

Προσομοίωση και έλεγχος αντοχής σε κάμψη πυρήνων με το πρόγραμμα στατικής κτιριακών κατασκευών ΡΑΦ του ΤΟΛ[®]

Modelling and bending strength design for shear wall cores
using the TOL[®]/RAF structural analysis program

Κ. ΜΟΡΦΙΔΗΣ¹, Ε.Ν. ΜΠΑΜΠΟΥΚΑΣ², Ι. Ε. ΑΒΡΑΜΙΔΗΣ³

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η μεθοδολογία με την οποία αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της προσομοίωσης και του ελέγχου αντοχής σε κάμψη των πυρήνων πολυωρόφων κτιρίων από το πρόγραμμα στατικής κτιριακών κατασκευών ΡΑΦ του Τεχνικού Οίκου Λογισμικού - ΤΟΛ[®]. Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην ισοδύναμη πλαισιακή προσομοίωση των πυρήνων με τοποθέτηση στύλων στα κέντρα βάρους των επιμέρους σκελών τους, μέθοδος που προ πολλού έχει αποδειχθεί ως ο δοκιμότερος τρόπος προσομοίωσης με χρήση γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων. Όσον αφορά στον έλεγχο αντοχής σε κάμψη, αυτός εκτελείται στην ενιαία οπλισμένη διατομή του πυρήνα, καταπονούμενου σε λοξή κάμψη με ορθή δύναμη βάσει του χώρου αντοχής της συνολικής διατομής και όχι με χωριστούς ελέγχους κάμψης στα μεμονωμένα σκέλη του πυρήνα. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου προσομοίωσης και ελέγχου αντοχής συγκρίνονται μέσω ενός κατάλληλα επιλεγμένου αριθμητικού παραδείγματος με άλλες μεθόδους της πράξης για την αντιμετώπιση του ίδιου προβλήματος, όπως είναι η προσομοίωση του πυρήνα με έναν μόνο ισοδύναμο στύλο και ο έλεγχος σε κάμψη για το κάθε σκέλος του πυρήνα ξεχωριστά.

ABSTRACT: The paper describes the modelling of shear wall cores and the verification procedure for their bending strength as they are implemented in the RAF structural analysis program, developed by the engineering software house TOL[®]. The cores are modelled by equivalent columns, one at the mass centre of each individual core branch (wing), interconnected by rigid arms at the story levels - a method that has been proved so far quite reliable in every-day praxis. The bending strength design is performed on the basis of the capacity surface of the core's composite cross section as a whole. The R/C section's design concerning number, diameter and position of steel reinforcement can be chosen by the program user. Normal force and biaxial bending is taken into account. Numerical results for a typical multi-story building are compared to corresponding results when other, less rational but widely used methods are applied, e.g., one-single-column models for the cores and separate bending design of each individual core branch.

¹ Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Επιστημονικός σύμβουλος ΤΟΛ[®] Ε.Ε., email: morfidis@tol.com.gr

² Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός - ΤΟΛ[®] Ε.Ε., email: emmbab@tol.com.gr

³ Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: avram@civil.auth.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ορθή μόρφωση πολυώροφων αντισεισμικών κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος απαιτεί κατά κανόνα την ενσωμάτωση στον φέροντα οργανισμό τους πυρήνων (σύνθετων τοιχωμάτων), οι οποίοι με την υψηλή δυσκαμψία και δυστρεψία τους συμβάλλουν θετικά στην παραλαβή των σεισμικών φορτίων. Παράλληλα, η ενσωμάτωση των πυρήνων συμβάλλει ουσιαστικά και στην κάλυψη λειτουργικών αναγκών, καθώς εντός αυτών τοποθετούνται τα κλιμακοστάσια ή/και οι ανελκυστήρες. Οι πυρήνες διακρίνονται σε ανοικτούς, ημιανοικτούς και κλειστούς. Από τις τρεις αυτές κατηγορίες ενδιαφέρον για τη μελέτη των συνήθων αντισεισμικών κατασκευών εμφανίζουν οι δύο πρώτες. Οι πυρήνες των πολυώροφων κτιρίων μπορούν να θεωρηθούν εξαιτίας των συνήθως μικρών λόγων πάχους προς μήκος των σκελών και μήκους των σκελών προς ύψος του πυρήνα ως δοκοί με λεπτοτοιχη διατομή, πακτωμένες (ελαστικά ή πλήρως) στη βάση τους. Ως εκ τούτου, ο κυριότερος τρόπος καταπόνησης ενός πυρήνα, ενταγμένου σε κτίριο με μη συμμετρική κάτοψη που υπόκειται σε οριζόντια σεισμικά φορτία, είναι η καμπτική στρέψη (ή στρέψη Vlasson), δηλαδή στρέψη με παρεμποδιζόμενη στρέβλωση.

Δεδομένων των ιδιοτεροτήτων που οφείλονται στη μηχανική συμπεριφορά των πυρήνων ως στοιχείων με λεπτότοιχη διατομή, ο τρόπος προσομοίωσης τους αποτελεί σημαντική πηγή αβεβαιοτήτων κατά την ανάλυση ενός κτιρίου. Η πλέον ακριβής προσομοίωση επιτυγχάνεται με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους. Εναλλακτικά, υπάρχει και η δυνατότητα προσομοίωσης με μακροεπιφανειακά στοιχεία, οπότε για κάθε σκέλος του πυρήνα απαιτείται ένα μόνο στοιχείο για κάθε τμήμα του τοιχώματος μεταξύ δύο διαδοχικών ορόφων. Ωστόσο, η χρήση προσομοιωμάτων με επιφανειακά στοιχεία (συμβατικά ή μακροεπιφανειακά) εισάγει διάφορα προβλήματα, όπως το γεγονός ότι η όπλιση τους θα πρέπει να γίνει με βάση το πεδίο των αναπτυσσομένων τάσεων. Μια τέτοια διαδικασία, εκτός του ότι απαιτεί την ανάπτυξη ενός αξιόπιστου ειδικού λογισμικού, θα πρέπει να προσαρμοστεί και στις απαιτήσεις των διαφόρων σύγχρονων κανονισμών, οι οποίοι σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτούν ελέγχους των στοιχείων και στη μετελαστική περιοχή συμπεριφοράς. Ένα επιπλέον θέμα που τίθεται είναι επίσης η απαίτηση από τον μελετητή ενός υψηλού θεωρητικού υποβάθρου, αλλά και μεγάλης εμπειρίας στην εφαρμογή προγραμμάτων που βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Μια τέτοια απαίτηση δεν μπορεί να κριθεί απαραίτητη στις περιπτώσεις των συνήθων κτιριακών κατασκευών της πράξης. Για όλους τους παραπάνω λόγους έχει προταθεί εδώ και αρκετά χρόνια μια σειρά από απλοποιημένα προσομοιώματα με χρήση γραμμικών (ραβδωτών) στοιχείων δοκού/στύλου (βλ. π.χ. Αβραμίδης (1993)). Τα προσομοιώματα αυτά, τα οποία είναι γνωστά ως ισοδύναμα πλαισιακά μοντέλα, έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα ότι συντίθενται αποκλειστικά από γραμμικά στοιχεία, με τα οποία η πλειονότητα των μελετητών είναι εξοικειωμένη. Επιπλέον, τα μεγέθη έντασης (ροπές, τέμνουσες, αξονικές δυνάμεις), τα οποία εξάγονται από την επίλυση με τα προσομοιώματα αυτά, είναι απολύτως συμβατά με τη συνήθη και επί πολλά χρόνια εφαρμοζόμενη διαδικασία όπλισης γραμμικών στοιχείων. Παράλληλα, οι διάφοροι κανονισμοί όπως και ο ΕΚΟΣ 2000 είναι προσαρμοσμένοι στη συγκεκριμένη λογική όπλισης, δίνοντας ειδικές οδηγίες για την όπλιση των πυρήνων (όπως π.χ. η διαμόρφωση ειδικών διατάξεων στα σημεία ένωσης των σκελών), με τις οποίες παρακάμπτεται η αδυναμία των ισοδύναμων πλαισιακών μοντέλων στην απόδοση όλων των παραμέτρων απόκρισης των πυρήνων. Ωστόσο, ο εγγενώς προσεγγιστικός χαρακτήρας της ισοδύναμης πλαισιακής προσομοίωσης δημιουργεί αρκετά προβλήματα αξιοπιστίας, που όμως έχουν εντοπιστεί και παρουσιαστεί σε μια μεγάλη σειρά ερευνητικών εργασιών (βλ. π.χ. Αβραμίδης Ι.Ε., Ξενίδης Χ. (1991), Ξενίδης

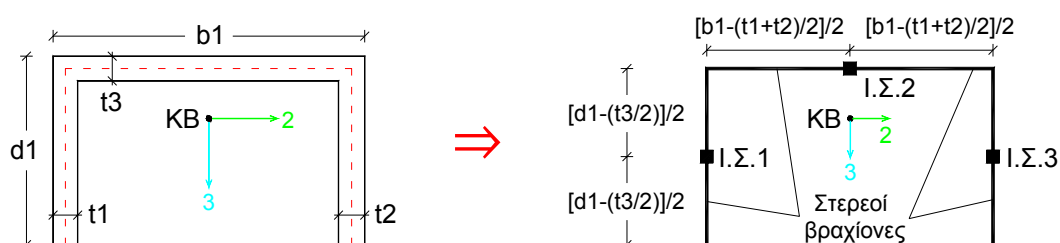
Χ., Αβραμίδης Ι.Ε. (1992)). Από τις διάφορες παραλλαγές του ισοδύναμου πλαισιακού μοντέλου εκείνη που εμφανίζεται ως η πλέον αξιόπιστη (συγκρινόμενη με τη λύση αναφοράς που προκύπτει από προσομοιώματα με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία) είναι η προσομοίωση του πυρήνα με εισαγωγή ισοδύναμων στύλων στα κέντρα βάρους των σκελών του (βλ. π.χ. Ξενίδης Χ., Αβραμίδης Ι.Ε., Τριαματάκη Μ. (1998), Xenidis H., Morfidis K., Avramidis I.E. (2000)). Η παραλλαγή αυτή θεωρείται και ως η πλέον κατάλληλη για ενσωμάτωση σε επαγγελματικό λογισμικό ανάλυσης και διαστασιολόγησης κτιριακών φορέων.

