

Προσεισμική ενίσχυση των γεφυρών και των σηράγγων ενός οδικού δικτύου βάσει της συνεισφοράς τους στην αναταξιμότητα

Ιωάννης Κοιλανίτης¹, Αναστάσιος Σεξτός²

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η προσεισμική ενίσχυση των γεφυρών και των σηράγγων ενός οδικού δικτύου συμβάλλει καθοριστικά στην αναβάθμιση της αναταξιμότητάς του. Όμως, ο σχεδιασμός των απαιτούμενων επεμβάσεων ενέχει μεγάλη δυσκολία, η οποία σχετίζεται κυρίως με την επιλογή των στοιχείων που θα ενισχυθούν, καθώς η ενίσχυση όλων των γεφυρών και των σηράγγων ενός οδικού δικτύου είναι οικονομικά ασύμφορη. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία μεθοδολογία για την διαμόρφωση μιας ομάδας εναλλακτικών σχημάτων δομικής ενίσχυσης ενός οδικού δικτύου και την επιλογή του βέλτιστου εξ αυτών. Η μεθοδολογία στηρίζεται στην αρχική ιεράρχηση της συνεισφοράς κάθε στοιχείου του δικτύου στην αναταξιμότητά του. Βάσει της ιεράρχησης αυτής διαμορφώνεται η ομάδα των εναλλακτικών σχημάτων ενίσχυσης ενώ η επιλογή του βέλτιστου σχήματος γίνεται βάσει μίας ανάλυσης κόστους-οφέλους η οποία επαναλαμβάνεται για κάθε εναλλακτικό σχήμα. Στην εργασία περιλαμβάνεται και ανάλυση ευαισθησίας από την οποία προκύπτει ότι το προεξοφλητικό επιτόκιο και ο υπολειπόμενος χρόνος ζωής του δικτύου επηρεάζουν καθοριστικά την αποδοτικότητα των εναλλακτικών σχημάτων δομικής ενίσχυσης του δικτύου.

1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι δυσλειτουργίες που παρατηρήθηκαν σε οδικά δίκτυα μετά από ισχυρούς σεισμούς του πρόσφατου παρελθόντος οφειλόταν κυρίως σε δομικές αστοχίες γεφυρών και σηράγγων. Για αυτό στη συνέχεια τα στοιχεία αυτά ενός οδικού δικτύου (γέφυρες και σήραγγες) αναφέρονται ως κρίσιμες συνιστώσες (ΚΣ) του δικτύου. Η προσεισμική ενίσχυση των κρίσιμων συνιστωσών ενός οδικού δικτύου [1,2] μέσω δομικών επεμβάσεων όπως είναι η κατασκευή μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος στα βάθρα μιας γέφυρας συνεπάγεται, στην περίπτωση ενός μεταγενέστερου σεισμού, μικρότερης έκτασης βλάβης στις κρίσιμες συνιστώσες που ενισχύονται, σε σχέση με τις βλάβες που αυτές θα εμφάνιζαν εάν δεν είχαν ενισχυθεί. Έτσι, σε επίπεδο οδικού δικτύου, περιορίζονται τόσο οι συναρτώμενες άμεσες απώλειες, καθώς απαιτούνται λιγότερες επισκευές στις ενισχυμένες κρίσιμες συνιστώσες όσο και οι επακόλουθες έμμεσες απώλειες (οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές) [3,4], επειδή

¹ Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, giakila@yahoo.gr

² Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, asextos@civil.auth.gr

κλείνουν λιγότερα οδικά τμήματα και η επαναφορά μετά από σεισμό γίνεται γρηγορότερα [5,6].

Όμως, ο σχεδιασμός των απαιτούμενων επεμβάσεων ενέχει μεγάλη δυσκολία, η οποία σχετίζεται κυρίως με την επιλογή των κρίσιμων συνιστωσών που θα ενισχυθούν [7,8], καθώς η ενίσχυση του συνόλου των κρίσιμων συνιστωσών ενός οδικού δικτύου είναι οικονομικά ασύμφορη. Μια από τις πιο βασικές παραμέτρους που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον καθορισμό των προς ενίσχυση κρίσιμων συνιστωσών είναι η συναρτώμενη μείωση των μελλοντικών σεισμικών απωλειών η οποία είναι και ο στόχος των προσεισμικών ενισχύσεων. Ο πιο αξιόπιστος τρόπος εκτίμησης της μείωσης αυτής είναι η αποτίμηση των (αναμενόμενων) σεισμικών απωλειών για το υφιστάμενο και το προς ενίσχυση δίκτυο με τη χρήση μίας μεθοδολογίας που συνεκτιμά την αύξηση του χρόνου που απαιτείται για την πραγματοποίηση μετακινήσεων καθώς και τη σταδιακή αποκατάσταση της κυκλοφορίας στο δίκτυο [9–11]. Δεδομένου ότι το πλήθος των συνδυασμών των εν δυνάμει ενισχυόμενων κρίσιμων συνιστωσών είναι ιδιαίτερα μεγάλο, η πιο πάνω διαδικασία συνεπάγεται ένα απαγορευτικό υπολογιστικό κόστος (ιδιαίτερα σε περιπτώσεις οδικών δικτύων πολλών κρίσιμων συνιστωσών). Επιπλέον, ο σχεδιασμός των προσεισμικών επεμβάσεων δυσχεραίνεται και από το γεγονός ότι το μεν κόστος υλοποίησης των επεμβάσεων θα πληρωθεί στο άμεσο μέλλον, το δε όφελος θα προκύψει στο απώτερο μέλλον με αποτέλεσμα τα αντίστοιχα χρηματικά ποσά να μην είναι νομισματικώς, άμεσα συγκρίσιμα.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων, στη παρούσα εργασία:

