

# Διερεύνηση Προσομοιώσεων για Δικυψελικούς Πυρήνες Κτιρίων Ο/Σ

**Χ. ΞΕΝΙΔΗΣ**  
Λέκτορας Α.Π.Θ

**Κ. ΜΟΡΦΙΔΗΣ**  
Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός

**Ι.Ε. ΑΒΡΑΜΙΔΗΣ**  
Καθηγητής Α.Π.Θ.

## Περίληψη

Η αξιοπιστία απλοποιημένων προσομοιωμάτων για μονοκυψελικούς πυρήνες και κυρίως για ανοικτούς και ημιανοικτούς πυρήνες διατομής Π έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών ερευνητικών εργασιών στο πρόσφατο παρελθόν. Αντίθετα, λίγες μόνον αναφορές υπάρχουν διεθνώς σχετικά με την αποτελεσματικότητα αντίστοιχων προσομοιώσεων για πολυκυψελικούς πυρήνες πολυωρόφων κτιρίων Ο/Σ. Στην παρούσα εργασία αξιολογείται και σχολιάζεται η αξιοπιστία διαφόρων απλοποιημένων μοντέλων για τους συχνά χρησιμοποιούμενους στην πράξη ανοικτούς δικυψελικούς πυρήνες. Προσομοιώματα αποτελούμενα α) από εναλλακτικές διατάξεις ισοδύναμων στύλων, β) από μακροεπιφανειακά στοιχεία και γ) από πεπερασμένα στοιχεία κελύφους με ένα στοιχείο ανά σκέλος και όροφο συγκρίνονται μεταξύ τους και με την οιονεί ακριβή λύση. Ως τέτοια λαμβάνεται εδώ η λύση που προκύπτει από την προσομοιώση των πυρήνων με έναν επαρκώς πικνό κάναβο επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων κελύφους. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν αναφέρονται τόσο σε ισοδύναμες στατικές όσο και σε δυναμικές φασματικές αναλύσεις, ενώ οι επί μέρους παραδοχές των αριθμητικών διερευνήσεων είναι συμβατές με τις διατάξεις του ισχύοντος Ελληνικού Αντιεισιμού Κανονισμού.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1. Προσομοίωση συνήθων κτιριακών κατασκευών Ο/Σ

Η διείσδυση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε όλα σχεδόν τα επί μέρους πεδία υπολογισμού των κατασκευών δεν μπόρεσε ακόμη να εκτοπίσει από την καθημερινή πράξη διάφορες απλοποιημένες μεθόδους προσομοιώσης και ανάλυσης. Οι μέθοδοι αυτές είναι βέβαια μικρότερης ακρίβειας, καλύπτουν όμως κατά κανόνα τις απαιτήσεις αξιοπιστίας για μελέτες συμβατικών κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Άλλωστε, η εφαρμογή της μεθόδου των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων με τη βοήθεια του διατιθέμενου σήμερα επαγγελματικού λογισμικού δεν απαλλάσσει δυστυχώς ακόμη το μελετητή από χρονοβόρες διαδικασίες εισαγωγής των δεδομένων και κυρίως μετεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων, όταν πρόκειται για μελέτες εφαρμογής που πρέπει να ικανοποιούν τους ισχύοντες κανονισμούς.

Κατά τη συνήθη απλοποιημένη προσομοίωση τοιχωμάτων χρησιμοποιούνται κατά κανόνα γραμμικά προσομοιώματα

(ισοδύναμα πλαισιακά μοντέλα) και μοντέλα μακροεπιφανειακών στοιχείων, καθώς επίσης σε ορισμένες περιπτώσεις και μοντέλα με ένα πεπερασμένο στοιχείο κελύφους ανά σκέλος τοιχώματος και όροφο. Η επιτυχής εφαρμογή κυρίως του ισοδύναμου πλαισιακού μοντέλου σε επίπεδους μικτούς φορείς πλαισίων-τοιχίων αποτελέσεις ισχυρό κίνητρο για την ευρεία διάδοση της απλοποιημένης αυτής γραμμικής προσομοίωσης [1-3]. Η απλότητα του μοντέλου, με τη βοήθεια του οποίου η ανάλυση τοιχωμάτων μπορούσε να γίνει στον ηλεκτρονικό υπολογιστή με κοινά προγράμματα επιπέδων πλαισίων, ώθησε με αυτονόητο σχεδόν τρόπο στην επέκταση της εφαρμογής του και σε σύνθετα τοιχώματα του χώρου (πυρήνες) κατά τη χωρική ανάλυση πολυωρόφων κτιρίων. Δεν άργησε, όμως, και η διαπίστωση διαφόρων αδυναμιών τής εν λόγω προσομοίωσης πυρήνων. Μια σειρά σχετικών διερευνήσεων έδειξε ότι η εφαρμογή του μοντέλου σε ανοικτούς, ημιανοικτούς και κλειστούς πυρήνες υπό έντονη στρεπτική καταπόνηση οδηγεί σε ανακριβή έως και απαράδεκτα αποτελέσματα [4-6], και ότι ακόμη και σε επίπεδους φορείς με μη κανονικής μορφής τοιχώματα [7] τα αποτελέσματα αποκλίνουν σημαντικά από την ορθή λύση. Ας σημειωθεί ότι η ισοδύναμη πλαισιακή προσομοίωση ενός πυρήνα δεν είναι μονοσήμαντη και σε εξάρτηση από ορισμένες απαραίτητες παραδοχές μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά προσομοιώματα. Οι διαφορές των πιθανών προσομοιωμάτων αφορούν στο διαφορετικό αριθμό των χρησιμοποιούμενων ισοδύναμων στύλων, στις διαφορετικές θέσεις τους στη διατομή του πυρήνα και στις διαφορετικές ιδιότητες τόσο των ισοδύναμων στύλων όσο και των βοηθητικών δοκών (άκαμπτων βραχιόνων) που τους διασυνδέουν στις στάθμες των ορόφων. Η αξιοπιστία και η αποτελεσματικότητα πολλών βασικών ισοδύναμων προσομοιωμάτων πυρήνων, κυρίως μορφής Π, έχουν διερευνηθεί εκτενώς στο παρελθόν [8-11].

### 1.2. Αντικείμενο της εργασίας

Στους σύνθετους πυρήνες με δύο ή και περισσότερες κυψέλες, το πρόβλημα της επιλογής μεταξύ περισσοτέρων παραλλαγών για τον καθορισμό ενός αξιόπιστου ισοδύναμου

πλαισιακού μοντέλου γίνεται ακόμη πιο έντονο και περίπλοκο. Λόγω της ασαφούς διάκρισης μεταξύ κορμού και πελμάτων και της δυνατότητας πολλών εναλλακτικών διατάξεων των ισοδύναμων στύλων προκύπτει μεγάλο πλήθος δυνατών παραλλαγών άγνωστης κατ' αρχάς αξιοπιστίας. Επιπλέον, αυξάνει η πιθανότητα αδόκιμης επιλογής των γεωμετρικών και ελαστικών χαρακτηριστικών των ισοδύναμων στύλων και βραχύνων του πλαισιακού μοντέλου, που μπορεί να οδηγήσει σε πλήρη αλλοίωση της πραγματικής χωρικής συμπεριφοράς του φορέα.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η συστηματική διερεύνηση της αξιοπιστίας και αποτελεσματικότητας απλοποιημένων προσομοιωμάτων για το δικυψελικό πυρήνα ανοικτής διατομής, ο οποίος πολύ συχνά χρησιμοποιείται στην πράξη ως περίβλημα κλιμακοστασίου και ανελκυστήρα. Διερευνώνται προσομοιώματα αποτελούμενα: α) από εναλλακτικές διατάξεις ισοδύναμων στύλων, β) από μακροεπιφανειακά στοιχεία και γ) από πεπερασμένα στοιχεία κελύφους με ένα πλήρες στοιχείο κελύφους ανά σκέλος και όροφο. Τα προσομοιώματα αυτά συγκρίνονται μεταξύ τους και με την οιονεί ακριβή λύση. Ως τέτοια λαμβάνεται εδώ η λύση που προκύπτει από την προσομοιώση των πυρήνων με έναν επαρκώς πυκνό κάναβο καταλλήλως διατεταγμένων επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων κελύφους. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν αναφέρονται τόσο σε ισοδύναμες στατικές όσο και σε δυναμικές φασματικές αναλύσεις, ενώ οι επί μέρους παραδόχες των αριθμητικών διερευνήσεων είναι συμβατές με τις διατάξεις του ισχύοντος Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού.

Θα πρέπει εδώ να τονισθεί ότι οι διερευνήσεις της αποτελεσματικότητας απλοποιημένων προσομοιωμάτων πυρήνων γίνονταν στο παρελθόν, κατά κανόνα, με βάση τη σύγκριση των μεγεθών έντασης ανά σκέλος του πυρήνα. Ο συνήθης αυτός τρόπος αποτίμησης της αξιοπιστίας των μοντέλων υπαγορευόταν από το γεγονός ότι η διαστασιολόγηση (υπολογισμός οπλισμών και έλεγχοι διατομής), που ακολουθούσε την ανάλυση, γινόταν με τη βοήθεια προγραμμάτων που ίσχυαν για ορθογωνικές διατομές. Σήμερα διατίθενται και χρησιμοποιούνται πλέον στην πράξη δοκιμασμένα προγράμματα διαστασιολόγησης διατομών τυχούσας γεωμετρίας. Έτσι, πάνει να υφίσταται η αναγκαιότητα συγκρίσεων ανά σκέλος και ο έλεγχος αποτελεσματικότητας των μοντέλων μπορεί να γίνει συγκρίνοντας συνολικά εντατικά μεγέθη της σύνθετης διατομής του πυρήνα. Η μεταφορά των συγκρίσεων από το σκέλος στη σύνθετη διατομή μειώνει, όπως και παλαιότερα σημειώθηκε [12, 13], τις διαπιστούμενες αποκλίσεις των απλοποιημένων μοντέλων έναντι των ακριβών λύσεων, κάνοντάς τα έτσι περισσότερο αποδεκτά στη συνήθη καθημερινή πράξη.

## 2. ΦΟΡΕΙΣ, ΕΙΔΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

### 2.1. Βασικές παραδοχές προσομοίωσης επιλεγέντων φορέων

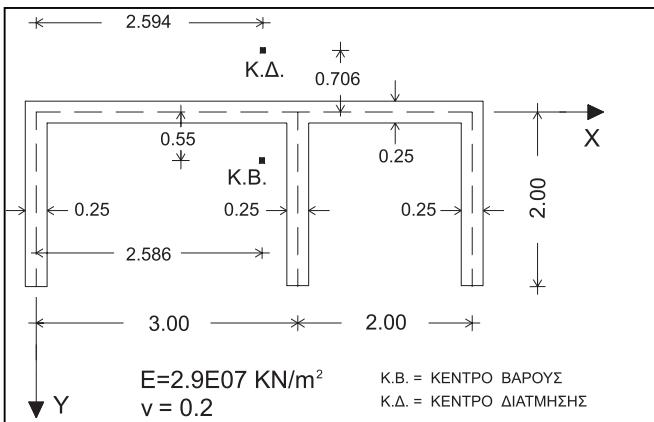
Επισημαίνεται ότι οι μέγιστες αποκλίσεις των διαφόρων απλοποιημένων προσομοιωμάτων πυρήνων διαπιστώνονται κατά τη διερεύνηση μεμονωμένων πυρήνων. Στην πράξη, όμως, οι πυρήνες περιβάλλονται κατά κανόνα από τον υπόλοιπο πλαισιακό σκελετό του κτιρίου, με τον οποίο συνδέονται μέσω δοκών και πλακών. Η σύζευξη αυτή συνεπάγεται γενικά μικρότερες τελικές αποκλίσεις των αποτελεσμάτων, που είναι και αυτές που ενδιαφέρουν εν κατακλείδι στην πράξη. Προς σύγκριση των τελικών αποτελεσμάτων των συζευγμένων από τους μεμονωμένους πυρήνες παρουσιάζονται αποτελέσματα που αφορούν κατ' αρχάς μεμονωμένους πυρήνες αλλά και πυρήνες ενσωματωμένους σε κτιριακό φορέα.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιλέχθηκαν για παρουσίαση ο δικυψελικός πυρήνας του σχήματος 1 και το 10-ώροφο κτίριο του σχήματος 2.

Ο μεμονωμένος πυρήνας είναι 10-ώροφος, πλήρως πακτωμένος στη βάση του με ύψος 1<sup>ο</sup> ορόφου 5m, ενώ οι υπόλοιποι όροφοι έχουν ύψος 3m. Κατά τη στατική ανάλυση, η επίλυση έγινε λαμβάνοντας δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις στα άκρα της κορυφής του πυρήνα με τιμή κάθε δύναμης ίσης με 300 KN. Για τη φασματική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το φάσμα σχεδιασμού του NEAK με τα εξής στοιχεία: έδαφος A, ζώνη II (A=0.16g), συντελεστής σπουδαιότητας  $\gamma=1$ , συντελεστής θεμελίωσης  $\theta=1$ , απόσβεση  $\zeta=5\%$  και συντελεστής σεισμικής συμπεριφοράς  $q=3$ . Η σεισμική διέγερση θεωρήθηκε ότι ενεργεί κατά τη διεύθυνση x, ενώ η μάζα του πυρήνα συγκεντρώθηκε στη στάθμη κάθε ορόφου και τοποθετήθηκε σε απόσταση 5m από το κέντρο βάρους των μοντέλων με τιμή  $m=100 \text{KN sec}^2/\text{m}$ . Η εσκεμμένως εδώ έκκεντρη τοποθέτηση της μάζας του πυρήνα εκλέγεται για μία ρεαλιστικού ύψους προσέγγιση της στροφικής, περί κατακόρυφο άξονα, καταπόνησης του φορέα.

