

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΕΙΣΗΓΗΣΗ:
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ
ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΠΡΑΞΗ**

Ιωάννης Ε. Αβραμίδης
Καθηγητής Στατικής & Δυναμικής των Κατασκευών
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ.
avram@civil.auth.gr, <http://users.auth.gr/avram>

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το γνωστικό πεδίο της Ανάλυσης των Κατασκευών είναι τεράστιο. Ακόμη κι αν το περιορίσουμε - όπως θα ήταν εύλογο στα πλαίσια του παρόντος συνεδρίου - σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος ή και ακόμη περισσότερο - κι αυτό εύλογο εφόσον μας ενδιαφέρει πρωτίστως ο σεισμογόνος ελληνικός χώρος - σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος υπό σεισμικές δράσεις, το εύρος του παραμένει πολύ μεγάλο για να μπορέσουν έστω και στοιχειωδώς να καλυφθούν οι εξελίξεις των τελευταίων ετών σε μια ολιγοσέλιδη εισήγηση. [Πάντως, μια εικόνα - αν και βέβαια όχι πλήρη και εξαντλητική - για τις νεότερες προόδους στο τομέα αυτόν στην Ελλάδα αλλά και διεθνώς αποκομίζει κανείς από τη μελέτη των ευάριθμων ανακοινώσεων που εντάσσονται στις συνεδρίες "Ανάλυση" και "Αντισεισμικός Σχεδιασμός-Ανάλυση" των Πρακτικών του συνεδρίου.] Αντ' αυτού, στην παρούσα εισήγηση προτίμησα να αναφερθώ επιλεκτικώς σε ορισμένα μόνο θέματα και να διατυπώσω επ' αυτών σκέψεις και απόψεις που θα μπορούσαν να αποτελέσουν το έναυσμα για τη δημιουργία ενός σχετικού προβληματισμού, πιστεύοντας ότι στη "γρήγορη" εποχή που ζούμε μια μικρή "στάση" για στοχασμό και αναστοχασμό ίσως και να είναι χρήσιμη. Τα θέματα αυτά αφορούν στον ρόλο της προσομοίωσης (μοντελοποίησης), δηλαδή της "μετάφρασης" της πραγματικής συμπεριφοράς των κατασκευών σε υπολογιστικά προσομοιώματα (μοντέλα), με ιδιαίτερη αναφορά στις νεότερες εξελίξεις στο πεδίο της μη γραμμικής (ανελαστικής) σεισμικής ανάλυσης. Προκαταρκτικά διατυπώνονται με άκρα συντομία ορισμένες παρατηρήσεις που αφορούν στην εξέλιξη των υπολογιστικών μοντέλων.

2 ΣΚΕΨΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

Έχω ακούσει την άποψη ότι οι Μηχανικοί είναι τεχνικά "ανιστόρητοι". Ο χαρακτηρισμός δεν είναι ίσως άστοχος, αν με αυτόν υπονοείται ότι οι Μηχανικοί δεν γνωρίζουν παλιότερες μεθόδους υπολογισμού. Πράγματι, για τη δουλειά τους στην καθημερινή πράξη οι Μηχανικοί καλύπτονται σχεδόν πλήρως από υπολογιστικές μεθοδολογίες της εκάστοτε προηγούμενης δεκαετιας - αν όχι και λιγότερο. Από την άλλη πλευρά βέβαια ας μην παραβλέπουμε το γεγονός ότι παλιές ιδέες ζουν και βασιλεύουν, όπως π.χ. η έννοια του μέτρου ελαστικότητας.

- *Η δυσκολία μετατροπής της τεχνικής πείρας σε υπολογιστικά μοντέλα*

Εντούτοις, είναι αξιοσημείωτη η κατ' αρχήν δυσκολία με την οποία η πείρα και η εμπειρία των Μηχανικών μετατρέπεται σε υπολογιστικά μοντέλα (Σημ.: Παρά το ελληνοπρεπέστερο του όρου

"προσομοίωμα", χρησιμοποιείται στο κείμενο αυτό χωρίς αναστολές και ο όρος "μοντέλο" ως απολύτως ισότιμος. Το ίδιο ισχύει για τους όρους "προσομοίωση" και "μοντελοποίηση"). Πράγματι, αν και από την αρχαιότητα μέχρι την αναγέννηση κατασκευάστηκαν αξιοθαύμαστα τεχνικά έργα (βλ. Σχ. 1), τα διαθέσιμα μαθηματικά εργαλεία παρέμειναν σ' όλο αυτό το χρονικό διάστημα (άνω των δύο χιλιετιών) ίδια με εκείνα της εποχής του Θαλή του Μιλήσιου (~625-546 π.Χ.) και του Πυθαγόρα (~582-500 π.Χ.). Μόλις το 1638 μ.Χ. αναρωτιέται ο Γαλιλαίος για το πώς άραγε φέρει τα φορτία της μια απλή πακτωμένη δοκός (Σχ. 2) και αναπτύσσει μια - δυστυχώς λανθασμένη - σχετική θεωρία (Szabo 1977). Ήδη όμως 1800 χρόνια πριν από τον Γαλιλαίο οι Ρωμαίοι κατασκεύαζαν αξιόλογες γέφυρες και εντυπωσιακές θολωτές κατασκευές.



Θολωτός τάφος στις Μυκήνες (περί το 1300 π.Χ.)



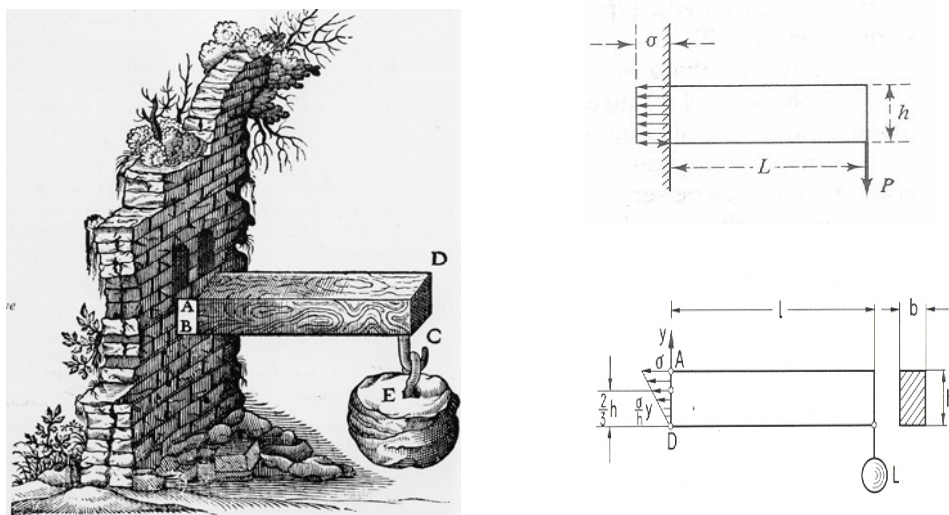
Αγ. Σοφία (532-537, Ισίδωρος & Ανθέμιος)



Σχ. 1 Σημαντικά τεχνικά έργα στην "προ-επιστημονική" εποχή

Γιατί τόσο δυστοκία; Μήπως δεν είναι τόσο αυτονόητη η "μεταγραφή" της τεχνικής πείρας σε λιγότερο ή περισσότερο αφηρημένα υπολογιστικά μοντέλα; Όπως παρατηρεί ο Duddeck (Duddeck 1993), ο τύπος $M = \max \sigma \cdot b \cdot h^2 / 6$, ο οποίος συνδέει τάσεις και ροπές σε μια ορθογωνική διατομή και φαντάζει σήμερα αυτονόητος σε κάθε πρωτοετή φοιτητή Πολιτικό Μηχανικό, απαίτησε την

πάροδο ακόμη 135 ετών για να αναπτυχθεί από τον Coulomb το 1773, δηλαδή 135 ολόκληρα χρόνια μετά την πρώτη προσπάθεια του Γαλιλαίου. Ενδιάμεσα μεσολάβησε μεγάλη σειρά λανθασμένων προτάσεων, όπως π.χ. αυτή του διάσημου Mariotte το 1686 (βλ. Σχ. 2). Όσον αφορά δε στο προαναφερθέν μέτρο ελαστικότητας, την ιδέα του οποίου εισηγήθηκε ο Hooke το 1678 υπό μορφή της περίφημης ρήσεως "ut tensio sic vis" (δηλαδή, ένα σώμα επιμηκύνεται σε αναλογία με την εφελκυστική δύναμη που το καταπονεί), η συγκεκριμενοποίησή του υπό τη μορφή του σήμερα χρησιμοποιούμενου μέτρου ελαστικότητας E έγινε από τον Euler το 1744, δηλαδή 64 χρόνια αργότερα και περισσότερο από έναν αιώνα μετά την πρώτη προσπάθεια του Γαλιλαίου. Ας σημειωθεί επίσης ότι η απλή και αυτονόητη σήμερα διαφορετική εξίσωση της καμπτόμενης δοκού, οικεία στους φοιτητές των μικρών ήδη εξαμήνων, διατυπώθηκε μόλις το 1826 από τον Navier.



Σχ. 2 Πακτωμένη δοκός-πρόβολος από τη μελέτη του Γαλιλαίου "Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno a due nuove scienze" (1638) - Λανθασμένες κατανομές τάσεων (άνω: κατά Γαλιλαίο, κάτω: κατά Mariotte-1686)

· "Στατικό αισθητήριο" και υπολογιστικά μοντέλα

Τα Μαθηματικά υπάρχουν εδώ και 2500 χρόνια, αλλά η απλούστερη των θεωριών για την κάμψη των δοκών έχει ηλικία μόλις 170 χρονών. Η σύλληψη της γενικότερης ιδέας των "νοητών τομών" και των "εσωτερικών μεγεθών έντασης" έγινε τον 19^ο αιώνα, αλλά ήδη στην αρχαία Βαβυλώνα κατασκευάζονταν αξιόλογα κτίρια και υπήρχε μάλιστα και σύστημα ποινών για τους μηχανικούς-κατασκευαστές της εποχής σε περίπτωση κατάρρευσης - και όχι μόνο (Κώδικας του Χαμουραμπί, περί το 1800 π.Χ.). Δεν είναι εντυπωσιακό ότι υπερνοήμονες και χαρισματικοί ερευνητές χρειάστηκαν πάνω από έναν αιώνα, από τον Γαλιλαίο έως τον Euler, για να ορίσουν με σαφήνεια ένα μέτρο ελαστικότητας και να το εισάγουν σε μια στοιχειώδη θεωρία κάμψης; Μοιάζει να ήταν σχετικά εύκολο στους ανθρώπους να μετουσιώσουν τις εμπειρίες και την πείρα τους σε στατική διαίσθηση (Το "στατικό αισθητήριο" είναι όντως παλιά ιστορία!), την οποία μάλιστα μπορούσαν να την αξιοποιήσουν για την υλοποίηση μεγάλων έργων και εν μέρει να την μεταδώσουν σε νεότερους, ενώ ήταν σαφώς δυσκολότερη η "μετάφραση" της φέρουσας συμπεριφοράς μιας απλής δοκού σε ένα νοητικό μοντέλο, το οποίο να μπορεί να εφαρμοστεί για οποιαδήποτε δοκό.

Σ' αυτή την πραγματική διαπίστωση εδράζεται η και σήμερα ισχύουσα άποψη, ότι τα αποτελέσματα των όποιων υπολογισμών πρέπει να ικανοποιούν το στατικό αισθητήριο του μελετητή (αρκεί βέβαια αυτό να υφίσταται) και ότι αν κάτι στα αριθμητικά αποτελέσματα μιας επίλυσης φαίνεται λανθασμένο στον έμπειρο μελετητή, πιθανότατα είναι πράγματι λανθασμένο.

Στην ίδια πραγματική διαπίστωση εδράζονται όμως και λιγότερο αποδεκτές απόψεις, όπως π.χ. ότι "εάν ο θόλος της Αγίας Σοφίας κατασκευάστηκε χωρίς μαθηματικά και χωρίς υπολογιστικά μοντέλα, τότε μπορεί κάλλιστα να επισκευαστεί ή και να ενισχυθεί χωρίς αυτά" - άποψη που αποποιείται των δυνατοτήτων σύγχρονων μεθόδων και μέσων ανάλυσης.

