

Διερεύνηση αιτιών αστοχίας στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος μέσω ανάλυσης ευαισθησίας Investigating R/C member inefficiencies using sensitivity analysis

Γεώργιος Ν. ΒΑΛΑΛΟΥΚΑΣ¹, Αριστείδης Γ. ΠΑΠΑΧΡΗΣΤΙΔΗΣ²,
Αθηνά-Χριστιάνα Μ. ΑΝΩΓΙΑΤΗ³

Λέξεις κλειδιά : ανάλυση ευαισθησίας, δείκτες ανεπάρκειας, ΚΑΝΕΠΕ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια μεθοδολογία ανάλυσης της κατασκευαστικής ευαισθησίας υφιστάμενων κτηρίων υπό στατικές και δυναμικές συνθήκες φόρτισης. Συγκεκριμένα, λαμβάνονται υπ' όψη συμβατικές πλαίσιακές κατασκευές που παρουσιάζουν διαφραγματική λειτουργία με (ή δίχως) τοιχεία. Το περιβάλλον έδαφος διακρίτοποιείται μέσω ελατήριων, ώστε οι συνδετήριες δοκοί της θεμελίωσης να θεωρούνται ως δοκοί τύπου Winkler. Αρχικά μελετάται η στατικού-τύπου ευαισθησία, και υπολογίζονται αδιάστατοι συντελεστές στους βαθμούς ελευθέριας του προσομοιωμάτος της κατασκευής για τις μετακινήσεις και τα εντατικά μεγέθη. Οι ιδιότητες των δομικών στοιχείων που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα (παράμετροι ευαισθησιών) ποικίλουν και παρουσιάζονται στα πλαίσια της παρούσης εργασίας. Σε μια δεύτερη φάση που αφορά στις δυναμικές φορτίσεις, η ανάλυση ευαισθησίας γίνεται για το ιδιομορφικό πρόβλημα, όπου υπολογίζονται αδιάστατοι συντελεστές ευαισθησίας για τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής. Αυτό επιτρέπει τη χρήση της φασματικής ανάλυσης για υφιστάμενα (κυρίως για διατηρητέα) κτήρια, προκειμένου να επισκευασθούν (ή να αναπαλαιωθούν) με γνώμονα την ικανοποίηση των σχετικών διατάξεων του αντισεισμικού κανονισμού (ΕΑΚ 2000, ΕΚΟΣ 2000) καθώς και του κανονισμού επεμβάσεων (ΚΑΝΕΠΕ 2004).

ABSTRACT : In this work, a sensitivity analysis for structures is formulated for both static and dynamic conditions. In particular, conventional buildings are considered that consist of beam-column frames, with or without shear walls, and with diaphragm action assumed for the flooring system. Furthermore, a Winkler type foundation exists for the foundation system comprising connector beams, whereby the soil is represented by discrete spring constants. For static analysis

