

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

**Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών
Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος**

Μεταπτυχιακή Διατριβή



**Επίδραση των Επικαθήμενων Σωματιδίων στην Παραγωγή
Ηλεκτρικής Ενέργειας από Αιολικά Πάρκα.
Μελέτη Πτέρυγας και Χωρική Ανάλυση.**

Καλλιόπη Παπαδοπούλου

**Επιβλέπων Καθηγητής
Γεώργιος Ξύδης**

Δεκέμβριος 2016

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

**Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών
Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος**

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**Επίδραση των Επικαθήμενων Σωματιδίων στην Παραγωγή
Ηλεκτρικής Ενέργειας από Αιολικά Πάρκα.
Μελέτη Πτέρυγας και Χωρική Ανάλυση.**

Καλλιόπη Παπαδοπούλου

**Επιβλέπων Καθηγητής
Γεώργιος Ξύδης**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών στη Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου.

Δεκέμβριος 2016

ΛΕΥΚΗ ΣΕΛΙΔΑ

Περίληψη

Η ανάπτυξη ενεργειακών επενδύσεων αιολικού χαρακτήρα, προϋποθέτει καλή γνώση του επιπέδου της ηλεκτροπαραγωγής, γεγονός που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του ρότορα και τη δυνατότητά του να αξιοποιεί βέλτιστα το αιολικό δυναμικό. Έχει παρατηρηθεί ότι η επικάθιση σωματιδίων σκόνης στις επιφάνειες των πτερύγων του ρότορα μπορεί να επηρεάσει την απόδοση των Αιολικών Πάρκων με αποτέλεσμα την καταγραφή απωλειών ισχύος.

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή, μελετάται η επιφανειακή τραχύτητα που εντοπίζεται στις πτέρυγες του ρότορα των ανεμογεννητριών λόγω της συσσώρευσης σκόνης και η δυναμική της επίδραση στο μέγεθος της αιολικής παραγωγής. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιείται πειραματική διερεύνηση με χρήση του υπολογιστικού εργαλείου ανοικτού κώδικα QBlade. Τα διαθέσιμα δεδομένα, αφορούν την επικάθιση σκόνης σε τέσσερις διαφορετικές περιοχές, στις οποίες μελετάται η εξέλιξη του φαινομένου της επικάθισης σκόνης και διερευνάται η επίδρασή του στην αεροδυναμική απόδοση και στο μέγεθος της αποδιδόμενης ισχύος.

Με στόχο την αποτίμηση του φαινομένου, και με τη βοήθεια των υπορουτίνων του QBlade, σχεδιάζεται πρότυπο μοντέλο ρότορα με αεροτομές NACA 5518, το οποίο χρησιμοποιείται για την εκτέλεση επιλεγμένων προσομοιώσεων που αφορούν καθεμία από τις επιλεχθείσες περιοχές. Ακολούθως, παρουσιάζονται Διαγράμματα που αποδεικνύουν την αλληλεπίδραση μεταξύ της επιφανειακής τραχύτητας, του αριθμού Re και των αεροδυναμικών συντελεστών των αεροτομών και ακολουθεί σύγκριση στα πλαίσια του αντικειμένου της παρούσας μελέτης.

Τα αποτελέσματα περιορίζονται στην απόδειξη της επίδρασης της τραχύτητας στην αεροδυναμική απόδοση του ρότορα των Α/Γ και στην εκτίμηση της αποδιδόμενης ισχύος και του ύψους των απωλειών για επιλεγμένες συνθήκες ταχύτητας ανέμου και προσανατολισμού της Α/Γ.

Summary

The development of wind projects requires very good knowledge of the level of energy production and that depends on the rotor aerodynamics and its potential of making optimal use of wind power. It has been noted that dust accumulation across the rotor's blade surfaces can seriously affect the overall Wind Park performance and lead to severe energy losses.

In the present Master Thesis, surface roughness that occurs on the rotor's blade surfaces due to dust accumulation and its possible effect on wind turbine's performance, are the subjects to be studied. For this purpose, an experimental investigation is conducted by means of the widely used open source tool QBlade. All available data, pertain to dust accumulation in four different areas, at which, it is being studied the evolution of the phenomenon and its possible effect on the aerodynamic performance and on the level of energy production.

In order to evaluate this phenomenon, a standard rotor model with NACA 5518 airfoils is being designed and for that purpose the modules of QBlade are being used. Subsequently, the study consists of a series of simulations, which concern each one of the four subjected areas. The resulting graphs are presented and through them it is clearly proved that surface roughness, Reynolds number and lift and drag coefficients are interacting with each other. Furthermore, a comparison among the main findings is being realized.

Main results are limited to the subject of the present Thesis, namely to prove that rotor's blade surface roughness can affect the overall energy performance, and to evaluate the power output and the power losses for selected conditions of wind speed and orientation.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Εισαγωγή	1
1.2	Καταγραφή προβλήματος	2
1.3	Σημασία και αναγκαιότητα της μελέτης	3
1.4	Σκοποί και στόχοι	3
1.5	Διατύπωση κεντρικών εννοιών	3
1.5.1	Αιολική ενέργεια	4
1.5.2	Ανεμογεννήτριες	5
1.5.3	Αεροδυναμική απόδοση	7
1.5.4	Αεροδυναμικά μεγέθη	7
2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	9
2.1	Εισαγωγή	9
2.2	Ιστορική αναδρομή	10
2.3	Βασικά στοιχεία αεροδυναμικής	12
2.3.1	Αδιάστατοι συντελεστές ομοιότητας	12
2.3.2	Αεροτομές	13
2.3.3	Αεροδυναμική των Α/Γ	16
2.4	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	24
2.4.1	Διεθνής και ελληνική πραγματικότητα	25
2.4.2	Επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας	28
2.4.3	Επίδραση της σκόνης	32
2.4.4	Μοντελοποίηση και Προσομοίωση	38
2.4.5	Συμπεράσματα	40
3	Μεθοδολογία.....	41
3.1	Σκοπός και στόχοι	41
3.2	Ερευνητικά ερωτήματα	41
3.3	Δεδομένα	42
3.3.1	Συλλογή δεδομένων	42
3.3.2	Ανάλυση δεδομένων	44
3.3.3	Σύνοψη	49
3.4	Μεθοδολογική προσέγγιση	50
3.4.1	Περιγραφή ερευνητικού εργαλείου	50
3.4.1.1	Βασικές λειτουργίες	50
3.4.1.2	Κώδικας προσομοίωσης	55
3.4.2	Αξιοπιστία και εγκυρότητα εργαλείου	56
3.4.3	Περιγραφή του θεωρητικού πλαισίου	57
3.5	Διαδικασία	60
3.6	Ανάλυση αποτελεσμάτων	66
4	Αποτελέσματα	68
4.1	Έννοιες και θέματα	68
4.2	Παρουσίαση αποτελεσμάτων	68
4.2.1	Προσομοιώσεις Α' φάσης	68
4.2.2	Προσομοιώσεις Β' φάσης	76
4.2.2.1	Λεμεσός	77
4.2.2.2	Σητεία	81
4.2.2.3	Θήβα	85
4.2.2.4	Αλεξανδρούπολη	89
4.2.2.5	Σύγκριση πεδίων μελέτης	93
5	Συμπεράσματα - Συζήτηση	107
5.1	Συζήτηση	107
5.2	Περιορισμοί της μελέτης	122
5.3	Συμπεράσματα	124

5.4	Εισηγήσεις	125
6	Επίλογος	127
	Παραρτήματα	128
A	Συντομογραφίες και Σύμβολα	128
A.1	Κατάλογος Ακρωνυμίων	128
A.2	Επεξήγηση Συμβόλων	129
B	Εικόνες, Πίνακες, Διαγράμματα	131
B.1	Κατάλογος Εικόνων	131
B.2	Κατάλογος Πινάκων	132
B.3	Κατάλογος Διαγραμμάτων	134
	Βιβλιογραφία	138

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας Μεταπτυχιακής Διατριβής, αποτελεί η μελέτη των επιπτώσεων στην ηλεκτροπαραγωγή από Ανεμογεννήτριες (Α/Γ), λόγω της μεταφοράς και επικάθισης σκόνης στις πτέρυγές τους. Για το λόγο αυτό γίνεται χρήση δεδομένων συγκέντρωσης σκόνης τα οποία εμπλέκονται στη διαδικασία μοντελοποίησης. Στη συνέχεια, και με τη βοήθεια του λογισμικού ανοικτού κώδικα QBlade, σχεδιάζεται υποθετικό μοντέλο Α/Γ και προσδιορίζεται η επίδραση του φαινομένου στην αεροδυναμική απόδοση των πτερύγων του ρότορα και τελικά στην ηλεκτροπαραγωγή, εκφρασμένη σε απώλειες ισχύος.

1.1 Εισαγωγή

Όπως είναι φυσικό, τόσο στην Ελλάδα όσο και στην Κύπρο συναντώνται πολλές περιοχές με διαφορετικά γεωγραφικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά. Για το λόγο αυτό, παρατηρούνται τα επίπεδα συγκέντρωσης σκόνης σε κάθε πόλη και επιλέγονται προς εξέταση οι περιοχές στις οποίες εξελίσσεται εντονότερα το φαινόμενο της μεταφοράς σκόνης.

Η έρευνα περιλαμβάνει τόσο θεωρητικό όσο και πρακτικό μέρος, ενώ στις παραγράφους που ακολουθούν, περιγράφεται εν συντομία το πρόβλημα, εκτιμάται ο βαθμός σημαντικότητας και καταγράφονται ο σκοπός και οι στόχοι της παρούσας Μεταπτυχιακής Διατριβής, και διατυπώνονται βασικές έννοιες που σχετίζονται με το εν λόγω θέμα.

Το θεωρητικό μέρος (2^ο Κεφάλαιο), αναπτύσσεται σε δύο βασικές υποενότητες: στο βασικό θεωρητικό πλαίσιο, στο οποίο καταγράφεται και αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά στον τομέα της αεροδυναμικής και των Α/Γ, και στη βιβλιογραφική ανασκόπηση όπου συγκεντρώνονται οι τάσεις που έχουν καταγραφεί

στην εγχώρια διεθνή βιβλιογραφία και αρθρογραφία και που σχετίζονται με το ευρύτερο αντικείμενο της παρούσας Μεταπτυχιακής Διατριβής.

Στη συνέχεια, στο 3^ο Κεφάλαιο, ακολουθεί το πρακτικό μέρος της έρευνας, το οποίο περιλαμβάνει περιγραφή και εκτενή ανάλυση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε, παρουσίαση των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν και παρουσίαση του μοντέλου της Α/Γ που σχεδιάστηκε με τη βοήθεια του QBlade. Το εν λόγω λογισμικό μας δίνει τις δυνατότητες του σχεδιασμού διαφόρων μοντέλων, της προσομοίωσης της ροής γύρω από αυτά και της παράλληλης σύγκρισης των αποτελεσμάτων. Έτσι, εξετάστηκαν διάφορα σενάρια ροής γύρω από το σχεδιασθέν μοντέλο και προσδιορίστηκαν οι απώλειες ισχύος που σχετίζονται με το υπό μελέτη φαινόμενο.

Τα αποτελέσματα της έρευνας, παρατίθενται στο 4^ο Κεφάλαιο ενώ στο 5^ο Κεφάλαιο, ακολουθεί η αξιολόγησή τους καθώς και τα συμπεράσματα από τη μελέτη.

1.2 Καταγραφή προβλήματος

Η βέλτιστη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού, εξαρτάται κατά κανόνα από τη μελέτη και το σχεδιασμό της εκάστοτε Α/Γ και των επιμέρους τμημάτων της. Ωστόσο, στη φάση λειτουργίας, η συσσώρευση σωματιδίων στις πτέρυγες του ρότορα, είναι φαινόμενο σύνηθες, επειδή οι Α/Γ από τη φύση τους προορίζονται για λειτουργία υπό συνθήκες έκθεσης σε παράγοντες διάβρωσης. Οι σημαντικότεροι παράγοντες διάβρωσης είναι η βροχή, ο πάγος, η σκόνη και τα έντομα, οι μάζες των οποίων συγκεντρώνονται στις επιφάνειες των πτερύγων και συντελούν στη μεταβολή του ύψους τραχύτητας σε αυτές. Η μεταβολή της τραχύτητας μίας επιφάνειας, αποτελεί σημαντικό παράγοντα μεταβολής της ροής σε αυτήν. Έτσι, αύξηση τη τραχύτητας, συνεπάγεται αύξηση των δυνάμεων τριβής, που έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή της ροής από στρωτή σε τυρβώδη. Όσο το φαινόμενο αυτό εντείνεται στην επιφάνεια της πτέρυγας μίας Α/Γ, υποβαθμίζεται η αεροδυναμική της απόδοση και τελικά λαμβάνουν χώρα φαινόμενα αποκόλλησης της ροής από αυτήν. Έτσι, τα ποσά της δυναμικά διαθέσιμης κινητικής ενέργειας του ανέμου, αποτελούν αεροδυναμικές απώλειες για την πτέρυγα και η συνολικά παραγόμενη από την Α/Γ ενέργεια περιορίζεται σημαντικά.

1.3 Σημασία και αναγκαιότητα της μελέτης

Η επιφανειακή τραχύτητα επιδρά σημαντικά στις ρευστοδυναμικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε μία επιφάνεια κατά την αλληλεπίδραση του ρευστού με αυτήν. Η παραδοχή αυτή ισχύει και για τις πτέρυγες των Α/Γ, όπου τα φαινόμενα αποκόλλησης της ροής που σχηματίζεται γύρω από αυτές, επηρεάζονται σημαντικά από το ύψος της επιφανειακής τραχύτητας.

Με εξαίρεση ορισμένες πειραματικές και υπολογιστικές μελέτες γύρω από το αντικείμενο, στις οποίες εμπλέκεται ο παράγοντας της τραχύτητας, μπορεί να θεωρηθεί με βεβαιότητα ότι η σχετική γνώση που έχει αποκτηθεί δεν καλύπτει πλήρως τα ερευνητικά ερωτήματα. Οι διεργασίες αλληλεπίδρασης και αποκόλλησης τις ροής από τις πτέρυγες των Α/Γ παρουσία τραχύτητας δεν είναι πλήρως κατανοητές.

Τα αποτελέσματα της έρευνας δύναται να φανούν χρήσιμα για το σχηματισμό της εικόνας των πιθανών απωλειών ενέργειας λόγω της επίδρασης της τραχύτητας, τη βελτίωση στο σχεδιασμό με σκοπό τη βελτιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας, και την αντιμετώπιση του φαινομένου της επικάθισης σκόνης.

1.4 Σκοποί και στόχοι

Βασικός σκοπός της παρούσας Μεταπτυχιακής Διατριβής είναι η μελέτη της επίδρασης της σκόνης στην παραγωγή ενέργειας από Α/Π. Επιπλέον, εξετάζονται οι επιπτώσεις της μεταφοράς και επικάθισης σκόνης στην αεροδυναμική απόδοση των Α/Γ.

Οι επιμέρους στόχοι που τίθενται για την επίτευξη του σκοπού, είναι η εκλογή των περιοχών μελέτης, η στατιστική επεξεργασία των σχετικών δεδομένων, η προσέγγιση της επιφανειακής τραχύτητας, ο προσδιορισμός του πλήθους και της γεωμετρίας των πτερύγων του μοντέλου ρότορα που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, η χωρική ανάλυση των πτερύγων με χρήση του λογισμικού QBlade, ο προσδιορισμός της αεροδυναμικής απόδοσης ανά περίοδο και ανά περιοχή και η κατάρτιση συγκριτικών πινάκων.

1.5 Διατύπωση κεντρικών εννοιών

Στο σημείο αυτό, κρίνεται απαραίτητο να διατυπωθούν και επεξηγηθούν οι κεντρικές έννοιες της παρούσας Μεταπτυχιακής Διατριβής.

1.5.1 Αιολική ενέργεια

Ανάμεσα στις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, η αιολική αποτελεί σήμερα την πιο ελκυστική και αναπτυσσόμενη μορφή. Η ηλεκτροπαραγωγή από Αιολικά Πάρκα θεωρείται ως η πιο αξιόπιστη τεχνολογία, κυρίως λόγω της ικανότητας παραγωγής μεγάλων ποσών ενέργειας. Βασικοί παράγοντες καθορισμού του μεγέθους της ηλεκτροπαραγωγής, είναι η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου, μεγέθη σημαντικά, όχι όμως και αποκλειστικά.

Η αιολική ενέργεια αποτελεί εν γένει δευτερογενή ανανεώσιμη μορφή ενέργειας, καθώς δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη Γη. Η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της Γης προκαλεί ανομοιόμορφη κατανομή πιέσεων στην ατμόσφαιρα που την περιβάλλει με αποτέλεσμα τη συνεχή ροή μεγάλων μαζών αέρα από περιοχές υψηλής πίεσης προς περιοχές χαμηλότερης πίεσης, και αντιστρόφως. Από την προσπίπτουσα στη Γη ηλιακή ενέργεια, μόνο ένα ποσοστό 1,5-2% μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια αερίων μαζών.

Η αιολική ενέργεια θεωρείται ήπια μορφή ενέργειας, φιλική προς το περιβάλλον και πρακτικά ανεξάντλητη. Το ενεργειακό περιεχόμενο των ανέμων, έχει τέτοιο μέγεθος, που με την τρέχουσα τεχνολογία θα μπορούσε να καλύψει τις ανάγκες της ανθρωπότητας σε ηλεκτρική ενέργεια. (ΚΑΠΕ 2016α).

Εκτιμάται ότι σε ποσοστό 25% της επιφάνειας της Γης, και σε ύψος 10 m πάνω από το έδαφος, επικρατούν άνεμοι που διατηρούν μέση ετήσια ταχύτητα τουλάχιστον 5 m/sec. Αναφορικά με το τοπικό αιολικό δυναμικό κάθε περιοχής, αυτό θεωρείται αξιοποιήσιμο όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπερνάει την προαναφερθείσα τιμή. Σε αυτήν την περίπτωση, η μελέτη και η κατασκευή αιολικών εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης, με τα έως τώρα δεδομένα, θεωρούνται οικονομικά βιώσιμες. Και αυτό γιατί το κόστος κατασκευής των Α/Γ έχει μειωθεί σημαντικά και μπορεί να θεωρηθεί ότι η αιολική ενέργεια διανύει την πρώτη περίοδο ωριμότητας καθώς είναι πλέον ανταγωνιστικότερη των συμβατικών μορφών ενέργειας. (Θεοδώρου et al., 2010).

Ένα Α/Π μπορεί να περιέχει αρκετές Α/Γ και για το λόγο αυτό και η επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας για εγκατάσταση εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως η οικονομικά συμφέρουσα παραγωγή ενέργειας, οι επιδράσεις στο περιβάλλον, οι

κανονισμοί και οι περιορισμοί στη χρήση γης, η αποδοχή των Α/Γ από το τοπικό δίκτυο, οι κλιματολογικές συνθήκες και η αποδοχή από το κοινό.

1.5.2 Ανεμογεννήτριες

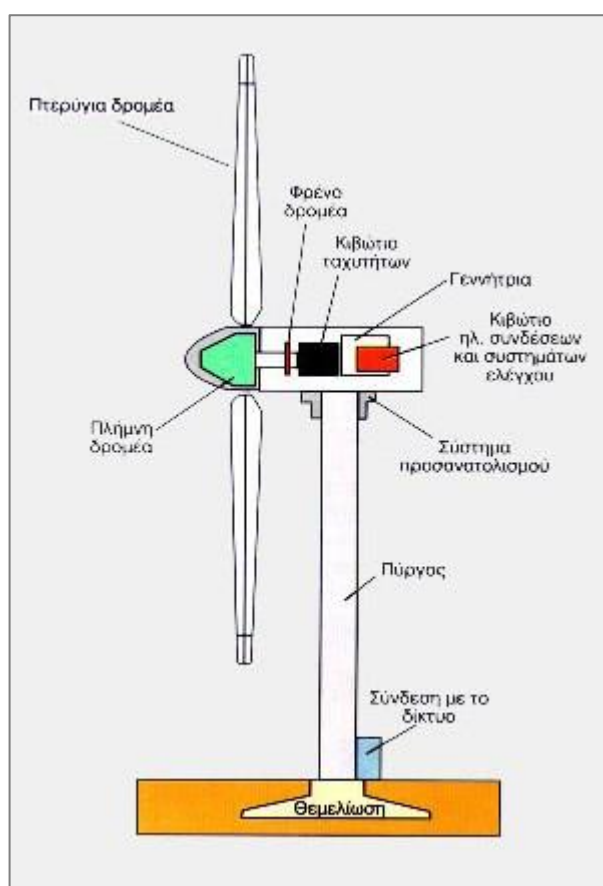
Είναι γνωστό από ιστορικές καταγραφές, ότι ο άνθρωπος εκμεταλλεύτηκε τη δύναμη του ανέμου και τη χρησιμοποίησε σε απλές, για τα σημερινά δεδομένα, αλλά πολύ σημαντικές εφαρμογές. Πιθανόν να προηγήθηκε η ανακάλυψη της αλληλεπίδρασης μεταξύ ιστίου και ανέμου και άρα η ικανότητα προώθησης πλοίων. Ωστόσο, καταγράφονται και άλλες εφαρμογές, όπως είναι για παράδειγμα οι πολύ γνωστοί ανεμόμυλοι για την άλεση του σίτου ή την άντληση υδάτων για άρδευση. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, με τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας, η διαρκής προσπάθεια κάλυψης των αναγκών, νομοτελειακά, οδήγησε στην εξέλιξη των Α/Γ.

