

**Διερεύνηση της επιρροής των παραδοχών της ανάλυσης
στον προϋπολογισμό των οικοδομικών έργων**
Investigation of the effect of structural analysis assumptions
on the building cost

**Αναστάσιος Σέξτος¹, Μιχαήλ Διακομιχάλης², Κυριάκος Μαυρόπουλος²,
Γεώργιος Μαρκάκης², Ευάγγελος Κατσάνος³**

*Λέξεις κλειδιά: αντισεισμικός σχεδιασμός, δυναμική των κατασκευών,
προϋπολογισμός οικοδομικών έργων*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η παρούσα εργασία αφορά στη διερεύνηση της επιρροής των παραμέτρων της ανάλυσης και του σχεδιασμού στο συνολικό τελικό κόστος κατασκευής των οικοδομικών έργων. Οι παράμετροι αυτές αφορούν συνήθεις παραδοχές ανάλυσης ή επιλογές σχεδιασμού που πραγματοποιούνται από τον μελετητή, όπως οι συνθήκες στήριξης (εν είδει ελατηριακών σταθερών) ή ο συντελεστής συμπεριφοράς q καθώς επίσης και παραμέτρους που δύναται να επιλεγούν λανθασμένα από τον ίδιο εκ παραδρομής στο πλαίσιο μιας μελέτης (όπως για παράδειγμα τα στοιχεία που αφορούν τον υπολογισμό του φάσματος σχεδιασμού). Στο πλαίσιο αυτό, επιλέχθηκε να μελετηθούν τέσσερα πραγματικά πολώροφα κτίρια, σχεδιασμένα σύμφωνα με τις διατάξεις του ΕΚΩΣ2000 και του ΕΑΚ2000 τα οποία προσομοιώθηκαν και επιλύθηκαν με δύο (για λόγους σύγκρισης) εμπορικά στατικά προγράμματα με τη μέθοδο της δυναμικής φασματικής ανάλυσης και για όλους τους συνδυασμούς των παραμέτρων που μελετώνται. Για κάθε μια παραμετρική ανάλυση υπολογίστηκε με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια τόσο το επιμέρους (δομικό, μη δομικό και δαπάνη λοιπών δαπανών, κερδών και φόρων) και συνολικό κόστος της κατασκευής, κατόπιν αναλυτικής προμέτρησης υλικών και κοστολόγησης βάση των αντίστοιχων διατάξεων Α.Τ.Ο.Ε. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι αφενός το αμιγώς δομικό κόστος των κατασκευών αποτελεί σταθερά ένα σχετικά μικρό μέρος (περίπου 1/3) του συνολικού προϋπολογισμού, γεγονός που ενδεχομένως αναδεικνύει το ζήτημα του πραγματικού κόστους της επιδιωχθείσας αντισεισμικής ασφάλειας σε σχέση με άλλες δαπάνες, αφετέρου δε, ότι η επιρροή των παραμέτρων που μελετήθηκαν στο τελικό κόστος αποτελεί συνάρτηση της κανονικότητας του κτιρίου.

¹ Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., email: asextos@civil.auth.gr

² Πολιτικός Μηχανικός, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

³ Πολιτικός Μηχανικός, MSc, Υποψ. Διδάκτωρ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

ABSTRACT : The present work deals with the investigation of the effect of structural analysis assumptions on the overall cost of buildings. Decisions related to the analysis (i.e. the assumption of flexible or fixed supporting conditions) or the design of a building (i.e. the adoption of the appropriate behavior factor q) are thoroughly studied in terms of their final impact on the construction cost. Moreover, the effect on the total cost of numerous analysis parameters, such as those defining the design spectrum, which can be accidentally set wrongly by the designer itself is also examined. Along these lines, four different buildings are selected for study, specifically designed for all the aforementioned cases with the use of commercially available, structural design software packages and according to the Hellenic Code for Concrete (ΕΚΩΣ2000) and the Hellenic Seismic Code (ΕΑΚ2000). In the following, the exact cost of construction is derived by considering in maximum possible detail the structural and non-structural cost, as well as any additional profit or tax of the constructor. The results indicate (a) that the purely structural cost is found approximately equal to the 1/3 of the total cost in all cases studied, a fact that poses the question of the actual cost of the foreseen seismic safety while (b) that the effect of the analysis decisions and errors is also associated with the regularity of the building in plan and in height.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια πρώτη προσπάθεια ποσοτικοποίησης με σημερινούς τεχνικούς, υπολογιστικούς και οικονομικούς όρους, του πραγματικού κόστους της αντισεισμικής προστασίας για την περίπτωση νεόδμητων οικοδομών οι οποίες μελετώνται με το τρέχον κανονιστικό πλαίσιο. Ερέθισμα για τη διερεύνηση αυτή αποτελεί η παγιωμένη πλέον άποψη στην αγορά κατοικίας ότι οι σύγχρονες διατάξεις του αντισεισμικού κανονισμού (παρότι προδιαγράφουν ένα ελάχιστο αποδεκτό επίπεδο ασφαλείας και ταυτόχρονα δια του συντελεστή συμπεριφοράς αποδέχονται βλάβες στον φέροντα οργανισμό για το σεισμό σχεδιασμού) είναι ήδη υπερεπαρκείς. Αντίθετα, κάθε απόκλιση επί το ασφαλέστερο από τις ελάχιστες κατά τον κανονισμό προδιαγραφές δεν παρουσιάζει πραγματικό αγοραστικό ενδιαφέρον για τους εν δυνάμει ιδιοκτήτες οι οποίοι συνηθέστατα ιεραρχούν το ζήτημα της πρόσθετης αντισεισμικής ασφάλειας πολύ χαμηλά στις προτεραιότητές τους, σε αντίθεση με λοιπά επιφαινόμενα της κατασκευής. Στον αντίποδα, αυτό που δυστυχώς συχνά παρουσιάζει πρακτικό ενδιαφέρον για τους κατασκευαστές, είναι το κόστος το οποίο θα προέκυπτε εξαιτίας ενός ενδεχόμενου λάθους του μελετητή κατά την ανάλυση ακόμη και σε περίπτωση που το σφάλμα αυτό θα οδηγούσε σε σχεδιασμό προς τη μεριά της ασφαλείας.