¹ Πολιτικός Μηχανικός, 4Μ-VK, Μυκητών 9, Χαλάνδρι, 15233 Αθήνα, georgev@4m.gr

² Πολιτικός Μηχανικός, 4Μ-VK, Μυκητών 9, Χαλάνδρι, 15233 Αθήνα, aris@4m.gr

³ Πολιτικός Μηχανικός, 4Μ-VK, Μυκητών 9, Χαλάνδρι, 15233 Αθήνα, athina@4m.gr

purposes, dimensionless sensitivity factors are computed at the degrees-of-freedom of the finite element model of the building regarding both kinematic (i.e., displacements and rotations) and stress fields. The key sensitivity parameters in the methodology are identified and subsequently presented. As far as dynamic analysis is concerned, we focus on the eigenvalue problem. This allows the use of spectral analysis for existing (primarily heritage-type) buildings that are to be retrofitted (or renovated) in view of full compliance with contemporary Greek national building and earthquake codes.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι έννοιες της “δομικής ευαισθησίας” (structural sensitivity) σε αιτιοκρατικό περιβάλλον (deterministic environment) και της “στοχαστικής δομικής ευαισθησίας” (stochastic structural sensitivity) σε πιθανοτικό περιβάλλον (probabilistic environment) αποτελούν συνέχεια της κλασσικής στατικής / δυναμικής ανάλυσης των κατασκευών, όπου σε πρώτη φάση προσδιορίζεται η κινηματική και η εντατική κατάσταση του υπό εξέταση φορέα υπό στατικά / δυναμικά φορτία (Haukaas and Kiureghian, 2004 και Manolis and Koliopoulos, 2001). Το επόμενο βήμα, όπου υπεισέρχεται η έννοια της δομικής ευαισθησίας, αφορά στη μεταβολή της κινηματικής / εντατικής κατάστασης του φορέα ως συνάρτηση αλλαγών που πραγματοποιούνται στη γεωμετρία και στις μηχανικές του ιδιότητες των επιμέρους δομικών στοιχείων (Liu et al., 1986; Vanmarke et al., 1986; Manolis et al., 1990; Kleiber et al., 1997). Πρακτικά, αυτές οι αλλαγές έχουν να κάνουν με τα εξής κατασκευαστικά θέματα:

- (1) Επισκευές και επεμβάσεις στον αρχικό φορέα με στόχο την αποκατάσταση της αρχικής του μορφής (αναπαλαίωση όταν πρόκειται για διατηρητέα κτήρια).
- (2) Ενισχύσεις και αποκαταστάσεις σε υπάρχοντα φορέα ώστε να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις των νέων κανονισμών.
- (3) Οι συνήθειες επισκευές που απαιτούνται κατά τη διάρκεια ζωής μιας συμβατικής κατασκευής για την σωστή και ασφαλή της λειτουργία.

Μία ανάλυση δομικής ευαισθησίας έχει τη δυνατότητα να προσδιορίσει επακριβώς τις επιπτώσεις της συγκεκριμένης επέμβασης (π.χ., επιλεκτική ενίσχυση των στύλων του ισογείου) στην εντατική και κινηματική κατάσταση που αναπτύσσεται στο φορέα για τις συνήθειες κατηγορίες φορτίων, δηλαδή μόνιμα, κινητά, σεισμικά, κλπ. Κατ’ αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μια οικονομική και αποτελεσματική αξιοποίηση των εργασιών αποκατάστασης και των υλικών που χρησιμοποιούνται γι’ αυτό το σκοπό. Σημειώνουμε τέλος πως δεν είναι δυνατή η επίτευξη της βέλτιστης λύσης για ένα συγκεκριμένο στόχο, όπως π.χ. η μείωση μιας κρίσιμης μετακίνησης οροφής ή μιας τέμνουσας βάσης μέσα σε κάποιο αποδεκτό όριο για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς φόρτισης, επειδή αυτό άπτεται του θέματος της “αντίστροφης ανάλυσης” (inverse analysis), που είναι μία διαφορετική κατηγορία επίλυσης προβλημάτων της μηχανικής των κατασκευών. Απλώς, η ανάλυση δομικής ευαισθησίας δείχνει σε ποιο σημείο της κατασκευής έχουμε τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις της απόκρισης (ελάχιστα / μέγιστα), σε σχέση πάντα με μία συγκεκριμένη επέμβαση.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Στην ενότητα που ακολουθεί, θα αναπτυχθεί το θεωρητικό υπόβαθρο της δομικής ευαισθησίας, ξεκινώντας από τις βασικές αρχές της μηχανικής του ελαστικού σώματος.

Ισχυρή διατύπωση του προβλήματος της γραμμικής ελαστικότητας

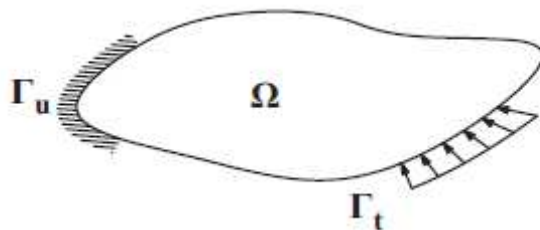
Το σύνολο των εξισώσεων που απαιτούνται για την βασική περιγραφή του προβλήματος της μηχανικής συμπεριφοράς ενός δομικού στοιχείου (ή σώματος, δες Σχ. 1) που καταλαμβάνει το χωρικό πεδίο Ω και με σύνορα $\Gamma = \Gamma_u \cup \Gamma_t$ έχει ως εξής:

$$\frac{\partial s^i}{\partial x_i} + f(x) = 0, \quad x \in \Omega \quad (1)$$

$$s^i n_i = t(x), \quad x \in \Gamma_t \quad (2)$$

$$u = \tilde{u}(x), \quad x \in \Gamma_u \quad (3)$$

Στις Εξισώσεις (1) – (2), το διάνυσμα \mathbf{x} υποδηλώνει τις χωρικές συντεταγμένες, το διάνυσμα \mathbf{u} περιγράφει το πεδίο των μετακινήσεων ενώ τα διανύσματα \mathbf{f} και \mathbf{t} είναι οι κατανεμημένες πεδιακές δυνάμεις και οι προκαθορισμένες τάσεις στα σύνορα Γ_t αντιστοίχως. Με Γ_u υποδηλώνεται το τμήμα του συνόρου του σώματος στο οποίο οι μετακινήσεις είναι προκαθορισμένες. Τέλος, \mathbf{s}^i είναι το διάνυσμα των τάσεων ενώ \mathbf{n}^i οι συνιστώσες ενός μοναδιαίου διανύσματος, εξωτερικά κάθετου προς το σύνορο Γ . Το προαναφερόμενο σύνολο εξισώσεων επαυξάνεται με τις καταστατικές εξισώσεις που συνδέουν τάσεις και παραμορφώσεις (εδώ γίνεται θεώρηση γραμμικής ελαστικότητας), καθώς και τις γεωμετρικές συνθήκες οι οποίες συνδέουν τα πεδία των παραμορφώσεων και μετακινήσεων.



Σχήμα 1. Ελαστικό σώμα στον τρισδιάστατο χώρο

Ασθενής διατύπωση του προβλήματος της γραμμικής ελαστικότητας

Πολλαπλασιάζοντας την εξίσωση (1) με μια συνάρτηση 'βάρους' w , όπου

$$w \in V \quad V = \{w \in H^1(\Omega) \} : w=0 \text{ στο } \Gamma_u$$

και ολοκληρώνοντας στο χωρικό πεδίο του σώματος, και ταυτόχρονα εφαρμόζοντας το θεώρημα του Green όπου λαμβάνονται υπ' όψη οι φυσικές συνοριακές συνθήκες (natural boundary conditions) της εξίσωσης (2a), λαμβάνουμε την ακόλουθη έκφραση που αποτελεί την 'ασθενή' διατύπωση (weak formulation) του προβλήματος (Wempner and Talaslidis, 2003):

$$\int_{\Omega} s^i \cdot \frac{\partial w}{\partial x_i} d\Omega - \int_{\Omega} f \cdot w d\Omega - \int_{\Gamma_t} t \cdot w d\Omega = 0 \quad (4)$$

Στην ανωτέρω 'ασθενή' διατύπωση του προβλήματος, οι καταστατικές εξισώσεις και οι γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ παραμορφώσεων και μετακινήσεων θεωρείται ότι ικανοποιούνται σημειακά (ισχυρή μορφή). Λαμβάνοντας υπόψη τις εκάστοτε παραδοχές για τις βασικές μεταβλητές του ελαστικού πεδίου, καθώς και για τις αντίστοιχες δοκιμαστικές συναρτήσεις (trial functions) ανάλογα με τον τύπο του πεπερασμένου στοιχείου που θα αναπτυχθεί, και εκτελώντας τις ολοκληρώσεις, καταλήγουμε στην ακόλουθη συνήθη διακριτοποιημένη αλγεβρική μορφή του προβλήματος:

$$\delta w^T (Ku - f) = 0$$

$$v = \tilde{v} \text{ , στο } \Gamma_u \quad (5)$$

όπου K είναι το μητρώο δυσκαμψίας και u, f τα διανύσματα μετακινήσεων και εξωτερικών φορτίσεων αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί πως για να παραχθούν συμμετρικά αλγεβρικά συστήματα, θα πρέπει να υιοθετηθούν οι κοινές παραδοχές για τις μεταβλητές του προβλήματος και τις αντίστοιχες δοκιμαστικές συναρτήσεις.