Πέραν του προβλήματος της προσομοίωσης των πυρήνων, ένα εξίσου σημαντικό πρόβλημα είναι και η όπλιση τους. Όταν η προσομοίωση γίνεται με το ισοδύναμο πλαισιακό μοντέλο, τότε ένα θέμα που τίθεται είναι αν η διαστασιολόγηση/όπλιση του πυρήνα θα γίνει ανά σκέλος ή με βάση την ενιαία διατομή του. Ειδικά για την περίπτωση ελέγχου σε κάμψη και επικεντρώνοντας στην προσομοίωση με ισοδύναμους στύλους στα κέντρα βάρους των σκελών, υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής και των δύο μεθόδων. Ωστόσο, ακριβέστερη είναι η διαδικασία όπλισης της ενιαίας (σύνθετης) διατομής, αφού έτσι λαμβάνεται ορθότερα υπόψη η ταυτόχρονη επιρροή των ράβδων οπλισμού όλων των σκελών και όχι μόνον των ράβδων του κάθε σκέλους κατά περίπτωση. Η όπλιση με βάση τη σύνθετη διατομή απαιτεί τη σύνθεση των φορτίων διατομής των σκελών, όπως αυτά προκύπτουν από την ανάλυση, σε φορτία διατομής που αναφέρονται στην ενιαία διατομή και εφαρμόζονται στο κέντρο βάρους της. Επιπλέον, η διαδικασία όπλισης θέτει το δίλημμα της επιλογής μεταξύ δύο διαφορετικών προσεγγίσεων που αφορούν αφενός τον υπολογισμό του απαιτούμενου οπλισμού μιας διατομής με βάση τα μεγέθη που προκύπτουν από την ανάλυση και αφετέρου τον έλεγχο επάρκειας μιας ήδη οπλισμένης διατομής. Όταν ένα πρόγραμμα στατικής υιοθετεί την πρώτη προσέγγιση, θα πρέπει να έχει ενσωματωμένη μια συγκεκριμένη σειρά διατάξεων όπλισης, με βάση τις οποίες γίνεται η τελική επιλογή των διαμέτρων των ράβδων οπλισμού. Αν υιοθετηθεί η δεύτερη προσέγγιση, τότε δεν είναι αναγκαία η κωδικοποιημένη («κλειστή») ενσωμάτωση ενός περιορισμένου αριθμού διατάξεων όπλισης. Αντίθετα, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα διαμόρφωσης μιας οποιασδήποτε διάταξης όπλισης. Στην περίπτωση αυτή το πρόγραμμα υπολογίζει τον χώρο αντοχής (βλ. π.χ. Werner H. (1974)) της εκάστοτε διάταξης όπλισης και με βάση τα μεγέθη έντασης (δράσεις) που προκύπτουν από την ανάλυση υπολογίζει τους λόγους εξάντλησης της συγκεκριμένης διάταξης για όλους τους συνδυασμούς δράσεων που επιβάλλονται από τους κανονισμούς. Μια τέτοια προσέγγιση κρίνεται ως πιο «ανοικτή» στον χρήστη, αφού του δίνει την πρωτοβουλία των κινήσεων όσον αφορά στην επιλογή της καταλληλότερης κατά τον ίδιο διάταξης όπλισης χωρίς δεσμεύσεις.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η μέθοδος με την οποία αντιμετωπίζεται το πρόβλημα προσομοίωσης και ελέγχου αντοχής σε κάμψη των πυρήνων από το πρόγραμμα στατικής κτιριακών κατασκευών ΡΑΦ του ΤΟΛ®. Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην πλέον δοκιμη ισοδύναμη πλαισιακή προσομοίωση πυρήνων με τοποθέτηση στύλων στα κέντρα βάρους των σκελών τους. Όσον αφορά στον έλεγχο αντοχής σε κάμψη, αυτός γίνεται βάσει του χώρου αντοχής της οπλισμένης ενιαίας διατομής του πυρήνα ως καταπονούμενης σε λοξή κάμψη με ορθή δύναμη. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου προσομοίωσης και ελέγχου αντοχής συγκρίνονται μέσω ενός κατάλληλα επιλεγμένου αριθμητικού παραδείγματος με άλλες διαδεδομένες μεθόδους της πράξης για την αντιμετώπιση του ίδιου προβλήματος κάνοντας χρήση του προγράμματος SAP2000 (2001). Συγκεκριμένα, οι άλλες τεχνικές με τις οποίες γίνεται σύγκριση είναι η προσομοίωση του πυρήνα με ένα και μόνο ισοδύναμο στύλο καθώς και η εκτέλεση του ελέγχου σε κάμψη για το κάθε σκέλος του πυρήνα ξεχωριστά.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Το ΡΑΦ χρησιμοποιεί για την προσομοίωση των πυρήνων το ισοδύναμο πλαίσιακό προσομοίωμα που συνίσταται από ισοδύναμους σύλους (Ι.Σ.) στα κέντρα βάρους των σκελών του (Σχήμα 1), διασυνδεδεμένους με άκαμπτους βραχίονες (δοκούς) στις στάθμες των ορόφων. Όπως έχει δείξει μια μεγάλη σειρά δημοσιευμένων συστηματικών διερευνητικών εργασιών (π.χ. Ξενίδης Χ., Αβραμίδης Ι.Ε., Τριαματάκη Μ. (1998), Xenidis H., Morfidis K., Anramidis I.E. (2000)), το προσομοίωμα αυτό είναι γενικώς το πλέον αξιόπιστο μεταξύ των διαφόρων ισοδυνάμων πλαίσιακών προσομοιωμάτων όσον αφορά στην απόδοση μεγεθών έντασης και μετακίνησης, με βάση αναφοράς με το κατά τεκμήριο ακριβέστερο προσομοίωμα που κάνει χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων κελύφους.



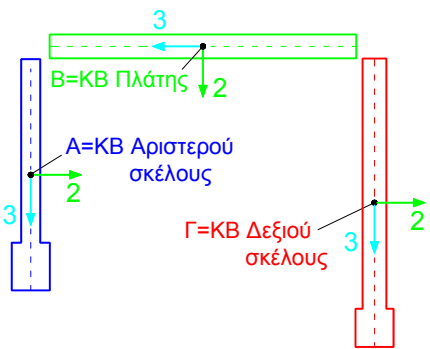
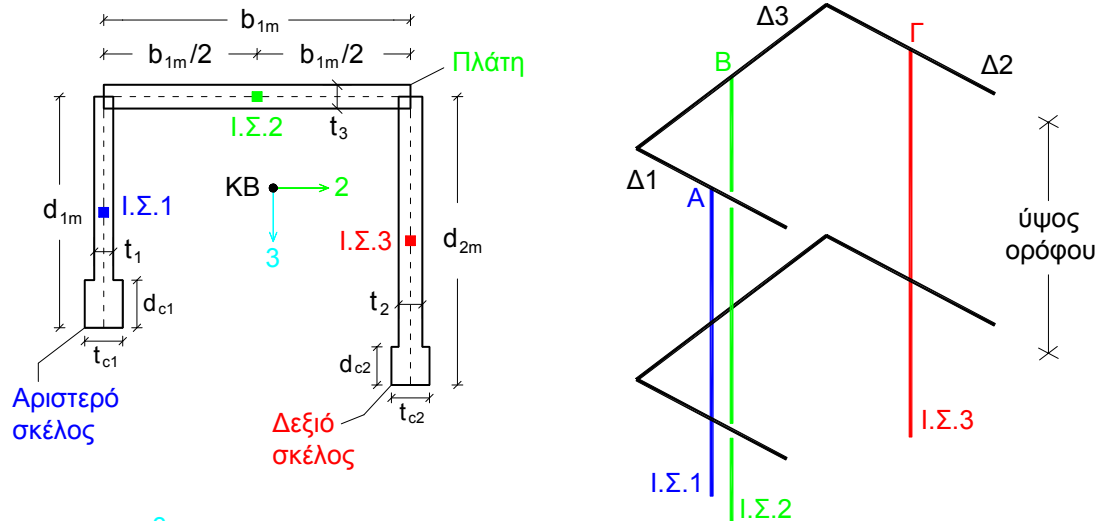
Σχήμα 1. Ισοδύναμο πλαίσιακό προσομοίωμα μονοκυβελικού πυρήνα, το οποίο δημιουργείται αυτόματως από το ΡΑΦ

Η δημιουργία του ισοδύναμου πλαίσιακού προσομοιώματος από το ΡΑΦ είναι αυτόματη για τις περιπτώσεις μονοκυβελικών (διατομής Π) και δικυβελικών (διατομής ΠΠ) πυρήνων, καθώς και για χωρικά τοιχώματα διατομής Γ ή Τ. Η αυτόματη δημιουργία του προσομοιώματος εκτελείται μόλις εισαχθεί μια διατομή κατακόρυφου στοιχείου, η οποία είναι καταχωρημένη στη βάση δεδομένων του προγράμματος ως διατομή πυρήνα (Σχήμα 2).

Ιδιότητα	Τιμή
Γενικά	
Όνομα Διατομής	Ue325x225x25
Σχόλιο	
Υλικά	
Ποιότητα Σκυροδέματος	C20/25
Γεωμετρία	
b1 =	325 cm
d1 =	225 cm
d2 =	225 cm
t1 =	25 cm
t2 =	25 cm
t3 =	25 cm
dc1 =	48 cm
dc2 =	48 cm
dc3 =	55 cm
dc4 =	55 cm
bc3 =	55 cm
bc4 =	55 cm
e1α =	0 cm
e1β =	0 cm
e2α =	0 cm
e2β =	0 cm
Αδρανειακά Μεγέθη	
Επιφάνεια Διατομής A=	1.8125 m ²
Ροπή Αδράνειας I2=	0.904914 m ⁴
Ροπή Αδράνειας I3=	2.97038 m ⁴
Στροπική Ροπή Αδράνειας J=	0.0353096 m ⁴
Άλλα Μεγέθη για την Ανάλυση	
Επιφάνεια Ισίου Βάρους Asw=	0 m ²
Επιφάνεια Διάτμησης As2=	0.3349 m ²
Επιφάνεια Διάτμησης As3=	0.3842 m ²

Σχήμα 2. Ενδεικτική κάρτα εισαγωγής δεδομένων διατομής μονοκυβελικού πυρήνα στο ΡΑΦ

Για άλλες μορφές συνθέτων τοιχωμάτων του χώρου, το ΡΑΦ δίνει στον χρήστη όλα τα απαραίτητα εργαλεία για τη μόρφωση του ισοδύναμου πλαισιακού προσομοιώματος. Τα δεδομένα των διατομών των επί μέρους στοιχείων του ισοδύναμου αυτού πλαισιακού προσομοιώματος δημιουργούνται αυτόματα από το πρόγραμμα ΡΑΦ σύμφωνα με τα όσα προδιαγράφονται στις δημοσιευμένες εργασίες, στις οποίες έχει διατυπωθεί η συγκεκριμένη εκδοχή του. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στο παρακάτω Σχήμα 3 για την περίπτωση ενός μονοκυβελικού πυρήνα.



ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΩΝ ΣΤΥΛΩΝ

	Αριστερό σκέλος → I.Σ.1	Δεξιό σκέλος → I.Σ.3	Πλάτη → I.Σ.2
F	$F_{Αρ.σκ.}$	$F_{Δεξ.σκ.}$	$F_{Πλ.}$
I_2	$I_{2Αρ.σκ.}$	$I_{2Δεξ.σκ.}$	$I_{2Πλ.}$
I_3	$I_{3Αρ.σκ.}$	$I_{3Δεξ.σκ.}$	$I_{3Πλ.}$
F'_2	$F'_{2Αρ.σκ.} = 0$	$F'_{2Δεξ.σκ.} = 0$	$F'_{2Πλ.} = 0$
F'_3	$F'_{3Αρ.σκ.} = F_{Αρ.σκ.}$	$F'_{3Δεξ.σκ.} = F_{Δεξ.σκ.}$	$F'_{3Πλ.} = F_{Πλ.}$
J_t	$J_{tΑρ.σκ.}$	$J_{tΔεξ.σκ.}$	$J_{tΠλ.}$

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΔΟΚΩΝ

	ΔΟΚΟΣ Δ1	ΔΟΚΟΣ Δ2	ΔΟΚΟΣ Δ3
F	∞^*	∞	∞
I_2	∞	∞	∞
I_3	∞	∞	∞
F'_2	∞	∞	∞
F'_3	∞	∞	∞
J_t	$J_{t\Delta 1}^{**}$	$J_{t\Delta 2}$	$J_{t\Delta 3}$

- F=Επιφάνεια διατομής
- I_2 =Ροπή αδράνειας διατομής για κάμψη περί τον τοπικό άξονα 2
- I_3 =Ροπή αδράνειας διατομής για κάμψη περί τον τοπικό άξονα 3
- F'_2 =Επιφάνεια διάτμησης για κάμψη περί τον τοπικό άξονα 2
- F'_3 =Επιφάνεια διάτμησης για κάμψη περί τον τοπικό άξονα 3
- J_t =Στρεπτική ροπή αδράνειας διατομής

* Το σύμβολο ∞ σημαίνει ότι για τις συγκεκριμένες ιδιότητες διατομής δίνονται σχετικά μεγάλες τιμές, κατάλληλα εκλεγμένες έτσι ώστε να μην δημιουργούνται αριθμητικές αστάθειες.

** Στις διατομές των δοκών Δ1, Δ2, Δ3 οι οποίες τοποθετούνται στις στάθμες των ορόφων δίνονται πεπερασμένες τιμές για τη στρεπτική ροπή αδράνειας: $J_{t\Delta ij} = \alpha t_i^3 h_j$
 t_i =το πάχος του σκέλους i, $h_j = (H_j + H_{j+1})/2$, H_j = ύψος ορόφου j
 $\alpha = (1/3)[1 - ((192t)/(π^5 h)) \tanh((πh)/(2t))]$

Σχήμα 3. Δεδομένα των στοιχείων που συνθέτουν το ισοδύναμο πλαισιακό προσομοίωμα

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

Διαδικασία υπολογισμού των μεγεθών διαστασιολόγησης μιας διατομής

Οι πυρήνες Ο/Σ, ως κατακόρυφα στοιχεία δυσκαμψίας κτιριακών φορέων που υπόκεινται σε συνδυασμό κατακόρυφων στατικών και οριζοντίων σεισμικών φορτίων, καταπονούνται γενικώς σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη και συνεπώς οφείλουν να σπλιστούν αντιστοίχως. Προς τούτο θα πρέπει - σύμφωνα με τις διατάξεις των παραγράφων 3.4.4 και 3.5.3 του ΕΑΚ - να γίνονται για κάθε κρίσιμη διατομή τους έλεγχοι αντοχής με βάση όλες εκείνες τις τριάδες μεγεθών (N, M_2, M_3), όπου N =αξονική δύναμη και M_2, M_3 = ροπές κάμψης κατά τους τοπικούς άξονες της διατομής, οι οποίες προκύπτουν θεωρώντας διαδοχικά την πιθανή ακραία (μέγιστη-θετική και ελάχιστη-αρνητική) τιμή του ενός από τα τρία μεγέθη και τις πιθανές ταυτόχρονες τιμές των άλλων δύο (Σημ.: Η διαδικασία υπολογισμού των πιθανών ακραίων και των ταυτόχρονων τιμών των μεγεθών αυτών δίνεται για μεν την ανάλυση με τη δυναμική φασματική μέθοδο στις παραγράφους 3.4.3 και 3.4.4 του ΕΑΚ, για δε την ανάλυση με την απλοποιημένη φασματική μέθοδο στην παράγραφο 3.5.3 του ΕΑΚ). Οι έξι τριάδες των πιθανών ακραίων (μέγιστων, ελάχιστων) τιμών των μεγεθών N, M_2, M_3 και των ταυτόχρονών τους, οι οποίες προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία και αντιστοιχούν στην ένταση που αναπτύσσεται στην διατομή λόγω των σεισμικών φορτίων, θα πρέπει να επαλληλιστούν με τις αντίστοιχες τιμές των μεγεθών N, M_2, M_3 που αντιστοιχούν στην ένταση που αναπτύσσεται στη διατομή λόγω των στατικών κατακορύφων φορτίων, σύμφωνα με τους συνδυασμούς δράσεων που προδιαγράφονται από την παράγραφο 6.3 του ΕΚΟΣ. Έτσι προκύπτουν π.χ. οι τριάδες μεγεθών έντασης (δράσεις) του Πίνακα 1, ο οποίος αντιστοιχεί σε τμήμα της κάρτας των αποτελεσμάτων ανάλυσης, όπως αυτά εξάγονται από το ΡΑΦ στην οθόνη του υπολογιστή. Με έντονους χαρακτήρες παρουσιάζονται οι πιθανές μέγιστες (θετικές) τιμές των μεγεθών N, M_2, M_3 . Αντίστοιχες τριάδες ισχύουν και για τις πιθανές ελάχιστες (αρνητικές ακραίες) τιμές των N, M_2, M_3 .

Πίνακας 1. Ενδεικτικός πίνακας των πιθανών μέγιστων (θετικών) τιμών των μεγεθών διαξονικής κάμψης με ορθή δύναμη και των ταυτόχρονών τους

Ακραία & Ταυτόχρονα Εντακτικά Μεγέθη ($N_{ακρ}, M_{2ακρ}, M_{3ακρ}$) - ($N_{ταυ}, M_{2ακρ}, M_{3ακρ}$) - ($N_{ταυ}, M_{2ταυ}, M_{3ακρ}$)								
α/α	Στοιχείο	Χωρική Επαλληλία	Κόμβος Αρχής			Κόμβος Τέλους		
			N	M2	M3	N	M2	M3
			[kN]	[kN·m]		[kN]	[kN·m]	
0	Υ6-Σ1	E1	379.820	-2005.818	1506.759	379.820	157.220	2609.997
1			-366.428	2079.127	-1157.535	202.751	294.526	1284.109
2			245.875	-1033.969	2327.596	251.072	95.787	3948.380

Η προγραμματιστική υλοποίηση της παραπάνω διαδικασίας από το ΡΑΦ πραγματοποιείται μέσω ενός αλγόριθμου, τα βασικά τμήματα του οποίου παρουσιάζονται παρακάτω για την περίπτωση της ανάλυσης με τη δυναμική φασματική μέθοδο (Σημ.: Ανάλογη είναι η διαδικασία για την περίπτωση ανάλυσης με βάση την απλοποιημένη φασματική μέθοδο):

- Δυναμική ιδιομορφική ανάλυση του φορέα

Υπολογισμός των ιδιομορφικών τιμών των μεγεθών έντασης $N_{j,i}$, $M_{2j,i}$ και $M_{3j,i}$ των ισοδύναμων στύλων j του πυρήνα για κάθε μία από τις ιδιομορφές i που λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση.

- Σύνθεση των ιδιομορφικών μεγεθών των ισοδυνάμων στύλων

Με δεδομένα τα ιδιομορφικά μεγέθη των ισοδυνάμων στύλων $N_{j,i}$, $M_{2j,i}$ και $M_{3j,i}$ υπολογίζονται τα ιδιομορφικά μεγέθη $N_{\text{ΠΥΡ},i}$, $M_{2\text{ΠΥΡ},i}$, $M_{3\text{ΠΥΡ},i}$ της ενιαίας διατομής του πυρήνα ως προς το ΚΒ της.

- Υπολογισμός των μέγιστων ιδιομορφικών τιμών των μεγεθών της ενιαίας διατομής

Εκτελώντας μια αλληλουχία υπολογισμών (όπως π.χ. υπολογισμός συντελεστών διέγερσης, συμμετοχής κ.τ.λ., βλ. π.χ. Αναστασιάδης (1991), Chopra (2001)) προκύπτουν οι μέγιστες ιδιομορφικές τιμές των μεγεθών έντασης της ενιαίας διατομής για σεισμικές διεγέρσεις κατά τη διεύθυνση δύο κάθετων μεταξύ τους αξόνων X και Y : $N_{\text{ΠΥΡ},EX,i}$, $M_{2\text{ΠΥΡ},EX,i}$, $M_{3\text{ΠΥΡ},EX,i}$ και $N_{\text{ΠΥΡ},EY,i}$, $M_{2\text{ΠΥΡ},EY,i}$, $M_{3\text{ΠΥΡ},EY,i}$.

- Ιδιομορφική επαλληλία των μέγιστων ιδιομορφικών τιμών των μεγεθών της ενιαίας διατομής

Πραγματοποιείται με εφαρμογή των σχέσεων (3.7), (3.8) και (3.9) του ΕΑΚ. Από τη διαδικασία αυτή προκύπτουν οι πιθανές ακραίες τιμές των μεγεθών έντασης της ενιαίας διατομής του πυρήνα για κάθε μία από τις δύο συνιστώσες της σεισμικής διέγερσης: $exN_{\text{ΠΥΡ},EX}$, $exM_{2\text{ΠΥΡ},EX}$, $exM_{3\text{ΠΥΡ},EX}$ και $exN_{\text{ΠΥΡ},EY}$, $exM_{2\text{ΠΥΡ},EY}$, $exM_{3\text{ΠΥΡ},EY}$

- Χωρική επαλληλία των μεγεθών έντασης της ενιαίας διατομής για ταυτόχρονη δράση σεισμού στις διευθύνσεις των αξόνων X και Y

Πραγματοποιείται με εφαρμογή των σχέσεων (3.10) και (3.11α,β) του ΕΑΚ. Από την διαδικασία αυτή προκύπτουν οι προαναφερθείσες έξι τριάδες των τιμών των μεγεθών έντασης λόγω σεισμού, τρεις εκ των οποίων παρουσιάσθηκαν ενδεικτικά στον Πίνακα 1. Οι τιμές αυτές επαλληλιζόμενες με τις τιμές των μεγεθών έντασης της ενιαίας διατομής του πυρήνα λόγω των κατακόρυφων στατικών φορτίων δίνουν τις τελικές τιμές σχεδιασμού, βάσει των οποίων θα πρέπει να οπλισθεί ο πυρήνας (τριάδες εντασιακών μεγεθών διαστασιολόγησης/όπλισης).

Διαδικασία όπλισης της διατομής έναντι κάμψης

Με δεδομένες τις δράσεις (εδώ: των τριάδων διαστασιολόγησης), η διαδικασία της όπλισης μιας διατομής έναντι κάμψης από ένα πρόγραμμα ανάλυσης/διαστασιολόγησης φορέων μπορεί να γίνει γενικά με δύο τρόπους:

- Υπολογισμός από το πρόγραμμα του απαιτούμενου εμβαδού των διαμήκων ράβδων έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η διατομή από αστοχία για όλους τους προδιαγραφόμενους από τον κανονισμό συνδυασμούς δράσεων.
- Έλεγχος μιας ήδη οπλισμένης με συγκεκριμένη διάταξη ράβδων διατομής έναντι όλων των μεγεθών σχεδιασμού (δράσεων) που προδιαγράφει ο κανονισμός. Στην περίπτωση αυτή το πρόγραμμα δεν καλείται να υπολογίσει το απαιτούμενο εμβαδόν του οπλισμού, αλλά να κάνει έλεγχο μιας οπλισμένης διατομής που εισήχθη από τον χρήστη.

