

**Αποτίμηση μακροχρόνιας κόπωσης λόγω ανέμου για τις μεταλλικές κατασκευές  
στήριξης των πινακίδων σήμανσης της Εγνατίας Οδού**

**Ακριβή Χατζηδάκη**  
Υποψήφια Διδάκτορας  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ  
Αθήνα, Ελλάδα  
e-mail: [chatzidaki.akrivi@gmail.com](mailto:chatzidaki.akrivi@gmail.com)

**Αικατερίνη Νταϊφώτη**  
Υποψήφια Διδάκτορας  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ  
Αθήνα, Ελλάδα  
e-mail: [ntaifotik@gmail.com](mailto:ntaifotik@gmail.com)

**Δημήτριος Β. Μπιλιώνης**  
Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ  
Environmental Reliability & Risk Analysis  
(ERRA)  
Λεωφ. Συγγρού 67 & Ζαν Μωρεάς 40,  
Αθήνα, TK 11745, Ελλάδα  
e-mail: [d.bilionis@erra.gr](mailto:d.bilionis@erra.gr)

**Χάρης Ι. Γαντές**  
Καθηγητής  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ  
Αθήνα, Ελλάδα  
e-mail: [chgantes@central.ntua.gr](mailto:chgantes@central.ntua.gr)

**Δημήτρης Βαμβάτσικος**  
Αναπληρωτής Καθηγητής  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ  
Αθήνα, Ελλάδα  
e-mail: [divamva@mail.ntua.gr](mailto:divamva@mail.ntua.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Προτείνεται μεθοδολογία για την αποτίμηση της μακροχρόνιας συσσώρευσης βλάβης λόγω κόπωσης από ανεμοφόρτιση για τις μεταλλικές κατασκευές στήριξης των πινακίδων σήμανσης αυτοκινητοδρόμων, με εφαρμογή στην Εγνατία Οδό. Οι κατασκευές αυτές συνήθως είναι μορφής T, Γ ή Π και αποτελούνται από ένα ή δύο υποστυλώματα και μία οριζόντια δοκό η οποία φέρει την πινακίδα σήμανσης. Κατά τη διάρκεια ζωής τους, εκτίθενται στις περιβαλλοντικές συνθήκες με αποτέλεσμα να κινδυνεύουν από διάβρωση, ενώ το κρίσιμότερο φορτίο για αυτές είναι ο άνεμος που τις καταπονεί σε κόπωση λόγω της δυναμικής του φύσης. Για το σκοπό αυτό υπολογίζεται η συσσώρευση βλάβης λόγω κόπωσης στις κρίσιμες συνδέσεις των μεταλλικών κατασκευών για 10λεπτες φορτίσεις ανέμου, λαμβάνοντας υπόψη και το ενδεχόμενο της διάβρωσής τους. Η συσσώρευση βλάβης που προκύπτει συνδυάζεται με 10λεπτες χρονοϊστορίες ανέμου με περίοδο επαναφοράς που είναι συμβατή με την μακροπρόθεσμη καιρική επικινδυνότητα της θέσης στην οποία βρίσκεται κάθε κατασκευή και υπολογίζεται για εναλλακτικά σενάρια κλιματικής αλλαγής. Στόχος είναι να εκτιμηθεί η συσσώρευση βλάβης στις κρίσιμες συνδέσεις των κατασκευών στήριξης των πινακίδων σήμανσης κατά τη διάρκεια ζωής τους. Η αναπτυσσόμενη μεθοδολογία επιτρέπει τη μακροπρόθεσμη εκτίμηση της διακινδύνευσης λόγω κόπωσης για ένα σύνολο χωρικά καταναμημένων κατασκευών, και ενσωματώνεται μέσα σε εργαλείο που στοχεύει να διευκολύνει τους διαχειριστές του αυτοκινητοδρόμου στην άμεση εκτίμηση της κατάστασης των κρίσιμων κατασκευών ώστε να μπορούν να ιεραρχήσουν αποτελεσματικά τις επιθεωρήσεις τους.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

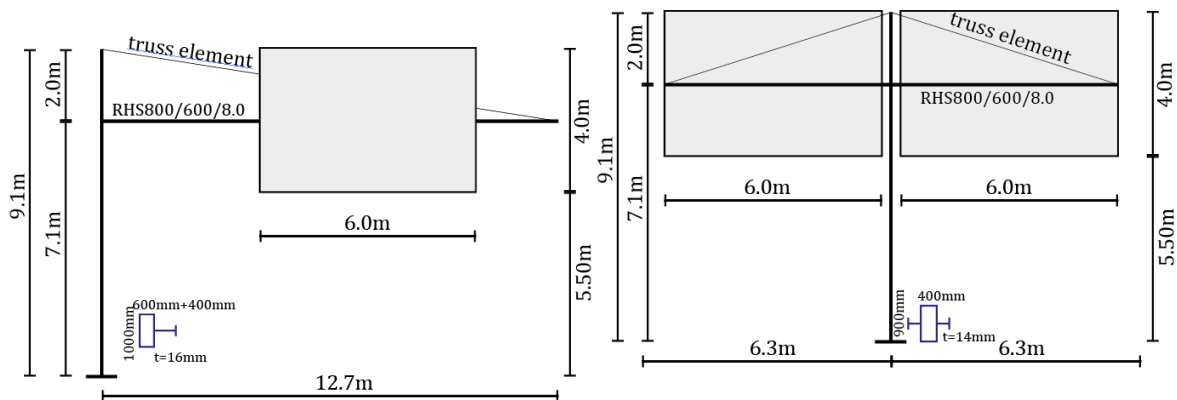
Μία από τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι διαχειριστές των σύγχρονων αυτοκινητοδρόμων είναι η ασφαλής λειτουργία καθώς και η γρήγορη εκτίμηση της κατάστασης των κρίσιμων κατασκευών τόσο σε καθημερινή βάση όσο και μετά από κάποιο καταστροφικό συμβάν. Στα σύγχρονα οδικά δίκτυα συναντώνται πολλές μεταλλικές κατασκευές στήριξης πινακίδων σήμανσης, η αστοχία των οποίων μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές συνέπειες. Κύρια φόρτιση για αυτές τις κατασκευές είναι ο άνεμος, αφού αφενός μπορεί να οδηγήσει στην αστοχία τους σε περίπτωση ακραίων τιμών, ενώ λόγω της εναλλασσόμενης φύσης τις καταπονεί και σε κόπωση με αποτέλεσμα, ιδίως για τις συνδέσεις, να αποτελεί την κύρια μορφή αστοχίας. Για το λόγο αυτό, πολλοί ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στην εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας των μεταλλικών κατασκευών στήριξης πινακίδων σήμανσης υπό ακραία φορτία ανέμου (π.χ., [1-3]) καθώς και στην εκτίμηση της κόπωσης λόγω του ανέμου αξιοποιώντας μετρήσεις από μετεωρολογικούς σταθμούς ή/και τυποποιημένα φάσματα ανέμου για την εκτίμηση των φορτίων που δρουν κατά τη διάρκεια ζωής της κατασκευής (π.χ., [4-6]). Ωστόσο η εκτίμηση της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στα φορτία του ανέμου και στη συνεπαγόμενη κόπωση των κατασκευών στήριξης πινακίδων παραμένει πρόκληση. Λαμβάνοντας μάλιστα υπόψη ότι οι κατασκευές εκτίθενται σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες, ιδίως λόγω της παρουσίας χλωριόντων σε παραθαλάσσια περιβάλλοντα ή περιοχές αποπάγωσης, θα πρέπει να συνυπολογίζεται και το ενδεχόμενο της διάβρωσης που μπορεί να μειώσει σημαντικά τη διάρκεια ζωής τους.

