

ΟΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΣΤΙΣ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Π. Χαβιαρόπουλος, Γ. Γληνού, Δ. Δουβίκας, Φ. Μουζάκης

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας
19ο χλμ. Λεωφ. Μαραθώνος, 190 09 Πικέρμι
Τηλ: 210 6603300, Fax: 210 6603301, e-mail: tchaviar@cres.gr
Ηλεκτρονική Δ/ση : www.cres.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χώρα μας χαρακτηρίζεται από το έντονο ανάγλυφο της, το οποίο επιδρά σημαντικά στη διαμόρφωση των τοπικών ανεμολογικών συνθηκών που έχει να αντιμετωπίσει μια ανεμογεννήτρια (Α/Γ) στη διάρκεια της ζωής της. Οι ανεμολογικές αυτές συνθήκες επηρεάζουν τόσο την ενεργειακή απόδοση μιας αιολικής εγκατάστασης όσο και τα χαρακτηριστικά φόρτισης της, ακραία και κοπωτικά. Στο άρθρο αυτό παρουσιάζεται συνοπτικά η σχετική εμπειρία και γνώση που αποκτήθηκε στο ΚΑΠΕ μέσω της συστηματικής συμμετοχής του σε μια σειρά Ευρωπαϊκών έργων με αντικείμενο τις Ανεμογεννήτριες στη Σύνθετη Τοπογραφία.

Λέξεις κλειδιά: Ανεμογεννήτριες, σύνθετη τοπογραφία, απόδοση και ασφάλεια

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τόσο ο σχεδιασμός (και, επομένως, η ικανοποίηση των απαιτήσεων ασφάλειας) όσο και η εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης μιας σύγχρονης ανεμογεννήτριας βασίζονται σε υποθέσεις για τις ανεμολογικές συνθήκες που επικρατούν στην πιθανή θέση εγκατάστασης της, οι οποίες όμως δεν αντανακλούν τις ιδιαιτερότητες που επάγει η σύνθετη τοπογραφία (έντονο ανάγλυφο) που χαρακτηρίζει τη χώρα μας. Λόγω της κρισιμότητας του αντικειμένου, το ΚΑΠΕ συμμετείχε και συντόνισε μια σειρά Ευρωπαϊκών ερευνητικών έργων [1], [2], [3], με στόχο την καταγραφή και κατανόηση των ανεμολογικών αυτών ιδιαιτεροτήτων, την διερεύνηση της επίδρασης τους στην ενεργειακή παραγωγή και φόρτιση των ανεμογεννητριών και, τελικά, στη διατύπωση «κανόνων» για το πώς πρέπει να επιλέγει κανείς τον τύπο (κλάση) μιας ανεμογεννήτριας εν' όψη της εγκατάστασης της σε μια τέτοια θέση και με ποια διαδικασία να εκτιμά την καμπύλη ισχύος της. Την εμπειρία του αυτή κλήθηκε, πρόσφατα, να ενσωματώσει στο υπό αναθεώρηση διεθνές πρότυπο IEC-61400-1 [4], το οποίο διαπραγματεύεται τις απαιτήσεις ασφάλειας των Α/Γ, ενώ παράλληλα διαμορφώνει σχέδιο Ελληνικού προτύπου για τη μέτρηση της καμπύλης ισχύος Α/Γ [5].

Στο άρθρο αυτό παρουσιάζονται, περιληπτικά, απαντήσεις για το σύνολο των ερωτημάτων που τέθηκαν παραπάνω, πιστεύοντας ότι η ευρύτερη γνωστοποίηση αποτελεσμάτων που άπτονται της απόδοσης και της ασφάλειας των Α/Γ θα συμβάλει θετικά στην περαιτέρω ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στη χώρα μας.

Η εργασία ξεκινά με μια συνοπτική περιγραφή της φιλοσοφίας των υαρχόντων διεθνών προτύπων για τις «απαιτήσεις ασφαλείας» και την εκτίμηση της «καμπύλης ισχύος». Στις ενότητες αυτές συζητούνται και οι υποθέσεις που γίνονται εμμέσως ή αμέσως ως προς τα ντετερμινιστικά και στοχαστικά χαρακτηριστικά του ανέμου προκειμένου να διαμορφωθεί ένα πλαίσιο εξωτερικών συνθηκών κάτω από τις οποίες θα «δοκιμαστεί» η ανεμογεννήτρια.

Το επόμενο βήμα είναι η καταγραφή των ανεμολογικών ιδιοτήτων που σχετίζονται με τη σύνθετη τοπογραφία. Οι ιδιαιτερότητες αυτές αφορούν τόσο στη διαμόρφωση του μέσου πεδίου ροής (στοιχεία κατανομής μέσης δεκάλεπτης ταχύτητας, καθ' ύψος κατανομή της ταχύτητας, κλπ) όσο και στη διαμόρφωση της δομής της ατμοσφαιρικής τύρβης (τάσεις Reynolds, κλίμακες μήκους κλπ). Τα σχετικά συμπεράσματα βασίζονται σε συστηματικές μετρήσεις και θεωρητικές αναλύσεις. Γίνεται, επίσης, μια σύντομη αναφορά στα διαθέσιμα υπολογιστικά εργαλεία για την εκτίμηση του πεδίου ροής στη σύνθετη τοπογραφία. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα για την επίδραση των παραπάνω ανεμολογικών παραμέτρων στην ενεργειακή απόδοση και στη φόρτιση τυπικών Α/Γ. Τα σχετικά αποτελέσματα προέρχονται από μεθόδους παραμετρικής αναγνώρισης που εφαρμόστηκαν σε πειραματικές και υπολογιστικές (αεροελαστικές προσομοιώσεις) βάσεις δεδομένων.

Τέλος, δίνεται απάντηση στο ερώτημα «πώς επιλέγεται η κλάση μιας Α/Γ προκειμένου να εγκατασταθεί σε μια συγκεκριμένη θέση και με ποια διαδικασία αξιολογείται η απόδοση της». Τα δύο αυτά ερωτήματα είναι ιδιαίτερα σημαντικά, αφού συνδέονται άμεσα με την οικονομικότητα μιας αιολικής επένδυσης. Ξεκινώντας από το διεθνές πρότυπο IEC-61400-1, που αντιμετωπίζει το γενικότερο ζήτημα του ασφαλούς σχεδιασμού των Α/Γ, δίνεται μια σειρά κανόνων για την εφαρμογή του προτύπου στη σύνθετη τοπογραφία βάσει ανεμολογικών μετρήσεων που πρέπει να έχουν προηγηθεί. Τέλος, συζητούνται οι κανόνες που πρέπει να τηρούνται κατά την αξιολόγηση της απόδοσης των Α/Γ ώστε να προκύπτει αξιόπιστα η καμπύλη ισχύος των και η αναμενόμενη ετήσια παραγωγή ενέργειας.

2. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ – ΚΛΑΣΕΙΣ Α/Γ

Το IEC-61400-1 αποτελεί το διεθνές πρότυπο που πραγματεύεται τις τεχνικές απαιτήσεις που εξασφαλίζουν την ασφαλή λειτουργία των δομικών και ηλεκτρο-μηχανολογικών υποσυστημάτων καθώς και του συστήματος ελέγχου των Α/Γ. Για τις ανάγκες του άρθρου θα περιοριστούμε στο διεθνές αυτό πρότυπο, αφού η φιλοσοφία των επι-μέρους εθνικών προτύπων, π.χ. της Δανίας, Γερμανίας, Ολλανδίας κλπ είναι παρόμοια.

