



ΔΡΑΣΗ: «ΑΡΙΣΤΕΙΑ ΙΙ»

ΤΙΤΛΟΣ:

«Πρωτότυπες έννοιες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών
για τον ενεργειακό τομέα με χρήση σύγχρονων υλικών»

4916-ENSSTRAM

Επιστημονικός Υπεύθυνος: **Καθ. Χ. ΓΑΝΤΕΣ**

ΕΝΟΤΗΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ (Ε.Ε.) 6

*Μεθοδολογία σχεδιασμού και κατασκευής πυλώνων
ανεμογεννητριών με κελύφη τύπου sandwich*

ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 6.1:

*Τεχνική έκθεση μεθοδολογίας σχεδιασμού και κατασκευής
πυλώνων ανεμογεννητριών με κελύφη τύπου sandwich*

2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



PROJECT: «ARISTEIA II»

TITLE:

**«Novel design concepts for ENergy related Steel
STRuctures using Advanced Materials»**

4916-ENSSTRAM

Research Coordinator: Prof. C. GANTES

WORKPACKAGE (W.P.) 6

*Design and construction methodology of sandwich-type wind
turbine towers*

DELIVERABLE 6.1:

*Technical report of design and construction methodology of
sandwich-type wind turbine towers*

2015



European Union
European Social Fund



MINISTRY OF EDUCATION & RELIGIOUS AFFAIRS, CULTURE & SPORTS
MANAGING AUTHORITY

Co-financed by Greece and the European Union



EUROPEAN SOCIAL FUND

Summary

As a primary scope of this report, a methodology for the preliminary design of wind turbine towers is provided, based on the results of the bibliographical, analytical, numerical and experimental research carried out and presented within the context of the preceding deliverables. Instead of completely disregarding the conventional steel-only solution in favor of the sandwich alternative, the proposed methodology takes advantage of the latter's beneficial properties only where the former option leads to non-transferable or uneconomical diameters, namely at the lower segments of large wind turbines' towers, undergoing maximal bending loads. The proposed solution is, thus, a hybrid one, consisting of sandwich-section segments near the tower's base and steel-only-section segments near the top of it, consequently achieving optimal manufacturing economy as well as structural behavior.

Additionally, as far as the construction process of hybrid wind turbine towers is concerned, general guidelines are provided within this report. Nonetheless, given the quite complex nature of sandwich segments, mainly due to the significantly different properties of the combined materials, numerous constructional issues arise and are thoroughly discussed here, as well.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	3
2	Προτεινόμενη μεθοδολογία σχεδιασμού πυλώνων ανεμογεννητριών τύπου «sandwich»	5
2.1	Γενικά.....	5
2.2	Αναλυτική περιγραφή βημάτων	5
2.3	Διάγραμμα ροής.....	12
3	Συστάσεις για την κατασκευή πυλώνων ανεμογεννητριών τύπου «sandwich».....	13
3.1	Περιγραφή διαδικασίας βιομηχανοποίησης και ανέγερσης συμβατικών, αμιγώς χαλύβδινων πυλώνων	13
3.2	Κατασκευή πυλώνων διατομής «sandwich»	15
4	Συμπεράσματα	21
5	Αναφορές.....	23
6	Παράρτημα.....	24

1

Εισαγωγή

Η παρούσα Τεχνική Έκθεση αποτελεί παραδοτέο του Ερευνητικού Προγράμματος με τίτλο:

ΔΡΑΣΗ «ΑΡΙΣΤΕΙΑ II»

Πρωτότυπες έννοιες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών για τον ενεργειακό τομέα με χρήση σύγχρονων υλικών (ENSSTRAM)

που πραγματοποιείται κάτω από το γενικό συντονισμό του Καθηγητή Χαράλαμπου Γαντέ (Κύριος Ερευνητής).

Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζει τις δράσεις που προδιαγράφονται στην **Ενότητα Εργασίας Ε.Ε. 6**, με τίτλο:

«Μεθοδολογία σχεδιασμού και κατασκευής πυλώνων ανεμογεννητριών με κελύφη τύπου sandwich»

Το αντικείμενο της **Ενότητας Εργασίας Ε.Ε. 6**, έχει περιγραφεί στην εγκεκριμένη Ερευνητική Πρόταση ως:

«Θα διατυπωθούν συστάσεις για προκαταρκτικές αναλυτικές αλλά και περισσότερο ακριβείς αριθμητικές μεθοδολογίες για την ανάλυση και το σχεδιασμό πυλώνων ανεμογεννητριών με διατομές τύπου sandwich. Στη συνέχεια θα συνταχθούν συστάσεις σχεδιασμού και κατασκευής σε ένα περιεκτικό έγγραφο που θα αποτελέσει προσχέδιο για μελλοντική ενσωμάτωση σε κανονιστικές διατάξεις.»

Το εν λόγω αντικείμενο έχει καλυφθεί πλήρως, όπως περιγράφεται στα κεφάλαια που ακολουθούν. Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα τεχνική έκθεση παρουσιάζεται μια μεθοδολογία για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό πυλώνων ανεμογεννητριών, η οποία στηρίζεται στα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής, αναλυτικής, αριθμητικής και πειραματικής διερεύνησης που διενεργήθηκε στα πλαίσια των προηγούμενων παραδοτέων. Η προτεινόμενη μεθοδολογία δεν περιορίζεται αποκλειστικά στη χρήση διατομών «sandwich», απορρίπτοντας τη συμβατική επιλογή των αμιγώς χαλύβδινων. Αντιθέτως, στόχος της είναι η αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων της λύσης αυτής, εκεί όπου η συμβατική οδηγεί σε διατομές με διαμέτρους απαγορευτικές για χερσαία

μεταφορά, ή κατασκευαστικά ασύμφορες. Αυτό αναμένεται να συμβαίνει ως επί το πλείστον στα χαμηλότερα τμήματα των πυλώνων σύγχρονων ανεμογεννητριών μεγάλου μεγέθους, όπου οι καμπτικές δράσεις μεγιστοποιούνται, σε αντιδιαστολή με τα υψηλότερα τμήματα, όπου οι απαιτήσεις σε αντοχή και δυσκαμψία είναι μικρότερες και επομένως η -κατασκευαστικά απλούστερη, -αμιγώς χαλύβδινη διατομή επαρκεί. Η λύση επομένως που προτείνεται και περιγράφεται αναλυτικά στις ενότητες που ακολουθούν αφορά την κατασκευή υβριδικού πυλώνα, με διατομή μορφής «sandwich» κοντά στη βάση και ομοιογενή, χαλύβδινη διατομή στα τμήματα που βρίσκονται υψηλότερα, με στόχο την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση των διαφορετικών πλεονεκτημάτων που διαθέτουν οι δύο αυτές μορφές.

Ακολουθώς, την παρούσα έκθεση συμπληρώνουν, κάποιες γενικές συστάσεις που αφορούν την κατασκευή πυλώνων που, είτε εν μέρει, είτε εξ ολοκλήρου αποτελούνται από τμήματα διατομής «sandwich». Η διατομή αυτή, ως σύνθετη διατομή με λειτουργία που βασίζεται στη συνεργασία δύο υλικών με σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες, απαιτεί κατασκευαστικά ιδιαίτερη προσοχή σε πολλά επιμέρους σημεία, τα οποία περιγράφονται διεξοδικά.

Οι εργασίες που περιγράφονται έχουν πραγματοποιηθεί με τη συνεισφορά των παρακάτω μελών της **Ερευνητικής Ομάδας**:

- Χαράλαμπος Γαντές, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Γεώργιος Μπουκοβάλας, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Αθανάσιος Τριανταφύλλου, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών
- Κωνσταντίνος Καλοχαιρέτης, Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Αλέξανδρος Βαλοσαμής, Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Στυλιανός Βερνάρδος, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Αριστομένης Τσαντίλης, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών
- Γρηγορία-Πολυξένη Ζαράκη, Πολιτικός Μηχανικός Δομικών Έργων
- Theodore Stathopoulos, Professor, Concordia U., Canada
- Charalampos Baniotopoulos, Professor, U. of Birmingham, U.K.