- α) εισάγεται ένας νέος δείκτης, ο *Δείκτης συνεισφοράς στην αναταξιμότητα (ΔΣΑ)*, που χρησιμοποιείται για την ιεράρχηση της προτεραιότητας ενίσχυσης των κρίσιμων και για τη διαμόρφωση μια ομάδας σεναρίων προσεισμικής ενίσχυσης του δικτύου που αναμένεται να οδηγήσουν σε αξιόλογη μείωση των σεισμικών απωλειών
- β) προτείνεται μέθοδος για την ανάλυση κόστους-οφέλους των εναλλακτικών σεναρίων προσεισμικής ενίσχυσης που διαμορφώνονται βάσει του παραπάνω δείκτη

Ο νέος δείκτης και η προτεινόμενη μέθοδος ανάλυσης κόστους-οφέλους ενσωματώνονται σε μία υφιστάμενη μεθοδολογία λεπτομερούς αποτίμησης των απωλειών λόγω δυσλειτουργίας του οδικού δικτύου μετά από έναν ισχυρό σεισμό [9].

2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Εκτίμηση της συνεισφοράς των κρίσιμων συνιστωσών στην αναταξιμότητα του οδικού δικτύου

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στην εργασία [9] περιλαμβάνει τον καθορισμό σταθμών σεισμικής επικινδυνότητας (σεισμικών σεναρίων με συγκεκριμένο ετήσιο ρυθμό επαναφοράς) και τη διακριτοποίηση των σεισμικών πηγών της περιοχής σε σεισμικά τμήματα. Κάθε συνδυασμός σεισμικού τμήματος και στάθμης σεισμικής επικινδυνότητας αντιστοιχίζεται σε μία πιθανή σεισμική διάρρηξη από την οποία παράγεται ένας σεισμικός χάρτης (χάρτης κατανομής του μέτρου έντασης). Έτσι, για K στάθμες σεισμικής επικινδυνότητας και L σεισμικά τμήματα παράγονται τελικά $K \times L$ σεισμικοί χάρτες. Για κάθε

έναν από τους χάρτες αυτούς δημιουργούνται S σενάρια κατανομής της βλάβης στο δίκτυο. Στη συνέχεια, βάσει των χρόνων αποκατάστασης των βλαβών κάθε κρίσιμης συνιστώσας, κάθε σενάριο βλάβης αναλύεται σε ένα πλήθος φάσεων αποκατάστασης που εν γένει δεν προκύπτει ίδιο για όλα τα σενάρια βλάβης. Έτσι, θεωρώντας ότι το σενάριο κατανομής βλάβης s που δημιουργήθηκε από το σεισμικό χάρτη k, l αναλύεται σε $P_{k,l,s}$ φάσεις αποκατάστασης ο συνολικός αριθμός των φάσεων αποκατάστασης είναι $\sum_k \sum_l \sum_s P_{k,l,s}$.

