

Αποτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης οδικών δικτύων εξαιτίας της τρωτότητας γεφυρών και σηράγγων οπλισμένου σκυροδέματος

Ιωάννης Κουλιανίτης

Υποψήφιος Διδάκτορας Α.Π.Θ., giakila@civil.auth.gr

Αναστάσιος Σέξτος

Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ., asextos@civil.auth.gr

& Reader in Earthquake Engineering, University of Bristol UK a.sextos@bristol.ac.uk

Περίληψη

Η σημασία των οδικών μεταφορών στην ευημερία και την ανάπτυξη των σύγχρονων κοινωνιών σε σεισμογενείς περιοχές τεκμαίρεται από πρόσφατους ισχυρούς σεισμούς διεθνώς οι οποίοι προκάλεσαν εκτεταμένες δομικές βλάβες σε κατασκευές (συνιστώσες) του δικτύου από οπλισμένο σκυρόδεμα όπως είναι οι γέφυρες και οι σήραγγες και οι οποίες με τη σειρά τους οδήγησαν σε παρατεταμένη υπολειτουργία του δικτύου και σε σημαντικές πρόσθετες απώλειες. Η διακινδύνευση αυτή είναι επιπροσθέτως αναπόφευκτα συνδεδεμένη και με τις κοινωνικοοικονομικές δομές καθώς και την εκτεταμένη εξάρτηση της καθημερινότητας των πολιτών από την εύρυθμη λειτουργία των οδικών δικτύων. Κατά συνέπεια, η ποσοτικοποίηση της “αναταξιμότητας” (resilience) ενός οδικού δικτύου δηλαδή της δυνατότητάς του να προσαρμόζεται και να ανακάμπτει μετά από μία φυσική καταστροφή αποτελεί ένα βασικό εργαλείο διαχείρισης και μείωσης της σεισμικής διακινδύνευσης. Η παρούσα εργασία λαμβάνει υπόψη της τα παραπάνω ζητήματα και προτείνει μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία για την πολυκριτηριακή αποτίμηση των συνολικών (οικονομικών, δομικών και μη-δομικών, άμεσων και έμμεσων) απωλειών για την κοινωνία μετά από έναν ισχυρό σεισμό. Στις συνολικές αυτές απώλειες προσμετρούνται τόσο οι άμεσες που σχετίζονται με τις βλάβες των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος όσο και οι έμμεσες που σχετίζονται με την αύξηση του χρόνου των μετακινήσεων και τις ευρύτερες κοινωνικοοικονομικές απώλειες. Προκειμένου να εκφραστεί η πολυδιάστατη φύση των απωλειών εισάγονται νέοι δείκτες που αποτιμώνται στις διάφορες φάσεις της περιόδου αποκατάστασης που ακολουθεί μετά από έναν ισχυρό σεισμό. Οι παραπάνω δείκτες υπολογίζονται βάσει της τρωτότητας των κατασκευών σκυροδέματος, της σεισμικής επικινδυνότητας της ευρύτερης περιοχής καθώς και των κυκλοφοριακών συνθηκών που επικρατούν πριν και μετά ένα ισχυρό σεισμικό γεγονός. Η ίδια μεθοδολογία και δείκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιλογή του βέλτιστου, μεταξύ των πολλών εναλλακτικών, σχήματος προσεισμικής ενίσχυσης των στοιχείων του δικτύου από οπλισμένο σκυρόδεμα, ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος και το κόστος αποκατάστασης του δικτύου, μειώνοντας με τον τρόπο αυτόν τις συναρτώμενες οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις.

1. Εισαγωγή

Τα οδικά δίκτυα είναι υποδομές ζωτικής σημασίας για την ευημερία των σύγχρονων, πυκνοκατοικημένων κοινωνιών συνεισφέροντας καθοριστικά στη μεταφορά ανθρώπων, αγαθών και υπηρεσιών. Η ομαλή και απρόσκοπτη λειτουργία τους αποτελεί βασικό παράγοντα για τη διασφάλιση της άμεσης παροχής βοήθειας, της αποτελεσματικής αποκατάστασης βλαβών και της επαναφοράς της ομαλότητας στην ζωή των πολιτών μετά από φυσικές καταστροφές (π.χ. σεισμούς, πλημμύρες, κατολισθήσεις κτλ.). Πρόσφατοι ισχυροί σεισμοί παγκοσμίως προκάλεσαν εκτεταμένες βλάβες σε οδικά δίκτυα (Σχήμα 1) οι οποίες αφορούσαν κυρίως σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος όπως είναι οι γέφυρες [1] και οι σήραγγες [2].

Οι ενδεχόμενες απώλειες εξαιτίας ενός μελλοντικού σεισμού μπορούν να εκτιμηθούν μετά από μία ανάλυση σεισμικής διακινδύνευσης η οποία συνδυάζει την τρωτότητα μίας ή περισσότερων κατασκευών με την σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής στην οποία βρίσκονται. Η αποτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης συστημάτων αποτελούμενων από έναν αριθμό κατασκευών που εκτείνονται γεωγραφικά σε μία ευρεία περιοχή, όπως είναι για παράδειγμα τα οδικά δίκτυα, συναρτάται με πρόσθετες αβεβαιότητες, οι οποίες κυρίως υπεισέρχονται στην διαδικασία εκτίμησης των απωλειών. Ένα από τα πιο δύσκολα και σε σημαντικό βαθμό υποκειμενικό κομμάτι στην διαδικασία της αποτίμησης τέτοιων συστημάτων, είναι η ποσοτικοποίηση των συνολικών απωλειών οι οποίες εκτός από τις άμεσες δομικές βλάβες θα πρέπει να περιλαμβάνουν και τις έμμεσες, δηλαδή αυτές που συνδέονται με την διατάραξη της λειτουργίας του δικτύου και τις συν αυτώ κοινωνικοοικονομικές και περιβαντολογικές συνέπειες. Το εύρος των ενδεχόμενων σεισμικών απωλειών γίνεται εύκολα αντιληπτό με παράδειγμα του σεισμού Tohoku το 2011 στην Ιαπωνία που προκάλεσε άμεσες και έμμεσες απώλειες 320 και 620 δισεκατομμυρίων δολαρίων αντίστοιχα. Σε επίπεδο οδικού δικτύου, οι άμεσες απώλειες αφορούν ουσιαστικά το κόστος επισκευής των δομικών βλαβών [3], μη λαμβάνοντας υπόψη το (εν γένει ανεκτίμητο) κόστος πιθανών ανθρώπινων απωλειών. Από την άλλη, οι έμμεσες απώλειες οφείλονται στη μειωμένη λειτουργικότητα του δικτύου, στην επακόλουθη αύξηση του χρόνου των μετακινήσεων, στη διατάραξη της κοινωνικής και επαγγελματικής ζωής των πολιτών, στη διακοπή της λειτουργίας των επιχειρήσεων, στην απώλεια πρόσβασης σε κρίσιμες υποδομές και υπηρεσίες καθώς και πρόσθετο κόστος μετακινήσεων και μεταφορών. Οι έμμεσες απώλειες μεγεθύνονται περαιτέρω και από το γεγονός ότι η μειωμένη λειτουργικότητα του δικτύου μπορεί να δυσχεραίνει την άμεση επέμβαση, τις εργασίες αποκατάστασης των βλαβών και γενικά την επαναφορά στην ομαλή λειτουργία του οδικού δικτύου [4].