· *Η σύλληψη υπολογιστικών προσομοιωμάτων*

Η διείσδυση σε νέα πεδία και η ρεαλιστική εξιδανίκευση της μηχανικής συμπεριφοράς κατασκευών σε υπολογιστικά μοντέλα είναι πράγματι δύσκολη υπόθεση - ακόμη και σήμερα. Ίσως η δυσκολία να συνίσταται στο ότι τα μοντέλα δεν προκύπτουν ούτε με απλή παρατήρηση του όποιου φυσικού φαινομένου ούτε με λογική επαγωγή και διαδικασίες ρουτίνας από κάποια αξιώματα. Αντίθετα, η εφεύρεση ή σύλληψη ενός μηχανικού-υπολογιστικού μοντέλου απαιτεί μεγάλο βαθμό διαισθητικής εξοικείωσης με το υπό εξήγηση φαινόμενο και - το κυριότερο - δημιουργική φαντασία. Επειδή όμως η φαντασία υποδαυλίζεται και από την επιθυμία, την επιθυμία να είναι η πραγματικότητα έτσι όπως θα θέλαμε ή όπως θα μας βόλευε να είναι, τα αρχικά μοντέλα μας σπανίως αποδεικνύονται ρεαλιστικά - κι όταν γίνονται ρεαλιστικά, γίνονται μετά από πολλές προσπάθειες, δικές μας και άλλων ερευνητών. Γι' αυτό γενικώς ισχύει ότι υπολογιστικά μοντέλα που δεν έχουν υποστεί τη πειραματική ή πραγματική δοκιμασία (π.χ. σεισμός) διατρέχουν τον κίνδυνο να είναι με μεγάλη πιθανότητα λανθασμένα.

· *Η ταχύτητα εξέλιξης υπολογιστικών προσομοιωμάτων*

Εντούτοις, από τη στιγμή που εδραιωθεί επιστημονικά μια θεμελιώδης ιδέα, μια βασική θεωρία ή ένα κατ' αρχήν ρεαλιστικό υπολογιστικό μοντέλο, η περαιτέρω βελτίωση/εξέλιξη/διεύρυνσή της/του ακολουθεί άλλες, πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες. Έτσι, π.χ., την ουσιαστική ολοκλήρωση της κλασικής Μεθόδου Δυνάμεων για την επίλυση υπερστατικών φορέων από τον Müller-Breslau στο τέλος του 19^{ου} ακολούθησε με γρήγορους ρυθμούς η ανάπτυξη πληθώρας νέων ιδεών, μεθόδων και τεχνικών που ξεκινώντας από τη γενικευμένη Τεχνική Θεωρία Κάμψης της σχολής του Darmstadt φθάνουν έως τις μη γραμμικές θεωρίες για κάθε είδους μη γραμμικότητα, υλική ή γεωμετρική. Σήμερα, βοηθώντας και των ηλεκτρονικών υπολογιστών, οι ρυθμοί παρουσίασης νέων ιδεών, τεχνικών και μεθόδων έχουν γίνει ραγδαίοι. Ιδιαίτερα ενδιαφέρον παράδειγμα ταχύτατων εξελίξεων αποτελούν οι μέθοδοι υπερωθητικής ανάλυσης (pushover analysis), οι οποίες θα σχολιαστούν εν συντομία στην παράγραφο 5.

3 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΗ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

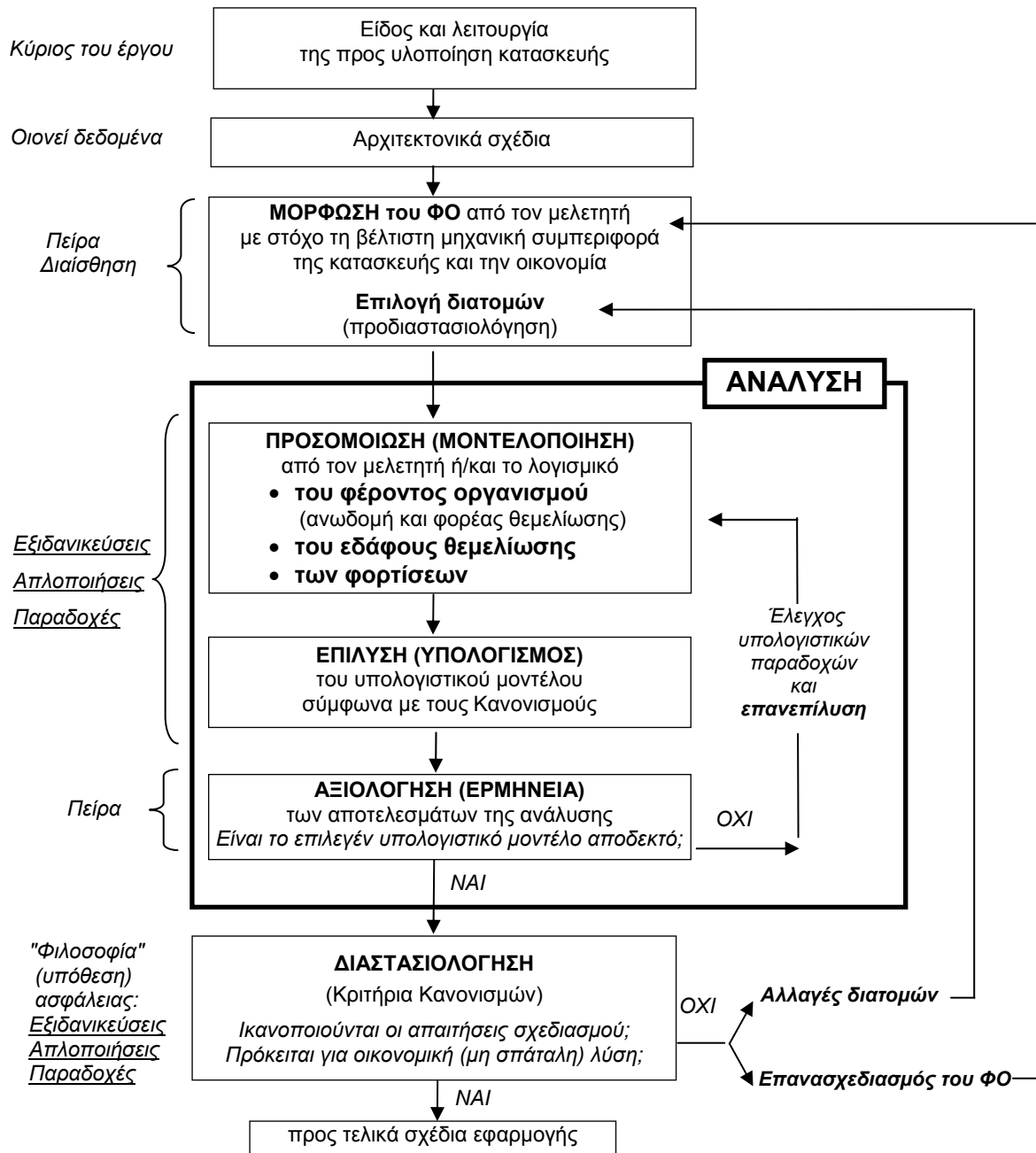
Προκειμένου οι σύγχρονες κατασκευές να ικανοποιούν απαιτήσεις σχεδιασμού όπως π.χ.:

- να λειτουργούν ικανοποιητικά καθ' όλη την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής τους,
- να μην υφίστανται μη προβλεπόμενες βλάβες,
- να μη δημιουργούν κινδύνους για το ανθρώπινο και το υλικό περιεχόμενό τους,

χρειαζόμαστε ρεαλιστικά μοντέλα που να μπορούν να "συλλάβουν" και να προβλέψουν την πραγματική μηχανική συμπεριφορά των κατασκευών μας σε βάθος 50 ή και 100 ετών. Εν προκειμένω τίθενται ερωτήματα όπως π.χ.:

- Ποιά υπολογιστικά μοντέλα διαθέτουμε σήμερα μεταξύ των οποίων μπορούμε να επιλέξουμε;
- Ποιές παραδοχές υπεισέρχονται στα μοντέλα αυτά;
- Σε τί βαθμό καλύπτουν τα διαθέσιμα μοντέλα τις προαναφερθείσες απαιτήσεις σχεδιασμού;
- Σε ποιά ορθολογικά σκεπτικά στηρίζεται η εμπιστοσύνη μας στα μοντέλα αυτά;
- Σε ποιά σημεία θα πρέπει να τα βελτιώσουμε;
- Τέλος, εν μέσω του "κατακλυσμού" νέων προτάσεων για βελτίωση/επέκταση/εκλέπτυνση παλιών υπολογιστικών μοντέλων και για εισαγωγή στην πράξη νέων μεθοδολογιών, που με επιταχυνόμενο ρυθμό παρουσιάζονται από ερευνητές στη διεθνή επιστημονική κοινότητα, είναι εύλογο να αναρωτιέται κανείς "προς τα πού πάει η εξέλιξη της τεχνολογίας".

Προκειμένου να δοθούν απαντήσεις σ' αυτά τα ερωτήματα θα πρέπει να διασαφηνιστεί η έννοια του "προσομοιώματος" και να συνειδητοποιηθούν τα σημεία που υπεισέρχεται η προσομοίωση στον διανοητικό άθλο που λέγεται "δομοστατική μελέτη" (Σημ.: Τον χαρακτηρισμό "άθλο" τον εννοώ κυριολεκτικά.). Προς τούτο είναι χρήσιμη η διάκριση μεταξύ των "ερευνητικών προσομοιωμάτων" και των "τεχνικών προσομοιωμάτων εφαρμογής" που θα περιγραφούν παρακάτω. Προηγουμένως όμως ας θυμηθούμε τα κύρια στάδια που διέρχεται μια δομοστατική μελέτη από την αρχική ιδέα έως τα κατασκευαστικά σχέδια εφαρμογής. Ένα σχετικό διάγραμμα ροής εργασιών που δόθηκε σε παλαιότερη εισήγηση (Αβραμίδης 2003) δίνεται εδώ παραλλαγμένο (βλ. Σχ. 3) με τρόπο που τονίζει εντονότερα εκείνα τα σημεία της δομοστατικής μελέτης όπου η προσομοίωση παίζει καθοριστικό ρόλο.



Σχ. 3 Τα στάδια που διέρχεται η δομοστατική μελέτη μιας κατασκευής

· *Η προσομοίωση στην ανάλυση*

Μετά την πρώτη και ιδιαίτερα σημαντική φάση της μόρφωσης (σχεδιασμού) του φέροντος οργανισμού από τον μελετητή Πολιτικό Μηχανικό (η οποία περιλαμβάνει όχι μόνο τη σύλληψη του φορέα, αλλά και την προδιαστασιολόγηση, δηλαδή τον κατ' αρχάς καθορισμό των διατομών βάσει εμπειρικών εκτιμήσεων) και πριν αρχίσουν οι απαιτούμενοι υπολογισμοί, ακολουθεί η φάση της προσομοίωσης. Οι διάφορες σχετικές εξιδανικεύσεις, απλοποιήσεις και παραδοχές αφορούν στα γεωμετρικά μεγέθη (π.χ. διαστάσεις πλακοδοκού), στην υλική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων (ελαστική-ανελαστική, απολύτως στερεά διαφράγματα κτλ.), στην κατανομή της μάζας της κατασκευής (π.χ. συγκέντρωση στο κέντρο βάρους των ορόφων ή κατανεμημένη) και σε μια σειρά άλλων παραγόντων.

Η προσομοίωση της κατασκευής δεν περιλαμβάνει βέβαια μόνο το μοντέλο της ανωδομής, αλλά και το μοντέλο του φορέα θεμελίωσης του κτιρίου (π.χ. εσχάρα πεδιλοδοκών, κοιτόστρωση κτλ.), το μοντέλο του εδάφους θεμελίωσης (π.χ. ακλόνητες ή ελαστικές στηρίξεις κατά Winkler) και - ιδιαίτερα για κατασκευές που υπόκεινται σε σεισμική δράση - το μοντέλο της φόρτισης. Το μοντέλο φόρτισης περιγράφεται για συνήθεις κατασκευές σχεδόν πλήρως από τους ισχύοντες Κανονισμούς. Αντίθετα, για την προσομοίωση ανωδομής-θεμελίωσης-εδάφους οι Κανονισμοί δίνουν μόνον ορισμένες γενικές οδηγίες, αφήνοντας τη συγκεκριμενοποίηση των μοντέλων στην κρίση του μελετητή (π.χ. προσομοίωση πυρήνων). Η διαδικασία της προσομοίωσης του πραγματικού φορέα αποτελεί μια φάση της εργασίας του πολιτικού μηχανικού εξίσου δημιουργική με εκείνη της μόρφωσης του φέροντος οργανισμού, αφού προϋποθέτει τη σε βάθος κατανόηση της πραγματικής μηχανικής συμπεριφοράς της κατασκευής.