Τα πρώτα ηλεκτρικά δίκτυα, χαμηλής τάσης και συνεχούς ρεύματος, αποτελούνταν από καλώδια που είχαν χαρακτηριστικά μεγάλες απώλειες. Έτσι λοιπόν η παραγωγή ενέργειας έπρεπε να λαμβάνει χώρα όσο το δυνατόν κοντύτερα στον ηλεκτροδοτούμενο χώρο και για το λόγο αυτό, οι πρώτες Α/Γ βρήκαν αμέσως εφαρμογή στις φάρμες. Στη συνέχεια, η χρήση τους περιορίστηκε σταδιακά, όταν πια τις ενεργειακές ανάγκες τις κάλυψαν ανταγωνιστικότερες και πιο σύγχρονες τεχνολογίες (συμβατικές). Ωστόσο, οι Α/Γ επανέρχονται στο προσκήνιο, κατά τη διάρκεια των δύο Παγκοσμίων Πολέμων, όταν η κάλυψη των καθημερινών αναγκών, δεν μπορούσε πλέον να γίνεται με συμβατικά καύσιμα, λόγω του υψηλού τους κόστους και της μικρής πιθανότητας ανεύρεσής τους. Σήμερα, οι Α/Γ χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ σε εξέλιξη βρίσκονται και εφαρμογές αφαλάτωσης νερού, ώστε να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της έλλειψης πόσιμου νερού κυρίως στις νησιωτικές περιοχές.

Σε μία Α/Γ, λαμβάνει χώρα η βέλτιστη εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου και η μετατροπή της σε ηλεκτρική. Η δε ηλεκτροπαραγωγή, δε συνοδεύεται από παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα ή άλλων ρυπαντών και ως εκ τούτου, η χρήση των Α/Γ δε συνεισφέρει στην επιβάρυνση της ατμόσφαιρας και στην εντατικοποίηση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Ωστόσο, πρόκειται για ογκώδεις και στιβαρές κατασκευές, οι οποίες αν μη τι άλλο προκαλούν οπτική και ηχητική ρύπανση.

Οι Α/Γ ανάλογα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους ως προς την κατεύθυνση ροής του ανέμου, διακρίνονται σε οριζοντίου και σε κατακόρυφου άξονα. Κατηγοριοποιούνται περαιτέρω ανάλογα με τον αριθμό των πτερύγων του δρομέα, την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, το μέγεθος και την παραγόμενη ισχύ.

Παρόλο που δεν υφίσταται κανένας καθοριστικός λόγος, στην αγορά έχουν επικρατήσει οι Α/Γ οριζοντίου άξονα με δύο ή τρεις πτέρυγες. Βασικά μέρη των Α/Γ αυτού του τύπου είναι ο δρομέας, το σύστημα μετάδοσης κίνησης, η ηλεκτρογεννήτρια, το σύστημα προσανατολισμού, ο πύργος και ο πίνακας ελέγχου (Εικόνα 1).



Εικόνα 1. Βασικά μέρη Α/Γ οριζοντίου άξονα.
(Πηγή: ΚΑΠΕ, 2016β).

Ο δρομέας είναι τύπου έλικας και ο άξονας περιστροφής του βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με τη διεύθυνση του ανέμου, χάρη στο σύστημα προσανατολισμού. Αποτελείται από δύο ή τρεις πολυεστερικές πτέρυγες προσδεσμένες σε μία πλήμνη, οι οποίες είτε είναι σταθερές (πτέρυγες σταθερού βήματος) είτε περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονά τους (πτέρυγες μεταβλητού βήματος). Το σύστημα μετάδοσης

κίνησης, αποτελείται από τον κύριο άξονα και το κιβώτιο ταχυτήτων, το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας. Η ηλεκτρογεννήτρια, η οποία αποτελεί το μέσο μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, είναι σύγχρονη ή επαγωγική και βρίσκεται πάνω στον πύργο της Α/Γ. Ο πύργος στηρίζει την ως άνω μηχανολογική εγκατάσταση, ενώ στη βάση του είναι τοποθετημένοι ο ηλεκτρονικός πίνακας και ο πίνακας ελέγχου, σκοπός των οποίων είναι η παρακολούθηση, ο συντονισμός και ο έλεγχος όλων των λειτουργιών της Α/Γ. (ΚΑΠΕ, 2016β).

1.5.3 Αεροδυναμική απόδοση

Στις σύγχρονες Α/Γ η κίνηση του ρότορα οφείλεται στην άνωση. Η βέλτιστη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού, εξαρτάται κατά κανόνα από τη μελέτη και το σχεδιασμό της εκάστοτε Α/Γ και των επιμέρους τμημάτων της, και δη των πτερύγων. Η αεροδυναμική απόδοση της εκάστοτε πτέρυγας καθορίζει μονοσήμαντα το μέγεθος της ηλεκτροπαραγωγής. Ωστόσο, στη φάση λειτουργίας, η συσσώρευση σωματιδίων (π.χ. σκόνη, άλατα, πάγος) στις πτέρυγες, έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή στην τραχύτητα της επιφάνειας ροής. Γενικά, η μεταβολή στην τραχύτητα, αποτελεί σημαντικό παράγοντα μεταβολής της ροής σε μία επιφάνεια. Ειδικότερα, αύξηση τη τραχύτητας, έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή της ροής από στρωτή σε τυρβώδη οπότε και λαμβάνουν χώρα φαινόμενα αποκόλλησης της ροής από την επιφάνεια.

1.5.4 Αεροδυναμικά μεγέθη

Κατά τη σχετική κίνηση στερεού σώματος και ρευστού μέσου αναπτύσσεται η δύναμη της άνωσης, η οποία έχει διεύθυνση κάθετη στη διεύθυνση της ροής. Η παραγωγή της άνωσης, είναι αποτέλεσμα των διαφορών πίεσης που προκύπτουν μεταξύ της άνω και κάτω πλευράς του στερεού. Ωστόσο, διαφορές πίεσης παρατηρούνται και λόγω των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται κατά τη διεύθυνση της ροής, και αυτές έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία της δύναμης της αντίστασης. Η αεροδυναμική αντίσταση, εύλογα έχει πάντα τη διεύθυνση της ροής.

Για την ανάπτυξη των ανωστικών δυνάμεων είναι απαραίτητη η στροφή της ροής, ώστε να αυξηθούν οι πιέσεις στην κάτω επιφάνεια και να μειωθούν αντίστοιχα στην άνω. Την επιθυμητή στροφή της ροής, την προκαλεί εδώ, κυρίως η γεωμετρία του στερεού. Για την ανάπτυξη των διατμητικών τάσεων ευθύνονται τόσο η γεωμετρία του

στερεού, όσο και η επιφανειακή του τραχύτητα. Άλλοι παράγοντες που καθορίζουν την ανάπτυξη τόσο της αεροδυναμικής άνωσης, όσο και της αεροδυναμικής αντίστασης, είναι η σχετική κίνηση μεταξύ σώματος και ρευστού και κάποιες χαρακτηριστικές ιδιότητες του ρευστού μέσου, όπως είναι το ιξώδες και η συμπιεστότητά του.

Κατά τη σχετική κίνηση στερεού σώματος και ρευστού μέσου, το στερεό βρίσκεται σε ισορροπία, όταν το σημείο του στερεού από το οποίο διέρχονται οι ως άνω δυνάμεις και το κέντρο βάρους του συμπίπτουν. Έτσι, η ανάπτυξη ζεύγους δυνάμεων άνωσης και αντίστασης σε οποιοδήποτε άλλο σημείο εκτός του κέντρου βάρους, έχει σαν αποτέλεσμα την απώλεια ισορροπίας δυνάμεων και τότε αναπτύσσεται η αεροδυναμική ροπή, η οποία τείνει να περιστρέψει το στερεό αναλόγως.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στις ενότητες που ακολουθούν, περιγράφεται το βασικό θεωρητικό πλαίσιο, στο οποίο καταγράφεται και αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά στον τομέα της αεροδυναμικής και των Α/Γ, και ακολουθεί η βιβλιογραφική ανασκόπηση όπου συγκεντρώνονται οι τάσεις που έχουν καταγραφεί στην εγχώρια και διεθνή βιβλιογραφία και αρθρογραφία και που σχετίζονται με το ευρύτερο αντικείμενο της παρούσας Μεταπτυχιακής Διατριβής.

2.1 Εισαγωγή

Η αιολική ενέργεια μέχρι σήμερα θεωρείται η πιο καθαρή και ήπια ανανεώσιμη μορφή ενέργειας, αφού οι τεχνολογίες εκμετάλλευσής της δεν επιφέρουν περιβαλλοντική ρύπανση.

Μεταξύ άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εκείνες που σχετίζονται με την αιολική εκμετάλλευση, κατέχουν πιο ώριμη τεχνολογία, πιο ανταγωνιστική τιμή και ξεχωρίζουν λόγω της φιλικότερης συμπεριφορά τους προς το περιβάλλον.

Αρκετά υπεράκτια Α/Π υπάρχουν ήδη διασυνδεδεμένα στην Ευρώπη και παράλληλα διαφαίνεται συνεχής βελτίωση των τεχνολογιών αιολικής εκμετάλλευσης, ενώ προβλέπεται ότι η αιολική ενέργεια θα έχει αγγίξει το 5% της παγκόσμιας ενεργειακής αγοράς μέχρι το 2020. Η προηγμένη αιολική τεχνολογία αναμένεται να είναι κατασκευαστικώς ποιοτικότερη, ενεργειακώς επαρκέστερη και οικονομικώς καλύτερη εν συγκρίσει με τις συμβατικές τεχνολογίες. Ωστόσο, θα απαιτηθεί περαιτέρω έρευνα σε αρκετά πεδία, όπως για παράδειγμα στο πεδίο βελτιστοποίησης δικτύων μεταφοράς και διείσδυσης των ΑΠΕ. Προς το παρόν, η διείσδυση στο ηλεκτρικό δίκτυο της συνολικά παραγόμενης ενέργειας από αιολικά, δεν μπορεί να επιτραπεί, επειδή το μέγεθος της παραγόμενης ενέργειας αποτελεί στοχαστική μεταβλητή που διέπεται από τις αλλαγές στην ένταση του ανέμου. (Dhillon, 2014).

Συνεπώς, διείσδυση της συνολικά παραγόμενης αιολικής ενέργειας θα οδηγούσε σε προβλήματα που σχετίζονται με τη λειτουργία του συστήματος, όπως ασυνήθιστα μεγάλη αστάθεια στο ηλεκτρικό δίκτυο και ασυνέπεια προγραμματισμού στις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. (Kaldellis et al., 2004).

2.2 Ιστορική Αναδρομή

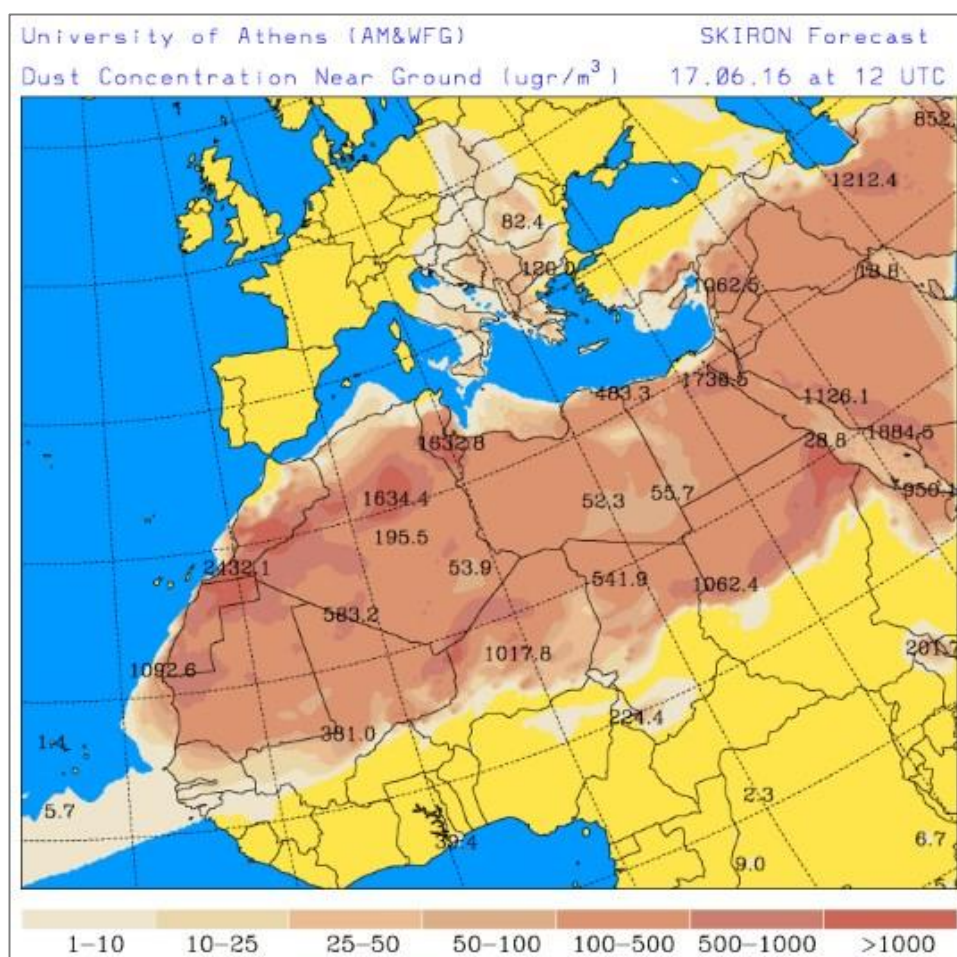
Η Ελλάδα είναι χώρα που χαρακτηρίζεται από μεγάλη ακτογραμμή και πλήθος νησιών και νησίδων. Παράλληλα, και σύμφωνα με εκτεταμένες μελέτες που έχουν αναπτυχθεί, συγκριτικό της πλεονέκτημα μεταξύ άλλων, αποτελεί το έντονο αιολικό της δυναμικό, το οποίο είναι προς το παρόν και εν μέρει αναξιοποίητο (Kaldellis et al., 2004). Η Ελλάδα, βρίσκεται στις πρώτες θέσεις μεταξύ των χωρών της Ευρώπης, με μέση ταχύτητα ανέμων που καταγράφεται τοπικά στα 8-11 m/s σε περιοχές όπως είναι τα νησιά του Αιγαίου και οι παράκτιες περιοχές της ενδοχώρας (ΚΑΠΕ, 2016; Kaldellis, 2005).

Το 1982, τέθηκε σε εφαρμογή το εθνικό πρόγραμμα για την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οπότε και εγκαταστάθηκε από τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού το πρώτο πιλοτικό Α/Π στην περιοχή της Κύθνου. Οι 5 Α/Γ των 20 kW, σε συνεργασία με φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συνολικής ισχύος 100kW αποτέλεσαν το πρώτο υβριδικό σύστημα Wind – PV – Diesel στον κόσμο (ΕΛΕΤΑΕΝ, 2016a). Ακολούθησε μία περίοδος ανάπτυξης για τον κατασκευαστικό τομέα των αιολικών, κυρίως κατά τις περιόδους 1990-1993 και 1999-2001, με την πραγματοποίηση αρκετών σημαντικών έργων. (Kaldellis, 2005).

Η βέλτιστη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού, επιτυγχάνεται με το βέλτιστο σχεδιασμό των μηχανικών μερών των Α/Γ και τη βελτιστοποίηση του δικτύου ώστε να επιτευχθεί μέγιστη διείσδυση της παραγόμενης ενέργειας στο σύστημα.

Μέχρι πρόσφατα, αρκούσε ο σχεδιασμός πτερύγων με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως επιθυμητό αεροδυναμικό προφίλ και στιβαρή κατασκευή, ωστόσο με την επερχόμενη ανάπτυξη και την εγκατάσταση Α/Γ σε περιοχές διαφορετικών περιβαλλοντικών συνθηκών παγκοσμίως, η θεώρηση αυτή εγκαταλείφθηκε. Έτσι, καθορίστηκαν τρεις ζώνες ιδιαίτερων συνθηκών και πλέον η νέα πρακτική σχεδιασμού,

επιβάλλει τη μελέτη των κλιματολογικών συνθηκών στην περιοχή εγκατάστασης του έργου. Οι ζώνες αυτές αφορούν περιοχές ψυχρού κλίματος όπου ευνοείται η ανάπτυξη παγετού, περιοχές αυξημένης υγρασίας όπου ευνοείται η ανάπτυξη πληθυσμών εντόμων, και περιοχές με αμμώδη περιβάλλοντα χώρο όπου ευνοούνται οι αμμοθύελλες ή η αερομεταφορά σωματιδίων σκόνης. Σε καθεμία από τις ζώνες αυτές δημιουργούνται συνθήκες ικανές να προκαλέσουν λειτουργικά προβλήματα στα Α/Π και κατ' επέκταση στην εκτιμώμενη απόδοση των Α/Γ. Έτσι, με στόχο την αποφυγή ανεπιθύμητων προβλημάτων κατά τη λειτουργία των Α/Γ, υιοθετήθηκαν τεχνικές σχεδιασμού οι οποίες δίνουν ιδιαίτερη έμφαση στο υλικό κατασκευής και τις ιδιότητες της επιφάνειας των πτερύγων. (Dalili et al., 2009).



Εικόνα 2. Συγκέντρωση σκόνης στην περιοχή της Μεσογειακής Ευρώπης. (Πηγή: ΕΚΠΑ, 2016α).

Σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, η συγκέντρωση σκόνης στην ατμόσφαιρα είναι πολύ μικρή στην Ελλάδα, σε

σχέση με τις χώρες τις Κεντρικής Ασίας ή της Βορείου Αφρικής. Ωστόσο, το κλιματικό καθεστώς της Β. Αφρικής, ιδιαίτερα λόγω της ερήμου Σαχάρας, ασκεί έντονη επιρροή στην Ελλάδα, με αποτελέσματα να υπάρχουν περίοδοι κατά τις οποίες σημειώνεται έντονη μεταφορά σκόνης από τα νότια, επιδρώντας στη σύνθεση της ατμόσφαιρας πάνω από τον ελλαδικό χώρο, ενώ ανάλογα φαινόμενα επιδρούν και στην περιοχή της Κύπρου. Τέτοια είναι η κατάσταση που αποτυπώνεται στην Εικόνα 2. (ΕΚΠΑ, 2016α).

2.3 Βασικά στοιχεία αεροδυναμικής

Η αεροδυναμική αποτελεί ένα από τα πεδία της μηχανικής των ρευστών και έχει σαν αντικείμενο τη μελέτη της συμπεριφοράς των σωμάτων που κινούνται μέσα σε ρεύμα αέρα και την αλληλεπίδρασή τους με αυτόν. Ακολουθεί αναφορά στις αεροτομές και τη βασική θεωρία που διέπει τη συμπεριφορά τους, καθώς και στις δυνάμεις που ασκούνται σε μία Α/Γ κατά τη λειτουργία της.

2.3.1 Αδιάστατοι συντελεστές ομοιότητας

Στα πλαίσια της μελέτης ροής ρευστών γίνεται χρήση αδιάστατων μεγεθών, τα οποία χαρακτηρίζουν τη ροή και τη διακριτοποιούν σε συγκεκριμένα καθεστάτα. Τα αδιάστατα αυτά μεγέθη, καλούνται αριθμοί ομοιότητας και επιτρέπουν τη σύγκριση πεδίων ροής υπό ανόμοιες συνθήκες. Έτσι, όταν τα πεδία ροής γύρω από γεωμετρικά ανόμοια σχήματα, εμφανίζουν ίδιους αδιάστατους αριθμούς, τότε τα πεδία αυτά χαρακτηρίζονται όμοια και οι βασικές εξισώσεις στις οποίες υπεισέρχονται τα μεγέθη αυτά απλοποιούνται.

Στην αεροδυναμική, οι αριθμοί Reynolds και Mach αποτελούν παράγοντες επίδρασης στο καθεστώς ροής και στην αεροδυναμική απόδοση των αεροτομών. Ο αριθμός Reynolds, ορίζεται ως ο λόγος των αδρανειακών δυνάμεων προς τις δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται στο ρευστό σε ένα συγκεκριμένο καθεστώς ροής, ενώ ο αριθμός Mach ορίζεται ως το πηλίκο της ταχύτητας της ροής προς την τοπική ταχύτητα μετάδοσης του ήχου, η οποία δίνεται από τη σχέση $a_{\infty} = \sqrt{\gamma RT_{\infty}}$, όπου γ ο ισεντροπικός εκθέτης, T_{∞} η απόλυτη θερμοκρασία και R η ειδική σταθερά του ρευστού μέσου (NASA, 2016α). Οι αριθμοί Reynolds και Mach, δίδονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} c}{\mu} = \frac{U_{\infty} c}{\nu} \quad (1)$$

$$Ma = \frac{U_{\infty}}{a_{\infty}} \quad (2)$$

όπου c το μήκος χορδής της αεροτομής, ρ η πυκνότητα, μ το δυναμικό ιξώδες, ν το κινηματικό ιξώδες και U_{∞} η αδιατάρακτη ταχύτητα του ρευστού μέσου.

Η μέθοδος της ομοιότητας, αποτελεί βασικό εργαλείο διερεύνησης, αφενός γιατί με χρήση ομοιωμάτων μικρότερων διαστάσεων δίνεται η δυνατότητα να εξαχθούν βασικά συμπεράσματα για τη ροή στα πρότυπα, τηρώντας του ίδιους αριθμούς ομοιότητας, αφετέρου διότι περιορίζεται έτσι το πλήθος των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν ένα ρευστομηχανικό φαινόμενο και απλοποιούνται οι βασικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το πρόβλημα. (Τσαγγάρης, 1995).

