ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΚΟΧΛΙΩΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Ηλίας Δ. Θανάσουλας Πολιτικός Μηχανικός Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα, Ελλάδα e-mail: <u>iliasthana@gmail.com</u> Κωνσταντίνα Γ. Κουλάτσου Υποψήφια Διδάκτορας Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα, Ελλάδα e-mail: <u>konkoulatsou@gmail.com</u>

Χάρης Ι. Γαντές Καθηγητής Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα, Ελλάδα e-mail: <u>chgantes@central.ntua.gr</u>

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο παρόν άρθρο παρουσιάζεται μια αρχική προσέγγιση της μη γραμμικής ανάλυσης των κοχλιωτών συνδέσεων μεταξύ διαδοχικών τμημάτων πυλώνων ανεμογεννητριών, υπό ρεαλιστικά δυναμικά φορτία ανέμου και της συμπεριφοράς τους έναντι κόπωσης. Οι συνδέσεις αυτές υλοποιούνται μέσω διπλών δακτυλιοειδών ελασμάτων, τα οποία είναι εργοστασιακά συγκολλημένα σε κάθε τέμαχος του πυλώνα στις θέσεις αποκατάστασης της συνέχειας, και κοχλιώνονται μεταξύ τους με προεντεταμένους κοχλίες. Η μεταβίβαση της έντασης δύο τεμαχίων του πυλώνα γίνεται μέσω δυνάμεων επαφής στη σύνδεση, γεγονός που καθιστά το πρόβλημα μη γραμμικό. Για την ανάλυση του προβλήματος, οι κοχλίες και τα ελάσματα της υπό μελέτη σύνδεσης προσομοιώθηκαν με πεπερασμένα στοιχεία διαφόρων τύπων, τρισδιάστατα και δισδιάστατα. Οι επαφές ανάμεσα στα ελάσματα, της άντυγας του ελάσματος και του κορμού του κοχλία και της κεφαλής του κοχλία με το έλασμα λήφθηκαν υπόψη με κατάλληλα στοιχεία επαφής. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε έλεγχος σε κόπωση για τα μέλη της σύνδεσης, συνολικά στο χρόνο ζωής της ανεμογεννήτριας σύμφωνα με το ΕΝ 1993-1-9. Οι εντάσεις κόπωσης υπολογίστηκαν από τεχνητές χρονοϊστορίες ανέμου που παρήχθησαν μέσω κατάλληλων λογισμικών της National Renewable Energy Laboratory (NREL) και παρέχονται ελεύθερα στο κοινό.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας, σε μια προσπάθεια ανταπόκρισης στην αυξημένη ζήτηση ενέργειας και σε συνδυασμό με τα περιβαλλοντικά προβλήματα που δημιουργούνται από τη συνεχώς αυξανόμενη χρήση των υπαρχουσών πηγών ενέργειας αλλά και την εξάντληση των αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων, όλο και περισσότερες οικονομίες ανά τον κόσμο στρέφονται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Μεταξύ άλλων, μεγάλο ενδιαφέρον

αναπτύσσεται για την αιολική ενέργεια, με αποτέλεσμα η απαίτηση αλλά και το ενδιαφέρον για τη διερεύνηση διαφόρων θεμάτων όσον αφορά το σχεδιασμό, την κατασκευή αλλά και τη λειτουργία των ανεμογεννητριών να αυξάνεται συνεχώς.

Η συνηθέστερη μορφή πυλώνων ανεμογεννητριών είναι τα χαλύβδινα κυλινδρικά ή κολουροκωνικά κελύφη, των οποίων η κατασκευή επιτυγχάνεται (i) καμπυλώνοντας επίπεδα ελάσματα με ψυχρή έλαση ώστε να αποκτήσουν το επιθυμητό κυλινδρικό σχήμα, (ii) συγκολλώντας την κοινή ακμή ώστε να δημιουργηθεί ένα κλειστό κέλυφος, (iii) συγκολλώντας διαδοχικά κελυφωτά τμήματα μεταξύ τους ώστε να δημιουργηθούν κελύφη επιθυμητού μήκους, με κριτήριο τη δυνατότητα μεταφοράς και ανέγερσής τους και (iv) κοχλιώνοντας αυτά τα τμήματα μεταξύ τους μέσω δακτυλιοειδών πελμάτων (Σχ. 1) με προεντεταμένους κοχλίες.



Σχ. 1: Δακτυλιοειδή πέλματα σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας πυλώνα ανεμογεννήτριας

Η κύρια καταπόνηση αυτών των πυλώνων είναι καμπτική, λόγω των δράσεων του ανέμου. Το ύψος των πυλώνων και τα μήκη των πτερυγίων των ανεμογεννητριών συνεχώς αυξάνονται προκειμένου να αξιοποιηθεί καλύτερα το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό, με αποτέλεσμα την αύξηση του φορτίου του ανέμου και των αναπτυσσόμενων ροπών καθ'ύψος του πυλώνα. Λαμβάνοντας υπόψη και την ανακυκλιζόμενη φύση των ανεμοπιέσεων, ένας κύριος μηχανισμός αστοχίας τέτοιων πυλώνων είναι η κόπωση των συνδέσεων.

