

ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ & ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ (ΟΑΣΠ)

ΣΕΜΙΝΑΡΙΟ ΓΙΑ ΤΗΝ «ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΠΑΡΚΕΙΑ ΜΝΗΜΕΙΩΝ»

ΟΙΟΝΕΙ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΝΗΜΕΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΑΠΟ ΑΟΠΛΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

Γ. Γρ. Πενέλης
Ομ. Καθηγητής Α.Π.Θ.

Γρ. Γ. Πενέλης
Δρ. Πολιτ. Μηχ-κος Α.Π.Θ.

Β. Κ. Παπανικολάου
Δρ. Πολιτ. Μηχ-κος Α.Π.Θ.

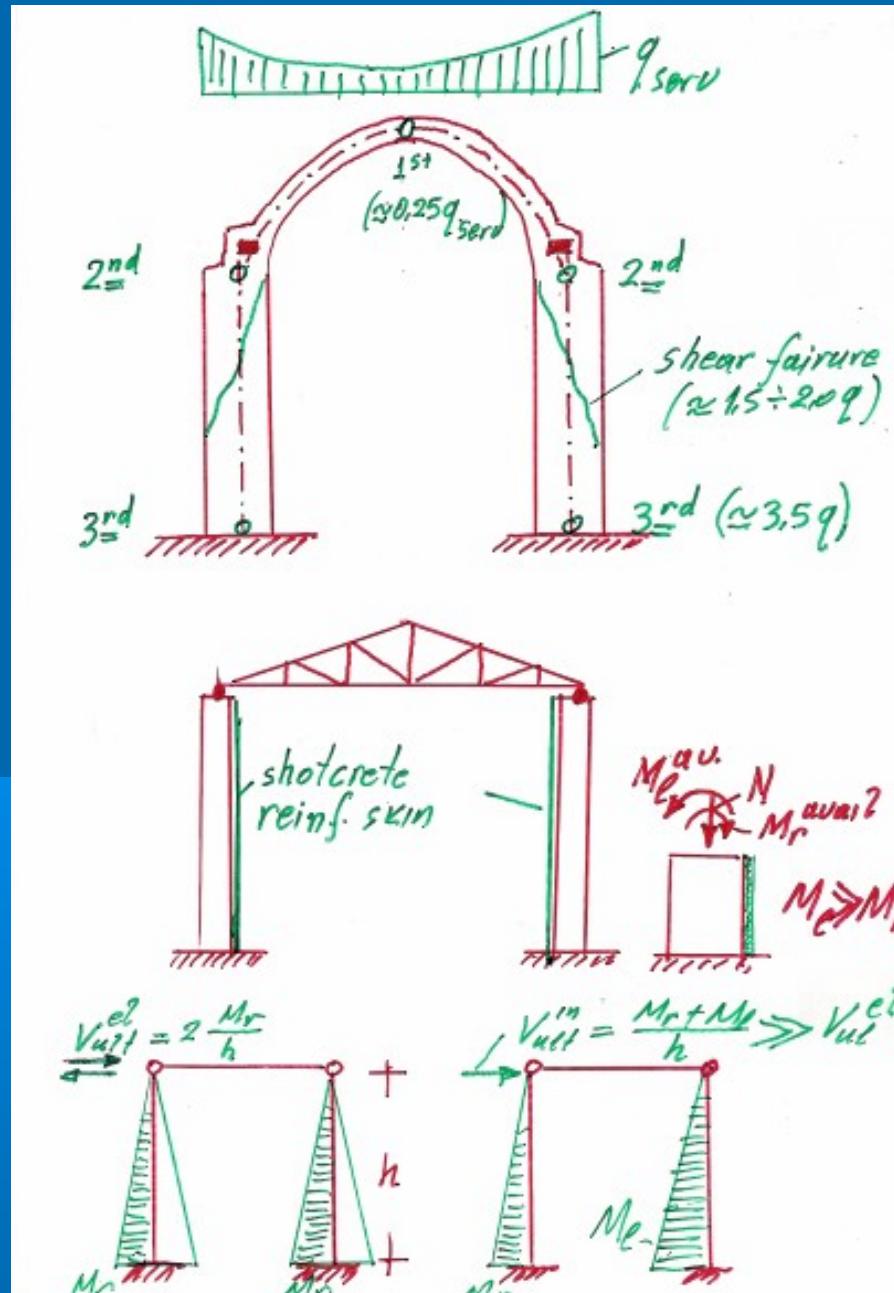
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2011

1. Εισαγωγή

- Βασικές μηχανικές ιδιότητες της Άοπλης Τοιχοποιίας :
 - Χαμηλή και αναξιόπιστη εφελκυστική και διατμητική αντοχή.
 - Υψηλού βαθμού ορθοτροπία στην αντοχή και τη δυσκαμψία προερχόμενη από τον προσανατολισμό των αρμών δόμησης.
 - Δυσκολία προσομοίωσης των πλείστων Άοπλων Κατασκευών από τοιχοποιία με γραμμικούς φορείς λόγω της επιφανειακής τους μορφής στο χώρο, γεγονός που καθιστά αδύνατη την συγκέντρωση των πλαστικών παραμορφώσεων σε πλαστικές αρθρώσεις γραμμικών στοιχείων.

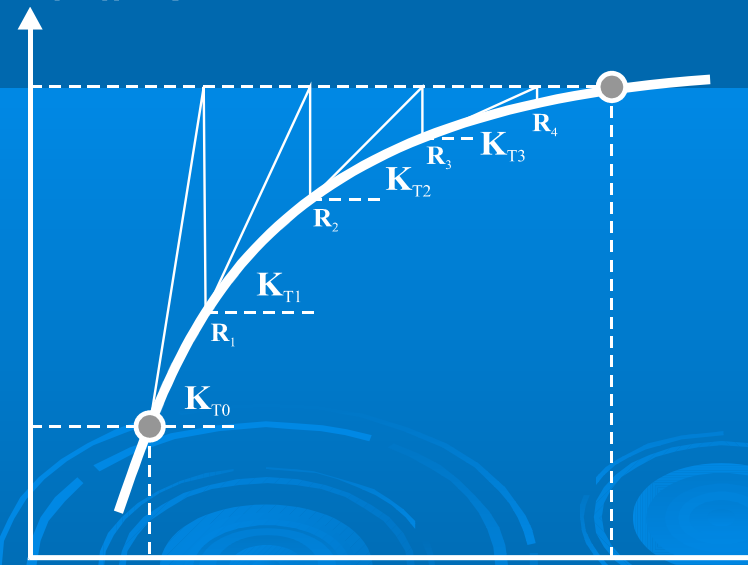
- Στην περίπτωση γραμμικής ελαστικής ανάλυσης (στατικής ή δυναμικής) οι παραπάνω ιδιότητες συντελούν στην ανάπτυξη **ζωνών ρηγματώσεως** για πολύ χαμηλό ποσοστό του οριακού φορτίου αστοχίας, γεγονός που οδηγεί από εκεί και πέρα σε πολύ μεγάλες ανακατανομές εντάσεως. Έτσι, **τα προκύπτοντα αποτελέσματα είναι αναξιόπιστα** κατά την προέκταση της γραμμικότητας μέχρι την οριακή κατάσταση της αστοχίας.
Είναι χαρακτηριστικό ότι σε κλασσικές θολωτές κατασκευές (Ιερό Ροτόντας) το φορτίο πρώτης αστοχίας

ΟΙΟΝΕΙ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΜΕΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΑΠΟ ΑΟΠΛΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ



στην κλείδα του τόξου εμφανίζεται στο 25% των φορτίων λειτουργίας.

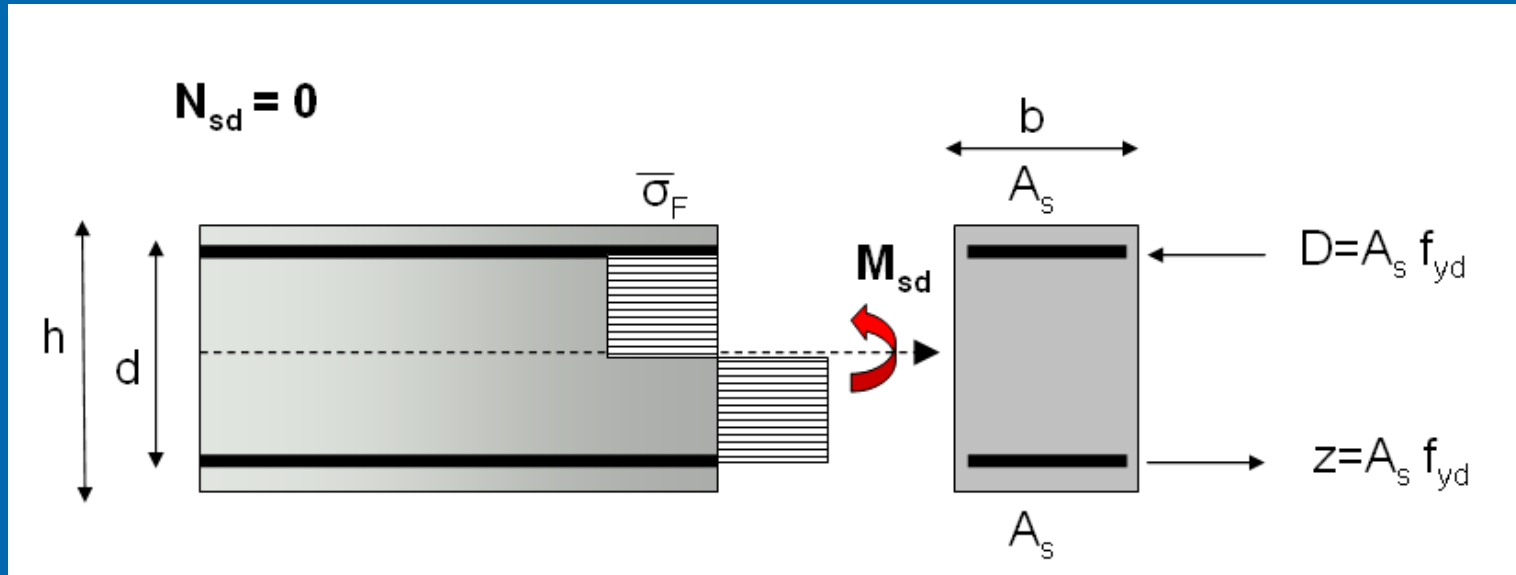
- Το πρόβλημα θεωρητικά έχει βεβαίως αντιμετωπισθεί από καιρό με την ανάπτυξη **μη γραμμικών μεθόδων F.E.M.** Οι μέθοδοι αυτές αντιμετωπίζουν το πρόβλημα χρησιμοποιώντας τη διαδικασία Newton – Raphson (βήμα προς βήμα ανάλυση με διαδοχικούς κύκλους προσέγγισης σε κάθε βήμα).



- Εν τούτοις όλες αυτές οι μέθοδοι και οι πλατφόρμες λογισμικού που τις συνοδεύουν (ANSIS, NASTRAN, ATENA κλπ), **παρ' όλον ότι είναι ακριβείς για απλά κατασκευαστικά συστήματα** (επίπεδοι τοίχοι, απλοί τρούλοι), **εμφανίζονται αναποτελεσματικές** στην διαχείριση πολύπλοκων κατασκευαστικών συστημάτων (όπως αυτά που αποτελούν κοινό τόπο στις μνημειακές κατασκευές). Και τούτο λόγω του τεράστιου όγκου των απαιτούμενων υπολογισμών κατά τους επαναληπτικούς κύκλους ανάλυσης μέσα σε κάθε βήμα.