Τη φάση αυτή της προσομοίωσης ακολουθούν οι φάσεις των επιλύσεων του προσομοιώματος, της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων και της ενδεχόμενης επανεπίλυσής του μετά από αναγκαίες τροποποιήσεις του προσομοιώματος. Το τρίπτυχο «προσομοίωση-επίλυση-αξιολόγηση» συνιστά το περιεχόμενο της «ανάλυσης» μιας κατασκευής (ακριβέστερα: του φέροντος οργανισμού της).

· *Η προσομοίωση στη διαστασιολόγηση*

Εφόσον τα αποτελέσματα των υπολογισμών κριθούν ικανοποιητικά, προχωρούμε στη φάση της διαστασιολόγησης (ή του ελέγχου των προδιαστασιολογημένων διατομών), της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της και της ενδεχόμενης τροποποίησης του αρχικού φορέα (αλλαγές επί μέρους διατομών ή/και τροποποιήσεις του φέροντος οργανισμού). Στην τελευταία περίπτωση ακολουθεί η επανεπίλυση του αντίστοιχα τροποποιημένου προσομοιώματος του φέροντος οργανισμού. Μέσω της επαναληπτικής αυτής διαδικασίας μπορούν να βελτιωθούν οι αρχικές (εμπειρικές) επιλογές των διατομών, αλλά ενδεχομένως και η αρχική (διαισθητική) σύλληψη του φέροντος οργανισμού. Είναι σαφές ότι στις διαδικασίες διαστασιολόγησης εμπεριέχεται μεγάλο πλήθος εξιδανικεύσεων, απλοποιήσεων και παραδοχών - από τους νόμους τάσεων-παραμορφώσεων για σκυρόδεμα και χάλυβα έως το συνολικό σκεπτικό της ασφάλειας έναντι οριακών καταστάσεων.

· *Το υπολογιστικό προσοίωμα της κατασκευής*

Το σύνολο των εξιδανικεύσεων, απλοποιήσεων και παραδοχών που γίνονται στα διάφορα στάδια μιας δομοστατικής μελέτης συνθέτουν το "υπολογιστικό προσοίωμα" της κατασκευής. Συχνά, το προσοίωμα που αφορά στην ανάλυση χαρακτηρίζεται και ως "μηχανικό" προσοίωμα ή ακόμη και ως "μαθηματικό" προσοίωμα. Σε κάθε περίπτωση πρόκειται για ένα επί μέρους υπολογιστικό προσοίωμα, το οποίο μαζί με τις προσομοιώσεις που αφορούν στη διαστασιολόγηση αποτελεί το συνολικό προσοίωμα της όλης κατασκευής. Ταυτόχρονα, κάθε στοιχείο του συνολικού προσομοιώματος είναι κι αυτό από μόνο του ένα μοντέλο της πραγματικότητας είτε πρόκειται για τις παραδοχές φόρτισης είτε για τη χρησιμοποίηση του ελαστικού νόμου του Hooke είτε για τα κριτήρια αντοχής/θραύσης μιας διατομής οπλισμένου σκυροδέματος.

Όπως ειπώθηκε παραπάνω, είναι χρήσιμο για έναν διεξοδικότερο σχολιασμό να διακρίνουμε τα μοντέλα που χρησιμοποιούμε ως μηχανικοί σε δύο κατηγορίες: στα "ερευνητικά προσομοιώματα" και στα "τεχνικά προσομοιώματα εφαρμογής".

4 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ↔ ΤΕΧΝΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Όταν σκοπός και στόχος είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη κατανόηση και εξήγηση της μηχανικής συμπεριφοράς (ενός μέλους, μιας κατασκευής κτλ.), τότε αναπτύσσουμε "ερευνητικά μοντέλα" για τη λεπτομερή απεικόνιση των πραγματικών φαινομένων. Οι πιθανές φορτίσεις/καταπονήσεις και η υλική συμπεριφορά μελετώνται διεξοδικά, το προσομοίωμα διερευνάται μέσω εκτεταμένων παραμετρικών αναλύσεων και η αξιοπιστία της όλης μεθοδολογίας ελέγχεται πειραματικά. Ζητούμενο είναι, οι αποκλίσεις των πειραματικών μετρήσεων από τα αναλυτικά αποτελέσματα να είναι κατά το δυνατόν μικρές έως αμελητέες.

Διαφορετικό είναι το ακολουθούμενο σκεπτικό, όταν σκοπός και στόχος είναι η ανάπτυξη μεθόδων που θα χρησιμοποιηθούν στη δομική πράξη, όταν δηλαδή το ζητούμενο είναι η ανάπτυξη "τεχνικών προσομοιωμάτων εφαρμογής" για την εκπόνηση μελετών εφαρμογής. Στα προσομοιώματα αυτά οι συντελεστές που επηρεάζουν το φαινόμενο μειώνονται σε πλήθος έτσι ώστε να περιλαμβάνουν μόνο τις σημαντικές επιρροές (Εδώ υπεισέρχεται η "τέχνη" της προσομοίωσης). Τόσο οι φορτίσεις όσο και η υλική συμπεριφορά εξιδανικεύονται και απλοποιούνται σε μεγάλο βαθμό. Παράλληλα καλυπτόμαστε έναντι διαφόρων δευτερευουσών επιρροών καθώς και έναντι άλλων αβεβαιοτήτων μέσω συντελεστών ασφαλείας. Είναι σαφές, ότι οι αποκλίσεις των αναλυτικών αποτελεσμάτων από αντίστοιχες πραγματικές μετρήσεις δεν αναμένεται κατά κανόνα να είναι μικρές. Εντούτοις, θα πρέπει να είναι προς την πλευρά της ασφάλειας.

Με άλλα λόγια: Τα ερευνητικά μοντέλα απεικονίζουν και εξηγούν (ή προσπαθούν να απεικονίσουν και να εξηγήσουν) όσο γίνεται πιστότερα το πραγματικό φαινόμενο, δηλαδή την πραγματική μηχανική συμπεριφορά, ενώ τα τεχνικά μοντέλα εφαρμογής "υπερκαλύπτουν" το πραγματικό φαινόμενο, δηλαδή εξασφαλίζουν την υλοποίηση κατασκευών με μηχανική συμπεριφορά που κυμαίνεται εντός θεμιτών ορίων. Χρησιμοποιώντας μικρό σχετικά πλήθος παραμέτρων (κάνοντας χρήση χαρακτηριστικών φορτίσεων, σημαντικών εξιδανικεύσεων στην υλική συμπεριφορά και απλοποιημένων επιλύσεων) - τα τεχνικά μοντέλα στοχεύουν στην πραγματοποίηση κατασκευών που θα συμπεριφέρονται εντός των προβλεπόμενων ορίων σε όλες τις φάσεις της προβλεπόμενης διάρκειας ζωής τους. Με αυτή την έννοια τα τεχνικά μοντέλα δεν απεικονίζουν - όπως τα ερευνητικά - την πραγματικότητα, αλλά την "υποκαθιστούν". Προς εικονογράφηση των παραπάνω θα υπενθυμίσω στις ακόλουθες δύο παραγράφους ορισμένα "κλασικά" παραδείγματα.

4.1 ΤΟ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ - ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

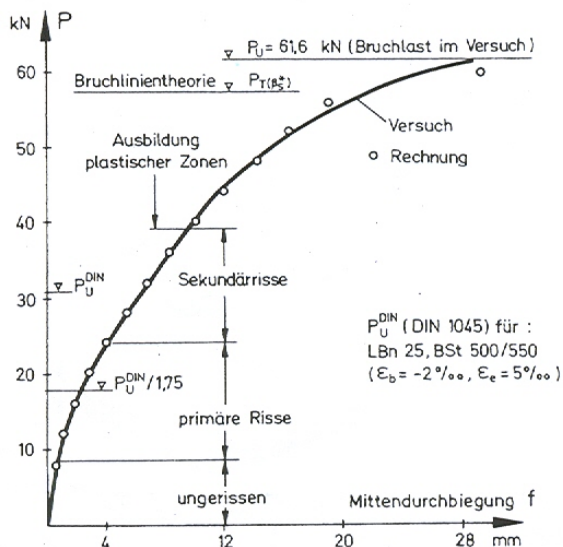
Ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να αναπτύξουμε ένα υπολογιστικό μοντέλο το οποίο να περιγράφει με ακρίβεια την ένταση και παραμόρφωση μιας τετραερίστης πλάκας Ο/Σ που φορτίζεται με ένα συγκεντρωμένο φορτίο στο κέντρο της μέχρι καταρρεύσεως και μάλιστα με τόση ακρίβεια που τα αναλυτικά (αριθμητικά) αποτελέσματα να προσεγγίζουν τα αντίστοιχα πειραματικά με μικρές μόνο αποκλίσεις. Ένα τέτοιο ερευνητικό προσομοίωμα οφείλει να διαθέτει ιδιότητες και χαρακτηριστικά όπως π.χ. τα εξής:

- α) Στα γεωμετρικά δεδομένα θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όχι μόνο η ακριβής γεωμετρία της πλάκας (κάτι που είναι σχετικά εύκολο), αλλά και η ακριβής θέση όλων των ράβδων οπλισμού (κάτι που για πραγματικές κατασκευές δεν είναι κατά κανόνα δυνατό να γίνει).

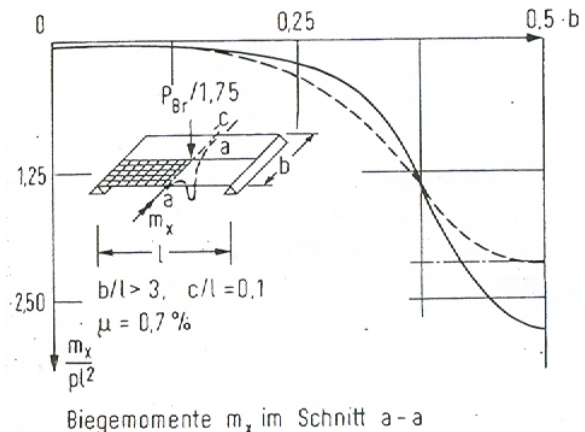
- β) Ο τρόπος εφαρμογής του φορτίου (ακριβής επιφάνεια φόρτισης, ταχύτητα φόρτισης) θα πρέπει να προσομοιώνεται με ακρίβεια. Για μια πραγματική κατασκευή αυτό θα σήμαινε ότι το φορτιστικό μοντέλο θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει όλες τις δράσεις που θα υποστεί η κατασκευή κατά τη διάρκεια της ζωής της, συμπεριλαμβανομένων δυναμικών φαινομένων και αυτεντατικών καταστάσεων.
- γ) Η υλική συμπεριφορά του Ο/Σ θα πρέπει να προσομοιώνεται σωστά σε όλα τα στάδια της φόρτισης (αρχική γραμμικά ελαστική περιοχή, ρηγμάτωση του σκυροδέματος, διαρροή και εν συνεχεία κράτυνση του χάλυβα, ενδεχομένως θερμοκρασιακές επιρροές κ.ά.π.). Είναι φανερό ότι κάτι τέτοιο υπερβαίνει κατά πολύ τα όρια της δομοστατικής μελέτης μιας πραγματικής κατασκευής.
- δ) Τα παραπάνω χαρακτηριστικά (μαζί με άλλα) θα πρέπει να συντίθενται με τέτοιο τρόπο, ώστε το προκύπτον ερευνητικό προσομοίωμα να κατορθώνει να περιγράφει όλες τις πιθανές καταστάσεις απόλειας λειτουργικότητας και αστοχίας, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά.

Στο σχήμα 3, που έχει ληφθεί από την ερευνητική εργασία (Wegner 1974), συγκρίνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα ενός τέτοιου ερευνητικού μοντέλου (καμπύλη) με πειραματικά δεδομένα (μεμονωμένα κυκλάκια). Η σύμπτωση είναι πολύ καλή. Προκειμένου να επιτευχθεί η καλή αυτή απεικόνιση του πραγματικού φαινομένου χρησιμοποιήθηκε ένα προσομοίωμα μη γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο ήταν σε θέση να παρακολουθεί τη σταδιακή ρηγμάτωση της πλάκας και τον σχηματισμό πλαστικών ζωνών και να λαμβάνει τα φαινόμενα αυτά υπόψη στο εκάστοτε επόμενο βήμα υπολογισμών. Προφανώς, ένα τέτοιο προσομοίωμα είναι υπερβολικό για χρήση στη δομική πράξη. Είναι όμως απαραίτητο αν θέλουμε να ερμηνεύσουμε πλήρως το πραγματικό φαινόμενο και εν συνεχεία, περιοριζόμενοι στις σημαντικές μόνο παραμέτρους, να δημιουργήσουμε ένα ρεαλιστικό τεχνικό προσομοίωμα εφαρμογής. Πράγματι, στα τεχνικά μας προσομοιώματα για τον υπολογισμό πλακών παραιτούμαστε π.χ. από την υλική μη γραμμικότητα και περιοριζόμαστε σε γραμμικές (ελαστικές) αναλύσεις, οι οποίες μάλιστα σε συνήθεις κατασκευές γίνονται όχι με πεπερασμένα στοιχεία, αλλά με πολύ χονδροειδέστερες μεθόδους ανάλυσης (π.χ. μέθοδος λωρίδων κατά Marcus).

