

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΔΙΚΤΥΩΤΩΝ ΙΣΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΑΝΕΜΟΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

Δημήτριος Β. Μπιλιώνης

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Environmental Reliability & Risk Analysis (ERRA)

Λεωφ. Συγγρού 67 & Ζαν Μωρεάς 40, Αθήνα, ΤΚ 11745, Ελλάδα

d.bilionis@erra.gr

Κωνσταντίνος Βλαχάκης

Υποψ. Διδάκτωρ ΕΜΠ

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

kostasvlachakis@central.ntua.gr

Μαρία-Ελένη Δασίου

Υποψ. Διδάκτωρ ΕΜΠ

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

medasiou@mail.ntua.gr

Δημήτριος Βαμβάτσικος

Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

divamva@mail.ntua.gr

Ιωάννης Βάγιας

Ομ. Καθηγητής ΕΜΠ

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

vastahl@central.ntua.gr

Κωνσταντίνος Λαγουβάρδος

Διευθυντής Ερευνών

Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος & Βιώσιμης Ανάπτυξης, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών

lagouvar@noa.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι δικτυωτοί χαλύβδινοι ιστοί αποτελούν το συνηθέστερο τύπο φορέα στήριξης κεραιών κινητής τηλεφωνίας. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένας τυπικός χαλύβδινος δικτυωτός ιστός κινητής τηλεφωνίας ύψους 48 m. Ο ιστός έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Ευρωκώδικα για παράκτιες περιοχές της Ελλάδας και βασική τιμή ταχύτητας ανέμου 33 m/s. Αρχικά πραγματοποιείται η εκτίμηση της τρωτότητας (πιθανότητα αστοχίας) του συγκεκριμένου ιστού έναντι διαφόρων συνδυασμών ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου. Στη συνέχεια, αξιοποιώντας χρονοσειρές ανεμολογικών δεδομένων από επιλεγμένες παράκτιες περιοχές της Ελλάδας και με βάση τις κατανομές της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου που προκύπτουν, υπολογίζεται η αντίστοιχη διακινδύνευση του ιστού για κάθε

περιοχή και τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στον γεωγραφικό χάρτη της Ελλάδας. Η παραπάνω διαδικασία αποτελεί ουσιαστικά ένα πλαίσιο εκτίμησης επιτελεστικότητας δικτυωτών μεταλλικών ιστών έναντι ακραίων τιμών ανέμου. Το πλαίσιο αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί ως ένα χρήσιμο εργαλείο για τις εταιρείες κινητής τηλεφωνίας στα πλαίσια του σχεδιασμού ή/και αναβάθμισης των δικτύων τους. Επιπλέον, από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της διακινδύνευσης ανά περιοχή μπορεί να ελεγχθεί και η επάρκεια της παραδοχής της ενιαίας τιμής (33 m/s) για τη βασική ταχύτητα ανέμου του εθνικού προσαρτήματος του Ευρωκώδικα που ισχύει για παράκτιες περιοχές στην Ελλάδα.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι χαλύβδινοι δικτυωτοί ιστοί αποτελούν σημαντική και κρίσιμη υποδομή στη σημερινή εποχή. Τέτοιου είδους ιστοί-χρησιμοποιούνται συνήθως για την ανάρτηση των κεραιών της κινητής τηλεφωνίας. Για λόγους καλύτερης μετάδοσης του σήματος οι ιστοί τοποθετούνται σε ανοικτές περιοχές (π.χ. κορυφή λόφου) εκτεθειμένες σε έντονα καιρικά φαινόμενα όπως π.χ. οι ισχυροί άνεμοι. Μάλιστα η φόρτιση του ανέμου θεωρείται ως το κύριο περιβαλλοντικό φορτίο κατά τον σχεδιασμό τους. Η επιρροή δε του ανέμου μεγεθύνεται σε περιπτώσεις που πάνω στα μέλη του ιστού έχει σχηματιστεί και σημαντικού πάχους επίπαγος, συνθήκη που απαντάται ιδιαίτερος σε βόρεια κλίματα με έντονους χειμώνες [1]-[2].

Ο σχεδιασμός και η ανάλυση των ιστών κινητής τηλεφωνίας έχουν συγκεντρώσει σημαντικό ενδιαφέρον. Στη σχετική βιβλιογραφία περιλαμβάνονται αναφορές σχετικά με του μηχανισμούς αστοχίας [3]-[6], τη βελτιστοποίηση της τοπολογίας του ιστού [7] καθώς και εκτιμήσεις επεμβάσεων ή ενίσχυσης υφιστάμενων ιστών ιδίως για να καλυφθούν τα επιπλέον φορτία λόγω αλλαγής ή προσθήκης νέων κεραιών σε περιπτώσεις αναβαθμίσεων του δικτύου [8]-[9]. Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι αξιοσημείωτες είναι και οι προσπάθειες αποτίμησης της επιτελεστικότητας (performance) των ιστών τηλεπικοινωνιών έναντι του ανέμου, οι οποίες έχουν συγκεντρώσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον την τελευταία περίοδο [10]-[11].

Η αποτίμηση της επιτελεστικότητας μιας κατασκευής μπορεί να πραγματοποιηθεί εφαρμόζοντας ένα κατάλληλο πλαίσιο (Performance Based Engineering – PBE) το οποίο, αν και αρχικά προτάθηκε από τον κλάδο της αντισεισμικής μηχανικής [12], πλέον έχει αποκτήσει ευρύτερη εφαρμογή σε άλλου είδους φορτίσεις και άλλους φορείς πλέον των κτιρίων. Η επιτελεστικότητα μιας κατασκευής μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με βάση την πιθανότητα εμφάνισης ή υπέρβασης μιας συγκεκριμένης οριακής κατάστασης (αστοχίας ή λειτουργικότητας) εξαιτίας ενός ή περισσότερων μέτρων έντασης (π.χ. ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου, επιτάχυνσης σεισμού κ.λπ.).

