

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Α. Π. Θ.**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

**Ο ΣΕΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ ΤΗΣ 7-9-99:
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΠΛΕΙΟΣΕΙΣΤΗ
ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ
ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΒΛΑΒΩΝ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΤΟ
ΣΕΙΣΜΟ**



ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Σχετιζόμενα ερευνητικά αντικείμενα Ενδιαφέροντος Ο.Α.Σ.Π. :
Σεισμική Αποτίμηση Κατασκευών
Αντισεισμικός Σχεδιασμός Κατασκευών
Υποστήριξη και Τεκμηρίωση του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού
Εδαφοτεχνικά θέματα

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2004

ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΟΥ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ: ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με το παράρτημα της σύμβασης του ερευνητικού έργου:

Ο ΣΕΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ ΤΗΣ 7-9-99 : ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΠΛΕΙΟΣΕΙΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΒΛΑΒΩΝ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ

που ανατέθηκε από τον Οργανισμό Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ) στο Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ) και στο εργαστήριο του Οπλισμένου Σκυροδέματος του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, το αντικείμενο του ερευνητικού προγράμματος ήταν:

Η επιστημονικά εμπειριστατωμένη αποτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης (seismic risk) σε Δήμους της πλειόσειστης περιοχής του σεισμού της Αθήνας, σύμφωνα με σενάρια τα οποία θα βασίζονται αφενός στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας (seismic Hazard) της κατά περίπτωση εξεταζόμενης περιοχής, και αφετέρου στον προσδιορισμό της τρωτότητας των κατασκευών που δομούνται σε αυτή .

Η εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας είναι μια βασική συνιστώσα για την εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης και συνεπώς αναγκαία για την κατάστροψη σχεδίων μείωσης αυτής. Ωστόσο, είναι σημαντικό τα αποτελέσματα σεισμικής επικινδυνότητας για μια θέση να είναι αξιόπιστα και να βασίζονται σε καλά τεκμηριωμένες μεθόδους, αξιοποιώντας όλες τις διαθέσιμες σεισμοτεκτονικές πληροφορίες καθώς και στοιχεία απόσβεσης της σεισμικής κίνησης στην ευρύτερη περιοχή. Συνήθως, δύο κατηγορίες μεθόδων εφαρμόζονται κατά την ανάλυση της σεισμικής επικινδυνότητας: (α) οι πιθανολογικές μέθοδοι και (β) οι προσδιορισμικές-στοχαστικές μέθοδοι. Κάθε μια από τις μεθόδους αυτές εμπεριέχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Σημειώνεται ότι όλοι οι υπάρχοντες αντισεισμικοί κανονισμοί βασίζονται κυρίως σε πιθανολογικές μεθόδους, ενώ οι ειδικές μελέτες ανάλυσης σεισμικής επικινδυνότητας συχνά βασίζονται και σε προσδιορισμικές μεθόδους.

Στα πλαίσια του ερευνητικού αυτού προγράμματος και επειδή το ρήγμα του σεισμού της 7-9-99 είναι συγκεκριμένο ακολουθήθηκε η προσδιορισμική (Empirical Green's function) και η στοχαστική μέθοδος.

Για την εκτίμηση της τρωτότητας, που αποτελεί τη δεύτερη βασική συνιστώσα της σεισμικής διακινδύνευσης, η μεθοδολογία που έχει διεθνώς επικρατήσει είναι εκείνη

των μητρώων πιθανότητας βλάβης (damage probability matrices) ή των καμπυλών τρωτότητας (vulnerability curves, fragility curves). Οι δύο προσεγγίσεις είναι ουσιαστικά οι ίδιες, αν γίνει δεκτό ότι η κλίμακα της μακροσεισμικής έντασης είναι γραμμική, κάτι που δεν ισχύει μεν, αλλά έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα (για λόγους απλότητας), ακόμη και σε πρόσφατα διεθνή προγράμματα. Η διαδικασία αυτή, με κατάλληλες προσαρμογές και βελτιώσεις (που περιγράφονται παρακάτω) εφαρμόστηκε και στο δομικό απόθεμα της πλειόσειστης περιοχής του σεισμού της 7-9-99.