Από τα παραπάνω απορρέει ότι, ενώ το άμεσο κόστος εξαρτάται από τις βλάβες των μεμονωμένων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος (γέφυρες και σήραγγες), η εκτίμηση των έμμεσων απωλειών είναι πιο σύνθετη. Αυτό συμβαίνει διότι οι βλάβες σε ένα μεμονωμένο στοιχείο, εν τέλει επηρεάζουν τη λειτουργικότητα ολόκληρου του δικτύου ενώ μετά από ένα σεισμό η φύση και ο αριθμός των μετακινήσεων συνήθως μεταβάλλονται. Η έντονη αλληλεξάρτηση των διαφόρων λειτουργιών των σύγχρονων κοινωνιών και η δυσκολία στην αναγνώριση και ποσοτικοποίηση των απωλειών που αφορούν διαφορετικούς τομείς (πχ. οικονομία, κοινωνία, περιβάλλον) [5] περιπλέκει ακόμη περισσότερο την διαδικασία εκτίμησης των έμμεσων απωλειών. Μάλιστα οι έμμεσες απώλειες εξελίσσονται στο χρόνο καθ' όλη την περίοδο αποκατάστασης σε αντίθεση με τις άμεσες που συμβαίνουν ακαριαία τη στιγμή του σεισμού. Προκειμένου να ενσωματωθούν οι έμμεσες απώλειες σε μία ανάλυση σεισμικής διακινδύνευσης, το ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια στράφηκε

στη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των βασικών δομικών βλαβών και των ευρύτερων κοινωνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών απωλειών.

Μία πρόσθετη πρόκληση στη σεισμική διακινδύνευση οδικού δικτύου είναι η αξιόπιστη εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας. Αυτό συμβαίνει γιατί ένα οδικό δίκτυο εκτείνεται σε μία ευρεία περιοχή και δεν μπορεί να χωροθετηθεί σημειακά όπως μία κατασκευή. Κατά συνέπεια τα διάφορα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος του δικτύου εκτίθενται σε διαφορετικά επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας και συνεπώς οι σεισμικές βλάβες και η ανακατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου εξαρτώνται από συγκεκριμένα σεισμικά σενάρια [6]. Η πρακτική συνέπεια της παρατήρησης αυτής σχετικά με την κυκλοφοριακή ροή είναι ότι η μελέτη της διακινδύνευσης οδικών δικτύων, σε αντίθεση με τη μελέτη της συμπεριφοράς μεμονωμένων κατασκευών, αναπόφευκτα πρέπει να πραγματοποιείται επί τη βάση σεισμικών σεναρίων πηγής και όχι μέσω συμβατικής ανάλυσης σεισμικής επικινδυνότητας η οποία ολοκληρώνει την επικινδυνότητα πολλαπλών πηγών ταυτόχρονα.

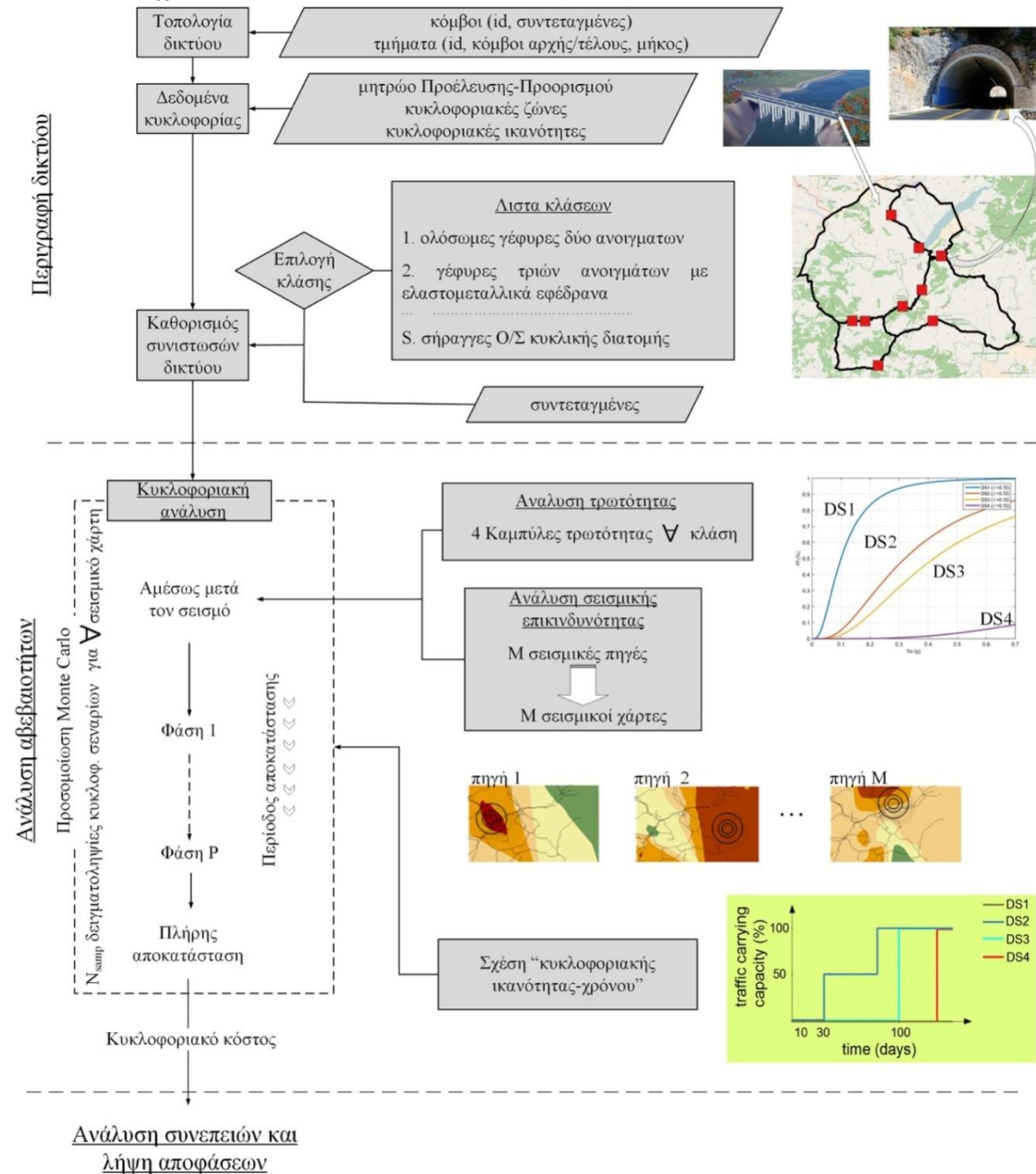
Με βάση τα παραπάνω, η καθολική μεθοδολογία αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης οδικών δικτύων θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα παραπάνω ζητήματα ώστε στο τέλος να αποτιμά την “αναταξιμότητα” (resilience) του δικτύου, δηλαδή την ικανότητά των κατασκευών που το απαρτίζουν να απορροφούν τις σεισμικές δράσεις με τις μικρότερες δυνατές βλάβες, ώστε το δίκτυο να προσαρμόζεται στις νέες συνθήκες και να επανέρχεται γρήγορα στη προσεισμική του κατάσταση [7]-[8]. Στο πλαίσιο αυτό, στόχος της εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης, πιθανοτικής προσέγγισης για την εκτίμηση της αλληλεπίδρασης βλαβών, λειτουργικότητας και κυκλοφορίας σε ένα οδικό δίκτυο και τελικά την αποτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσής του. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην συνεκτίμηση της χρονικής εξέλιξης της κατάστασης του δικτύου κατά την περίοδο αποκατάστασής του μέσω της λεπτομερούς κυκλοφοριακής ανάλυσης των διαδοχικών φάσεων μετασεισμικής αποκατάστασης. Παράλληλα επιδιώκεται η σύνθεση, προσαρμογή και ενσωμάτωση στη μεθοδολογία ποιοτικών και ποσοτικών δεικτών των απωλειών ώστε να είναι εφικτή η ολοκληρωμένη περιγραφή του άμεσου και έμμεσου κόστους καθώς και των ευρύτερων κοινωνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών συνεπειών συναρτήσει διαφόρων πιθανοτικών σεισμικών σεναρίων. Οι ίδιοι δείκτες χρησιμοποιούνται ως κριτήρια για τη βέλτιστη διαχείριση της σεισμικής διακινδύνευσης μέσω της επιλογής του αποδοτικότερου σχήματος προσεισμικής ενίσχυσης του δικτύου [9].



