

Αιολική Ενέργεια:

Οι Ελληνικές Ερευνητικές Επιδόσεις και η Τεχνολογική Προοπτική στην Ελλάδα

1. Εισαγωγή.

Η αιολική ενέργεια, γνωστή στους Έλληνες από την αρχαιότητα, αποτελεί σήμερα το πιο ελπιδοφόρο κομμάτι των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στην προσπάθεια που τα τελευταία χρόνια έχει αναληφθεί διεθνώς για περιβαλλοντικά φιλικές λύσεις στον τομέα της παραγωγής ενέργειας. Η τεχνολογική ανάπτυξη που σημειώθηκε τα τελευταία 20 χρόνια, κυρίως σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, είχε ως αποτέλεσμα, τη μείωση του κόστους της αιολικής κολοβατώρας, σε επίπεδα που καθιστούν τις σχετικές επενδύσεις, όχι μόνο οικονομικά βιώσιμες αλλά και επενδυτικά ελκυστικές. Ενδεικτικό της τεχνολογικής πρόοδου, είναι ότι, ενώ στις αρχές της δεκαετίας του '80, τα εμπορικά μεγέθη μηχανών κυμαίνονταν στα επίπεδα των 250kW, σήμερα με σιγουριά οδεύουμε προς μεγέθη της τάξης των 4 MW (Σχήμα 1). Παράλληλα με την αματωδή τεχνολογική πρόοδο, εξ' ίσου σημαντική ήταν και η οικονομική ανάπτυξη. Στο Σχήμα 2, παρουσιάζεται η εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος από αιολικές μηχανές στην Ευρώπη τα τελευταία χρόνια. Η τάση είναι κάτι παραπάνω από ενθαρρυντική. Πέραν όμως της "σκληρής" οικονομικής διάστασης, υπάρχει και η κοινωνική που, αντίθετα με αρκετές τεχνολογίες, έρχεται να ενισχύσει ακόμα περισσότερο τα θετικά της αιολικής ενέργειας. Στις αρχές της δεκαετίας του '90, η Ευρωπαϊκή Ένωση Αιολικής Ενέργειας είχε βάλει στόχο για το τέλος της δεκαετίας αύξηση απασχόλησης της τάξης των 8000 ανθρωποετών. Ο απολογισμός έκλεισε στα 72000 ανθρωποετή! (βλ. [1]).

Όλα αυτά, τα ομολογουμένως ενδιαφέροντα και σημαντικά, αποτελούν για την Ελλάδα μία σημαντική πρόκληση, όχι μόνο επειδή η χώρα διαθέτει σημαντικό αιολικό δυναμικό, αλλά και επειδή, υπάρχει όλη η απαιτούμενη τεχνολογική γνώση. Για το μεν πρώτο, δεν χωρά αμφιβολία. Για

το δεύτερο όμως, χρειάζονται στοιχεία. Αυτό θα επιχειρήσουμε να κάνουμε στη συνέχεια, με επίκεντρο τις ελληνικές ερευνητικές και τεχνολογικές επιδόσεις, που όπως θα δούμε, κάθε άλλο παρά υπολείπονται των αντίστοιχων άλλων χωρών, ακόμα και των πλέον ανεπτυγμένων. Αν σ' αυτά προσθέσουμε την ευνοϊκή διεθνή συγκυρία που δημιουργεί η εκρηκτική ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, τότε πραγματικά μιλάμε για μία πραγματική ευκαιρία.

Θα ξεκινήσουμε με μία σύντομη ιστορική αναδρομή, με αναφορά στα πρόσωπα που έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη της εγχώριας έρευνας στο τομέα της αιολικής ενέργειας. Στη συνέχεια, θα δώσουμε μια σύντομη επισκόπηση της τρέχουσας τεχνολογίας, με έμφαση στα βασικά πεδία ερευνητικού ενδιαφέροντος σήμερα. Θα ακολουθήσει η καταγραφή των πιο σημαντικών ερευνητικών αποτελεσμάτων, από ελληνικής πλευράς, που θα αποτελέσει και τη βάση της τελικής συζήτησης, για την προοπτική της αιολικής ενέργειας στη χώρα, τόσο σε ερευνητικό όσο και βιομηχανικό επίπεδο.

2. Ιστορική αναδρομή της ερευνητικής δραστηριότητας στην Ελλάδα.

Στην πορεία της τεχνολογικής εξέλιξης που ακολούθησε η Ευρώπη στον τομέα της αιολικής ενέργειας, η Ελλάδα είχε και έχει μία συνεχή και αξιόλογη παρουσία, κυρίως σε ερευνητικό επίπεδο. Πρωτοπόροι αυτής της προσπάθειας ήταν, ο ομότιμος καθηγητής του ΕΜΠ, Ν. Αθανασιάδης, που μαζί με τον τότε επιστημονικό συνεργάτη και σημερινό καθηγητή Γ. Μπεργελέ, σχεδίασαν τις πρώτες ελληνικές αιολικές μηχανές, καθώς και ο τότε καθηγητής Δ. Λάλας -σημερινός πρόεδρος του Εθνικού Αστεροσκοπείου- που ανέλαβε την κατασκευή του πρώτου αιολικού χάρτη της χώρας, με την συνδρομή ομάδων από πολλά ΑΕΙ της χώρας.

Στα μέσα της δεκαετίας του '80, η Πολιτεία προχώρησε στην δημιουργία του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, που ιδρύθηκε ως οργανισμός εποπτευόμενος από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας. Η κίνηση αυτή, μαζί με την ευτυχή συγκυρία να βρεθούν σε θέσεις κλειδιά επιστήμονες με όραμα, αποδείχθηκε καταλυτική για τις μετέπειτα εξελίξεις. Οι βάσεις για μία συγκροτημένη Ελληνική ερευνητική συμμετοχή, τέθηκαν από τον πρώτο πρόεδρο του ΚΑΠΕ Δ. Λάλα και τον αναπληρωτή καθηγητή Α. Ζερβό (τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ). Την πρώτη ελληνική ερευνητική ομάδα, συμπλήρωναν από το ΚΑΠΕ, ο υπεύθυνος του τμήματος Δρ. Α.Φραγκούλης και οι Δρ Ε. Μορφαδάκης και Π. Βιώνης ενώ από το ΕΜΠ ο καθηγητής Μ. Παπαδόπουλος από το τμήμα Ηλεκτρολόγων και ο υπογράφων. Στη συνέχεια προστέθηκαν ο σημερινός υπεύθυνος έρευνας του ΚΑΠΕ Δρ. Π. Χαβιαρόπουλος, ο καθηγητής Ν. Χατζηαργυρίου και ο αναπληρωτής καθηγητής Α. Κλαδάς (τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΕΜΠ), και ο αναπληρωτής καθηγητής Θ. Φιλιππίδης (τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, με ειδικότητα στα σύνθετα υλικά). Στη διαδρομή των τελευταίων δέκα και πλέον ετών, η ομάδα αυτή κατέγραψε σημαντικές επιτυχίες, αναλαμβάνοντας και διεκπεραιώνοντας με επιτυχία, δεκάδες σημαντικών ερευνητικών έργων. Η διεθνής αναγνώριση είναι ευρεία και αποτυπώνεται από την πολύπλευρη συμμετοχή της Ελλάδας σε διεθνή επιστημονικά και τεχνολογικά fora, παρά την έλλειψη εγχώριας βιομηχανίας. Χωρίς αμφιβολία, οι επιτυχίες αυτές σε σημαντικό βαθμό, οφείλονται στην πρωτοβουλία συγκρότησης συντεταγμένης συμμετοχής της χώρας στα Ευρω-παϊκά τεκταινόμενα. Όμως, οι δραστηριότητες της "ελληνικής ερευνητικής ομάδας", δεν

του
Σπύρου Γ.
Βουτσινά,
αναπλ. καθηγητή
Τμ. Μηχ/γων
Μηχ/κών ΕΜΠ

περιορίστηκαν στην έρευνα. Με χρηματοδότηση της ΓΓΕΤ, στα πλαίσια του προγράμματος ΕΠΕΤ-Π, ξεκίνησε το 1996 η σχεδίαση και κατασκευή της πρώτης ελληνικής εμπορικής μηχανής. Συντονιστής του έργου ήταν ο τότε υπεύθυνος του τομέα αιολικής ενέργειας του ΚΑΠΕ Α.Φραγκούλης και βασικός μελετητής-σχεδιαστής, ο ομότιμος καθηγητής Ν.Αθανασιάδης συνεπικουρούμενος από τον Δρ Κ. Μιχαηλίδη και την ομάδα του ΕΜΠ. Πρόκειται για μία μηχανή 450kW μεταβλητών στροφών, που κατασκευάζεται από την ΠΥΡΚΑΛ.

Το πρωτότυπο έχει ήδη αναρραβεί ενώ δύο ακόμα μονάδες είναι υπό ανέργεση στο αιολικό πάρκο του Λαυρίου. Παράλληλα, στο ίδιο έργο, αναπτύχθηκε τεχνολογία κατασκευής περυγίων ανεμογεννητριών, αποκλειστικά ελληνικής σχεδίασης και κατασκευής, από την εταιρεία Γεωβιολογική ΑΒΕΕ, με επιστημονικό υπεύθυνο τον Θ. Φιλλιππίδη και συμβολή στον αεροδυναμικό σχεδιασμό, από την αεροδυναμική ομάδα ΚΑΠΕ-ΕΜΠ. Ήδη, έχουν κατασκευαστεί τρεις τύποι περυγίων για μηχανές έως 600kW, ενώ πρόκειται να ξεκινήσει σύντομα η σχεδίαση και κατασκευή περυγίων για μηχανές 1MW, στα πλαίσια Ευρω-παϊκού ερευνητικού έργου.

3. Τα βασικά πεδία ερευνητικού ενδιαφέροντος, σήμερα.

Η θεματική της αιολικής ενέργειας από αμιγώς τεχνολογική σκοπιά, όπου απαιτείται παραγωγή νέας επιστημονικής γνώσης, χωρίζεται σε τέσσερα βασικά πεδία:

- την ενεργειακή "πηγή", δηλαδή το αιολικό δυναμικό,
- την αιολική μηχανή,
- τις "μεγάλες" εγκαταστάσεις, δηλαδή τα αιολικά πάρκα, και
- τη διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Έτσι, εξαιρούνται μία σειρά ζητήματα εφαρμογής, όπως τα υβριδικά και αυτόνομα συστήματα, η διείσδυση στο δίκτυο, σε συνδυασμό με τεχνικές αποταμίευσης, καθώς και οικονομοτεχνικά θέματα, στα οποία υπάρχει σημαντική δραστηριότητα [2]. Λόγοι οικονομίας επιβάλλουν την εξαίρεση των θεμάτων αυτών, αφού θα απαιτούσαν από μόνα

τους, ένα ξεχωριστό άρθρο για να αναπτυχθούν.

Από τα βασικά πεδία που προαναφέρθηκαν, θα επικεντρωθούμε στα τρία πρώτα, ενώ στο τέταρτο, θα περιοριστούμε σε ορισμένες επιστημονικές, εφ' όσον αποτελεί αντικείμενο της επιστήμης του ηλεκτρολόγου μηχανικού. Οποσδήποτε η διαπραγμάτευση που επιχειρείται, δεν εξαντλεί το θέμα, που άλλωστε δεν αποτελεί σκοπό του άρθρου. Γι' αυτό και προκαταβολικά ζητώ συγγνώμη από τους συναδέλφους, των οποίων η συμβολή δεν αναφέρεται.

3.1. Το αιολικό δυναμικό.

Το πρώτο και κρισιμότερο στοιχείο που απαιτείται για την απόφαση εγκατάστασης μίας ή περισσότερων αιολικών μηχανών, είναι η αξιόπιστη εκτίμηση του αιολικού δυναμικού στην υποψήφια θέση. Από τεχνική άποψη, στον όρο αιολικό δυναμικό, περιλαμβάνονται:

- Το στοχαστικό μέρος, που δίδεται ως κατανομή πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου ανά κατεύθυνση (συνήθως θεωρούμα 16 κατευθύνσεις), και
- Το ντετερμινιστικό, που συνίσταται στη καθ' ύψος κατανομή της ταχύτητας ανά κατεύθυνση (συνήθως μέχρι το επίπεδο του άξονα της μηχανής).

Από αυτά τα στοιχεία, το μεν στοχαστικό απαιτεί οποσδήποτε τη διεξαγωγή μετρήσεων, ενώ το ντετερμινιστικό, προκύπτει και από υπολογισμούς.

Συνήθως οι μετρήσεις διεξάγονται σε μία αντιπροσωπευτική θέση και στη συνέχεια "ανάγονται" κατ' αναλογία σε γειτονικές. Η αναγωγή μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

α) Με περιορισμένης διάρκειας ταυτόχρονες μετρήσεις σε διάφορες θέσεις και συσχέτιση με τον βασικό ιστό,

β) Με χρήση υπολογιστικών μεθόδων.

Στη δεύτερη περίπτωση, οι υπολογισμοί αφορούν στην πρόλεξη του μέσου πεδίου ταχύτητας στην ευρύτερη περιοχή, για διάφορες κατευθύνσεις ανέμου. Στη συνέχεια, με βάση τις προλέξεις στην θέση του βασικού ιστού, γίνεται η συσχέτιση με άλλα σημεία της περιοχής. Βασικά πλεονεκτήματα

της υπολογιστικής διαδικασίας, είναι το μικρό κόστος, καθώς και η πληρότητα της παρεχόμενης πληροφορίας, αφού καλύπτει μία ευρύτερη περιοχή και όχι μεμονωμένα σημεία. Επιπλέον, οι υπολογισμοί παρέχουν και τη καθ' ύψος κατανομή του ανέμου, στοιχείο επίσης σημαντικό, για τη σωστή εκτίμηση του αιολικού δυναμικού.

Για εφαρμογές σε περιοχές επίπεδης τοπογραφίας ή στη θάλασσα, υπάρχει αποκωδικοποιημένη πληροφορία σε μορφή οδηγιών και έτοιμου λογισμικού, που καλύπτει πλήρως τις τρέχουσες ανάγκες εφαρμογής. Στην περίπτωση όμως της ανώμαλης τοπογραφίας, υπάρχει κενό. Το πεδίο ροής του ανέμου παρουσιάζει έντονη μεταβλητότητα, ακόμα και σε μικρής έκτασης περιοχές, ώστε να καθίσταται καθοριστικής σημασίας η λεπτομερής εκτίμησή του. Η διεξαγωγή μετρήσεων δεν αποτελεί πάντα την ενδεδειγμένη λύση. Χρειάζονται πολλοί ιστοί και μεγάλη διάρκεια δειγματοληψίας. Γι' αυτό και πολλές φορές καταφεύγουμε σε υπολογισμούς. Οι υπολογιστικές τεχνικές που υπάρχουν σήμερα, μπορούν να χωριστούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- Τις κνηματικές τεχνικές που βασίζονται στη λύση της εξίσωσης συνέχειας, με πιο αντιπροσωπευτικό παράδειγμα το πρότυπο [3, 4],

- Τις τεχνικές οριακού στρώματος, με πιο γνωστό το πρότυπο Jackson-Hunt και το WASP [5, 6], και τέλος,

- Τις συνεκτικές τεχνικές, όπου λύνονται οι μέσες τυρβώδεις εξισώσεις Navier Stokes.