Μέχρι σήμερα, είναι σχετικά λίγες οι αναλογιστικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο του ΕΑΚ2000 (Αβραμίδης και συν., 2001, Papachristidis et al., 2005, Μωρέτη και Παπαλοΐζου, 2006, Παπαχριστίδης και συν., 2006), σε σύγκριση του ΕΑΚ2000 με τον Ευρωκώδικα 8 (Panagiotakos & Fardis, 2004, Athanasiadou, 2008) ή αμιγώς σε επίπεδο Ευρωκώδικα 8 (Kappos, 1998) για τον προσδιορισμό της επίπτωσης του επιπέδου πλαστιμότητας στο

τελικό, πραγματικό κόστος μιας οικοδομής. Γενικά, στις περισσότερες περιπτώσεις, το κόστος που εξετάζεται αφορά στην αξία του κτιρίου για μελέτες αποτίμησης και σεισμικής διακινδύνευσης (Kappos et al., 2008), τη συσχέτιση του δείκτη βλάβης με τις οικονομικές απώλειες (Καρέλα και Δρίτσος, 2006, Ελευθεριάδου και Καραμπίνης, 2006, Kappos et al., 2007) και τη δαπάνη αποκατάστασης μετά από έναν ισχυρό σεισμό (Δρίτσος και συν., 2003, Graf and Lee, 2009), τη δαπάνη (Στυλιανίδης και συν., 2003) και σκοπιμότητα (Kappos & Dimitrakopoulos, 2008) προσεισμικής ενίσχυσης, τη συγκριτική αποτίμηση διεθνών κανονισμών (Laogan & Elnashai, 1999) ή τη συνολική διαδικασία βελτιστοποίησης του σχεδιασμού των κτιριακών κατασκευών (Lagaros et al., 2009). Αντίστοιχη αποτίμηση της επιρροής εκ τυχαίου λάθους κατά τη φάση της ανάλυσης δεν έχει υποπέσει στην αντίληψη των συγγραφέων. Στην προκειμένη περίπτωση και με βάση τα ερωτήματα που διατυπώθηκαν παραπάνω, καταστρώθηκε ένα πλαίσιο παραμετρικών αναλύσεων όπου με τη χρήση δύο διαφορετικών πακέτων ελληνικού τεχνικού λογισμικού (εν προκειμένω Fespa, Stereostatika) και με ένα κατά το δυνατόν ρεαλιστικό λογισμικό υπολογισμού του συνολικού κόστους του οικοδομικού έργου βάση προμέτρησης και τιμών Α.Τ.Ο.Ε. το οποίο αναπτύχθηκε από τους συγγραφείς, προσδιορίστηκε η επίπτωση επί του συνολικού προϋπολογισμού του έργου όταν ο μελετητής θέτει εκ παραδρομής λανθασμένα τα δεδομένα του φάσματος σχεδιασμού (ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας, απόσβεση, κατηγορία εδάφους) ή συνειδητά επιλέγει διαφορετική τιμή συντελεστή συμπεριφοράς q .

Το τελευταίο αποτελεί ένα λεπτό ζήτημα δεδομένου του γεγονότος ότι, αυστηρά ομιλώντας, το τρέχον κανονιστικό πλαίσιο πράγματι επιτρέπει το σχεδιασμό χωρίς απαιτήσεις πλαστιμότητας δια της θεώρησης συντελεστή συμπεριφοράς q μικρότερου του προβλεπόμενου στον Πίνακα 2.6 του ΕΑΚ2000 και την δι αυτού του τρόπου αποφυγή ικανοτικών ελέγχων στοιχείων και κόμβων καθώς και της μέριμνας υλοποίησης κατασκευαστικών διαμορφώσεων κρίσιμων περιοχών για τη διασφάλιση της απορρόφησης σεισμικής ενέργειας μέσω μεταελαστικών παραμορφώσεων. Ειδικότερα, σύμφωνα με τη διάταξη της παραγράφου §4.1.4 οι έλεγχοι αυτοί (όπως περιγράφονται στις §4.1.4.1, §4.1.5 και §4.1.6 και στα Παραρτήματα Β και Γ του ΕΑΚ2000) μπορούν να αποφεύγονται εφόσον χρησιμοποιείται συντελεστής συμπεριφοράς q για τον οποίο ισχύει:

$$1.0 < q < \min \left\{ \frac{1.5}{q_{\text{πίνακα 2.6 ΕΑΚ}}/2} \right\} \quad (1)$$

Αυτό σημαίνει ότι ο σχεδιασμός δύναται να είναι οιονεί ελαστικός ή σχεδόν ελαστικός υπό το σεισμό σχεδιασμού και ότι η ανάπτυξη του αναγκαίου υπολοίπου πλαστιμότητας επαφίεται αποκλειστικά στις υπεραντοχές του φορέα και στις κατασκευαστικές διατάξεις του ΕΚΩΣ2000 που αφορούν κατασκευές χωρίς αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας (βλ. και Καλδέρης και Ζέρης, 2006). Δεδομένου του γεγονότος ότι η τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς είναι ίση προς 3.5 για παισιακά και μικτά συστήματα με αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας, από την σχέση (1) απορρέει πως πρακτικά, οι φορείς αυτοί μπορούν να σχεδιαστούν είτε για τιμή 3.5 (συνηθέστερα) είτε με τιμή $q=1.5$.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί πως η πραγματική δυνατότητα απόσβεσης σεισμικής ενέργειας σε κρίσιμες περιοχές και το αντίστοιχο επίπεδο αντισεισμικής ασφάλειας ενός οικοδομικού έργου δεν θα πρέπει να συναρτάται αμφιμονοσήμαντα με τον συντελεστή μετελαστικής συμπεριφοράς q καθώς η δυναμική ανελαστική συμπεριφορά ενός κτιρίου από Ο/Σ υπό ισχυρή σεισμική φόρτιση είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων και αβεβαιοτήτων κατά την προσομοίωση, ανάλυση και τον σχεδιασμό έως την τελική του κατασκευή (Chrysanthopoulos et al., 2000). Ως εκ τούτου, η παρούσα εργασία δεν επιχειρεί να απαντήσει στο ερώτημα *περί του θεμιτού της απομείωσης* του συντελεστή συμπεριφοράς q παρά μόνον επιδιώκει να *εκτιμήσει το κόστος* της επιλογής αυτής (μεταξύ και άλλων) στο συνολικό προϋπολογισμό του έργου. Υπό το πρίσμα αυτό θα πρέπει να ειδωθεί και η παραμετρική ανάλυση που περιγράφεται στις ενότητες που ακολουθούν.

