

## **ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΙΚΤΥΩΤΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

**Ζαχαρίας Χ. Φασουλάκης**

Υπ. Διδάκτωρ

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: [fasoulakis-z@hotmail.com](mailto:fasoulakis-z@hotmail.com)

**Ιωάννης Γ. Ραυτογιάννης**

Αν. Καθηγητής

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ελλάδα

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

**Τάσος Π. Αβραάμ**

Επ. Καθηγητής

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ελλάδα

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

### **1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Ο σχεδιασμός δικτυωτών πυλώνων μεταφοράς ενέργειας έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές μέχρι σήμερα. Στην παρούσα εργασία επισημαίνονται οι δυσκολίες που προκύπτουν κατά την επίλυση και διαστασιολόγηση τέτοιων κατασκευών με μέλη από διατομές γωνιακών. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης για έναν τυπικό πυλώνα - ευθυγραμμίας και μικρής γωνίας - γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος. Με δεδομένο ότι οι δράσεις ανέμου αποτελούν κρίσιμο κριτήριο σχεδιασμού, συγκρίνονται οι δυνάμεις ανεμοπίεσης που προβλέπονται από διάφορους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς. Επίσης, διερευνάται η επιρροή κατασκευαστικών λεπτομερειών (όπως οι συνδέσεις των ενισχύσεων επί της υφιστάμενης κατασκευής) στην αντοχή των μελών καθώς και στην όλη συμπεριφορά του φορέα. Ακολουθώντας, προτείνονται βελτιώσεις/ενισχύσεις των υφιστάμενων φορέων, προκειμένου να ανταποκρίνονται στις ισχύουσες κανονιστικές διατάξεις. Τέλος, γίνεται αναφορά σε υπολογιστικούς προβληματισμούς που προέκυψαν κατά τη διερεύνηση.

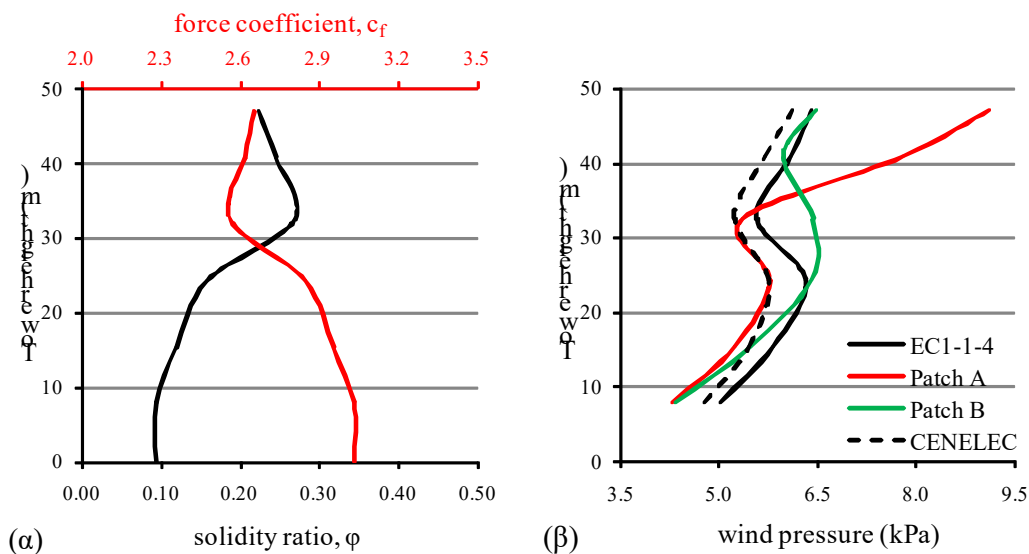
## 2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο άμεσο μέλλον, χώρες με σημαντικό δίκτυο ηλεκτροδότησης θα αντιμετωπίσουν το θέμα της επάρκειας καθώς και του επανασχεδιασμού των υφιστάμενων γραμμών λειτουργίας (τόσο σε μεγέθη ηλεκτρικής ενέργειας όσο και σε στατική συμπεριφορά των πυλώνων – καθώς οι ηλικία των τελευταίων ξεπερνά ήδη τα 40-50 χρόνια). Έτσι, το θέμα της στατικής επάρκειας και η ανάγκη ενίσχυσης υφιστάμενων πυλώνων μεταφοράς ενέργειας θα αναδειχθούν ακόμα περισσότερο. Σημαντικές επεμβάσεις σε έναν πυλώνα προκειμένου για την ασφαλή λειτουργία, μπορεί να προκύπτουν σε περιπτώσεις ηλεκτρικής ή δομικής αναβάθμισης της γραμμής (uprating και upgrading αντίστοιχα). Έχουν ήδη καταγραφεί στη βιβλιογραφία Τεχνικές Οδηγίες [1]-[2] που συμπληρώνουν τα γνωστά κανονιστικά κείμενα [3]-[8]. Η παρούσα εργασία αντιμετωπίζει το θέμα στατικής επάρκειας και στη συνέχεια ενίσχυσης τυπικού δικτυωτού πυλώνα (ύψους 50m και κάτοψης στη βάση 11.0m x 11.0m) προκειμένου να ικανοποιεί τα κριτήρια σχεδιασμού των κείμενων κανονισμών. Ταυτόχρονα, επισημαίνονται θέματα σχετικά με τις επιβαλλόμενες δράσεις καθώς και με περισσότερο ακριβή υπολογιστικά προσομοιώματα.