Το 10-ώροφο κτίριο δεν διαθέτει την πολυπλοκότητα πραγματικών κτιρίων, η οποία ενδεχομένως θα καθιστούσε δυσχερή την εξαγωγή σαφών συμπερασμάτων, έχει όμως βασικά χαρακτηριστικά τυπικών πολυώροφων κατασκευών Ο/Σ. Η έκκεντρη τοποθέτηση του ανοικτού δικυψελικού πυρήνα στο άνω αριστερό άκρο της κάτοψης πρέπει βέβαια να αποφεύγεται σε πραγματικές κατασκευές.

Εδώ, όμως, επιλέγεται εσκεμμένως για τους σκοπούς της εργασίας, προκειμένου να εντοπισθούν οι μέγιστες δυνατές αποκλίσεις των προσομοιωμάτων του πυρήνα. Διότι, όπως έχει τεκμηριωθεί σε προγενέστερες εργασίες [9, 13], οι αποκλίσεις γίνονται μεγαλύτερες, όταν οι πυρήνες, λόγω της



Σχήμα 1: Κάτοψη των διερευνηθέντος δίκυνψελικού πυρήνα.  
Figure 1: Plane view of the investigated double honeycomb core.

ασυμμετρίας του κτιρίου σε κάτοψη, υφίστανται έντονες στρεπτικές καταπονήσεις.

Για την προσομοίωση του κτιρίου: (α) οι πλάκες θεωρήθηκαν ως απαραμόρφωτες εντός του επιπέδου τους, (β) η συνεισφορά των πλακών στις δυσκαμψίες των δοκών ελήφθη υπόψη με συνεργαζόμενα πλάτη 1.25m για τις εσωτερικές δοκούς και 0.75m για τις περιμετρικές δοκούς, (γ) εκτός των καμπτικών ελήφθησαν υπόψη και οι αξονικές, διατμητικές και στρεπτικές παραμορφώσεις των γραμμικών στοιχείων, (δ) μικρές εκκεντρότητες έδρασης των δοκών επί των στύλων θεωρήθηκαν αμελητέες και (ε) τα σεισμικά φορτία εφαρμόσθηκαν στο κέντρο μάζας της κάτοψης, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οπές και τυχηματικές ή άλλες εκκεντρότητες.

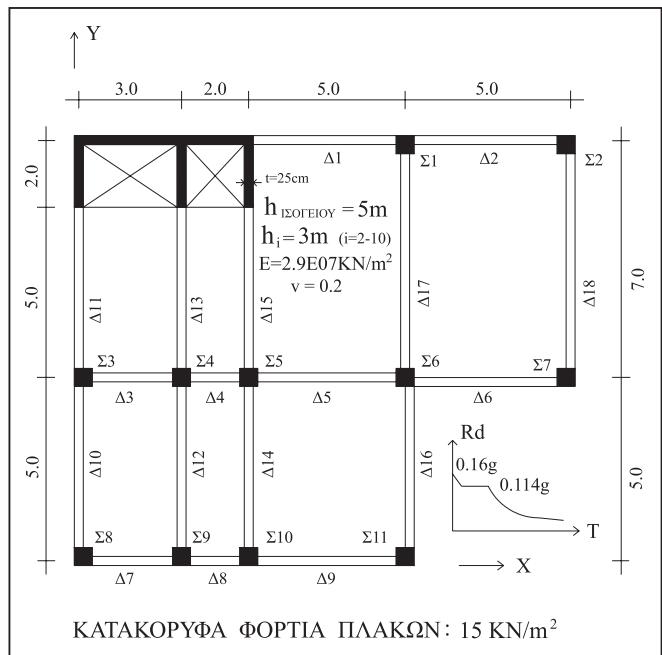
Τα σεισμικά φορτία υπολογισμού υπολογίσθηκαν με βάση τις ασύνευκτες ιδιοπεριόδους του φορέα και σύμφωνα με το φάσμα σχεδιασμού του N.E.A.K., ενώ η καθ' ύψος κατανομή τους έγινε βάσει της σχέσης (3.7) του ίδιου κανονισμού. Όπως φαίνεται από τον πίνακα 1, τα ισοδύναμα στατικά φορτία δεν είναι ακριβώς τα ίδια για όλα τα μοντέλα, αλλά διαφοροποιούνται ελαφρώς λόγω της διαφορετικής θεμελιώδους ιδιοπεριόδου κάθε προσομοίωματος.

Κατά την ελαστική ανάλυση, η παραδοχή της θεώρησης χωρίς μείωση των δυσκαμψιών του σταδίου I αντιβαίνει τις διατάξεις του N.E.A.K. (παρ. 3.2.3.), κρίθηκε όμως σκόπιμη, διότι εξυπηρετεί εν προκειμένω όχι στη διαστασιολόγηση των φορέων αλλά στη μελέτη της απόκρισης υπό οριζόντια στατική και δυναμική σεισμική φόρτιση.

Οι επιλύσεις διενεργήθηκαν με τη βοήθεια των προγραμμάτων SAP90 [14] και ETABS [15].

## 2.2. Προσομοίωση πυρήνα με επιφανειακά στοιχεία κελύφους (προσομοίωμα Νο 1)

Όπως ήδη αναφέρθηκε, ως βάση σύγκρισης και λύση αναφοράς θεωρήθηκε η προσομοίωση με έναν επαρκώς



Σχήμα 2: 10-ώροφο κτίριο:

Στύλοι: όροφοι  $I^{0\circ}-4^{\circ}$  60/60,  $5^{\circ}-7^{\circ}$  50/50,  $8^{\circ}-10^{\circ}$  40/40.

Δοκοί: όροφοι  $I^{\circ}$  25/80,  $2^{\circ}-4^{\circ}$  25/70,  $5^{\circ}-10^{\circ}$  25/60.

Figure 2: 10-storey building:

Columns: storeys  $I^{1\text{-}4}$  60/60,  $5^{\text{-}}7$  50/50,  $8^{\text{-}}10$  40/40.

Beams: storeys  $I^{\text{st}}$  25/80,  $2^{\text{nd}}\text{-}4^{\text{th}}$  25/70,  $5^{\text{th}}\text{-}10^{\text{th}}$  25/60.

πυκνό κάναβο τετράκομβων επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων κελύφους [18, 20]. Από προκαταρκτικές επιλύσεις κρίθηκε επαρκής ένας κάναβος με στοιχεία διαστάσεων 1.0m x 1.0m για την πλάτη και τα σκέλη του πυρήνα.

Επιπλέον, για την υλοποίηση της διαφραγματικής λειτουργίας σε κάθε στάθμη ορόφου κατά μήκος των σκελών του πυρήνα χρησιμοποιήθηκαν βοηθητικές δοκίδες με “άπειρη” δυσκαμψία, δυστμησία και δυστένεια εντός του επιπέδου x-y, ενώ οι ίδιες ιδιότητες στα επίπεδα x-z και y-z δόθηκαν μηδενικές. Επισημαίνεται ότι για τα αποτελέσματα των εντατικών μεγεθών των μοντέλων με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιούνται οι ισορροπιακώς ισοδύναμες κομβικές δυνάμεις των στοιχείων, οι οποίες υπολογίζονται από το χρησιμοποιηθέν πρόγραμμα SAP90, ώστε να καταστεί δυνατή η σύγκρισή τους με τα απολέσματα των γραμμικών μοντέλων (ροπές, τέμνουσες, αξονικές δυνάμεις). Οι συνισταμένες των κομβικών αυτών δυνάμεων στα εκάστοτε σημεία που ενδιαφέρουν (ανάλογα με τις θέσεις των ισοδύναμων στύλων του πλαισιακού μοντέλου όπου θα γίνει η σύγκριση) υπολογίζονται βάσει των γνωστών κανόνων σύνθεσης δυνάμεων [12, 13].

## 2.3. Προσομοίωση πυρήνα με ισοδύναμα πλαίσια (προσομοίωμα Νο 2 έως Νο 4)

Οι βασικοί κανόνες μόρφωσης ισοδύναμων πλαισιακών προσομοιωμάτων για τοιχώματα και πυρήνες περιγράφονται

**Πίνακας 1:** Θεμελιώδεις ασύζενκτες ιδιοπερίοδοι ταλάντωσης των προσομοιωμάτων No 1-No 6 και τα αντίστοιχα σεισμικά φορτία τους για σεισμική διέγερση κατά x (a) και κατά y (b).

Table 1: Fundamental uncoupled natural periods for models No1-No 6 and correspondant seismic loadings in x direction (a) and in y direction (b).

		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6
<b>O</b>	T <sub>x</sub>	0,7076	0,7244	0,7092	0,7087	0,7061	0,7056
	V <sub>0</sub>	2226,85	2192,22	2223,46	2224,39	2229,87	2231,07
	10	445,07	430,35	446,10	446,30	446,98	447,05
	9	395,20	383,81	395,60	395,78	396,66	396,82
	8	343,37	335,05	343,40	343,58	344,37	344,62
	ρ	7	290,23	284,68	290,10	290,25	291,08
	o	6	238,55	235,48	238,10	238,18	238,91
	φ	5	187,63	186,73	187,00	187,08	187,72
	ο	4	139,34	140,25	138,70	138,74	139,25
	ι	3	97,26	99,54	96,20	96,29	96,70
	2	60,03	63,16	59,00	58,99	59,20	59,26
	1	30,19	33,17	29,20	29,19	28,98	29,21

(a)

		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6
<b>O</b>	T <sub>y</sub>	0,8400	0,8522	0,6846	0,8394	0,8300	0,8285
	V <sub>0</sub>	1986,15	1967,17	2276,43	1987,15	2002,07	2004,52
	10	368,48	357,31	442,20	367,39	374,87	375,40
	9	336,31	327,78	396,70	335,79	341,84	342,30
	8	300,33	294,09	348,60	300,25	304,91	305,30
	ρ	7	260,44	256,22	298,20	260,69	264,07
	o	6	219,12	217,01	247,50	219,49	221,38
	φ	5	176,26	176,03	196,60	176,75	177,28
	ο	4	134,32	135,84	147,50	135,04	134,37
	ι	3	96,91	100,02	103,50	97,46	95,59
	2	62,06	66,24	64,00	62,40	59,53	59,60
	1	31,87	36,62	31,60	31,90	28,24	28,30

(b)

αναλυτικά σε διάφορες προγενέστερες εργασίες [βλ. π.χ. 9, 16]. Στο σχήμα 3 απεικονίζονται σε κάτοψη τα τρία ισοδύναμα πλαισιακά μοντέλα No 2 έως No 4, των οποίων η αποτελεσματικότητα διερευνήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Το μοντέλο No 2 μπορεί να χαρακτηρισθεί ως το “κλασικό” μοντέλο, ενώ τα άλλα δύο επιλέχθηκαν λόγω του γεγονότος ότι είναι ενσωματωμένα σε διάφορα επαγγελματικά προγράμματα και ως εκ τούτου η αξιοπιστία τους ενδιαφέρει άμεσα τους μελετητές στην πράξη.

Υπενθυμίζεται εδώ ο σημαντικός ρόλος των άκαμπτων βραχιόνων, που διασυνδέουν τους ισοδύναμους στύλους στις στάθμες των ορόφων, όσον αφορά στην ορθή απόδοση της στρεπτικής συμπεριφοράς του πυρήνα. Προς τούτο, οι βρα-

χίονες αυτοί δεν θα πρέπει να παρακωλύουν τη στρέβλωση της διατομής του πυρήνα [17]. Αυτό είναι δυνατόν να ρυθμισθεί μόνο στην περίπτωση του κλασικού μοντέλου No 2, ενώ στα μοντέλα του ενός ισοδύναμου στύλου (No 3 και No 4) η διατομή παραμένει επίπεδη.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των εντατικών μεγεθών M, Q, N γίνεται για τους λόγους που αναφέρθηκαν στο τέλος της παραγράφου 1.2, για τα συνολικά μεγέθη της σύνθετης διατομής. Τα M, Q, N των ισοδύναμων στύλων μεταφέρονται, όπου αυτό χρειάζεται (μοντέλα No 2 και No 3), στο K.B. της διατομής του πυρήνα σύμφωνα με τους γνωστούς κανόνες ανάλυσης, σύνθεσης και μεταφοράς δυνάμεων.

## 2.4. Προσομοίωση πυρήνα με μακροεπιφανειακά στοιχεία (προσομοίωμα No 5)

Η περιγραφή των μακροεπιφανειακών στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν δίνεται αναλυτικά στις εργασίες [13] και [15]. Επιπλέον, δίνεται έμφαση και στο γεγονός της αναγκαιότητας υπολογιστικής θεώρησης της δυντρεψίας της διατομής των μεμονωμένων πυρήνων, η οποία μπορεί να προσδοθεί στις ιδιότητες των ακραίων (βιοηθητικών-πλασματικών) στύλων του προσομοιώματος που διαθέτουν μηδενικές, κατά τα άλλα, ιδιότητες.