Σχήμα 1: Σεισμικές βλάβες σε γέφυρα (αριστερά) και σήραγγα (δεξιά) οπλισμένου σκυροδέματος του οδικού δικτύου της επαρχίας Sichuan στην Κίνα μετά τον ισχυρό σεισμό μεγέθους $M_s=7.9$ (Μάιος 2008)

2. Μεθοδολογία εκτίμησης των απωλειών

Η προτεινόμενη μεθοδολογία περιλαμβάνει τρία στάδια (Σχήμα 2). Το πρώτο είναι η “Περιγραφή του δικτύου” και αφορά στο καθορισμό των τοπολογικών δεδομένων του προβλήματος. Επόμενο στάδιο είναι η “Ανάλυση αβεβαιοτήτων” που περιλαμβάνει τρία ενδιάμεσα στάδια (ανάλυση τρωτότητας, ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας και κυκλοφοριακή ανάλυση) και καταλήγει στον υπολογισμό διαφόρων ποσοτήτων που περιγράφουν τη μετασεισμική κυκλοφορία και τις δομικές βλάβες του δικτύου. Τέλος στο στάδιο της “Ανάλυσης συνεπειών και λήψης αποφάσεων” καθορίζονται διάφοροι δείκτες απωλειών και στη συνέχεια υπολογίζονται - βάσει των ποσοτήτων που προέκυψαν από το προηγούμενο στάδιο - ώστε να χρησιμοποιηθούν ως δείκτες αποτίμησης της “αναταξιμότητας” του δικτύου, καθώς και ως κριτήρια καθορισμού του βέλτιστου σχεδίου μείωσης της σεισμικής διακινδύνευσης του δικτύου.



Σχήμα 2: Λογικό διάγραμμα προτεινόμενης μεθοδολογίας

2.1 Περιγραφή του δικτύου

Η “Περιγραφή του δικτύου” αφορά την περιγραφή της τοπολογίας του δικτύου, των κυκλοφοριακών συνθηκών που επικρατούν προσεισμικά και των θέσεων, των βασικών ιδιοτήτων και των κλάσεων των στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος του δικτύου.

2.1.1 Τοπολογία του δικτύου

Κάθε διασταύρωση του δικτύου καθώς και κάθε σημείο από το οποίο προέρχεται ή προς το οποίο κατευθύνεται κυκλοφορία θεωρείται κόμβος. Ένας μοναδικός αύξων αριθμός (ID) και ένα ζεύγος συντεταγμένων αντιστοιχίζεται σε κάθε κόμβο. Παράλληλα σε κάθε τμήμα του δικτύου μεταξύ δύο κόμβων αντιστοιχίζεται ένας αριθμός ID, το μήκος του (σε χιλιόμετρα) και οι μοναδικοί αριθμοί των κόμβων των άκρων του.

2.1.2 Προσεισμικές συνθήκες κυκλοφορίας

Ο υπολογισμός των κυκλοφοριακών ροών προϋποθέτει την περιγραφή της κυκλοφοριακής ζήτησης μέσω ενός μητρώου Προέλευσης – Προορισμού (OD matrix). Λόγω της σταθερής φύσης των προσεισμικών κυκλοφοριακών συνθηκών αυτές είναι δυνατόν να περιγραφούν από ένα στατικό μητρώο Προέλευσης – Προορισμού. Βάσει του μητρώου αυτού, της κυκλοφοριακής ικανότητας κάθε συνδέσμου και μετά την εφαρμογή μιας επαναληπτικής διαδικασίας υπολογίζονται οι κυκλοφοριακές ροές στο δίκτυο. Στην εργασία αυτή γίνεται η υπόθεση ότι όλοι οι οδηγοί επιλέγουν τη διαδρομή που ελαχιστοποιεί τον χρόνο ταξιδιού τους, μία υπόθεση που κρίνεται ρεαλιστική καθώς η ανάλυση αυτή αφορά τις καθημερινές (προσεισμικές) κυκλοφοριακές συνθήκες.

2.1.3 Κρίσιμες συνιστώσες

Μετά την περιγραφή της τοπολογίας του δικτύου και την προσεισμική κυκλοφοριακή ανάλυσή του πρέπει να καθοριστεί η θέση των στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος (γέφυρες και σήραγγες) που βρίσκονται κατανεμημένα κατά μήκος των δρόμων. Παράλληλα, τα στοιχεία αυτά που στη συνέχεια αναφέρονται ως κρίσιμες συνιστώσες (σε αυτά αποδίδεται η σεισμική τρωτότητα του συνόλου του δικτύου) ομαδοποιούνται σε κλάσεις ανάλογα με τη σεισμική τους τρωτότητα. Η ομαδοποίηση αυτή, που αναπόφευκτα σε κάποιο βαθμό βασίζεται στην κρίση του μηχανικού, πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα δομικά και γεωμετρικά στοιχεία των κατασκευών.

2.2 Ανάλυση αβεβαιοτήτων

2.2.1 Καμπύλες τρωτότητας

Η περιγραφή της τρωτότητας των κρίσιμων συνιστωσών πραγματοποιείται μέσω καμπύλων τρωτότητας. Οι καμπύλες τρωτότητας εκφράζουν την πιθανότητα υπέρβασης προκαθορισμένων σταθμών βλάβης μιας κατασκευής ή μιας κλάσης κατασκευών, δεδομένης της τιμής ενός κατάλληλου μέτρου έντασης (IM) όπως είναι η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση και η φασματική επιτάχυνση.

Πλήθος εμπειρικών και αναλυτικών μεθόδων έχει προταθεί για την παραγωγή καμπύλων τρωτότητας γεφυρών οπλισμένου σκυροδέματος. Οι εμπειρικές μέθοδοι στηρίζονται σε πραγματικές καταγραφές σεισμικών βλαβών και συνεπώς θεωρείται ότι αντικατοπτρίζουν καλύτερα την πραγματικότητα. Η έλλειψη επαρκών δεδομένων για την παραγωγή εμπειρικών καμπύλων τρωτότητας οδήγησε πολλούς μελετητές στη διερεύνηση αναλυτικών μεθόδων υπολογισμού της τρωτότητας γεφυρών [10]. Από την άλλη, μέχρι σήμερα η σεισμική τρωτότητα σηράγγων δεν έχει επαρκώς διερευνηθεί, όμως, δεδομένων των βλαβών που έχουν παρουσιάσει μετά από ισχυρούς σεισμούς, προτείνεται να

συμπεριλαμβάνονται στις κρίσιμες συνιστώσες ακόμη και αν οι παράμετροι που απαιτούνται για την περιγραφή της τρωτότητας τους επιλέγονται εμπειρικά.