## 3. ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ - ΑΝΕΜΟΣ

Η δράση του ανέμου θεωρείται απ'τους κρίσιμότερους παράγοντες σε περίπτωση αστοχίας μίας γραμμής μεταφοράς ενέργειας. Για το λόγο αυτό, οι προβλέψεις για τον άνεμο σύμφωνα με γνωστούς Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς (Ευρωκώδικες 1 και 3, CENELEC) αξίζουν ιδιαίτερης προσοχής. Εκτενέστερη διερεύνηση, σύντομη αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο και προτάσεις βελτίωσης έχει γίνει από τον Peyrot (2009)[9].

Στα παρακάτω σχήματα, παρατηρείται η κατανομή του συντελεστή πλήρωσης,  $\phi$ , καθώς και του συντελεστή δύναμης καθ' ύψος του πυλώνα (Σχ. 1α), ενώ συγκρίνεται η συνολική ανεμοπίεση σύμφωνα με το Μέρος 1-4 του Ευρωκώδικα 1 [4], το Μέρος 3-1 του Ευρωκώδικα 3 [6] και τον CENELEC [7]. Συγκεκριμένα, οι διαφορές που παρατηρούνται σε σύγκριση με τον EC1-1-4, σε όρους συνολικής δύναμης, είναι 2-3% για τον EC3-3-1 (Patch A&B) και 5% για τον CENELEC.



Σχ. 1: α) Κατανομή του λόγου πλήρωσεως,  $\phi$ , καθώς και του συντελεστή δύναμης,  $c_f$ , και β) κατανομή της ανεμοπίεσης καθ' ύψος του πυλώνα.

Για τον υπολογισμό των δράσεων ανέμου, σημαντικό είναι να αναφέρουμε τις αντίστοιχες διατάξεις. Για τον υπολογισμό δύναμης ανέμου επί στοιχείων, από το Μέρος 1-4 (EC1) λαμβάνονται οι εξ. (1)-(2). Σύμφωνα με το Μέρος 3-1 (EC3), προκύπτει ότι για τη δεδομένη γεωμετρία του πυλώνα θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν 2 μοντέλα προσομοίωσης της φόρτισης ανέμου (patch loading). Από τις εξ. (3)-(4) προκύπτουν οι δυνάμεις για μέσο και προσαυξημένο άνεμο, αντίστοιχα. Τέλος, ο CENELEC προσδιορίζει τις δυνάμεις εισάγοντας τον συντελεστή ριπής ανέμου (gust factor),  $k_g$ , όπως φαίνεται στις εξισώσεις (5)-(6). Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι, όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφία [9], οι υπολογισμοί για «ακαδημαϊκούς ανέμους» όπως στον CENELEC, δεν βασίζονται σε μετρήσεις για χρονική περίοδο 2-3 sec, αλλά προκύπτουν με βάση τη μέση ταχύτητα ανέμου μετά από στατιστική επεξεργασία.

