



Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας

“Σεμινάριο: Σεισμική Επάρκεια Μνημείων”

3 – 5 Νοεμβρίου, 2011

Σχεδιασμός - Ανασχεδιασμός Ιστορικών Κατασκευών

Design - Reinforcement of Historical Structures

Κ.Α. Συρμακέζης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.



Ε.Μ.Π.

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Δομοστατικής

Εργαστήριο Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών

Μονάδα Ανάλυσης Δομημάτων (Μ.ΑΝ. ΔΟ.)



Διαδικασία Αποκατάστασης

1. Συλλογή-Αξιολόγηση Γενικών Στοιχείων
2. Έλεγχος Υπάρχουσας Κατάστασης
3. Πρόταση Αποκατάστασης και Ανασχεδιασμός Επεμβάσεων
4. Κατασκευαστική Υλοποίηση



Διαδικασία Αποκατάστασης

1. Συλλογή - Αξιολόγηση Γενικών Στοιχείων

α. Ιστορικά Στοιχεία

β. Γεωλογικά Στοιχεία Μείζονος Περιοχής

γ. Δεδομένα Αντισεισμικού Σχεδιασμού

δ. Γενικά Κλιματολογικά Δεδομένα

ε. Βιβλιογραφία-Βοηθήματα



Διαδικασία Αποκατάστασης

2. Έλεγχος Υπάρχουσας Κατάστασης

α. Τεκμηρίωση

(αποτύπωση αρχιτεκτονική, αποτύπωση δομοστατική, δοκιμές και μετρήσεις, αποτίμηση βλαβών, εκτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων υλικών, φωτογραφική τεκμηρίωση)

β. Αναλυτικός Έλεγχος

(Προσομοίωση δομήματος/υλικών/δράσεων, ανάλυση, έλεγχος αστοχιών, φωτογραφική τεκμηρίωση)

γ. Λήψη Αποφάσεων



Διαδικασία Αποκατάστασης

3. Πρόταση Αποκατάστασης και Ανασχεδιασμός Επεμβάσεων

α. Αρχιτεκτονική πρόταση

β. Δομοστατική πρόταση

γ. Ανασχεδιασμός επεμβάσεων

(νέα χαρακτηριστικά υλικών και τοιχοποιιών, προσομοίωση των τροποποιημένων φορτίσεων, προσομοίωση του φορέα στη νέα κατάσταση)

δ. Τελικός αναλυτικός έλεγχος

(ανάλυση και υπολογισμός εντατικών/παραμορφωσιακών μεγεθών, έλεγχος αστοχιών, έλεγχος-αξιολόγηση αποτελεσμάτων)



Διαδικασία Αποκατάστασης

4. Κατασκευαστική Υλοποίηση

- α. Εφαρμογή Μελέτης
- β. Τεκμηρίωση



Διαδικασία Αποκατάστασης Ανάλυση και Σχεδιασμός



- Ο κύκλος μπορεί να χρειαστεί πολλές φορές στη ζωή ενός δομήματος



Διαδικασία Αποκατάστασης

Η αξιοπιστία της ανάλυσης εξαρτάται:

- **Περισσότερο** από την αξιοπιστία των χρησιμοποιούμενων προσομοιωμάτων (προσομοιώματα συμπεριφοράς υλικού, δομικής απόκρισης κλπ.)
- **Λιγότερο** από την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ανάλυσης

Πρέπει να αντιμετωπίζεται:

- **Περισσότερο** σαν ένας δείκτης μιας **πιθανής συμπεριφοράς** της κατασκευής, υπό τις επιλεγείσες **ιδανικές συνθήκες**
- **Λιγότερο**, σαν η μοναδική λύση του προβλήματος

Αυξάνεται σημαντικά στην περίπτωση:

- Συστηματικής **σειράς επιλύσεων**, για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς εξωτερικών δράσεων και για ενδεχόμενες τιμές χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας (**ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ**)
- Σχεδιασμού με την **περιβάλλουσα** των σχετικών εντατικών μεγεθών



Διαδικασία Αποκατάστασης Ανάλυση και Σχεδιασμός

Το κατάλληλα επιλεγόμενο προσομοίωμα, θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να εξασφαλίζει μέσω της ανάλυσης, **ΕΠΑΡΚΕΙΑ** της πραγματικής κατασκευής, ως αυτή θα ευρίσκεται μετά την ανέγερσή της (ή μετά τις παρεμβάσεις, σε περίπτωση υφιστάμενης κατασκευής).

Η επάρκεια αυτή πρέπει να εξασφαλίζεται σε τρία επίπεδα:

ΕΠΙΠΕΔΟ 1: **ΣΗΜΕΙΑ**

ΕΠΙΠΕΔΟ 2: **ΔΙΑΤΟΜΕΣ**

ΕΠΙΠΕΔΟ 3: **ΔΟΜΗΜΑ**



Διαδικασία Αποκατάστασης Η σημασία των απλοποιητικών παραδοχών

ΥΠΕΡ-ΑΠΛΟΠΟΙΗΣΗ



ΜΙΚΡΟΤΕΡΕΣ

πιθανότητες σύγκλισης της συμπεριφοράς του προσομοιώματος
προς την συμπεριφορά της πραγματικής κατασκευής



ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ

ευκολία ανάλυσης του προσομοιώματος
και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων

ΥΠΟ-ΑΠΛΟΠΟΙΗΣΗ



ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΕΣ



ΜΙΚΡΟΤΕΡΗ

ΧΡΥΣΗ ΤΟΜΗ



Διαδικασία Αποκατάστασης Η σημασία των απλοποιητικών παραδοχών

Γενικές αρχές επιλογής παραδοχών:

1. Προτεραιότητα της **“ποιότητας”** των παραδοχών, έναντι της **“ποσότητας”**.
Δεν έχει σημασία το πόσες παραδοχές θα γίνουν, αλλά ποιες.
2. Επιδίωξη **“συμμετρικότητας”** των παραδοχών.
Δεν πρέπει η απλοποίηση να επιτελείται επιλεκτικά και δυσανάλογα προς μια μόνο κατεύθυνση.
3. **Παράλληλη απλοποίηση** προσομοιώματος και τροποποίηση πραγματικής κατασκευής.
Υλοποίηση μόνο για αρχικό σχεδιασμό.



Διαδικασία Αποκατάστασης Η σημασία των απλοποιητικών παραδοχών

EVERYTHING SHOULD BE MADE AS SIMPLE

AS POSSIBLE BUT NOT SIMPLER

A. EINSTEIN

ΟΛΑ ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΓΙΝΟΝΤΑΙ (ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΖΟΝΤΑΙ, ΣΥΝΤΙΘΕΤΑΙ)

ΟΣΟ ΤΟ ΔΥΝΑΤΟ ΠΙΟ ΑΠΛΑ ΑΛΛΑ ΟΧΙ ΑΠΛΟΥΣΤΕΡΑ

Α. ΑΪΝΣΤΑΪΝ



Διαδικασία Αποκατάστασης

Στη διαδικασία αποκατάστασης-αναστήλωσης-αντισεισμικού ελέγχου ιστορικών και παραδοσιακών κατασκευών, είναι απαραίτητη η **ΔΙΑΚΛΑΔΙΚΗ, ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ.**



Πύργος Ορτά-Καπού, Μυτιλήνη



Παραδοσιακά Υλικά

ΒΑΣΙΚΑ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

παραδοσιακά υλικά

φυσικά

πέτρα
(λίθος)

ξύλο

τεχνητό

τούβλο
(πλίνθος)

μικρότερες αντοχές
ψαθυρότητα

σύγχρονα υλικά

σκυρόδεμα

Χάλυβας.

(ενίσχυση ιστορικών
κατασκευών)

μεγαλύτερες αντοχές
πλαστικότητα

ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

λίθος ή πλίνθος & κονίαμα



Ιδιαιτερότητες τοιχοποιίας

1. Ανομοιογένεια
2. Ορθοτροπία
3. Μικρή εφελκυστική αντοχή
4. Κατανομή του μάζας σε όλο το ύψος της κατασκευής
5. Μη μονολιθικότητα συνδέσεων
6. Αβεβαιότητες κατά την προσομοίωση



Ανάλυση Κατασκευών από τοιχοποιία

1. Προσομοίωση

(δράσεις, υλικό, δόμημα)

2. Αναλυτικοί Υπολογισμοί

(στατική/δυναμική ανάλυση

ελαστική/ελαστοπλαστική ανάλυση

1-Δ για μεμονωμένα μέλη, 2-Δ για επιφανειακά μέλη, 3-Δ για ολόκληρη την κατασκευή)

3. Επιβεβαίωση Αποτελεσμάτων

(Κριτική επιβεβαίωση των αναλυτικών αποτελεσμάτων - βαθμονόμηση, πειραματική διασταύρωση)

4. Διαστασιολόγηση

(Μέθοδος επιτρεπόμενων τάσεων, μέθοδος συνολικής αντοχής)



Προσομοίωμα και Πραγματική Κατασκευή

ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ



ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ: ΦΥΣΙΚΗ

Οι ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ αφορούν
την ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Όχι όμως υποχρεωτικά και
τους ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥΣ
ΝΟΜΟΥΣ του ιδεατού
προσομοιώματος

ΙΔΕΑΤΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ



ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ

Η ΑΝΑΛΥΣΗ γίνεται στο
ΙΔΕΑΤΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

Όχι όμως υποχρεωτικά και
τους ΦΥΣΙΚΟΥΣ ΝΟΜΟΥΣ
της πραγματικής
κατασκευής



Προσομοίωμα και Πραγματική Κατασκευή

Δεν πρέπει να περιμένουμε από την πραγματική κατασκευή να κάνει για τον εαυτό της τις παραδοχές που εμείς έχουμε κάνει για λογαριασμό της και ερήμην της, κατά τη σύνθεση και ανάλυση του προσομοιώματός της.

Η «απόσταση» μεταξύ των συμπεριφορών του προσομοιώματος και της πραγματικής κατασκευής, καθορίζεται τελεσίδικα από την ποιότητα των επιλογών κατά την προσομοίωση, και δεν μπορεί, σε καμιά περίπτωση να βελτιωθεί αργότερα αισθητά, με την βελτίωση της ποιότητας και αύξηση του όγκου των υπολογισμών της ανάλυσης.



Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Βασική Αρχή:

Η αντικατάσταση του γεωμετρικά σύνθετου προβλήματος της επίλυσης ενός φορέα από ένα σύνολο υποπεδίων προς επίλυση, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία.