Ως μέτρο επιτελεστικότητας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η Μέση Ετήσια Συχνότητα (ΜΕΣ) υπέρβασης λ μιας συγκεκριμένης τιμής μιας παραμέτρου της κατασκευής (π.χ. μετατόπιση κορυφής) λόγω συγκεκριμένης φόρτισης ή συνδυασμού φορτίσεων. Για παράδειγμα σε περίπτωση αστοχίας έχουμε υπέρβαση της αντοχής (Capacity – C) της κατασκευής από τις αναπτυσσόμενες δράσεις εξαιτίας ενός ή περισσότερων μέτρων έντασης (Intensity Measures – IM). Να σημειωθεί ότι οι δράσεις ουσιαστικά αποτελούν την απαίτηση (Demand – D). Συνεπώς, αστοχία προκύπτει όταν $D > C$. Με βάση τα παραπάνω, η ΜΕΣ $\lambda(D > C)$ αστοχίας για ένα ή περισσότερα IM υπολογίζεται από την εξ. (1) [13]:

$$\lambda(D > C) = \int P(D > C | IM) \cdot |d\lambda(IM)| \quad (1)$$

όπου: $|d\lambda(IM)|$: ο όρος που αντιπροσωπεύει την πιθανότητα εμφάνισης του συγκεκριμένου IM και $P(D > C | IM)$: η πιθανότητα αστοχίας (δηλαδή η τρωτότητα) για συγκεκριμένη τιμή του IM .

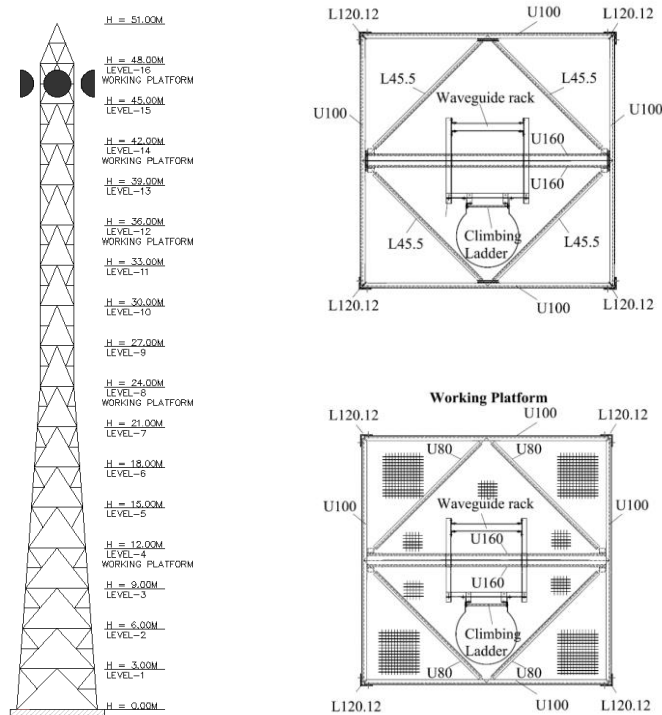
Στην παρουσία εργασίας παρουσιάζεται μια εφαρμογή του πλαισίου αποτίμησης της επιτελεστικότητας ενός τυπικού χαλύβδινου ιστού κινητής τηλεφωνίας σχεδιασμένου με βάση τις παραδοχές του Ευρωκώδικα για παράκτιες περιοχές της Ελλάδας (νησιά ή σε απόσταση από θάλασσα < 10 Km). Για την εκτίμηση της επιτελεστικότητας ως IM θα χρησιμοποιηθεί η ταχύτητα του ανέμου (λαμβάνοντας υπόψη και τη διεύθυνση). Ως περιοχές εφαρμογής έχουν επιλεγεί 19 νησιά και παράκτιες περιοχές που βρέχονται είτε από το Αιγαίο είτε από το Ιόνιο Πέλαγος. Τέλος, ο υπολογισμός της κατανομής της

ταχύτητας ανέμου έγινε με βάση ιστορικά ανεμολογικά δεδομένα που μετρήθηκαν για κάθε περιοχή από σταθμούς του δικτύου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών.

3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΙΣΤΟΥ

3.1 Γεωμετρία

Ο προς μελέτη ιστός έχει ύψος 48 m και είναι τετραγωνικής κάτοψης. Στην κορυφή του σχηματίζεται μια πυραμίδα που φέρει το αλεξικέραυνο (Σχ. 1 αριστερά). Ο ιστός περιλαμβάνει οριζόντια διαφράγματα ανά 3 m καθ' ύψος (Σχ. 1 δεξιά άνω) καθώς και πέντε πλατφόρμες εργασίας σε συγκεκριμένα ύψη (Σχ. 1 δεξιά κάτω). Τα περισσότερα μέλη του ιστού (όπως οι ορθοστάτες και τα διαγώνια) αποτελούνται από γωνιακές διατομές, ενώ υπάρχουν και ορισμένα μέλη από διατομές μορφής “U”. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη γεωμετρία, τις διατομές και τα χαρακτηριστικά του υλικού (χάλυβα) του ιστού παρουσιάζονται στο [14].



Σχ. 1: Όψη ιστού (αριστερά) - Κάτοψη διαφράγματος (δεξιά άνω) – Κάτοψη πλατφόρμας εργασίας (δεξιά κάτω)

3.2 Φορτία

3.2.1 Βαρυτικά Φορτία

Η συνολική μάζα του χάλυβα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του ιστού ισούται με 15,14 tn. Επίσης θεωρείται ότι ιστός φέρει τέσσερις κεραίες (μία ανά παρειά) σχήματος κατόπτρου βάρους 2,30 kN η κάθε μία, ενώ το βάρος των καλωδίων είναι 0,05 kN/m. Επιπλέον ο ιστός φέρει μια σκάλα αναρρίχησης (climbing ladder) με μόνιμο φορτίο (λόγω βάρους) 15,30 kN και κινητό 5,00 kN, καθώς και ένα κανάλι καλωδίων μόνιμου φορτίου (βάρους) 14,60 kN. Τέλος, το κινητό φορτίο για κάθε πλατφόρμα εργασίας θεωρήθηκε ίσο με 2,00 kN.