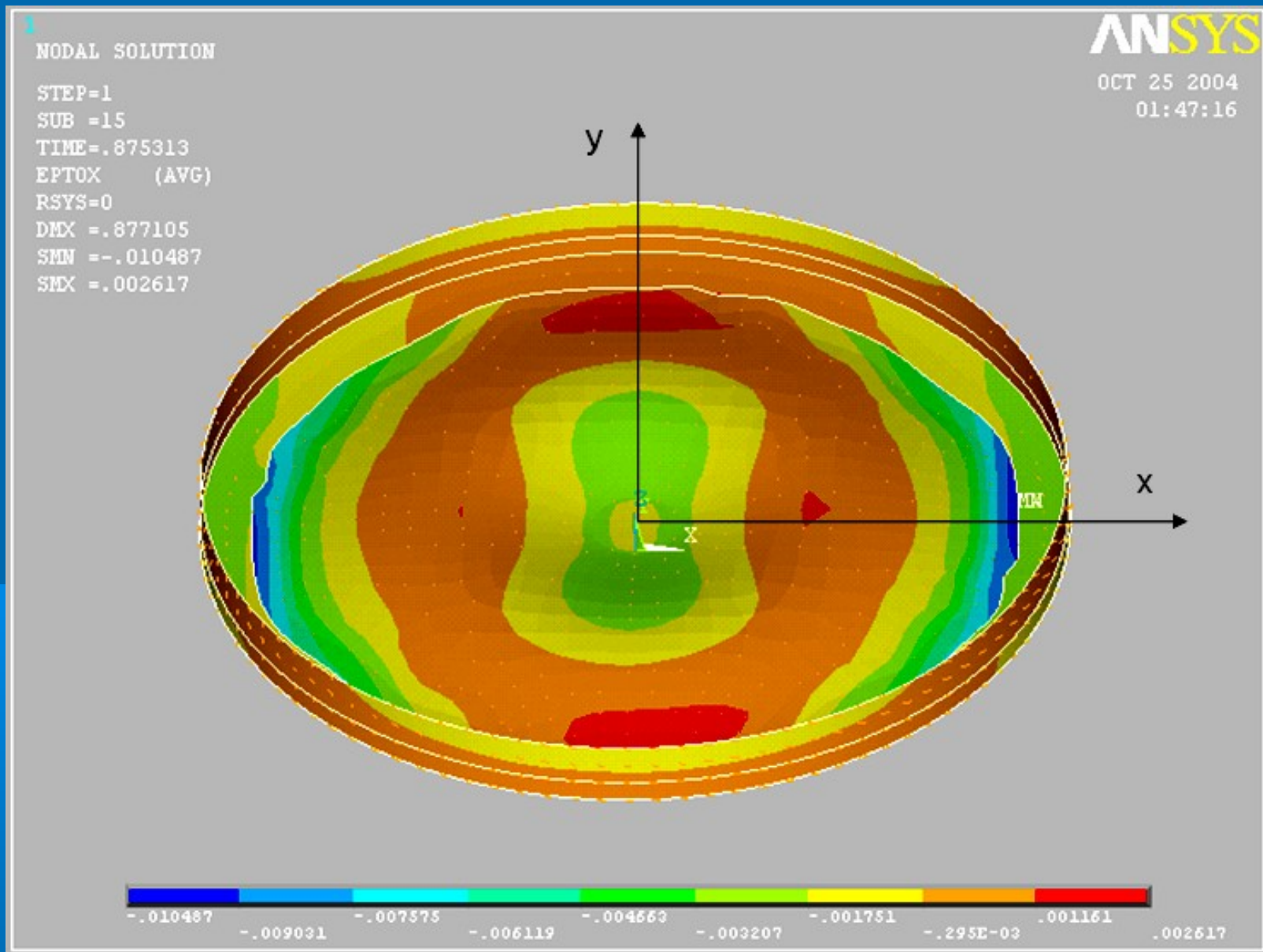




$$M = \bar{\sigma}_F \frac{d}{2} \frac{d}{2} = \bar{\sigma}_F \frac{d^2}{4}$$

$$M = A_s f_{yd} d$$

$$\bar{\sigma}_F = \frac{4 A_s f_{yd}}{d} = 2 \cdot \frac{2 A_s f_{yd}}{d}$$



- Επιπλέον, το γεγονός ότι οι μέθοδοι αυτές αναφέρονται σε γενικευμένους μη γραμμικούς νόμους υλικών, οδηγεί σε σοβαρές δυσχέρειες προσομοίωσης της τοιχοποιίας η οποία έχει υψηλό βαθμό ορθοτροπίας ιδιαίτερα κατά την εισαγωγή της περιβάλλουσας αστοχίας του υλικού.
- Έτσι στην πράξη, επί του παρόντος, για την ανάλυση και διαστασιολόγηση των μνημειακών κτιρίων από τοιχοποιία ακολουθούνται οι ακόλουθες απλοποιημένες διαδικασίες :
 - Ελαστική στατική ή δυναμική ανάλυση και διαστασιολόγηση με όλα τα μειονεκτήματα της αναξιόπιστης προεκβολής μέχρι αστοχίας.
 - Στατική ανελαστική ανάλυση σε περίπτωση πλαισιακών μοντέλων.
 - Διάσπαση σε απλά υποσυστήματα των σύνθετων κατασκευών και εφαρμογή σ' αυτά ανελαστικών F.E.M. Μοντέλων.
 - Εφαρμογή των θεωρημάτων άνω και κάτω ορίων (θεωρία πλαστικότητας).

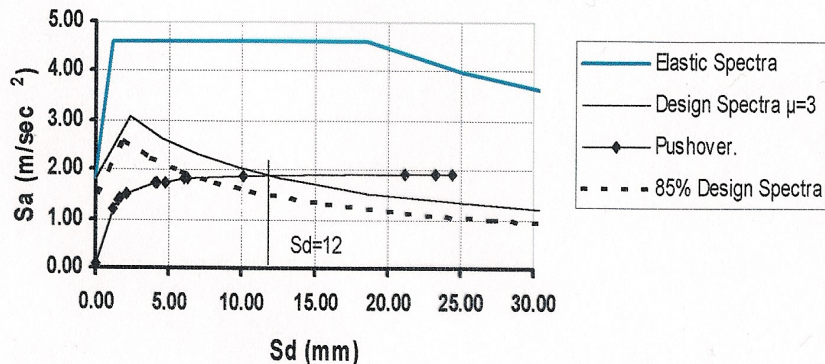


- Case study – National Library in Athens

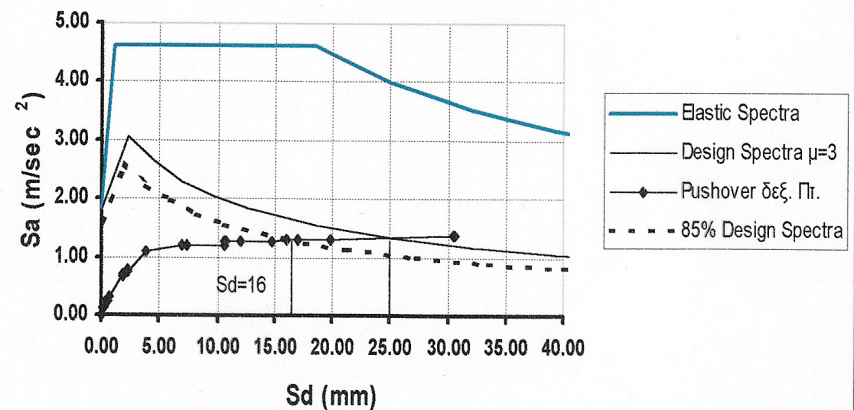
The 3 separate wings of the URM building of the National Library in Athens were analysed in two differed planes using the proposed methodology and assessed using the capacity spectrum approach.

The building consisted of perforated URM walls and marble columns (Kions).

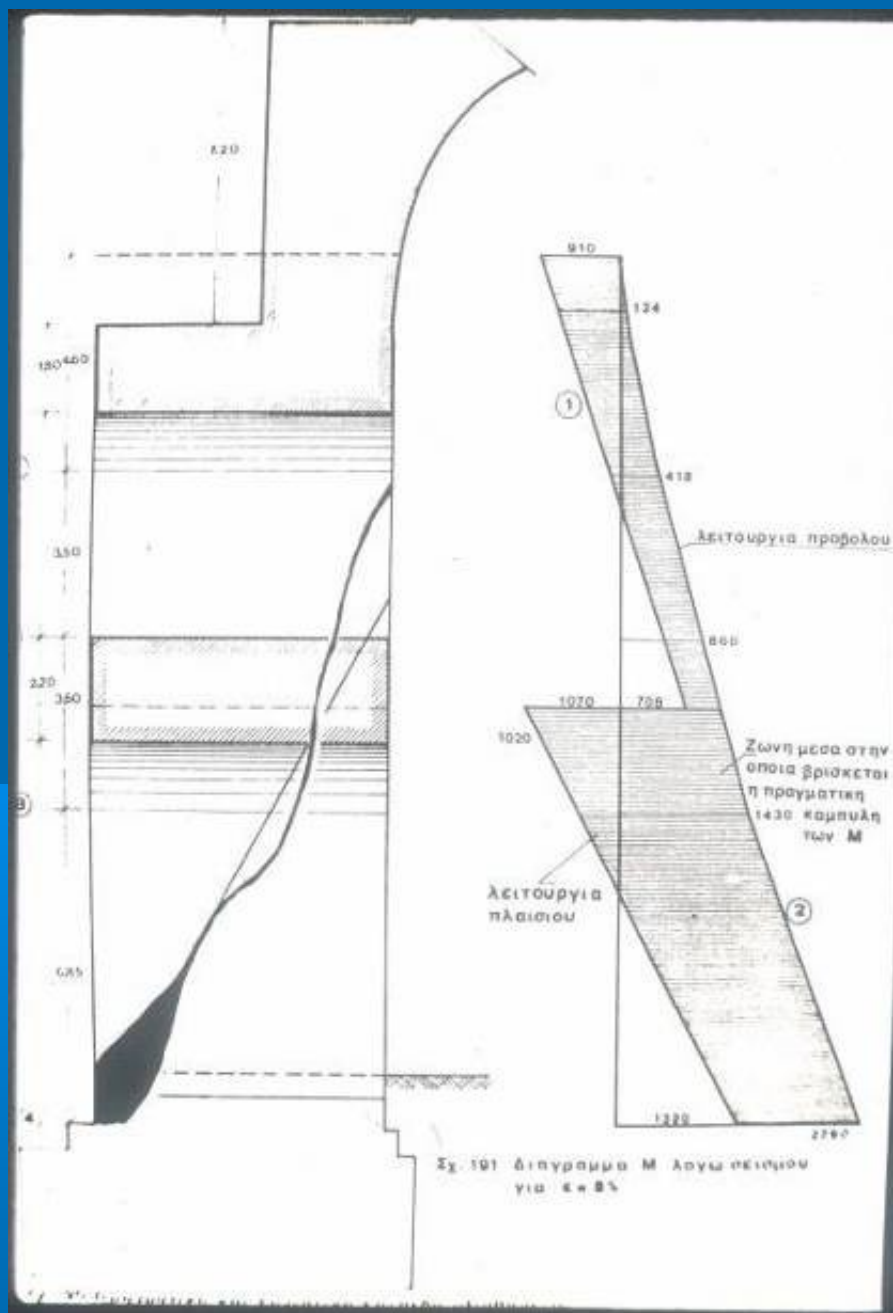
Left Wing - Longitudinal direction
Capacity Spectrum