Στο παρόν άρθρο θα διερευνηθεί η συμπεριφορά μιας τέτοιας κοχλιωτής σύνδεσης με προεντεταμένους κοχλίες μιας ανεμογεννήτριας 1.5MW με τρία πτερύγια και ύψος πυλώνα ίσο με 82.39m, λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική φύση του φορτίου ανέμου από το οποίο καταπονείται [1]. Για τις συνδέσεις αυτές, έχουν κατά καιρούς προταθεί διάφορα προσεγγιστικά αναλυτικά [2] καθώς και αριθμητικά προσομοιώματα και έχουν πραγματοποιηθεί πειραματικές δοκιμές [3, 4]. Για τη διερεύνηση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τρία ελεύθερα για το κοινό προγράμματα, τα οποία αναπτύχθηκαν από τα National Renewable Energy Laboratory (NREL) [5] και National Wind Technology Center (NTWC) [6], με σκοπό να παραχθούν τεχνητές χρονοϊστορίες ταχύτητας ανέμου και στη συνέχεια χρονοϊστορίες ασκούμενων δυνάμεων και ροπών στην κορυφή του πυλώνα σύμφωνα με την αεροδυναμική θεωρία των πτερυγίων. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν δύο προσομοιώματα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA [7]. Το πρώτο αποτελεί λεπτομερές προσομοίωμα ενός κοχλία με πεπερασμένα στοιχεία τύπου 3d-solid τόσο για το έλασμα όσο και για τον κοχλία, το οποίο χρησιμοποιήθηκε αρχικά για να αποκτηθεί μια ποιοτική εικόνα της συμπεριφοράς της σύνδεσης. Το δεύτερο προσομοίωμα περιλαμβάνει ολόκληρη την κοχλιωτή σύνδεση χρησιμοποιώντας πεπερασμένα στοιχεία κελύφους για τα ελάσματα και τα εκατέρωθεν τμήματα του πυλώνα και στοιχεία δοκού για τους κοχλίες. Η επαφή μεταξύ των ελασμάτων και της κεφαλής του κοχλία με το έλασμα προσομοιώθηκε με κατάλληλα πεπερασμένα στοιχεία επαφής, μέσω των οποίων λαμβάνεται υπόψη η μη γραμμική συμπεριφορά της σύνδεσης. Τα αποτελέσματα του δεύτερου προσομοιώματος χρησιμοποιήθηκαν μετέπειτα για τον έλεγχο της σύνδεσης σε κόπωση.

3. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΟΧΛΙΑ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ

Για τον ακριβή υπολογισμό των δυνάμεων επαφής στην υπό μελέτη σύνδεση, ένα τμήμα του κυκλικού δακτύλιου του ελάσματος και του κοχλία όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 2, προσομοιώθηκε με πεπερασμένα στοιχεία τύπου 3d-solid.



Σχ. 2: Τμήμα της σύνδεσης που προσομοιώθηκε

Οι συνθήκες συμμετρίας επέτρεψαν τη μόρφωση της μισής γεωμετρίας του προβλήματος. Συνολικά δημιουργήθηκαν τέσσερα πλέγματα με διαδοχική πύκνωση (Σχ. 3), ώστε να εξασφαλιστεί η σύγκλιση των αποτελεσμάτων.



Σχ. 3: Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία της αλληλεπίδρασης κοχλία-ελάσματος

Ο κοχλίας είναι διατομής M20, ποιότητας 10.9 και σε πρώτη φάση της ανάλυσης προεντείνεται. Ο κυκλικός δακτύλιος έχει εξωτερική ακτίνα 260mm, εσωτερική ακτίνα 180mm, πάχος 40mm και αποτελεί τμήμα του κυκλικού δακτύλιου της σύνδεσης του πυλώνα, υπό κλίμακα ώστε να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος. Επιπλέον προσομοιώθηκαν οι 3 επιφάνειες επαφών: η επαφή κεφαλής κοχλία με έλασμα, η ενδιάμεση διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων, και η επαφή του κορμού του κοχλία με την άντυγα του ελάσματος. Μελετήθηκε η αλληλεπίδραση του κοχλία με το έλασμα τόσο σε καμπτική όσο και σε διατμητική φόρτιση. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Adina [7].

3.1 Έκκεντρη φόρτιση ελάσματος κατά z

Στην ακραία παρειά του ελάσματος ασκήθηκε σταδιακά αυξανόμενη δύναμη ως 120 kN κατά z προσομοιώνοντας τη δύναμη από το κέλυφος του πυλώνα στην εφελκυόμενη ζώνη του δακτυλίου λόγω κάμψης. Η σύγκλιση των αποτελεσμάτων όσον αφορά την αξονική δύναμη στον κοχλία (Σχ. 4), επιτυγχάνεται ακόμα και για το πιο αραιό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων (1° πλέγμα). Όσον αφορά τις μετακινήσεις, όπως για παράδειγμα

η οριζόντια μετακίνηση του ελάσματος κατά y (Σχ. 5), ικανοποιητική σύγκλιση επιτυγχάνεται για το 3° πιο πυκνό πλέγμα.