3.2.2 Φορτία Ανέμου

Εκτός από τα βαρυτικά φορτία (στατική φόρτιση), η σημαντικότερη φόρτιση του ιστού προκύπτει από την επίδραση του ανέμου, η οποία αποτελεί μάλιστα δυναμική φόρτιση. Η δύναμη λόγω ανέμου οφείλεται στην επιρροή του ανέμου πάνω στα μέλη του ιστού (F_{body}). Μάλιστα στο ύψος που βρίσκονται

οι κεραιές στην παραπάνω δύναμη πρέπει να προστεθεί και η αντίστοιχη δύναμη λόγω της πρόσπτωσης του ανέμου πάνω στην επιφάνεια των κεραιών.

Η δύναμη του ανέμου πάνω στα μέλη του ιστού για ύψος z υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_{body}(z) = q(z)C_D(z)A_{ref}(z) \quad (2)$$

όπου: $q(z) = 0,5\rho u(z)$ με $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$ (πυκνότητα αέρα) και $u(z)$: ταχύτητα ανέμου σε ύψος z , $C_D(z)$: ο συντελεστής δύναμης του τμήματος του ιστού σε ύψος z και $A_{ref}(z)$: το άθροισμα της προβαλλόμενης επιφάνειας των μελών του ιστού σε επίπεδο κάθετο στην διεύθυνση του ανέμου σε ύψος z .

Η δύναμη του ανέμου πάνω στις κεραιές υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_{antennas} = qA_a(C_{Da_1}f_{a_1} + C_{Da_2}f_{a_2}) \quad (3)$$

όπου: $q = 0,5\rho u_{antennas}$ με $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$ (πυκνότητα αέρα) και $u_{antennas}$: ταχύτητα ανέμου στο ύψος των κεραιών, C_{Da_1}, C_{Da_2} : οι συντελεστές δύναμης για δύο κεραιές a_1 & a_2 που είναι τοποθετημένες αντιδιαμετρικά και f_{a_1}, f_{a_2} : συντελεστές που λαμβάνουν υπόψη φαινόμενα σκίασης ανέμου μεταξύ των a_1 & a_2 .

Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τον υπολογισμό των δυνάμεων λόγω ανέμου και των επιμέρους όρων των εξ. (2) και (3) παρέχονται στο [14].

Πρέπει δε να σημειωθεί ότι για τον υπολογισμό της ταχύτητας ανέμου καθ' ύψος του πυλώνα θεωρήθηκε εκθετικό προφίλ (power law profile) με εκθέτη $\alpha=0,20$. Για να εκτιμηθεί πλήρως η επιρροή της ταχύτητας του ανέμου σε ολόκληρη την έκταση του πυλώνα δημιουργήθηκε δισδιάστατος κανάβος με διαστάσεις που να περικλείουν ολόκληρο των πυλώνα. Για κάθε σημείο του κανάβου προσομοιώθηκαν 10λεπτες χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου με τη χρήση του λογισμικού TurbSim [15].

4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

Για την εκτίμηση της τρωτότητας, η οποία ως όρος αφορά στην πιθανότητα αστοχίας για δεδομένη τιμή ταχύτητας και γωνίας ανέμου πραγματοποιήθηκαν μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις στο λογισμικό OpenSees [16]. Κάθε δυναμική ανάλυση είχε διάρκεια 10 λεπτών και η δύναμη του ανέμου στα μέλη του ιστού και τις κεραιές υπολογίζονταν με βάση τις τιμές της χρονοσειράς ταχύτητας ανέμου που είχαν προσομοιωθεί στο TurbSim από τις εξισώσεις (2) και (3) για κάθε χρονική στιγμή (time-step).

Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε ένας μεγάλος αριθμός δυναμικών αναλύσεων για τιμές μέσης ταχύτητας 10λέπτου που βρίσκονταν στο διάστημα 20-50 m/s με βήμα 2,5 m/s και είχαν προσομοιωθεί στο TurbSim. Μάλιστα, για να ληφθούν υπόψη τυχόν αβεβαιότητες για κάθε μέση τιμή ταχύτητας προσομοιώθηκαν 18 χρονοσειρές (TurbSim) και διενεργήθηκαν ισάριθμες δυναμικές αναλύσεις (OpenSees). Αναφορικά με την επιρροή της γωνίας (πρόσπτωσης) του ανέμου εξετάστηκαν τρεις περιπτώσεις (0° , $22,5^\circ$ και 45°), οι οποίες είναι επαρκείς λόγω της τετραγωνικής συμμετρίας της κάτοψης του ιστού. Συνεπώς για την εκτίμηση της τρωτότητας του ιστού διενεργήθηκαν συνολικά $3 \times 13 \times 18 = 702$ μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις.

Ως κριτήριο αστοχίας σε κάθε δυναμική ανάλυση ορίστηκε η ύπαρξη μη μηδενικής σχετικής μετατόπισης (residual drift) στην κορυφή του ιστού μετά τη λήξη της επιβολής της 10λέπτης φόρτισης και αφού είχαν περάσει 2 λεπτά όπου ο φορέας έκανε ελεύθερη ταλάντωση (free oscillation) χωρίς την επιβολή φορτίου ανέμου ή άλλου φορτίου πέρα του ίδιου βάρους.

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας αστοχίας για δεδομένη τιμή του IM , δηλαδή του όρου $P(D > C|IM)$ της εξ. (1), για κάθε συνδυασμό τιμής και γωνίας (μέσης) ταχύτητας ανέμου υπολογίστηκε το πηλίκο του αριθμού των αναλύσεων που έδειξαν αστοχία προς το συνολικό αριθμό των αναλύσεων για

το συγκεκριμένο συνδυασμό. Για παράδειγμα εάν από τις 18 αναλύσεις για μέση τιμή ταχύτητας 35 m/s και γωνία ανέμου 0° αστόχησαν οι 6, τότε η αντίστοιχη πιθανότητα ήταν ίση με $P(D > C | u = 35, \theta = 0^\circ) = \frac{6}{18} = 0,333$.