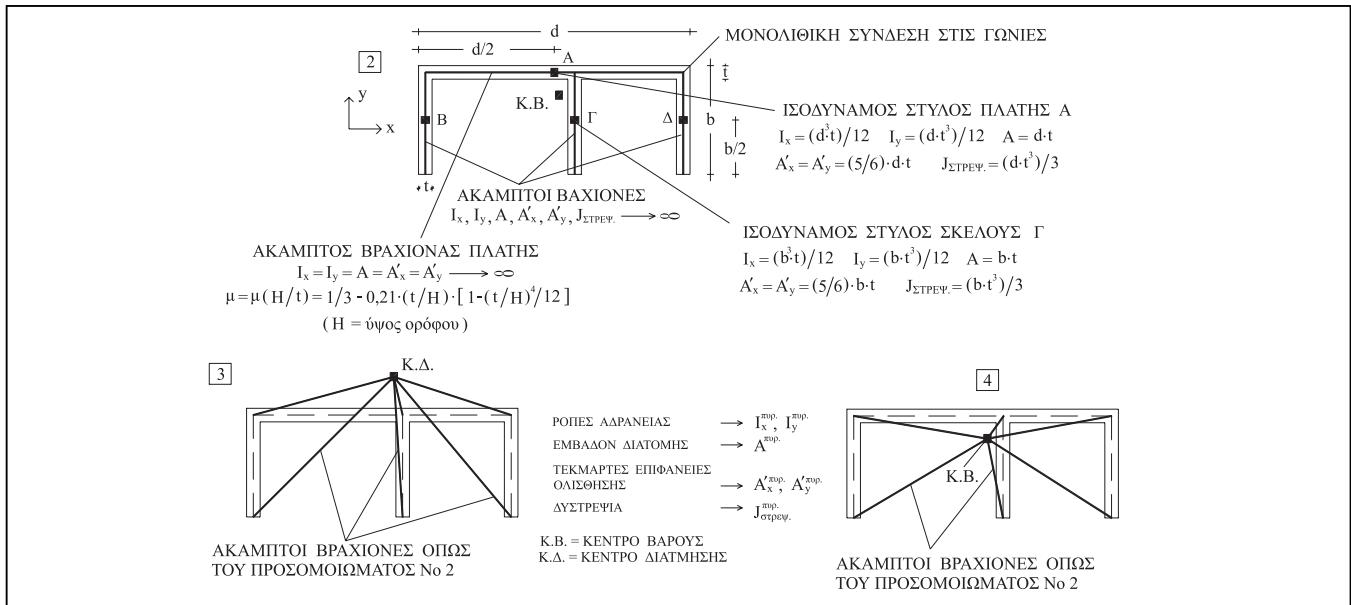
## 2.5. Προσομοίωση πυρήνα με ένα στοιχείο κελύφους ανά σκέλος και όροφο (προσομοίωμα No 6)

Μία εναλλακτική λύση, ανάλογη των μακροεπιφανειακών στοιχείων, αποτελεί η αντικατάσταση του μακροεπιφανειακού στοιχείου από ένα κανονικό (πλήρες) πεπερασμένο στοιχείο κελύφους [14, 18, 20]. Λόγω του συνδυασμού μεμβράνης και πλάκας που διαθέτει, λαμβάνει υπόψη και τους τρεις στροφικούς βαθμούς ελευθερίας κίνησης στους κόμβους αποδίδοντας έτσι αποτελεσματικότερα όχι μόνον τις καμπτικές παραμορφώσεις αλλά και τις δύο συστροφικές συνιστώσες δυσκαμψίας. Για την επίτευξη της διαφραγματικής λειτουργίας σε κάθε στάθμη ορόφου χρησιμοποιούνται βιοηθητικές δοκίδες ανά σκέλος και ανά στοιχείο κελύφους με τις ίδιες ιδιότητες, όπως και στο προσομοίωμα No 1.

## 3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 3.1. Εισαγωγή

Ακολούθως, γίνεται πρώτα μία επιλεκτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την ισοδύναμη στατική ανάλυση του επιλεγέντος μεμονωμένου πυρήνα και του κτιρίου. Τα αποτελέσματα αφορούν σε στατικά μεγέθη παραμόρφωσης και έντασης καθώς και ιδιοπειρόδουν ταλάντωσης.



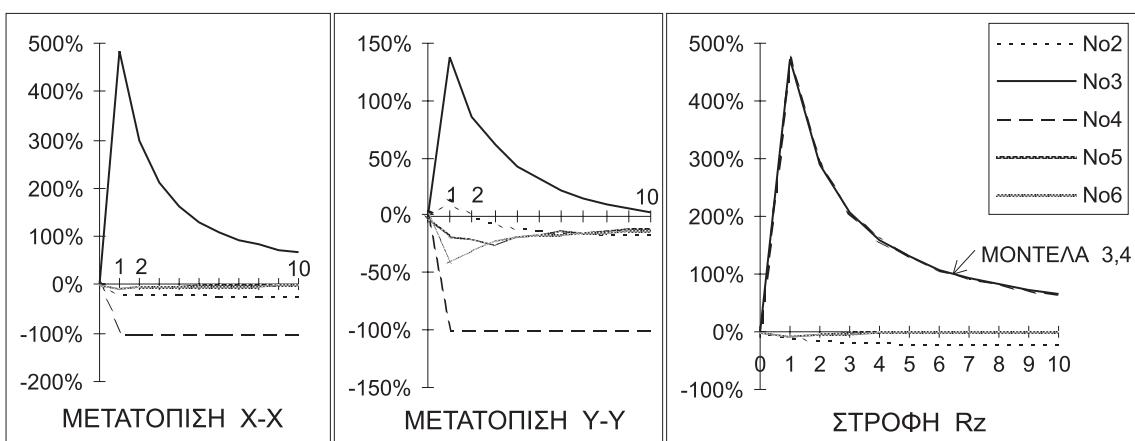
Σχήμα 3: Τα 3 διερευνηθέντα ισοδύναμα πλαισιακά προσομοιώματα (προσομοιώματα No 2 έως No 4).  
 Figure 3: The 3 investigated equivalent frame models (models No 2 - No 4).

Η σύγκριση και η αξιολόγηση των προσομοιωμάτων περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα της εν λόγω ανάλυσης για έντονη στρεπτική καταπόνηση του μεμονωμένου πυρήνα καθώς και τα αποτελέσματα για σεισμό κατά x και κατά y για όλα τα προσομοιώματα (No 1 έως No 6) του κτιρίου.

Στη συνέχεια, για τον περαιτέρω έλεγχο της αξιοπιστίας τους χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα δυναμικών φασματικών αναλύσεων. Οι αναλύσεις αυτές διενεργήθηκαν για έκκεντρη σεισμική διέγερση κατά x του μεμονωμένου πυρήνα και για ταυτόχρονη σεισμική διέγερση κατά x και y του κτιρίου με το ίδιο φάσμα σχεδιασμού σύμφωνα με το N.E.A.K. Επιπλέον, η σύγκριση περιλαμβάνει και δύο αμιγώς γραμμικά στοιχεία του κτιριακού φορέα: το ακραίο και

διαμετρικά αντίθετο του πυρήνα υποστύλωμα Σ11 και τη συζευγμένη με τον πυρήνα δοκό Δ1.

Οι συγκρίσεις των διαφόρων μοντέλων έγιναν με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των διερευνηθέντων φορέων με μοντέλα επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων κελύφουν μεγάλης ακρίβειας (προσομοίωμα No 1). Παρ' όλο που στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας παρατίθενται αποτελέσματα και συγκρίσεις που αναφέρονται μόνο στο 10-ώροφο κτίριο του σχήματος 2, εν τούτοις, τα συμπεράσματα που διατυπώνονται μπορούν να θεωρηθούν ως γενικότερης ισχύος, διότι αφ' ενός βασίζονται σε ένα μεγάλο αριθμό διερευνήσεων και άλλων φορέων και αφ' επέριου επιβεβαιώνουν παλαιότερα επί μέρους συμπεράσματα



Σχήμα 4: Ποσοστιαίες αποκλίσεις των μετακινήσεων του Κ.Μ. στους ορόφους των ανοικτών πυρήνων για τα προσομοιώματα No 2 έως No 6 έναντι του προσομοιώματος No 1 - Ισοδύναμη στατική μέθοδος.

Figure 4: Percentage divergencies of models No 2 - No 6 from model No 1 of displacements and rotations at the storeys' mass centers of open core - Equivalent static analysis.

που διατυπώθηκαν σε προγενέστερες εργασίες των συγγραφέων [5, 6, 9, 10, 13, 17, 19].

### 3.2. Ισοδύναμη στατική ανάλυση

#### 3.2.1. Σύγκριση μεγεθών παραμόρφωσης

και ιδιοταλάντωσης μεμονωμένου πυρήνα

#### 3.2.1.1. Μετατοπίσεις κέντρων μάζας (βάρους) ορόφων (σχ. 4)

Τα προσομοιώματα Νο 3 και Νο 4 του ενός ισοδύναμου στύλου στο κέντρο διάτμησης και το κέντρο βάρους, αντίστοιχα, παρουσιάζουν πολύ μεγάλες αποκλίσεις (βλ. σχ. 4). Αυτές προφανώς προέρχονται σε μεγάλο βαθμό από την αδυναμία των μοντέλων αυτών να αποδώσουν σωστά τη στρέβλωση αντίσταση (στρέψη Vlassov) της σύνθετης διατομής του πυρήνα [9, 13].

Αρκετά καλά συμπεριφέρεται το μοντέλο Νο 2 του ενός ισοδύναμου στύλου στα κέντρα βάρους των επί μέρους σκελών του πυρήνα, ενώ τα αποτελέσματα των προσομοιωμάτων Νο 5 (μακροεπιφανειακό) και Νο 6 (με ένα πλήρες στοιχείο κελύφους ανά σκέλος και όροφο) πρακτικά συμπίπτουν με τις αντίστοιχες τιμές των μεγεθών του προσομοιώματος Νο 1.

#### 3.2.1.2. Στρέβλωση της διατομής του πυρήνα (σχ. 5)

Επισημαίνεται ότι στα προσομοιώματα Νο 3 και Νο 4 η στρέβλωση στην κορυφή της σύνθετης διατομής του πυρήνα δεν αποδίδεται σωστά. Διότι, λόγω στρέψης της διατομής, χωρίς κάμψη των ισοδύναμων στύλων δεν υφίσταται στροφή περί οριζόντιο άξονα των ακάμπτων βραχιόνων των ως άνω μοντέλων. Όπως προκύπτει από τη στρέβλωση της διατομής του πυρήνα (σχ. 5), τα προσομοιώματα Νο 5 και Νο 6 δίνουν πολύ καλές τιμές, ενώ ποσοτικά το μοντέλο Νο 2 εμφανίζει πολύ μεγάλες αποκλίσεις.

#### 3.2.1.3. Ιδιοπερίοδοι ταλάντωσης (πίν. 2)

Οι προηγούμενες παρατηρήσεις ενισχύονται τέλος και από τα αποτελέσματα για τις ιδιοπεριόδους ταλάντωσης του πυρήνα. Τα προσομοιώματα Νο 3 και Νο 4 εμφανίζουν μεγάλες θετικές αποκλίσεις για την πρώτη (θεμελιώδη) ιδιοπερίοδο.

#### 3.2.2. Σύγκριση εντατικών μεγεθών μεμονωμένου πυρήνα (σχ. 6, 7)

Η διάθεση και η χρησιμοποίηση στην πράξη δοκιμασμένων προγραμμάτων διαστασιολόγησης διατομών σύνθετης γεωμετρίας επιτρέπουν τον περιορισμό του ελέγχου αποτελεσματικότητας των μοντέλων στα συνολικά εντατικά μεγέθη της σύνθετης διατομής του πυρήνα, ενώ παλαιότερα οι συγκρίσεις αφορούσαν σε μεγέθη των επί μέρους σκελών. Οπως ήδη διαπιστώθηκε [13], οι αποκλίσεις των συνολικών μεγεθών της σύνθετης διατομής είναι σαφώς μικρότερες από τις αποκλίσεις των επιμερισμένων στα σκέλη των πυρήνων μεγεθών.

**Πίνακας 2: Ιδιοπερίοδοι ταλάντωσης μεμονωμένου πυρήνα για τα προσομοιώματα Νο 1 έως Νο 6.**

Table 2: Natural periods of vibration of isolated core for models No 1 to No 6.

	No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6
T <sub>1</sub>	3,823	3,315	5,534	6,433	3,652	3,646
T <sub>2</sub>	2,042	1,986	1,847	2,147	1,956	1,953
T <sub>3</sub>	0,925	0,864	1,111	1,979	0,868	0,866
T <sub>4</sub>	0,525	0,513	0,932	1,291	0,498	0,499
T <sub>5</sub>	0,379	0,379	0,803	0,934	0,347	0,348
T <sub>6</sub>	0,340	0,332	0,638	0,742	0,313	0,313
T <sub>7</sub>	0,205	0,218	0,538	0,626	0,185	0,188
T <sub>8</sub>	0,144	0,147	0,506	0,552	0,117	0,121
T <sub>9</sub>	0,124	0,127	0,474	0,504	0,113	0,114
T <sub>10</sub>	0,102	0,110	0,433	0,473	0,094	0,095

Εν τούτοις, στην παρούσα εργασία όπου, λόγω της ισοστατικότητας του πυρήνα θεωρούμενου ως προβόλου, τα συνολικά εντατικά μεγέθη της σύνθετης διατομής προκύπτουν χωρίς αποκλίσεις από την ακριβή τιμή τους, η σύγκριση των εντατικών μεγεθών για τα διάφορα μοντέλα γίνεται ανά σκέλος του πυρήνα. Η σύγκριση εν προκειμένω αφορά σε εντατικά μεγέθη του αριστερού σκέλους και της πλάτης του πυρήνα, ενώ τα μεγάλης απλότητας μοντέλα Νο 3 και Νο 4 κρίνονται ως μη ικανοποιητικής αξιοπιστίας και δεν διερευνώνται περαιτέρω. Προσεκτική σύγκριση της μορφής και των τιμών των διαγραμμάτων M, Q, N των μοντέλων Νο 2, Νο 5 και Νο 6 με την “ακριβή” λύση (σχ. 6, 7) οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το πλαισιακό προσομοίωμα Νο 2 παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις (σύγκρ. π.χ. τα M, Q, N στους τελευταίους ορόφους του αριστερού σκέλους και καθ’ όλο το ύψος της πλάτης του πυρήνα).