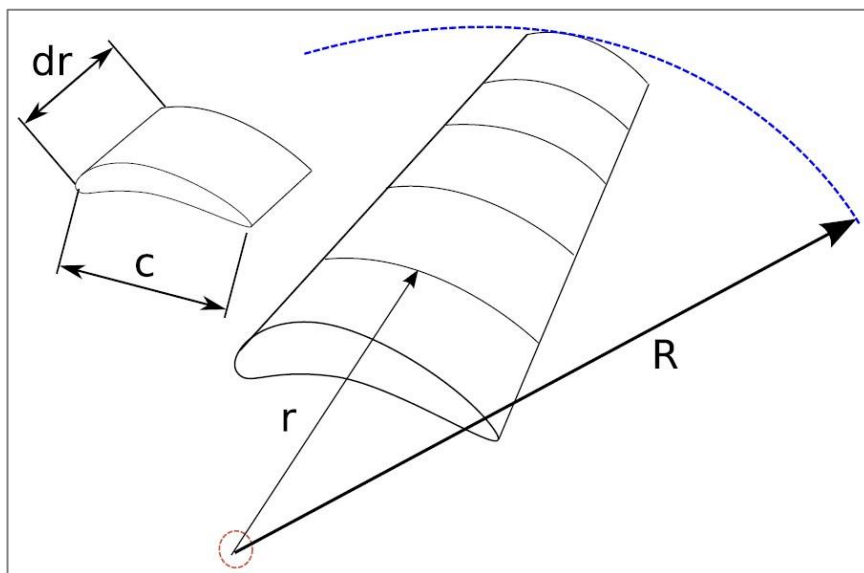
Για πολύ μικρή τιμή του αριθμού Re ($Re \ll 1$) η ροή χαρακτηρίζεται ως έρπουσα. Το καθεστώς αυτό εμφανίζεται συχνά στη φύση αλλά και στην τεχνολογία (π.χ. ροή σε πορώδη μέσα). Στην πράξη, η ροή ενός ρευστού είναι στρωτή για $Re \leq 2.300$, αν και σε εργαστηριακές συνθήκες και πολύ λείες επιφάνειες, μπορεί να διατηρηθεί στρωτή για μεγαλύτερες τιμές. Όταν ο Re αυξηθεί, προκαλούνται αστάθειες λόγω της έναρξης εμφάνισης τύρβης ($Re < 4.000$) και στη συνέχεια η ροή περνά στην τυρβώδη μεταβατική περιοχή. Η τιμή του Re για την οποία η ροή γίνεται πλήρως τυρβώδης εξαρτάται σημαντικά από τις συνθήκες εισόδου στο πεδίο και από την τραχύτητα της επιφάνειας που διατρέχει η ροή. Σε πολύ τραχείες επιφάνειες, η ροή μπορεί να γίνει πλήρως τυρβώδης για Re της τάξης του 10^4 , ενώ σε πολύ λείες για Re έως και 10^8 . (Μαθιουλάκης & Αναγνωστόπουλος, 2003).

2.3.2 Αεροτομές

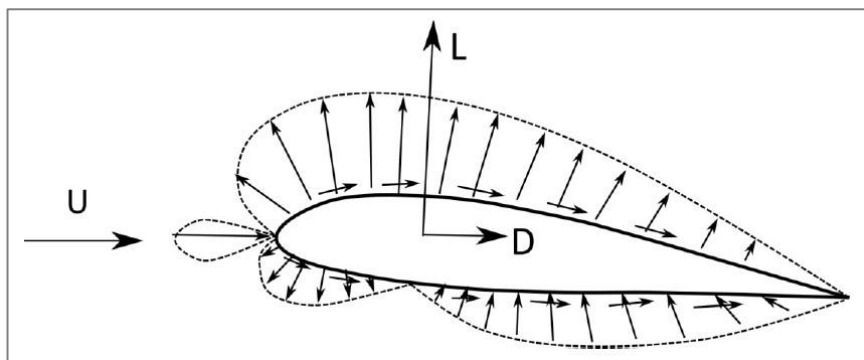
Κατά τη διδιάστατη ανάλυση, η αεροτομή θεωρείται ως γεωμετρικό σχήμα το οποίο εκτίθεται σε ρεύμα αέρα. Κατά την έκθεση, προκαλείται ανομοιομορφία κατανομής πιέσεων μεταξύ άνω και κάτω πλευράς, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή δυνάμεων άνωσης.

Στην πραγματικότητα, η αεροτομή είναι τμήμα πτέρυγας (Εικόνα 3), στερεό σώμα δηλαδή με στοιχειώδες πάχος το οποίο αλληλεπιδρά με συνεκτικό ρευστό, και ως εκ τούτου, η παραγωγή ανωστικών δυνάμεων θα συνοδεύεται από την παραγωγή δυνάμεων αντίστασης.

Στο σχήμα της Εικόνας 4, με L και D συμβολίζονται οι δυνάμεις της άνωσης και της αντίστασης αντίστοιχα. Το διάνυσμα της δύναμης της άνωσης, είναι κάθετο στο διάνυσμα της δύναμης της αντίστασης, το οποίο έχει πάντα την ίδια διεύθυνση με την ταχύτητα της ροής.

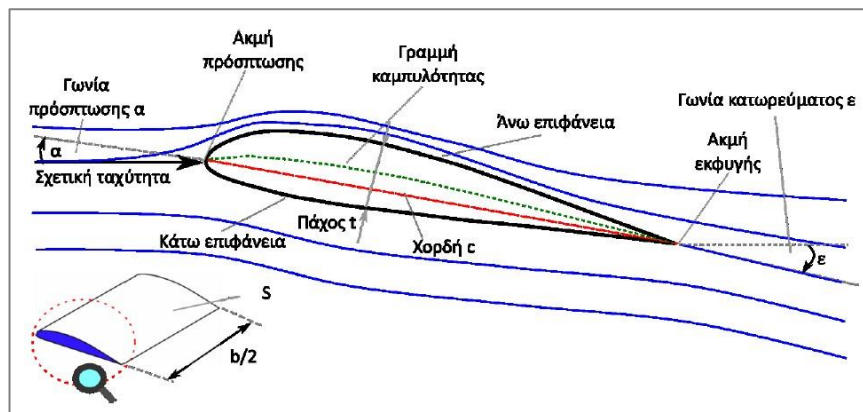


Εικόνα 3. Τρισδιάστατη άποψη μεμονωμένης αεροτομής και τμήμα πτέρυγας. (Πηγή: Ingram, 2011).



Εικόνα 4. Δυνάμεις και κατανομή πιέσεων σε αεροτομή. (Πηγή: Αντωνιάδης, 2016).

Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι παράμετροι σχεδιασμού μίας αεροτομής φαίνονται στο σχήμα της Εικόνας 5.



Εικόνα 5. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αεροτομής. (Πηγή: Αντωνιάδης, 2016).

Διακρίνονται οι ακμές πρόσπτωσης και εκφυγής καθώς και η χορδή της αεροτομής. Ως ακμή πρόσπτωσης ή χείλος προσβολής (leading edge), χαρακτηρίζεται το ακραίο σημείο της αεροτομής με το οποίο αυτή έρχεται αρχικά σε επαφή με το ρευστό μέσο. Αντίστοιχα, η ακμή εκφυγής ή χείλος εκφυγής (trailing edge) είναι το ακραίο σημείο της αεροτομής, το οποίο αποτελεί το τελευταίο σημείο επαφής και αλληλεπίδρασης με το ρευστό. Το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει την ακμή πρόσπτωσης με την ακμή εκφυγής καλείται χορδή (chord line) και συμβολίζεται με c . Διακρίνονται επίσης η άνω και η κάτω επιφάνεια της αεροτομής και ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που ισαπέχουν από αυτές, ο οποίος καλείται και γραμμή καμπυλότητας (mean camber line). Η κάθετη απόσταση μεταξύ των δύο επιφανειών αποτελεί το πάχος (thickness) της αεροτομής και συμβολίζεται με t . Η γωνία που σχηματίζει η χορδή της αεροτομής με τη διεύθυνση του ανέμου, καλείται γωνία πρόσπτωσης (angle of attack – AoA) και συμβολίζεται με το γράμμα α .

Κατά την εξέλιξη του κλάδου της Αεροδυναμικής, σχεδιάσθηκαν και αναπτύχθηκαν πολλές αεροτομές με διαφορετικά γεωμετρικά και αεροδυναμικά χαρακτηριστικά, οι οποίες στη συνέχεια τυποποιήθηκαν. Το γεγονός αυτό, οδήγησε στην καθιέρωση σειρών αεροτομών από διάφορους οίκους κατασκευής. Τέτοιες είναι οι NREL, NACA, SERI, FFA, RISØ. Διεθνώς αναγνωρίσιμες, είναι οι σειρές NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), αρκετές από τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν σε ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα. Το σημαντικότερο έργο περιγραφής και καταγραφής στοιχείων των αεροτομών, έχει αναπτυχθεί από τους Abbott & Von Doenhoff (1959). Ωστόσο, μία πιο πρόσφατη μελέτη που περιλαμβάνει πειραματικά

δεδομένα και κριτήρια επιλογής κατάλληλων αεροτομών είναι αυτή των Hansen & Butterfield (1993).

Οι αεροτομές αποτελούν διατομές, σχεδιασμένες κατάλληλα ώστε να επιτυγχάνονται ταυτόχρονα μέγιστη δυνατή ανάπτυξη άνωσης και ελάχιστη δυνατή ανάπτυξη αντίστασης.

Οι δυνάμεις άνωσης και αντίστασης εκφράζονται μέσω των αδιάστατων συντελεστών άνωσης (C_l) και αντίστασης (C_d) ή του λόγου τους $\left(\frac{C_l}{C_d}\right)$. Η άνωση και η αντίσταση εξαρτώνται από τη γωνία πρόσπτωσης, την ταχύτητα της ροής, την πυκνότητα του ρευστού και τη συνεκτικότητα της ροής.

Ο συντελεστής αντίστασης μίας αεροτομής δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A_b} \quad \text{ή} \quad C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 bc} \quad (3)$$

όπου D η δύναμη αντίστασης (σε N), ρ η πυκνότητα του ανέμου (σε kg/m³), V η ταχύτητα πρόσπτωσης του ανέμου στην αεροτομή (σε m/sec) και A_b είναι η επιφάνεια της πτέρυγας (σε m²), ήτοι το μήκος χορδής c επί το πλάτος της b . (NASA, 2016b).

Αντίστοιχα, ο συντελεστής άνωσης δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A_b} \quad \text{ή} \quad C_l = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 bc} \quad (4)$$

όπου L η δύναμη άνωσης (σε N). (NASA, 2016c).

Καθώς μεταβάλλεται η γωνία πρόσπτωσης, μεταβάλλεται και το μέτρο της άνωσης, ενώ κάθε αεροτομή παρουσιάζει μέγιστο λόγο $\frac{C_l}{C_d}$ για συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης. Επιπλέον, χαρακτηριστική για κάθε αεροτομή είναι και η γωνία πρόσπτωσης, κατά την οποία παρουσιάζεται αποκόλληση της ροής, άρα και δραματική μείωση της άνωσης με ταυτόχρονη αύξηση της αντίστασης (γωνία μηδενικής άνωσης).

2.3.3 Αεροδυναμική των Α/Γ

Βασικός στόχος της σχεδίασης των Α/Γ είναι η βέλτιστη απόδοση του ρότορα και η μέγιστη εκμετάλλευση του ενεργειακού περιεχομένου του ανέμου. Η κινητική ενέργεια

του αέρα που διέρχεται από την επιφάνεια που διαγράφει ο ρότορας καθώς στρέφεται, δίνεται από τη σχέση $E = \frac{1}{2}mV^2$ και η συνολικά διαθέσιμη ισχύς θα είναι:

$$P_{wind} = \frac{1}{2}\dot{m}U_{\infty}^2 \xrightarrow{\dot{m}=\rho AU_{\infty}} P_{wind} = \frac{1}{2}\rho AU_{\infty}^3 \xrightarrow{A=\pi R^2} P_{wind} = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 U_{\infty}^3 \quad (5)$$

Όπου m η μάζα αέρα, ρ η πυκνότητά του, \dot{m} η παροχή αέρα που διέρχεται από την επιφάνεια A που διαγράφει ο στρεφόμενος ρότορας, U_{∞} η αδιατάρακτη ταχύτητα του ανέμου, και R η ακτίνα του ρότορα.

Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη σχεδιασμού των Α/Γ, είναι ο λόγος προχώρησης (tip speed ratio) και ο συντελεστής πληρότητας (solidity).

Ο λόγος προχώρησης λ , εκφράζει την αριθμητική συσχέτιση της ταχύτητας του ανέμου με τη γωνιακή ταχύτητα του ρότορα της Α/Γ, και δίδεται από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U_{\infty}} \quad (6)$$

όπου Ω είναι η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα και R η ακτίνα του. Η γωνιακή ταχύτητα δίδεται από τη σχέση $\Omega = 2\pi f$, όπου f είναι η συχνότητα περιστροφής. Γενικά, χαμηλή τιμή του λ οδηγεί σε απώλεια δυναμικού αξιοποιήσιμου δυναμικού, ακριβώς γιατί μεγάλες μάζες αέρα διαφεύγουν από τα ανοίγματα που υπάρχουν μεταξύ των πτερύγων. Αντίθετα, η υψηλή τιμή του λ είναι επιθυμητή γιατί η μεγάλη γωνιακή ταχύτητα σημαίνει αυξημένες στροφές του άξονα περιστροφής του ρότορα, γεγονός που εξασφαλίζει επαρκή λειτουργία της γεννήτριας. Ωστόσο, συνδέεται και με φαινόμενα που επιδρούν αρνητικά στη λειτουργία της Α/Γ, όπως διάβρωση λόγω της αλληλεπίδρασης με αερομεταφερόμενα σωματίδια, ηχητική ρύπανση, αυξημένες δονήσεις και αστοχία. (Ragheb, 2014).

Ο συντελεστής πληρότητας σ , εκφράζει την αριθμητική συσχέτιση του εμβαδού των πτερυγίων του ρότορα με το εμβαδό της επιφάνειας που διαγράφουν τα πτερύγιά του κατά την περιστροφή, και δίδεται από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{cB}{2\pi R} \quad (7)$$

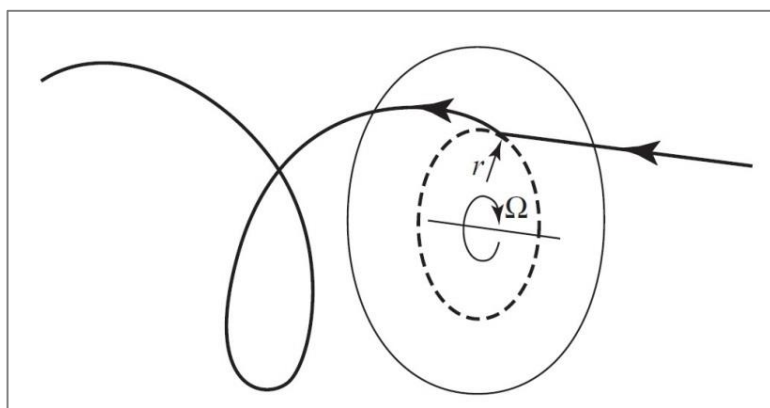
όπου c είναι το μήκος χορδής, R η ακτίνα του ρότορα και B ο αριθμός των πτερύγων του. (Marten & Wendler, 2013).

Για την προσέγγιση της συμπεριφοράς των πτερύγων Α/Γ οριζοντίου άξονα, τα αριθμητικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα είναι αρκετά. Ένα από αυτά

αποτελεί και η Θεωρία Ορμής Στοιχείων Πτέρυγας ή BEM (Blade Element Momentum Theory), εκτενής περιγραφή της οποίας έχει πραγματοποιηθεί από τους Burton et al. (2001) και Hansen (2008). Η BEM συνδυάζει τη Γενική Θεωρία Ορμής (Momentum Theory) με τη Θεωρία Στοιχείου Πτέρυγας (Blade Element Theory).

Γενική Θεωρία Ορμής

Η μέθοδος στηρίζεται στην αρχή διατήρησης της ορμής του περιστρεφόμενου απορρεύματος, που σχηματίζεται όταν το ρεύμα αέρα διέλθει από το επίπεδο του ρότορα, οπότε και διαταράσσεται λόγω της αλληλεπίδρασης με το στρεφόμενο μέρος της Α/Γ. Στο σημείο αυτό έχει γραμμική και γωνιακή ταχύτητα, και η τροχιά που διαγράφει αμέσως μετά το κατάντη επίπεδο του ρότορα, είναι ελικοειδής (Εικ. 6).



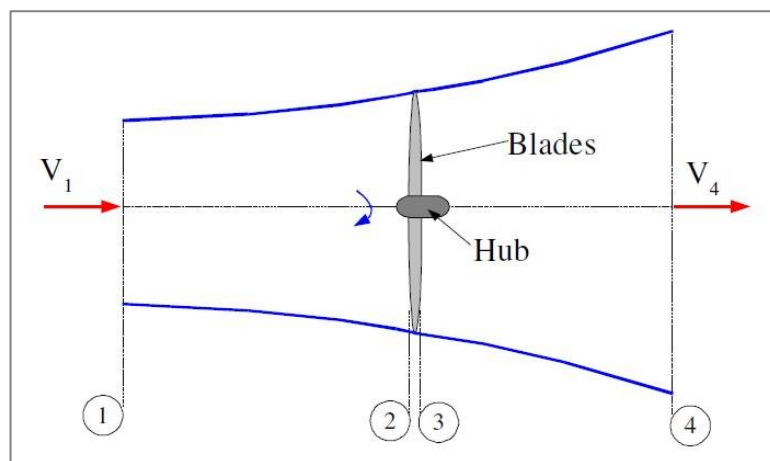
Εικόνα 6. Ελικοειδής τροχιά στοιχειώδους σωματιδίου ρευστού. (Πηγή: Burton et al., 2001).

Για τον προσδιορισμό της αξονικής δύναμης, θεωρώ το ρεύμα αέρα και τα επίπεδα 1 έως 4 όπως φαίνονται στο σχήμα της Εικόνας 7 ($V_1 = U_\infty$). Αν θεωρηθεί ότι $p_1 = p_4$ και $V_2 = V_3$ και ότι η ροή είναι συνεκτική μόνο πριν και μετά το επίπεδο του ρότορα, τότε από τη εξίσωση Bernoulli προκύπτει:

$$p_2 - p_3 = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_4^2) \quad (8)$$

Ορίζεται ο συντελεστής αξονικής επαγωγής α ως ο συντελεστής μείωσης της αδιατάρακτης ταχύτητας του ανέμου λόγω της επιβράδυνσης της ροής στο επίπεδο του ρότορα. Είναι δηλαδή:

$$\alpha = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \quad (9)$$



Εικόνα 7. Αξονικό ρεύμα αέρα γύρω από το ρότορα της Α/Γ. (Πηγή: Ingram, 2011).

Για τις ταχύτητες V_2 και V_4 , ισχύουν τα εξής:

$$V_2 = V_1(1-\alpha) \quad (10)$$

$$V_4 = V_1(1 - 2\alpha) \quad (11)$$

Έτσι, η αξονική δύναμη υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$dF_x = \frac{1}{2}\rho V_1^2 [4\alpha(1-\alpha)]2\pi r dr \quad (12)$$

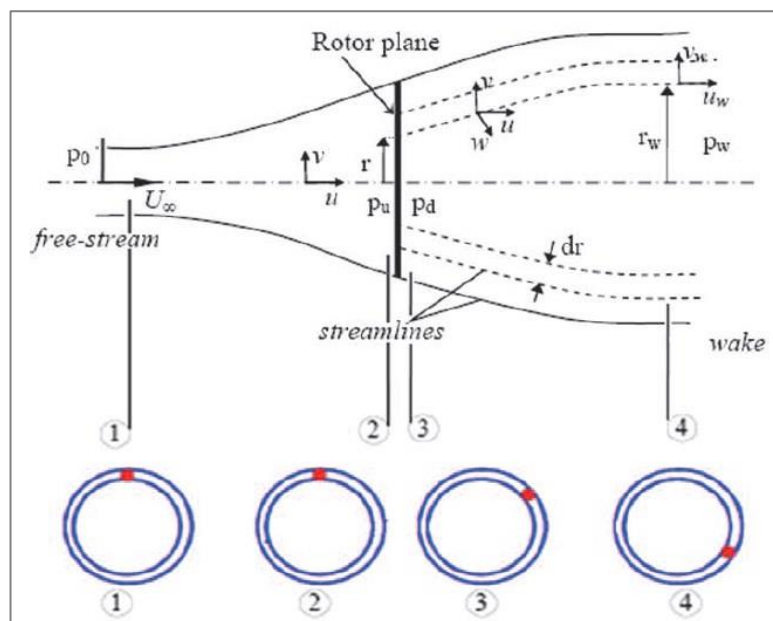
Το περιστρεφόμενο απόρρευμα φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 8 και η μελέτη γίνεται στα επίπεδα 1 έως 4.

Μεταξύ των επιπέδων 2 και 3 η Α/Γ περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα Ω και προκαλεί την περιστροφή του απορρέυματος, το οποίο αποκτά γωνιακή ταχύτητα ω . Σύμφωνα με τις αρχές της Θεωρητικής Μηχανικής, για τον κυκλικό δίσκο ισχύουν οι σχέσεις: για τη ροπή αδράνειας $I = mr^2$ όπου m η μάζα και r η ακτίνα του δίσκου, για τη στροφορμή $L_\delta = I\omega$ ενώ για τη ροπή στρέψης (ρυθμός μεταβολής στροφορμής) θα είναι $T = \frac{dL}{dt}$. Είναι λοιπόν:

$$T = \frac{dI\omega}{dt} = \frac{d(mr^2\omega)}{dt} = \frac{dm}{dt}r^2\omega \quad (13)$$

Η αεροδυναμική ροπή για στοιχειώδες σωματίδιο του ρευστού στο απόρρευμα, θα είναι:

$$dT = dm\omega r^2 \quad (14)$$



Εικόνα 8. Περιστρεφόμενο απόρρευμα γύρω από την Α/Γ. (Πηγή: Kulunk, 2011).

Για το περιστρεφόμενο απόρρευμα, ισχύει:

$$d\dot{m} = \rho AV_2 = \rho 2\pi r dr V_2 \quad (15)$$

Ορίζεται ο συντελεστής γωνιακής επαγωγής α' ως ο συντελεστής μείωσης της γωνιακής ταχύτητας του ρότορα, λόγω της επιβράδυνσης της ροής στο επίπεδο του ρότορα. Είναι δηλαδή:

$$\alpha' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (16)$$

Τελικά, με τη βοήθεια των (9), (10), (15) και (16), η εφαπτομενική δύναμη θα είναι:

$$dT = 4 \alpha' (1-\alpha) \rho V \Omega r^3 \pi dr \quad (17)$$

Από τις εξισώσεις (12) και (17) υπολογίζονται αντίστοιχα η αξονική και η εφαπτομενική δύναμη σε στοιχειώδες σωματίδιο του ρευστού στο περιστρεφόμενο απόρρευμα.