Επικεντρωνόμενοι στο πρόβλημα της καμπτικής όπλισης των πυρήνων, που αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας, προκύπτει ένα ακόμα θέμα επιλογής:

- Όπλιση του πυρήνα κατά σκέλος. Στην περίπτωση αυτή όπλιση γίνεται με βάση τα μεγέθη σχεδιασμού του κάθε σκέλους ξεχωριστά.
- Όπλιση της ενιαίας διατομής του πυρήνα. Στην περίπτωση αυτή η όπλιση γίνεται με βάση τα μεγέθη της ενιαίας διατομής, τα οποία υπολογίζονται από τη διαδικασία που περιγράφηκε στην προηγούμενη υποπαράγραφο.

Σε σχέση με τα παραπάνω θέματα, η διαδικασία που έχει υιοθετηθεί από το ΡΑΦ είναι η εξής: Έλεγχος επάρκειας (και όχι υπολογισμός του απαιτούμενου εμβαδού ράβδων) μίας ή περισσοτέρων διατάξεων όπλισης που έχει/έχουν εισαχθεί από τον χρήστη με βάση την ενιαία διατομή του πυρήνα (και όχι ανά σκέλος). Το σκεπτικό αυτής της επιλογής στηρίζεται στα δύο παρακάτω σημεία:

- Είναι καταρχάς σαφές ότι η αντοχή σε κάμψη μιας διατομής ενός δομικού στοιχείου από οπλισμένο σκυροδέμα δεν εξαρτάται μόνον από το εμβαδόν του οπλισμού, αλλά και από τη διάταξη των ράβδων όπλισης. Αυτό σημαίνει ότι ένας αλγόριθμος αυτόματου υπολογισμού του απαιτούμενου οπλισμού κάμψης θα πρέπει να έχει ενσωματωμένες συγκεκριμένες διατάξεις όπλισης, βάσει των οποίων θα εκτελεί τη διαδικασία υπολογισμού. Επομένως, οι διατάξεις όπλισης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι αναγκαστικά περιορισμένες. Αντίθετα, με την υιοθέτηση της φιλοσοφίας του ελέγχου επάρκειας μιας ήδη οπλισμένης διατομής, δίνεται στο χρήστη του προγράμματος η δυνατότητα εισαγωγής μιας οποιασδήποτε διάταξης όπλισης, η οποία στη συνέχεια ελέγχεται αυτόματα από το πρόγραμμα. Με τον τρόπο αυτό ο χρήστης/μελετητής, αντί να είναι παθητικός παρατηρητής της αυτόματης διαδικασίας όπλισης, έχει την πρωτοβουλία των κινήσεων στη διαδικασία της μελέτης. Αντίστοιχα, το πρόγραμμα μετατρέπεται – όπως είναι σωστό – σε εκτελεστή πράξεων, αντί να του ανατίθενται περαιτέρω πρωτοβουλίες. Επιπλέον, το ΡΑΦ έχει τη δυνατότητα αυτόματου εμπλουτισμού της αρχικής του βάσης δεδομένων διατομών με κάθε νέα διάταξη όπλισης που εισάγει ο χρήστης. Έτσι είναι δυνατή η διενέργεια ελέγχου μιας διατομής για όσες διατάξεις όπλισης ζητηθούν, χωρίς να είναι αναγκαία η επανεπίλυση του φορέα (κάτι τέτοιο είναι αναγκαίο μόνον εάν δεν αρκεί ο μέγιστος κατά τους κανονισμούς οπλισμός κάμψης, οπότε απαιτείται αλλαγή διαστάσεων της διατομής).
- Η διατομή ενός πυρήνα αποτελείται από τα σκέλη του, τα οποία όμως κατά την καμπτική επιπόνηση λειτουργούν ως ενιαίο σύνολο. Επομένως, οι ράβδοι οπλισμού καθενός σκέλους δεν λειτουργούν αποκλειστικά για το σκέλος αυτό, αλλά συμβάλλουν στη συνολική αντοχή της διατομής. Αυτό σημαίνει ότι η ανά σκέλος ξεχωριστή διαδικασία όπλισης ενός πυρήνα δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική συμπεριφορά της διατομής του. Ως εκ τούτου κρίνεται ως ρεαλιστικότερη η διαδικασία ελέγχου των διατομών ενός πυρήνα με βάση την ενιαία διατομή του και όχι ανά σκέλος ξεχωριστά. Το ΡΑΦ υιοθετεί αυτήν τη διαδικασία έχοντας ενσωματωμένο – όπως θα τεκμηριωθεί παρακάτω – έναν αξιόπιστο αλγόριθμο υπολογισμού αντοχής μιας τυχούσας γεωμετρίας διατομής οπλισμένου σκυροδέματος με οποιαδήποτε διάταξη όπλισης (βλ. και ΔΙΑΣΚ (2003)).

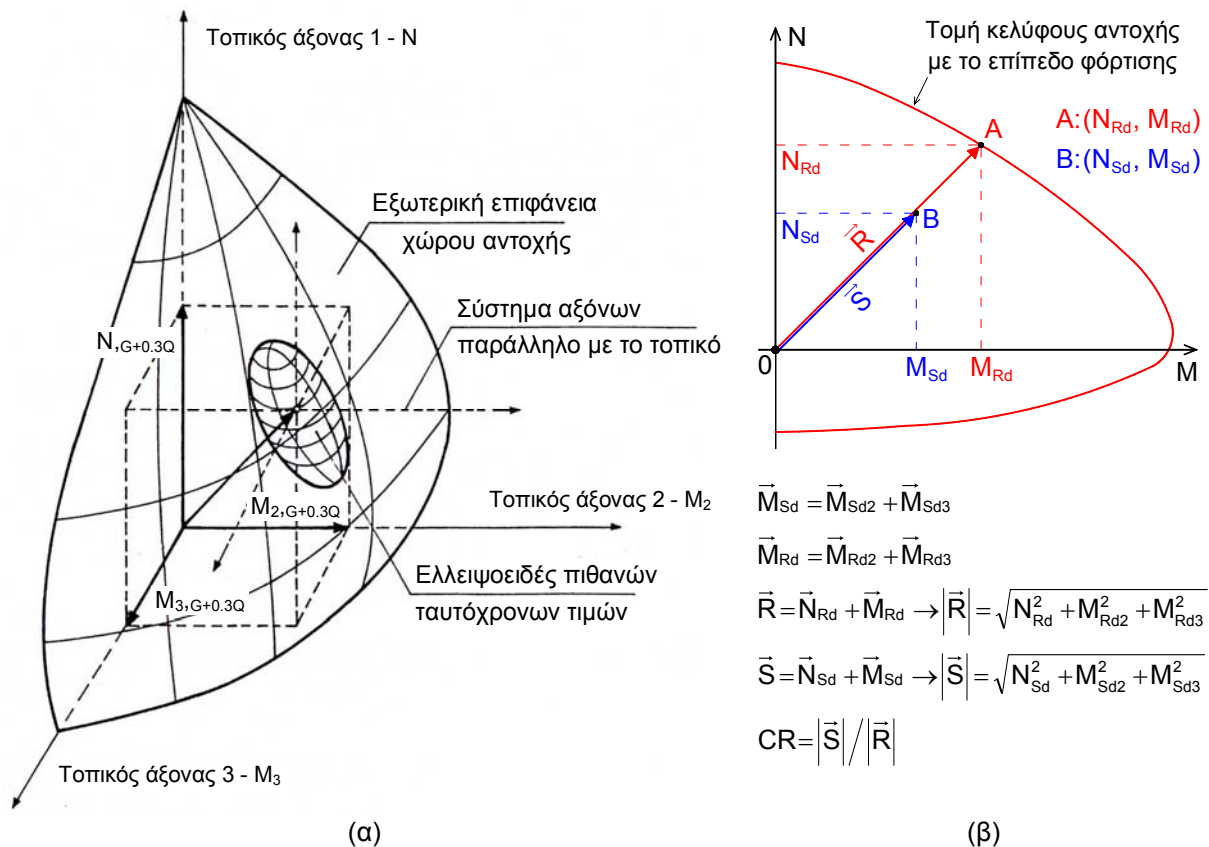
Η όλη φιλοσοφία που υιοθετεί το ΡΑΦ για τον έλεγχο διατομών οπλισμένου σκυροδέματος (και φυσικά και των διατομών των πυρήνων) στηρίζεται στις έννοιες του «*χώρου αντοχής*» και των «*λόγων εξάντλησης*».

Ως *χώρος αντοχής* σε κάμψη μιας διατομής οπλισμένου σκυροδέματος που καταπονείται σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη ορίζεται ο χώρος (βλ. π.χ. Werner H. (1974)), ο οποίος σε ένα τρισσορθόγωνιο σύστημα αναφοράς $N-M_2-M_3$ οριοθετείται από μία κλειστή επιφάνεια (κέλυφος) που έχει την εξής ιδιότητα: Κάθε σημείο της επιφάνειας έχει συντεταγμένες εκείνα τα μεγέθη έντασης N , M_2 , M_3 , τα οποία μπορεί να παραλάβει η διατομή με τον οπλισμό της εξαντλώντας οριακά τα περιθώρια αντοχής της. Επομένως, ο χώρος αντοχής μιας διατομής με συγκεκριμένη διάταξη όπλισης είναι ο γεωμετρικός τόπος των τριάδων (δράσεων)

διαξονικής κάμψης με ορθή δύναμη (N, M_2, M_3), για τις οποίες ο λόγος δράση/αντοχή (=λόγος εξάντλησης=*Capacity Ratio*= CR) είναι ίσος με τη μονάδα. Συμβολίζοντας με τον δείκτη S_d τα μεγέθη σχεδιασμού (διαστασιολόγησης) και με τον δείκτη R_d τις αντίστοιχες οριακές τιμές αντοχής έχουμε:

$$CR = \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} = \frac{M_{Sd2}}{M_{Rd2}} = \frac{M_{Sd3}}{M_{Rd3}} = 1$$

Έτσι κάθε διάνυσμα φόρτισης (δηλαδή κάθε τριάδα δράσεων) με «συντεταγμένες» εντός του χώρου αντοχής αντιστοιχεί σε λόγο εξάντλησης $CR < 1.0$ (βλ. Σχήμα 4β) και συνεπώς μπορεί να παραληφθεί από τη διατομή με τον καθορισθέντα από τον χρήστη οπλισμό της. Αντίθετα, για οπλισμένες διατομές υπό δεδομένη φόρτιση για τις οποίες προκύπτει $CR > 1.0$, το συμπέρασμα είναι ότι αυτές δεν μπορούν να παραλάβουν τη φόρτιση αυτή.