Για το σκοπό αυτό προτείνεται μεθοδολογία για την εκτίμηση της μακροχρόνιας συσσώρευσης βλάβης λόγω κόπωσης στις συνδέσεις των μεταλλικών κατασκευών στήριξης πινακίδων σήμανσης υπό την επίδραση της κλιματικής αλλαγής, σε περίπτωση διάβρωσης και μη. Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής των κατασκευών αυτών, βοηθώντας έτσι τους διαχειριστές του αυτοκινητόδρομου στην εκτίμηση της κατάστασης τους καθώς και στην έγκαιρη απόκριση για πρόληψη της αστοχίας λόγω κόπωσης. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται ενδεικτικά για την εκτίμηση της συσσώρευσης βλάβης λόγω κόπωσης στις μεταλλικές κατασκευές στήριξης πινακίδων σήμανσης του τμήματος Μέτσοβο-Παναγιά της Εγνατίας Οδού.

## 2. ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΘΕΣΗΣ

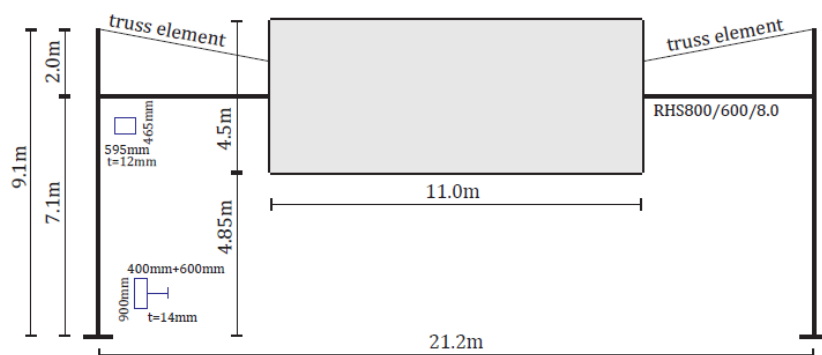
Οι μεταλλικές κατασκευές στήριξης πινακίδων σήμανσης κατατάσσονται κυρίως σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τη μορφή τους, δηλαδή στις κατασκευές μορφής Γ, Π και Τ. Στην κατηγορία Γ κατατάσσονται εκείνες που έχουν τη μορφή μονόπλευρου προβόλου (Σχήμα 1α), στην Τ εκείνες με μορφή αμφίπλευρου προβόλου (Σχήμα 1β) ενώ στην Π εκείνες με πλαισιακή μορφή (Σχήμα 1γ). Οι κατασκευές αυτές για το τμήμα Μέτσοβο-Παναγιά της Εγνατίας Οδού φαίνονται στο Σχήμα 2, και είναι κατασκευασμένες από χάλυβα S275 ενώ αποτελούνται από κοίλες ορθογωνικές διατομές. Για κάθε μία από τις τρεις κατηγορίες, επιλέγεται μία χαρακτηριστική κατασκευή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, και αναλύεται ακολουθώντας τη μεθοδολογία των Ntaifoti et al. [7] ώστε να προσδιοριστεί η συσσώρευση βλάβης για 10λεπτες φορτίσεις ανέμου για τα κρίσιμα στοιχεία των συνδέσεων της, δηλαδή της έδρασης των υποστυλωμάτων και της σύνδεσης του ζυγώματος με το υποστύλωμα. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται τα κρίσιμα

αγκύρια της έδρασης της κατασκευής μορφής Γ. Τα αποτελέσματα αξιοποιούνται για την εκτίμηση της μακροχρόνιας συσσώρευσης βλάβης λόγω κόπωσης για όλες τις κατασκευές της ίδιας τυπολογίας. Στις αναλύσεις χρησιμοποιείται διανυσματικό μέτρο έντασης [8] που λαμβάνει υπόψη τη μέση τιμή  $10\text{min}$  ταχύτητας ανέμου σε  $10\text{m}$  ύψος,  $u_{10}$ , καθώς και τη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου που σχηματίζεται με την κάθετη στην πινακίδα σήμανσης,  $\theta$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.