Έπειτα από την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας προέκυψαν τρεις καμπύλες τρωτότητας οι οποίες δίνουν την πιθανότητα αστοχίας για όλες τις πιθανές τιμές ταχύτητας ανέμου για κάθε μία από τις γωνίες πρόσπτωσης που εξετάστηκαν. Σύμφωνα με το [17] μία καμπύλη τρωτότητας μπορεί να περιγραφεί από μια λογαριθμοκανονική κατανομή με βάση την εξίσωση:

$$P(D > C | u, \theta) = \Phi \left(\frac{\ln[u/u_{50}(\theta)]}{\beta(\theta)} \right) \quad (4)$$

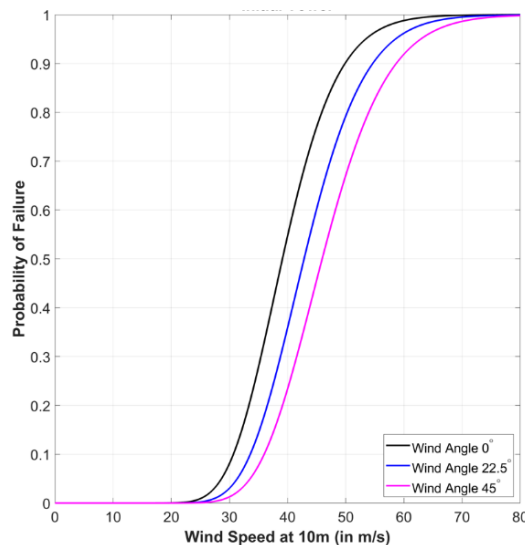
όπου: $\Phi(\cdot)$ η αθροιστική συνάρτηση της τυποποιημένης κανονικής κατανομής, u : η ταχύτητα ανέμου, $u_{50}(\theta)$: η διάμεση ταχύτητα αστοχίας που αποτελεί την πρώτη παράμετρο της λογαριθμοκανονικής κατανομής για γωνία θ , $\beta(\theta)$: η εκτιμώμενη διασπορά που αποτελεί τη δεύτερη παράμετρο της λογαριθμοκανονικής κατανομής για γωνία θ .

Με βάση τα παραπάνω στις τιμές της πιθανότητας αστοχίας για κάθε γωνία ανέμου εφαρμόστηκε (fit) μια λογαριθμοκανονική κατανομή και υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες παράμετροι. Επιπλέον, για να ληφθούν υπόψη όλες οι πιθανές αβεβαιότητες, η τιμή της διασποράς για κάθε γωνία θ υπολογίστηκε από την παρακάτω εξίσωση:

$$\beta(\theta) = \sqrt{\beta_R(\theta)^2 + \beta_b^2 + \beta_{Cd}^2 + \beta_C^2} \quad (5)$$

όπου: $\beta_R(\theta)$: η διασπορά που προκύπτει από τις αναλύσεις για κάθε γωνία θ και κυμαίνεται από 0,01 έως 0,04, $\beta_b = 0,10$: η διασπορά της αντοχής λυγισμού των γωνιακών διατομών σύμφωνα με [18], $\beta_{Cd} = 0,12$: η διασπορά λόγω του συντελεστή δύναμης σύμφωνα με [19] και $\beta_C = 0,10$: η διασπορά που λαμβάνει υπόψη την ποιότητα της κατασκευής και λοιπές αβεβαιότητες σύμφωνα με [20].

Οι καμπύλες τρωτότητας που προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία για κάθε γωνία ανέμου παρουσιάζονται στο Σχ. 2. Με βάση το σχήμα παρατηρείται ότι η δυσμενέστερη περίπτωση προκύπτει όταν ο άνεμος είναι κάθετος στην παρειά του ιστού (γωνία ανέμου 0°) καθώς στη συγκεκριμένη περίπτωση για δεδομένη ταχύτητα ανέμου εμφανίζεται μεγαλύτερη πιθανότητα αστοχίας σε σχέση με τις δύο άλλες γωνίες (22,5° και 45°). Τέλος, η περίπτωση για γωνία ανέμου 22,5° είναι δυσμενέστερη από την περίπτωση γωνίας 45°.



Σχ. 2: Καμπύλες τρωτότητας για κάθε γωνία ανέμου

5. ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΟΣ ΚΙΝΔΥΝΟΣ

Η εκτίμηση της επιτελεστικότητας του υπό εξέταση ιστού πραγματοποιήθηκε για 19 νησιά ή παράκτιες περιοχές της Ελλάδας (Πίν. 1). Για κάθε περιοχή συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν συνεχείς χρονοσειρές ανεμολογικών δεδομένων από μετεωρολογικούς σταθμούς αυτόματης καταγραφής που έχουν εγκατασταθεί και λειτουργούν υπό την αιγίδα του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών – ΕΑΑ [21].

Οι μετεωρολογικές μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση ήταν η ταχύτητα ανέμου (μέση τιμή 10λέπτου) και η αντίστοιχη διεύθυνση. Πρέπει δε να σημειωθεί ότι δεν λήφθηκε υπόψη τυχόν επιρροή του πάχους πάγου καθώς στις συγκεκριμένες περιοχές δεν αναμένεται σημαντική συνεισφορά του παράγοντα αυτού. Στον Πίν. 1 παρουσιάζεται η περίοδος των διαθέσιμων δεδομένων για κάθε σταθμό καθώς και η μέγιστη καταγεγραμμένη μέση ταχύτητα 10λέπτου σε ύψος 10 m. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το ύψος του ανεμομέτρου είναι διαφορετικό από σταθμό σε σταθμό (συνήθως είναι 3 ως 5 m), συνεπώς για κάθε σταθμό έγινε αναγωγή της τιμής της ταχύτητας του ανέμου από το ύψος μέτρησης σε ύψος 10 m, θεωρώντας εκθετικό προφίλ ανέμου με εκθέτη $\alpha=0,20$.