Ανεξαρτήτως της μεθοδολογίας με την οποία παράχθηκαν, οι περισσότερες καμπύλες τρωτότητας βασίζονται στην υπόθεση της λογαριθμοκανονικής κατανομής:

$$P_{DS_t/IM=im} = \Phi \left[\frac{1}{\beta_t} \ln \left(\frac{im}{im_{mt}} \right) \right] \quad (1)$$

όπου:

Φ : η κλασική αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας

im_{mt} : η διάμεσος τιμή των τιμών του IM που σχετίζονται με τη στάθμη βλάβης t

β_t : η λογαριθμική τυπική απόκλιση των τιμών του IM που σχετίζονται με τη στάθμη βλάβης t

Τόσο για τις κλάσεις των γεφυρών όσο και για τις κλάσεις των σιδηράγων προδιαγράφονται τέσσερις στάθμες βλάβης. Οι τέσσερις αυτές στάθμες βλάβης αντιστοιχούν σε χαμηλές, μέσες, εκτεταμένες και ολοκληρωτικές βλάβες και συμβολίζονται ως DS1 έως 4 αντίστοιχα. Η περιγραφή της δέσμης των τεσσάρων καμπύλων τρωτότητας κάθε κλάσης - μία για κάθε στάθμη βλάβης - γίνεται μέσω των παραμέτρων im_{mt} και β_t . Στη συνέχεια σε κάθε κρίσιμη συνιστώσα του δικτύου αντιστοιχίζεται μία δέσμη καμπύλων τρωτότητας ανάλογα με την κλάση στην οποία αυτή ανήκει. Για δεδομένη τιμή του μέτρου σεισμικής έντασης (IM) στη θέση μιας κρίσιμης συνιστώσας η πιθανότητα να εμφανίσει η συνιστώσα αυτή βλάβες που αντιστοιχούν στη στάθμη βλάβης DS1 έως 4 υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$P_{DS_0/IM} = 1 - P_{S \geq DS_1/IM}, P_{DS_1/IM} = P_{S \geq DS_1/IM} - P_{S \geq DS_2/IM} \quad (2)$$

$$P_{DS_2/IM} = P_{S \geq DS_2/IM} - P_{S \geq DS_3/IM}, P_{DS_3/IM} = P_{S \geq DS_3/IM} - P_{S \geq DS_4/IM}, P_{DS_4/IM} = P_{S \geq DS_4/IM}$$

Σημειώνεται ότι η περιγραφή της τρωτότητας μιας κρίσιμης συνιστώσας μέσω καμπύλων τρωτότητας που αφορούν την κλάση της είναι μια αδρομερής προσέγγιση καθώς εμπεριέχει τις αβεβαιότητες στα δομικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά μεταξύ συνιστωσών που ανήκουν στην ίδια κλάση. Προτείνεται για πολύ σημαντικές συνιστώσες (συνιστώσες με υψηλούς κυκλοφοριακούς φόρτους ή συνιστώσες των οποίων η παράκαμψη οδηγεί σε μεγάλη αύξηση του χρόνου ταξιδιού) να υπολογίζονται καμπύλες τρωτότητας βάσει των ιδιαίτερων δομικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών των συγκεκριμένων κατασκευών και στη συνέχεια να ορίζεται για κάθε τέτοια συνιστώσα μία κλάση ενός στοιχείου.

2.2.2 Ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας

Λόγω της χωρικής συσχέτισης των τιμών της παραμέτρου έντασης στις διάφορες θέσεις ενός οδικού δικτύου, οι κλασικοί χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας – που προκύπτουν εξετάζοντας κάθε θέση ξεχωριστά – δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας τους. Το παραπάνω πρόβλημα συνήθως αντιμετωπίζεται με τη χρήση σεισμικών σεναρίων. Έτσι η εκτίμηση των απωλειών ενός χωρικά κατανομημένου συστήματος γίνεται είτε χρησιμοποιώντας ντετερμινιστικά σεισμικά σενάρια [11] είτε, στην περίπτωση που απαιτείται πιθανολογική ανάλυση απωλειών, χρησιμοποιώντας ομάδες σεισμικών γεγονότων που αντιπροσωπεύουν σεισμικότητα των πηγών της περιοχής [12], [13].

Στην εργασία αυτή η αποτίμηση πραγματοποιείται για τέσσερα διαφορετικά πιθανοτικά σενάρια κάθε ένα από τα οποία αποτελείται από μία ομάδα M σεισμικών χαρτών και αφορά μία συγκεκριμένη

περίοδο επαναφοράς (πχ 50, 100, 475 και 1890 χρόνια). Πιο συγκεκριμένα, προκειμένου να παραχθούν σεισμικά σενάρια που να ανταποκρίνονται στη σεισμικότητα της υπό εξέταση περιοχής αλλά ταυτόχρονα να λαμβάνουν υπόψη τη χωρική συσχέτιση που προαναφέρθηκε, προτείνεται η διακριτοποίηση όλων των ενεργών ρηγμάτων της περιοχής σε μικρά τμήματα μήκους 1 έως 2 χιλιομέτρων και στη συνέχεια η παραγωγή χαρτών ξεχωριστά για κάθε ένα από αυτά. Έτσι για κάθε περίοδο επαναφοράς παράγονται τόσοι χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας όσα είναι τα τμήματα στα οποία διακριτοποιήθηκαν τα ενεργά ρήγματα της περιοχής. Στα επόμενα κεφάλαια η ομάδα των M χαρτών που αφορούν μία συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς θα αποτελεί ένα σεισμικό σενάριο.

2.2.3 Παραγωγή κυκλοφοριακών σεναρίων

Θεωρείται ότι μετά από έναν σεισμό κάθε κρίσιμη συνιστώσα μπορεί είτε να διατηρήσει το 100% της κυκλοφοριακής της ικανότητας (θεωρούμενη ανοιχτή) είτε να την απολέσει πλήρως (θεωρούμενη κλειστή). Ένα κυκλοφοριακό σενάριο καθορίζεται από την λειτουργικότητα όλων των κρίσιμων συνιστωσών του δικτύου και μπορεί να αποδοθεί υπό τη μορφή ενός δυαδικού πίνακα \tilde{T}_i (πίνακας λειτουργικότητας) όπου κάθε μία από τις N κρίσιμες συνιστώσες αντιστοιχίζεται στην τιμή 1 (ανοιχτό) ή 0 (κλειστό) αναλόγως της στάθμης βλάβης της. Στην εργασία αυτή μία κρίσιμη συνιστώσα θεωρείται κλειστή όταν βρίσκεται σε στάθμη βλάβης 2 ή ανώτερη. Με δεδομένες τις πιθανότητες κάθε στάθμης βλάβης όπως αυτές υπολογίζονται από τη σχέση 2, εκτελείται μία προσομοίωση Monte Carlo από την οποία για κάθε κατανομή του μέτρου έντασης προκύπτουν N_{samp} δειγματοληψίες του πίνακα λειτουργικότητας. Έτσι τελικά για κάθε σεισμικό σενάριο παράγονται $M \cdot N_{samp}$ κυκλοφοριακά σενάρια.