Θεωρείται κατάλληλη για την ανάλυση της τοιχοποιίας γιατί μπορεί να:

- Προσομοιάζει ικανοποιητικά τη γεωμετρία της πραγματικής κατασκευής, σε όλα τα σημεία της (με κατάλληλη επιλογή τύπου, μεγέθους πεπερασμένων στοιχείων κτλ.)
- Προσομοιάζει ικανοποιητικά την κατανομή της μάζας της τοιχοποιίας σε όλη την επιφάνειά της, με την κατανομή της μάζας κάθε πεπερασμένου στοιχείου στους κόμβους του (ρεαλιστικότερη προσομοίωση των αδρανειακών σεισμικών δυνάμεων).



Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Παρέχει αποτελέσματα για:

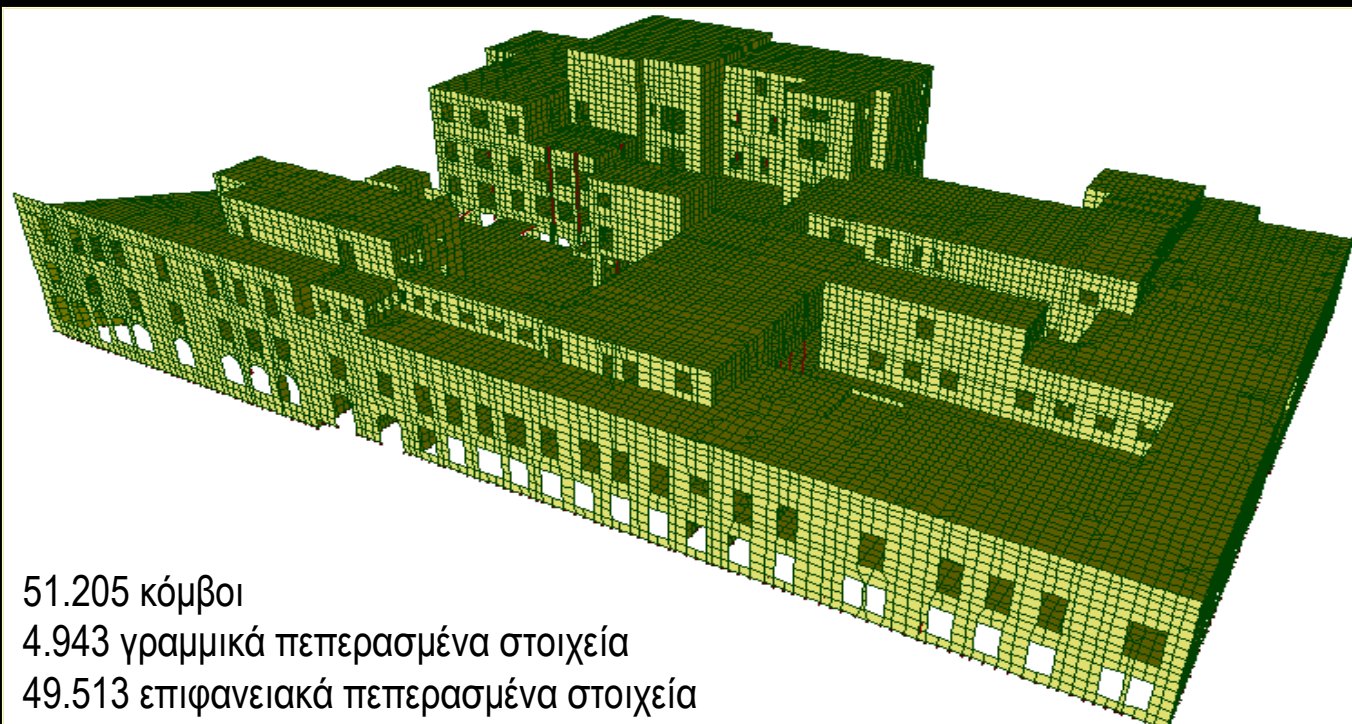
1. Εντατική κατάσταση
2. Παραμορφωσιακή κατάσταση
3. Δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής

Ανάγκη για εξειδικευμένες μεθοδολογίες για:

1. Ανάλυση αστοχιών
2. Χρήση 3-Δ πεπερασμένων στοιχείων
3. Πιθανοτική εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας (διάγραμμα καμπυλών θραυστότητας)
4. Αποτίμηση επεμβάσεων και σύγχρονων μεθόδων ελέγχου



Παράδειγμα: Το κτήριο του Κεντρικού Κάταστήματος της Εθνικής Τράπεζας Ελλάδος



51.205 κόμβοι
4.943 γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία
49.513 επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία



Ανάλυση Αστοχιών

Στόχος

Ποιοτικός και ποσοτικός υπολογισμός της επιφάνειας μιας τοιχοποιίας που αστοχεί υπό σεισμική φόρτιση.

Προτεινόμενη μεθοδολογία:

Επεξεργασία των αποτελεσμάτων της μεθόδου των Π.Σ. για την παραγωγή των αποτελεσμάτων αστοχίας, μέσω του λογισμικού FAILURE.

