

## Εύρωστος Βέλτιστος Αντισεισμικός Σχεδιασμός Μεταλλικών Κατασκευών Robust Seismic Optimum Design of Steel Structures

Βαγγέλης ΠΛΕΥΡΗΣ<sup>1</sup>, Νίκος Δ. ΛΑΓΑΡΟΣ<sup>2</sup>, Μανόλης ΠΑΠΑΔΡΑΚΑΚΗΣ<sup>3</sup>

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Οι αβεβαιότητες οι οποίες εμφανίζονται σε κάθε πραγματική εφαρμογή μηχανικού παίζουν πολλές φορές έναν σημαντικό ρόλο. Σε προβλήματα βελτιστοποίησης κατασκευών, η επίδραση των αβεβαιοτήτων στον σχεδιασμό μπορεί να ληφθεί υπόψη με δύο διατυπώσεις: Βελτιστοποίηση Εύρωστου Σχεδιασμού (Robust Design Optimization, RDO) και Βελτιστοποίηση με βάση την Αξιοπιστία (Reliability-Based Design Optimization, RBDO). Σύμφωνα με τη διατύπωση RDO, ο στόχος είναι να παραχθούν σχεδιασμοί οι οποίοι να μην παρουσιάζουν ευαισθησία σε πιθανές διακυμάνσεις των αβέβαιων (πιθανοτικών) παραμέτρων του προβλήματος. Στην παρούσα εργασία, το πρόβλημα Εύρωστου Σχεδιασμού μιας κατασκευής διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια, για το οποίο οι ιδιότητες του υλικού, της διατομής και των σεισμικών φορτίων θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν δεδομένες κατανομές. Ο σχεδιασμός αυτός αξιολογείται με τον αντίστοιχο αιτιοκρατικό βέλτιστο σχεδιασμό (Deterministic-Based Optimization, DBO) με πολλαπλά κριτήρια (multi-objective), όπου οι αβεβαιότητες δεν λαμβάνονται υπόψη. Για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια χρησιμοποιείται ένας βελτιωμένος αλγόριθμος NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm), στον οποίο ο γενετικός αλγόριθμος έχει αντικατασταθεί από έναν αλγόριθμο Στρατηγικών Εξέλιξης (Evolution Strategies, ES), ενώ το στοχαστικό πρόβλημα πεπερασμένων στοιχείων επιλύεται με τη μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo. Οι δύο κύριοι στόχοι της εργασίας αυτής είναι: (i) Η σύγκριση της διατύπωσης και των αποτελεσμάτων του αιτιοκρατικού προβλήματος βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια σε σχέση με ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης Εύρωστου Σχεδιασμού, και (ii) η προσπάθεια για αξιολόγηση, μέσω των δύο παραπάνω διατυπώσεων, της αποτελεσματικότητας του δείκτη συμπεριφοράς  $q$  που προτείνεται από τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ 2000) για τον σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών.

**ABSTRACT:** Due to the inherent characteristics of nature, uncertainties appear everywhere and can play a significant role. In optimization problems, the uncertainties can be taken into account using two distinctive formulations: Robust Design Optimization (RDO) and Reliability-Based Design Optimization (RBDO). According to a RDO formulation, the aim is to obtain solutions insensitive to the uncontrollable parameter variation. In the present study the structural robust design problem is formulated as a two-objective optimization problem. Additionally a two-objective Deterministic-Based Optimization (DBO) problem is also

<sup>1</sup> Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, email: [vplevris@central.ntua.gr](mailto:vplevris@central.ntua.gr)

<sup>2</sup> Λέκτορας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, email: [niagaros@central.ntua.gr](mailto:niagaros@central.ntua.gr)

<sup>3</sup> Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, email: [mpapadra@central.ntua.gr](mailto:mpapadra@central.ntua.gr)

considered. The DBO and RDO formulations are employed in an attempt to assess the Greek national seismic design code for steel structural buildings with respect to the behavioural factor considered. The limit state dependent cost is used as a measure of assessment. The stochastic finite element problem is solved using the Monte Carlo Simulation method, while a modified NSGA-II algorithm is employed for solving the two-objective optimization problem.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε πραγματικές εφαρμογές Πολιτικού Μηχανικού, ο σχεδιασμός μίας κατασκευής υπόκειται πάντοτε σε αβεβαιότητες. Εξαιτίας των εγγενών χαρακτηριστικών της φύσης, οι αβεβαιότητες εμφανίζονται παντού και δεν μπορούν να αποφευχθούν. Στην αιτιοκρατική (deterministic) διατύπωση ενός προβλήματος βέλτιστου σχεδιασμού οι αβεβαιότητες αμελούνται. Για να ληφθούν υπόψη οι αβεβαιότητες σε ένα πρόβλημα βέλτιστου σχεδιασμού υπάρχουν δύο διατυπώσεις, η Βελτιστοποίηση Εύρωστου Σχεδιασμού (Robust Design Optimization, RDO) και η Βελτιστοποίηση με βάση την Αξιοπιστία (Reliability-Based Design Optimization, RBDO) (Frangopol and Soares (2001)).

Σε γενικές γραμμές ένα απλό πρόβλημα βέλτιστου σχεδιασμού κατασκευής μπορεί να διατυπωθεί ως εξής

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{s} \in F} \quad & C(\mathbf{s}) \\ \text{subject to} \quad & g_i(\mathbf{s}) \leq 0 \quad i=1, \dots, k \end{aligned} \quad (1)$$

όπου η συνάρτηση κόστους  $C(\mathbf{s})$  απαιτείται να ελαχιστοποιηθεί, υπό κάποιους περιορισμούς  $g$ . Ένα πρόβλημα RDO μπορεί να διατυπωθεί ως πρόβλημα δύο αντικειμενικών συναρτήσεων ως εξής

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{s} \in F} \quad & [\bar{C}(\mathbf{s}, \boldsymbol{\mu}_r), \sigma_C(\mathbf{s}, \boldsymbol{\mu}_r)]^T \\ \text{subject to} \quad & g_i(\mathbf{s}, \boldsymbol{\mu}_r) \leq 0 \quad i=1, \dots, k \\ \text{where} \quad & \mathbf{r} \sim N(\boldsymbol{\mu}_r, \sigma_r^2) \end{aligned} \quad (2)$$

όπου τα διανύσματα  $\mathbf{s}$ ,  $\mathbf{r}$  παριστούν τις μεταβλητές σχεδιασμού και τις αβέβαιες παραμέτρους αντίστοιχα, ενώ  $F$  είναι η εφικτή περιοχή στην οποία ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί  $g_i$ , ενώ  $\bar{C}$  και  $\sigma_C$  είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της συνάρτησης κόστους  $C(\mathbf{s})$ .

Οι περισσότεροι αντισεισμικοί κανονισμοί έχουν τη φιλοσοφία της σχεδίασης του φορέα για κάποιες οριακές καταστάσεις, όπου αν ένας αριθμός ελέγχων ικανοποιείται, η κατασκευή θεωρείται ασφαλής. Τυπικές τέτοιες θεωρήσεις είναι αυτές της μίας οριακής κατάστασης σχεδιασμού (οριακή αντοχή) ή και των δύο οριακών καταστάσεων (οριακές καταστάσεις αντοχής και λειτουργικότητας). Όλοι οι νεώτεροι αντισεισμικοί κανονισμοί βασίζονται στην

αρχή ότι η κατασκευή θα αποφύγει την κατάρρευση αν σχεδιαστεί ώστε να απορροφήσει και να καταναλώσει την ενέργεια που εισέρχεται σε αυτή κατά τη διάρκεια του σεισμού. Οι περισσότεροι κανονισμοί εκφράζουν την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας μέσω πλαστικής παραμόρφωσης μέσω του συντελεστή συμπεριφοράς  $q$ . Η ικανότητα της κατασκευής να αντισταθεί σε σεισμικά φορτία στη μη-γραμμική περιοχή μας επιτρέπει τον σχεδιασμό της για σεισμικά φορτία μικρότερα από αυτά που θα εκδηλώνονταν στην κατασκευή με την υπόθεση της πλήρους γραμμικής συμπεριφοράς της. Τα σεισμικά φορτία μειώνονται κατάλληλα με τη διαίρεσή τους με τον συντελεστή συμπεριφοράς  $q$ . Σε πρόσφατη έρευνα των Lagaros *et al.* (2006a) βρέθηκε ότι για κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα η τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς  $q$  που προτείνει ο ΕΑΚ ενδέχεται να μην οδηγεί πάντοτε σε σχεδιασμούς με το ελάχιστο συνολικό κόστος κύκλου ζωής.

Οι δύο κύριοι στόχοι της παρούσας εργασίας είναι: (i) Η σύγκριση της διατύπωσης και των αποτελεσμάτων του αιτιοκρατικού προβλήματος βελτιστοποίησης (Deterministic-Based Optimization, DBO) με πολλαπλά κριτήρια σε σχέση με ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης Εύρωστου Σχεδιασμού (RDO), και (ii) η προσπάθεια για αξιολόγηση, μέσω των δύο παραπάνω διατυπώσεων, της αποτελεσματικότητας του δείκτη συμπεριφοράς  $q$  που προτείνεται από τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ) για τον σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών. Ο σχεδιασμός με βάση τον ΕΑΚ συγκρίνεται με βάση το κόστος το εξαρτώμενο από τις οριακές καταστάσεις (limit state dependent cost) της κατασκευής. Το κόστος το εξαρτώμενο από τις οριακές καταστάσεις αντιπροσωπεύει το κόστος εξαιτίας της εκδήλωσης του σεισμού και των συνεπαγόμενων βλαβών στη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια χρησιμοποιείται ένας βελτιωμένος αλγόριθμος NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm), στον οποίο ο γενετικός αλγόριθμος έχει αντικατασταθεί από έναν αλγόριθμο Στρατηγικών Εξέλιξης (Evolution Strategies, ES), ενώ το στοχαστικό πρόβλημα πεπερασμένων στοιχείων επιλύεται με τη μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo.

## ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στον χώρο των στοχαστικών πεπερασμένων στοιχείων (Schuëller (2005)). Όμως, συγκριτικά λίγες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί στο αντικείμενο του βέλτιστου σχεδιασμού κατασκευών παρουσία αβεβαιοτήτων.

### Βασικά στοιχεία στοχαστικής ανάλυσης

Στην παρούσα εργασία, διάφορες παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν την επίδοση της κατασκευής, όπως το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, οι ιδιότητες της διατομής και το σεισμικό φορτίο έχουν θεωρηθεί αβέβαιες μεταβλητές. Έστω  $n_r$  ο συνολικός αριθμός των αβέβαιων παραμέτρων και  $\mathbf{r}$  το αντίστοιχο διάνυσμα. Το στοχαστικό δυναμικό πρόβλημα πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να διατυπωθεί ως ακολούθως

$$\mathbf{M}(\mathbf{r})\ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{r}) + \mathbf{C}(\mathbf{r})\dot{\mathbf{u}}(\mathbf{r}) + \mathbf{K}(\mathbf{r})\mathbf{u}(\mathbf{r}) = -\mathbf{M}(\mathbf{r})\mathbf{a}_g(\mathbf{r}) \quad (3)$$

όπου  $\mathbf{M}(\mathbf{r})$  είναι το αβέβαιο μητρώο μάζας,  $\mathbf{C}(\mathbf{r})$  είναι το αβέβαιο μητρώο απόσβεσης,  $\mathbf{K}(\mathbf{r})$  είναι το αβέβαιο καθολικό μητρώο στιβαρότητας της κατασκευής,  $\mathbf{u}(\mathbf{r})$  είναι το διάνυσμα των

επικόμβιων μετατοπίσεων και  $\mathbf{a}_g(\mathbf{r})$  είναι το διάνυσμα επιταχύνσεων εδάφους. Οι στατιστικές ποσότητες που απαιτείται να υπολογιστούν στα πλαίσια της μεθοδολογίας RDO που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία είναι η τυπική απόκλιση της μέγιστης μετακίνησης μεταξύ των ορόφων (interstorey drift) και η μέση τιμή των συναρτήσεων περιορισμών. Αν οι αβέβαιες παράμετροι  $\mathbf{r}$  δεν είναι συσχετισμένες μεταξύ τους, όπως λαμβάνεται ως παραδοχή στην παρούσα εργασία, τότε η μέση τιμή  $\bar{g}_i$  των συναρτήσεων περιορισμών και η τυπική απόκλιση  $\sigma_{\Delta_{max}}^2$  της μέγιστης μετακίνησης μεταξύ των ορόφων μπορούν να υπολογιστούν αναλυτικά ως εξής

$$\bar{g}_i = \int \int \dots \int g_i(\mathbf{r}) pdf_1(r_1) \dots pdf_{n_r}(r_{n_r}) d\mathbf{r} \quad (4)$$

$$\sigma_{\Delta_{max}}^2 = \int \int \dots \int [\Delta_{max}(\mathbf{r}) - \bar{\Delta}_{max}]^2 pdf_1(r_1) \dots pdf_{n_r}(r_{n_r}) d\mathbf{r} \quad (5)$$

όπου  $pdf_j$ ,  $j=1, \dots, n_r$  είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της  $j$  αβέβαιης παραμέτρου. Για τον υπολογισμό των στατιστικών ποσοτήτων των παραπάνω εξισώσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στατιστικές ή μη-στατιστικές μέθοδοι. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται μια στατιστική μέθοδος και συγκεκριμένα η μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo.

### Η μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo (Monte Carlo Simulation, MCS)

Η μέθοδος Monte Carlo Simulation (MCS) είναι εφαρμόσιμη για τη στοχαστική ανάλυση κατασκευών σε περιπτώσεις που δεν είναι εφικτή η εξεύρεση αναλυτικής λύσης. Αυτό είναι σύνηθες σε περιπτώσεις πολύπλοκων προβλημάτων της μηχανικής με μεγάλο αριθμό αβέβαιων παραμέτρων, όπου οι άλλες μέθοδοι ανάλυσης δεν είναι εφαρμόσιμες. Αν και η μαθηματική διατύπωση της μεθόδου MCS είναι σχετικά απλή, η μέθοδος έχει την ικανότητα να χειριστεί πρακτικά όλες τα πιθανά προβλήματα ανεξαρτήτως πολυπλοκότητας, ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις η υπολογιστική προσπάθεια που απαιτείται ενδέχεται να είναι σημαντική. Η μέθοδος MCS έχει αποδειχτεί από τους Papadrakakis και Lagaros (2002) ότι είναι εφαρμόσιμη με επιτυχία για τον υπολογισμό των στατιστικών παραμέτρων που υπεισέρχονται σε προβλήματα RBDO.

Καθώς η μέθοδος MCS βασίζεται στη θεωρία των μεγάλων αριθμών ( $N_{\infty}$ ), μια ακριβής εκτίμηση της μέσης τιμής των συναρτήσεων περιορισμών και της τυπικής απόκλισης της μετατόπισης ενός κόμβου δίνεται από τις σχέσεις

$$\bar{g}_i = \frac{1}{N_{\infty}} \sum_{j=1}^{N_{\infty}} g_i(\mathbf{r}_j) \quad (6)$$

$$\sigma_{\Delta_{max}}^2 = \frac{1}{N_{\infty}} \sum_{j=1}^{N_{\infty}} [\Delta_{max}(\mathbf{r}_j) - \bar{\Delta}_{max}]^2 \quad (7)$$

όπου  $r_j$  είναι το  $j$ -διάνυσμα των αβέβαιων παραμέτρων. Για να εκτιμηθούν τα  $\bar{g}_i$  και  $\sigma_{\Delta max}^2$  με τη μέθοδο MSC με βάση τις παραπάνω εξισώσεις, απαιτείται ένας ικανός αριθμός ανεξάρτητων δειγμάτων  $N$ .

## ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ (MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION PROBLEM)

Διάφορες μέθοδοι έχουν προταθεί στο παρελθόν για την αντιμετώπιση προβλημάτων βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια (Coello Coello (2000), Marler and Arora (2004)). Στην παρούσα εργασία, ένας αλγόριθμος βασισμένος στον NSGA-II, που αναπτύχθηκε από τους Deb et al. (2002), χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται μια διαφοροποιημένη έκδοση του NSGA-II αλγόριθμου, όπου ο Γενετικός Αλγόριθμος έχει αντικατασταθεί από έναν αλγόριθμο Στρατηγικών Εξέλιξης (ES), ο οποίος έχει αποδειχτεί ιδιαίτερα αποτελεσματικός στην επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης μίας αντικειμενικής συνάρτησης (Lagaros et al. (2004)). Ο συνδυασμένος αλγόριθμος ονομάζεται ως NSES-II( $\mu+\lambda$ ) ή NSES-II( $\mu,\lambda$ ), ανάλογα με το σχήμα που χρησιμοποιείται για τον τελεστή επιλογής (selection) της διαδικασίας.

Σε ένα μικτό πρόβλημα βελτιστοποίησης συνεχών και διακριτών μεταβλητών που αντιμετωπίζεται με τον αλγόριθμο ES, κάθε μέλος κατέχει μια ομάδα παραμέτρων

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= [(\mathbf{s}_d, \boldsymbol{\gamma}), (\mathbf{s}_c, \boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\alpha})] \in (I_d, I_c) \\ I_d &= D^{n_d} \times \mathbb{R}_+^{n_\gamma} \\ I_c &= \mathbb{R}^{n_c} \times \mathbb{R}_+^{n_\sigma} \times [-\pi, \pi]^{n_\alpha} \end{aligned} \quad (8)$$

όπου  $\mathbf{s}_d$  και  $\mathbf{s}_c$  είναι τα διανύσματα των διακριτών (discrete) και των συνεχών (continuous) μεταβλητών σχεδιασμού, αντίστοιχα. Τα διανύσματα  $\boldsymbol{\gamma}$ ,  $\boldsymbol{\sigma}$  και  $\boldsymbol{\alpha}$  είναι τα διανύσματα παραμέτρων κατανομής. Το διάνυσμα  $\boldsymbol{\gamma}$  αντιστοιχεί στην απόκλιση της κατανομής Poisson, το διάνυσμα  $\boldsymbol{\sigma} \in \mathbb{R}_+^{n_\sigma}$  αντιστοιχεί στις τυπικές αποκλίσεις ( $1 \leq n_\sigma \leq n_c$ ) της κανονικής κατανομής, ενώ το διάνυσμα  $\boldsymbol{\alpha} \in [-\pi, \pi]^{n_\alpha}$  αντιστοιχεί στις γωνίες κλίσης ( $n_\alpha = (n_c - n_\sigma / 2)(n_\sigma - 1)$ ) που καθορίζουν γραμμικών εξαρτημένες μεταλλάξεις των συνεχών μεταβλητών σχεδιασμού  $\mathbf{s}_c$ .

Έστω  $\mathbf{B}_p^{(g)} = \{\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_\mu\}$  ένας πληθυσμός – γονέας στη  $g$  γενιά της διαδικασίας. Οι γενικοί τελεστές που χρησιμοποιούνται σε ένα μικτό πρόβλημα βελτιστοποίησης με ES, με συνεχείς και διακριτές μεταβλητές, έχουν τις εξής απεικονίσεις

$$\begin{aligned} \text{rec} &: (I_c)^\mu \rightarrow (I_c)^\lambda \text{ recombination} \\ \text{mut} &: (I_c)^\lambda \rightarrow (I_c)^\lambda \text{ mutation} \\ \text{sel}_\mu^k &: (I_c)^k \rightarrow (I_c)^\mu \text{ selection, } k \in \{\lambda, \mu + \lambda\} \end{aligned} \quad (9)$$

όπου οι όροι recombination, mutation και selection αναφέρονται στους τελεστές ανασυνδυασμού, μετάλλαξης και επιλογής, αντίστοιχα. Λεπτομέρειες της διαδικασίας

βελτιστοποίησης και του αλγορίθμου NSES-II(μ+λ) μπορούν να βρεθούν στο άρθρο των Lagaros, Papadrakakis (2007).