2.2.4 Κυκλοφοριακή ανάλυση

Κάθε σενάριο κυκλοφορίας αναλύεται σε διάφορες φάσεις που εξελίσσονται στο χρόνο βάσει της σταδιακής αποκατάστασης της κυκλοφορίας. Η ανάλυση του αρχικού (αμέσως μετά το σεισμό) σεναρίου κυκλοφορίας σε P φάσεις που εξελίσσονται στο χρόνο προϋποθέτει τη γνώση της σχέσης κυκλοφοριακής ικανότητας - χρόνου [14] για κάθε κρίσιμη συνιστώσα. Η σχέση αυτή εξαρτάται από τη στάθμη βλάβης της συνιστώσας και μπορεί να περιγράψει και τη μερική ανάκτηση της κυκλοφοριακής ικανότητας μιας συνιστώσας (πχ. άνοιγμα μιας λωρίδας κυκλοφορίας) μετά την πάροδο ενός χρονικού διαστήματος από το σεισμό. Η μετάβαση από τη μία φάση αποκατάστασης στην επόμενη γίνεται υπό την παραδοχή ότι κάθε τμήμα του δικτύου ανοίγει για την κυκλοφορία των οχημάτων όταν όλες οι κρίσιμες συνιστώσες που περιλαμβάνει έχουν αποκατασταθεί (πλήρως ή μερικώς).

3. Ανάλυση συνεπειών και λήψη αποφάσεων

Προκειμένου να εκτιμηθεί η σεισμική επίπτωση στη λειτουργικότητα του δικτύου και να αποτιμηθεί η “αναταξιμότητα” της πληγείσας περιοχής, χρησιμοποιούνται διάφοροι ποιοτικοί και ποσοτικοί δείκτες. Η πρώτη κατηγορία δεικτών απεικονίζει την εξέλιξη των ευρύτερων επιπτώσεων κατά τις φάσεις αποκατάστασης κάθε κυκλοφοριακού σεναρίου δίνοντας έμφαση στη διάσταση του χρόνου ενώ η δεύτερη εκφράζει το συνολικό δομικό και κυκλοφοριακό κόστος ανά σεισμικό σενάριο.

3.1 Ποιοτικοί δείκτες

Ένα σεισμικό γεγονός έχει ως αποτέλεσμα τη διατάραξη της λειτουργίας του δικτύου η οποία στη συνέχεια αποκαθίσταται σταδιακά ακολουθώντας στη σταδιακή αποκατάσταση των σεισμικών βλαβών. Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται διάφοροι ποιοτικοί δείκτες οι οποίοι αποτυπώνουν τη χρονική μεταβλητότητα των επιπτώσεων από την έλευση του σεισμού μέχρι και την πλήρη αποκατάσταση. Οι δείκτες αυτοί, προκειμένου να απεικονίσουν καλύτερα την χρονική διάσταση του προβλήματος, αποτιμώνται συναρτήσει του χρόνου.

3.1.1 Προσθετό κυκλοφοριακό κόστος

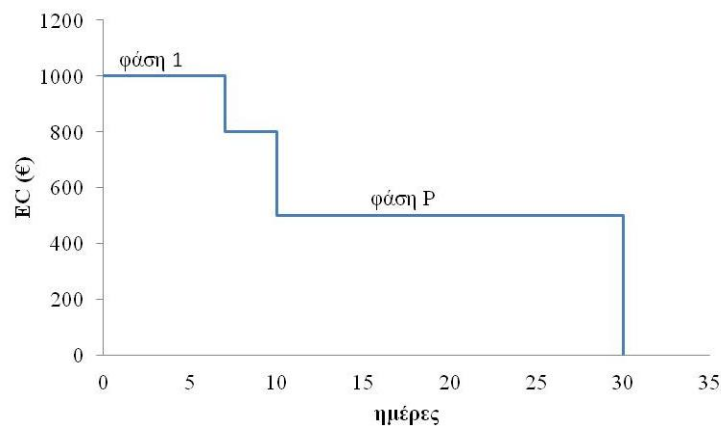
Μετά την ανάπτυξη των P μετασεισμικών φάσεων που σχετίζονται με κάθε κυκλοφοριακό σενάριο υπολογίζεται η αύξηση του χρόνου ταξιδιών και το αντίστοιχο πρόσθετο κυκλοφοριακό κόστος. Το κόστος αυτό εκφράζεται σε χρήμα ανά μονάδες χρόνου (πχ ευρώ ανά ημέρα) και εξελίσσεται συνεχώς καθ' όλη την περίοδο αποκατάστασης μειούμενο μέχρι το τέλος αυτής οπότε και μηδενίζεται (Σχήμα 3). Στην εργασία αυτή, το πρόσθετο κυκλοφοριακό κόστος δίδεται από τον τύπο του Goodwin [15]:

$$EC_p = D_p \cdot VOT \quad (3)$$

όπου:

$$D_p = \sum_{j=1}^{n_{tot}} (V_{jp} t_{jp} - V_{j0} t_{j0}) \quad (4)$$

- EC_p : πρόσθετο κυκλοφοριακό κόστος κατά τη φάση p (στη μονάδα του χρόνου)
- VOT : σταθμισμένη μέση αξία χρόνου
- D_p : συνολικές καθυστερήσεις στο δίκτυο κατά τη φάση p
- V_{jp} : κυκλοφοριακός φόρτος στο τμήμα του δικτύου j κατά τη φάση p
- t_{jp} : χρόνος μετακίνησης στο τμήμα του δικτύου j κατά τη φάση p
- V_{j0} : κυκλοφοριακός φόρτος στο τμήμα του δικτύου j πριν το σεισμό
- t_{j0} : χρόνος μετακίνησης στο τμήμα του δικτύου j πριν το σεισμό
- n_{tot} : ο συνολικός αριθμός των τμημάτων του δικτύου



Σχήμα 3: Ενδεικτικό διάγραμμα πρόσθετου κυκλοφοριακού κόστους συναρτήσει του χρόνου

3.1.2 Διάνυσμα συνεπειών

Προκειμένου να αποτιμηθούν περαιτέρω οι επιπτώσεις της μειωμένης λειτουργικότητας του δικτύου θεωρείται ένα διάνυσμα συνεπειών $\{ECO_p, CON_p, ENV_p\}$. Το διάνυσμα αυτό αποτελεί σύνθεση τριών συντελεστών απωλειών των οποίων οι τιμές κυμαίνονται από 0 έως 1. Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή ενός συντελεστή τόσο σημαντικότερες οι συνέπειες. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι τιμές και των τριών συντελεστών είναι 1.0 προσεισμικά, πέφτουν απότομα με την έλευση του σεισμού και επανέρχονται σταδιακά στην αρχική τιμή (1.0) με το τέλος της περιόδου αποκατάστασης.