2

Προτεινόμενη μεθοδολογία σχεδιασμού πολώνων ανεμογεννητριών τύπου «sandwich»

2.1 Γενικά

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται σε επιμέρους βήματα η μεθοδολογία μέσω της οποίας μπορεί να επιτευχθεί η βέλτιστη επιλογή των βασικότερων παραμέτρων ενός πολώνα ανεμογεννήτριας – των υλικών και της γεωμετρίας του. Τα βήματα αυτά συνθέτουν έναν αλγόριθμο, βάσει του οποίου, ανάλογα με τις απαιτήσεις σε αντοχή και δυσκαμψία, είναι δυνατόν να προκύψουν ως βέλτιστες λύσεις τρία διαφορετικά είδη πολώνα: αμιγώς χαλύβδινος, εξ ολοκλήρου κατασκευασμένος από διατομή «sandwich» και υβριδικός, συνδυάζοντας τις δύο πρώτες μορφές. Στη συνέχεια παρατίθεται ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα ροής με στόχο την καλύτερη εποπτεία της διαδικασίας προκαταρκτικού σχεδιασμού.

2.2 Αναλυτική περιγραφή βημάτων

1. Καθορισμός ύψους πολώνα, αριθμού τμημάτων και τύπου ανεμογεννήτριας

Καθορίζεται αρχικά το ύψος του υπό σχεδιασμό πολώνα. Για να έχει πρακτικό νόημα η παρούσα μεθοδολογία, η απαίτηση ύψους θα πρέπει να είναι τέτοια που να δικαιολογεί την αναζήτηση εναλλακτικής λύσης, αντί της συμβατικής. Ορίζεται επίσης ο αριθμός των τμημάτων (n) που αποτελούν τον πολώνα. Με θεώρηση ύψους άνω των 150m, οπότε προκύπτει η αναγκαιότητα χρήσης διατομής «sandwich», κρίνεται εύλογο ο πολώνας να συνίσταται από 4 ή και 5 επιμέρους τμήματα, διαφορετικής διαμέτρου και πάχους, αντί των 3 που συνήθως επιλέγονται για πολώνες μικρότερου μεγέθους. Καθορίζεται επιπλέον ο τύπος της ανεμογεννήτριας, συμπεριλαμβανομένων όλων εκείνων των χαρακτηριστικών που επηρεάζουν από στατικής άποψης το σχεδιασμό του πολώνα (βλ. και 5).

2. Προσεγγιστική εκτίμηση ροπής καθ' ύψος με θεώρηση ανεμοπίεσης που δρα στο θεωρητικό δίσκο των πτερυγίων και μειωτικό συντελεστή 30%

Με βάση την απλοποιητική παραδοχή ότι ο νοητός κυκλικός δίσκος που δημιουργείται από την περιστροφή του δρομέα είναι συμπαγής με εμβαδό A_{rotor} , τότε η οριζόντια, κάθετη σε αυτόν δύναμη (F_{solid}) μπορεί να υπολογιστεί από την εξ. (2.1), με πολλαπλασιασμό του εμβαδού με το τετράγωνο της ταχύτητας του ανέμου (u) και την πυκνότητά του (ρ).

$$F_{solid} = \frac{1}{2} \rho u^2 A_{rotor} \quad (2.1)$$

Ενώ η προσεγγιστική αυτή μέθοδος αποτελεί συνήθη πρακτική εκτίμησης του φορτίου ανέμου για στατικές αναλύσεις ανεμογεννητριών, η δύναμη που προκύπτει από την εφαρμογή της είναι σχεδόν μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από τη δύναμη που υπολογίζεται μέσω της ακριβέστερης αριθμητικής ανάλυσης με χρήση του λογισμικού FAST [1]. Συνεπώς, ο απλοποιητικός αυτός υπολογισμός είναι υπερβολικά συντηρητικός και δεν συνιστάται, εκτός αν λαμβάνεται παράλληλα υπόψη κατάλληλος μειωτικός συντελεστής. Στη συγκεκριμένη προτεινόμενη μεθοδολογία χρησιμοποιείται μόνο ως αρχικό στάδιο της διαδικασίας σχεδιασμού και με μειωτικό συντελεστή 30%, για μια αδρή εκτίμηση των δράσεων που καλείται να παραλάβει ο πυλώνας καθ' ύψος του.

Επαναληπτική διαδικασία 1:

Για καθένα από τα $i=1,2,\dots,n$ επιμέρους τμήματα του πυλώνα, ξεκινώντας από το υψηλότερο με τη μικρότερη απαίτηση αντοχής και καταλήγοντας στο χαμηλότερο, ακολουθούνται τα 3,4.

3. Αδρή εκτίμηση καμπτικής ροπής και υπολογισμός αξονική δύναμης στη χαμηλότερη διατομή

Βάσει των προηγούμενων, υπολογίζεται χονδροειδώς από την εξ. (2.2) **Error! Bookmark not defined.** η δρώσα ροπή κάμψης στη χαμηλότερη διατομή του υπό εξέταση τμήματος, η οποία βρίσκεται σε ύψος h από τη βάση του πυλώνα συνολικού ύψους H .

$$M_{solid,i} = 0.3F_{solid}(H-h) \quad (2.2)$$

Υπολογίζεται, επίσης, η αξονική δύναμη που ασκείται στην ίδια διατομή, προσθέτοντας το βάρος της ατράκτου ($N_{nacelle}$) και το ίδιο βάρος των τμημάτων που βρίσκονται πάνω από το εξεταζόμενο ($N_{dead,i-1}$).

4. Αναζήτηση γεωμετρίας και ποιότητας υλικού ομοιογενούς χαλύβδινης διατομής

Με χρήση της εξ. (2.3) **Error! Bookmark not defined.** υπολογισμού της ροπής αντοχής, όπου η ροπή αντίστασης για κυκλική, σωληνωτή διατομή δίνεται από την εξ. (2.4) και f_{sy} είναι το όριο διαρροής του χρησιμοποιούμενου χάλυβα **Error! Bookmark not defined.**, επιλέγεται για την εξεταζόμενη διατομή συνδυασμός ποιότητας χάλυβα, εξωτερικής ακτίνας (R_i) και πάχους χαλύβδινου κελύφους (t_i), τέτοιος ώστε να ικανοποιείται η απαίτηση σε καμπτική αντοχή ($M_{solid,i}$) που εκτιμήθηκε αδρά παραπάνω.

$$M_{solid,i} = M'_{R,i} = W_{el,i} f_{sy} \quad (2.3)$$

$$W_{el,i} = \frac{\pi R_i^4 - (R_i - t_i)^4}{4 R_i} \quad (2.4)$$

Με βάση τις παραπάνω επιλογές, υπολογίζεται στη συνέχεια η θλιπτική αντοχή της διατομής από την εξ. (2.5), καθώς επίσης το ίδιο βάρος του εξεταζόμενου τμήματος από την εξ. (2.6), το οποίο προστίθεται στα φορτία ατράκτου και ιδίων βαρών των ανώτερων τμημάτων, για να προκύψει από την εξ. (2.7) το συνολικό θλιπτικό φορτίο που καταπονεί τη διατομή.

$$N_{R,i} = \pi [R_i^2 - (R_i - t_i)^2] f_{sy} \quad (2.5)$$

$$N_{dead,i} = \pi [R_i^2 - (R_i - t_i)^2] h \gamma_s \quad (2.6)$$

$$N_{tot,i} = N_{nacelle} + N_{dead,i-1} + N_{dead,i} \quad (2.7)$$

Υπολογίζεται, τέλος, με βάση τον Ευρωκώδικα 3 [2], η απομειωμένη ροπή αντοχής της διατομής λόγω ταυτόχρονης επιβολής θλιπτικού φορτίου, από την εξ. (2.8).

$$M_{R,i} = M'_{R,i} \left[1 - \left(\frac{N_{tot,i}}{N_{R,i}} \right)^{1.7} \right] \quad (2.8)$$

Εσωτερική επαναληπτική διαδικασία Βήματος 4

Επιλέγονται εκ νέου από το 4 ποιότητα χάλυβα και γεωμετρία διατομής με απαίτηση αντοχής $M_{R,i}$ και το βήμα επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση.