ΣΤΑΤΙΚΟΙ ΦΟΡΕΙΣ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΗΘΗΚΑΝ ΚΑΙ ΠΛΑΙΣΙΟ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Για τη διερεύνηση της ευαισθησίας του κόστους στις παραμέτρους σχεδιασμού μελετήθηκαν τέσσερις πολυώροφοι φορείς από οπλισμένο σκυρόδεμα οι οποίοι συνοψίζονται στο **Σχήμα 1**. Ο φορέας Α αποτελεί τον πλέον σύνθετο εκ των προτύπων παραδειγμάτων που έχουν προετοιμαστεί στο πλαίσιο προγράμματος του Ο.Α.Σ.Π. για τον έλεγχο του τεχνικού λογισμικού (Αβραμίδης και συν., 2003) ενώ ο φορέας Β είναι πραγματικός (Sextos et al., 2005) και ανήκει στη ζώνη ΙΙΙ αλλά ενισχύθηκε με κατάλληλα διατεταγμένα τοιχώματα και επαναστασιασολογήθηκε ώστε να πληρεί τις διατάξεις του ΕΑΚ2000, δοθέντως ότι έχει κατασκευαστεί το 1980. Τα κτίρια Γ και Δ είναι επίσης νεόδμητες πραγματικές κατασκευές στην περιοχή της Θεσσαλονίκης (ζώνη Ι) οι οποίες έχουν εξ' αρχής σχεδιαστεί σύμφωνα με το ισχύον κανονιστικό πλαίσιο. Οι φορείς αυτοί με εξαίρεση τον Α διαθέτουν υπόγειο ενώ είναι, σκοπίμως, μη-κανονικοί σε κάτοψη και καθ' ύψος με εξαίρεση τον Γ ο οποίος είναι γενικά συμμετρικός και κανονικός ώστε να διερευνηθεί ο ρόλος της κανονικότητας στην ευαισθησία του κόστους επί των παραμέτρων που εξετάζονται. Σε όλες τις περιπτώσεις για την κατασκευή του φέροντος οργανισμού θεωρήθηκε σκυρόδεμα C20/25, ενώ ο χάλυβας για τους οπλισμούς των διαμήκων ράβδων και των συνδετήρων ελήφθη S500 και S500s αντίστοιχα.

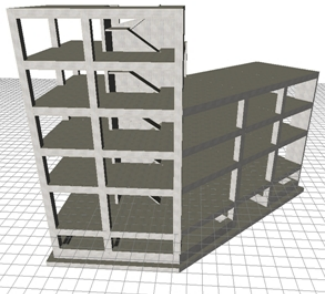
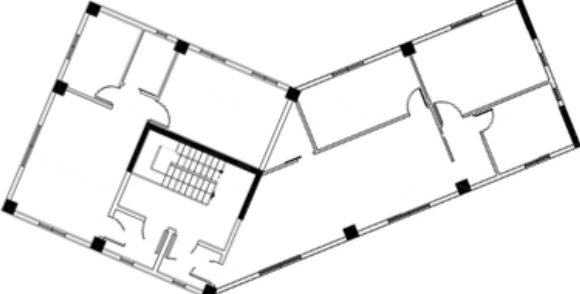
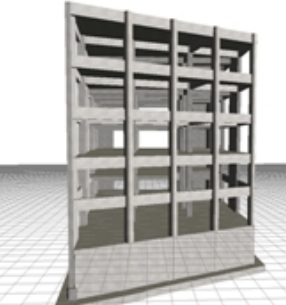
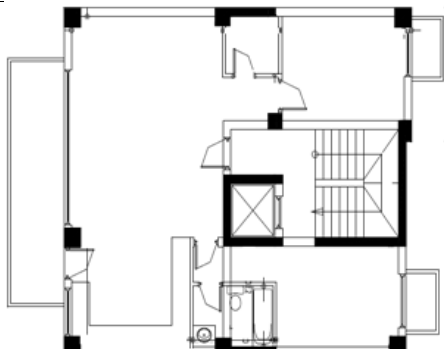
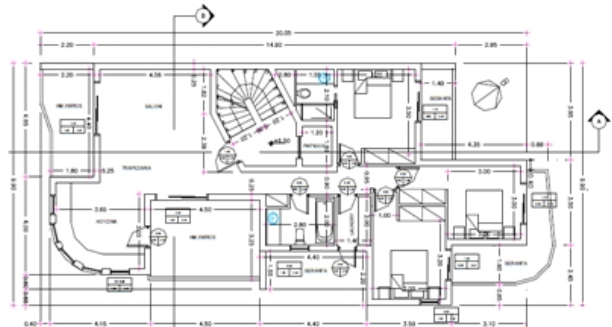
Όλα τα φορτία ελήφθησαν σύμφωνα με τους ισχύοντες ελληνικούς κανονισμούς. Όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκαν, για λόγους σύγκρισης, δύο διαφορετικά πακέτα τεχνικού λογισμικού (Fespa, Stereostatika) καθώς και ένα εναλλακτικό (ETABS-etoools) ειδικά για τη διακρίβωση της ορθής χρήσης των προγραμμάτων και την τεκμηρίωση της αξιοπιστίας της διαδικασίας επίλυσης για την περίπτωση πρότυπων, τυπικών φορέων για τους οποίους υπάρχουν διαθέσιμα αποτελέσματα ανάλυσης και διαστασιολόγησης (Σέξτος και συν., 2008). Διαφορές πράγματι παρατηρήθηκαν, ιδιαίτερα αναφορικά με τα εντατικά μεγέθη και κυρίως, τον προτεινόμενο οπλισμό περίσφιξης της κρυφοκολώνας των πυρήνων (Μαυρόπουλος, 2008). Οι διαφορές αυτές αποδίδονται σε διαφορετικές παραδοχές του λογισμικού κατά περίπτωση, σε γενικές πάντως γραμμές

παρατηρήθηκε συμφωνία τουλάχιστον σε επίπεδο τελικών ξυλοτύπων. Για λόγους ορθότερης εκτίμησης του κόστους για τις διάφορες παραμετρικές εκδοχές της ανάλυσης, το συνολικό κόστος υπολογίστηκε με βάση τις αναλύσεις ενός εκ των προγραμμάτων το οποίο ελήφθη ως επίπεδο αναφοράς. Όλοι οι φορείς επιλύθηκαν καταρχάς με βάση τα πραγματικά δεδομένα και ακολούθως επαναδιαστασιολογήθηκαν για με τη θεώρηση μιας διαφορετικής τιμής μιας κάθε φορά εκ των παραμέτρων του φάσματος σχεδιασμού, εν προκειμένω:

- Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας: I, II, III
- Κατηγορία εδάφους: A, B, Γ, Δ
- Συντελεστής απόσβεσης: 2%, 3%, 4%, 5%, 6%
- Ελατηριακή σταθερά: 10000, 30000, 50000, 70000, 110000, 130000 kN/m³
- Συντελεστής συμπεριφοράς η : 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5

Υπενθυμίζεται ότι οι ανωτέρω τιμές των παραμέτρων (ζώνη σεισμικότητας, κατηγορία εδάφους, συντελεστής απόσβεσης και ελατηριακή σταθερά εδάφους) αφορούν πιθανή, εκ παραδρομής λανθασμένη εισαγωγή δεδομένων από τον μελετητή ενώ οι τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς αποτελούν μια δυνητικά συνειδητή επιλογή από μέρους του. Το πλαίσιο αυτό παραμετρικής ανάλυσης οδήγησε τελικώς σε $(3+4+5+6+6) \times (4 \text{ κτίρια}) = 96$ διαφορετικές επιλύσεις για κάθε μια από τις οποίες πραγματοποιήθηκε λεπτομερής προμέτρηση από το ίδιο το χρησιμοποιούμενο λογισμικό. Κατόπιν συντάχθηκε, επίσης για κάθε μια από τις ανωτέρω περιπτώσεις, αναλυτικός πίνακας 47 τον αριθμό ποσοτήτων και εργασιών που αφορούν τόσο στην κατασκευή του φέροντος οργανισμού όσο και στην αποπεράτωση της οικοδομής μέχρι τη λειτουργία της με βάση το Α.Τ.Ο.Ε. και τις τρέχουσες τιμές της εγκυκλίου. Ενδεικτικά στον **Πίνακα 1** παρατίθεται η ανάλυση ποσοτήτων και εργασιών για την περίπτωση του κτιρίου Γ.