Περιοχή	Περίοδος Δεδομένων (έτη)	Μέγιστη Καταγεγραμμένη Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Κατανομή Gumbel		Ταχύτητα Ανέμου για Περίοδο Επαναφοράς 50 έτη (m/s)
			Παράμετρος Θέσης μ (m/s)	Παράμετρος Κλίμακας k	
Αίγινα	7	16,50	14,05	1,54	20,05
Αλεξανδρούπολη	12	18,78	11,56	3,37	24,71
Αθήνα	12	12,95	10,70	0,45	12,45
Έμπωνας Ρόδου	6	26,15	21,69	1,39	27,10
Φινοκαλιά Λασιθίου	6	41,61	34,05	5,40	55,13
Κατταβιά Ρόδου	6	19,33	16,93	0,92	20,53
Κέρκυρα	11	12,32	10,10	0,81	13,27
Λευκάδα	11	30,85	22,49	2,85	33,62
Λίνδος Ρόδου	6	21,03	18,37	1,52	24,31
Μονεμβασιά	13	22,08	18,32	1,78	25,26
Μύκονος	12	26,72	23,69	1,41	29,17
Νάξος	10	29,58	25,80	1,94	33,38
Πάργα	10	19,12	12,05	2,69	22,55
Παξιμάδα Ευβοίας	7	39,38	31,82	3,57	45,74
Ρόδος	8	15,94	12,84	0,95	16,53
Σαμοθράκη	12	32,87	18,93	2,52	28,76
Βαρθολομιό Ηλείας	12	13,88	10,41	0,89	13,89
Ζαγορά Πηλίου	11	13,88	10,46	1,58	16,64
Ζάκυνθος	10	11,81	8,72	0,97	12,50

Πίν. 1: Επιλεγείσες παράκτιες περιοχές εφαρμογής

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας εμφάνισης ενός συνδυασμού ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου χρησιμοποιήθηκαν οι μέγιστες ετήσιες τιμές από κάθε σταθμό (περιοχή). Για τις μέγιστες ετήσιες τιμές θεωρήθηκε ότι ακολουθείται η κατανομή Gumbel. Η αθροιστική συνάρτηση της κατανομής Gumbel δίνεται από τον τύπο:

$$F(u) = P(U \leq u) = \exp \left[- \exp \left(- \frac{u - \mu}{k} \right) \right] \quad (6)$$

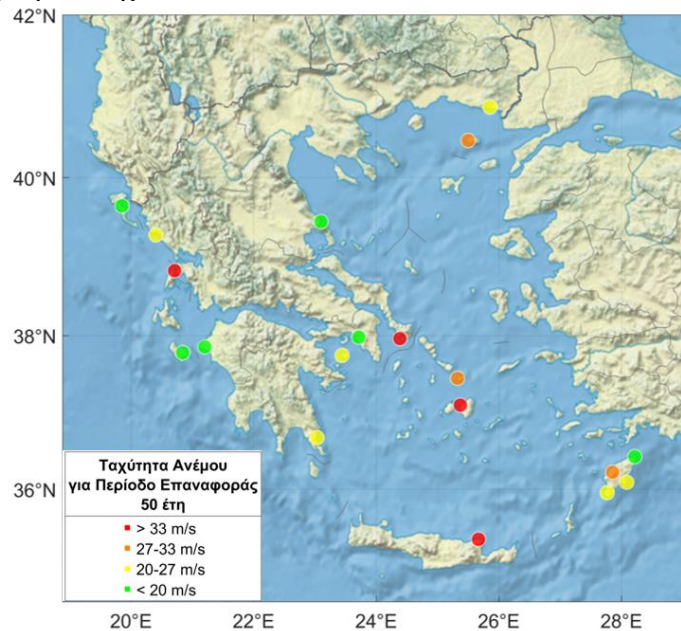
όπου: u : η τιμή της ταχύτητας ανέμου, μ : η παράμετρος θέσης της κατανομής Gumbel και k : η παράμετρος κλίμακας της κατανομής Gumbel. Στον Πίν. 1 παρουσιάζονται οι παράμετροι μ και k έτσι όπως προέκυψαν από την ανάλυση των ετήσιων μεγίστων για κάθε περιοχή.

Αντιστρέφοντας την εξ. (6), η τιμή της ταχύτητας ανέμου u_p για δεδομένη (ετήσια) πιθανότητα $P(U \leq u_p) = p$ υπολογίζεται ως εξής:

$$u_p = \mu - k \ln(-\ln p) \quad (7)$$

Με βάση τον Ευρωκώδικα EN1991-1-4 [22], η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας ανέμου $v_{b,0}$, που αντιστοιχεί στη μέση ταχύτητα ανέμου 10 λεπτών ανεξάρτητα από τη διεύθυνση και την εποχή του έτους, σε ύψος 10 m, θα πρέπει να έχει μέση περίοδο επαναφοράς 50 έτη, δηλαδή ετήσια πιθανότητα υπέρβασης ίση με $p = 0,02$. Σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα [23], η Ελλάδα χωρίζεται σε δύο ζώνες με βάση τη $v_{b,0}$. Συγκεκριμένα, για νησιά ή παράκτιες περιοχές σε απόσταση <10 Km από τη θάλασσα προτείνεται η τιμή $v_{b,0} = 33 \text{ m/s}$, ενώ για την υπόλοιπη χώρα προτείνεται η τιμή $v_{b,0} = 27 \text{ m/s}$.

Εφαρμόζοντας την εξ. (7) και με βάση τις τιμές των παραμέτρων της κατανομής Gumbel του Πίν. 1 μπορεί να υπολογιστεί η τιμή της ταχύτητας ανέμου που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς 50 ετών για κάθε περιοχή. Για την τιμή αυτή η ετήσια πιθανότητα (μη υπέρβασης) ισούται με: $P(U \leq u_{0,98}) = 1 - 0,02 = 0,98$. Οι τιμές που προέκυψαν για κάθε περιοχή παρουσιάζονται στην τελευταία στήλη του Πίν. 1 και αποτυπώνονται στο χάρτη του Σχ. 3.