Συντελεστής ισχύος των Α/Γ

Ο συντελεστής ισχύος των Α/Γ δίνεται από τη σχέση (Burton et al., 2001):

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A_d} \quad \text{ή} \quad C_p = 4 \alpha (1-\alpha)^2 \quad (18)$$

Η μέγιστη τιμή για του συντελεστή προκύπτει όταν $4(1-\alpha)(1-3\alpha) = 0$, δηλαδή για $\alpha = \frac{1}{3}$, οπότε με αντικατάσταση στην εξίσωση (18), θα είναι $C_{p_{max}} = \frac{16}{27} = 0,593$. Η μέγιστη δυνατή τιμή που μπορεί να λάβει ο συντελεστής ισχύος είναι γνωστή ως όριο

του Betz και εκφράζει το ποσοστό το οποίο θεωρητικά μπορεί μία Α/Γ να αποσπάσει από το ενεργειακό περιεχόμενο του διερχόμενου αέρα.

Θεωρία Στοιχείου Πτέρυγας

Εδώ εξετάζεται η κατανομή των πιέσεων που αναπτύσσονται γύρω από την πτέρυγα λόγω των δυνάμεων της άνωσης και της αντίστασης, θεωρώντας ότι δεν υπάρχει αλληλεπίδραση αεροδυναμικής φύσεως μεταξύ των στοιχείων και ότι οι δυνάμεις που ασκούνται στα στοιχεία καθορίζονται μόνο από τους συντελεστές άνωσης και αντίστασης.

Θεωρούμε ότι η πτέρυγα αποτελείται από πεπερασμένο αριθμό στοιχείων (Εικ. 3), σε καθένα από τα οποία η ροή ελαφρώς διαφέρει λόγω των μεταξύ τους διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών, όπως η απόσταση από τον άξονα περιστροφής (r) και το μήκος της χορδής (c). Εφόσον η εφαπτομενική ταχύτητα του κάθε στοιχείου είναι γνωστή και ίση με Ωr , μπορεί να υπολογιστεί η ροή σε καθένα από αυτά και ολοκληρώνοντας να προσδιοριστεί η απόδοση της πτέρυγας (Ingram, 2011).

Δεδομένα για τους συντελεστές άνωσης και αντίστασης για την πλειοψηφία των αεροτομών, είναι διαθέσιμα από δοκιμές αεροδυναμικής σήραγγας που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν. Λαμβάνοντας όμως υπόψη το γεγονός ότι κατά την πραγματοποίηση των δοκιμών η αεροτομή παραμένει ακίνητη, γεννάται η ανάγκη συσχέτισης της ροής γύρω από κινούμενη αεροτομή με τη ροή γύρω από την ακίνητη αεροτομή της εκάστοτε δοκιμής.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω (Εικ. 8), η ροή γύρω από την πτέρυγα ξεκινάει στο επίπεδο 2 (ανάντη του ρότορα) και τελειώνει στο επίπεδο 3 (κατάντη του ρότορα), όπου και περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω λόγω της αλληλεπίδρασης με το στρεφόμενο ρότορα. Είναι ήδη γνωστό, ότι κατά μήκος της πτέρυγας, η μέση γωνιακή ταχύτητα του περιστρεφόμενου απορρεύματος θα είναι ίση με $\frac{\omega}{2}$, ενώ η γωνιακή ταχύτητα της πτέρυγας είναι ίση με Ω . Έτσι, η μέση εφαπτομενική ταχύτητα της πτέρυγας, θα είναι ίση με $\Omega r + \frac{\omega r}{2}$ (Εικ. 9).

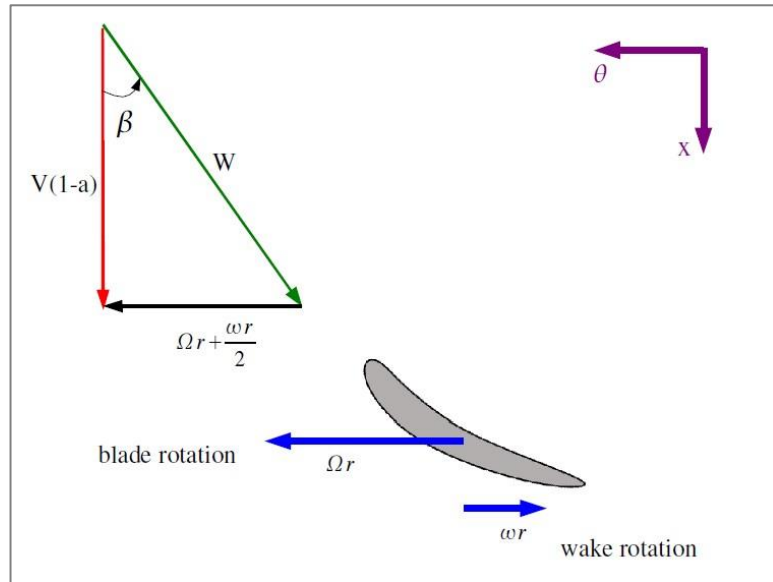
Από το σχήμα της Εικόνας 9 και την εξίσωση (16) προκύπτει ότι:

$$\Omega r + \frac{\omega r}{2} = \Omega r(1 + \alpha') \quad (19)$$

Στη συνέχεια, από την εξίσωση (19) και με τη βοήθεια της (10) προκύπτει ότι:

$$\tan\beta = \frac{\Omega r(1+\alpha')}{V(1-\alpha)} \quad (20)$$

Στην εξίσωση (20), το V αντιπροσωπεύει την ταχύτητα της ροής αμέσως πριν αυτή εισέλθει στο πεδίο επίδρασης της πτέρυγας ($V = U_\infty$).



Εικόνα 9. Τρίγωνο ταχυτήτων σε πτέρυγα Α/Γ. (Πηγή: Ingram, 2011).

Η τιμή του β θα διαφέρει από στοιχείο σε στοιχείο, ενώ τοπικά, ο λόγος προχώρησης λ_r δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{V} \quad (21)$$

Από την εξίσωση (20) με τη βοήθεια της εξίσωσης (21) προκύπτει ότι:

$$\tan\beta = \frac{\lambda_r(1+\alpha')}{(1-\alpha)} \quad (22)$$

Τελικά, η ζητούμενη σχετική ταχύτητα W δίνεται από την εξίσωση (Εικόνα 9):

$$W = \frac{V(1-\alpha)}{\cos\beta} \quad (23)$$

Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται σε κάθε στοιχείο, αποτυπώνονται στο σχήμα της Εικόνας 10. Όπως ήδη αναφέρθηκε, το διάνυσμα της άνωσης είναι εξ' ορισμού κάθετο στο διάνυσμα της ταχύτητα της ροής, ενώ για το διάνυσμα της αντίστασης ισχύει ότι

αυτό είναι πάντα παράλληλο με το διάνυσμα της ταχύτητας της ροής. Για κάθε στοιχείο της πτέρυγας, ισχύει:

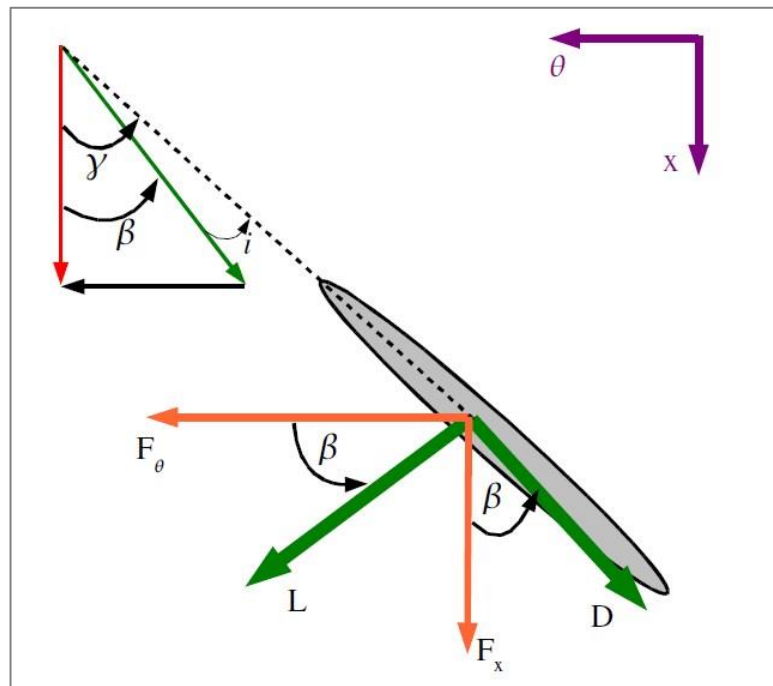
$$dF_{\theta} = dL \cos \beta - dD \sin \beta \quad (24)$$

$$dF_x = dL \sin \beta + dD \cos \beta \quad (25)$$

Στις εξισώσεις (24) και (25), οι παράγοντες dL και dD μπορούν να προσδιορισθούν με τη βοήθεια των εξισώσεων (3) και (4) (συντελεστές αντίστασης και άνωσης), ως εξής:

$$dL = C_l \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (26)$$

$$dD = C_d \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (27)$$



Εικόνα 10. Δυνάμεις που αναπτύσσονται στην πτέρυγα.

(Πηγή: Ingram, 2011).

Για αριθμό πτερυγών ίσο με B , οι εξισώσεις (24) και (25) διατυπώνονται ως εξής:

$$dF_x = \sigma_r \pi \rho \frac{V^2 (1-\alpha)^2}{\cos^2 \beta} (C_l \sin \beta + C_d \cos \beta) r dr \quad (28)$$

$$dT = \sigma_r \pi \rho \frac{V^2 (1-\alpha)^2}{\cos^2 \beta} (C_l \cos \beta - C_d \sin \beta) r^2 dr \quad (29)$$

όπου ορίζεται τοπικά ο συντελεστής πληρότητας σ_r ως εξής:

$$\sigma_r = \frac{cB}{2\pi r} \quad (30)$$

Θεωρία Ορμής Στοιχείων Πτέρυγας

Οι απώλειες ακροπτερυγίου, μπορούν να ληφθούν υπόψη με τη χρήση ενός συντελεστή διόρθωσης (Q), ο οποίος εκφράζει τη μείωση των ασκούμενων δυνάμεων κατά μήκος της πτέρυγας, λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1, και υπολογίζεται ως εξής:

$$Q = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp \left\{ \frac{B(1-\frac{r}{R})}{\frac{r}{R} \cos \beta} \right\} \right] \quad (31)$$

Με εφαρμογή της εξίσωσης (31) στις εξισώσεις (12) και (17), προκύπτει:

$$dF_x = Q \rho V_1^2 [4 \alpha (1-\alpha)] \pi r dr \quad (32)$$

$$dT = Q 4 \alpha' (1-\alpha) \rho V \Omega r^3 \pi dr \quad (33)$$

Οι εξισώσεις (32) και (33) εκφράζουν την αξονική ώση και τη ροπή στρέψης συναρτήσει των παραμέτρων της ροής. Οι εξισώσεις (28) και (29) εκφράζουν την αξονική ώση και τη ροπή στρέψης συναρτήσει των συντελεστών άνωσης και αντίστασης της αεροτομής. Με επίλυση των (28), (29), (32) και (33) προκύπτουν οι παρακάτω χρήσιμες σχέσεις:

$$\frac{\alpha}{1-\alpha} = \frac{\sigma_r (C_l \sin \beta + C_d \cos \beta)}{4 Q c \cos^2 \beta} \quad (34)$$

$$\frac{\alpha'}{1-\alpha} = \frac{\sigma_r (C_l \cos \beta - C_d \sin \beta)}{4 Q \lambda_r \cos^2 \beta} \quad (35)$$

Απόδοση ισχύος A/Γ

Η συνεισφορά του κάθε στοιχείου στη συνολικά αποδιδόμενη ισχύ είναι (Ingram, 2011):

$$dP = \Omega dT \quad (36)$$

Έτσι, η συνολική ισχύς του ρότορα δίνεται από τη σχέση:

$$P = \int_{r_{hub}}^R dP dr = \int_{r_{hub}}^R \Omega dT dr \quad (37)$$

Τελικά, από τις εξισώσεις (5), (37), (18), υπολογίζεται ο συντελεστής ισχύος:

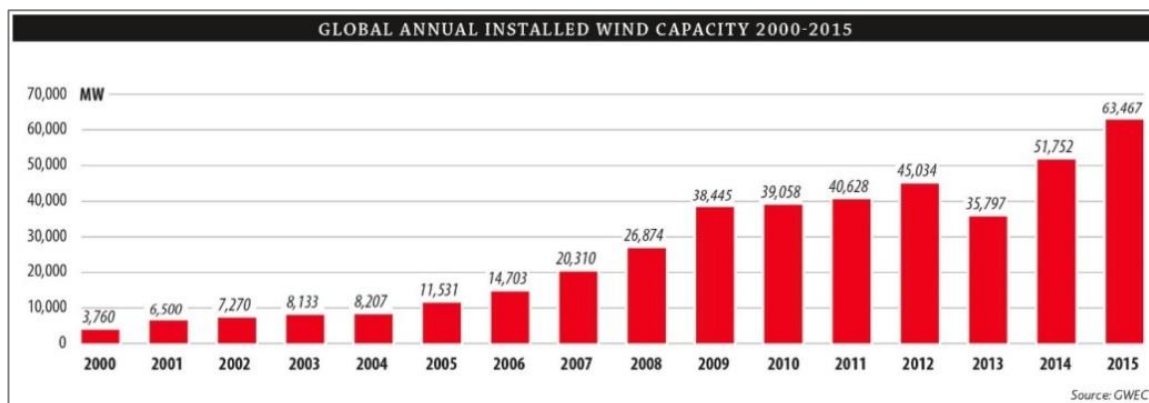
$$P = C_p P_{wind} \rightarrow P = C_p \frac{1}{2} \rho \pi R^2 U_{\infty}^3 \rightarrow C_p = \frac{\int_{r_{hub}}^R \Omega dT dr}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 U_{\infty}^3} \quad (38)$$

2.4 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

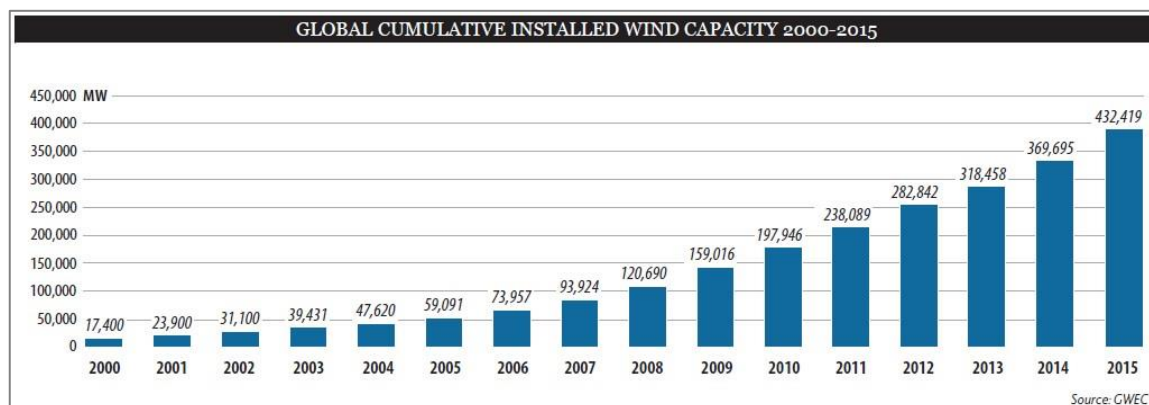
Στις παραγράφους που ακολουθούν, συγκεντρώνονται οι τάσεις που έχουν καταγραφεί στην εγχώρια διεθνή βιβλιογραφία και αρθρογραφία και που σχετίζονται με το ευρύτερο αντικείμενο της παρούσας Μεταπτυχιακής Διατριβής.

2.4.1 Διεθνής και ελληνική πραγματικότητα

Το 2015 εγκαταστάθηκαν συνολικά περισσότερα από 63 GW αιολικής ισχύος, μέγεθος που αποτελεί ρεκόρ για τα παγκόσμια χρονικά (Διάγραμμα 1). Όσον αφορά στις χώρες που διαμορφώνουν το αποτέλεσμα, στην πρώτη θέση της κατάταξης βρίσκεται η Κίνα, ακολουθεί η Γερμανία ενώ την τρίτη θέση καταλαμβάνουν οι ΗΠΑ. Στα τέλη του ίδιου έτους, η συνολικά εγκατεστημένη ισχύς ανέρχεται παγκοσμίως σε 432,9 GW, γεγονός που υποδηλώνει μεγέθυνση της τάξης του 17% (Διάγραμμα 2). (GWEC, 2016b).



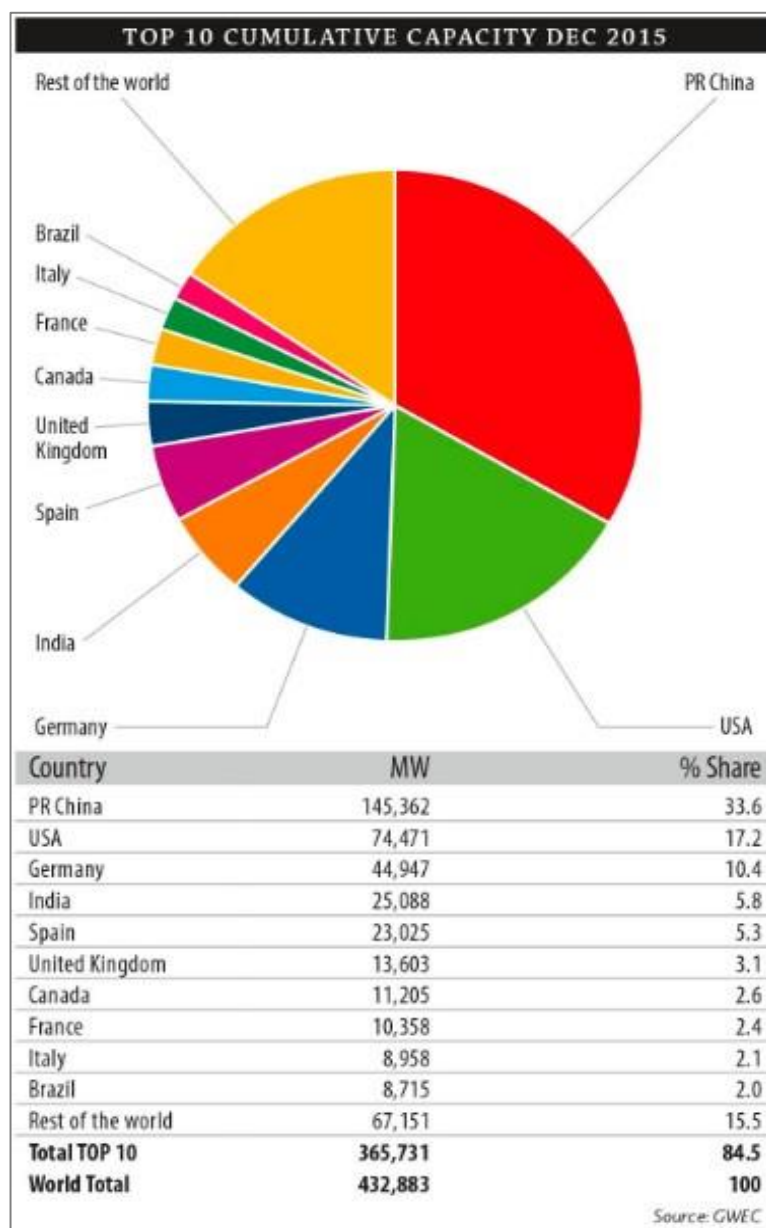
Διάγραμμα 1. Παγκόσμια ετήσια εγκατάσταση αιολικής ισχύος 2000 – 2015. (Πηγή: GWEC, 2016a).



Διάγραμμα 2. Παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς 2000 – 2015. (Πηγή: GWEC, 2016a).

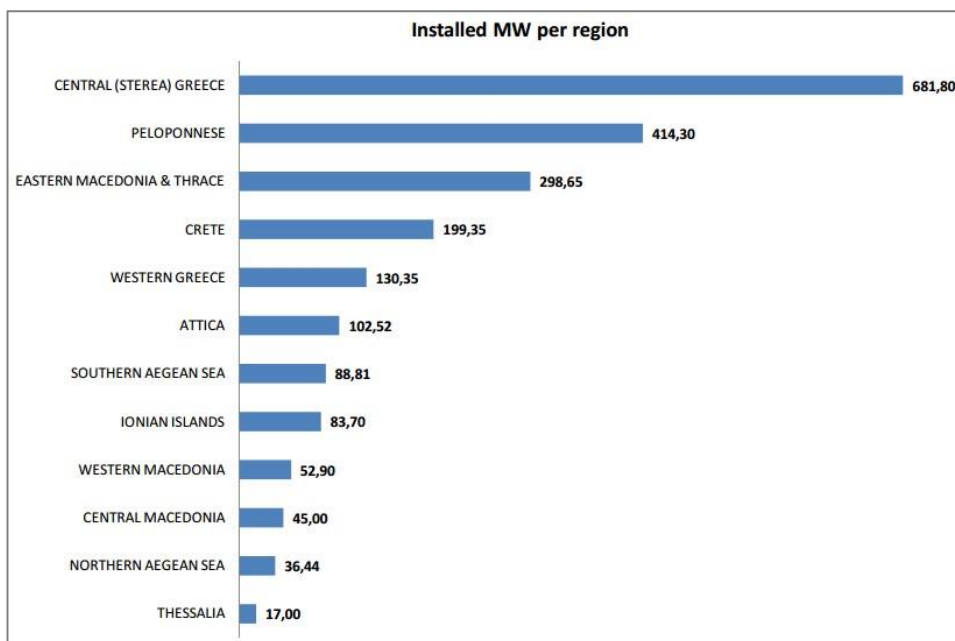
Περί τα τέλη του 2015, συνολικά 8 χώρες είχαν εγκατεστημένη ισχύ άνω των 10.000 MW και συγκεκριμένα οι εξής: Κίνα, ΗΠΑ, Γερμανία, Ινδία, Ισπανία, Ηνωμένο Βασίλειο, Καναδάς και Γαλλία (Διάγραμμα 3). Την ίδια στιγμή, οι χώρες με εγκατεστημένη ισχύ άνω των 1.000 MW ανέρχονταν σε 26, εκ των οποίων 17 ήταν ευρωπαϊκές, 4 ασιατικές,

(Κίνα, Ινδία, Ιαπωνία, Αυστραλία), 4 βορειοαμερικανικές (ΗΠΑ, Καναδάς, Μεξικό, Βραζιλία) και 1 αφρικανική (Νότιος Αφρική), ολοκληρώνοντας έτσι τον παγκόσμιο χάρτη της συνολικά εγκατεστημένης αιολικής ισχύος. (GWEC, 2016b).