Η ανάλυση πραγματοποιείται σε 40 βήματα. Στο βήμα 1 ο κοχλίας προεντείνεται με δύναμη 50 kN και από το βήμα 2 έως το βήμα 40 αυξάνεται σταθερά η επιβαλλόμενη δύναμη στο άκρο του ελάσματος ως 120 kN. Η αξονική δύναμη του κοχλία παραμένει σταθερή μέχρι το βήμα 7, που αντιστοιχεί σε επιβαλλόμενη δύναμη περίπου 21 kN (Σχ. 4). Στο Σχ. 6 απεικονίζονται οι κάθετες προς την επιφάνεια επαφής δυνάμεις μεταξύ των δύο ελασμάτων, και η ανακατανομή που λαμβάνει χώρα καθώς αυξάνεται η επιβαλλόμενη δύναμη. Από το βήμα 12 μέχρι το τέλος της φόρτισης η συμπεριφορά είναι γραμμική καθώς οι επιφάνειες επαφής δεν μεταβάλλονται πλέον αισθητά. Η παραλαβή της επιβαλλόμενης δύναμης γίνεται μέσω του ζεύγους δυνάμεων εφελκυσμού του κοχλία και συμπίεσης στην άκρη των ελασμάτων. Η συμπεριφορά που αναδεικνύεται από την αριθμητική ανάλυση είναι συμβατή με παρατηρήσεις από πειραματικές δοκιμές που είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία [2] (Σχ. 7)



Σχ. 6: Ανακατανομή της εγκάρσιας αντίδρασης μεταξύ των ελασμάτων επαφής στα βήματα 5, 7, 10 και 40



Σχ. 7: Πειραματικές δοκιμές αλληλεπίδρασης κοχλία ελάσματος κατά Petersen [2]

Για τέσσερις διαφορετικές δυνάμεις προέντασης κοχλία 10, 50, 100 και 150 kN, διερευνήθηκε η αλληλεπίδραση κοχλία-ελάσματος στο 3° πιο πυκνό πλέγμα στοιχείων. Για μεγάλη επιβαλλόμενη δύναμη ή για μικρή δύναμη προέντασης παρατηρούμε ότι τόσο η αξονική δύναμη του κοχλία όσο και η εγκάρσια αντίδραση από το κάτω έλασμα είναι

ανεξάρτητες από τη δύναμη αρχικής προέντασης. Στο Σχ. 8 παρουσιάζεται η μεταβολή της αξονικής δύναμης του κοχλία με την αύξηση της δύναμης και στο Σχ. 9 η εγκάρσια αντίδραση μεταξύ των ελασμάτων. Λόγω ισορροπίας του συστήματος η εξωτερικά επιβαλλόμενη δύναμη κάθε στιγμή προκύπτει ως η διαφορά της αξονικής δύναμης κοχλία (Σχ. 8) από την εγκάρσια αντίδραση μεταξύ των ελασμάτων (Σχ. 9).



3.2 Προσεγγιστικός αναλυτικός υπολογισμός αξονικής δύναμης κοχλία

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που αφορούν την αξονική δύναμη κοχλία ελέγχθηκαν προσεγγιστικά μέσω της ισορροπίας του συστήματος ελάσματος-κοχλία, όπως φαίνεται στο Σχ. 10. Οι δυνάμεις που ασκούνται στο σύστημα είναι η δύναμη προέντασης F_{p,c} που εφαρμόζεται στον άξονα του κοχλία, η εξωτερικά επιβαλλόμενη δύναμη F στο άκρο του ελάσματος και η εγκάρσια αντίδραση N μεταξύ των ελασμάτων.



Σχ. 10: Ισορροπία συστήματος ελάσματος-κοχλία

Η ακριβής θέση του μοχλοβραχίονα της αντίδρασης Ν είναι άγνωστη. Για μεγάλη εξωτερική δύναμη F ή για μικρή δύναμη προέντασης, βρίσκεται στο άκρο του ελάσματος όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 10. Από την ισορροπία του ελάσματος προκύπτει:

$$\mathbf{F}_{\mathbf{P},\mathbf{C}} \cdot \mathbf{d}_1 = \mathbf{F} \cdot (\mathbf{d}_1 + \mathbf{d}_2) \tag{1}$$

Με αντικατάσταση των τιμών στο βήμα 40 λαμβάνουμε:

$$F_{P,C} \cdot 43mm = 120kN \cdot 80mm \Longrightarrow F_{P,C} = 223kN$$
⁽²⁾

Διαπιστώνεται επομένως πολύ καλή προσέγγιση σε σύγκριση με τα αριθμητικά αποτελέσματα. Για μικρότερη επιβαλλόμενη δύναμη F ή μεγάλη δύναμη προέντασης, ο μοχλοβραχίονας της αντίδρασης πρέπει να μειωθεί για να έχουμε ακριβή αποτελέσματα.

3.3 Έκκεντρη διατμητική φόρτιση ελάσματος

Για την προσομοίωση της σύνδεσης σε διάτμηση χρησιμοποιήθηκε το 3° πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων όπως φαίνεται στο Σχ. 11. Ο συντελεστής τριβής στις επιφάνειες λήφθηκε 0.5, η δύναμη προέντασης 50 kN και η τέμνουσα δύναμη που ασκήθηκε στο έλασμα αυξήθηκε σταδιακά ως την τιμή των 40 kN.