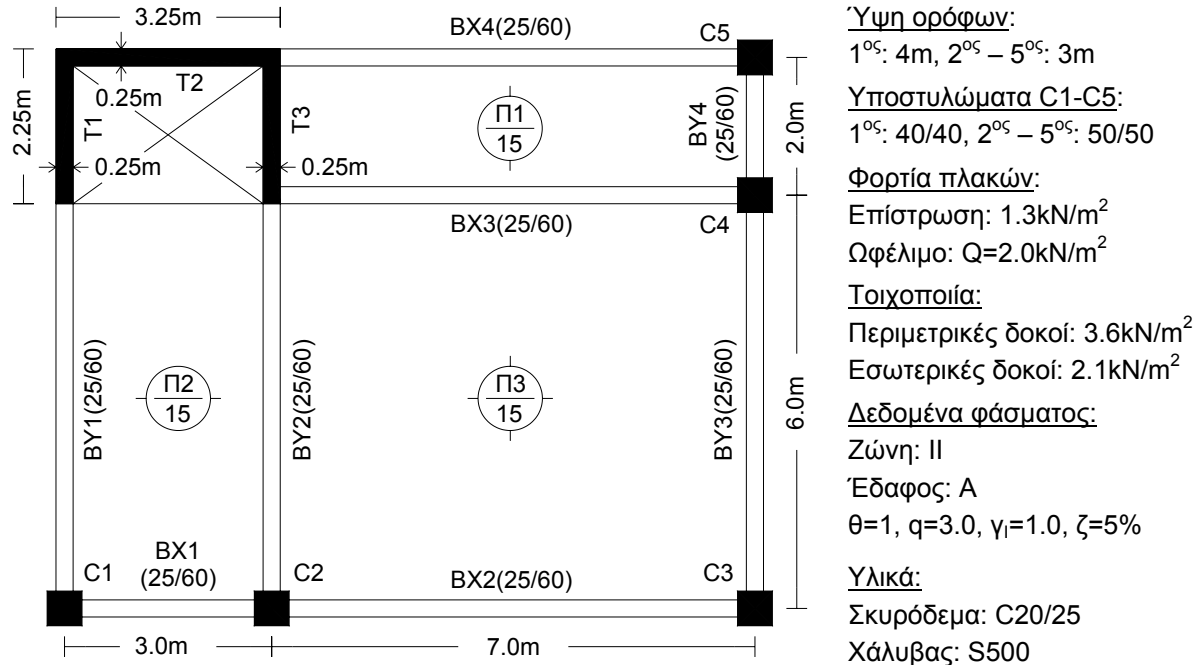


Σχήμα 4. (α) Απεικόνιση του χώρου αντοχής και του ελλειψοειδούς των τριάδων των πιθανών ακραίων και ταυτόχρονων μεγεθών διαξονικής κάμψης με ορθή δύναμη [Πηγή σχήματος: Penelis G.G., Karros A.J. (1997)], (β) Απεικόνιση της τομής του χώρου αντοχής με ένα συγκεκριμένο επίπεδο φόρτισης, και υπολογισμός του αντίστοιχου λόγου εξάντλησης (*Capacity Ratio*) CR .

Το ΡΑΦ δημιουργεί αυτόματα για κάθε εισαγόμενη διατομή με δεδομένη όπλιση τον χώρο αντοχής της και εκτελεί ελέγχους του δείκτη εξάντλησης CR για όλες τις τριάδες μεγεθών διαξονικής κάμψης, για τις οποίες θα πρέπει να ελέγχεται η διατομή αυτή σύμφωνα με τους κανονισμούς (Σχήμα 4α). Τους ελέγχους αυτούς έχει τη δυνατότητα να τους κάνει για όσες διαφορετικές διατάξεις όπλισης έχει ορίσει ο χρήστης/μελετητής για τη συγκεκριμένη διατομή.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Η φιλοσοφία προσομοίωσης και ελέγχου οπλισμού των πυρήνων που υιοθετείται από το ΡΑΦ παρουσιάζεται και αξιολογείται εδώ με τη βοήθεια ενός αριθμητικού παραδείγματος. Το παράδειγμα αυτό αφορά στο πενταώροφο κτίριο του Σχήματος 5.



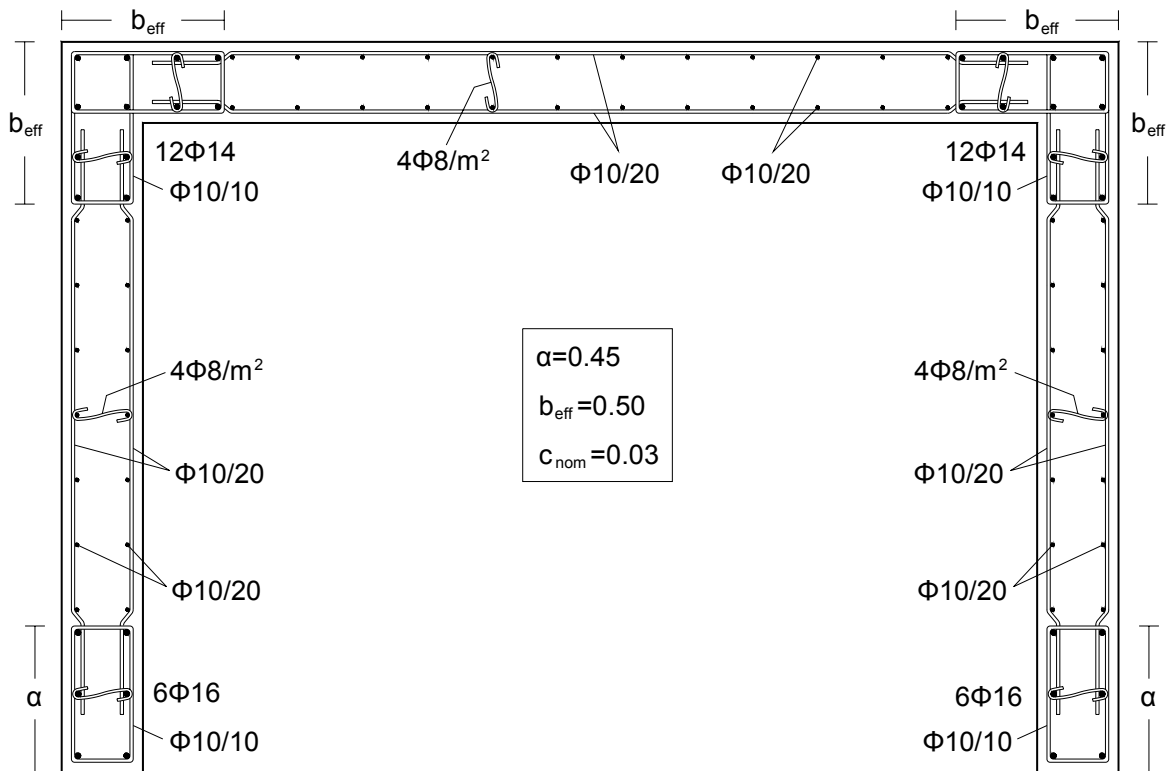
Σχήμα 5. Κάτοψη και γεωμετρικά δεδομένα κτιρίου

Οι λοιπές παραδοχές προσομοίωσης για τις επιλύσεις με το SAP περιγράφονται στο βιβλίο «Πρότυπα Αριθμητικά Παραδείγματα Ανάλυσης Κατασκευών» (2005). Επιπλέον έγιναν και επιλύσεις με το SAP προσαρμόζοντας όμως τις παραδοχές υπολογισμού των αδρανειακών μεγεθών (θέσεις κέντρων μάζας, μάζες και μαζικές ροπές αδράνειας) στις παραδοχές του ΡΑΦ. Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι ο αυτόματος υπολογισμός των αδρανειακών μεγεθών από το ΡΑΦ γίνεται με βάση την πραγματική κατανομή των μαζών των πλακών και των τοιχοποιιών, και όχι με θεώρηση ομοιόμορφης κατανομής της μάζας και συγκέντρωση της στο γεωμετρικό κέντρο βάρους της κάτοψης όπως έχει γίνει στις επιλύσεις των Πρότυπων Αριθμητικών Παραδειγμάτων. Έτσι, η διαδικασία των επιλύσεων που έγιναν είναι η εξής:

- (α) Όπλιση του πυρήνα στη στάθμη πάκτωσης με τη διάταξη του σχήματος 6, η οποία πληρεί όλες τις ελάχιστες απαιτήσεις του ΕΚΟΣ 2000 (Παράγραφος 18.5.1).
- (β) Επίλυση με το ΡΑΦ και όλες τις αυτόματες επιλογές του. Επίλυση: **M3-ΡΑΦ**.
- (γ) Επίλυση με το πρόγραμμα SAP με τις εξής τέσσερις εναλλακτικές εκδοχές:
 - (γ1) Προσομοίωση του πυρήνα με έναν ισοδύναμο στύλο στο ΚΒ της διατομής και έλεγχος επάρκειας της ενιαίας διατομής του στη στάθμη πάκτωσης για την επιλεγμένη διάταξη όπλισης με το πρόγραμμα ελέγχου διατομών ΔΙΑΣΚ/ΤΟΛ[®] (2003). Επίλυση: **M1-SAP**. (Σημ.: Ο υπολογισμός των αδρανειακών μεγεθών έγινε με βάση τις παραδοχές των Πρότυπων Αριθμητικών Παραδειγμάτων).
 - (γ2) Προσομοίωση του πυρήνα με τρεις ισοδύναμους στύλους στα ΚΒ των σκελών, και έλεγχος επάρκειας της ενιαίας διατομής του στη στάθμη πάκτωσης, για την επιλεγμένη διάταξη όπλισης με το πρόγραμμα ΔΙΑΣΚ. Επίλυση: **M3-SAP-TS-S**. (Σημ.: Ο υπολογισμός των αδρανειακών μεγεθών έγινε με βάση τις παραδοχές των Πρότυπων Αριθμητικών Παραδειγμάτων).

(γ3) Διαδικασία ανάλυσης ανάλογη με την εκδοχή (γ2), αλλά με προσαρμογή του υπολογισμού των αδρανειακών μεγεθών στις αυτόματες παραδοχές του ΡΑΦ. Επίλυση: **M3-SAP-TS-P**.

(γ4) Προσομοίωση του πυρήνα με 3 ισοδύναμους σύλους στα ΚΒ των σκελών και έλεγχος επάρκειας των επιμέρους σκελών του στη στάθμη πάκτωσης για την επιλεγμένη διάταξη όπλισης με το πρόγραμμα ΔΙΑΣΚ. Επίλυση: **M3-SAP-SL**. (Σημ.: Ο υπολογισμός των αδρανειακών μεγεθών έγινε με βάση τις παραδοχές των Πρότυπων Αριθμητικών Παραδειγμάτων).