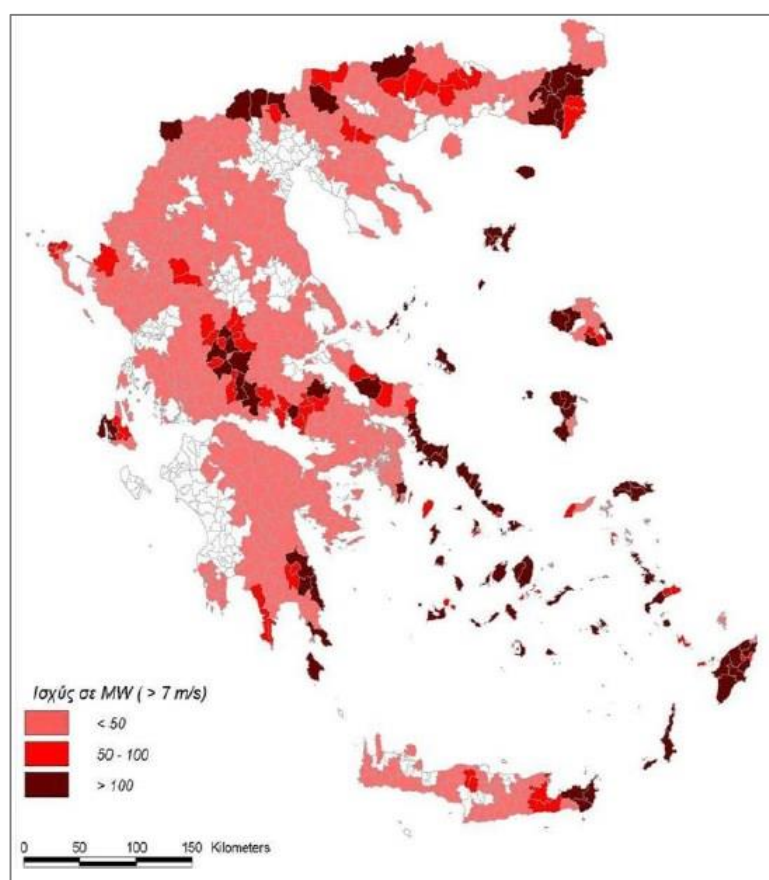


Διάγραμμα 3. Κατάταξη χωρών σύμφωνα με την εγκατεστημένη αιολική ισχύ. (Πηγή: GWEC, 2016a).

Η εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ελλάδα, την ίδια περίοδο, ανέρχεται σε 2.150,8 MW, μέγεθος το οποίο υποδηλώνει αύξηση της τάξης του 8,7% σε σχέση με το 2014 (ΕΛΕΤΑΕΝ, 2016b). Η κατανομή ανά περιοχή, φαίνεται στο Διάγραμμα 4.



Διάγραμμα 4. Εγκατεστημένη αιολική ισχύς. Κατανομή στον ελληνικό χώρο. (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ, 2016b).



Εικόνα 11. Πρόβλεψη εγκατάστασης αιολικής ισχύος ανά Δήμο. (Πηγή: ΥΠΕΚΑ, 2012).

Οι προβλέψεις για την παραγωγή αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα, είναι κάθε άλλο παρά απαισιόδοξες. Η τεχνολογική βελτίωση στα υλικά και στα μηχανικά μέρη των Α/Γ, εκτιμάται ότι θα αυξήσει το μέγεθος της παραγωγής κατά 20-30% ανά περιοχή αιολικού ενδιαφέροντος, ενώ προβλέπεται ότι θα κατασκευαστούν νέα θαλάσσια Α/Π. Ταυτόχρονα, η διασύνδεση των νησιών με τα Κέντρα Υπερυψηλής Τάσης (ΚΥΤ) του Διασυνδεδεμένου Συστήματος αναμένεται να υπερπηδήσει τον περιορισμό της διείσδυσης της αιολικής ισχύος στο σύστημα, με συνέπεια τη περαιτέρω αύξηση της αιολικής παραγωγής. Έτσι, το «εν δυνάμει» δυναμικό ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα, κατανέμεται χωρικά στις διάφορες περιφέρειες της χώρας, ως φαίνεται στη Εικόνα 11. (ΥΠΕΚΑ, 2012).

2.4.2 Επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας

Το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών βρίσκεται στην κατεύθυνση της ηλεκτροπαραγωγής από Α/Π. Διερευνώνται οι παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος της ηλεκτροπαραγωγής, ενώ παράλληλα, στη διεθνή βιβλιογραφία και αρθρογραφία, έχουν αναπτυχθεί πολλές μελέτες στις οποίες αναλύεται το πεδίο ροής και συσχετίζονται η μεταβολή της επιφανειακής τραχύτητας με την απόδοση των Α/Γ.

Η τεχνολογία των Α/Γ είναι πλέον εξειδικευμένη και ως εκ τούτου χρήζει εξειδικευμένων μεθόδων σχεδιασμού οι οποίες υπεισέρχονται στον τομέα της αεροδυναμικής. Το μέσο για τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε μηχανική είναι η ίδια η πτέρυγα της Α/Γ, οι αεροδυναμικές ιδιότητες της οποίας, μαζί με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της, καθορίζουν την επάρκειά της ως προς την παραγωγή ισχύος.

Σε γενικές γραμμές έχουν αναπτυχθεί αρκετές έρευνες, στις οποίες μελετάται η ροή σε τραχεία επιφάνεια (Furuya & Fujita, 1967; Perry et al., 1969; Antonia & Luxton, 1971; Acharya et al., 1986; Raupach et al., 1991; Tachie et al., 2000; Antonia & Krogstad, 2001; Schultz & Flack, 2003). Όλες οι μελέτες, αφορούν σε διδιάστατη ασυμπίεστη ροή και εξετάζουν την επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας στη μεταβολή του ροϊκού καθεστώτος.

Εξειδικεύοντας το φαινόμενο αυτό, συμπεραίνουμε ότι η επιφανειακή τραχύτητα επιδρά στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της πτέρυγας και στην απόδοση των Α/Γ.

Το φαινόμενο μελέτησαν οι Van Rooij & Timmer (2003), Howell et al. (2010) και Li et al. (2010). Σύμφωνα με τους Van Rooij & Timmer (2003), η επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας στην αεροδυναμική απόδοση της πτέρυγας μίας Α/Γ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωμετρία της πτέρυγας, η οποία επιλέγεται τέτοια ώστε να ελαχιστοποιούνται οι ενεργειακές απώλειες. Ωστόσο η συνεχής επαφή των πτερύγων με παράγοντες διάβρωσης (σκόνη, σωματίδια, έντομα) κατά τη διάρκεια λειτουργίας της Α/Γ, επιφέρει φθορά στην επιφάνεια και οδηγεί σε αύξηση της επιφανειακής τραχύτητας, με άμεσο επακόλουθο την αύξηση των απωλειών παραγόμενης ισχύος (Sagol et al., 2013). Οι Howell et al. (2010), προσδιορίζουν την απόδοση Α/Γ κατακόρυφου άξονα, τόσο πειραματικά όσο και υπολογιστικά. Η κατανόηση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς πραγματοποιείται με την ανάπτυξη μοντέλων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Κατά τη μελέτη του πεδίου ροής, παρατηρήθηκε ότι η τραχύτητα της επιφάνειας των πτερύγων του ρότορα, επιδρά σημαντικά στην απόδοση της Α/Γ, ενώ τα αποτελέσματα της μελέτης, αποκάλυψαν ότι για χαμηλές ταχύτητες ανέμου ($U_{\infty} < 4,3 \text{ m/sec}$ και $Re < 30.000$) και λειαινώντας την επιφάνεια της πτέρυγας προκύπτει μειωμένη απόδοση της Α/Γ. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μεθοδολογία των Li et al. (2010), κατά την οποία πραγματοποιούνται προσομοιώσεις αρχικά για λεία επιφάνεια (μηδενική τραχύτητα), στη συνέχεια για διαφορετικά ύψη τραχύτητας, έπειτα για διαφορετική κατανομή τραχύτητας και τέλος εντοπίζονται τα κρίσιμα σημεία της αεροτομής.

Φαίνεται ότι η επιφανειακή τραχύτητα εμφανίζεται με δεδομένη κατανομή στις πτέρυγες των Α/Γ (Ferrer & Manduate, 2009; Pechlivanoglou et al., 2010). Οι Ferrer & Manduate (2009) πραγματοποιούν ανάλυση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής εκτελώντας σενάρια κατανομής της επιφανειακής τραχύτητας σε δεδομένη αεροτομή, για διαφορετικές περιόδους λειτουργίας της Α/Γ, ώστε να προσδιορίσουν πειραματικά τα αεροδυναμικά της χαρακτηριστικά. Η ανάλυση πραγματοποιείται αρχικά με τη θεώρηση απόλυτα λείας επιφάνειας, ενώ ακολουθεί προσομοίωση τραχείας επιφάνειας αντίστοιχης με αυτή που έχει υποστεί διάβρωση από σωματίδια σκόνης. Οι Pechlivanoglou et al. (2010), εξετάζουν τις αποκλίσεις γεωμετρίας που εμφανίζουν οι πτέρυγες των Α/Γ και οι οποίες προκαλούνται από μεταβολές στην επιφανειακή τους τραχύτητα, και συμπεραίνουν ότι η κατανεμημένη τραχύτητα έχει πολύ σημαντική επίδραση στη λειτουργία και την απόδοση των Α/Γ. Οι αποκλίσεις γεωμετρίας και η επιφανειακή τραχύτητα, προκαλούν συνδυαστικά μεγαλύτερες απώλειες ισχύος ενώ

το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται από τη μορφή και τη σοβαρότητα τους. Ωστόσο, για να μην προκληθούν μεταβολές στην απόδοση της Α/Γ, θα πρέπει να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες ενέργειας γύρω από την πτέρυγα και αυτό επιτυγχάνεται με τη διατήρηση της στρωτής ροής. Έτσι, εισάγεται ο όρος της οριακής τραχύτητας, ως το ύψος της αποδεκτής επιφανειακής τραχύτητας ώστε η ροή στο οριακό στρώμα να παραμείνει στρωτή.

Για τη μείωση της ηλεκτροπαραγωγής από Α/Π ευθύνεται και η διάβρωση που προκαλείται από τη συνεχή έκθεση των Α/Γ σε παράγοντες οξείδωσης (Soltani et al., 2011; Keegan et al., 2013; Sareen et al., 2014). Οι Soltani et al. (2011), μελέτησαν το πεδίο ροής γύρω από τμήμα πτέρυγας Α/Γ οριζοντίου άξονα, ισχύος 660 kW, ώστε να προσδιορίσουν την επίδραση της επιφανειακής διάβρωσης στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της αεροτομής και στην απόδοση της πτέρυγας. Με τον όρο επιφανειακή διάβρωση, νοείται η μεταβολή των φυσικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων της επιφάνειας της πτέρυγας, η οποία στην προκειμένη περίπτωση επέρχεται κατά την έκθεση των Α/Γ στα στοιχεία της φύσης. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε θεωρώντας ύψος τραχύτητας 0,5mm στην ανώτερη επιφάνεια της αεροτομής με ανομοιόμορφη κατανομή από το μέτωπο προσβολής έως το χείλος εκφυγής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ευαισθησία της επιλεχθείσης αεροτομής στην επιφανειακή διάβρωση, με μείωση του συντελεστή άνωσης (C_l) της τάξης του 35% και ελαφριά αύξηση του συντελεστή αντίστασης (C_d). Οι Keegan et al. (2013) εξετάζουν την ενδεχόμενη υποβάθμιση των μονάδων, εστιάζοντας στη διάβρωση που προκαλείται από τις βροχοπτώσεις και τις χαλαζοπτώσεις, ενώ οι Sareen et al. (2014) θεωρούν ότι μετά από διαρκή έκθεση των Α/Γ σε αερομεταφερόμενα σωματίδια επέρχεται φθορά στα μηχανικά τους μέρη, και δη στο χείλος προσβολής των πτερύγων. Η διάβρωση ξεκινάει με το σχηματισμό μικρής σημειακής φθοράς, η οποία με την πάροδο του χρόνου επεκτείνεται δημιουργώντας κοιλότητες και ασυνέχειες στην επιφάνεια γύρω από το χείλος προσβολής.

Παράλληλα, αρκετές μελέτες εστιάζουν στην ανάπτυξη παγετού και την επίδρασή του στην αεροδυναμική απόδοση των πτερύγων Α/Γ (Botta et al., 1998; Jasinski et al., 1998; Hochart et al., 2007; Homola et al., 2011; Parent & Ilinca, 2011). Οι Parent & Ilinca (2011), θεωρούν ότι η ανάπτυξη παγετού στις πτέρυγες των Α/Γ μεταβάλλει την έκταση και το ύψος της επιφανειακής τραχύτητας επηρεάζοντας έτσι τα αεροδυναμικά

τους χαρακτηριστικά. Ειδικότερα, αρκεί μικρή ποσότητα πάγου συγκεντρωμένη στο μέτωπο προσβολής της αεροτομής για να μειωθούν οι αεροδυναμικές ιδιότητες της πτέρυγας με αποτέλεσμα τη μείωση της παραγόμενης ισχύος. Σε αυτήν την περίπτωση, οι απώλειες ισχύος κυμαίνονται από 0,005 έως 50% της ετήσιας παραγωγής και εξαρτώνται από το μοντέλο της Α/Γ, την ένταση του παγετού και τη διάρκεια παραμονής του στην πτέρυγα. (Botta et al., 1998).

Κάνοντας μία πιο διευρυμένη θεώρηση, οι Dalili et al. (2009), υποστηρίζουν ότι η απόδοση των Α/Γ μπορεί μειωθεί αρκετά όταν υποβαθμιστεί η επιφανειακή ποιότητα των πτερύγων και συνοψίζουν στη μελέτη τους, τους παράγοντες εκείνους που επηρεάζουν τη φυσική μορφή της επιφάνειας ροής και οδηγούν στην υποβάθμιση της ποιότητας των επιφανειών και άρα την αλλαγή στο ροϊκό καθεστώς. Μελετούν την επίδραση του πάγου, των εντόμων και της διάβρωσης που προκαλείται από τους κόκκους σκόνης ή τα σταγονίδια της βροχής, στις πτέρυγες των Α/Γ, ενώ παρέχουν πληροφορίες σχετικές με τις μεθόδους και τα μέσα προστασίας των πτερύγων από τους παράγοντες διάβρωσης.

Σύμφωνα με τους Dalili et al. (2009), μεγάλες ποσότητες σωματιδίων σκόνης και σταγονιδίων μεταφέρονται μέσω του ανέμου. Οι ποσότητες αυτές είναι ικανές να δράσουν διαβρωτικά όταν έλθουν σε επαφή με το μέτωπο προσβολής της πτέρυγας, γεγονός που συνεπάγεται αύξηση της επιφανειακής τραχύτητας. Η κατάσταση αυτή, αναπόφευκτα επιφέρει μείωση στην αεροδυναμική απόδοση της πτέρυγας και στην παραγωγή μηχανικής ισχύος της Α/Γ. Παράλληλα, το ίδιο αποτέλεσμα δύναται να παραχθεί και από τη μεταφορά και συσσωμάτωση εντόμων στις πτέρυγες. Το ύψος της διάβρωσης, καθορίζεται από τη σφοδρότητα με την οποία τα σωματίδια προσκρούουν στην αεροτομή. Ειδικότερα, οι παραγόμενες δυνάμεις κατά την πρόσκρουση εκφράζονται σαν συνάρτηση της γεωμετρίας της πτέρυγας και των σχετικών ταχυτήτων πτέρυγας – σωματιδίων, ενώ η ταχύτητα του ανέμου και η ταχύτητα περιστροφής της πτέρυγας καθορίζουν την ταχύτητα πρόσκρουσης.

Οι Huang et al. (2011) ενισχύουν τη θεώρηση αυτή και μελετούν την επίδραση των αεροδυναμικών παραμέτρων των αεροτομών εφαρμόζοντας τη θεωρία Ορμής Στοιχείων Πτέρυγας. Συμπεραίνουν ότι το μέγεθος που ρυθμίζει καθοριστικά την παραγωγή ισχύος είναι ο συντελεστής άνωσης, ενώ ο συντελεστής αντίστασης μπορεί

να θεωρηθεί αμελητέος, τουλάχιστον από τη βάση μέχρι και το μέσο της πτέρυγας (εσωτερικό τμήμα). Ωστόσο, από το μέσο της πτέρυγας έως και το άκρο της (εξωτερικό τμήμα), στο τμήμα δηλαδή που θεωρητικά καθορίζει την παραγωγή ισχύος, παρατηρείται ότι οι απώλειες ισχύος που προκαλούνται από τη δύναμη της αντίστασης είναι σημαντικές, και σε αυτήν την περίπτωση ο συντελεστής αντίστασης πρέπει να ληφθεί υπόψη. Παράλληλα, αυξανόμενης της επιφανειακής τραχύτητας της πτέρυγας, ο συντελεστής άνωσης της αεροτομής μειώνεται.

2.4.3 Επίδραση της σκόνης

Ως προς την επίδραση της σκόνης στην ηλεκτροπαραγωγή από Α/Π, το ερευνητικό έργο που έχει πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα είναι αρκετά περιορισμένο. Στη διεθνή αρθρογραφία, διατίθενται μελέτες που αφορούν στην υποβάθμιση της απόδοσης λόγω της επίδρασης της σκόνης στην απόδοση Α/Γ (Khalfallah & Koliub, 2007; Ren & Ou, 2009; Salem et al., 2013; Diab et al., 2015), όπως επίσης και στην προσομοίωση της φθοράς που προκαλούν τα αερομεταφερόμενα σωματίδια στις πτέρυγες των Α/Γ (Asim & Mishra, 2015; Fiore & Selig, 2015).

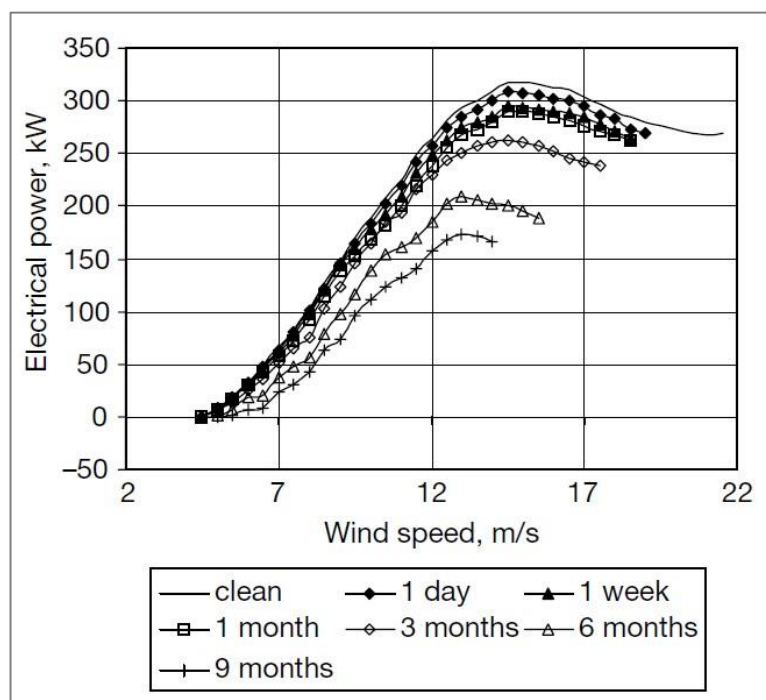
Οι Khalfallah & Koliub (2007) μελέτησαν την επίδραση της επικαθήμενης σκόνης σε σχέση με τη μεταβολή της τραχύτητας της επιφάνειας της πτέρυγας και τις επιπτώσεις στην απόδοση Α/Γ τοποθετημένης σε Α/Π στην Ουργκάντα της Αιγύπτου. Μελετήθηκαν, ο μηχανισμός μεταφοράς και επικάθισης σκόνης στις επιφάνειες των πτερύγων και η συγκέντρωση σκόνης στο μέτωπο προσβολής τους, ώστε να εκτιμηθεί το επίπεδο της απόδοσης της Α/Γ υπό τις δεδομένες συνθήκες.

Πρόκειται για μελέτη σε Α/Γ οριζοντίου άξονα, ισχύος 300kW, ενώ τα πειραματικά δεδομένα ελήφθησαν κατά τους εαρινούς και θερινούς μήνες, περιόδους δηλαδή κατά τις οποίες δεν πραγματοποιούνται καθαρισμοί στις πτέρυγες. Επιπλέον, μελετήθηκε το φαινόμενο για διαφορετικές περιόδους λειτουργίας της Α/Γ, ήτοι ημέρα, εβδομάδα, μήνα, κλπ, και πραγματοποιήθηκαν καθαρισμοί πτερύγων μόνο στην αρχή κάθε περιόδου και καθόλου κατά τη διάρκειά της.