Στις ελαστικές αυτές αναλύσεις "χάνονται" βέβαια πολλά από τα πραγματικά χαρακτηριστικά



Σχ. 3 Υπολογιστική καμπύλη φορτίου-μετατόπισης μιας ορθογωνικής πλάκας Ο/Σ υπό συγκεντρωμένο φορτίο στο κέντρο της και σημειακές πειραματικές τιμές (Wegner 1974)



Σχ. 4 Ροπές κάμψης m_x μιας διέριστης πλάκας υπό συγκεντρωμένο φορτίο (Griebenow 1977)
Κατάσταση I : συνεχής καμπύλη
Κατάσταση II : διακεκομμένη καμπύλη

του φαινομένου. Βλέπουμε π.χ. στο σχήμα 4, που έχει ληφθεί από την ερευνητική εργασία (Griebenow 1977), ότι λόγω της εμφανιζόμενης ρηγματώσης η μέγιστη ελαστική ροπή m_x στο μέσον της πλάκας δεν προλαβαίνει να αναπτυχθεί. Η πραγματικά αναπτυσσόμενη ροπή είναι περίπου το 75% ροπής που προκύπτει από την ελαστική ανάλυση. Η ένταση αρχίζει να ανακατανέμεται παράλληλα με την έναρξη της ρηγματώσης και το φορτίο παραλαμβάνεται από γειτονικές περιοχές (ράβδους οπλισμού) και μεταφέρεται στις στηρίξεις. Αν για περισσότερες θέσεις του συγκεντρωμένου φορτίου οπλίσουμε την πλάκα με τον οπλισμό που αντιστοιχεί στις μέγιστες ροπές στο πλαίσιο της θεωρίας ελαστικότητας, τότε η πλάκα θα έχει σαφώς υπεροπλιστεί.

Στο σχήμα 4 βλέπουμε ότι το πραγματικό οριακό φορτίο P_U είναι 61.6kN, ότι το οριακό φορτίο P_U^{DIN} κατά DIN1045 είναι περίπου το 50% του πραγματικού (31kN) και ότι το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο χρήσης ($= P_U^{DIN}/1.75$) είναι μόλις 18 kN. Οι χαμηλότερες αυτές τιμές έρχονται να "υπερκαλύψουν" τις αδυναμίες του τεχνικού προσομοιώματος που χρησιμοποιούμε στην πράξη και να δημιουργήσουν έτσι την απαιτούμενη απόσταση ασφαλείας έναντι της κατάρρευσης. Σε κάποιες χώρες επιτρέπεται - με ορισμένους πρόσθετους περιορισμούς - ο υπολογισμός του οριακού φορτίου πλακών με χρήση της θεωρίας των γραμμών διαρροής (για την πλάκα του σχήματος 3 το φορτίο αυτό είναι περίπου $P_{U(\beta^*S)}=57.5$ kN).

4.2 ΤΟ ΤΕΧΝΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ - ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Ένα καλό παράδειγμα τεχνικού προσομοιώματος εφαρμογής αποτελεί το προσομοίωμα που χρησιμοποιείται συνήθως στην πράξη για τον υπολογισμό δικτυωμάτων. Το προσομοίωμα αυτό, που αναπτύχθηκε στο δεύτερο μισό του 19ου αιώνα από τους τότε πρωτεργάτες της Στατικής, αποτελεί υπόδειγμα μοντελοποίησης που στηρίζεται στη σύνθεση στατικής διαίσθησης και απλότητας υπολογισμού. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του προσομοιώματος παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα 1, μπορούν δε να "γενικευθούν" ως χαρακτηριστικά όλων των τεχνικών προσομοιωμάτων.

· *Αρθρωτοί κόμβοι δικτυωμάτων*

Η πλέον οφθαλμοφανής απλοποίηση είναι η θεώρηση των κόμβων του δικτύωματος ως αρθρωτών. Πράγματι, όπως γνωρίζουμε (βλ. φωτογραφίες τους σχήματος 5) οι πραγματικοί κόμβοι (είτε πρόκειται για κατασκευές Ο/Σ είτε για κατασκευές από χάλυβα) κάθε άλλο παρά αρθρωτοί είναι. Και όμως, η απλοποιητική αυτή παραδοχή αποδείχθηκε διαχρονικά ως άκρως ικανοποιητική στα πλαίσια του συνολικού υπολογιστικού προσομοιώματος δικτυωμάτων που περιγράφηκε στον πίνακα 1. Θα χρησιμοποιούσαμε την ίδια παραδοχή και για τους κόμβους μιας δοκού Vierendeel; [Σημείωση: Παρεμπιπτόντως, αξίζει να υπενθυμίσουμε εδώ ότι η θεώρηση αρθρώσεων στους κόμβους των δικτυωμάτων συνοδεύτηκε από παράλληλη προσπάθεια εκτίμησης των δευτερευουσών τάσεων που αναπτύσσονται στα δικτυώματα λόγω του γεγονότος ότι στην πραγματικότητα οι κόμβοι τους δεν είναι αρθρωτοί. Η προσπάθεια αυτή οδήγησε εν τέλει στην ανάπτυξη της κλασικής Μεθόδου Μετακινήσεων, στο βασικό σκεπτικό της οποίας στηρίζεται η σήμερα σχεδόν αποκλειστικά εφαρμοζόμενη μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων].

· *Προσομοίωση και Κανονισμοί*

Η ανάπτυξη τεχνικών προσομοιωμάτων εφαρμογής αποτελεί μια από τις ουσιαστικότερες "δουλειές" του μηχανικού. Για την πλειοψηφία των συνήθων κατασκευών, το γεγονός αυτό συγκαλύπτεται εν μέρει από τις διατάξεις των Κανονισμών, οι οποίοι προδιαγράφουν ως υποχρεωτικές πολλές από τις εξιδανικεύσεις και απλοποιήσεις του υπολογιστικού μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί. Όπως βέβαια αναφέρθηκε στην παράγραφο 3, πολλές προσομοιώσεις παραμένουν στη διακριτική ευχέρεια του μηχανικού, όπως π.χ. η προσομοίωση τοιχωμάτων, πυρήνων και κλιμακωστάσιων, διότι Κανονισμοί δεν μπορούν - και δεν πρέπει άλλωστε - να προκαθορίζουν όλα τα στοιχεία του προσομοιώματος. Στον μηχανικό οφείλει να παρέχεται επαρκής ελεύθερος χώρος για την λήψη αποφάσεων που αφορούν στην προσομοίωση, έτσι ώστε να μπορούν να

αντιμετωπισθούν με τον καταλληλότερο τρόπο οι πάμπολλες περιπτώσεις για τις οποίες δεν είναι δυνατόν να υπάρχει σχετική κανονιστική πρόβλεψη.

· *Αναρμονική ακρίβεια*

Η "τέχνη" της προσομοίωσης συνίσταται εν προκειμένω στη διατύπωση ενός όσο το δυνατόν απλούστερου μοντέλου, που όμως να αποδίδει ικανοποιητικά όλες τις βασικές μηχανικές ιδιότητες της υπό μελέτη κατασκευής. Το μέγιστο επίπεδο απλούστευσης καθορίζεται από τις ελάχιστες απαιτήσεις ακρίβειας για την εκάστοτε περίπτωση, ενώ το επίπεδο της επιτρεπόμενης πολυπλοκότητας του μοντέλου εξαρτάται άμεσα από τις υφιστάμενες δυνατότητες υπολογισμού του. Σήμερα,

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά τεχνικών προσομοιωμάτων εφαρμογής

Προσομοίωμα δικτύωματος	Γενίκευση: Χαρακτηριστικά τεχνικού προσομοιώματος εφαρμογής
Παρά την ισχυρή σύνδεση των στοιχείων στους κόμβους, οι κόμβοι θεωρούνται αρθρωτοί (Σχ. 5). Η κατ' αρχάς αγνόηση των αναπτυσσόμενων ροπών ως δευτερεύουσας σημασίας βασίζεται στο γεγονός της "εξουδετέρωσής" τους λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης των κόμβων.	Εξιδανίκευση του στατικού προσομοιώματος του φέροντος οργανισμού (και βέβαια της θεμελίωσης και του εδάφους) με περιορισμό στις κύριες παραμέτρους που προκαλούν ένταση και παραμόρφωση.
Η φόρτιση περιορίζεται σε λίγους και συγκεκριμένους "συρμούς φορτίων" ικανού μεγέθους ώστε να καλύπτουν και την κόπωση υλικού.	Εξιδανίκευση του φορτιστικού προσομοιώματος με τρόπο που να περικλείει όλα τα αναμενόμενα πραγματικά φορτία,.
Παρά τις αναμενόμενες πλαστικοποιήσεις χρησιμοποιείται γραμμικός νόμος υλικής συμπεριφοράς (Hooke).	Περιορισμός σε ελαστικές αναλύσεις (ενδεχομένως με παράλληλη φροντίδα αυτές να είναι "ισοδύναμες").
Στατικός υπολογισμός με τη θεωρία 1 ^{ης} τάξης. Φαινόμενα λυγισμού αντιμετωπίζονται πρακτικά, π.χ. με εισαγωγή της έννοιας του "μήκους λυγισμού",	Περιορισμός σε γεωμετρικά γραμμικές αναλύσεις (αγνόηση των παραμορφώσεων κατά την επίλυση του φορέα). Φαινόμενα 2 ^{ης} τάξης λαμβάνονται προσεγγιστικά υπόψη.
Ως κριτήριο διαστασιολόγησης χρησιμοποιείται η μέγιστη τάση $\sigma = \max N/A$ λόγω των παραπάνω φορτίων, παρόλο που αυτή δεν συμπεριλαμβάνει τις δευτερεύουσες τάσεις λόγω μη αρθρωτών κόμβων και τις τάσεις από αυτεντατικές καταστάσεις. Η απαίτηση ασφάλειας συνίσταται στην επαρκή απόσταση της τάσης αυτής από την τάση διαρροής.	Οι απαιτήσεις σχεδιασμού και η ασφάλεια έναντι αστοχίας περιορίζονται στον έλεγχο και στην εξασφάλιση της κατασκευής έναντι λίγων και συγκεκριμένων οριακών καταστάσεων. Οι μέθοδοι των επιτρεπόμενων τάσεων, της συνολικής αντοχής των διατομών και του οριακού φορτίου του φορέα αποτελούν εναλλακτικά σενάρια ασφάλειας.
Προσεκτική διαμόρφωση και κατασκευή, ιδιαίτερα των κομβοελασμάτων και των σημείων προσαγωγής των φορτίων.	Κάλυψη αδυναμιών του υπολογιστικού προσομοιώματος μέσω κατασκευαστικών διατάξεων που βασίζονται στη διαίσθηση και στην αποκτηθείσα πείρα.
Το προσομοίωμα αυτό αποδείχθηκε κατά την πολυετή εφαρμογή του στην πράξη ικανοποιητικό και ασφαλές.	Το προσομοίωμα μπορεί να θεωρηθεί ώριμο αν οι κατασκευές που μελετήθηκαν και κατασκευάστηκαν σύμφωνα με αυτό παρουσιάζουν την αναμενόμενη συμπεριφορά σε βάθος χρόνου.