5. Ακριβέστερος υπολογισμός καμπτικών ροπών με το πρόγραμμα FAST για βασικούς συνδυασμούς φόρτισης

Εισάγονται στο πρόγραμμα FAST ή σε ανάλογο λογισμικό αεροελαστικής ανάλυσης ανεμογεννητριών τα στοιχεία της υπόψη ανεμογεννήτριας, συμπεριλαμβανομένων

των διαμέτρων των διατομών του υψηλότερου και του χαμηλότερου τμήματος του πωλώνα, όπως προέκυψαν από το 4. Ορισμένα από τα βασικότερα δεδομένα εισαγωγής στο πρόγραμμα είναι ενδεικτικά τα εξής:

- Ύψος δρομέα (m)
- Ύψος πωλώνα (m)
- Διάμετρος θεωρητικού δίσκου (m)
- Μέγιστη εξωτερική διάμετρος πωλώνα στη βάση (m)
- Ελάχιστη εξωτερική διάμετρος πωλώνα στην κορυφή (m)
- Δυσκαμψία πωλώνα (kNm^2)
- Διάμετρος δρομέα (m)
- Μάζα πωλώνα (kg)
- Μάζα έκαστου πτερυγίου (kg)
- Μάζα δρομέα (kg)
- Μάζα θαλάμου μηχανολογικών μερών (kg)
- Συνολική μάζα θεωρητικού δίσκου (kg)
- Συνολική μάζα στην κορυφή του πωλώνα (kg)
- Συνολική μάζα (kg)

Το FAST, βάσει των δεδομένων αυτών και κατάλληλου πεδίου ανέμου που παράγεται από το πρόγραμμα TurbSim [3], υπολογίζει μεταξύ άλλων τα εντατικά μεγέθη που καταπονούν τον πωλώνα καθ' ύψος του βάσει καθορισμένων συνδυασμών φόρτισης που προσομοιώνουν διαφορετικές καταστάσεις. Η πληθώρα συνδυασμών φόρτισης που σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για το σχεδιασμό πωλώνων ανεμογεννητριών απαιτεί χρόνο και υπολογιστικούς πόρους που υπερβαίνουν το σκοπό μιας προκαταρκτικής διαστασιολόγησης, όπως αυτή που περιγράφεται στο παρόν πόνημα. Κρίνεται επομένως σκόπιμο, για τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών από το πρόγραμμα FAST να ελέγχονται όχι όλες αλλά οι βασικότερες φορτίσεις σχεδιασμού. Στο Παράρτημα περιγράφονται αναλυτικότερα οι κανονιστικές διατάξεις, καθώς και η λογική της επιλογής των βασικότερων συνδυασμών φόρτισης στα πλαίσια του προκαταρκτικού σχεδιασμού. Σημειώνεται ότι οι συγκεκριμένες διατάξεις αφορούν την περίπτωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών και συνεπώς συμπεριλαμβάνουν, επιπλέον των φορτίσεων που αφορούν τις επίγειες ανεμογεννήτριες, φορτία από τη δράση των κυμάτων. Στην περίπτωση χερσαίων ανεμογεννητριών παραλείπονται οι φορτίσεις λόγω κυματισμού. Λαμβάνονται κατά τον τρόπο αυτόν ακριβέστερες τιμές καμπτικής ροπής στη χαμηλότερη διατομή κάθε τμήματος του πωλώνα ($M_{FAST,i}$).

Επαναληπτική διαδικασία 2:

Για κάθε τμήμα i του πωλώνα, ακολουθείται το 4, με αντικατάσταση της τιμής $M_{solid,i}$ από την $M_{FAST,i}$.

Επαναληπτική διαδικασία 3:

Τα βήματα 4, 5 επαναλαμβάνονται έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση.

Αν δεν μπορεί να υπάρξει, ή δε συμφέρει για οικονομικούς ή κατασκευαστικούς λόγους, κάποιος συνδυασμός ποιότητας χάλυβα, πάχους και διαμέτρου διατομής, ο οποίος να περιλαμβάνει διάμετρο μικρότερη ή ίση με 4m, που αποτελεί το σύνηθες άνω όριο δυνατότητας χερσαίας μεταφοράς, προτείνεται για το συγκεκριμένο τμήμα και τα χαμηλότερα αυτού η αναζήτηση κατάλληλης διατομής «sandwich», με μετάβαση στην Επαναληπτική διαδικασία 4: .

Επαναληπτική διαδικασία 4:

Για κάθε τμήμα του πολώνα, από αυτό για το οποίο δε βρέθηκε κατάλληλη συμβατική διατομή έως το τελευταίο (χαμηλότερο), επαναλαμβάνεται το 4, με αντικατάσταση του $M_{solid,i}$ από το $M_{FAST,i}$.

6. Προσδιορισμός βέλτιστων διατομών «sandwich» από διαγράμματα προσεγγιστικής αναλυτικής λύσης

Με βάση την προσεγγιστική αναλυτική λύση που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του παραδοτέου 2.1, κατέστη δυνατή η παραγωγή ποιοτικών διαγραμμάτων βελτιστοποίησης της διατομής «sandwich» σε όρους καμπτικής αντοχής, δυσκαμψίας καθώς και κόστους, τα οποία παρουσιάστηκαν στο παραδοτέο 5.1. Υπενθυμίζεται ότι η προσεγγιστική λύση βασίστηκε στη θεώρηση της διατομής ως λεπτότοιχης, με ενιαία ακτίνα R , ίση με την πραγματική μέση ακτίνα. Τα αποτελέσματά της όσον αφορά τον υπολογισμό της ροπής αντοχής προσέγγισαν με ικανοποιητική ακρίβεια εκείνα της πιο σύνθετης λύσης που παρουσιάστηκε στο παραδοτέο 2.1 και η οποία δε στηρίχθηκε στη συγκεκριμένη παραδοχή, χωρίς ωστόσο να ισχύει το ίδιο αναφορικά με τη δυσκαμψία της διατομής, όπου το σφάλμα υπήρξε σημαντικό. Καθώς στη φάση αυτή της μεθοδολογίας σχεδιασμού κριτήριο επιλογής αποτελεί η ροπή αντοχής, η χρήση της προσεγγιστικής διαδικασίας για τη βέλτιστη επιλογή διατομής κρίνεται ασφαλής και προτιμάται ως ταχύτερη.

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της απλοποιημένης αναλυτικής λύσης είναι ότι:

- Για δεδομένη ροπή αντοχής, το κόστος μειώνεται περίπου γραμμικά με την αύξηση του πάχους σκυροδέματος. Η μείωση αυτή είναι εντονότερη όσο αυξάνεται η αξονική δύναμη.
- Για δεδομένη ροπή αντοχής, η χρήση υλικού στον πυρήνα (σκυροδέματος) οδηγεί σε μείωση του πάχους των ελασμάτων. Η μείωση αυτή είναι περίπου γραμμική με την αύξηση του πάχους σκυροδέματος και γίνεται εντονότερη όσο αυξάνεται η αξονική δύναμη.

Τα παραπάνω οδηγούν σε αναζήτηση μιας γεωμετρίας, στην οποία τα πάχη των χαλύβδινων ελασμάτων θα είναι όσο το δυνατόν μικρότερα, ώστε να μεγιστοποιείται το πάχος του πυρήνα σκυροδέματος στη διατομή. Στις καμπύλες επιλογής γεωμετρίας, επομένως, κύριο μέλημα εκτός της απαίτησης αντοχής είναι η ελαχιστοποίηση του πάχους του χάλυβα.

Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν τα εν λόγω ποιοτικά διαγράμματα για επιλογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διατομής, απαιτείται η αδιαστατοποίηση της ροπής αντοχής, ώστε να προκύψει η ζητούμενη, ανηγμένη ροπή αντοχής ($\mu_{R,i}$), σύμφωνα με την εξ. (2.9).

$$\mu_{R,i} = \frac{M_{R,i}}{R_i^3 f_{sy}} \quad (2.9)$$

Επιπλέον, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επιρροή του θλιπτικού φορτίου που δέχεται η διατομή, απαιτούνται αφενός ο υπολογισμός της αντοχής σε θλίψη της σύνθετης διατομής από την εξ. (2.10) **Error! Bookmark not defined.** και αφετέρου η εκτίμηση της δρώσας θλιπτικής δύναμης **Error! Bookmark not defined.** λόγω του ίδιου βάρους των τμημάτων του πωλώνα (εξ. (2.11)) και της ατράκτου, ώστε να προκύψει η τιμή του ανηγμένου αξονικού φορτίου (ν_i) από την εξ. (2.12) **Error! Bookmark not defined.**

$$N_{R,i} = 4\pi R_i t_{s,i} f_{sy} + 2\pi R_i t_{c,i} f_c \quad (2.10)$$

$$N_{dead,i} = 4\pi R_i t_{s,i} h \gamma_s + 2\pi R_i t_{c,i} h \gamma_c \quad (2.11)$$

$$\nu_i = \frac{N_{tot,i}}{N_{R,i}} \quad (2.12)$$

Με γνωστό τέλος το λόγο των αντοχών των υλικών f_c/f_{sy} , επιλέγεται το κατάλληλο διάγραμμα και εντοπίζεται η βέλτιστη γεωμετρία διατομής σύμφωνα με τα κριτήρια που περιγράφηκαν παραπάνω.

7. Υπολογισμός δυσκαμψίας από την ακριβή αναλυτική λύση

Το σημαντικό, όπως προαναφέρθηκε, σφάλμα στον υπολογισμό της δυσκαμψίας κατά την εφαρμογή της προσεγγιστικής μεθόδου οδηγεί στην ανάγκη εφαρμογής για τις τελικά επιλεγόμενες διατομές των περισσότερο περίπλοκων σχέσεων της ακριβούς αναλυτικής λύσης που αναπτύχθηκε στο παραδοτέο 2.1. Στις σχέσεις αυτές λαμβάνεται υπόψη η πραγματική γεωμετρία μιας διατομής «sandwich» και η εκτίμηση της συμπεριφοράς της διατομής με τη χρήση τους πραγματοποιείται με μεγάλη ακρίβεια, χωρίς ωστόσο να είναι εφικτή η περαιτέρω διαχείρισή τους στο βαθμό που επιτυγχάνεται με τις απολοποιημένες σχέσεις της προσεγγιστικής μεθόδου. Στο βήμα αυτό, η σύνθετη λύση επιστρατεύεται για τον ακριβή υπολογισμό της ισοδύναμης δυσκαμψίας της επιλεγείσας διατομής, ώστε αυτή να εισαχθεί στο FAST, αντικαθιστώντας τη δυσκαμψία της αμιγώς χαλύβδινης διατομής.

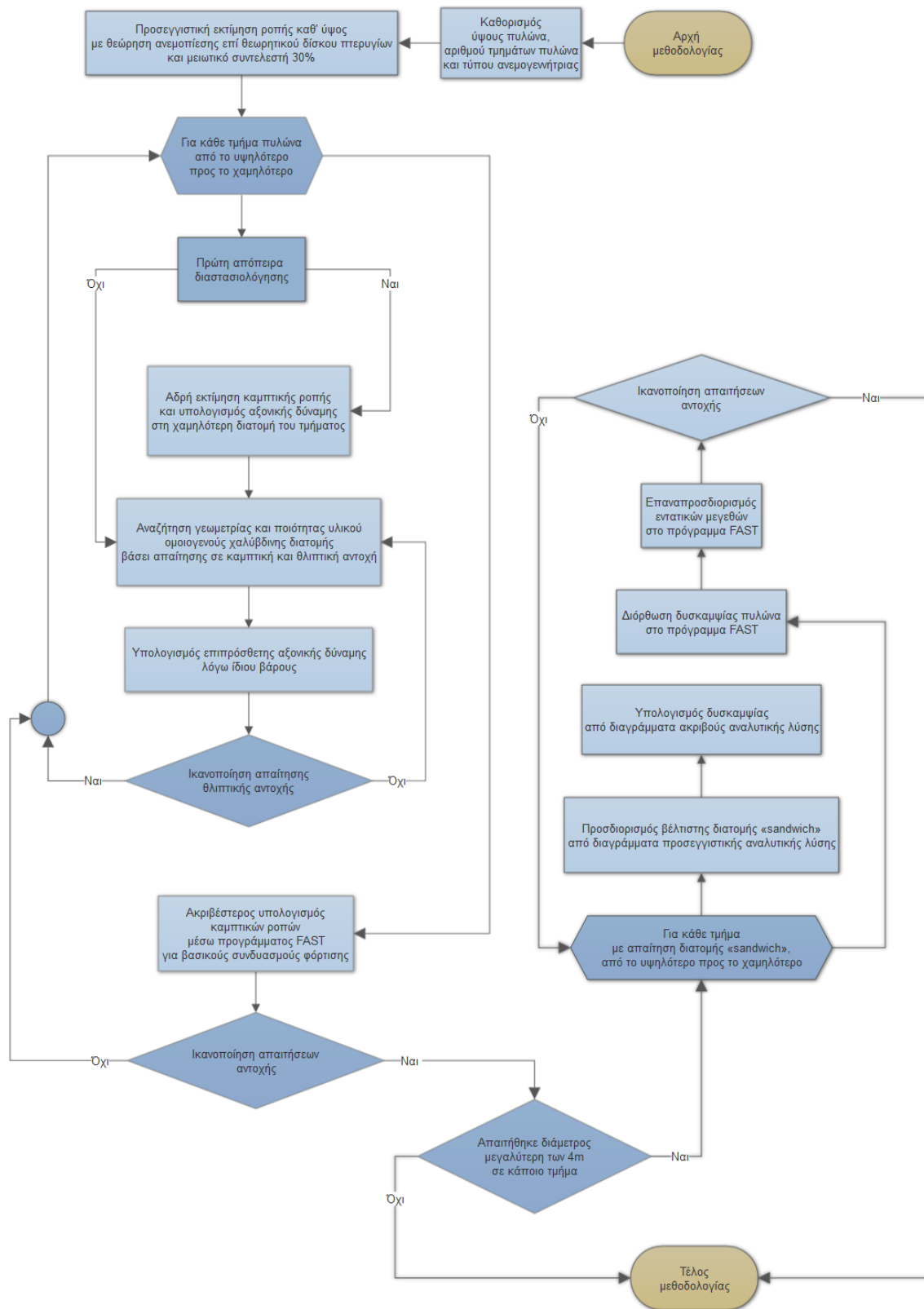
Επαναληπτική διαδικασία 5:

Επανάληψη των 5,6,7, με επιλογή γεωμετρίας και ποιότητας υλικών στο 6 τέτοια ώστε $M_{R,i} \geq M_{FAST,i}$, έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση, η οποία σηματοδοτεί παράλληλα και την εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας διατομής «sandwich» για το υπό εξέταση τμήμα του πολώνα.

8. Οι διατομές «sandwich» οριστικοποιούνται με βάση την ακριβέστερη διαδικασία βελτιστοποίησης

Η επιλεχθείσα γεωμετρία επιλύεται με εφαρμογή της ακριβούς αναλυτικής μεθόδου και επιβεβαιώνονται οι τιμές ροπής αντοχής που υπολογίστηκαν για τη διατομή από την προσεγγιστική μέθοδο και ικανοποιούν τις απαιτήσεις σε αντοχή που επιβάλλει η ανεμοπίεση σε συνδυασμό με τις θλιπτικές δράσεις από το ίδιο βάρος της ανεμογεννήτριας.

2.3 Διάγραμμα ροής



3

Συστάσεις για την κατασκευή πολώνων ανεμογεννητριών τύπου «sandwich»

3.1 Περιγραφή διαδικασίας βιομηχανοποίησης και ανέγερσης συμβατικών, αμιγώς χαλύβδινων πολώνων

Η συνηθέστερη μορφή πολώνων ανεμογεννητριών είναι τα χαλύβδινα κυλινδρικά ή κολουροκωνικά κελύφη, των οποίων η κατασκευή επιτυγχάνεται (α) καμπλώνοντας επίπεδα ελάσματα με ψυχρή έλαση ώστε να αποκτήσουν το επιθυμητό κυλινδρικό σχήμα (Εικόνα 3.1i), (β) συγκολλώντας την κοινή ακμή ώστε να δημιουργηθεί ένα κλειστό κέλυφος (Εικόνα 3.1ii), (γ) συγκολλώντας διαδοχικά κελυφωτά τμήματα μεταξύ τους ώστε να δημιουργηθούν κελύφη επιθυμητού μήκους (Εικόνα 3.1iii), με κριτήριο τη δυνατότητα μεταφοράς και ανέγερσής τους, (δ) μεταφέροντας τα τμήματα στον τόπο εγκατάστασης (Εικόνα 3.1iv) για την ανέγερσή τους (Εικόνα 3.1v) και (ε) κοχλιώνοντας αυτά τα τμήματα μεταξύ τους μέσω δακτυλοειδών πελμάτων (Εικόνα 3.1vi) με προεντεταμένους κοχλίες (Εικόνα 3.1vii).



