



Σεμινάριο: Σεισμική Επάρκεια Μνημείων



Διαθέσιμες μέθοδοι ανάλυσης μνημείων και κριτήρια για την επιλογή τους




Καθηγητής Α. Ι. Κάππος
Τμήμα Πολιτ. Μηχανικών ΑΠΘ



Θεσσαλονίκη, 3-5 Νοεμ. 2011

Κατηγορίες μεθόδων αποτίμησης σεισμικής τρωτότητας

- Εμπειρικές
 - ◆ Μέθοδοι ταξινόμησης
 - ◆ Μέθοδοι αξιολόγησης (μέθοδοι ερωτηματολογίου)
- Αναλυτικές, π.χ. 
 - ◆ Με βάση τις δυνάμεις
 - ◆ Με βάση τις μετακινήσεις
- Πειραματικές
 - ◆ Εργαστηριακές δοκιμές
 - ◆ Επιτόπου δοκιμές

Η επιλογή μεθόδου εξαρτάται από το **σκοπό**
της αποτίμησης και τα διαθέσιμα **μέσα**

- Για αποτίμηση σεισμικών απωλειών («σενάρια») σε
πολεοδομικά συγκροτήματα:
 - *Εμπειρικές (ταξινόμησης)*
(όχι για μνημεία...)
- Για καθορισμό προτεραιοτήτων ενίσχυσης:
 - *Εμπειρικές (ερωτηματολογίου)*
- Για μελέτες ενίσχυσης μεμονωμένων κτιρίων:
 - *Αναλυτικές (+επιτόπου δοκιμές)*

ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΟΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΝΗΜΕΙΩΝ ΜΕ ΦΕΡΟΝΤΑ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

(βλ. και Ρυθμιστικό Κείμενο για τις δομητικές
επεμβάσεις και την αντισεισμική προστασία των
ελληνικών μνημείων)

ΔΙΑΘΕΣΙΜΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΟΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

- Ελαστική (ισοδύναμη) στατική ανάλυση με καθολικό δείκτη συμπεριφοράς (q)
- Ελαστική δυναμική ανάλυση με καθολικό δείκτη συμπεριφοράς (q)
- Ανελαστική στατική ανάλυση
- Ανελαστική δυναμική ανάλυση (ανάλυση χρονοϊστορίας)
- δεν συνιστάται (στην παρούσα φάση) η χρήση της ανελαστικής δυναμικής μεθόδου: πολύπλοκη δομή φορέων μνημείων, ελλιπής διαθέσιμη εμπειρία...

ΓΕΝΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΜΕΘΟΔΩΝ

- Για την αρχική επιλογή λαμβάνονται υπόψη:
 - ◆ Μορφολογία και δυναμικά χαρακτηριστικά του δομικού συστήματος του μνημείου
 - ◆ Σπουδαιότητα εξεταζόμενου μνημείου
- Κριτήρια μορφολογίας μνημείου :
 - ◆ μέγεθος και πολυπλοκότητα
 - ◆ κανονικότητα
 - ◆ δυναμικά χαρακτηριστικά δομικού συστήματος
- Υψηλότερη στάθμη σπουδαιότητας ↔ πλέον ακριβής μέθοδος ανάλυσης

ΓΕΝΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΜΕΘΟΔΩΝ

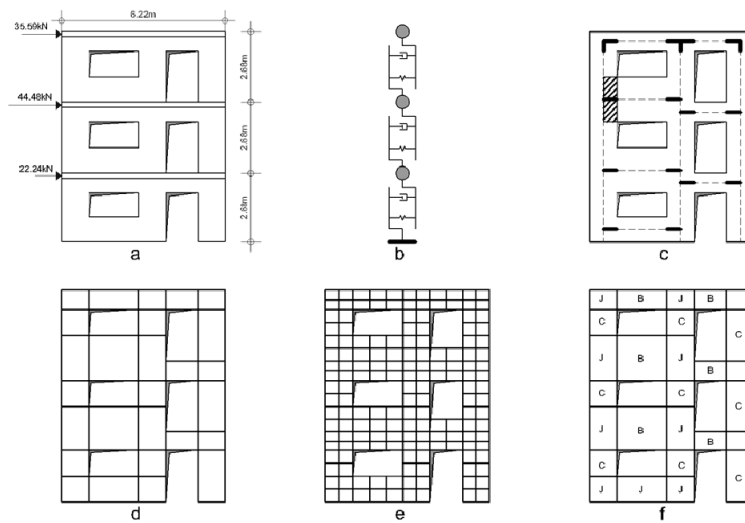
- Σημαντικό κριτήριο επιλογής της τελικής μεθόδου ανάλυσης: Ικανότητα της μεθόδου (και της αντίστοιχης προσομοίωσης) να αναπαραγάγει λογιστικώς τις προγενέστερες συμπεριφορές του μνημείου, κυρίως τις υπάρχουσες βλάβες!
- Ο συνδυασμός μεθόδων και προσομοιωμάτων ανάλυσης, π.χ.
 - ελαστική ανάλυση πλήρους προσομοιώματος του μνημείου + ανελαστική ανάλυση επιλεγμένων (πιο ευαίσθητων ή πιο σημαντικών) υποσυνόλων τουαποτελεί, κατά κανόνα, την καταλληλότερη επιλογή!

ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΙΣΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ (ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΩΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ)

- Το προσομοίωμα του μνημείου πρέπει να περιλαμβάνει (αυτοτελώς, ή με συνδυασμό επιμέρους προσομοιωμάτων) το σύνολο του φέροντος οργανισμού του μνημείου
- Στην ανάλυση υποσυνόλων → οι συνοριακές συνθήκες να ανταποκρίνονται στην πραγματική επιρροή του υπολοίπου φορέα (μπορεί να είναι κρίσιμες για την ευστάθεια του υποσυνόλου!)
- Η προσομοίωση μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας μία (ή περισσότερες) θεωρήσεις

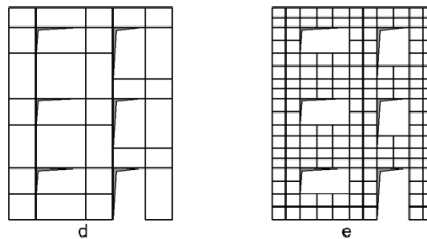
ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΙΣΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

- ❖ Πεπερασμένα στοιχεία συνεχούς μέσου, κατά προτίμηση 2D (π.χ. στοιχεία επίπεδης έντασης ή δίσκου), σε συνδυασμό (εφόσον απαιτείται)
 - ◆ με ραβδωτά στοιχεία, ή και
 - ◆ εφόσον κρίνεται απαραίτητο, 3D (π.χ. στερεά στοιχεία ή στοιχεία κελύφους)
 - αποδεκτή (και συνήθης) η απλοποιητική παραδοχή ισότροπης συμπεριφοράς
- ενδείκνυται για την ελαστική ανάλυση μνημείων στον χώρο (ιδιαίτερως των περίπλοκης γεωμετρίας!)
- είναι σκόπιμη στη (συνήθη) περίπτωση όπου η αποδεκτή στάθμη βλάβης του μνημείου είναι χαμηλή
- καλύπτεται και από υπάρχοντα εμπορικά λογισμικά



Ενδεικτικές προσομοιώσεις επίπεδου φορέα από
φέρουσα τοιχοποιία

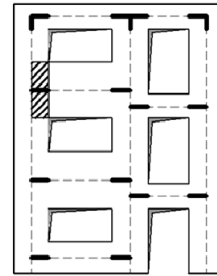
ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΙΣΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



- τα ελαστικά στοιχεία, κατά κανόνα, δεν μπορούν να περιγράψουν την πραγματική συμπεριφορά του μνημείου
- τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης εξαρτώνται από τον κάνναβο της διακριτοποίησης
- απαιτείται ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων στην κατά τόπους πυκνότητα του καννάβου!

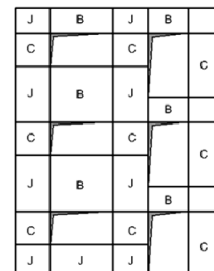
ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΙΣΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

- ❖ Ισοδύναμα πλαίσια: κατακόρυφα στοιχεία (πεσσοί) και οριζόντια στοιχεία (υπέρθυρα ή οιονεί-δοκοί), που συνδέονται με άκαμπτους βραχίονες
 - μπορεί να εφαρμοστούν τόσο για την ελαστική όσο και για την ανελαστική ανάλυση μνημείων, στο επίπεδο ή και στον χώρο
 - είναι η πλέον ενδεδειγμένη μέθοδος για την ανελαστική ανάλυση! (καλύπτεται και από ορισμένα υπάρχοντα εμπορικά λογισμικά)
 - μπορεί να εφαρμοστεί είτε για το σύνολο του μνημείου είτε, συνηθέστερα, για καταλλήλως επιλεγμένα (επίπεδα) υποσύνολά του



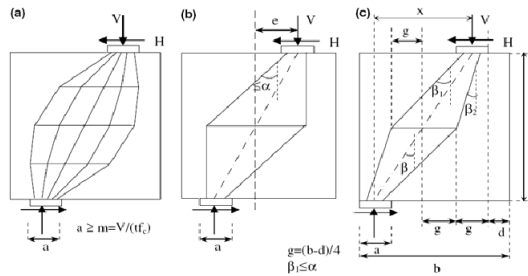
ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΙΣΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

- ❖ Μακροστοιχεία: καθένα τους προσομοιώνει ένα τμήμα του μνημείου. Μπορεί να οριστούν:
 - με βάση την αρχική γεωμετρία του φορέα, π.χ. φαντώματα που αντιστοιχούν σε πεσσούς ή υπέρθυρα
 - με βάση μια αρχική κατανομή κυρίων ρωγμών στον φορέα (π.χ. από προκαταρκτική ελαστική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, ή γνωστή από την παθολογία)
- μπορεί να εφαρμοστεί τόσο για την ελαστική όσο και για την ανελαστική ανάλυση μνημείων (2D ή και 3D)
- απαιτεί υψηλό βαθμό εμπειρίας
- επί του παρόντος, δεν έχει ενσωματωθεί σε εμπορικά λογισμικά



ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΙΣΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

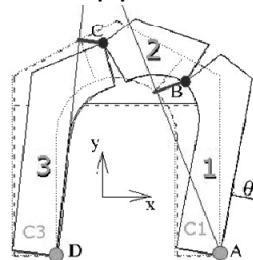
- ❖ Συστήματα (υποκατάστατων) θλιπτήρων και ελκυστήρων: ενδείκνυνται αν διατίθενται επαρκώς αγκυρωμένοι ελκυστήρες (μεταλλικοί ή και ξύλινοι)
- μπορεί να εφαρμοστεί για την ανάλυση (κρίσιμων) τμημάτων μνημείων στο επίπεδο



- δυσχέρεια στον αξιόπιστο καθορισμό των ελκυστήρων (κατά κανόνα οριζοντίων)
- προϋποθέτουν ανάληψη εφελκυσμού από την τοιχοποιία (μέσω συνοχής και τριβής στους αρμούς)

ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΙΣΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

- ❖ Οριακή ανάλυση: Προσομοίωση κρίσιμου τμήματος του μνημείου ως κινηματικού μηχανισμού (π.χ. τριαρθρωτού τόξου) που αναλύεται με βάση τις κινηματικές μεθόδους (γραμμικές ή και μη-γραμμικές)
- Έλεγχος του μηχανισμού: βάσει συνθηκών οριακής ισορροπίας (κινηματική προσέγγιση)
- Επιλογή (με βάση προηγούμενη εμπειρία – παθολογία) κατάλληλων μηχανισμών αστοχίας
- προσδιορισμός οριζοντίων δυνάμεων που ενεργοποιούν τον επιλεγέντα μηχανισμό
- κυρίως για την ανελαστική ανάλυση:
 - της εκτός επιπέδου αστοχίας κρίσιμων τμημάτων μνημείων (π.χ. τοίχοι στην όψη του κτιρίου, μετώπες)
 - τόξων του φορέα



ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΙΣΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

- Επίσης: σημαντική αβεβαιότητα στη δυσκαμψία-δυσστησία (K) και τις αντιστάσεις (R) των επιμέρους τμημάτων του φορέα του μνημείου (που υπεισέρχονται στις ανελαστικές μεθόδους ανάλυσης)
- απαραίτητο να γίνονται κατάλληλες αναλύσεις ευαισθησίας (στη διακύμανση των τιμών των εισαγόμενων K και R)
- Για την τελική επιλογή κρίσιμη είναι και η ικανότητα του προσομοιώματος να ερμηνεύει τις προγενέστερες συμπεριφορές του μνημείου

ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Ελαστική (ισοδύναμη) στατική ανάλυση

- Κριτήρια ελέγχου των προϋποθέσεων εφαρμογής
 - ◆ $\lambda = S / R_m \leq 2$
 - ◆ $\lambda > 2$, αλλά φορέας μορφολογικά κανονικός
 - ◆ γεωμετρία σε κάτοψη και τομή
 - ◆ αν δεν υπάρχουν ουσιώδεις βλάβες, επιτρέπεται πάντα για την αποτίμηση (μόνον) του μνημείου
- Αρχικά, τιμές των EI και GA για αρηγμάτωτα στοιχεία, αναθεωρούνται μετά από μια (μόνο) αρχική ανάλυση
- Τα M, V υπολογίζονται σε όλες τις κρίσιμες θέσεις με ολοκλήρωση των τάσεων των πεπερ. στοιχείων εντός κατάλληλου μεγέθους «εστίας αντοχής»

Ελαστική δυναμική ανάλυση

- Κριτήρια ελέγχου των προϋποθέσεων εφαρμογής
 - ◆ $\lambda = S / R_m \leq 2$
 - ◆ $\lambda > 2$, αλλά φορέας μορφολογικά κανονικός
- ΕΙ, GA όπως στη στατική ανάλυση
- Φασματική ιδιομορφική ανάλυση (βάσει §3.4 ΕΑΚ)
- Τα M , V υπολογίζονται σε όλες τις κρίσιμες θέσεις με ολοκλήρωση των τάσεων των πεπερ. στοιχείων εντός κατάλληλου μεγέθους «εστίας αντοχής»
 - στατιστική επαλληλία των προκυπτόντων ιδιομορφικών μεγεθών

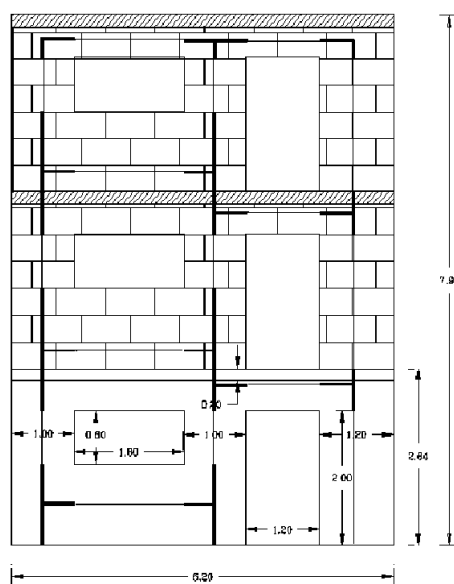
ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Ανελαστική στατική ανάλυση

- Κριτήρια ελέγχου των προϋποθέσεων εφαρμογής
 - ◆ θεμελιώδης ιδιοπερίοδος $T_0 < 3.5T_2$
 - ◆ όταν $T_0 > 3.5T_2$ εφαρμόζεται σε συνδυασμό με μια συμπληρωματική δυναμική ελαστική ανάλυση
- Μή-γραμμικοί καταστατικοί νόμοι έντασης – παραμόρφωσης μελών (π.χ. $M - \theta$ στα ισοδύν. πλαίσια)
- Εφαρμογή δύο τουλάχιστον διαφορετικών καθύψους κατανομών φορτίων (1^{ης} ιδιομορφής + 'ομοιόμορφη')
- Σε κτίρια με ευπαραμόρφωτα διαφράγματα, η στοχευόμενη μετακίνηση μπορεί να υπολογίζεται χωριστά για κάθε φορέα ανάληψης σεισμ. δράσεων

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ – ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΪΑ

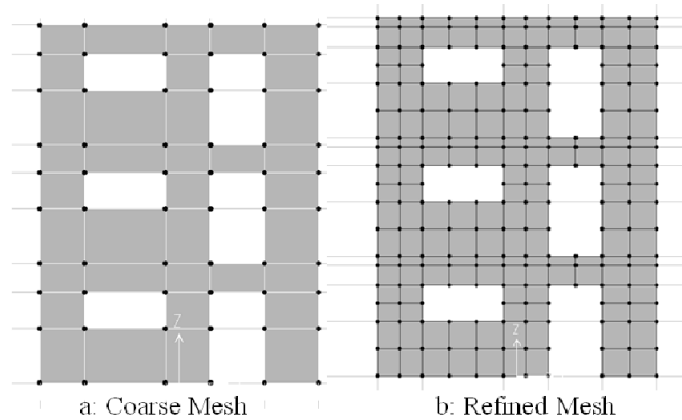
Ισοδύναμο πλαίσιο ή πεπερ. στοιχεία;



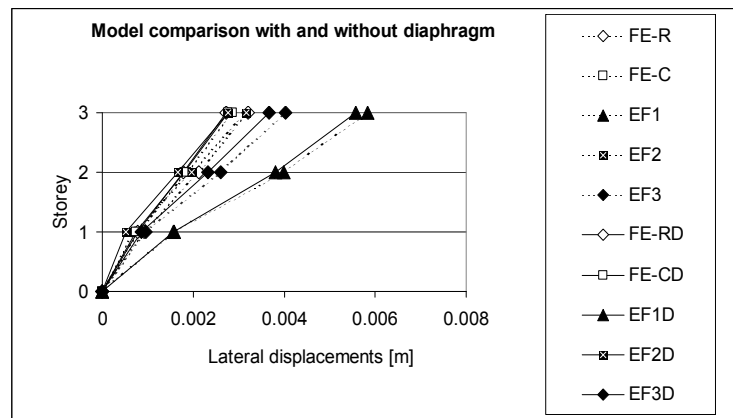
Τυπικός τοίχος με ανοίγματα

- Ελαστική ανάλυση (2D):
 - ◆ 6 μοντέλα ισοδύν. πλαισίου (άκαμπτες ζώνες, διάφραγμα)
 - ◆ 4 μοντέλα πεπερ. στοιχείων (κάνναβος, διάφραγμα)

Name	Description
EF1	Only horizontal rigid zones and no diaphragm constraint
EF1D	Only horizontal rigid zones with diaphragm constraint
EF2	Horizontal and vertical rigid zones and no diaphragm constraint
EF2D	Horizontal and vertical rigid zones with diaphragm constraint
EF3	Horizontal and half vertical rigid zones and no diaphragm constraint
EF3D	Horizontal and half vertical rigid zones with diaphragm constraint
FE-R	A refined mesh of finite elements with no diaphragm constraints
FE-RD	A refined mesh of finite elements with diaphragm constraints
FE-C	A coarse mesh of finite elements with no diaphragm constraints
FE-CD	A coarse mesh of finite elements with diaphragm constraints



μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων (SAP2000)
με/χωρίς διαφραγματική λειτουργία



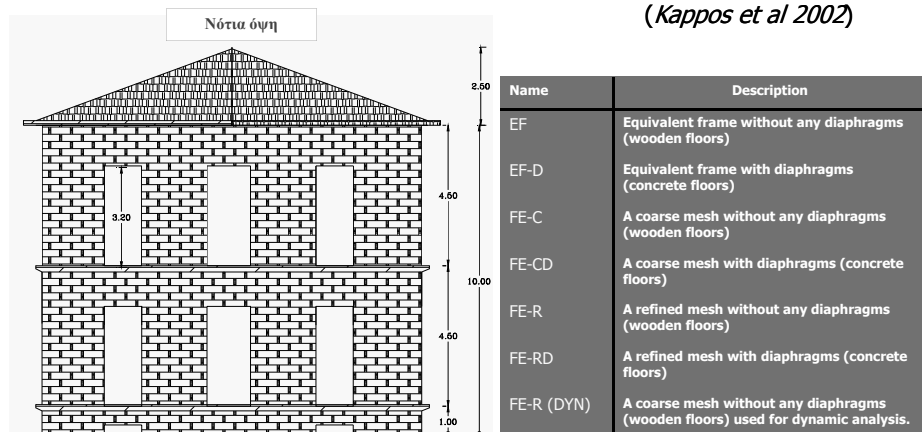
- Επιρροή διαφραγματικής λειτουργίας αμελητέα (αλλά 2D!)
- Σημαντική η παραδοχή για τις άκαμπτες ζώνες!
- Καλύτερη σύμπτωση FE με EF2 = πλήρεις οριζόντιες + κατακόρυφες άκαμπτες ζώνες (\leftrightarrow ελαστική ανάλυση!)
- Μικρή επιρροή πυκνότητας καννάβου στα FE (αλλά σημαντικότερη στις τάσεις!)

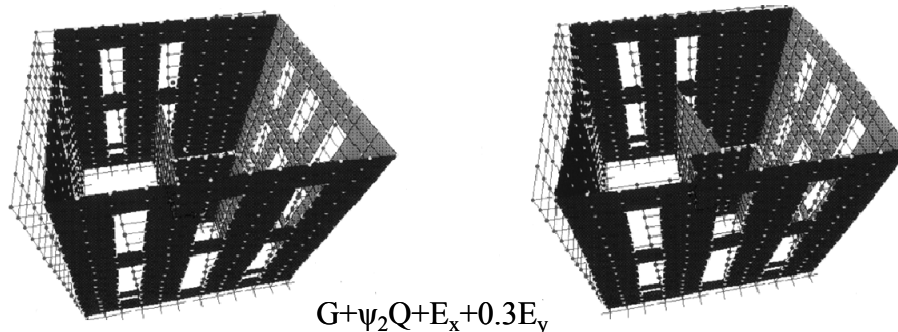
στοιχείο	Αξονική δύναμη [KN]			Τέμνουσα [KN]		
	EF2	FE-R	Διαφορά (%)	EF2	FE-R	Διαφορά (%)
αριστερός πεσσός	-85	-65.37	23.0	15.56	19.0	16.0
μεσαίος πεσσός	-147	-172.0	14.5	28.58	23.5	17.7
δεξιός πεσσός	-171	-166.65	2.5	15.94	18.0	11.4

