

Μελέτη σεισμικής τρωτότητας γεφυρών από σκυρόδεμα. Εφαρμογή στο πολεοδομικό συγκρότημα Θεσσαλονίκης

Σ. Α. Αργυρούδης
Πολιτικός Μηχανικός, Α.Π.Θ.

Κ. Δ. Πιτιλάκης
Καθηγητής, Τμήμα Πολ. Μηχανικών, Α.Π.Θ.

Α. Ι. Κάππος
Καθηγητής, Τμήμα Πολ. Μηχανικών, Α.Π.Θ.

Α. Γ. Σέξτος
Λέκτορας, Τμήμα Πολ. Μηχανικών, Α.Π.Θ.

Λέξεις κλειδιά: Γέφυρες Ο/Σ, σεισμική τρωτότητα, επικινδυνότητα, διακινδύνευση

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία αρχικά γίνεται σύντομη ανασκόπηση των μεθόδων εκτίμησης της σεισμικής τρωτότητας γεφυρών από σκυρόδεμα που έχουν προταθεί διεθνώς, με επίκεντρο τις μεθόδους προσεισμικού ελέγχου που χρησιμοποιούν δείκτες τρωτότητας, οι οποίες βασίζονται στη βαθμολόγηση των κύριων χαρακτηριστικών που επηρεάζουν την συμπεριφορά μιας γέφυρας. Στη συνέχεια γίνεται μια κριτική αξιολόγησή τους μέσω της εκτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης επιλεγμένων γεφυρών της ευρύτερης περιοχής Θεσσαλονίκης με εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίνει η καθεμιά, αναδεικνύεται η συμβολή των επιμέρους δεικτών σε κάθε μέθοδο, ενώ εξετάζεται και η πολυπλοκότητά τους, καθώς και η εφαρμοσιμότητά τους στον ελληνικό χώρο.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι γέφυρες αποτελούν βασικές συνιστώσες του οδικού δικτύου, ιδιαίτερα όσες βρίσκονται σε οδικούς άξονες με υψηλούς κυκλοφοριακούς φόρτους ή χαρακτηρίζονται ως στρατηγικής σημασίας. Οι βλάβες από σεισμούς που παρατηρήθηκαν παγκοσμίως σε οδικές γέφυρες από σκυρόδεμα και η συνακόλουθη επίδρασή τους στις δράσεις άμεσης ανάγκης, αλλά και στις ευρύτερες οικονομικές και κοινωνικές δραστηριότητες των πληγεισών περιοχών, κατέδειξαν ότι αποτελούν την πλέον ευαίσθητη συνιστώσα του οδικού δικτύου από άποψη σεισμικής τρωτότητας.

Μέχρι πρόσφατα η αποτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης τόσο του οδικού δικτύου όσο και των υπολοίπων δικτύων κοινής ωφέλειας δεν αποτελούσε πρώτη προτεραιότητα για την διαχείριση του σεισμικού κινδύνου σε αστικές περιοχές. Οι κύριοι λόγοι ήταν η πολυπλοκότητα των δικτύων, η μεγάλη τους έκταση, η ποικιλία συνιστωσών, η έλλειψη στοιχείων από πραγματικές σεισμικές βλάβες, οι αβεβαιότητες στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας και τρωτότητας, καθώς και η απουσία κατάλληλων εργαλείων και μεθόδων για την πραγματοποίηση μελετών σεισμικής διακινδύνευσης. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί, διεθνώς, μέθοδοι αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης δικτύων κοινής ωφέλειας που στοχεύουν στην κατά το δυνατό πιο ρεαλιστική εκτίμηση των πιθανών βλαβών για δεδομένο σεισμικό σενάριο.

Οι μέθοδοι εκτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης των γεφυρών διακρίνονται σε αυτές που επικεντρώνονται στην αποτίμηση των δομικών βλαβών και συνοψίζονται παρακάτω και σε αυτές που λαμβάνουν υπόψη, εκτός από τις φυσικές βλάβες και τις επιπτώσεις στο οδικό δίκτυο, συνήθως σε όρους στάθμης εξυπηρευτικότητας ή οικονομικών απωλειών για συγκεκριμένα

σεισμικά σενάρια (Werner et al., 2000, Chang and Nojima 2001, Cho et al., 2001). Ο σκοπός σε κάθε περίπτωση είναι να καταστεί εφικτός ο ορθολογικός προσεισμικός έλεγχος των υφιστάμενων γεφυρών και να καθοριστεί ο βαθμός προτεραιότητας των γεφυρών για περαιτέρω ελέγχους, ώστε τελικά να διαμορφωθεί η κατάλληλη στρατηγική τόσο προσεισμικής ενίσχυσής τους, όσο και αποκατάστασης των ζημιών μετά τον σεισμό. Υπό αυτή την έννοια, είναι φανερό πως ο βαθμός εφαρμογής των προσεγγίσεων που στοχεύουν στην αποτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης είναι γενικότερα συνυφασμένος με το επίπεδο της οικονομικής και τεχνολογικής ανάπτυξης της κοινωνίας στην οποία αναπτύσσονται και εφαρμόζονται.

Η εμπειρία από προηγούμενους καταστρεπτικούς σεισμούς στον ελληνικό χώρο είναι ενθαρρυντική, υπό την έννοια ότι οι γέφυρες δεν παρουσίασαν σημαντικές βλάβες. Ωστόσο, είναι απαραίτητη η ενδεδειγμένη και συστηματική μελέτη της σεισμικής τους διακινδύνευσης, αφού ο σεισμικός κίνδυνος είναι δεδομένος, ενώ πληθώρα γεφυρών δεν καλύπτουν τις σύγχρονες απαιτήσεις, καθώς μόλις την τελευταία δεκαετία έχει αναβαθμιστεί ουσιαστικά ο αντισεισμικός κανονισμός σχεδιασμού γεφυρών. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια έχουν κατασκευαστεί αρκετές μεγάλου μήκους γέφυρες χωρίς να έχουν εκτεθεί σε σημαντικές σεισμικές δράσεις μέχρι τώρα, καθιστώντας απαραίτητη την εφαρμογή μεθόδων αποτίμησης της σεισμικής τους διακινδύνευσης.

2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΓΕΦΥΡΩΝ

Η αποτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης συνίσταται στην ποσοτικοποίηση του αναμενόμενου βαθμού δομικής βλάβης (σεισμική τρωτότητα) ως συνάρτηση της στάθμης της σεισμικής έντασης (σεισμική επικινδυνότητα). Η μελέτη της τρωτότητας μπορεί να γίνει με μεθόδους οι οποίες σε γενικές γραμμές διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες (Αργυρούδης και συνεργάτες, 2006):

(1) Εμπειρικές μέθοδοι βασισμένες σε στατιστική επεξεργασία πραγματικών στοιχείων

Στην προσέγγιση αυτή χρησιμοποιούνται στοιχεία βλαβών που παρατηρήθηκαν σε προηγούμενους σεισμούς, κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ιαπωνία, προκειμένου να εκτιμηθούν καμπύλες τρωτότητας ύστερα από στατιστική επεξεργασία (Basöz and Kiremidjian, 1998, Yamazaki et al, 2000, Shinozuka et al., 2003). Οι καμπύλες τρωτότητας περιγράφουν την πιθανότητα, για δεδομένη σεισμική ένταση, η βλάβη της κατασκευής να είναι ίση ή μεγαλύτερη από μια συγκεκριμένη τιμή και εκφράζονται από συναρτήσεις σωρευτικής κατανομής. Συνήθως αναφέρονται σε διαφορετικές κατηγορίες γεφυρών, οι οποίες καθορίζονται με βάση την τυπολογία τους, καθώς γίνεται η παραδοχή πως κατασκευές με παρόμοια χαρακτηριστικά θα παρουσιάσουν παρόμοια συμπεριφορά για την ίδια σεισμική δράση.