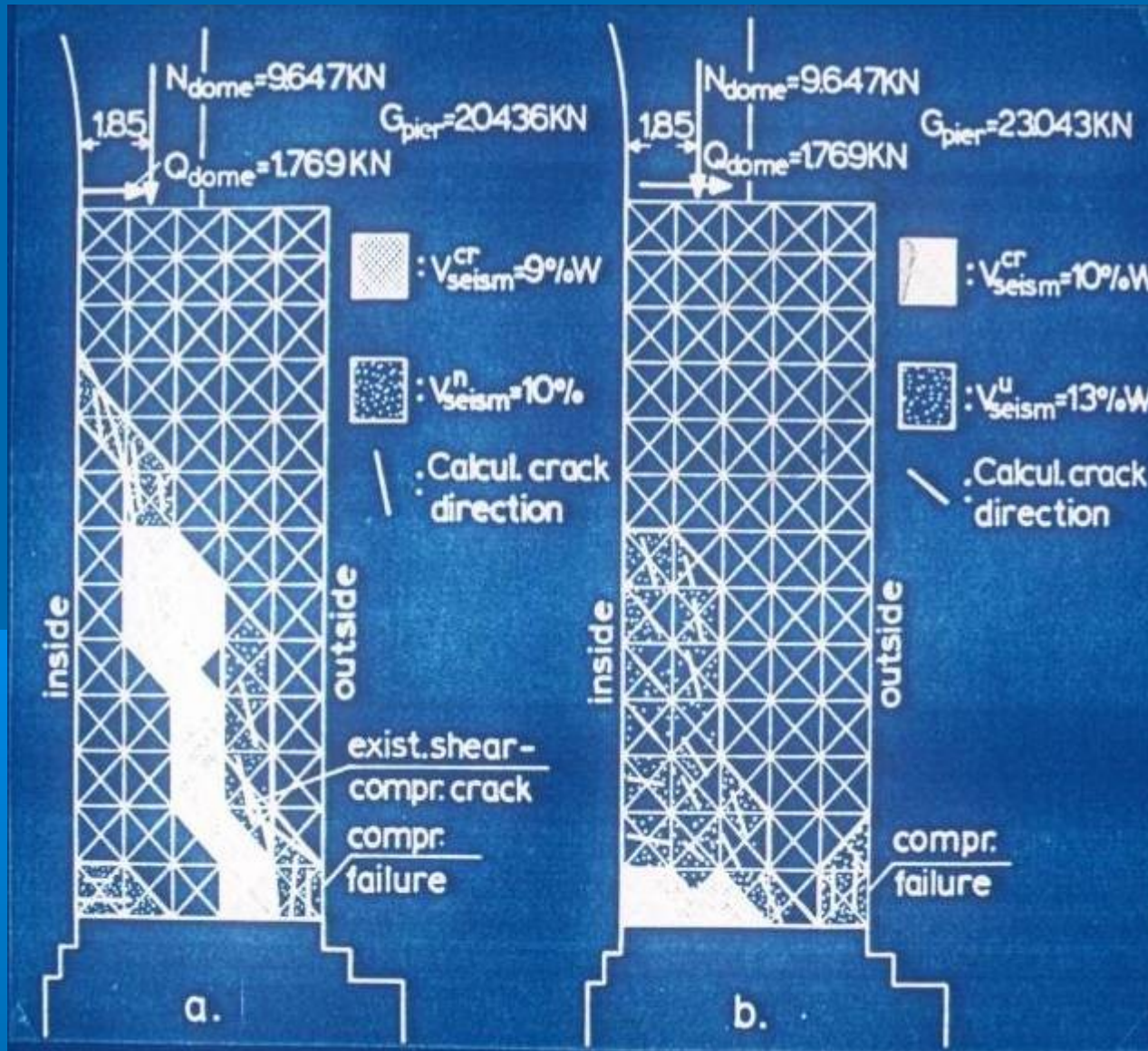


Left Wing - Transverse Direction
Capacity Spectrum







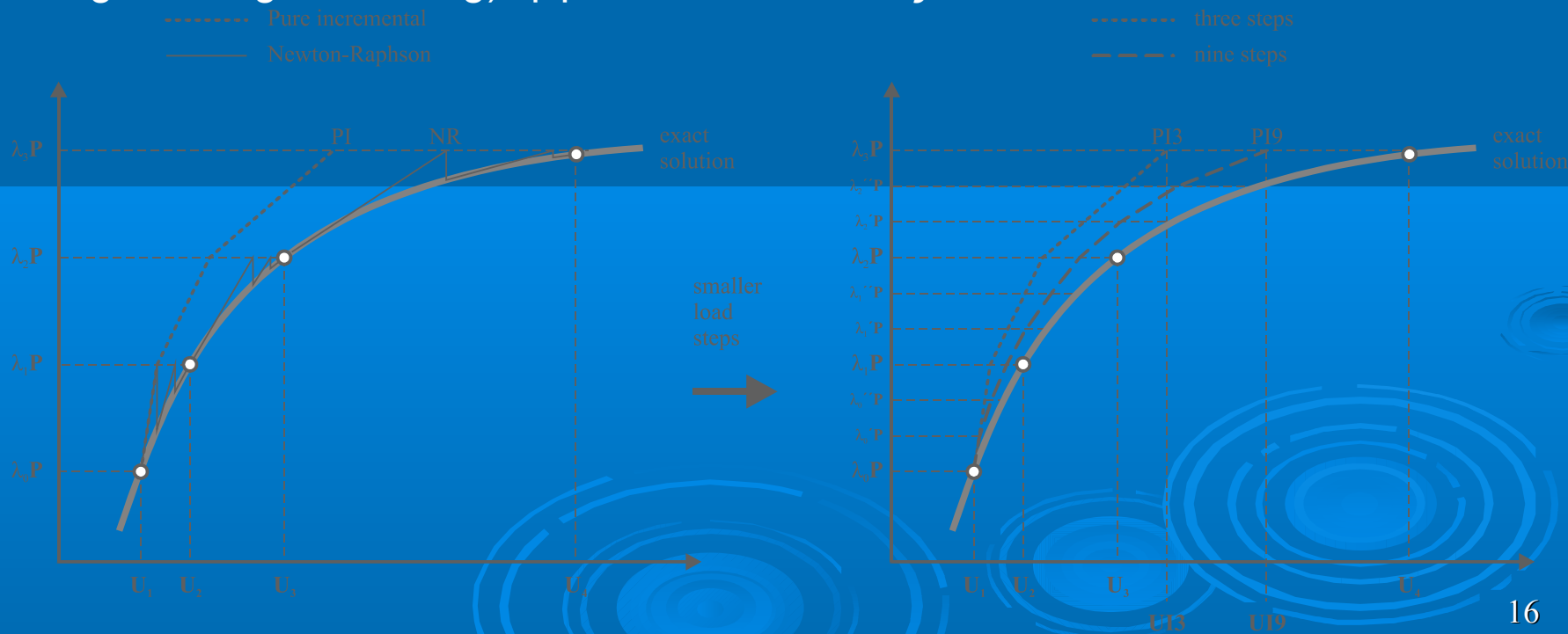


Predicted failure pattern of the piers of the Roman part using a F.E.M. inelastic analysis

- a) Cracked pier with staircase.
- b) Untracked massive pier.

2. Περιγραφή της προτεινόμενης Μεθόδου

Στην παρούσα Μέθοδο ένα ευρείας χρήσης επαγγελματικό πρόγραμμα F.E.M. Γραμμικής Ανάλυσης (SAP2000) χρησιμοποιείται ως κεντρικός επεξεργαστής σε μία καθαρή βήμα προς βήμα διαδικασία μέχρι αστοχίας, σε συνδυασμό με έναν κατάλληλο προεπεξεργαστή και μεταεπεξεργαστή οι οποίοι επικοινωνούν με τον πυρήνα χρησιμοποιώντας ενσωματωμένα σ' αυτόν A.P.I. (Application – Programming Interfacing) εργαλεία επικοινωνίας.



- Οι προ/μετά – επεξεργαστές **τροποποιούν την καμπτική δυσκαμψία (EJ), την αξονική δυσκαμψία (EA) και την διατμητική δυσκαμψία (GA)** κάθε πεπερασμένου στοιχείου, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα εντάσεως του προηγούμενου βήματος, ενώ σε κάθε βήμα ο τυχόν τύπος αστοχίας του πεπερασμένου στοιχείου απεικονίζεται γραφικά (ρηγμάτωση, συντριβή, διατμητική αστοχία).
- Στους προ/μετά – επεξεργαστές έχουν περιληφθεί κριτήρια αστοχίας της τοιχοποιίας, σχέσεις προς υπολογισμό των **μετασχηματιστών δυσκαμψίας** (stiffness modifiers) και παράμετροι που συνεκτιμούν την ορθοτροπία της τοιχοποιίας.
- Το στατικό μοντέλο μπορεί να συντίθεται από :
 - Πεπ. γραμμικά στοιχεία.
 - Πεπ. στοιχεία κελύφους (μεμβρανική + καμπτική λειτουργία).

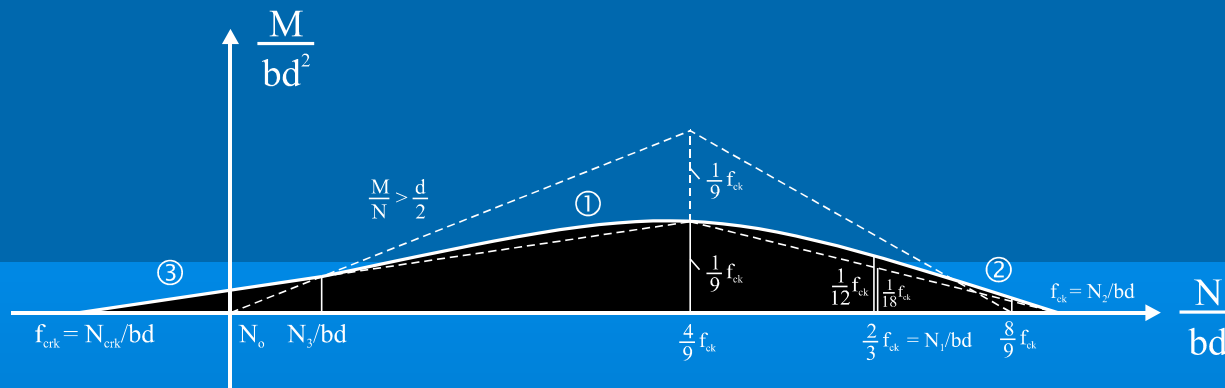
Διάγραμμα Ροής



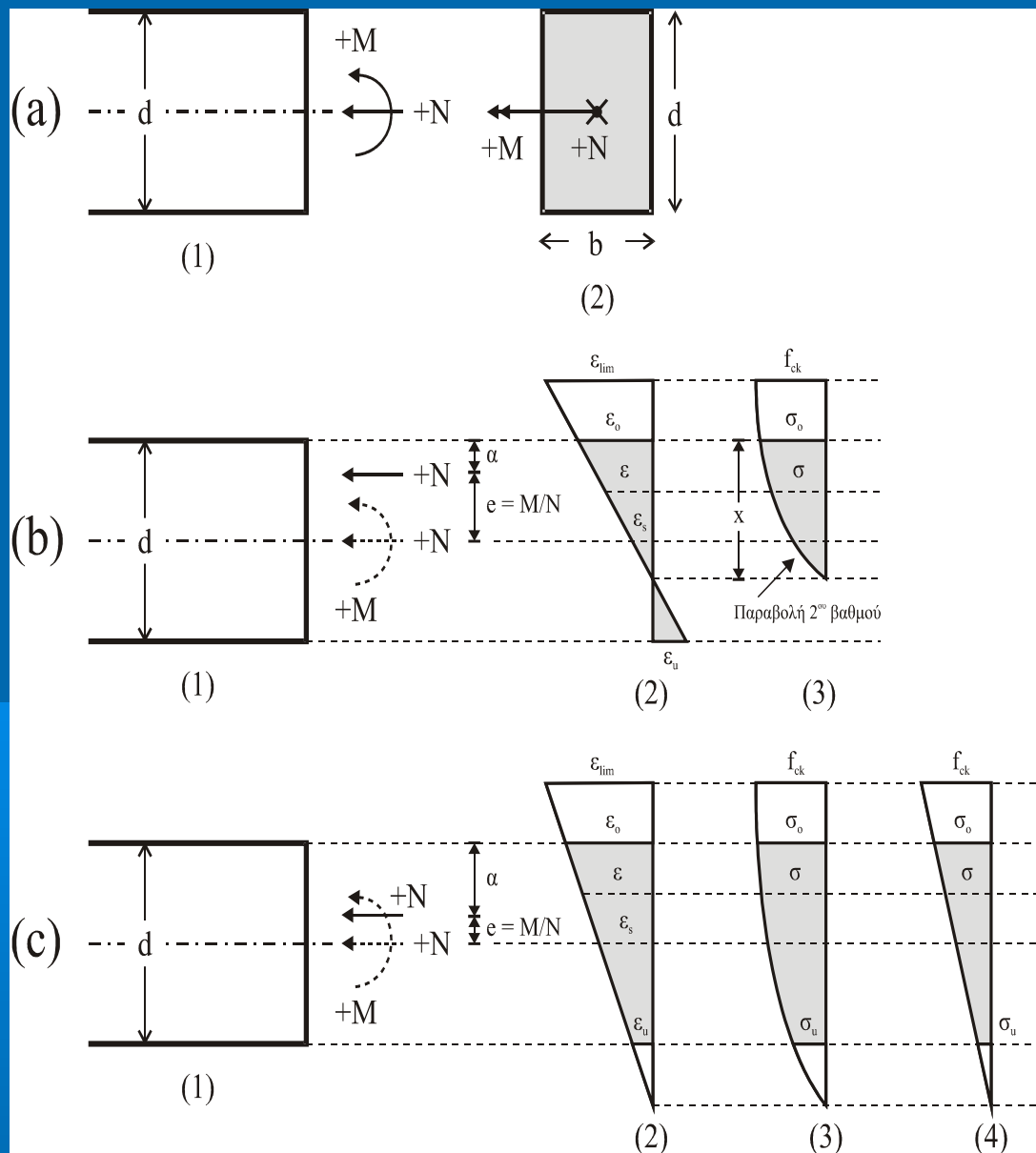
3. Κριτήρια Αστοχίας – Μετασχηματιστές Δυσκαμψίας