#### 3.2.3. Σύγκριση μεγεθών παραμόρφωσης και ιδιοταλάντωσης κτιριακού φορέα

#### 3.2.3.1. Μετατοπίσεις κέντρων μάζας (βάρους) ορόφων (σχ. 8)

Το προσομοίωμα Νο 3 (ενός ισοδύναμου στύλου στο Κ.Δ.) προκύπτει ευκαμπτότερο, ενώ το Νο 4 (ενός ισοδύναμου στύλου στο Κ.Β.) δυσκαμπτότερο του προσομοίωματος Νο 1, όταν το σεισμικό φορτίο δρα κατά x (σχ. 8a). Για σεισμική διέγερση κατά y (βλ. σχ. 8b) η σχετική αυτή συμπεριφορά των προσομοιωμάτων Νο 3 και Νο 4 αντιστρέφεται, όσον αφορά στις μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση του σεισμού, ενώ διατρέπεται για τις κάθετες στη σεισμική διέγερση μετακινήσεις. Διατρέπεται, επίσης, και για τις στροφές περί τον κατακόρυφο άξονα, παρ’ ότι και τα δύο προσομοίωμα προκύπτουν πιο δύστρεπτα από το προσομοίωμα αναφοράς.

Αντίθετα, το “κλασικό” προσομοίωμα Νο 2, ενώ προκύπτει κατά τι δυσκαμπτότερο και κατά τις δύο σεισμικές διεύθυνσεις x και y, εν τούτοις είναι ακριβέστερο των προηγουμένων εμφανίζοντας γενικώς την καλύτερη συμπεριφορά

από τα άλλα δύο ισοδύναμα πλαισιακά μοντέλα. Πάντως, τα προσομοιώματα των μακροεπιφανειακών στοιχείων και του ενός στοιχείου κελύφους ανά σκέλος και όροφο (No 5 και No 6 αντίστοιχα) εμφανίζουν και αυτά γενικώς καλή συμπεριφορά, με τιμές μετακινήσεων που πρακτικά συμπίπτουν με τις αντίστοιχες τιμές των μεγεθών του προσομοιώματος No 1.

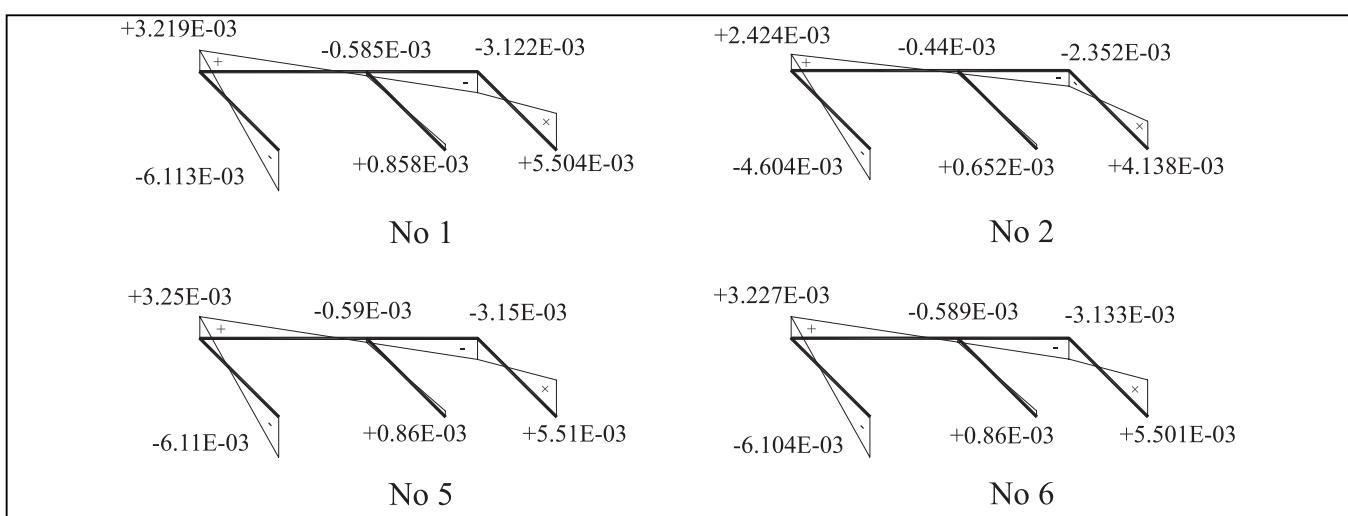
### 3.2.3.2. Στρέβλωση της διατομής του πυρήνα (σχ. 9)

Η προηγούμενη πρώτη εικόνα αξιολόγησης των διαφόρων προσομοιωμάτων ενισχύεται από τα αποτελέσματα που αφορούν στη στρέβλωση της διατομής του πυρήνα: Το προσομοίωμα No 3 δίνει μεγάλες, μη αποδεκτές αποκλίσεις. Το μοντέλο No 2 προσομοιώνει τη στρέβλωση της διατομής

ποσοτικώς καλύτερα από το μοντέλο No 4, ενώ τα μοντέλα No 5 και No 6 δίνουν, επίσης, πολύ καλές τιμές.

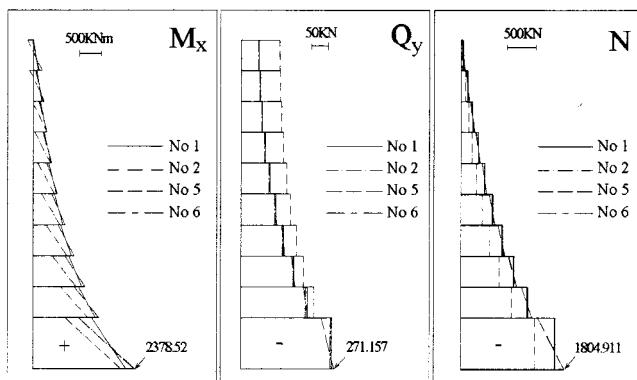
### 3.2.3.3. Ιδιοπερίοδοι ταλάντωσης (πίν. 3)

Τα αποτελέσματα για τις (συζευγμένες) ιδιοπεριόδους ταλάντωσης του κτιρίου επιβεβαιώνουν και αυτά τις προηγούμενες παρατηρήσεις για τη συμπεριφορά των μοντέλων: Τα προσομοιώματα No 2, No 5 και No 6 δίνουν αποτελέσματα παρόμοιας αξιοπιστίας, με καλύτερο το No 2 που δίνει σχεδόν μηδενική απόκλιση για την πρώτη (θεμελιώδη) ιδιοπερίοδο. Αντίθετα, τα μοντέλα No 3 (σύγκρ. π.χ. την  $T_2$ ) και No 4 (σύγκρ. π.χ. την  $T_1$ ) εμφανίζουν αισθητές αποκλίσεις.



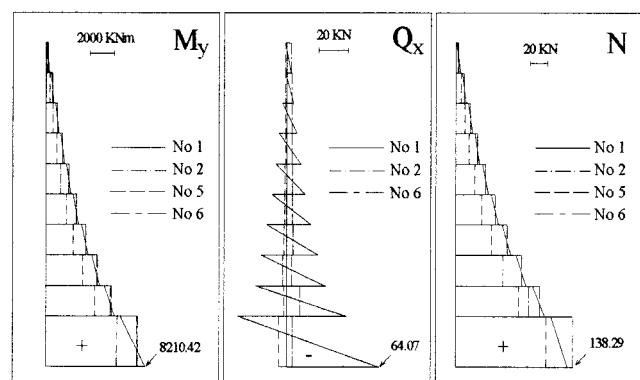
Σχήμα 5: Στρέβλωση διατομής της κορυφής του ανοικτού πυρήνα για τα προσομοιώματα No 1, No 2, No 5 και No 6 - Ισοδύναμη στατική μέθοδος. (Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις δίδονται σε [m]).

Figure 5: Warping at the open core's top for models No 1, No 2, No 5, and No 6 - Equivalent static analysis. (The vertical displacements are given in [m]).



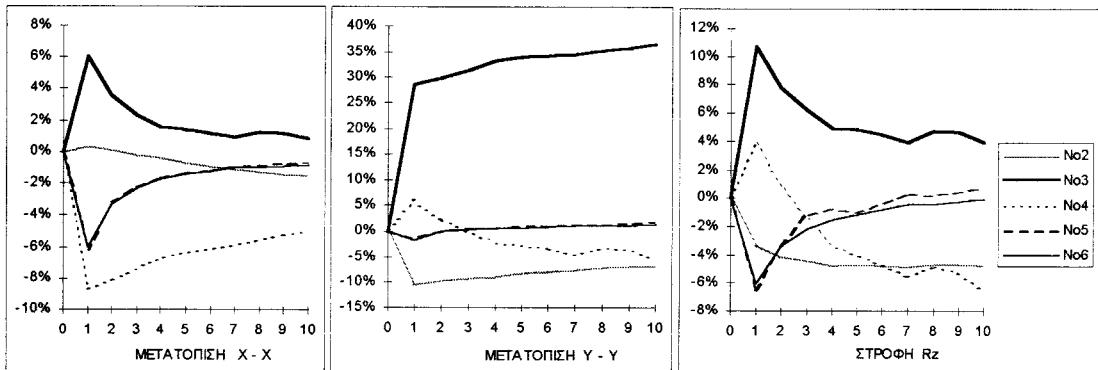
Σχήμα 6: Διαγράμματα  $M$ ,  $Q$ ,  $N$  των αριστερού σκέλους του ανοικτού πυρήνα για τα προσομοιώματα No 1, No 2, No 5 και No 6 - Ισοδύναμη στατική μέθοδος.

Figure 6:  $M$ ,  $Q$ ,  $N$  diagrams for the left flange of open core for models No 1, No 2, No 5 and No 6 - Equivalent static method.



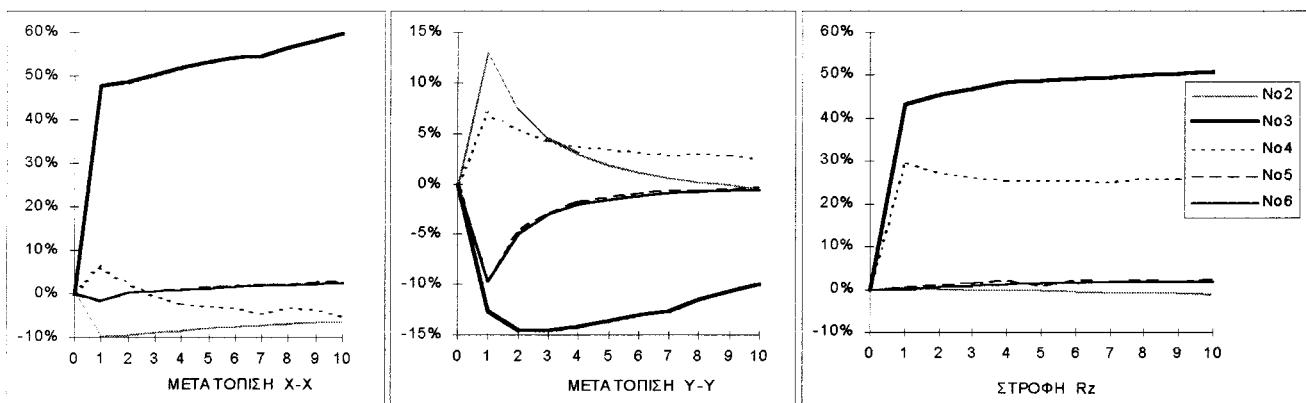
Σχήμα 7: Διαγράμματα  $M$ ,  $Q$ ,  $N$  της πλάτης του ανοικτού πυρήνα για τα προσομοιώματα No 1, No 2, No 5 και No 6 - Ισοδύναμη στατική μέθοδος.

Figure 7:  $M$ ,  $Q$ ,  $N$  diagrams for the web of open core for models No 1, No 2, No 5 and No 6 - Equivalent static method.



Σχήμα 8α: Ποσοστιαίς αποκλίσεις των μετατοπίσεων του Κ.Μ. στους ορόφους των προσομοιωμάτων No 2 έως No 6 έναντι του προσομοιώματος No 1. Σεισμική διέγερση κατά x - Ισοδύναμη στατική ανάλυση.

Figure 8a: Percentage divergencies of models No 2 - No 6 from model No 1 of displacements and rotations at the storeys' mass centers. Seismic loading in x direction - Equivalent static analysis.



Σχήμα 8β: Ποσοστιαίς αποκλίσεις των μετατοπίσεων του Κ.Μ. στους ορόφους των προσομοιωμάτων No 2 έως No 6 έναντι του προσομοιώματος No 1. Σεισμική διέγερση κατά y - Ισοδύναμη στατική μέθοδος.

Figure 8b: Percentage divergencies of models No 2 - No 6 from model No 1 of displacements and rotations at the storeys' mass centers. Seismic loading in y direction - Equivalent static analysis.

### 3.2.4. Σύγκριση εντατικών μεγεθών του κτιριακού φορέα

#### 3.2.4.1. Γενικές παρατηρήσεις

Επισημαίνεται, όπως ήδη αναφέρθηκε στο τέλος των παραγράφων 1.2 και 2.3, ότι τα εντατικά μεγέθη  $M$ ,  $Q$ ,  $N$  δίνονται ως συνολικά (συνιστάμενα) μεγέθη στο κέντρο βάρους της σύνθετης διατομής του πυρήνα, ο οποίος είναι εκείνος ο δομικός υποφορέας που δημιουργεί τα προβλήματα προσομοιώσης.

Εκτός των λόγων που αναφέρονται εκεί, ο υπολογισμός των οπλισμών της σύνθετης διατομής με βάση τα συνολικά εντατικά μεγέθη είναι οπωσδήποτε ορθότερος του συμβατικού (που γίνεται συνήθως ανά σκέλος του πυρήνα), διότι λαμβάνει υπόψη και τη συμμετοχή του συνεργαζόμενου εύρους του εκάστοτε εγκάρσιου σκέλους.