Σχήμα 6. Η διάταξη όπλισης στη στάθμη πάκτωσης του πυρήνα

Με βάση τις επιλύσεις που περιγράφονται παραπάνω έγιναν οι ακόλουθες συγκρίσεις:

- **Κατηγορία Α:** Συγκρίσεις ιδιοπεριόδων ταλάντωσης, μεγεθών έντασης και μεγεθών μετακίνησης μεταξύ των προγραμμάτων SAP και ΡΑΦ (Επιλύσεις M3-SAP-TS-S, M3-SAP-TS-P και M3-ΡΑΦ). Στόχος είναι να αποδειχθεί ότι η αυτόματη δημιουργία του προσομοιώματος με τους τρεις ισοδύναμους σύλους από το ΡΑΦ και η εν συνεχεία επίλυση του είναι αξιόπιστες μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων του με τα αποτελέσματα ενός κατά τεκμήριο αξιόπιστου προγράμματος όπως είναι το SAP.
- **Κατηγορία Β:** Σύγκριση των λόγων εξάντλησης CR της διάταξης όπλισης του σχήματος 6, όπως προκύπτουν από τις επιλύσεις M3-SAP-TS-P και M3-ΡΑΦ. Στόχος είναι η ανάδειξη της αξιοπιστίας του ΡΑΦ σε σύγκριση με το SAP όσον αφορά στη διαδικασία ελέγχου επάρκειας του οπλισμού του πυρήνα.
- **Κατηγορία Γ:** Σύγκριση των λόγων εξάντλησης CR της διάταξης όπλισης του σχήματος 6 για μεγέθη σχεδιασμού που προκύπτουν από τις επιλύσεις M1-SAP και M3-SAP-TS-S. Στόχος είναι να διερευνηθεί η επιρροή του τρόπου προσομοίωσης του πυρήνα επί της επάρκειας μιας συγκεκριμένης διάταξης όπλισης. Για τις συγκρίσεις θεωρήθηκε: $\alpha=2.00$.

- **Κατηγορία Δ:** Σύγκριση μεταξύ των επιλύσεων M3-SAP-TS-P και M3-SAP-SL. Αντικείμενο των συγκρίσεων είναι να αναδειχθούν οι διαφοροποιήσεις που προκύπτουν κατά τον έλεγχο επάρκειας του οπλισμού του πυρήνα, όταν ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται με βάση την ενιαία διατομή (Επίλυση M3-SAP-TS-P) ή ανά σκέλος του πυρήνα (Επίλυση M3-SAP-SL). Ο λόγος για τον οποίον οι συγκρίσεις της κατηγορίας αυτής έγιναν αποκλειστικά με το SAP είναι ότι το ΡΑΦ δεν ενσωματώνει διαδικασία ελέγχου επιμέρους σκελών σε κάμψη. Σημειώνεται, τέλος, ότι έγινε ανάλυση και με $q=2.00$.

Συγκρίσεις Κατηγορίας Α

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές των ιδιοπεριόδων ταλάντωσης για την περίπτωση που οι μάζες τοποθετούνται στη θέση μάζας 1 σύμφωνα με τον ΕΑΚ 2000 (Σχήμα Σ.3.3.2):

Πίνακας 2. Σύγκριση ιδιοπεριόδων ταλάντωσης από τις επιλύσεις με το SAP και ΡΑΦ

	M3-ΡΑΦ	M3-SAP-TS-P		M3-SAP-TS-S	
	(sec)	(sec)	Απόκλιση%	(sec)	Απόκλιση%
T₁	0,53	0,5298	0,04%	0,5381	-1,51%
T₂	0,4112	0,4112	0,00%	0,4133	-0,51%
T₃	0,204	0,2039	0,05%	0,2088	-2,30%
T₄	0,163	0,1631	-0,06%	0,1665	-2,10%
T₅	0,104	0,1038	0,19%	0,1044	-0,38%
T₆	0,0887	0,0887	0,00%	0,0911	-2,63%

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει το συμπέρασμα ότι είτε η επίλυση γίνει με τις παραδοχές του ΡΑΦ για τον υπολογισμό των αδρανειακών μεγεθών (Επίλυση M3-SAP-TS-P) είτε γίνει με τις παραδοχές των Πρότυπων Αριθμητικών Παραδειγμάτων (Επίλυση M3-SAP-TS-S) οι αποκλίσεις μεταξύ των προγραμμάτων SAP και ΡΑΦ είναι πολύ μικρές.

Πίνακας 3. Σύγκριση πιθανών ακραίων τιμών μεγεθών έντασης του στύλου C1 και της δοκού ΒΧ1

		M3-ΡΑΦ	M3-SAP-TS-P		M3-SAP-TS-S	
		Τιμή	Τιμή	Απόκλιση%	Τιμή	Απόκλιση%
Στύλος C1 (Ισόγειο-Πέρας)	extrN	410,6	410,55	0,01%	401,95	2,15%
	extrM₂	69,92	69,97	-0,07%	71,49	-2,20%
	extrM₃	166,92	166,96	-0,02%	166,27	0,39%
	extrV₂	72,59	72,62	-0,04%	72,39	0,28%
	extrV₃	27,47	27,50	-0,11%	28,15	-2,42%
Δοκός ΒΧ11 (Ισόγειο-Αρχή)	extrV₂	135,47	135,47	0,00%	134,68	0,59%
	extrM₃	175,72	175,72	0,00%	174,71	0,58%

Το συμπέρασμα που προκύπτει από τη μελέτη του παραπάνω πίνακα είναι ότι στην περίπτωση που η επίλυση με το SAP γίνεται με χρήση των αδρανειακών μεγεθών που προκύπτουν από την αυτόματη διαδικασία υπολογισμού του ΡΑΦ, τα αποτελέσματα των δύο προγραμμάτων πρακτικά συμπίπτουν. Ακόμα όμως και στην περίπτωση που η επίλυση με το SAP γίνεται με αδρανειακά μεγέθη σύμφωνα με τις παραδοχές των Πρότυπων Αριθμητικών Παραδειγμάτων, οι αποκλίσεις των δύο προγραμμάτων είναι πολύ μικρές και δεν υπερβαίνουν το 2.5%.

Πίνακας 4. Σύγκριση πιθανών ακραίων τιμών των μετακινήσεων στην κορυφή του κτιρίου

		M3-PAΦ	M3-SAP-TS-P		M3-SAP-TS-S	
		Τιμή (m)	Τιμή	Απόκλιση%	Τιμή	Απόκλιση%
Κορυφή κτιρίου Στύλος C1	u_x	0,01865	0,01866	-0,03%	0,01842	1,27%
	u_y	0,01254	0,01254	0,00%	0,01274	-1,57%
	R_z	0,00176	0,00176	-0,09%	0,00178	-1,21%

Από τη μελέτη του παραπάνω πίνακα προκύπτουν συμπεράσματα ανάλογα αυτών που προέκυψαν από τη μελέτη των πινάκων 2 και 3.

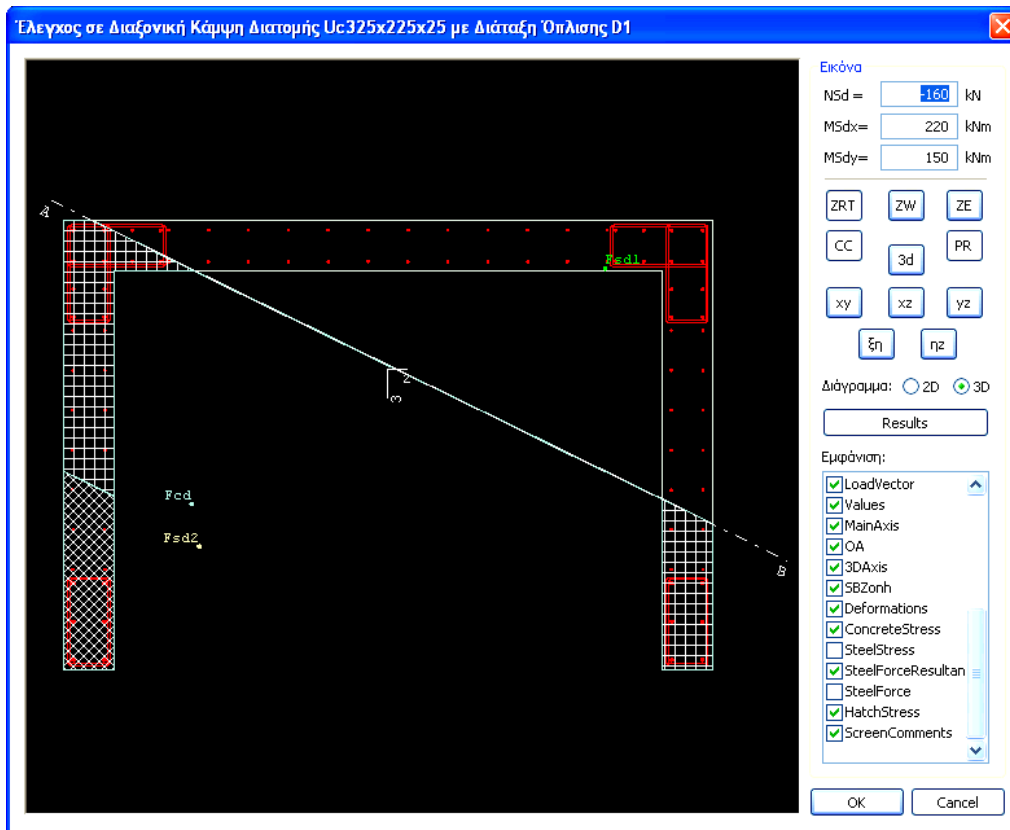
Συγκρίσεις Κατηγορίας B

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τριάδες μεγεθών έντασης για τον έλεγχο σε διαξονική κάμψη της διατομής του πυρήνα στη στάθμη πάκτωσης και οι αντίστοιχοι μέγιστοι λόγοι εξάντλησης όπως προκύπτουν από το PAΦ (Επίλυση M3-PAΦ) και το SAP (Επίλυση M3-SAP-TS-P).