3.1 Γραμμικά Πεπ. Στοιχεία (Frame Elements)

- Η περιβάλλουσα αντοχής (M-N) που έχει εισαχθεί απεικονίζεται στο σχήμα:



Περιβάλλουσα Αντοχής M-N για ορθογωνική διατομή



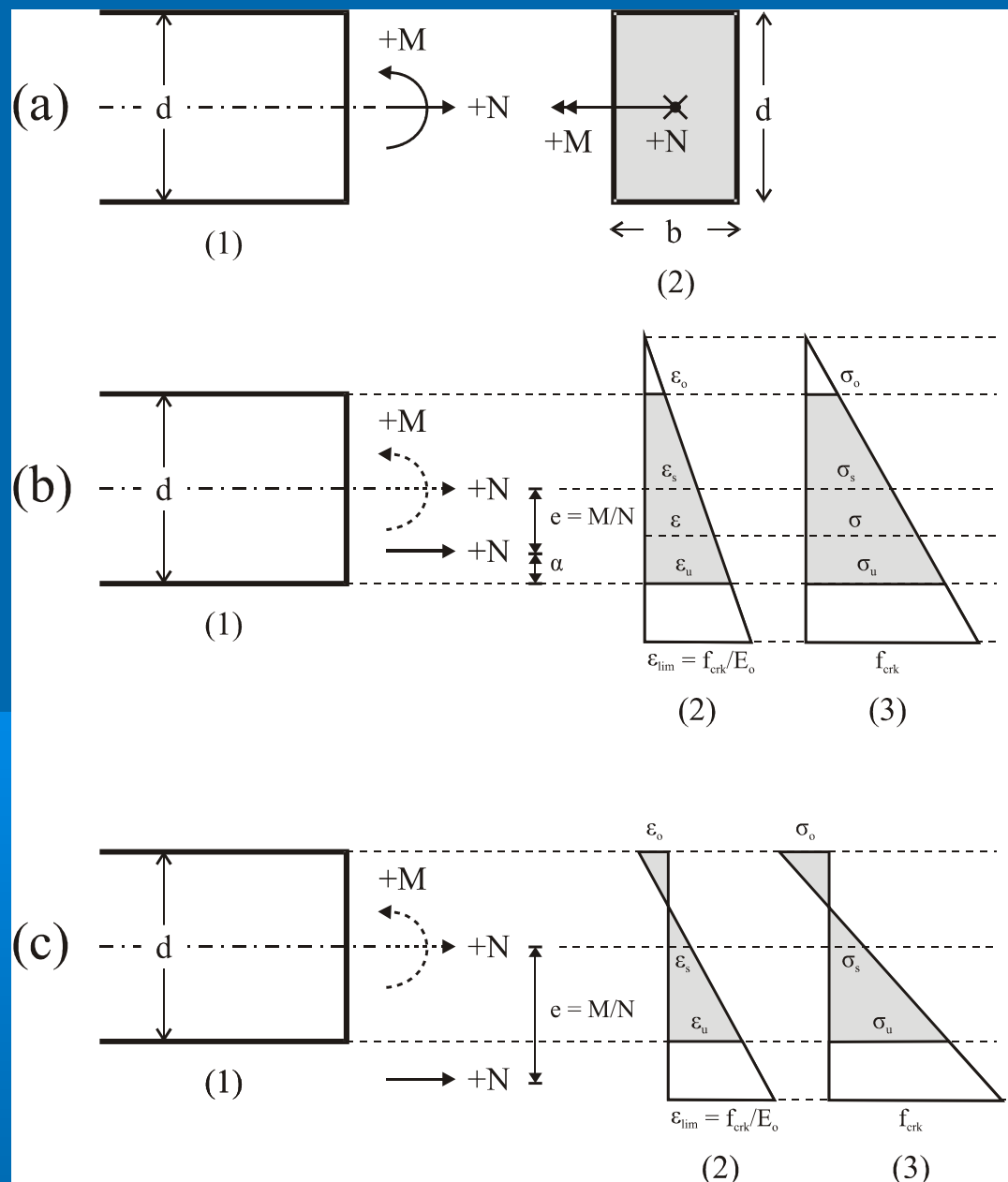
Καταπόνηση διατομής με θλίβουσα αξονική δύναμη και θετική καμπτική ροπή

(a) Γεωμετρία – φόρτιση ορθογωνικής διατομής

(b) Διατομή με αδρανή περιοχή
(b1) Γεωμετρία – φόρτιση
(b2) Κατανομή παραμορφώσεων
(b3) Κατανομή τάσεων

(c) Διατομή υπό πλήρη σύνθλιψη
(c1) Γεωμετρία – φόρτιση
(c2) Κατανομή παραμορφώσεων
(c3) Κατανομή τάσεων
(c4) Προσεγγιστική κατανομή τάσεων

ΟΙΟΝΕΙ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΗΜΕΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΑΠΟ ΑΟΠΛΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ



Καταπόνηση διατομής με εφελκύουσα αξονική δύναμη και θετική καμπτική ροπή

(a) Γεωμετρία – φόρτιση ορθογωνικής διατομής

(b) Διατομή με μικρή εκκεντρότητα $e \leq d/6$
(πλήρης εφελκυσμός)
(b1) Γεωμετρία – φόρτιση
(b2) Κατανομή παραμορφώσεων
(b3) Κατανομή τάσεων

(c) Διατομή υπό ετερόσημη ένταση (εκκεντρότητα $e > d/6$)
(c1) Γεωμετρία – φόρτιση
(c2) Κατανομή παραμορφώσεων
(c3) Κατανομή τάσεων

- Για συνδυασμούς M-N εκτός περιβάλλουσας **οι μετασχηματιστές δυσκαμψίας** παίρνουν και τιμή $m = \emptyset$
- Για συνδυασμούς M-N εντός περιβάλλουσας ισχύουν τα εξής :
 - Για $N_{cr} > N^3 - |N_3|$, $m = 1,0$ (αρρηγμάτωση διατομή)
 - Για $- |N_3| > N > - |N_1|$, $m = \frac{K_{ef}}{K_0}$ (σταδιακή ρηγμάτωση της συνθλιβόμενης διατομής)
 - Για $- |N_1| > N > - |N_2|$, $m = 1,0$ (καθαρή σύνθλιψη)

3.2 Μεμβρανικά στοιχεία (τρούλοι – θόλοι)

- Σχέση τάσεων – παραμορφώσεων ορθότροπων στοιχείων (Darwin – Peckhold)

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \frac{1}{1 - \nu^2} \begin{pmatrix} E_x & \nu \sqrt{E_x g E_y} & 0 \\ \nu \sqrt{E_x g E_y} & E_y & 0 \\ 0 & 0 & (1 - \nu^2) G \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}$$

Όπου :

$$\nu = \sqrt{\nu_x g \nu_y}$$

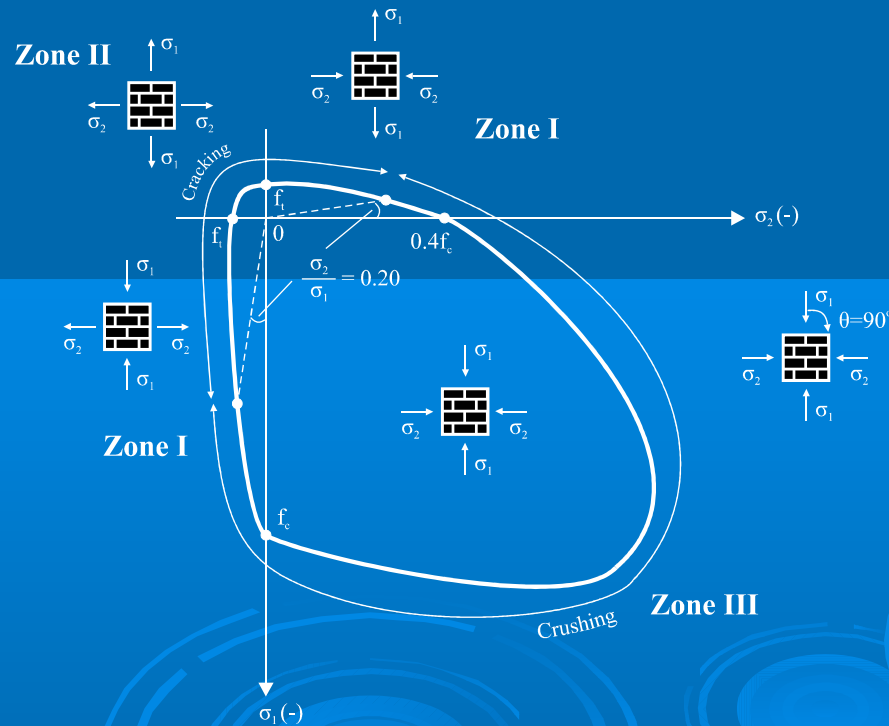
$$(1 - \nu^2) G = (E_x + E_y - 2\nu \sqrt{E_x g E_y}) / 4$$