Για τα προσομοιώματα No 4 και No 5 τα συνολικά μεγέθη  $M$ ,  $Q$ ,  $N$  στο κέντρο βάρους της σύνθετης διατομής του πυρήνα υπολογίζονται απευθείας από τα χρησιμοποιούμενα εδώ προγράμματα επίλυσης, ενώ για τα υπόλοιπα προσομοιώ-

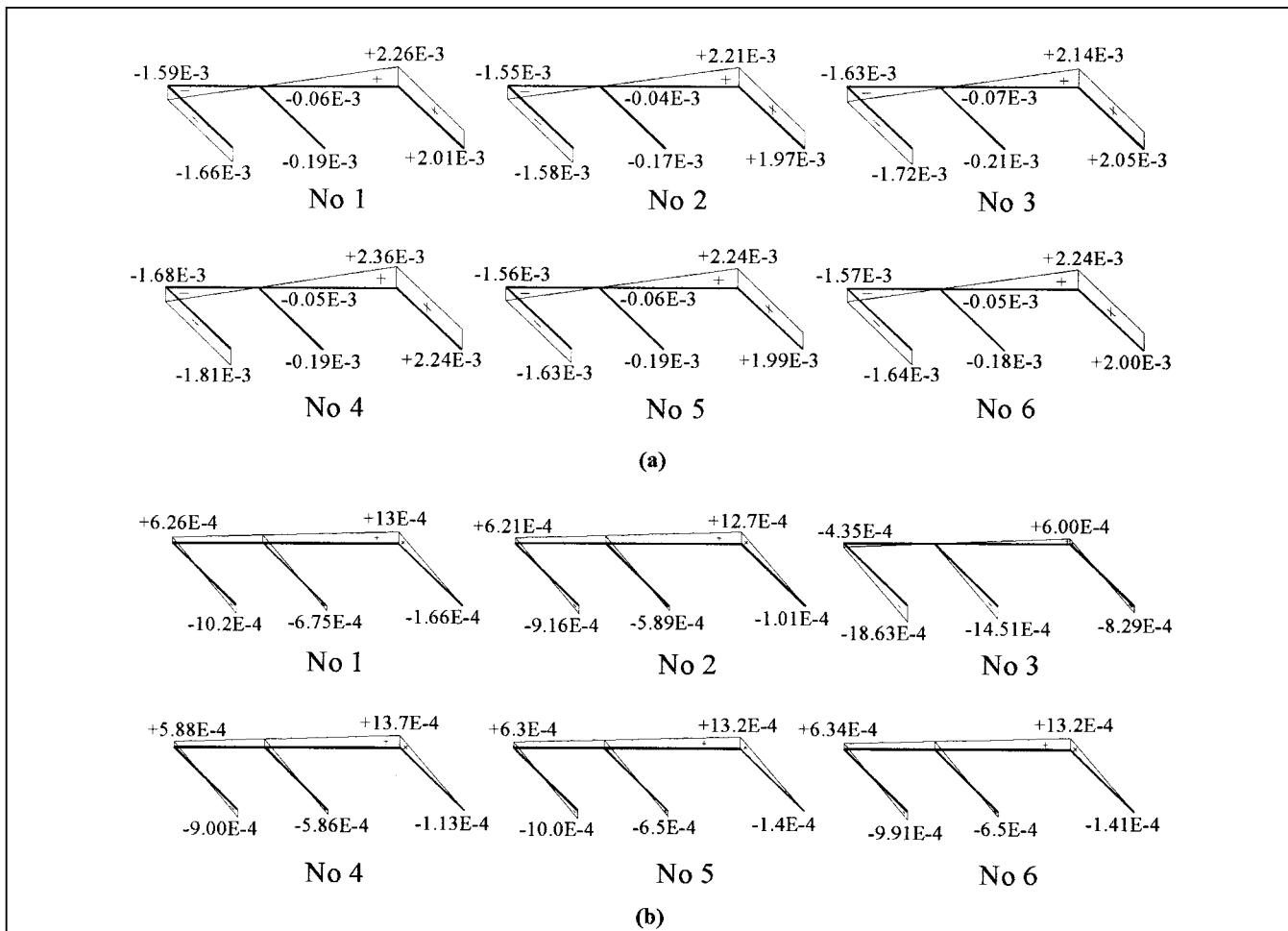
ματα η μεταφορά των  $M$ ,  $Q$ ,  $N$  στο κέντρο βάρους της σύνθετης διατομής γίνεται κατά τους γνωστούς κανόνες ανάλυσης, σύνθεσης και μεταφοράς δυνάμεων [12, 13].

#### 3.2.4.2. Διαγράμματα μεγεθών διατομής $M$ , $Q$ , $N$ του στύλου Σ11 (σχ. 10)

Στο σχήμα 10 δίνονται για σεισμό κατά x τα εντατικά μεγέθη  $M_y$ ,  $Q_x$ ,  $N$  του στύλου Σ11. Τα μοντέλα No 4, No 5 και No 6 εμφανίζουν αποκλίσεις προς την ανασφαλή πλευρά (σύγκρ. π.χ. ροπές  $M$  και τέμνουσες  $Q$  στη βάση του στύλου), ενώ το μοντέλο No 3 προκύπτει γενικώς συντηρητικότερο εμφανίζοντας, όμως, έντονες διακυμάνσεις. Αντίθετα, το μοντέλο No 2 ("κλασικό") δίνει γενικώς τα πλέον ικανοποιητικά αποτελέσματα.

#### 3.2.4.3. Ροπές $M$ και τέμνουσες $Q$ της δοκού Δ1 (σχ. 11)

Και εδώ ξεχωρίζουν το μοντέλο No 2 καθώς και τα προσομοιώματα No 5 και No 6 (σύγκρ. π.χ. ροπές  $M$  και τέμνουσες  $Q$  του 1ου ορόφου).



Σχήμα 9: Στρέβλωση διατομής της κορυφής του πυρήνα για τα προσομοίωμα No 1 έως No 6. Σεισμική διέγερση κατά x (a) και κατά y (b) - Ισοδύναμη στατική μέθοδος. (Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις δίνονται σε [m]).

Figure 9: Warping at the core's top for models No 1 - No 6. Seismic loading in x direction (a) and in y direction (b) - Equivalent static analysis. (The vertical displacements are given in [m]).

Πίνακας 3: Ιδιοπερίοδοι ταλάντωσης  $T_i$  ( $i=1-10$ ) των προσομοιώματων No 1 έως No 6.

Table 3: Natural periods of vibration  $T_i$  ( $i=1-10$ ) for models No 1 - No 6.

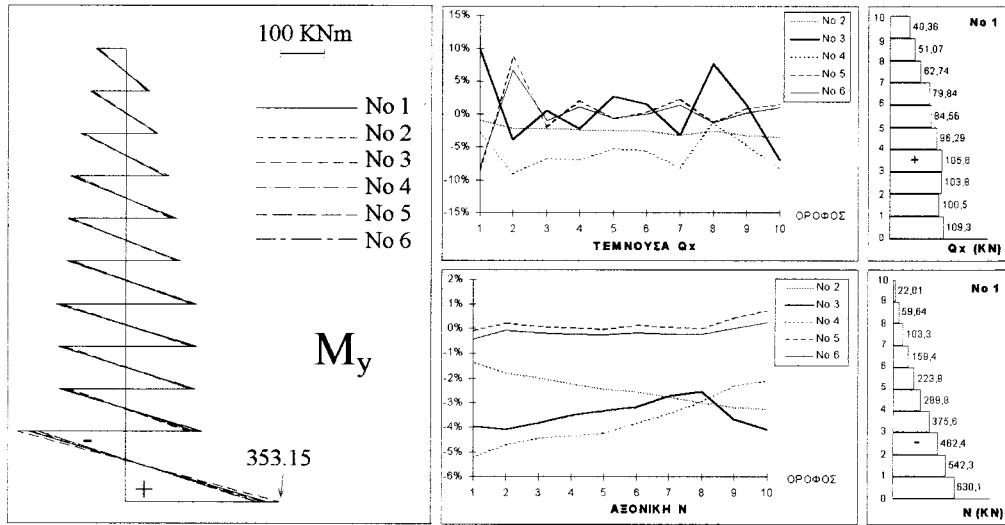
Αντίθετα, τα ισοδύναμα πλαισιακά μοντέλα No 3 και No 4, αν και δεν παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις από το προσομοίωμα αναφοράς (No 1), υστερούν εν τούτοις σαφώς έναντι των άλλων.

### 3.2.4.4. Εντατικά μεγέθη πυρήνα

Έχει τεκμηριωθεί σε προηγούμενες εργασίες των συγγραφέων [5, 6, 9, 12, 13] ότι με τη συνήθη συμβατική διαστασιολόγηση πυρήνων ανά σκέλος βάσει των μεγεθών έντασης M, Q, N, που προκύπτουν για το καθένα τους, τα αποτελέσματα των προσομοιωμάτων “εξεζητημένης πολυπλοκότητας ή υπερβολικής απλότητας” εμφανίζουν σημαντικότατες αποκλίσεις τόσο από την “ακριβή” λύση των πεπερασμένων στοιχείων κελύφους όσο και μεταξύ τους.

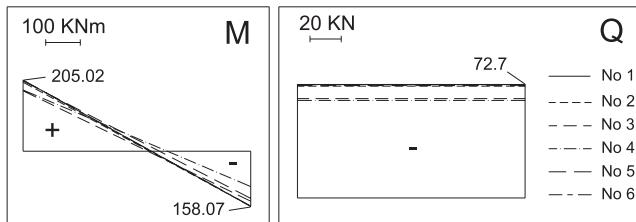
Προσεκτική σύγκριση της μορφής και των τιμών των διαγραμμάτων  $M_y$ ,  $Q_x$ ,  $N$  τόσο του πυρήνα που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία (σχ.12a, b) όσο και σειράς άλλων πυρήνων και φορέων οδηγεί στο γενικό συμπέρασμα ότι οι

	No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6
$T_1$	0,9812	0,9850	0,9752	1,0001	0,9758	0,9741
$T_2$	0,7797	0,7893	0,6898	0,7668	0,7715	0,7706
$T_3$	0,4708	0,4810	0,4438	0,5115	0,4663	0,4658
$T_4$	0,3548	0,3560	0,3579	0,3641	0,3518	0,3515
$T_5$	0,2449	0,2523	0,2056	0,2391	0,2392	0,2391
$T_6$	0,2015	0,2014	0,1865	0,2072	0,1989	0,1996
$T_7$	0,1344	0,1334	0,1392	0,1395	0,1310	0,1327
$T_8$	0,1235	0,1279	0,1093	0,1288	0,1169	0,1211
$T_9$	0,1207	0,1261	0,1065	0,1172	0,1145	0,1158
$T_{10}$	0,1033	0,1015	0,0861	0,1073	0,0986	0,1013



Σχήμα 10: Διαγράμματα  $M_y$ ,  $Q_x$ ,  $N$  των στόλου Σ11 για τα προσομοιώματα Νο 1 έως Νο 6. Σεισμική διέγερση κατά  $x$  - Ισοδύναμη στατική μέθοδος.

Figure 10:  $M_y$ ,  $Q_x$ ,  $N$  diagrams of column Σ1 for models No 1 - No 6. Seismic loading in  $x$  direction - Equivalent static analysis.



Σχήμα 11: Διαγράμματα  $M$ ,  $Q$  της δοκού Δ1 στον πρώτο όροφο για τα προσομοιώματα Νο 1 έως Νο 6. Σεισμική διέγερση κατά  $x$  - Ισοδύναμη στατική μέθοδος.

Figure 11:  $M$ ,  $Q$  diagrams of beam Δ1 for models No 1 - No 6 of the 1<sup>st</sup> storey of the building. Seismic loading in  $x$  direction - Equivalent static analysis.

αποκλίσεις των μοντέλων περιορίζονται σε πιο αποδεκτά επίπεδα, εάν τα συνολικά συνιστάμενα μεγέθη υπολογιστούν στο κέντρο βάρους της σύνθετης διατομής του πυρήνα.

Εν τούτοις, κατά τη σύγκριση των  $M$ ,  $Q$ ,  $N$  στη βάση του πυρήνα (πίν. 4), όπου μία κατά το δυνατόν καλή προσέγγιση των εντατικών μεγεθών κρίνεται ως ιδιαιτέρως σημαντική για την πράξη, εμφανίζονται μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των μοντέλων. Ειδικότερα, το μοντέλο Νο 3 (του ενός ισοδύναμου στόλου στο Κ.Δ.) κρίνεται ως μη ικανοποιητικής αξιοπιστίας. Αντίθετα, το μοντέλο Νο 4 και περισσότερο τα μοντέλα Νο 2 (“κλασικό”), Νο 5 και Νο 6 φαίνεται να αποδίδουν ικανοποιητικά τα μεγέθη έντασης.

### 3.3. Δυναμική φασματική ανάλυση

#### 3.3.1. Γενικές παρατηρήσεις

Υπενθυμίζεται ότι οι συγκρίσεις των μετακινήσεων και των εντατικών μεγεθών του μεμονωμένου πυρήνα προέκυψαν από έκκεντρη σεισμική διέγερση κατά  $x$ .

Πίνακας 4: Συνολικά εντατικά μεγέθη της σύνθετης διατομής του πυρήνα στο Κ.Β. του στάθμη 0.00m για τα προσομοιώματα Νο 1 έως Νο 6. Σεισμική διέγερση κατά  $x$  (a) και  $y$  (b) - Ισοδύναμη στατική μέθοδος.

Table 4: Resultant stresses in cores' section at 0.00m for models No 1 - No 6. Seismic loading in  $x$  direction (a) and in  $y$  direction (b) - Equivalent static analysis.

