

## **ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΙΚΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΝΕΓΕΡΣΗΣ**

**Θεμιστοκλής Ν. Νικολαΐδης**

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών,  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, Ελλάς,  
e-mail: [think@civil.auth.gr](mailto:think@civil.auth.gr)

**Ευθύμιος Καραδήμος**

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, Ελλάς  
e-mail: [ekaradit@civil.auth.gr](mailto:ekaradit@civil.auth.gr)

**Χαράλαμπος Κ. Μπανιωτόπουλος**

Dr.-Ing., Professor, School of Engineering, University of Birmingham  
B15 2TT Birmingham, United Kingdom  
e-mail: [c.baniotopoulos@bham.ac.uk](mailto:c.baniotopoulos@bham.ac.uk)

### **1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην εργασία αυτή αναλύεται η δυνατότητα σχεδιασμού χαλύβδινων ανεμογεννητριών μικρής ισχύος οι οποίες διαθέτουν το πλεονέκτημα του χαμηλού κόστους κατασκευής και περιβαλλοντικού τους στίγματος. Πιο συγκεκριμένα, με επιλογή δύο τοποθεσιών από τον Ελληνικό χώρο με τελείως διαφορετικά τοπογραφικά και ανεμολογικά χαρακτηριστικά γίνεται μια ολοκληρωμένη διερεύνηση και αξιολόγηση ενός τέτοιου σχεδιασμού. Συγκεκριμένα η εκτίμηση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού της αντίστοιχης περιοχής οδηγεί στην εκτίμηση του βέλτιστου ύψους της ανεμογεννήτριας. Ακολούθως μέσα από μια συγκριτική αποτίμηση μιας πληθώρας παραμέτρων σχεδιασμού επιλέγεται ο τύπος της ανεμογεννήτριας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και συγκεκριμένα ένας τύπος κατακόρυφου άξονα και ένας τύπος οριζόντιου άξονα για διατάξεις μικρής ισχύος, κυρίως όμως διερευνάται η βέλτιστη μορφή του χαλύβδινου ιστού στήριξης με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής. Η ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής τέτοιου τύπου ανεμογεννητριών μικρής ισχύος κάνει την επιλογή τους ιδιαίτερα ανταγωνιστική στις τοπικές κοινωνίες και οδηγεί στη μείωση της ενεργειακής εξάρτησης από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

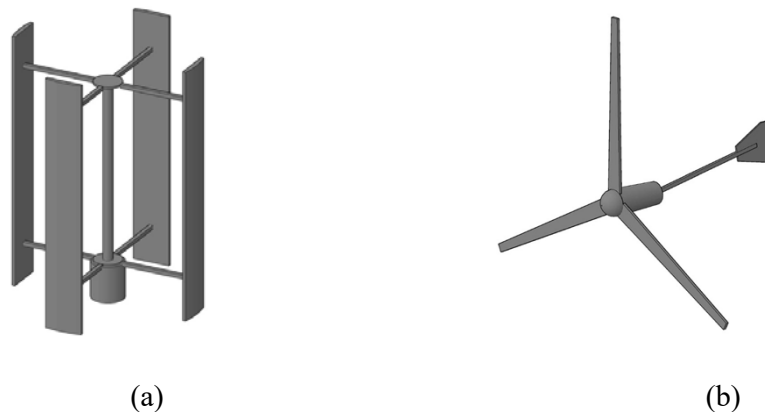
### **2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Καθώς τα ενεργειακά αποθέματα φαίνεται ότι ολοένα και λιγοστεύουν, μια άκρως φιλική για το περιβάλλον περιβαλλοντική ενέργεια είναι αυτή που προσπαθεί να αξιοποιήσει μέσω ανεμογεννητριών την αιολική ενέργεια. Ιδιαίτερα οι ανεμογεννήτριες μεγάλης κλίμακας εξαιτίας των επιπέδων του παραγόμενου θορύβου κατά τη λειτουργία τους, αλλά και εξαιτίας της αισθητικής υποβάθμισης που προκαλούν σε περιοχές ιδιαίτερου φυσικού

κάλλους, αντιμετωπίζονται τουλάχιστον με σκεπτικισμό. Μια λύση στο πρόβλημα αυτό μπορεί να είναι η δυνατότητα εφαρμογής ομάδων ή αυτόνομων μονάδων ανεμογεννητριών μικρής ισχύος οι οποίες εξαιτίας του μεγέθους τους αφήνουν πολύ μικρότερο περιβαλλοντικό ίχνος. Ως ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος διακρίνονται αυτές που σχεδιάζονται ώστε να ανταποκρίνονται στο συγκεκριμένο αιολικό δυναμικό μιας περιοχής ονομαστικής ισχύος έως 50 kW [5], [6]. Ανάλογα με την περιοχή εφαρμογής πρέπει να διερευνηθεί ο κατάλληλος τύπος τέτοιων ανεμογεννητριών. Στη συγκεκριμένη εργασία διερευνάται η δυνατότητα βιώσιμου σχεδιασμού του συστήματος, με παράδειγμα εφαρμογής για δύο περιοχές της Ελλάδας με διαφορετικά τοπογραφικά και ανεμοδυναμικά χαρακτηριστικά. Η πρώτη είναι στην ηπειρωτική χώρα στην περιοχή του Νότιου Πεδίου ορυχείων Λιγνίτη στην Κοζάνη, ενώ η δεύτερη είναι στο Παραλία του Ρεθύμνου στη θέση λειτουργίας της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων.