Ασθενής διατύπωση του προβλήματος ευαισθησίας

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας περιοριζόμαστε στη παρουσίαση της ευαισθησίας ως προς μια μηχανική παράμετρο, καθώς θεωρούμε πως η επέκταση σε προβλήματα με παραπάνω από μια παράμετρο είναι άμεση. Θεωρούμε συνεπώς πως κάθε χαρακτηριστικό δομικό στοιχείο του ελαστικού συστήματος P έχει μια τιμή αναφοράς P^0 που μπορεί να μεταβάλλεται σε σχέση με μια συγκεκριμένη παράμετρο h , δηλαδή :

$$P_j = P_j^0 \times h \quad (6)$$

Έστω λοιπόν h η παράμετρος ως προς την οποία θέλουμε να μελετήσουμε την ευαισθησία του προβλήματος. Παραγωγίζοντας την ‘ασθενή’ έκφραση του προβλήματος ως προς την θεωρούμενη παράμετρο h και λαμβάνοντας υπ’ όψη πως οι δοκιμαστικές συναρτήσεις δεν εξαρτώνται από αυτή, εξάγουμε την ασθενή διατύπωση του προβλήματος ευαισθησίας:

$$\int_{\Omega} s_{,h}^i \cdot \frac{\partial w}{\partial x_i} d\Omega - \int_{\Omega} f_{,h} \cdot w d\Omega - \int_{\Gamma_t} t_{,h} \cdot w d\Omega = 0 \quad (7)$$

Εισάγοντας στην εξίσωση (7), όπως και παραπάνω, τις αντίστοιχες παραδοχές για τις βασικές μεταβλητές και τις δοκιμαστικές συναρτήσεις καταλήγουμε στη διακριτοποιημένη αλγεβρική έκφραση του προβλήματος ευαισθησίας ως προς τη παράμετρο h :

$$\delta w^T (K u_{,h} + K_{,h} u - f_{,h}) = 0 \rightarrow u_{,h} = K^{-1} (-K_{,h} u + f_{,h}) \quad (8)$$

Από την παραπάνω σχέση προσδιορίζονται οι συντελεστές ευαισθησίας $u_{,h}$ του διανύσματος απόκρισης u . Η συνολική μεταβολή του διανύσματος απόκρισης u , ή διαφορετικά η εκτίμηση του διανύσματος u για δεδομένη μεταβολή της παραμέτρου h ίση με δh δίνεται από την ακόλουθη σχέση (προσέγγιση πρώτης τάξης):

$$du = u_{ekt} - u = u_{,h} \times dh \quad (9)$$

Η αντίστοιχη μεταβολή για τις εσωτερικές δυνάμεις του μηχανικού συστήματος δίνεται ως εξής:

$$df_{int} = (K_{,h} \times u + K \times u_{,h}) \times dh \quad (10)$$

Διατύπωση του προβλήματος ευαισθησίας για τη περίπτωση του ιδιοπροβλήματος

Το τυπικό ιδιοπρόβλημα ενός διακριτοποιημένου μηχανικού συστήματος (κατασκευής) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$K\phi_i - w_i^2 M\phi_i = 0 \quad (11)$$

όπου K και M τα συνήθη συμμετρικά μητρώα δυσκαμψίας και μάζας, w_i η i -ιοστή ιδιοσυχνότητα του συστήματος και ϕ_i το αντίστοιχο ιδιοδιάνυσμα (ή ιδιομορφή). Παραγωγίζοντας την εξίσωση (11) ως προς μια παράμετρο ευαισθησίας h , πολλαπλασιάζοντας (από αριστερά) με το ιδιοδιάνυσμα ϕ_i και λαμβάνοντας υπ' όψη τις σχέση ορθογωνικότητας των ιδιοδιανυσμάτων ως προς τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας, καταλήγουμε στη παρακάτω σχέση που δίνει την ευαισθησία της i -ιοστής ιδιοσυχνότητας:

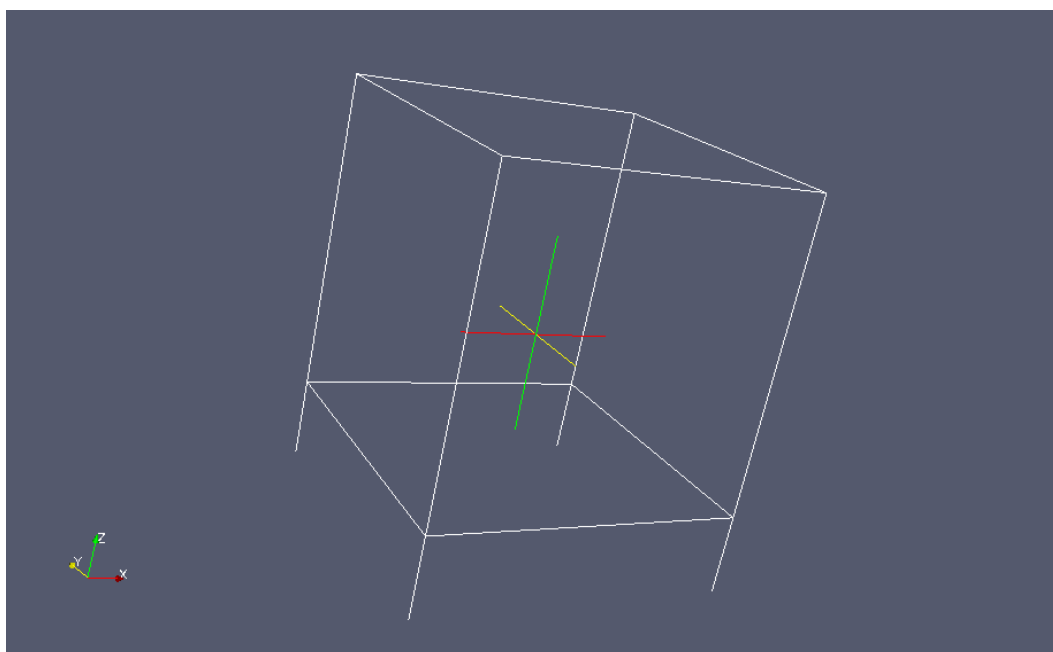
$$w_{i,h} = \frac{\phi_i^T K_{,h} \phi_i - w_i^2 \phi_i^T M_{,h} \phi_i}{2w_i \phi_i^T M \phi_i} \quad (12)$$

Η αντίστοιχη μεταβολή στην i -ιοστή ιδιοσυχνότητα του συστήματος και ως επακόλουθο η εκτίμηση αυτής για δεδομένη μεταβολή της παραμέτρου h ίση με δh δίνεται από τη σχέση:

$$dw_i = w_{i,ekt} - w_i = w_{i,h} \times dh \quad (13)$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΙΔΙΟΤΙΜΩΝ

Ως παράδειγμα εφαρμογής της ανάλυσης ευαισθησίας του προβλήματος ιδιοτιμών παρουσιάζουμε εδώ ένα απλό μονώροφο κτήριο από οπλισμένο σκυρόδεμα (βλ. Σχ. 2) και παρατηρούμε την ευαισθησία της πρώτης ιδιοσυχνότητας του ως προς μεταβολές των χαρακτηριστικών παραμέτρων, όπως αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, για ένα από τα υποστυλώματα του. Με το τρόπο αυτό μπορούμε να εντοπίσουμε τη σημαντικότητα των εκάστοτε παραμέτρων στις ιδιοτιμές ενός κατασκευαστικού συστήματος. Όπως φαίνεται από τη σύνοψη των αποτελεσμάτων που δίδονται στον Πίνακα 1, το μέγεθος των αδιάστατων συντελεστών ευαισθησίας απεικονίζουν κατά πόσο η συγκεκριμένη μηχανική παράμετρος επηρεάζει ή όχι τη δυναμική συμπεριφορά του κτηρίου.



Σχήμα 2 Μονώροφο κτήριο: επιρροή των ελαστικών παραμέτρων στα δυναμικά του χαρακτηριστικά.