$$(E_x) g(\nu_x) = (E_y g \nu_y)$$

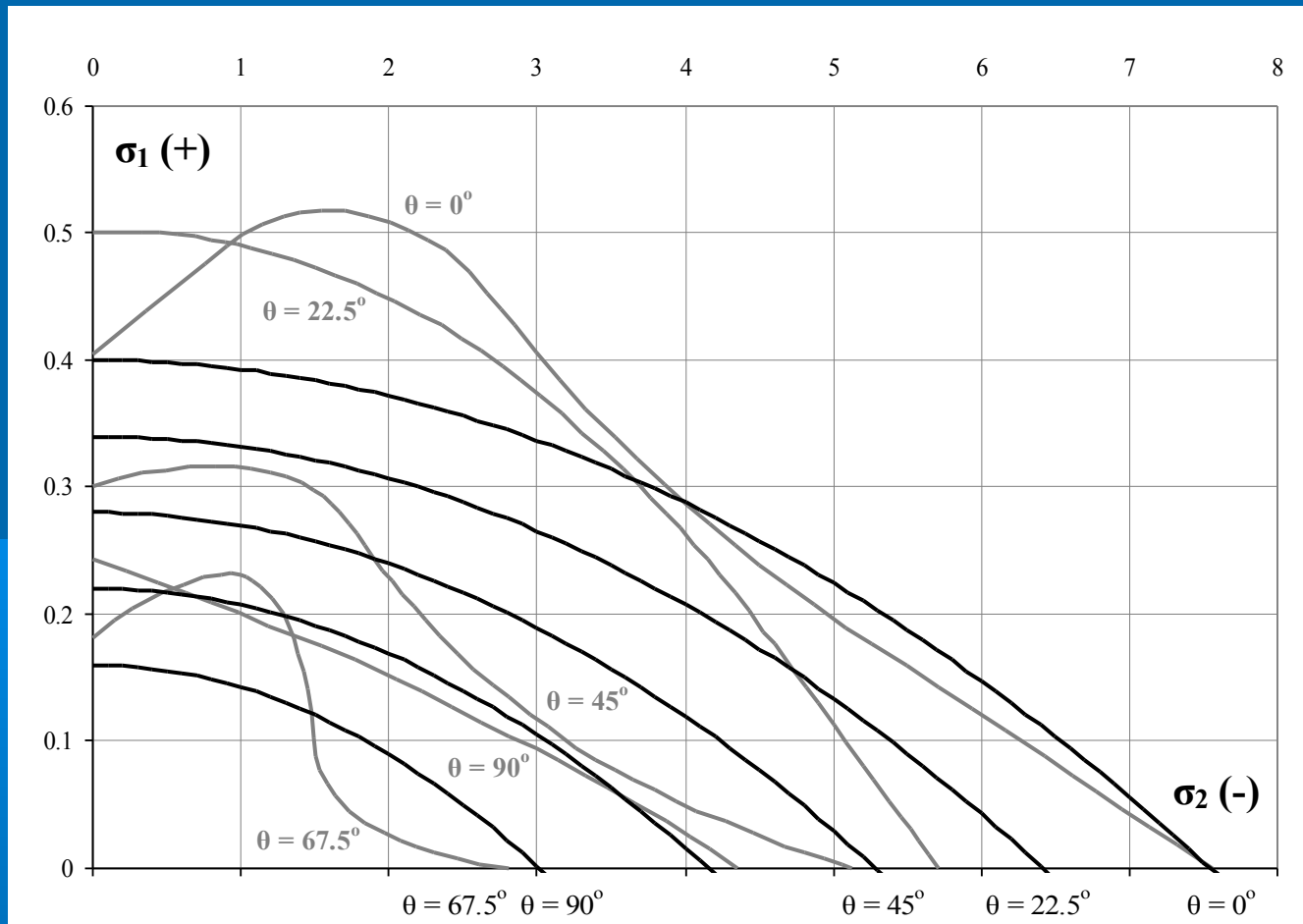
- Περιβάλλουσες αντοχής

συνάρτηση των $(\sigma_1, \sigma_2, \theta)$

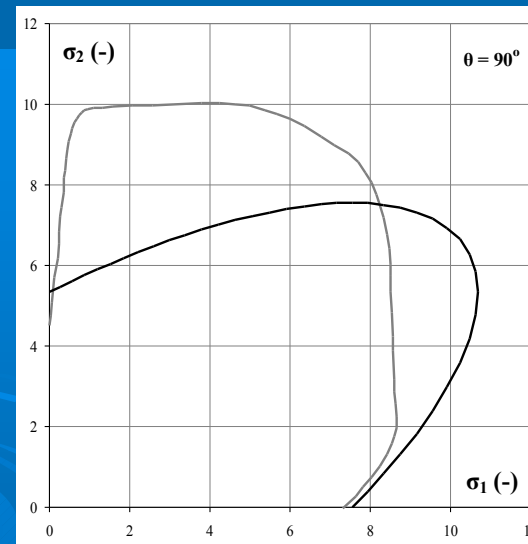
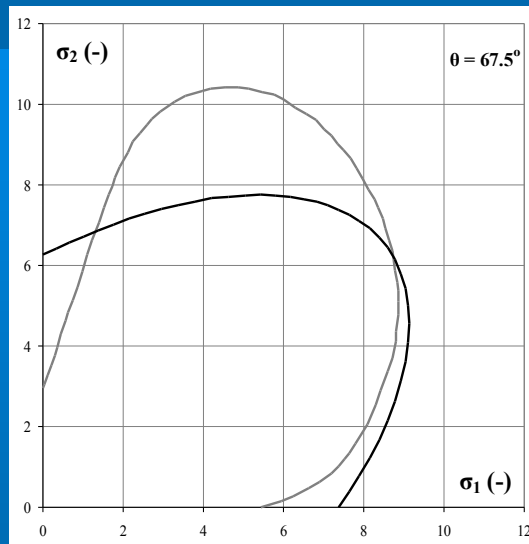
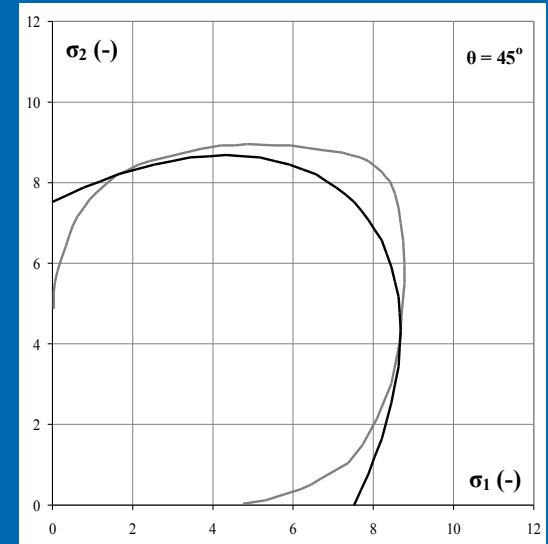
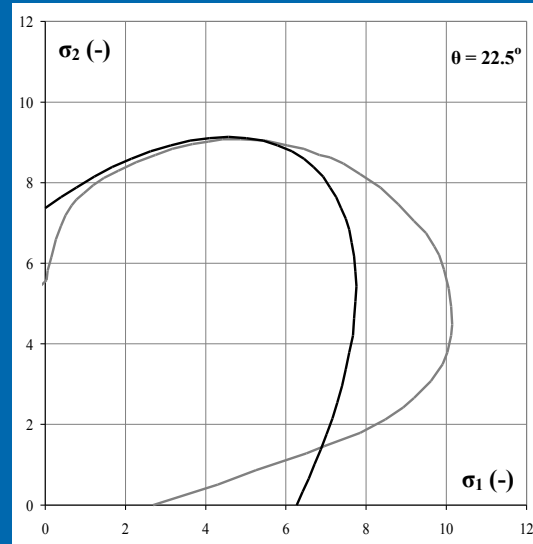
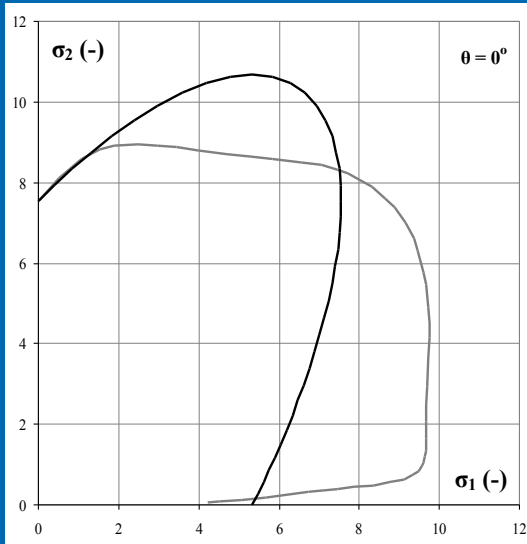
- Περιβάλλουσα $\sigma_1 - \sigma_2$ για $\theta = 90^\circ$ (Ζώνες I, II, III)



- Περιβάλλουσα $\sigma_1 - \sigma_2$ για Ζώνη Ι : $\sigma_1 > 0, \sigma_2 < 0$



- Περιβάλλουσα $\sigma_1 - \sigma_2$ για Ζώνη III : $\sigma_1 < 0, \sigma_2 < 0$



3.3 Στοιχεία κελύφους

Τα στοιχεία κελύφους συνδυάζουν την **μεμβρανική** με την **καμπτική λειτουργία** (Παρ. 3.2 και 3.3), ήτοι :

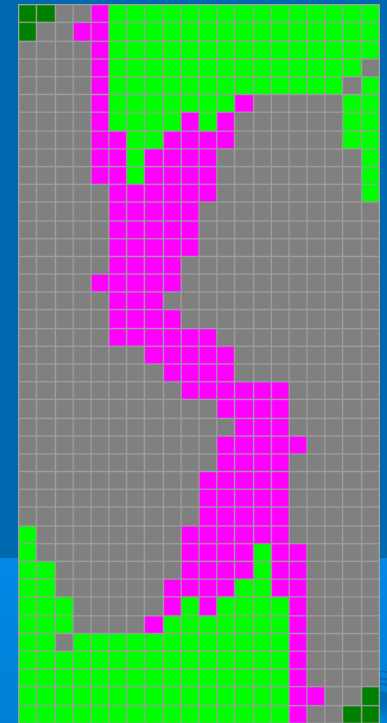
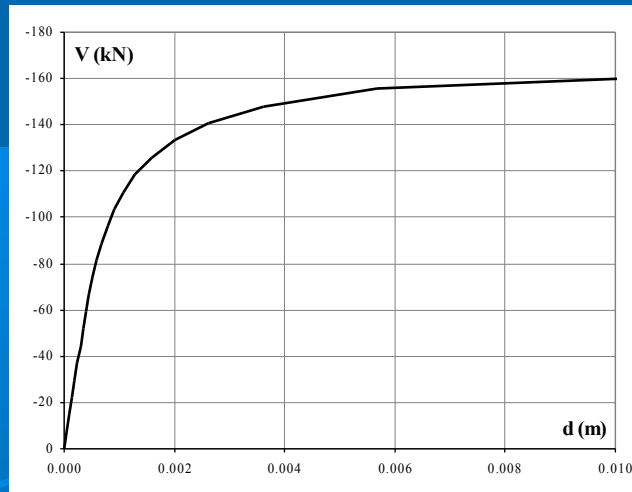
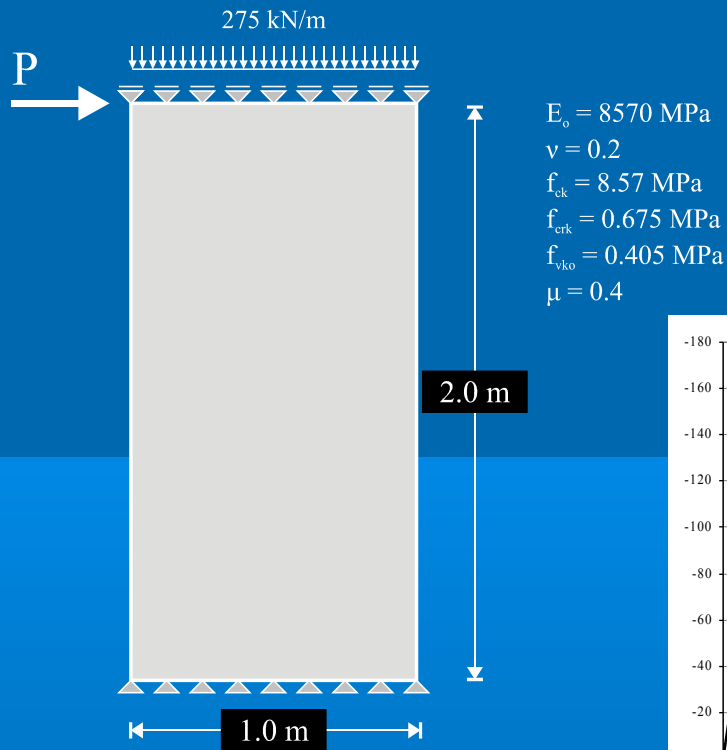
- Προσδιορίζονται οι κύριες ροπές κάμψεως M_1 , M_2 και η γωνία τους θ_k ως προς τους άξονες ορθοτροπίας (από τις M_x , M_y , M_{xy}).
- Προσδιορίζονται οι N_1 , N_2 και η γωνία τους θ_μ ως προς τους άξονες ορθοτροπίας (από τις N_x , N_y , N_{xy}). $(\theta_\mu \quad \theta_k)$
- Γίνεται έλεγχος της εντατικής κατάστασης με τη βοήθεια των στοιχείων της παρ. 3.2 για **μεμβρανική αστοχία**.
- Προσδιορίζονται οι αξονικές (μεμβρανικές) δυνάμεις N_{θ_k} και $N_{\theta_k + \frac{\pi}{2}}$ (θ_k η γωνία των M_1 , M_2 ως προς τους άξονες ορθοτροπίας).
- Γίνεται έλεγχος της εντατικής κατάστασης για τους συνδυασμούς (M_1, N_{θ_k}) και $(M_2, N_{\theta_k + \frac{\pi}{2}})$ με την βοήθεια της διαδικασίας της παρ. 3.1 **για καμπτ. αστοχία**.