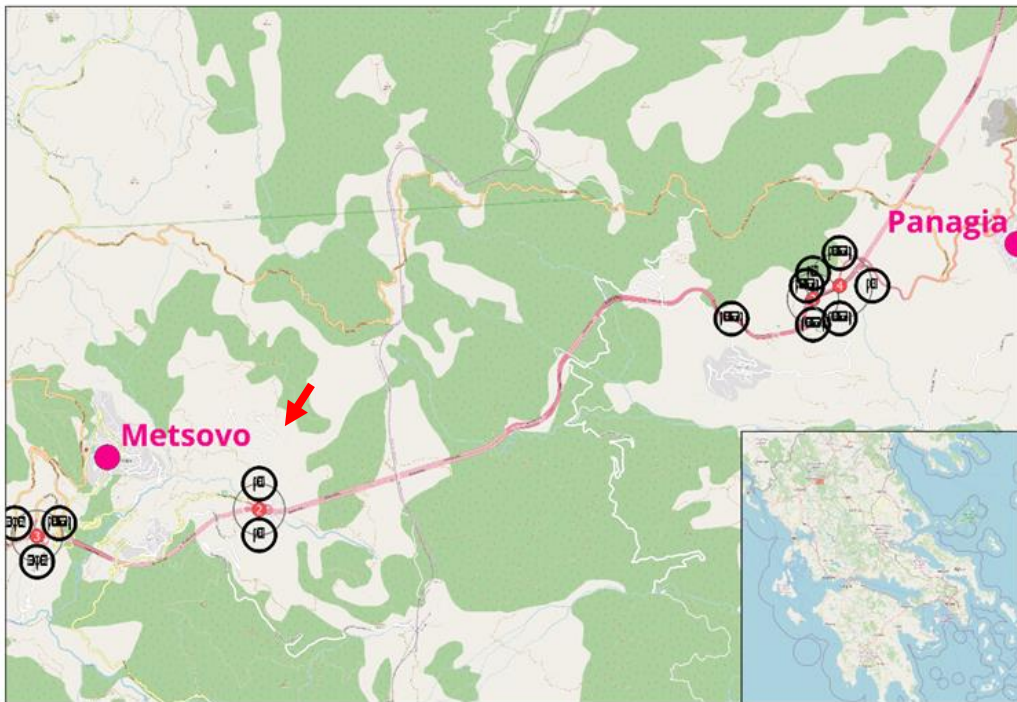
(α) γεωμετρία τυπικής πινακίδας μορφής Γ

(β) γεωμετρία τυπικής πινακίδας μορφής T

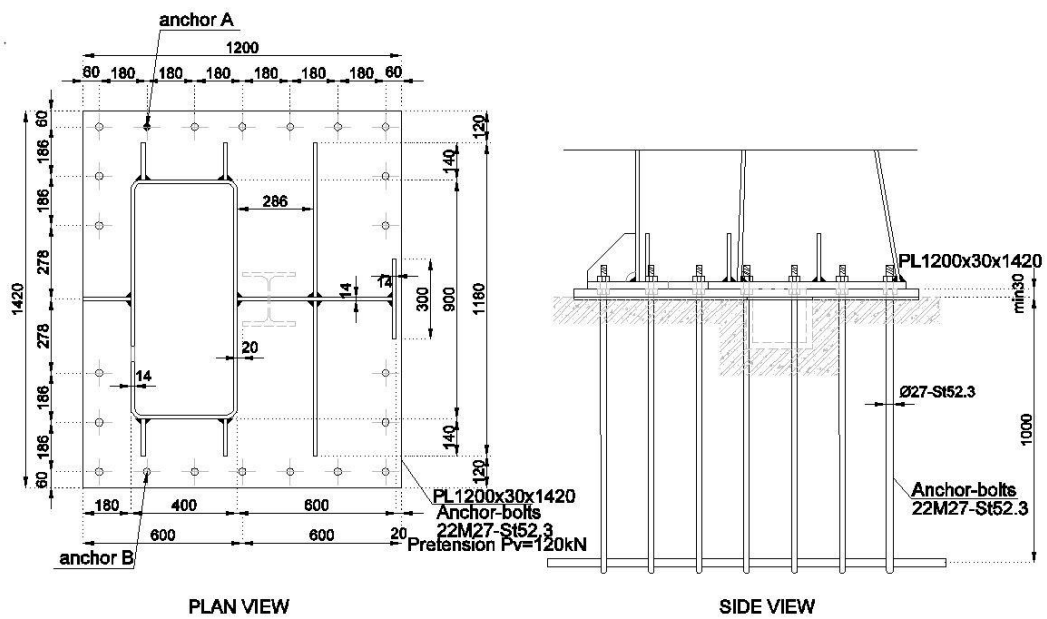


(γ) γεωμετρία τυπικής πινακίδας μορφής Π

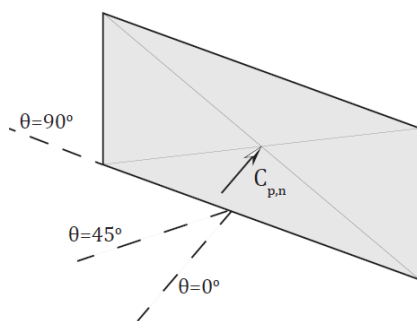
Σχήμα 1: Γεωμετρία εξεταζόμενων φορέων



Σχήμα 2: Θέση πινακίδων σήμανσης κατά μήκος του τμήματος Μέτσοβο-Παναγιά της Εγνατίας Οδού. Με κόκκινο βέλος υποδεικνύεται η εξεταζόμενη πινακίδα μορφής Γ.



Σχήμα 3: Λεπτομέρεια έδρασης του υποστρώματος πινακίδων μορφής Γ.

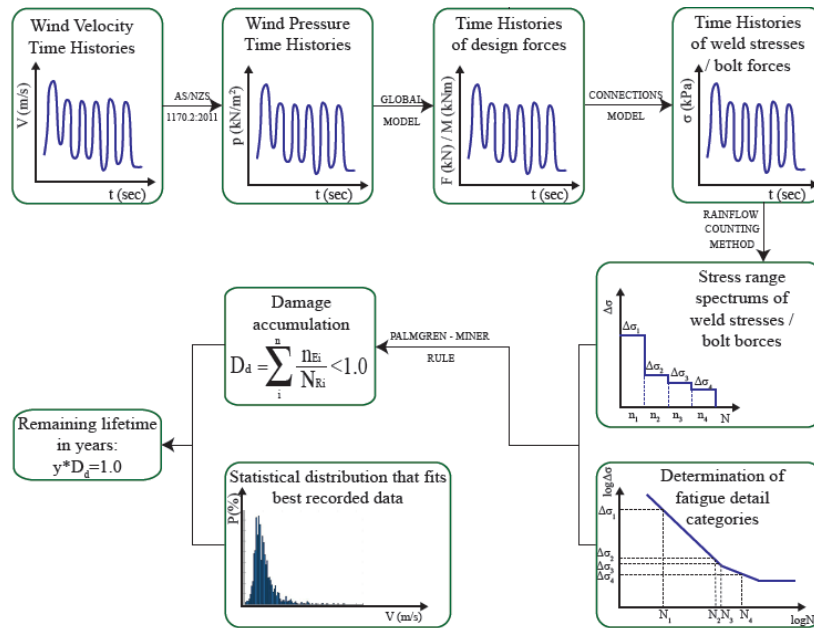


Σχήμα 4: Γωνία πρόσπτωσης ανέμου (από [7]).