Τελικά παρατηρείται ότι κατά την περιστροφή του ρότορα, υπό συνθήκες ύπαρξης σκόνης στην ατμόσφαιρα, αυτή συγκεντρώνεται στο μέτωπο προσβολής των πτερύγων, και δη στο σημείο ανακοπής της ροής, και σε όλο το μήκος της ακτίνας του

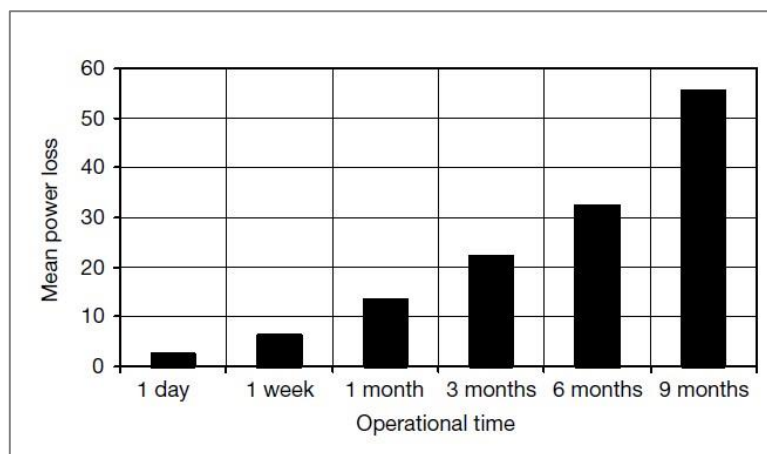
ρότορα, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα περιστροφής. Αυξανόμενη δε της συγκέντρωσης σκόνης στα ως άνω τμήματα της πτέρυγας, μεταβάλλεται αναλόγως και η επιφανειακή τους τραχύτητα.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι απώλειες στην παραγωγή ισχύος αυξάνονται καθώς αυξάνεται το υπό μελέτη χρονικό διάστημα κατά το οποίο δεν πραγματοποιούνται καθαρισμοί. Η χαρακτηριστική καμπύλη της Α/Γ φαίνεται στο Διάγραμμα 5.



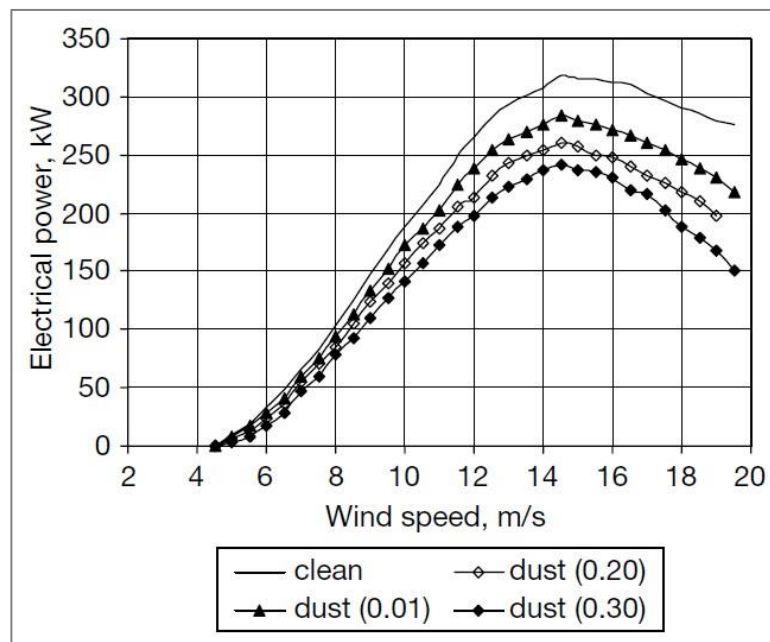
Διάγραμμα 5. Χαρακτηριστική καμπύλη της Α/Γ για διαφορετικές περιόδους λειτουργίας κατά τις οποίες δεν πραγματοποιούνται καθαρισμοί. (Πηγή: Khalfallah & Koliub, 2007).

Επίσης, οι απώλειες ισχύος προσδιορίζονται από τη σχέση $MPL (\%) \approx \frac{T}{5} + 5$ για $T > 1$, όπου MPL είναι η μέση απώλεια ισχύος (σε ποσοστό %) και T είναι η χρονική διάρκεια της περιόδου (σε ημέρες). Φαίνεται ότι οι απώλειες ισχύος μεγιστοποιούνται σε ποσοστό 57% για περίοδο λειτουργίας 9 μηνών, όπως περιγράφεται στο Διάγραμμα 6. (Khalfallah & Koliub, 2007).



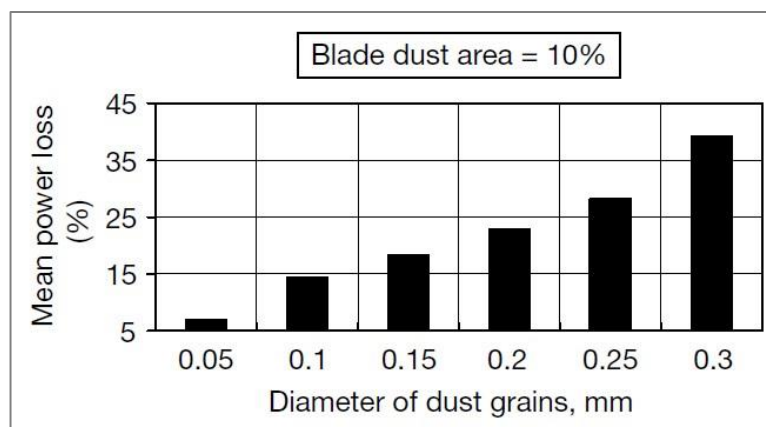
Διάγραμμα 6. Μέση απώλεια ισχύος A/Γ για τις υπό εξέταση περιόδους λειτουργίας. (Πηγή: Khalfallah & Koliub, 2007).

Η επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας στην παραγωγή ισχύος απεικονίζεται γραφικά στη χαρακτηριστική καμπύλη της A/Γ του Διαγράμματος 7. Εδώ, το πάχος του στρώματος σκόνης που καλύπτει την πτέρυγα ουσιαστικά καθορίζει το ύψος επιφανειακής τραχύτητας στην πτέρυγα.



Διάγραμμα 7. Ισχύς A/Γ για διαφορετικά πάχη στρώματος σκόνης και για εύρος τιμών ταχύτητας ανέμου. (Πηγή: Khalfallah & Koliub, 2007).

Η επίδραση του μεγέθους των κόκκων σκόνης στην απώλεια ισχύος, φαίνεται στο Διάγραμμα 8. Φαίνεται πως η αύξηση του μεγέθους των κόκκων συνεπάγεται την αύξηση των απωλειών ισχύος και αυτό συμβαίνει ουσιαστικά λόγω της παράλληλης αύξησης της τραχύτητας. Οι απώλειες ισχύος μπορούν να προσδιορισθούν από τη σχέση $MPL (\%) = 125 \times d$, όπου MPL είναι η μέση απώλεια ισχύος (σε ποσοστό %) και d είναι η διάμετρος του κόκκου (σε mm), ενώ η επιφάνεια της πτέρυγας που καλύπτεται με σκόνη (A_D) θεωρείται σταθερή και ίση με 10%.



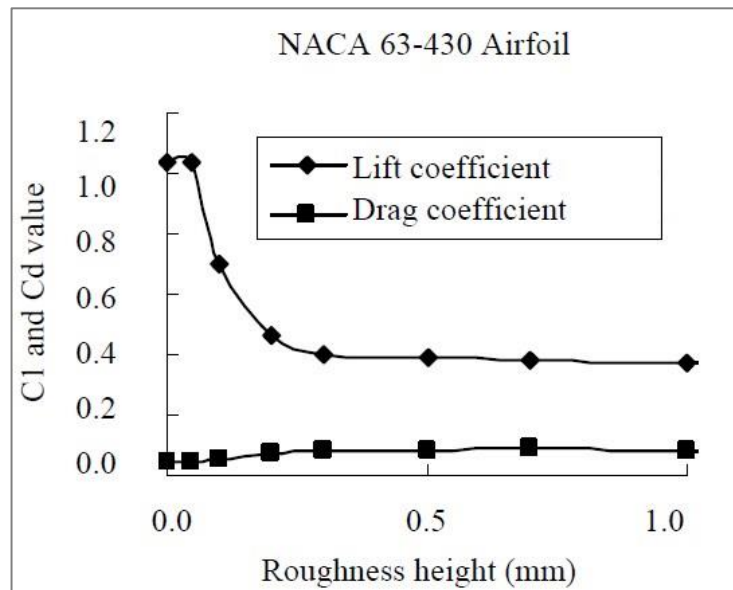
Διάγραμμα 8. Απώλεια ισχύος A/Γ για διαφορετική διάμετρο κόκκων σκόνης. (Πηγή: Khalfallah & Koliub, 2007).

Οι Ren & Ou (2009) μελετούν την αεροδυναμική συμπεριφορά πτέρυγας A/Γ, υπό συνθήκες λείας και τραχείας επιφάνειας, όταν αυτή διατρέχεται από ασυμπίεστο συνεκτικό ρευστό. Αποδίδουν την αύξηση της επιφανειακής τραχύτητας στην επικάθιση σκόνης, και προσδιορίζουν τις μεταβολές στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της πτέρυγας, και την επίδρασή τους στο ύψος της ηλεκτροπαραγωγής. Συγκεκριμένα, μελετάται το πεδίο ροής γύρω από αεροτομή, ο τύπος της οποίας χρησιμοποιείται ευρέως στις A/Γ, ενώ ακολουθεί επαναληπτική διαδικασία προσδιορισμού των συντελεστών άνωσης και οπισθέλκουσας.

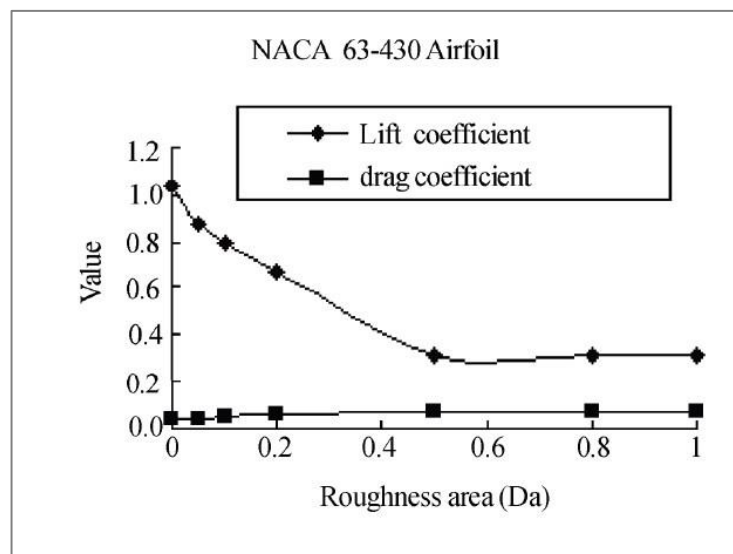
Η μεταβολή των συντελεστών άνωσης και αντίστασης που προέκυψαν φαίνεται στα Διαγράμματα 9 και 10, για διαφορετικά ύψη και διαφορετικές κατανομές τραχύτητας.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο συντελεστής άνωσης μειώνεται ραγδαίως όταν το ύψος τραχύτητας παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 0,3 mm, ενώ για τιμή του ύψους

τραχύτητας μεγαλύτερη από 0,3mm δεν παρουσιάζει ουσιαστική μεταβολή. Αντίθετα, ο συντελεστής αντίστασης αυξάνει αναλόγως του ύψους τραχύτητας, ενώ επίσης δεν εμφανίζει ουσιαστική μεταβολή για τιμές του ύψους τραχύτητας μεγαλύτερες από 0,3 mm. Για τιμές του ύψους τραχύτητας μεγαλύτερες από 0,3 mm (οριακή τραχύτητα), ουσιαστικά η επίδραση της τραχύτητας είναι πλέον ασήμαντη, διότι η ροή χαρακτηρίζεται τυρβώδης ενώ παρατηρείται σοβαρή αποκόλληση της ροής.

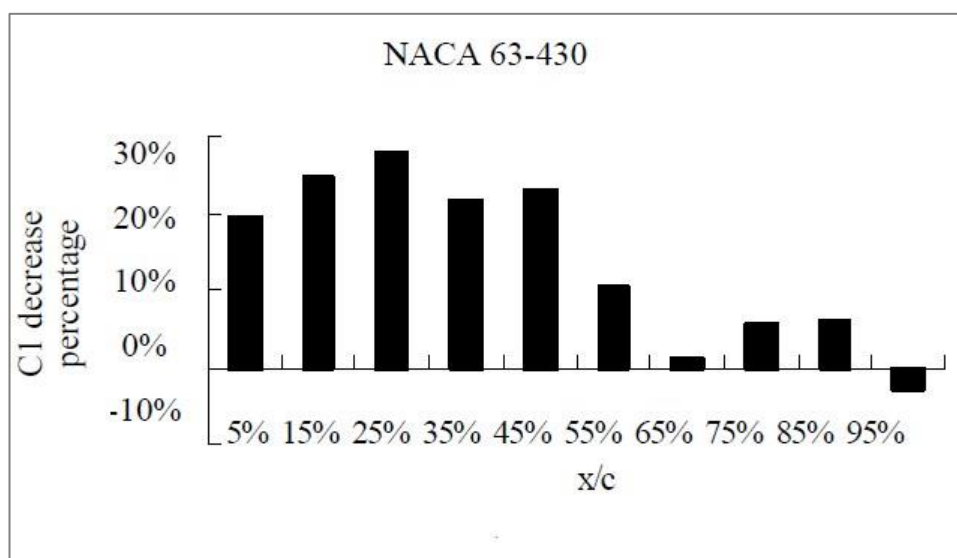


Διάγραμμα 9. Μεταβολή συντελεστών άνωσης και οπισθέλκουσας. (Πηγή: Ren & Ou, 2009).



Διάγραμμα 10. Μεταβολή συντελεστών άνωσης και οπισθέλκουσας. (Πηγή: Ren & Ou, 2009).

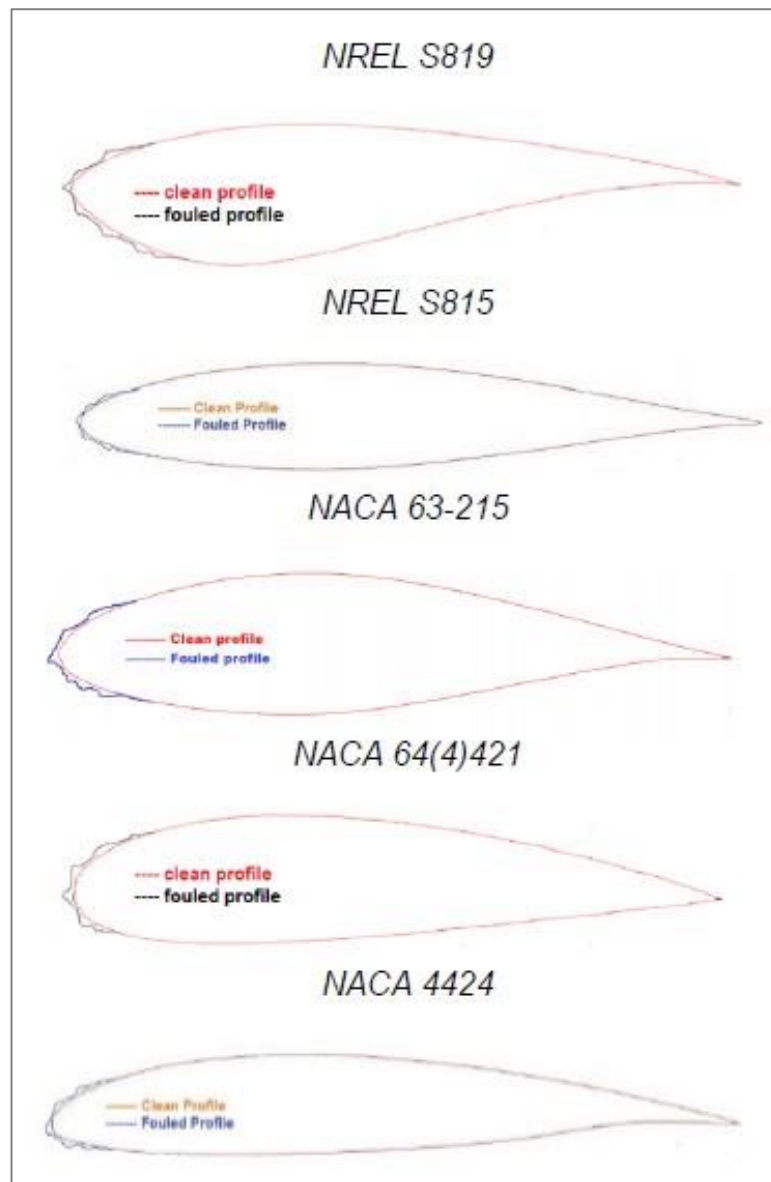
Στο Διάγραμμα 11 φαίνεται η ποσοστιαία μείωση του συντελεστή άνωσης, ανάλογα με της θέση της τραχείας επιφάνειας στην πτέρυγα, θεωρώντας ύψος τραχύτητας 0,3 mm.



Διάγραμμα 11. Ποσοστιαία μεταβολή συντελεστή άνωσης. (Πηγή: Ren & Ou, 2009).

Στην ίδια κατεύθυνση κινούνται και οι Salem et al. (2013) οι οποίοι μελετούν την αεροδυναμική συμπεριφορά πτέρυγας Α/Γ, η οποία λειτουργεί σε περιβάλλον που ευνοεί τη μεταφορά σκόνης. Στα πλαίσια της μελέτης, επιλέγεται αεροτομή τύπου NACA 63-215, εκτιμάται η ποσότητα της επικαθήμενης σκόνης κατά μήκος της πτέρυγας, προσδιορίζεται το αντίστοιχο ύψος τραχύτητας και δημιουργείται το αντίστοιχο προφίλ αεροτομής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αύξηση της ποσότητας της επικαθήμενης σκόνης συνεπάγεται μείωση της παραγόμενης ισχύος, και προτείνονται καθαρισμοί ανά τρίμηνο αντί για έτος, για την αντιμετώπιση των απωλειών από Α/Γ που λειτουργούν σε αντίστοιχο περιβάλλον.

Στην Εικόνα 12 διαγράφονται τα προφίλ που αντιστοιχούν σε διάφορους τύπους αεροτομών, μετά από τρίμηνη περίοδο λειτουργίας σε περιβάλλον με σκόνη (Salem et al., 2013; Diab et al., 2015).



Εικόνα 12. Προφίλ αεροτομής μετά από τρίμηνη περίοδο λειτουργίας σε περιβάλλον με σκόνη. (Πηγή: Diab et al., 2015).

2.4.4 Μοντελοποίηση και Προσομοίωση

Ο αεροδυναμικός σχεδιασμός των Α/Γ πραγματοποιείται με χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD), και αυτό γιατί η υπολογιστική προσομοίωση επιτρέπει την εκτέλεση επαναληπτικών διαδικασιών ενώ ταυτόχρονα παρέχει ακριβείς πληροφορίες σχετικές με τη συμπεριφορά των ρευστών μέσων, βοηθώντας έτσι στην εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων αεροδυναμικής απόδοσης.

Στη βιβλιογραφία συναντώνται μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί με χρήση συνήθων υπολογιστικών εργαλείων. Ενδεικτικά αναφέρεται η χρήση υπολογιστικών εργαλείων όπως το Ansys CFX, το XFOIL, το FLUENT, το STAR CCM, το NREL, κλπ. (Patel & Patel, 2015).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το υπολογιστικό εργαλείο Qblade, ένα εργαλείο ανοικτού κώδικα, που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό και την προσομοίωση Α/Γ. Ο σχεδιασμός των αεροτομών και ο προσδιορισμός των αεροδυναμικών τους χαρακτηριστικών γίνεται στο γραφικό περιβάλλον του QBlade, με χρήση του βελτιστοποιημένου κώδικα XFOIL. Η προσομοίωση των Α/Γ οριζοντίου άξονα, πραγματοποιείται με τη Μέθοδο Ορμής Στοιχείων Πτέρυγας. Το λογισμικό περιβάλλον είναι φιλικό προς το χρήστη, και σε συνδυασμό με την αξιοπιστία των δυναμικών αποτελεσμάτων, το QBlade μπορεί να θεωρηθεί ως βασικό εργαλείο για την κατανόηση των βασικών παραμέτρων σχεδιασμού και την προσομοίωση των Α/Γ. (Marten et al., 2013a; Marten et al., 2013b; Mishra & Patel, 2015).

Το QBlade έχει επιλεγεί και χρησιμοποιηθεί από αρκετούς ερευνητές, για διαφορετικούς σκοπούς, ενώ το συγκεκριμένο εργαλείο προτιμάται για το σχεδιασμό και την προσομοίωση των Α/Γ λόγω της αμεσότητας που παρέχει στο χρήστη. Οι Monteiro et al. (2013) εκτελούν δοκιμές αεροδυναμικής σήραγγας σε μικρή Α/Γ οριζοντίου άξονα και στη συνέχεια πραγματοποιούν προσομοίωση στο QBlade με σκοπό την ανάλυση και τη σύγκριση μεταξύ των πειραματικών και των υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Οι Vey et al. (2015) χρησιμοποιούν το QBlade για το σχεδιασμό μικρής Α/Γ, η οποία πρόκειται να κατασκευαστεί για ερευνητικό σκοπό, ενώ το υπολογιστικό εργαλείο εξακολουθεί να χρησιμοποιείται και μετά το πέρας της κατασκευής, για την προσομοίωση της λειτουργίας της Α/Γ και την εκτίμηση της απόδοσής της για διάφορα ροϊκά καθεστώτα στις πτέρυγές της.

Για τις ανάγκες μίας πιο εξειδικευμένης μελέτης, οι Pechlivanoglou et al. (2011), εκτελώντας δοκιμές αεροδυναμικής σήραγγας μετρούν την αεροδυναμική άνωση των πτερυγίων καμπυλότητας του χείλους προσβολής, υπολογίζουν την ετήσια παραγωγή ενέργειας μίας Α/Γ ισχύος 1,5 MW με τη βοήθεια του QBlade, και στη συνέχεια συσχετίζουν την αύξηση της αεροδυναμικής άνωσης με την αύξηση της ετήσιας παραγωγή ενέργειας. Έπειτα, ο Soland (2012) πραγματοποίησε μία μελέτη εστιασμένη

στα εξωτερικά τμήματα πτέρυγας με επιφανειακή τραχύτητα, μίας εικονικής A/Γ ισχύος 7,0 MW. Επιπλέον, οι Mueller-Vahl et al. (2012) εφάρμοσαν το λογισμικό για να εκτιμήσουν εάν υπάρχει δυνατότητα αύξησης της απόδοσης μίας A/Γ οριζοντίου άξονα, σε περίπτωση εγκατάστασης στροβιλογεννητριών στις πτέρυγές της.