## ΤΥΧΑΙΕΣ (ΑΒΕΒΑΙΕΣ) ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Στην παρούσα εργασία έχουν ληφθεί υπόψη δύο ειδών τυχαίες (αβέβαιες) παράμετροι: Τυχαίες παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν το επίπεδο της σεισμικής απαίτησης (*demand*) και τυχαίες παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν την ικανότητα της κατασκευής (*capacity*). Η στιβαρότητα μίας πλαισιωτής κατασκευής είναι ανάλογη με το μέτρο ελαστικότητας  $E$  του υλικού και τις διαστάσεις των διατομών των μελών (δοκών και υποστυλωμάτων). Για αυτό τον λόγο, οι τυχαίες παράμετροι που επιλέχτηκαν σε σχέση με την ικανότητα της κατασκευής είναι το μέτρο ελαστικότητας και οι διαστάσεις των διατομών, τα οποία θεωρείται ότι ακολουθούν όλα κανονικές κατανομές.

Η πιο συνήθης προσέγγιση για τον καθορισμό της σεισμικής δράσης είναι η χρήση της έννοιας του φάσματος σχεδιασμού του αντισεισμικού κανονισμού. Ωστόσο, αν απαιτείται ένας πιο ρεαλιστικός σχεδιασμός, τότε η χρήση φασμάτων από πραγματικές σεισμικές καταγραφές είναι πιο κατάλληλη. Εξαιτίας του ότι υπάρχει μεγάλη διασπορά των τιμών των επιταχύνσεων, τα φάσματα που προκύπτουν από φυσικές καταγραφές πρέπει να αναχθούν σε ένα κοινό πλαίσιο αναφοράς, με την «κανονικοποίησή» τους στο ίδιο επίπεδο σεισμικής απαίτησης. Στην παρούσα εργασία η αβεβαιότητα σε σχέση με τη σεισμική απαίτηση εκφράζεται μέσω του διαμέσου (*median*) φάσματος σχεδιασμού μίας ομάδας πραγματικών σεισμικών καταγραφών.

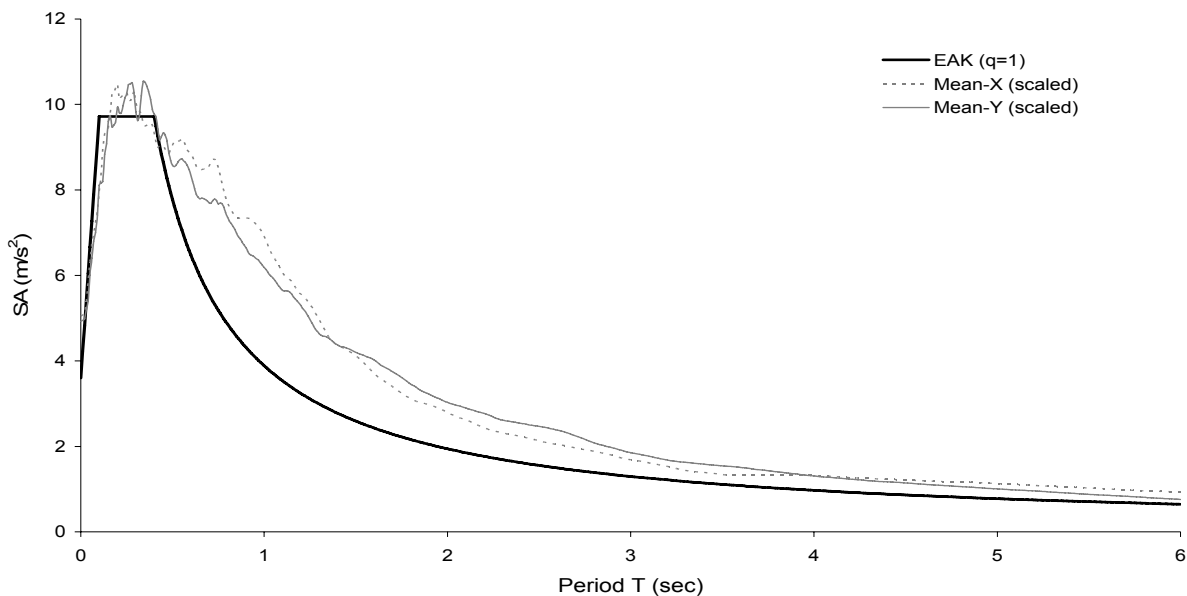
**Πίνακας 1.** Φυσικές σεισμικές καταγραφές που ανήκουν στην ομάδα επικινδυνότητας με πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 χρόνια (Somerville and Collins (2002))

Σεισμός	Σταθμός	Απόσταση	Έδαφος
Tabas (TB)	Dayhook	14	rock
16 September 1978	Tabas	1.1	rock
Cape Mendocino (CM)	Cape Mendocino	6.9	rock
25 April 1992	Petrolia	8.1	soil
Chi-Chi (CC), Taiwan	TCU052	1.4	soil
20 September 1999	TCU065	5.0	soil
	TCU067	2.4	soil
	TCU068	0.2	soil
	TCU071	2.9	soil
	TCU072	5.9	soil
	TCU074	12.2	soil
	TCU075	5.6	soil
	TCU076	5.1	soil
	TCU078	6.9	soil
	TCU079	9.3	soil
	TCU089	7.0	rock
	TCU101	4.9	soil
	TCU102	3.8	soil
	TCU129	3.9	soil

Συγκεκριμένα, επιλέχτηκε το διάμεσο φάσμα σχεδιασμού των καταγραφών που ανήκουν στην ομάδα επικινδυνότητας με πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 χρόνια (10/50) της βάσης δεδομένων των Somerville και Collins (2002). Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των

καταγραφών φαίνονται στον Πίνακα 1 όπου διαπιστώνεται ότι κάθε καταγραφή αντιστοιχεί σε διαφορετικά μεγέθη σεισμών και ιδιότητες εδάφους.

Οι καταγραφές κανονικοποιούνται σύμφωνα με την τιμή  $Sa(T_1)$  του φάσματος σχεδιασμού του ΕΑΚ ώστε να εξασφαλιστεί η συμβατότητα μεταξύ τους. Οι δύο κανονικοποιημένες οριζόντιες συνιστώσες (κατά Χ και Υ) - διάμεσες τιμές του φάσματος και το ελαστικό φάσμα ( $q=1$ ) του ΕΑΚ φαίνονται στο σχήμα 1.



**Σχήμα 1.** Το φάσμα των φυσικών καταγραφών και η διάμεσός τους κατά Χ και Υ, σε κλίμακα του φάσματος σχεδιασμού του ΕΑΚ ( $q=1$ )

Έχει παρατηρηθεί από τους Chintanarakdee και Chopra (2003) ότι τα φάσματα απόκρισης ακολουθούν τη λογαριθμική κανονική κατανομή (*lognormal*). Έτσι, το διάμεσο φάσμα  $\hat{x}$  και η τυπική απόκλιση  $\delta$  υπολογίζονται από το φάσμα των φυσικών καταγραφών σύμφωνα με τις σχέσεις

$$\hat{x} = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \ln(R_{d,i}(T))}{n} \right] \quad (10)$$

$$\delta = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(R_{d,i}(T)) - \ln(\hat{x}))^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (11)$$

όπου  $R_{d,i}(T)$  είναι η τιμή του φάσματος απόκρισης για περίοδο ίση με  $T$  για την  $i$  καταγραφή ( $i=1, \dots, n$ ). Ο τύπος των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας, η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση όλων των αβέβαιων παραμέτρων του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, δίνονται στον παρακάτω πίνακα, όπου  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού ενώ  $H$ ,  $d$ ,  $B$  και  $t$  είναι οι διαστάσεις της διατομής σχήματος διπλού ταυ.

**Πίνακας 2.** Χαρακτηριστικά των τυχαίων (αβέβαιων) μεταβλητών

Τυχαία μεταβλητή	Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
E (kN/m <sup>2</sup> )	Normal	2.10 E+08	0.10E
H	Normal	H <sub>i</sub> *	0.01 H <sub>i</sub>
d	Normal	d <sub>i</sub> *	0.01 d <sub>i</sub>
B	Normal	B <sub>i</sub> *	0.01 B <sub>i</sub>
t	Normal	t <sub>i</sub> *	0.01 t <sub>i</sub>
Σεισμικό φορτίο	Log-Normal	$\hat{x}$ (Eq. 8)	$\delta$ (Eq. 9)

\* Έχουν ληφθεί από τη βάση των διατομών IPE (δοκοί) και HEB (υποστυλώματα) του Ευρωκώδικα, για κάθε σχεδιασμό.

## ΑΡΧΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (LIFE-CYCLE COST)

Το συνολικό κόστος κύκλου ζωής  $C_{TOT}$  μίας κατασκευής σε ένα χρονικό διάστημα που μπορεί να είναι η διάρκεια σχεδιασμού για νέες κατασκευές ή ο υπολειπόμενος χρόνος ζωής για παλαιές ή επισκευασμένες κατασκευές, μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της χρονικής αυτής περιόδου και του διανύσματος μεταβλητών σχεδιασμού ως (Wen και Kang (2001a))

$$C_{TOT}(t, \mathbf{s}) = C_{IN}(\mathbf{s}) + C_{LS}(t, \mathbf{s}) \quad (12)$$

όπου  $C_{IN}$  είναι το αρχικό κόστος της νέας ή της παλαιάς – επισκευασμένης κατασκευής,  $C_{LS}$  είναι το κόστος το σχετιζόμενο με τις οριακές καταστάσεις (*limit state cost*) της κατασκευής,  $\mathbf{s}$  είναι το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδιασμού και  $t$  είναι η χρονική περίοδος που εξετάζουμε. Ο όρος αρχικό κόστος κατασκευής, αναφέρεται στο κόστος κατά τη διάρκεια του σταδίου ανοικοδόμησης. Για πλαισιωτές κατασκευές από σκυρόδεμα, το αρχικό κόστος θεωρείται συνήθως ανάλογος προς το συνολικό βάρος της κατασκευής. Το αρχικό κόστος μπορεί επίσης να επηρεαστεί από άλλες παραμέτρους όπως το κόστος των συνδέσεων ή άλλων λεπτομερειών που επηρεάζουν την απόδοση. Όλες αυτές οι παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν με τη χρήση κατάλληλων συντελεστών στο μοντέλο.