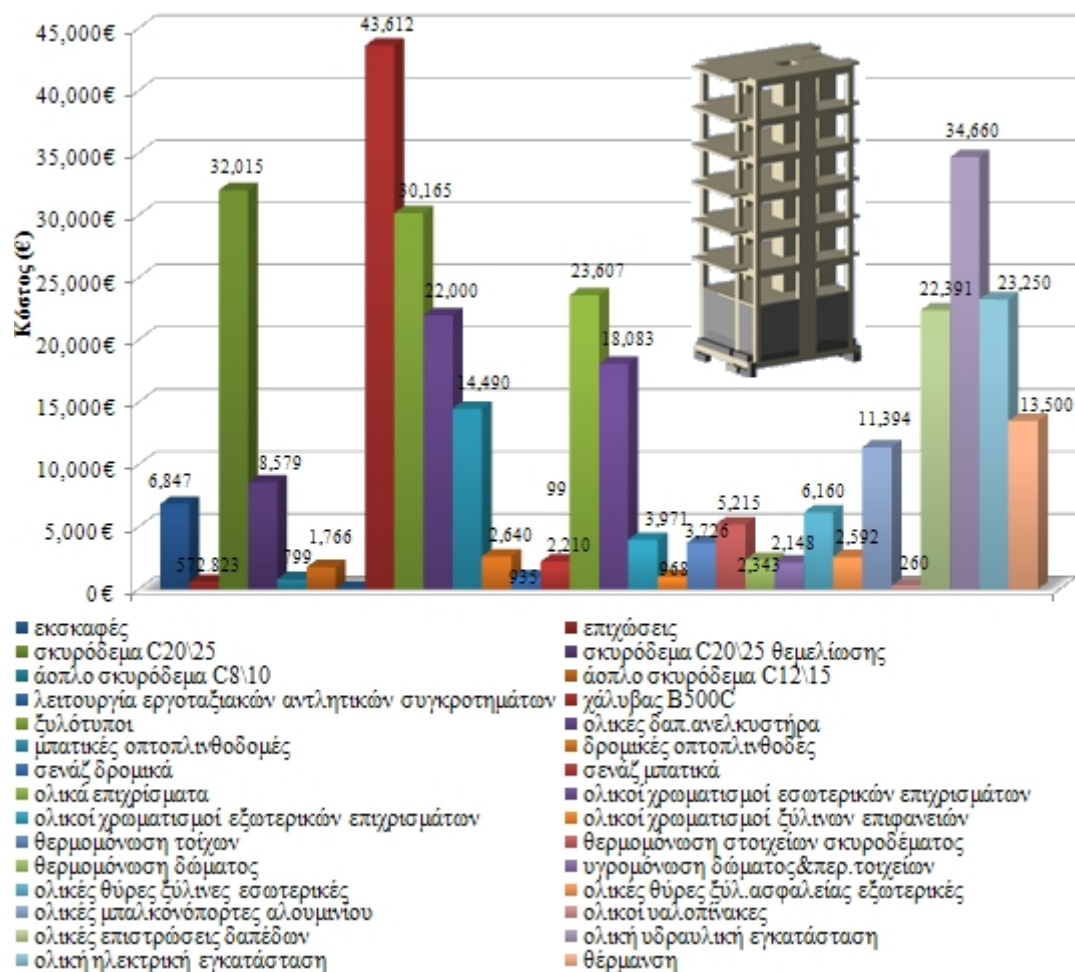
Κατόπιν εκτιμήθηκε για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν το συνολικό κόστος κατασκευής συμπεριλαμβανομένου εργολαβικού οφέλους 18%, απρόβλεπτων εξόδων της τάξης του 15% και τιμής Φ.Π.Α. 19%. Για λόγους μελέτης, ο επιμερισμός του κόστους υπολογίστηκε με δύο τρόπους: (α) ανά εργασία ή κατηγορία υλικών (**Σχήμα 2**) και (β) σε επίπεδο δομικών (σκυρόδεμα, χάλυβας, ξυλότυποι, εκσκαφές) και μη-δομικών (κουφώματα, επιχρίσματα, Η/Μ) δαπανών διακριτά από τα λοιπά έξοδα και κέρδη (**Σχήμα 3**). Ειδικά στο σχήμα αυτό είναι εμφανής η επιμέρους αναλογία (ανεξαρτήτως δηλαδή συνολικού κόστους) των δομικών και των μη-δομικών δαπανών οι οποίες συνιστούν συστηματικά περίπου το 1/3 η κάθε μία του συνολικού προϋπολογισμού του έργου (Διακομιχάλης & Μαρκάκης, 2008, Μαυρόπουλος, 2008). Τέλος, με βάση τα αναλυτικά διαγράμματα και τους πίνακες επιμερισμού ποσοτικοποιήθηκε η επιρροή των παραμέτρων σχεδιασμού που εξετάστηκαν στο συνολικό κόστος, όπως περιγράφεται στην ενότητα που ακολουθεί.

ΦΟΡΕΑΣ Α		
ΦΟΡΕΑΣ Β		
ΦΟΡΕΑΣ Γ		
ΦΟΡΕΑΣ Δ		

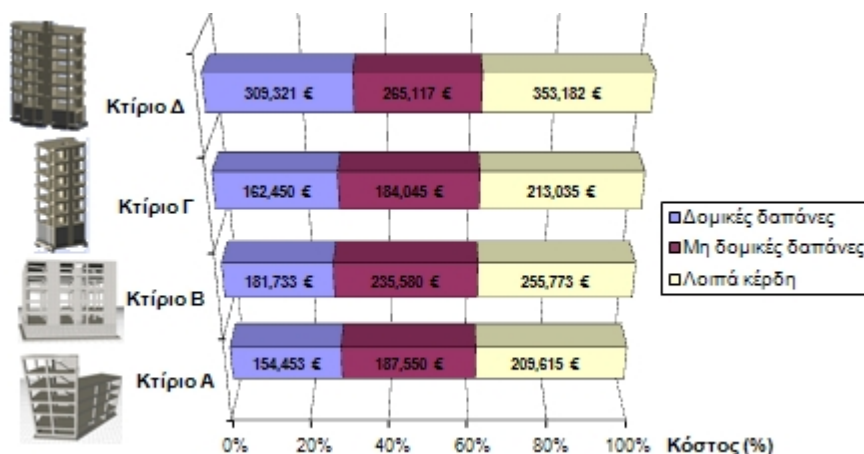
Σχήμα 1. Υπό μελέτη στατικοί φορείς.