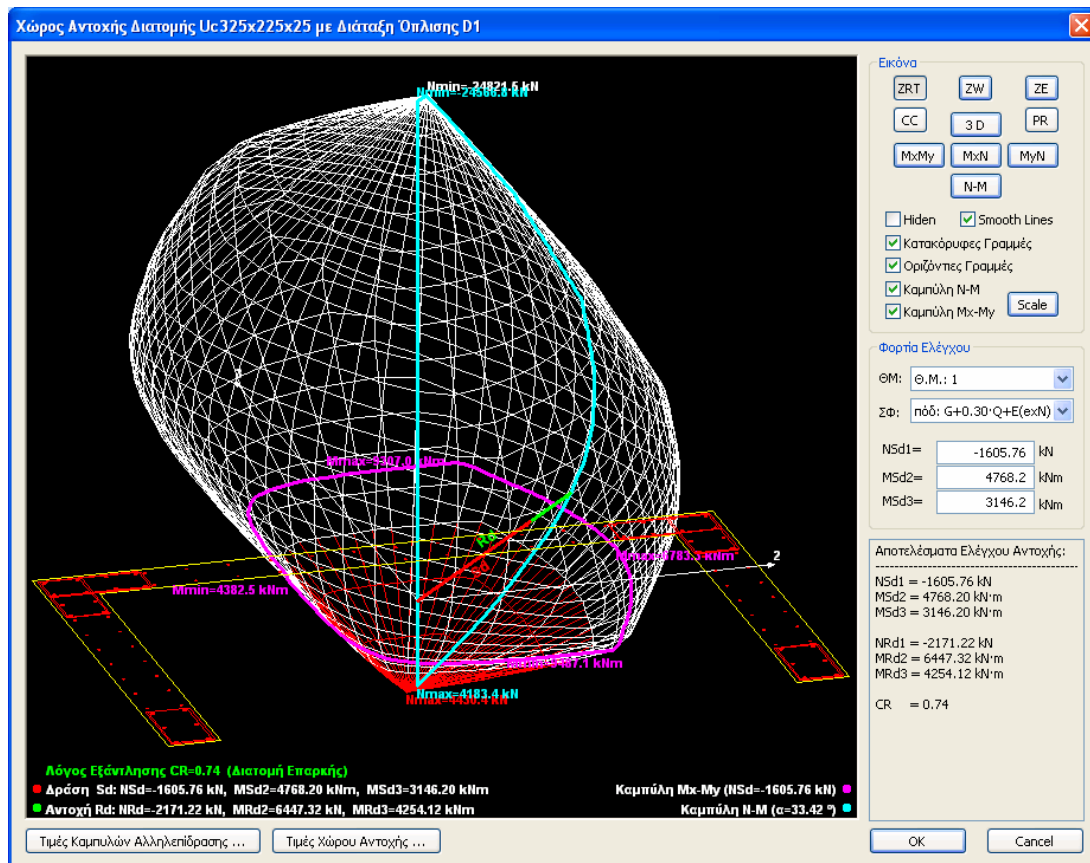
Πίνακας 5. Σύγκριση μεγεθών έντασης και λόγων εξάντλησης από τις επιλύσεις με το PAΦ και το SAP

			N	M ₂	M ₃	maxCR
1.35G+1.50Q		M3-PAΦ	-2945,75	898,47	859,29	0,19
		M3-SAP-TS-P	-2983,85	913,20	825,48	0,19
		Απόκλιση%	-1,28%	-1,61%	4,10%	0,00%
G+03Q±E	ΘM1	M3-PAΦ	-1605,76	4768,21	3146,19	0,74
		M3-SAP-TS-P	-1632,06	4781,27	3119,16	0,74
		Απόκλιση%	-1,61%	-0,27%	0,87%	0,00%
	ΘM2	M3-PAΦ	-1619,57	4439,48	4084,36	0,74
		M3-SAP-TS-P	-1645,67	4449,35	4055,19	0,74
		Απόκλιση%	-1,59%	-0,22%	0,72%	0,00%
	ΘM3	M3-PAΦ	-1616,46	4527,72	3796,15	0,74
		M3-SAP-TS-P	-1642,56	4537,47	3767,08	0,73
		Απόκλιση%	-1,59%	-0,21%	0,77%	1,37%
	ΘM4	M3-PAΦ	-1607,36	4688,14	3489,47	0,74
		M3-SAP-TS-P	-1633,45	4697,99	3460,65	0,74
		Απόκλιση%	-1,60%	-0,21%	0,83%	0,00%

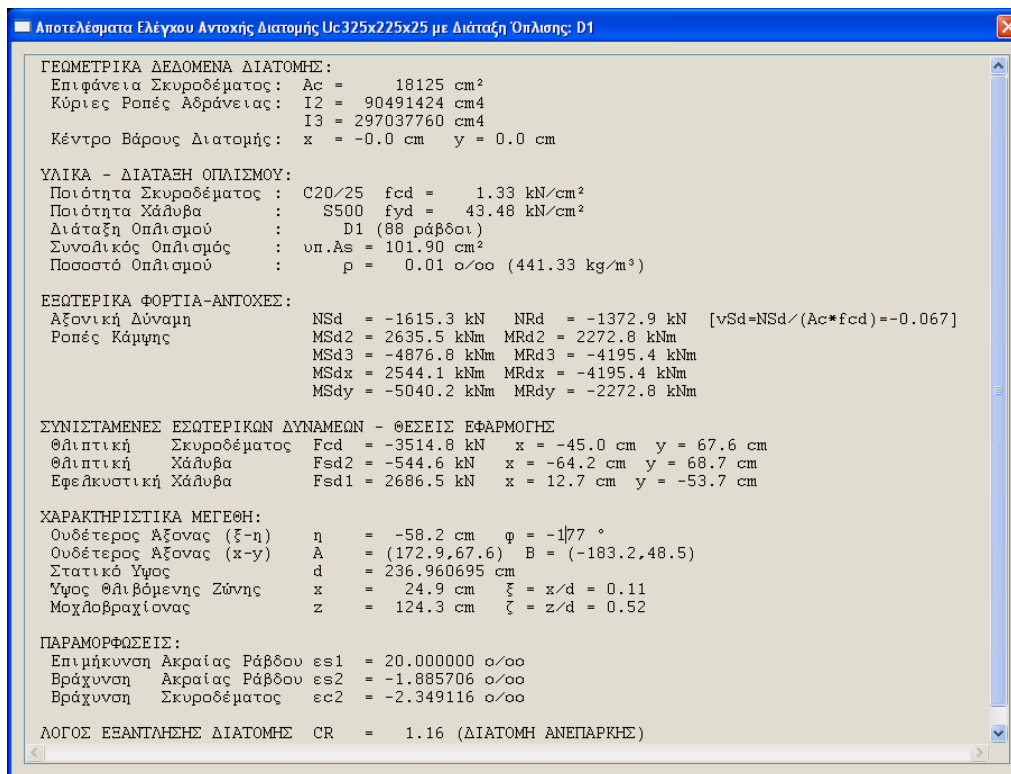
Από τη μελέτη του παραπάνω πίνακα προκύπτει το συμπέρασμα ότι το PAΦ προσεγγίζει πολύ ικανοποιητικά τα αποτελέσματα των αντίστοιχων επιλύσεων με το SAP. Πιο συγκεκριμένα, οι αποκλίσεις των μεγεθών έντασης δεν υπερβαίνουν το 4.1% και η μέγιστη αυτή απόκλιση (4.09%) οφείλεται αποκλειστικά στη μη πλήρη απόδοση της μορφής των τραπεζοειδών φορτίων (που παράγονται αυτόματα στο PAΦ) από το SAP. Πέραν τούτου, οι υπόλοιπες αποκλίσεις των μεγεθών έντασης είναι κάτω του 2%. Το ίδιο ισχύει και για τους λόγους εξάντλησης, για τους οποίους η μέγιστη απόκλιση (1.89%) είναι μικρότερη του 2%. Τέλος, στα παρακάτω σχήματα 7, 8 και 9 παρουσιάζονται ενδεικτικές εικόνες από την οθόνη του PAΦ, όπου φαίνονται χαρακτηριστικά όλα τα στοιχεία που παρέχει στον χρήστη το πρόγραμμα για τον έλεγχο αντοχής σε κάμψη της ενιαίας διατομής του πυρήνα.



Σχήμα 7. Ενδεικτική εικόνα της γραφικής απεικόνισης του ελέγχου αντοχής του πυρήνα από το ΡΑΦ



Σχήμα 8. Ενδεικτική εικόνα της γραφικής απεικόνισης του χώρου αντοχής του πυρήνα από το ΡΑΦ



Σχήμα 9. Ενδεικτική εικόνα του πίνακα αποτελεσμάτων του ελέγχου αντοχής του πυρήνα από το ΡΑΦ

Συγκρίσεις Κατηγορίας Γ

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τριάδες των μεγεθών έντασης για τον έλεγχο σε διαξονική κάμψη της διατομής του πυρήνα στη στάθμη πάκτωσης και οι αντίστοιχοι μέγιστοι λόγοι εξάντλησης, όπως προκύπτουν από τα μοντέλα με έναν (Επίλυση M1-SAP) και τρεις (Επίλυση M3-SAP-TS-S) ισοδύναμους στύλους. Οι τριάδες αυτές είναι οι δυσμενέστερες από τις 25 τριάδες ελέγχου (μία για το συνδυασμό 1.35G+1.50Q και 24 για τους συνδυασμούς G+0.3Q±E) της διατομής σύμφωνα με τους ΕΚΟΣ/2000 και ΕΑΚ/2000.

Πίνακας 6. Σύγκριση μέγιστων λόγων εξάντλησης για τα μοντέλα με 1, και 3 ισοδύναμους στύλους

	N	M ₂	M ₃	CR
M1-SAP	-1421,59	5657,47	4876,38	0,98
M3-SAP-TS-P	-2527,68	-5443,25	-2398,96	1,16

Από τη μελέτη του παραπάνω πίνακα καθίσταται σαφές ότι το μοντέλο με τον ένα ισοδύναμο στύλο αποδίδει λόγο εξάντλησης μικρότερο από τον λόγο εξάντλησης που αποδίδει το μοντέλο με τους τρεις ισοδύναμους στύλους. Ακόμα όμως πιο σημαντικό είναι το συμπέρασμα ότι ενώ ο λόγος εξάντλησης που αποδίδει το μοντέλο με τον ένα στύλο είναι μικρότερος της μονάδας, γεγονός που δηλώνει επάρκεια της επιλεγμένης διάταξης όπλισης, ο λόγος εξάντλησης που αποδίδει το μοντέλο με τους τρεις ισοδύναμους στύλους είναι μεγαλύτερος της μονάδας, γεγονός που δηλώνει ότι η συγκεκριμένη διάταξη όπλισης δεν είναι επαρκής. Δεδομένου ότι το μοντέλο με τους τρεις ισοδύναμους στύλους είναι κατά τεκμήριο ακριβέστερο του μοντέλου με τον ένα ισοδύναμο στύλο, πρόκυπτει έτσι το σημαντικό συμπέρασμα ότι η επίλυση με το δεύτερο δίνει αποτελέσματα που μπορεί να είναι προς την ανασφαλή πλευρά.

Συγκρίσεις Κατηγορίας Δ

Για τις συγκρίσεις της κατηγορίας Δ, ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- Ταξινομήθηκε ο οπλισμός των άκρων και των σημείων σύνδεσης πλάτης-σκελών, που δίνεται στο σχήμα 6 (Διάταξη Δ1), στις τέσσερις περιοχές (I, II, III, IV) του πίνακα 7.
- Ο οπλισμός αυτός ελέγχθηκε τόσο σε επίπεδο της ενιαίας διατομής όσο και ανά σκέλος και υπολογίστηκαν οι σχετικοί λόγοι εξάντλησης.
- Επισημαίνεται ότι με βάση την ταξινόμηση του οπλισμού στις περιοχές του πίνακα 7 τα δύο σκέλη θεωρήθηκε ότι έχουν στο ένα άκρο τον οπλισμό της περιοχής I και στο άλλο των περιοχών III, IV. Αντίστοιχα, η πλάτη θεωρήθηκε ότι σε κάθε ένα από τα άκρα της έχει τον οπλισμό των περιοχών III, IV.
- Έγινε ανάλυση του κτιρίου με συντελεστές συμπεριφοράς $q=3.00$ και $q=2.00$.