Σημειώνεται ότι εκτός των ερευνητών που αναφερόταν στην αρχική σύμβαση και λόγω της έκτασης του αντικειμένου, η ερευνητική ομάδα διευρύνθηκε με την συμμετοχή των κάτωθι ερευνητών: α) από το ΙΤΣΑΚ του κ. Σούς Ισάμ, Δόκιμου Ερευνητή, Δν/σης Αντισεισμικών Κατασκευών, β) από το εργαστήριο Ο.Σ. του Α.Π.Θ. του κ. Γρ. Πενέλη, διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού και υποψηφίου Διδάκτορα ΑΠΘ, γ) του κ. Γ. Παναγόπουλου διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού και υποψηφίου Διδάκτορα ΑΠΘ και δ) του κ. Χρ. Παναγιωτόπουλου, διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού και υποψηφίου Διδάκτορα ΑΠΘ.

Επί μέρους στόχοι του προγράμματος

Επιλογή / βελτίωση, τεκμηρίωση / εφαρμογή διαφόρων μεθόδων (στοχαστικών και αιτιοκρατικών) για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας στο πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας καθώς και ρεαλιστικό σεισμικό σενάριο, επιλογή σεισμικού σχεδιασμού και αντιπροσωπευτικά επιταχυνσιογραφήματα (πραγματικά και συνθετικά) της αναμενόμενης ισχυρής δόνησης από το σεισμό του ρήγματος της Πάρνηθας.

Ανάπτυξη μοντέλου για συσχέτιση των αναλυτικά υπολογισμένων δεικτών δομικής βλάβης με την οικονομική απώλεια και έλεγχος αξιοπιστίας του με τη βοήθεια υπαρχόντων στατιστικών δεδομένων του Ελληνικού χώρου

Βελτιστοποίηση και προσαρμογή για το συγκεκριμένο προς εξέταση πρόβλημα μιας υβριδικής μεθοδολογίας αποτίμησης τρωτότητας κατασκευών, η οποία εμπεριέχει στοιχεία τόσο θεωρητικών, όσο και εμπειρικών μεθόδων.

Επικαιροποιημένα Μητρώα Πιθανότητας Βλάβης (ΜΠΒ) για τους διάφορους τύπους κτιρίων που απαντώνται συνήθως στον Ελλαδικό χώρο.

Ανάπτυξη πιλοτικής μεθοδολογίας αποτίμησης του σεισμικού κινδύνου για την μητροπολιτική περιοχή της Αθήνας, η οποία εύκολα μπορεί να προσαρμοσθεί και εφαρμοσθεί και σε άλλες οικιστικές περιοχές του Ελλαδικού χώρου.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΣΤΟ ΠΑΡΟΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Καθορισμός σεισμικής επικινδυνότητας-ανάλυση της σεισμικής απόκρισης επιφανειακών εδαφικών σχηματισμών

Στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού έργου για την εκτίμηση της τρωτότητας στην πλειόσειστη περιοχή του σεισμού της Πάρνηθας της 7/9/1999 στη ΒΔ Αττική ακολουθήθηκε η παρακάτω μεθοδολογία:

1. Συλλογή και επεξεργασία επιταχυνσιογραφημάτων τόσο του μετασεισμικού δικτύου του ΙΤΣΑΚ στην πλειόσειστη περιοχή του σεισμού της 7/9/1999 στην ΒΔ Αττική, όσο και του μόνιμου δικτύου στην ευρύτερη περιοχή των Αθηνών.
2. Με βάση τη στρωματογραφία και τις δυναμικές ιδιότητες της εδαφικής στήλης στις θέσεις των επιταχυνσιογράφων (πάχη γεωλογικών σχηματισμών, ταχύτητες επιμήκων και εγκάρσιων κυμάτων, πυκνότητες, παράγοντα απόσβεσης Q_p , Q_s) υπολογίσθηκαν “θεωρητικές” συναρτήσεις μεταφοράς. Υπολογίσθηκαν επίσης εμπειρικές συναρτήσεις μεταφοράς με την τεχνική του φασματικού λόγου της οριζόντιας προς κατακόρυφη συνιστώσα (receiver function estimates) στις θέσεις των επιταχυνσιογράφων του μετασεισμικού δικτύου του ΙΤΣΑΚ (Δήμοι πλειόσειστης περιοχής). Από τη σύγκριση των παραπάνω συναρτήσεων μεταφοράς προέκυψαν αξιόπιστα μονοδιάστατα μοντέλα εδαφικών προσομοιωμάτων. Επίσης με βάση τα γεωλογικά-γεωφυσικά και γεωτεχνικά στοιχεία έγινε εκτίμηση της ισχυρής κίνησης στο υπόβαθρο των εξεταζόμενων θέσεων. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με σκοπό την ποσοτική εκτίμηση και τη διαφοροποίηση της σεισμικής απόκρισης των εδαφικών αποθέσεων στην ευρύτερη περιοχή για τις σεισμικές διεγέρσεις που προτάθηκαν στα πλαίσια της μελέτης καθορισμού της ισχυρής σεισμικής κίνησης στην υπόψη περιοχή. Παρουσιάζονται επιπλέον και αξιολογούνται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα των αναλύσεων σεισμικής απόκρισης στην πλειόσειστη περιοχή της Αθήνας (περιοχές Δήμου Α.Λιοσίων, Μενιδίου και Μεταμόρφωσης) μετά τον καταστρεπτικό σεισμό της 7-9-1999
3. Με βάση τα επιταχυνσιογραφήματα των μετασεισμών και την τεχνική του φασματικού λόγου της οριζόντιας προς κατακόρυφη συνιστώσα έγινε διερεύνηση για ενδεχόμενη μη-γραμμική συμπεριφορά του υπεδάφους στις θέσεις των επιταχυνσιογράφων και εκτίμηση της ενδεχόμενης μεταβολής της δυσστησίας των επιφανειακών εδαφικών στρώσεων.
4. Με βάση τις καταγραφές των επιταχυνσιογράφων του κυρίου σεισμού τόσο στην Αττική όσο και στην ευρύτερη περιοχή και με βάση σχέσεις απόσβεσης των φασματικών τιμών για τον Ελληνικό χώρο, έγινε αναγωγή των φασμάτων απόκρισης στο κοντινό πεδίο (πλειόσειστη περιοχή). Η αβεβαιότητα που εισάγουν οι παραπάνω σχέσεις απόσβεσης δίνεται ποσοτικά με την \pm μια τυπική απόκλιση και ως εκ τούτου μπορεί να αξιολογηθεί ποσοτικά και να ληφθεί στα τελικά συμπεράσματα
5. Με βάση τις ιδιότητες της σεισμικής πηγής του σεισμού της 7/9/1999 στη ΒΔ Αττική (επιφάνεια ρήγματος, μηχανισμός γένεσης κτλ.), έγινε προσομοίωση της ισχυρής σεισμικής κίνησης στις θέσεις των επιταχυνσιογράφων του ΙΤΣΑΚ (Δήμοι πλειόσειστης περιοχής) με προσδιορισμική (empirical Green’s function technique) ή/και με στοχαστική μέθοδο (ω -square model, extended source). Με βάση τα προαναφερόμενα στα 2 και 3, εκτίμηση της ισχυρής κίνησης στο υπόβαθρο των εξεταζόμενων θέσεων.

Ανάπτυξη προσομοιώματος αποτίμησης της τρωτότητας κατασκευών και εφαρμογή στη πλειόσειστη περιοχή των Αθηνών

Στην τελική φάση αναπτύχθηκε προσομοίωμα αποτίμησης της τρωτότητας κατασκευών και εφαρμογή στη πλειόσειστη περιοχή των Αθηνών. Για την αποτίμηση της τρωτότητας κατασκευών ακολουθήθηκε μία υβριδική μεθοδολογία, η οποία συνδυάζει στοιχεία τόσο από εμπειρικές (στατιστικές), όσο και από θεωρητικές (αναλυτικές) μεθόδους. Η μεθοδολογία που έχει διεθνώς επικρατήσει για τις μελέτες τρωτότητας και σεισμικής διακινδύνευσης είναι εκείνη των μητρώων πιθανότητας βλάβης (damage probability matrices) ή των καμπυλών τρωτότητας (vulnerability curves, fragility curves). Οι δύο προσεγγίσεις είναι ουσιαστικά οι ίδιες, αν γίνει δεκτό ότι η κλίμακα της μακροσεισμικής έντασης είναι γραμμική, κάτι που δεν ισχύει μεν, αλλά έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα (για λόγους απλότητας), ακόμη και σε πρόσφατα διεθνή προγράμματα (π.χ. RADIUS). Στην παρούσα έκθεση, γίνεται επίσης αναλυτική περιγραφή της μεθοδολογίας της τρωτότητας καθώς και του τρόπου βελτίωσης των μητρώων πιθανότητας βλάβης.