4. Εφαρμογές

Παρατίθενται :

- Απλές περιπτώσεις πεσσών ή επίπεδων τοίχων από άοπλη τοιχοποιία με ανοίγματα για τις οποίες διατίθενται πειραματικά αποτελέσματα :
 - Παράδειγμα Πεσσού (Magenes & Calvi, 1995)
 - Τοίχος Παβίας (Magenes et al., 1995)
- Τρεις περιπτώσεις σύνθετων πραγματικών κτιρίων για τα οποία ήμασταν υπεύθυνοι μελετητές για την στατική τους αναστύλωση :
 - Το κωδωνοστάσιο της Ι. Μονής Ζωγράφου στον Άθω.
 - Η Παντάνασσα στην Πελοπόννησο.
 - Ο Άγιος Γεώργιος στο Κάϊρο.

Παράδειγμα Πέσσου (Magenes & Calvi, 1995)

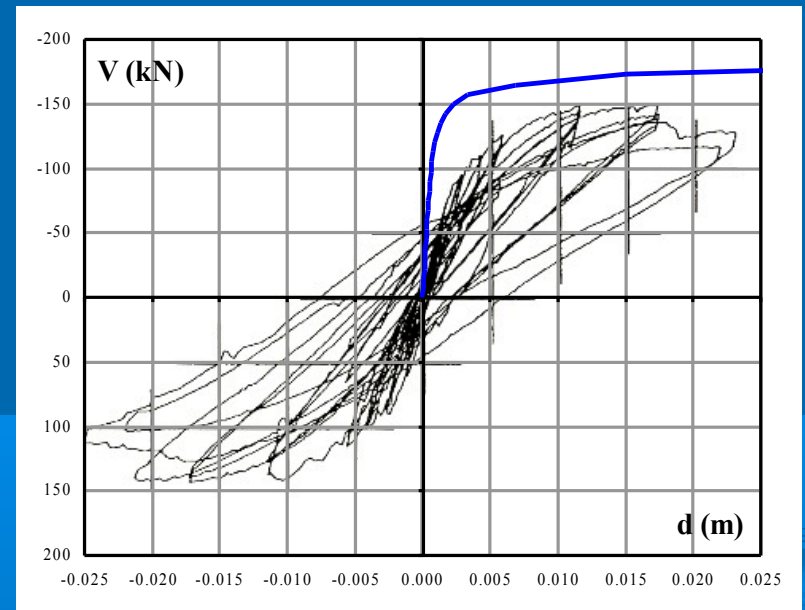
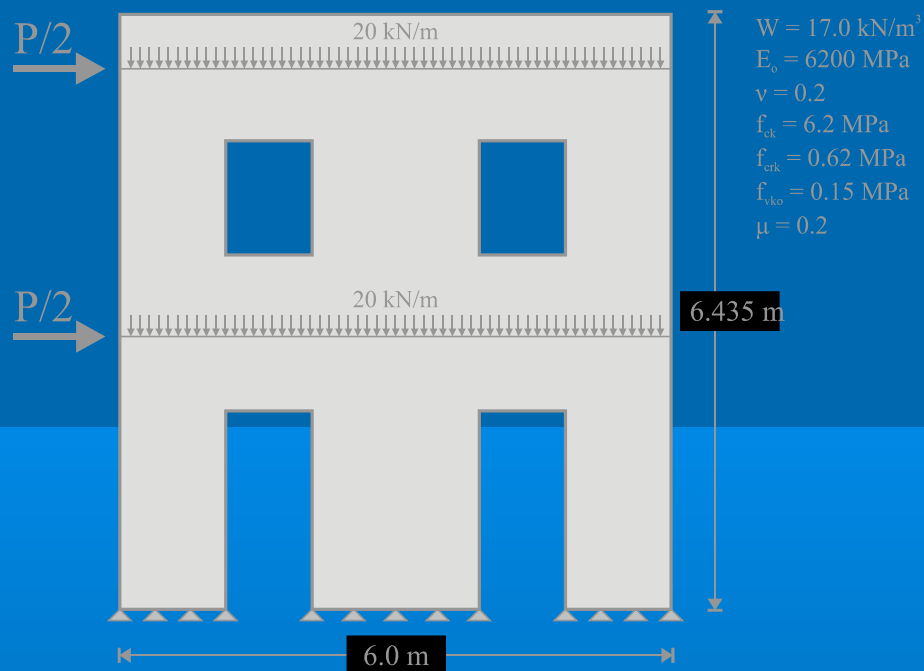


$$V_{ult}^{exp.} = 151 \text{ kN}$$

$$V_{ult}^{anal.} = 160 \text{ kN}$$

Failure mode : Rocking

Τοίχος Παβίας (Magenes et al., 1995)

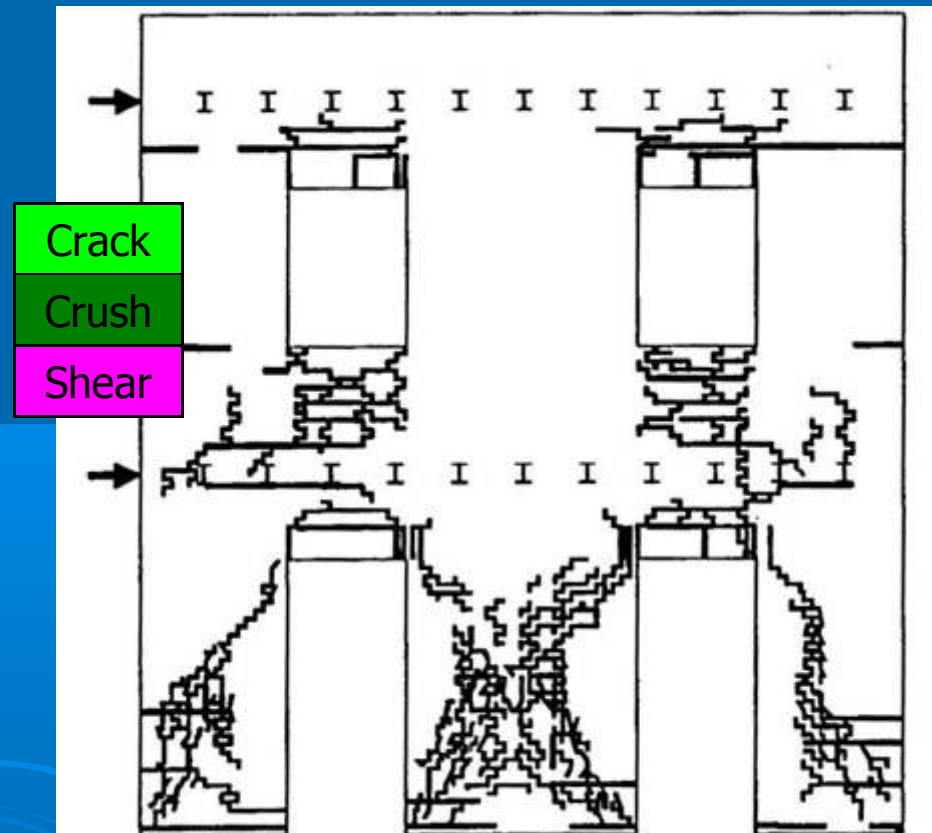
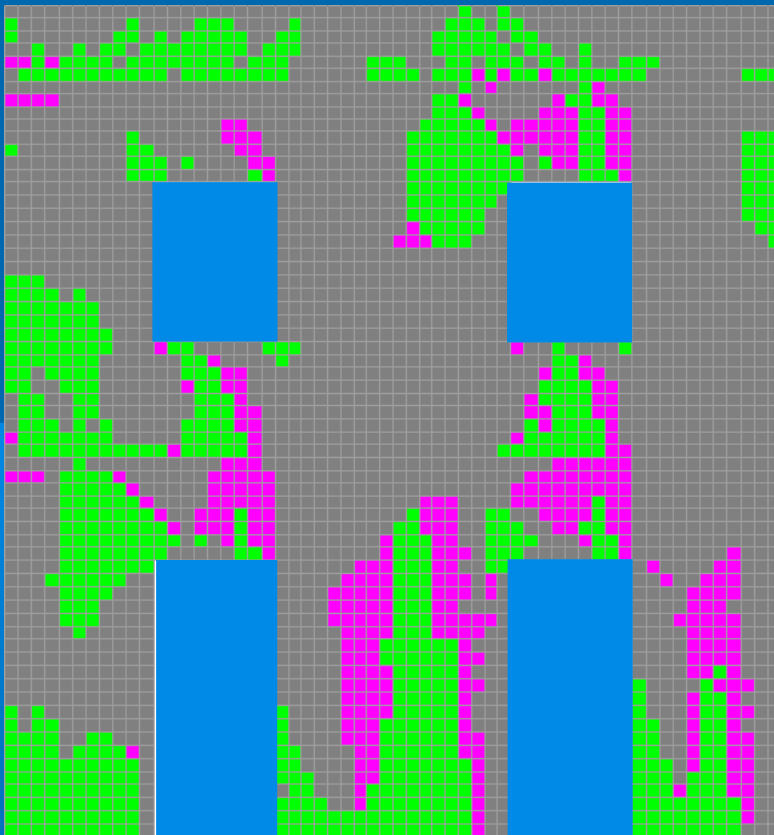