(i)



(ii)



(iii)



(iv)



(v)



(vi)



(vii)



(viii)

Εικόνα 3.1: Φάσεις κατασκευής πολώνων ανεμογεννητριών αμιγώς χαλύβδινης διατομής

Photo 3.1: Construction phases of steel-only wind turbine towers

3.2 Κατασκευή πυλώνων διατομής «sandwich»

3.2.1 Γενικά

Για την κατασκευή πυλώνων «sandwich» είναι δυνατόν να ακολουθηθούν δύο διαφορετικές μέθοδοι, η διαφοροποίηση των οποίων έγκειται στο αν η σκυροδέτηση του πυρήνα πραγματοποιείται στον τόπο ανέγερσης ή στο εργοστάσιο, ενώ τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους περιγράφονται αναλυτικότερα στη συνέχεια. Στην πρώτη περίπτωση, καταρχάς ακολουθείται η διαδικασία των συμβατικών πυλώνων που περιγράφηκε παραπάνω, όσον αφορά την κατασκευή, μεταφορά και ανέγερση των χαλύβδινων κελυφών. Πριν τη μεταφορά τους στον τόπο εγκατάστασης, τα χαλύβδινα τμήματα που αποτελούν το εσωτερικό κέλυφος συνδέονται με εκείνα που συνιστούν το εξωτερικό κέλυφος με πλάκες που συγκολλώνται περιμετρικά, κάθετα στα δύο κελύφη, τοποθετούμενες μεταξύ των δύο κελυφών σε ρόλο αποστατών και φλάντζες συγκολλώνται στα δύο άκρα του εκάστοτε τμήματος για τη σύνδεσή του με εκείνα εκατέρωθέν του. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στις Εικόνα 3.1i,ii,iii για την περίπτωση πυλώνα τηλεπικοινωνιών μορφής «sandwich» με μεταβλητή διατομή καθ' ύψος, με τη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση, λόγω μικρότερου μεγέθους, η σύνδεση μεταξύ των δύο τμημάτων γίνεται κοχλιωτά, στη θέση ανέγερσης. Στη συνέχεια, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3.1iv, σκυροδετείται το κενό στον πυρήνα του πυλώνα κατά τα αναφερόμενα στην ενότητα 3.2.2. Συνιστάται, ωστόσο, για λόγους αποφυγής παραμενουσών τάσεων που περιγράφονται στην ενότητα 3.2.4, η ανέγερση των χαλύβδινων τμημάτων να πραγματοποιείται σταδιακά, με σκυροδέτηση του πυρήνα μεταξύ των ήδη τοποθετημένων τμημάτων πριν την τοποθέτηση των επόμενων. Η δεύτερη μέθοδος κατασκευής βασίζεται στην πλήρη προκατασκευή κάθε τμήματος του πυλώνα στο εργοστάσιο, συμπεριλαμβανομένης της σκυροδέτησης, ώστε οι εργασίες στο εργοτάξιο να περιοριστούν μόνο στη διαδικασία ανέγερσης.

3.2.2 Έγχυση σκυροδέματος

Ομοίως με την περίπτωση πυλώνων εξ ολοκλήρου κατασκευασμένων από σκυρόδεμα, και όπως προαναφέρθηκε, η σκυροδέτηση μπορεί να πραγματοποιείται είτε επιτόπου στο πεδίο εγκατάστασης, είτε στο εργοστάσιο. Η διαδικασία της επιτόπου σκυροδέτησης συνεπάγεται σαφώς μειωμένο κόστος μεταφοράς και ανέγερσης, σε σύγκριση με τη χρήση προκατασκευασμένων τμημάτων, αναπόφευκτα μεγαλύτερου βάρους. Ωστόσο, ο ποιοτικός έλεγχος στην περίπτωση αυτή καθίσταται δυσχερής και η σκυροδέτηση απαιτεί πολύ μεγάλη προσοχή, ιδιαίτερα όταν πραγματοποιείται σε μεγάλα υψόμετρα όπου, εκτός άλλων δυσχερειών, επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες, ειδικά κατά τη χειμερινή περίοδο. Η εναλλακτική λύση της προκατασκευής τμημάτων πυλώνα στο εργοστάσιο ενέχει το πλεονέκτημα της σκυροδέτησης υπό απολύτως ελεγχόμενες συνθήκες, ενώ το σχετικό κόστος της, όσον αφορά την παραγωγή, μειώνεται όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των πυλώνων που πρόκειται να κατασκευαστούν. Το αυξημένο βάρος των έτοιμων τμημάτων δημιουργεί ωστόσο δυσκολίες τόσο στην ανέγερση όσο και στη μεταφορά τους και οδηγεί σε αναγκαστική, σημαντική μείωση του μήκους με ταυτόχρονη αύξηση του πλήθους τους, άρα σε

αυξημένο κόστος παραγωγής, μεταφοράς αλλά και εγκατάστασης λόγω του μεγαλύτερου αριθμού συνδέσεων που πρέπει να πραγματοποιηθούν.

Από τα σημαντικότερα ζητήματα που ανακύπτουν κατά την κατασκευή των τμημάτων «sandwich» είναι η εξασφάλιση επαρκούς συμπίκνωσης του σκυροδέματος στον πυρήνα. Η πιο ενδεδειγμένη λύση για την ικανοποίηση αυτής της απαίτησης είναι η χρήση αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Τόσο στην περίπτωση της επιτόπου έγχυσης, όσο και σε αυτήν της σκυροδέτησης σε συνθήκες εργαστηρίου, η χρήση αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος σχεδόν εξαλείφει την ανάγκη δόνησης, κάτι που συνεπάγεται μειωμένη απαίτηση σε εξειδικευμένους τεχνίτες λόγω ευκολότερης εφαρμογής, γρηγορότερη και ασφαλέστερη ολοκλήρωση της κατασκευής, χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και, εν τέλει, σημαντική μείωση κόστους. Επιπλέον, μολονότι υπάρχουν αρκετά περιθώρια περαιτέρω έρευνας όσον αφορά τον σχετικά νέο αυτό τύπο σκυροδέματος, οι έως τώρα μελέτες εφαρμογής του σε υποστυλώματα μορφής «sandwich» (Concrete-Filled Double Skin Steel Tubes, CFDST) τεκμηριώνουν υψηλά επίπεδα απορρόφησης ενέργειας και πλαστιμότητας, σε συνδυασμό με αντοχή που δεν υστερεί σε σύγκριση με εκείνη του συμβατικού σκυροδέματος [4]. Ανεξάρτητα από το είδος σκυροδέματος, ωστόσο, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να επιτευχθεί με μεγάλη ακρίβεια η ενδεδειγμένη αναλογία νερού προς τσιμέντο στο μείγμα, καθώς ο εγκλεισμός του σκυροδέματος ανάμεσα στα δύο χαλύβδινη κελύφη δεν επιτρέπει την απομάκρυνση τυχόν περίσσειας νερού, με δυσμενείς επιπτώσεις στην αντοχή [5].