Το IEC-61400-1 απαιτεί τη χρήση μοντέλων δυναμικής ανάλυσης για την πρόλεξη των φορτίων σχεδιασμού μιας Α/Γ. Τα τελευταία, εκφράζουν ένα πλήθος συνδυασμένων εξωτερικών (συμπεριλαμβανομένων των ανεμολογικών) και λειτουργικών συνθηκών που η Α/Γ θα πρέπει να είναι σε θέση να αντιπαρέλθει στη διάρκεια της ζωής της. Οι εξωτερικές ανεμολογικές συνθήκες διακρίνονται σε «ακραίες» και «συνήθεις». Οι συνήθεις ελέγχουν τη μακράς διάρκειας αντοχή της Α/Γ (λόγω των συσσωρευμένων κοπωτικών φορτίων κάτω από φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας) ενώ οι ακραίες σχετίζονται με την αντοχή σε ακραία φόρτιση μικρής διάρκειας (αντιμετώπιση της μέγιστης ανεμορριπής της πεντηκονταετίας, μεταξύ άλλων).

Το IEC-61400-1 στη σημερινή μορφή του προβλέπει τέσσερις κανονικές και μια ειδική κλάση Α/Γ. Για τις κανονικές κλάσεις, η αρίθμηση δηλώνει με αντίστροφη σειρά την στιβαρότητα και την αντοχή της μηχανής. Οι κλάσεις χαρακτηρίζονται από τη μέση ταχύτητα αναφοράς (της πιθανής θέσης εγκατάστασης) η οποία και δεσμεύει, κατά κύριο λόγο, τις ακραίες εξωτερικές συνθήκες. Κάθε κλάση χωρίζεται σε δύο υπο-κλάσεις (Α και Β) οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς την ένταση της ατμοσφαιρικής τύρβης. Πιο συγκεκριμένα, οι κλάσεις προσδιορίζονται με βάση τον Πίνακα Ι

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι : Παράμετροι κλάσεων A/Γ

Κλάση A/Γ		I	II	III	IV	S
V_{ref}	(m/s)	50	42,5	37,5	30	Προσδιορίζεται από τον σχεδιαστή
V_{ave}	(m/s)	10	8,5	7,5	6	
A	I_{15} (-)	0,18	0,18	0,18	0,18	
	a (-)	2	2	2	2	
B	I_{15} (-)	0,16	0,16	0,16	0,16	
	a (-)	3	3	3	3	

όπου: (οι τιμές προσδιορίζονται στο ύψος της πλήμνης)

V_{ave} είναι η μέση (ετήσια) ταχύτητα δεκαλέπτου

V_{ref} είναι η μέγιστη μέση ταχύτητα δεκαλέπτου της πεντηκονταετίας,

$$V_{ref} = 5 V_{ave} \quad (1)$$

A δηλώνει την κατηγορία υψηλής τύρβης,

B δηλώνει την κατηγορία χαμηλότερης τύρβης,

I_{15} είναι η χαρακτηριστική τιμή της έντασης της τύρβης στα 15 m/s,

a είναι μια επί πλέον παράμετρος που χρειάζεται για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης της τύρβης στη διεύθυνση της ροής (σ_1).

Με βάση τις τιμές των V_{ave} και I_{15} προσδιορίζεται, στη συνέχεια, το σύνολο των εξωτερικών συνθηκών για τις οποίες πρέπει να ελεγχθεί η δομική ακεραιότητα της A/Γ. Το πρόβλημα με την παραπάνω προσέγγιση είναι ότι όλο το ημι-εμπειρικό πλαίσιο που συσχετίζει τις ελεύθερες παραμέτρους με τις δύο ανεξάρτητες V_{ave} και I_{15} (η εξίσωση (1), για παράδειγμα) είναι, εμμέσως, προσαρμοσμένο στη λογική της επίπεδης τοπογραφίας και της μεμονωμένης μηχανής. Ένα μεγαλύτερο πρόβλημα, όμως, είναι ότι το IEC-61400-1 για να ξεφύγει από μια πρόσθετη περιπτώσιολογία θεωρεί ότι κατανομή πιθανότητας της μέσης δεκάλεπτης ταχύτητας ακολουθεί τη μονο-παραμετρική κατανομή Rayleigh και όχι, την πιο γενική, δι-παραμετρική κατανομή Weibull. Η τελευταία συμπίπτει με τη Rayleigh μόνο όταν ο συντελεστής μορφής της k παίρνει την τιμή 2. Οι τιμές, όμως, του k που μετράμε στην Ελλάδα είναι συχνά πολύ μικρότερες από 2, που σημαίνει ότι η πιθανότητα στην περιοχή υψηλών ταχυτήτων, για την ίδια μέση ταχύτητα, είναι αυξημένη. Όπως θα δούμε παρακάτω, η τιμή του k επηρεάζει δραστικά τόσο τις ακραίες ανεμολογικές συνθήκες, όσο και την κοπωτική φόρτιση της μηχανής στη διάρκεια της ζωής της, μέσω της διαδικασίας σύνθεσης της τελευταίας.

Βέβαια, το πρότυπο δηλώνει ρητά ότι οι παράμετροι των κλάσεων των μηχανών δεν συνδέονται άμεσα με τις ανεμολογικές συνθήκες που επικρατούν σε συγκεκριμένες θέσεις εγκατάστασης A/Γ και για το λόγο αυτό προβλέπει τη διαδικασία αποτίμησης της θέσης εγκατάστασης (site assessment) βάση της οποίας θα γίνει η τελική επιλογή της κατάλληλης κλάσης. Συμπληρώνει, μάλιστα, ότι για τη σύνθετη τοπογραφία η αποτίμηση θα πρέπει να βασίζεται απαραίτητα σε μετρήσεις. Στη σημερινή του μορφή, όμως, το πρότυπο δεν καταφέρνει να περιγράψει μια διαδικασία αποτίμησης που να είναι αποδεκτή και για τη σύνθετη τοπογραφία. Το ΚΑΠΕ, συμμετέχοντας στην αναθεώρηση του υπάρχοντος προτύπου, έχει αναλάβει να καλύψει αυτό το κενό.

3. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ – ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Το IEC-61400-12 [6] αποτελεί το διεθνές πρότυπο που πραγματεύεται τις τεχνικές απαιτήσεις που εξασφαλίζουν την εκτίμηση της καμπύλης ισχύος Α/Γ και της αναμενόμενης ενεργειακής απόδοσης για συγκεκριμένο αιολικό δυναμικό. Το Ευρωπαϊκό Δίκτυο Εργαστηρίων Αιολικής Ενέργειας (MEASNET) έχει εκδώσει οδηγία για την εκτίμηση της καμπύλης ισχύος η οποία περιλαμβάνει βελτιώσεις πάνω στο βασικό κείμενο του IEC-61400-12.

Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας έχει δημιουργήσει την ανάγκη για βελτίωση και επέκταση του προτύπου με τελικό στόχο την ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας της εκτίμησης της καμπύλης ισχύος και την δυνατότητα σύγκρισης της απόδοσης Α/Γ σε διαφορετικές θέσεις. Τα πεδία στα οποία αναμένονται βελτιώσεις στο άμεσο μέλλον είναι τα εξής:

- εκτίμηση καμπύλης ισχύος σε σύνθετη τοπογραφία
- εκτίμηση καμπύλης ισχύος αιολικού πάρκου
- εκτίμηση καμπύλης ισχύος μικρών Α/Γ

Η εκτίμηση της καμπύλης ισχύος Α/Γ βασίζεται σε πειραματική κυρίως εργασία, και ακολουθεί τα εξής βήματα:

- εγκατάσταση μετεωρολογικού ιστού εξοπλισμένου με βαθμονομημένα όργανα (ανεμόμετρο, ανεμοδείκτης, θερμομέτρο, βαρόμετρο και βροχόμετρο) σε αποδεκτή θέση. Στην περίπτωση που η περιβάλλουσα τοπογραφία δεν ικανοποιεί τις προϋποθέσεις που τίθενται από το IEC-61400-12 τότε επιβάλλεται η βαθμονόμηση θέσης είτε πειραματικά είτε αριθμητικά. Η πειραματική βαθμονόμηση θέσης εκτελείται με χρήση μετεωρολογικού ιστού στη θέση που θα εγκατασταθεί η Α/Γ για τον υπολογισμό της επίδρασης της τοπογραφίας στην ταχύτητα του ανέμου από τη θέση του ιστού αναφοράς στη θέση της Α/Γ. Οι συντελεστές που υπολογίζονται χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση των μετρήσεων στη θέση αναφοράς.
- εγκατάσταση συστήματος μέτρησης ηλεκτρικής ισχύος και σήματος διαθεσιμότητας Α/Γ
- εγκατάσταση συστήματος συλλογής πειραματικών δεδομένων και εκτέλεση της πειραματικής εργασίας (συλλογή στατιστικών μεγεθών 10λεπτου από μετρήσεις με δειγματοληψία 1Hz)
- πειραματική επιβεβαίωση των κυρίων γεωμετρικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών της Α/Γ (ύψος πλήμνης, διάμετρος δρομέα, γωνία σφήνωσης πτερύγων)
- ανάλυση πειραματικών δεδομένων και έκδοση τεχνικής έκθεσης

Η ανάλυση των δεδομένων περιλαμβάνει:

- αποκοπή των μη αποδεκτών δεδομένων (σκίαση της Α/Γ ή οργάνων από Α/Γ ή άλλα εμπόδια, βροχόπτωση, Α/Γ μη διαθέσιμη)
- υπολογισμός καμπύλης ισχύος
- υπολογισμός της πυκνότητας αέρα και κανονικοποίηση της καμπύλης ισχύος σε συνθήκες αναφοράς (πυκνότητα αέρα 1.225kgm^{-3})
- υπολογισμός αβεβαιοτήτων καμπύλης ισχύος και ετήσιας παραγόμενης ενέργειας

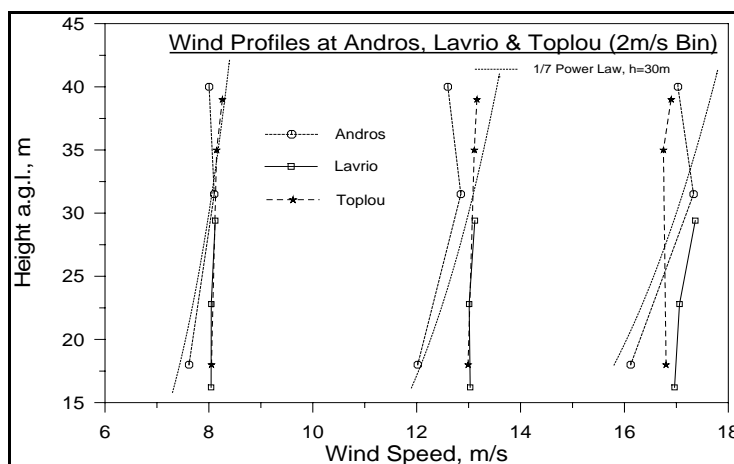
Το κείμενο του IEC-61400-12 περιλαμβάνει οδηγίες για τον υπολογισμό της σκίασης λόγω εμποδίων, την εκτέλεση βαθμονόμησης θέσης, την τοποθέτηση των οργάνων και τις απαιτούμενες διορθώσεις των μετρήσεων, τη συλλογή και την επιλογή των πειραματικών δεδομένων, τον υπολογισμό της καμπύλης ισχύος και την κανονικοποίηση σε συνθήκες αναφοράς, τον υπολογισμό της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας και την έκδοση της τεχνικής έκθεσης.

Η οδηγία του MEASNET προδιαγράφει ότι η βαθμονόμηση θέσης, εάν απαιτείται, εκτελείται αποκλειστικά με πειραματικά δεδομένα.

4. ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗ ΣΥΝΘΕΤΗ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ -ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ Α/Γ

4.1 Ντετερμινιστικά χαρακτηριστικά του ανέμου – Μέσο πεδίο ροής

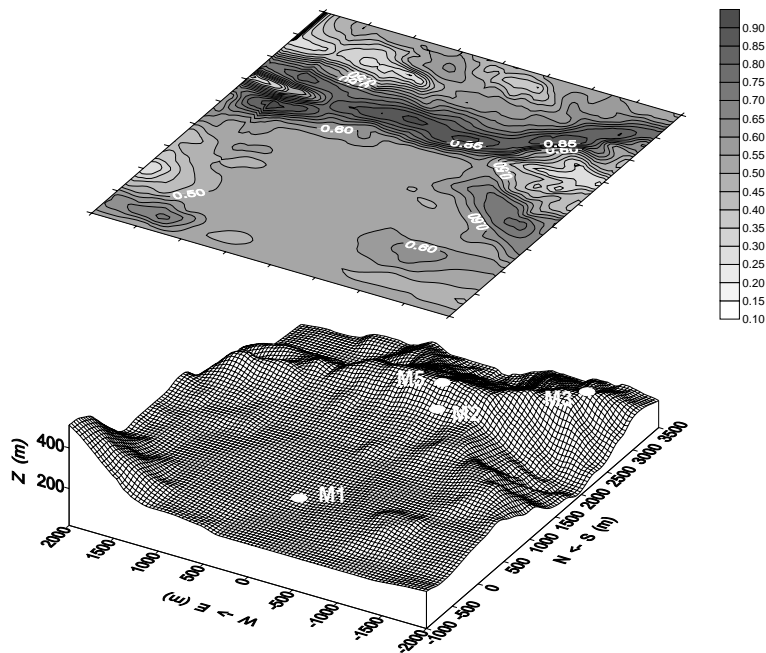
Η επίδραση του σύνθετου ανάγλυφου στη μορφολογία του πεδίου της ροής του ανέμου είναι ιδιαίτερα έντονη, με αποτέλεσμα την παρουσία σημαντικών μεταβολών των χαρακτηριστικών της ροής. Η παρουσία της σύνθετης τοπογραφίας διαμορφώνει εναλλασσόμενες περιοχές επιτάχυνσης και επιβράδυνσης της ροής, προσδίδει δε έντονα τρισδιάστατο χαρακτήρα στο πεδίο του ανέμου. Η έντονα τρισδιάστατη υφή του πεδίου ροής χαρακτηρίζεται από την μεταβολή της διεύθυνσης του ανέμου κατά την διέλευσή του από περιοχές σύνθετου ανάγλυφου, την καθ' ύψος μεταβολή της γωνίας της ροής σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο (flow inclination) - φαινόμενα τα οποία γίνονται εντονότερα κοντά στο έδαφος - η δε καθ' ύψος κλίση του πεδίου ροής (wind shear) ελαττώνεται σε σύγκριση με την επίπεδη τοπογραφία (βλέπε Σχήμα 1, για παράδειγμα).