Σχ. 11: Προσομοίωση κοχλία-ελάσματος σε διάτμηση



Η τέμνουσα μέχρι την τιμή 25 kN παραλαμβάνεται μέσω της τριβής στην κάτω διεπιφάνεια σε σχεδόν μηδενική μετακίνηση, όπως αναμένεται, και στη συνέχεια το έλασμα ολισθαίνει. Αντίθετα, η επιφάνεια κάτω από την κεφαλή του κοχλία και πάνω από το έλασμα δεν έχει ολισθήσει και μπορεί να παραλάβει όση τέμνουσα απομένει αλλά σε μεγαλύτερες μετακινήσεις, αφού παράλληλα ο κοχλίας παραμορφώνεται. Όπως παρατηρούμε, η τελική μετακίνηση του ελάσματος είναι περίπου 0.8 mm και άρα δεν ενεργοποιήθηκε η δύναμη της άντυγας αφού η ανοχή στην οπή είναι 1 mm.



Σχ. 13: Άνω και κάτω επιφάνεια επαφής του ελάσματος στο τέλος της ανάλυσης

4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΗΣ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

Σε ένα δεύτερο επίπεδο ανάλυσης, η σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας του πυλώνα προσομοιώθηκε με πεπερασμένα στοιχεία, προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά της σε καμπτική και διατμητική ένταση. Ζητούμενα από τις αναλύσεις αποτελούν η θέση του ουδέτερου άξονα, οι αξονικές δυνάμεις στους κοχλίες και η αναπτυσσόμενες τάσεις στην θέση της συγκόλλησης του πυλώνα με το έλασμα.

Η εξωτερική διάμετρος των ελασμάτων είναι 1.680 m, η εσωτερική 1.440 m, το πάχος των ελασμάτων είναι 60 mm και το πάχος του πυλώνα στην θέση της σύνδεσης 16 mm. Τα δύο ελάσματα κοχλιώνονται με 60 προεντεταμένους κοχλίες M20 10.9, ανά 6° μοίρες. Η

δύναμη προέντασης υπολογίστηκε ίση προς 171.5 kN (το 70% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία σύμφωνα με το EN 1993-1-8 [8]).

Το έλασμα της φλάντζας καθώς και ένα τμήμα του πυλώνα ύψους 5 m, περίπου τριών διαμέτρων του πυλώνα, προσομοιώθηκαν με στοιχεία κελύφους (Σχ. 14), οι κοχλίες με στοιχεία δοκού και οι στηρίξεις λήφθηκαν σύμφωνα με τις συνθήκες συμμετρίας. Οι επαφές που προσομοιώθηκαν είναι της κεφαλής του κοχλία με το έλασμα και η επαφή μεταξύ των δυο ελασμάτων. Στην κορυφή του πυλώνα δεσμεύτηκαν οι βαθμοί ελευθερίας των κόμβων του κελύφους σε έναν κεντρικό, στον οποίο επιβλήθηκαν η συγκεντρωμένη τέμνουσα και η ροπή.



Σχ. 14: Προοπτική απεικόνιση του προσομοιώματος του πυλώνα και της σύνδεσης

Συνολικά δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικής πυκνότητας πλέγματα ώστε να ελεγχθεί η σύγκλιση των αποτελεσμάτων (Σχ. 15). Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για κάμψη και διάτμηση της σύνδεσης στη διεύθυνση του κυρίαρχου ανέμου, καθώς αυτές συνιστούν την πιο κρίσιμη ένταση στον πυλώνα.



Σχ. 15: Προοπτική απεικόνιση των δύο πλεγμάτων

4.1 Καμπτική φόρτιση

Στην πρώτη σειρά αναλύσεων της σύνδεσης σε κάμψη, αρχικά οι κοχλίες προεντείνονται και στη συνέχεια επιβάλλεται ροπή στην κορυφή του πυλώνα αυξανόμενη σταδιακά έως την τιμή 1000 kNm. Παρατηρούμε τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων των δύο πλεγμάτων τόσο για τη συνολική εγκάρσια δύναμη επαφής μεταξύ των δύο δακτυλιοειδών ελασμάτων (Σχ. 16), όσο και για τη γωνία στροφής στην κορυφή του πυλώνα κατά τη φορά της επιβαλλόμενης ροπής (Σχ.17).



Σχ. 16: Εγκάρσια δύναμη επαφής μεταξύ των ελασμάτων

Σχ. 17: Στροφή στην κορυφή του πυλώνα κατά τη φορά της καμπτικής ροπής

Για τη διερεύνηση της επιρροής της προέντασης στην απόκριση της σύνδεσης αναλύθηκε το ίδιο πρόβλημα με και χωρίς προεντεταμένους κοχλίες. Στο προσομοίωμα χωρίς προένταση επιβλήθηκε για λόγους αριθμητικής ευστάθειας πολύ μικρή προένταση 10 kN σε κάθε κοχλία. Οι αξονικές δυνάμεις στους κοχλίες παρουσιάζονται στα Σχ. 18 και 19. Παρατηρείται ότι οι προεντεταμένοι κοχλίες αρχικά διατηρούν σταθερή ένταση και στη συνέχεια αναπτύσσουν μεγαλύτερη αξονική δύναμη από τους απλούς κοχλίες στο ίδιο επίπεδο φόρτισης, όπως έγινε φανερό και από την αριθμητική ανάλυση του ενός κοχλία.



Στο Σχ. 20 συγκρίνονται οι επιφάνειες επαφής των ελασμάτων και η θέση του ουδέτερου άξονα όταν η επιβαλλόμενη ροπή στην κορυφή είναι 1000 kNm. Η θέση του ουδέτερου άξονα βρίσκεται στο σημείο έναρξης της επαφής στην περιφέρεια του ελάσματος (με ροζ χρώμα).