Με τον όρο κόστος σχετιζόμενο με τις οριακές καταστάσεις αναφερόμαστε στο πιθανό κόστος ζημίας από τους σεισμούς που μπορούν να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια της ζωής της κατασκευής. Αυτό περιλαμβάνει το κόστος της επισκευής της κατασκευής μετά από έναν σεισμό, το κόστος της απώλειας περιεχομένων, το κόστος των ανθρώπινων τραυματισμών ή το κόστος των ανθρώπινων απωλειών, καθώς και άλλες άμεσες ή έμμεσες οικονομικές απώλειες. Ο τρόπος ποσοτικοποίησης των απωλειών με οικονομικούς όρους εξαρτάται από διάφορες κοινωνικοοικονομικές παραμέτρους. Παραδείγματος χάριν, υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για τον υπολογισμό του κόστους της απώλειας μιας ανθρώπινης ζωής, οι οποίες κυμαίνονται ανάμεσα σε καθαρώς οικονομικές προσεγγίσεις και σε πιο ευαίσθητες για τις οποίες η ανθρώπινη ζωή θεωρείται αναντικατάστατη. Επομένως, η εκτίμηση του κόστους του σχετιζόμενου με μία οριακή κατάσταση θα ποικίλει αρκετά ανάλογα με την προσέγγιση η οποία υιοθετείται.

Το κόστος το σχετιζόμενο με μία οριακή κατάσταση  $i$ , μπορεί να γραφτεί ως ακολούθως



$$C_{LS}^i = C_{dam}^i + C_{con}^i + C_{ren}^i + C_{inc}^i + C_{inj}^i + C_{fat}^i \quad (13)$$

όπου  $C_{dam}^i$  είναι το κόστος αποκατάστασης (επισκευής) της κατασκευής,  $C_{con}^i$  είναι το κόστος απώλειας περιεχομένων,  $C_{ren}^i$  είναι η απώλεια εσόδων ενοικίασης,  $C_{inc}^i$  είναι η απώλεια εσόδων,  $C_{inj}^i$  είναι το κόστος ανθρώπινων τραυματισμών και  $C_{fat}^i$  είναι το κόστος ανθρώπινων απωλειών. Λεπτομέρειες σχετικά με τους υπολογισμούς που αντιστοιχούν σε κάθε οριακή κατάσταση μπορούν να βρεθούν στο άρθρο των Wen και Kang (2001a).

**Πίνακας 3.** Οριακές καταστάσεις, καταστάσεις ζημίας, μετακινήσεις μεταξύ ορόφων και τα σχετικά κόστη ως ποσοστά του αρχικού κόστους

Performance level	Damage State	Interstorey Drift (%)	Cost (% of initial cost)
I	None	$\Delta < 0.2$	0
II	Slight	$0.2 < \Delta < 0.5$	0.5
III	Light	$0.5 < \Delta < 0.7$	5
IV	Moderate	$0.7 < \Delta < 1.5$	20
V	Heavy	$1.5 < \Delta < 2.5$	45
VI	Major	$2.5 < \Delta < 5.0$	80
VII	Destroyed	$5.0 < \Delta$	100

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, το κόστος υπέρβασης μιας οριακής κατάστασης λαμβάνεται ως ποσοστό του αρχικού κόστους από τον παραπάνω πίνακα 3 του ATC-13 (1985). Με βάση μια διαδικασία προσομοίωσης Poisson για την εκδήλωση σεισμών και την υπόθεση ότι η κατασκευή που έχει υποστεί βλάβες επισκευάζεται στην αρχική της κατάσταση μετά την εκδήλωση ενός μεγάλου σεισμού, οι Wen και Kang (2001b) πρότειναν την παρακάτω σχέση για το κόστος το σχετιζόμενο με τις οριακές καταστάσεις, λαμβάνοντας υπόψη έναν αριθμό  $N$  οριακών καταστάσεων

$$C_{LS} = \frac{v}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \sum_{i=1}^N C_{LS}^i P_i \quad (14)$$

όπου

$$P_i = P_i(\Delta > \Delta_i) - P_{i+1}(\Delta > \Delta_{i+1}) \quad (15)$$

και

$$P_i(\Delta > \Delta_i) = (-1/vt) \cdot \ln[1 - \bar{P}_i(\Delta - \Delta_i)] \quad (16)$$

όπου  $P_i$  είναι η πιθανότητα υπέρβασης της  $i$  οριακής κατάστασης και  $C_{LS}^i$  είναι το αντίστοιχο κόστος το σχετιζόμενο με την  $i$  οριακή κατάσταση,  $\bar{P}_i(\Delta - \Delta_i)$  είναι η ετήσια πιθανότητα υπέρβασης της μέγιστης μετακίνησης μεταξύ ορόφων  $\Delta_i$ ,  $v$  είναι η ετήσια συχνότητα εμφάνισης σημαντικών σεισμών, μοντελοποιημένη με μια διαδικασία Poisson και  $t$  είναι η διάρκεια ζωής μίας νέας κατασκευής ή η υπολειπόμενη διάρκεια ζωής μίας παλαιάς ή επισκευασμένης κατασκευής.

Το πρώτο μέρος της εξ. (14) το οποίο περιέχει τον εκθετικό όρο χρησιμοποιείται προκειμένου να εκφραστεί το κόστος  $C_{LS}$  σε παρούσα αξία, όπου  $\lambda$  είναι το ετήσιο επιτόκιο αναφοράς το οποίο λαμβάνεται σταθερό και ίσο με 5% στην παρούσα μελέτη. Υποτίθεται ότι μετά την εκδήλωση ενός σεισμού η κατασκευή αποκαθίσταται πλήρως στο αρχικό επίπεδο της.

Κάθε επίπεδο ζημίας που αντιστοιχεί σε μια οριακή κατάσταση, καθορίζεται από μια μέγιστη τιμή σχετικής μετακίνησης μεταξύ των ορόφων, που απαριθμείται στον πίνακα 3. Όταν μια από τις τιμές σχετικής μετακίνησης ξεπερνιέται, θεωρείται ότι η αντίστοιχη οριακή κατάσταση έχει επιτευχθεί. Η ετήσια πιθανότητα υπέρβασης  $P_i$  ( $\Delta > \Delta_i$ ) λαμβάνεται από μια σχέση της μορφής:

$$\bar{P}_i(\Delta > \Delta_i) = \gamma(\Delta_i)^{-k} \quad (17)$$

**Πίνακας 4.** Φυσικές καταγραφές που ανήκουν στο επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας 50% στα 50 χρόνια (Somerville and Collins (2002))

Σεισμός	Σταθμός	Απόσταση	Έδαφος
Honeydew (PT) 17 August 1991	Cape Mendocino Petrolia	20 17	rock soil
Cape Mendocino (CM) 25 April 1992	Bunker Hill Butler Valley Centerville Eureka College Eureka School Ferndale Fortuna Loleta Rio Dell	8.8 37 16 21 24 14 13 17 13	rock rock soil soil soil soil soil soil soil
Cape Mendocino (C1) aftershock, 26 April 1992 0741GMT	Bunker Hill Centerville Eureka College Eureka School Ferndale Fortuna Loleta	27 27 46 48 34 43 41	rock soil soil soil soil soil soil
Cape Mendocino (C2) aftershock, 4/26/92 1118GMT	Bunker Hill Centerville Ferndale Fortuna	27 28 34 43	rock soil soil soil

Η παραπάνω έκφραση λαμβάνεται από μια διαδικασία βέλτιστου ταιριάσματος (*best fit*) για γνωστά ζεύγη  $P_i - \Delta_i$ . Τα ζεύγη αυτά αντιστοιχούν στους σεισμούς με πιθανότητες υπέρβασης 2, 10 και 50 τοις εκατό στα 50 έτη, με γνωστές πιθανότητες υπέρβασης  $\bar{P}_i$ . Οι αντίστοιχες μέγιστες οριακές τιμές σχετικής μετακίνησης μεταξύ των ορόφων  $\Delta_i$  για τα τρία αυτά επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας λαμβάνονται από μια μη-γραμμική δυναμική ανάλυση για έναν αριθμό σεισμών. Στην παρούσα μελέτη έχουν ληφθεί υπόψη τρία σετ φυσικών καταγραφών, με τις δύο οριζόντιες συνιστώσες τους. Τα βασικά χαρακτηριστικά των σεισμών αυτών δίνονται στους πίνακες 1, 4, 5, σε σχέση με τα τρία επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας που αντιστοιχούν σε πιθανότητες υπέρβασης 10, 50 και 2 τοις εκατό σε 50 χρόνια αντίστοιχα.