Παρεχόμενα αποτελέσματα:

- περιοχές που αστοχούν
- τύπος αστοχίας (θλίψη, εφελκυσμός κ.ο.κ.)
- ποσοτικά αποτελέσματα



Ανάλυση Αστοχιών- Λογισμικό *FAILURE*

➡ Εφαρμόζεται ξεχωριστά για όλα τα επίπεδα της κατασκευής

γεωμετρικά
δεδομένα

εντατικά μεγέθη

αντοχές υλικών

εφαρμογή κριτηρίου
αστοχίας σε κάθε ΠΣ

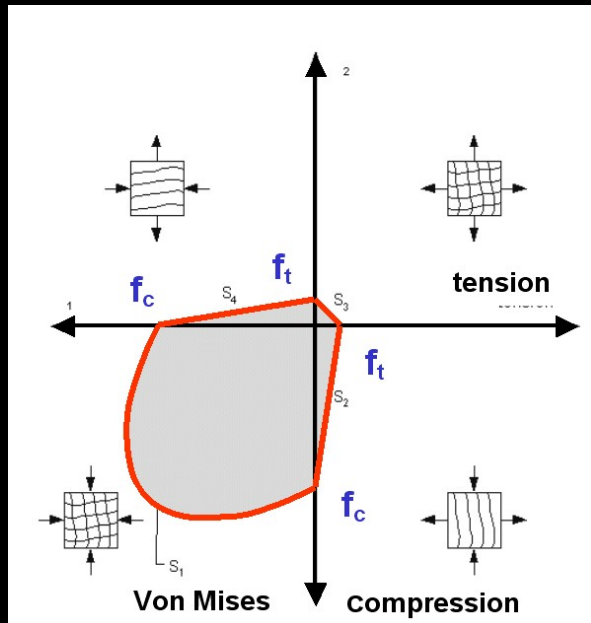
γραφικά
αποτελέσματα

ποσοτικά αποτελέσματα
συνολικής επιφάνειας που
αστοχεί



Ανάλυση Αστοχιών- Κριτήριο Αστοχίας

➡ Τροποποιημένο κριτήριο Von Mises, για τοιχοποιίες



$$S1: \sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy} + 3\tau^2 - f_{wc}^2 = 0$$