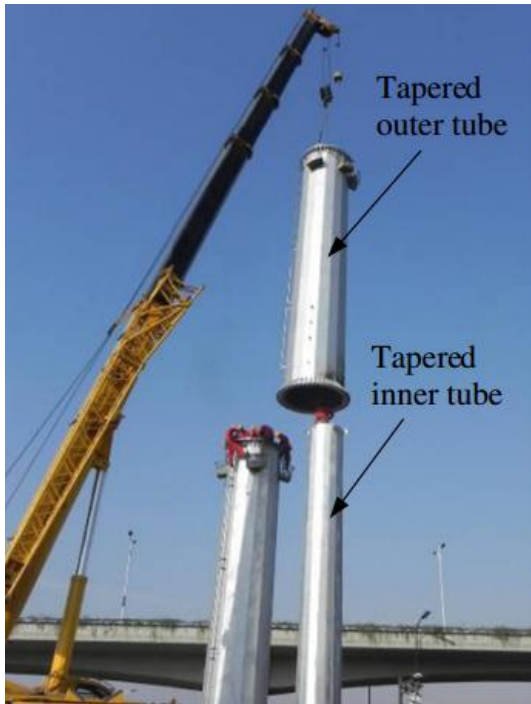
Η διαδικασία της επιτόπου έγχυσης σκυροδέματος σε κάθε περίπτωση ακολουθεί χρονικά αυτήν της τοποθέτησης των δύο χαλύβδινων κελυφών, τα οποία λειτουργούν ταυτόχρονα ως καλούπι. Πρέπει να δίνεται προσοχή, ώστε από τις χαλύβδινες επιφάνειες που σχηματίζουν τον πυρήνα να έχει απομακρυνθεί η σκόνη, καθώς και τυχόν υπολείμματα νερού ή λαδιού [5]. Η έγχυση μπορεί έπειτα να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους: είτε από τη βάση του υπό σκυροδέτηση τμήματος με χρήση αντλίας, είτε από την κορυφή. Στην πρώτη περίπτωση η πλήρωση πραγματοποιείται μέσω οπής που διανοίγεται για το σκοπό αυτό στη βάση του πολώνα. Από την οπή αυτή, η πλήρωση πραγματοποιείται μέχρι ενός ύψους που εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το μήκος και ο αριθμός των επιμέρους τμημάτων πολώνα, η ισχύς της αντλίας κ.α. Πάνω από το εν λόγω ύψος, έπειτα, διανοίγεται η επόμενη οπή κ.ο.κ. Στις περιοχές διάνοιξης των οπών η αντοχή του χάλυβα πρέπει να επανελέγχεται. Το κλείσιμο των οπών έπεται της πήξης του σκυροδέματος. Στη δεύτερη περίπτωση η έγχυση του σκυροδέματος από την κορυφή μπορεί να γίνει είτε με χρήση χοάνης σε βήματα των 300mm έως 500mm και δόνηση μετά από κάθε βήμα [5], είτε με σωλήνα σκυροδέτησης, με προϋπόθεση η άκρη του να παραμένει χαμηλότερα από την επιφάνεια του υγρού σκυροδέματος, ώστε να εξασφαλίζεται κατά το δυνατόν η συμπίκνωσή του. Ανεξαρτήτως μεθόδου, κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης απαιτείται καταγραφή του όγκου σκυροδέματος που εγχύεται, ώστε να διασφαλίζεται η πραγματική και όχι φαινομενική πλήρωση του όγκου του πυρήνα.

Στην εναλλακτική περίπτωση χρήσης έτοιμων τμημάτων πολώνα, σκυροδετημένων στο εργοστάσιο, η ανέγερση αυτών δεν πρέπει να πραγματοποιείται πριν το σκυρόδεμα να έχει αποκτήσει τουλάχιστον το 50% της τελικής αντοχής του [5].

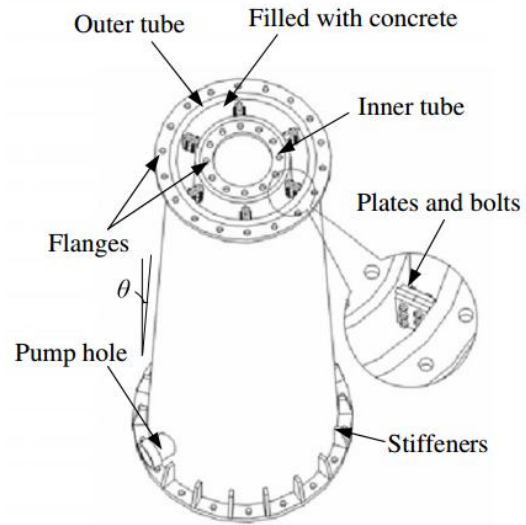
3.2.3 Σύνδεση διαδοχικών τμημάτων

Ο συμβατικός τρόπος σύνδεσης μεταξύ των τμημάτων αμιγώς χαλύβδινων πολώνων που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.1 είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί επίσης στην κατασκευή πολώνων τύπου «sandwich». Στην περίπτωση αυτή, στο άκρο καθενός από τα δύο χαλύβδινα κελύφη συγκολλάται από μία χαλύβδινη φλάντζα, όπως φαίνεται στις Εικόνα 3.1ii,iii, η οποία στη συνέχεια κοχλιώνεται στην αντίστοιχη φλάντζα του επόμενου χαλύβδινου τμήματος με προεντεταμένους κοχλίες.

Αν εφαρμοστεί η λύση της κατασκευής υβριδικού πολώνα, με διατομή sandwich κοντά στη βάση και συμβατική, αμιγώς χαλύβδινη διατομή στα υψηλότερα τμήματα, η σύνδεση στο σημείο αλλαγής του τύπου διατομής μπορεί να υλοποιηθεί, είτε μέσω της προαναφερθείσας μεθόδου με συγκόλληση φλαντζών και κοχλίωσή τους, είτε μέσω μιας νέας εναλλακτικής λύσης [6], η οποία ωστόσο βρίσκεται ακόμα υπό διερεύνηση και επομένως συνιστάται προς το παρόν με επιφύλαξη. Η μέθοδος αυτή προβλέπει τη μερική διείσδυση του αμιγώς χαλύβδινου κελύφους του άνω τμήματος του πολώνα στον πυρήνα σκυροδέματος του τμήματος με διατομή «sandwich», όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, χωρίς απαίτηση φλαντζών και κοχλιών. Η λύση αυτή αποτελεί μια παραλλαγή της μεθόδου σύνδεσης με κονίαμα (grouted connection) που εφαρμόζεται κυρίως για τη σύνδεση θεμελίωσης και πολώνα υπεράκτιων ανεμογεννητριών, με κυριότερο πλεονέκτημα τη μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε κόπωση συγκριτικά με την κοχλιωτή λύση. Στην περίπτωση της μετάβασης από διατομή «sandwich» σε αμιγώς χαλύβδινη διατομή, το χαλύβδινο κέλυφος της δεύτερης μορφής εισέρχεται στο εσωτερικό του πυρήνα της πρώτης πριν αυτός σκυροδετηθεί, με μήκος αλληλοκάλυψης που εξαρτάται από την εκάστοτε περίπτωση. Στη συνέχεια, και αφού ολοκληρωθεί με ακρίβεια η τοποθέτηση του ενός τμήματος εντός του άλλου, η σύνδεση ολοκληρώνεται με τη σκυροδέτηση του πυρήνα.



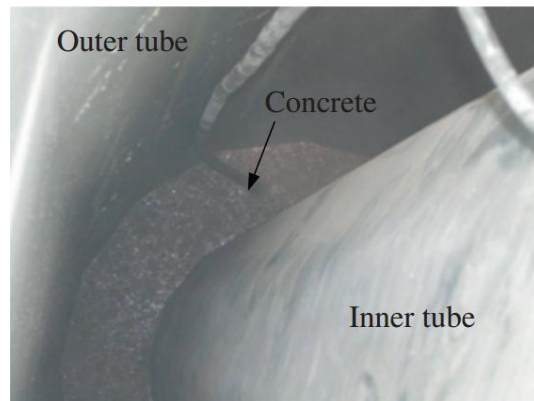
(i)



(ii)



(iii)



(iv)

Εικόνα 3.1: Ανέγερση πολώνων διατομής τύπου «sandwich»

Photo 3.2: Erection of sandwich type towers



Σχήμα 3.1: Πιλοτική μέθοδος σύνδεσης υβριδικών πολώνων ανεμογεννητριών

Figure 3.1: Innovative connection type of hybrid wind turbine towers

3.2.4 Ειδικά ζητήματα σχεδιασμού και κατασκευής

Στην περίπτωση που η σκυροδέτηση του πυρήνα ενός πολώνα «sandwich» πραγματοποιείται επιτόπου, οπότε προηγείται η τοποθέτηση των χαλύβδινων κελυφών, τα τελευταία υποβάλλονται σε σημαντική καταπόνηση λόγω υπερκείμενων τμημάτων, ίδιου βάρους και, μετά την πλήρωση, πίεσης του υγρού σκυροδέματος [7]. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ανάπτυξη αρχικών παραμορφώσεων και παραμενουσών τάσεων στο χάλυβα κατά τη φάση κατασκευής, οι οποίες απομειώνουν την τελική αντοχή του πολώνα [8]. Το θέμα αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό, ώστε τα χαλύβδινα κελύφη να διαθέτουν επαρκή αντοχή και δυσκαμψία για να αντεπεξέλθουν με ασφάλεια στις προαναφερθείσες καταπονήσεις, ή ακόμα να προβλέπεται προσωρινή υποστήριξη τους κατά την ανέγερση, έως ότου επέλθει η πήξη του σκυροδέματος.