**Πίνακας 5.** Φυσικές καταγραφές που ανήκουν στο επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας 2% στα 50 χρόνια (Somerville and Collins (2002))

Σεισμός	Σταθμός	Απόσταση	Έδαφος
Valparaiso (VL), Chile 3 May 1985	Vina del Mar Zapaller	30 30	soil rock
Michoacan (MI), Mexico 19 September 1985	Caleta de Campos La Union La Villita Zihuatenejo	12 22 18 21	rock rock rock rock

Οι καταγραφές κανονικοποιούνται στο ίδιο  $Sa(T_1)$  ώστε να εξασφαλιστεί η συμβατότητα μεταξύ τους, σύμφωνα με τις καμπύλες επικινδυνότητας για την Ελλάδα, οι οποίες λαμβάνονται από την εργασία των Papazachos et al. (1993) (Πίνακας 6). Σύμφωνα με τον νόμο του Poisson η ετήσια πιθανότητα υπέρβασης ενός σεισμού με πιθανότητα υπέρβασης  $p$  σε  $t$  έτη δίνεται από τον τύπο

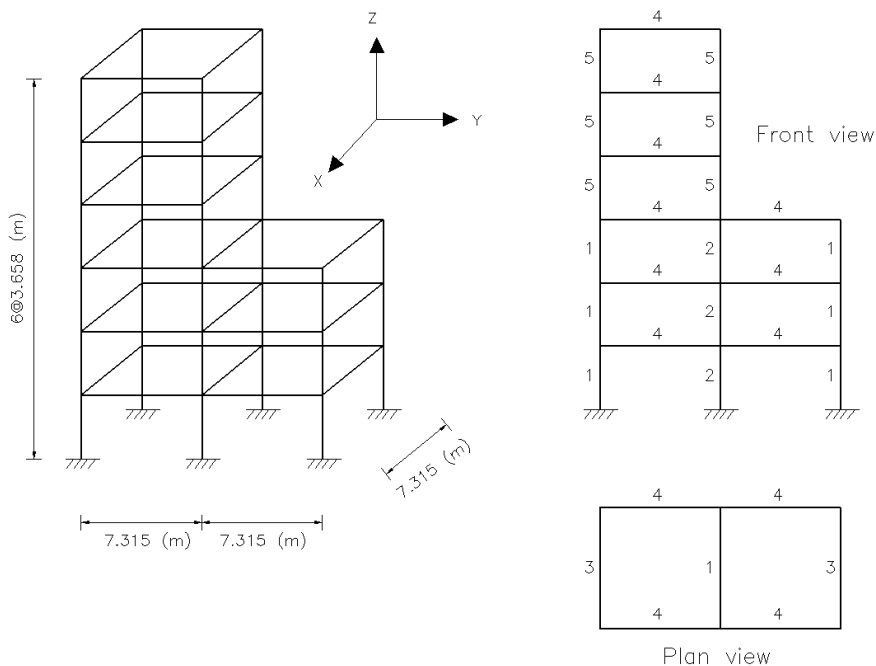
$$\bar{P} = (-1/t) \cdot \ln(1-p) \quad (18)$$

**Πίνακας 6.** Επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας (Papazachos et al. (1993))

Συμβάν	Περίοδος επανάληψης	Πιθανότητα υπέρβασης	PGA (g)
Frequent	21 years	90% in 50 years	0.06
Occasional	72 years	50% in 50 years	0.11
Rare	475 years	10% in 50 years	0.31
Very Rare	2475 years	2% in 50 years	0.78

## ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

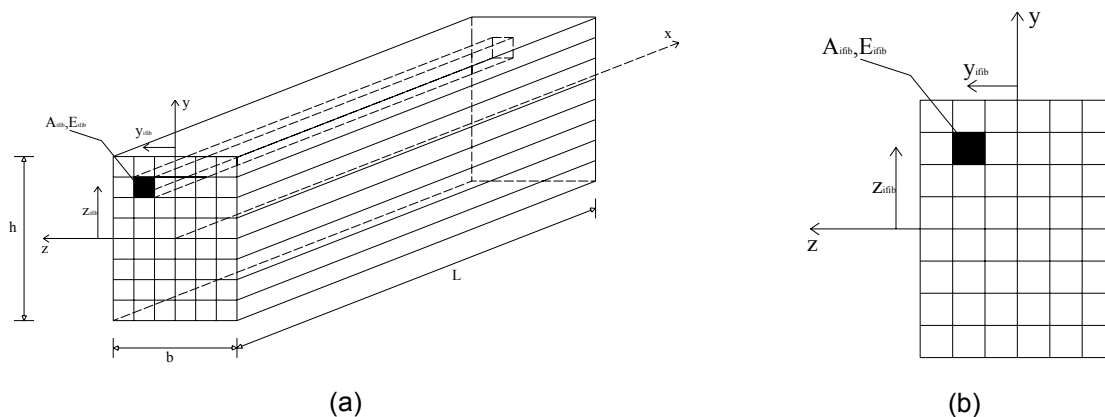
Η κατασκευή η οποία εξετάστηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας είναι το τρισδιάστατο πλαίσιο έξι ορόφων το οποίο φαίνεται στο σχήμα 2. Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού είναι ίσο προς 210 GPa και η τάση διαρροής του υλικού των μελών είναι  $f_y=355$  MPa. Τα μέλη της κατασκευής χωρίζονται σε 5 ομάδες, κάθε μία από τις οποίες αναπαριστά μία μεταβλητή σχεδιασμού, επομένως υπάρχουν 5 μεταβλητές σχεδιασμού συνολικά. Όλα τα μέλη έχουν διατομές σχήματος διπλού ταυ από τους πίνακες του Ευρωκώδικα. Συγκεκριμένα οι δοκοί ανήκουν στην κατηγορία IPE, ενώ τα υποστυλώματα στην κατηγορία HEB. Εκτός από το ίδιο βάρος των δοκών και των πλακών (λαμβάνεται πάχος 10 cm), θεωρείται ένα κατανεμημένο μόνιμο φορτίο 2 kN/m<sup>2</sup> και κινητό φορτίο με ονομαστική τιμή 1.5 kN/m<sup>2</sup> σε κάθε στάθμη. Στον πρώτο συνδυασμό που λαμβάνεται υπόψη (χωρίς σεισμό) τα μόνιμα και τα κινητά φορτία πολλαπλασιάζονται με τους συντελεστές 1.35 και 1.50, αντίστοιχα. Ακολουθώντας τις διατάξεις του ΕΑΚ, στον σεισμικό συνδυασμό, τα μόνιμα φορτία θεωρούνται ως έχουν (συντελεστής 1.00) και τα κινητά φορτία λαμβάνονται υπόψη με συντελεστή 0.30.



**Σχήμα 2.** Γεωμετρία της τρισδιάστατης κατασκευής έξι ορόφων

### Προσομοίωση της κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία

Για την διενέργεια δυναμικής ανάλυσης λαμβάνοντας υπόψη τη μη-γραμμική συμπεριφορά του υλικού απαιτείται μια λεπτομερής και ακριβής προσομοίωση της κατασκευής στις περιοχές που αναμένεται η πλαστικοποίηση. Με δεδομένους τους περιορισμούς της απλής μεθόδου της πλαστικής άρθρωσης όσον αφορά την ακρίβεια της προσομοίωσης, ιδιαίτερα υπό δυναμικές φορτίσεις, στην παρούσα εργασία υιοθετήθηκε η θεώρηση των ινών της διατομής (fiber approach). Κάθε μέλος διαιρείται σε έναν αριθμό διατομών και κάθε διατομή διαιρείται σε έναν αριθμό ινών (Σχήματα 3a και 3b).



**Σχήμα 3.** Μοντελοποίηση της ανελαστικής συμπεριφοράς – Διακριτοποίηση των ινών της διατομής (fiber approach)

Οι διατομές είναι τοποθετημένες στα σημεία ολοκλήρωσης Gauss του στοιχείου. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της θεώρησης είναι ότι κάθε μεμονωμένη ίνα ακολουθεί έναν απλό μονοαξονικό νόμο υλικού (διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων) με αποτέλεσμα να μπορεί να υλοποιηθεί σχετικά απλά και αποτελεσματικά η μη-γραμμική συμπεριφορά. Αυτή η

προσέγγιση θεωρείται κατάλληλη για μη-γραμμικά στοιχεία δοκού – υποστυλώματος υπό δυναμικά φορτία και δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα σε σχέση με άλλες διατυπώσεις. Όμως, οδηγεί σε υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις, τόσο όσον αφορά την υπολογιστική μνήμη, όσο και τον υπολογιστικό χρόνο. Χρησιμοποιείται ένας προσαρμοστικός τρόπος διακριτοποίησης όπου γίνεται πύκνωση στις θέσεις των κόμβων (Lagaros *et al.* (2006b)). Επομένως, οι περιοχές κοντά στα άκρα του μέλους διακριτοποιούνται με πιο πυκνό τρόπο, ενώ το υπόλοιπο μέλος διακριτοποιείται με ένα ελαστικό στοιχείο

Εφαρμόζεται ένας απλός διγραμμικός νόμος τάσεων – παραμορφώσεων του υλικού, με κινηματική κράτυνση. Μελέτες έχουν δείξει ότι αυτός ο νόμος υλικού είναι ικανοποιητικός και δίνει αρκετά ακριβή αποτελέσματα για πρακτικές εφαρμογές μηχανικού. Η σχέση τάσεων ( $\sigma$ ) - παραμορφώσεων ( $\varepsilon$ ) δίνεται από τις σχέσεις

$$\begin{aligned}\sigma &= E \cdot \varepsilon & , \text{ for } \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ \sigma &= E \cdot \varepsilon_y + E_{st} \cdot (\varepsilon - \varepsilon_y), & \text{ for } \varepsilon > \varepsilon_y\end{aligned}\tag{19}$$

όπου  $\sigma_y$  και  $\varepsilon_y$  είναι η τάση διαρροής και η αντίστοιχη παραμόρφωση διαρροής και  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας, ενώ  $E_{st}$  είναι το μέτρο κράτυνσης του υλικού.