Σχ. 20: Επιφάνειες σε επαφή για προεντεταμένους και απλούς κοχλίες αντίστοιχα για επιβαλλόμενη ροπή στην κορυφή του πυλώνα ίση με 1000 kNm

Η διατομή του πυλώνα στη θέση αποκατάσταση συνέχειας δεν πληροί την παραδοχή της επιπεδότητας αφού οι δυνάμεις στη σύνδεση μεταφέρονται μέσω επαφής. Η θέση του ουδέτερου άξονα εξαρτάται κυρίως από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ελασμάτων, το μέγεθος της προέντασης των κοχλιών και λιγότερο από το μέγεθος της επιβαλλόμενης ροπής. Στα Σχ. 21-24 παρουσιάζεται η κατανομή των κατακόρυφων μετακινήσεων και των ορθών τάσεων στη διατομή του πυλώνα στη θέση της σύνδεσης, με προεντεταμένους

(αριστερά) και χωρίς προεντεταμένους (δεξιά) κοχλίες για τιμές επιβαλλόμενης ροπής 200 και 1000 kNm.



Σχ. 21: Κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων στη διατομή του πυλώνα με προεντεταμένους κοχλίες



διατομή του πυλώνα με προεντεταμένους κοχλίες



Σχ. 22: Κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων στη διατομή του πυλώνα με απλούς κοχλίες



Σχ. 24: Κατανομή ορθών τάσεων σ_{zz} στη διατομή του πυλώνα με απλούς κοχλίες

Στη σύνδεση με προεντεταμένους κοχλίες, η θέση του ουδέτερου άξονα βρίσκεται σε απόσταση 0.9 m περίπου από την αρχή των αξόνων, πιο κοντά στον άξονα συμμετρίας της διατομής απ' ότι στη σύνδεση με απλούς κοχλίες που βρίσκεται σε απόσταση 1.2 m περίπου. Επιπλέον οι κατακόρυφες μετακινήσεις είναι μικρότερες στη σύνδεση με προεντεταμένους κοχλίες, ομοίως και η στροφή στην κορυφή του πυλώνα που παρουσιάζεται στο Σχ. 25. Οι ορθές τάσεις σ_{zz} που αναπτύσσονται στη μέση επιφάνεια της διατομής λαμβάνουν παραπλήσιες τιμές στις δύο περιπτώσεις.



4.2 Διατμητική φόρτιση

Στη δεύτερη σειρά αναλύσεων της σύνδεσης υπό διάτμηση, αρχικά οι κοχλίες προεντείνονται με δύναμη 171.50 kN και στη συνέχεια επιβάλλεται αυξανόμενη σταδιακά τέμνουσα δύναμη ως την τιμή 200 kN στην κορυφή του πυλώνα. Ο συντελεστής τριβής στις επιφάνειες επαφής λήφθηκε ίσος με 0.5. Η τριβή ολίσθησης κατά Coulomb αρχικά είναι:

 $T_{sl} = n \cdot F_{P,C} \cdot \mu = 30 \cdot 171.5 \cdot 0.5 = 2572.5 \text{ kN}$

Η τριβή ολίσθησης αυξάνεται περαιτέρω καθώς αυξάνεται η εγκάρσια δύναμη μεταξύ των ελασμάτων στην πορεία της φόρτισης λόγω της αύξησης της ροπής, όπως παρουσιάστηκε στο Σχ. 16. Η αρχική τριβή ολίσθησης είναι αρκετά μεγαλύτερη από την επιβαλλόμενη τέμνουσα και επομένως η σύνθλιψη άντυγας δεν θα λειτουργήσει αφού η ανοχή κάθε οπής είναι 2 mm. Η τέμνουσα παραλαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από την τριβή στη διεπιφάνεια των ελασμάτων και όχι από την επαφή της κεφαλής του κοχλία με το έλασμα, όπως προέκυψε και από την αριθμητική ανάλυση του ενός κοχλία στο Σχ. 12. Η συνολική τέμνουσα δύναμη που παραλαμβάνεται από τους κοχλίες και το έλασμα παρουσιάζεται στο Σχ. 26 ενώ στο Σχ. 27 απεικονίζεται η επιφάνεια επαφής των δακτυλίων στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για επιβαλλόμενη τέμνουσα 200 kN.





Σχ. 26: Τέμνουσα δύναμη που παραλαμβάνεται μέσω τριβής στους κοχλίες και στη διεπιφάνεια των ελασμάτων

Σχ. 27: Κάτοψη σύνδεσης με τις επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή

Η αναπτυσσόμενη ροπή στη διατομή της σύνδεσης είναι 1000 kNm και επομένως οι αξονικές δυνάμεις στους κοχλίες, οι ορθές τάσεις στη συγκόλληση και η θέση του ουδέτερου άξονα ισχύουν όπως αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.1.