Σχ. 3: Χάρτης ταχύτητας ανέμου για περίοδο επαναφοράς 50 έτη

Από τις τιμές που προκύπτουν παρατηρείται ότι, παρότι το Εθνικό Προσάρτημα του Ευρωκώδικα κατατάσσει και τις 19 περιοχές στην ίδια ζώνη ως παράκτιες και συνεπώς προτείνεται $v_{b,0} = 33 \text{ m/s}$, εν τούτοις, η εκτιμώμενη ταχύτητα με περίοδο επαναφοράς για 50 έτη με βάση πραγματικά ανεμολογικά δεδομένα και χρήση της κατανομής Gumbel προκύπτει σημαντικά διαφορετική από την προτεινόμενη τιμή του κανονισμού, εμφανίζοντας μάλιστα μεγάλες αποκλίσεις από περιοχή σε περιοχή. Πιο συγκεκριμένα: 6 από τις 19 περιοχές εμφανίζουν τιμή ταχύτητας με περίοδο επαναφοράς 50 έτη μικρότερη από 20 m/s, 6 επίσης περιοχές εμφανίζουν τιμή ταχύτητας μεταξύ 20 και 27 m/s, 3 περιοχές εμφανίζουν τιμή ταχύτητας μεταξύ 27 και 33 m/s, ενώ 4 περιοχές τιμή ταχύτητας μεγαλύτερη από 33 m/s. Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω ευρήματα, για 12 από τις 19 περιοχές, αν και παράκτιες, φαίνεται ότι επαρκεί η τιμή $v_{b,0} = 27 \text{ m/s}$ που προτείνει ο Ευρωκώδικας για τις μη παράκτιες περιοχές. Τέλος, για 3 περιοχές (Παξιμάδα, Φινοκαλιά και Νάξος), η προτεινόμενη από τον Ευρωκώδικα τιμή $v_{b,0} = 33 \text{ m/s}$ φαίνεται ότι δεν επαρκεί.

Αναφορικά με την επιρροή της διεύθυνσης (γωνίας) του ανέμου θ , πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της σχετικά μικρής περιόδου για την οποία υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα για κάθε περιοχή, δεν μπορεί να υπολογιστεί η κοινή κατανομή μέγιστης ταχύτητας ανέμου και διεύθυνσης $f(u, \theta)$. Παραταύτα, όπως αναφέρεται και στο [14], μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι οι δύο μεταβλητές u και θ είναι ανεξάρτητες και συνεπώς $f(u, \theta) = f(u) \cdot f(\theta)$, όπου: $f(u)$: η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου (Gumbel) και $f(\theta)$: η

εμπειρική κατανομή της διεύθυνσης του ανέμου (wind rose).

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Με βάση όσα παρουσιάστηκαν στις ενότητες 4 και 5, και θεωρώντας ως IMs την ταχύτητα (u) και τη διεύθυνση (θ) του ανέμου, η εξ. (3) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\lambda(D > C) = \int_u \int_\theta P(D > C | u, \theta) \cdot f(u, \theta) \cdot du \cdot d\theta \quad (8)$$

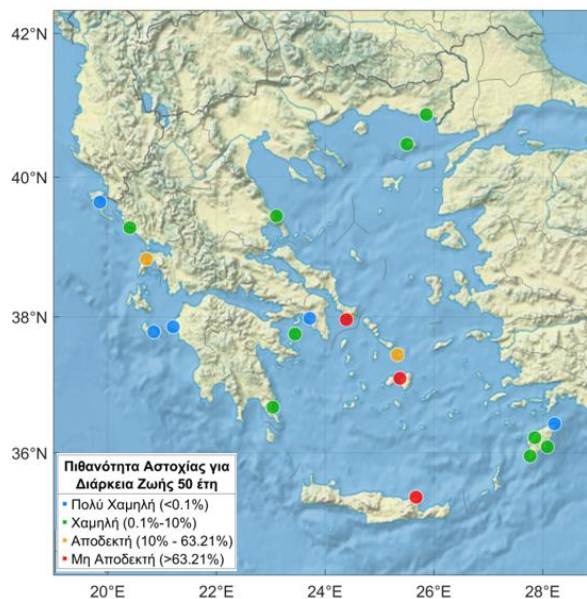
Διακριτοποιώντας τα πεδία όλων των πιθανών τιμών των μεταβλητών u και θ και λαμβάνοντας υπόψη την παραδοχή της ανεξαρτησίας, η εξ. (8) γράφεται ως εξής:

$$\lambda(D > C) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N P(D > C | u_i, \theta_j) \cdot P(u_i, \theta_j) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N P(D > C | u_i, \theta_j) \cdot P(u_i) \cdot P(\theta_j) \quad (9)$$

Συνεπώς, εφαρμόζοντας την Εξ. (9) σε κάθε περιοχή, μπορεί να υπολογιστεί η ΜΕΣ αστοχίας λ , καθώς και η αντίστοιχη περίοδος επαναφοράς $T = 1/\lambda$. Επίσης θεωρώντας ότι οι συνδυασμοί ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου που προκαλούν αστοχία ακολουθούν μια διαδικασία Poisson με μέση τιμή λ , τότε η πιθανότητα αστοχίας του υπό εξέταση ιστού για κάθε περιοχή και για δεδομένο χρονικό διάστημα t έτη μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$P_{fail} = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (10)$$

Στον Πίν. 2 παρουσιάζεται η ΜΕΣ καθώς και η αντίστοιχη πιθανότητα αστοχίας του υπό εξέταση ιστού για διάρκεια ζωής 50 έτη. Επίσης οι τιμές της πιθανότητας αστοχίας αποτυπώνονται στο χάρτη του Σχ. 4. Πρέπει δε να σημειωθεί ότι με βάση τις παραδοχές του Ευρωκώδικα η περίοδος επαναφοράς λαμβάνεται ίση με 50 έτη (δηλ. $\lambda = 0,02$). Συνεπώς, η αντίστοιχη αποδεκτή πιθανότητα αστοχίας θεωρώντας 50 έτη διάρκειας ζωής του ιστού προκύπτει από την εξ. (10) ίση με 63,21%.