		ΠΟΣΟΤΗΤΑ			
ΕΡΓΑΣΙΑ	ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	2^{ος} όροφος	3^{ος} όροφος	4^{ος} όροφος	5^{ος} όροφος
εκσκαφές	m ³	0	0	0	0
σκυρόδεμα C20\25	m ³	63,4	53,9	34,2	22,30
σκυρόδεμα C20\25 θεμελίωσης	m ³	0	0	0	0
άοπλο σκυρόδεμα C8\10	m ³	0	0	0	0
σκυρόδεμα C12\15	m ³	0	0	0	0
λειτουργία εργοταξιακών αντλητικών συγκροτημάτων	h	0	0	0	0
χάλυβας B500C	kg	5307,94	5029,96	2830,27	1917,75
ξύλοτυποι	m ²	445,90	391,80	244,50	165,40
επίστρωση δαπέδων	m ²	186,83	186,83	84,95	54,85
εσωτ. επιχρίσματα τοιχοποιιών	m ²	530,40	530,40	253,97	186,98
εξωτ. επιχρίσματα τοιχοποιιών	m ²	193,41	193,41	114,59	94,49
επίχρισμα οροφής	m ²	186,83	186,83	84,19	54,46
χρωματισμός επιχρισμάτων	m ²	908,93	908,93	452,74	335,92
μπατικές οπτοπλινθοδομές	m ²	122,84	122,84	75,51	50,21
δρομικές οπτοπλινθοδομές	m ²	79,95	79,95	16,43	34,69
σενάζ δρομικά	MM	29,37	29,37	7,90	11,80
σενάζ μπατικά	MM	65,48	65,48	29,75	21,60
υαλοπίνακες	m ²	16,05	16,05	9,10	5,26
εσωτ. θύρες ξύλινες	m ²	17,28	17,28	5,94	3,74
εξωτ. θύρες ασφαλείας	m ²	4,84	4,84	2,42	2,42
θερμομόνωση τοιχοποιιών	m ²	120,44	120,44	70,24	57,13
θερμομόνωση στοιχ. σκυροδέματος	m ²	51,04	51,04	47,57	27,09
θερμομόνωση οροφής	m ²	0,00	97,47	37,23	41,22
επίστρωση με ασφαλτόπανο	m ²	0	98,20	37,95	54,46
υγρομόνωση δώματος	m ²	0	98,20	37,95	54,46
υδραυλική εγκατάσταση	κατ' αποκοπή	1	1	1	1
ηλεκτρική εγκατάσταση	κατ' αποκοπή	1	1	1	1

Πίνακας 1. Συγκεντρωτικός πίνακας εργασιών και ποσοτήτων υλικών για κάθε όροφο για την περίπτωση του Κτιρίου Γ.



Σχήμα 2. Επιμερισμός κόστους κατασκευής για την περίπτωση του Κτιρίου Γ.

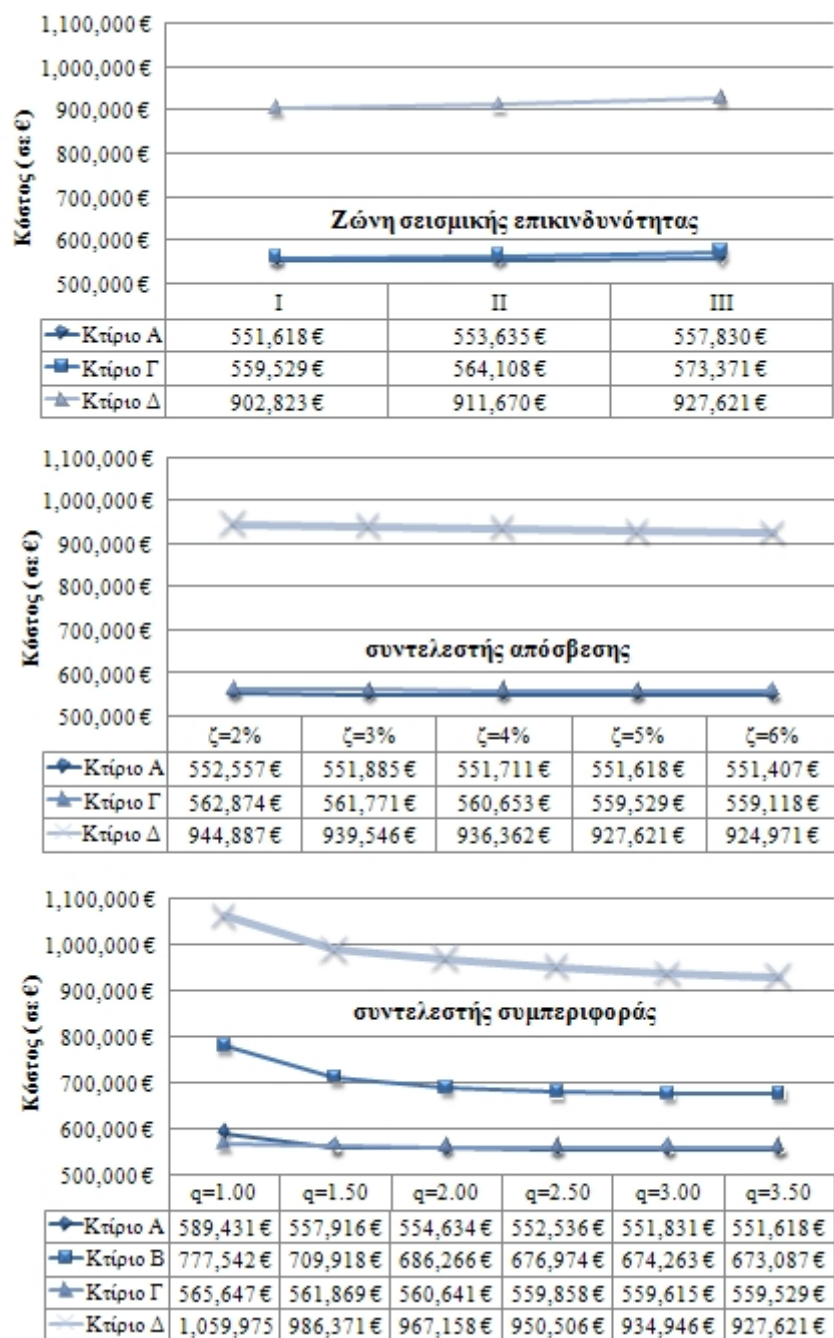


Σχήμα 3. Ποσοστιαία ανάλυση δομικού, μη-δομικού κόστους και λοιπών κερδών.

ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Στο **Σχήμα 4** παρουσιάζεται η μεταβολή του συνολικού κόστους κατασκευής των κτιρίων Α, Β, Γ και Δ σε τιμές 2009 για τη σταδιακή μεταβολή των παραμέτρων που εξετάζονται, εν προκειμένω της αύξησης της ζώνης σεισμικής επικινδυνότητας από Ι σε ΙΙΙ διατηρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές (άνω), της μεταβολής της απόσβεσης από 2 σε 5% (μέση) και της μείωσης του συντελεστή συμπεριφοράς από 3.5 σε 1.0 (κάτω). Παρατηρείται ότι ζώνη υψηλότερης σεισμικής επικινδυνότητας, παρότι επαυξάνει τις φασματικές επιταχύνσεις και αντιστοίχως τα σεισμικά φορτία κατά $0.36/0.16=2.25$ φορές, εντούτοις οδηγεί σε αμελητέα αύξηση του συνολικού κόστους της τάξης που δεν υπερβαίνει το 3%. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί καταρχάς στο γεγονός ότι οι κατασκευές που εξετάστηκαν παρουσιάζουν σημαντική υπεραντοχή δεδομένου του ότι σε πολλά δομικά στοιχεία έχουν προκύψει τα ελάχιστα κατά κανονισμό ποσοστά οπλισμού αλλά και η ελάχιστη γεωμετρία των διατομών. Παράλληλα, είναι φανερό ότι η όποια αύξηση (δια της επαύξησης του σεισμικού συντελεστή) των ποσοτήτων σκυροδέματος και χάλυβα αποτελεί ένα μόνο κλάσμα των δομικών δαπανών, πολλώ δε μάλλον των συνολικών δαπανών οι οποίες είναι υπερτριπλάσιες των πρώτων. Για τους ίδιους λόγους, δεν παρατηρείται σημαντική μεταβολή του συνολικού κόστους και για την περίπτωση της μεταβολής του συντελεστή απόσβεσης αλλά και της ενδοσιμότητας του εδάφους, είτε αυτή εκφράζεται δια της διαφορετικής εδαφικής κατηγορίας είτε δια της χρήσης ελατηριακών σταθερών. Κατά συνέπεια προκύπτει πως κατασκευές οι οποίες διαθέτουν έναν ορθολογικά μορφωμένο φέροντα οργανισμό είναι λιγότερο ευαίσθητες από οικονομική άποψη (τουλάχιστον σε σχέση με το συνολικό κόστος κατασκευής) σε ενδεχόμενα σφάλματα της μελέτης αναφορικά με τις τιμές των παραμέτρων του φάσματος σχεδιασμού.

Από την άλλη, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το κόστος επιλογής μικρότερου του συνήθους συντελεστή συμπεριφοράς q . Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4** (κάτω) ενδεχόμενη μείωση του συντελεστή από 3.5 σε 1.5 (διατηρώντας σταθερή τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Ι) δεν επιφέρει σημαντική αύξηση του κόστους η οποία δεν υπερβαίνει το 6%. Αντίθετα, η περαιτέρω μείωση σε τιμή $q=1.0$ (εάν σύμφωνα με την §2.3.5 [3] του ΕΑΚ2000 απαιτούνταν ελαστική συμπεριφορά) θα επαύξανε το συνολικό προϋπολογισμό του έργου κατά περίπου 16% για την περίπτωση των κτιρίων Β και Δ, κατά 7% για το κτίριο Α ενώ δεν θα είχε ουσιαστική επίπτωση στο (σχεδόν συμμετρικό και πλήρως κανονικό) κτίριο Γ. Τα αποτελέσματα αυτά βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με παλαιότερες μελέτες (Parachristidis et al, 2005) οι οποίες εκτίμησαν, για την περίπτωση της ζώνης σεισμικής επικινδυνότητας Ι, το πρόσθετο κόστος που απορρέει από τη θεώρηση συντελεστή συμπεριφοράς $q=1.5$ στο 4.0-5.5% (και 5.0-8.5% για $q=1.0$). Τηρουμένων των αναλογιών, αντίστοιχη σχετικά μικρή επιρροή της κατηγορίας πλαστιμότητας στο τελικό κόστος έχει παρατηρηθεί και από τους Karpos (1998), Φαρδή (2006) και Athanasiadou (2008) για την περίπτωση μετάβασης από την Υψηλή στη Μέση Κατηγορία Πλαστιμότητας κατά Ευρωκώδικα 8, αν και η στόχευση των εργασιών αυτών ήταν διαφορετική.



Σχήμα 4. Επίπτωση της ζώνης σεισμικής επικινδυνότητας (επάνω), του συντελεστή απόσβεσης (μέση) και του συντελεστή συμπεριφοράς (κάτω) στον τελικό προϋπολογισμό των κτιρίων Α, Β, Γ, και Δ.

Με βάση τα παραπάνω θα μπορούσε να ειπωθεί πως το κόστος της υιοθέτησης χαμηλότερου δείκτη συμπεριφοράς από αυτό που προδιαγράφεται στον Πίνακα 2.6 του ΕΑΚ2000 δεν είναι απαγορευτικό για την περίπτωση της ζώνης σεισμικής επικινδυνότητας Ι (όπου τοποθετείται το 60% του δομικού πλούτου της χώρας μας, Βλάχος, 1999) καθώς ακόμη και αν ειδωθεί σε απόλυτες τιμές, στη δυσμενέστερη περίπτωση κτιρίου (και για τιμή $q=1.5$) δεν υπερβαίνει τις 60,000€ για ένα εξαώροφο κτίριο (Α) ή τις 40,000€ για το τετραώροφο κτίριο Β. Υπό την έννοια αυτή, το κόστος «εξαγοράς πρόσθετης ασφάλειας» δια της μικρότερης μείωσης των σεισμικών φορτίων δε φαίνεται να είναι μεγάλο, ιδιαίτερα εάν αναλογιστεί κανείς τις συνήθεις δαπάνες των ιδιοκτητών για τον εξοπλισμό μιας νέας κατοικίας. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να συνεκτιμηθεί από οικονομική άποψη και το γεγονός ότι η αποδοχή τιμής $q=1.5$ οδηγεί και σε μικρότερη πιθανότητα παρουσίας βλαβών υπό το σεισμό σχεδιασμού.