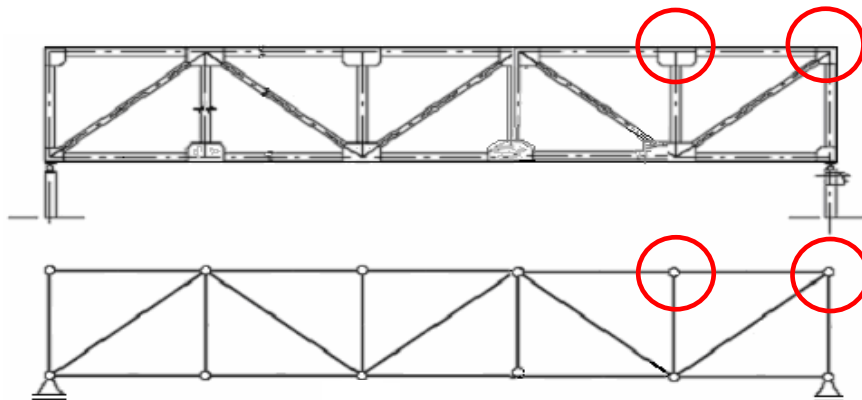
ο ηλεκτρονικός υπολογιστής και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν ισχυρά εργαλεία για μια αποτελεσματική προσομοίωση οποιουδήποτε φορέα, χωρίς όμως να αποκλείουν και τον κίνδυνο αδόκιμων ή και εξεζητημένων μοντελοποιήσεων. Έτσι, π.χ., αδόκιμο θα πρέπει να θεωρηθεί ένα προσομοίωμα κτιρίου, αν μετά από χονδροειδείς παραδοχές φόρτισης ακολουθήσει λεπτομερειακή προσομοίωση (ενδεχομένως με χρήση και επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων) του φέροντος οργανισμού, επίλυσή του με προχωρημένες μεθόδους ανάλυσης (ενδεχομένως και μη γραμμικής) και λεπτομερειακή διαστασιολόγηση. Σε τέτοιες περιπτώσεις μιλάμε για "αναρμονική ακρίβεια", η οποία βέβαια πρέπει να αποφεύγεται ως άτοπη.



Δικτυώματα από Ο/Σ και χάλυβα



Δοκός Vierendeel



Σχ. 5 Τεχνικό προσομοίωμα δικτυώματος

· *Αναλύσεις ευαισθησίας*

Επίσης, ως μην λησμονείται ότι λόγω των μεγάλων αβεβαιοτήτων ακόμη και του στατικού υπολογισμού κατασκευών Ο/Σ (πιθανοτικός χαρακτήρας φορτίων και συμπεριφοράς δομικών υλικών, ανακρίβειες μοντέλου κτιρίου-θεμελίωσης-εδάφους κ.τ.λ.), οποιαδήποτε προσομοίωση δεν είναι παρά μια προσέγγιση της πραγματικότητας : Κανένα μοντέλο δεν είναι σε θέση να αποδώσει πλήρως όλα τα χαρακτηριστικά της πραγματικής συμπεριφοράς μιας κατασκευής, γι' αυτό και είναι πάντα επιδεκτικό βελτίωσης. Μια απλή αλλά χαρακτηριστική περίπτωση είναι η προσομοίωση του εδάφους θεμελίωσης μέσω ελατηρίων Winkler (μεμονωμένων ή συνεχώς καταναμημένων), όπου παρά το ενδεχομένως μεγάλο εύρος διακύμανσης των εδαφικών παραμέτρων η ανάλυση περιορίζεται σε ένα μόνο σετ τιμών. Εδώ ισχύει το "μία ανάλυση = καμία ανάλυση". Σε τέτοιες περιπτώσεις θα πρέπει, αντίθετα, να διενεργούνται δύο, τρεις ή και περισσότερες αναλύσεις με στόχο την περιβολή της κατάστασης έντασης και παραμόρφωσης και τον προσδιορισμό των δυσμενέστερων πιθανών τιμών ("αναλύσεις ευαισθησίας").

4.3 ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΠΡΑΞΗ

Η έρευνα στα Πανεπιστήμια και στα διάφορα ερευνητικά κέντρα εστιάζεται στη διερεύνηση επί μέρους πτυχών των πραγματικών φαινομένων και στην ανάπτυξη αντίστοιχων επί μέρους ερευνητικών μοντέλων που είναι σε θέση να απεικονίσουν (δηλαδή να περιγράψουν και να εξηγήσουν ποιοτικά και ποσοτικά) τα φαινόμενα με την εκάστοτε επιδιωκόμενη πιστότητα. Αναφέρω χωρίς περαιτέρω επεξηγήσεις ορισμένα παραδείγματα ερευνητικών προσομοιωμάτων από το πεδίο της αντισεισμικής ανάλυσης των κατασκευών:

Επί μέρους προβλήματα

- Προσομοίωση της σεισμικής διέγερσης (π.χ. με στατικά σεισμικά φορτία ή με φάσματα απόκρισης ή με σειρά επιταχυνσιογραφημάτων)
- Προσομοίωση δομικών στοιχείων και υποφορέων (π.χ. με ισοδύναμα γραμμικά μοντέλα ή με μοντέλα γραμμικών, επιφανειακών και τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων)
- Προσομοίωση του υλικού υπό στατική ή δυναμική φόρτιση (π.χ. με τον νόμο του Hooke ή με ιδανικά ελαστικό - ιδανικά πλαστικό νόμο τάσεων-παραμορφώσεων ή λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη και φαινόμενα ρηγμάτωσης, κράτυνσης κ.ά.)
- Προσομοίωση της ενδοσιμότητας του εδάφους θεμελίωσης (π.χ. με σημειακά ελατήρια Winkler, με ελαστική έδραση δύο παραμέτρων, με πεπερασμένα στοιχεία που ενσωματώνουν τον νόμο τάσεων-παραμορφώσεων του εδάφους)

Προβλήματα που αφορούν ολόκληρο τον φέροντα οργανισμό

- Προσομοίωση της *ελαστικής ή και ανελαστικής* απόκρισης της κατασκευής σε σεισμική διέγερση μέσω *γραμμικών* (στατικών ή φασματικών ή χρονολογικών δυναμικών) μεθόδων ανάλυσης
- Προσομοίωση της *ανελαστικής* απόκρισης της κατασκευής σε σεισμική διέγερση μέσω *μη γραμμικών* (στατικών ή χρονολογικών δυναμικών) μεθόδων ανάλυσης
- Προσομοίωση της επιρροής της διευθυντικότητας της σεισμικής δράσης επί των μεγεθών απόκρισης της κατασκευής

Ιδωμένα από τη σκοπιά της δομικής πράξης, ακόμη και τα προβλήματα που αναφέρονται σε ολόκληρο τον φέροντα οργανισμό αποτελούν επί μέρους προσομοιώματα, αφού το ζητούμενο είναι ένα συνολικό υπολογιστικό προσομοίωμα της κατασκευής, το οποίο - συνθέτοντας τα επί μέρους προσομοιώματα φόρτισης, φέροντος οργανισμού, εδάφους θεμελίωσης και εντάσσοντάς τα σε ένα συνεκτικό "φιλοσοφικό" πλαίσιο ανάλυσης, διαστασιολόγησης και αντισεισμικής ασφάλειας - δίνει τη δυνατότητα εκπόνησης δομοστατικών μελετών που οδηγούν σε ασφαλείς και οικονομικές κατασκευές.

Σε απλουστευτική διατύπωση θα μπορούσαμε να πούμε τα εξής:

Η έρευνα ασχολείται κατά κανόνα με την ανάπτυξη επί μέρους (αν και διαφορετικών επιπέδων πολυπλοκότητας) ερευνητικών προσομοιωμάτων και ενδεχομένως με τις δυνατότητες απλοποίησής τους.

Η πράξη επιλέγει επί μέρους προσομοιώματα που παράγονται από την έρευνα, ενδεχομένως τα απλοποιεί περαιτέρω και εν τέλει τα συνθέτει σε ένα συνολικό τεχνικό προσομοίωμα που θα εφαρμοστεί για τη μελέτη της όλης κατασκευής. Η σύνθεση ενδέχεται να εμπεριέχει και θεωρητικώς αντιφατικά μοντέλα (π.χ. αντιμετώπιση της μη γραμμικής συμπεριφοράς των κατασκευών μέσω "ισοδύναμων" γραμμικών αναλύσεων), όπου όμως η αντίφαση "αίρεται" μέσω κατάλληλων πρόσθετων ρυθμίσεων.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η περιστασιακή δυσφορία πολλών συναδέλφων της πράξης για τις "εξεζητημένες" διερευνήσεις και το υπερβολικό "ψείρισμα" πολλών ερευνητών είναι μάλλον άτοπη. Η έρευνα πρέπει να "εξαντλεί" το φαινόμενο. Εν συνεχεία η πράξη έχει τη δική της ευθύνη στην επιλογή και σύνθεση του συνολικού υπολογιστικού μοντέλου που καλύπτει τις ανάγκες της.

Τέλος, είναι σαφές ότι η διάκριση μεταξύ ερευνητικών και τεχνικών προσομοιωμάτων έχει από ένα σημείο και μετά σχηματικό χαρακτήρα. Πράγματι, πολλά ερευνητικά προσομοιώματα έχουν αρκετά επί μέρους χαρακτηριστικά τεχνικών προσομοιωμάτων, ενώ η ανάπτυξη τεχνικών προσομοιωμάτων αποτελεί και αυτή αντικείμενο ερευνητικής δραστηριότητας.

5 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ Ο/Σ ΓΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ

Ιδιαίτερος ενδιαφέροντα παραδείγματα ερευνητικών μοντέλων αποτελούν οι προσπάθειες πολλών ερευνητών στην Ελλάδα και διεθνώς να περιγράψουν τη μη γραμμική συμπεριφορά κατασκευών, οι οποίες λόγω ισχυρης σεισμικής διέγερσης εισέρχονται στην ανελαστική περιοχή.

· *Αντισεισμικός σχεδιασμός με βάση την επίδοση*

Όπως είναι γνωστό (βλ. π.χ. Αβραμίδης & Αναστασιάδης 2001), οι ανελαστικές αναλύσεις και τα σχετικά προσομοιώματα εντάσσονται στη φιλοσοφία αντισεισμικού σχεδιασμού κατασκευών με βάση την επίδοσή τους. Πρόκειται για μια ευέλικτη φιλοσοφία αντισεισμικού σχεδιασμού που προσαρμόζεται στην εκάστοτε ζητούμενη στάθμη σεισμικής επίδοσης (επιτελεστικότητα) της κατασκευής. Η φιλοσοφία αυτή συνίσταται σε ένα οργανωμένο σύνολο ιδεών, κανόνων, μεθόδων και κριτηρίων (ποιοτικών και ποσοτικών) που στοχεύει στον σχεδιασμό κατασκευών με προκαθορισμένη σεισμική συμπεριφορά (ή συμπεριφορές) για δεδομένο επίπεδο (ή επίπεδα) σεισμικής φόρτισης.

Η νέα αυτή στρατηγική μελέτης αντισεισμικών κατασκευών αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ υπό την εποπτεία κυρίως της FEMA (Federal Emergency Management Agency) κατά την τελευταία εικοσαετία και έχει πάρει ήδη τη μορφή προ-κανονιστικών και κανονιστικών κειμένων (SEAOC 1995, ATC-40, FEMA 273 & 274, FEMA 356, FEMA 440, ASCE Standard 31-03). Αν και αρχικά το ενδιαφέρον αφορούσε στην αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας υφισταμένων (παλαιότερων) κτιρίων (προκειμένου να επισκευασθούν ή να ενισχυθούν), τα οποία σε περίπτωση ισχυρών σεισμών εισέρχονται με μεγαλύτερη βεβαιότητα στην ανελαστική περιοχή λόγω του ότι μελετήθηκαν και κατασκευάστηκαν βάσει παλαιότερων προδιαγραφών, η φιλοσοφία αυτή αποτίμησης της αντισεισμικής επίδοσης συμπεριλαμβάνει και τα νεοκατασκευαζόμενα κτίρια.

Κεντρικό σημείο αναφοράς του αντισεισμικού σχεδιασμού με βάση την επίδοση είναι η επιθυμητή (από τον κύριο του έργου) σεισμική επίδοση (seismic performance) του κτιρίου, δηλαδή η επιθυμητή (ή καλύτερα, ανεκτή) οριακή κατάσταση βλαβών μετά το σεισμό. Στον ακόλουθο πίνακα 2 αναφέρονται τα επίπεδα επίδοσης του κτιρίου σύμφωνα με τη FEMA και σύμφωνα με το ελληνικό σχέδιο ενός Κανονισμού Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2005): Οι οριακές αυτές καταστάσεις βλαβών (επίπεδα επίδοσης) ορίζονται στα κείμενα της FEMA περιγραφικά με την μεγαλύτερη δυνατή λεπτομέρεια και η επίτευξή τους ελέγχεται ποσοτικά με μεθόδους υπολογισμού και

αντίστοιχα κριτήρια αποδοχής. Στο σχέδιο ΚΑΝ.ΕΠΕ. οι οριακές καταστάσεις περιορίζονται σε τρεις, αντίστοιχες εκείνων της FEMA, για τις οποίες δίνονται σύντομοι ορισμοί.