(2) Μέθοδοι βασισμένες στην κρίση του μηχανικού (expert judgment)

Πρόκειται για έναν εναλλακτικό τρόπο προεκτίμησης της σεισμικής συμπεριφοράς γεφυρών διαφορετικής τυπολογίας, όπου αντί των (ελλειπόντων) στατιστικών στοιχείων, χρησιμοποιείται η εμπειρία. Βασίζεται στην στατιστική επεξεργασία της (ποσοτικοποιημένης) «κρίσης» εμπειρών μηχανικών για τη συμπεριφορά της κατασκευής, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μητρώων πιθανότητας βλάβης και τελικά τον προσδιορισμό καμπυλών τρωτότητας για κάθε κατηγορία γεφυρών. Σε αυτήν τη κατηγορία ανήκουν οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν στις ΗΠΑ από το Applied Technology Council (ATC, 1985 και ATC, 1991) και πιο πρόσφατα από το Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center (Porter, 2004).

(3) Αναλυτικές μέθοδοι

Η σεισμική συμπεριφορά γεφυρών από σκυρόδεμα και επομένως η σεισμική τους τρωτότητα είναι δυνατό να εκτιμηθεί με τη βοήθεια αναλυτικών προσομοιωμάτων, από τα οποία, μέσω κατάλληλης συσχέτισης των υπολογιζόμενων μεγεθών απόκρισης με το βαθμό βλάβης, μπορούν να προκύψουν καμπύλες τρωτότητας. Η διαδικασία ανάλυσης περιλαμβάνει τα εξής βασικά στάδια: α) καθορισμός της εισαγόμενης σεισμικής κίνησης, β) προσομοίωση της γέφυρας, γ)

καθορισμός του δείκτη και των σταθμών βλάβης, δ) εκτίμηση των αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται στην εκτίμηση της εισαγόμενης σεισμικής κίνησης και της αντοχής της κατασκευής, καθώς και στον καθορισμό του δείκτη και των σταθμών βλάβης, ε) υπολογισμός των καμπυλών τρωτότητας με βάση τα αποτελέσματα της σεισμικής απόκρισης της γέφυρας. Η τελευταία μπορεί να προκύψει μέσω ανελαστικών δυναμικών αναλύσεων (π.χ. Shinozuka et al., 2003, Karim and Yamazaki, 2001), δυναμικών φασματικών αναλύσεων (π.χ. Hwang et al., 2000) ή στατικών ανελαστικών αναλύσεων (π.χ. Shinozuka et al., 2003, Shinozuka et al., 2000, Mander and Basöz, 1999).

(4) Μέθοδοι βασισμένες σε εμπειρικούς δείκτες τρωτότητας

Στοχεύουν σε μια προκαταρκτική ιεραρχική κατάταξη των γεφυρών η οποία πραγματοποιείται βαθμολογώντας μέσω ενός ερωτηματολογίου τα κύρια χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη σεισμική συμπεριφορά μιας γέφυρας και υπολογίζοντας με αυτόν τον τρόπο έναν συνολικό δείκτη δομικής τρωτότητας. Αντίστοιχα, υπολογίζονται δείκτες που σχετίζονται με τη σεισμικότητα και το έδαφος και σε αρκετές περιπτώσεις με την σπουδαιότητα της γέφυρας, εξάγοντας έτσι έναν συνολικό δείκτη διακινδύνευσης της κατασκευής. Η κατάταξη των γεφυρών γίνεται μέσω μια συνάρτησης, προσθέτοντας ή πολλαπλασιάζοντας τις βαθμολογίες που έχουν δοθεί σε κάθε κατηγορία παραμέτρων, ενώ συχνά χρησιμοποιούνται συντελεστές βαρύτητας ώστε να συνυπολογιστεί η σημασία της κάθε παραμέτρου. Ο προσδιορισμός των επιμέρους βαθμολογιών έχει προκύψει είτε με την στατιστική επεξεργασία στοιχείων από βλάβες σε προηγούμενους σεισμούς είτε με βάση την ποσοτικοποιημένη «κρίση» έμπειρων μηχανικών. Διάφορες τέτοιες μεθοδολογίες έχουν αναπτυχθεί διεθνώς: ATC-6-2, (ATC, 1983), Kawashima & Unjoh (1990), Kim (1993), Pezeshk et al. (1993), Buckle & Friedland, (1995), Basoz and Kiremidjian (1995), και στην Ελλάδα από τον ΟΑΣΠ (ΟΑΣΠ, 2002).

Οι παραπάνω μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν τόσο σε μεμονωμένες γέφυρες όσο και σε ένα απόθεμα γεφυρών, χωρίς συνήθως να απαιτούνται πολλά και λεπτομερή στοιχεία, οπότε είναι δυνατή η γρήγορη προκαταρκτική αποτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης και ο καθορισμός του βαθμού προτεραιότητας για περαιτέρω έλεγχο. Οι μέθοδοι που βασίζονται σε καμπύλες τρωτότητας παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι συσχετίζουν άμεσα τη στάθμη σεισμικής διέγερσης με τη στάθμη των αναμενόμενων βλαβών με πιθανοτικό τρόπο. Ωστόσο, η αξιοπιστία τους εξαρτάται από την επάρκεια των στατιστικών στοιχείων, την πληρότητα και αξιοπιστία των αναλυτικών προσομοιωμάτων, αλλά και τον επαρκή καθορισμό των κατηγοριών τρωτότητας με βάση τα τυπολογικά χαρακτηριστικά (π.χ. αριθμός ανοιγμάτων, τύπος σύνδεσης βάθρων-ανωδομής, έτος κατασκευής). Οι μέθοδοι των δεικτών τρωτότητας είναι λεπτομερέστερες των εμπειρικών-στατιστικών μεθόδων, αν και σε κάποιες περιπτώσεις απαιτούνται πολλά στοιχεία, ενώ από την εφαρμογή τους δεν προκύπτει σαφής εικόνα της στάθμης των αναμενόμενων βλαβών.

Παρακάτω συνοψίζονται οι βασικές αρχές έξι μεθόδων αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης που βασίζονται σε εμπειρικούς δείκτες, με τρόπο κατά το δυνατό ενιαίο και με προσπάθεια διαχωρισμού των επιμέρους δεικτών σε δείκτες τρωτότητας και σεισμικής επικινδυνότητας, καθώς και σε δείκτες που επηρεάζουν την διακινδύνευση (σε πολλές μεθόδους υπάρχει σχετική σύγχυση). Οι μέθοδοι αυτές εφαρμόζονται στη συνέχεια σε ένα δείγμα γεφυρών της περιοχής Θεσσαλονίκης, ώστε να καταστεί δυνατή η συγκριτική αξιολόγησή τους.

3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ ΓΕΦΥΡΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ

(1) Μέθοδος της Federal Highway Administration, FHWA

Η Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αυτοκινητοδρόμων των ΗΠΑ αναθεωρώντας προηγούμενες οδηγίες του ATC-6-2 (ATC, 1983) για τη σεισμική ενίσχυση οδικών γεφυρών, εξέδωσε ένα εγχειρίδιο (Buckle & Friedland, 1995), όπου προτείνεται μέθοδος για τον προσδιορισμό ενός

δείκτη προτεραιότητας για σεισμική ενίσχυση. Η αποτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης (R) βασίζεται στην εκτίμηση της δομικής τρωτότητας (V) και της σεισμικής επικινδυνότητας (E), οι οποίες βαθμολογούνται από 0 έως 10, ενώ ο δείκτης σεισμικής διακινδύνευσης ($R=V \cdot E$) μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 100. Ο δείκτης δομικής τρωτότητας συντίθεται από τον δείκτη τρωτότητας εφεδράνων, συνδέσεων και εδράσεων, και τον δείκτη τρωτότητας μεσοβάθρων, ακροβάθρων και ρευστοποίησης εδάφους. Σύμφωνα με το προτεινόμενο σύστημα βαθμολόγησης οι δείκτες αυτοί παίρνουν τιμές από 0 έως 10 με βάση τη σεισμική κατηγορία της γέφυρας, τα γεωμετρικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της, την κατηγορία του εδάφους και την σεισμική επικινδυνότητα της αντίστοιχης θέσης. Ο δείκτης σεισμικής επικινδυνότητας εξαρτάται από την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση σε συνθήκες βράχου και την κατηγορία του εδάφους. Τελικά, ο δείκτης προτεραιότητας είναι συνάρτηση του δείκτη σεισμικής διακινδύνευσης (R) και της σπουδαιότητας της γέφυρας. Για τον προσδιορισμό της τελευταίας δίνονται γενικές οδηγίες, χωρίς ωστόσο να προτείνεται συγκεκριμένος τρόπος υπολογισμού του αντίστοιχου δείκτη.