Τέλος πραγματοποιήθηκε σύγκριση αποτελεσμάτων προτεινομένου μοντέλου τρωτότητας με τις πραγματικές τιμές απωλειών του σεισμού της Πάρνηθας. Συγκεκριμένα έγινε ο 'πραγματικός' υπολογισμός του συνολικού κόστους αποκατάστασης των βλαφθέντων κτιρίων χρησιμοποιώντας τις μέσες τιμές αποκατάστασης ανά τετραγωνικό μέτρο, όπως προέκυψαν από τους φακέλους δανειοδότησης για περιπτώσεις βλαφθέντων κτιρίων στους Δήμους Άνω Λιοσίων και Αχαρνών. Για την εκτίμηση του αντίστοιχου κόστους, με βάση τα αναλυτικά μοντέλα αποτίμησης τρωτότητας, (οικονομικούς δείκτες βλάβης) διαχωρίστηκε το δείγμα των κτιρίων σε κατηγορίες αντίστοιχες με αυτές για τις οποίες έγιναν οι αναλύσεις. Η αναλυτική πρόβλεψη του κόστους απωλειών στην περιοχή των Άνω Λιοσίων έδωσε αποτελέσματα που βρίσκονται σε σχετική συμφωνία με το εκτιμηθέν πραγματικό κόστος, με την έννοια ότι το «πραγματικό» κόστος βρίσκεται πάντοτε μεταξύ της ανώτερης και της κατώτερης αναλυτικής πρόβλεψης.

Βαθμός Εκπλήρωσης στόχων του προγράμματος

Τέλος, ο βαθμός ανταπόκρισης του εκπονηθέντος ερευνητικού έργου σε σχέση με το αναλυτικό αντικείμενο, τη μεθοδολογία και τα προσδοκώμενα αποτελέσματα, που περιλαμβάνονται στο παράρτημα της σύμβασης με τον ΟΑΣΠ, κρίνεται από την ερευνητική ομάδα ως ιδιαίτερα ικανοποιητικός. Πρέπει επίσης να τονισθεί και να συνεκτιμηθεί ότι οι στόχοι του προγράμματος ήταν πολύ φιλόδοξοι και υπήρχαν εγγενείς δυσκολίες για την συγκέντρωση του υλικού και την απογραφή του δομικού πλούτου των δήμων. Παρόλα αυτά η ερευνητική ομάδα ολοκλήρωσε όλες τις φάσεις του προγράμματος με επιτυχία και προέκυψαν βελτιωμένα ΜΠΒ τα οποία θα είναι χρήσιμα και για την εθνική προσπάθεια της πολιτικής για την ενίσχυση των υφισταμένων κατασκευών. Τέλος όσον αφορά **το ερωτηματολόγιο της επιτροπής επίβλεψης** που στάλθηκε μετά την πρώτη έκθεση προόδου που υποβλήθηκε στον ΟΑΣΠ προς την ερευνητική ομάδα αυτό έχει ληφθεί **αναλυτικά** υπόψη και στα αντίστοιχα κεφάλαια **έχουν διατυπωθεί οι αντίστοιχες παρατηρήσεις** (κυρίως για τις φάσεις 2 έως 4).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Κατά την διάρκεια του παρόντος ερευνητικού προγράμματος αναπτύχθηκε μία πιλοτική μεθοδολογία αποτίμησης του σεισμικού κινδύνου (ή, ορθότερα της σεισμικής διακινδύνευσης) για την μητροπολιτική περιοχή της Αθήνας, η οποία εύκολα μπορεί να προσαρμοσθεί και εφαρμοσθεί και σε άλλες οικιστικές περιοχές του Ελλαδικού χώρου. Ο σεισμός της Πάρνηθας έδωσε την δυνατότητα να γίνει σύγκριση του πραγματικού κόστους αποκατάστασης για επιλεγμένα οικοδομικά τετράγωνα του Δήμου Άνω Λιοσίων από τον σεισμό της 7/9/1999 με το εκτιμώμενο αναλυτικό κόστος από το προτεινόμενο μοντέλο της τρωτότητας. Το παρόν ερευνητικό πρόγραμμα στο μέτρο του εφικτού και μέσα στα πλαίσια των μεγάλων αβεβαιοτήτων του προβλήματος μπορεί να απαντήσει στο κρίσιμο ερώτημα:

Ποιο θα είναι το κόστος ενός τέτοιου σεισμού, αλλά και ποιο το κόστος ενός μεγαλύτερου (με μικρότερη πιθανότητα εμφάνισης) ή μικρότερου (αλλά με μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης);

Η παρούσα μελέτη τρωτότητας και σεισμικής διακινδύνευσης προσέγγισε το κρίσιμο αυτό ερώτημα με την πιο δόκιμη διεθνώς μεθοδολογία, εκείνη των μητρώων πιθανότητας βλάβης. Στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού προγράμματος έγινε και βελτίωση των υπάρχοντων μέχρι σήμερα μητρώων πιθανότητας βλάβης για κτίρια από Ο/Σ και λιθοδομή.

Όπως αναφέρεται διεξοδικότερα στο κεφάλαιο 4, έγινε εκτίμηση των σεισμικών κινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους για κάθε μια από τις 14 συνολικά θέσεις για τις οποίες είχε προσδιορισθεί το εδαφικό προφίλ, ήτοι στα Άνω Λιόσια (10 κινήσεις, για 9 θέσεις, σε μία εκ των οποίων εξετάστηκαν δύο υποπεριπτώσεις), το Μενίδι (2) και τη Μεταμόρφωση (2) θεωρώντας ως διέγερση στο οιονεί βραχώδες υπόβαθρο:

- τη σεισμική διέγερση που εκτιμήθηκε με βάση τη μέθοδο PSM (σημειακό ρήγμα)
- τη σεισμική διέγερση που εκτιμήθηκε με βάση τη μέθοδο FSM (ρήγμα πεπερασμένου μήκους)
- τρεις πραγματικές καταγραφές από το σεισμό του 1999, στις θέσεις ΚΕΔΕ (ΚΕΔΕ-D), Σύνταγμα (SGMA) και Σεπόλια (SPLA)

Στην τελική φάση του προγράμματος, μετά και από σχετική παρατήρηση των κριτών, η σεισμική διέγερση στο οιονεί βραχώδες υπόβαθρο εκτιμήθηκε και με βάση τη μέθοδο FSM-DM (βλ. και §4.3).

Από τις ανωτέρω σειρές επιταχυνσιογραφημάτων, χρησιμοποιήθηκαν στις ανελαστικές δυναμικές αναλύσεις καταρχήν εκείνες που προέκυψαν από τη σεισμική διέγερση βάσει των μεθόδων PSM και FSM και εκείνες που προέκυψαν βάσει των τριών πραγματικών καταγραφών (οι οποίες είχαν προκύψει από διαδικασία αποσυνέλιξης για τον προσδιορισμό του κραδασμού σε συνθήκες εμφάνισης βραχώδους υποβάθρου).

Στην τελική φάση του προγράμματος χρησιμοποιήθηκε και η σειρά επιταχυνσιο-γραφημάτων που προέκυψε από τη σεισμική διέγερση βάσει της μεθόδου FSM-DM, τα αποτελέσματα της οποίας αξιολογήθηκαν σε σχέση με τις σεισμικές διεγέρσεις των προηγούμενων μεθοδολογιών.

Η πλήρης σειρά ανελαστικών δυναμικών αναλύσεων έγιναν για τις θέσεις που αφορούσαν την περιοχή των Άνω Λιοσίων. Ο λόγος για την επιλογή αυτή είναι ότι αφενός τα αποτελέσματα για τις 2 θέσεις στο Μενίδι και τη Μεταμόρφωση αναμένονται παρόμοια (κάτι τέτοιο έδειξαν και κάποιες επιλεκτικές αναλύσεις που έγιναν με τα σχετικά επιταχυνσιογραφήματα) και αφετέρου (και κυριότερο) ότι δεν υπήρχαν διαθέσιμα επαρκή επιτόπου στοιχεία για τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με τις πραγματικές απώλειες του σεισμού του '99.