$$F_w = c_s \cdot c_d \cdot \sum c_f \cdot q_p(z) \cdot A_{ref} \quad (1)$$

$$q_p = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot v_m^2(z) \quad (2)$$

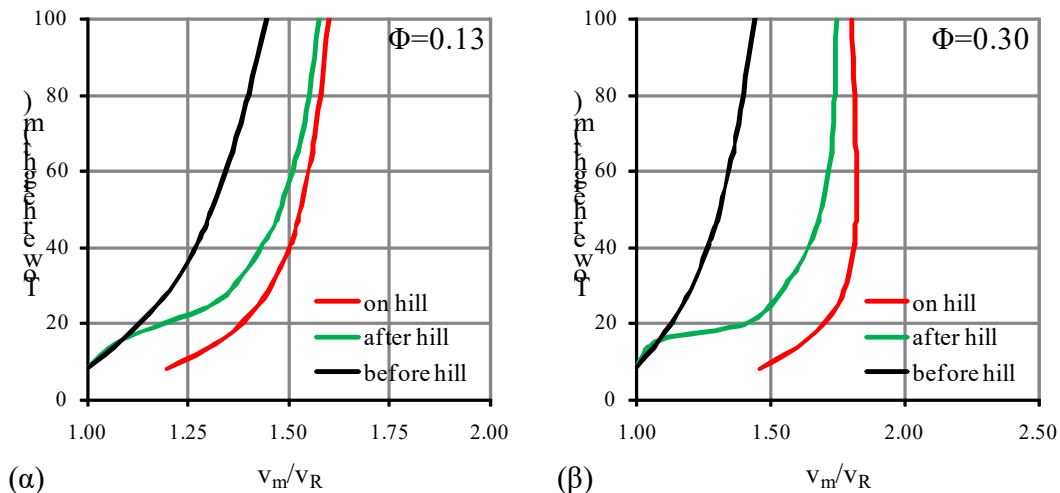
$$F_{m,w}(z) = \frac{q_p(z)}{1 + 7 \cdot I_v(z)} \cdot \sum c_f \cdot A_{ref} \quad (3)$$

$$F_{T,w}(z) = F_{m,w}(z) \cdot \left[ 1 + \left( 1 + 0.2 \left( \frac{z}{h} \right)^2 \right) \frac{[1 + 7 \cdot I_v(z)] [c_s \cdot c_d - 1]}{c_0(z)} \right] \quad (4)$$

$$Q_{wt} = q_h \cdot G_q \cdot G_t \cdot (1 + 0.2 \cdot \sin^2 2\phi) \cdot (C_{t1} \cdot A_{t1} \cdot \cos^2 \phi + C_{t2} \cdot A_{t2} \cdot \sin^2 \phi) \quad (5)$$

$$G_q = k_g^2 = (1 + 2.28 / \ln(h/z_0))^2 \quad (6)$$

Ακόμα, σημαντική παράμετρο για τον προσδιορισμό ανεμοπίεσης αποτελεί η τοπογραφική διαμόρφωση. Στο επόμενο σχήμα συγκρίνονται οι μέσες ταχύτητες ανέμου, σύμφωνα με το Μέρος 1-4 (EC1), που προκύπτουν σε 3 διαφορετικές θέσεις (πριν από λόφο, επάνω και μετά από λόφο) για 2 κλίσεις της επιφάνειας του εδάφους. Η προσαύξηση, ιδιαίτερα για κλίση  $\Phi=0.3$  είναι πολύ σημαντική, λαμβάνοντας υπόψη και το γεγονός ότι η ανεμοπίεση είναι ανάλογη από το τετράγωνο της ταχύτητας, όπως είναι γνωστό από την εξίσωση Bernoulli. Στο Σχ. 2 οι μέσες ταχύτητες,  $v_m$ , έχουν αδιαστατοποιηθεί με την ταχύτητα αναφοράς,  $v_R$ .