(2) *Μέθοδος του Washington State Department of Transportation (WSDOT)*

Οι Babei & Hawkins (1991) προτείνουν ένα απλό μοντέλο για τον προσδιορισμό ενός δείκτη προτεραιότητας (I) για τη σεισμική ενίσχυση των γεφυρών στην πολιτεία της Washington, ως γινόμενο του δείκτη 'κρισιμότητας' (C) και του δείκτη σεισμικής διακινδύνευσης (V).

Ο δείκτης C εξαρτάται από την σπουδαιότητα των επί της, και υπό την, γέφυρα διερχόμενων οδών, των μεταφερόμενων δικτύων και της γέφυρας ως δομήματος. Ο δείκτης V (που λανθασμένα αναφέρεται ως δείκτης τρωτότητας) εξαρτάται από την σεισμική επικινδυνότητα και τη δομική τρωτότητα. Πιο συγκεκριμένα είναι $V=9.85 \{[(a) \cdot (K)] \cdot [SV]\}^{0.41}$, όπου:

a, συντελεστής που αντιπροσωπεύει την σεισμικότητα στη θέση της γέφυρας και είναι ίσος με την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση με πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 χρόνια.

K, συντελεστής προσαρμογής του a στην διάρκεια ζωής της γέφυρας, ώστε να προσδιοριστεί η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση με πιθανότητα υπέρβασης 10% εντός της εναπομένουσας διάρκειας ζωής της γέφυρας.

SV, συντελεστής που εκφράζει την δομική τρωτότητα της γέφυρας και υπολογίζεται σύμφωνα με τις οδηγίες του ATC-6-2 (ATC, 1983).

(3) *Μέθοδος των Pezeshk et al.*

Η συγκεκριμένη απλοποιημένη μέθοδος βαθμολόγησης αναπτύχθηκε για την προκαταρκτική εξέταση της σεισμικής τρωτότητας των γεφυρών στις επαρχίες Memphis και Shelby της πολιτείας Tennessee των ΗΠΑ (Pezeshk et al., 1993). Τα κριτήρια για την αποτίμηση της τρωτότητας και το σύστημα βαθμολόγησης προτάθηκαν από μια επιτροπή αποτελούμενη από μηχανικούς, επαγγελματίες και ακαδημαϊκούς, ύστερα από την αξιολόγηση αντίστοιχων υφιστάμενων μεθόδων (Caltrans, WSDOT, IDOT, ATC/FWHA). Εξετάζονται ξεχωριστά η κατασκευή, η θεμελίωση και η σπουδαιότητα με βάση εννιά, τρία και δύο κριτήρια, αντίστοιχα, ενώ προκύπτει μια τελική βαθμολογία ως άθροισμα των επιμέρους βαθμολογιών ανά κριτήριο. Η σεισμική επικινδυνότητα θεωρείται ενιαία για την περιοχή μελέτης, οπότε δεν ορίζεται αντίστοιχος δείκτης. Τελικά, οι γέφυρες που συγκεντρώνουν χαμηλότερη βαθμολογία θεωρούνται ως πιο τρωτές έναντι σεισμού.

4) *Μέθοδος των Kawashima & Unjoh*

Οι Kawashima & Unjoh (1990) συνδυάζοντας την έμπειρη κρίση με την στατιστική επεξεργασία στοιχείων για γέφυρες που υπέστησαν ή όχι βλάβες σε σεισμούς της Ιαπωνίας, ανέπτυξαν μια μέθοδο εκτίμησης της σεισμικής τρωτότητας που συνίσταται στην κατάταξη των γεφυρών σε τρεις κατηγορίες τρωτότητας (χαμηλής, μέσης, και υψηλής) εφαρμόζοντας ένα σύστημα βαθμολόγησης των παραμέτρων που επηρεάζουν την σεισμική συμπεριφορά των γεφυρών. Εξετάζονται ξεχωριστά οι παράμετροι που επηρεάζουν την ανάπτυξη υψηλής μετακίνησης μεταξύ ανωδομής και στηρίξεων και την αστοχία λόγω ανεπαρκούς αντοχής των βάρων. Συνολικά βαθμολογούνται 22 παράμετροι, ενώ τελικά με βάση τα αποτελέσματα για τα δύο αυτά κριτήρια γίνεται η κατάταξη σε μία από τις τρεις κατηγορίες τρωτότητας. Με βάση την

αξιολόγηση της σχετικής βαρύτητας των επιμέρους παραγόντων στην αποτίμηση του συνολικού βαθμού τρωτότητας παρατηρείται ότι οι πλέον σημαντικές παράμετροι είναι η ύπαρξη μηχανισμών παρεμπόδισης πτώσης της ανωδομής (stoppers, restrainers, επαρκές πλάτος έδρασης), οι τοπικές εδαφικές συνθήκες και η στάθμη του αντισεισμικού σχεδιασμού (που εκφράζεται μέσω του έτους κατασκευής). Η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση εξαιρείται από το σύστημα βαθμονόμησης καθώς σκοπός της μεθόδου είναι να εκτιμηθεί η σεισμική τρωτότητα γεφυρών για δεδομένη (ενιαία) σεισμική ένταση.

(5) *Μέθοδος του Kim*

Ο Kim (1993) αναπτύσσοντας αρχικά μια κατά το δυνατό ομογενοποιημένη βάση δεδομένων για 109 γέφυρες που υπέστησαν βλάβες σε 13 σεισμούς μεταξύ του 1964 και 1991 ανά τον κόσμο, προσδιόρισε και ταξινομήσε τους παράγοντες που επηρεάζουν την σεισμική τους συμπεριφορά. Στη συνέχεια αναλύοντας στατιστικά τις παρατηρήσεις, πρότεινε δύο μοντέλα εκτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης τα οποία βασίζονται στην βαθμολόγηση 12 συνολικά παραμέτρων, λαμβάνοντας υπόψη στην τελική αποτίμηση την σχετική βαρύτητα της καθεμίας. Έτσι προκύπτει ένας δείκτης σεισμικής διακινδύνευσης (y_i) ο οποίος αντιστοιχεί σε μία κατηγορία βαθμού διακινδύνευσης και σε μία στάθμη αναμενόμενης βλάβης. Οι παράμετροι που υπεισέρχονται στην προτεινόμενη μέθοδο είναι: Η σεισμική ένταση, η στάθμη του αντισεισμικού σχεδιασμού, ο τύπος της ανωδομής, η λοξότητα/ καμπυλότητα της ανωδομής, η ύπαρξη ενδιάμεσων αρθρώσεων, ο τύπος των βάθρων, ο τύπος της θεμελίωσης, το υλικό, η ανισοϋψία των βάθρων, οι τοπικές εδαφικές συνθήκες, η επιρροή της ρευστοποίησης, και το μήκος έδρασης. Ο καθορισμός της σχετικής βαρύτητας της κάθε παραμέτρου στην αποτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης, σύμφωνα με την συγκεκριμένη μέθοδο, δείχνει πως οι πιο σημαντικοί παράγοντες είναι: η σεισμική ένταση (31,4%), η επιρροή της ρευστοποίησης (20,5%), το επίπεδο σχεδιασμού (10,4%) και το πλάτος έδρασης (8,7%). Στην συγκεκριμένη μέθοδο, όπως και στην αμέσως προηγούμενη, δεν λαμβάνεται υπόψη η σπουδαιότητα της γέφυρας, οπότε η τελική βαθμολογία δεν δίνει απευθείας το δείκτη προτεραιότητας για περαιτέρω έλεγχο της σεισμικής επάρκειας και πιθανή λήψη μέτρων προσεισμικής ενίσχυσης, όπως συμβαίνει στις άλλες μεθόδους.