$$V_{ult}^{exp.} = 150 \text{ kN}$$

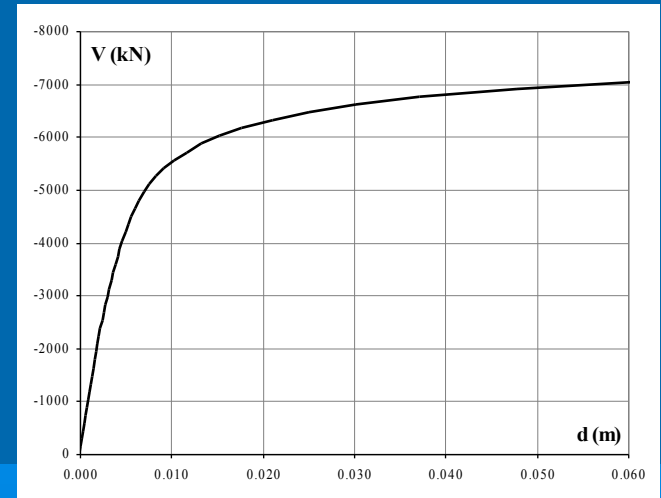
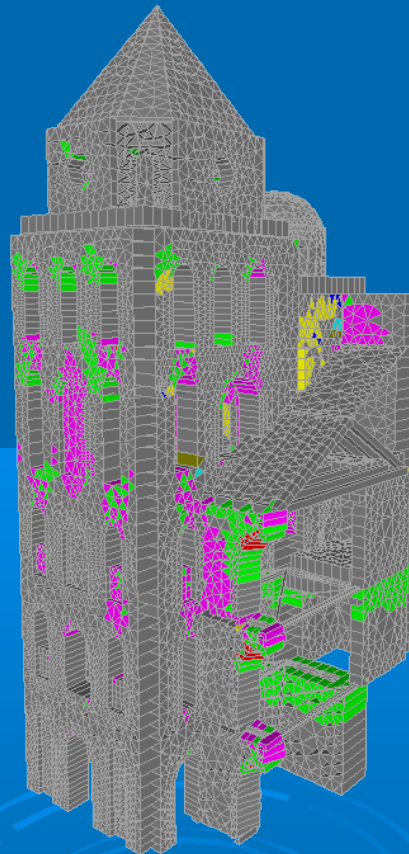
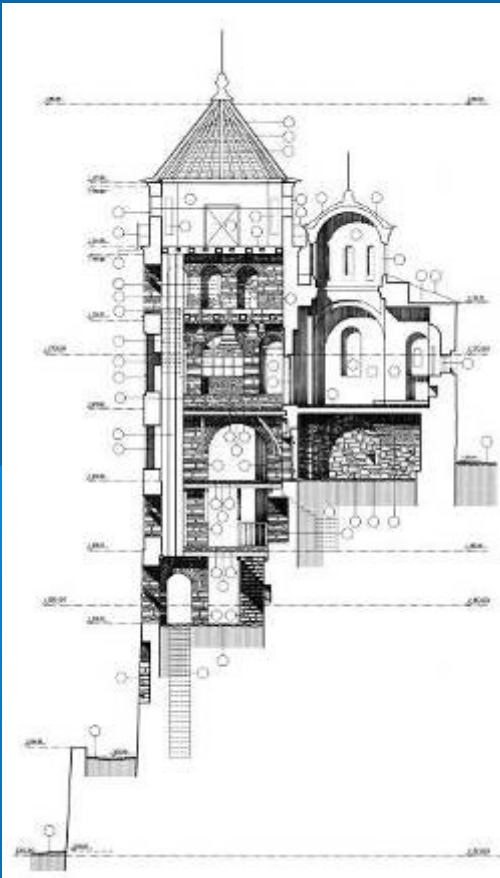
$$V_{ult}^{anal.} = 170 \text{ kN}$$

Failure drift : 0.43 %
30

Τοίχος Παβίας (Magenes et al., 1995)



Το κωδωνοστάσιο της Ι. Μονής Ζωγράφου στον Άθω

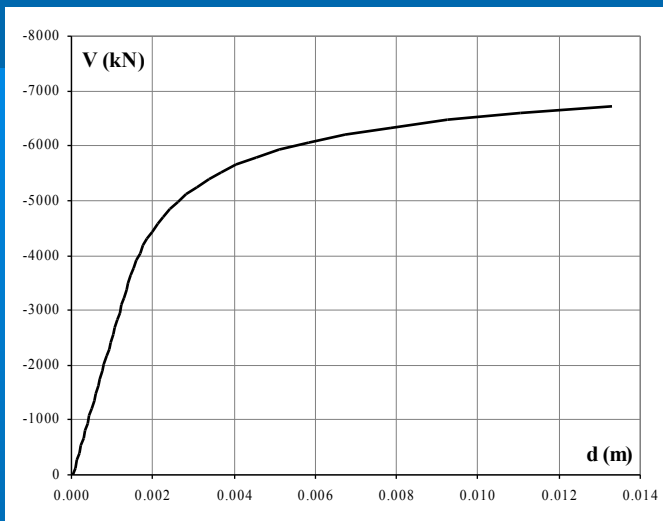
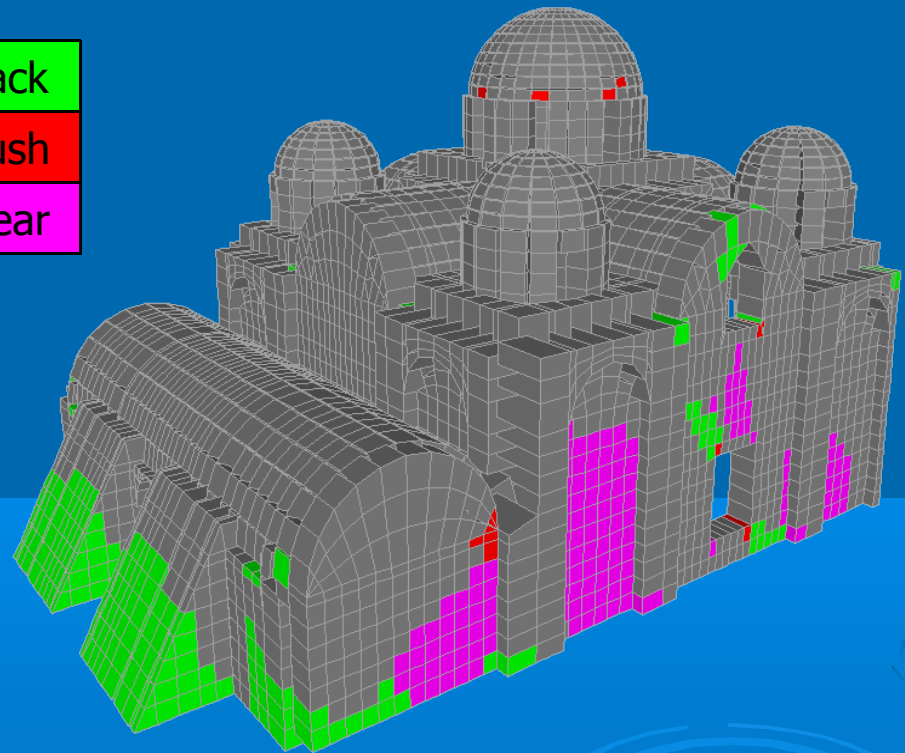


$$\delta_{ult} = 6 \text{ cm}$$

$$V_{design} = 4450 \text{ kN} (a_{design} = 0.46g)$$

$$V_{ult} = 7000 \text{ kN} (a_{ult} = 0.73g)$$

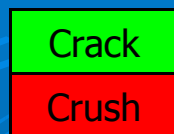
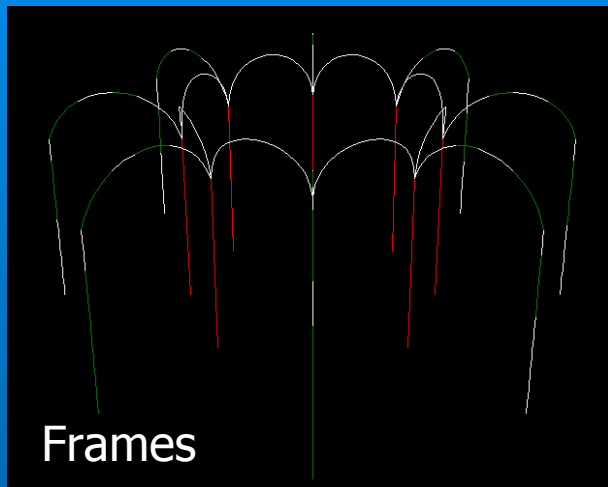
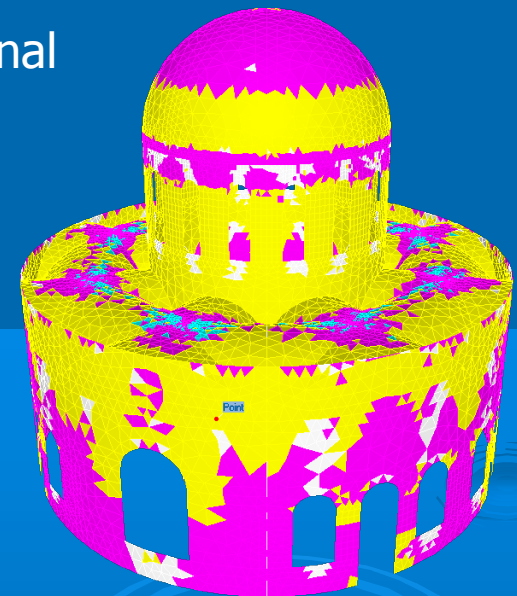
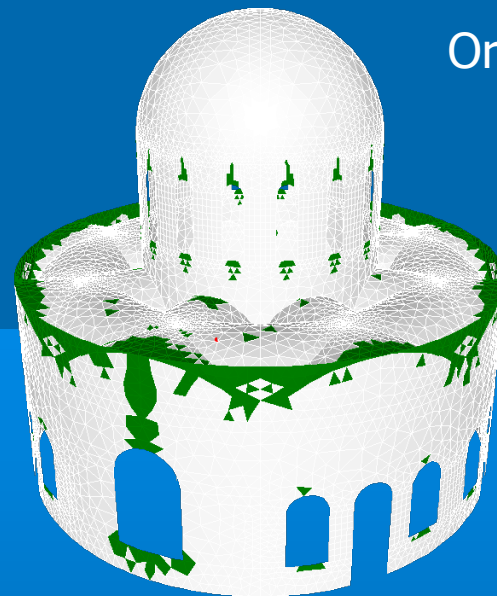
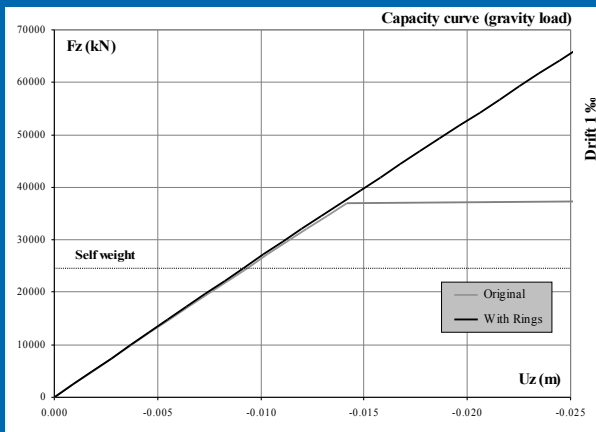
Η Παντάνασσα στην Πελοπόννησο



$$\delta_{\text{design}} = 2.9 \text{ mm} - a_{\text{design}} = 0.30g$$

$$\delta_{\text{ult}} = 13.2 \text{ mm} - a_{\text{ult.}} = 0.60 g$$

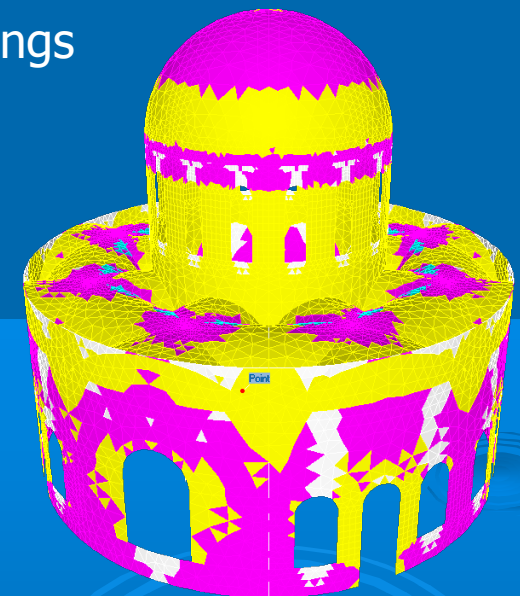
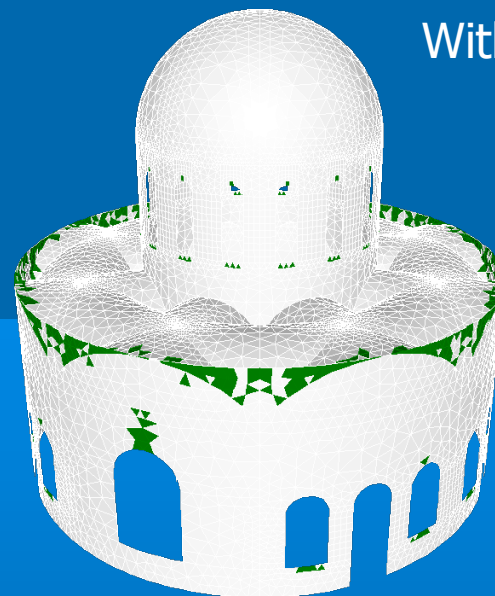
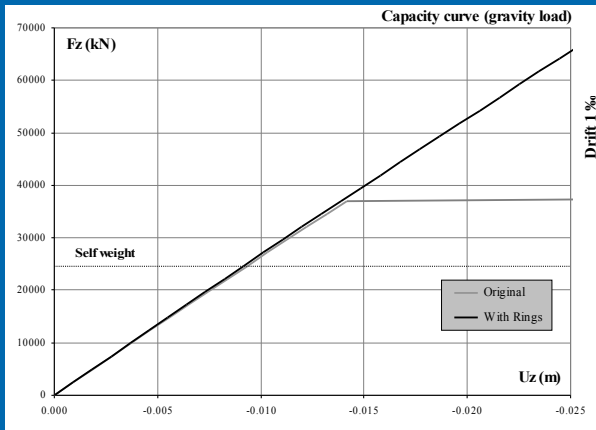
Ο Άγιος Γεώργιος στο Κάιρο – Dead load