Απόλυτα μεγέθη

	No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6
$Q_x$	1273,8	1240,2	1192,3	1335,2	1353,4	1351,3
$Q_y$	263,0	233,9	342,6	285,0	258,5	256,8
$N$	1100,2	1071,4	971,1	1089,5	1093,3	1098,7
$M_x$	1459,3	1324,9	3281,2	1301,2	1472,10	1474,9
$M_y$	18784,5	18188,0	18253,4	19978,5	19236,4	19249,8

Ποσοστά απόκλισης  $\{(\alpha_i - \beta_i)/\alpha_i\} * 100$  έναντι του προσομοιώματος Νο 1.

(a)  
Απόλυτα μεγέθη

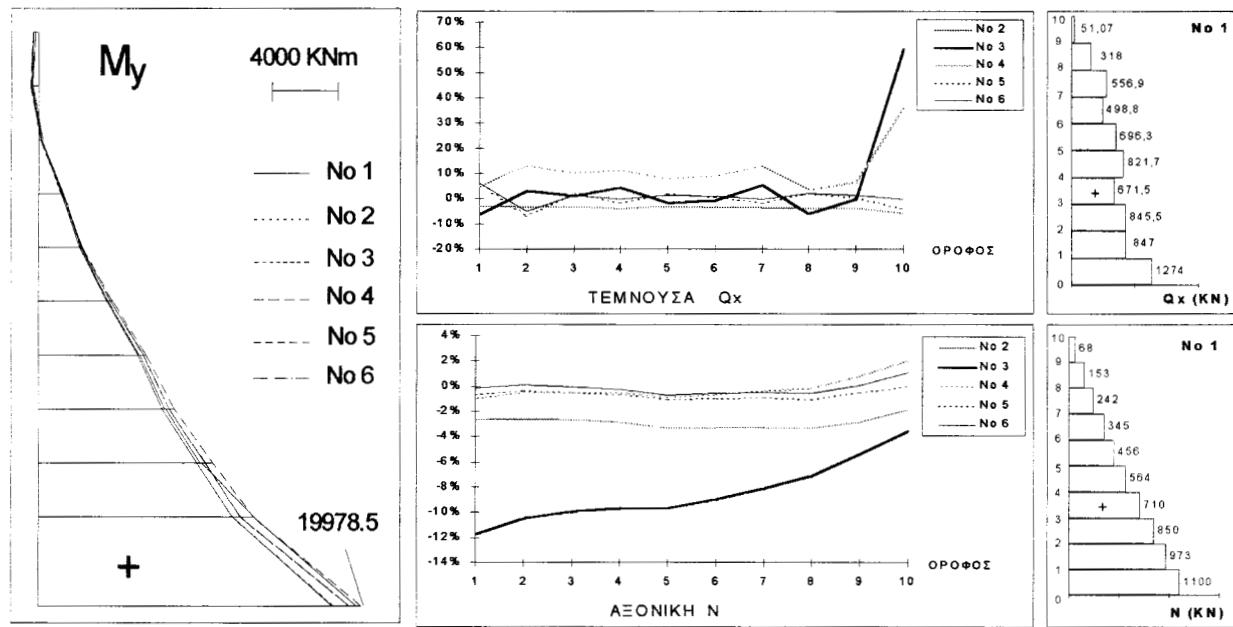
	No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6
$Q_x$	-2,64%	-6,40%	4,82%	6,25%	6,08%	
$Q_y$	-11,06%	30,26%	8,37%	-1,72%	-2,37%	
$N$	-2,62%	-11,73%	-0,98%	-0,63%	-0,14%	
$M_x$	-9,21%	124,85%	-10,84%	0,88%	1,07%	
$M_y$	-3,18%	-2,83%	6,36%	2,41%	2,48%	

Ποσοστά απόκλισης  $\{(\alpha_i - \beta_i)/\alpha_i\} * 100$  έναντι του προσομοιώματος Νο 1.

(b)

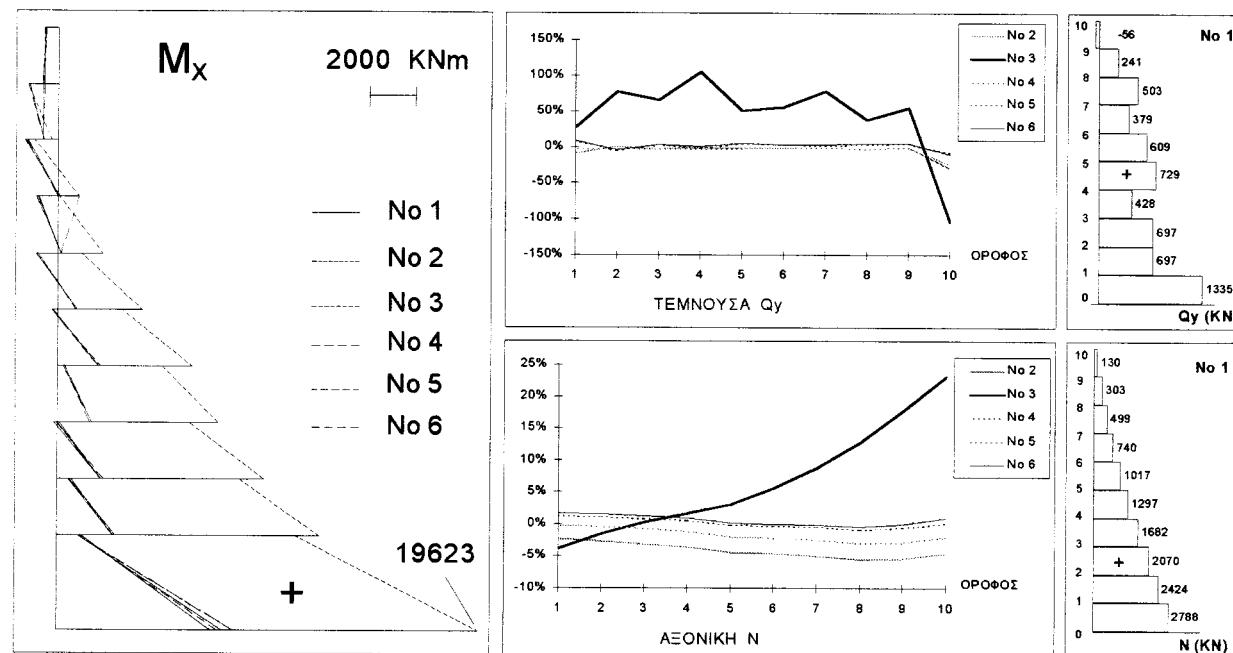
	No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6
$Q_x$	1,09%	57,44%	23,72%	7,13%	7,06%	
$Q_y$	-9,69%	27,58%	-3,72%	7,78%	7,86%	
$N$	-2,32%	-3,88%	-0,18%	1,21%	1,67%	
$M_x$	-7,09%	154,35%	-3,17%	6,03%	6,49%	
$M_y$	-4,35%	38,63%	5,63%	3,92%	2,86%	

Ποσοστά απόκλισης  $\{(\alpha_i - \beta_i)/\alpha_i\} * 100$  έναντι του προσομοιώματος Νο 1.



Σχήμα 12a: Διαγράμματα  $M_y, Q_x, N$  της σύνθετης διατομής του πυρίνα στο K.B. του για τα προσομοιώματα No 1 έως No 6. Σεισμική διέγερση κατά x – Ισοδύναμη στατική μέθοδος.

Figure 12a:  $M_y, Q_x, N$  diagrams in core's section for models No 1 - No 6. Seismic loading in x direction - Equivalent static analysis.

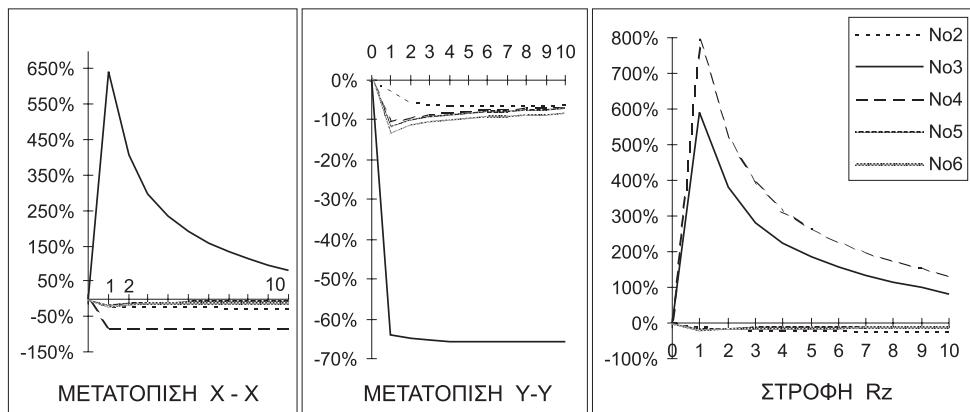


Σχήμα 12b: Διαγράμματα  $M_x, Q_y, N$  της σύνθετης διατομής του πυρίνα στο K.B. του για τα προσομοιώματα No 1 - No 6. Σεισμική διέγερση κατά y – Ισοδύναμη στατική μέθοδος.

Figure 12b:  $M_x, Q_y, N$  diagrams in core's section for models No 1 - No 6. Seismic loading in y direction - Equivalent static analysis.

Αντίθετα, οι συγκρίσεις των μετακινήσεων και των εντατικών μεγεθών του κτιρίου προέκυψαν από ταυτόχρονη θεώρηση δύο κάθετων μεταξύ τους σεισμικών διεγέρσεων με το ίδιο φάσμα σχεδιασμού. Σημειώνεται, επίσης, ότι το μέσο επίπεδο αποκλίσεων των δυναμικών αναλύσεων είναι γενι-

κώς χαμηλότερο από το επίπεδο αποκλίσεων σε αμιγώς στατικές αναλύσεις. Το γεγονός αυτό, που διαπιστώθηκε και αναφέρθηκε και σε προγενέστερες εργασίες, αποδίδεται στη μεγαλύτερη γενικώς ακρίβεια που έχει η αδρανειακή προσομοίωση και διακριτοποίηση των μαζών έναντι της ελαστικής



Σχήμα 13: Ποσοστιαίς αποκλίσεις των μετακινήσεων του K.M. στους ορόφους των ανοικτών πυρήνων για τα προσομοιώματα No 2 έως No 6 έναντι των προσομοιώματος No 1 - Δυναμική φασματική μέθοδος.

Figure 13: Percentage divergencies of models No 2 - No 6 from model No 1 of displacements and rotations at the storeys' mass center of open core - Response spectrum method.

προσομοίωσης και διακριτοποίησης των πυρήνων.

Επισημαίνεται ακόμη η σημασία της χρησιμοποιούμενης μεθόδου επαλληλίας των ιδιομορφικών αποκλίσεων ανά διεύθυνση σεισμικής διέγερσης (κανόνας SRSS ή CQC) για τον επιτυγχανόμενο βαθμό προσέγγισης των διαφόρων προσομοιωμάτων. Όταν ο λόγος  $T_{i+1}/T_i$  δύο διαδοχικών ιδιοπεριόδων ταλάντωσης πλησιάζει τη μονάδα {N.E.A.K.: όταν  $T_{i+1}/T_i > 10/(10+\zeta) = 10/(10+5) = 0,667$  για O/S}, συνίσταται η εφαρμογή του κανόνα CQC, ο οποίος λαμβάνει ακριβέστερα του SRSS υπόψη το συγχρονισμό των ιδιομορφικών αποκρίσεων. Στο 10-ώροφο υπό εξέταση κτίριο ο πρώτος λόγος  $T_2/T_1$  και όλοι σχεδόν οι υπόλοιποι είναι μεγαλύτεροι του 0,667 (εξαίρεση αποτελεί ο  $T_3/T_2$ ). Το γεγονός αυτό δημιουργεί στην περίπτωση χρήσης του κανόνα SRSS κάποιες πρόσθετες αποκλίσεις, κυρίως για τα μεγέθη στην κάθετη προς το σεισμό διεύθυνση.

Αναφέρεται, τέλος, η αδυναμία σύγκρισης των εντατικών μεγεθών στην περίπτωση δυναμικής φασματικής ανάλυσης τόσο του μεμονωμένου πυρήνα όσο και του πυρήνα του κτιρίου. Διότι, για να γίνει η σύγκριση, απαιτείται προηγουμένως ο υπολογισμός των συνισταμένων μεγεθών διατομής του πυρήνα (ή των επί μέρους σκελών του) από τις τάσεις των πεπερασμένων στοιχείων του προσομοιώματος No 1. Αντές, όμως, είναι φασματικές και άρα μη ταυτόχρονες τάσεις, και δεν μπορούν να συντεθούν για να δώσουν συνιστάμενες ροπές, τέμνουσες και αξονικές δυνάμεις διατομής. Η σύγκριση των μεγεθών απόκρισης του μεμονωμένου πυρήνα είναι, όμως, δυνατή μεταξύ του μοντέλου No 2 και του μοντέλου No 5 των μακροεπιφανειακών στοιχείων, η οποία λαμβάνεται εν προκειμένω ως η “λύση αναφοράς”. Για τον κτιριακό φορέα η σύγκριση περιορίστηκε στα προσομοιώματα No 4 και No 5, των οποίων τα συνιστάμενα φασματικά μεγέθη (ροπές, τέμνουσες, αξονικές δυνάμεις) υπολογίζονται από το

πρόγραμμα ανάλυσης απευθείας στο κέντρο βάρους της διατομής του πυρήνα.

### 3.3.2. Μετακινήσεις κέντρων μάζας ορόφων μεμονωμένου πυρήνα (σχ. 13)

Από τα διαγράμματα των φασματικών μετακινήσεων  $u_x$ ,  $u_y$  και  $\varphi$  στο κέντρο μάζας (σχ. 13) προκύπτει η καλή εν γένει απόδοση των προσομοιωμάτων No 5 και No 6.