$$S2: \sigma_{yy} + (1 - \sigma_{xx}/a)\sqrt{f_{wc}^2 - 3\tau^2} = 0$$

$$S3: \sigma_{xx} + \sigma_{yy} - a = 0$$

S4: συμμετρική ως προς την S2, ως προς τη διχοτόμο του 1ου τεταρτημορίου

$$\text{όπου: } a = (f_{wt}/f_{wc})\sqrt{f_{wc}^2 - 3\tau^2}$$

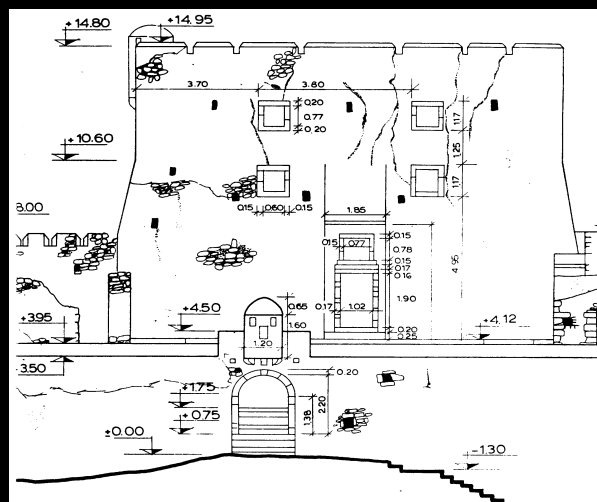
f_c : αντοχή σε θλίψη

f_t : αντοχή σε εφελκυσμό

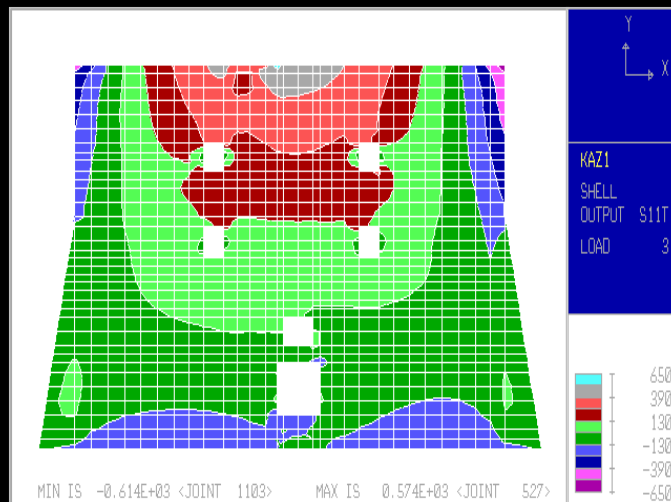


Ανάλυση Αστοχιών- Πύργος Καζάρμα, Σητεία

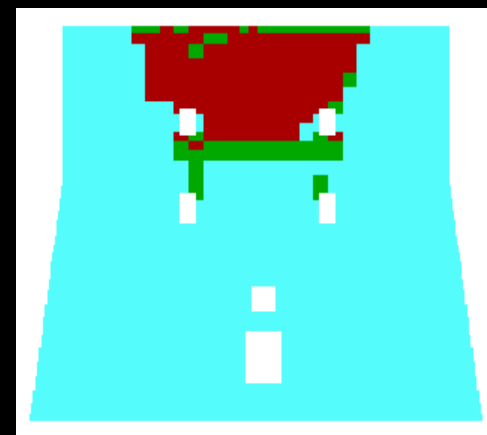
Τεκμηρίωση-Υπάρχουσα κατάσταση



Εντατική κατάσταση



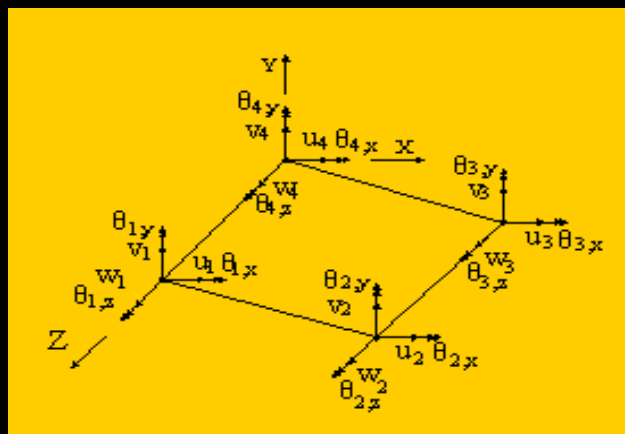
Ανάλυση Αστοχιών



■ αστοχία υπό διαξονικό εφελκυσμό
 ■ αστοχία υπό διαξονικό εφελκυσμό-θλίψη
 ■ αστοχία υπό διαξονική θλίψη-εφελκυσμό
 ■ αστοχία υπό διαξονική θλίψη
 ■ μη αστοχία

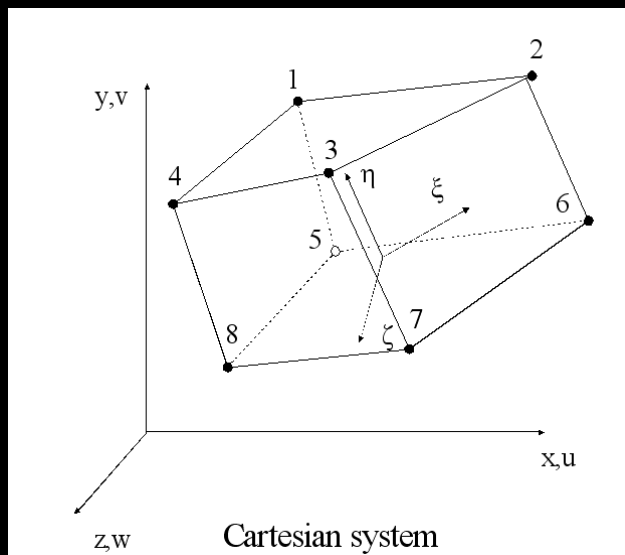


Χρήση χωρικών Π.Σ.



Επίπεδα στοιχεία κελύφους

- 3 μεταφορικοί και 3 στρωφικοί βαθμοί ελευθερίας σε κάθε κόμβο



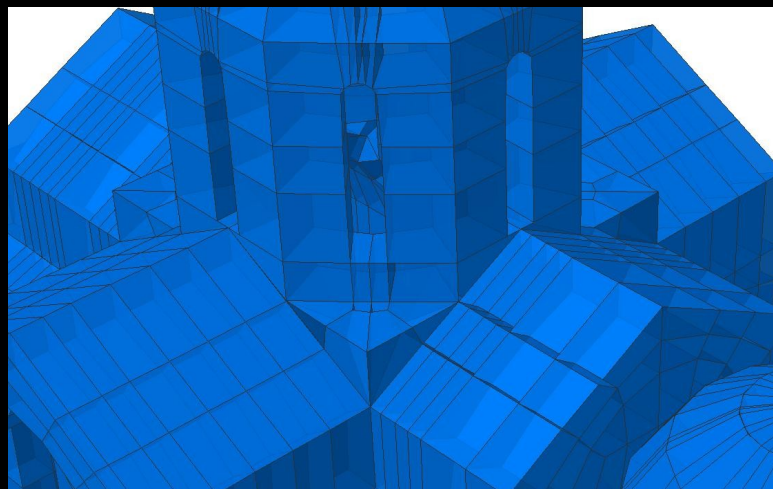
Χωρικά στοιχεία "solid"

- 3 μεταφορικοί βαθμοί ελευθερίας σε κάθε κόμβο

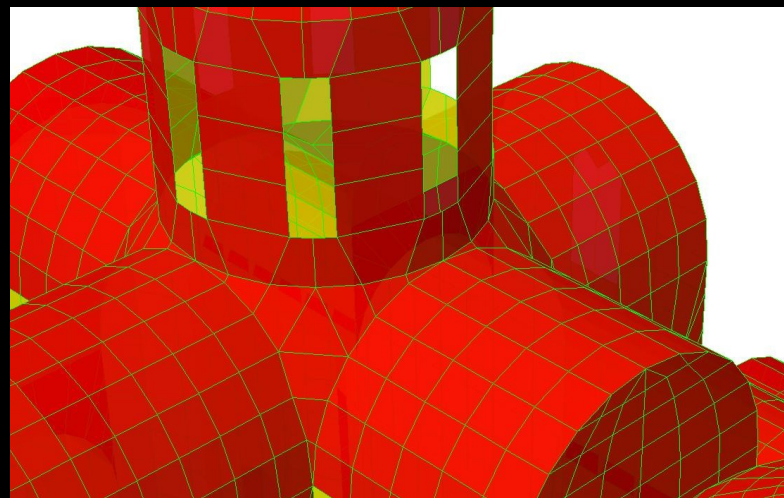


Χρήση χωρικών Π.Σ.

- Γεωμετρικές απλοποιήσεις που επιβάλλονται από τη χρήση επιφανειακών Π.Σ. μπορούν να οδηγήσουν σε μικρή ακρίβεια των αποτελεσμάτων της ανάλυσης (περιπτώσεις μεταβαλλόμενου πάχους τοίχων, συνδέσεων τοίχων κτλ.)
- Απότομες αλλαγές στη γεωμετρία του φορέα (ανοίγματα, τόξα, τρούλοι κτλ.), οδηγούν σε χρήση επιφανειακών στοιχείων με μικρό πάχος σε σχέση με τις διαστάσεις τους.