Πίνακας 2. Στάθμες σεισμικής επίδοσης (επιτελεστικότητας)

FEMA	ΚΑΝ.ΕΠΕ.
OP : Ανεπηρέαστη συνέχιση λειτουργίας (Operational) → (Σχεδόν) μηδενικές βλάβες	---
IO : Άμεση χρήση μετά το σεισμό (Immediate Occupancy) → Πολύ περιορισμένες βλάβες.	Άμεση χρήση μετά το σεισμό
LS: Προστασία ζωής (Life Safety) → Σημαντικές βλάβες στα φέροντα στοιχεία, αλλά υπάρχει αρκετή απόσταση από την μερική ή ολική κατάρρευση.	Προστασία ζωής
CP: Πρόληψη κατάρρευσης (Collapse Prevention) → Εκτεταμένες σοβαρές βλάβες. Το κτίριο δυνάμενο να φέρει μόνο τα κατακόρυφα φορτία όχι όμως και οριζόντια.	Αποφυγή οιονεί κατάρρευσης

· *Γραμμικές δυναμικές και στατικές αναλύσεις*

Γραμμικές δυναμικές μέθοδοι ανάλυσης (π.χ. η δυναμική φασματική μέθοδος του ΕΑΚ-2000) είναι εύλογο να εφαρμόζονται σε κτίρια υψηλής επιτελεστικότητας, π.χ. επιπέδου επίδοσης OP ή IO (μηδενικές έως πολύ περιορισμένες βλάβες). Σε κανονικά κτίρια όχι μεγάλου αριθμού ορόφων και με προεξάρχουσα τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο ταλάντωσης είναι υπό όρους αποδεκτή και η χρήση γραμμικών στατικών μεθόδων (π.χ. η απλοποιημένη φασματική μέθοδος του ΕΑΚ-2000).

· *Μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις*

Μη γραμμικές (ανελαστικές) δυναμικές αναλύσεις μπορούν (θεωρητικά) να εφαρμοσθούν σε οποιαδήποτε περίπτωση κατασκευής. Ιδιαίτερο νόημα έχει βέβαια η χρήση τους σε κατασκευές που διαθέτουν ή που σχεδιάζονται για χαμηλά επίπεδα επιτελεστικότητας (LS ή CP, σημαντικές έως πολύ σοβαρές βλάβες). Η εφαρμογή τους όμως εμφανίζει ανυπέβλητες για τη συνήθη συμβατική πράξη δυσκολίες, στις οποίες θα προσέκρουε ο μελετητής αν ήθελε να εφαρμόσει τέτοιου είδους ανάλυση. Οι δυσκολίες αυτές σχετίζονται :

(1) με τη μη διαθεσιμότητα κατάλληλων και αντιπροσωπευτικών για την περιοχή που μας ενδιαφέρει επιταχυνσιογραφημάτων,

(2) με την έλλειψη αξιόπιστων νόμων υλικής (και ιδιαίτερα υστερητικής) συμπεριφοράς για τα δομικά στοιχεία του χωρικού φέροντος οργανισμού και του εδάφους θεμελίωσης υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση,

(3) με την έλλειψη γνώσεων και θεσμοθετημένων διατάξεων όσον αφορά στα όρια της επιτρεπτής (οριακής) συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων υπό διάφορους συνδυασμούς δυναμικών επιπονήσεών τους, και

(4) με τη μη διαθεσιμότητα κατάλληλων υπολογιστικών εργαλείων που θα επέτρεπαν τέτοιου είδους αναλύσεις εντός των αποδεκτών χρονικών και οικονομικών ορίων ενός τεχνικού γραφείου.

Εκτός από τις παραπάνω εγγενείς δυσκολίες, οι ανελαστικές δυναμικές αναλύσεις απαιτούν ιδιαίτερη πείρα όσον αφορά στα χρησιμοποιούμενα μοντέλα των δομικών στοιχείων, στη χρήση των επιταχυνσιογραφημάτων και στην ερμηνεία και αξιοποίηση των αποτελεσμάτων. (Για τους

λόγους αυτούς οι αμερικανικές σχετικές διατάξεις επιβάλλουν τον έλεγχο τέτοιων μελετών και από ανεξάρτητο μηχανικό με αναγνωρισμένη εμπειρία σε τέτοιου είδους αναλύσεις.)

· *Οι στατικές υπερωθητικές αναλύσεις (ΣΥΑ)*

Οι δυσχέρειες αλλά και το απαγορευτικό για την πράξη κόστος της μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης κατασκευών χαμηλής επιτελεστικότητας ώθησαν πολλούς ερευνητές στην αναζήτηση απλούστερων προσομοιώσεων και προσεγγιστικών μεθόδων υπολογισμού της ανελαστικής σεισμικής συμπεριφοράς των κατασκευών. Το τίμημα της απλούστερης προσομοίωσης είναι βέβαια αναπόφευκτα η ελλιπέστερη "σύλληψη" της ανελαστικής συμπεριφοράς. Το τίμημα όμως αυτό είναι αποδεκτό, εφόσον "συλλαμβάνονται" τα ουσιαστικά και ενδιαφέροντα τη δομική πράξη χαρακτηριστικά της ανελαστικής συμπεριφοράς.

Οι προσπάθειες των ερευνητών ξεκίνησαν με τη χρησιμοποίηση της από παλαιότερα γνωστής *στατικής υπερωθητικής ανάλυσης (ΣΥΑ)*, η οποία κατά την δεκαετία του 1950 χρησιμοποιήθηκε για τον "βήμα προς βήμα" προσδιορισμό του οριακού στατικού φορτίου μιας κατασκευής ("collapse analysis", βλ. Kunnath 2004) μέσω μιας επαυξητικής επιβολής της *στατικής εξωτερικής φόρτισης* έως ότου ο φορέας μετατραπεί σε πλαστικό μηχανισμό (προσδιορισμός υπερωθητικής καμπύλης φορτίου-παραμόρφωσης). Βέβαια, προκειμένου η στατική αυτή υπερωθητική ανάλυση να εφαρμοστεί για την εκτίμηση της *σεισμικής* ανελαστικής συμπεριφοράς κατασκευών υπέστη κατάλληλες προσαρμογές και συμπληρώθηκε με διάφορες προσθήκες έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η όσο το δυνατόν καλύτερη περιγραφή των πλαστικοποιήσεων που υφίσταται η κατασκευή κατά τη σεισμική της επιπόνηση. Οι προσαρμογές και προσθήκες αυτές περιέχουν πληθώρα πρόσθετων εξιδανικεύσεων, απλοποιήσεων και παραδοχών, οι οποίες επηρεάζουν έως και σε πολύ μεγάλο βαθμό την ποιότητα των αποτελεσμάτων και επομένως χρήζουν ιδιαίτερης διερεύνησης.

Σημειώνεται ότι η εφαρμογή της ΣΥΑ στον αντισεισμικό σχεδιασμό εμπεριέχει και τον υπολογισμό της *απαιτήσης* (π.χ. υπό μορφή επιβαλλόμενης-απαιτούμενης παραμόρφωσης) που θέτει η εκάστοτε θεωρούμενη σεισμική διέγερση και ότι επομένως δεν πρόκειται απλά και μόνο για μια στατική μη γραμμική ανάλυση. Με τη στατική μη γραμμική (ανελαστική) ανάλυση γίνεται ο υπολογισμός της υπερωθητικής καμπύλης, ο οποίος αποτελεί ένα μόνο βήμα της ΣΥΑ (βλ. σύντομη περιγραφή των βασικών βημάτων υπολογισμού στην επόμενη υποπαράγραφο).

Οι πρώτες εργασίες με αντικείμενο τη στατική σεισμική ανελαστική ανάλυση εμφανίζονται ήδη στη δεκαετία του 1970 (Gulkan & Sozen 1974, Saiidi & Sozen 1981). Η μεγάλη ώθηση δίνεται όμως στη δεκαετία του 1990 μετά τη δημοσίευση των πρώτων εκδόσεων των προαναφερθέντων σχετικών κειμένων της FEMA, ενώ κατά τα λίγα τελευταία χρόνια η παραγωγή σχετικών ερευνητικών εργασιών είναι ιδιαίτερα αυξημένη. Δυστυχώς, ήδη από τις πρώτες εμπεριστατωμένες διερευνήσεις και εφαρμογές της ΣΥΑ διαπιστώθηκαν αρκετά προβλήματα και σημαντικές αδυναμίες της μεθόδου αυτής (βλ. π.χ. Krawinkler & Seneviratna 1998, Fajfar 2000, Chopra & Goel 2002).

· *Τα προβλήματα των στατικών υπερωθητικών αναλύσεων*

Ένας πρώτος κύκλος προβλημάτων ανάγεται στις διαφορετικές παραδοχές που γίνονται από τους ερευνητές κατά την υλοποίηση της ΣΥΑ σε συγκεκριμένους φορείς. Τα αποτελέσματα των διερευνήσεων διαφοροποιούνται έντονα σε εξάρτηση π.χ. από την επιλογή της καθύψος μεταβολής των στατικών φορτίων που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση (ομοιόμορφα, τριγωνικά, βάσει της 1^{ns} ιδιομορφής κ.ά.) ή από τον τρόπο με τον οποίο προσδιορίζεται η μέγιστη *απαιτούμενη* μετατόπιση ή ακόμη από τη μέθοδο προσδιορισμού των ανελαστικών ιδιοτήτων των διατομών Ο/Σ (π.χ. μέθοδος των λωρίδων) και των δομικών στοιχείων (π.χ. μοντέλο κατανεμημένης πλαστικότητας για τους στύλους και συγκεντρωμένης πλαστικότητας στα άκρα των δοκών, βλ. Powell 1993). Χαρακτηριστική είναι εν προκειμένω η διαφοροποίηση των "προκατανομιστικών" κειμένων ATC-40 (1996) και FEMA 273(1997) & FEMA 356 (2000) όσον αφορά στον προσδιορισμό της μέγιστης απαιτούμενης μετατόπισης, αλλά και της εν γένει διαδικασίας ανάλυσης (ATC-40: "Capacity Spectrum Method", FEMA 273: "Displacement Coefficient

Method"). Και μόνο η διαφοροποίηση ως προς τον προσδιορισμό της μέγιστης απαιτούμενης μετατόπισης (πέραν των υπολοίπων διαφορών μεταξύ των δύο μεθόδων) δημιουργεί αξιοσημειώτες αποκλίσεις στα αποτελέσματα.

Ένας δεύτερος κύκλος προβλημάτων έχει να κάνει με *εγγενείς* αδυναμίες της ΣΥΑ και της κεντρικής της ιδέας, που είναι ο συσχετισμός της ανελαστικής απόκρισης της πραγματικής (πολυβάθμιας) κατασκευής με την απόκριση ενός «ισοδύναμου» μονοβάθμιου ταλαντωτή. Αυτό όμως σημαίνει, ότι η απόκριση της πραγματικής κατασκευής θεωρείται ότι εξαρτάται από μία μόνο ιδιομορφή ταλάντωσης, της οποίας η μορφή παραμένει σταθερή καθόλη τη διάρκεια του φαινομένου. Χάρην καλύτερου σχολιασμού παρατίθενται σε γενικές γραμμές τα βασικά βήματα υπολογισμού σύμφωνα με τη στατική υπερωθητική ανάλυση (βλ. Αβραμίδης 2003):