Σχ. 2: Σύγκριση κατανομής της μέσης ταχύτητας ανέμου,  $v_m(z_e)$  καθ' ύψος στην περίπτωση λόφου, για 2 περιπτώσεις κλίσεων εδάφους: α)  $\Phi=0.13$  και β)  $\Phi=0.3$ .

Τέλος, για τον προσδιορισμό των δράσεων σχεδιασμού, θα πρέπει να ορισθούν οι οριακές καταστάσεις αστοχίας, σύμφωνα και με το επίπεδο αξιοπιστίας. Το τελευταίο, όπως αναφέρεται και στους κανονισμούς, γίνεται βάσει reliability management και εξαρτάται εν πολλοίς και στις κοινωνικο-οικονομικές συνέπειες της κατάρρευσης της κατασκευής [6]. Ακολουθεί συνοπτικός πίνακας με συντελεστές φορτίσεων (partial factor ανέμου -  $\gamma_w$ ) για τους 3 υπό εξέταση κανονισμούς. Τα Sections 4.2 & 4.3 του CENELEC αναφέρονται στη Γενική και την Εμπειρική Μέθοδο αντίστοιχα. Επιπλέον, για τους συνδυασμούς που περιλαμβάνουν ταυτόχρονη δράση ανέμου-παγετού, στην παρούσα διερεύνηση έγινε χρήση του ISO 12494:2001 [10], όπως ορίζεται και στο Μέρος EC3-3-1.

Κανονισμός	Κατηγορία Αξιοπιστίας		
	1	2	3
EC0		1.5	
EC3-3-1	1.2	1.4	1.6
CENELEC (4.2)	1.0	1.2	1.4
CENELEC (4.3)		1.3	

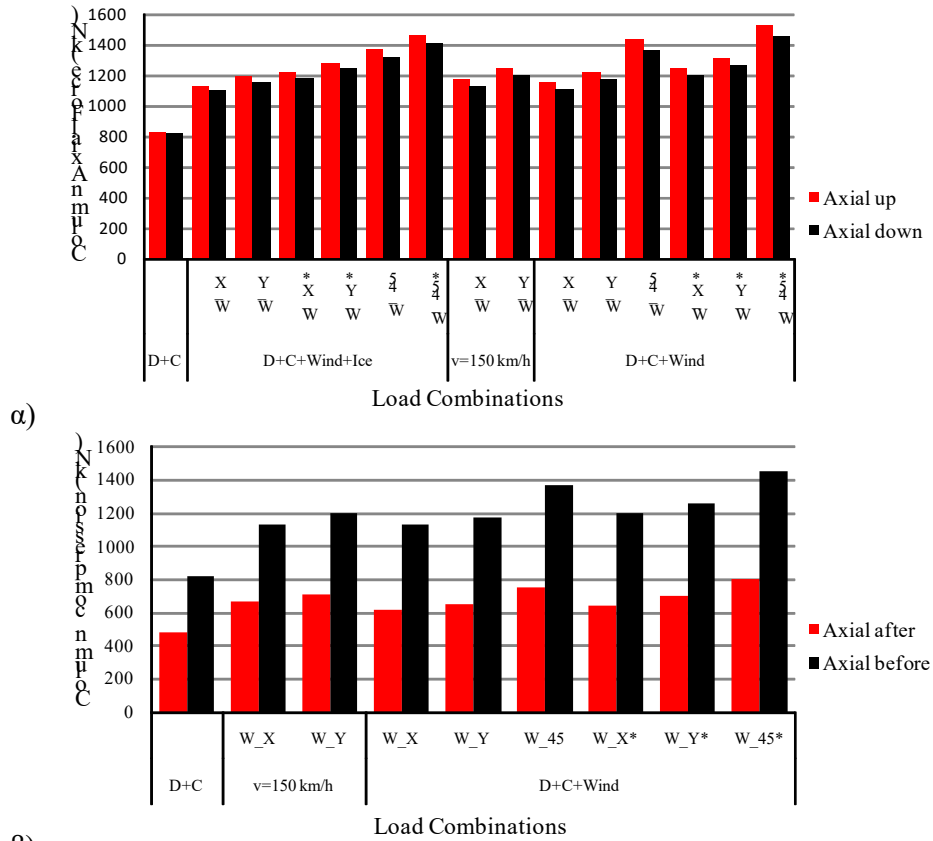
Πίν. 1. Σύγκριση συντελεστών συνδυασμού δράσεων ανέμου,  $\gamma_w$ .

