερη προσοχή στα δεδομένα εισαγωγής (Garbage in / Garbage out)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ!

Απορίες;