- διαφορές στα εντατικά μεγέθη (V, N) αποδεκτές για πρακτική εφαρμογή (3÷23%)
- αν απαιτείται και υπολογισμός τάσεων, ενδείκνυται η χρήση πεπερ. στοιχείων

Διώροφο κτήριο από λιθοδομή (Karantoni - Fardis 1991)

- Ελαστική ανάλυση (3D):
 - ◆ 2 μοντέλα ισοδύναμου πλαισίου: πλήρεις άκαμπτες ζώνες, τύπος διαφράγματος (ξύλινο, πλάκα Ο/Σ)
 - ◆ 5 μοντέλα πεπερ. στοιχείων (κάνναβος, τύπος διαφράγματος)

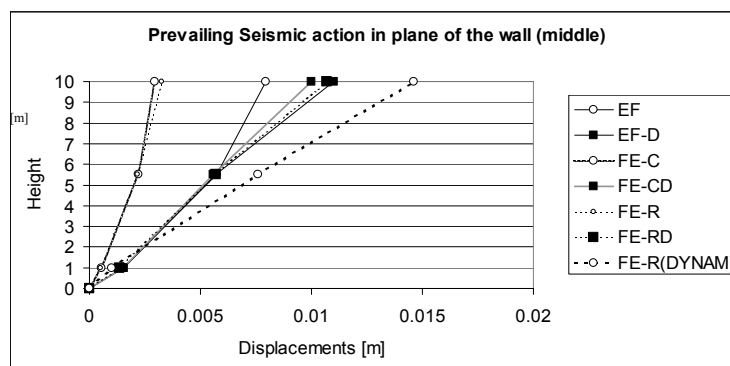




με πλάκα O/Σ

με ξύλινο πάτωμα

- στο κτήριο με διαφραγμ. λειτουργία η σεισμική δράση αναλαμβάνεται κυρίως από τους τοίχους x-x
- στο κτήριο χωρίς διαφραγμ. λειτουργία παρατηρούνται σημαντικές παραμορφώσεις τοίχων εκτός επιπέδου
- δεν προσομοιώθηκε τυχόν αποχωρισμός τοίχων

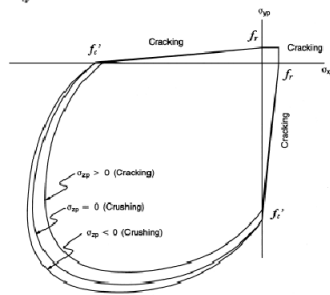
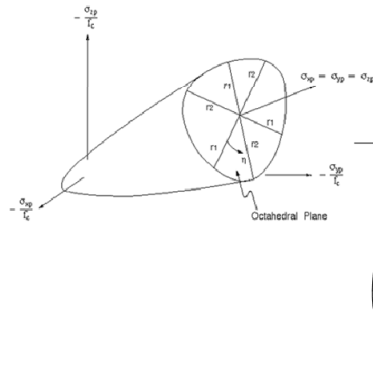


- σημαντικές διαφορές στις μετακινήσεις (KM πατωμάτων)!
- οι πλάκες O/Σ σχεδόν διπλασιάζουν τη συνολική μάζα
- αλλάζει επίσης η καθύψος κατανομή φορτίων ($\delta_{\text{τριγ}} \approx 1.9\delta_{\text{ομ}}$)
- δυναμική ανάλυση: πολύ μεγαλύτερες δ από 'ομοιόμορφη'
- η πυκνότητα του καννάβου FE δεν έχει ουσιώδη επιρροή

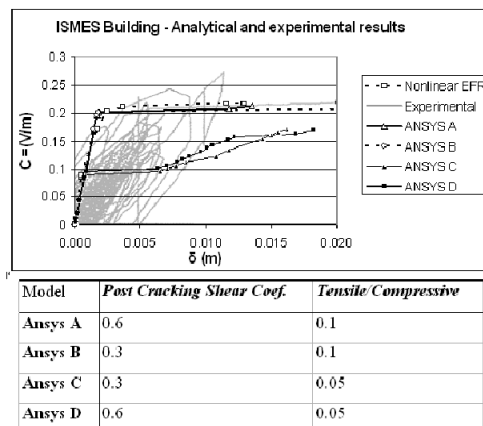
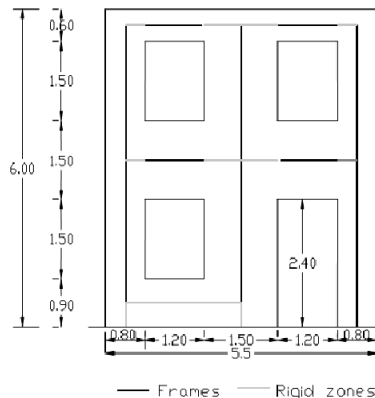
Τυπικός τοίχος με ανοίγματα

■ Ανελαστική ανάλυση:

- ◆ μοντέλο ισοδύναμου πλαισίου (άκαμπτες ζώνες, διάφραγμα) - SAP2000
 - μοντέλο M-θ (Penelis, 2000, 2006)
- ◆ μοντέλα πεπερ. στοιχείων – ANSYS (Solid 65)



- κριτήριο αστοχίας Willam-Warnke
- αστοχία από θλίψη ($\epsilon_u = 0.002$)
- ή διαξονικό εφελκυσμό ($f_t = 0.1 \cdot f_c$)
- $E_{el} = 1000 \cdot f_c$
- μετά την αστοχία: $G_{res} = 0.6 G_0$

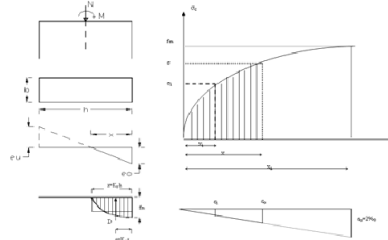


- επιλογή f_t , G_{res} από βαθμονόμηση βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων (κτήριο ISMES) και συγκρίσεις με Ignatakis et al. (1989)
- πρόσθετες αναλύσεις για $E_{el} = 550 \cdot f_c$

Καταστατικός νόμος M - θ

- Καμπτική συνιστώσα από ανάλυση M - κ (διατομών)

$$\theta = \int_0^L \frac{\kappa \cdot x}{L} dx$$



- Διατμητική συνιστώσα από ημι-εμπειρική προσέγγιση (αξιοποίηση πειραματικών αποτελεσμάτων)
αντοχή:

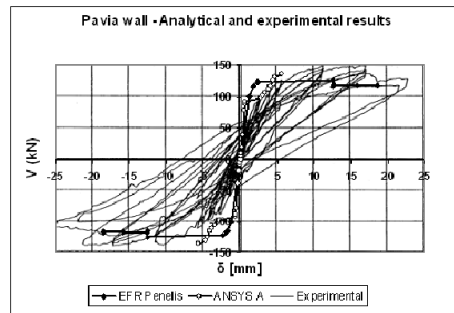
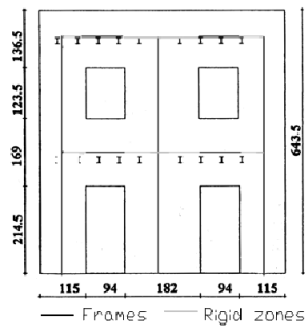
$$V_u = b \cdot h \cdot \left[\frac{1.5f_{vko} + 0.4p}{1 + 3f_{vko} \cdot a_v / p} \right] \quad p = N/h \cdot b, \quad a_v = M/V \cdot h \quad (\text{λόγος διάτμησης})$$

(Gr. Penelis, 2000, 2006)

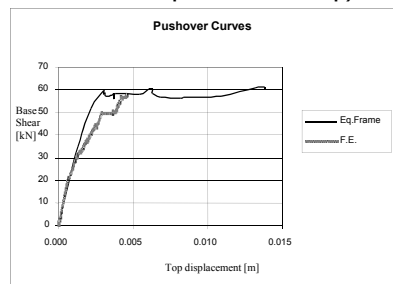
διατμητικές παραμορφώσεις:
πειραματικά αποτελέσματα Pavia and ISPRA

- προτεινόμενο $\theta_u = 5.30 \text{ ‰}$ (μικρό COV)
- από περαιτέρω επεξεργασία (Penelis, 2000, 2006):

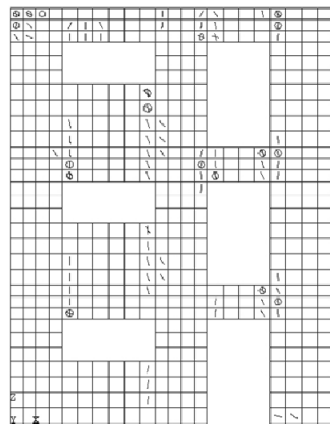
$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{5/6 \cdot G_{ef}} \quad \text{όπου } G_{ef} \cong 90f_m,$$



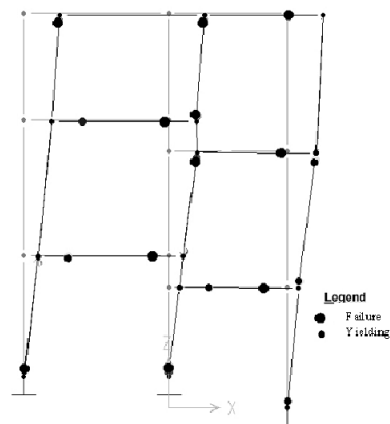
Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων (κτήριο Pavia) με αποτελέσματα ανάλυσης FE (ANSYS A) και ισοδ. πλαισίου (EFR)



- και τα δύο μοντέλα δίνουν καλή πρόβλεψη της αρχικής δυσκαμψίας και της μέγιστης αντοχής
- η ανάλυση FE (force-controlled) δεν μπορεί να προβλέψει παραμορφώσεις



μοντέλο FE: πρόβλεψη ρηγματώσης



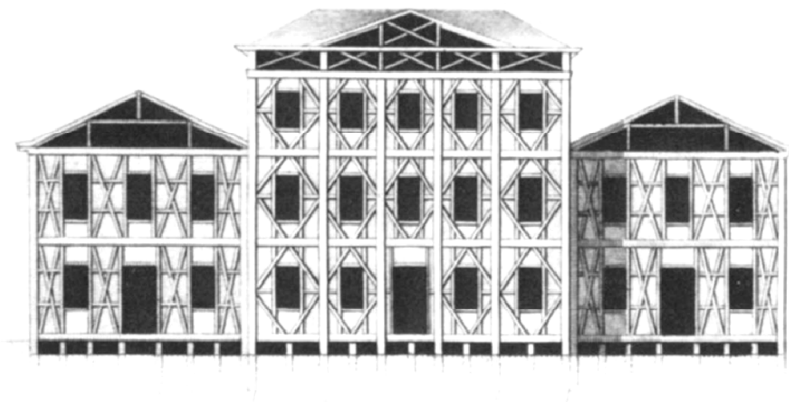
μοντέλο EFR: πρόβλεψη πλαστικών αρθρώσεων