(3)

5. ΚΟΠΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

Η αντοχή της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας του πυλώνα μελετήθηκε έναντι κόπωσης σύμφωνα με το ΕΝ 1993-1-9 [9], ώστε να υπάρχει ένα αποδεκτό επίπεδο πιθανότητας ότι η λειτουργία της ανεμογεννήτριας θα είναι ικανοποιητική κατά τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού. Το ΕΝ 1991-1-4 [10] δεν παρέχει προσομοίωμα φορτίων κόπωσης σε πυλώνες ανεμογεννητριών επομένως για τον προσδιορισμό των φορτίων κόπωσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που αναγράφεται στο Παράρτημα Α του ΕΝ 1993-1-9 [9]. Συνοπτικά τα βήματα της μεθόδου είναι τα ακόλουθα:

- Α.1 Προσδιορισμός γεγονότων φόρτισης
- Α.2 Προσδιορισμός ιστορικού τάσεων της λεπτομέρειας
- Α.3 Μέτρηση κύκλων
- Α.4 Δημιουργία φάσματος σχεδιασμού
- Α.5 Υπολογισμός συγκέντρωσης βλάβης
- Α.6 Έλεγχος συσσώρευσης βλαβών

5.1 Προσδιορισμός γεγονότων φόρτισης

Οι χρονοϊστορίες φόρτισης της ανεμογεννήτριας δημιουργήθηκαν με χρήση των ελεύθερων στο κοινό λογισμικών Turbsim [11], Fast [12] και Aerodyn [13], τα οποία αναπτύχθηκαν από τα National Renewable Energy Laboratory (NREL) [5] και National Wind Technology Center (NTWC) [6]. Αρχικά δημιουργήθηκαν έξι χρονοϊστορίες ταχυτήτων ανέμου (Σχ. 28 και 29) στο ύψος της πλήμνης (hub height), για άνεμο κατηγορίας τύρβης B και σύμφωνα με το φάσμα συχνοτήτων τύπου Kaimal, με μέσες τιμές 10λέπτου 2, 6, 10, 14, 28 και 22 m/s, ώστε να καλύπτεται όλο το εύρος πιθανών ταχυτήτων υπό συνήθεις εξωτερικές συνθήκες (normal wind conditions). Στη συνέχεια, υπολογίσθηκαν οι χρονοϊστορίες τέμνουσας και ροπής στην κορυφή του πυλώνα για τις συγκεκριμένες ταχύτητες ανέμου.



Σχ. 29: Τεχνητές χρονοϊστορίες ταχυτήτων ανέμων μέσων τιμών 14, 18 και 22 m/s αντίστοιχα

5.2 Προσδιορισμός ιστορικού τάσεων της λεπτομέρειας

Για τον υπολογισμό του ιστορικού της έντασης που αναπτύσσεται στους κοχλίες καθώς και στη συγκόλληση της σύνδεσης επιβλήθηκαν οι παραπάνω χρονοϊστορίες στην κορυφή του πυλώνα του προσομοιώματος. Οι κοχλίες διατήρησαν σταθερή αξονική δύναμη ίση με τη δύναμη προέντασης τους σε όλες τις αναλύσεις καθώς η επιβαλλόμενη ροπή παραλήφθηκε μέσω της ανακατανομής της εγκάρσιας αντίδρασης μεταξύ των ελασμάτων. Όσον αφορά τις αναπτυσσόμενες τάσεις στη ραφή της συγκόλλησης του πυλώνα με το δακτυλιοειδές έλασμα, ελέγχθηκαν οι ορθές τάσεις σ_{zz} στην εφελκυόμενη παρειά του πυλώνα, καθώς οι εφελκυστικές τάσεις αποτελούν εξ' ορισμού την κυρίαρχη αιτία αστοχίας από κόπωση. Στα Σχ. 30 και 31 παρουσιάζονται τα ιστορικά τάσεων σ_{zz} στη μέση επιφάνεια του κελύφους του πυλώνα για τις διάφορες ταχύτητες ανέμου.



5.3 Μέτρηση κύκλων

Το διάγραμμα τάσεων συναρτήσει του χρόνου σε κάθε σημείο είναι ακανόνιστο και τυχαίο με μεταβλητή συχνότητα και εύρος. Το πρόβλημα που ανακύπτει είναι τι σημαίνει κύκλος και ποιο είναι σε κάθε κύκλο το αντίστοιχο εύρος τάσης. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με διάφορες μεθόδους που έχουν κατά καιρούς προταθεί εκ των οποίων οι δύο πιο γνωστές που έχουν υιοθετηθεί ευρέως είναι η μέθοδος της δεξαμενής (reservoir) και η μέθοδος της βροχής (rainflow). Για τον έλεγχο της συγκόλλησης, δημιουργήθηκαν τα ιστογράμματα του εύρους τάσεων (Σχ. 32 και 33) με τη μέθοδο της βροχής, από τα αντίστοιχα ιστορικά τάσεων των Σχ. 30 και 31, για κάθε μια από τις έξι χρονοϊστορίες φόρτισης ανέμου. Επειδή ο έλεγχος αφορά την κόπωση και γίνεται για συνήθεις συνθήκες λειτουργίας, αγνοήθηκαν τα πρώτα 10 sec του ιστορικού τάσεων, όπου παρουσιάζονται έντονες αυξομειώσεις κατά την έναρξη λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.