Αναφορικά με την επιλογή των υλικών κατασκευής, συνιστάται η ποιότητα χάλυβα και σκυροδέματος να βρίσκονται σε σχετική αντιστοιχία μεταξύ τους - υψηλή ποιότητα χάλυβα να συνδυάζεται με υψηλή ποιότητα σκυροδέματος και αντίστροφα - καθώς επιτυγχάνεται έτσι η βέλτιστη συμπεριφορά της σύνθετης διατομής [5]. Παραδειγματος χάριν, για τάση διαρροής χάλυβα μεταξύ 235MPa και 345MPa, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος που επιλέγεται ενδείκνυται να κυμαίνεται από 40MPa έως 60MPa. Αντίστοιχα, η ενδεικτική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος για χάλυβα με όριο διαρροής ανώτερο των 345MPa είναι μεγαλύτερη των 60MPa.

Λόγω του μικρού πάχους χαλύβδινου κελύφους ενός πολώνα «sandwich», η οξείδωση του χάλυβα στο εξωτερικό της διατομής σε συνδυασμό με τη συνεχή μακροχρόνια φόρτιση έχει παρατηρηθεί ότι υποβιβάζει δραστικά την αντοχή και τη δυσκαμψία [9]. Ιδιαίτερη μέριμνα επομένως απαιτείται για προσεκτική και με αυστηρό έλεγχο εφαρμογή αντιοξειδωτικής προστασίας, ιδιαίτερα όταν επικρατούν συνθήκες που ευνοούν την οξείδωση, όπως στην περίπτωση παράκτιων ή υπεράκτιων ανεμογεννητριών.

Τέλος, σε περίπτωση πυρκαγιάς στον πολώνα, από το εγκλωβισμένο σκυρόδεμα θα παραχθεί ατμός ο οποίος λόγω μη δυνατότητας διαφυγής θα ασκήσει έντονη πίεση στα χαλύβδινα κελύφη με κίνδυνο έκρηξης [5]. Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού συνιστάται η διάνοιξη μικρών οπών στο χάλυβα, όχι μικρότερων από 20mm, η βέλτιστη πυκνότητα των οποίων εξαρτάται από την εκάστοτε γεωμετρία της διατομής.

4

Συμπεράσματα

Στην παρούσα τεχνική έκθεση παρουσιάστηκε μια μεθοδολογία προκαταρκτικού σχεδιασμού πυλώνων ανεμογεννητριών, βασισμένη στα ποικίλα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά τις διερευνήσεις που έχουν προηγηθεί. Η μεθοδολογία αναπτύχθηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτυγχάνεται η αξιοποίηση τόσο της συμβατικής, ομοιογενούς χαλύβδινης διατομής, όσο και της πρωτότυπης λύσης «sandwich» που μελετήθηκε διεξοδικά στα πλαίσια του έργου. Αναλόγως των εκάστοτε απαιτήσεων ενός αιολικού πάρκου, είναι δυνατόν για την κατασκευή των πυλώνων να αρκεί η χρήση αμιγώς χαλύβδινων τμημάτων, να απαιτείται η καθολική χρήση τμημάτων «sandwich», ή να είναι πιο δόκιμος ο συνδυασμός των δύο σε μορφή υβριδικών πυλώνων, με εφαρμογή της ευκολότερης κατασκευαστικά πρώτης λύσης στα υψηλότερα τμήματα και αξιοποίηση των βελτιωμένων μηχανικών ιδιοτήτων της δεύτερης στα τμήματα που βρίσκονται κοντά στη βάση, όπου οι απαιτήσεις σε αντοχή και δυσκαμψία είναι σημαντικά αυξημένες. Σε κάθε περίπτωση, η προτεινόμενη μεθοδολογία στοχεύει στην καθοδήγηση προς τη βέλτιστη επιλογή είδους διατομής, γεωμετρικών χαρακτηριστικών και ποιότητας υλικών, ως ένα προκαταρκτικό στάδιο σχεδιασμού και μελέτης εφικτότητας, με ικανοποιητική ακρίβεια και ταυτόχρονα εξοικονόμηση χρόνου και υπολογιστικών πόρων.

Όσον αφορά το μετέπειτα στάδιο της υλοποίησης της όποιας επιλεγείσας λύσης, ενώ η διαδικασία κατασκευής και ανέγερσης συμβατικών πυλώνων από χάλυβα βρίσκεται σε αρκετά ώριμο στάδιο, οι σημαντικές και έντονες ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν οι πυλώνες που αποτελούνται – καθ' όλο το ύψος τους ή μερικώς – από διατομές μορφής «sandwich» επιτάσσουν την ανάπτυξη διαφορετικών, πιο εξελιγμένων μεθόδων για την ασφαλή, αποτελεσματική και οικονομική τους εγκατάσταση. Ωστόσο, παρά την προφανή ανάγκη για περαιτέρω έρευνα στο νέο αυτό πεδίο, μέσω των πειραματικών δοκιμών και των αριθμητικών διερευνήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του έργου, κατέστη εφικτή η μερική προσαρμογή της περιορισμένης διεθνούς εμπειρίας από άλλες κατασκευές «sandwich», όπως πυλώνες τηλεπικοινωνιών ή υποστυλώματα μεγάλου ύψους, στις ειδικές απαιτήσεις των πυλώνων ανεμογεννητριών. Βάσει αυτού, προτάθηκε μια διαδικασία κατασκευής των τελευταίων, με έμφαση στις σημαντικές διαφορές με εκείνη των συμβατικών πυλώνων. Τονίστηκαν ακόμα ζητήματα που

χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής και διατυπώθηκαν συστάσεις για την αντιμετώπισή τους, με στόχο την επιτυχή διεκπεραίωση του πρωτότυπου αυτού εγχειρήματος.

Αναφορές

- [1] NWTTC Information Portal (FAST). <https://nwtc.nrel.gov/FAST>. Last modified 19-March-2015; Accessed 13-November-2016.
- [2] Eurocode 3, Design of Steel Structures, Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [3] NWTTC Information Portal (TurbSim). <https://nwtc.nrel.gov/TurbSim>. Last modified 31-January-2016; Accessed 13-November-2016.
- [4] Han L.H., Yao G.H. and Zhao X.L., “Tests and calculations of hollow structural steel (HSS) stub columns filled with self-consolidating concrete (SCC)”, *Journal of Constructional Steel Research*, 61 (2005), 1241–1269.
- [5] Han L.H., Li W. and Bjorhovde R., “Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members”, *Journal of Constructional Steel Research*, 100 (2014), 211–228.
- [6] Keindorf Ch. and Schaumann P., “Sandwichtürme für Windenergieanlagen mit höherfesten Stahl- und Verbundwerkstoffen”, *Stahlbau*, 79 (2010), Heft 9, 648–659.
- [7] Li W., Han L.H. and Zhao X.L., “Axial strength of concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) columns with preload on steel tubes”, *Thin-Walled Structures*, 56 (2012), 9–20.
- [8] Han L.H. and Yao G.H., “Behaviour of concrete-filled hollow structural steel (HSS) columns with pre-load on the steel tubes”, *Journal of Constructional Steel Research*, 59 (2003), 1455–1475.
- [9] Han L.H., Hou C. and Wang Q.L., “Square concrete filled steel tubular (CFST) members under loading and chloride corrosion: Experiments”, *Journal of Constructional Steel Research*, 71 (2012), 11–25.
- [10] Li W. et al., “Behaviour of tapered concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) stub columns”, *Thin-Walled Structures*, 57 (2012), 37–48.