Πίνακας 1 Μεταβλητές ευαισθησίας

A/A	Συμβολισμός	Περιγραφή Παραμέτρου	Αδιάστατοι Συντελεστές Ευαισθησίας της Πρώτης Ιδιοσυχνότητας του Κτηρίου
1	E	Μέτρο ελαστικότητας	4.0308 E-005
2	A	Εμβαδόν διατομής	-7.74550 E-006
3	J	Στρεπτική ροπή αδράνειας διατομής	4.4657 E-012
4	I_{yy}	Ροπή αδράνειας ως προς τον y-άξονα του στοιχείου	1.6033 E-008
5	I_{zz}	Ροπή αδράνειας ως προς τον z-άξονα του στοιχείου	1.6042 E-004
6	K_{fs}	Σταθερά ελατηρίου	0.0000 E+000
7	ρ	Πυκνότητα μάζας	-7.9329 E-006

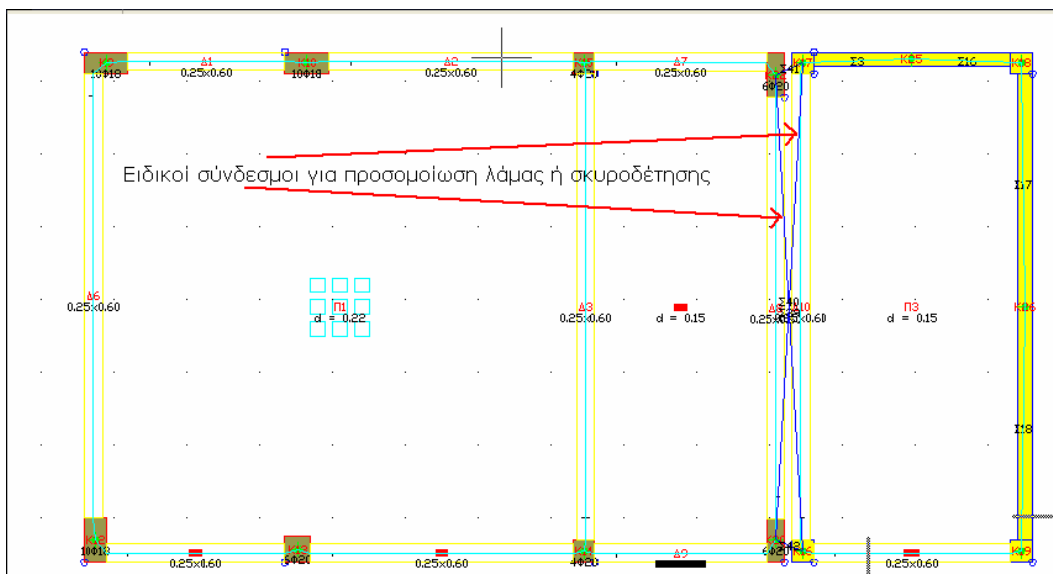
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΕΠΙ ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΝΕΠΑΡΚΕΙΑΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής της δομικής στατικής ευαισθησίας των δεικτών ανεπάρκειας ορόφων ενός τετραώροφου κτηρίου. Το υπό εξέταση κτήριο κατασκευάστηκε σε δύο φάσεις. Η προσθήκη προβλεπόταν στατικά ανεξάρτητη, τελικά όμως έγινε σύνδεση στον όροφο παλιού και νέου κτίσματος. Στο ισόγειο εμφανίστηκε ρωγμή μεταξύ παλιάς και νέας πλάκας (Σχήμα 3). Για την επισκευή του κτηρίου, θεωρήθηκε κατάλληλη λύση η είτε η χρήση μεταλλικής λάμας που θα συνέδεε τις δύο πλάκες, είτε τμηματική καθαίρεση και εκ νέου σκυροδέτηση. Συνεπώς, εφαρμόστηκε η μέθοδος της ανάλυσης ευαισθησίας για τον έλεγχο των πιθανών λύσεων

Υπολογισμός των δεικτών ανεπάρκειας και των ευαισθησιών τους

Ως δείκτης ανεπάρκειας ενός κατακόρυφου δομικού στοιχείου ορίζεται ο λόγος της αντοχής σχεδιασμού προς την απαιτούμενη αντοχή. Επιπροσθέτως, ορίζεται ο δείκτης ανεπάρκειας ορόφου που ουσιαστικά είναι ο σταθμισμένος μέσος όρος των δεικτών ανεπάρκειας των επιμέρους κατακόρυφων στοιχείων που απαρτίζουν τον συγκεκριμένο όροφο. Η στάθμιση αυτή για κάθε επιμέρους στοιχείο γίνεται με βάρος το ποσοστό της τέμνουσας που αναπτύσσεται και αναλογεί στην κάθε σεισμική διεύθυνση.