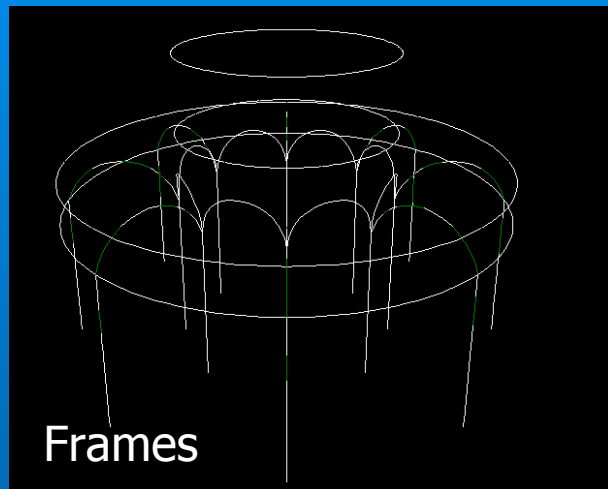
Membrane

Bending

Ο Άγιος Γεώργιος στο Κάιρο – Dead load



Cracking Top
Crushing Top
Cracking Bottom
Crushing Bottom

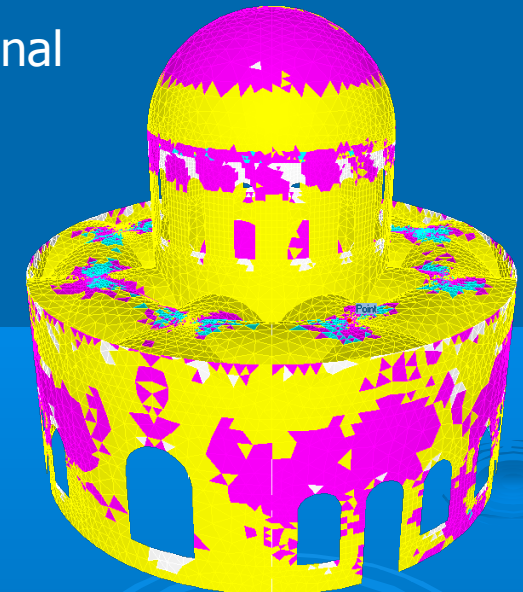
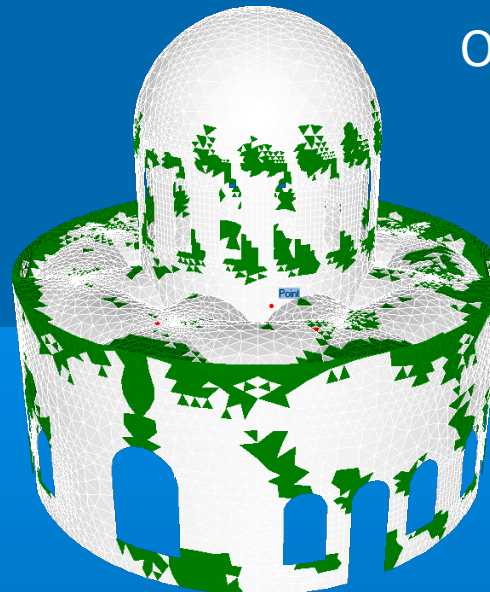
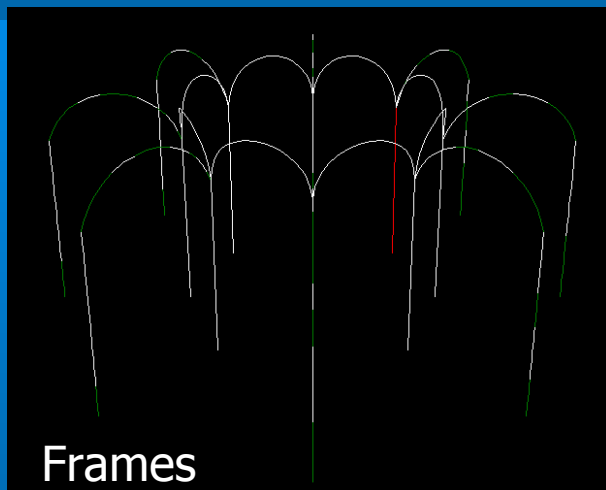
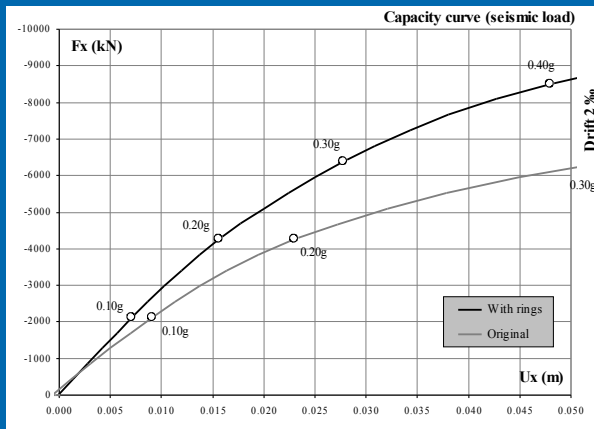


Crack
Crush

Membrane

Bending

Ο Άγιος Γεώργιος στο Κάιρο – Seismic load



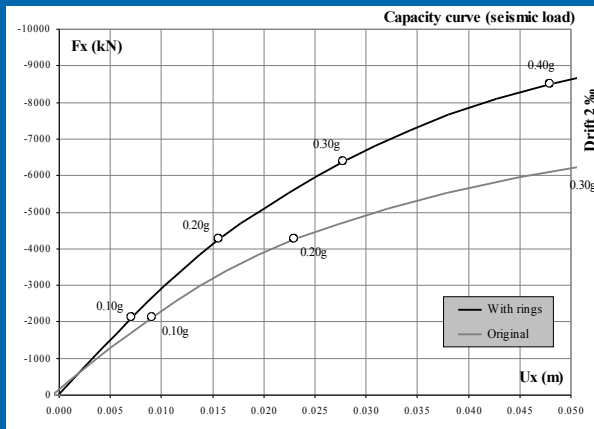
Cracking Top
Crushing Top
Cracking Bottom
Crushing Bottom

Crack
Crush

Membrane

Bending

Ο Άγιος Γεώργιος στο Κάιρο – Seismic load



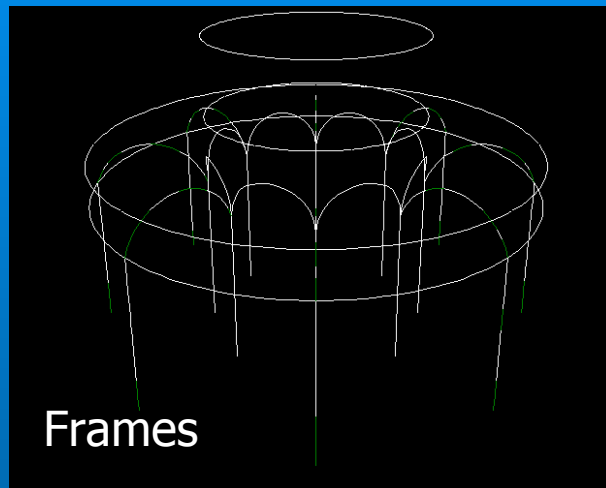
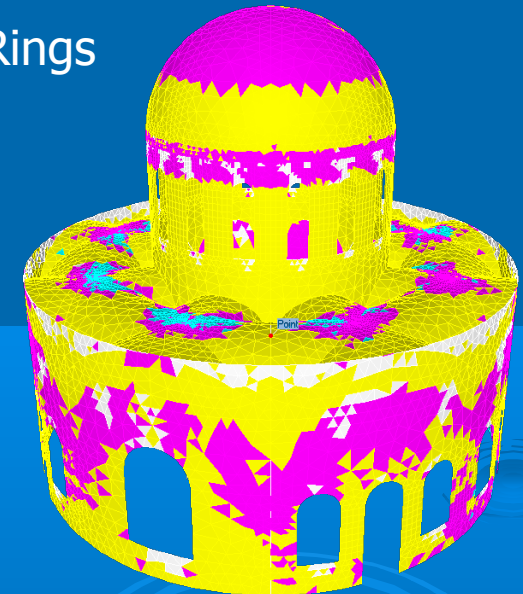
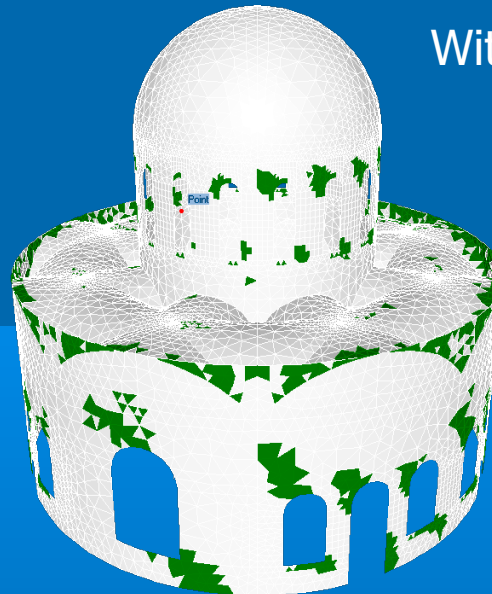
Cracking Top

Crushing Top

Cracking Bottom

Crushing Bottom

With Rings



Frames

Crack

Crush

Membrane

Bending

5. Συμπεράσματα

1. Η αναπτυχθείσα Μέθοδος δίνει αποτελέσματα **πολύ πλησιέστερα προς τα πειραματικά** από ό,τι η ελαστική ανάλυση.
2. Η εισαγόμενη βήμα προς βήμα διαδικασία καθιστά δυνατό τον εντοπισμό κρίσιμων πρόωρων αστοχιών, την εξαγωγή συμπερασμάτων για την επικινδυνότητά τους (π.χ. αστοχίες πεσσών από σύνθλιψη – διάτμηση). Έτσι καθιστά δυνατή τη λήψη μέτρων για τοπικές επεμβάσεις, όπου αυτό είναι απαραίτητο.

3. Από την άλλη πλευρά καθιστά δυνατή την εφαρμογή ηπιότερων επεμβάσεων σε ευσταθείς ζώνες αστοχίας (π.χ. ζώνες με ρήγματα κάμψης σύνθλιψης).
4. Τέλος, κατά την άποψη του ομιλούντος η αναπτυχθείσα οιονεί ανελαστική μέθοδος, όπως και κάθε ανελαστική, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην πράξη **μόνο** σε συνδυασμό με την ελαστική ανάλυση προς υιοθέτηση ενδεχομένως ηπιότερου σχήματος επεμβάσεως καθώς επίσης και για τοπικές επεμβάσεις σε κρίσιμες περιοχές πρόωρης συντριπτικής αστοχίας.