### 3. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΙΚΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

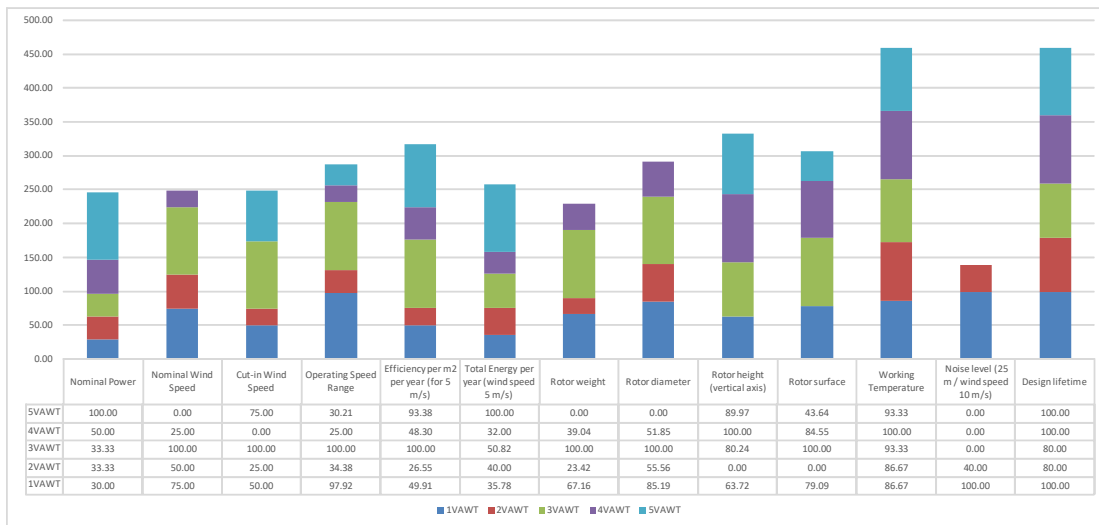
Οι βασικές αρχές του βιώσιμου σχεδιασμού στην υλοποίηση μιας κατασκευής αφορούν στις επιπτώσεις που προκαλούνται από αυτές στο περιβάλλον, τη κοινωνία και την οικονομία της κατασκευής. Η τελευταία αρχή σχετίζεται άμεσα με την αντοχή και τη λειτουργικότητα της κατασκευής. Ειδικότερα ως προς την κατηγορία αυτή, οι κατακόρυφου άξονα μικρής ισχύος ανεμογεννήτριες προορίζονται για περιοχές όπου δεν υπάρχει ομαλή ροή του ανέμου, καθώς δεν επηρεάζεται πολύ η παραγόμενη ενέργεια (Σχ.1a). Από την άλλη μεριά για ανοιχτές περιοχές με στρωτή ροή και λίγα εμπόδια είναι προτιμότερος ο τύπος οριζόντιου άξονα (Σχ.1b).



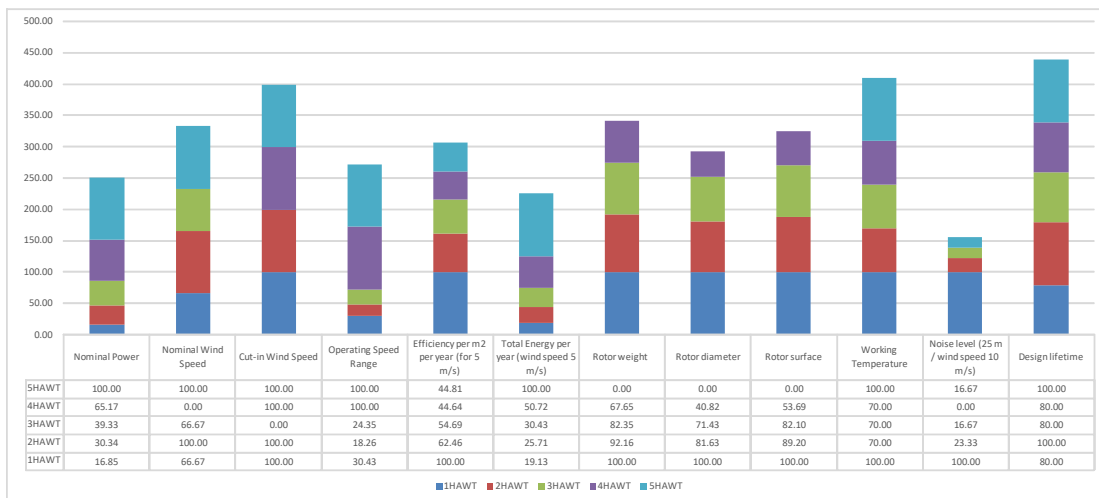
Σχ. 1. Χαρακτηριστική μορφή τύπων ανεμογεννητριών μικρής κλίμακας (a) κατακόρυφου άξονα και (b) οριζόντιου άξονα.