(6) *Μέθοδος του ΟΑΣΠ*

Η προτεινόμενη μεθοδολογία (ΟΑΣΠ, 2002) συνίσταται σε έναν προκαταρκτικό έλεγχο που στοχεύει στον υπολογισμό του δείκτη σεισμικής διακινδύνευσης γεφυρών από Ο/Σ, με βάση τον οποίο μπορεί μια γέφυρα να αξιολογηθεί καταπόσον πρέπει να παραπεμφθεί σε πιο λεπτομερή έλεγχο της τρωτότητάς της. Σύμφωνα με τις αρχές τις μεθόδου, οι γέφυρες κατατάσσονται σε τέσσερις σεισμικές κατηγορίες ανάλογα με τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας και τη σπουδαιότητα της γέφυρας, ακολουθώντας ουσιαστικά την διαδικασία που προτείνεται από την FHWA (Buckle & Friedland, 1995).

Ο συνολικός δείκτης σεισμικής διακινδύνευσης (T) (που λανθασμένα αναφέρεται ως δείκτης τρωτότητας), εκφράζεται ως $T = (0.4 \cdot \Delta + 0.6 \cdot \Sigma) \cdot E \leq 100$, όπου:

Δ , ο δείκτης δομικής τρωτότητας, $\Delta = 0.35 \cdot \Delta_1 + 0.25 \cdot \Delta_2 + 0.25 \cdot X + 0.15 \cdot \Gamma$

Δ_1 , ο δείκτης τρωτότητας εφεδράνων, συνδέσεων και εδράσεων,

Δ_2 , ο δείκτης τρωτότητας μεσοβάθρων, ακροβάθρων, και ρευστοποίησης εδάφους

X, ο δείκτης χρονολογίας μελέτης

Γ , ο δείκτης γενικής κατάστασης της γέφυρας

Οι παραπάνω δείκτες παίρνουν, τιμές από 0 έως 10 με βάση τη σεισμική κατηγορία της γέφυρας, τα γεωμετρικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της, καθώς και του εδάφους και της σεισμικής επικινδυνότητας της αντίστοιχης θέσης ακολουθώντας την μεθοδολογία της FHWA, προσαρμοσμένη κατά περίπτωση στα ελληνικά δεδομένα.

Σ , ο δείκτης σπουδαιότητας,

Ο δείκτης αυτός αξιολογεί την κοινωνική, οικονομική και στρατηγική σημασία της γέφυρας.

E, ο δείκτης σεισμικής επικινδυνότητας, $E = 11.6 \cdot a \cdot S \leq 10$, όπου:

α, η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, ανάλογα με τη ζώνη του ΝΕΑΚ,
S, συντελεστής που εξαρτάται από την κατηγορία του εδάφους.

Στην μεθοδολογία του ΟΑΣΠ, η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) εκτός από το στάδιο εκτίμησης του δείκτη σεισμικής επικινδυνότητας, ενυπάρχει και στον υπολογισμό της δομικής τρωτότητας, καθώς τα προτεινόμενα κριτήρια έχουν εξαχθεί ύστερα από την στατιστική επεξεργασία βλαβών που παρατηρήθηκαν σε γέφυρες με παρόμοια τυπολογία αλλά σε θέσεις διαφορετικής στάθμης σεισμικής διέγερσης. Το αποτέλεσμα της διττής αυτής συμμετοχής της PGA είναι να μην υπάρχει σαφής διαχωρισμός δομικής τρωτότητας και σεισμικής επικινδυνότητας.

4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΔΕΙΓΜΑ ΓΕΦΥΡΩΝ ΤΟΥ Π.Σ. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Προκειμένου να αξιολογηθούν οι μέθοδοι που βασίζονται σε δείκτες τρωτότητας και να συγκριθούν τα αποτελέσματα που δίνει η καθεμιά, εφαρμόζονται εδώ σε 10 οδικές γέφυρες από σκυρόδεμα, κατά το δυνατό αντιπροσωπευτικές, της Μητροπολιτικής Περιοχής Θεσσαλονίκης. Οι συγκεκριμένες γέφυρες αποτελούν ένα δείγμα από την βάση δεδομένων που αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια από το Εργαστήριο Εδαφομηχανικής, Θεμελιώσεων και Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής του ΑΠΘ και περιλαμβάνει την πλειοψηφία των γεφυρών της Μητροπολιτικής Περιοχής Θεσσαλονίκης (περί τις 85). Τα στοιχεία συλλέχθηκαν από υπηρεσίες (ΔΕΚΕ, ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ, ΟΣΕ), μελετητικά γραφεία, καθώς και από επιτόπου αυτοψίες, βάσει ενός καταλόγου απογραφής που περιλαμβάνει γενικά στοιχεία (π.χ. θέση, έτος μελέτης), γεωμετρικά (π.χ. αριθμός ανοιγμάτων, μήκος, λοξότητα), τεχνικά (π.χ. τύπος ανωδομής, στηρίξεων, εφεδράνων, μεσοβάθρων, ακροβάθρων, θεμελίωσης, αριθμός ενδιάμεσων αρθρώσεων) και γεωτεχνικά (κατηγορία εδάφους). Η βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε ενσωματώθηκε σε περιβάλλον GIS (ΕΓΣΑ'87), στο οποίο συμπεριλήφθηκε και το οδικό δίκτυο της περιοχής.

Στους πίνακες 1 και 2 δίνονται ορισμένα χαρακτηριστικά για τις γέφυρες που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Σημειώνεται ότι στις περιπτώσεις που κάποια από τις απαιτούμενες παραμέτρους δεν είναι γνωστή με ακρίβεια, εκτιμήθηκε κατάλληλα ώστε να γίνει δυνατή η εφαρμογή (π.χ. το μήκος παράκαμψης ή η μέση ημερήσια κυκλοφορία). Υπολογίζεται ξεχωριστά ο δείκτης δομικής τρωτότητας (ΔΤ), ο δείκτης σεισμικής διακινδύνευσης (ΣΔ), με την συμμετοχή του δείκτη σεισμικής επικινδυνότητας και ο δείκτης προτεραιότητας (ΔΠ) με την συμμετοχή του δείκτη σπουδαιότητας, όπου αυτός λαμβάνεται υπόψη (βλ. Πίνακα 3). Επειδή σε κάποιες περιπτώσεις η σεισμική επικινδυνότητα δεν αποτελεί διακριτό δείκτη, αλλά υπεισέρχεται ως επιμέρους δείκτης στον προσδιορισμό της δομικής τρωτότητας (εκφράζοντας την ένταση της διέγερσης συνήθως σε όρους μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης), γίνεται απαλοιφή της κατά τον υπολογισμό, ώστε να προκύψει η δομική τρωτότητα ανεξάρτητα της σεισμικής έντασης.