- (1) Σε ένα πρώτο βήμα καθορίζεται με συγκεκριμένο τρόπο το «ισοδύναμο» (δηλαδή «αντιπροσωπευτικό» της όλης κατασκευής) μονοβάθμιο σύστημα και υπολογίζεται η ανελαστική του μετατόπιση λόγω σεισμού/ών σχεδιασμού. Από την μετατόπιση αυτή προκύπτει η ανελαστική μετατόπιση στην κορυφή (ή σε άλλο επιλεγμένο σημείο) της πραγματικής κατασκευής, που ονομάζεται "μετατόπιση-στόχος" $\Delta_{\text{στοχ}}$. Η $\Delta_{\text{στοχ}}$ θεωρείται ότι εκφράζει την απαίτηση του σεισμού σχεδιασμού από την πραγματική κατασκευή.
- (2) Σε ένα δεύτερο βήμα καθορίζεται βάσει μίας και μόνης μορφής ταλάντωσης (π.χ. της θεμελιώδους ιδιομορφής) η καθύψος κατανομή των στατικών σεισμικών φορτίων του πραγματικού φορέα. Η κατανομή αυτή διατηρείται αμετάβλητη κατά τη διάρκεια της προοδευτικής διαρροής του φορέα. Με τα έτσι καθύψος κατανεμημένα οριζόντια φορτία διενεργείται η παλαιότερη γνωστή στατική υπερωθητική ανάλυση: Ξεκινώντας από μικρές τιμές των φορτίων προχωράμε σε διαδοχικές επαυξήσεις τους, υπολογίζοντας κάθε φορά την ανελαστική απόκριση του φορέα. Διαδοχικά και σε αντιστοιχία με την επαύξηση των φορτίων τροποποιείται βεβαίως και το χρησιμοποιούμενο προσομοίωμα της πραγματικής κατασκευής με εισαγωγή πλαστικών αρθρώσεων στα σημεία των διαρρευουσών διατομών. Η επαύξηση των φορτίων συνεχίζεται τουλάχιστον μέχρι να αναπτυχθεί μετατόπιση κορυφής ίση με $1,5 \Delta_{\text{στοχ}}$, αλλά μπορεί να συνεχιστεί και μέχρι να επέλθει κατάρρευση του όλου φορέα.
- (3) Σε ένα τρίτο βήμα γίνεται η αξιολόγηση. Η απόκριση του πραγματικού φορέα υπό τον σεισμό σχεδιασμού είναι εκείνη που αντιστοιχεί σε μετατόπιση κορυφής του ίση με την μετατόπιση-στόχο. Γι' αυτήν την κατάσταση, που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα, γίνεται η εκτίμηση των αναμενομένων ζημιών και γενικότερα η εκτίμηση της ανελαστικής συμπεριφοράς της κατασκευής.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η περιγραφείσα στατική υπερωθητική ανάλυση δίνει αποδεκτά αποτελέσματα μόνο όταν ο φορέας ταλαντώνεται πράγματι κατά προεξάρχοντα τρόπο σύμφωνα με την επιλεγμένη στο βήμα (2) μορφή ταλάντωσης. Κατά τα λοιπά *αγνοούνται οι συνεισφορές των ανώτερων ιδιομορφών ταλάντωσης*.

Το χαρακτηριστικό αυτό της ΣΥΑ την κάνει *εφαρμόσιμη ουσιαστικά* μόνον σε *επίπεδα συστήματα* (ή χωρικά συστήματα με πρακτικώς μηδενική στρέψη, π.χ. λόγω διπλής συμμετρίας), τα οποία διαθέτουν επιπλέον και υψηλό βαθμό γεωμετρικής και μαζικής ομοιομορφίας και που ως εκ τούτου αναμένεται να εμφανίσουν σχετικώς ομοιόμορφη καθύψος κατανομή ανελαστικών παραμορφώσεων.

Επίσης, επισημαίνεται ότι η διατήρηση της κατανομής των σεισμικών φορτίων αμετάβλητης καθύψος κατά τα διαδοχικά υπολογιστικά βήματα σημαίνει, ότι η μέθοδος συστηματικά δεν λαμβάνει υπόψη την μεταβολή των ταλαντωτικών ιδιοτήτων της κατασκευής κατά την προοδευτική εμφάνιση διαρροών (πλαστικών αρθρώσεων).

Τέλος, σημειώνεται ότι εφόσον πρόκειται για μη γραμμική μέθοδο δεν επιτρέπεται γενικώς κατά την εφαρμογή της η χρήση της Αρχής της Επαλληλίας με τον συνήθη σε γραμμικές μεθόδους τρόπο. Εντούτοις, η Αρχή αυτή εφαρμόζεται σαν να επρόκειτο για γραμμική διαδικασία (π.χ. στο τρέχον σχέδιο του Ευρωκώδικα 8 [EC8 (2002)] η Αρχή της Επαλληλίας χρησιμοποιείται τόσο

στην παράγραφο 4.3.3.5.1(6) για την εκτίμηση της απόκρισης λόγω των δύο οριζοντίων συνιστωσών του σεισμού, όσο και στην παράγραφο 4.3.3.4.2.7 για την εκτίμηση της εν χώρω στρέψης της κατασκευής).

Πολλά από τα προαναφερθέντα προβλήματα των στατικών υπερωθητικών αναλύσεων αποτελούν αντικείμενο εργασιών που παρουσιάζονται στο παρόν συνέδριο και στις οποίες παραπέμπεται ο αναγνώστης.

Πάντως, με δεδομένο ότι η θεωρητική θεμελίωση της ΣΥΑ είναι ισχνή για επίπεδα συστήματα και ανύπαρκτη για χωρικά (Krawinkler & Seneviratna 1998), η μέθοδος δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται για ποσοτικούς προσδιορισμούς, αλλά μόνον για ποιοτική εκτίμηση της ανελαστικής συμπεριφοράς υπό κατάλληλες προϋποθέσεις. Ως εκ τούτου, προσώρας, η ΣΥΑ μπορεί να χρησιμοποιείται μόνον συμπληρωματικά προς τις δύο γραμμικές μεθόδους ανάλυσης του ισχύοντος Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού υπό την έννοια πρόσθετων ελέγχων της μετελαστικής συμπεριφοράς της κατασκευής, ενώ δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται αυτοτελώς και εναλλακτικά προς αυτές.

· *"Προηγμένες" υπερωθητικές αναλύσεις*

Προς αντιμετώπιση των παραπάνω εγγενών αδυναμιών και προβλημάτων των "συμβατικών" στατικών υπερωθητικών αναλύσεων αναπτύχθηκαν διάφορες παραλλαγές της ΣΥΑ καθώς και άλλες "προηγμένες" (ή "μη συμβατικές") μέθοδοι που ξεφεύγουν από τα στενά όρια της στατικής υπερωθητικής ανάλυσης. Εξ αυτών ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι εξής μέθοδοι (που στη διεθνή βιβλιογραφία εμφανίζονται σε διάφορες παραλλαγές):

(1) Οι Ιδιομορφικές Υπερωθητικές Αναλύσεις (Multimodal or Modal Pushover Methods // Paret et al. 1996, Moghadam and Tso 2002, Chopra and Goel 2002, 2004), με τις οποίες επιδιώκεται να ληφθεί υπόψη η συμβολή των ανώτερων ιδιομορφών ταλάντωσης και των αντίστοιχων φασματικών επιταχύνσεων. Αντί μόνο μίας ανάλυσης, διενεργείται μια ολόκληρη σειρά στατικών υπερωθητικών αναλύσεων, μία για κάθε ιδιομορφή ταλάντωσης, και τα αποτελέσματά τους (μεγέθη απόκρισης) επαλληλίζονται με "κατάλληλο" τρόπο (Σημ.: Παρά τη μη γραμμικότητα του προβλήματος, εφαρμόζεται η Αρχή της Επαλληλίας!).

(2) Η "Ενεργειακή" Υπερωθητική Ανάλυση (Energy-Based Pushover Method // Hernández-Montes et al. 2004) με την οποία επιδιώκεται η αντιμετώπιση φαινομένων υπερβολικά μεγάλης αύξησης της μετακίνησης κορυφής ή και εναλλαγής του προσήμου της κατά τις αναλύσεις που λαμβάνουν υπόψη ανώτερες ιδιομορφές. Αντί της μετακίνησης κορυφής εισάγεται ως παράμετρος η απορροφούμενη ενέργεια και κατασκευάζονται αντίστοιχες υπερωθητικές καμπύλες.

(3) Η Φασματική Υπερωθητική Ανάλυση (Spectral Pushover Analysis // Αναστασιάδης 2001), κύριο χαρακτηριστικό γνώρισμα της οποίας είναι η απευθείας επαυξητική φόρτιση της κατασκευής με το φάσμα της σεισμικής διέγερσης αντί της επαυξητικής εφαρμογής των στατικών σεισμικών δυνάμεων ορόφων. Δεδομένου ότι κατά την ΦΥΑ ο φορέας επιλύεται σε κάθε βήμα εφαρμόζοντας την φασματική δυναμική ανάλυση, παύει να ισχύει ο περιορισμός σε επίπεδα συστήματα. Η αξιοπιστία της μεθόδου δεν έχει διερευνηθεί ακόμη πλήρως.

(4) Οι Προσαρμοστικές Υπερωθητικές Αναλύσεις με βάση τις δυνάμεις (Force-based Adaptive Pushover Methods // Bracci et al. 1997, Sasaki et al. 1998, Gupta & Kunnath 2000, Elnashai 2001, Antoniou and Rovithakis 2002, Aydinoglu 2003) με τις οποίες επιδιώκεται τόσο η συμπερίληψη της επιρροής ανώτερων ιδιομορφών ταλάντωσης όσο και της σταδιακής απομείωσης της δυσκαμψίας και της εν γένει μεταβολής των δυναμικών χαρακτηριστικών του φορέα λόγω των εμφανιζόμενων πλαστικοποιήσεων. Βασικό χαρακτηριστικό των μεθόδων αυτών είναι η τρέχουσα αναπροσαρμογή του διανύσματος φόρτισης. Στα πλαίσια ανάπτυξης τέτοιων μεθόδων προτάθηκαν και διαφορετικοί τρόποι πιθανοτικής επαλληλίας των ιδιομορφικών συνεισφορών, όπως η direct vectorial addition (DVA) αντί των γνωστών κανόνων της τετραγωνικής (SRSS) και της πλήρους (CQC) επαλληλίας (Kunnath 2004, Menjívar 2004). Η αποτελεσματικότητα των νέων αυτών τρόπων πιθανοτικής επαλληλίας δεν έχει διερευνηθεί πλήρως. Γενικότερα, με τις προσαρμοστικές υπερωθητικές αναλύσεις δεν φαίνεται να επιτυγχάνεται ιδιαίτερη βελτίωση στα αποτελέσματα έναντι των "συμβατικών" (μη προσαρμοστικών) μεθόδων. Χαρακτηριστικά αναφέρεται η

διατηρούμενη αδυναμία αποτελεσματικής αντιμετώπισης χωρικών φορέων (βλ. π.χ. Papanikolaou et al. 2005).

(5) Οι Προσαρμοστικές Υπερωθητικές Αναλύσεις με βάση τις μετακινήσεις (Displacement-based Adaptive Pushover Analysis // Antoniou and Pinho 2004a, 2004b), με τις οποίες επιδιώκεται η παράκαμψη των αποκλίσεων που εμφανίζουν οι προσαρμοστικές υπερωθητικές αναλύσεις με βάση τις δυνάμεις. Στις μεθόδους αυτές η κατασκευή υποβάλλεται σε κάθε βήμα της επαυξητικής διαδικασίας όχι σε καθύψος κατανεμημένες σεισμικές δυνάμεις, αλλά σε ένα προφίλ καταναγκασμένων μετατοπίσεων. Παρά τα βελτιωμένα αποτελέσματα, οι μέθοδοι αυτές δεν είναι ακόμη σε θέση να αναπαράγουν σε ικανοποιητικό βαθμό τα αποτελέσματα της δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης.

(6) Η Δυναμική Υπερωθητική (Ανελαστική) Ανάλυση (Incremental Dynamic Analysis // Vamvatsikos and Cornell 2002) κατά την οποία η σεισμική διέγερση περιγράφεται από συγκεκριμένο επιταχυνσιογράφημα που εφαρμόζεται επαυξητικά. Η κατασκευή επιλύεται σε κάθε βήμα της επαυξητικής διαδικασίας μέσω μιας μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης (non-linear time-history analysis). Η μέθοδος αυτή είναι η ακριβέστερη των διαθέσιμων σήμερα μεθόδων, γι' αυτό και τα αποτελέσματά της χρησιμοποιούνται πολύ συχνά ως "λύση αναφοράς" με την οποία συγκρίνονται τα αποτελέσματα απλούστερων αναλύσεων. Ωστόσο, για τη μέθοδο αυτή ισχύουν οι δυσκολίες και οι περιορισμοί των μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων που αναφέρθηκαν στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου 5.

· *Η δυσκολία προσομοίωσης της ανελαστικής σεισμικής συμπεριφοράς*

Από την παραπάνω σύντομη και λόγω του περιορισμένου χώρου αναπόφευκτα αποσπασματική επισκόπηση της τρέχουσας έρευνας συνάγεται αβίαστα το συμπέρασμα ότι οι μέθοδοι υπερωθητικής ανάλυσης ("συμβατικές" και "προηγμένες") βρίσκονται υπό διαρκή αναμόρφωση λόγω των προβλημάτων που παρουσιάζουν σε διάφορα επί μέρους επίπεδα. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα των κειμένων της FEMA. Οι αρχικά προταθείσες διαδικασίες ανελαστικής ανάλυσης στα κείμενα FEMA 273/274 του 1997 βελτιώθηκαν το 2000 με το FEMA 356 και αναθεωρήθηκαν σε σημαντικό βαθμό το 2005 με το FEMA 440 (ATC-55).