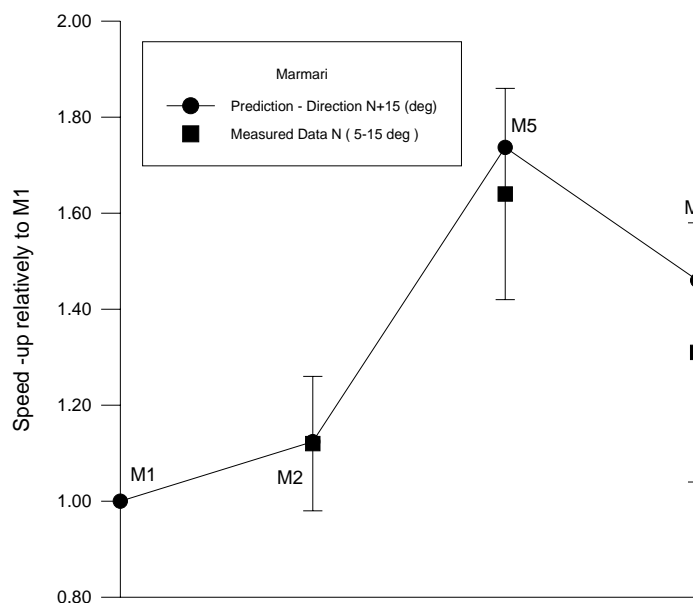
Σχήμα 1: Τυπικά προφίλ ταχύτητας στη σύνθετη τοπογραφία

Η προσομοίωση των φαινομένων που συνδέονται με την ροή σε τοπογραφίες με έντονο ανάγλυφο οδηγεί στην ανάγκη της χρήσης εξελιγμένων υπολογιστικών εργαλείων. Στην κατεύθυνση αυτή το ΚΑΠΕ έχει αναπτύξει δύο μεθοδολογίες, που ακολουθούν διαφορετικό επίπεδο προσέγγισης του προβλήματος. Η πρώτη [7], χαρακτηριζόμενη από ένα επίπεδο προσέγγισης κατώτερο από την δεύτερη αλλά με σημαντικά μικρότερες απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο και ισχύ, επιλύει το τρισδιάστατο μέσο πεδίο ροής βασιζόμενη σε ολοκληρωτική μεθοδολογία ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Η δεύτερη [8] βασίζεται σε έναν επιλύτη των τρισδιάστατων ασυμπίεστων εξισώσεων Navier-Stokes.

Στη συνέχεια παρατίθενται χαρακτηριστικά αποτελέσματα εφαρμογής της πρώτης μεθόδου για την περιοχή του Μαρμαρίου της Εύβοιας όπου το ΚΑΠΕ εγκατέστησε τέσσερις ανεμολογικούς σταθμούς (M1, M2, M3, M5) όπως και συγκρίσεις με τις μετρήσεις [9]. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η αριθμητική προσομοίωση της ροής στα 30 μέτρα από το έδαφος για βορινή κύρια διεύθυνση του ανέμου (υπό μορφή περιοχών σταθερού μέτρου της αδιάστατης ταχύτητας), το ανάγλυφο της περιοχής καθώς και οι θέσεις των ιστών. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται η μετρηθείσα και η προλεχθείσα σχετική μεταβολή της μέσης ταχύτητας του ανέμου στις θέσεις των σταθμών για διεύθυνση του ανέμου από BVA (15°) ως προς τον σταθμό M1, όπου προκύπτει η καλή συμφωνία των προλέξεων με τις μετρήσεις, ενώ είναι προφανής η σημαντική επίδραση του αναγλύφου της τοπογραφίας στη μορφολογία του μέσου πεδίου της ροής.



Σχήμα 2: Τοπογραφία και ισοταχείς καμπύλες υπολογισμένες στα 30 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους στην περιοχή του Μαρμαρίου



Σχήμα 3: Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών δεδομένων μέσου πεδίου ταχύτητας

4.2 Στοχαστικά χαρακτηριστικά του ανέμου – Δομή της ατμοσφαιρικής τύρβης

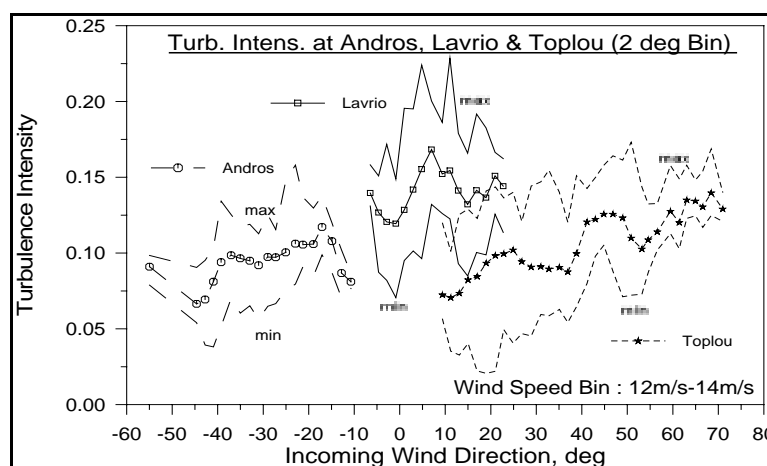
Η συστηματική επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων σε τοπογραφίες που χαρακτηρίζονται από έντονο ανάγλυφο [1], [2] ανέδειξε τη σημαντική διαφοροποίηση στη συμπεριφορά των στοχαστικών χαρακτηριστικών του ανέμου στις περιοχές αυτές, σε σχέση με τα ισχύοντα σε επίπεδες εδαφικές διαμορφώσεις. Το επίπεδο της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (TKE) είναι υψηλότερο στις περιοχές σύνθετης τοπογραφίας σε σύγκριση με την επίπεδη τοπογραφία, ενώ σημαντικά διαφορετικός είναι ο μηχανισμός διανομής της στις τρεις κατευθύνσεις. Η διανομή αυτή, εκφραζόμενη με τους λόγους των τυπικών αποκλίσεων (standard deviation) των τριών συνιστωσών της ταχύτητας, είναι διαφορετική από τον τυπικό συνδιασμό 1:0.8:0.5 που ισχύει για την επίπεδη τοπογραφία (βλ. Πίνακας II). Στην περίπτωση

της σύνθετης τοπογραφίας η ΤΚΕ διανέμεται εντονότερα στις άλλες δύο κατευθύνσεις του πεδίου ροής (εγκάρσια και καθ' ύψος συνιστώσα), οι τιμές διαμορφώνονται κατά περίπτωση, ακολουθώντας. Ταυτόχρονα, η ένταση της τύρβης στην κύρια διεύθυνση του ανέμου και στις περιοχές σημαντικής επιτάχυνσης της ροής λόγω της τοπικής εδαφικής διαμόρφωσης, είναι δυνατόν να παίρνει μικρότερες τιμές σε σύγκριση με την επίπεδη τοπογραφία.