#### Διατύπωση των προβλημάτων DBO και RDO

Οι δύο διατυπώσεις DBO και RDO χρησιμοποιούνται και συγκρίνονται για τον έλεγχο της τιμής του συντελεστή συμπεριφοράς  $q$  που προτείνεται από τον ΕΑΚ για σιδηρές πλαισιωτές κατασκευές. Η μαθηματική διατύπωση του αιτιοκρατικού προβλήματος δύο αντικειμενικών συναρτήσεων (*multi-objective DBO*) είναι η εξής

$$\begin{aligned}\min_{\mathbf{s} \in F} & \quad [C_{IN}(\mathbf{s}), \Delta_{max}(\mathbf{s})]^T \\ \text{subject to} & \quad g_i(\mathbf{s}) \leq 0 \quad i=1, \dots, k\end{aligned}\tag{20}$$

όπου το διάνυσμα  $\mathbf{s}$  παριστά τις μεταβλητές σχεδιασμού και  $F$  είναι η εφικτή περιοχή όπου όλες οι συναρτήσεις περιορισμού  $g_i$  ικανοποιούνται. Οι δύο αντικειμενικές συναρτήσεις είναι το αρχικό κόστος της κατασκευής  $C_{IN}$  και η μέγιστη σχετική μετακίνηση μεταξύ των ορόφων  $\Delta_{max}$ . Από την άλλη, η διατύπωση του εξεταζόμενου προβλήματος εύρωστου βέλτιστου σχεδιασμού (RDO) είναι η εξής

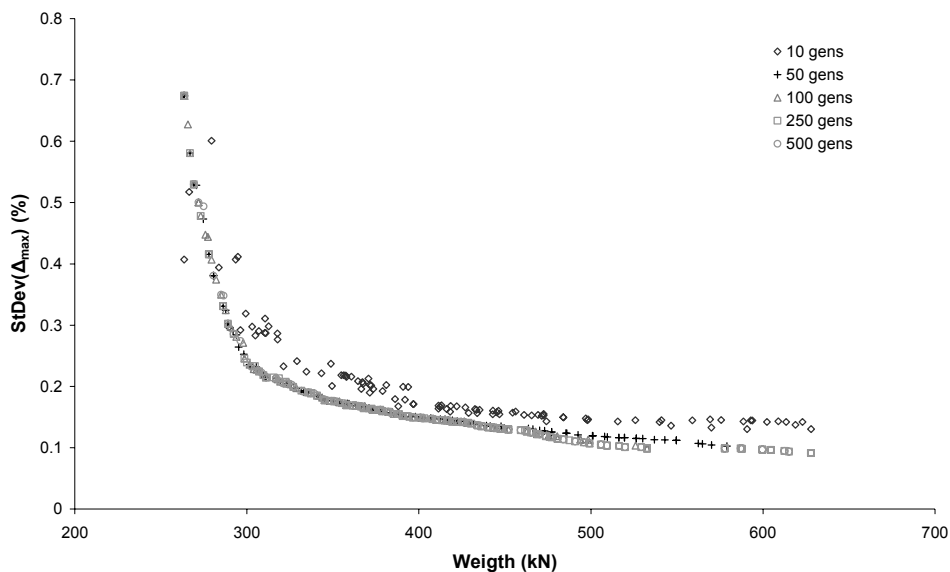
$$\begin{aligned}\min_{\mathbf{s} \in \bar{F}} & \quad [C_{IN}(\mathbf{s}, \boldsymbol{\mu}_r), \sigma_{\Delta_{max}}(\mathbf{s}, \boldsymbol{\mu}_r)]^T \\ \text{subject to} & \quad \bar{g}_i(\mathbf{s}, \boldsymbol{\mu}_r) \leq 0 \quad i=1, \dots, k \\ \text{where} & \quad \mathbf{r} \sim N(\boldsymbol{\mu}_r, \sigma_r^2)\end{aligned}\tag{21}$$

Όπου τα διανύσματα  $\mathbf{s}$ ,  $\mathbf{r}$  παριστούν τις μεταβλητές σχεδιασμού και τις αβέβαιες παραμέτρους αντίστοιχα και  $\bar{F}$  είναι η εφικτή περιοχή όπου οι μέσες τιμές όλων των συναρτήσεων περιορισμού  $\bar{g}_i$  ικανοποιούνται. Οι δύο αντικειμενικές συναρτήσεις είναι το αρχικό κόστος  $C_{IN}$  και η τυπική απόκλιση της μέγιστης μετατόπισης μεταξύ ορόφων  $\Delta_{max}$ . Εκτός από τη διαφορετική δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση για τις δύο εξεταζόμενες διατυπώσεις, υπάρχει και μια ουσιώδης διαφορά που αφορά τον έλεγχο των συναρτήσεων

περιορισμού, καθώς στη διατύπωση RDO οι μέσες τιμές των συναρτήσεων περιορισμού χρησιμοποιούνται για τον αντίστοιχο έλεγχο.

### Αριθμητική διερεύνηση

Για τον υπολογισμό των στατιστικών παραμέτρων που απαιτούνται για το πρόβλημα RDO χρησιμοποιείται η μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo. Μέσα από παραμετρικές διερευνήσεις διαπιστώθηκε ότι ένα δείγμα με πληθυσμό 100 ήταν αρκετό για τον υπολογισμό των απαιτούμενων στατιστικών παραμέτρων που είναι η τυπική απόκλιση της μέγιστης μετακίνησης μεταξύ των ορόφων και η μέση τιμή των συναρτήσεων περιορισμού. Για όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση ο αλγόριθμος NSES-II(100+100) με 100 γονείς και 100 απογόνους. Στο πρώτο μέρος, εξετάζεται η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου NSES-II(μ+λ). Για το μέρος αυτό, λαμβάνεται συντελεστής συμπεριφοράς  $q$  της κατασκευής ίσος προς 4.0, όπως προτείνει ο ΕΑΚ για τις μεταλλικές κατασκευές. Διενεργείται μια παραμετρική ανάλυση, σε σχέση με τον ελάχιστο αριθμό γενεών του αλγορίθμου βελτιστοποίησης που απαιτούνται για τον υπολογισμό καλής ποιότητας καμπυλών Pareto. Στο σχήμα 4 παρουσιάζονται οι καμπύλες Pareto για αριθμό γενεών 10, 50, 100, 250 και 500. Όπως διαπιστώνεται, ένας αριθμός 50 γενεών είναι αρκετός για μια καλής ποιότητας καμπύλη Pareto. Επομένως, και για το δεύτερο μέρος, λαμβάνονται 50 γενεές για τις αναλύσεις.

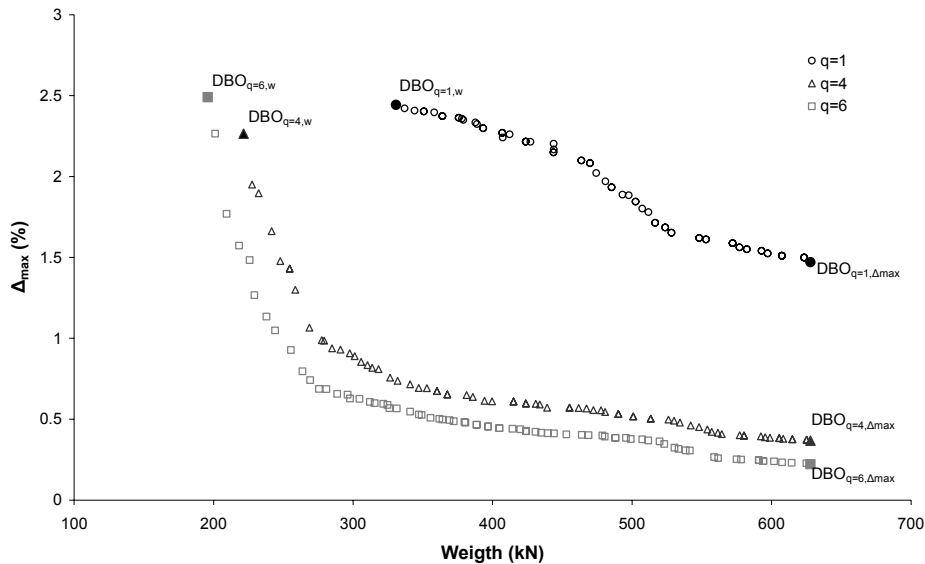


Σχήμα 4. Η καμπύλη Pareto για  $q=4$  σε σχέση με τον αριθμό των γενεών του αλγορίθμου βελτιστοποίησης

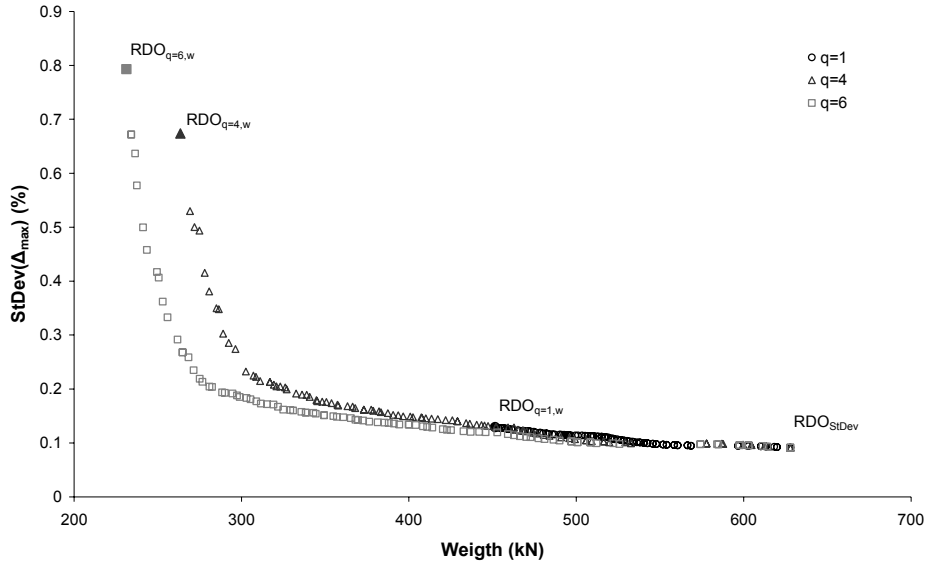
Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ των βέλτιστων σχεδιασμών που προκύπτουν με βάση τις θεωρήσεις DBO και RDO σε σχέση με το αρχικό κόστος, την τυπική απόκλιση της μέγιστης μετακίνησης μεταξύ των ορόφων και τον λόγο του κόστους του σχετιζόμενου με τις οριακές καταστάσεις σε σχέση με το αρχικό κόστος. Για τη συγκριτική αυτή ανάλυση, το εξάωρο πλαίσιο έχει σχεδιαστεί με τα κριτήρια του ΕΑΚ για διαφορετικές τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς  $q$  και ειδικότερα για τις τιμές 1.0, 4.0 και 6.0. Σύμφωνα με τις διατάξεις του ΕΑΚ, οι σεισμικές δυνάμεις ελήφθησαν από το ελαστικό