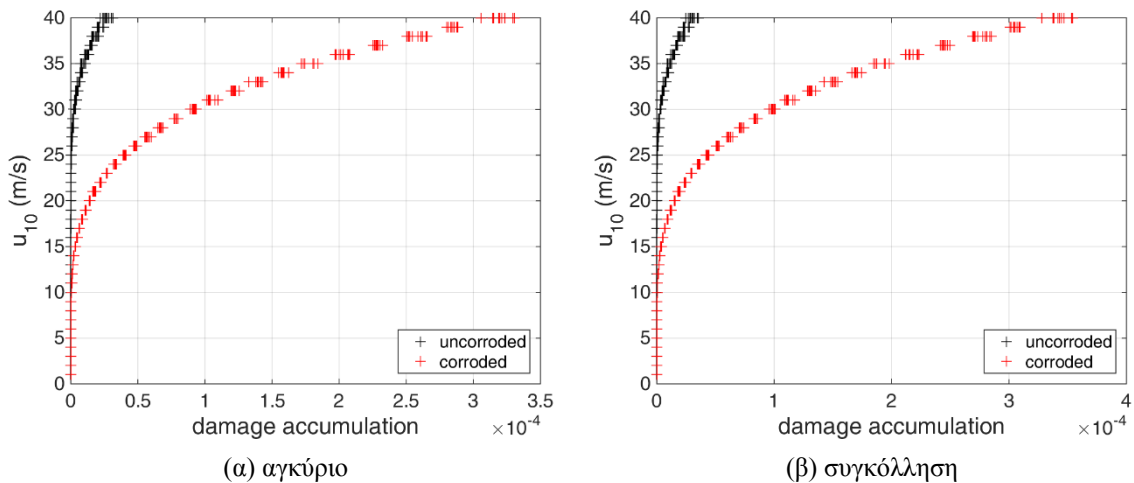
### 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ ΒΛΑΒΗΣ

Η συσσώρευση βλάβης για τα κρίσιμα στοιχεία των κατασκευών υπολογίζεται σύμφωνα από τους Ntaifoti et al. [7] ακολουθώντας τη μεθοδολογία που συνοψίζεται στο Σχήμα 5. Συγκεκριμένα, αρχικά παράγονται τεχνητές χρονοϊστορίες ανέμου διάρκειας 10min χρησιμοποιώντας το λογισμικό TurbSim [9], για κλιμακούμενες τιμές της μέσης ταχύτητας δεκαλέπτου,  $u_{10}$ , από 1m/s έως και 40m/s με βήμα 1m/s. Οι χρονοϊστορίες αυτές μετατρέπονται σε χρονοϊστορίες πιέσεων ανέμου και ασκούνται στο τρισδιάστατο προσομοίωμα του φορέα, λαμβάνοντας υπόψη 9 εναλλακτικές γωνίες πρόσπτωσης του ανέμου,  $\theta$ , στο διάστημα  $[0^\circ, 360^\circ)$  με βήμα  $45^\circ$ . Στη συνέχεια υπολογίζονται οι χρονοϊστορίες εντατικών μεγεθών στις θέσεις των συνδέσεων και, μέσω απλοποιητικών σχέσεων, μετατρέπονται σε χρονοϊστορίες τάσεων στο αγκύριο και στη συγκόλληση των κρίσιμων συνδέσεων που εξετάζονται. Κατόπιν, εφαρμόζεται η μέθοδος βροχοροής [10] για τον υπολογισμό των ιστογραμμάτων εύρους τάσεων που συνδυάζονται με την αντοχή σε κόπωση κατά τον EN1993-1-9 [11] ώστε να υπολογιστεί η συσσώρευση βλάβης για το αγκύριο και τη συγκόλληση των κρίσιμων συνδέσεων σύμφωνα με τους Palmgren-Miner [12]. Τελικώς προκύπτει η συσσώρευση βλάβης για κάθε 10λεπτη χρονοϊστορία στα αγκύρια και στη συγκόλληση των κρίσιμων συνδέσεων. Σε περίπτωση διάβρωσης, χρησιμοποιούνται οι τροποποιημένες καμπύλες αντοχής σε κόπωση των [13] εντός της μεθοδολογίας του Σχήματος 5 ενώ τα υπόλοιπα βήματα παραμένουν ίδια.

Για να ληφθούν υπόψη οι αβεβαιότητες, η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για δέκα εναλλακτικές χρονοϊστορίες ανέμου για κάθε τιμή της  $u_{10}$  με αποτέλεσμα για κάθε συνδυασμό  $u_{10}$  και  $\theta$  να προκύπτουν δέκα τιμές συσσώρευσης βλάβης σε κάθε ένα από τα κρίσιμα στοιχεία των κατασκευών. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για το αγκύριο A και την κρίσιμη συγκόλληση, που είναι η συγκόλληση του ενισχυτικού ελάσματος στην πλάκα έδρασης, της κατασκευής μορφής Γ για διαβρωμένη και μη διαβρωμένη κατάσταση, όπου φαίνεται η συσσώρευση βλάβης για άνεμο που δρα κάθετα στην πινακίδα σήμανσης. Παρατηρείται ότι σε περίπτωση διάβρωσης η συσσώρευση βλάβης για κάθε  $u_{10}$  είναι μεγαλύτερη από αυτή που προκύπτει για τη μη διαβρωμένη κατάσταση. Επιπλέον, η συσσώρευση βλάβης στη συγκόλληση είναι μεγαλύτερη από τη συσσώρευση βλάβης στο αγκύριο. Τα αποτελέσματα αυτά συνδυάζονται με τα αποτελέσματα εκτίμησης της μακροχρόνιας καιρικής επικινδυνότητας για την εκτίμηση της μακροχρόνιας συσσώρευσης βλάβης λόγω κόπωσης.



Σχήμα 5: Βήματα μεθοδολογίας εκτίμηση συσσώρευσης βλάβης λόγω κόπωσης (από Ntaifoti et al. 2023).