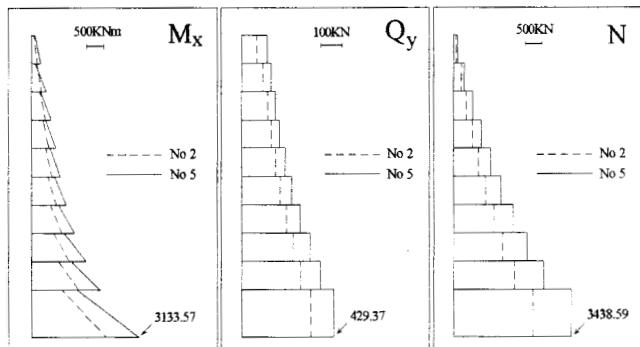
Αποκλίσεις μέχρι και 30% (σύγκρ. π.χ. την  $u_x$  και  $\varphi$  του τελευταίου ορόφου) εμφανίζει το πλαισιακό μοντέλο No 2, ενώ τα προσομοιώματα No 3 και No 4 παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις και πρέπει να θεωρηθούν ως πλήρως αστοχούντα.

### 3.3.3. Εντατικά μεγέθη μεμονωμένου πυρήνα (σχ. 14, 15)

Κατά τη σύγκριση των φασματικών εντατικών μεγεθών M, Q, N του αριστερού σκέλους των πυρήνων (σχ. 14), το μοντέλο No 2 εμφανίζει σημαντικές αποκλίσεις και αστοχεί έναντι του προσομοιώματος No 5. Οι αποκλίσεις αυτές για όλα τα μεγέθη προσεγγίζουν το 50%, ενώ για την πλάτη του πυρήνα (σχ. 15) δεν ξεπερνούν το 20% (σύγκρ. π.χ. τη ροπή κάμψεως στην κεφαλή και στον πόδα).

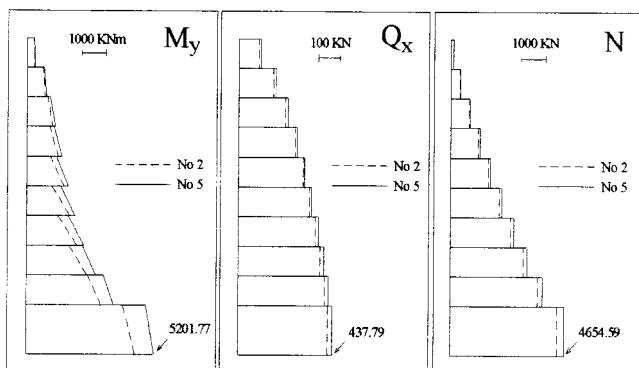
### 3.3.4. Σύγκριση μετακινήσεων κτιριακού φορέα

Από το διάγραμμα του σχήματος 16, που αφορά στη δυναμική φασματική ανάλυση κατά x και y, προκύπτει η πολύ καλή σύμπτωση των μετακινήσεων  $u_x$ ,  $u_y$  και  $\varphi$  του κέντρου μάζας των ορόφων του μοντέλου No 2 (“κλασικού”) με εκείνες του προσομοιώματος No 1 των πεπερασμένων στοιχείων. Ικανοποιητική είναι, επίσης, η απόδοση των προσομοιωμάτων No 5 και No 6. Αντίθετα, τα πλαισιακά μοντέλα No 3 και No 4, χωρίς να παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις, φαίνεται να υστερούν έναντι των υπολοίπων (σύγκρ.



Σχήμα 14: Διαγράμματα  $M$ ,  $Q$ ,  $N$  των αριστερού σκέλους των ανοικτού πυρήνα για τα προσομοιώματα No 2 και No 5 - Δυναμική φασματική μέθοδος.

Figure 14:  $M$ ,  $Q$ ,  $N$  diagrams for the left flange of open core for models No 2 and No 5 - Response spectrum method.



Σχήμα 15: Διαγράμματα  $M$ ,  $Q$ ,  $N$  της πλάτης των ανοικτού πυρήνα για τα προσομοιώματα No 2 και No 5 - Δυναμική φασματική μέθοδος.

Figure 15:  $M$ ,  $Q$ ,  $N$  diagrams for the web of open core for models No 2 and No 5 - Response spectrum method.

π.χ. τη μετακίνηση  $u_y$  και τη στροφή του τελευταίου ορόφου των μοντέλων αντίστοιχα No 3 και No 4).

### 3.3.5. Σύγκριση εντατικών μεγέθών κτιριακού φορέα

Από το σχήμα 17 για τα εντατικά μεγέθη  $M_y$ ,  $Q_x$ ,  $N$  του στύλου Σ11 προκύπτει ότι το μοντέλο No 2 συμπεριφέρεται πολύ ικανοποιητικά, με τιμές προς την ασφαλή πλευρά έναντι του προσομοιώματος No 1.

Τα δύο μακροεπιφανεικά μοντέλα No 5 και No 6 δίνουν τιμές προς την ανασφαλή πλευρά, ενώ τα πλαισιακά προσομοιώματα No 3 και No 4 διαφέρουν σε ορισμένα μόνο μεγέθη έντασης (π.χ. αξονική δύναμη  $N$  στη βάση του στύλου για το μοντέλο No 3, καμπτική ροπή  $M_y$  στη βάση του στύλου για το μοντέλο No 4).

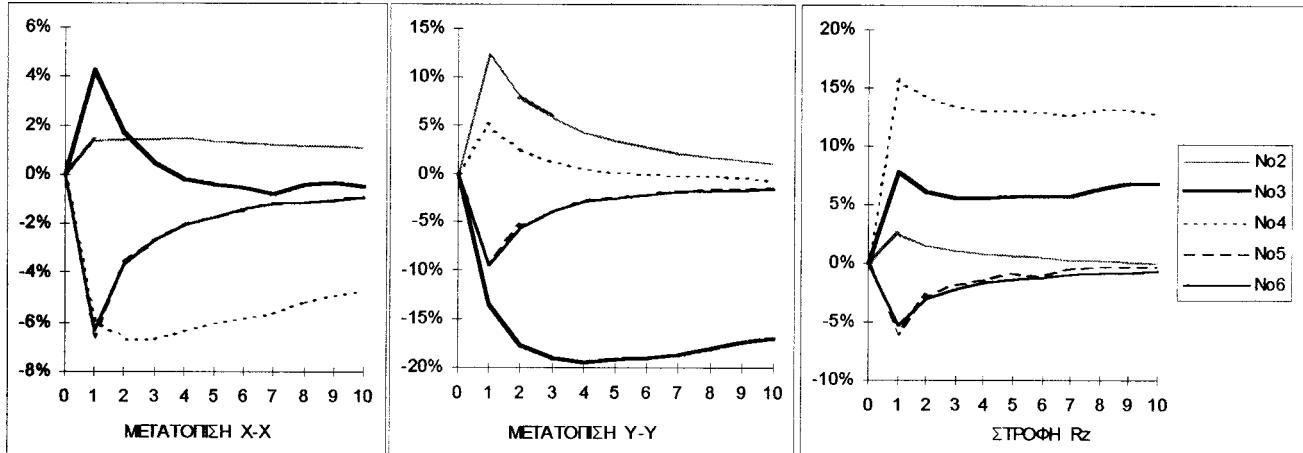
Η ίδια περίπου εικόνα παρατηρείται για τα διαγράμματα της δοκού Δ1 (σχήμα 18). Τα προσομοιώματα No 2, No 5 και No 6 αποδίδουν με ικανοποιητική ακρίβεια τις τιμές συγκρινόμενα με το προσομοιώμα No 1, ενώ προβλήματα εμφανίζουν τα δύο πλαισιακά μοντέλα No 3 και No 4 (σύγκρ. π.χ. τις ροπές και τις τέμνουσες του τελευταίου ορόφου).

Τέλος, για τα εντατικά μεγέθη του πυρήνα (σχήμα 19) η σύγκριση περιορίζεται στα προσομοιώματα No 5 (μακροεπιφανειακά στοιχεία) και No 4 (με έναν ισοδύναμο στύλο στο K.B.).

Οι αποκλίσεις του δεύτερου από το πρώτο είναι της τάξης του 11% έως 22% (σύγκρ. π.χ. τη  $M_x$  στη βάση του πυρήνα και τη  $Q_x$  στον τελευταίο όροφο).

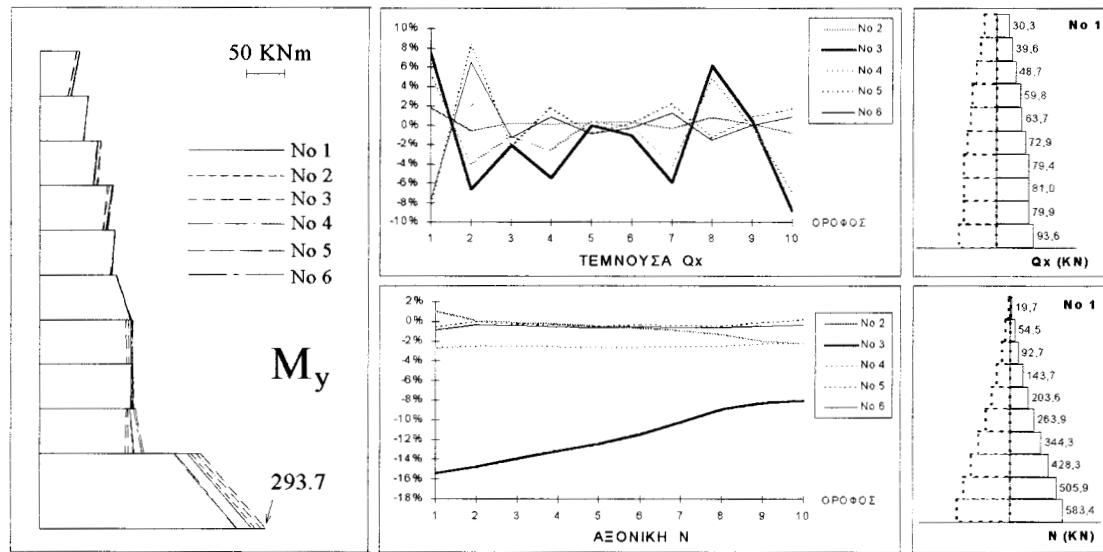
## 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως σημειώθηκε στην αρχή, η διερεύνηση αφορά κατ' αρχάς σε μεμονωμένους πυρήνες με στόχο τη διαπίστωση

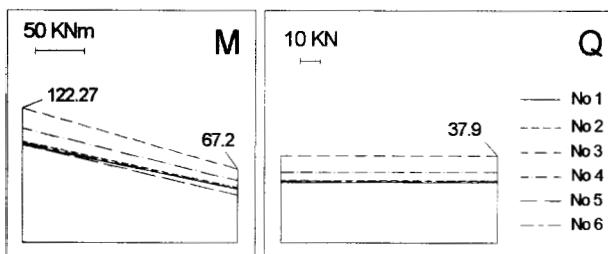


Σχήμα 16: Ποσοστιαίες αποκλίσεις των μετατοπίσεων του Κ.Μ. στους ορόφους των προσομοιωμάτων No 2 έως No 6 έναντι του προσομοιώματος No 1 - Δυναμική φασματική ανάλυση.

Figure 16: Percentage divergencies of models No 2 - No 6 from model No 1 of the displacements and rotations of storeys' mass centers - Response spectrum analysis.

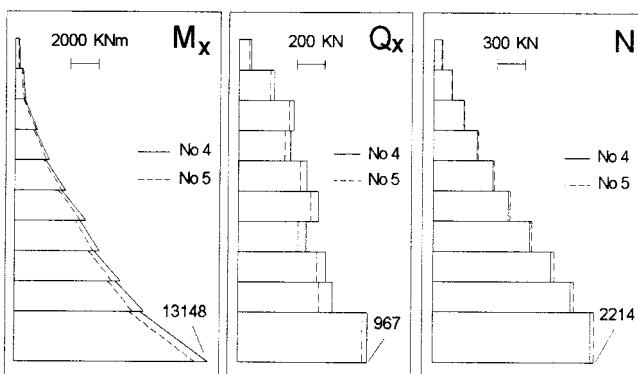


Σχήμα 17: Διαγράμματα  $M_y$ ,  $Q_x$ ,  $N$  στόλου  $\Sigma 11$  για τα προσομοιώματα No 1 - No 6 - Δυναμική φασματική ανάλυση.  
Figure 17:  $M_y$ ,  $Q_x$ ,  $N$  diagrams of column  $\Sigma 11$  for models No 1 - No 6 - Response spectrum analysis.



Σχήμα 18: Διαγράμματα  $M$ ,  $Q$  της δοκού  $A1$  στον τελευταίο όροφο για τα προσομοιώματα No 1 έως No 6 - Δυναμική φασματική ανάλυση.

Figure 18:  $M$ ,  $Q$  diagrams of beam  $A1$  for models No 1 to No 6 of the 10<sup>th</sup> storey of the building - Response spectrum analysis.



Σχήμα 19: Διαγράμματα  $M_x$ ,  $Q_x$ ,  $N$  της σύνθετης διατομής του πυρήνα για τα προσομοιώματα No 4 και No 5 - Δυναμική φασματική ανάλυση.  
Figure 19:  $M_x$ ,  $Q_x$ ,  $N$  diagrams in cores' section for models No 4 and No 5 - Response spectrum analysis.

των μεγίστων αποκλίσεων των διαφόρων απλοποιημένων προσομοιωμάτων τους. Διότι η συνήθως κατά την πράξη περιβάλλοντα τον πυρήνα πλαισιωτή κατασκευή μειώνει γενικά τις αποκλίσεις, όπως προκύπτει και από τα αποτελέσματα της ανάλυσης του εξετασθέντος εδώ κτιριακού φορέα. Επιπλέον, τα αποτελέσματα, που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, αναφέρονται στους συγκεκριμένους εδώ επιλεγέντες πυρήνες και δεν μπορούν να γενικευθούν δίχως περαιτέρω συμπληρωματικές διερευνήσεις για άλλης μορφής δικυψελικούς ή πολυπλοκότερης διατομής πυρήνες.