ΠΙΝΑΚΑΣ II : Στοχαστικά μεγέθη στη σύνθετη τοπογραφία

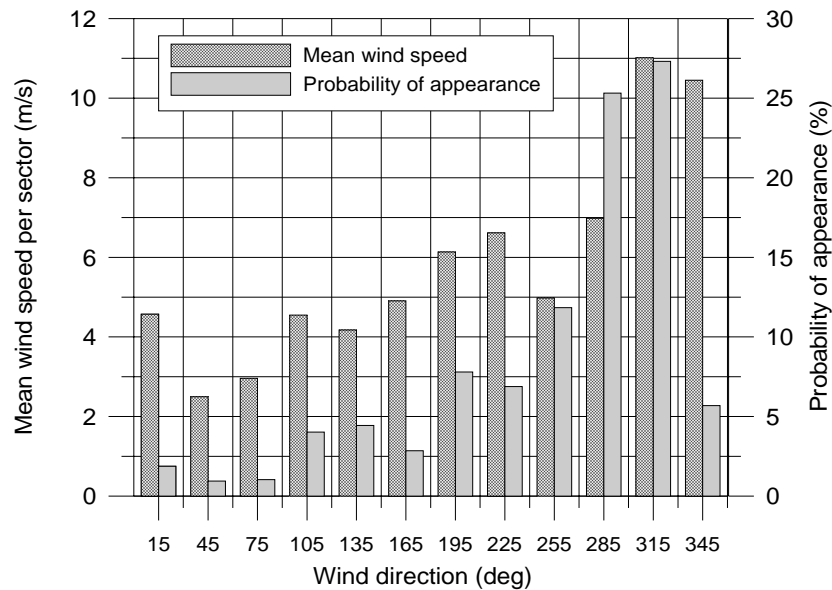
ΘΕΣΗ	Λαύριο	Άνδρος	Μαρμάρι
Ύψος από έδαφος (m)	22	31	40
Μέση Ταχ. V_{ave} (m/s)	7.4	8.7	9.3
Weibull C(m/s),k	8.3 1.5 3	9.8 1.8 5	10. 1.3 0 2
$\Gamma I = \sigma_1 / U$ (%)	13	9.5	10
σ_2 / σ_1	0.85	0.90	0.97
σ_3 / σ_1	0.72	0.70	0.68
L_1 (m)	20-120	20-120	20-200
L_2 (m)	10-50	10-50	5-150
L_3 (m)	5-20	5-20	4-40

Αξιοσημείωτη είναι επίσης η μεταβολή της έντασης της τύρβης σε σχέση με την διεύθυνση του ανέμου, κάτι που μπορεί να συμβαίνει και στην επίπεδη τοπογραφία λόγω της μεταβολής του επιπέδου τραχύτητας του εδάφους (Σχήμα 4). Η περιγραφή της ΤΚΕ στο πεδίο συχνοτήτων αναδεικνύει – για τις περιοχές έντονου ανάγλυφου – χαρακτηριστικές κλίμακες μήκους (length scales) οι οποίες είναι εν γένει μικρότερες αυτών που εμφανίζονται σε επίπεδη τοπογραφία (Πίνακας II), γεγονός που υποδηλώνει τη συγκέντρωση περισσότερης ενέργειας στην περιοχή υψηλών συχνοτήτων του φάσματος της τύρβης.



Σχήμα 4: Ένταση τύρβης συναρτήσει της διεύθυνσης του ανέμου

Καθοριστική είναι επίσης η επίδραση της σύνθετης τοπογραφίας στην ανομοιομορφία του ροδογράμματος του ανέμου. Η θεωρητική ανάλυση υφισταμένων μετρήσεων απέδειξε ότι η ανομοιομορφία αυτή είναι η αιτία που οδηγεί σε χαμηλές τιμές τον συντελεστή μορφής k (shape parameter) της κατανομής Weibull που χαρακτηρίζει μία θέση. Ένα τέτοιο ροδόγραμμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5, όπου γίνεται φανερή η συγκέντρωση του αιολικού δυναμικού στην περιοχή διευθύνσεων 270-330⁰, τόσο λόγω της μεγαλύτερης πιθανότητας εμφάνισης των διευθύνσεων αυτών όσο και της υψηλής τους μέσης ταχύτητας ανέμου.

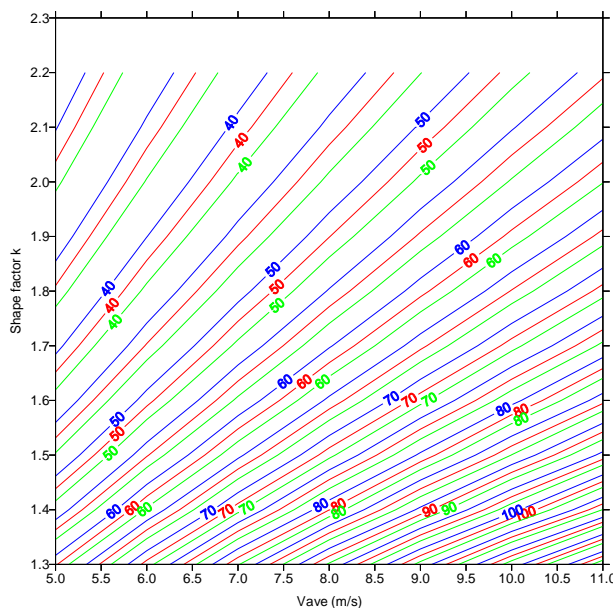


Σχήμα 5: Τοπικό 'ροδόγραμμα' ανέμου στη σύνθετη τοπογραφία

4.3 Επίδραση στη φόρτιση των Α/Γ

4.3.1. Ακραία φόρτιση

Η μορφή, ιδιαίτερα στην περιοχή υψηλών ταχυτήτων, της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της μέσης δεκάλεπτης ταχύτητας στο ύψος της πλήμνης της Α/Γ, $p(V_{hub})$, επηρεάζει σημαντικότερα το σύνολο των ακραίων ανεμολογικών συνθηκών που ενδέχεται να αντιμετωπίσει η μηχανή. Θεωρώντας ότι η συνάρτηση αυτή ακολουθεί την κατανομή Weibull, το Σχήμα 6 παρουσιάζει την επίδραση του συντελεστή k της κατανομής (και της μέσης της τιμής V_{ave}) στη μέγιστη ανεμορριπή της πενηνταετίας $Ve50$ [10]. Η $Ve50$ ($=1.4V_{ref}$ κατά IEC 61400-1), η οποία συχνά αναφέρεται σαν ταχύτητα επιβίωσης της Α/Γ, προσδιορίζει σε μεγάλο βαθμό τον σχεδιασμό των Α/Γ και ιδιαίτερα των πύργων τους. Παρατηρούμε ότι για την ίδια μέση ταχύτητα, η $Ve50$ αυξάνεται δραστικά καθώς το k μικραίνει. Σημαντική επίδραση στη διαμόρφωση της τιμής της έχει και η ένταση της τύρβης.



Σχήμα 6: Μέγιστη ανεμορριπή πενηνταετίας σαν συνάρτηση της V_{ave} , του συντελεστή μορφής k και της έντασης της τύρβης (Tl). Οι τριάδες των $iso-Ve50$ γραμμών αντιστοιχούν εκ των κάτω προς τα άνω για $Tl = 14\%$, 16% , & 18% αντιστοίχως.