Τα κριτήρια βιωσιμότητας πρέπει να προσδιορίζουν σε μεγάλο βαθμό τον τύπο μικρής ανεμογεννήτριας που πρέπει να επιλεγεί μέσα από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και δεδομένα απόδοσης τέτοιων συστημάτων. Τα κυριότερα από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η ονομαστική ισχύς, η ονομαστική ταχύτητα ανέμου, η ταχύτητα ανέμου έναρξης λειτουργίας, η ετήσια παραγόμενη ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας ρότορα, το βάρος του ρότορα, η διάμετρος και η επιφάνεια των πτερυγίων, το ύψος του ρότορα (μόνο για κατακόρυφου τύπου), το διάστημα θερμοκρασιών λειτουργίας, τα επίπεδα έντασης θορύβου και η διάρκεια ζωής. Είναι προφανές ότι τα κριτήρια αυτά είναι ανομοιόμορφα, αλλά μπορεί να προκύψει μια σαφής εικόνα λαμβάνοντας κατά την συγκριτική αξιολόγηση, ισοδύναμους συντελεστές βαρύτητας. Με τον τρόπο αυτό στην παρούσα

εργασία επιλέγονται 5 γνωστοί τύποι ανεμογεννητριών μικρής ισχύος κατακόρυφου άξονα (VAWT) και 5 οριζόντιου (HAWT). Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι εκφρασμένα εδώ ως ποσοστά επί της μέγιστης τιμής του κάθε μεγέθους από την ομάδα. Από την ανάλυση αυτή προκύπτει ως βέλτιστη επιλογή (Σχ.2) ο τύπος 3VAWT ονομαστικής ισχύος 2.0kW. Με αντίστοιχη διαδικασία (Σχ.3) προκύπτει ως βέλτιστη επιλογή ο τύπος 5HAWT ονομαστικής ισχύος 8.9kW. Σε κάθε περίπτωση μπορεί ανάλογα με το σχεδιασμό να ληφθούν υπ' όψιν συγκεκριμένα επιμέρους κριτήρια ικανοποίησης. Σημαντική παράμετρος για την επιτυχία της εγκατάστασης αποτελεί ο ακριβής προσδιορισμός των ανεμολογικών συνθηκών της περιοχής. Για να καθοριστεί όσο το δυνατόν καλύτερα το προφίλ του ανέμου μιας δεδομένης περιοχής, χρειάζεται να προσδιοριστεί η ταχύτητά του, η διεύθυνσή του και ο πιθανός στροβιλισμός και οι αναταράξεις λόγω παρουσίας εμποδίων στη ροή του.



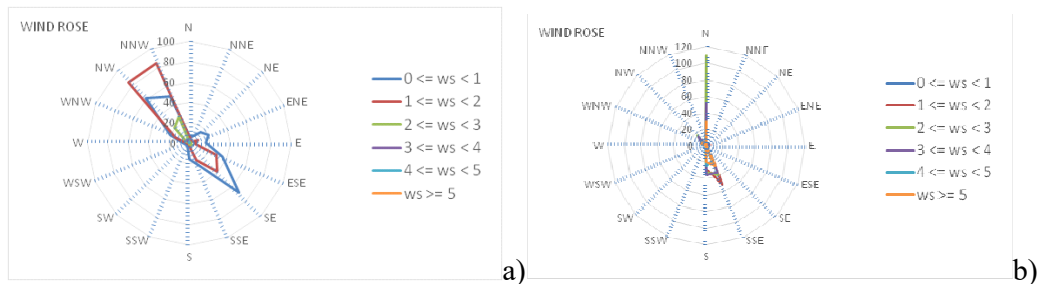
Σχ. 2. Συγκριτική αποτίμηση κριτηρίων ανεμογεννητριών μικρής ισχύος κατακόρυφου άξονα (VAWT).



Σχ. 3. Συγκριτική αποτίμηση κριτηρίων ανεμογεννητριών μικρής ισχύος οριζόντιου άξονα (HAWT).