Τέλος, αρκετά Πανεπιστήμια και Ερευνητικά Ιδρύματα, έχουν συμπεριλάβει το QBlade στις σχετικές διαλέξεις τους, προσδίδοντάς του τρόπον τινά, το κύρος και την αξιοπιστία ενός εμπειρικού εργαλείου, κατάλληλου για την εφαρμογή των βασικών αρχών αεροδυναμικής καθώς και για τη διερεύνηση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς και την εκτίμηση της απόδοσης των A/Γ. (Marten et al., 2013a).

2.4.5 Συμπεράσματα

Οι A/Γ δύναται να εκτεθούν σε εντελώς διαφορετικές συνθήκες ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν. Στην περίπτωση που ευνοείται η συγκέντρωση σκόνης ή η αερομεταφορά σωματιδίων, επηρεάζονται οι επιφάνειες των πτερύγων των A/Γ, και οι αρχικώς λείες επιφάνειές τους εμφανίζουν τελικά ανωμαλίες ή ακόμα και ασυνέχειες, ικανές να διαταράξουν το πεδίο ροής γύρω από αυτές.

Η συγκέντρωση σκόνης στην επιφάνεια της πτέρυγας, μεταβάλλει το ύψος τραχύτητας και κατά συνέπεια επηρεάζει το στρωτό οριακό στρώμα, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της ροής από στρωτή σε τυρβώδη, την αποκόλλησή της, την αλλαγή στο αεροδυναμικό καθεστώς της πτέρυγας και την απώλεια ενέργειας.

Διαπιστώνεται ότι έχουν αναπτυχθεί πολλές μελέτες γύρω από την επίδραση της τραχύτητας, γενικότερα στις A/Γ και ειδικότερα στις πτέρυγες και στη μεταβολή των αεροδυναμικών τους χαρακτηριστικών. Ωστόσο, η επίδραση της σκόνης στην ηλεκτροπαραγωγή, αποτελεί ένα θέμα το οποίο δεν έχει πλήρως αποτιμηθεί.

Κεφάλαιο 3

Μεθοδολογία

3.1 Σκοπός και στόχοι

Σκοπός της παρούσας Μεταπτυχιακής Διατριβής είναι η μελέτη της επίδρασης της σκόνης στην παραγωγή ενέργειας από Α/Π. Για το λόγο αυτό, εξετάζονται οι επιπτώσεις της μεταφοράς και επικάθισης σκόνης στην αεροδυναμική απόδοση των Α/Γ. Λόγω της διάθεσης δεδομένων για περισσότερες από μία περιοχές, η σύγκριση ανάμεσα στις υπό μελέτη περιοχές έπεται της εξαγωγής των τελικών αποτελεσμάτων.

Οι επιμέρους στόχοι που τίθενται για την επίτευξη του σκοπού, είναι οι εξής:

- Εκλογή των κατάλληλων περιοχών για μελέτη
- Στατιστική επεξεργασία των σχετικών δεδομένων
- Προσεγγιστική εκτίμηση της επιφανειακής τραχύτητας
- Μελέτη κατασκευής μοντέλου ρότορα: προσδιορισμός του πλήθους και της γεωμετρίας των πτερύγων
- Χρήση του λογισμικού QBlade: Κατασκευή μοντέλου, χωρική ανάλυση πτέρυγας, προσδιορισμός αεροδυναμικών μεγεθών
- Προσδιορισμός αεροδυναμικής απόδοσης ανά περιοχή μελέτης
- Εξαγωγή συγκριτικών διαγραμμάτων αεροδυναμικής ισχύος
- Κατάρτιση συγκριτικών πινάκων

3.2 Ερευνητικά ερωτήματα

Η διάβρωση των επιφανειών των πτερύγων αποτελεί τη σημαντικότερη πρόκληση για τη βιομηχανία. Η έρευνα, απέδειξε πως η επικάθιση σκόνης στις πτέρυγες στέκεται ως κρίσιμος παράγων δημιουργίας των προϋποθέσεων διάβρωσης και δη της δημιουργίας τραχύτητας. Λόγω των επικαθήμενων σωματιδίων, οι επιπτώσεις στο ρότορα είναι η μείωση της απόδοσης και η αδυναμία πρόβλεψης του χρόνου απώλειας στήριξης.

Παρίσταται λοιπόν επιτακτική η ανάγκη βαθύτερης γνώσης των παραγόντων εμφάνισης τραχύτητας και των επιπτώσεών τους στις πτέρυγες των Α/Γ και στην αεροδυναμική τους απόδοση. Έτσι λοιπόν, η μελέτη δημιουργίας τραχύτητας στις επιφάνειες των πτερύγων θεωρείται ως πολύ σημαντική, η δε επίδραση στην απόδοση των Α/Γ, εμφανίζει τόσο πρακτικό, όσο και ακαδημαϊκό ενδιαφέρον.

Ωστόσο, η σχέση μεταξύ εξέλιξης τραχύτητας και αλλαγής στο μικροκαθεστώς ροής, έχει διαπιστωθεί μεν, είναι εξαιρετικά δύσκολο δε, να προσδιορισθεί και να αποτιμηθεί. Έτσι, η μελέτη της επίδρασης της τραχύτητας, θεωρητικά επιτυγχάνεται μέσω χωρικής ανάλυσης πτέρυγας, κατά την οποία προσδιορίζονται τα αεροδυναμικά μεγέθη των αεροτομών και των πτερύγων, υπό δεδομένες συνθήκες. Η χωρική ανάλυση, παρέχει τη γνώση γύρω από τα αεροδυναμικά μεγέθη και τις μεταβολές τους, ώστε να προσδιορισθεί τελικά η συνολική απόδοση των Α/Γ.

Η μελέτη και η επίλυση προβλημάτων σχετικών με την επικάθιση των στοιχείων που προκαλούν την επιφανειακή διάβρωση, παρέχει τη γνώση για την επίλυση σημαντικών θεμάτων λειτουργίας και απόδοσης των Α/Γ.

3.3 Δεδομένα

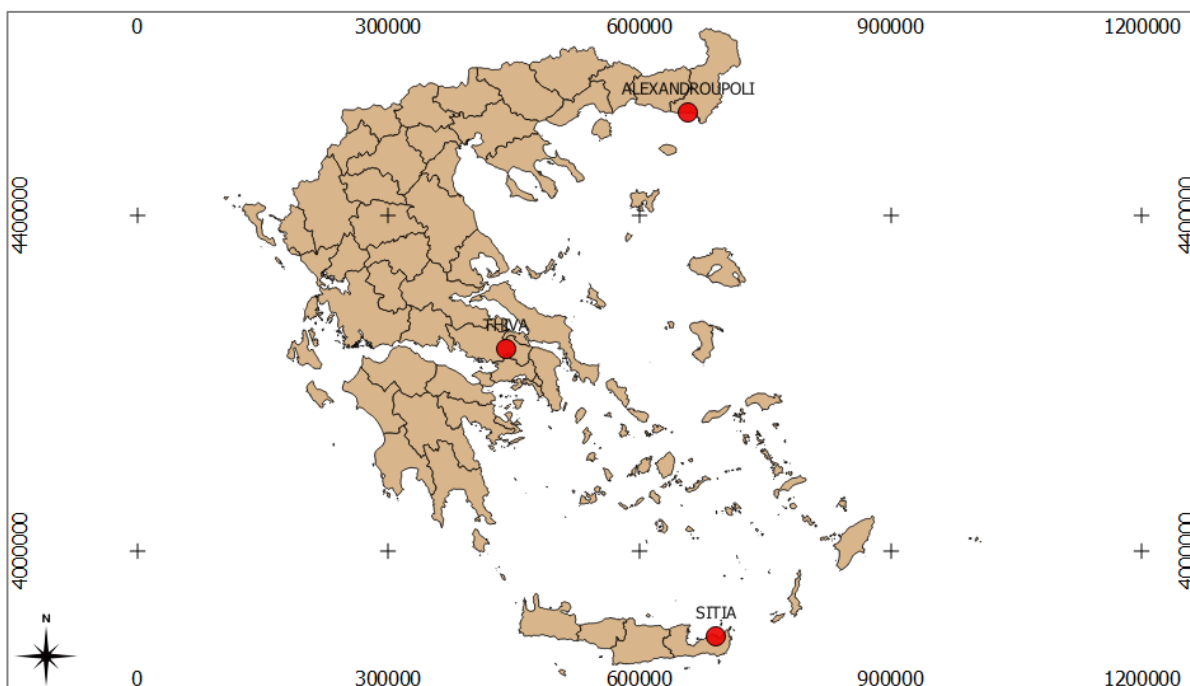
Τα διαθέσιμα δεδομένα αφορούν επικάθιση σκόνης και έχουν ληφθεί από την Ομάδα Ατμοσφαιρικών Μοντέλων και Πρόγνωσης Καιρού (ΟΑΜ&ΠΚ). Πρόκειται για ωριαία δεδομένα επικάθισης σκόνης σε ύψος 10 μέτρων για το έτος 2014.

3.3.1 Συλλογή δεδομένων

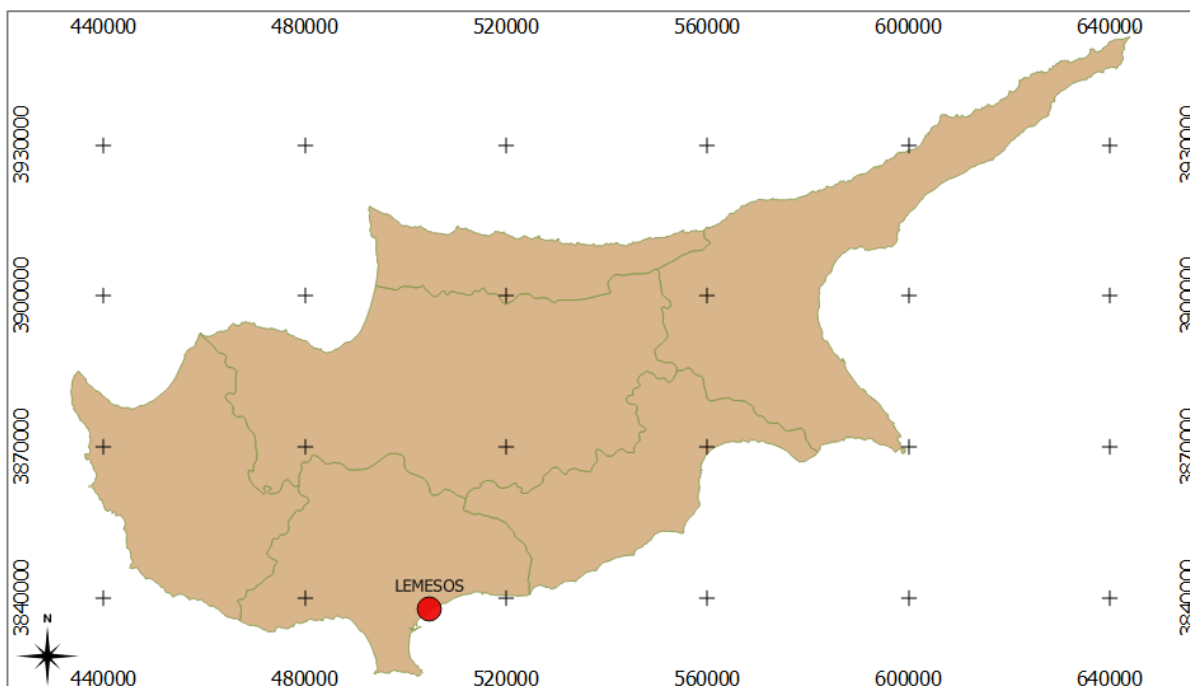
Η Ομάδα Ατμοσφαιρικών Μοντέλων και Πρόγνωσης Καιρού αποτελεί τμήμα του Τμήματος Φυσικής (Τομέας Φυσικής Περιβάλλοντος – Μετεωρολογίας) και του Ινστιτούτου Επιταχυντικών Συστημάτων και Εφαρμογών (ΙΕΣΕ) του Εθνικού & Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Οι ερευνητικές δραστηριότητες της Ομάδας σχετίζονται αφενός με την ατμοσφαιρική αέρια ρύπανση, τον κύκλο σκόνης, τις κλιματικές μεταβολές, τη μοντελοποίηση κύματος, την πρόγνωση καιρού, κύματος και αέριας ρύπανσης, αφετέρου με την ανάπτυξη εφαρμογών στη γεωργία και την αιολική ενέργεια. (ΕΚΠΑ, 2016β).

Το Σύστημα SKIRON είναι ένα από τα σημαντικότερα συστήματα που αναπτύχθηκε από την ΟΑΜ&ΠΚ. Αποτελεί ολοκληρωμένο σύστημα περιορισμένης περιοχής το οποίο χρησιμοποιείται σε περισσότερα από 20 ερευνητικά ινστιτούτα και Μετεωρολογικές Υπηρεσίες παγκοσμίως. Μία από τις δυνατότητες του SKIRON είναι η προσομοίωση του κύκλου σκόνης, ως προς τη λήψη, τη μεταφορά, την εναπόθεση και τις επιπτώσεις της στην ακτινοβολία. Η ανάπτυξη του συστήματος, πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια των ερευνητικών προγραμμάτων MEDUSE, ADIOS και SKIRON, τα οποία χρηματοδοτήθηκαν από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Το SKIRON αποτελεί ένα μοναδικό σύστημα που παρέχει πρόβλεψη της συγκέντρωσης σκόνης και εναπόθεσής της παγκοσμίως, ενώ έχει επιλεγεί ως το κύριο προγνωστικό εργαλείο της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, όπου εγκαταστάθηκε και λειτουργεί από το 1996. (ΕΚΠΑ, 2016β).

Τα διαθέσιμα δεδομένα αφορούν τοπικά 3 πόλεις της Ελλάδας (Σητεία, Θήβα, Αλεξανδρούπολη) και μία πόλη της Κύπρου (Λεμεσός). Οι ως άνω περιοχές έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να φαίνεται η διαφοροποίησή τους ως προς τα μεγέθη συγκέντρωσης σκόνης στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 13. Χαρακτηριστική θέση των υπό μελέτη περιοχών στην Ελλάδα.



Εικόνα 14. Χαρακτηριστική θέση της υπό μελέτη περιοχής στην Κύπρο.

Τα γεωγραφικά μήκη και πλάτη των επιλεγθεισών περιοχών συνοψίζονται στον Πίνακα 1. Οι χαρακτηριστικές θέσεις των υπό μελέτη περιοχών διακρίνονται στις Εικόνες 13 και 14.

Πίνακας 1. Γεωγραφική θέση των υπό μελέτη περιοχών.

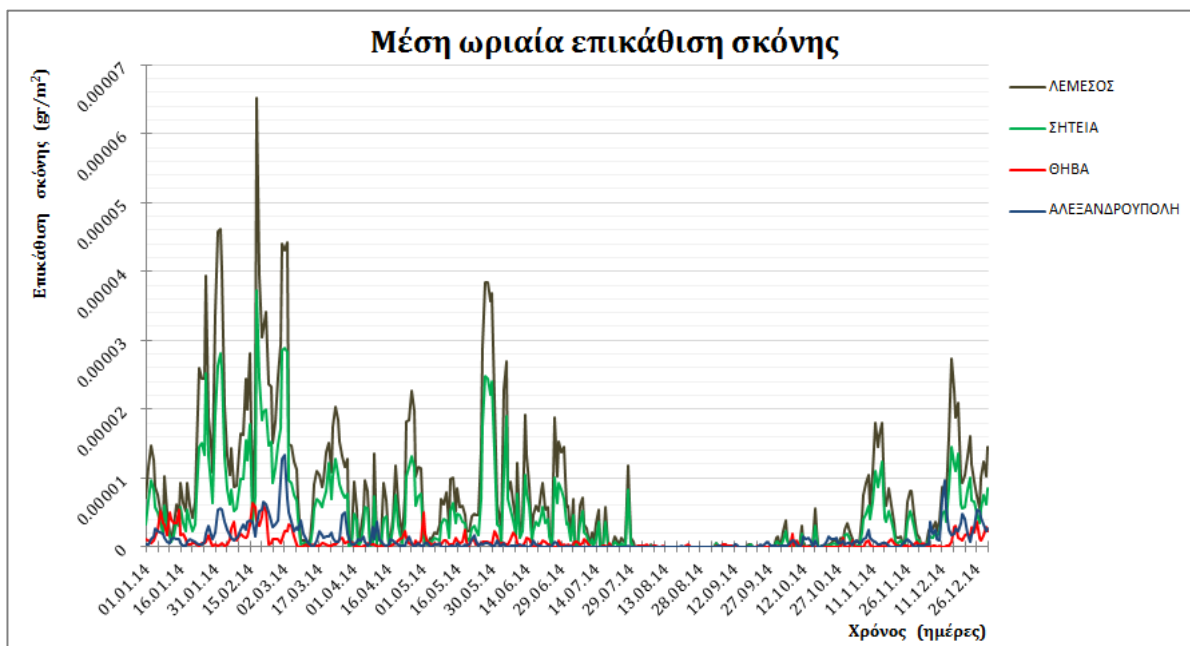
Πόλη	Γεωγραφικό πλάτος	Γεωγραφικό μήκος
Λεμεσός	34,67	33,03
Σητεία	35,20	26,10
Θήβα	38,32	23,32
Αλεξανδρούπολη	40,83	25,87

3.3.2 Παρουσίαση και ανάλυση δεδομένων

Τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί από το σύστημα SKIRON, μετρώνται σε $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ και παρουσιάζονται παρακάτω μαζί με τα αντίστοιχα διαγράμματα και τους σχετικούς πίνακες, θεωρώντας ότι $1 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ αντιστοιχεί σε $1 \mu\text{gr}/\text{m}^2$. Το Διάγραμμα 12, απεικονίζει γραφικά τη χρονοσειρά της μέσης ωριαίας επικάθισης σκόνης ανά ημέρα.

Στον Πίνακα 2 περιλαμβάνονται οι τιμές της μέσης ωριαίας επικάθισης σκόνης ανά μήνα και η αντίστοιχη γραφική απεικόνιση εμφανίζεται στο Διάγραμμα 13.

Στον Πίνακα 3, περιλαμβάνονται οι τιμές που προκύπτουν για την αθροιστική επικάθιση σκόνης στο τέλος κάθε μήνα, για το έτος 2014, εάν υποθέσουμε ότι στην αρχή της περιόδου έχουμε μηδενική επικάθιση. Η αθροιστική επικάθιση σκόνης ανά ημέρα απεικονίζεται γραφικά στο Διάγραμμα 14.



Διάγραμμα 12. Μέση ωριαία επικάθιση σκόνης ανά ημέρα (2014).

Από τη χρονοσειρά των δεδομένων (Διάγρ. 12), σε κάθε περιοχή, παρατηρείται υψηλότερη ένταση επικάθισης σκόνης κατά τους χειμερινούς μήνες σε σχέση με τους υπόλοιπους μήνες του έτους. Αυτό, πιθανόν να οφείλεται στους νότιους και νοτιοανατολικούς ανέμους που επικρατούν στην περιοχή της νοτιοανατολικής Μεσογείου, μέσω των οποίων μεταφέρονται τα σωματίδια που προέρχονται από την Αφρική.

Επίσης, στις πόλεις της Αλεξανδρούπολης και της Θήβας, που βρίσκονται βορειότερα, παρατηρούνται πολύ χαμηλότερα επίπεδα συγκέντρωσης σκόνης, σε σχέση με τις περιοχές Λεμεσού και Σητείας που βρίσκονται πιο κοντά στην Αφρικανική ήπειρο (Διάγρ. 12). Ανάμεσα στις τέσσερις περιοχές που έχουν επιλεγεί, παρατηρείται ότι το φαινόμενο γίνεται εντονότερο όσο μετακινούμαστε νοτιοανατολικά. Η συσχέτιση

μεταξύ έντασης φαινομένου και γεωγραφικής θέσης, επιβεβαιώνεται και από τα γεωγραφικά μήκη και πλάτη των περιοχών αυτών (Πίν. 1, Ευκ. 13, 14).

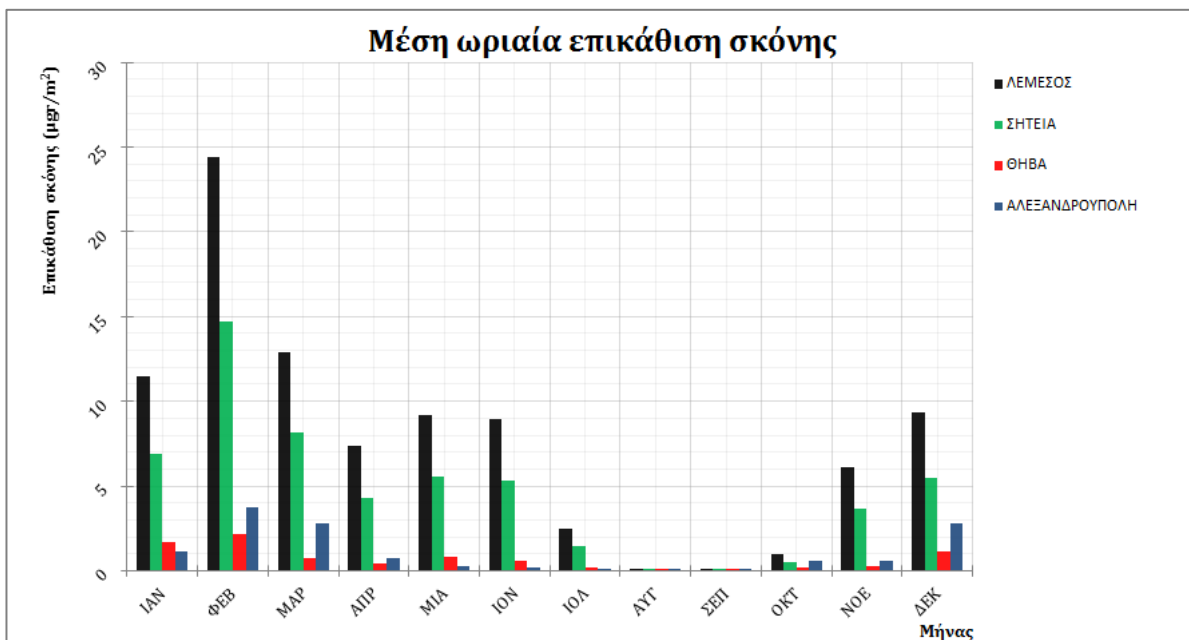
Πίνακας 2. Μέση ωριαία επικάλυψη σκόνης ανά μήνα το 2014 ($\mu\text{gr}/\text{m}^2$).