Από την άλλη όμως, δεν θα πρέπει να παραγνωρίζεται το γεγονός ότι ένας φορέας σχεδιασμένος χωρίς αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας δε διαθέτει έναν εξίσου αξιόπιστο προδιαγεγραμμένο ελαστοπλαστικό μηχανισμό απορρόφησης ενέργειας για την περίπτωση όπου η σεισμική φόρτιση υπερβαίνει το σεισμό σχεδιασμού, καθώς η πραγματικά διαθέσιμη πλαστιμότητα του είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί. Επιπρόσθετα, από τις αναλύσεις και τον σχεδιασμό των κτιρίων που μελετήθηκαν προέκυψε πως στην περίπτωση της ζώνης σεισμικής επικινδυνότητας ΙΙΙ δεν κατέστη σε όλες τις περιπτώσεις εφικτός ο σχεδιασμός για τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς $q=1.5$ (πολλώ δε μάλλον ίσου προς 1.0) εξαιτίας είτε υπέρβασης μεγίστων ποσοστών οπλισμού είτε προβλημάτων παραλαβής των φορτίων στο επίπεδο της θεμελίωσης.

Με βάση τα παραπάνω, και δεδομένης της διατυπωθείσας σημαντικής διαφοροποίησης των δύο προσεγγίσεων σχεδιασμού με και χωρίς αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας ανάλογα με τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας και κυρίως, το επίπεδο της σεισμικής δράσης (σεισμός σχεδιασμού ή υψηλότερη απαίτηση) προκύπτει πως το συγκεκριμένο ζήτημα είναι αμφιλεγόμενο και χρήζει περαιτέρω και ενδελεχούς διερεύνησης. Αυτό που όμως μπορεί να ειπωθεί ότι απορρέει από την παρούσα εργασία είναι πως το κόστος υψηλότερου επιπέδου επιτελεστικότητας (όχι κατ' ανάγκη δια της μείωσης του συντελεστή συμπεριφοράς q αλλά ενδεχομένως δια της απευθείας αναβάθμισης σε υψηλότερη στάθμη σεισμικής επικινδυνότητας) δε φαίνεται να είναι δυσβάσταχτο και ως εκ τούτου θα μπορούσε δυνητικά να εξετάζεται από τους μελετητές.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, παρουσιάστηκαν τα κυριότερα σημεία μιας οικονομοτεχνικής ανάλυσης που στόχο είχε την αποτίμηση της επίπτωσης στο συνολικό κόστος κατασκευής μιας σειράς από παραμέτρους σχεδιασμού οι οποίες δύναται να ληφθούν διαφορετικές είτε από λανθασμένη εισαγωγή δεδομένων είτε από συνειδητή επιλογή του μελετητή μηχανικού. Τα αποτελέσματα μιας σειράς παραμετρικών επιλύσεων τεσσάρων κτιριακών έργων καταδεικνύουν ότι:

- (α) το αμιγώς δομικό κόστος των περισσότερων σύγχρονων κτιριακών κατασκευών είναι σχετικά μικρό καθώς αντιστοιχεί περίπου στο 1/3 του συνολικού κόστους κατασκευής όταν συνεκτιμηθούν εκτός των μη-δομικών δαπανών και τα λοιπά εργολαβικά κέρδη και έξοδα γεγονός που έχει ιδιαίτερη σημασία αναφορικά με το πραγματικό κόστος επιλογής υψηλότερης στάθμης επιτελεστικότητας.
- (β) η χρήση τυχόν λανθασμένων τιμών των παραμέτρων του φάσματος σχεδιασμού (εν είδει χρησιμοποιούμενης απόσβεσης, ζώνης σεισμικής επικινδυνότητας ή κατηγορίας εδάφους) δεν έχει σημαντική επίπτωση στον συνολικό προϋπολογισμό του έργου αφενός εξαιτίας του προαναφερθέντος επιμερισμού των δαπανών, αφετέρου δε, εξαιτίας των διαθέσιμων υπεραντοχών.
- (γ) η επιλογή του μελετητή να σχεδιάσει τον φορέα χωρίς αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας δε φαίνεται να οδηγεί σε σημαντική αύξηση του συνολικού κόστους της κατασκευής, τουλάχιστον για τις κατασκευές που εντάσσονται στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας I (προκύπτει επαύξηση μικρότερη του 10%) ενώ η επιβάρυνση φαίνεται να είναι ακόμη μικρότερη σε κανονικές καθ' ύψος και σε κάτοψη κατασκευές. Από την άλλη, δεν θα πρέπει να παραγνωρίζεται το γεγονός ότι ο σχεδιασμός για μικρότερη του 3.5 τιμή συντελεστή συμπεριφοράς ($q=1.5$) προέκυψε συχνά ανέφικτος για την περίπτωση κτιρίων που ανήκουν στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας III ενώ είναι δύσκολο να προσδιοριστεί το πραγματικό επίπεδο ασφάλειας που παρέχεται για την περίπτωση όπου η σεισμική δράση υπερβαίνει το σεισμό σχεδιασμού.
- (δ) σε κάθε περίπτωση, η επιλογή υψηλότερης στάθμης επιτελεστικότητας (όχι δια της μείωσης του συντελεστή συμπεριφοράς q αλλά ενδεχομένως δια της απευθείας αναβάθμισης σε υψηλότερη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας) δε φαίνεται να οδηγεί σε δυσβάσταχτο κόστος κατασκευής και ως εκ τούτου θα μπορούσε να εξετάζεται κατά περίπτωση.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Αβραμίδης, Ι., Κ. Αναστασιάδης, Α. Αθανατοπούλου και Α. Καταβέλος, «Ο μύθος του επαχθούς κόστους αντισεισμικών κατασκευών που μελετώνται για ελαστική συμπεριφορά υπό τον σεισμό σχεδιασμού», 14ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, Κως (2003).

Αβραμίδης, Ι., Αθανατοπούλου, Μ., Αναστασιάδης, Κ. Μορφίδης, Κ. «Πρότυπα αριθμητικά παραδείγματα ανάλυσης κατασκευών. Για την ορθή εφαρμογή του ΕΑΚ και τον έλεγχο των προγραμμάτων H/Y», Εκδόσεις Αίβαζή, Θεσσαλονίκη (2003).

Athanassiadou, C, "Seismic performance of R/C plane frames irregular in elevation" Engineering Structures, Vol. 30, no. 5 (2008), 1250-1261.

Βλάχος, Ι. « Εκτίμηση των αναμενόμενων οικονομικών ζημιών από σεισμούς στον οικιστικό πλούτο της χώρα και των επιπτώσεων τους», 13ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, Ρέθυμνο, Τομ. ΙΙΙ, (1999) 65-72.