#### 4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΦΟΡΕΑ

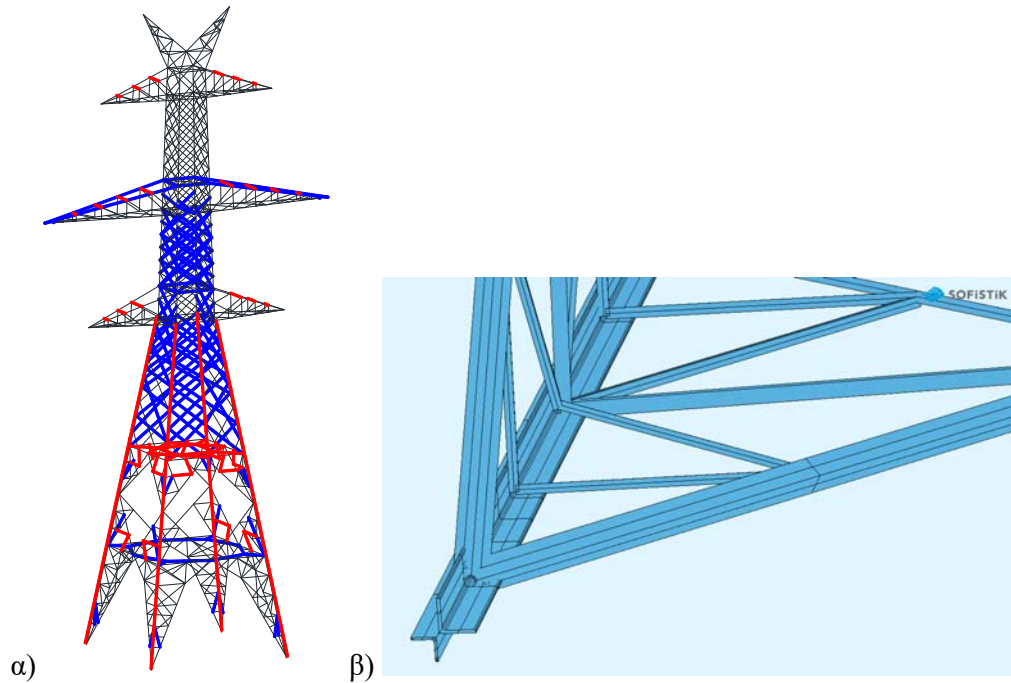
Με βάση τις απαιτήσεις των δράσεων, προκύπτουν τα αποτελέσματα από τις αντίστοιχες στατικές αναλύσεις, οι οποίες έγιναν με χρήση λογισμικού του εμπορίου [11]. Αξίζει να αναφερθεί ότι η δράση του ανέμου για τη μεγαλύτερη επιφάνεια του πυλώνα (εγκαρσίως της γραμμής) υπολογίζεται χωρίς συντελεστές συνδυασμού περίπου διπλάσια συνολική δύναμη από το ίδιο βάρος του πυλώνα. Στο ιστόγραμμα του Σχ. 3α γίνεται σύγκριση των αξονικών δυνάμεων σε 2 δυσμενείς θέσεις των υποστυλωμάτων καθ' ύψος του πυλώνα (στάθμες +0.7m και +11.6m), για διάφορους συνδυασμούς δράσεων. Το σύμβολο (\*) στους συνδυασμούς υποδηλώνει την ταυτόχρονη ύπαρξη της δράσης σπασμένου αγωγού. Από τα αποτελέσματα παρατηρούνται δυσμενέστερα (επομένως κρισιμότερα για τον σχεδιασμό) εντατικά μεγέθη για την περίπτωση της δράσης του ανέμου χωρίς ταυτόχρονα παγετό. Το τελευταίο, πριν γενικευθεί, επιβαιώθηκε για το σύνολο του φορέα.