Παράρτημα: Αναλύσεις - προσομοίωση επιλεγμένων φορτίσεων σχεδιασμού

Στο παρόν Παράρτημα περιγράφονται αναλυτικότερα οι κανονιστικές διατάξεις καθώς και η λογική της επιλογής των βασικότερων συνδυασμών φόρτισης στα πλαίσια του προκαταρκτικού σχεδιασμού ανεμογεννητριών. Επισημαίνεται ότι, όπως προαναφέρθηκε, οι συγκεκριμένες διατάξεις αφορούν την περίπτωση υπεράκτιων ανεμογεννητριών και συνεπώς συμπεριλαμβάνουν, επιπλέον των φορτίσεων που αφορούν τις χερσαίες ανεμογεννήτριες, φορτία από τη δράση των κυμάτων. Στην περίπτωση χερσαίων ανεμογεννητριών παραλείπονται οι φορτίσεις λόγω κυματισμού.

Ο σχεδιασμός υπεράκτιων ανεμογεννητριών σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς IEC, απαιτεί την προσομοίωση πολλών φορτιστικών καταστάσεων, ή αλλιώς Φορτίσεων Σχεδιασμού (Design Load Cases - DLC), που σχετίζονται τόσο με την οριακή κατάσταση αστοχίας της κατασκευής όσο και με τις απαιτήσεις σχεδιασμού των δομικών μελών και συνδέσεων έναντι κόπωσης. Ο ελάχιστος αριθμός Φορτίσεων Σχεδιασμού σύμφωνα με τον κανονισμό είναι περίπου 35 για το σύνολο των μονίμων καταστάσεων (παραγωγής ενέργειας, εμφάνιση σφάλματος, διακοπής-έναρξης λειτουργίας, αναμονής) αλλά και των τυχηματικών και παροδικών καταστάσεων (μεταφορά, συναρμολόγηση) σχεδιασμού.

Αν ληφθεί υπόψη ότι ο κανονισμός επιβάλλει ότι για την εξαγωγή αποδεκτών αποτελεσμάτων για μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου $v_w(i)$, απαιτείται η εκτέλεση τουλάχιστον 6 προσομοιώσεων διάρκειας 10 λεπτών, προκύπτει ότι ο υπολογιστικός όγκος που απαιτείται για την ανάλυση όλων των DLC και την επεξεργασία και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι πολύ μεγάλος.

Θεωρείται συνεπώς σκόπιμο, στα πλαίσια προκαταρκτικού σχεδιασμού, να γίνει η ανάλυση-προσομοίωση επιλεγμένων DLC που να καλύπτουν καταστάσεις:

- Ακραίων τιμών φορτίων ανέμου και κυμάτων
- Έναρξης - παύσης λειτουργίας
- Παραγωγής ενέργειας με εμφάνιση σφάλματος δικτύου
- Αναμονής με ή χωρίς σφάλμα δικτύου
- Που σχετίζονται με φαινόμενα κόπωσης

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, επιλέγονται οι εξής φορτίσεις σχεδιασμού:

Για ελέγχους αστοχίας (U)

- DLC 1.3 (extreme turbulence model + normal sea state)
- DLC 1.6a (normal turbulence model + severe sea state)
- DLC 2.1 (normal turbulence model + normal sea state+ fault)
- DLC 2.3 (extreme operating gust + normal sea state + fault)
- DLC 3.2 (extreme operating gust + normal sea state + start-up)
- DLC 6.1a (extreme wind model + extreme sea state + parked)
- DLC 6.2a (extreme wind model + extreme sea state + parked + loss of electrical network)

Στον επόμενο πίνακα περιλαμβάνονται οι επιλεγμένες φορτίσεις σχεδιασμού, ελέγχων ασφαλείας (U) προκαταρκτικού σχεδιασμού, με περιγραφή των θεωρούμενων συνθηκών ανέμου, κυμάτων, συστημάτων ελέγχου και συντελεστών ασφαλείας

	DLC	Wind Condition	Wave	Wind and Wave Directionality	Sea Currents	Water Level	Other Conditions	Partial Safety Factor (N:normal A:accidental)
Power Production	DLC 1.3	ETM $V_{ref} < V_{hub} < V_{cut}$	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD, UNI	NCM	MSL	-	N ($\gamma=1.35$)
	DLC 1.6a	NTM $V_{ref} < V_{hub} < V_{cut}$	SSS $H_s = H_{sSSS}$	COD, UNI	NCM	NWLR	-	N ($\gamma=1.35$)
Power production plus occurrence of fault	DLC 2.1	NTM $V_{ref} < V_{hub} < V_{cut}$	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD, UNI	NCM	MSL	Control system fault or loss of electrical network	N ($\gamma=1.35$)
	DLC 2.3	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ and V_{cut}	NSS (or NWH) $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD, UNI	NCM	MSL	External or internal electrical fault including loss of electrical network	A ($\gamma=1.1$)
Start-up	DLC 3.2	EOG $V_{hub} = V_r, V_r \pm 2 \text{ m/s}$ and V_{cut}	NSS (or NWH) $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD, UNI	NCM	MSL	-	N ($\gamma=1.35$)
Parked (standstill or idling)	DLC 6.1a	EWM Turbulent wind model $V_{hub} = K_1 V_{ref}$	ESS $H_s = K_2 H_{S50}$	MIS, MUL	ECM	EWLR	-	N ($\gamma=1.35$)
	DLC 6.2a	EWM Turbulent wind model $V_{hub} = K_1 V_{ref}$	ESS $H_s = K_2 H_{S50}$	MIS, MUL	ECM	EWLR	Loss of electrical network	A ($\gamma=1.1$)

Πίνακας 1. Επιλεγμένες φορτίσεις σχεδιασμού, ελέγχων ασφαλείας (U) προκαταρκτικού σχεδιασμού

Στον παραπάνω πίνακα χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι συμβολισμοί:

COD (co-directional): Θεώρηση ίδιας κατεύθυνσης για άνεμο - κύματα

MIS (mis-aligned): Θεώρηση διαφορετικής κατεύθυνσης για άνεμο - κύματα

UNI (uni-directional): Θεώρηση μόνο μίας κατεύθυνσης για άνεμο - κύματα

MUL (multi-directional): Θεώρηση πολλών κατευθύνσεων για άνεμο - κύματα

Για ελέγχους κόπωσης (F)

- DLC 1.2 (normal turbulence model + normal sea state + power production)
- DLC 6.4 (normal turbulence model + normal sea state + Parked)
- DLC 7.2 (normal turbulence model + normal sea state + Parked + fault)

Στον επόμενο πίνακα περιλαμβάνονται οι επιλεγμένες φορτίσεις σχεδιασμού, ελέγχων κόπωσης (F) προκαταρκτικού σχεδιασμού, με περιγραφή των θεωρούμενων συνθηκών ανέμου, κυμάτων, συστημάτων ελέγχου και συντελεστών ασφάλειας

	DLC	Wind condition	Wave	Wind and Wave Directionality	Sea Currents	Water Level	Other Conditions	Partial Safety Factor
Power Production	DLC 1.2	NTM $V_{ref} < V_{hub} < V_{cut}$	NSS Joint prob. distribution of H_s, T_p, V_{hub}	OOD, MUL	No currents	NWLR or \geq MSL	-	F ($\gamma=1.0$)
Parked (standstill or idling)	DLC 6.4	NTM $V_{hub} < 0.7 V_{ref}$	NSS Joint prob. distribution of H_s, T_p, V_{hub}	OOD, MUL	No currents	NWLR or \geq MSL	-	F ($\gamma=1.0$)
Parked and fault conditions	DLC 7.2	NTM $V_{hub} < 0.7 V_1$	NSS Joint prob. distribution of H_s, T_p, V_{hub}	OOD, MUL	No currents	NWLR or \geq MSL	-	F ($\gamma=1.0$)

Πίνακας 2. Επιλεγμένες φορτίσεις σχεδιασμού, ελέγχων κόπωσης (F) προκαταρκτικού σχεδιασμού