Όποια μέθοδο και αν ακολουθήσουμε, θα χρειαστεί να δώσουμε συνοριακές συνθήκες στα όρια της εξεταζόμενης περιοχής [7]. Στην περίπτωση ενός νησιού, όπως η Άνδρος, το υπολογιστικό χωρίο μπορεί να καλύψει ολόκληρο το νησί. Οπότε με ασφάλεια μπορούμε να θεωρήσουμε ότι, η επερχόμενη ροή, αντιστοιχεί σε πλήρως διαμορφωμένο οριακό στρώμα πάνω από θάλασσα. Αν η θέση που εξετάζουμε είναι στην ενδοχώρα, για να έχουμε "ασφαλείς" συνοριακές συνθήκες, θα πρέπει να επεκτείνουμε το υπολογιστικό χωρίο σε αρκετά μεγάλη έκταση, οπότε η επίδραση των συνο-

ριακών συνθηκών στην περιοχή που μας ενδιαφέρει, να ελαχιστοποιείται κατά το δυνατόν. Αυτό οδηγεί σε αραίωση του πλέγματος, με αποτέλεσμα οι προλέξεις να γίνονται αναξιόπιστες. Έτσι, η εστίαση των ερευνητικών προσηπαθειών στον τομέα αυτό, σήμερα, στοχεύει στην ανάπτυξη εξελιγμένων υπολογιστικών τεχνικών, που χωρίς να χάνουν την ακρίβεια, να μπορούν με λογικό κόστος, να καλύπτουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη έκταση.

3.2. Η αιολική μηχανή.

Ο μηχανισμός παραγωγής ενέργειας σε μία αιολική μηχανή, είναι αεροδυναμικός. Γι' αυτό και όλα σε μια αιολική μηχανή, ξεκινούν από την αεροδυναμική ανάλυση και σχεδίαση. Η αεροδυναμική ανάλυση, αφορά στον προσδιορισμό της κατανομής φόρτισης των πτερυγίων (δηλαδή κατανομή της άνωσης και αντίστασης), ενώ η σχεδίαση αφορά στον προσδιορισμό της γεωμετρίας πτερυγίου, με στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας (δηλαδή του σχήματος των αεροτομών που σχηματίζουν το πτερύγιο, καθώς και τις κατανομές χορδής και συστροφής). Συναφής με την αεροδυναμική είναι και η αερακουστική σχεδίαση, που στοχεύει στη μείωση του αεροδυναμικού θορύβου, που εκπέμπουν τα πτερύγια.

Στη συνέχεια, έχουμε την ηλεκτρομηχανική σχεδίαση της μηχανής. Εδώ περιλαμβάνονται: η επιλογή του αριθμού πτερυγίων, η τεχνική ελέγχου της ισχύος, η σχεδίαση του αξονικού συστήματος, η επιλογή των συστημάτων ελέγχου και ασφάλειας, καθώς και η σχεδίαση του πύργου στήριξης.

Τέλος, έχουμε την αεροελαστική ανάλυση, όπου ελέγχεται σε αντοχή και κόπωση το σύνολο της μηχανής, με στόχο, βέβαια, την αξιοπιστία της κατασκευής και την μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής της.

3.2.1 Αεροδυναμική ανάλυση.

Από αεροδυναμική άποψη, η ροή γύρω από μία αιολική μηχανή, ανήκει στην κατηγορία των μη-μόνιμων τριδιαστάτων τυρβωδών ροών. Η μη-μονιμότητα, οφείλεται τόσο σε εγγενείς ρευστομηχανικούς μηχανισμούς, με πό σημαντικούς, την δημιουργία ομόρρου (wake) και την εμφάνιση απώλειας

στήριξης (stall), όσο και σε λειτουργικούς μηχανισμούς, με πό χαρακτηριστικούς, την μεταβολή του βήματος (pitch variation) και την απόκλιση στην κατεύθυνση (yaw misalignment).

Υπάρχουν πολλά ανοικτά ερωτήματα. Είναι χαρακτηριστικό ότι, ακόμα και σήμερα, δεν διαθέτουμε αξιόπιστο τρόπο πρόλεξης της καμπύλης ισχύος μίας μηχανής. Δύο είναι τα πιο σημαντικά ανοικτά ερωτήματα:

- Η πρόλεξη της επίδρασης του ομόρρου, και
- Η πρόλεξη της αποκόλλησης, σε περιστρεφόμενα πτερύγια.

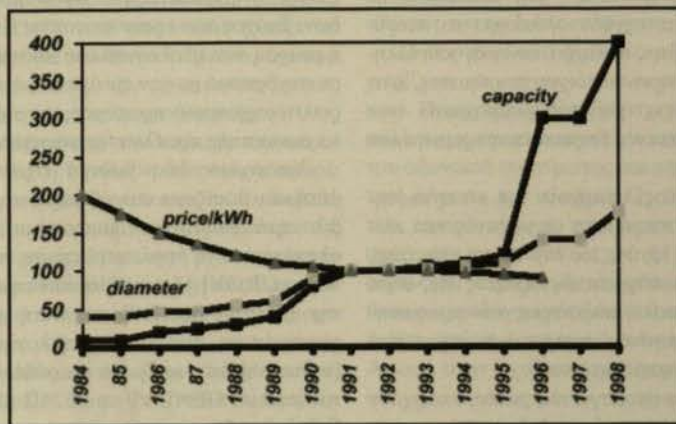
Ο ομόρρος, αποτελεί ενεργό στοιχείο της αεροδυναμικής ανεμογεννητριών. Σε μόνιμες συνθήκες, καθορίζει την ισχύ, ενώ σε μη-μόνιμες συνθήκες, καθορίζει τα εύρη της μεταβολής των φορτίων, που ασκούνται στη μηχανή. Τον μηχανισμό, προσδιορίζει ποσοτικά το θεώρημα Kelvin, σύμφωνα με το οποίο, κάθε μεταβολή της φόρτισης - δηλαδή της κυκλοφορίας- στα πτερύγια, συνοδεύεται από ίση και αντίθετη αποβολή στροβιλότητας στον ομόρρο. Οι βασικές δυσκολίες προσομοίωσης της επίδρασης του ομόρρου, εντοπίζονται στο χειρισμό της παραμόρφωσης της στροβιλότητας. Οι περισσότερες από τις υπάρχουσες υπολογιστικές μέθοδοι διαχέουν τη στροβιλότητα γρήγορα ενώ όσες δεν το κάνουν, παρουσιάζουν αστάθειες.

Σχετικά με αποκολλημένες ροές, η υπάρχουσα σε διεθνές επίπεδο γνώση, αφορά, κατά βάση, αεροτομές και μη-περιστρεφόμενες πτέρυγες. Όμως,

ακόμα και σ' αυτές τις περιπτώσεις, οι αναλύσεις φτάνουν σε γωνίες πρόσπτωσης, μέχρι τις 20-25°. Στις ανεμογεννήτριες και ειδικά στις σταθερού βήματος, το εύρος των γωνιών πρόσπτωσης, ξεπερνά κατά πολύ τις τιμές αυτές. Επιπλέον, ο συνδυασμός αποκόλλησης και περιστροφής, διαφοροποιεί ουσιαστικά τη δομή του πεδίου ροής ώστε τα συμπεράσματα για σταθερές πτέρυγες να μην επεκτείνονται στην περίπτωση δρομένων, αφήνοντας έτσι σημαντικό κενό γνώσης. Επιπλέον, ανοικτά παραμένουν τα ζητήματα της προσομοίωσης της μετάβασης, από στρωτή σε τυρβώδη ροή τύρβης και της προσομοίωσης της τύρβης. Όλα αυτά, συνθέτουν έναν πλούσιο κατάλογο θεμάτων, προς μελλοντική έρευνα.

Από άποψη τεχνικών ανάλυσης, κατά βάση χρησιμοποιούνται υπολογιστικές μεθοδολογίες και όχι πειραματικές. Βέβαια, τα πειράματα και μάλιστα τα λεπτομερή, χρειάζονται πάντα, προσφέροντας, ανάμεσα στ' άλλα, τη βάση για την επαλήθευση των υπολογιστικών μεθόδων. Οι υπάρχουσες μετρήσεις, χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τις μετρήσεις πλήρους κλίμακας σε μηχανές που λειτουργούν στο ύψαιθρο, τις μετρήσεις πλήρους κλίμακας σε αεροσήραγγες και τις εργαστηριακές μετρήσεις υπό κλίμακα.

Μετρήσεις του πεδίου πίεσης σε πτερύγια, που λειτουργούν σε πραγματικές συνθήκες, υπάρχουν αρκετές [8, 9, 10]. Βασικό μειονέκτημα αυτού του τύπου των μετρήσεων, είναι η στοχα-



Σχήμα 1: Η εξέλιξη του τυπικού εμπορικού μεγέθους αιολικής μηχανής

στατικότητα του ανέμου, στοιχείο που δύσκολα μπορεί να απαλειφθεί από τις μετρήσεις. Έτσι, η χρησιμότητα των στοιχείων αυτών για επιβεβαίωση αεροδυναμικών υπολογιστικών μεθόδων, είναι περιορισμένη.

Μετρήσεις σε αεροδυναμική σήραγγα σε ολόκληρη μηχανή, υπάρχουν από δύο πειράματα. Το πρώτο διεξήχθη από το Σουηδικό αεροναυπηγικό κέντρο έρευνας FFA στην Κίνα όπου χρησιμοποιήθηκε αεροδυναμική σήραγγα κλειστού τύπου [11]. Μετρήθηκε το πεδίο πιέσεων πάνω στο πτερύγιο μίας μηχανής Stork σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας. Επίσης, έγιναν οπτικές καταγραφές της ροής γύρω από το πτερύγιο, με νημάτια. Βασικό μειονέκτημα αυτού του πειράματος, ήταν ο περιορισμός της ροής από τα τοιχώματα της σήραγγας (blockage). Το δεύτερο πείραμα διεξήχθη μόλις το 2000 στις ΗΠΑ, από το NREL. Χρησιμοποιήθηκε η μεγάλη αεροδυναμική σήραγγα της NASA, όπου τοποθετήθηκε μία μηχανή διαμέτρου 10μ, σε διατομή 26x39 [12]. Πρόκειται για πείραμα μεγάλης αξίας αφού για πρώτη φορά έγινε λεπτομερής καταγραφή του πεδίου πίεσης πάνω στο πτερύγιο. Επίσης, σημαντικό είναι το γεγονός ότι, η ίδια μηχανή έχει διεξοδικά μετρηθεί σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, οπότε δίδεται η δυνατότητα σύγκρισης της συμπεριφοράς μίας μηχανής, σε ελεγχόμενες και μη συνθήκες. Ωστόσο, ο τύπος πτερυγίου που εξετάστηκε, δεν ήταν αντιπροσωπευτικός, αφού ήδη από την ταχύτητα των 10m/s, η έκταση της αποκόλλησης κάλυπτε σχεδόν ολόκληρο το πτερύγιο. Έτσι, υπάρχει ανάγκη επανάληψης ενός αντίστοιχου πειράματος, κάτι που έχει ήδη προγραμματιστεί στα πλαίσια ενός Ευρωπαϊκού ερευνητικού έργου.

Τέλος, υπάρχουν και τα εργαστηριακά πειράματα σε μηχανές υπό κλίμακα [13, 14, 15, 16]. Λόγω κλίμακας, ο χαρακτηριστικός αριθμός Re, είναι κατά πολύ μικρότερος του πραγματικού, γεγονός, που μειώνει σημαντικά την χρησιμότητά τους.

Στο υπολογιστικό πεδίο, υπάρχουν τρεις κατηγορίες μεθοδολογιών:

- Οι μεθοδολογίες που βασίζονται στη θεωρία δίσκου ορμής και το πρό-

τυπο των στοιχείων πτερύγωσης (BEM=Blade Element momentum Models). Πρόκειται για την απλούστερη δυνατή αεροδυναμική θεώρηση, που, παρά τις σημαντικές απλοποιητικές παραδοχές και τον εμπειρικό της χαρακτήρα, είναι σήμερα η μόνη ρεαλιστική επιλογή του μηχανικού στην πράξη. Υπάρχουν πάμπολλες παραλλαγές. Όλα τα ερευνητικά κέντρα της Ευρώπης και των ΗΠΑ, έχουν αναπτύξει τέτοιους κώδικες. Ωστόσο, σε πολλά σημεία υστερούν, κάτι που σε πολλές περιπτώσεις, έχει πιστοποιηθεί από συγκρίσεις με πειραματικά στοιχεία [17, 18].

- Οι τριδιάστατες στροβιλές μεθοδολογίες (vortex models). Πρόκειται για την απλούστερη τριδιάστατη θεώρηση του αεροδυναμικού προβλήματος. Σε σύγκριση με τις BEM μεθοδολογίες, οι στροβιλές προσομοιώνουν με ακρίβεια την τριδιάστατη γεωμετρία της μηχανής, ενώ ταυτόχρονα εισάγουν με λεπτομέρεια τις επιδράσεις ομόρρου. Δύο είναι τα βασικά μειονεκτήματα των στροβιλών μεθοδολογιών: το σημαντικά υψηλότερο υπολογιστικό κόστος, σε σύγκριση με τις BEM μεθόδους, και ο μη-συνεκτικός χαρακτήρας τους, που μας υποχρεώνει να εισάγουμε ημ-εμπειρικές μεθόδους υπολογισμού των φορτίων σε περιπτώσεις αποκολλημένων καταστάσεων. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις έχει επιβεβαιωθεί η υπεροχή τους σε σύγκριση με τις BEM μεθόδους, κάτι που έχει οδηγήσει πολλές ερευνητικές ομάδες της Ευρώπης να προσανατολίζονται στη ανάπτυξη τέτοιων μεθόδων. Στόχος των ερευνών αυτών, είναι η μείωση του υπολογιστικού κόστους, σε συνδυασμό με τον εμπλουτισμό του ρευστομηχανικού προτύπου, ως προς τα συνεκτικές προέλευσης φαινόμενα.