Τα προβλήματα αντοχών που προκύπτουν σύμφωνα με τα Μέρη EC3-1-1 & EC3-3-1, εμφανίζονται κυρίως για τις γέφυρες, τα υποστυλώματα μέχρι τη στάθμη 24m, καθώς και κάποια δευτερεύοντα στοιχεία (σύνδεσμοι δυσκαμψίας). Κρίνεται, λοιπόν, επιβεβλημένη η αντικατάσταση των δοκών των γεφυρών, ενώ μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζεται στην ενίσχυση των υποστυλωμάτων. Κατά την ανάλυση επιλέγεται η προσομοίωση των νέων στοιχείων και η σύνδεσή τους με τον υφιστάμενο φορέα μέσω ελαστικών στηρίξεων. Για τις παραμέτρους των τελευταίων έγιναν επαναληπτικές διαδικασίες μέχρι να ικανοποιούνται κριτήρια κατανομής των εντατικών μεγεθών στα υφιστάμενα και νέα μέλη της κατασκευής καθώς και τα κριτήρια σχεδιασμού για τις συνδέσεις.

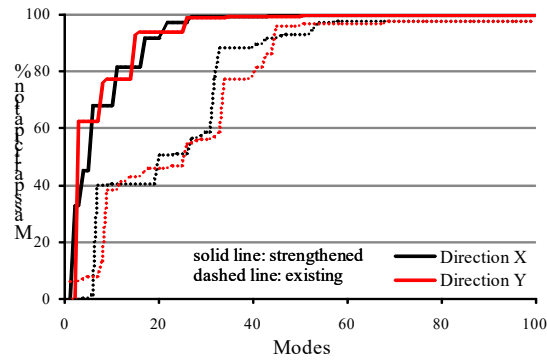
Η σύγκριση της κατανομής των αξονικών δυνάμεων, για την ίδια θέση υποστυλώματος πριν και μετά την ενίσχυση παρατηρείται εύκολα στο ιστόγραμμα του Σχ. 3β. Ακόμα, στο Σχ. 4 επισυνάπτονται: α) ο φορέας με τις ενισχύσεις και αντικαταστάσεις μελών, καθώς και β) η απεικόνιση της προσθήκης μέλους σε υφιστάμενο υποστυλώμα από το πρόγραμμα διαστασιολόγησης. Τέλος, αν και η σεισμική δράση δεν είναι κρίσιμη για τον σχεδιασμό, εντούτοις καλό είναι να αναφερθούν ορισμένα δυναμικά χαρακτηριστικά του νέου φορέα και η σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα του υφιστάμενου, όπως αυτά απεικονίζονται στο Σχ. 5. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σε 2 ιδιομορφές ( $T=1.05$  sec και  $T=0.55$  sec αντίστοιχα) ο νέος φορέας συγκεντρώνει το 60% της μάζας και για τις δύο διευθύνσεις, ενώ το 90% της μάζας αθροίζεται στις πρώτες 16 ιδιομορφές (έναντι 44 για τον υφιστάμενο).



Σχ. 3: Συγκριτική απεικόνιση αξονικών δυνάμεων α) σε δύο θέσεις των υφιστάμενων υπ/των και β) στην ίδια θέση πριν και μετά την ενίσχυση.