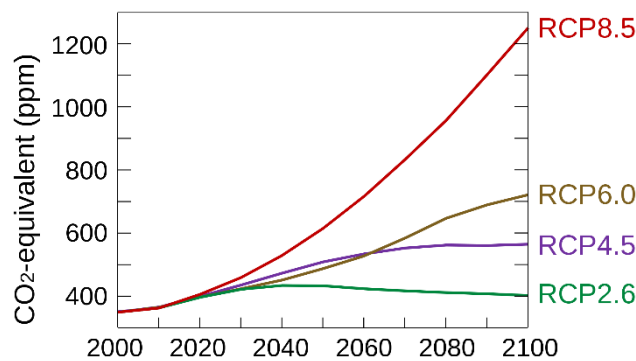
Σχήμα 6: Συσσώρευση βλάβης στο κρίσιμο αγκύριο Α και την κρίσιμη συγκόλληση της γέφυρας σήμανσης μορφής Γ για άνεμο που δρα κάθετα στην πινακίδα.

#### 4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙΡΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Η καιρική επικινδυνότητα για την περιοχή μελέτης εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας ως βάση τα σενάρια κλιματικής αλλαγής που είναι διαθέσιμα από τη βάση δεδομένων του EuroCORDEX [14]. Αυτά παρέχουν εκτιμήσεις για τις κλιματικές παραμέτρους και βασίζονται σε εναλλακτικά σενάρια συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου έως το 2100 λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση τους στο ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος Γη-ατμόσφαιρα (RCP, representative concentration pathways [15]). Τα βασικά RCP σενάρια που λαμβάνει υπόψη το EuroCORDEX φαίνονται στο Σχήμα 7, και είναι το σενάριο πολύ χαμηλών εκπομπών, RCP2.6, τα σενάρια χαμηλών και ήπιων εκπομπών, RCP4.5 και RCP6.0, καθώς και το σενάριο πολύ υψηλών εκπομπών, RCP8.5. Το



EuroCORDEX προσφέρει αποτελέσματα κλιματικών προσομοιώσεων με χωρική ανάλυση  $0.11^\circ$  ή περίπου  $12.5 \times 12.5 \text{ km}$  με χρονική κλίμακα μίας ημέρας για τα χρόνια 1980-2100. Ωστόσο, η χαμηλή χωρική και χρονική διακριτοποίηση των δεδομένων αυτών δεν επιτρέπουν την αξιοποίηση τους για την εκτίμηση της διακινδύνευσης έργων Πολιτικού Μηχανικού που βρίσκονται σε μικρές σχετικά αποστάσεις μεταξύ τους, για αυτό είναι απαραίτητο και οι δύο κλίμακες να «υποβιβαστούν» (downscaling), ώστε να μεταφερθούν από το επίπεδο των χιλιομέτρων και των ημερών σε αυτό των εκατοστών του μέτρου και του δευτερολέπτου. Στόχος είναι η δημιουργία χωρικά και χρονικά συσχετισμένων χρονοϊστοριών ανέμου διάρκειας 10min για όλες τις θέσεις ενδιαφέροντος στις οποίες βρίσκονται κατασκευές Πολιτικού Μηχανικού που είναι ευαίσθητες στον άνεμο.

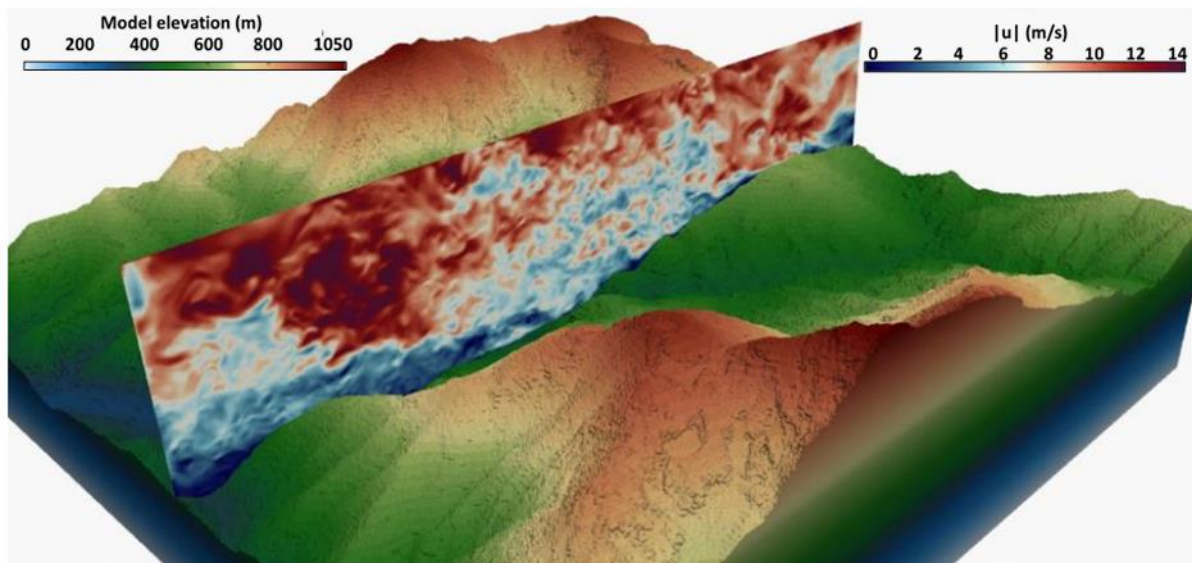


Σχήμα 7: Μεταβολή της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου έως το 2100 σύμφωνα με τα RCP σενάρια του EuroCORDEX (από [16]).