Για τον υπολογισμό της ευαισθησίας του δείκτη ανεπάρκειας δομικών στοιχείων χρησιμοποιείται στο παραγόμενο λογισμικό Η/Υ η *MPA* και συγκεκριμένα η μέθοδος κεντρικής διαφοράς. Τέλος, για την ευαισθησία του δείκτη ανεπάρκειας ορόφου γίνεται ο υπολογισμός μέσω των δεικτών ανεπάρκειας των επιμέρους στοιχείων που τον απαρτίζουν χρησιμοποιώντας τον κανόνα παραγωγίσης για σύνθετη συνάρτηση (chain rule of differentiation).



Σχήμα 3 Κάτοψη στην οποία παρουσιάστηκε η ρωγμή

Η μεταλλική λάμα προσομοιώθηκε με ειδικούς συνδέσμους, οι οποίοι ενώνουν τα παλιά και τα νέα υποστρώματα. Ως εφαρμογή επιλέχθηκε να διερευνηθεί η επιρροή του εμβαδού-μέτρου ελαστικότητας των ειδικών συνδέσμων στους δείκτες ανεπάρκειας του κάθε ορόφου. Στους δύο παρακάτω πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Σημειώνεται ότι τα μεγέθη είναι αδιάστατα.

Πίνακας 2 Ευαισθησία δεικτών ανεπάρκειας για σεισμικό συνδυασμό στη διεύθυνση y

Στάθμη	Δείκτης ανεπάρκειας λ_v	Ευαισθησία δείκτη ανεπάρκειας λ_v
2	0.16	0.0743
3	0.32	0.2209
4	0.56	1.6291
5	0.96	0.032

Πίνακας 3 Ευαισθησία δεικτών ανεπάρκειας για σεισμικό συνδυασμό στη διεύθυνση x

Στάθμη	Δείκτης ανεπάρκειας λ_x	Ευαισθησία δείκτη ανεπάρκειας λ_x
2	0.22	0.0898
3	0.26	0.3151
4	0.04	-0.2103
5	0.07	-0.0371