Με το πέρας κάθε φάσης αποκατάστασης, ολοκληρώνονται οι εργασίες επισκευής (αποκατάσταση) μίας ή περισσότερων κρίσιμων συνιστωσών με αποτέλεσμα την επαναλειτουργία των αντίστοιχων οδικών τμημάτων (των οδικών τμημάτων που επηρεάζονται λειτουργικά από τις βλάβες των κρίσιμων συνιστωσών αυτών). Δεδομένου ότι η επαναλειτουργία ενός οδικού τμήματος μπορεί να μην συνεπάγεται τη δημιουργία νέας, συντομότερης διαδρομής είναι πιθανόν οι οδηγοί να επιλέξουν να μην διέλθουν από το οδικό τμήμα αυτό. Επιπλέον είναι πιθανόν η διέλευση από ένα οδικό τμήμα που επαναλειτουργεί να είναι πρακτικά ανέφικτη λόγω βλαβών σε γειτονικά οδικά τμήματα.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, εισάγεται ο *Δείκτης συνεισφοράς στην αναταξιμότητα ΔΣΑ* που βασίζεται στην υπόθεση ότι η συνεισφορά του ανοίγματος (επαναφορά στην κυκλοφορία) μίας κρίσιμης συνιστώσας στην ανάταξη του οδικού δικτύου εκφράζεται από τον *φόρτο επαναφοράς (V^c)* δηλαδή, από τον κυκλοφοριακό φόρτο που θα διέλθει από αυτή αμέσως μετά την επαναλειτουργία της. Έτσι, εάν η κρίσιμη συνιστώσα i ανοίγει με το πέρας της φάσης αποκατάστασης p , ο φόρτος επαναφοράς της $V_{i,k,l,s,p}^c$ ισούται με τον φόρτο που διέρχεται από αυτήν κατά την αμέσως επόμενη φάση αποκατάστασης, $V_{i,k,l,s,p+1}$, όπως αυτός υπολογίζεται από τον αντίστοιχο καταμερισμό της κυκλοφορίας. Αντίθετα, εάν η κρίσιμη συνιστώσα i δεν ανοίγει με το πέρας της φάσης αποκατάστασης p ο φόρτος επαναφοράς της $V_{i,k,l,s,p}^c$ ορίζεται μηδενικός. Η τιμή του δείκτη *συνεισφοράς στην αναταξιμότητα* για την κρίσιμη συνιστώσα i , $\Delta\Sigma A_i$, υπολογίζεται ως το κανονικοποιημένο άθροισμα των φόρτων επαναφοράς που αντιστοιχούν στην κρίσιμη συνιστώσα i για το σύνολο των $\sum_k \sum_l \sum_s P_{k,l,s}$ φάσεων αποκατάστασης που δημιουργούνται κατά την εφαρμογή της αρχικής μεθοδολογίας:

$$\Delta\Sigma A_i = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^{P_{k,l,s}} V_{i,k,l,s,p}^c}{\sum_q \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^{P_{k,l,s}} V_{q,k,l,s,p}^c} \quad (1)$$

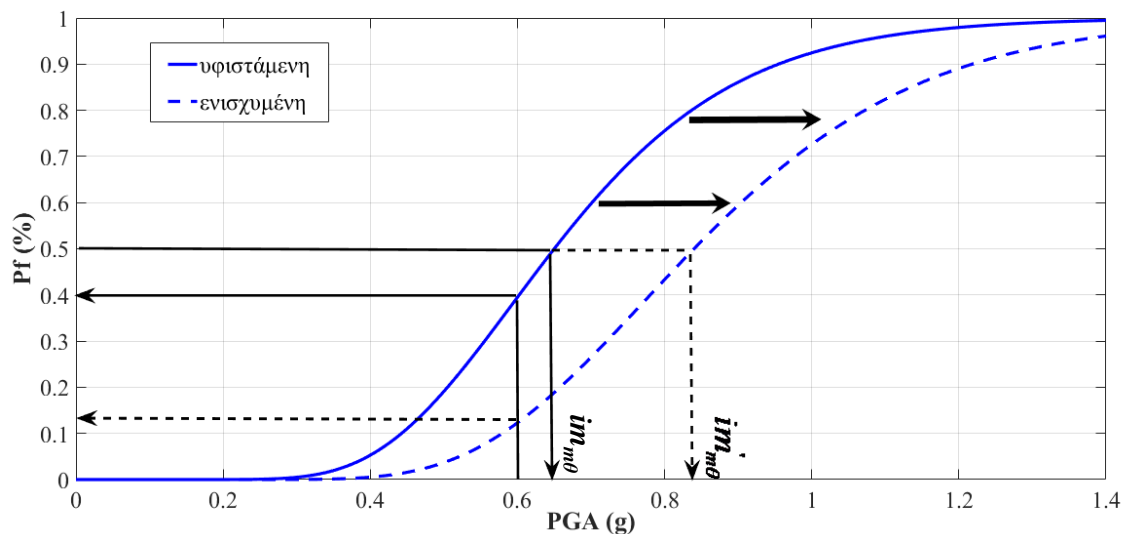
όπου:

$$V_{i,k,l,s,p}^c = \begin{cases} V_{i,k,l,s,p+1} & \text{εάν η ΚΣ } i \text{ ανοίγει με το πέρας της φάσης αποκατάστασης } p \\ & \text{που δημιουργείται για το σενάριο βλάβης } s \text{ του σεισμ. χάρτη } k,l \\ 0 & \text{εάν η ΚΣ } i \text{ είναι ανοιχτή κατά τη φάση αποκατάστασης } p \\ & \text{που δημιουργείται για το σενάριο βλάβης } s \text{ του σεισμ. χάρτη } k,l \\ & \text{ή εάν παραμένει κλειστή μετά το πέρας της} \end{cases}$$

Το άθροισμα των τιμών του ΔΣΑ για τις I κρίσιμες συνιστώσες του δικτύου ισούται με 1 ($\sum_i \Delta \Sigma_i = 1$) με τις κρίσιμες συνιστώσες που συνδέονται με την διέλευση περισσότερων οχημάτων αμέσως μετά την επαναλειτουργία τους να έχουν μεγαλύτερες τιμές ΔΣΑ. Συνεπώς, η δομική ενίσχυση των συνιστωσών αυτών συμβάλλει καθοριστικά στην βελτίωση των χρόνων μετακίνησης στο δίκτυο και κατ' επέκταση στην αναταξιμότητά του.