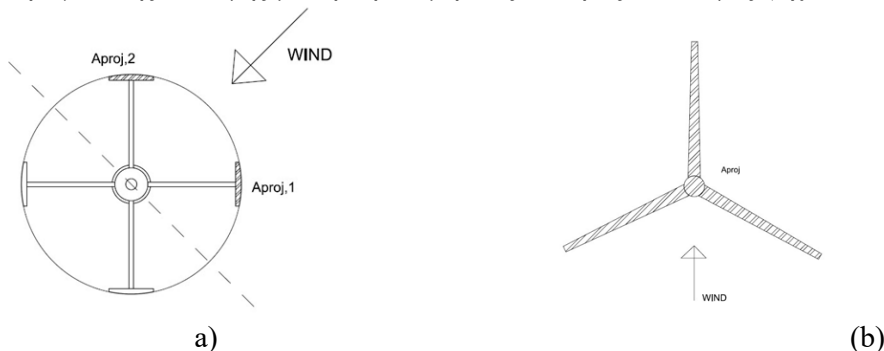
#### 4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΕΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η ανάλυση των ανεμοδυναμικών χαρακτηριστικών μιας περιοχής οδηγεί τόσο στον τύπο μικρής ανεμογεννήτριας που μπορεί να επιλεγεί, όσο και στο ύψος του ιστού της αξιολογώντας τα καταγεγραμμένα ανεμολογικά δεδομένα μιας περιοχής. Στη εργασία αυτή τα δεδομένα αυτά παρέχονται για τις συγκεκριμένες περιοχές του Ν. Κοζάνης και του Ν. Ρεθύμνης που αναφέρθηκαν [7]. Η αξιολόγηση του γίνεται μέσα από τον σχηματισμό αντίστοιχων ροδογραμμμάτων (WindRoses). (Σχ.4a,b). Τα διαγράμματα αυτά καταγράφουν τη συχνότητα εμφάνισης ανέμου και την κατανομή ταχυτήτων ανέμου ανά διεύθυνση. Αξιολογώντας τα δεδομένα αυτά για την περιοχή του Ν. Κοζάνης διαπιστώνεται ότι καθώς δεν υπάρχει εκεί ομαλή ροή του ανέμου δεν επηρεάζεται πολύ η παραγόμενη ενέργεια (Σχ. 5a) και επιλέγεται σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε τύπος ανεμογεννήτριας 3VAWT, με ύψος ιστού  $H_T=12.0m$ . Το ύψος αυτό επιτρέπει την κατασκευή, διαμόρφωση, μεταφορά και τοποθέτηση του ιστού ως μια αυτόνομη μονάδα, χωρίς επιμέρους τμήματα που απαιτούν συναρμολόγηση. Έτσι ο ιστός μορφώνεται με κελυφωτή κοίλη κυκλική χαλύβδινη διατομή μεταβλητής διαμέτρου καθ' ύψος (Σχ.6a1,a2).



Σχ. 4. Ανάλυση Ροδογράμματος (WindRose) συσχέτισης μέσης ημερήσιας ταχύτητας ανέμου και αντίστοιχης διεύθυνσης a) Νότιο Πεδίο Κοζάνης, b) Παραλία Ρεθύμνου.

Αντίστοιχα για την περιοχή του Ν. Ρεθύμνης διαπιστώνεται ότι τα εμπόδια είναι λίγα και η ροή του ανέμου είναι στρωτή (Σχ.5b). Έτσι για την περίπτωση αυτή επιλέγεται τύπος ανεμογεννήτριας μικρής ισχύος οριζόντιου άξονα τύπου 5HAWT σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε, με ύψος ιστού  $H_T=24.0m$ . Αξιολογώντας αυτό το δεδομένο επιλέγεται η διαμόρφωση του ιστού με χαλύβδινη δικτυωτή μορφή τριγωνικής ή τετραγωνικής κάτοψης μεταβλητού μήκους πλευράς καθ' ύψος (Σχ.6b1-2-3-4).

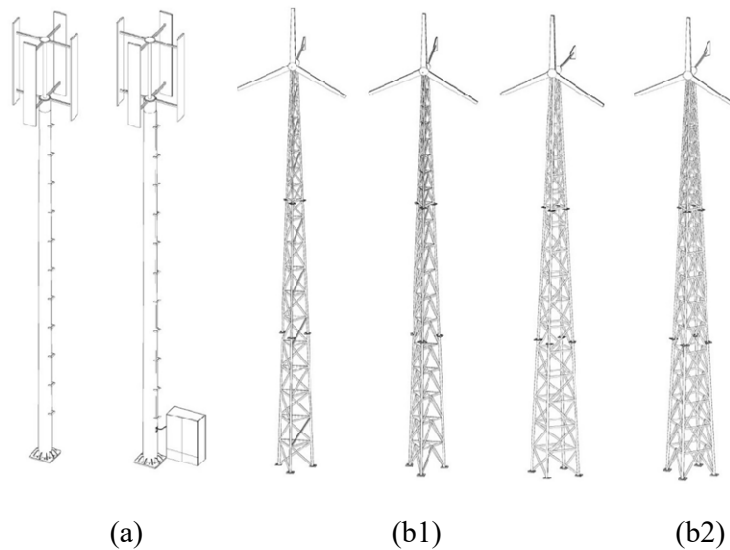


Σχ. 5. Σκαρίφημα προσήνεμης επιφάνειας ανέμου στα πτερύγια ανεμογεννήτριας μικρής κλίμακας (α) κατακόρυφου άξονα, (b) οριζόντιου άξονα.