Για το σκοπό αυτό, αναπτύσσεται μεθοδολογία υποβάθμισης της χωρικής και χρονικής κλίμακας των εκτιμήσεων του EuroCORDEX. Για να επιτευχθεί αυτό, οι εκτιμήσεις EuroCORDEX συνδυάζονται με μετρήσεις από τους μετεωρολογικούς σταθμούς που βρίσκονται κοντά στην περιοχή μελέτης καθώς και με χωρικά συσχετισμένα πεδία 10min ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου για όλες τις θέσεις ενδιαφέροντος που προκύπτουν από υπολογιστικά προσομοιώματα ρευστοδυναμικής. Ενδεικτικά στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται το πεδίο του ανέμου για μια κατακόρυφη τομή κατά μήκος του αυτοκινητοδρόμου στην κοιλάδα του Μετσόβου. Τα πεδία αυτά δίνουν ταυτόχρονες τιμές ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου σε τις θέσεις ενδιαφέροντος με 10min χρονική κλίμακα και συνδυάζοντας τα με 10λεπτες χρονοϊστορίες των μετεωρολογικών σταθμών, προκύπτουν οι αντίστοιχες χρονοϊστορίες των πεδίων ανέμου. Κατόπιν, εφαρμόζονται μοντέλα μηχανικής μάθησης για να συνδυαστούν κατάλληλα αυτά τα πεδία ανέμου ώστε να δημιουργηθούν τεχνητές χρονοϊστορίες ανέμου που θα είναι συμβατές με τις εκτιμήσεις του EuroCORDEX για το κλίμα κάθε ημέρας. Η μεθοδολογία αυτή παρουσιάζεται διεξοδικά από τους [17].

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι χρονοϊστορίες αυτές δεν αναμένεται να παρατηρηθούν όντως στο μέλλον αλλά αποτελούν εναλλακτικές προσεγγίσεις από στατιστικής άποψης του ανέμου που μπορεί να παρατηρηθεί σε μία μελλοντική μέρα. Εν τέλει, παρόλο που δε μπορούμε να εμπιστευτούμε ένα-προς-ένα κάθε 10min της χρονοϊστορίας, στο σύνολό τους είναι συμβατά με τα μακροπρόθεσμα στατιστικά στοιχεία του EuroCORDEX και έχουν τη ζητούμενη χρονική και χωρική κλίμακα, επιτρέποντας την εκτίμηση της διακινδύνευσης των κρίσιμων κατασκευών σε βάθος χρόνου. Συνεπώς οι χρονοϊστορίες αυτές μπορούν να συνδυαστούν με τα αποτελέσματα των αναλύσεων της Παραγράφου 3

για την εκτίμηση της συσσώρευσης βλάβης στις πινακίδες σήμανσης του αυτοκινητοδρόμου. Στην περίπτωση μας, λήφθηκαν 10 εναλλακτικά σενάρια κλιματικής αλλαγής που βασίζονται στα σενάρια RCP2.6 και RCP4.5.



Σχήμα 8: Πεδίο ανέμου που έχει προκύψει από προσομοιώσεις υπολογιστικής ρευστοδυναμικής σε μία κατακόρυφη τομή κατά μήκος του αυτοκινητοδρόμου στη κοιλάδα του Μετσόβου (από [18]).

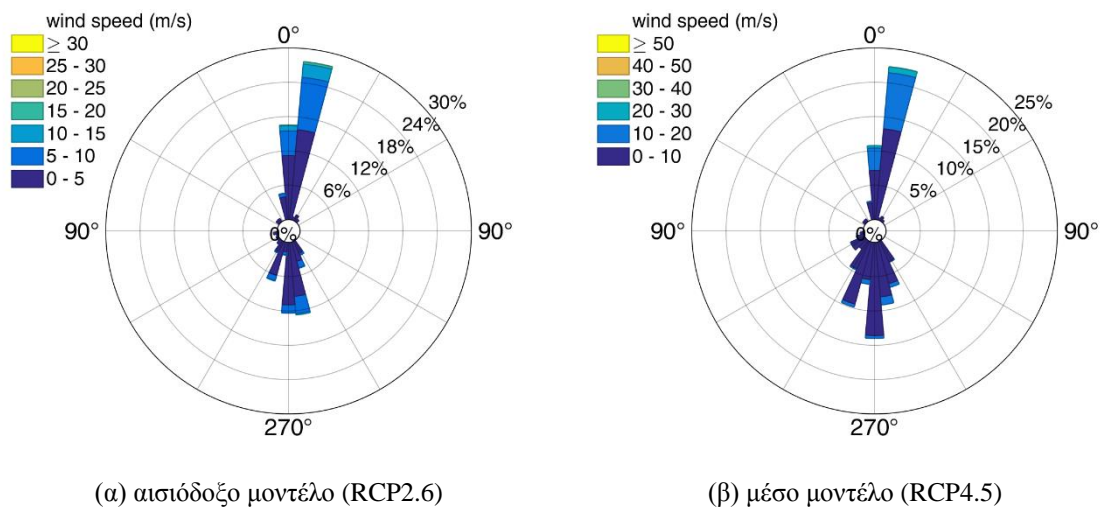
## 5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗΣ ΒΛΑΒΗΣ ΛΟΓΩ ΚΟΠΩΣΗΣ

Οι 10min ιστορίες ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου που έχουν προκύψει από την υποβάθμιση της χωρικής και χρονικής κλίμακας των δεδομένων EuroCORDEX συνδυάζονται με τη 10min συσσώρευση βλάβης της Παραγράφου 3 ώστε να εκτιμηθεί η μακροχρόνια συσσώρευση βλάβης για τα κρίσιμα στοιχεία των συνδέσεων κάθε κατασκευής. Για το σκοπό αυτό, λαμβάνεται υπόψη η διεύθυνση των πινακίδων σήμανσης ώστε οι 10min ιστορίες διεύθυνσης ανέμου σε καθολικό σύστημα συντεταγμένων να μετατραπούν στο τοπικό σύμφωνα με τις γωνίες πρόσπτωσης,  $\theta$ . Ενδεικτικά, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για την κατασκευή μορφής Γ που βρίσκεται στη θέση που φαίνεται στο Σχήμα 2 με το κόκκινο βέλος. Το ιστόγραμμα συνδυασμένης ταχύτητας και γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου στην επιλεγμένη κατασκευή για ένα αισιόδοξο και ένα μέσο σενάριο κλιματικής αλλαγής παρουσιάζονται στο Σχήμα 9. Παρατηρείται ότι η πλειοψηφία των  $u_{10}$  ταχυτήτων ανέμου για το αισιόδοξο σενάριο είναι στο εύρος 0-15m/s, οδηγώντας σε χαμηλή συσσώρευση βλάβης στα αγκύρια και τη συγκόλληση σύμφωνα με το Σχήμα 6. Αντίθετα, για το μέσο σενάριο κλιματικής αλλαγής παρατηρούνται αυξημένες τιμές ανέμου εύρους 0-30m/s, για τις οποίες η αναμενόμενη συσσώρευση βλάβης είναι σαφώς μεγαλύτερη.