Υπάρχουν δύο βασικά σχολές: αυτή που βασίζεται στην θεωρία στροβιλονημάτων (vortex filaments) με πό ολοκληρωμένη την περίπτωση του κώδικα ROVLM του Πανεπιστημίου της Στουτγάρδης [19] και αυτή που χρησιμοποιεί στοιχεία στροβιλότητας (vortex blobs), με μόνο παράδειγμα τον κώδικα GENUVP του ΕΜΠ [20]. Επίσης, ενδιαφέρουσα είναι η περίπτωση του κώδικα που ανέπτυξε το Imperial College [21]. Πρόκειται για

υβριδικό πρότυπο, που συνδυάζει την θεωρία στροβιλονημάτων για το μακρινό ομόρρου, με την τοπική κατά τομές διδιάστατη λύση των συνεκτικών εξισώσεων, με βάση τη μέθοδο των σημειακών δυνάμεων, γεγονός που περιορίζει τη χρησιμότητά του σε ροές χαμηλού αριθμού Re. Συνεκτικές διορθώσεις έχουν εισαχθεί και στο κώδικα GENUVP. Αφορούν τις περιπτώσεις αποκολλημένων ροών, όπου αντί ενός φύλλου στροβιλότητας, εισάγονται δύο, με το δεύτερο να εκφεύγει από το χείλος πρόσπτωσης.

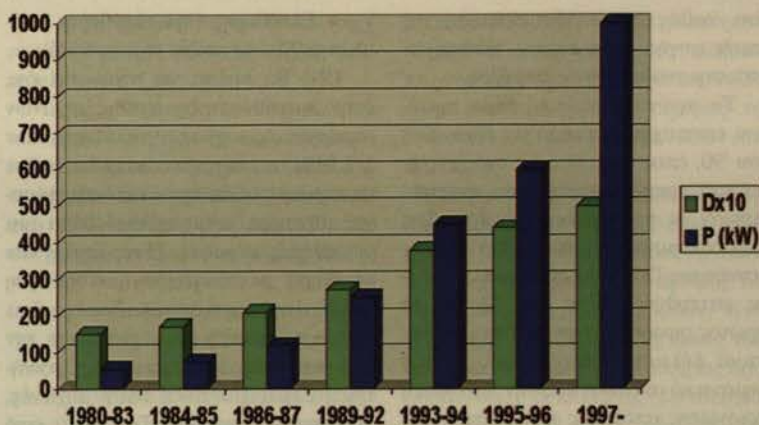
- Οι συνεκτικές μεθοδολογίες (Navier Stokes solvers). Αντιστοιχούν στην πληρέστερη, από φυσική άποψη, περιγραφή της αεροδυναμικής συμπεριφοράς ανεμογεννητριών. Στον τομέα της αιολικής ενέργειας, η εφαρμογή συνεκτικών μεθοδολογιών είναι σχετικά πρόσφατη. Ξεκίνησε στις ΗΠΑ πριν 3 περίπου χρόνια, με την προσαρμογή συμπιεστών κωδικών στις συνθήκες λειτουργίας ανεμογεννητριών. Στο ίδιο διάστημα στην Ευρώπη, ανάλογες προσπάθειες έγιναν από την ομάδα του C.Hirsh στο Βέλγιο και την ομάδα ελικοπτέρων του DLR, ενώ ασυμπίεστες μεθοδολογίες εφάρμοσαν το RISOE και το ΕΜΠ [22]. Χωρίς αμφιβολία το μέλλον ανήκει στις συνεκτικές μεθοδολογίες, αφού είναι οι μόνες που ενσωματώνουν χωρίς απλοποιητικές παραδοχές όλους τους φυσικούς χαρακτήρες του προβλήματος. Βέβαια, το υπολογιστικό τους κόστος, είναι βαρύ. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η προσομοίωση της ροής γύρω από ένα πτερύγιο σε ομοίμορφες συνθήκες λειτουργίας, απαιτεί, περίπου, μία βδομάδα. Αυτό σημαίνει ότι, για αρκετό καιρό ακόμα οι συνεκτικές μεθοδολογίες θα παραμείνουν εργαλείο έρευνας.

3.2.2 Αεροδυναμική σχεδίαση.

Στον τομέα της αεροδυναμικής σχεδίασης, βασικό πεδίο έρευνας αποτέλεσε η σχεδίαση αεροτομών. Σχετικά, υπάρχει εκτενέστατη βιβλιογραφία, προερχόμενη από τον αεροναυπηγικό τομέα. Δυστυχώς οι ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν οι ανεμογεννήτριες, καθιστούν την τεχνολογία αυτή εν πολλοίς ανεπαρκή. Στις αεροπορικές εφαρμογές η λειτουργία σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης απαγορεύεται,

ενώ στις ανεμογεννήτριες είναι επιβεβλημένη. Επίσης, στις αεροπορικές εφαρμογές, η επιφάνεια των πτερυγίων θεωρείται λεία. Αντίθετα, στις ανεμογεννήτριες, οι ακαθαρσίες που επικαθονται στην περιοχή του χείλους πρόσπτωσης προκαλούν πρόωρη μετάβαση. Είναι γνωστό στον χώρο της αιολικής ενέργειας, το φαινόμενο πολλαπλής απώλειας στήριξης (multi-stall), που εμφανίζεται σε μηχανές σταθερού βήματος. Συγκεκριμένα, η καμπύλη ισχύος στην περιοχή των υψηλών ταχυτήτων ανέμου, δηλαδή όταν το πτερόγιο λειτουργεί σχεδόν όλο σε συνθήκες αποκόλλησης, παρουσιάζει διακλάδωση με διαφορές, που μπορεί να φτάσουν στο 30% των θεωρητικών τιμών. Γι' αυτό και σημαντικό κριτήριο στη σχεδίαση αεροτομών για πτερύγια ανεμογεννητριών, είναι η αναισθησία των αεροδυναμικών επιδόσεων στη τραχύτητα της επιφάνειάς τους. Στην κατεύθυνση αυτή υπάρχουν λίγες σχετικές εργασίες και ακόμα λιγότερες δημοσιευμένες. Σήμερα υπάρχουν βασικά τέσσερις ομάδες που σχεδιάζουν αεροτομές για ανεμογεννήτριες: η ομάδα του NREL στις ΗΠΑ, η ομάδα του Πανεπιστημίου του Delft στην Ολλανδία, η ομάδα του RISOE στη Δανία και η ομάδα του ΚΑΠΕ-ΕΜΠ στην Ελλάδα [23, 24, 25, 26].

Η αεροδυναμική ενός πτερυγίου ανεμογεννήτριας, εκτός του σχήματος των αεροτομών που το αποτελούν, μπορεί επίσης να διαμορφωθεί με τη χρησιμοποίηση "αεροδυναμικών ενισχυτών", όπως οι στροβιλογεννήτριες (vortex generators). Η βασική ιδέα, γνωστή από την αεροναυπηγική, συνίσταται στη δημιουργία ενός ισχυρού στροβιλωσώληνα στα όρια του οριακού στρώματος, που μεταφέρει οριζιακά από την αδιατάρακτη ροή στο εσωτερικό του οριακού στρώματος, καθυστερώντας την εμφάνιση αποκόλλησης. Υπάρχουν δύο τύποι στροβιλογεννητριών: ο μηχανικός και ο αεροδυναμικός. Οι μηχανικές στροβιλογεννήτριες είναι τριγωνικού σχήματος πλακίδια, που τοποθετούν σε κλίση ως προς την κύρια ροή. Στην περίπτωση αυτή, ο στρόβιλος δημιουργείται στο ακροπτερόγιο του πλακιδίου, που γι' αυτό το λόγο, έχει ύψος, περίπου, όσο το εκτιμώμενο πάχος του οριακού



Σχήμα 2: Η εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος από αιολικές μηχανές στην Ευρώπη.

στρώματος. Οι αεροδυναμικές στροβιλογεννήτριες είναι μικρές δέσμες αέρα (air-jets), που φυσούν επίσης σε κλίση ως προς την κύρια ροή αέρα, από οπές που ανοίγονται στην επιφάνεια του πτερυγίου.

Ορισμένοι κατασκευαστές πτερυγίων, έχουν τοποθετήσει με σχετική επιτυχία μηχανικές στροβιλογεννήτριες σε εμπορικά τους προϊόντα, βασισμένοι καθαρά στην εμπειρία. Υπάρχει κενό στην θεωρητική τους ανάλυση, που πιστεύω σύντομα θα απασχολήσει την ερευνητική κοινότητα της Ευρώπης. Αεροδυναμικές στροβιλογεννήτριες τοποθετήθηκαν σε μία μηχανή στα πλαίσια ερευνητικών έργων με χρηματοδότηση της ΕΕ. Στο ίδιο πλαίσιο, διεξήχθη και θεωρητική ανάλυση της συμπεριφοράς τους από το ΕΜΠ, που στη ουσία άνοιξε το πεδίο για μελλοντική έρευνα, σχετικά με τον έλεγχο του οριακού στρώματος σε πτερύγια ανεμογεννητριών.

Εκτός από την επιλογή των αεροτομών, η σχεδίαση πτερυγίων αφορά και στη μορφή του πτερυγίου, δηλαδή στη κατανομή της χορδής και της συστροφής. Η επιλογή έχει στόχο, την μεγιστοποίηση της ενέργειας. Ως πρόβλημα βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς, μπορεί να λυθεί με κλασικές μεθόδους κλίσης. Όπως όμως έχει διαπιστωθεί σε πολλά ανάλογα προβλήματα αυτού του τύπου, οι μεθοδολογίες συχνά εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα. Ένας τρόπος αποφυγής

εγκλωβισμού σε τοπικά ακρότατα, είναι η χρησιμοποίηση γενετικού ή εξελικτικού τύπου άμεσων μεθόδων. Το όλο θέμα της σχεδίασης, έχει τα τελευταία χρόνια προσελκύσει το ερευνητικό ενδιαφέρον πολλών ομάδων της Ευρώπης. Κύριος στόχος αυτής της δραστηριότητας, είναι η περαιτέρω μείωση του κόστους.

3.2.3 Αερακουστική

Η θεματική της αερακουστικής, άνοιξε για την αιολική ενέργεια, όταν η τοποθέτηση μηχανών κοντά σε κατοικημένες περιοχές, βρήκε την αντίδραση των κατοίκων. Μαζί με το ζήτημα της οπτικής όχλησης, ο θόρυβος που εκπέμπει μία αιολική μηχανή ή ένα αιολικό πάρκο, συγκροτούν τις ονομαζόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αιολικής ενέργειας.

Ο θόρυβος από αιολικές μηχανές χωρίζεται σε μηχανικό και αεροδυναμικό. Ο μηχανικός θόρυβος σχετίζεται, μάλλον, με την προσεκτική κατασκευή του αξονικού συστήματος και την ηχητική μόνωση του κλωβού. Ως εκ τούτου, αφορά κυρίως, τους κατασκευαστές, που τα τελευταία χρόνια έχουν σημειώσει σημαντική πρόοδο. Αντίθετα ο αεροδυναμικός θόρυβος παρουσιάζει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον. Αφορά στην σχεδίαση των πτερυγίων και πιο συγκεκριμένα, τη γεωμετρία του ακροπτερυγίου, όπου η παρουσία του στρόβιλου ακροπτερυγίου, αποτελεί την πλέον σημαντική πηγή θορύ-

βου, καθώς και τη διαμόρφωση της ακμής φυγής, όπου επίσης, κατανέμονται σημαντικές πηγές θορύβου.

Το πρώτο σημαντικό βήμα προόδου, επετεύχθη στα μέσα της δεκαετίας του '90, όπου στα πλαίσια ενός ευρωπαϊκού ερευνητικού έργου, αναπτύχθηκαν οι πρώτοι κώδικες πρόλεξης αεροδυναμικού θορύβου από ανεμογεννήτριες [27]. Στη συνέχεια, η έρευνα κατευθύνθηκε σε δύο άξονες. Ο πρώτος αφορούσε στη σχεδίαση ακουστικά βέλτιστων αεροτομών, με πιο σημαντικό αποτέλεσμα, την προσθήκη περιονωτής απόληξης κατά μήκος της ακμής φυγής (serrated trailing edge). Η βελτίωση που εξασφαλίζει μία τέτοια σχεδίαση πρόσφατα επιβεβαιώθηκε και πειραματικά [28]. Ο δεύτερος αφορούσε στην διερεύνηση των ακουστικών εκπομπών από αιολικά πάρκα, με ταυτόχρονη ανάπτυξη μεθόδων πρόλεξης της διάδοσης των ακουστικών κυμάτων στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον [29]. Οπωσδήποτε το θέμα της αερακουστικής δεν έχει κλείσει, ιδιαίτερα τώρα που η αιολική ενέργεια επεκτείνεται στη θάλασσα, όπου το χαμηλό επίπεδο τύρβης, επιτρέπει τη διάδοση του χαμηλόσυχνου θορύβου, σε μεγάλες αποστάσεις.

3.2.4 Σχεδίαση αιολικών μηχανών.

Διατρέχοντας τις σχεδιαστικές τάσεις που τείνουν να επικρατήσουν, οι βασικοί τύποι μηχανών είναι όλοι οριζοντίου άξονα. Οι μηχανές κατακόρυφου άξονα, εξ' αιτίας της μειωμένης απόδοσής τους, σε σχέση με τις αντίστοιχες οριζοντίου άξονα στα μεγέθη μέχρι 5MW, έχουν εγκαταλειφθεί.

Ως προς τον αριθμό πτερυγίων, έχουμε:

- Διπτέρυγες μηχανές με σύστημα κατακόρυφου προσανατολισμού (teetering hub),

- Τριπτέρυγες μηχανές σταθερής πλήμνης (rigid hub),

Ως προς το είδος του αξονικού συστήματος, έχουμε:

- Σταθερών στροφών, με μειωτήρα,

- Μεταβλητών στροφών, με ή χωρίς μειωτήρα,

Ως προς τον έλεγχο ισχύος:

- Σταθερού βήματος με αερόφρενα,

- Μεταβλητού βήματος,

- Ελευθέρης ή ημι-ελευθέρης απόκλισης (free or active yaw control).

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι, στην κατεύθυνση σχεδίασης μηχανών ονομαστικής ισχύος μεγαλύτερης των 1-2 MW, η παραπάνω ποικιλία τείνει να περιοριστεί σε έναν τύπο τριπτέρυγης μηχανής, με μεταβλητό βήμα και μεταβλητές στροφές. Η αφαίρεση του μειωτήρα με ταυτόχρονη υιοθέτηση πολυπολικών γεννητριών, δεν έχει βρει ευρεία εφαρμογή με κύρια αιτία την ανάγκη ειδικής κατασκευής της γεννήτριας. Σήμερα, τέτοιου τύπου μηχανές, κατασκευάζονται στη Γερμανία από την ENERCON και στην Ολλανδία από την Lagerway.

Από άποψη ερευνητική, τα περισσότερα ανοικτά ερωτήματα, αφορούν στο ηλεκτρικό-ηλεκτρονικό μέρος των μηχανών. Ήδη, οι μεγάλες εταιρείες κατασκευής ηλεκτρικού υλικού, όπως η Siemens και η ABB, έχουν δημιουργήσει ειδικά τμήματα για εφαρμογές αιολικής ενέργειας, ενώ τα ηλεκτρονικά ισχύος και ο τρόπος εφαρμογής τους σε ανεμογεννήτριες, βρίσκονται στο μέτωπο της εφαρμοσμένης έρευνας σήμερα.