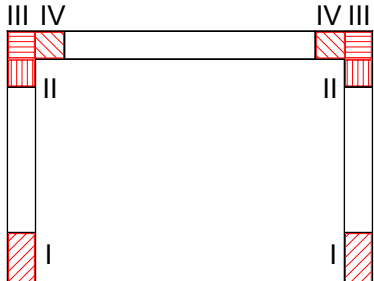
Από την ανάλυση για $q=3.00$ (Πίνακας 7) προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- (α) Ο οπλισμός του σχήματος 6 (Διάταξη Δ1) είναι επαρκής όταν ο έλεγχος γίνει σε επίπεδο ενιαίας διατομής. Το ίδιο ισχύει και για τα δύο σκέλη όταν ελεγχθούν ξεχωριστά.
- (β) Ο οπλισμός της πλάτης δεν είναι επαρκής όταν ελεγχθεί ως ξεχωριστή διατομή.
- (γ) Για να είναι επαρκής ο οπλισμός της πλάτης ($CR=0.95$) θα πρέπει να αυξηθούν οι οπλισμοί των περιοχών III και IV από από 4Φ14 σε 4Φ16 (Διάταξη Δ3).

Επομένως το βασικό συμπέρασμα είναι ότι ο ξεχωριστός έλεγχος των σκελών θα οδηγούσε σε απαίτηση αύξησης του οπλισμού της πλάτης, κάτι το οποίο δεν είναι απαραίτητο αφού σε επίπεδο ενιαίας διατομής επαρκεί ο ελάχιστος οπλισμός του σχήματος 6.

Πίνακας 7. Λόγοι εξάντλησης της ενιαίας διατομής και των σκελών ($q=3.00$)

		ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ				maxCR
		I	II	III	IV	
Δ1	ΕΝΙΑΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗ	6Φ16	4Φ14	4Φ14	4Φ14	0,69
	ΠΛΑΤΗ			4Φ14	4Φ14	1,11
	ΑΡ. ΣΚΕΛΟΣ	6Φ16	4Φ14	4Φ14		0,58
	ΔΕΞ. ΣΚΕΛΟΣ	6Φ16	4Φ14	4Φ14		0,95
Δ2	ΠΛΑΤΗ			4Φ16	4Φ14	1,02
Δ3	ΕΝΙΑΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗ	6Φ16	4Φ14	4Φ16	4Φ16	0,66
	ΠΛΑΤΗ			4Φ16	4Φ16	0,95



Πίνακας 8. Λόγοι εξάντλησης της ενιαίας διατομής και των σκελών ($q=2.00$)

		ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ				maxCR
		I	II	III	IV	
Δ1	ΕΝΙΑΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗ	6Φ16	4Φ14	4Φ14	4Φ14	1,24
	ΠΛΑΤΗ			4Φ14	4Φ14	1,79
	ΑΡ. ΣΚΕΛΟΣ	6Φ16	4Φ14	4Φ14		1,03
	ΔΕΞ. ΣΚΕΛΟΣ	6Φ16	4Φ14	4Φ14		1,72
Δ4	ΕΝΙΑΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗ	8Φ18	4Φ16	4Φ16	4Φ16	0,95
	ΠΛΑΤΗ			4Φ16	4Φ16	1,53
	ΑΡ. ΣΚΕΛΟΣ	8Φ18	4Φ16	4Φ16		0,74
	ΔΕΞ. ΣΚΕΛΟΣ	8Φ18	4Φ16	4Φ16		1,19
Δ5	ΠΛΑΤΗ			4Φ22	4Φ20	1,00
	ΔΕΞ. ΣΚΕΛΟΣ	8Φ20	4Φ20	4Φ22		0,99

Από τον Πίνακα 8 προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- (α) Για να είναι επαρκής ο οπλισμός του πυρήνα κατά τον έλεγχο του ως ενιαία διατομή, αρκεί να τοποθετηθούν στα άκρα και στα σημεία σύνδεσης πλάτης-σκελών συνολικά $24\Phi 16+16\Phi 18$ (Διάταξη Δ4). Το συνολικό εμβαδόν του οπλισμού αυτού είναι 90cm^2 .
- (β) Όταν γίνει έλεγχος της διατομής ανά σκέλος, προκύπτει η ανάγκη τοποθέτησης $4\Phi 22$ στην περιοχή III και $4\Phi 20$ στη περιοχή IV προκειμένου να επαρκεί οριακά ο οπλισμός της πλάτης. Αντίστοιχα, θα πρέπει να τοποθετηθούν για τα δύο σκέλη $8\Phi 20$ στη περιοχή I, $4\Phi 20$ στη περιοχή II, και τα υπάρχοντα από τις ανάγκες της πλάτης $4\Phi 22$ στη περιοχή III, έτσι ώστε να επαρκούν και αυτά. Συνολικά λοιπόν απαιτούνται για τη διατομή του πυρήνα: $32\Phi 20+8\Phi 22$. Το συνολικό εμβαδόν του οπλισμού αυτού είναι 131cm^2 .
- (γ) Απαιτείται αύξηση του συνολικού εμβαδού του οπλισμού των άκρων και των σημείων σύνδεσης πλάτης-σκελών κατά 45%, εάν ο έλεγχος της αντοχής του πυρήνα γίνει ανά σκέλος και όχι επί της ενιαίας διατομής.

Επομένως, από τους δύο παραπάνω πίνακες προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο ανά σκέλος έλεγχος μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες αποφάσεις ενίσχυσης του οπλισμού. Οι εσφαλμένες αυτές αποφάσεις έχουν ως τίμημα την αύξηση του κόστους, καθώς με τον έλεγχο αντοχής της ενιαίας διατομής λαμβάνεται ορθά υπόψη η κοινή λειτουργία όλων των ράβδων του πυρήνα κατά την παραλαβή των φορτίων διατομής. Η αύξηση του κόστους είναι πολύ πιο σημαντική για μικρότερες τιμές του q .

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία περιγράφηκε αναλυτικά η μέθοδος με την οποία γίνεται η προσομοίωση και ο έλεγχος αντοχής σε κάμψη των πυρήνων από το πρόγραμμα υπολογισμού κτιριακών κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος ΡΑΦ του ΤΟΛ®. Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην πλέον αξιόπιστη ισοδύναμη πλαισιακή προσομοίωση των πυρήνων με τοποθέτηση ισοδυνάμων στύλων στα κέντρα βάρους των σκελών τους, ενώ ο έλεγχος σε κάμψη γίνεται βάσει του χώρου αντοχής της οπλισμένης ενιαίας διατομής του πυρήνα, καταπονούμενης σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη.

Οι συγκεκριμένες επιλογές του ΡΑΦ για την προσομοίωση και τον έλεγχο αντοχής των πυρήνων παρουσιάστηκαν και αξιολογήθηκαν εδώ με τη βοήθεια ενός αριθμητικού παραδείγματος που περιλαμβάνει πυρήνα διατομής Π. Από τις επιλύσεις του παραδείγματος αυτού προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η αυτόματη δημιουργία του ισοδύναμου πλαισιακού προσομοιώματος του πυρήνα με τρεις ισοδύναμους στύλους και η εν συνεχεία επίλυση του από το ΡΑΦ είναι αξιόπιστη καθώς αποδίδει αποτελέσματα τα οποία συγκλίνουν σε πολύ μεγάλο βαθμό προς τα αποτελέσματα που αποδίδει το αξιόπιστο πρόγραμμα ανάλυσης κατασκευών SAP2000.
- Τα μεγέθη έντασης της ενιαίας διατομής, τα οποία προκύπτουν από την επίλυση προσομοιώματος με έναν ισοδύναμο στύλο, είναι δυνατό να οδηγήσουν σε αποτελέσματα ελέγχων αντοχής που συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του γενικώς ακριβέστερου προσομοιώματος με τους τρεις ισοδύναμους στύλους δεν είναι προς την πλευρά της ασφάλειας.
- Ο ανά σκέλος έλεγχος της διατομής είναι δυνατό να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα επάρκειας/μη επάρκειας και επομένως σε λάθος αποφάσεις για την ενίσχυση του οπλισμού της διατομής.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ ή ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αβραμίδης Ι., Αθανατοπούλου Α., Αναστασιάδης Κ., Μορφίδης Κ. (2005), «Πρότυπα Αριθμητικά Παραδείγματα Ανάλυσης Κατασκευών», Εκδόσεις Αϊβάζη, Θεσσαλονίκη.
- Αβραμίδης Ι.Ε., Ξενίδης Χ. (1991), «Συστηματική διερεύνηση των ανεπαρκειών του μοντέλου του ισοδυνάμου πλαισίου κατά την προσομοίωση ανοικτών πυρήνων Ο/Σ», Πρακτικά 10^{ου} Ελλην. Συνεδρίου Σκυροδέματος, Ρόδος, том. Ι, σελ. 179-186.
- Αβραμίδης Ι.Ε. (1993), «Κριτική του μοντέλου του ισοδυνάμου πλαισίου για τοιχεία και πυρήνες πολυωρόφων κτιρίων Ο/Σ». Τεχνικά Χρονικά, том.13, τεύχ. 3, σελ. 135-170.
- Αναστασιάδης Κ. (1991), «Αντισεισμικές Κατασκευές», Πρώτη Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Chopra K.A. (2001), "Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering", Second Edition, Prentice Hall, New Jersey USA.
- ΔΙΑΣΚ v2.0 (2003), Πρόγραμμα υπολογισμού ΔΙΑτομών οπλισμένου Σκυροδέματος, Τεχνικός Οίκος Λογισμικού (ΤΟΛ[®]), Ηράκλειο Κρήτης.
- ΕΑΚ/2000, *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (2000)*, ΟΑΣΠ, Αθήνα.
- ΕΚΟΣ/2000 *Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος (2001)*, ΟΑΣΠ-ΣΠΜΕ, Αθήνα.
- Ξενίδης Χ., Αβραμίδης Ι.Ε. (1992), «Τεκμηρίωση βασικών ανεπαρκειών της πλαισιακής προσομοίωσης ημιανοικτών και κλειστών πυρήνων Ο/Σ», Πρακτικά 1^{ου} Ελληνικού Συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, Αθήνα, σελ. 96-105.
- Ξενίδης Χ., Αβραμίδης Ι.Ε., Τριαματάκη Μ. (1998), «Συγκριτική Αξιολόγηση Απλοποιημένων Προσομοιωμάτων για Πυρήνες Κτιρίων Ο/Σ υπό Στατική και Δυναμική φόρτιση», Τεχνικά Χρονικά, Σειρά Ι, том. 18, τεύχ. 3, σελ. 9-25.
- Penelis G.G., Kappos A.J. (1997), "Earthquake-Resistant Concrete Structures", First Edition, E & FN SPON, London UK.
- SAP Non-Linear Version 7.44. (2001), Integrated finite element analysis and design of structures. Berkeley, California, USA: Computers and Structures, Inc.
- Werner H. (1974), "Schiefe Biegung polygonal umrandeter Stahlbeton-Querschnitte", Beton und Stahlbetonbau, 4, pp. 92-97.
- Xenidis H., Morfidis K., Avramidis I.E. (2000), "Modeling of two-cell cores for three-dimensional analysis of multi-story buildings", The Structural Design of Tall Buildings, 9, pp. 343-363.