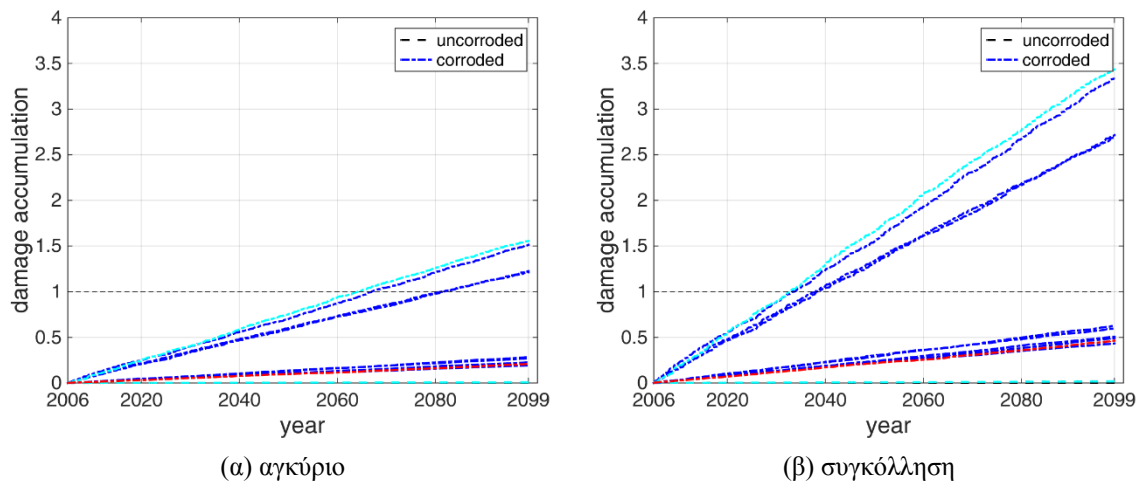
Συνδυάζοντας τις ιστορίες ανέμου για τα εναλλακτικά σενάρια κλιματικής αλλαγής με τα αποτελέσματα των αναλύσεων της Παραγράφου 3 προκύπτει η αθροιστική μακροχρόνια συσσώρευση βλάβης λόγω κόπωσης της κατασκευής υπό εξέταση. Η κατασκευή αυτή θεωρείται ότι εγκαταστάθηκε προσεγγιστικά το 2006, κατά τη διάρκεια κατασκευής του τμήματος Μέτσοβο-Παναγιά της Εγνατίας. Η αθροιστική συσσώρευση



βλάβης λόγω κόπωσης από την εγκατάσταση της έως και το 2100 παρουσιάζεται στο Σχήμα 10 για το κρίσιμο αγκύριο A και τη συγκόλληση για 10 εναλλακτικά σενάρια κλιματικής αλλαγής, ενώ εξετάζεται η περίπτωση της διαβρωμένης και της μη διαβρωμένης κατάστασης. Για την πρώτη περίπτωση θεωρούμε έκθεση σε αστικό περιβάλλον ανεξαρτήτως χρόνου έκθεσης, εξετάζοντας το φαινόμενο της διάβρωσης κόπωσης (διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση, corrosion fatigue). Με γαλάζιο χρώμα σημειώνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν για το μέσο σενάριο του Σχήματος 9β και με κόκκινο εκείνα που προκύπτουν από το αισιόδοξο σενάριο του Σχήματος 9α. Στην περίπτωση της μη διαβρωμένης κατάστασης, η εκτιμώμενη συσσώρευση βλάβης λόγω κόπωσης και στα αγκύρια και στη συγκόλληση είναι αμελητέα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι σύμφωνα με τον κανόνα Palmgren-Miner η οριακή τιμή συσσώρευσης βλάβης που δηλώνει αστοχία λόγω κόπωσης είναι 1.0, παρατηρείται ότι σε περίπτωση διάβρωσης τα 4 στα 10 σενάρια οδηγούν σε αστοχία λόγω κόπωσης σε 30-35 χρόνια από την εγκατάσταση των πινακίδων, δηλαδή σε λιγότερα από 50 χρόνια που είναι η διάρκεια ζωής των κατασκευών αυτών. Τα αποτελέσματα αυτά βέβαια προκύπτουν θεωρώντας ότι η κατασκευή είναι διαβρωμένη από την εγκατάστασή της, κάτι που γενικώς δεν ισχύει. Ωστόσο, η προτεινόμενη μεθοδολογία επιτρέπει την εκτίμηση της συσσώρευσης βλάβης λόγω κόπωσης με μεταβαλλόμενο επίπεδο διάβρωσης κατά τη διάρκεια ζωής της, για παράδειγμα, απλοποιητικά αθροίζοντας τις τιμές που έχουν προκύψει για τη μη διαβρωμένη κατάσταση μέχρι την ημερομηνία εμφάνισης «σημαντικής» διάβρωσης με εκείνα της διαβρωμένης από την εμφάνιση και μετά.



Σχήμα 9: Ιστόγραμμα συνδυασμένης ταχύτητας ανέμου και γωνίας πρόσπτωσης στην πινακίδα Γ2 για δύο εναλλακτικά μοντέλα κλιματικής αλλαγής.



Σχήμα 10: Συσσώρευση βλάβης στο κρίσιμο αγκύριο και την κρίσιμη συγκόλληση της γέφυρας σήμανσης μορφής Γ σε περίπτωση διάβρωσης και μη.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάστηκε μεθοδολογία εκτίμησης της μακροπρόθεσμης συσσώρευσης βλάβης λόγω κόπωσης στα κρίσιμα στοιχεία των μεταλλικών κατασκευών στήριξης των πινακίδων σήμανσης σε αυτοκινητόδρομο. Η αναπτυσσόμενη μεθοδολογία βασίζεται σε συνδυασμό εκτιμήσεων για το μελλοντικό κλίμα στη θέση των κατασκευών με 10min χρονική κλίμακα, με αποτελέσματα αναλύσεων που δίνουν τη συσσώρευση βλάβης για 10min άνεμο στα κρίσιμα στοιχεία των συνδέσεων των κατασκευών. Η συναρμογή των παραπάνω στοιχείων επιτρέπει την εκτίμηση των μακροχρόνιων βλαβών στις μεταλλικές κατασκευές στήριξης πινακίδων σήμανσης και μπορούν να αξιοποιηθούν για τη δημιουργία μακροπρόθεσμων σχεδίων συντήρησης, αποκατάστασης και ασφάλισης του οδικού δικτύου.