Προσομοίωση με χωρικά στοιχεία



Προσομοίωση με επιφανειακά στοιχεία



Σεισμική τρωτότητα

Εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας

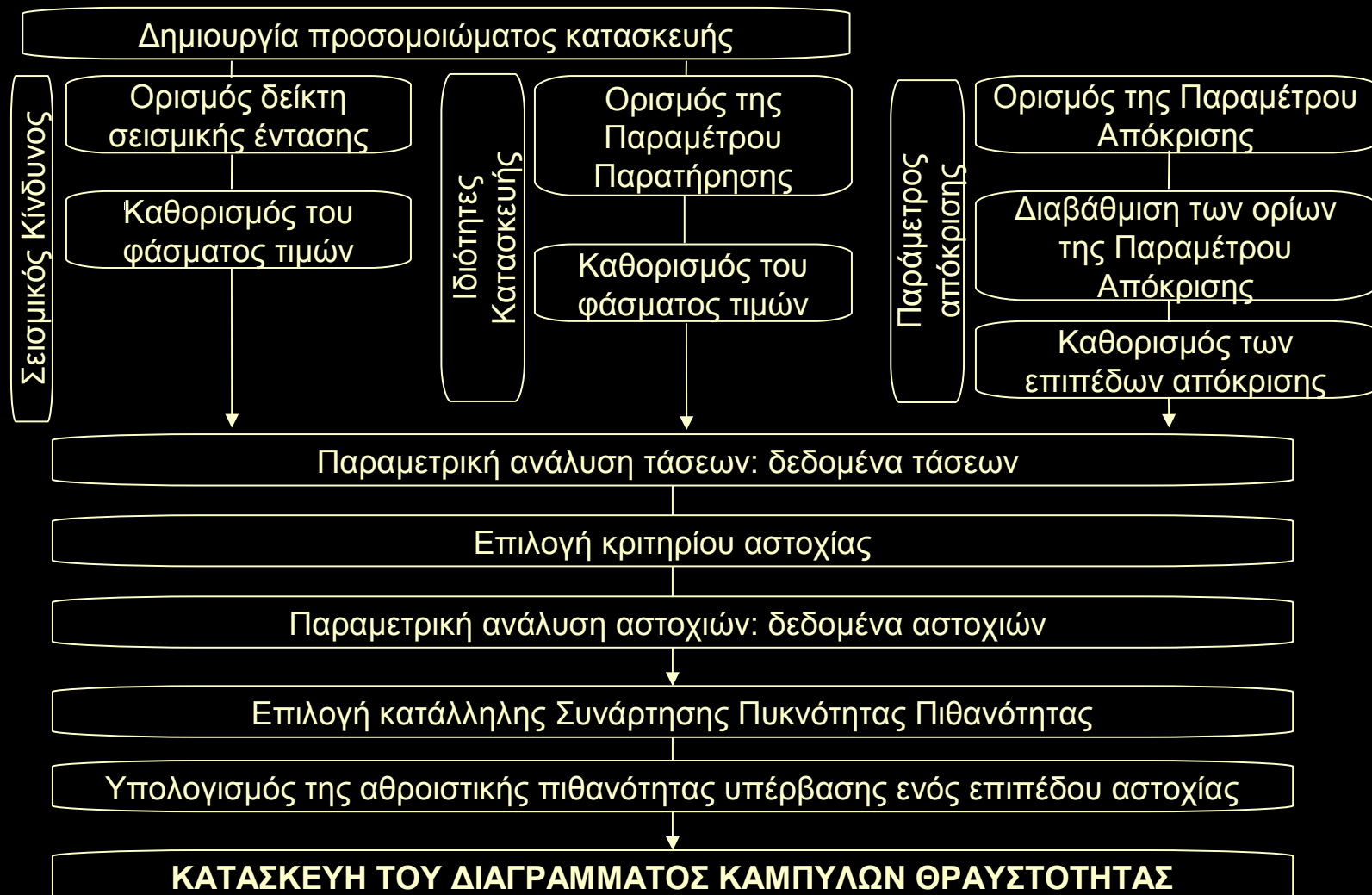
Εκφράζει τη σεισμική απόκριση της κατασκευής που υπόκειται σε μοναδικό σεισμικό γεγονός άγνωστης έντασης, συνυπολογίζοντας την αβεβαιότητα προσδιορισμού μιας ιδιότητας της κατασκευής.

Υπερτερεί της ντετερμινιστικής ανάλυσης γιατί συνυπολογίζει:

- Την τυχαία φύση της σεισμικής δράσης
- Τον τυχαίο χαρακτήρα ιδιοτήτων της κατασκευής που επηρεάζουν την σεισμική της απόκριση



Καμπύλες Θραυστότητας





Καμπύλες Θραυστότητας- Μονή Καισαριανής

1. Σεισμικός Κίνδυνος:

Δείκτης σεισμικής έντασης: μέγεθος της σεισμικής δραστηριότητας

- ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΔΑΦΙΚΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ
- ΦΑΣΜΑ ΤΙΜΩΝ: 0,16g, 0,24g, 0,32g, 0,40g

2. Παράμετρος Παρατήρησης:

Εκφράζει μια ιδιότητα της κατασκευής που παρουσιάζει τυχαίο χαρακτήρα και επιδρά καθοριστικά στην απόκρισή της

- ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ
- ΦΑΣΜΑ ΤΙΜΩΝ: 120-480 KPa βήμα: 40 KPa

Χαρακτηριστικά τοιχοποιίας	fmc	E	v	γ
	(Kpa)	(Mpa)		(KN/m ³)
	1.300,00	1.300,00	0,3	18,00



Καμπύλες Θραυστότητας- Μονή Καισαριανής

3. Παράμετρος απόκρισης:

Εκφράζει το αποτέλεσμα της σεισμικής επίδρασης στην κατασκευή

➔ Φυσικός Δείκτης απωλειών: $DI = A_{fail} / A_{tot}$

Διαβάθμιση ορίων/Καθορισμός επιπέδων απόκρισης:

Επίπεδα απωλειών	Μικρή	Μεσαία	Μεγάλη
	(S)	(M)	(H)
Όρια απωλειών	0%-10%	10%-15%	>15%

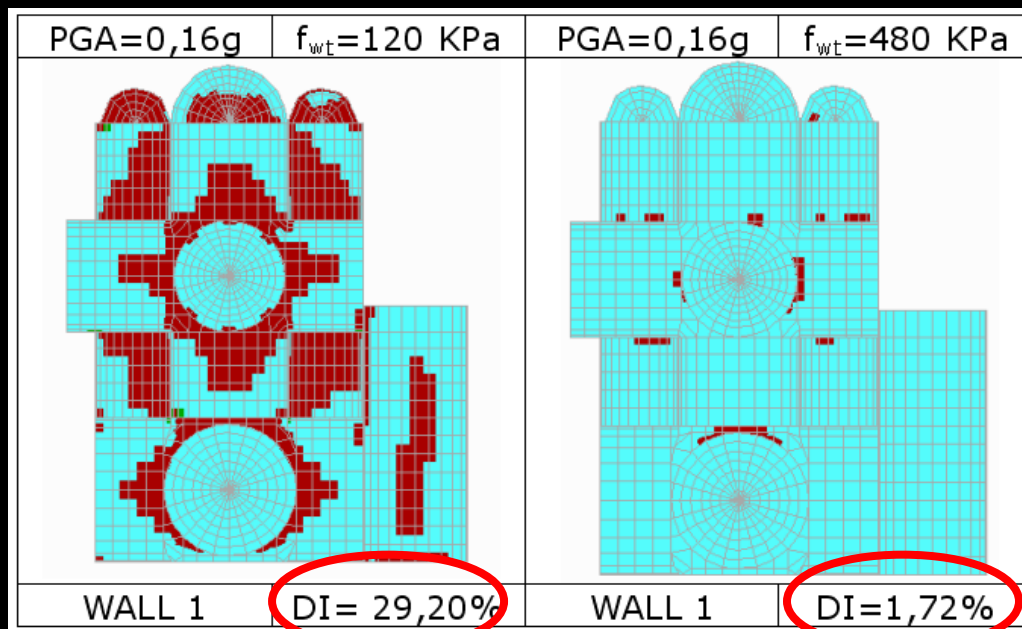
4. Παραμετρική ανάλυση τάσεων και αστοχιών:

Μεταβλητές:

- Τιμές Μέγιστης Εδαφικής Επιτάχυνσης Σεισμού
- Εφελκυστική αντοχή τοιχοποιίας



Καμπύλες θραυστότητας- Μονή Καισαριανής



Αστοχία σε διαξονικό
εφελκυσμό

Αστοχία σε διαξονικό
εφελκυσμό/θλίψη

Αστοχία σε διαξονική
θλίψη/εφελκυσμό

Αστοχία σε διαξονική
θλίψη/θλίψη

Μη αστοχία

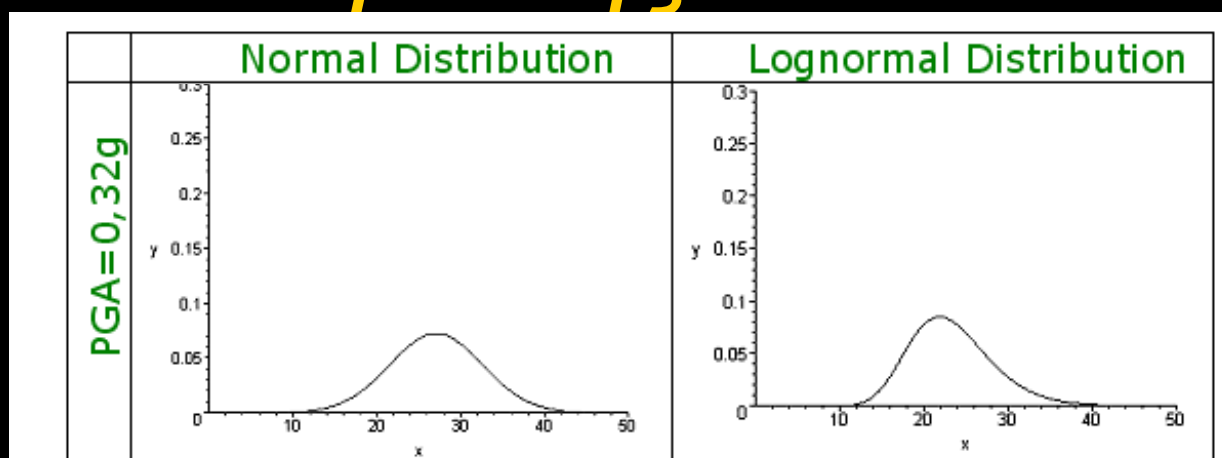
5. Στατιστική επεξεργασία:

Συνάρτηση πυκνότητας-πιθανότητας:

➔ Κανονική,
λογαριθμική



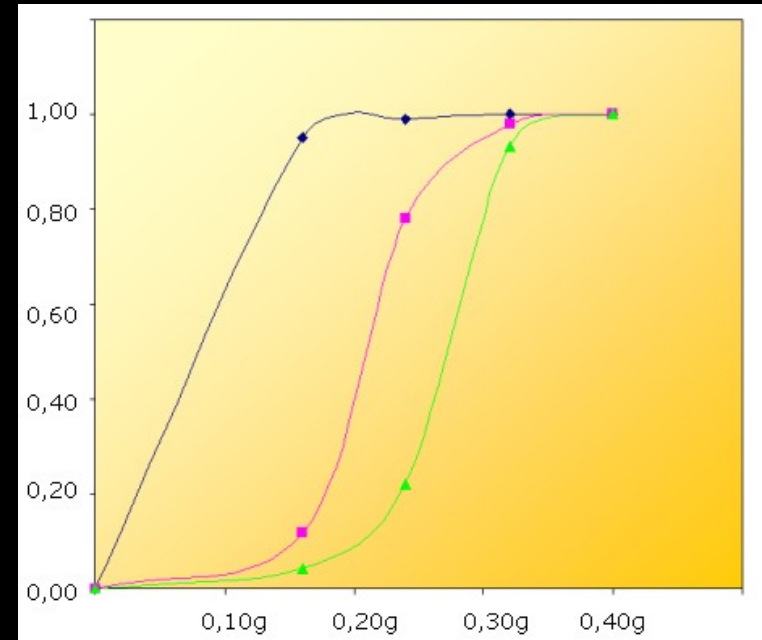
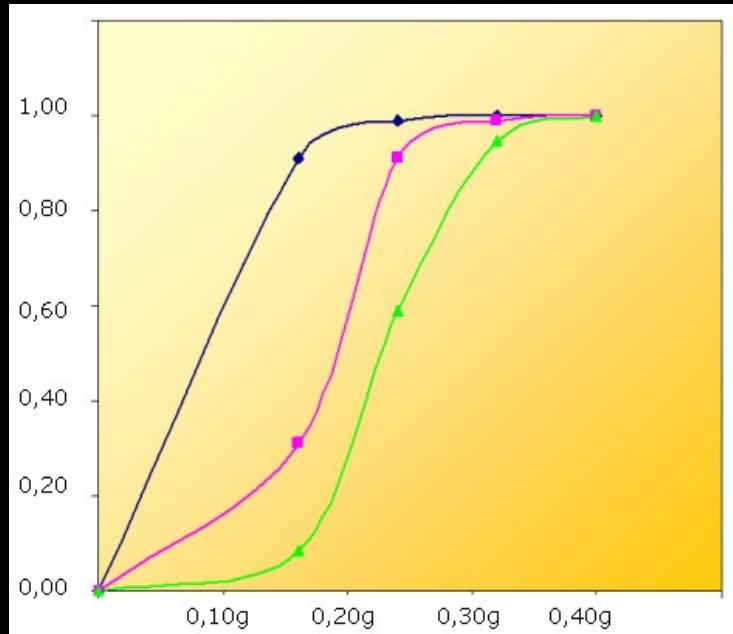
Καμπύλες Θραυστότητας- Μονή Καισαριανής



PGA	Αθροιστική Πιθανότητα υπέρβασης κάθε επιπέδου απωλειών					
	Κανονική Κατανομή			Λογαριθμική Κατανομή		
	μικρή	μεσαία	μεγάλη	μικρή	μεσαία	μεγάλη
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,16g	0,91	0,31	0,01	0,95	0,04	0,00
0,24g	0,99	0,91	0,59	0,99	0,78	0,22
0,32g	1,00	0,99	0,98	1,00	0,98	0,97
0,40g	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00



Καμπύλες θραυστότητας- Μονή Καισαριανής



Διαγράμματα καμπυλών θραυστότητας
για κανονική (αριστερά) και λογαριθμική(δεξιά) κατανομή



Συμπεράσματα

- Οι ιστορικές κατασκευές από τοιχοποιία παρουσιάζουν πολλές ιδιαιτερότητες σε σχέση με τις σύγχρονες κατασκευές, οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ανάλυσή τους.
- Νέες μεθοδολογίες για την ανάλυση αστοχιών της τοιχοποιίας είναι απαραίτητες ως εργαλείο εκτίμησης της υπάρχουσας κατάστασης των ιστορικών κατασκευών και της αποτελεσματικότητας των προτεινόμενων επεμβάσεων σεισμικής προστασίας.
- Κατά την ανάλυση ιστορικών κατασκευών η πιθανοτική προσέγγιση της σεισμικής απόκρισής τους, είναι απαραίτητη. Η προτεινόμενη μέθοδος (διάγραμμα καμπυλών θραυστότητας) παρέχει ένα χρήσιμο εργαλείο λήψης αποφάσεων σχετικά με την προστασία τους.
- Η ανάγκη σύγχρονων αναλυτικών εργαλείων προκύπτει επιπλέον από την εφαρμογή σύγχρονων συστημάτων ελέγχου για την αντισεισμική προστασία των ιστορικών κατασκευών.