Πέρα από σχεδιαστικές επιλογές γενικού χαρακτήρα, εξαιρετικά σημαντικό ρόλο στη σχεδίαση μηχανών παίζουν:

- Η επιλογή των υλικών,

- Ο τρόπος κατασκευής των διαφόρων τμημάτων, και

- Η μεθοδολογία ανέγερσης.

Θα ξεκινήσουμε από το ζήτημα της ανέγερσης, που αποτελεί καθοριστικής σημασίας παράγοντα για την προοπτική της αιολικής ενέργειας, παγκοσμίως. Όσο το μέγεθος των αιολικών μηχανών, βρισκόταν στο επίπεδο του 0.5MW, το ζήτημα της ανέγερσης μίας μηχανής ήταν απλό. Οι απαιτήσεις υποδομής πρόσβασης στις θέσεις εγκατάστασης, ακόμα και σε ορεινές περιοχές, δεν ήταν μεγάλες. Η μηχανή χωριζόταν στα βασικά της μέρη: πτερύγια, κλωβός και πύργος (σε δύο ή τρία τμήματα), τα οποία έτοιμα, συναρμολογούνταν επί τόπου. Τα μέγιστο μήκος σε μία τέτοια περίπτωση, δεν ξεπερνούσε τα 20μ. Ακόμα και στην περίπτωση που δεν υπάρχει οδικό δίκτυο, το κόστος κατασκευής ενός υποτυπώδους δρόμου, δεν αποτελούσε

δυσβάστακτο κόστος. Σήμερα, η τάση της αγοράς, οδηγεί σε μηχανές πολύ μεγαλύτερες, οπότε η μεταφορά έτοιμων προς συναρμολόγηση μερών, δεν είναι απλή ούτε ως προς τη μεταφορά τους ούτε ως προς τη διαδικασία ανέγερσης. Μεγάλα σε μήκος και βάρος αντικείμενα, απαιτούν οδικό δίκτυο με ανοικτές στροφές και ανθεκτικό οδόστρωμα, κάτι που δεν είναι προφανές. Επίσης, καλή οδική πρόσβαση θέλει και η μεταφορά στη θέση εγκατάστασης του κατάλληλου ανυψωτικού μηχανήματος. Αυτού του είδους τα προβλήματα, οδήγησαν την τρέχουσα εφαρμοσμένη έρευνα στην Ευρώπη, σε διαρρέσιμα πτερύγια που συγκολλούνται επί τόπου, αυτοανειργόμενες μηχανές κλπ. Από τεχνική και ερευνητική άποψη, τα θέματα αυτά, μόλις άνοιξαν. Χωρίς αμφιβολία, στο άμεσο μέλλον, θα βρίσκονται στην πρώτη γραμμή ενδιαφέροντος.

Στο ζήτημα των υλικών, τα ερωτήματα είναι πράγματι πολλά, όλα σχετιζόμενα με την τεχνολογία συνθέτων υλικών, που κατ' αποκλειστικότητα χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των πτερυγίων. Κατ' αρχήν, με σύνθετα υλικά είναι ανισότροπα με έντονα μη-γραμμική συμπεριφορά. Το γεγονός αυτό, καθιστά την εκτίμηση των χαρακτηριστικών τους, τόσο σε αντοχή όσο και σε κόπωση, ανακείμενο της τρέχουσας βασικής έρευνας. Σε εφαρμοσμένο επίπεδο, η ανάγκη για μείωση του κόστους κατασκευής, τροφοδοτεί συνεχώς την έρευνα για νέα, καλύτερα υλικά. Στην ίδια κατεύθυνση πιέζει άλλωστε και η τάση για αύξηση της ονομαστικής ισχύος των αιολικών μηχανών, οπότε από τα σημερινά πτερύγια των 25μ, θα πρέπει να περάσουμε σε πτερύγια, ακόμα και 50μ. Αρκεί ένας πρόχειρος υπολογισμός για να διαπιστωθεί ότι, ένα τόσο μεγάλο πτερύγιο, πιθανόν, να αντιμετωπίσει πρόβλημα στήριξης του ίδιου του βάρους. Απαντήσεις απλές δεν υπάρχουν. Η χρησιμοποίηση εξελιγμένων, αεροπορικού τύπου, υλικών, θα εκτάριζε το κόστος σε απαγορευτικά ύψη. Συνεπώς, τα περιθώρια έρευνας είναι μεγάλα. Ήδη, σε ολόκληρη την Ευρώπη, πολλές ομάδες εργάζονται στην κατεύθυνση αυτή, με πιο σημαντική αυτή του Πανεπιστημίου του Delft

στην Ολλανδία. Επίσης, σημαντική έρευνα διεξάγεται και από τις εταιρείες κατασκευής πτερυγίων, όπως η LM Glasfiber και η Aerpac.

Συναφές με το ζήτημα των υλικών, είναι και το ζήτημα κατασκευής κυρίως, των πτερυγίων. Αρχικά τα πτερύγια κατασκευάζονταν από τεχνίτες που "έχαζαν" το κάθε πτερύγιο χωριστά. Σε πολλές περιπτώσεις μία τέτοια διαδικασία είχε αποτέλεσμα μικροατέλειες και μικροδιαφορές. Όμως, το πιο σημαντικό μειονέκτημα ήταν ο χαμηλός ρυθμός παραγωγής. Σήμερα, η διαδικασία αυτή έχει αντικατασταθεί από την ρομποτική. Έτσι, πέραν του ότι εξασφαλίζεται υψηλή ποιότητα κατασκευής, η αυτοματοποιημένη κατασκευή των πτερυγίων, μείωσε σημαντικά το κόστος. Υπάρχει σημαντικό περιθώριο περαιτέρω εξέλιξης της διαδικασίας κατασκευής κυρίως σε ό,τι αφορά τον καθορισμό των καταλλήλων συνθηκών, που όπως είναι γνωστό, επηρεάζει καθοριστικά τις ιδιότητες των συνθέτων υλικών.

3.2.5 Αεροελαστική ανάλυση & πιστοποίηση.

Όπως σε όλες τις τεχνολογικές εφαρμογές, έτσι και στην περίπτωση των αολικών μηχανών, το ζήτημα της αντοχής και αξιοπιστίας, αποτελεί απόλυτο κριτήριο αποδοχής. Οι αολικές μηχανές κατασκευάζονται με προοπτική διάρκειας ζωής 20 ετών. Αυτό σημαίνει ότι, στη διάρκεια της ζωής της, η μηχανή θα πρέπει να αντιμετωπίσει χωρίς προβλήματα, όλες τις ενδεχόμενες αντιξοότητες που προκαλεί το φυσικό περιβάλλον, στο οποίο καλείται να λειτουργήσει. Αυτού του τύπου οι καταστάσεις ονομάζονται "ακραίες". Πέραν όμως της αντοχής στις μέγιστες πιθανές καταστάσεις καταπόνησης, στη διάρκεια λειτουργίας της, μία αολική μηχανή υπόκειται συστηματικά σε κόπωση, ως αποτέλεσμα της μεταβλητότητας των ανεμολογικών δεδομένων. Ως κοπωτικές καταστάσεις λειτουργίας χαρακτηρίζονται, η παραγωγή ενέργειας σε όλο το φάσμα λειτουργικών ταχυτήτων ανέμου, καθώς και οι περιπτώσεις κανονικής εκκίνησης και πέδησης (starts and stops). Η βασική πληροφορία που απαιτείται για τον προσδιορισμό της κόπωσης (ή ισοδύναμα της διάρκειας ζωής της μηχανής ή

καθ' ενός επί μέρους στοιχείου της), είναι το φάσμα φόρτισης (load spectrum).

Ο προσδιορισμός των ακραίων και κοπωτικών φορτίων σε αολικές μηχανές, βασίζεται σήμερα σε υπολογισμούς, απ' όπου προκύπτει και η ανάγκη αεροελαστικής ανάλυσης. Σ' αυτό συνηγορεί, ανάμεσα στ' άλλα, και το γεγονός ότι, πολλές από τις καταστάσεις όπου η συμπεριφορά μίας μηχανής θα πρέπει να επαληθευθεί, δεν είναι δυνατόν να αναπαραχθούν πειραματικά. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει ότι δεν χρειάζεται να γίνουν και εργαστηριακές δοκιμές. Για παράδειγμα, τα πτερύγια ανεμογεννητριών, ελέγχονται κατ' αρχήν με τη βοήθεια προσομοιώσεων στον υπολογιστή και στη συνέχεια, υποβάλλονται σε εργαστηριακές δοκιμές, που αναπαράγουν, τόσο τα ακραία φορτία όσο και τα κοπωτικά. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, οι δοκιμές χρησιμοποιούν τα φορτία, που η υπολογιστική διαδικασία ελέγχου παρήγαγε.

Οι αεροελαστικοί υπολογισμοί ελέγχου, εκτελούνται επί τη βάση διεθνώς παραδεκτών κανονισμών, που προβλέπουν μία σειρά προσομοιώσεων τόσο ακραίων, όσο και κοπωτικών καταστάσεων [30]. Τις λεπτομέρειες των προσομοιώσεων, καθορίζει το ανεμολογικό κλίμα, στο οποίο πρόκειται να λειτουργήσει η μηχανή. Οι κανονισμοί προβλέπουν 4 κλάσεις, με πιο "σκληρή" την κλάση I, που αντιστοιχεί σε μέση ετήσια ταχύτητα 10m/s.

Το σύστημα πιστοποίησης που ισχύει σήμερα, βασίζεται εν πολλοίς, στην εμπειρία από μηχανές που λειτουργούν σε επίπεδες τοπογραφίες. Η επέκταση σε περιοχές ανώμαλης τοπογραφίας απ' ενός και η εμπειρία από αολικά πάρκα, έχει καταγράψει ορισμένες αδυναμίες του συστήματος, γεγονός που έχει οδηγήσει στη διαδικασία αναθεώρησης του προτύπου. Τα ανοικτά ερωτήματα εντοπίζονται στην διατύπωση της κατάλληλης πιθανοτικής θεωρίας, που επιτρέπει το προσδιορισμό των ακραίων καταστάσεων, τις οποίες μπορεί να αντιμετωπίσει μία μηχανή, καθώς και στον αξιόπιστο τρόπο αναπαραγωγής του φάσματος φόρτισης. Επίσης, κενά έχουν παρατηρηθεί, στο τρόπο υπολογισμού της επί-

δρασης που έχει η αλληλεπίδραση μεταξύ των μηχανών ενός αολικού πάρκου, ερώτημα που έχει επανέλθει στην επικαιρότητα, με αφορμή την εγκατάσταση μεγάλων μονάδων στη θάλασσα.

Πέραν του πλασιού πιστοποίησης, σημαντικό ρόλο παίζουν, όπως είναι φυσικό και τα υπολογιστικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται. Ο αριθμός των ανεξάρτητων προσομοιώσεων, είναι της τάξης των 200, με τις μισές από αυτές να αντιστοιχούν σε πλήρεις προσομοιώσεις, δεκάλεπτης λειτουργίας της μηχανής. Ο όγκος των υπολογισμών είναι αρκετά υψηλός, ώστε να επιβάλλεται η χρησιμοποίηση, σχετικά απλών μεθόδων προσομοίωσης. Στη διαδικασία πιστοποίησης, αποκλειστικά χρησιμοποιούνται συνδυασμοί της θεωρίας στοιχείων πτερύγωσης, για το αεροδυναμικό μέρος και της θεωρίας δοκού για το ελαστικό. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι, μία δεκάλεπτη χρονοσειρά, διαρκεί στον υπολογιστή 30min, αν χρησιμοποιηθεί η θεωρία στοιχείων πτερύγωσης, ενώ ένα τριδιάστατο πρότυπο ελεύθερου ομόρου, εκκινάσει τον απαιτούμενο χρόνο στις 80ώρες. Βέβαια, αυτό δεν σημαίνει ότι πάντα θα χρησιμοποιούνται απλά εργαλεία για την πιστοποίηση. Το επόμενο βήμα, θα αφορά σε τριδιάστατα πρότυπα ελεύθερου ομόρου, για τα οποία υπάρχουν ενδείξεις ότι σε ορισμένες περιπτώσεις υπερτερούν.

Ένα από τα ζητήματα που επιβάλλουν λεπτομερέστερη και ακριβέστερη ανάλυση, είναι αυτό της αεροελαστικής ευστάθειας. Το πρόβλημα ανέκκυψε σχετικά πρόσφατα, σε πτερύγια 19μ, όπου διαπιστώθηκαν ρωγμές, λίγους μήνες μετά τη τοποθέτησή τους [31]. Οι αναλύσεις και οι έρευνες που ακολούθησαν, εντόπισαν ως γενεσιουργό αιτία τη δραματική μείωση της μηχανικής απόδοσης του υλικού των πτερυγίων, κατά τους χειμερινούς μήνες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η μικρή ή ακόμα και αρνητική αεροδυναμική απόδοση που προκύπτει σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης (ή ισοδύναμα σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου), οδηγεί σε αστάθεια. Έτσι, οι κατασκευαστές πτερυγίων υποχρεώθηκαν να καταφύγουν σε λύσεις ανάγκης, όπως είναι η τοπο-

θέτηση stall-strips. Πρόκειται για τριγωνικής διατομής στοιχεία, που τοποθετούνται κατά μήκος του χείλους πρόπτωσης και έχουν ως αποτέλεσμα, την αύξηση της αεροδυναμικής απόσβεσης, που όμως συνοδεύεται από δραματική μείωση των αεροδυναμικών συντελεστών. Χωρίς αμφιβολία, μία λιγότερο καταστροφική, για την αεροδυναμική, τεχνική αναίρεσης της αεροελαστικής αστάθειας, αποτελεί ζητούμενο με εξαιρετικό βιομηχανικό ενδιαφέρον.

3.2.6 Η επίδραση της τοπογραφίας.

Συναφές με το ζήτημα της αξιοπιστίας και πιστοποίησης μηχανών, είναι και η κατάλληλη αποτίμηση διαφόρων εξωτερικών παραγόντων, με πιο σημαντική αυτή της τοπογραφίας, που όπως δείχνουν συστηματικές μετρήσεις φορτίων σε μηχανές που λειτουργούν σε ορεινές περιοχές, επιβαρύνει σημαντικά τις καταπονήσεις. Το σημερινό επίπεδο γνώσεων, σχετικά με την επίδραση της τοπογραφίας, βρίσκεται στο στάδιο της καταγραφής και αποτίμησης απ' ενός των μετρήσεων και απ' ετέρου συστηματικών παραμετρικών υπολογιστικών αναλύσεων. Στόχος όλης αυτής της δραστηριότητας, είναι να διαπιστωθούν οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί που αυξάνουν την καταπόνηση, ώστε στη συνέχεια, η όλη πληροφορία, να αποτυπωθεί στο πρότυπο και στην διαδικασία πιστοποίησης.