Πίνακας 1. Περιγραφή γεφυρών που εξετάστηκαν – γενικά στοιχεία

α/α	Θέση γέφυρας	Έτος κατασκ.	Αρ. ανοιγμ.	Μήκος (m)	Έδαφος
1	Τ.Ε Περιφ. τάφρου στην Εσωτ. Περιφ.	1985	1	22,0	B
2	Α/Δ στον κόμβο Κ8 της Εσωτ. Περιφ.	2005	1	33,5	A
3	Γέφυρα Λαγκαδικίων (Ε.Ο. Θεσ/νίκης- Καβάλας)	1984	3	93,0	B2
4	Α/Δ οδού προς Αγ. Παύλο (Ε.Ο. Θεσ/νίκης-Μουδανιών)	2000	3	69,7	B1
5	Α/Κ οδού Λαγκαδά στον κόμβο Κ18 της Εσωτ. Περιφ.	1985	10	418,0	B
6	Α/Κ κλάδου 3 στον κόμβο Κ1 της Εξωτ. Περιφ.	2003	5	150,0	Γ3
7	Γέφυρα Α1-Α2, Δ. είσοδος Θεσ/νίκης (δίδυμη)	2000	4	135,0	Γ3
8	Α/Κ οδού Ρυσίου-Ταγαράδων (Ε.Ο. Θεσ/νίκης-Μουδανιών)	1990	2	55,4	B1
9	Α/Δ στις σιδηρ. γραμμές του σταθμού Λαχανοκήπων	1991	3	81,2	Γ1
10	Γέφυρα Αξιού στο νέο κλάδο Θεσ/νίκης -Κατερίνης	1984	27	780,0	Γ2

Πίνακας 2. Περιγραφή γεφυρών που εξετάστηκαν – λοιπά στοιχεία

a/a	Συνέχεια ανωδομής	Τύπος στήριξης	Λοξό-τητα (°)	Ανωδομή	Θεμελίωση
1	συνεχής	απλή έδραση	21	πλάκα με κυλινδρ. διάκενα-Πρ./Σ	επιφανειακή
2	συνεχής	απλή έδραση	10	πλακοδοκός-Πρ./Σ	επιφανειακή
3	μη συνεχής	απλή έδραση	30	πλακοδοκός-Πρ./Σ	επιφανειακή
4	μη συνεχής	απλή έδραση	43	συμπαγής πλάκα - Πρ./Σ	πάσσαλοι
5	μη συνεχής	απλή έδραση	30	πλάκα με κυλινδρ. διάκενα-Πρ./Σ	πάσσαλοι
6	συνεχής	μονολιθική	0	μονοκύψελη κιβωτ. διατομή-Πρ./Σ	πάσσαλοι
7	συνεχής	μονολιθική	18	πλάκα με κυλινδρ. διάκενα-Πρ./Σ	πάσσαλοι
8	μη συνεχής	απλή έδραση	10	πλάκα με κυλινδρ. διάκενα-Πρ./Σ	πάσσαλοι
9	μη συνεχής	απλή έδραση	20	πλακοδοκός-Πρ./Σ	πάσσαλοι
10	μη συνεχής	απλή έδραση	0	πλακοδοκός-Πρ./Σ	πάσσαλοι

Η τιμή της PGA στη θέση της κάθε γέφυρας, κατά τον υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας και στη συνέχεια της συνολικής διακινδύνευσης, αρχικά θεωρείται ίση με αυτή που προβλέπεται από τον NEAK για την αντίστοιχη ζώνη. Στη συνέχεια λαμβάνεται η τιμή που προτείνεται από τη Μικροζωνική Μελέτη της Θεσσαλονίκης για το σεισμικό σενάριο με μέση περίοδο επαναφοράς 475 έτη, όπως έχει προκύψει από αναλύσεις εδαφικής απόκρισης (Anastasiadis et al., 2001). Στις περιπτώσεις γεφυρών εκτός περιοχής της Μικροζωνικής (3,4,10) η PGA επαυπολογίζεται είτε με τη χρήση κατάλληλης σχέσης εξασθένησης είτε με βάση μελέτες σεισμικής επικινδυνότητας και συνεκτιμώντας την επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών. Ο δείκτης της συνολικής διακινδύνευσης υπολογίζεται αρχικά χωρίς την συμμετοχή του δείκτη σπουδαιότητας, αφενός για να διαφανεί πως διαμορφώνεται το τελικό αποτέλεσμα λαμβάνοντας ή όχι υπόψη τη συγκεκριμένη παράμετρο και αφετέρου για να είναι συγκρίσιμος με τις μεθόδους που δεν ενέχουν τέτοιο δείκτη. Ακολούθως, συνυπολογίζεται και ο δείκτης σπουδαιότητας ώστε να προσδιοριστεί τελικά ο δείκτης προτεραιότητας.

Στον Πίνακα 4 οι γέφυρες κατατάσσονται κατά φθίνουσα σειρά των δεικτών τρωτότητας, διακινδύνευσης και προτεραιότητας, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση, καθώς η κλίμακα βαθμολόγησης είναι διαφορετική σε κάθε προσέγγιση, οπότε και οι αντίστοιχοι δείκτες δεν είναι άμεσα συγκρίσιμοι. Παρατηρείται πως υπάρχουν διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα μεταξύ των μεθόδων, οι οποίες είναι αναμενόμενες λόγω των διαφορετικών κριτηρίων που λαμβάνονται κάθε φορά υπόψη, καθώς και του τρόπου συνδυασμού και στάθμισής τους. Ωστόσο, οι διαφορές στην κατάταξη ως προς την σεισμική διακινδύνευση δεν είναι πολύ έντονες, δηλαδή διαφαίνεται μια παρόμοια τάση σε όλες τις μεθόδους. Μια γέφυρα που κατατάσσεται ως υψηλής διακινδύνευσης σε μία μέθοδο, παραμένει ενγένει σε υψηλές θέσεις προτεραιότητας και στις άλλες μεθόδους (π.χ. η γέφυρα 5). Ο δείκτης σπουδαιότητας παρουσιάζει σημαντικό ποσοστό συμμετοχής στην εκτίμηση του δείκτη σεισμικής διακινδύνευσης. Έτσι, είναι πιθανό, μια γέφυρα μικρής σχετικά σπουδαιότητας και μεγάλου βαθμού δομικής τρωτότητας να χαρακτηρίζεται ως χαμηλότερης διακινδύνευσης σε σχέση με μια μεγάλης σπουδαιότητας, αλλά μικρής δομικής τρωτότητας γέφυρα.

Επίσης το ποσοστό συμμετοχής της σεισμικής επικινδυνότητας (μέσω της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης) στην εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης είναι μεγάλο σε σχέση με τους υπόλοιπους παράγοντες (κάτι αναμενόμενο), ιδιαίτερα όταν πολλαπλασιάζεται απευθείας με τους υπόλοιπους παράγοντες. Έτσι, μια γέφυρα με υψηλό δείκτη δομικής τρωτότητας εκτιθέμενη σε μικρή PGA, παρουσιάζει μικρότερη σεισμική διακινδύνευση, από μία γέφυρα χαμηλότερης δομικής τρωτότητας εκτιθέμενη σε μεγαλύτερη PGA. Επιπλέον παρατηρούνται σαφείς διαφοροποιήσεις στην σεισμική διακινδύνευση για τις δύο διαφορετικές τιμές της PGA. Το γεγονός αυτό σημαίνει πως κατά την εφαρμογή αυτών των μεθόδων θα πρέπει να εξασφαλίζεται η όσο το δυνατό πιο ρεαλιστική εκτίμηση της PGA η οποία να προκύπτει από ειδικές αναλύσεις

Πίνακας 3. Δείκτες δομικής τρωτότητας, διακινδύνευσης και προτεραιότητας.