4.3.2 Κοπωτική φόρτιση

Εφαρμόζοντας τεχνικές παραμετρικής αναγνώρισης σε διαθέσιμες πειραματικές και θεωρητικές βάσεις δεδομένων για ένα πλήθος μηχανών, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

Την κυριότερη επίπτωση στην κοπωτική φόρτιση μιας Α/Γ έχει η ένταση της τύρβης και, ακριβέστερα, η τυπική απόκλιση της συνιστώσας της στη διεύθυνση της ροής, σ_1 . Η σ_1 μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με την ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή των υψηλών ταχυτήτων λειτουργίας και η κλίση της ευθείας αυτής ακολουθεί την ένταση της τύρβης. Η σχέση της σ_1 με τα «ισοδύναμα φορτία κόπωσης» της Α/Γ είναι, επίσης, σχεδόν γραμμική.

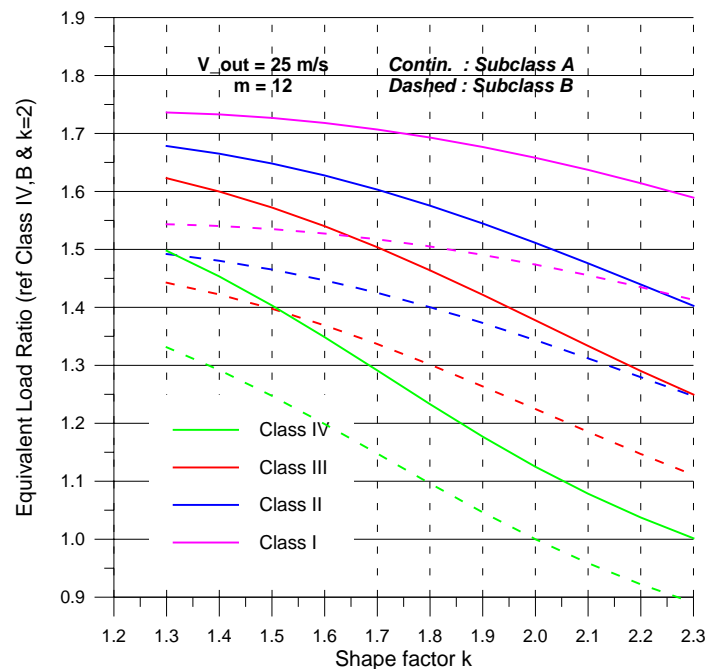
Η κοπωτική φόρτιση της μηχανής, και ιδιαίτερα τα oligo-κυκλικά χαρακτηριστικά της, επιβαρύνεται αισθητά όταν η μηχανή λειτουργεί συστηματικά εκτός προσανατολισμού. Αντίστοιχη είναι η επίδραση της γωνίας κλίσης της ροής από τον άξονα της μηχανής. Η επίδραση των παραγόντων αυτών στην κόπωση είναι ανάλογη της ποσότητας $\cos^2\chi\sin\chi\Delta\chi$, όπου χ η γωνία οριζόντιου (yaw) ή κατακόρυφου (flow tilt) απο-προσανατολισμού.

Σημαντική είναι και η επίδραση των χαρακτηριστικών της δομής της τύρβης στην κοπωτική φόρτιση των Α/Γ. Στη σύνθετη τοπογραφία και ιδιαίτερα στις περιοχές της που η ροή επιταχύνεται (που είναι επιθυμητές για την ενεργειακή απόδοση) η τύρβη γίνεται περισσότερο ισότροπη και οι κλίμακες μήκους της μειώνονται. Και οι δύο αυτοί παράγοντες επιδρούν αυξητικά στην κοπωτική φόρτιση της μηχανής. Ο πρώτος επειδή για την ίδια σ_1 η συνολική τυρβώδης κινητική ενέργεια είναι μεγαλύτερη και ο δεύτερος διότι η μείωση της κλίμακας μήκους συνεπάγεται περισσότερη ενέργεια στην περιοχή υψηλών συχνοτήτων όπου συνήθως τοποθετούνται οι ιδιοσυχνότητες της Α/Γ. Συστηματική διερεύνηση της επίδρασης της δομής της τύρβης στην κόπωση με αεροελαστικούς υπολογισμούς για ένα πλήθος μηχανών διαφορετικής σχεδιαστικής φιλοσοφίας έδειξε ότι η επίδραση αυτή μπορεί να ληφθεί υπ' όψιν μέσω μιας «ισοδύναμης έντασης τύρβης». Η τελευταία προκύπτει σαν γινόμενο της μετρημένης έντασης επί έναν συντελεστή διόρθωσης ο οποίος εκφράζει την επιπρόσθετη κινητική ενέργεια της τύρβης που προέρχεται από το σύνθετο ανάγλυφο. Ο συντελεστής αυτός δίνεται από τη σχέση:

$$C_{15} = \frac{\sqrt{1 + (\sigma_2 / \sigma_1)^2 + (\sigma_3 / \sigma_1)^2}}{1.375} \quad (2)$$

και ο παρανομαστής του εκφράζει την τιμή που λαμβάνει ο αριθμητής σε συνθήκες επίπεδης τοπογραφία όπου, τυπικά, $\sigma_2 / \sigma_1 = 0.8$ και $\sigma_3 / \sigma_1 = 0.5$. Ο προσδιορισμός του C_{15} πρέπει να βασίζεται σε τριδιάστατες μετρήσεις τύρβης.

Σημαντικότερη, όμως, είναι και η επίδραση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της μέσης δεκάλεπτης ταχύτητας στο ύψος της πλήμνης της Α/Γ, $p(V_{hub})$, αφού αυτή προσδιορίζει μέσω της διαδικασίας σύνθεσης των κοπωτικών φορτίων τη διάρκεια ζωής της μηχανής. Θεωρώντας ότι η $p(V_{hub})$ ακολουθεί την κατανομή Weibull, παρουσιάζουμε στο Σχήμα 7 την επίδραση του συντελεστή μορφής k στη διαμόρφωση της ισοδύναμης κοπωτικής φόρτισης στη διάρκεια ζωής της μηχανής για τις διάφορες κλάσεις των μηχανών. Έτσι, μια μηχανή κλάσης IV-B, η οποία έχει σχεδιαστεί για $k=2$ θα αντιμετωπίσει 35% υψηλότερα φορτία κόπωσης εάν λειτουργήσει σε θέση εγκατάστασης με παραπλήσια ανεμολογικά χαρακτηριστικά με αυτά του σχεδιασμού αλλά με $k=1.3$. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται και η επίδραση της έντασης της τύρβης στην κόπωση (συγκρίνοντας τις καμπύλες ίδιων κλάσεων για τις δύο υπο-κλάσεις τους).



Σχήμα 7: Λόγοι «ισοδύναμου κοπωτικού φορτίου» σαν συνάρτηση του k και της κλάσης της Α/Γ. Η τιμή αναφοράς είναι το ισοδύναμο φορτίο της κλάσης IV (B) για $k=2$. Οι τιμές ισοδύναμου φορτίου αντιστοιχούν εκ των άνω προς τα κάτω για IEC Class I, II, III & IV αντίστοιχα

4.4 Επίδραση στην ενεργειακή απόδοση των Α/Γ

Εφαρμόζοντας τεχνικές παραμετρικής αναγνώρισης σε διαθέσιμες πειραματικές και θεωρητικές βάσεις δεδομένων για ένα πλήθος μηχανών, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

Την κυριότερη επίδραση, όπως είναι αναμενόμενο, στην ενεργειακή απόδοση της μηχανής έχει η κατανομή της μέσης (δεκάλεπτης) ταχύτητας στο ύψος της πλήμνης της. Για τον λόγο αυτό, είναι ιδιαίτερα σημαντικό στη σύνθετη τοπογραφία, να είναι πλήρως αποτυπωμένο το μέσο πεδίο ροής στην περιοχή ενός αιολικού πάρκου. Η εμπειρία έδειξε ότι η παραγωγή Α/Γ σε γειτονικές θέσεις μπορεί να διαφέρει μέχρι και 30% λόγω της επίδρασης της τοπογραφίας όταν αυτή διαφοροποιεί το πεδίο ταχύτητας κατά, μόνο, 15%.