Ταυτόχρονα μειώνεται και το οπτικό ίχνος του ιστού συνολικά. Σε όλες τις περιπτώσεις όταν πρόκειται για εγκατάσταση αιολικού πάρκου μικρών ανεμογεννητριών, η απόσταση μεταξύ αυτοτελών μονάδων καλό είναι να είναι πενταπλάσια από τη διάμετρο του ρότορα.

## 5. ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΙΣΤΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΙΚΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

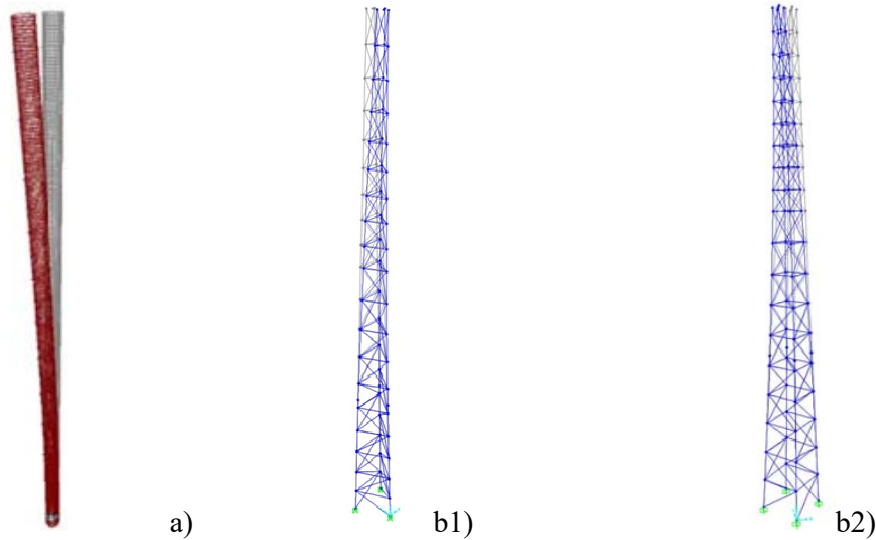
Ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός πύργου στήριξης ανεμογεννήτριας έχει ως βασικές επιδιώξεις τη διασφάλιση ότι η μέγιστη σχεδιαστική τάση είναι μικρότερη από την τάση αντοχής του υλικού, την αποφυγή λυγισμού ολόκληρου του πύργου ή κάποιου στοιχείου αυτού και την αντίσταση των μελών και των συνδέσεων της κατασκευής σε κόπωση. Ταυτόχρονα η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα του πύργου θα πρέπει να μη συμπίπτει με τις συχνότητες περιστροφής των πτερυγίων. Ακόμα η μέγιστη μετατόπιση στην κορυφή του ιστού πρέπει να βρίσκεται κάτω από το όριο του 5% επί του ύψους του πύργου [2], μέχρι το οποίο είναι αποδεκτό να πραγματοποιείται ελαστική ανάλυση του φορέα υπό συνδυασμούς Ο.Κ.Α. και κάτω από το όριο του 1÷2% επί του ύψους του πύργου το οποίο αποτελεί όριο ασφαλούς λειτουργίας της ανεμογεννήτριας υπό συνδυασμούς Ο.Κ.Λ.



Σχ. 6. Επιλεγμένοι τύποι ιστών ανεμογεννητριών μικρής κλίμακας (a) κατακόρυφου άξονα και (b1), (b2) οριζόντιου άξονα.

Στην εργασία αυτή η ανεμογεννήτρια κατακόρυφου ιστού στηρίζεται σε μονόστυλο κελυφωτό χαλύβδινο (S355) ιστό μορφής κόλουρου κώνου (Σχ.6a1,a2). Η διάμετρος της βάσης είναι  $d_b = 0.40\text{m}$  και της κορυφής  $d_t = 0.35\text{m}$ . Η συνολική μάζα του συστήματος ρότορα–πτερυγίων είναι 89 kg, ενώ η ανεμογεννήτρια διαθέτει κατακόρυφο άξονα περιστροφής και τα πτερύγια της περιστρέφονται γύρω από αυτόν. Στην περίπτωση πρόβλεψης πλευρικής οπής για τα καλώδια 15x8cm, λόγω των αυξημένων τάσεων που εμφανίζονται στην περιοχή της [4], προβλέπονται εσωτερικά περιμετρικά νεύρα ακαμψίας στην περιοχή της βάσης και της οπής, ώστε να αντιμετωπιστεί ιδιαίτερα ο τοπικός λυγισμός. Το πάχος του κελύφους είναι σταθερό και εξετάζονται 3 διαφορετικά μοντέλα (τα 2 τελευταία με οπή) με πάχη  $t_1 = 5,0\text{mm}$ ,  $t_2 = 5,5\text{mm}$ ,  $t_3 = 7,5\text{mm}$ . Η βασική ταχύτητα ανέμου για τη φόρτιση του ιστού λαμβάνεται για την περιοχή (Ελλάδα, ηπειρωτική χώρα)