Ο *συντελεστής οικονομικών απωλειών* (ECO) χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αύξηση του κόστους μεταφοράς προϊόντων και προσώπων, την διατάραξη των παραγωγικών δραστηριοτήτων, τη μείωση της αποδοτικότητας των επιχειρήσεων καθώς και τη μείωση στην τουριστική κίνηση. Ο δείκτης βασίζεται στην προσέγγιση του Goodwin για το επιπλέον οικονομικό κόστος λόγω συμφόρησης και στην παραδοχή ότι όλες οι οικονομικές επιπτώσεις οφείλονται στην αύξηση του χρόνου μετακίνησης. Η τιμή του δείκτη σε κάθε φάση της περιόδου αποκατάστασης δίνεται από τη σχέση:

$$ECO_p = \frac{\sum_{j=1}^{ntot} (V_{j0} \cdot t_{j0})}{\sum_{j=1}^{ntot} (V_{jp} \cdot t_{jp})} \quad (5)$$

όπου:

V_{j0} : κυκλοφοριακός φόρτος στο τμήμα του δικτύου j σε συνθήκες ομαλής λειτουργίας του δικτύου

t_{j0} : χρόνος μετακίνησης στο τμήμα του δικτύου j σε συνθήκες ομαλής λειτουργίας του δικτύου

V_{jp} : κυκλοφοριακός φόρτος στο τμήμα του δικτύου j κατά τη φάση p

t_{jp} : χρόνος μετακίνησης στο τμήμα του δικτύου j κατά τη φάση p

Ο *συντελεστής απώλειας συνδεσιμότητας* (CON) χρησιμοποιείται για να αποδώσει τις επιπτώσεις που έχει η απώλεια πρόσβασης σε σημεία ιδιαίτερου ενδιαφέροντος (POI). Ως σημεία ιδιαίτερου ενδιαφέροντος νοούνται κτίρια και περιοχές τα οποία είναι σημαντικό να είναι προσβάσιμα μετά από ένα σεισμό όπως για παράδειγμα εγκαταστάσεις υγείας, εγκαταστάσεις εκπαίδευσης, εγκαταστάσεις ενέργειας, αναπτυξιακές ζώνες, τόποι τουριστικού ενδιαφέροντος, μεθοριακοί σταθμοί, αεροδρόμια, λιμάνια και τερματικοί σταθμοί. Ο δείκτης αυτός εκφράζει τη δυνατότητα σύνδεσης (συνδεσιμότητα) και όχι το φόρτο και το χρόνο μετακίνησης [16]. Ο τύπος υπολογισμού του συντελεστή απώλειας συνδεσιμότητας στηρίζεται στην υπόθεση ότι η απώλεια της λειτουργικότητας μέρους του οδικού δικτύου σε μία περιοχή στην οποία υπάρχουν σημεία ιδιαίτερου ενδιαφέροντος μειώνει τη δυνατότητα πρόσβασης προς τα σημεία αυτά. Απώλεια λειτουργικότητας σε ένα τμήμα του δικτύου θεωρείται ότι υπάρχει είτε όταν το τμήμα αυτό είναι κλειστό στην κυκλοφορία λόγω βλάβης σε μια ή περισσότερες κρίσιμες συνιστώσες είτε όταν ενώ το τμήμα δεν έχει υποστεί βλάβες, δεν είναι εφικτή η πρόσβαση σε αυτό λόγω βλαβών στο υπόλοιπο δίκτυο. Σύμφωνα με τα παραπάνω ο συντελεστής προσβασιμότητας υπολογίζεται ως:

$$CON_p = \frac{\sum_{z=1}^S (\gamma_{zp} \cdot N_k)}{\sum_{z=1}^S K_z} \quad (6)$$

όπου:

$\gamma_{zp} = \frac{L_{z0} - L_{zp}}{L_{z0}}$: ο συντελεστής προσβασιμότητας στην κυκλοφοριακή ζώνη z για τη φάση p της

περιόδου αποκατάστασης

L_{z0} : το συνολικό μήκος του οδικού δικτύου στην κυκλοφοριακή ζώνη z

L_{zp} : το μήκος των τμημάτων της κυκλοφοριακής ζώνης z που κατά τη φάση p παρουσιάζουν απώλεια λειτουργικότητας

N_z : ο συνολικός αριθμός σημείων ενδιαφέροντος στην κυκλοφοριακή ζώνη
 S : ο συνολικός αριθμός κυκλοφοριακών ζωνών που περιέχουν σημεία ενδιαφέροντος

Η ανακατανομή του φόρτου κυκλοφορίας μετά από έναν σεισμό μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές. Περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές είναι οι περιοχές οι οποίες επηρεάζονται αρνητικά από την αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου στα τμήματα του δικτύου που διέρχονται από αυτές λόγω της επακόλουθης αύξησης των εκπομπών αερίων, κυκλοφοριακού θορύβου κτλ. Τέτοιες περιοχές μπορεί να είναι οι εθνικοί δρυμοί, τα προστατευόμενα οικοσυστήματα και οι περιοχές διέλευσης αρκούδας. Ο *συντελεστής περιβαλλοντικών απωλειών* (ENV) χρησιμοποιείται για την αποτίμηση των επιπτώσεων στις περιοχές αυτές. Ο υπολογισμός συντελεστή προϋποθέτει τον καθορισμό των περιβαλλοντικά κρίσιμων τμημάτων. Περιβαλλοντικά κρίσιμα τμήματα μπορεί να είναι τμήματα του δικτύου που διέρχονται από περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές ή και άλλα τμήματα ιδιαίτερου περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος. Θεωρείται ότι η αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου σε ένα οδικό τμήμα θα επιφέρει μια αντίστοιχη αύξηση των επιπτώσεων στο τμήμα αυτό. Σύμφωνα με τα παραπάνω ο συντελεστής περιβαλλοντικών απωλειών δίνεται ως:

$$ENV_p = \frac{\sum_{j=1}^J l_j}{\sum_{j=1}^J a_{kp} \cdot l_j} \quad (7)$$

όπου:

α_{pj} : ο λόγος του κυκλοφοριακού φόρτου στο κρίσιμο τμήμα j κατά τη φάση p της προς το φόρτο στο ίδιο τμήμα κατά την κατάσταση ομαλής λειτουργίας του δικτύου
 l_j : το μήκος του περιβαλλοντικά κρίσιμου τμήματος j
 J : ο συνολικός αριθμός των περιβαλλοντικά κρίσιμων τμημάτων

3.2 Ποσοτικοί δείκτες

Οι ποσοτικοί δείκτες εκφράζουν το χρηματικό κόστος των βλαβών στο δίκτυο (δομικό κόστος) και των καθυστερήσεων που προκαλούνται από αυτές (κυκλοφοριακό κόστος). Ο υπολογισμός του δομικού κόστους προϋποθέτει τον καθορισμό των πινάκων λόγου κόστους επισκευής που περιέχουν τους λόγους κόστους επισκευής για κάθε μία από τις τέσσερις στάθμες βλάβης. Ως λόγος κόστους επισκευής ορίζεται ο λόγος του κόστους επισκευής προς το συνολικό κόστος ανακατασκευής της κρίσιμης συνιστώσας. Ο πίνακας λόγου κόστους επισκευής εξαρτάται από την διαδικασία και τα υλικά επισκευής. Δεδομένου ότι συνιστώσες που ανήκουν στην ίδια κλάση επισκευάζονται με παρόμοιο τρόπο ο πίνακας αυτός ορίζεται ανά κλάση. Βάσει του πίνακα κόστους επισκευής και των πιθανοτήτων εμφάνισης κάθε στάθμης βλάβης για την κρίσιμη συνιστώσα i το εκτιμώμενο δομικό κόστος λόγω του σεισμικού σεναρίου k δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$SC_{k,m} = \sum_{i=1}^N TBC_i \cdot (RCR_1^i \cdot P_{DS1}^{i,k,m} + RCR_2^i \cdot P_{DS2}^{i,k,m} + RCR_3^i \cdot P_{DS3}^{i,k,m} + RCR_4^i \cdot P_{DS4}^{i,k,m} + RCR_4^i \cdot P_{DS4}^{i,k,m}) \quad (8)$$

όπου:

TBC_i : το συνολικό κόστος ανακατασκευής της κρίσιμης συνιστώσας i

$RCR_1^i, RCR_2^i, RCR_3^i, RCR_4^i$: οι λόγοι κόστους επισκευής που αντιστοιχούν σε DS 1 έως 4

$P_{DS}^{i,k,m}$: η πιθανότητα η κρίσιμη συνιστώσα i να είναι σε DS 1 έως 4 εξαιτίας του μέτρου έντασης του χάρτη m για το σεισμικό σενάριο k

M : ο συνολικός αριθμός των χαρτών κατανομής του μέτρου έντασης (ισούται με τον αριθμό των σεισμικών πηγών)

N : ο συνολικός αριθμός των κρίσιμων συνιστωσών του δικτύου

Θεωρώντας ότι οι M κατανομές του μέτρου έντασης ενός σεισμικού σεναρίου έχουν την ίδια πιθανότητα εμφάνισης, το εκτιμώμενο δομικό κόστος ενός σεισμικού σεναρίου δίνεται από τον μέσο όρο των M τιμών δομικού κόστους που υπολογίζονται για αυτό το σεισμικό σενάριο:

$$ESC_k = \frac{\sum_{m=1}^M SC_{k,m}}{M} \quad (9)$$

Το κυκλοφοριακό κόστος ενός κυκλοφοριακού σεναρίου (μιας δειγματοληψίας της προσομοίωσης Monte Carlo) είναι το πρόσθετο κόστος κατά τη διάρκεια όλης της περιόδου αποκατάστασης του σεναρίου αυτού και συνεπώς υπολογίζεται ως το άθροισμα των γινομένων “διάρκειας φάσης” και “πρόσθετου κυκλοφοριακού κόστους” όλων των φάσεων του κυκλοφοριακού σεναρίου:

$$TC_{k,m,n_{samp}} = \sum_{p=1}^{P_{k,m,n_{samp}}} EC_{k,m,n_{samp},p} \cdot t_{k,m,n_{samp},p} \quad (10)$$

όπου:

$t_{k,m,n_{samp},p}$: η διάρκεια της φάσης p του n_{samp} κυκλοφοριακού σεναρίου που προέκυψε από τη $m^{οστη}$ κατανομή μέτρου έντασης του σεισμικού σεναρίου k

$P_{k,m,n_{samp}}$: το πλήθος των φάσεων του n_{samp} κυκλοφοριακού σεναρίου που προέκυψε από τη $m^{οστη}$ κατανομή μέτρου έντασης του σεισμικού σεναρίου k

Τα $M \cdot N_{samp}$ κυκλοφοριακά κόστη που υπολογίζονται για το σύνολο των δειγματοληψιών Monte Carlo που αφορούν ένα σεισμικό σενάριο είναι ισοπίθανες εκτιμήσεις του κυκλοφοριακού κόστους. Συνεπώς το εκτιμώμενο κυκλοφοριακό κόστος ενός σεισμικού σεναρίου k δίδεται από τον μέσο όρο των $M \cdot N_{samp}$ δειγματοληψιών της προσομοίωσης Monte Carlo που αφορούν το σεισμικό σενάριο αυτό είναι:

$$ETC_k = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n_{samp}=1}^{N_{samp}} TC_{k,m,n_{samp}}}{M \cdot N_{samp}} \quad (11)$$

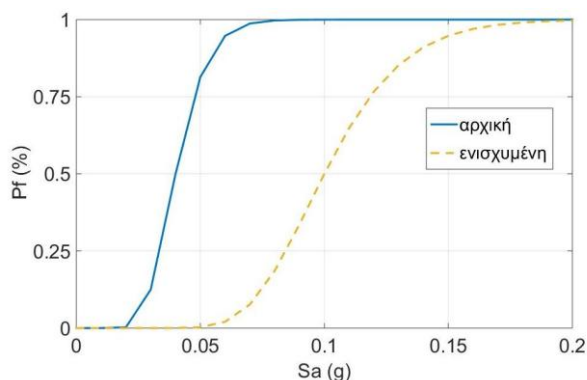
ενώ το συνολικό κόστος ενός σεισμικού σεναρίου κείται το άθροισμα του εκτιμώμενου δομικού και κυκλοφοριακού κόστους:

$$TNC_k = ESC_k + ETC_k \quad (12)$$

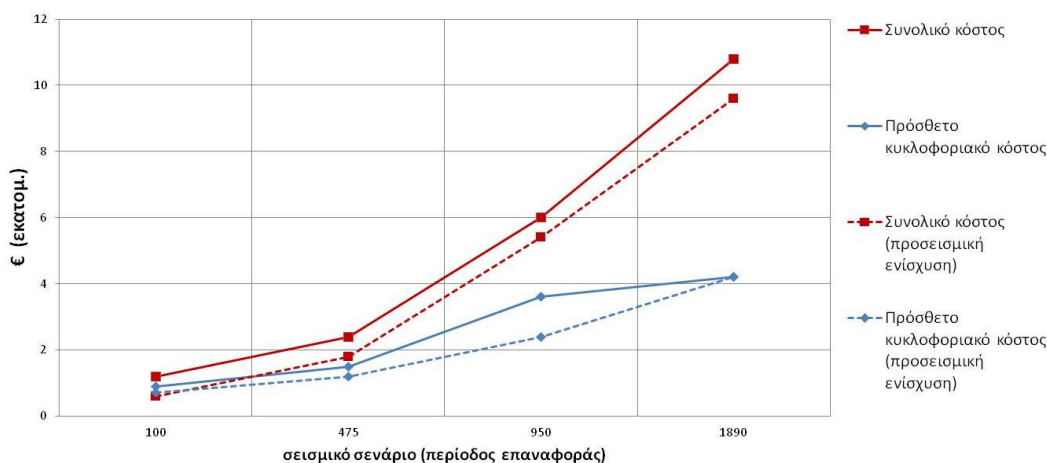
4. Βελτίωση της “αναταξιμότητας” δια του σχήματος ενίσχυσης

Η σεισμική διακινδύνευση ενός οδικού δικτύου μπορεί να μειωθεί (και αντίστοιχα να βελτιωθεί η “αναταξιμότητα” του) μέσω της ενίσχυσης των κρίσιμων συνιστωσών του [13],[17],[18]. Η ενίσχυση όλων των κρίσιμων συνιστωσών ενός δικτύου είναι οικονομικά ασύμφορη και πρακτικά αδύνατη. Συνεπώς, ανάλογα με τους διαθέσιμους πόρους πρέπει να επιλεγεί ένα κατάλληλο σχήμα

προσεισμικής ενίσχυσης του δικτύου που να περιλαμβάνει την ενίσχυση κατάλληλα επιλεγμένων κρίσιμων στοιχείων του [19]. Είναι προφανές ότι τα εναλλακτικά σχήματα ενίσχυσης που μπορεί να ακολουθηθούν είναι πολλά. Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποτίμηση των εναλλακτικών σχημάτων ενίσχυσης. Πιο συγκεκριμένα οι νέες (μειωμένες) καμπύλες τρωτότητας όλων των στοιχείων που ενισχύονται σύμφωνα με ένα σχήμα ενίσχυσης χρησιμοποιούνται για την αναθεώρηση της τρωτότητας (Σχήμα 4). Στη συνέχεια η μεθοδολογία επαναλαμβάνεται οι ποιοτικοί και ποσοτικοί δείκτες επανυπολογίζονται (Σχήμα 5).