Από τη σύγκριση των τιμών των συνολικών ποσών, για κάθε περίπτωση σεισμικής διέγερσης, προκύπτει ότι το πλησιέστερο στο 'πραγματικό' κόστος αποκατάστασης (11.033.577,8 €) είναι το αναλυτικά εκτιμηθέν συνολικό κόστος που προκύπτει με την θεώρηση της συνθετικής σεισμικής διέγερσης τύπου PSM, και το οποίο ανέρχεται στο ποσό των 15.505.431,0€. Η τιμή αυτή παρουσιάζει απόκλιση από την 'πραγματική' τιμή αποκατάστασης κατά 29,9%, η οποία κρίνεται ικανοποιητική για μελέτες σεισμικής διακινδύνευσης.

Αναφορικά με την αναλυτική μελέτη του κόστους απωλειών (βάσει της οποίας καλύπτονται όλες οι εντάσεις πλην αυτών για τις οποίες υπάρχουν λεπτομερή στατιστικά στοιχεία), οι τυπικοί φορείς που αναλύθηκαν είναι οι ίδιοι με αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν και για την εκτίμηση της τρωτότητας της πλειόσειστης περιοχής των Άνω Λιοσίων και παρουσιάζονται αναλυτικά στην ενότητα §5.2.1. Υπενθυμίζεται εδώ ότι περιλαμβάνουν χαμηλά (2ώροφο), μέσου ύψους (4ώροφο) και υψηλά (9ώροφο) κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος, με πλαισιακό ή μικτό σύστημα και σχεδιασμένα με τους παλιούς (ΒΔ 1959) ή τους σύγχρονους κανονισμούς. Επιπλέον έγινε διάκριση σε φορείς χωρίς τοιχοπληρώσεις, κανονικά τοιχοπληρωμένους ή με μη κανονική τοιχοπλήρωση (ύπαρξη pilotis). Συνολικά δηλαδή αναλύθηκαν 36 διαφορετικοί φορείς Ο/Σ.

Δεδομένου ότι η αναλυτική πρόβλεψη του κόστους απωλειών στην περιοχή των Άνω Λιοσίων έδωσε αποτελέσματα που βρίσκονται σε σχετική συμφωνία με το εκτιμηθέν πραγματικό κόστος, με την έννοια ότι το «πραγματικό» κόστος βρισκόταν πάντοτε μεταξύ της ανώτερης και της κατώτερης αναλυτικής πρόβλεψης (όπως αναλυτικότερα περιγράφεται στην ενότητα 5.3), κρίθηκε σκόπιμο να κρατηθούν για τις αναλύσεις βάσει των οποίων προέκυψαν τα τελικώς προτεινόμενα ΜΠΒ τα μοντέλα συσχέτισης δομικού και οικονομικού δείκτη βλάβης των σχημάτων 5.15 και 5.16. Ωστόσο, δεδομένου ότι η παραδοχή σχετικά με την αστοχία του κτιρίου ως συνόλου βρέθηκε ότι επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης, έγινε προσπάθεια βελτίωσης («εκλέπτυνσης») των κριτηρίων αστοχίας κτιρίου (σε αντιδιαστολή με την αστοχία δομικού στοιχείου), λαμβάνοντας υπόψη αφενός τα αποτελέσματα πρόσφατων μελετών όπου τεκμηριώνονται στατιστικά (με βάση πειραματικά αποτελέσματα) οι τιμές των σχετικών βελών ορόφου στη φάση της αστοχίας και αφετέρου την πραγματική εικόνα των βλαβών στην πλειόσειστη περιοχή (βλ. και §5.3). Τα τελικά κριτήρια που υιοθετήθηκαν είναι διαφορετικά για αμιγώς πλαισιακά κτίρια και για κτίρια με τοιχώματα, ήτοι:

- Στα *αμιγώς πλαισιακά* κτίρια Ο/Σ, με ή χωρίς τοιχοπληρώσεις, η αστοχία κτιρίου, θεωρείται ότι επέρχεται *είτε* όταν 50% ή περισσότερα των κατακόρυφων στοιχείων (υποστυλωμάτων) ενός ορόφου αστοχούν, δηλ. η απαίτηση πλαστικής στροφής (εκτιμώμενη από την ανελαστική ανάλυση) υπερβαίνει τη διαθέσιμη τιμή της στα άκρα του στοιχείου (υπολογιζόμενη από το DRAIN-2000), *είτε* το σχετικό βέλος ορόφου ξεπερνά το 4% σε οποιονδήποτε όροφο.
- Στα κτίρια *με τοιχώματα* Ο/Σ (διπλά συστήματα) η αστοχία κτιρίου, θεωρείται ότι επέρχεται *είτε* όταν 50% ή περισσότερα των υποστυλωμάτων ενός ορόφου αστοχούν, *είτε* όταν τα τοιχώματα (τα οποία αναλαμβάνουν και το μεγαλύτερο μέρος της σεισμικής τέμνουσας βάσης) αστοχούν, *είτε* το σχετικό βέλος ορόφου ξεπερνά το 2% σε οποιονδήποτε όροφο (το σχετικό βέλος αστοχίας τοιχωμάτων είναι σημαντικά χαμηλότερο από εκείνο των πλαισίων).

Τα ανωτέρω λεπτομερή κριτήρια αστοχίας θεωρούνται από την ερευνητική ομάδα ως η βέλτιστη εφικτή λύση (για τις ανάγκες της παρούσας ανάλυσης), επισημαίνεται, ωστόσο, ότι οι φάσεις κοντά στην αστοχία φορέων είναι πολύ δύσκολο να προσομοιωθούν και όλες οι διαθέσιμες μέθοδοι (διεθνώς) έχουν τους περιορισμούς τους. Στην παρούσα ανάλυση (και στη συντριπτική πλειοψηφία αντίστοιχων αναλύσεων άλλων ερευνητών) η συμπεριφορά μετά την αστοχία των κατακόρυφων στοιχείων δεν προσομοιώνεται άμεσα, σε αντιδιαστολή με εκείνη των οριζοντίων (βλ. Dymiotis et al. 1999), συνεπώς το κριτήριο της αστοχίας 50% των κατακόρυφων στοιχείων είναι απλώς μια λογική παραδοχή που προσπαθεί να συμβιβάσει τη συνήθη (συντηρητική) παραδοχή ότι αστοχία κατακόρυφου στοιχείου σημαίνει και αστοχία του κτιρίου με την πραγματικότητα που διαπιστώνεται μετά από κάθε πραγματικό σεισμό ότι κτίρια (ακόμη και παλαιά ή/και ανεπαρκώς σχεδιασμένα) δεν καταρρέουν παρότι αρκετά από τα υποστυλώματά τους έχουν σαφώς αστοχήσει.

Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω παραδοχών, η στάθμη της σεισμικής δράσης για την οποία η ανάλυση προβλέπει αστοχία κτιρίου είναι εν γένει ρεαλιστική, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις (αφορούν κυρίως διπλά συστήματα σχεδιασμένα με τους σύγχρονους κανονισμούς) η στάθμη της σεισμικής δράσης αστοχίας προκύπτει μη-ρεαλιστικά υψηλή, δείγμα του ότι απαιτείται περαιτέρω εκλέπτυνση των κριτηρίων (ή, ενδεχομένως και «έμπειρη κρίση» μηχανικού) για τις περιπτώσεις αυτές.

Τα αποτελέσματα του παρόντος ερευνητικού προγράμματος αναμένεται να συνεισφέρουν καθοριστικά στον ορθολογικό σχεδιασμό της αντισεισμικής πολιτικής κυρίως σε πυκνοκατοικημένα αστικά κέντρα όπως είναι η Αθήνα αλλά και στη δυνατότητα επιλεκτικής ενίσχυσης δομημάτων καθότι θα προκύπτουν κατά τρόπο επιστημονικά τεκμηριωμένο και σαφή οι περιοχές αυξημένης σεισμικής διακινδύνευσης σε ένα πολεοδομικό συγκρότημα (και όχι αποκλειστικά αυξημένης σεισμικής επικινδυνότητας η οποία αποτελεί μόνο τη μια από τις δύο συνιστώσες της εκτίμησης της διακινδύνευσης).