3.2.7 Η προοπτική των μεγάλων μηχανών.

Η σημερινή προοπτική για το άμεσο μέλλον, εστιάζεται στην κατασκευή πραγματικά μεγάλων αιολικών μηχανών ονομαστικής ισχύος 3-4MW. Στο παρελθόν, υπήρξαν τέτοια παραδείγματα, με πιο γνωστό αυτό του Gronian. Από τότε πολλά έχουν αλλάξει. Το επίπεδο γνώσεων είναι σημαντικά εμπλουτισμένο, ώστε η επιτυχία ενός τέτοιου εγχειρήματος, να φαίνεται δυνατή. Ήδη στη Δανία εγκαθίσταται μηχανές 2MW, ενώ έχουν ξεκινήσει οι μελέτες σχεδίασης και κατασκευής ακόμα μεγαλύτερων μηχανών. Τα ανοικτά ερωτήματα στην κατεύθυνση αυτή, είναι πολλά.

Ξεκινώντας από τον τύπο της μηχανής, το ανεξέλεγκτο της απώλειας στήριξης, σε συνδυασμό με τη σημαντι-

κή αύξηση των αεροδυναμικών φορτίων λόγω μεγέθους της μηχανής, έχει δώσει σαφές προβάδισμα σε τεχνικές ελέγχου της ισχύος, με μεταβολή του βήματος. Επίσης, όλοι οι βασικοί κατασκευαστές προχωρούν στη υιοθέτηση μεταβλητών στροφών. Έτσι, η πρώτη ομάδα ερωτημάτων, αφορά ζητήματα ελέγχου (μάλιστα βέλτιστου ελέγχου ως προς και τις επιδόσεις και ως προς την καταπόνηση) και προκύπτει από τον συνδυασμό των μεταβλητών στροφών και της μεταβολής βήματος.

Στη συνέχεια, πολλά είναι τα ερωτήματα που σχετίζονται με την σχεδίαση και κατασκευή των πτερυγίων. Μήκη της τάξης των 50 και 60m, ξεπερνούν κατά πολύ το σημερινό επίπεδο γνώσεων και ως προς την επιλογή των υλικών και ως προς τη διαδικασία κατασκευής.

Τρίτο, εξ' ίσου σημαντικό ερώτημα, είναι αυτό της θεμελίωσης του πύργου στήριξης, ειδικά στη περίπτωση θαλάσσιων εφαρμογών. Μέχρι σήμερα, η τεχνική που ακολουθείται, συνίσταται στη σφήνωση του πύργου στον πυθμένα της θάλασσας. Για μεγαλύτερα μεγέθη οι υπολογισμοί δείχνουν ότι αυτή η τεχνική θα πρέπει να αντικατασταθεί από τριπλή στήριξη σε σχήμα τριπόδου. Και σε αυτό το πεδίο υπάρχει σημαντικό περιθώριο έρευνας, καθώς μία ενδεχόμενη μείωση του κόστους θεμελίωσης, θα έδινε εξαιρετική ώθηση στις θαλάσσιες εφαρμογές της αιολικής ενέργειας.

Τελευταίο αλλά επίσης σημαντικό ζήτημα, είναι η διαγνωστική και η παρακολούθηση των μηχανών από απόσταση. Στον τομέα της αιολικής ενέργειας μέχρι σήμερα δεν είχε προκύψει η ανάγκη ανάπτυξης διαγνωστικών συστημάτων. Και το μέγεθος των μηχανών παρέμενε μικρό, ώστε η ανάλυση επένδυση να μην ήταν συμφέρουσα, αλλά κυρίως η πρόσβαση στις μηχανές, δεν επηρεαζόταν από καιρικές συνθήκες.

Τώρα όμως που τα μεγέθη μεγαλώνουν και άρα το μέγεθος της επένδυσης, λόγοι εξασφάλισης επιβάλλουν την προσθήκη εξελιγμένων διαγνωστικών συστημάτων. Επίσης, στην περίπτωση θαλασσιών εφαρμογών, η δυσκολία πρόσβασης ενισχύει την ανάγκη αυτή κατά πολύ. Εδώ το πεδίο

είναι σχετικά παρθένο, με πολύ μεγάλα περιθώρια ανάπτυξης.

3.3. Αιολικά Πάρκα.

Ο όρος "αιολικά πάρκα", έχει επικρατήσει ως προσδιοριστικό μίας συστοιχίας αιολικών μηχανών, που τοποθετούνται στην ίδια περιοχή. Αιολικά πάρκα τοποθετούνται σε περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό, με σκοπό την καλύτερη εκμεταλλεύση του. Ο βασικός περιοριστικός παράγοντας σε ένα αιολικό πάρκο, είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ παρακείμενων ανεμογεννητριών, που στη βιβλιογραφία προσδιορίζεται από τον όρο "επιδράσεις ομόρρου" (wake effects).

Οι ανεμογεννήτριες παράγουν ενέργεια απορροφώντας μέρος της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Η διαδικασία αυτή, έχει αποτέλεσμα, κατ' αρχήν τη μείωση της μέσης ταχύτητας του ανέμου στα κατάντα της μηχανής. Τοποθετώντας λοιπόν μία δεύτερη μηχανή στο ομόρρο της πρώτης, περιμένουμε μείωση της παραγόμενης ενέργειας, που εξαρτάται βέβαια από την απόσταση που χωρίζει τις δύο μηχανές. Πέραν όμως της μείωσης της ενεργειακής απόδοσης, αυξάνεται και η τύρβη της ροής που προσπίπτει στη δεύτερη μηχανή, με αποτέλεσμα την αύξηση της κόπωσης. Ο συνδυασμός της μείωσης της ενεργειακής απόδοσης και της αύξησης των καταπονήσεων, μετατρέπει το πρόβλημα της σχεδίασης ενός αιολικού πάρκου, σε ένα πολύπλοκο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Βασικό στοιχείο για τη σωστή σχεδίαση αιολικού πάρκου, είναι η αξιόπιστη πρόλεξη του πεδίου ροής στον ομόρρο μίας ανεμογεννήτριας.

Στην κατεύθυνση αυτή έχουν προταθεί δύο κατηγορίες προτύπων: τα κληματατικά που βασίζονται στη θεωρία δεσμών και τα συνεκτικά τύπου πρότυπα. Τα κληματατικά πρότυπα, αν και απλοϊκά, έχουν το σημαντικό πλεονέκτημα του εξαιρετικά χαμηλού υπολογιστικού κόστους. Έτσι προσφέρονται για πρακτικούς υπολογισμούς. Από την άλλη, τα συνεκτικά πρότυπα υπερτερούν σαφώς ως προς την φυσική λεπτομέρεια που ενσωματώνουν, υστερούν όμως σημαντικά, ως προς το υπολογιστικό κόστος, ιδιαίτερα στην περίπτωση ενός αιολικού πάρκου.

Πέραν των ερευνών πάνω στην

ανάπτυξη μεθόδων πρόλεξης, σημαντική στο θέμα της σχεδίασης αιολικών πάρκων είναι και η συμβολή των πειραμάτων.

Υπάρχουν συστηματικές μετρήσεις, τόσο σε πραγματικά αιολικά πάρκα, όσο και σε αεροδυναμικές σήραγγες. Δύο είναι τα πιο σημαντικά πειράματα πλήρους κλίμακας: το πείραμα στο πάρκο του Sexbiegum στην Ολλανδία και το πείραμα στο πάρκο του Alsveik στη Σουηδία, όπου οι καταγραφές είναι λεπτομερέστερες. Σε αεροδυναμική σήραγγα υπάρχουν πολλά πειράματα. Τα πιο σημαντικά είναι: το πείραμα των Garrad Hassan στη Μεγάλη Βρετανία, όπου χρησιμοποιήθηκαν πραγματικοί υπό κλίμακα δρομείς [32], και το πείραμα που πρόσφατα διεξήχθη στο ΕΜΠ, χρησιμοποιώντας διάτρητους δίσκους [33].

Λίγο πολύ, για επίγειες εφαρμογές, το θέμα των επιδράσεων ομόρρου σε αιολικά πάρκα, έχει κλείσει. Τα αποτελέσματα των σχετικών ερευνών που έλαβαν χώρα στο παρελθόν, έχουν κωδικοποιηθεί σε έτοιμη τεχνογνωσία που χρησιμοποιείται στη πράξη. Έτσι, το ενδιαφέρον της έρευνας για τις επιδράσεις ομόρρου σε αιολικά πάρκα, εστιάζεται σήμερα στις θαλάσσιες εφαρμογές. Το ειδοποιό στοιχείο στην περίπτωση αυτή, είναι η χαμηλή τύρβη, που έχει αποτέλεσμα μικρό βαθμό ανάμιξης και άρα, την σε μεγάλη απόσταση διατήρησης του ομόρρου.

3.4. Η Διασύνδεση με το Δίκτυο.

Οι αιολικές μηχανές παράγουν ενέργεια, εφ' όσον το επιτρέπει η ένταση του ανέμου στην περιοχή εγκατάστασης. Όμως και στη περίπτωση παραγωγής, η προσφερόμενη ενέργεια από μία ανεμογεννήτρια, καθορίζεται από τον άνεμο και όχι το φορτίο. Δηλαδή, δεν υπάρχει προσαρμοστικότητα. Αυτό σημαίνει ότι, από τη φύση της η λειτουργία μίας αιολικής μονάδας, θα επάγει στο δίκτυο ταλαντώσεις που βασικά θα προσδιορίζονται από τη μεταβλητότητα του ανέμου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι ταλαντώσεις αυτές, μπορεί να είναι μεγάλες. Για παράδειγμα σε περίπτωση αύξησης της μέσης ταχύτητας του ανέμου πέραν της μέγιστης επιτρεπόμενης, θα οδηγήσει τις μηχανές συνολικά σε αποσύνδεση.

Ανάλογες ταλαντώσεις μπορεί να προκύψουν σε περιπτώσεις που η αιολική μονάδα παράγει περισσότερη από την απαιτούμενη ενέργεια.

Αυτού του τύπου τα προβλήματα έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη διαδικασιών προστασίας του δικτύου, που βασικά λειτουργούν ως φίλτρο που μειώνει τις ταλαντώσεις. Παράδειγμα τέτοιας διαδικασίας, είναι η προσθήκη ενός ενδιάμεσου στοιχείου, που μπορεί να είναι είτε ένα υδροηλεκτρικό έργο [34], είτε μία μονάδα αφαλάτωσης, είτε μία μονάδα αποθήκευσης της ενέργειας. Πέραν όμως αυτού του τύπου παρεμβάσεων, εξαιρετικό ενδιαφέρον παρουσιάζει και η δημιουργία "έξυπνων" διαχειριστικών διαδικασιών, ώστε να βελτιστοποιείται η διείσδυση της αιολικής μονάδας στο δίκτυο χωρίς να δημιουργεί προβλήματα [35]. Στην κατεύθυνση αυτή, εξαιρετικής σημασίας είναι η ανάπτυξη μηχανών μεταβλητών στροφών [36].

4. Επισκόπηση των βασικών αποτελεσμάτων της ελληνικής ερευνητικής δραστηριότητας.

Ακολουθώντας τον χωρισμό, σε πεδία ερευνητικού ενδιαφέροντος, της προηγούμενης παραγράφου, στη συνέχεια παρουσιάζουμε τα σημαντικότερα ερευνητικά αποτελέσματα, από ελληνικής πλευράς.

4.1. Το αιολικό δυναμικό.

Η ελληνική συμβολή εστιάζεται στην ανάπτυξη εξελιγμένων μεθόδων πρόλεξης του πεδίου ροής του ανέμου, πάνω από ανώμαλη τοπογραφία. Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύχθηκαν τρεις νέες τεχνικές:

- Μία βασισμένη στη λύση των τρισδιάστατων τυρβωδών εξισώσεων Navier Stokes, από τους Γ. Μπεργελέ και Α. Θεοδωρακάκο [37]. Η πρωτοτυπία της μεθόδου, έγκειται στη χρησιμοποίηση πολλαπλών πλεγμάτων διαφορετικής πυκνότητας. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατόν να καλυφθεί πολύ μεγαλύτερη έκταση, σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνικές. Το πυκνότερο πλέγμα καλύπτει την περιοχή ενδιαφέροντος, ενώ, καθώς απομακρυνόμαστε απ' αυτή, χρησιμοποιούνται πλέγματα όλο ένα και αραιότερα. Η διάσταση του υπολογιστικού κελιού στην περιοχή ενδιαφέροντος, μπορεί να φτάσει

τα 30-50μ, που για μία τυπική μηχανή 600kW, αντιστοιχεί σε μία διάμετρο.

- Μία βασισμένη στη θεωρία του οριακού στρώματος από τους Π. Χαβιαρόπουλο και Δ. Δουβίκα [38]. Η πρωτοτυπία της μεθόδου, έγκειται στη χρησιμοποίηση κατανομών ταχύτητας (profiles), ειδικά κατασκευασμένων για ατμοσφαιρικές ροές πάνω από ανώμαλη τοπογραφία. Πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής, σε σχέση με τις συνεκτικές, είναι το σημαντικά χαμηλότερο υπολογιστικό κόστος.

- Μία δυναμική από τους Σ. Βουτινά και Π. Χασαπογιάννη [39]. Η πρωτοτυπία της μεθόδου, έγκειται στη χρησιμοποίηση πολλαπλών κλιμάκων που επιτρέπουν την κάλυψη μεγάλης έκτασης με εξαιρετικά πυκνό πλέγμα, που μπορεί να φτάσει τα 500.000 επιφανειακά στοιχεία.

Πρόκειται για εξαιρετικά γρήγορη μέθοδο, που μπορεί να υποδείξει τις καλύτερες θέσεις μίας ευρύτερης περιοχής.

4.2. Η αιολική μηχανή.

4.2.1 Αεροδυναμική ανάλυση.

Στο ζήτημα της αεροδυναμικής, η ελληνική συμβολή, όπως αποτυπώνεται από τα αποτελέσματα της ομάδας ΚΑΠΕ-ΕΜΠ, είναι πολύπλευρη και πλούσια. Πιο συγκεκριμένα:

- Αναφορικά με την προσομοίωση του ομόρρου ανεμογεννήτριας, το ΕΜΠ ανέπτυξε τον κώδικα GENUVP [40]. Πρόκειται για το μόνο ολοκληρωμένο υπολογιστικό εργαλείο ελεύθερου ομόρρου, με δυνατότητα πλήρων αεροελαστικών υπολογισμών. Για την προσομοίωση της αποκόλλησης, έχει ενσωματωθεί στον κώδικα, ένα πρότυπο διπλού ομόρρου, που είναι επίσης πρωτότυπο. Βέβαια, ο GENUVP παραμένει ένας κώδικας ουσιαστικά μη-συνεκτικός, γεγονός που περιορίζει τις δυνατότητές του σε μηχανές μεταβλητού βήματος.