Σχήμα 4: Ενδεικτικές καμπύλες τρωτότητας γέφυρας Ο/Σ πριν και μετά την ενίσχυση



Σχήμα 5: Διάγραμμα για τη λήψη αποφάσεων

5. Συμπεράσματα

Η εργασία αυτή παρουσιάζει μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία για την αποτίμηση των συνολικών απωλειών που προκύπτουν μετά από έναν ισχυρό σεισμό και σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με τις βλάβες του οδικού δικτύου. Για το σκοπό αυτό εισάγονται νέοι δείκτες ικανοί να περιγράψουν την έκταση των απωλειών αλλά και την χρονική εξέλιξη τους από την έλευση του σεισμού μέχρι και την πλήρη αποκατάσταση του δικτύου. Η χρονική εξέλιξη της κατάστασης του δικτύου κατά την περίοδο αποκατάστασής του συνυπολογίζεται με λεπτομερή τρόπο με την κυκλοφοριακή ανάλυση των διαδοχικών φάσεων στις οποίες αυτό μετέρχεται από την έλευση του σεισμού και μετά. Επίσης, η προσέγγιση που προτείνεται λαμβάνει υπόψη τις αβεβαιότητες στη σεισμική διέγερση, την απόκριση των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και την κυκλοφορία των οχημάτων καθώς συνδυάζει πιθανοτικά σεισμικά σενάρια, καμπύλες τρωτότητας και κυκλοφοριακά σενάρια που παράγονται μετά από προσομοίωση Monte Carlo. Η ίδια μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διαχείριση της σεισμικής διακινδύνευσης καθώς χρησιμοποιώντας τους δείκτες ως κριτήρια

αξιολόγησης εναλλακτικών τρόπων προσεισμικής ενίσχυσης είναι δυνατό να καθοριστεί το βέλτιστο σχήμα ενίσχυσης δηλαδή αυτό που οδηγεί στη μεγαλύτερη μείωση των συναρτώμενων επιπτώσεων.

6. Ευχαριστίες

Η ανωτέρω ολοκληρωμένη μεθοδολογία αποτελεί απότοκο του ερευνητικού προγράμματος “Real-time Seismic Risk” το οποίο χρηματοδοτήθηκε από την Γ.Γ.Ε.Τ. κατά το διάστημα 2014-15 στο πλαίσιο του πλαισίου «ΑΡΙΣΤΕΙΑ II». (www.retis-risk.eu). Στο πλαίσιο αυτό, οι συγγραφείς εκφράζουν τις θερμές τους ευχαριστίες τόσο στη χρηματοδοτική αρχή όσο και στους συντελεστές του προγράμματος κ.κ. Ανδρέα Κάππο (καθηγητή Α.Π.Θ. και City University London), Γεώργιο Σεργιάδη (καθηγητή Α.Π.Θ.), Μάγδα Πιτσιάβα (καθηγήτρια Α.Π.Θ.), Γεώργιο Μυλωνάκη (καθηγητή Παν. Πατρών), Δρ. Βασίλειο Μάργαρη (Δρ. Σεισμολογίας), Δρ. Νικόλαο Θεοδουλίδη (Πρ/νο Διεύθυνσης, Ι.Τ.Σ.Α.Κ.), Δρ. Παναγιώτη Πανέτσο (ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε.) καθώς και τους καθηγητές Alain Pecker (Geodynamique et Structure) και Saiid Saidi (University Nevada, Reno).

Βιβλιογραφία

- [1] K. Kawashima and I. Buckle, “Structural performance of bridges in the Tohoku-oki earthquake,” *Earthquake Spectra*, vol. 29, no. S1, pp. S315–S338, 2013.
- [2] Y. Shen, B. Gao, X. Yang, and S. Tao, “Seismic damage mechanism and dynamic deformation characteristic analysis of mountain tunnel after Wenchuan earthquake,” *Eng. Geol.*, vol. 180, pp. 85–98, 2014.
- [3] K. Mackie, J.-M. Wong, and B. Stojadinovic, “Bridge Damage and Loss Scenarios Calibrated by Schematic Design and Cost Estimation of Repairs,” *Earthq. Spectra*, vol. 27, no. 4, pp. 1127–1145, Nov. 2011.
- [4] A. Kiremidjian, J. Moore, Y. Y. Fan, O. Yazlali, N. Basoz, and M. Williams, “Seismic Risk Assessment of Transportation Network Systems,” *J. Earthq. Eng.*, vol. 11, no. 3, pp. 371–382, 2007.
- [5] Z. Lounis and T. P. McAllister, “Risk-Based Decision Making for Sustainable and Resilient Infrastructure Systems,” *J. Struct. Eng.*, p. F4016005, 2016.
- [6] N. Jayaram and J. Baker, “Efficient sampling and data reduction techniques for probabilistic seismic lifeline risk assessment,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 39, no. 10, pp. 1109–1131, 2010.
- [7] G. P. Cimellaro, A. Reinhorn, and M. Bruneau, “Framework for analytical quantification of disaster resilience,” *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 11, pp. 3639–3649, Nov. 2010.
- [8] Y. Dong and D. M. Frangopol, “Risk and resilience assessment of bridges under mainshock and aftershocks incorporating uncertainties,” *Eng. Struct.*, vol. 83, pp. 198–208, 2015.
- [9] P. Bocchini and D. M. Frangopol, “A probabilistic computational framework for bridge network optimal maintenance scheduling,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 96, no. 2, pp. 332–349, Feb. 2011.
- [10] B. G. Nielson and R. DesRoches, “Seismic fragility methodology for highway bridges using a component level approach,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 36, no. 6, pp. 823–839, 2007.
- [11] J. E. Padgett, R. DesRoches, and E. Nilsson, “Regional Seismic Risk Assessment of Bridge Network in Charleston, South Carolina,” *J. Earthq. Eng.*, vol. 14, pp. 918–933, 2010.

- [12] L. Chang, F. Peng, A. S. Elnashai, and B. F. Spencer, “Bridge Seismic Retrofit Program Planning to Maximize Post-Earthquake Transportation Network Capacity,” *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 75–88, 2012.
- [13] M. Shinozuka, Y. Murachi, X. Dong, Y. Zhou, and M. Orlikowski, “Effect of seismic retrofit of bridges on transportation networks,” *Earthq. Eng. Eng. Vib.*, pp. 35–49, 2003.
- [14] J. E. Padgett and R. DesRoches, “Bridge functionality relationships for improved seismic risk assesment of transportation networks,” *Earthq. Spectra*, vol. 23, no. 1, pp. 115–130, 2007.
- [15] P. Goodwin, “The Economic Costs of Road Traffic Congestion,” 2004.
- [16] L. Du and S. Peeta, “A Stochastic Optimization Model to Reduce Expected Post-Disaster Response Time Through Pre-Disaster Investment Decisions,” *Networks Spat. Econ.*, vol. 14, no. 2, pp. 271–295, Jan. 2014.
- [17] R. DesRoches, J. E. Padgett, and E. Nilsson, “Retrofitting Transportation Systems to Ensure Resiliency,” in *14th World Conference of Earthquake Engineering*, 2008.
- [18] Y. Zhou, S. Banerjee, and M. Shinozuka, “Socio-economic effect of seismic retrofit of bridges for highway transportation networks: a pilot study,” *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 6, no. 1–2, pp. 145–157, 2010.
- [19] Y. Dong, D. M. Frangopol, and D. Saydam, “Pre-Earthquake Multi-Objective Probabilistic Retrofit Optimization of Bridge Networks Based on Sustainability,” *J. Bridg. Eng.*, vol. 19, no. 6, Jun. 2014.