A/A	PGA (g)		FHWA			WSDOT				
	NEAK (1)	MZ (2)	ΔΤ	ΣΔ (1)	ΣΔ (2)	ΔΤ	ΣΔ (1)	ΣΔ (2)	ΔΠ (1)	ΔΠ (2)
1	0,16	0,33	5	12,0	20,6	5,0	9,0	12,1	12,4	16,7
2	0,16	0,29	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,24	0,36	5	18,0	22,5	5,0	10,6	12,5	19,0	17,3
4	0,16	0,19	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,16	0,45	10	24,0	56,3	10,0	11,9	18,2	28,1	25,2
6	0,16	0,16	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,16	0,33	5	15,0	20,6	5,0	9,0	12,1	18,8	16,7
8	0,16	0,42	10	24,0	52,5	10,0	11,9	17,7	17,0	24,5
9	0,16	0,16	8,2	24,7	16,5	8,2	11,0	11,0	17,9	15,2
10	0,16	0,20	5	15,0	12,5	5,0	9,0	9,9	20,4	13,6

Πίνακας 3. (συνέχεια)

A/A	Kim			Pezeshk		ΟΑΣΠ				
	ΔΤ	ΣΔ (1)	ΣΔ (2)	ΔΤ	ΔΠ	ΔΤ	ΣΔ (1)	ΣΔ (2)	ΔΠ (1)	ΔΠ (2)
1	1,29	1,58	1,86	45	55	5,50	6,12	8,42	15,14	20,82
2	0,00	0,00	0,00	59	79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1,66	2,09	2,23	55	60	5,50	9,19	9,19	13,82	13,82
4	0,18	0,47	0,47	55	70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	3,04	3,33	3,61	40	45	6,75	7,52	14,09	16,54	31,01
6	0,00	0,00	0,00	59	69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,70	0,98	1,26	53	68	1,75	2,34	2,68	9,96	11,41
8	0,26	0,54	0,82	58	68	5,50	6,12	10,72	8,84	15,47
9	1,85	2,13	2,13	35	45	5,06	6,76	3,75	10,77	5,98
10	2,16	2,44	2,44	44	44	5,50	7,35	5,10	15,37	10,67

(1): Κατά NEAK, (2): Κατά Μικροζωνική Μελέτη (MZ)

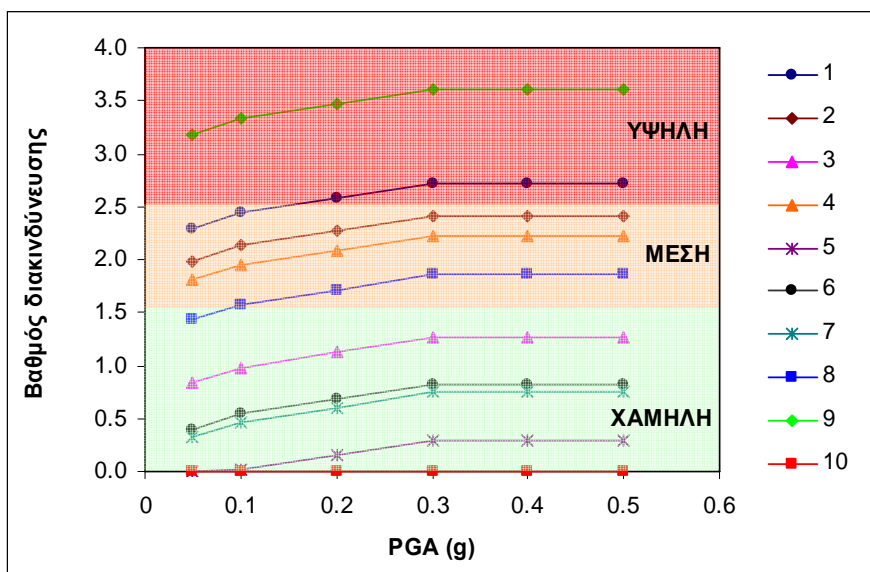
ΔΤ: Δομική Τρωτότητα, ΣΔ: Σεισμική Διακινδύνευση, ΔΠ: Δείκτης προτεραιότητας

Πίνακας 4. Κατάταξη κατά φθίνουσα σειρά τρωτότητας, διακινδύνευσης και προτεραιότητας.

A/A	FHWA			WSDOT					Kim			Pezeshk		ΟΑΣΠ				
	ΔΤ	ΣΔ (1)	ΣΔ (2)	ΔΤ	ΣΔ (1)	ΣΔ (2)	ΔΠ (1)	ΔΠ (2)	ΔΤ	ΣΔ (1)	ΣΔ (2)	ΔΤ	ΔΠ	ΔΤ	ΣΔ (1)	ΣΔ (2)	ΔΠ (1)	ΔΠ (2)
1	3	5	4	3	4	4	7	4	5	5	5	4	3	2	5	4	3	2
2	4	6	7	4	5	7	8	7	9	9	9	8	8	5	7	8	8	8
3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	3	6	4	2	1	3	4	4
4	4	6	7	4	5	7	8	7	8	8	8	6	7	5	7	8	8	8
5	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	1	1
6	4	6	7	4	5	7	8	7	9	9	9	8	6	5	7	8	8	8
7	3	4	4	3	4	4	4	4	6	6	6	5	5	4	6	7	6	5
8	1	2	2	1	1	2	6	2	7	7	7	7	5	2	5	2	7	3
9	2	1	5	2	2	5	5	5	3	3	4	1	2	3	4	6	5	7
10	3	4	6	3	4	6	2	6	2	2	2	3	1	2	3	5	2	6

(μικροζωνικές μελέτες) που να αναφέρονται στη θέση του υπό μελέτη φορέα και όχι στις προτεινόμενες από τον κανονισμό τιμές. Για την ανάδειξη του σχετικού ρόλου της PGA στην εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης, υπολογίζεται για τις γέφυρες της εφαρμογής η συνολική σεισμική διακινδύνευση, μεταβάλλοντας την PGA που αντιστοιχεί στην κάθε θέση και θεωρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές. Στο σχήμα 1 φαίνεται ο τρόπος μεταβολής του δείκτη σεισμικής διακινδύνευσης αυξανόμενης της PGA σύμφωνα με τη μέθοδο Kim. Η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση υπεισέρχεται ως επιμέρους δείκτης, ο οποίος πολλαπλασιάζεται με τον αντίστοιχο συντελεστή βαρύτητας αθροίζεται με τους υπόλοιπους δείκτες διαμορφώνοντας έτσι τον συνολικό βαθμό διακινδύνευσης. Παρατηρείται ότι υπάρχει τμηματική και όχι συνεχής αύξηση της διακινδύνευσης, καθώς η σεισμική επικινδυνότητα υπεισέρχεται ως ξεχωριστός δείκτης, ο οποίος βαθμολογείται για συγκεκριμένα όρια μεταβολής της PGA ($PGA < 0.1g$, $0.1 < PGA < 0.2g$, $0.2 < PGA < 0.3g$, $PGA > 0.3g$), ενώ μετά από μια ορισμένη τιμή της PGA (0.3g) ο βαθμός διακινδύνευσης παραμένει σταθερός. Τονίζεται ότι σύμφωνα με την συγκεκριμένη μέθοδο το απαιτούμενο πλάτος έδρασης μεταβάλλεται ανάλογα με την τιμή της PGA, με αποτέλεσμα την προσαύξηση του βαθμού διακινδύνευσης. Στην εφαρμογή του σχήματος 1 δεν ακολουθήθηκε αυτή η θεώρηση, δηλαδή το απαιτούμενο πλάτος έδρασης διατηρήθηκε σταθερό ανεξαρτήτως της PGA κάθε φορά, ακολουθώντας τις οδηγίες της E39/93, οπότε ο βαθμός διακινδύνευσης δεν μεταβάλλεται έντονα.

Τέλος, προκειμένου να προσδιορισθεί για τις γέφυρες της συγκεκριμένης εφαρμογής, μια τελική κατάταξή τους ως προς τη σεισμική διακινδύνευση και το βαθμό προτεραιότητας, μια πραγματιστική αντιμετώπιση συνίσταται στην χρήση ενός μέσου όρου της κατάταξης που προκύπτει από την εφαρμογή των διαφορετικών μεθόδων.