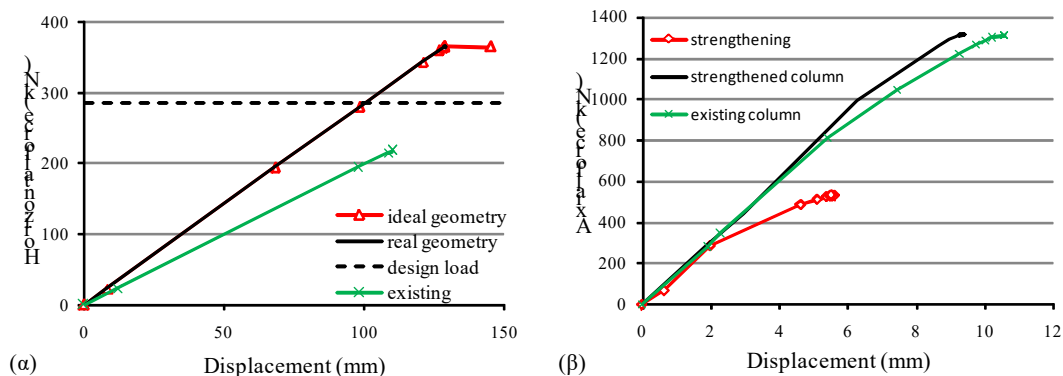
Σχ. 4: α) Απεικόνιση απαιτούμενων ενισχύσεων (κόκκινο) και αντικαταστάσεων μελών (μπλε) και β) απεικόνιση ενίσχυσης υπ/τος με προσθήκη μέλους από το πρόγραμμα διαστασιολόγησης.



Σχ. 5: Σύγκριση δυναμικών ιδιοτήτων υφιστάμενου (συνεχόμενη) και ενισχυμένου φορέα (διακεκομμένη) (μαύρο: εγκάρσιως δ/σης γραμμής, κόκκινο: δ/ση γραμμής).

#### 4.1 Μη-γραμμική στατική ανάλυση

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι εφαρμόζοντας εξελιγμένες υπολογιστικές μεθόδους προσεγγίζεται περισσότερο -και άρα γίνεται περισσότερο κατανοητή- η πραγματική συμπεριφορά του φορέα [12]-[14]. Για την υπό εξέταση περίπτωση, η πραγματική κατάσταση μεταφράζεται σε όρους φάσεων κατασκευής καθώς και επιρροή μη-γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας. Για το λόγο αυτό πραγματοποιούνται μη-γραμμικές (incremental) στατικές αναλύσεις λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή φαινομένων 3<sup>ης</sup> τάξεως. Συγκεκριμένα, τα νέα μέλη των ενισχύσεων εισάγονται αφού έχει προηγηθεί στάδιο φόρτισης με τα βασικά φορτία λειτουργίας της γραμμής που δρουν κατά τη διάρκεια των επεμβάσεων. Επιπλέον, πραγματοποιούνται αναλύσεις λαμβάνοντας υπόψη τις ενισχύσεις των υποστυλωμάτων στην παραμορφωμένη γεωμετρία (real geometry). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η επιρροή έναντι στη γεωμετρία των ενισχύσεων στην απαραμόρφωτη κατάσταση (ideal geometry) είναι αμελητέα (κάτω από 1% στη συνολική δρώσα οριζόντια δύναμη). Στο Σχ. 6 παρατηρούνται: α) η αύξηση της φέρουσας ικανότητας για τον ενισχυμένο φορέα (άνεμος παράλληλα στη δ/ση της γραμμής), και β) οι δρόμοι ισορροπίας για δυσμενές υπ/μα στη βάση του πυλώνα, πριν και μετά την ενίσχυση καθώς και για το αντίστοιχο της ενίσχυσης (άνεμος κάθετα στη δ/ση της γραμμής).



Σχ. 6: Δρόμος ισορροπίας α) για σημείο στην υψηλότερη στάθμη του πυλώνα (Capacity curve) και β) για υπ/μα στη βάση του πυλώνα.

### 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε κατά την ανάλυση και τον σχεδιασμό ενός τυπικού δικτυωτού πυλώνα μεταφοράς ενέργειας από

χαλύβδινα μέλη γωνιακής διατομής. Αφού συζητήθηκαν κάποια μείζονα θέματα για τη δράση του ανέμου από τη βιβλιογραφία και για διάφορους κανονισμούς, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των στατικών αναλύσεων και επισημάνθηκαν οι κρίσιμοι συνδυασμοί δράσεων. Ακολούθησε η παρουσίαση των επεμβάσεων και η στατική επάρκεια για τον ενισχυμένο φορέα, καθώς και κάποια αναφορά στα δυναμικά χαρακτηριστικά. Τέλος, ιδιαίτερα χρήσιμα συμπεράσματα προέκυψαν από μη-γραμμικές αναλύσεις, οι οποίες επιβεβαιώνουν την πραγματική συμπεριφορά του ενισχυμένου φορέα.