Δεύτερος σημαντικός παράγοντας είναι το σφάλμα της γωνίας προσανατολισμού. Η ισχύς της Α/Γ είναι ανάλογη με την τρίτη δύναμη του συνημίτονου της γωνίας αυτής. 20 μοίρες σφάλμα επάγουν 17% μείωση της παραγόμενης ισχύος.

Η ένταση της τύρβης επιδρά ασθενώς (<3% για τις συνήθεις τιμές της) στην ενεργειακή απόδοση και, κυρίως, στις χαμηλές ταχύτητες λειτουργίας. Εξ' ίσου ασθενής είναι και η επίδραση της καθ' ύψος κατανομής της ταχύτητας του ανέμου.

5. ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΛΑΣΗΣ Α/Γ ΣΤΗ ΣΥΝΘΕΤΗ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην παράγραφο 1, οι Α/Γ σχεδιάζονται για συγκεκριμένες εξωτερικές συνθήκες λειτουργίας που βασίζονται, εμμέσως, σε ένα ημι-εμπειρικό πλαίσιο επίπεδης τοπογραφίας. Ο έλεγχος του κατά πόσο μια μηχανή οποιασδήποτε κλάσης είναι κατάλληλη για μια συγκεκριμένη θέση εγκατάστασης αφήνεται στην διαδικασία αποτίμησης της θέσης αυτής. Η παρούσα μορφή του IEC 61400-1 προβλέπει ελέγχους μόνο για την μέση

ετήσια ταχύτητα V_{ave} και την χαρακτηριστική ένταση της τύρβης I_{15} , η οποία προκύπτει από την μετρημένη τιμή στην περιοχή ταχυτήτων 15 m/s, επιβαρημένη κατά μια τυπική απόκλιση της μέτρησης της. Η παραπάνω διαδικασία, όμως, δεν λαμβάνει υπ' όψιν της τους δύο βασικότερους παράγοντες που επιβαρύνουν τη φόρτιση των μηχανών στη σύνθετη τοπογραφία, την επίδραση του συντελεστή μορφής k στα ακραία αλλά και στα κοπωτικά φορτία και την επίδραση της δομής της τύρβης στην κόπωση. Το ΚΑΠΕ, συμμετέχοντας στη διαμόρφωση της τρίτης έκδοσης του 61400-1, πρότεινε την παρακάτω διαδικασία αποτίμησης:

Έστω $()_{design}$ οι παράμετροι σχεδιασμού μιας Α/Γ δεδομένης κλάσης και $()_{assessed}$ οι αντίστοιχες παράμετροι που προκύπτουν από τη διαδικασία αποτίμησης της θέσης εγκατάστασης. Για να είναι κατάλληλη η κλάση της Α/Γ για εγκατάσταση στη συγκεκριμένη θέση, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω :

5.1. Έλεγχος για ακραία φόρτιση

$$(V_{ave})_{assessed} \leq (V_{ave})_{design} \quad (3)$$

$$(V_{e50})_{assessed} \leq (V_{e50})_{design} \quad (4)$$

όπου

$$(V_{e50})_{assessed} = 4.4 \{ (V_{ave-WD})_{assessed} + 2.5 (I_{ave-WD})_{assessed} \} \quad (5)$$

και $(V_{ave-WD})_{assessed}$ είναι η μέγιστη τιμή της μέσης δεκάλεπτης ταχύτητας $(V_{ave-WD} i)_{assessed}$ των διευθύνσεων (i) του ανεμολογικού ροδογράμματος, υπολογισμένη για τις διευθύνσεις που έχουν πιθανότητα εμφάνισης μεγαλύτερη του 10% (βλ. Σχήμα 5, για παράδειγμα, με $(V_{ave-WD})_{assessed} = 11 \text{ m/s}$), και $(I_{ave-WD})_{assessed}$ η μέση ένταση της τύρβης που αντιστοιχεί στη διεύθυνση αυτή. Το εύρος των τομέων της διεύθυνσης του ανέμου θα πρέπει να είναι μεταξύ 20 και 30 μοιρών. Η σχέση (5) προκύπτει από πιθανοτική ανάλυση μεγίστων τιμών [11], θεωρώντας ότι η ανά διεύθυνση κατανομή της μέσης ταχύτητας είναι τύπου Rayleigh, $k=2$, μια υπόθεση που επιβεβαιώνεται από τις διαθέσιμες μετρήσεις (δεν ισχύει βέβαια το ίδιο για την μέση ταχύτητα στο σύνολο των διευθύνσεων, όπου το k παίρνει τόσο μικρότερες τιμές όσο πιο ανομοιόμορφο είναι το ροδόγραμμα). Ο έλεγχος των ακραίων συνθηκών ανά διεύθυνση της ροής μας απαλλάσσει από την αβεβαιότητα της εκτίμηση του k στην περιοχή των υψηλών ταχυτήτων.

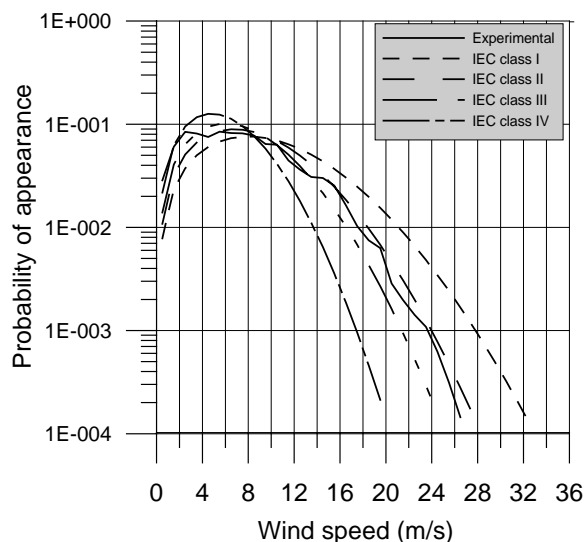
5.2. Έλεγχος για κόπωση

$$(C_{15} * I_{15})_{assessed} \leq (I_{15})_{design} \quad (6)$$

όπου, το C_{15} διορθώνει την χαρακτηριστική ένταση της τύρβης για την επίδραση της σύνθετης τοπογραφίας, ενώ θα πρέπει, επιπλέον

$$(p(V_{hub}))_{assessed} \leq (p(V_{hub}))_{design} \quad \text{for } V_r \leq V_{hub} \leq V_{out} \quad (7)$$

όπου $(p(V_{hub}))_{design}$, για όλες τις κλάσεις Α/Γ με εξαίρεση την ειδική S, είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Rayleigh με μέση τιμή $(V_{ave})_{design}$. Η (7) εφαρμόζεται στην περιοχή ταχυτήτων V_r (rated) έως την ταχύτητα εξόδου της μηχανής V_{out} . Η εφαρμογή της εξίσωσης (7) επιδεικνύεται στο Σχήμα 8. Θεωρώντας μια τυπική τιμή $V_r = 14 \text{ m/s}$, φαίνεται ότι η πειραματική καμπύλη καλύπτεται για πρώτη φορά από τη θεωρητική κατανομή της κλάσης II, αν και η συγκεκριμένη θέση εγκατάστασης με μέση τιμή ταχύτητας 7.5 m/s θα αντιστοιχούσε, από αυτήν την άποψη και σύμφωνα με το κριτήριο της εξίσωσης (3), στην κλάση III.