## 7. ΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ

Η παρούσα έρευνα έχει χρηματοδοτηθεί από το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα “PANOPTIS – Development of a decision support system for increasing the resilience of transportation infrastructure based on combined use of terrestrial and airborne sensors and advanced modelling tools” με Αριθμό Πρότασης: 769129. Επιπλέον, η πρώτη συγγραφέας έχει λάβει χρηματοδότηση και από το Ίδρυμα Ευγενίδου για την οικονομική υποστήριξη των διδακτορικών της σπουδών.

## 8. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Barle J, Grubisic V, Vlak F (2011). Failure analysis of the highway sign structure and the design improvement. *Engineering Failure Analysis*, 18(3), 1076-1084.
- [2] Meyer D, Chowdhury AG, Irwin P (2015). Investigation of wind-induced dynamic and aeroelastic effects on variable message signs. *Wind and Structures*, 20(6), 793-810.
- [3] Shurbert-Hetzel C, Shafei B, Phares B (2021). Performance of steel dynamic message sign-support structures in extreme wind events. *Engineering Structures*,

237, 112086.

- [4] Li X, Whalen TM, Bowman MD (2005). Fatigue strength and evaluation of double–mast arm cantilevered sign structures. *Transportation Research Record*, 1928(1), 64-72.
- [5] Kacin J, Rizzo P, Tajari M (2010). Fatigue analysis of overhead sign support structures. *Engineering Structures*, 32(6), 1659-1670.
- [6] Unobe ID, Bean B, Sorensen AD (2022). Creating an asset management plan for traffic signal structures through interactive explorations of wind induced fatigue damage. *Structure and Infrastructure Engineering*, 18, 1-14.
- [7] Ntaifoti A, Chatzidaki A, Gantes C, Vamvatsikos D (2023). Corrosion influence on fatigue resistance of lightweight steel structures. *Proceedings of the 10th National Conference of Steel Structures*, Athens, Greece.
- [8] Kohrangi M., Bazzurro P., Vamvatsikos D. (2016). Vector and scalar IMs in structural response estimation: Part II – Building Demand Assessment. *Earthquake Spectra*. *Earthquake Spectra*, 32(3): 1525-1543. DOI: 10.1193/053115EQS081M
- [9] Jonkman BJ (2006). TurbSim user's guide (No. NREL/TP-500-39797). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- [10] Lee YL, Barkey ME, Kang HT (2011). *Metal Fatigue Analysis Handbook: practical problem-solving techniques for computer-aided engineering*. Elsevier.
- [11] EN1993-1-9 (2005). Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue, European Committee for Standardization.
- [12] Murakami Y (2019). *Metal Fatigue – Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*. Elsevier.
- [13] Adasooriya N, Pavlou D, Hemmingsen T (2019). Fatigue strength degradation of corroded structural details: A formula for S-N curve. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 43, 721-733.
- [14] Jacob D, Petersen J, Eggert B, Alias A, et al. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Changes* 14(2), 563-578. DOI: 10.1007/s10113-013-0499-2
- [15] Moss RH, Babiker M, Brinkman S, et al. (2008). Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies (No. PNNL-SA-63186). Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States).
- [16] Representative Concentration Pathway. In Wikipedia.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Representative\\_Concentration\\_Pathway](https://en.wikipedia.org/wiki/Representative_Concentration_Pathway)
- [17] Chatzidaki A, Vamvatsikos D, Auvinen M, Hellsten A, Barmpas F, Lehtonen I (2022). A baseline approach to downscaling Euro-CORDEX data for wind hazard assessment of the Egnatia Odos highway. *Proceedings of the 3rd International Conference on Natural Hazards & Infrastructure ICONHIC 2022*, Athens, Greece.

- [18] Hellsten A, Auvinen M, Barmpas F (2021a). D3: D3.3.1 Report on the dynamical downscaling of climate and atmospheric impacts V1. The PANOPTIS project, GA: 769129

**Fatigue damage assessment of the Egnatia Odos sign-support structures under spatially-correlated time-varying wind fields**

**Akrivi Chatzidaki**

PhD Candidate

National Technical University of Athens  
Athens, Greece

e-mail: [chatzidaki.akrivi@gmail.com](mailto:chatzidaki.akrivi@gmail.com)

**Aikaterini Ntaifoti**

PhD Candidate

National Technical University of Athens  
Athens, Greece

e-mail: [ntaifotik@gmail.com](mailto:ntaifotik@gmail.com)

**Dimitrios Bilonis**

Environmental Reliability & Risk Analysis  
(ERRA)

Leof. Syggroy 67 & Zan Moreas 40,  
Athens, 11745, Greece

e-mail: [d.bilonis@erra.gr](mailto:d.bilonis@erra.gr)

**Charis Gantes**

Professor

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: [chgantes@central.ntua.gr](mailto:chgantes@central.ntua.gr)

**Dimitris Vamvatsikos**

Associate Professor

National Technical University of Athens  
Athens, Greece

e-mail: [divamva@mail.ntua.gr](mailto:divamva@mail.ntua.gr)

**ABSTRACT**

A methodology is proposed for assessing the long-term wind-induced fatigue damage accumulation of steel sign-supporting structures of highways, as it applies to Egnatia Odos. These structures are usually configured as portal, L-shaped or T-shaped frames, consisting of one or two columns and a horizontal beam that supports the sign. During their lifetime, they are exposed to environmental conditions thus being susceptible to corrosion, while the critical load is the wind that subjects them to fatigue due to its dynamic nature. To this scope, the cumulative fatigue damage is computed for the critical connections of the sign-supporting structures on a site-agnostic basis for 10min loading intervals, both for corroded and for non-corroded structures. This data is combined with 10min wind time-series that are compatible with the long-term weather hazard at the location of the structures and are computed based on alternative climate change scenarios. The aim is to assess the damage accumulation due to fatigue for the critical connections of the structures during their lifetime. The proposed methodology allows assessing the long-term risk due to fatigue for an ensemble of spatially distributed sign-support structures and is incorporated into a tool that aims to help road operators rapidly assess the state of the highway assets and help them efficiently manage their inspections.