- Στην κατεύθυνση αναβάθμισης του GENUVP, αναπτύχθηκε στο ΕΜΠ ο κώδικας FOIL2W [41]. Πρόκειται για διδιάστατο κώδικα προσομοίωσης μη-μόνιμων ροών γύρω από αεροτομή, που βασίζεται στην ισχυρή σύζευξη της μη-συνεκτικής ροής με το συνεκτικό οριακό στρώμα. Η πρωτοτυπία της μεθόδου, έγκειται στη δυνατότητα αξιόπιστων υπολογισμών, ακόμα

Π Υ Ρ Φ Ο Ρ Ο Σ 2 0 0 2

και αποκολλημένων ροών. Η επέκταση της μεθόδου σε τρισδιάστατες ροές, βρίσκεται αυτή τη στιγμή σε ανάπτυξη.

• Στην κατεύθυνση ολοκληρωμένων αντιμετώπισης του αεροδυναμικού προβλήματος, αναπτύχθηκε μία σειρά συνεκτικών κωδικών, που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων. Η προσπάθεια αυτή ξεκίνησε το 1997 με τη πολύ σημαντική εργασία του Π. Χαβιαρόπουλου [42], όπου αναλύονται τα τρισδιάστατα χαρακτηριστικά της ροής σε περιστρεφόμενα πτερύγια. Χρησιμοποιήθηκε ένας ψευδο-τρισδιάστατος συνεκτικός κώδικας με βάση το πρότυπο κ-ε. Μέσω μίας παραμετρικής ανάλυσης, η εργασία καταλήγει να προτείνει συγκεκριμένες διορθώσεις των διδιάστατων αεροδυναμικών χαρακτηριστικών, που χρησιμοποιούνται στους αεροελαστικούς υπολογισμούς. Οι διορθώσεις αυτές είναι σήμερα ευρέως αποδεκτές από τη βιομηχανία. Η προσπάθεια συνεχίστηκε από το ΕΜΠ, που ανέλαβε στα πλαίσια της ευρύτερης συνεργασίας με το ΚΑΠΕ, την ανάπτυξη εξελιγμένων τρισδιάστατων κωδικών. Βάση των ερευνητικών δραστηριοτήτων του ΕΜΠ, απετέλεσε ο κώδικας NS2D [43]. Πρόκειται για διδιάστατο κώδικα που επιλύει τις μέσες τριβώδεις εξισώσεις Navier-Stokes. Το πιο σημαντικό στοιχείο στο κώδικα αυτό, είναι η ενσωμάτωση του προτύπου τύρβης των Spalart-Allmaras. Πρόκειται για το πλέον ενδεδειγμένο πρότυπο για αεροδυναμικές εφαρμογές, όπως έδειξε η συστηματική διερεύνηση μίας σειράς προτύπων, όπως το κ-ε και το κ-ω. Στη συνέχεια, ο κώδικας NS2D, επεκτάθηκε σε ψευδο-τρισδιάστατο (NS2.5D), με στόχο την κατ' αρχήν διερεύνηση των τρισδιάστατων χαρακτηριστικών της ροής σε περιστρεφόμενο πτερύγιο και σε πλήρως τρισδιάστατο (NS3D). Ακόμα, ενσωματώθηκαν τεχνικές πολλαπλών πλεγμάτων (multi-block techniques), τόσο επικαλυπτόμενων (overlapping) όσο και επαπτόμενων (face-to-face). Ειδικά στην τρισδιάστατη εκδοχή, αναπτύχθηκε μία υβριδική μεθοδολογία, που συζευγνύει τους συνεκτικούς υπολογισμούς κοντά στο πτερύγιο, με τους υπολογισμούς ελεύθερου ορόρου του GENUVP [44].

Πέραν όμως των αποτελεσμάτων, είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί και το πλαίσιο μέσα στο οποίο παρήχθησαν. Κατ' αρχήν, υπάρχει σταθερή συμμετοχή της ομάδας ΚΑΠΕ-ΕΜΠ σε όλα τα ερευνητικά έργα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, σε θέματα αεροδυναμικής, από τις αρχές της δεκαετίας του '90 μέχρι σήμερα [45-51]. Σε δύο απ' αυτά τα έργα, το NEWDESI και το VISCEL, τον συντονισμό είχε το ΕΜΠ και το ΚΑΠΕ αντίστοιχα. Απ' αυτά, το μεν πρώτο αφορούσε στην ανάπτυξη μεθόδων ελεύθερου ορόρου, ενώ το δεύτερο αφορούσε στην ανάπτυξη συνεκτικών. Σήμερα υπάρχουν διεθνώς, βασικά, τέσσερις συνεκτικοί τρισδιάστατοι κώδικες για ανεμογεννήτριες, ένας από τους οποίους είναι ελληνικός. Ο κώδικας GENUVP είναι ο μόνος αναγνωρισμένος κώδικας ελεύθερου ορόρου για ανεμογεννήτριες, γεγονός που προσέλλυσε το ενδιαφέρον ξένων ερευνητικών κέντρων. Τέλος, όπως όλα δείχνουν, το επόμενο διεθνές ερευνητικό πρόγραμμα του διεθνούς οργανισμού IEA σε αεροδυναμική ανεμογεννητριών, θα συντονιστεί από το ΚΑΠΕ.

4.2.2 Αεροδυναμική σχεδίαση.

Στον τομέα της αεροδυναμικής σχεδίασης, η ελληνική πλευρά παρακολουθεί στενά τις εξελίξεις στο διεθνή χώρο, έχοντας στο ενεργητικό της τρία σημαντικά αποτελέσματα.

Το πρώτο, αφορά στη σχεδίαση μίας νέας γενιάς αεροτομών χαμηλής αντίστασης, ειδικά για ανεμογεννήτριες [26]. Προς επιβεβαίωση του σχεδιασμού, έγιναν λεπτομερείς μετρήσεις στην αεροδυναμική σήραγγα του ΕΜΠ [52]. Οι νέες αυτές αεροτομές, έχουν χρησιμοποιηθεί στα τρία πτερύγια που σχεδίασε το ΕΜΠ, για λογαριασμό της εταιρείας Γεωβιολογική ΑΒΕΕ, στα πλαίσια του προγράμματος ΕΠΕΤ-II της ΓΓΕΤ. Το μεγαλύτερο από αυτά, μήκους 19μ, έχει δοκιμαστεί σε μηχανές. Ήδη στο ΕΜΠ προχωρούμε στην περαιτέρω βελτίωσή τους. Στην κατεύθυνση αυτή, χρησιμοποιείται μία γενετικού τύπου διαδικασία βελτιστοποίησης, που πιστεύουμε ότι θα οδηγήσει σε αεροτομές ανίσθητες στη τραχύτητα που δημιουργούν οι επικαθίσεις στα πτερύγια, από έντομα και σκόνη.

Το δεύτερο αποτέλεσμα, αφορά στην ανάπτυξη εξελικτικών μεθόδων σχεδίασης πτερυγίων, που σε σύγκριση με τις κλασικές μεθόδους, δεν εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα. Η μέθοδος αυτή, χρησιμοποιήθηκε για τη σχεδίαση των τριών πτερυγίων που προαναφέραμε, αποδίδοντας μία αύξηση της τάξης του 5% [53].

Το τρίτο, αφορά στην έρευνα γύρω από την επίδραση που έχει η τοποθέτηση στροβιλογεννητριών, σε πτερύγια ανεμογεννητριών με στόχο την καθυστέρηση της αποκόλλησης. Στο θέμα αυτό, έγινε διεξοδική παραμετρική ανάλυση, με βάση το συνεκτικό κώδικα NS3D, στα πλαίσια ερευνητικού έργου της ΕΕ, με συμμετοχή των εταιρειών ECOTECHNIA και LM, καθώς και του City University, που είχε αναλάβει τα πειράματα. Πρόκειται για την μόνη αριθμητικού τύπου ανάλυση στο θέμα [54].

4.2.3 Αερακουστική.

Στη θεματική της Αερακουστικής, το μεν πειραματικό μέρος των ερευνών ανέλαβε το ΚΑΠΕ με συστηματικές μετρήσεις σε μηχανές, το δε θεωρητικό-υπολογιστικό μέρος, ανέλαβε το ΕΜΠ, με συμβολή σε τρία επίπεδα. Κατ' αρχήν, μαζί, το Πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης, ανέπτυξαν τους πρώτους επιτυχημένους κώδικες πρόλεξης αεροδυναμικού θορύβου από μεμονωμένες μηχανές [27]. Στη συνέχεια, το ΕΜΠ συντόνισε ένα ευρωπαϊκό ερευνητικό έργο, που είχε στόχο, την διερεύνηση του θορύβου από αιολικά πάρκα [29]. Στα πλαίσια αυτά αναπτύχθηκαν οι πρώτες πλήρως υπολογιστικές τεχνικές διάδοσης ακουστικών κυμάτων σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον, στον τομέα της αιολικής ενέργειας [55-59].

4.2.4 Σχεδίαση αιολικών μηχανών.

Στον τομέα αυτό, υπάρχει κατ' αρχήν η σχεδίαση μηχανών μεταβλητών στροφών, που πρώτος ο ομότιμος καθηγητής Ν.Αθανασιάδης εισήγαγε στη δεκαετία του '80 και που αποτέλεσε αντικείμενο συστηματικής έρευνας στο ΕΜΠ [60]. Χρειάστηκε να περάσουν αρκετά χρόνια μέχρις ότου οι ιδέες του συγκεκριμενοποιηθούν, σε μία εμπορική μηχανή. Στο μεσοδιάστημα, πολλοί ευρωπαίοι κατασκευαστές προχώρησαν στη σχεδίαση και κατα-

σκευή μηχανών μεταβλητών στροφών, δίνοντας στη συγκεκριμένη τεχνολογία σαφές προβάδισμα. Όμως και με αυτά τα δεδομένα, το γεγονός ότι το πρωτότυπο της ελληνικής μηχανής ανηγέρθη και μετρήθηκε εντός του 2001, καλύπτει σημαντικό μέρος της υστέρησης που έχουμε, σε σχέση με το διεθνή ανταγωνισμό.

Σημαντική είναι επίσης η ερευνητική και κατασκευαστική δραστηριότητα στον τομέα των πτερυγίων. Ήδη, από τα μέσα της δεκαετίας του '90, το Πανεπιστήμιο Πατρών έχει δραστηριοποιηθεί στη δομική σχεδίαση και κατασκευή πτερυγίων, σε συνεργασία με την εταιρεία Γεωβιολογική και το ΚΑΠΕ, όπου δοκιμάζονται τα πτερύγια [61]. Οι τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί, βασίζονται στην χρήση εξελιγμένων υπολογιστικών εργαλείων, που δίνουν τη δυνατότητα λεπτομερούς τρισδιάστατης δομικής ανάλυσης. Η εξωτερική γεωμετρία του πτερυγίου καθώς και η προβλεπόμενη φόρπση του, παρέχεται από το ΕΜΠ. Ήδη έχει ολοκληρωθεί με επιτυχία η σχεδίαση και κατασκευή τριών μεγεθών πτερυγίων, όλα ελληνικής κατασκευής, από τα οποία, αυτό των 19μ, έχει πιστοποιηθεί σε αντοχή και πρόκειται σύντομα να δοκιμαστεί στην Ισπανία σε μηχανή της εταιρείας ECOTECHNIA.

Στην ίδια γραμμή εργασίας, έχει ξεκινήσει ένα ακόμα σημαντικότερο έργο της ΕΕ, με συντονιστή το ΚΑΠΕ. Φέρει την κωδική ονομασία DAMP-BLADE και έχει στόχο, την ανάπτυξη νέου τύπου πτερυγίων με αυξημένη δομική απόσβεση. Στο έργο, σημαντικό μέρος της ανάπτυξης, έχει αναλάβει το Πανεπιστήμιο Πατρών ενώ η Γεωβιολογική ΑΒΕΕ, πρόκειται μαζί με την ολλανδική ΑΕΡΡΑC, να κατασκευάσουν τα νέου τύπου πτερύγια.

4.2.5 Αεροελαστική ανάλυση και πιστοποίηση.

Και στον τομέα αυτό, η ελληνική συμβολή και παρουσία είναι σημαντική. Από πλευράς υπολογιστικών εργαλείων, η ομάδα ΚΑΠΕ-ΕΜΠ, ανέπτυξε έναν ολοκληρωμένο αεροελαστικό κώδικα [62]. Ο κώδικας αυτός, έχει ήδη πιστοποιηθεί μέσω συστηματικών συγκρίσεων με πειραματικά δεδομένα και αποτελεί το βασικό εργαλείο που

χρησιμοποιεί το ΚΑΠΕ, ως πιστοποιητικός οργανισμός. Σήμερα, συγκαταλέγεται μεταξύ των βασικών Ευρωπαϊκών κωδικών, όπως προκύπτει και από τη συμμετοχή της ομάδας στο πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης VEWTC: Verification of European Wind Turbine Design Codes, με τη συμμετοχή της Δανίας της Μεγάλης Βρετανίας, της Ολλανδίας και της Σουηδίας [63]. Επίσης, η ελληνική πλευρά, διαθέτει τον μόνο αεροελαστικό κώδικα, που βασίζεται σε τρισδιάστατο αεροδυναμικό πρότυπο. Πρόκειται για τον κώδικα ελεύθερου ομίχρου GENUVP, που επίσης συμμετέχει στο πρόγραμμα VEWTC.

Στο πειραματικό πεδίο, το ΚΑΠΕ έχει αναπτύξει μία από τις πληρέστερες και εκτενέστερες βάσεις δεδομένων, με αεροελαστικές μετρήσεις, δηλαδή συνδυασμένη μέτρηση του ανέμου και των φορτίων της μηχανής. Αξίζει να σημειωθεί ότι, το ΚΑΠΕ είναι μέλος του MEASNET. Πρόκειται για την ομάδα των μόνων ευρωπαϊκών κέντρων, των οποίων οι μετρήσεις αναγνωρίζονται. Επιπλέον, στο ΚΑΠΕ λειτουργεί δοκιμαστήριο πτερυγίων, όπου μπορούν να πιστοποιηθούν πτερύγια. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι το Εργαστήριο Ανεμογεννητριών του ΚΑΠΕ, είναι από τα πρώτα και από τα λίγα που διαθέτουν πιστοποιητικό EN-450001.

Σημαντική επιτυχία και στοιχείο αναγνώρισης για την χώρα, αποτελεί η συμμετοχή του ΚΑΠΕ στις ομάδες εργασίας, για την αναθεώρηση των κανονισμών IEC 61400-1 (Safety Requirements) και -12 (Power performance) της IEC (International Electrotechnical Committee), και στις αντίστοιχες Ευρωπαϊκές (BTTF και CENELEC). Να σημειωθεί ότι βάση για την αναθεώρηση του IEC 61400-1, αποτελεί η εργασία του Π. Χαβιαρόπουλου [64], όπου παρουσιάζεται μία ολοκληρωμένη πιθανοτική ανάλυση των ακραίων καταστάσεων, που θα μπορούσε να αντιμετωπίσει μία μηχανή. Και το στοιχείο αυτό είναι ενδεικτικό της ευρείας αναγνώρισης που έχουν οι ελληνικές ερευνητικές επιδόσεις.