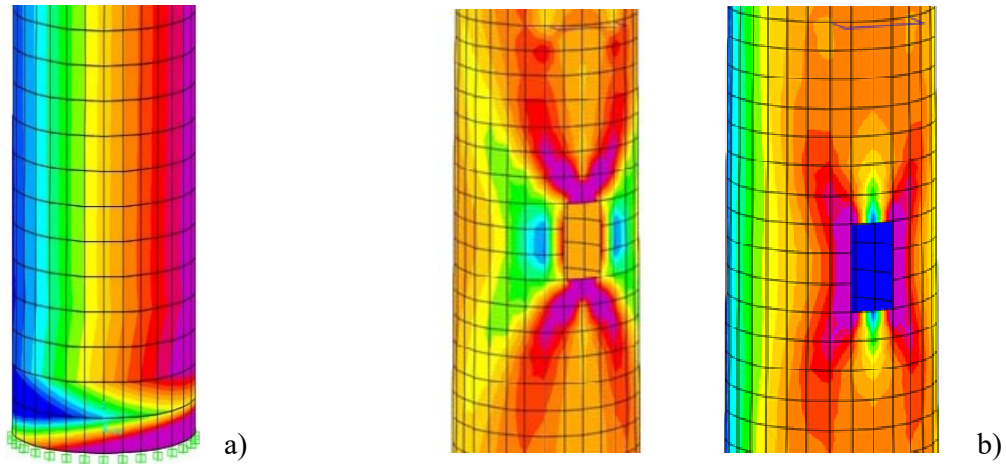
ως  $v_b=27\text{m/s}$ . Αντίστοιχα η ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα στηρίζεται σε δικτυωτό χαλύβδινο ιστό (S355H) τριγωνικής (Σχ.6b1,b2) ή τετραγωνικής διαμόρφωσης (Σχ.6b3,b4).



Σχ. 7. Κρίσιμη ιδιομορφή a) μονόστουλου κυκλικού κελύφους, b1,2) δικτυωτού ιστού ανεμογεννήτριας.

Ο ιστός αποτελείται από ράβδους διατομής κυκλικής κοιλοδοκού CHS, τόσο για τις κολώνες του συστήματος, όσο και για τα διαγώνια (μορφής Z ή Λ) και οριζόντια στοιχεία πλήρωσης. Η συνολική μάζα του συστήματος ρότορα – πτερυγίων είναι 545 kg, ενώ η ανεμογεννήτρια διαθέτει οριζόντιο άξονα περιστροφής και τα πτερύγια της περιστρέφονται γύρω από αυτόν. Τόσο στην τριγωνική, όσο και στην τετραγωνική μορφή η κάτοψη στη βάση έχει μήκος πλευράς 2.0m και στην κορυφή 0.35m. Εξαιτίας του ύψους του ο ιστός αυτός πρέπει να συναρμολογείται σε 2 ή 3 τμήματα προκειμένου να μεταφερθεί επί τόπου. Η βασική ταχύτητα ανέμου για τη φόρτιση του ιστού λαμβάνεται για την περιοχή (Ελλάδα, νησιά) ως  $v_b=33\text{m/s}$ . Σε όλα τα υπολογιστικά μοντέλα προσδιορίστηκε η τιμή του κρίσιμου φορτίου λυγισμού (buckling analysis) καθώς και η μέγιστη θλιπτική τάση που εμφανίζεται εξαιτίας αυτού στο κέλυφος (Σχ.7a, 7b1, 7b2). Ο έλεγχος επάρκειας εδώ γίνεται συντηρητικά ως ο λόγος μεταξύ της θλιπτικής τάσης υπό τα φορτία βαρύτητας προς την θλιπτική τάση που προκύπτει θέτοντας το κρίσιμο φορτίο λυγισμού στην κορυφή του ιστού. Η ανάλυση των υπολογιστικών μοντέλων των δύο τύπων ιστών και η αποτίμηση της έντασης και των παραμορφώσεων γίνεται με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων SAP2000. Η απόκριση δε των φορέων στα αναπτυσσόμενα φορτία σχεδιασμού σύμφωνα με τα προβλεπόμενα στον Ευρωκώδικα EN1991, EN1993 [3] και EN1998 σε συνδυασμό με το βάρος κάθε τύπου οδηγεί στην επιλογή της βέλτιστης διατομής για τον κάθε τύπο ιστού που εξετάζεται. Ιδιαίτερα όμως ο έλεγχος της διατομής του δακτυλίου του ιστού στην περίπτωση του κυκλικού κελύφους εμπεριέχει και την επιρροή του τοπικού λυγισμού σε κρίσιμες θέσεις, όπως είναι η βάση είτε η H/M οπή στην πλευρά του. Φαίνεται από τα αποτελέσματα (Πιν.1) του ελέγχου αυτού η επάρκεια της διατομής του κελύφους, αλλά και η αυξημένη επιρροή για τα μοντέλα 2 και 3 της μικρής οπής στην πλευρά του. Ταυτόχρονα η οριζόντια μετακίνηση στην κορυφή των ιστών ικανοποιεί τον έλεγχο με βάση γνωστά αποδεκτά όρια [2] (Πιν.2). Το όριο αυτό τίθεται στο  $0.05 \cdot H_T$ , για καταστάσεις Ο.Κ.Α., όριο μέχρι το οποίο είναι αποδεκτό να πραγματοποιείται ελαστική ανάλυση του φορέα, χωρίς να λαμβάνονται υπ' όψιν οι παραμορφώσεις 2<sup>ης</sup> τάξης. Αντίστοιχα για καταστάσεις Ο.Κ.Α. το όριο αυτό τίθεται μεταξύ  $0.01 \cdot H_T$  ως  $0.02 \cdot H_T$  ανάλογα με τον κατασκευαστή και την ταχύτητα