→ εύλογη σύμπτωση αποτελεσμάτων (και τα δύο μοντέλα προβλέπουν αστοχία κυρίως στις 'οιονεί-δοκούς')

Ανελαστική ανάλυση ξυλόπηκτης τοιχοποιίας



Πρόσοψη κτηρίου ξυλόπηκτης
τοιχοποιίας στην Ιταλία (Calabria)



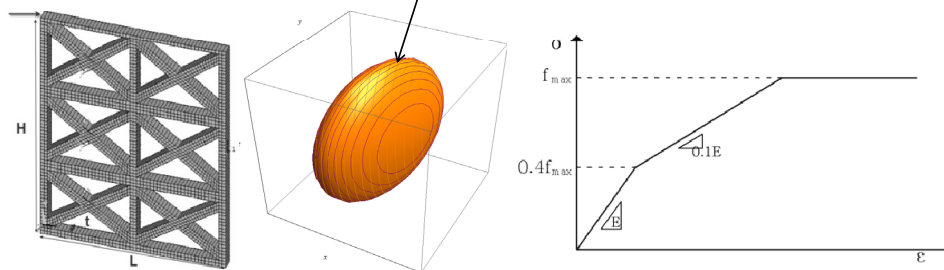
Ο ξύλινος φορέας του ξυλόπηκτου
κτηρίου της Calabria

- το ιδανικό θα ήταν να χρησιμοποιηθούν χωρικά στοιχεία (solid elements) με καταλλήλους μη-γραμμικούς νόμους για το ξύλο και την τοιχοποιία και για την μεταξύ τους αλληλεπίδραση
- η προσομοίωση της ξυλόπηκτης τοιχοποιίας είναι εξαιρετικά σύνθετη λόγω των μη-γραμμικών νόμων των υλικών και της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης
- ιδιαίτερα σε ιστορικά κτήρια το πρόβλημα περιπλέκεται λόγω της αβεβαιότητας στη λειτουργία των μεταλλικών συνδέσμων των ξύλινων μελών
- απαιτείται κατάλληλη μεθοδολογία για την απλοποίηση της προσομοίωσης
- χρήση ραβδωτών μη-γραμμικών στοιχείων για την ανάλυση όλης της κατασκευής και λεπτομερής ανάλυση υποσυνόλων του κτιρίου

Λεπτομερές προσομοίωμα ξυλόπηκτου φορέα

[Kouris-Kappos, JCH, 2011]

- Προσομοίωση ξύλινων μελών με επίπεδα (2D) στοιχεία.
- Επιφάνεια διαρροής (και πλαστικό δυναμικό) για το ξύλο βάσει ορθότροπου νόμου Hill.
$$\frac{1}{a^2}x^2 + \frac{1}{b^2}y^2 - \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}\right)xy + \frac{1}{c^2}z^2 = 1$$
- Ο νόμος $\sigma - \varepsilon$ του ξύλου για μονότονη-μονοαξονική ένταση λήφθηκε τριγωνικός (για $\pm\sigma$). Έναρξη πλαστικών παραμόρφωσεων στο 40% της οριακής αντοχής.
- Νόμος πλαστικής ροής: συσχετισμένος, με ισότροπη κράτυνση

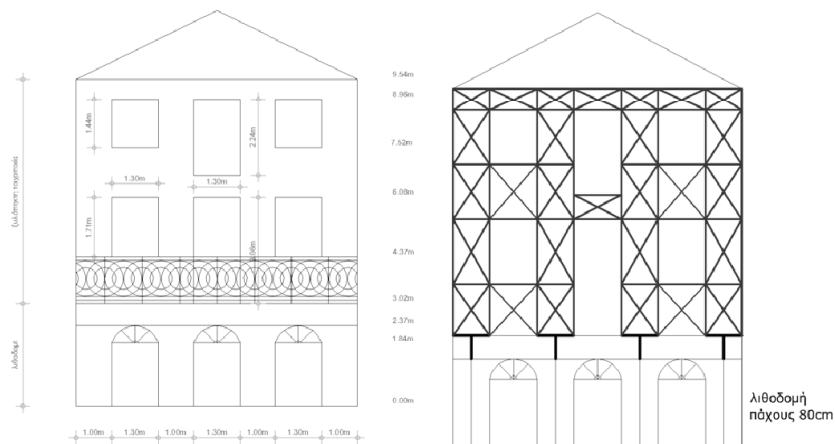


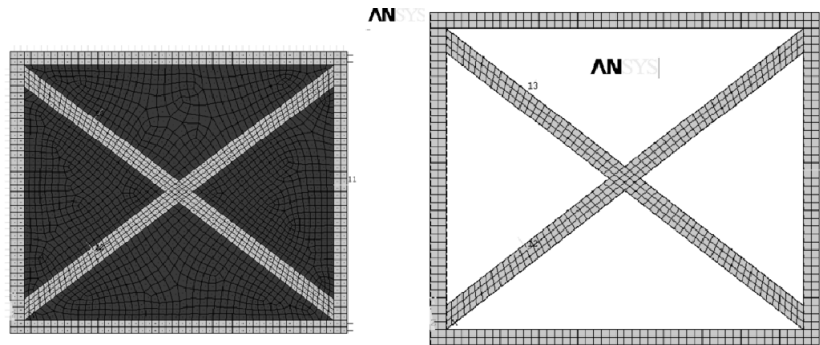
Στάδια της μεθόδου (για πρακτική εφαρμογή):