Από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας και λόγω της κρισιμότητας του σχεδιασμού πυλώνων μεταφοράς ενέργειας προκύπτει η ανάγκη για περαιτέρω έρευνα. Πιο συγκεκριμένα, περισσότερο λεπτομερή προσομοιώματα είναι απαραίτητα ώστε να λαμβάνεται υπόψη η ακριβής συμπεριφορά των συνδέσεων στην απόκριση του φορέα. Ακόμα, βελτιστοποίηση σχεδιασμού με κριτήριο το βάρος μπορεί να γίνει κάνοντας χρήση διαφορετικού τύπου διατομών, με στόχο απομειωμένους συντελεστές δύναμης για τη δράση του ανέμου και ταυτόχρονα βελτίωση της φέρουσας ικανότητας και της αισθητικής της κατασκευής.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] CIGRE, “How OH lines are re-designed for uprating/upgrading”. *Working Group B2.06*, Report No. 294, June 2006.
- [2] CIGRE, Guidelines for increased utilization of existing overhead transmission lines. *Working Group B2.13*, Report No. 353, August 2008.
- [3] EN 1990:2001. Basis of structural design, *CEN*, Brussels.
- [4] EN 1991-1-4:2010. Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions. *CEN*, Brussels.
- [5] EN 1993-1-1:2009. Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. *CEN*, Brussels.
- [6] EN 1993-3-1:2009. Design of steel structures – Part 3-1: Towers, masts and chimneys – Towers and masts. *CEN*, Brussels.
- [7] EN 50341-1:2001. Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV – Part 1: General requirements – Common specifications. *CENELEC*, Brussels.
- [8] IEC. Design criteria of overhead transmission lines. *Standard IEC 60826*, IEC, Geneva, Switzerland, 2003.
- [9] Peyrot, A.H. Wind loading: uncertainties and honesty suggest simplification. *Electrical Transmission and Substation Structures Conference*, ASCE, 2009, pp. 184-208.
- [10] ISO 12494:2001. Atmospheric icing of structures. *International Organization for Standardization*, 2001.
- [11] SOFiSTiK. Software Manuals. SOFiSTiK AG, 2016, [www.sofistik.com](http://www.sofistik.com).
- [12] Stamatopoulos G. “Assessment of strength and measures to upgrade a telecommunication steel tower”. *International Journal of Steel Structures*, Vol. 13, No. 2, 2013, pp. 331-340.
- [13] Tapia-Hernández E. and Emilio S. “Structural behaviour of lattice transmission towers subjected to wind load”, *Structure and Infrastructure Engineering*, 2017, DOI: 10.1080/15732479.2017.1290120.
- [14] Tapia-Hernández E, Ibarra-González S. and De-León-Escobedo D. “Collapse mechanisms of power towers under wind loading”, *Structure and Infrastructure Engineering*, 2016, DOI: 10.1080/15732479.2016.1190765.

# **INVESTIGATION ON STRUCTURAL ASSESSMENT AND STRENGTHENING OF ENERGY TRANSMISSION STEEL LATTICE TOWERS**

**Zacharias C. Fasoulakis**

PhD Candidate

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: [fasoulakis-z@hotmail.com](mailto:fasoulakis-z@hotmail.com)

**Ioannis G. Raftoyiannis**

Associate Professor

National Technical University of Athens

Athens, Greece

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

**Tassos P. Avraam**

Assistant Professor

National Technical University of Athens

Athens, Greece

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

## **SUMMARY**

The structural behavior of energy transmission steel lattice towers has been addressed by many researchers. Difficulties arising during the analysis and the design of the examined structures with steel angle sections are highlighted in the present work. The results for a typical tower – which can be used for an overhead line with small angle and double circuit – are presented. Keeping in mind that the wind action is considered as a critical design state, the wind forces are computed using several Standards. Furthermore, the members' resistance as well as the total structural behavior are investigated under the influence of structural details (such as eccentric connections). Subsequently, strengthening measures are proposed in order to comply with the current design standards. Finally, some advanced computational results are also presented herein.