2.2 Καμπυλες τρωτότητας ενισχυμένων κρίσιμων συνιστωσών

Η δομική ενίσχυση μιας κρίσιμης συνιστώσας σε όρους τρωτότητας εκφράζεται από την αύξηση της διαμέσου τιμής των σεισμικών εντάσεων που προκαλούν υπέρβαση μιας στάθμης βλάβης θ (παράμετρος $im_{m\theta}$). Πρακτικά αυτό σημαίνει μετατόπιση της αντίστοιχης καμπύλης τρωτότητας προς τα δεξιά και αντίστοιχη μείωση της πιθανότητας υπέρβασης της στάθμης βλάβης θ , $P(DS \geq DS_{\theta}/IM)$, για κάθε τιμή του μέτρου σεισμικής έντασης IM . Στο Σχήμα 1 φαίνεται η επιρροή της δομικής ενίσχυσης μιας κρίσιμης συνιστώσας i στην διάμεσο τιμή του μέτρου σεισμικής έντασης και στη μορφή μίας καμπύλης τρωτότητας που αντιστοιχεί σε στάθμη βλάβης θ . Φυσικά αντίστοιχη είναι η επιρροή της ενίσχυσης και στις καμπύλες τρωτότητας που αντιστοιχούν στις υπόλοιπες πιθανές στάθμες βλάβης της κρίσιμης συνιστώσας i . Κατά συνέπεια η πιθανότητα εμφάνισης της στάθμης βλάβης θ στην κρίσιμη συνιστώσα i και οι αναμενόμενες άμεσες και έμμεσες συνέπειες ενός σεισμού στο οδικό δίκτυο μειώνονται.



Σχήμα 1: Επιρροή της προσεισμικής ενίσχυσης σε μια τυπική καμπύλη τρωτότητας

2.3 Ανάλυση κόστους-οφέλους εναλλακτικών σεναρίων προσεισμικής ενίσχυσης

Κάθε εναλλακτικό σενάριο προσεισμικής ενίσχυσης συνεπάγεται μία μείωση των άμεσων και έμμεσων απωλειών του δικτύου από μελλοντικούς σεισμούς, η οποία ουσιαστικά είναι το όφελος που προκύπτει από την υιοθέτηση του σεναρίου αυτού, αλλά και ένα κόστος υλοποίησης.

Αποτελεσματικότερο μεταξύ των εναλλακτικών σχημάτων είναι αυτό που προσφέρει την καλύτερη σχέση κόστους-οφέλους. Βέβαια, ο υπολογισμός της σχέσης αυτής δεν είναι άμεσα εφικτός επειδή:

- το μεν κόστος υλοποίησης θα πληρωθεί στο άμεσο μέλλον, το δε όφελος θα προκύψει στο απώτερο μέλλον με αποτέλεσμα τα αντίστοιχα χρηματικά ποσά να μην είναι νομισματικός, άμεσα συγκρίσιμα
- η αβεβαιότητα στο μέγεθος και το πλήθος των μελλοντικών σεισμών που θα πλήξουν το οδικό δίκτυο συνεπάγεται και την αντίστοιχη αβεβαιότητα στο όφελος κάθε σεναρίου προσεισμικής ενίσχυσης
- στην εκτίμηση του οφέλους υπεισέρχεται και ο υπολειπόμενος χρόνος ζωής του δικτύου, καθώς για μεγαλύτερο υπολειπόμενο χρόνο ζωής δικτύου αναμένονται περισσότερα σεισμικά γεγονότα και άρα μεγαλύτερο όφελος

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα πιο πάνω ζητήματα που σχετίζονται με την αξιολόγηση των εναλλακτικών σεναρίων ενίσχυσης ενός οδικού δικτύου προτείνεται εδώ μία διαδικασία 7 βημάτων για την ανάλυση κόστους-οφέλους των εναλλακτικών σεναρίων ενίσχυσης που προκύπτουν σύμφωνα με την προηγούμενη ενότητα. Τα βήματα αυτής της διαδικασίας για ένα σενάριο προσεισμικής ενίσχυσης r , έχουν ως εξής:

Βήμα 1: Υπολογίζεται, ανά στάθμη σεισμικής επικινδυνότητας k (σεισμικό σενάριο με συγκεκριμένο ετήσιο ρυθμό υπέρβασης λ_k), το συνολικό σεισμικό κόστος του υφιστάμενου