- ❖ Αρχική ελαστική ανάλυση του κτιρίου με γραμμικά στοιχεία για την προεκτίμηση των κατακορύφων φορτίων των μελών της κατασκευής.
- ❖ Ανελαστική ανάλυση υποσυνόλων της κατασκευής
 - τα κτίρια από ξυλόπηκτη τοιχοποιία αποτελούνται από φατνώματα (ξύλινο πλαίσιο-διαγώνιοι σύνδεσμοι-τοιχοπληρώσεις), τα οποία αναλύονται ξεχωριστά (με λεπτομερές μοντέλο) και προκύπτει το διάγραμμα Ρ-δ κάθε φατνώματος.
- ❖ Το διάγραμμα Ρ-δ κάθε φατνώματος ενσωματώνεται στην διαγώνιό του → προκύπτει ένα 3D προσομοίωμα της κατασκευής με αρθρωτά συνδεδεμένα γραμμικά στοιχεία
 - ο μη-γραμμικός νόμος είναι της μορφής N-δ

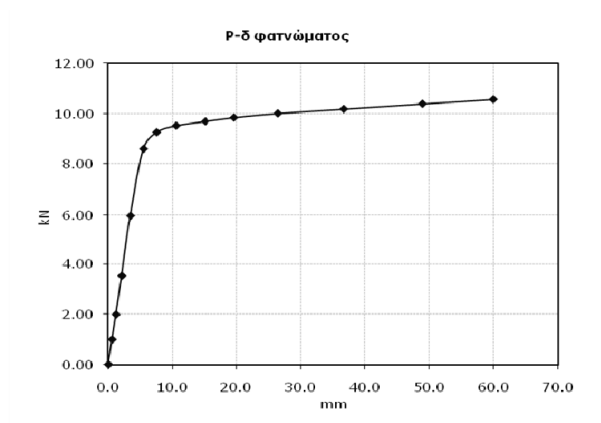
[Kouris-Kappos, JCH, 2011]

Ανάλυση κτηρίου ξυλόπηκτης τοιχοποιίας (Λευκάδα)





κάθε φάτνωμα αναλύεται με μη-γραμμικό (υλικό-
συνθήκες επαφής) μοντέλο πεπερ. στοιχείων
(πρόγραμμα ANSYS)



διάγραμμα P-δ του φαντώματος

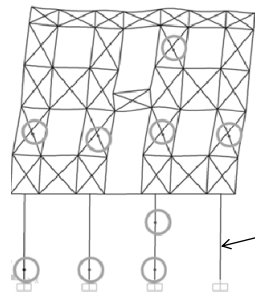
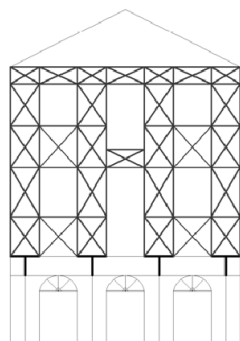


διάγραμμα N-δ της διαγωνίου



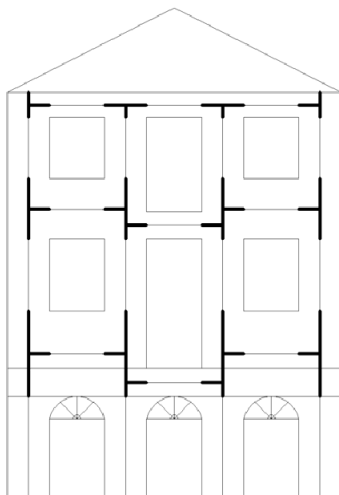
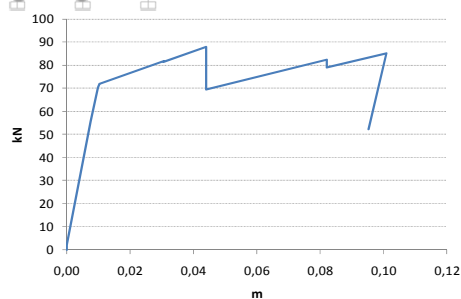
διαγράμματα N-δ των κόμβων των διαγωνίων
σημειακής πλαστικότητας (axial hinge)

Αποτελέσματα ανάλυσης κτηρίου Λευκάδας



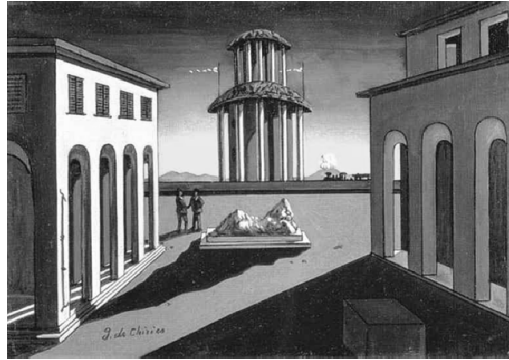
μηχανισμός αστοχίας -
'πλαστικές' αρθρώσεις

Πεσοί από ΑΦΤ



Προσομοίωση του ίδιου κτηρίου ως φορέα από ΑΦΤ
(ισοδύν. πλαίσιο)

Ευχαριστώ για την
προσοχή σας!



website: ajkap.weebly.com/
ajkap@civil.auth.gr