Σχήμα 8: Προτεινόμενος έλεγχος για κοπωτικά φορτία σε σχέση με την πιθανότητα κατανομής της μέσης ταχύτητας

6. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗ ΣΥΝΘΕΤΗ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ

Τα αποτελέσματα της πολυετούς χρήσης του IEC-61400-12 σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα των Ευρωπαϊκών Ερευνητικών Προγραμμάτων σε θέματα εκτίμησης καμπύλης ισχύος έχουν οδηγήσει στα εξής συμπεράσματα:

- Η εφαρμογή της διαδικασίας μέτρησης καμπύλης ισχύος σε περιπτώσεις σύνθετης τοπογραφία οδηγεί σε αποτελέσματα που αποκλίνουν από μετρήσεις σε επίπεδη τοπογραφία
- Τα χαρακτηριστικά ανέμου της σύνθετης τοπογραφίας επηρεάζουν την μέτρηση του μέσου πεδίου ανέμου
- Η μεθοδολογία βαθμονόμηση θέσης δεν επαρκεί για την πλήρη περιγραφή της επίδρασης της τοπογραφίας στα χαρακτηριστικά ανέμου από την θέση αναφοράς στην θέση της Α/Γ
- Τα μειονεκτήματα της χρήσης ανεμόμετρων κυπέλλου (υπερτάχυνση, επίδραση κλίσης ανέμου) είναι εντονότερα στις εφαρμογές σε σύνθετη τοπογραφία και οδηγούν σε αυξημένες αβεβαιότητες
- Έλλειψη διαδικασίας κανονικοποίησης (εκτός της πυκνότητας)

Το ΚΑΠΕ έχει εκδόσει οδηγία για την μέτρηση καμπύλης ισχύος σε σύνθετη τοπογραφία με στόχο την αντιμετώπιση των παραπάνω.

Η οδηγία περιλαμβάνει:

- Διαδικασία εκτίμησης της σύνθετης τοπογραφίας για την εκτέλεση βαθμονόμησης θέσης (εκτιμώνται τα υψομετρικά χαρακτηριστικά της περιβάλλουσας τοπογραφίας)
- Προσδιορισμό των μεγεθών αναφοράς (ταχύτητα ανέμου, τύρβη, κλίση οριακού στρώματος, κλίση ανύσματος ταχύτητας κλπ)
- Διαδικασία μεταφοράς των μεγεθών αναφοράς στην θέση της Α/Γ χρήση στατιστικών μεθόδων
- Προδιαγραφές οργάνων, τοποθέτησης και διόρθωσης μετρήσεων για την εκτέλεση των πειραμάτων βαθμονόμησης θέσης και καμπύλης ισχύος (χρήση ανεμόμετρων κυπέλλων και ανεμόμετρων τριών συνιστωσών, διόρθωση μετρήσεων ανεμομέτρου κυπέλλων λόγω κλίσης ανέμου)
- Διαδικασία εκτέλεσης βαθμονόμησης θέσης σε περιπτώσεις όπου η Α/Γ έχει ήδη εγκατασταθεί (χρήση μη μόνιμου ιστού επί της ατράκτου της ακινητοποιημένης Α/Γ)

- Διαδικασία για εκτέλεση ανάλυσης ευαισθησίας για εξαγωγή κανονικοποιημένων αποτελεσμάτων

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο άρθρο αυτό παρουσιάζεται συνοπτικά η σχετική εμπειρία και γνώση που αποκτήθηκε στο ΚΑΠΕ με αντικείμενο τις συνθήκες φόρτισης και απόδοσης των ανεμογεννητριών στη Σύνθετη Τοπογραφία. Τόσο τα ακραία όσο και τα κοπωτικά φορτία των μηχανών επηρεάζονται άμεσα από τις τοπικές ανεμολογικές συνθήκες, ντετερμινιστικές και στοχαστικές. Το ίδιο ισχύει σε μεγάλο βαθμό και για την ενεργειακή απόδοση των ανεμογεννητριών. Σήμερα, μετά από μακροχρόνια έρευνα που διενεργήθηκε στο ΚΑΠΕ στα παραπάνω αντικείμενα, είμαστε σε θέση να ποσοτικοποιήσουμε τις παραπάνω επιδράσεις και να προχωρήσουμε ένα βήμα παραπέρα εισάγοντας τις ιδιαιτερότητες της σύνθετης τοπογραφίας στα διεθνή πρότυπα που διέπουν τους κανόνες ασφαλούς σχεδιασμού και εκτίμησης της καμπύλης ισχύος των ανεμογεννητριών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] P.Chaviaropoulos, "Complex Terrain wind-WT parameter identification & quantification wind and WT modelling". Final Report, Volume III issued by CRES for the "Load and Power Measurement Program on Wind Turbines Operating in Complex Mountainous Regions, MOUNTURB" JOU2-CT93-0378 Project, November 1996.
- [2] G.Glinou, D.Foussekis, F.Mouzakis, D.Douvikas, A.Fragoulis, "Investigation of Design Aspects & Design Options for W/T operating in Complex Terrain Environments-COMTERID, JOR3-CT95-0033 Project". Final Report, issued by CRES, April 1998.
- [3] F.Mouzakis, "Adaptation of Existing Wind Turbines for Operation on High Wind Speed Complex terrain Sites; kWh cost reduction, ADAPTURB, JOR3-CT98-0251 Project". 1st 12-Monthly Report, March 2000.
- [4] IEC-61400-1 "Wind Turbine Generator Systems – Part 1: Safety Requirements
- [5] Ελληνικό πρότυπο καμπύλης ισχύος "Power Performance Testing for Wind Turbines operating in Complex Terrain"
- [6] IEC-61400-12 "W/T Generator Systems–Part 12: W/T Power Performance Testing
- [7] D.Douvikas, P.Chaviaropoulos, "3D Boundary Layer Method for Complex Terrain Micrositing. Application Examples", **European Wind Energy Conference and Exhibition**, Nice-France 1999, Proc. pp1113-1116.
- [8] P.Chaviaropoulos, D.Douvikas, "Mean-Flow-Field Simulations over Complex terrain using a 3-D Reynolds Average Navier Stokes Solver", **ECCOMASS '98**, Athens 7-11/9/1998, Proc. vol I, part II pp842-848.
- [9] G.Glinou, K.Papadopoulos, E.Morfiadakis, A.Fragoulis, «Mean and turbulent properties measured at a mountainous site with reported extreme wind conditions» EWEC'97, Proc.pp325-328.
- [10] P.Chaviaropoulos, "Probabilistic Analysis of Extreme Wind Events", **Journal Wind Engineering**, Vol.21, No 3, pp. 139-159, (1997).
- [11] P.Chaviaropoulos, unpublished work performed for IEC-TC88 / MT14