ανέμου που εξετάζεται, όριο το οποίο επιτρέπει την απρόσκοπτη λειτουργία της ανεμογεννήτριας.



Σχ. 8. Κατανομή μέγιστων κρίσιμων τάσεων κελύφους ιστού (α) στη βάση, [S22] - Model1-1 και (β) στην περιοχή της οπής H/M σύνδεσης, [S11] και [S22] - Model1-3.

	$\omega_x$	$\sigma_{x,Rk}$ (MPa)	$n_x$	$\omega_0$	$\sigma_{0,Rk}$ (MPa)	$n_0$
<b>Model 1-1</b>	379,47	1048,16	0,15	391,40	30,64	0,50
<b>Model 1-2</b>	361,81	1173,94	0,28	31,10	136,31	0,83
<b>Model 1-3</b>	309,84	1600,83	0,14	319,57	68,93	0,83

Πιν. 1. Αποτίμηση της αντίστασης σε τοπικό λυγισμό κελύφους ιστού για τα 3 μοντέλα διαμόρφωσης.

Συνδυασμός φορτίσεων	Model 1-1 (VAWT) [Οριζ. μετατόπιση (κορυφή)] (m)	Model 2-4 (HAWT) [Οριζ. μετατόπιση (κορυφή)] (m)
G + W (S.L.S.)	0,106 < 0,12 (5%H)	0,35 < 1,20 (5%H)
1,35G + 1,50W (U.L.S.)	0,158 < 0,60 (1%H)	0,25 < 0,38 (1,6%H)

Πιν. 2. Έλεγχος μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης στην κορυφή των ιστών σε συνθήκες Ο.Κ.Α. και Ο.Κ.Α.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Υπάρχουν σήμερα διαθέσιμοι πολλοί τύποι ανεμογεννητριών μικρής ισχύος, οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με την θέση της κάθε περιοχής. Σημαντικά χαρακτηριστικά που θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά τη διάρκεια επιλογής του βέλτιστου τύπου και μοντέλου για χρήση σε μια δεδομένη περιοχή, αποτελούν η ονομαστική ισχύς, η εκτιμώμενη ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε kWh, οι ταχύτητες έναρξης λειτουργίας και έναρξης παραγωγής ενέργειας, η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα, το συνολικό βάρος και η επιφάνεια του ρότορα, η ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων, το διάστημα θερμοκρασιών λειτουργίας, τα επίπεδα της