φάσμα σχεδιασμού (με 4% απόσβεση), διαιρεμένο με τον δείκτη συμπεριφοράς  $q$  για τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο της κατασκευής. Η τέμνουσα βάση λαμβάνεται από το φάσμα σχεδιασμού για κατηγορία εδάφους B ( $\theta = 1.0$ , με χαρακτηριστικές ιδιοπεριόδους  $T_1 = 0.15$  sec και  $T_2 = 0.60$  sec) και μέγιστη επιτάχυνση (PGA) ίση προς 0.31 g. Επιπρόσθετα, ο συντελεστής σπουδαιότητας  $\gamma$  ελήφθη ίσος προς 1.0 (κατηγορία σπουδαιότητας Σ2), ενώ ο συντελεστής διόρθωσης απόσβεσης ελήφθη ίσος προς 1.0. Το διάμεσο φάσμα απόκρισης του σχήματος 1, κανονικοποιημένο στο  $S_a(T_1)$  του φάσματος του ΕΑΚ χρησιμοποιείται για τις σεισμικές δυνάμεις.

Οι προκύπτουσες καμπύλες Pareto για τις διατυπώσεις DBO και RDO και για τους τρεις συντελεστές συμπεριφοράς που εξετάστηκαν, φαίνονται στα σχήματα 5 και 6 αντίστοιχα. Τα δύο άκρα της καμπύλης Pareto αντιστοιχούν σε δύο ακραίους σχεδιασμούς. Συγκεκριμένα, οι σχεδιασμοί  $DBO_{q=1,w}$ ,  $DBO_{q=4,w}$  και  $DBO_{q=6,w}$  αντιστοιχούν στις βέλτιστες λύσεις που προέκυψαν από τη διαδικασία DBO, όταν το βάρος της κατασκευής είναι το κύριο κριτήριο, ενώ οι σχεδιασμοί  $RDO_{q=1,w}$ ,  $RDO_{q=4,w}$  και  $RDO_{q=6,w}$  αντιστοιχούν στις αντίστοιχες βέλτιστες λύσεις της RDO διατύπωσης. Από την άλλη, οι σχεδιασμοί  $DBO_{q=1,\Delta max}$ ,  $DBO_{q=4,\Delta max}$  και  $DBO_{q=6,\Delta max}$  αντιστοιχούν στις βέλτιστες λύσεις που προκύπτουν από τη DBO διατύπωση, όταν η μέγιστη μετακίνηση μεταξύ των ορόφων ληφθεί ως το κύριο κριτήριο ενώ ο σχεδιασμός  $RDO_{StDev}$  λαμβάνεται με την RDO διαδικασία όταν η τυπική απόκλιση της μέγιστης μετακίνησης μεταξύ ορόφων είναι το κύριο κριτήριο, για όλες τις τιμές του  $q$ . Σημειώνεται ότι οι σχεδιασμοί  $RDO_{StDev}$  και  $DBO_{q=1,\Delta max}$ ,  $DBO_{q=4,\Delta max}$ ,  $DBO_{q=6,\Delta max}$  είναι ταυτόσημοι και αντιστοιχούν στο άνω όριο της διαθέσιμης βάσης δεδομένων για τις διατομές.



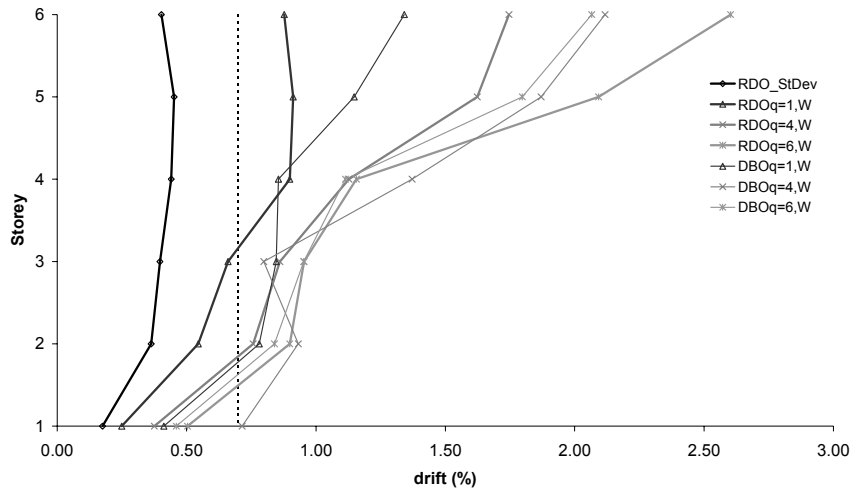
Σχήμα 5. DBO-Καμπύλες Pareto για  $q=1.0$ , 4.0 και 6.0



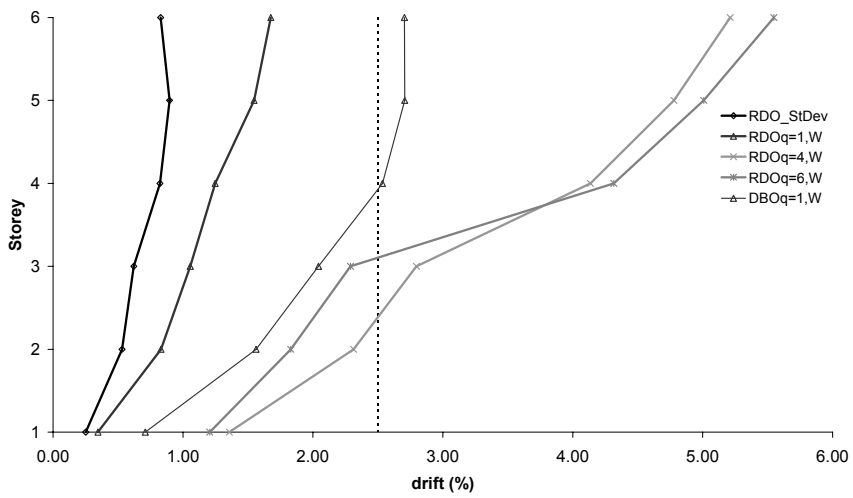
**Σχήμα 6.** RDO-Καμπύλες Pareto για  $q=1.0$ ,  $4.0$  και  $6.0$

Στα σχήματα 7(a) έως 7(c) φαίνεται η σεισμική επίδοση των παραπάνω βέλτιστων σχεδιασμών, με βάση τις μέγιστες μετακινήσεις μεταξύ των ορόφων. Πιο συγκεκριμένα, τα σχήματα 7(a) έως 7(c) δείχνουν τη διάμεσο της μέγιστης μετακίνησης μεταξύ των ορόφων καθ' ύψος του πλαισίου για τρία επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας για κάθε έναν από τους σχεδιασμούς DBO και RDO. Η διάμεσος της μέγιστης μετακίνησης μεταξύ των ορόφων έχει υπολογιστεί με μη-γραμμική ανάλυση με χρονική ολοκλήρωση με τις σεισμικές καταγραφές των πινάκων 1, 4 και 5. Τα όρια των σχετικών μετακινήσεων 0.7%, 2.5% και 5.0% που παριστάνονται με διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχούν στα επίπεδα επίδοσης III, V και VI του πίνακα 3, αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 7(a) ο σχεδιασμός  $RDO_{StDev}$  (που συμπίπτει με τον  $DBO_{q,\Delta_{max}}$ ) είναι ο μόνος ο οποίος δεν υπερβαίνει το όριο του επιπέδου επίδοσης III για το επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας 50/50, ενώ στα σχήματα 7(b) και 7(c) φαίνεται ότι οι σχεδιασμοί  $RDO_{StDev}$  και  $RDO_{q=1,w}$  είναι οι μόνιμοι που δεν υπερβαίνουν τα όρια των επιπέδων επίδοσης V και VI για τα επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας 10/50 και 2/50. Οι σχεδιασμοί που δεν αποτυπώνονται στα σχήματα 7(b) και 7(c) είναι εκείνοι που είτε καταρρέουν, είτε έχουν πολύ μεγάλες σχετικές μετακινήσεις ορόφων σε σχέση με τα όρια της διακεκομμένης γραμμής.