CEN [Comité Européen de Normalisation], "Eurocode 8: Design Provisions Of Structures For Earthquake Resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings", Brussels (2004).

Chryssanthopoulos, M.K., C. Dymiotis, and A.J. Kappos "Probabilistic evaluation of behaviour factors in EC8-designed R/C frame.", Engineering Structures 22 (2000), 1028-1041.

Computers & Structures "Etabs ver.9.14.User's manual",Berkeley, U.S (2007).

Διακομιχάλης, Μ., και Γ. Μαρκάκης. «Διερεύνηση της επίδρασης των παραδοχών της ανάλυσης στον προϋπολογισμό συνήθων οικοδομικών έργων», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ. (2008).

Δρίτσος, Σ.Η., Ν.Π. Καρέλα και Μ.Λ. Παύλου «Δείκτης Κόστους Αποκατάστασης και Βαθμός Βλάβης σε Κτίρια Οπλισμένου Σκυροδέματος» 14ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ. Κως (2003).

Ελευθεριάδου, Α.Κ., και Α.Ι. Καραμπίνης «Βαθμονόμηση και Συσχέτιση της Δομικής Βλάβης Κτιρίων Ωπλισμένου Σκυροδέματος με Οικονομικές Απώλειες», 15ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη, (2006).

Graf, W. P., and Y. Lee, "Code-Oriented Damage Assessment for Buildings." Earthquake Spectra, Vol. 25, no. 1 (2009), 17.

Καλδέρης, Π., και Χ. Ζέρης, «Ανελαστικός σχεδιασμός και απόκριση δύο κτιρίων ΟΣ Χαμηλής Πλαστιμότητας σε ζώνη υψηλής σεισμικότητας», 15ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, Αλεξανδρούπολη (2006).

Kappos, A.J. "Influence of ductility class on the seismic reliability and cost of EC8-designed structures", 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, (1998).

Kappos, A.J., V. Lekidis, G. Panagopoulos, I. Sous, N. Theodulidis, Ch. Karakostas, T. Anastasiadis, T. Salonikios, and B. Margaris, "Analytical Estimation of Economic Loss for Buildings in the Area Struck by the 1999 Athens Earthquake and Comparison with Statistical Repair Costs", Earthquake Spectra 23, No. 2 (2007), 333-355.

Kappos, A.J., and E. G. Dimitrakopoulos, "Feasibility of pre-earthquake strengthening of buildings based on cost-benefit and life-cycle cost analysis, with the aid of fragility curves", Natural Hazards 45, No. 1 (2008), 33-54.

Kappos, A.J., G. Panagopoulos, and Gr. Penelis, "Development of a seismic damage and loss scenario for contemporary and historical buildings in Thessaloniki, Greece", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 28, No. 10-11 (2008), 836-850.

Καρέλα, Ν.Π. και Σ.Η. Δρίτσος «Δείκτης κόστους αποκατάστασης και βαθμός βλάβης κτιρίων μετά από σεισμικές καταπονήσεις», 15ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ. Αλεξανδρούπολη (2006).

Lagaros, N., A. Fotis, and S. Krikos, "Assessment of seismic design procedures based on the total cost", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 35 (2006), 1381-1401.

Lagaros, N., N. Bakas, and M. Papadrakakis, "Optimum Design Approaches for Improving the Seismic Performance of 3D RC Buildings", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 13, No. 3 (2009), 345-363.

Laogan, B., and A. Elnashai. "Structural performance and economics of tall high strength rc buildings in seismic regions", *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 204 (1999), 171-204.

ΛΗ-Λογισμική, «Fespa 4: Τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης», Αθήνα (2007).

Μαυρόπουλος, Α. «Διερεύνηση της επίδρασης των παραδοχών της ανάλυσης στον προϋπολογισμό μη-κανονικών οικοδομικών έργων», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ (2009).

Μωρέτη, Μ.Α., και Δ. Παπαλοΐζου «Σχεδιασμός κτηρίων Με και Χωρίς Αυξημένες Απαιτήσεις Πλαστιμότητας: Συγκριτική Αξιολόγηση των δύο επιλύσεων (βάσει των ΕΑΚ-ΕΚΩΣ)», 15ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ. Αλεξανδρούπολη (2006).

Ο.Α.Σ.Π., «Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (Έκδοση 2000)», Υ.Α. Δ17α/141/3/ΦΝ 275, ΦΕΚ 2184Β' / 20-12-1999, Αθήνα (2000).

Ο.Α.Σ.Π., «Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος (έκδοση 2000)», Υ.Α. Δ17α/116/4/ΦΝ 429, ΦΕΚ 1329Β' / 6-11-2000, Αθήνα (2000).

π-Systems, «Stereostatika: Τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης», Αθήνα (2008).

Panagiotakos, T. B., and M. N. Fardis, "Seismic Performance of RC Frames Designed to Eurocode 8 or to the Greek Codes 2000", *Bulletin of Earthquake Engineering* Vol. 2, No. 2 (2004), 221 - 259.

Παπαχριστίδης, Α., Β. Σόγιακας και Ε.Α. Ευαγγελοπούλου, «Υπολογισμός της βέλτιστης, από οικονομικής άποψης, τιμής του συντελεστή συμπεριφοράς 'q' για κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα», 15ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ. Αλεξανδρούπολη (2006).

Papachristidis AG, Vadaloykas GN, Sogiakas VI "Investment appraisal with respect to EC8 behaviour factor 'q' in reinforced concrete buildings", 5th International Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures, Skiathos, Greece (2005).

Πενέλης λογισμικά, «e-tools: Τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης», Θεσσαλονίκη (2008).

Sextos, A.G., K. Pitilakis, E. Kirtas, and V. Fotaki, "A refined computational framework for the assessment of the inelastic response of an irregular building that was damaged during the Lefkada earthquake", 4th European Workshop on the Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures, Thessaloniki (2005).

Σέξτος, Α., Γ. Νασιόπουλος, Κ. Κατιρτζόγλου και Ι. Αβραμίδης, «Πρότυπα αριθμητικά παραδείγματα διαστασιολόγησης των κατασκευών για την ορθή εφαρμογή των κανονισμών και τον έλεγχο του τεχνικού λογισμικού», Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας 5-7 Νοεμβρίου, Αθήνα, No. 1852 (2008).

Στυλιανίδης, Κ., Α. Κάππος, Γ. Πενέλης και Χ. Ιγνατάκης, «Αξιολόγηση μεθόδων πρωτοβάθμιου προσεισμικού ελέγχου με κριτήριο τη συμπεριφορά των κτηρίων σε συγκεκριμένους σεισμούς», 14ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ. Κως (2003).

Φαρδής, Μ. «Προοπτικές για τον Αντισεισμικό Σχεδιασμό Κτιρίων Οπλισμένου Σκυροδέματος», 15ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ. Αλεξανδρούπολη (2006).