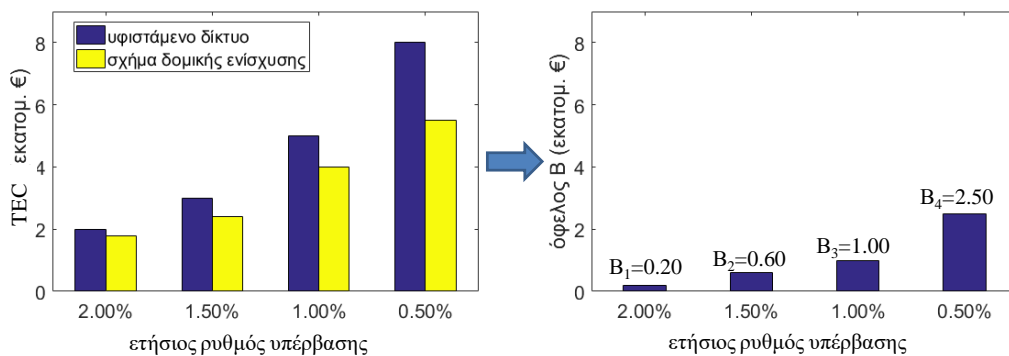
δικτύου TEC_k , δηλαδή το κόστος των άμεσων και έμμεσων σεισμικών απωλειών (βάσει της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στην εργασία [9])

Βήμα 2: Εκτιμάται το κόστος υλοποίησης του σεναρίου προσεισμικής ενίσχυσης r , C_r . Το κόστος αυτό καθορίζεται από πολλές παραμέτρους, οι οποίες πρέπει να εξετάζονται κατά περίπτωση (π.χ. κατασκευαστικές πρακτικές και διαθέσιμα μέσα της περιοχής).

Βήμα 3: Αναθεωρείται η διάμεσος τιμή και η λογαριθμική τυπική απόκλιση των καμπύλων τρωτότητας που αντιστοιχούν σε ενισχυόμενες κρίσιμες συνιστώσες (παραμέτροι $im_{m\theta}$ και β_{θ}) και υπολογίζεται, για κάθε στάθμη σεισμικής επικινδυνότητας k , το συνολικό σεισμικό κόστος του σεναρίου προσεισμικής ενίσχυσης r , $TEC_{r,k}$.

Βήμα 4: Υπολογίζεται το όφελος $B_{r,k}$ για κάθε στάθμη σεισμικής επικινδυνότητας k , ως η διάφορα συνολικού σεισμικού κόστους υφιστάμενου και ενισχυμένου δικτύου (σχήμα 2):

$$B_{r,k} = TEC_k - TEC_{r,k} \quad (2)$$



Σχήμα 2: Υπολογισμός οφέλους για κάθε στάθμη σεισμικής επικινδυνότητας

Βήμα 5: Υπολογίζεται ο ετήσιος ρυθμός εκδήλωσης ενός σεισμού μεγέθους μεγαλύτερου της οριακής τιμής m_{min} , για οποιαδήποτε από τις U συνολικά ενεργές σεισμικές πηγές της περιοχής μελέτης, λ_{tot} :

$$\lambda_{tot} = \sum_{u=1}^U \lambda^u (M > m_{min}) \quad (3)$$

όπου $\lambda^u (M > m_{min})$ είναι η ετήσιος ρυθμός σεισμικής διάρρηξης της σεισμικής πηγής u (γραμμική ή επιφανειακή πηγή) με μέγεθος σεισμού μεγαλύτερο της οριακής τιμής m_{min} (αποτελεί βασική σεισμολογική παράμετρο των συμβατικών μεθόδων ανάλυσης της σεισμικής επικινδυνότητας).

Βήμα 6: Εκτιμάται ο υπολειπόμενος χρόνος ζωής του δικτύου T_{RL} σε έτη. Χάριν απλοποίησης, θεωρείται ενιαίος υπολειπόμενος χρόνος ζωής για ολόκληρο το δίκτυο παρά το γεγονός ότι στην πραγματικότητα οι διάφορες κρίσιμες συνιστώσες (γέφυρες, άνω διαβάσεις ή σήραγγες),

ανάλογα με τον χρόνο και τον τρόπο κατασκευής τους, έχουν και διαφορετικό υπολειπόμενο χρόνο ζωής. Επίσης, γίνεται η υπόθεση ότι ο υπολειπόμενος χρόνος ζωής του δικτύου δεν επηρεάζεται από τη δομική ενίσχυση των κρίσιμων συνιστωσών του.

Βήμα 7: Γίνεται η υπόθεση ότι στην περίπτωση εκδήλωσης ενός σεισμού μεγέθους μεγαλύτερου του οριακού m_{min} το όφελος που προκύπτει μπορεί να λάβει μία από τις K τιμές οφέλους $\{B_1, B_2, \dots, B_K\}$ που υπολογίστηκαν στο 4^ο βήμα για τις K στάθμες σεισμικής επικινδυνότητας. Θεωρείται επίσης, ότι δεδομένης της εκδήλωσης σεισμού, η πιθανότητα το όφελος να ισούται με την τιμή B_k , προσδιορίζεται από τον λόγο του ετήσιου ρυθμού υπέρβασης της στάθμης σεισμικής επικινδυνότητας k , λ_k προς το άθροισμα του ρυθμού υπέρβασης των K σταθμών σεισμικής επικινδυνότητας:

$$p_k = \frac{\lambda_k}{\sum_{k=1}^K \lambda_k} \quad (4)$$

Συνεπώς το μέσο όφελος $\bar{B}_{r/E}$ από την εφαρμογή του σεναρίου ενίσχυσης r στην περίπτωση εκδήλωσης ενός σεισμού υπολογίζεται ως:

$$\bar{B}_{r/E} = \sum_{k=1}^K (p_k \cdot B_{r,k}) \quad (5)$$

Δεδομένου του ετήσιου ρυθμού εκδήλωσης ενός σεισμού μεγέθους μεγαλύτερου της οριακής τιμής m_{min} , για οποιαδήποτε από τις U συνολικά ενεργές σεισμικές πηγές της περιοχής μελέτης, λ_{tot} το μέσο ετήσιο όφελος από την εφαρμογή του σεναρίου ενίσχυσης r είναι :

$$\bar{B}_r = \lambda_{tot} \cdot \bar{B}_{r/E} \quad (6)$$

Το όφελος για το σύνολο του υπολειπόμενου χρόνου ζωής του δικτύου υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τα έτη του υπολειπόμενου χρόνου ζωής T_{RL} και το προεξοφλητικό επιτόκιο (*discount rate*) ν . Το προεξοφλητικό επιτόκιο είναι το επιτόκιο με το οποίο η αξία του μελλοντικού οφέλους αποτιμάται σε παρούσα αξία και μεταξύ άλλων εξαρτάται από την οικονομική αβεβαιότητα, τις προσδοκίες για τον πληθωρισμό, τις διαφορές στο επιτόκιο δανειστή και δανειζόμενου. Ο υπολειπόμενος χρόνος ζωής του δικτύου εξαρτάται κυρίως από τη φυσική φθορά και την φθορά λόγω χρήσης των συνιστωσών του οδικού δικτύου καθώς και από τις προοπτικές ανάπτυξης και τον συγκοινωνιακό σχεδιασμό της υπό μελέτη περιοχής. Δεδομένου του μέσου ετήσιου οφέλους \bar{B}_r ενός σεναρίου ενίσχυσης το *συνολικό όφελος* υπολογίζεται βάσει της προσέγγισης των Venkittaraman και Banerjee [12]:

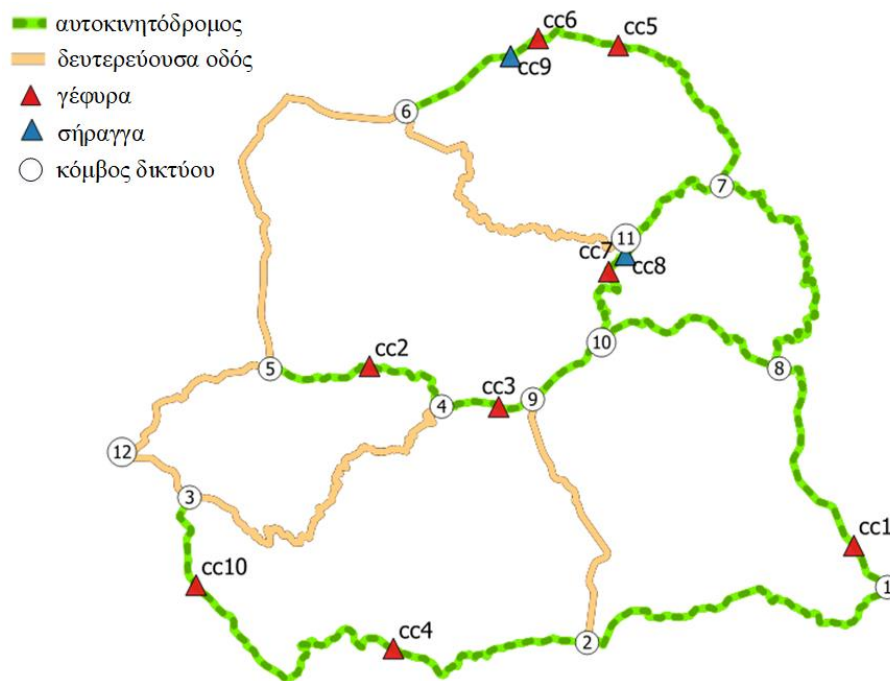
$$TB_r = \bar{B}_r \cdot \frac{(1+\nu)^{T_{RL}} - 1}{\nu \cdot (1+\nu)^{T_{RL}}} \quad (7)$$

Το καθαρό συνολικό όφελος EPV_r από την εφαρμογή του σεναρίου r είναι εκτιμώμενο όφελος μείον το κόστος εφαρμογής του:

$$EPV_r = TB_r - C_r \quad (8)$$

3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Στην ενότητα αυτή γίνεται παραμετρική διερεύνηση της επιρροής του προεξοφλητικού επιτοκίου και του υπολειπόμενου χρόνου ζωής στην επιλογή του βέλτιστου σχήματος ενίσχυσης ενός υποθετικού οδικού δικτύου που περιλαμβάνει 9 κρίσιμες συνιστώσες (σχήμα 3). Εξετάζονται δύο εναλλακτικά σεναρία ενίσχυσης. Το πρώτο σενάριο (σενάριο ενίσχυσης 1) περιλαμβάνει την τοποθέτηση μεταλλικού μανδύα στα βάθρα των κρίσιμων συνιστωσών cc2 και cc5 και την τοποθέτηση ελαστομεταλλικών εφεδράνων στην κρίσιμη συνιστώσα cc7. Το δεύτερο σενάριο (σενάριο ενίσχυσης 2) περιλαμβάνει την τοποθέτηση μεταλλικού μανδύα στα βάθρα των κρίσιμων συνιστωσών cc2 και cc6.