4.2.6 Η επίδραση της τοπογραφίας.

Πρόκειται για μία πλευρά της αιολικής ενέργειας, με εξαιρετικό ενδια-

φέρον για την Ελλάδα. Η ελληνική πλευρά, έχει κατορθώσει στο διάστημα των προηγούμενων οκτώ χρόνων, να προσελκύσει το σύνολο σχεδόν των ερευνητικών έργων της ΕΕ, σε θέματα που σχετίζονται με τις εφαρμογές της αιολικής ενέργειας, σε ορεινές περιοχές.

Το 1994, ξεκίνησαν δύο σημαντικά έργα. Το πρώτο, με συντονιστή τον Δ. Λάλα, είχε στόχο την βελτίωση των τεχνικών πρόλεξης των ανεμολογικών χαρακτηριστικών σε περιοχές με ανώμαλη τοπογραφία, όπου από ελληνικής πλευράς, ξεκίνησε η ανάπτυξη των κωδικών πρόλεξης αιολικού δυναμικού. Το δεύτερο, γνωστό στην Ευρώπη με το κωδικό όνομα MOUNTURB [9], με συντονιστή τον Α. Φραγκούλη, είχε στόχο την συστηματική μέτρηση των φορτίων σε μηχανές, που λειτουργούν σε ορεινές περιοχές. Στο έργο αυτό, δόθηκε η ευκαιρία δημιουργίας μίας συστηματικής βάσης πειραματικών δεδομένων, ενώ ξεκίνησε η ανάπτυξη των αεροελαστικών κωδικών. Ως συνέχεια των έργων αυτών, πάλι με συντονιστή τον Α. Φραγκούλη, ανέληφθη ένα ακόμα σημαντικό έργο το COMTER ID [10] που εδραίωσε το προβάδισμα της ελληνικής πλευράς στο ζήτημα της λειτουργίας ανεμογεννητριών σε ανώμαλη τοπογραφία. Στα πλαίσια αυτών των έργων:

- Το ΚΑΠΕ εμπλότισε σε σημαντικό βαθμό τη βάση δεδομένων του, με μετρήσεις φορτίων, ώστε να θεωρείται διεθνώς ως μία από τις βασικές πηγές πειραματικών δεδομένων. Ιδιαίτερα σημαντικές ήταν οι συνδυασμένες μετρήσεις ανέμου και φορτίων που έγιναν στο σταθμό του Λαυρίου. Η προσπίπτουσα ροή μετρήθηκε με μία συστοιχία ενέντα ανεμομέτρων, που κάλυπταν ολόκληρη την επιφάνεια του δρομέα. Σημειώνεται ότι μόνο δύο τέτοιου τύπου πειράματα έχουν γίνει διεθνώς: αυτό του ΚΑΠΕ και αυτό του NREL στις ΗΠΑ.

- Το ΕΜΠ προχώρησε σε μία συστηματική παραμετρική ανάλυση της επίδρασης της τοπογραφίας στην αντοχή και κόπωση ανεμογεννητριών, προσδιορίζοντας ποσοτικά το βαθμό συνεισφοράς κάθε μίας από τις επί μέρους παραμέτρους. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η επίδραση της έντασης

της τύρβης, των κλιμάκων μήκους, της χωρικής συσχέτισης, της κλίσης του εδάφους, της απόκλισης της ροής, του τρισδιάστατου χαρακτήρα της ροής κ.α. [65, 66].

Το τρίτο κατά σειρά έργο, πάντα με συντονιστή το ΚΑΠΕ, είναι το ADAPTURB [67] που βρίσκεται σε εξέλιξη και έχει στόχο τη συστηματοποίηση της τεχνολογίας, ειδικά για μηχανές που λειτουργούν σε περιοχές με ανώμαλη τοπογραφία, ώστε να καταλήξει στην μείωση του κόστους και συνακόλουθα, στην περαιτέρω ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας σε χώρες ορεινές, όπως η Ελλάδα.

4.2.7 Η προοπτική των μεγάλων μηχανών.

Και στον τομέα αυτό, η ελληνική παρουσία είναι σημαντική. Με συντονιστή το ΚΑΠΕ και τη συμμετοχή από Ελληνικής πλευράς του Πανεπιστημίου Πατρών, του ΕΜΠ και της Γεωβιολογικής, την 1/1/2001, ξεκίνησε ένα σημαντικό ερευνητικό έργο της ΕΕ, που έχει στόχο, την σχεδίαση και κατασκευή μίας μηχανής 1MW, ειδικά για ορεινές περιοχές. Στο έργο αυτό, πρόκειται να δοκιμαστεί το σύνολο των τεχνικών ανάλυσης και σχεδίασης, που έχουν αναπτυχθεί στην Ελλάδα. Επίσης, θα αναπτυχθούν νέες τεχνικές, όπως τα διααρτούμενα περύγια, η διαδικασία αυτοανέγερσης κ.α. Το πρωτότυπο θα κατασκευάσει η ισπανική εταιρεία MADE. Η ελληνική πλευρά έχει αναλάβει σημαντικό μέρος της σχεδίασης, ενώ τα περύγια που θα χρησιμοποιηθούν θα είναι ελληνικά.

Εξ' ίσου σημαντική είναι και η συμμετοχή της ομάδας ΚΑΠΕ-ΕΜΠ στην ανάπτυξη της νέας μηχανής 5MW από την γερμανική εταιρεία ENERCON. Πρόκειται για έργο που επίσης χρηματοδοτεί η ΕΕ με προγραμματισμένη έναρξη το 2001.

4.3. Αιολικά Πάρκα.

Η ελληνική συνεισφορά γύρω από το θέμα, εστιάστηκε στην θεωρητική και υπολογιστική διερεύνηση των επιδράσεων ομόρρου. Ήδη από το 1990, η ομάδα του ΕΜΠ, ήταν η πρώτη που ανέπτυξε ένα κινηματικό πρότυπο υπολογισμού της αλληλεπίδρασης πολλών ομόρρων, που μπορούσε να αναπαράγει τα πειραματικά δεδομένα του

πάρκου στο Sexbierum [68]. Το πρότυπο αυτό, χρησιμοποιήθηκε για την βέλτιστη σχεδίαση αιολικών πάρκων [69]. Στη συνέχεια, προχώρησε στην ανάπτυξη πλέον εξελιγμένων μεθόδων, συνδυάζοντας τον κώδικα GENUVP με έναν επιλυτή των εξισώσεων Navier-Stokes [70]. Η μεθοδολογία αυτή επαληθεύθηκε πλήρως στην περίπτωση του πειράματος στο Alsveik [71].

Παράλληλα, με την ανάπτυξη κωδικών, διεξήχθη μια σειρά πειραμάτων με προσομοιωτές στη αεροσήραγα του ΕΜΠ [72, 73]. Μετρήθηκε συστηματικά, τόσο το πεδίο ταχύτητας όσο και τα χαρακτηριστικά της τύρβης στον ομόρρο ενός και δύο προσομοιωτών σε διάφορες διατάξεις. Εξετάστηκαν, τόσο η περίπτωση χαμηλής όσο και υψηλής τύρβης εισόδου, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Τέλος, εξετάστηκε και η εξέλιξη του ομόρρου μίας μηχανής σε ανώμαλη τοπογραφία. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργήθηκε μία πλήρης βάση πειραματικών δεδομένων, τα ποιοτικά συμπεράσματα της οποίας, συμφωνούν με όσα έχουν καταγραφεί σε μετρήσεις πλήρους κλίμακας. Αυτό καθιστά την βάση αυτή εξαιρετικά χρήσιμη.

5. Η τεχνολογική βάση στην Ελλάδα σήμερα και η προοπτική ανάπτυξης Ελληνικής βιομηχανίας στον τομέα.

Την τεχνολογία της αιολικής ενέργειας απαρτίζουν:

- Η τεχνολογική γνώση, όπως αυτή παράγεται από τη βασική και εφαρμοσμένη έρευνα και έχει στόχο την επίλυση επιστημονικών και τεχνολογικών προβλημάτων που προκύπτουν κατά τη σχεδίαση και εφαρμογή της τεχνολογίας της αιολικής ενέργειας.

- Η κατασκευαστική/μελετητική γνώση, που παράγεται κατά την υλοποίηση των αποτελεσμάτων της έρευνας είτε αυτό αφορά στην κατασκευή αιολικών μηχανών είτε αφορά στην εφαρμογή της αιολικής ενέργειας,

- Η εμπειρία που πρέπει να υπάρχει, ώστε να τροφοδοτεί την έρευνα με ερωτήματα και να ωθεί την μελέτη/κατασκευή προς βελτίωση και άρα, σε αύξηση της ανταγωνιστικότητας.

Πιστεύω ότι όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, πεί-

θουν πέρα από κάθε αμφιβολία ότι, η υπάρχουσα τεχνολογία στην Ελλάδα δεν έχει να ζηλέψει τίποτα από τις υπόλοιπες Ευρωπαϊκές χώρες. Σε όλα τα επιστημονικά πεδία, οι ελληνικές ομάδες, σε όλο το φάσμα της τεχνολογίας της αιολικής ενέργειας, βρίσκονται στην πρώτη γραμμή της τρέχουσας εφαρμοσμένης έρευνας.

Και ενώ στο ζήτημα της τεχνολογίας υπάρχει πληρότητα, στους άλλους δύο τομείς υστερούμε σημαντικά. Στον μελετητικό τομέα, είναι λίγες οι περιπτώσεις που μηχανικοί ή τεχνικές εταιρείες, απευθύνονται στους αρμόδιους φορείς, όπως το ΚΑΠΕ ή τα ειδικά εργαστήρια των ΑΕΙ της χώρας, για να πάρουν την απαιτούμενη τεχνική υποστήριξη. Σε ορισμένες μάλιστα περιπτώσεις, συμβαίνει το παρόδοξο, η προσέγγιση των αρμοδίων φορέων να γίνεται, αφού εμφανιστούν πρακτικά προβλήματα εφαρμογής, σε στάδιο, που λίγα πράγματα μπορούν να γίνουν. Είναι ενδεικτικό το παράδειγμα του αιολικού πάρκου της Κύθνου, που το αναφέρω επειδή αφορά στην πρώιμη περίοδο ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα, οπότε τα λάθη δικαιολογούνταν. Τότε η κοινότητα των αιολικών στην Ελλάδα, έμαθε από ένα λάθος που στοίχισε συνολικά το πάρκο. Σήμερα, κάτι παρόμοιο δεν υπάρχει λόγος να συμβεί.

Στον κατασκευαστικό τομέα, πρέπει να σημειώσουμε ότι, οι απαιτήσεις μίας αιολικής βιομηχανίας, δεν είναι υψηλές. Αξίζει να θυμηθούμε ότι, την κατασκευαστική βάση της Δανίας, που είναι σήμερα η ηγετική δύναμη στη παραγωγή μηχανών, αποτέλεσαν οι εταιρείες κατασκευής πλαστικών σκαφών, τομέας στον οποίο η Ελλάδα δραστηριοποιείται από χρόνια. Επίσης, στην Ισπανία, η κατασκευή αιολικών μηχανών, ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του '80, με μία μηχανή 30kW, την ίδια περίπου περίοδο, που στην Ελλάδα είχαν ήδη σχεδιαστεί δύο μηχανές και στην ΕΑΒ βρισκόταν σε εξέλιξη ένα πρόγραμμα κατασκευής μικρών ανεμογεννητριών. Σήμερα στην Ισπανία, κατασκευάζονται εμπορικές μηχανές 600kW, με άμεσο στόχο τον διπλασιασμό του μεγέθους τους, ενώ στην Ελλάδα πρόκειται να ανεγερθεί το πρωτότυπο μίας μηχανής 500kW.

Τέλος, από άποψη εμπειρίας εφαρμογής, τέτοια μέχρι πρόσφατα διέθετε βασικά η ΔΕΗ. Και ενώ στην αρχή η δυναμική της εταιρείας στον τομέα των ΑΠΕ υποσχόταν πολλά, η συνέχεια ήταν κατώτερη των προσδοκιών. Πολλά από τα πρώτα έργα υπολειπόμενα, ενώ το πρόγραμμα νέων επενδύσεων έχει σχεδόν σταματήσει. Η πρόσφατη είσοδος του ιδιωτικού τομέα στο χώρο της αιολικής ενέργειας, χωρίς αμφιβολία ανοίγει καινούργιες προοπτικές. Ήδη, υπάρχει σχετική εμπειρία, που συνεχώς θα εμπλουτίζεται, ελπίζουμε, με γρήγορους ρυθμούς. Άλλωστε, αυτό επιτάσσουν οι κανόνες της αγοράς.

6. Επίλογος.

Πριν από τρία περίπου χρόνια, η Πολιτεία εισήγαγε ένα νέο νομοθετικό πλαίσιο, που δίνει τη δυνατότητα παραγωγής ενέργειας σε ιδιώτες, με χρήση ανανεώσιμων πηγών. Αν και υπάρχουν σημαντικά περιθώρια βελτίωσης, το νέο αυτό πλαίσιο έδωσε την ευκαρία σε ελληνικές επιχειρήσεις, όπως η "Ρόκας Αιολική", η "Αιολικά Πάρκα Κρήτης", η "ΤΕΡΝΑ" κ.α., να προχωρήσουν σε σημαντικές επενδύσεις, στο χώρο της αιολικής ενέργειας. Ήδη, στην Κρήτη και την Εύβοια, λειτουργούν ιδιωτικά αιολικά πάρκα, ενώ ένας μεγάλος αριθμός έργων βρίσκεται σε εξέλιξη. Προς το παρόν η βιομηχανική παραγωγή στην Ελλάδα περιορίζεται στην κατασκευή πύργων, ενώ η αξιολογία προσπάθεια της ΠΥΡΚΑΑ, που κατασκευάζει τις πρώτες τρεις ελληνικής κατασκευής μηχανές και της Γεωβιολογικής, που κατασκευάζει πτερύγια, βρίσκονται στα πρώτα τους βήματα (το πτερύγιο 9μ έχει δοκιμαστεί σε μηχανή, ενώ το πτερύγιο 19μ δοκιμάστηκε πρόσφατα). Σίγουρα όλα αυτά δεν είναι πολλά, ωστόσο, δεν παύουν να αποτελούν μία βάση. Χρειάζεται οι προσπάθειες αυτές να στηριχθούν από βούληση, μεταφρασμένη, από μεν την πλευρά του κράτους, σε κίνητρα από δε τον ιδιωτικό τομέα, σε επιχειρηματικό ενδιαφέρον. Οι ερευνητικές ομάδες της χώρας, με σημείο εστίασης και συντονιστή το ΚΑΠΕ, έχουν και την απαιτούμενη τεχνολογία αλλά και δείγματα γραφής έργου υψηλής στάθμης και αποδοτικότητας. Συνελπώς, δεν μένει παρά να

επιμεταλλευτούμε την ευκαρία.