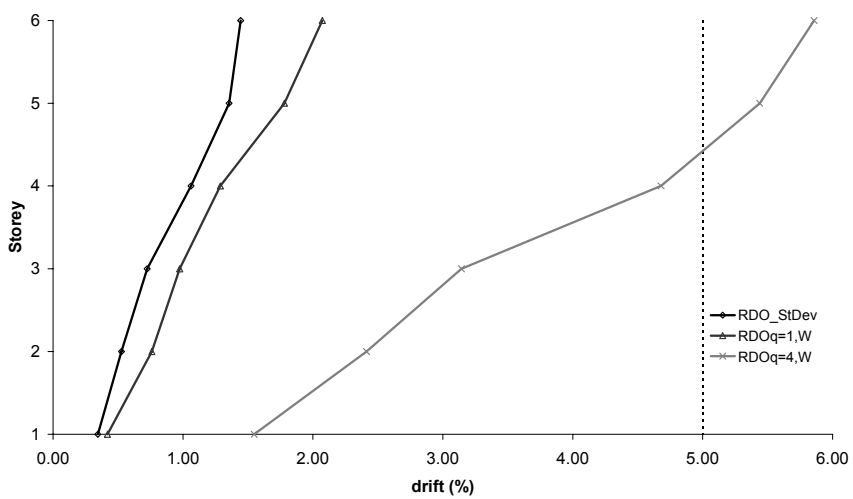




(a)



(b)



(c)

Σχήμα 7. Μετακινήσεις ορόφων για τους σχεδιασμούς DBO και RDO

**Πίνακας 7.** Σύγκριση των διαφόρων σχεδιασμών

Σχεδιασμός	$DBO_{\Delta_{max}}/RDO_{StDev}$	$DBO_{q=1,w}$	$RDO_{q=1,w}$	$DBO_{q=4,w}$	$RDO_{q=4,w}$	$DBO_{q=6,w}$	$RDO_{q=6,w}$
Column 1	HEB1000	HEB500	HEB900	HEB450	HEB360	HEB400	HEB340
Column 2	HEB1000	HEB550	HEB1000	HEB450	HEB340	HEB550	HEB360
Column 3	HEB1000	HEB600	HEB800	HEB360	HEB450	HEB320	HEB320
Beam 1	IPE600	IPE300	IPE360	IPE200	IPE270	IPE200	IPE220
Beam 2	IPE600	IPE360	IPE400	IPE220	IPE300	IPE200	IPE240
$\sigma(\Delta_{max})$ (%)	0.09	0.23	0.13	0.90	0.67	0.89	0.79
Mean( $\Delta_{max}$ ) (%)	1.32	3.11	2.49	3.07	2.41	2.79	2.42
$C_{IN}$ (kN)	627.9	330.8	450.9	221.5	263.5	195.8	231.2
$C_{LS}/C_{IN}$	2.5	74.7	22.0	177.9	123.8	192.5	139.8

Στον πίνακα 7 συγκρίνονται οι βέλτιστοι σχεδιασμοί που προκύπτουν με τις θεωρήσεις DBO και RDO, σε σχέση με το αρχικό κόστος και τον λόγο του κόστους του σχετιζόμενου με τις οριακές καταστάσεις προς το αρχικό κόστος. Οι σχεδιασμοί που αντιστοιχούν στις λύσεις Pareto με το αρχικό κόστος ως κύριο κριτήριο δείχνουν μια αντίθετη συμπεριφορά όσον αφορά το κόστος το σχετιζόμενο με τις οριακές καταστάσεις. Συγκεκριμένα, οι σχεδιασμοί  $DBO_{q=6,w}$  και  $RDO_{q=6,w}$  που αντιστοιχούν στους πλέον οικονομικούς σχεδιασμούς όσον αφορά το αρχικό κόστος, είναι οι λιγότερο οικονομικοί όσον αφορά το κόστος το σχετιζόμενο με τις οριακές καταστάσεις. Από την άλλη, οι σχεδιασμοί  $DBO_{q=1,w}$  και  $RDO_{q=1,w}$  είναι οι λιγότερο οικονομικοί σχεδιασμοί όσον αφορά το αρχικό κόστος, είναι όμως οι πλέον οικονομικοί όσον αφορά το κόστος το σχετιζόμενο με τις οριακές καταστάσεις. Το κόστος το σχετιζόμενο με τις οριακές καταστάσεις δίνει σημαντικές πληροφορίες για την επίδοση του σχεδιασμού σε μελλοντικούς σεισμούς, το οποίο πρέπει να ληφθεί κατάλληλα υπόψη κατά τον σχεδιασμό των κτιρίων. Από την άλλη, με σύγκριση των δύο διατυπώσεων με βάση τους σχεδιασμούς  $DBO_{q,w}$  και  $RDO_{q,w}$ , γίνεται φανερό ότι η διατύπωση RDO οδηγεί εν γένει σε σχεδιασμούς με αυξημένο αρχικό κόστος, αλλά καλύτερη μελλοντική συμπεριφορά έναντι σεισμών, και άρα περισσότερη οικονομία όσον αφορά το κόστος το σχετιζόμενο με τις οριακές καταστάσεις.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή έγινε μια παραμετρική διερεύνηση ώστε να αξιολογηθούν σχεδιασμοί σύμφωνοι με τον ΕΑΚ στα πλαίσια των διατυπώσεων DBO (Αιτιοκρατικός Βέλτιστος Σχεδιασμός) με πολλαπλά κριτήρια και RDO (Εύρωστος Βέλτιστος Σχεδιασμός). Ο τροποποιημένος αλγόριθμος NSGA-II που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων αποδείχτηκε ικανός, καθώς 50 γενιές ήταν αρκετές για την εύρεση καλής ποιότητας καμπυλών *Pareto*. Πέρα από το παραπάνω, δύο είναι τα σημαντικότερα ευρήματα από την έρευνα αυτή:

- Για το παράδειγμα που εξετάστηκε επιβεβαιώνεται ότι, όπως ήταν αναμενόμενο, όταν σχεδιάζουμε μια κατασκευή με την τιμή του  $q$  που προτείνει ο ΕΑΚ ( $q=4$ ) ο προκύπτων σχεδιασμός θα είναι περισσότερο ευάλωτος σε μελλοντικούς σεισμούς με αποτέλεσμα ένα πολύ μεγαλύτερο κόστος αποκαταστάσεων, σε σχέση με έναν σχεδιασμό που έχει προκύψει για γραμμική απόκριση της κατασκευής ( $q=1$ ). Αυτό επιβεβαιώνεται τόσο μέσω της αιτιοκρατικής διατύπωσης DBO, όσο και μέσω της διατύπωσης RDO.

- Από την άλλη τα αποτελέσματα που λαμβάνονται με την αιτιοκρατική διατύπωση (DBO) και τη διατύπωση RDO δείχνουν τη σπουδαιότητα του να ληφθούν υπόψη οι αβεβαιότητες στη διατύπωση του προβλήματος βέλτιστου σχεδιασμού. Οι βέλτιστοι σχεδιασμοί κατά Pareto που λαμβάνονται μέσω της διατύπωσης RDO παρουσιάζουν καλύτερη εν γένει συμπεριφορά υπό σεισμικά φορτία καθώς είναι πιο οικονομικοί όσον αφορά το συνολικό κόστος κύκλου ζωής σε σχέση με τους αντίστοιχους σχεδιασμούς που προκύπτουν από μια απλή αιτιοκρατική θεώρηση.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή χρηματοδοτήθηκε από το έργο ΠΕΝΕΔ 2003. Το έργο είναι μέρος του Επιχειρησιακού Προγράμματος “Ανταγωνιστικότητα” (μέτρο 8.3) του Γ΄ Κοινοτικού Πλαισίου Στήριξης και είναι συγχρηματοδοτούμενο, 75% από την Ευρωπαϊκή Ένωση και 25% από το Ελληνικό Υπουργείο Ανάπτυξης – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας και από τον ιδιωτικό τομέα.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ATC-13 (1985) Earthquake damage evaluation data for California. Applied Technology Council, Redwood City, California.
- Chen W, Lewis K (1999) A robust design approach for achieving flexibility in multidisciplinary design. *AIAA Journal*, 37(8): 982-990.
- Chintanapakdee C, Chopra AK (2003) Evaluation of modal pushover analysis using generic frames. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 32(3): 417-442.
- Coello Coello CA (2000) An updated survey of GA-based multi-objective optimization techniques. *ACM Computing Surveys*, 32(2): 109-143.
- Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T (2002) A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2): 182-197.
- Doltsinis I, Kang Z (2004) Robust design of structures using optimization methods. *Comput Methods Appl Mech Engrg*, 193: 2221-2237.
- EAK (2000), National seismic code of Hellas.
- Frangopol DM, Soares CG (2001) Reliability-oriented optimal structural design. Special Issue, *Reliability Engineering & System Safety*, 73(3): 195-306.
- Gunawan S, Azarm S (2005) Multi-objective robust optimization using a sensitivity region concept. *Struct Multidisc Optim* 29: 50–60.
- Jung D-H, Lee B-C (2002) Development of a simple and efficient method for robust optimization. *Int J Numer Meth Engrg*, 53: 2201-2215.
- Lagaros ND, Fragiadakis M, Papadrakakis M (2004) Optimum design of shell structures with stiffening beams. *AIAA Journal*, 42(1): 175-184.
- Lagaros ND, Papadrakakis M (2007) Robust seismic design optimization of steel structures. *Str. Mult. Opt.*, 33(6): 457-469
- Lagaros ND, Plevris V, Papadrakakis M (2005) Multi-objective design optimization using cascade evolutionary computations. *Comput Methods Appl Mech Engrg*, 194(30-33): 3496-3515.
- Lagaros ND, Fotis AD, Krikos SA (2006a) Assessment of seismic design procedures based on the total cost. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, (to appear).
- Lagaros ND, Fragiadakis M, Papadrakakis M, Tsompanakis Y (2006b) Structural optimization: a tool for evaluating seismic design procedures. *Journal of Engineering Structures*, (to appear).

- Marler RT, Arora JS (2004) Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Struct Multidisc Optim*, 26(6): 369-395.
- Messac A, Ismail-Yahaya A (2002) Multi-objective robust design using physical programming. *Struct Multidisc Optim*, 23: 357-371.
- Papadrakakis M, Lagaros ND (2002) Reliability-based structural optimization using neural networks and Monte Carlo simulation. *Comput Methods Appl Mech Engrg*, 191(32): 3491-3507.
- Papazachos BC, Papaioannou ChA, Theodulidis NP (1993) Regionalization of seismic hazard in Greece based on seismic sources. *Natural Hazards*, 8(1): 1-18.
- Park G-J, Lee T-H, Lee KH, Hwang K-H (2006) Robust design: An overview. *AIAA Journal*, 44 (1): 181-191.
- Schuëller GI (2005) Special Issue on Computational Methods in Stochastic Mechanics and Reliability Analysis. *Comput Methods Appl Mech Engrg*, 194(12-16): 1251-1795.
- Wen YK, Kang YJ (2001a) Minimum building life-cycle cost design criteria. I: Methodology. *J Struct Engrg*, 127(3): 330-337.
- Wen YK, Kang YJ (2001b) Minimum building life-cycle cost design criteria. II: Applications. *J Struct Engrg*, 127(3): 338-346.