Από τους δύο παραπάνω πίνακες, μπορεί να παρατηρήσει κανείς πως υπάρχει πολύ μικρή βελτίωση της επάρκειας σε σεισμό στη διεύθυνση x και έντονα δυσμενή αποτελέσματα σε σεισμό στη διεύθυνση y. Με άλλα λόγια, η χρήση μεταλλικής λάμας αυξάνει ουσιαστικά τις ανεπάρκειες των ορόφων. Τονίζουμε εδώ πώς η αξία της ανάλυσης ευαισθησίας έγκειται στο ότι παρέχει την απαιτούμενη πληροφορία για τη σωστή διερεύνηση πολύπλοκων συστημάτων με μη προβλέψιμη μηχανική συμπεριφορά.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κλείνοντας, πρέπει να αναφερθεί η σπουδαιότητα μιας ανάλυσης ευαισθησίας, που αντικαθιστά εκτεταμένες και χρονοβόρες παραμετρικές σπουδές και παρέχει την απαιτούμενη πληροφορία για την σωστή διερεύνηση πολύπλοκων συστημάτων με μη-προβλέψιμη μηχανική συμπεριφορά και τον εντοπισμό των πιο σημαντικών μεταβλητών που την επηρεάζουν. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνονται υπ' όψη συμβατικές πλαισιακές κατασκευές που παρουσιάζουν διαφραγματική λειτουργία με (ή δίχως) τοιχεία. Επίσης, το περιβάλλον έδαφος διακριτοποιείται μέσω ελατηρίων, ούτως ώστε οι συνδετήριες δοκοί της θεμελίωσης να θεωρούνται ως δοκοί τύπου Winkler. Αρχικά μελετάται η στατικού τύπου ευαισθησία, και υπολογίζονται αδιάστατοι συντελεστές στους βαθμούς ελευθερίας του προσομοιώματος της κατασκευής για μετακινήσεις, ροπές και τέμνουσες. Οι βασικές ιδιότητες των δομικών στοιχείων που παρουσιάζουν μεταβλητότητα (και οδηγούν στον υπολογισμό κατασκευαστικών ευαισθησιών) είναι οι διαστάσεις της διατομής, οι ελαστικές σταθερές και οι ελατηριακές σταθερές του εδάφους. Σε δεύτερη φάση που αφορά στις δυναμικές φορτίσεις, η ανάλυση ευαισθησίας γίνεται για το ιδιομορφικό πρόβλημα, δηλαδή υπολογίζονται αδιάστατοι συντελεστές για τις ιδιοσυχνότητες (ή τις θεμελιώδεις περιόδους) και τις ιδιομορφές της κατασκευής. Αυτό επιτρέπει τη χρήση φασματικής ανάλυσης για υφιστάμενα (ή και διατηρητέα) κτήρια, προκειμένου να επισκευασθούν (ή να αναπαλαιωθούν) με γνώμονα την ικανοποίηση των σχετικών κανονιστικών διατάξεων. Τέλος, οι εφαρμογές δείχνουν πως είναι δυνατή η συστηματική διερεύνηση ακόμη και της ανεπάρκειας των διαφόρων υποσυστημάτων ενίσχυσης παλαιών κατασκευών με γνώμονα την αναπαλαίωση τους.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς επιθυμούν να ευχαριστήσουν την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ), Αθήνα, για την οικονομική ενίσχυση της παρούσης ερευνητικής προσπάθειας μέσω του προγράμματος ΠΑΒΕΤ 2005 του Γ' ΚΠΣ, Υπόεργο 05ΠΑΒ327 προς την εταιρεία 4M-VK, με τίτλο «Ανάπτυξη Λογισμικού Η/Υ για Ανάλυση Κατασκευών υπό Επισκευή και Αναπαλαίωση».

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- EAK (2000), *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός*, ΟΑΣΠ, Αθήνα.
- EKOΣ (2000), *Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος*, ΟΑΣΠ, Αθήνα.
- KANEPΕ (2004), *Κανονισμός Επεμβάσεων, Προσχέδιο 1*, ΟΑΣΠ, Αθήνα.
- Haukaas T. and Kiureghian A.D. (2004). *Finite Element Reliability and Sensitivity Methods for Performance-Based Earthquake Engineering*, PEER Report 2003/14, Berkeley, California, 2004.
- Kleiber M., Antunez H., Hien T.D., and Kowalczyk P. (1997). *Parameter Sensitivity in Nonlinear Mechanics-Theory and Finite Element Computations*, John Wiley & Sons, New York.
- Liu, W.K., Belytschko, T. and Mani, A. (1986). "Random field finite elements", *International Journal Numerical Methods Engineering*, Vol. 23, pp. 1831-1845.
- Manolis, G.D., Juhn, G., Constantinou, M.C. and Reinhorn, A.M. (1990). *Secondary Systems in Base-isolated Structures: Experimental Investigation, Stochastic Response and Stochastic Sensitivity*, Technical Report NCEER-90-0013, State University of New York, Buffalo, New York, 1990.
- Manolis G.D. and Koliopoulos P.K. (2001). *Stochastic Structural Dynamics in Earthquake Engineering*, WIT Press, Southampton.
- Vanmarke, E., Shinozuka, M., Nakagiri, S., Schueller, G.I. and Grigoriu, M. (1986). "Random fields and stochastic finite elements", *Structural Safety*, Vol. 3, pp. 143-166.
- Wempner, G. and Talaslidis, D. (2003). *Mechanics of Solids and Shells: Theories and Approximations*, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Μανώλης Γ.Δ., Παναγιωτόπουλος Χ.Γ., Παρασκευόπουλος Η.Α., Καραουλάνης Φ.Ε., Βαδαλούκας Γ.Ν., Παπαχρηστίδης Α.Γ., Ανάλυση ευαισθησίας για αποκατάσταση υφιστάμενων κτηρίων με γνώμονα την αντισεισμική τους συμπεριφορά, 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανής και Τεχνικής Σεισμολογίας, Αθήνα, 2008