Σχ. 33: Ιστογράμματα εύρους τάσεων σ_{zz} για ανέμους μέσων ταχυτήτων 14, 18 και 22 m/s αντίστοιχα

5.4 Δημιουργία φάσματος σχεδιασμού

Για να υπολογισθεί ο ετήσιος αριθμός των κύκλων σε όλα τα εύρη τάσεων από τον αριθμό των κύκλων 10λέπτου, χρειάζεται να εκτιμηθεί η κατανομή που ακολουθεί η μέση ταχύτητα ανέμου των 10 λεπτών. Αυτή σύμφωνα με το IEC 61400-1 [14] ακολουθεί την κατανομή Rayleigh (4), της οποίας η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και αθροιστική συνάρτηση κατανομής παρουσιάζονται στα Σχ. 34 και 35 αντίστοιχα.

$$P_{\rm R}(V_{\rm hub}) = 1 - \exp[-\pi (V_{\rm hub} / 2V_{\rm ave})^2]$$
(4)

óπου $V_{ave}=0.2 \cdot V_{ref}$, $V_{ref}=42.5$ m/s.





Ο ετήσιος αριθμός κύκλων προκύπτει από το συνολικό άθροισμα του αριθμού κύκλων των 10 λεπτών επί την αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισης (Πιν. 1) επί το πλήθος των 10λέπτων στο έτος ίσο με 6·24·365, και έτσι δημιουργείται φάσμα σχεδιασμού ετήσιου αριθμού κύκλων που παρουσιάζεται στο Σχ. 36.

Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Πιθανότητα
0-4	0.160
4-8	0.342
8-12	0.290
12-16	0.147
16-20	0.049
20-24	0.011

Πίν. 1: Πιθανότητες εμφάνισης ταχυτήτων ανέμου

5.5 Υπολογισμός συγκέντρωσης βλάβης

Κατά τη φόρτιση μεταβλητής διακύμανσης και διαφορετικού κύκλου επαναλήψεων, προκαλείται στην υπό έλεγχο λεπτομέρεια μια συσσώρευση βλάβης (cumulative damage), για την εκτίμηση της οποίας έχουν διατυπωθεί διάφορες θεωρίες. Η απλούστερη είναι αυτή που διατυπώθηκε από τους Palmgren-Miner, γνωστή ως κανόνας Miner, η οποία ορίζεται με την ακόλουθη συνθήκη:

$$D_{d} = \sum_{i}^{n} \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}}$$
(5)

όπου:

 n_{Ei} ο αριθμός των κύκλων που αντιστοιχεί σε εύρος τάσεων $\gamma_{H}\Delta\sigma_{i}$ για τη ζώνη i στο φάσμα σχεδιασμού και

 N_{Ri} η διάρκεια ζωής (σε κύκλους) που προκύπτει από την επαυξημένη καμπύλη $\frac{\Delta \sigma_c}{\gamma_{Mf}} - N_{R}$ για εύρος τάσεων $\gamma_{Ff} \cdot \Delta \sigma_i$

Η κατηγορία της λεπτομέρειας που αντιστοιχεί στη συγκόλληση κυκλικού ελάσματος στον πυλώνα σύμφωνα με το EN1993-1-9 [9] φαίνεται στο Σχ. 37. Η κατηγορία 11 αναφέρεται σε σύνδεση πέλματος-σωλήνα με 80% της πλήρους διείσδυσης εσωραφές και έχει αντοχή σε κόπωση $\Delta \sigma_c$ =71 MPa. Η κατηγορία 12 αναφέρεται σε σύνδεση πέλματος-σωλήνα με εξωραφές και έχει αντοχή σε κόπωση $\Delta \sigma_c$ =40 MPa. Στη σύνδεση που μελετήθηκε επιλέχθηκε η κατηγορία 11, της οποίας η επαυξημένη καμπύλη αντοχής παρουσιάζεται στο Σχ. 38.



Σχ. 37: Κατηγορία λεπτομέρειας σύνδεσης πυλώνα





5.6 Έλεγχος συσσώρευσης βλαβών

Ο έλεγχος αντοχής σε κόπωση που βασίζεται στη συσσώρευση βλαβών θα πρέπει να ικανοποιεί το ακόλουθο κριτήριο:

$$D_d \le 1.0 \tag{6}$$

Η ετήσια συσσώρευση βλάβης στη συγκόλληση που μελετήθηκε είναι D_d =0.0402 που ισοδυναμεί με αστοχία σε 24.9 έτη.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση του προβλήματος της κόπωσης σε συνδέσεις αποκατάστασης συνέχειας των χαλύβδινων πυλώνων ανεμογεννητριών. Για το λόγο αυτό μορφώθηκε η σύνδεση με πεπερασμένα στοιχεία και διερευνήθηκε η αλληλεπίδραση μεταξύ κογλία και ελάσματος μέσω συνθηκών επαφής. Τελικά επιβλήθηκαν στη σύνδεση τα τυπικά εντατικά μεγέθη που αναμένονται να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες πιθανότητες εμφάνισης κάθε μεγέθους, μετρήθηκε η συσσώρευση βλάβης λόγω κόπωσης και εκτιμήθηκε ο συνολικός χρόνος αστοχίας της σύνδεσης. Ο υπάρχων σχεδιασμός για κατασκευές που εκτίθενται σε πολύ συχνές διακυμάνσεις τάσεων (>10⁸ κύκλους) βασίζεται στη μείωση του εύρους τάσεων κάτω από το όριο αποκοπής που δεν προκαλείται αστοχία λόγω κόπωσης. Αυτό, όσον αφορά τους κοχλίες, επιτυγχάνεται με την ισχυρή προένταση τους, έτσι ώστε να διατηρούν σταθερή ένταση καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας ανεξάρτητα από τις εξωτερικές συνθήκες ανέμου. Όσο για τη συγκόλληση, αυξάνεται η διατομή του πυλώνα επαρκώς, ώστε να μειωθούν οι αναπτυσσόμενες τάσεις στο επιθυμητό εύρος. Επιπλέον με την προένταση των κοχλιών επιτυγχάνουμε η παραλαβή της τέμνουσας στη σύνδεση να γίνεται μέσω της τριβής των ελασμάτων και όχι μέσω της άντυγας του κοχλία σε συνήθεις συνθήκες ανέμου. Για όλους τους παραπάνω λόγους κρίνεται απόλυτα επιβεβλημένη η χρήση προεντεταμένων κοχλιών σε όλες τις κοχλιωτές συνδέσεις της ανεμογεννήτριας για τη μείωση του φαινομένου της κόπωσης.

7. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο – ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: ΘΑΛΗΣ. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] H. Schmidt and A. Jakubowski, Ermüdungssicherheit imperfekter vorgespannter Ringflanschstösse in windbeanspruchten turmartigen Stahlbauten, U. of Essen, 2001.
- [2] C. Petersen, Stahlbau: Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten, Vieweg, 1993.

- [3] V.-L. Hoang, J.-P. Jaspart and J.-F. Demonceau, Behaviour of bolted flange joints in tubular structures under monotonic, repeated and fatigue loadings I: Experimental tests, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 85, 2013, pp. 1-11.
- [4] Y.Q. Wang, L. Zong and Y.J. Shi, Bending behavior and design model of bolted flange-plate connection, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 84, 2013, pp. 1-16.
- [5] National Renewable Energy Laboratory, NREL, <u>http://www.nrel.gov/</u>
- [6] National Wind Technology Center, NWTC, <u>http://www.nrel.gov/nwtc/</u>
- [7] ADINA System 8.3, Release Notes ADINA R&D Inc, 71 Elton Avenue, Watertown, USA, 2005.
- [8] EN 1993-1-8: 2005, Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-8: Design of joints, European Committee for Standardization, 2005.
- [9] EN 1993-1-9: 2003, Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-9: Fatigue, European Committee for Standardization, 2003.
- [10] EN 1991-1-4: 2005, Eurocode 1: Actions on structures Part 1-4: General actions Wind actions, European Committee for Standardization, 2005.
- [11] NWTC Computer-Aided Engineering Tools (TurbSim by Neil Kelley, Bonnie Jonkman). <u>http://wind.nrel.gov/designcodes/preprocessors/turbsim/</u>, Last modified 30 May 2013, accessed 1 Nov. 2013
- [12] NWTC Computer-Aided Engineering Tools (AeroDyn by David J. Laino, Ph.D.), <u>http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/aerodyn/</u>, Last modified 23 Feb. 2013, accessed 1 Nov. 2013
- [13] NWTC Computer-Aided Engineering Tools (FAST by Jason Jonkman, Ph.D.). <u>http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/fast/</u>, Last modified 28 Oct. 2013, accessed 1 Nov. 2013
- [14] IEC 61400-1, "Wind turbines, Part I Design requirements", International standard, 3rd edition, 2005.

NONLINEAR NUMERICAL SIMULATION OF THE RESPONSE OF BOLTED RING FLANGES IN WIND TURBINE TOWERS

Ilias D. Thanasoulas NTUA Civil Engineer School of Civil Engineering National Technical University of Athens Athens, Greece e-mail: iliasthana@gmail.com

Konstantina G. Koulatsou NTUA PhD Candidate School of Civil Engineering National Technical University of Athens Athens, Greece e-mail: <u>konkoulatsou@gmail.com</u>

Charis J. Gantes NTUA Professor School of Civil Engineering, National Technical University of Athens e-mail: <u>chgantes@central.ntua.gr</u>

SUMMARY

In the present article the efficiency against fatigue of connections between adjacent parts of tubular wind turbine towers is investigated, taking realistically into account the dynamic nature of applied wind loads. Such connections are realized by means of double ring flanges that are pre-welded on the adjacent shell parts and are bolted together with fully preloaded bolts. The prevailing structural action on wind turbine towers is bending due to lateral wind pressures on the tower itself and, mostly, on the rotating blades. In-line with the objective of growing energy production from renewable sources, wind turbine dimensions increase in order to take better advantage of the available wind potential. Namely, taller towers introduce higher wind velocities, while longer blades provide larger incident area. As a result, the wind load acting on the wind turbine towers increases also, inducing larger forces and, particularly, bending moments upon the wind turbine tower and its connections. Wind related actions are the cause of the two most common types of structural failures, either buckling failure of the tower itself, or fatigue failure at its connections.

A 3-bladed 1.5 MW wind turbine of tower height 82.39m is investigated, taking into account the dynamic nature of applied wind loads. Three public domain software tools produced by the National Renewable Energy Laboratory (NREL) and the National Wind Technology Center (NTWC) are first used in order to obtain realistic wind actions. Two numerical models are created with the finite element program ADINA. The first is a detailed model of a single bolt using solid elements, while in the second the entire bolted ring flange connection is modeled employing shell elements for the flanges and beam elements for the bolts. Contact elements are appropriately used in both models to introduce the connection's nonlinear behavior due to the interaction between flanges and bolts and between nuts and flanges. Nonlinear dynamic analysis results from the second model are used for fatigue checks according to Eurocode 3.