Συνοψίζοντας τις παραπάνω συγκριτικές παρατηρήσεις, μπορεί να ειπωθεί ότι τόσο στο πλαίσιο της ισοδύναμης στατικής όσο και της δυναμικής φασματικής μεθόδου ανάλυσης:  
α) Για τους μεμονωμένους πυρήνες τα μεγάλης απλούστευσης μοντέλα No 3 και No 4 αδυνατούν να προσομοιώσουν τη μηχανική συμπεριφορά του πυρήνα. Προς τούτο αλλά και λόγω των μεγάλων αποκλίσεων που εμφανίζουν τόσο στα μεγέθη παραμόρφωσης όσο και στις ιδιοπεριόδους ταλάντωσης, κρίνονται ως μειωμένης αξιοπιστίας. Αντίθετα, το μοντέλο No 2 συμπεριφέρεται αρκετά καλά με αποδεκτές παραμορφώσεις και ιδιοπεριόδους ταλάντωσης. Εν τούτοις, κατά τη σύγκριση των εντατικών μεγεθών του παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις που εν πολλοίς μπορεί να οφείλονται και στο γεγονός ότι πρόκειται για παράγωγα μεγέθη (πρώτα υπολογίζονται οι μετακινήσεις και εν συνεχείᾳ από αυτές οι εντάσεις). Τέλος, τα προσομοιώματα No 5 και No 6, τόσο ως προς τα μεγέθη παραμόρφωσης και τις ιδιοπεριόδους ταλάντωσης όσο και ως προς τα εντατικά τους μεγέθη, δεν διαφέρουν σημαντικά από τη “λύση αναφοράς”. β) Για τον κτιριακό φορέα το κλασικό προσομοίωμα No 2 εμφανίζει τις μικρότερες αποκλίσεις και γενικώς την πλησιέστερη

προς το «ακριβές» προσομοίωμα Νο 1 μηχανική συμπεριφορά. Σχεδόν εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα για μετακίνησης, ιδιοπεριόδους ταλάντωσης και συνολικά εντατικά μεγέθη της σύνθετης διατομής του πυρήνα δίνουν τα προσομοίωματα Νο 5 (μακροεπιφανειακά στοιχεία) και Νο 6 (ένα στοιχείο κελύφουνς ανά σκέλος και όροφο). Λιγότερο αποτελεσματικό αλλά οριακά αποδεκτό αποδεικνύεται το προσομοίωμα Νο 4 του ενός ισοδύναμου στύλου στο κέντρο βάρους του πυρήνα, ενώ τελείως ανεπαρκές και άρα απορριπτέο πρέπει να θεωρηθεί το προσομοίωμα Νο 3 του ενός ισοδύναμου στύλου στο κέντρο διάτησης του πυρήνα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Mac - Leod, I.A. (1973): "Analysis of Shear Wall Buildings by the Frame Method". **Proc. Instn. Civ. Engrs** **55**, pp. 593-603.
2. Stafford-Smith, B., Abate, A. (1981): "Analysis of Non-Planar Shear Wall Assemblies by Analogous Frame". **Proc. Instn Civ. Engrs** **71**, Part 2, pp. 395-406.
3. Αναγνωστόπουλος, Σ., Λεκίδης, Β. (1986): "Αντισεισμικός Σχεδιασμός με βάση τις νέες διατάξεις του Αντισεισμικού Κανονισμού". **Ειδική έκδοση ΙΤΣΑΚ - ΤΕΕ (Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας)**, Θεσσαλονίκη.
4. Stafford-Smith, B., Grgis, A.M. (1986): "Deficiencies in the Wide Column Analogy for Shear Wall Core Analysis". **Concrete International**, pp. 58-61.
5. Αβραμίδης, I.E., Ξενίδης, X. (1991): "Συστηματική διερεύνηση των ανεπαρκειών του μοντέλου του ισοδύναμου πλαισίου κατά την προσομοίωση ανοικτών πυρήνων Ο/Σ". **Πρακτικά 10<sup>ου</sup> Ελληνικού Συνεδρίου Σκυροδέματος**, Ρόδος, τόμ. I, 179-186.
6. Ξενίδης, X., Αβραμίδης, I.E. (1992): "Τεκμηρίωση βασικών ανεπαρκειών της πλαισιακής προσομοίωσης ημιανοικτών και κλειστών πυρήνων Ο/Σ". **Πρακτικά 1<sup>ου</sup> Ελληνικού Συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας**, Αθήνα, 96-105.
7. Ξενίδης, X., Αθανατοπούλου, A., Αβραμίδης, I.E. (1994): "Ισοδύναμη πλαισιακή προσομοίωση βαθμιδωτών τοιχωμάτων Ο/Σ υπό στατική και σεισμική φόρτιση". **Πρακτικά 11<sup>ου</sup> Ελληνικού Συνεδρίου Σκυροδέματος**, Κέρκυρα, 399-410.
8. Grgis, A.M., Stafford-Smith, B. (1979): "Torsion Analysis of Building Cores Partially Closed by Beams". **Proc. Symp. on Behaviour of Building Systems and Components**, Vanderbilt, Tenn.
9. Avramidis, I.E. (1991): "Zur Kritik des äquivalenten Rahmenmodells für Wandscheiben und Hochhauserkerne". **Bautechnik** **68**, H.8, S. 275-285.
10. Xenidis, H., Athanatopoulou, A., Avramidis, I.E. (1993): "Modelling of Shear Wall Cores under Earthquake Loading using Equivalent Frames". **EURODYN '93, 2<sup>nd</sup> European Conference on Structural Dynamics**, Trondheim, Norway, 901-910.
11. Δουδούμης, I.N., Μητσοπούλου, E.N. (1994): "Συγκριτική προσομοίωση των πυρήνων των μικτών κτιριακών φορέων με απλοποιημένα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων". **Πρακτικά 11<sup>ου</sup> Ελληνικού Συνεδρίου Σκυροδέματος**, Κέρκυρα, 369-378.
12. Αβραμίδης, I.E., Βαζηλώτης, Χρ., Μαλακάτας, N., κ.ά. (1994): "Τρόποι προσομοίωσης και υπολογισμού εντατικών μεγεθών τοιχωμάτων και πυρήνων από σκυρόδεμα". **Έκθεση ομάδας εργασίας Τ.Ε.Ε.**, Αθήνα.
13. Ξενίδης, X., Αβραμίδης, I.E., Τριαματάκη, M. (1998): "Συγκριτική Αξιολόγηση Απλοποιημένων Προσομοιωμάτων για Πυρήνες Κτιρίων Ο/Σ υπό Στατική και Δυναμική φόρτιση". **Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση Τ.Ε.Ε., Σειρά I, 1998**, τ. 18, τεύχ. 3, σελ. 9-25.
14. Wilson, E.L., Habibullah, A. (1992): "SAP90, A series of Computer Programs for the Finite Element Analysis of Structures". User Manual, Revised May 1992, **Computers and Structures Inc. Berkeley**, California, U.S.A.
15. Wilson, E.L., Habibullah, A. (1992): "ETABS, The Three Dimensional Analysis of Building Systems". Version 5.4., Revised August 1992, California, Berkeley, USA.
16. Mac-Leod, I.A. et al. (1977): "Frame Analysis of Shear Wall Cores". **ASCE J. Str. Div.** **103**, No ST10, pp. 2037-2047.
17. Αβραμίδης, I.E. (1993) : "Κριτική του μοντέλου του ισοδύναμου πλαισίου για τοιχία και πυρήνες πολυωρόφων κτιρίων Ο/Σ". **Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση Τ.Ε.Ε., Επιστημονική Περιοχή Α**, τ. 13, τεύχ. 3, 135-170.
18. Taylor, R.L., Simo, J.C. (1985): "Bending and Membrane Elements for Analysis of Thick and Thin Shells". **Proc. of the NUMETA 1985 Conf.**, Swansea (Jan. 7-11).
19. Αβραμίδης, I.E., Τριαματάκη, M., Ξενίδης, X. (1996) : "Στατική και δυναμική ανάλυση πολυωρόφων κτιρίων Ο/Σ με επιφανειακή και γραμμική προσομοίωση των πυρήνων τους και ρηγμάτωση κατά NEAK". **Πρακτικά 12<sup>ου</sup> Ελληνικού Συνεδρίου Σκυροδέματος**, Λεμεσός, Κύπρος, τόμος III, 145-156.
20. Batoz, J.L., Tahar, M.B. (1982): "Evaluation of a New Quadrilateral Thin plate Bending Element". **Int. J. for Num. Meth. in Eng.**, 18, 1655-1667.

### Χαρίτων Ξενίδης,

Δρ πολιτικός μηχανικός, λέκτορας, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Στατικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., 540 06 Θεσσαλονίκη, τηλ. 031-995838.

### Κων/νος Μορφίδης,

Διπλ. πολιτικός μηχανικός, μεταπτυχιακός φοιτητής, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Στατικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., 546 32 Θεσσαλονίκη, τηλ. 031-617373.

### Ιωάννης Ε. Αβραμίδης,

Δρ πολιτικός μηχανικός, καθηγητής, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Στατικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., 540 06 Θεσσαλονίκη, τηλ. 031-995623.

*Extended summary*

# Investigation of Modelling Techniques for R/C Double Honeycomb Building Cores

**H. XENIDIS**

Lecturer A.U.TH.

**K. MORFIDIS**

Civil Engineer A.U.TH.

**I.E. AVRAMIDIS**

Professor A.U.TH.

## Abstract

The reliability and accuracy of simplified models such as panel elements and equivalent frame models used for open and semi-open U-section R/C building cores, have been the subject of many publications until recently. In contrast, there is relatively little work in relation to the modelling effectiveness of R/C multi honeycomb building cores. This paper aims to provide a well founded presentation of generalized conclusions concerning the reliability and accuracy of simplified models of R/C double honeycomb building cores when using equivalent frame, panel elements and one shell element for each flange and storey modelling techniques. The numerical analyses and conclusions are based on the two main methods dictated by modern seismic design codes: the equivalent static and the response spectrum methods. All the assumptions deemed necessary in the modelling process are in complete agreement with the provisions of the new Greek seismic code. The corresponding finite shell element solutions serve as the basis of comparison.

## 1. INTRODUCTION

R/C double honeycomb building cores usually surround staircases and elevators and are generally desirable as earthquake-resistant structural elements due to their significant contribution to the flexural and torsional stiffness of the load bearing system as whole.

The most reliable computational modelling technique of R/C cores consists in their dense discretization with finite shell elements including all six degrees of freedom at each node.

However, the use of the Finite Element Method in the analysis of conventional structures leads to uneconomical solution. For this reason, simplified models such as equivalent frame models, panel elements and models with one shell element for each flange and storey, were introduced. In particular, the equivalent frame models are used extensively, mainly because they can be integrated in various professional structural analysis computer programs [1, 2, 3].

Submitted: July 15, 1998 Accepted: May 10, 1999

A few years after the first application of the equivalent frame models, it was realised that there were intrinsic deficiencies related to their particular modelling technique [4, 5, 6].

The present paper intends to provide an in-depth presentation to generalized conclusions concerning the reliability of simplified models, of R/C open double honeycomb building cores which are widely accepted in every-day engineering practice. For this reason, equivalent frame models, panel elements and models with one shell element for each individual flange of the core were used. The comparisons between the various models were made on the basis of the results obtained for analysis of the structures using highly accurate finite shell elements [18, 20]. The numerical analyses and conclusions are carried out using both methods required by modern seismic design codes, namely the equivalent static and response spectrum methods. All assumptions made throughout the paper are in complete agreement with the provisions of the new Greek seismic code.

## 2. STRUCTURAL SYSTEMS AND MODELLING

A number of structural systems were analysed. Figures 1 and 2 show in plan view the two which were chosen to be presented in the present paper. The discretized core using panel elements and models with one shell element have the main advantage that only a single element is required for any individual flange of the wall between two successive storeys and for this reason are an attractive solution.

Finally, figure 3 shows the main characteristics of the three different frame models of the R/C core, the effectiveness of which has been addressed in the present paper.

In models used, the slabs were considered as in-plane rigid (diaphragm action) while the existence of the openings in the area of R/C core was ignored.

For the frame elements (beams/columns) not only flexural deformations were taken into account, but also axial, shear and torsional ones. Computer programs SAP90 [14] and ETABS [15] were used for the analysis.

### 3. CONCLUSIONS

In relation to the effectiveness of the various models analysed by both equivalent static and response spectrum methods:

a. The results of a comparative study of the isolated core indicated that the classical linear equivalent frame model (model No 2) is in general the most effective one in providing reliable results relating to deformations and natural periods of vibrations, while the stresses exhibit intrinsic deficiencies with respect to the reference solution. Models No 5 and No 6 yielded results of similar accuracy concerning deformations, natural periods of vibrations and stresses, while models No 3 and No 4 are rejected.

b. For the 10-storey building core it can be stated that the classical equivalent frame model yielded the most effective mechanical behaviour in comparison with the finite shell elements solution. Models No 5 and No 6 also yielded results of similar accuracy concerning deformations, natural periods of vibration and stresses in the cores' section. Within acceptable limits is model No 4 which possess one equivalent column in the mass center of the core. Finally, model No 3, with the equivalent column in the shear center of the core, is considered completely insufficient and was rejected for this reason.

---

**Hariton Xenidis,**

Dr civil engineer, lecturer, Dept. of Civil Engineering, Division of Structural Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, 540 06 Thessaloniki, tel. 031-995838.

**Kostas Morfidis,**

Civil engineer, postgraduate student, Dept. of Civil Engineering, Division of Structural Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, 546 32 Thessaloniki, tel. 031-617373.

**Ioannis E. Avramidis,**

Dr civil engineer, professor, Dept. of Civil Engineering, Division of Structural Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, 540 06 Thessaloniki, tel. 031-995623.