Σχήμα 1. Επιρροή της PGA στην διαμόρφωση του συνολικού βαθμού διακινδύνευσης κατά την μέθοδο Kim.

5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΔΕΙΚΤΩΝ

Η βαθμονόμηση των επιμέρους παραγόντων βάσει των οποίων προκύπτουν οι δείκτες τρωτότητας και διακινδύνευσης είναι ιδιαίτερης σημασίας για τη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος και βασίζεται είτε στην στατιστική επεξεργασία δεδομένων από βλάβες που παρατηρήθηκαν σε προηγούμενους σεισμούς (π.χ. μέθοδοι Kim και Kawashima & Ushoh) είτε στην ποσοτικοποιημένη

κρίση έμπειρων μηχανικών για την συμπεριφορά των γεφυρών υπό σεισμική φόρτιση (π.χ. μέθοδοι FHWA, WSDOT, Pezeshk, ΟΑΣΠ). Σε ορισμένες μεθόδους λαμβάνεται υπόψη η σχετική βαρύτητα των δεικτών δομικής τρωτότητας, σεισμικής επικινδυνότητας και σπουδαιότητας στην διαμόρφωση της συνολικής διακινδύνευσης, αλλά και των επιμέρους παραμέτρων που υπεισέρχονται σε καθέναν από τους παραπάνω δείκτες (π.χ. μέθοδος ΟΑΣΠ) ενώ σε άλλες η σχετική βαρύτητα είναι ίδια (π.χ. μέθοδοι FHWA, Pezeshk, Kawashima & Unjoh).

Στις μεθόδους Kim και Kawashima & Unjoh η αξιολόγηση και βαθμονόμηση των παραμέτρων που υπεισέρχονται στον προσδιορισμό του τελικού βαθμού διακινδύνευσης, πραγματοποιήθηκε με βάση τη στάθμη βλάβης που υπέστη ένα πλήθος γεφυρών σε ισχυρούς σεισμούς μεταξύ 1923 και 1991 ανά τον κόσμο. Σε μια τέτοια προσέγγιση δεν αποκλείονται αβεβαιότητες σχετικές με τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των μοντέλων, όπως κατά τον προσδιορισμό της στάθμης βλάβης ή των επιμέρους χαρακτηριστικών της κάθε γέφυρας, καθώς και στην εκτίμηση του στάθμης της σεισμικής έντασης (PGA) για κάθε θέση, που συνήθως γίνεται μέσω σχέσεων εξασθένισης. Ωστόσο, η ανάλυση αξιοπιστίας και στις δύο περιπτώσεις δίνει αποδεκτές αποκλίσεις μεταξύ παρατηρηθέντων και αναμενόμενων βαθμών βλάβης.

Αναφορικά με τους εμπειρικούς συντελεστές σχετικής βαρύτητας (π.χ. μέθοδος ΟΑΣΠ), αυτοί προέκυψαν με βάση κυρίως την βαθμονόμηση της κρίσης έμπειρων μηχανικών, χωρίς να είναι πάντοτε απόλυτα τεκμηριωμένοι. Εντούτοις, η προσέγγιση αυτή αντικατοπτρίζει κατά το δυνατό ρεαλιστικά την σπουδαιότητα της κάθε παραμέτρου στη διαμόρφωση της σεισμικής διακινδύνευσης των γεφυρών, στηριζόμενη στην εμπειρία τόσο από τον αντισεισμικό σχεδιασμό αντίστοιχων κατασκευών όσο και από την συμπεριφορά τους υπό σεισμική φόρτιση σε πραγματικούς σεισμούς.

Σε ορισμένες μεθόδους προτείνεται η άθροιση των βαθμολογιών των επιμέρους δεικτών για την εκτίμηση του τελικού βαθμού σεισμικής διακινδύνευσης της κάθε γέφυρας. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι παρουσιάζουν μικρότερη ευαισθησία, γεγονός το οποίο είναι περισσότερο αισθητό σε περιπτώσεις κατασκευών με μέτριο βαθμό διακινδύνευσης, ενώ η τελική εκτίμηση εξαρτάται έντονα από τους επιμέρους συντελεστές βαρύτητας που εισάγονται σε κάθε παράμετρο του μοντέλου. Αντιθέτως στις μεθόδους όπου γίνεται πολλαπλασιασμός των επιμέρους δεικτών αντί της άθροισης (π.χ. μέθοδος WSDOT), δίνεται περισσότερη έμφαση στις ακραίες τιμές (άνω ή κάτω) της κάθε παραμέτρου, γεγονός που μπορεί να διαστρεβλώσει την τελική αποτίμηση, ενώ με τον τρόπο αυτόν αυξάνεται η επιρροή ενδεχόμενων λαθών ή αβεβαιοτήτων (Buckle, 1991).

6 ΤΕΛΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι εξεταζόμενες μέθοδοι χαρακτηρίζονται εξ ορισμού ως απλές, καθώς αποσκοπούν στον πρωτοβάθμιο προσεισμικό έλεγχο της διακινδύνευσης ενός πλήθους γεφυρών και τον προσδιορισμό του βαθμού προτεραιότητας για περαιτέρω έλεγχο. Η επισκόπηση και εφαρμογή επιλεγμένων μεθοδολογιών εκτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης γεφυρών Ο/Σ που βασίζονται σε δείκτες τρωτότητας αναδεικνύει και τον βαθμό πολυπλοκότητας της καθεμιάς. Έτσι, κάποιες από αυτές είναι περισσότερο σύνθετες απαιτώντας μεγαλύτερη πληθώρα στοιχείων και υπολογισμών, ενώ άλλες είναι απλούστερες, χωρίς να απαιτούν λεπτομερή στοιχεία. Για παράδειγμα, οι μέθοδοι FHWA, ΟΑΣΠ, Kawashima & Unjoh, απαιτούν σε σύγκριση με τις υπόλοιπες περισσότερα στοιχεία και υπολογισμούς, κυρίως σε σχέση με κατασκευαστικές λεπτομέρειες των γεφυρών, ενώ οι μέθοδοι Pezeshk και Kim είναι οι απλούστερες. Σε κάθε περίπτωση, εφόσον υπάρχει η αντίστοιχη βάση δεδομένων με τα απαιτούμενα κάθε φορά στοιχεία, είναι δυνατός ο αυτοματοποιημένος υπολογισμός των επιμέρους δεικτών και του τελικού βαθμού διακινδύνευσης. Επιπλέον, η όλη διαδικασία μπορεί να επεκταθεί υπό τη μορφή διαδραστικού λογισμικού σε περιβάλλον GIS, όπου και είναι εφικτός ο συνδυασμός θεματικών χαρτών, όπως για παράδειγμα της χωρικής κατανομής των παραμέτρων της σεισμικής διέγερσης από μικροζωνική μελέτη, της

χωροθέτησης του οδικού δικτύου, και τελικά των αποτελεσμάτων αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης, ώστε να αναπτυχθεί ένα πολύτιμο εργαλείο για την λήψη αποφάσεων και την διαχείριση του σεισμικού κινδύνου από τους αρμόδιους φορείς.