Σχ. 4: Πιθανότητα αστοχίας θεωρώντας διάρκεια ζωής του ιστού 50 έτη

Περιοχή	ΜΕΣ (λ)	Πιθανότητα Αστοχίας για Διάρκεια Ζωής (50 έτη)

Αίγινα	1,90E-05	0,09%
Αλεξανδρούπολη	6,42E-04	3,16%
Αθήνα	7,82E-11	0,00%
Έμπωνας Ρόδου	1,81E-03	8,67%
Φινοκαλιά Λασιθίου	2,89E-01	100,00%
Κατταβιά Ρόδου	1,52E-05	0,08%
Κέρκυρα	2,87E-09	0,00%
Λευκάδα	1,18E-02	44,48%
Λίνδος Ρόδου	1,90E-04	0,95%
Μονεμβασία	4,94E-04	2,44%
Μύκονος	5,64E-03	24,58%
Νάξος	2,41E-02	70,07%
Πάργα	2,29E-04	1,14%
Παξιμάδα Ευβοίας	1,74E-01	99,98%
Ρόδος	2,50E-07	0,00%
Σαμοθράκη	2,10E-03	9,95%
Βαρθολομιό Ηλείας	1,42E-08	0,00%
Ζαγορά Πηλίου	2,56E-06	0,01%
Ζάκυνθος	5,20E-09	0,00%

Πίν. 2: ΜΕΣ αστοχίας και πιθανότητα αστοχίας για διάρκεια ζωής 50 έτη

Παρατηρώντας τις τιμές του Πίν. 2 και του Σχ. 4 προκύπτει ότι μόνο 3 από τις εξεταζόμενες περιοχές εμφανίζουν μη αποδεκτή τιμή πιθανότητας αστοχίας ($> 63,21\%$), οι οποίες επίσης είναι οι ίδιες περιοχές που εμφανίζουν τιμή ταχύτητας με περίοδο επαναφοράς 50 έτη μεγαλύτερη από 33 m/s. Από τις υπόλοιπες περιοχές, 2 εμφανίζουν σημαντική πιθανότητα αστοχίας (από 10% έως 63,21%) που είναι όμως αποδεκτή. Τέλος, 9 περιοχές εμφανίζουν χαμηλή πιθανότητα αστοχίας ($< 10\%$) και 5 πολύ χαμηλή πιθανότητα ($< 0,1\%$).

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα της εκτίμησης της επιτελεστικότητας όπως αποτυπώνονται από τις τιμές της ΜΕΣ και της πιθανότητας αστοχίας για κάθε περιοχή είναι πλήρως συμβατά με τις εκτιμώμενες τιμές ταχύτητας ανέμου με περίοδο επαναφοράς 50 έτη. Ενδιαφέρον επίσης είναι το γεγονός ότι, παρότι όλες οι εξεταζόμενες περιοχές ανήκουν στην ίδια ζώνη ανέμου με βάση των Ευρωκώδικα, παρατηρείται μεγάλη διασπορά στις τιμές της πιθανότητας αστοχίας. Είναι δε χαρακτηριστικό ότι στις περισσότερες περιοχές η πιθανότητα αστοχίας προκύπτει σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη προβλεπόμενη από τον Ευρωκώδικα. Συνεπώς για τις περιοχές αυτές θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι ακολουθώντας τις προδιαγραφές του Ευρωκώδικα προκύπτει υπερδιαστασιολόγηση του ιστού. Τέλος, για τρεις περιοχές προκύπτει μεγαλύτερη πιθανότητα αστοχίας από την προβλεπόμενη, γεγονός που μάλλον υποδηλώνει την ανεπάρκεια του Ευρωκώδικα και συγκεκριμένα της προτεινόμενης τιμής $v_{b,0} = 33 \text{ m/s}$ για τις περιοχές αυτές.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η επιτελεστικότητα μιας κατασκευής μπορεί να εκτιμηθεί εφαρμόζοντας κατάλληλο πλαίσιο αποτίμησης (Performance Based Engineering framework). Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε ένα πλαίσιο αποτίμησης επιτελεστικότητας για τον υπολογισμό της πιθανότητας αστοχίας ενός δικτυωτού χαλύβδινου ιστού τηλεπικοινωνιών σχεδιασμένου με βάση τις παραδοχές του Ευρωκώδικα για παράκτιες περιοχές της Ελλάδας. Η αποτίμηση πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τόσο την τρωτότητα του ιστού, όσο και τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά διαφορετικών πιθανών περιοχών εγκατάστασης. Επιπλέον η πιθανότητα αστοχίας που προέκυψε για κάθε περιοχή αποτιμήθηκε σε σχέση με την πιθανότητα αστοχίας που προβλέπει ο Ευρωκώδικας.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν καταδεικνύουν ότι η υιοθέτηση από τον Ευρωκώδικα της ίδιας τιμής χαρακτηριστικής ταχύτητας ανέμου για όλα τα νησιά και τις παράκτιες περιοχές της Ελλάδας μάλλον θα