έντασης του θορύβου και τέλος η διάρκεια ζωής και η συντήρηση που απαιτείται. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα προσφέρουν μεγαλύτερο ποσοστό μετατροπής της αιολικής ενέργειας, όμως η απόδοσή τους επηρεάζεται σημαντικά από ανέμους μεταβλητής διεύθυνσης. Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα αποδίδουν σε χαμηλότερα επίπεδα και δεν επηρεάζονται σχεδόν καθόλου από ανέμους με μεταβλητή διεύθυνση. Είναι σημαντικό όμως ότι παράγουν μικρότερα επίπεδα θορύβου σε σχέση με τις αντίστοιχες οριζόντιου άξονα. Σε σχέση με τον κίνδυνο συντονισμού για τον ιστό και στις δύο περιπτώσεις διαμόρφωσης προκύπτει πως είναι σχεδόν σίγουρο ότι η συχνότητα περιστροφής των πτερυγίων προσεγγίζει κάποια στιγμή τη θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα του συστήματος. Όμως η ώθηση στην ανεμογεννήτρια για μια τιμή της ταχύτητας του ανέμου κοντά στη θεμελιώδη συχνότητα του πύργου είναι μικρή, επομένως ένας σχετικά δύσκαμπος ιστός, δε εμφανίζει σημαντικά προβλήματα συντονισμού. Στα μοντέλα μονόστυλου ιστού κυκλικού κελύφους με οπή κοντά στη βάση παρατηρείται σημαντική αύξηση των τάσεων γύρω από αυτή. Επομένως αν μπορεί να εξασφαλιστεί και σχεδιαστεί η διέλευση του Η/Μ εξοπλισμού μέσω από τη θεμελίωση, η απαιτούμενη διατομή κελύφους αλλά και ο κίνδυνος αστοχίας περιορίζεται σημαντικά. Από την ανάλυση των μοντέλων φαίνεται ότι ο δικτυωτός ιστός αναλογικά με τα φορτία που φέρει και το ύψος εφαρμογής παρουσιάζει μεγαλύτερη δυσκαμψία. Είναι όμως περισσότερο ευαίσθητος εξαιτίας των πολλών συνδέσεων κοιλοδοκών που απαιτούνται και στον έλεγχο κόπωσης, ενώ απαιτείται για τον ίδιο λόγο μεγαλύτερο κόστος συντήρησης και επιθεώρησης. Το μεγάλο του πλεονέκτημα είναι το μειωμένο του βάρος σε σχέση με αυτόν κυκλικού κελύφους, ιδιαίτερα όταν οι απαιτήσεις δυσκαμψίας αυξηθούν.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] BANIOPOULOS C. C., NIKOLAIDIS, N. T, “Steel Structures, Design Examples according to the EC3 Framework”, Ziti Publ. Co, pages 540, 2012.
- [2] CLIFTON-SMITH M. J., and WOOD D. H., “Optimization of self-supporting towers for small wind turbines”, Wind Engineering, 34(5), 561-578. doi:10.1260/0309-524X.34.5.56, 2010.
- [3] EUROCODE 3-1, “Design of steel structures, Part 3-1: Towers, masts and chimneys – Towers and masts”, EN 1993-3-1:2006.
- [4] LAVASSAS I., NIKOLAIDIS G., ZERVAS P. & BANIOPOULOS C. C., “Comparative Study of Stiffening Configurations at the Door Opening of a 2MW Wind Turbine Tower” Proceedings of the 8th National Conference of Metal Structures, Tripoli, 2-4.10.2014.
- [5] IEC 61400-1, “Wind Turbines Part 1: Design Requirements”. International Electrotechnical Commission, Geneva, 3rd edition, 2005.
- [6] IEC 61400-2, “Wind turbines – Part 2: Design requirements for small wind turbines”, International Electrotechnical Commission, 2006.
- [7] KARADIMOS E., “Evaluation of systems, analysis and optimal design of wind turbines configuration” Diploma Thesis, Institute of Metal Structures, School of Civil Engineering, Aristotle University of Greece, Oct. 2016.



## **OPTIMAL EVALUATION OF SMALL WIND TURBINES CONFIGURATION APPLYING CRITERIA RELATED TO THE SITE OF APPLICATION**

Themistoklis Nikolaidis  
Dr. Ing., Institute of Metal Structures,  
Department of Civil Engineering, A.U.Th., Thessaloniki, Greece,  
e-mail: [think@civil.auth.gr](mailto:think@civil.auth.gr)

Efthymios Karadimos  
Dipl. Civil Engineer  
Department of Civil Engineering, A.U.Th., Thessaloniki, Greece,  
e-mail: [ekaradit@civil.auth.gr](mailto:ekaradit@civil.auth.gr)

Charalampos C. Baniotopoulos  
Dr.-Ing., Professor, School of Civil Engineering, University of Birmingham  
B15 2TT Birmingham, United Kingdom  
e-mail: [c.baniotopoulos@bham.ac.uk](mailto:c.baniotopoulos@bham.ac.uk)

### **SUMMARY**

This paper focuses on the development of small wind technology taking under consideration sustainable energy criteria. Wind energy being an environmentally friendly technology is harvested by means of wind turbine systems. In order to satisfy local energy needs (households, villages, etc.), low power, small scale wind turbines, the so-called small wind, recently started been used. Recent technological developments allow the manufacturing of small wind turbines in any type and size having as principal objective the optimal use of the available wind resource where, regardless size and axis orientation, their use is crucial in order to meet local energy needs. In the present work a comparative analysis and evaluation of certain solutions was performed taking into consideration two different sites in Greece. This analysis is based on actual recordings of the characteristics of the wind, followed by the selection of the optimum installation height and the estimation of the construction cost. The latter includes the design of the steel support tower by means of a finite element analysis model using appropriate software. This way, a more accurate evaluation of the level of sustainability of the application of small wind energy systems was obtained.