Γενικά, η συντριπτική πλειοψηφία των παραμέτρων που υπεισέρχονται στις εξεταζόμενες μεθόδους συναντώνται στην ελληνική τυπολογία γεφυρών, οπότε είναι δυνατή η εφαρμογή τους αφού γίνουν βέβαια κάποιες τροποποιήσεις για την προσαρμογή τους στους κανονισμούς και τις κατασκευαστικές πρακτικές της χώρας μας. Οι τροποποιήσεις αυτές αναφορικά με τον δείκτη σεισμικής επικινδυνότητας, σχετίζονται με παραμέτρους όπως η κατηγοριοποίηση του εδάφους, οι συντελεστές εδαφικής ενίσχυσης και ο προσδιορισμός της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης. Αντίστοιχα, απαιτούνται μετατροπές σε παράγοντες που υπεισέρχονται στην εκτίμηση της δομικής τρωτότητας, όπως η βαθμονόμηση της χρονολογίας σχεδιασμού της γέφυρας ή ο τρόπος προσδιορισμού του πλάτους έδρασης που διαφοροποιούνται στη κάθε χώρα. Ωστόσο, ορισμένα μεμονωμένα τυπολογικά χαρακτηριστικά, όπως οι γέφυρες δύο επιπέδων, οι κρεμαστές ή τοξωτές γέφυρες, τα μεταλλικά μεσόβαθρα, δεν συνηθίζονται στην χώρα μας και δεν απαιτείται να ληφθούν υπόψη σε περίπτωση εφαρμογής κάποιας μεθόδου που συμπεριλαμβάνει τέτοιες παραμέτρους (π.χ. δομικοί τύποι ανωδομής στη μέθοδο Kim ή υλικό βάρων στη μέθοδο Kawashima & Ushioh). Από την άλλη, η τυπολογία γεφυρών σκυροδέματος στην Ελλάδα δεν εμφανίζει κάποια επιπλέον κρίσιμα τυπολογικά χαρακτηριστικά τα οποία δεν λαμβάνονται ήδη υπόψη στις παραπάνω μεθόδους.

Η μεθοδολογία του ΟΑΣΠ, που σε μεγάλο βαθμό βασίζεται στην αντίστοιχη προσέγγιση της FHWA, αποτελεί την μοναδική ως τώρα στον ελληνικό χώρο, ενώ λαμβάνει υπόψη σχεδόν όλα τα κρίσιμα γεωμετρικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη σεισμική απόκριση των γεφυρών, τα οποία και βαθμολογούνται αναλόγως, προκειμένου να προκύψει αρχικά η δομική τρωτότητα της γέφυρας και εν συνεχεία η σεισμική διακινδύνευση. Οι δείκτες δομικής τρωτότητας που χρησιμοποιούνται είναι τέτοιοι, ώστε να εντοπίζεται άμεσα ποιο τμήμα της γέφυρας είναι περισσότερο τρωτό, ενώ έτσι είναι εφικτό να διερευνηθεί κατά πόσο θα διαφοροποιηθεί η δομική τρωτότητα επεμβαίνοντας και βελτιώνοντας κάποιο στοιχείο της κατασκευής. Ωστόσο επιδέχεται βελτιώσεων που σχετίζονται με το βαθμό συμμετοχής του δείκτη σπουδαιότητας και της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης στον υπολογισμό της σεισμικής διακινδύνευσης, που κρίνεται δυσανάλογα μεγάλος σε σχέση με τις υπόλοιπες παραμέτρους. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να γίνει σαφής διαχωρισμός των παραμέτρων σεισμικής επικινδυνότητας και δομικής τρωτότητας, καθώς σύμφωνα με τη μέθοδο, η σεισμική διέγερση υπό τη μορφή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης υπεισέρχεται σε επιμέρους κριτήρια υπολογισμού του δείκτη δομικής τρωτότητας.

7 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Anastasiadis, A., Raptakis, D., Pitilakis, K. 2001. "Thessaloniki's detailed microzoning: Subsurface as basis of site response analysis". PAGEOPH, 158, 11.
- Applied Technology Council (1985). "Earthquake Damage Evaluation Data for California." Rep. No. ATC-13, Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- Applied Technology Council (1991). "Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States." Rep. No. ATC-25, Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- Babaei, K., & Hawkins, N.M., (1991) "Bridge Seismic Retrofit Prioritization", Proc. Third U.S. National Conf. on Lifeline Earthquake Engineering, Los Angeles, California, 149-155.
- Basöz N., & Kiremidjian A.S., (1995) Prioritization of Bridges for Seismic Retrofitting, Technical Report NCEER-95-0007, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo.

- Basöz, N., Kiremidjian, A.S., (1998), "Evaluation of Bridge Damage Data from the Loma Prieta and Northridge, California Earthquake". Technical Report MCEER-98-0004, State University of New York, Buffalo.
- Buckle I.G. & Friedland I.M., editors, (1995), "Seismic Retrofitting Manual for Highway Bridges", Report FHWA-RD-94-052, Grant DTFH61-92-C-00106, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Chang, S., Nojima, N., (2001). "Measuring post-disaster transportation system performance: the 1995 Kobe earthquake in comparative perspective", *Transportation Research, Part A* 35, 475-494.
- Cho S., Gordon P., Moore J., Richardson H., Shinozuka, M., Chang S., (2001). "Integrating Transportation Network and Regional Economic Models to Estimate the Costs of a Large Urban Earthquake". *Journal of Regional Science*, Vol. 41, Issue 1, 39-65.
- Hwang, H., Jernigan, J.B., Lin, Y-W. (2000). "Evaluation of Seismic Damage to Memphis Bridges and Highway Systems", *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 5, No 4, pp. 322-330.
- Karim K. and F. Yamazaki (2001), "Effect of earthquake ground motions on fragility curves of highway bridge piers based on numerical simulation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30:1839-1856.
- Kawashima K., & Unjoh S., (1990), An Inspection Method of Seismic Vulnerability of Existing Highway Bridges, *Structural Eng./Earthquake Eng.*, 7 (1): 143-150.
- Kim, S.H., (1993), "A GIS-Based Regional Risk Analysis Approach for Bridges Against Earthquakes", Dissertation, State University of New York at Buffalo, Department of Civil Engineering.
- Mander J.B. and Basöz N. (1999). "Seismic Fragility Theory for Highway Bridges", Proceedings, 5th U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering, Seattle WA, TCLEE/ASCE, Monograph No.16, edited by W.M. Elliot and P. McDonough, pp. 13-40.
- Pezeshk, S., Chang, T.S., Yiak K.C. & Kung H.T. (1993) Seismic vulnerability evaluation of bridges in Memphis and Shelby County, Tennessee, *Earthquake Spectra*, 9(4): 803-816.
- Porter, K.A., (2004), "A Survey of Bridge Practitioners to Relate Damage to Closure", Report EERL 2004-07, California Institute of Technology, Pasadena, CA.
- Shinozuka, M., Feng, M. Q., Kim, H.-K., and Kim, S.-H. (2000). "Nonlinear Static Procedure for Fragility Curve Development." *Journal of Engineering Mechanics*, 126(12), 1287-1296.
- Shinozuka, M., M.Q. Feng, H.-K. Kim, T. Uzawa, T. Ueda (2003). "Statistical Analysis of Fragility Curves", Technical Report MCEER-03-0002, State University of New York, Buffalo.
- Werner, S.D, C.E. Taylor., J.E. Moore, J.S. Walton, S. Cho., (2000). "A Risk-Based Methodology for Assessing the Seismic Performance of Highway Systems", Technical Report MCEER-00-0014, State University of New York, Buffalo.
- Yamazaki F., Motomura H., Hamada T., (2000). "Damage assessment of expressway networks in Japan based on seismic monitoring". Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, Paper No. 0551.
- Αργυρούδης Σ., Πεϊτση Ε., Πεϊτση Α., Πιτιλάκης Κ. (2006). «Ο Ρόλος των Τοπικών Εδαφικών Συνθηκών στην Εκτίμηση της Σεισμικής Διακινδύνευσης Γεφυρών Ο/Σ. Εφαρμογή στις Γέφυρες του Πολεοδομικού Συγκροτήματος Θεσσαλονίκης», 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ελληνική Επιστημονική Εταιρεία Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων, Ξάνθη, 31 Μαΐου- 2 Ιουνίου.
- ΟΑΣΠ (2002). «Συμπλήρωση και επέκταση μεθοδολογίας προσεισμικού ελέγχου υφιστάμενων γεφυρών με πρακτικές εφαρμογές», Ομάδα μελέτης: Α. Καραμάνος, Θ. Πανουτσόπουλος, Σ. Σταθόπουλος, Σ. Καρακατσανίδης.