Σχήμα 3: Συνδεσμολογία, θέσεις κρίσιμων συνιστωσών και κατηγορία οδών (αυτοκινητόδρομος ή δευτερεύουσα οδός) για το υποθετικό οδικό δίκτυο

Το κόστος υλοποίησης του σεναρίου ενίσχυσης 1 (περιλαμβάνει 3 ενισχυόμενες κρίσιμες συνιστώσες) λαμβάνεται 5.5 εκατομ. ευρώ, ενώ το κόστος υλοποίησης του σεναρίου δομικής ενίσχυσης 2 (περιλαμβάνει 2 ενισχυόμενες κρίσιμες συνιστώσες) λαμβάνεται 0.9 εκατομ. ευρώ. Ο υπολογισμός του καθαρού συνολικού οφέλους των δύο εξεταζόμενων σεναρίων ενίσχυσης έγινε για τέσσερις διαφορετικούς συνδυασμούς προεξοφλητικού επιτοκίου-υπολειπόμενου χρόνου ζωής δικτύου οι οποίοι προέκυψαν θεωρώντας δύο πιθανές τιμές για κάθε μία από τις

δύο αυτές παραμέτρους της ανάλυσης (2% και 6.5% για το προεξοφλητικό επιτόκιο και 50έτη και 100έτη για τον υπολειπόμενο χρόνο ζωής του δικτύου).

Στον Πίνακα 1 δίνεται το συνολικό σεισμικό κόστος ανά στάθμη σεισμικής επικινδυνότητας (αναθεώρηση της τρωτότητας και νέα ανάλυση για κάθε σενάριο ενίσχυσης), το όφελος ανά στάθμη σεισμικής επικινδυνότητας (σχέση 2) και το μέσο ετήσιο όφελος (σχέσεις 4, 5 και 6) των δύο αυτών εναλλακτικών σεναρίων ενίσχυσης του οδικού δικτύου.

Πίνακας 1: Συνολικό σεισμικό κόστος ανά στάθμη σεισμικής επικινδυνότητας, όφελος ανά στάθμη σεισμικής επικινδυνότητας και μέσο ετήσιο όφελος δύο εναλλακτικών σεναρίων ενίσχυσης του οδικού δικτύου

	Συνολικό σεισμικό κόστος (εκατομ. ευρώ)				Όφελος $B_{r,k}$ (εκατομ. ευρώ)				Μέσο ετήσιο όφελος
	500 έτη	1000 έτη	1500 έτη	2000 έτη	500 έτη	1000 έτη	1500 έτη	2000 έτη	
σενάριο ενίσχ. 1	72.49	140.13	175.62	209.89	8.77	5.05	13.28	10.13	0.315
σενάριο ενίσχ. 2	75.03	143.74	183.25	213.66	6.22	1.44	5.65	6.37	0.180

Στον Πίνακα 2 δίνεται το καθαρό συνολικό όφελος των δύο σεναρίων δομικής ενίσχυσης για τους εξής τέσσερις συνδυασμούς προεξοφλητικού επιτοκίου-υπολειπόμενου χρόνου ζωής δικτύου: 2%-50έτη, 6.5%-50έτη, 2%-100έτη και 6.5%-100έτη. Παρατηρείται ότι για τον 1^ο και 3^ο συνδυασμό το σχήμα ενίσχυσης 1 έχει μεγαλύτερο καθαρό συνολικό όφελος του σχήματος ενίσχυσης 2 με καθαρό συνολικό όφελος 6.91 εκατομμύρια ευρώ έναντι 4.96 εκατομμυρίων ευρώ και 10.59 εκατομμύρια ευρώ έναντι 7.06 εκατομμυρίων ευρώ, αντίστοιχα. Αντίθετα για τον 2^ο και 4^ο συνδυασμό το καθαρό συνολικό όφελος του σχήματος ενίσχυσης 2 είναι μεγαλύτερο. Η διαφοροποίηση του σχήματος με το μεγαλύτερο συνολικό όφελος για διαφορετικούς συνδυασμούς προεξοφλητικού επιτοκίου-υπολειπόμενου χρόνου ζωής σημαίνει ότι οι δύο αυτές παράμετροι της ανάλυσης κόστους-οφέλους είναι καθοριστικές στην επιλογή του βέλτιστου σεναρίου ενίσχυσης (σενάριο ενίσχυσης με το μεγαλύτερο καθαρό συνολικό όφελος στην περίπτωση συνεξέτασης πολλών εναλλακτικών σεναρίων).