πρέπει να επαναξιολογηθεί. Πιο συγκεκριμένα για τις περισσότερες περιοχές που εξετάστηκαν προκύπτει σημαντικά μικρότερη πιθανότητα αστοχίας σε σχέση με αυτή που προκύπτει ακολουθώντας τις προδιαγραφές του κανονισμού, γεγονός που υποδηλώνει ότι για τις περιοχές αυτές ο κανονισμός οδηγεί σε υπερδιαστασιολογημένες και ενδεχομένως αντικοινομικές κατασκευές. Από την άλλη πλευρά, αν και σπανιότερες, υπάρχουν περιπτώσεις για τις οποίες οι παραδοχές του κανονισμού προκύπτουν μάλλον ανεπαρκείς, οδηγώντας σε υποδιαστασιολογημένες κατασκευές.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη διαδικασία αποτίμησης της επιτελεστικότητας, πέρα από ένα μέσο για την αξιολόγηση του κανονισμού, θα μπορούσε να αποτελέσει και ένα χρήσιμο εργαλείο για τις εταιρείες κινητής τηλεφωνίας στα πλαίσια του σχεδιασμού ή/και αναβάθμισης των δικτύων τους.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Η συμμετοχή του πρώτου συγγραφέα στο συνέδριο και η δημοσίευση του άρθρου χρηματοδοτήθηκε από το ερευνητικό πρόγραμμα «Asset Level Modelling of RISKS In the Face of Climate Induced Extreme Events and ADAPTtation - RISKADAPT» που χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση με κωδ. αριθμό: 101093939 μέσω του προγράμματος HORIZON.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Makkonen, L., Lehtonen, P., & Hirviniemi, M. Determining ice loads for tower structure design, *Engineering Structures*, 74, 229-232, 2014.
- [2] Sundin, E., & Makkonen, L. Ice loads on a lattice tower estimated by weather station data. *Journal of applied meteorology*, 37, 523-529, 1998.
- [3] Szafran, J. An experimental investigation into failure mechanism of a full-scale 40 m high steel telecommunication tower. *Engineering Failure Analysis*, 54, 131-145, 2015.
- [4] Szafran, J., & Rykaluk, K. A full-scale experiment of a lattice telecommunication tower under breaking load. *Journal of Constructional Steel Research*, 120, 160-175, 2016.
- [5] Lorenzo, I. F., Elena, B. C., Rodríguez, P. M., & Parnás, V. B. E. Dynamic analysis of self-supported tower under hurricane wind conditions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 197, 104078, 2020.
- [6] Tian, L., Zhang, X., & Fu, X. Collapse Simulations of Communication Tower Subjected to Wind Loads Using Dynamic Explicit Method. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34, 04020024, 2020.
- [7] Tsavdaridis, K. D., Nicolaou, A., Mistry, A. D., & Efthymiou, E. Topology optimisation of lattice telecommunication tower and performance-based design considering wind and ice loads. *Structures*, 27, 2379-2399, 2020.
- [8] Dasiou, M.-E., Vayas, I. & Efthymiou, E. Comparative study of wind loading on telecommunication masts according to DIN 4131 and Eurocode 3 [Vergleichende Untersuchungen zur Windbelastung auf freistehende Telekommunikationsmasten nach DIN 4131 und Eurocode 3], *Stahlbau*, 79, 19-24, 2010.
- [9] Stamatopoulos, G. N. Assessment of strength and measures to upgrade a telecommunication steel tower. *International journal of steel structures*, 13, 331-340, 2013.
- [10] Tessari, R. K., Kroetz, H. M., & Beck, A. T. Performance-based design of steel towers subject to wind action. *Engineering Structures*, 143, 549-557, 2017.
- [11] Depina, I., Divić, V., Munjiza, A., & Peroš, B. Performance-based wind engineering assessment of critical telecommunication infrastructure subjected to bora wind. *Engineering Structures*, 236, 112083, 2021.
- [12] Cornell, C. A., & Krawinkler, H. Progress and Challenges in Seismic Performance Assessment. *PEER Center News*, 3(2), 1-4, 2000.

- [13] Bakalis, K., & Vamvatsikos, D. Seismic fragility functions via nonlinear response history analysis. *Journal of Structural Engineering*, 144, 04018181, 2018.
- [14] Bilionis, D.V., Vlachakis, K., Vamvatsikos, D., Dasiou, M.E., Vayas, I. & Lagouvardos, K., Risk assessment of rehabilitation strategies for steel lattice telecommunication towers of Greece under extreme wind hazard. *Engineering Structures*, 267, p.114625, 2022.
- [15] Jonkman, B.J. & Kilcher, L. *TurbSim User's Guide: Version 1.06.00*. NREL Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, 2012.
- [16] Mazzoni S., McKenna F., Scott M., & Fenves G., Open system for earthquake engineering simulation. User Command-Language Manual, Report NEES grid-TR 2004-21, Berkeley, CA: Pacific Earthquake Engineering Research, University of California, 2006. Retrieved
- [17] Baker, J.W., Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis. *Earthquake Spectra*, 31, 579-599, 2015.
- [18] Paschen, R., Pezard, J., & Zago, P., Probabilistic evaluation on test results of transmission line towers. *International Conference on Large High Voltage Electric Systems*, 28th Aug. - 3rd Sep. 1988, Paris, France.
- [19] Ellingwood, B. R., & Tekie, P. B., Wind load statistics for probability-based structural design. *Journal of structural engineering*, 125(4), 453-463, 1999.
- [20] FEMA P-58-1, Seismic performance assessment of buildings Volume 1-Methodology 2nd Ed., *Federal Emergency Management Agency*, 2018
- [21] Lagouvardos K., Kotroni V., Bezes A., Koletsis I., Kopania T., Lykoudis S., Mazarakis N., Papagiannaki K., Vougioukas S., The automatic weather stations network NOANN of the National Observatory of Athens: operation and database. *Geoscience Data Journal*, 2017.
- [22] EN 1991-1-4, Design of steel structures. Part 1-4: General actions – Wind actions. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 2005.
- [23] Greek National Annex to ELOT EN 1991-1-4:2005 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions, 2005.

PERFORMANCE-BASED WIND ASSESSMENT OF STEEL LATTICE TELECOMMUNICATION TOWERS IN COASTAL REGIONS OF GREECE

Dimitrios V. Bilonis

Environmental Reliability & Risk Analysis (ERRA)
Leof. Syggroy 67 & Zan Moreas 40, Athens, 11745, Greece
d.bilonis@erra.gr

Konstantinos Vlachakis

PhD Candidate
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece
kostasvlachakis@central.ntua.gr

Maria-Eleni Dasiou

PhD Candidate
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece
medasiou@mail.ntua.gr

Dimitrios Vamvatsikos

Associate Professor
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece
divamva@mail.ntua.gr

Ioannis Vayas

Professor Emeritus
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece
vastahl@central.ntua.gr

Konstantinos Lagouvardos

Research Director
Institute for Environmental Research and Sustainable Development, National Observatory of Athens, Greece
lagouvar@noa.gr

SUMMARY

Steel lattice towers are widely used for supporting telecommunication antennas. Herein, a performance-based analysis of a 48 m steel lattice telecommunication tower is presented. The tower has been designed according to the Eurocode requirements for coastal areas of Greece considering a basic wind speed value of 33 m/s. First, the fragility assessment (probability of failure) of the particular tower against various combinations of wind speed

and direction is carried out. Then, after elaborating time series of wind data from selected islands or coastal regions throughout Greece and based on the resulting wind speed and direction distributions, the corresponding risk of the tower is calculated for each location and the results are displayed on the geographical map of Greece. In practice, the above procedure introduces a framework for evaluating the performance of steel lattice towers against extreme wind. The present framework can be elaborated as a useful tool by mobile phone companies in the context of planning and/or upgrading their networks. Furthermore, by assessing and comparing the resulting risk levels of the various locations (coastal regions), inferences about the validity of Eurocode National Annex assumption for a single basic wind speed value of 33 m/s for all coastal regions in Greece can be derived.