Βιβλιογραφικές αναφορές.

1. "Wind Energy: The facts" 1999, A Plan for Action in Europe, έκδοση της Ευρωπαϊκής Ένωσης
2. "Η Εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας: Εθνικές προτεραιότητες και Ευρωπαϊκή Στρατηγική", Πρακτικά Εθνικού Συνεδρίου (ΕΜΠ), Ίδρυμα Ευγενίδου 1998.
3. Lalas, D.P., Panayotidis, T.C., Tryfonopoulos (1994) "A hybrid micro-siting model for wind flow simulation over complex topographies" Proc. ECWEC'94, Thessaloniki Athens
4. Lalas, D.P. Ratto C.F (1996) "Modeling of atmospheric flow fields" International Centre for Theoretical Physics, World Scientific
5. Jackson, P.S., Hunt J.C.R (1975) "Turbulent wind flow over a low hill", Q.J. Meteorological Society, 101, 929-956
6. Mortensen N.G. Landberg L., Troen, I., Petersen, E.L. (1993) "Wind atlas analysis and application program" Vol2 RISOE-I-666 (EN) (v2).
7. Bergeles, G., Glekas, I., Prospathopoulos, I., Voutsinas, S. (1996) "Statistical and Physical Modelling of Wind Resources in Complex Terrain: Assessment of the Applicability of a 3D Navier Stokes Code", EUWEC'96, Goteborg
8. Madsen, H.A. (1991) "aerodynamics of a Horizontal Axis Wind Turbine in Natural Conditions" Risoe-M-2903, RISOE.
9. Fragoulis, A.K. (1996) "Load and Power Measurement Programme on Wind Turbines operating in Complex Mountainous Regions", Final Report for the JOU2-CT93-0378 JOULE-II project, CRES.
10. Fragoulis, A.K. (1998) "Investigation of design aspects and design options for wind turbines operating in complex terrain environments", Final Report for the JOR3-CT95-0033, JOULE-III project, CRES.
11. Bjorck, A., Ronsten, G, Montgomerie, B. (1995) "Aerodynamic section characteristics of a rotating and non-rotating 3.375m wind turbine blade" FFA TN 1995-03.
12. Schreck, S.J. (2000) "Dynamic stall vortex deformation and unsteady blade loading during yawed operation" 14th IEA Symposium, NREL, Bulder 2000.
13. Hales, R.L. (1991) "Dynamic stall on horizontal axis wind turbines" EWEC'91, Amsterdam, ISBN 044489117 X.
14. Bruining, A. (1995) "Aerodynamic characteristics of a 10m diameter rotating wind turbine blade", Delft University of Technology IW95-084R.
15. Brown, C.J., Graham, J.M.R. (2000) "Wind Tunnel Investigations of Force and Pressure Distributions for the rotor tower interaction" Imperial College Report (βλ. Επίσης Paytner, R.J.H.W., Graham, J.M.R., Infield D.G. (1994) "Pressure measurements on a stall regulated wind turbine blade" EWEC'94 Proc. Thessaloniki, Greece).
16. Παπακωνσταντίνου, Α.Π. (1990) «Πειραματική και αριθμητική μελέτη πεδίων ροής γύρω από ανεμοκίνητηρα οριζοντίων άξονα», Διδακτορική Διατριβή ΕΜΠ, Τμήμα Μηχανολόγων, Εργαστήριο Αεροδυναμικής.
17. Quarton, D.C. (1998) "The evolution of wind turbine design analysis: A twenty year progress report", Wind Energy, Vol 1, pp. 5-24.
18. Snel, H., vanHolten, Th. (1994) "Review of recent aerodynamic research on wind turbines with relevance to rotorcraft. Data (and riddles) on dynamic inflow, flow field of yawed rotors, and rotating 3D stall", 75th AGARD Fluid Dynamics Panel Symposium, Aerodynamics and Aeracoustics of Rotorcraft, 10-14 October, Berlin.
19. Bareiss, R., Wagner, S. (1993) "The free-wake/hybrid wake code ROVLM: A tool for aerodynamic analysis of wind turbines" Stephans H.S. (Ed.) Proc. ECWEC'93, p424-431.
20. Voutsinas, S.G., Belessis, M.A., Rados, K.G. (1994) "Investigation of the Yawed Operation of Wind Turbines by means of a Vortex Particle Method", 75th AGARD Fluid Dynamics Panel Symposium, Aerodynamics and Aeracoustics of Rotorcraft, 10-14 October, Berlin
21. Pesmatzoglou, S. (1997) "Three-dimensional wake calculations applied

- to horizontal axis wind turbines" PhD thesis, Imperial College UK.
22. Chaviaropoulos, P.K. (2000) "Viscous and aeroelastic effects on wind turbine blades", Final Report for the JOR3-CT98-0208 JOULE-III project, CRES.
23. Tangler, J.L., Sommers, D.M. (1987) "Status of the special purpose airfoil families" WINDPOWER'87, San Francisco.
24. Timmer, W.A. (1992) "Nieuwe profielen voor wind turbines" Delft University of Technology, DUT-IW-92056R.
25. Fuselang, P., Dahl, K.S. (1999) "Design of the new RISOE-A1 airfoil family for wind turbines" EWEC'99, Nice, p134-137
26. Chaviaropoulos, P., Vossinis, A., Voutsinas, S. (1996) "Computer-Aided Design of Blades: Current Capabilities and Perspectives", EUWEC '96, Goteborg.
27. Wagner, S., Bareiss, R., Guidati, G., Voutsinas, S., Huberson, S. (1995) "Development of an Aeroacoustic Tool for Noise Prediction of Wind Turbines. Validation of New Full Size Wind Generators" Final Report for the JOULE-II JOU2-CT92-0148 project, IAG.
28. Schepers, J.G. (2000) "EU projects in German Dutch Wind Tunnel, DNW", 14th IEA Symposium, NREL, Boulder 2000.
29. Voutsinas, S.G. (1999) "Investigation of noise emissions from Wind Parks and their impact to the design of parks", Final Report for the JOULE-III project, NTUA.
30. IEC 1400-1 "Safety of wind turbine systems"
31. T. Moeller (1997) "Blade Cracks Signal New Stress Problem", WindPower Monthly, May 1997.
32. Ainslie, J.F., Hassan, U., Parkinson, H.G., Taylor, G. (1989) "A wind tunnel investigation of the wake structure within small wind turbine farms" EWEC' 89, Glasgow.
33. Στεφανάτος Χρ. (1997) «Ανάλυση συμπεριφοράς ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα σε ανομοιόμορφο πεδίο ροής» Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων ΕΜΠ.
34. Θεοδωρόπουλος, Π. (2000) «Ποντελοποίηση και διαστασιολόγηση υβριδικού συστήματος: Εφαρμογή στην Ικαρία», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων ΕΜΠ.
35. Nogaret, E. (1995) "Development and implementation of an advanced control system for the optimal operation and management of medium-sized power systems with large penetration from renewable energy sources" EC publications, ISBN 92-827-5007-8.
36. Παπαθανασίου, Σ. (1997) «Συμβολή στη ανάλυση ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια για την επιλογή του ηλεκτρικού σχήματος» Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ.
37. Bergeles, G.Ch, Theodorakakos, A. (1998) "Wind flow predictions in complex terrain", in "Investigation of design aspects and design options for wind turbines operating in complex terrain environments", Final Report for the JOR3-CT95-0033, JOULE-III project, CRES.
38. Douvikas, D.I., Chaviaropoulos, P.K. (1999) "CRES' 3D boundary layer method for complex terrain micro-siting. Application examples", EWEC'99, Nice, France.
39. Voutsinas, S.G., Chassapoyannis (1998) "A panel method based, kinematic model for siting applications", NTUA report.
40. Voutsinas, S. G., Riziotis, V. A. (1996) "Vortex Particle Modelling of Stall on Rotoros. Application to Wind Turbines", ASME Conference on Fluid Engineering, San Diego, California, U.S.A..
41. Voutsinas S. G., Riziotis V. A., (1999) "A Viscous-Inviscid Interaction Model for Dynamic Stall Simulations on Airfoils", 37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, January 11-14, 1999, AIAA paper 99-0038.
42. Chaviaropoulos, P.K. Hansen, M.O.L. (2000) "Investigating 3D and rotational effects on wind turbine blades by means of quasi 3D Navier Stokes solver" to appear in ASME Fluids Engineering.
43. Perivolaris G. Yannis, Tzabiras D. Giorgos, Voutsinas S. G. (1997) "Guidelines for an Accurate Prediction of Airfoil Characteristics Using an Advanced Navier-Stokes Solver" EWEC '97, Dublin.
44. Chaviaropoulos, P.K. (2000) "Viscous and aeroelastic effects on wind turbine blades", ECCOMAS 2000, Barcelona, Spain.
45. Snel, H., Schepers, J.G (1994) "Joint investigation of dynamic inflow effects and implementation of an engineering method for response analysis" ECN-C-94-107.
46. Snel, H., Schepers, J.G (1995) "Dynamic Inflow effects II. Stationary profile aerodynamics and partial span pitch modelling" ECN-C-95-056
47. Voutsinas, S.G. (1994) "NEWDES: Development of a new generation of design tools for horizontal axis wind turbines", NTUA Final Report for the JOU2-CT92-0113 JOULE-II project.
48. BJORCK, A. (1995) "Dynamic Stall and 3D effects" Final report for the JOU2-CT93-0345 JOULE-II project, FFA TN 1995-31.
49. Chaviaropoulos, P.K. (2000) "Viscous and aeroelastic effects on wind turbine blades", Final report for the JOR3-CT98-0208 JOULE-III project, CRES.
50. Snel, H. (1998) "MUST: Multiple Stall Levels", JOR3-CT98-0268 JOULE-III project.
51. Graham, J.M.R, Brown, C.J. (2000) "ROTOW: Investigation of the Aerodynamic Interaction Between Wind Turbine Rotor Blades and the Tower and its impact on Wind Turbine Design", Final Report for the JOR3-CT98-0237 JOULE-III project, Imperial College.
52. Alafouzou, V.V., Perivolaris, Y.G., Sharp, D.J., Voutsinas, S.G. (1999) "Assessment of a new family of low drag airfoils (II)". EWEC'99, Nice, March'99, pp160-163.
53. Belessis, M. A., Stamos, D. G., Voutsinas, S. G. (1996) "Investigation of the Capabilities of a Genetic Optimization Algorithm in Designing Wind Turbine Rotors", EUWEC'96, Goteborg.
54. Freathy, P., Voutsinas, S.G. "Wind Turbine Blades Equipped with Airjet Vortex Generators: Full Scale Verification of Blade Optimised for

increased performance and manufacturing" Final Report for the JOR3-CT97-0142 JOULE-III project, City University.

55. Theofilyiannakos, D., Vou-tsinas, S.G., (1999) "Noise from wind turbines", CEAS Forum on Aeroacoustics of Rotors and Propellers, Rome, Italy, June, 9-11, 1999.

56. Huberson, S., Pothou, K.P., Voutsinas, S.G. (1994) "Prediction of Wind Turbine Noise: Recent Developments of a Vortex Type Aeracoustic Numerical Tool", EWEC'94, Thessaloniki

57. Voutsinas, S.G. (1998) "NOISEPARK: Investigation of noise emissions from Wind Parks and their impact to the design of parks"

58. Pothou, K.P., Voutsinas, S.G., Huberson, S., Kuhlmann, M., Rawlinson-Smith, R. (1999) "Investigation of noise emissions from wind parks and their impact to the design of parks". EWEC'99, Nice, March'99, pp97-100.

59. Prospathopoulos, I.M., Belibassakis, K.A., Voutsinas, S.G. (1999) "Numerical modelling of propagation of noise emitted from wind parks". EWEC'99, Nice, March'99, pp189-192.

60. "Ανάπτυξη ελληνικής τεχνολογία ανεμογεννητριών μεγεθών 400-500kW και ταυτόχρονη ανάπτυξη

ελληνικής τεχνολογίας πτερυγίων ανεμογεννητριών" χρηματοδότηση ΓΓΕΤ, πρόγραμμα ΕΠΕΤ-ΙΙ, 1996-1999.

61. Papadopoulos, K., Morfiadakis, E., Philippidis, T.P., Lekou, D.J. (2000) "Assessment of the strain gauge technique for measurement of wind turbine blade loads", Wind Energy Vol3, No 1.

62. Riziotis, V.A., Chaviaropoulos, P.K., Voutsinas, S.G. (1996) "Development of a state-of-art aeroelastic simulator for horizontal axis wind turbines" J Wind Engineering, Vol 20 (6), pp 423-440

63. Schepers, G.J. (1999) "VEWTDC: Verification of European Wind Turbine Design Codes", JOR3-CT98-0267 JOULE-III project, ECN.

64. Chaviaropoulos, P.K. (1997) "Probabilistic analysis of extreme wind events", Wind Engineering, Vol 21, 139-159.

65. Riziotis, V.A., Voutsinas, S.G. (2000) "Fatigue Loads on Wind Turbines of different Control Strategies Operating in Complex Terrain", to appear in J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.

66. Mourikis, D.G., Riziotis, V.A., Voutsinas, S.G. (1999) "Length scale effects on fatigue loads calculation procedure". EWEC'99, Nice, March '99, pp250-253.

67. Vionis, P. (1998) "ADAPTURB:

Adaptation of existing wind turbines for operation on high wind speed complex terrain sites; kWh cost reduction", JOR3-CT98-0251, JOULE-III project, CRES.

68. Voutsinas S.G., Rados K.G., Zervos, A. (1990) "On the analysis of wake effects in wind parks", Wind Engineering, Vol. 14, No4, pp.204-219.

69. Voutsinas, S.G., Rados, K.G. (1993) "A method for aerodynamically optimal design of wind parks", Proc. of BWEA'93, York, 1993.

70. Voutsinas, S.G., Rados, K.G., Belessis, M.A. (1994) "Concluding a design tool for wind parks", EWEC'94, Thessaloniki

71. Magnusson, M., Rados, K. G., Voutsinas S.G. (1996) "A study for the Flow Downstream a Wind Turbine Using Measurements and Simulations" J of Wind Engineering, Vol.20 (6) pp.389-404.

72. Stephanatos, N.Ch., Voutsinas, S.G., Rados, K.G., Zervos, A. (1994) "A combined experimental and numerical investigation of wake effects in complex terrain", EWEC'94, Thessaloniki

73. Stefanatos, N. Ch., Koukas, A. B., Voutsinas, S. G. (1996) "Interaction of Wind Turbine Wakes", EUWEC '96, Goteborg.