Πίνακας 2: Παραμετρική διερεύνηση ανάλυσης κόστους-οφέλους δύο εναλλακτικών σεναρίων δομικής ενίσχυσης

προεξοφλητικό επιτόκιο (%)	υπολειπόμενος χρόνος ζωής δικτύου (έτη)	καθαρό συνολικό όφελος (εκατομ. ευρώ)	
		Σχήμα ενίσχυσης 1	Σχήμα ενίσχυσης 2
2	50	6.91	4.96
6.5	50	1.64	1.95
2	100	10.59	7.06
6.5	100	1.84	2.06

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εισάγεται ένα νέος δείκτης για την ιεράρχηση της προτεραιότητας ενίσχυσης των γεφυρών και των σηράγγων ενός δικτύου και προτείνεται μέθοδος για την ανάλυση κόστους-οφέλους εναλλακτικών σεναρίων ενίσχυσης του δικτύου. Η ενσωμάτωση του νέου δείκτη και της προτεινόμενης μεθόδου ανάλυσης κόστους-οφέλους σε μια υφιστάμενη μεθοδολογία λεπτομερούς αποτίμησης των απωλειών λόγω δυσλειτουργίας του οδικού δικτύου μετά από έναν ισχυρό σεισμό επιτρέπει την βέλτιστη αξιοποίηση των χρηματικών πόρων που είναι διαθέσιμοι για την προσεισμική δομική ενίσχυση του δικτύου. Η επιλογή του αποδοτικότερου σεναρίου ενίσχυσης μεταξύ μιας ομάδας εναλλακτικών σεναρίων επηρεάζεται καθοριστικά τόσο από το κόστος υλοποίησης καθενός από αυτά όσο και από τον υπολειπόμενο χρόνος ζωής του δικτύου. Συνεπώς απαραίτητη προϋπόθεση για την ακριβή ανάλυση κόστους-οφέλους είναι ο ακριβής προσδιορισμός του προεξοφλητικού επιτοκίου και του υπολειπόμενου χρόνου ζωής βάσει της διερεύνησης των οικονομικών προοπτικών της περιοχής μελέτης και της λεπτομερούς αποτίμησης της φθοράς των συνιστών του δικτύου (φυσικής φθοράς και φθοράς λόγω χρήσης), αντίστοιχα.

5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Shinozuka M, Murachi Y, Dong X, Zhou Y, Orlikowski M. Effect of seismic retrofit of bridges on transportation networks. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 2003; **2**(2): 169–179. DOI: 10.1007/s11803-003-0001-0.
2. Padgett JE. Seismic Vulnerability Assessment of Retrofitted Bridges Using Probabilistic Methods. 2007.
3. Zhou Y, Banerjee S, Shinozuka M. Socio-economic effect of seismic retrofit of bridges for highway transportation networks: a pilot study. *Structure and Infrastructure Engineering* 2010; **6**(1–2): 145–157. DOI: 10.1080/15732470802663862.
4. Dong Y, Frangopol DM, Saydam D. Sustainability of Highway Bridge Networks Under Seismic Hazard. *Journal of Earthquake Engineering* 2014; **18**(1): 41–66. DOI: 10.1080/13632469.2013.841600.
5. Cimellaro GP, Reinhorn AM, Bruneau M. Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering Structures* 2010; **32**(11): 3639–3649. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.08.008.
6. Lounis Z, McAllister TP. Risk-Based Decision Making for Sustainable and Resilient Infrastructure Systems. *Journal of Structural Engineering* 2016; **142**(9): F4016005. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001545.
7. Rokneddin K, Ghosh J, Dueñas-Osorio L, Padgett JE. Bridge retrofit prioritisation for ageing transportation networks subject to seismic hazards. *Structure and Infrastructure Engineering* 2013; **9**(10): 1050–1066. DOI: 10.1080/15732479.2011.654230.
8. Peeta S, Sibel Salman F, Gunnec D, Viswanath K. Pre-disaster investment decisions for strengthening a highway network. *Computers & Operations Research* 2010; **37**(10): 1708–1719. DOI: 10.1016/j.cor.2009.12.006.
9. Kilanitis I, Sextos A. Integrated seismic risk and resilience assessment of roadway networks in earthquake prone areas. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2019; **17**(1): 181–210. DOI: 10.1007/s10518-018-0457-y.
10. Werner SD, Taylor C, Cho S, Lavoie JP, Huyck C, Eitzel C, et al. *Redars 2: Methodology Software For And Seismic Risk Analysis Of Highway Systems (MCEER-06-SP08)*. Buffalo, NY, United States: 2006.
11. Alipour A, Shafei B. Seismic Resilience of Transportation Networks with Deteriorating Components. *Journal of Structural Engineering* 2016; **142**(8). DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001399.
12. Venkittaraman A, Banerjee S. Enhancing resilience of highway bridges through seismic retrofit. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2014; **43**(8): 1173–1179. DOI: 10.1002/eqe.