Έχοντας επίγνωση των ταχύτατων αυτών αλλαγών, που έρχονται να αντιμετωπίσουν σοβαρά προβλήματα προγενέστερων μεθόδων και διαδικασιών ανάλυσης, δεν είναι δυνατόν να λάβει κανείς στα σοβαρά τον ισχυρισμό ορισμένων ότι κάνοντας χρήση του τάδε ή του δείνα στατικού προγράμματος προσδιορίστηκαν με ελάχιστες αποκλίσεις οι πλαστικές αρθρώσεις (βλάβες) που εμφάνισαν πραγματικές κατασκευές (π.χ. στον σεισμό της Αθήνας το 1999). Η αναφερόμενη σχεδόν απόλυτη σύμπτωση πραγματικών βλαβών σε σεισμικά επιπονηθείσες κατασκευές με τα αναλυτικά αποτελέσματα υπερωθητικών αναλύσεων (και μάλιστα αναλύσεων που βασίζονται σε "πρώιμες" από την τωρινή σκοπιά διαδικασίες) είναι ελάχιστα πειστική.

Επίσης, από την προηγούμενη επισκόπηση διαφαίνεται η μεγάλη δυσκολία "μετάφρασης" της ανελαστικής σεισμικής συμπεριφοράς των κατασκευών σε ένα ρεαλιστικό και ικανοποιητικό για τη δομική πράξη υπολογιστικό προσομοίωμα. Οι εξελίξεις των τελευταίων ετών - με την πληθώρα των προτεινόμενων προσομοιώσεων (μεθόδων), τη γρήγορη διερεύνησή τους και την ακόλουθη ταχύτατη βελτίωση ή αντικατάστασή τους με άλλα μοντέλα - επαληθεύουν αυτό που αναφέρθηκε στην παράγραφο 1, ότι δηλαδή τα υπολογιστικά μοντέλα που δεν έχουν υποστεί πειραματική ή πραγματική (π.χ. σεισμός) δοκιμασία διατρέχουν τον κίνδυνο να είναι με μεγάλη πιθανότητα λανθασμένα. Ιδιαίτερα μάλιστα τονίζεται ότι η διαπίστωση των αδυναμιών των διαφόρων υπερωθητικών αναλύσεων γίνεται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό της όχι μέσω της πειραματικής δοκιμασίας τους, αλλά μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων τους με τα αποτελέσματα ακριβέστερων μεθόδων ανάλυσης που επέχουν θέση λύσεων αναφοράς, όπως π.χ. η ακριβέστερη όλων των άλλων δυναμική ανελαστική (υπερωθητική) ανάλυση. Εντούτοις, και αυτή η μέθοδος εμπεριέχει σωρεία παραδοχών, γι' αυτό και τα αποτελέσματά της χρήζουν εμπεριστατωμένης πειραματικής επιβεβαίωσης.

Συμπερασματικά, όσον αφορά στη δομική πράξη ισχύει προς το παρόν για τις "προηγμένες" υπερωθητικές αναλύσεις ό,τι και για τη "συμβατική" στατική υπερωθητική ανάλυση: Η χρήση τους μπορεί να γίνεται συμπληρωματικά προς τις γραμμικές μεθόδους ανάλυσης των ισχυόντων Κανονισμών υπό την έννοια πρόσθετων ελέγχων της μετελαστικής σεισμικής συμπεριφοράς της κατασκευής, ενώ δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται αυτοτελώς και εναλλακτικώς προς αυτές.

7 ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η ανασκόπηση της εξέλιξης των μεθόδων ανάλυσης/διαστασιολόγησης κατασκευών δείχνει την προεξάρχουσα σημασία που έχει η απεικόνιση, εξήγηση και πρόβλεψη της πραγματικής συμπεριφοράς τους υπό μορφή υπολογιστικών προσομοιωμάτων. Η περαιτέρω εξέλιξη των τελευταίων, παρά τις θετικές και ευρείες προοπτικές της, δεν είναι εντούτοις δυνατόν να προβλεφθεί. Αρκετά ερευνητικά μοντέλα που εκτιμώνται σήμερα ως πολλά υποσχόμενα ίσως απορριφθούν τελικώς στην πράξη, ενώ ανά πάσα στιγμή μπορεί να προταθούν άλλες λυσιτελείς προσομοιώσεις. Το πεδίο είναι ελεύθερο για δημιουργική έρευνα και όλοι ελπίζουμε σε ενδιαφέροντα και αξιοποιήσιμα στην πράξη αποτελέσματα.

Ένα πάντως είναι περισσότερο από βέβαιο: Τα υπολογιστικά μας προσομοιώματα ποτέ πια δεν θα έχουν την απλότητα του κλασικού μοντέλου του δικτυώματος. Ευτυχώς όμως, και τα υπολογιστικά μέσα που διαθέτουμε (και θα διαθέτουμε στο μέλλον) επαρκούν με το παραπάνω τον χειρισμό της πολυπλοκότητας των προσομοιωμάτων μας.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Αβραμίδης Ι. Ε. (2003) "Ανάλυση Κατασκευών", *Γενική Εισήγηση στο 14^ο Συνέδριο Σκυροδέματος*, Κως, 15-17 Οκτωβρίου 2003, Πρακτικά συνεδρίου τόμος Α', σελ. 29-46.

Αβραμίδης Ι.Ε. & Αναστασιάδης Κ. (2001) "Σχεδιασμός με Βάση την Επίδοση. Πλήρης-Μερική Αντισεισμική Προστασία", *Δελτίο ΣΠΜΕ*, τευχ. 287 (Ιούν.-Ιούλ. 2001), σελ. 26-30, και τευχ. 288 (Αύγ. 2001), σελ. 30-31.

Αναστασιάδης, Κ. (2001) "Φασματική υπερωθητική ανάλυση για εκτίμηση σεισμικής επίδοσης κτιρίων", *2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμ. Μηχανικής και Τεχν. Σεισμολογίας*, Θεσ/νίκη, 2001.

Antoniou S. and Pinho R. (2004a) "Advantages and limitations of adaptive and non adaptive force-based pushover procedures", *J. of Earthq. Engng*, Vol. 8, No. 4, pp. 497-522.

Antoniou S. and Pinho R. (2004b) "Development and verification of a displacement-based adaptive pushover procedure", *J. of Earthq. Engng*, Vol. 8, No. 5, pp. 643-661.

Antoniou S., Rovithakis A. and Pinho R (2002) "Development and verification of a fully adaptive pushover procedure", *Proc. 12th Europ. Conf. Earthq. Eng.*, London, UK, paper No. 822.

ASCE (2003) "Seismic Evaluation of Existing Buildings", *ASCE Standard 31-03*.

ATC-40 (1996). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. *Applied Technology Council*, California, Report No. SSC 96-01, November 1996.

Aydinoglu M.N. (2003) "An incremental response spectrum analysis procedure based on inelastic spectral displacements for multi-mode seismic performance", *Bulletin of Earthquake Engng*, No. 1, pp. 3-36.

Bracci J.M., Kunnath S.K. and Reinhorn A.M. (1997) "Seismic performance and retrofit evaluation for reinforced concrete structures", *ASCE J. Struct. Eng.*, 123(1), 3-10.

Chopra A.K and Goel R.K. (2002) "A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings", *Earthquake Engng Struct Dyn.*, 31, 561-582.

- Chopra A.K and Goel R.K. (2004) "A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for unsymmetric-plan buildings, *Earthquake Engng Struct Dyn.*, 33, 903-927.
- Duddeck H. (1983) "Die Ingenieuraufgabe, die Realität in ein Berechnungsmodell zu übersetzen", *Bautechnik* 60 (1983), 225-234.
- Duddeck H. (1993) "Entwicklung der Berechnungsmodelle des Bauingenieurs: Woher?Wohin?", *Bautechnik* 70 (1993), 640-649.
- EAK-2000, Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός, Σεπτ. 1999.
- EC8 (2002) "Eurocode 8", Draft No.5, May 2002 (revised final project team draft).
- Elnashai A.S. (2001) "Advanced inelastic static (pushover) analysis for earthquake applications", *Struct. Eng. Mech.*, 12(1), 51-69.
- Fajfar P. (2000) "A nonlinear analysis method for performance-based seismic design", *Earthquake Spectra* 16 (3),573-592.
- FEMA 273&274 (1997) "NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings", *Publ. FEMA 273 & 274*, Washington, D.C., October 1997.
- FEMA 356(2000) "Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings", *Publ. FEMA 356*, Washington, D.C., November 2000.
- FEMA 440 (2005) "Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures", *ATC-55 project*, prepared by FEMA (FEMA 440), Wadhington, D.C..
- Griebenow G. (1977) "Experimentelle Untersuchungen zum Biegetragverhalten gerissener Stahlbetonbalken und -platten im Vergleich mit nichtlinearen FEM-Berechnungen", Bericht Nr. 77-24, *Institut für Statik, TU Braunschweig*, 1977.
- Gulkan P. and Sozen M.A. (1974) "Inelastic response of rc structures to earthquake motion", *J. ACI*, Vol. 71, pp. 607-614, 1974.
- Gupta B. and Kunnath S.K. (2000) "Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures", *Earthquake Spectra* 16 (2), 367-391.
- Hernández-Montes E., Kwon O.-S. and Arschheim M.A. (2004) "An energy-based formulation for first- and multiple-mode nonlinear static (pushover) analyses", *J. of Earthq. Engng*, Vol. 8, No.1 (2004), 69-88.
- KAN.ΕΠΕ. (2005) "Σχέδιο Κανονισμού Επεμβάσεων", *Ο.Α.Σ.Π.*, Νοέμβριος 2005.
- Kim S.D., Hong W. K. and Ju Y.K. (1999) "A modified inelastic analysis of tall buildings considering changes of dynamic characteristics", *Struct. Design Tall Build* 8, 57-73.
- Kranwinkler H. & Seneviratna G.D.P.K. (1998) "Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation", *Engineering Structures*, vol. 20, No. 4-6, 452-464, 1998.
- Kunnath S.K. (2004) "Identification of modal combination for nonlinear static analysis of building structures", *Computer-Aided Civil and Infrastruct. Eng.*, 19, 246-259.
- Menjivar M.A.L. (2004) "A review of existing pushover methods for 2-D reinforced concrete buildings", *PhD Thesis, Rose School*, Italy, Sept. 2004.
- Moghadam A.S. and Tso W.K. (2002) "A pushover procedure for tall buildings", *Proc. 12th Europ. Conf. Earthq. Engng.*, London, UK, paper 395.
- Papanikolaou V.K., Elnashai A.S and Pareja J.H. (2005) "Limits of applicability of conventional and adaptive pushover analysis for seismic response assessment", *Report, Mid-America Earthquake Center*, Civil and Environmental Engineering Department, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, March 2005.

- Paret T.F., Sasaki K.K., Eilbeck D.H. and Freeman S.A. (1996) "Approximate inelastic procedures to identify failure mechanisms from higher mode effects", *Proc. 11th Conf. Earthq. Eng.*, Acapulco, Mexico, paper 966.
- Powell G. H. "DRAIN-2DX Element description and user guide", *USB/SEMM*, Report Nr. 18/93, Univ. of California, Dec. 1993.
- Saiidi M. and Sozen A.M. "Simple nonlinear analysis of rc structures", *ASCE, Struct. Div.*, Vol. 107(ST5), pp. 937-951, 1981.
- Sasaki K.K., Freeman and Paret T.F. (1998) "Multi-mode pushover procedure (MMP) - A method to identify the effects of higher modes in a pushover analysis", *Proc. 6th US Conf. Earthq. Eng.*, Seattle, Washington - Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California.
- SEAOC (1995) "Performance based seismic engineering of buildings", Vision 2000 Committee, Structural Engineering Association of California, California.
- Szabo I. (1977) "Geschichte der mechanischen Prinzipien", Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart, 1977.
- Vamvatsikos D. and Cornell A. (2002) "Incremental dynamic analysis", *Earthquake Engng Struct Dyn.*, 31, pp. 491-514.
- Wegner R. (1974) "Tragverhalten von Stahlbetonplatten mit nichtlinearen Materialgesetzen im gerissenen Zustand", *Bericht Nr. 74-11, Institut für Statik, TU Braunschweig*, 1974.