Μήνας	Λεμεσός	Σητεία	Θήβα	Αλεξανδρούπολη
<i>Ιανουάριος</i>	11,46094044	6,883913	1,715241	1,140493395
<i>Φεβρουάριος</i>	24,40990647	14,74613	2,153935	3,732658018
<i>Μάρτιος</i>	12,9046801	8,125267	0,752774	2,762925747
<i>Απρίλιος</i>	7,380140586	4,266668	0,455551	0,772421497
<i>Μάιος</i>	9,170188331	5,544391	0,850563	0,29948831
<i>Ιούνιος</i>	8,978018065	5,316429	0,555335	0,192895919
<i>Ιούλιος</i>	2,493272543	1,486793	0,189907	0,018401974
<i>Αύγουστος</i>	0,021097969	0,00541	0,047327	0,003878364
<i>Σεπτέμβριος</i>	0,111380574	0,070862	0,047284	0,097530146
<i>Οκτώβριος</i>	0,98689207	0,540516	0,162676	0,595911388
<i>Νοέμβριος</i>	6,144229918	3,654152	0,271291	0,583626569
<i>Δεκέμβριος</i>	9,313993409	5,46418	1,102988	2,807944962

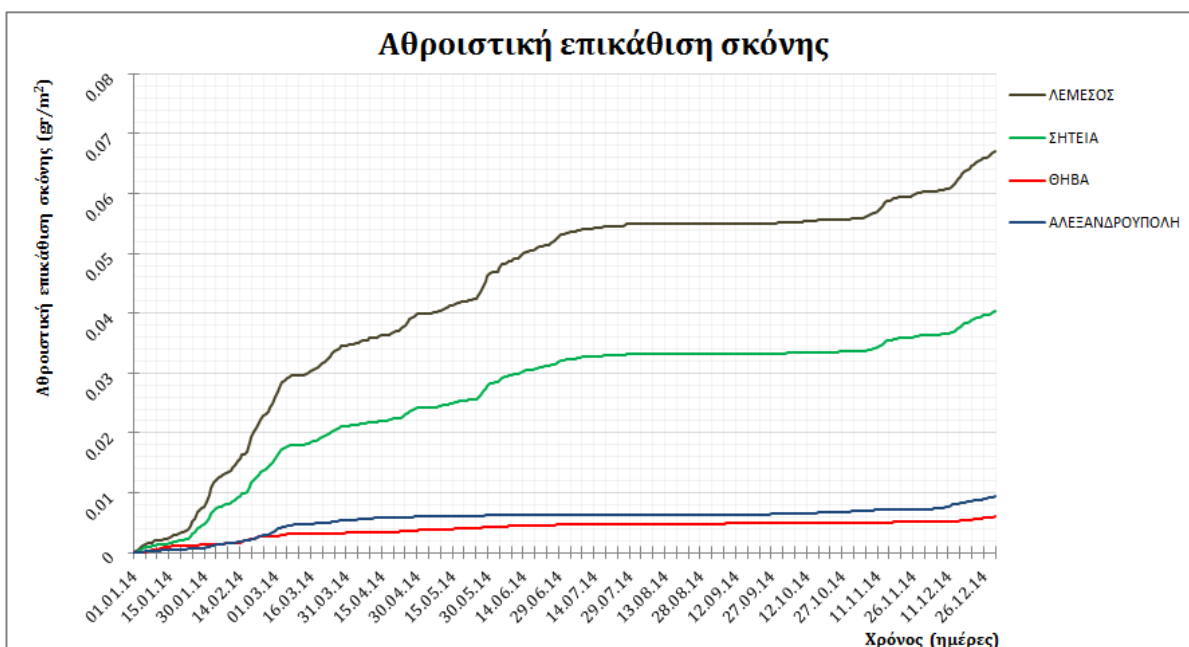
Πίνακας 3. Αθροιστική επικάλυψη σκόνης στο τέλος κάθε μήνα το έτος 2014 (gr/m^2).

Μήνας	Λεμεσός	Σητεία	Θήβα	Αλεξανδρούπολη
<i>Ιανουάριος</i>	0,00852694	0,005122	0,001276	0,000848527
<i>Φεβρουάριος</i>	0,0249304	0,015031	0,002724	0,003356873
<i>Μάρτιος</i>	0,03453148	0,021076	0,003284	0,00541249
<i>Απρίλιος</i>	0,03984518	0,024148	0,003612	0,005968634
<i>Μάιος</i>	0,0466678	0,028273	0,004244	0,006191453
<i>Ιούνιος</i>	0,05313197	0,032101	0,004644	0,006330338
<i>Ιούλιος</i>	0,05498697	0,033207	0,004786	0,006344029
<i>Αύγουστος</i>	0,05500266	0,033211	0,004821	0,006346914
<i>Σεπτέμβριος</i>	0,05508286	0,033262	0,004855	0,006417136
<i>Οκτώβριος</i>	0,05581711	0,033664	0,004976	0,006860494
<i>Νοέμβριος</i>	0,06024095	0,036295	0,005171	0,007280705
<i>Δεκέμβριος</i>	0,06717056	0,040361	0,005992	0,009369816

Τέλος, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, η ωριαία επικάλυψη σκόνης είναι πολύ χαμηλή (Διαγρ. 12, 13), σχεδόν μηδενική, γεγονός που μάλλον οφείλεται σε χαμηλές εντάσεις ανέμων που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή.



Διάγραμμα 13. Μέση ωριαία επικάλυψη σκόνης ανά μήνα (2014).



Διάγραμμα 14. Ετήσια αθροιστική επικάλυψη σκόνης (έτος 2014).

Στην περιοχή της Λεμεσού η αθροιστική επικάθιση σκόνης παρουσιάζει ραγδαία αύξηση κατά τις περιόδους Φεβρουαρίου – Ιουνίου και Νοεμβρίου – Δεκεμβρίου. Ειδικότερα, η αύξηση της ποσότητας επικαθήμενης σκόνης κατά την πρώτη προαναφερθείσα περίοδο, είναι της τάξης του 900% περίπου, ενώ κατά τη δεύτερη προαναφερθείσα περίοδο ανέρχεται σε περίπου 215%. Κατά την περίοδο Ιουλίου – Οκτωβρίου, δεν παρατηρείται ουσιαστική μεταβολή στην ποσότητα επικαθήμενης σκόνης.

Ομοίως, στην περιοχή της Σητείας η αθροιστική επικάθιση σκόνης παρουσιάζει ραγδαία αύξηση κατά τις περιόδους Φεβρουαρίου – Ιουνίου και Νοεμβρίου – Δεκεμβρίου. Ειδικότερα, η αύξηση της ποσότητας επικαθήμενης σκόνης κατά την πρώτη προαναφερθείσα περίοδο, είναι της τάξης του 500% περίπου, ενώ κατά τη δεύτερη προαναφερθείσα περίοδο ανέρχεται σε περίπου 175%. Κατά την περίοδο Ιουλίου – Οκτωβρίου, δεν παρατηρείται ουσιαστική μεταβολή στην ποσότητα επικαθήμενης σκόνης.

Στην περιοχή της Θήβας, η αθροιστική επικάθιση σκόνης παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αύξηση κατά την περίοδο Φεβρουαρίου – Μαρτίου και κατά το μήνα Δεκέμβριο. Ειδικότερα, η αύξηση της ποσότητας επικαθήμενης σκόνης κατά την πρώτη προαναφερθείσα περίοδο, είναι της τάξης του 300% περίπου, ενώ κατά τη δεύτερη προαναφερθείσα περίοδο ανέρχεται σε περίπου 20%. Κατά την περίοδο Απριλίου – Νοεμβρίου, δεν παρατηρείται ουσιαστική μεταβολή στην ποσότητα επικαθήμενης σκόνης.

Τέλος, στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης, η αθροιστική επικάθιση σκόνης παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αύξηση κατά την περίοδο Φεβρουαρίου – Μαρτίου και κατά το μήνα Δεκέμβριο. Ειδικότερα, η αύξηση της ποσότητας επικαθήμενης σκόνης κατά την πρώτη προαναφερθείσα περίοδο, είναι της τάξης του 500% περίπου, ενώ κατά τη δεύτερη προαναφερθείσα περίοδο ανέρχεται σε περίπου 35%. Κατά την περίοδο Απριλίου – Νοεμβρίου, δεν παρατηρείται ουσιαστική μεταβολή στην ποσότητα επικαθήμενης σκόνης.

Στις περιοχές Σητείας και Λεμεσού παρατηρείται ομοιότητα ως προς την εξέλιξη της επικαθίσεως σκόνης, όχι όμως και ως προς τις πραγματικές ποσότητες επικαθήμενης

σκόνης. Στις δύο περιοχές, η εξέλιξη του φαινομένου, ίσως να οφείλεται στο περίπου ίδιο γεωγραφικό πλάτος, το γεγονός όμως ότι η περιοχή της Λεμεσού βρίσκεται πολύ ανατολικότερα της περιοχής της Σητείας, πιθανόν να επηρεάζει την πραγματική ποσότητα επικαθήμενης σκόνης σε κάθε περιοχή.

Στις περιοχές Θήβας και Αλεξανδρούπολης, δεν παρατηρείται ομοιότητα στο μοτίβο της εξέλιξης, παρά μόνο κατά τους μήνες που η επικάθιση είναι ουσιαστικά μηδενική και στις δύο περιοχές. Επίσης, παρατηρείται μικρή διαφοροποίηση ως προς τις πραγματικές ποσότητες επικαθήμενης σκόνης, γεγονός το οποίο πιθανόν να οφείλεται στο ότι η περιοχή της Αλεξανδρούπολης βρίσκεται ανατολικότερα της περιοχής της Θήβας.

3.3.3 Σύνοψη

Μεταξύ των επιλεγθεισών περιοχών, η μικρότερη συγκέντρωση σκόνης εμφανίζεται στην περιοχή της Θήβας, ενώ η μεγαλύτερη στην περιοχή της Λεμεσού. Από τα παραπάνω, προκύπτει ότι καθώς μετακινούμαστε νοτιότερα και ανατολικότερα, το φαινόμενο εξελίσσεται με μεγαλύτερη ένταση, γεγονός που φυσικά οδηγεί στην αύξηση των πραγματικών ποσοτήτων επικαθήμενης σκόνης.

Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και ιδιαίτερα τον Αύγουστο και τον Σεπτέμβριο, σε όλες τις περιπτώσεις, η επικάθιση σκόνης είναι πρακτικά μηδενική λόγω των ασθενών ανέμων που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή.

Σε κάθε περίπτωση, παρατηρείται ότι η ποσότητα της επικαθήμενης σκόνης στις περιοχές Ελλάδας και Κύπρου δεν είναι τόσο αυξημένη, και σε καμία περίπτωση δεν θα πλησίαζε σε τάξη μεγέθους την ποσότητα που αντιστοιχεί σε κάποια περιοχή που βρίσκεται κοντά στην έρημο Σαχάρα της Αφρικής, στην οποία και τοποθετείται η πηγή των ρύπων.

Έτσι λοιπόν, οι απώλειες αιολικής ισχύος λόγω της επίδρασης της σκόνης, σε όλες τις επιλεγθείσες περιοχές, είναι μεν σημαντικές, αλλά μικρού μεγέθους και σχετικές πάντα με την ποσότητα επικαθήμενης σκόνης στις πτέρυγες των Α/Γ.

3.4 Μεθοδολογική προσέγγιση

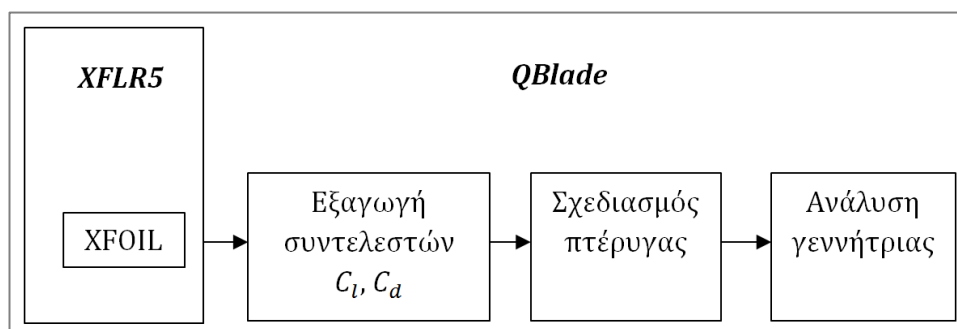
3.4.1 Περιγραφή ερευνητικού εργαλείου

Το υπολογιστικό εργαλείο Qblade αποτελεί εργαλείο ανοικτού κώδικα, το οποίο χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό και την προσομοίωση των Α/Γ. Η ιδέα αναπτύχθηκε 2010 από τον Τομέα Μηχανικής Ρευστών του Τεχνικού Πανεπιστημίου του Βερολίνου (TUB) με σκοπό τη δημιουργία ενός μεμονωμένου εργαλείου με κύριο χαρακτηριστικό του, τη μέγιστη λειτουργικότητα που απαιτούν ο αεροδυναμικός σχεδιασμός και η προσομοίωση των Α/Γ, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη εισαγωγής, μετατροπής ή επεξεργασίας δεδομένων που προέρχονται από άλλες πηγές. Επιπλέον, δημιουργήθηκε η ανάγκη προσαρμογής του κώδικα σε ένα συμβατό γραφικό περιβάλλον έτσι ώστε να βελτιωθεί η προσβασιμότητά του, σε σύγκριση πάντα με άλλους κώδικες προσομοίωσης.

3.4.1.1 Βασικές λειτουργίες

Για το σχεδιασμό των Α/Γ οριζοντίου άξονα, το QBlade χρησιμοποιεί τις εξισώσεις της BEM. Για το σχεδιασμό συνήθων αεροτομών και τον υπολογισμό των συντελεστών άνωσης και αντίστασης, ο συνδυασμένος κώδικας XFOIL για συνεκτική και μη συνεκτική ροή βελτιστοποιείται στο γραφικό περιβάλλον του QBlade. Ειδικότερα, στο περιβάλλον του QBlade, εκτελούνται οι ακόλουθες υπορουτίνες (Εικ. 15):

- Σχεδιασμός και ανάλυση αεροτομών (κώδικας XFOIL)
- Εξαγωγή δυνάμεων άνωσης και αντίστασης (σύστημα πολικών συντεταγμένων)
- Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση πτέρυγας
- Προσδιορισμός χαρακτηριστικών γεννήτριας και προσομοίωση

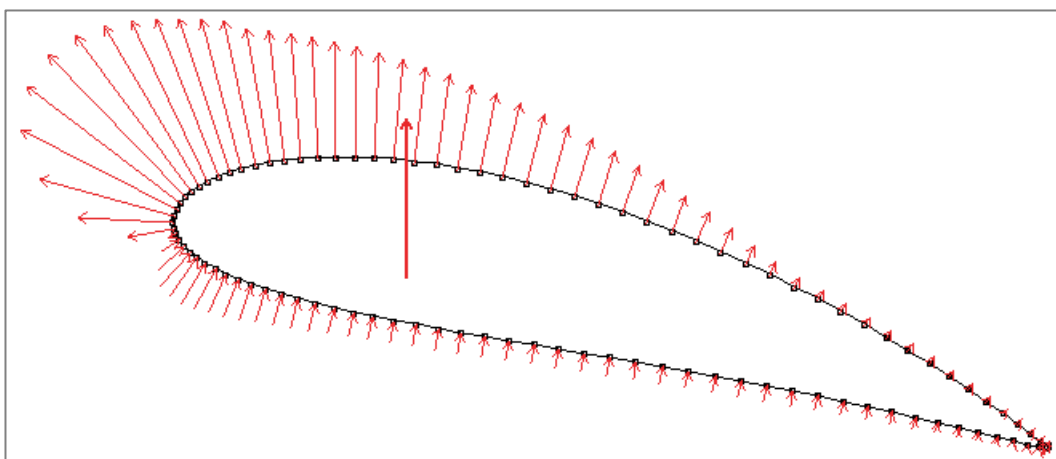


Εικόνα 15. Εκτελέσιμες υπορουτίνες στο περιβάλλον του QBlade.

Σχεδιασμός και Ανάλυση Αεροτομών

Για την εφαρμογή της BEM, απαιτούνται πίνακες τιμών των συντελεστών του συντελεστή άνωσης και αντίστασης για διαφορετικές τιμές γωνίας προσβολής (AoA). Οι τιμές αυτές, είτε συλλέγονται ως πειραματικά δεδομένα, είτε προσδιορίζονται από προσομοίωση της διδιάστατης ροής. Ο κώδικας XFOIL που αναπτύχθηκε από τους Drela & Giles (1987) εξυπηρετεί αυτόν τον σκοπό, της ανάλυσης και του υπολογισμού δηλαδή, της υποηχητικής ροής γύρω από μεμονωμένες αεροτομές. Ο κώδικας XFOIL παρέχει τη δυνατότητα σχεδιασμού και ανάλυσης συνήθων αεροτομών, χρησιμοποιώντας καμπύλες splines και συνδυασμένα δυναμικά συστήματα συντεταγμένων. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε από τον Deperrois (2009) το λογισμικό XFLR5, το οποίο αποτελεί συνδυασμό γραφικού περιβάλλοντος και XFOIL ενώ ο κώδικας είναι μεταφρασμένος από FORTRAN σε C++.

Έτσι, το λογισμικό QBlade βελτιστοποιεί το XFLR5, και ο βελτιστοποιημένος κώδικας χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό, αφενός των διδιάστατων αεροτομών, οι οποίες επιλέγονται για το σχεδιασμό των πτερυγών, αφετέρου των συντελεστών άνωσης και αντίστασης, οι οποίοι είναι απαραίτητοι για την εκτέλεση των προσομοιώσεων. Στην Εικόνα 16, φαίνεται σχηματικά η κατανομή των πιέσεων γύρω από μία αεροτομή τύπου NACA 5518, όπως εξάγεται από το γραφικό περιβάλλον του QBlade. (Marten et al., 2013b).

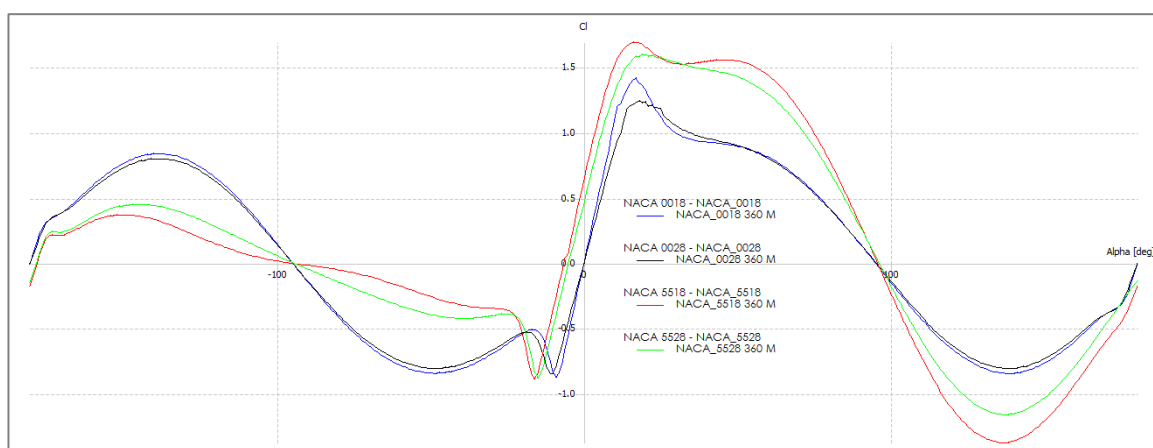


Εικόνα 16. Κατανομή πιέσεων γύρω από αεροτομή τύπου NACA 5518 υπολογισμένη στο XFLR5 ($Re=2 \times 10^6$, $Ma=0,1$, $AoA=15^\circ$).

Συντελεστές Άνωσης και Αντίστασης

Ο αλγόριθμος XFOIL είναι βασισμένος στη θεωρία δυναμικής ροής και για το λόγο αυτό, υπάρχει περιορισμός στον υπολογισμό των συντελεστών άνωσης και αντίστασης όσον αφορά στις γωνίες προσβολής που εμπίπτουν στο πεδίο γύρω και ακριβώς μετά από τη γωνία απώλειας στήριξης. Έτσι, για πολύ μεγάλες ή μικρές γωνίες προσβολής ο αλγόριθμος XFOIL δεν παρέχει συγκλίνοντα αποτελέσματα. Όμως, επειδή ο XFOIL αρχικά γράφτηκε για το σχεδιασμό πτήσης του αεροσκάφους, όπου δεν εμφανίζονται τέτοιες γωνίες προσβολής, το γεγονός αυτό δεν αποτέλεσε περιορισμό. Ωστόσο, κατά τη λειτουργία μίας Α/Γ οριζοντίου άξονα, στα τμήματα των πτερύγων που βρίσκονται κοντά στο κέντρο του ρότορα, συχνά εμφανίζονται γωνίες προσβολής πολύ κοντά στη γωνία απώλειας στήριξης.

Για τη διασφάλιση της ορθής εφαρμογής των σχετικών εξισώσεων υπολογισμού χρειάζεται να γίνει προβολή πολικών συντεταγμένων για όλο το εύρος των γωνιών προσβολής, ήτοι στις 360° (Διάγρ. 15). Η γενική διαδικασία ανάπτυξης, περιλαμβάνει την κατασκευή καμπύλης σύμφωνα με τις πολικές συντεταγμένες που περιγράφουν την πλήρη απώλεια στήριξης λεπτής πλάκας, θεωρώντας ότι σε μεγάλες γωνίες προσβολής η αεροτομή συμπεριφέρεται σαν λεπτή επίπεδη πλάκα με αιχμηρό χείλος προσβολής.



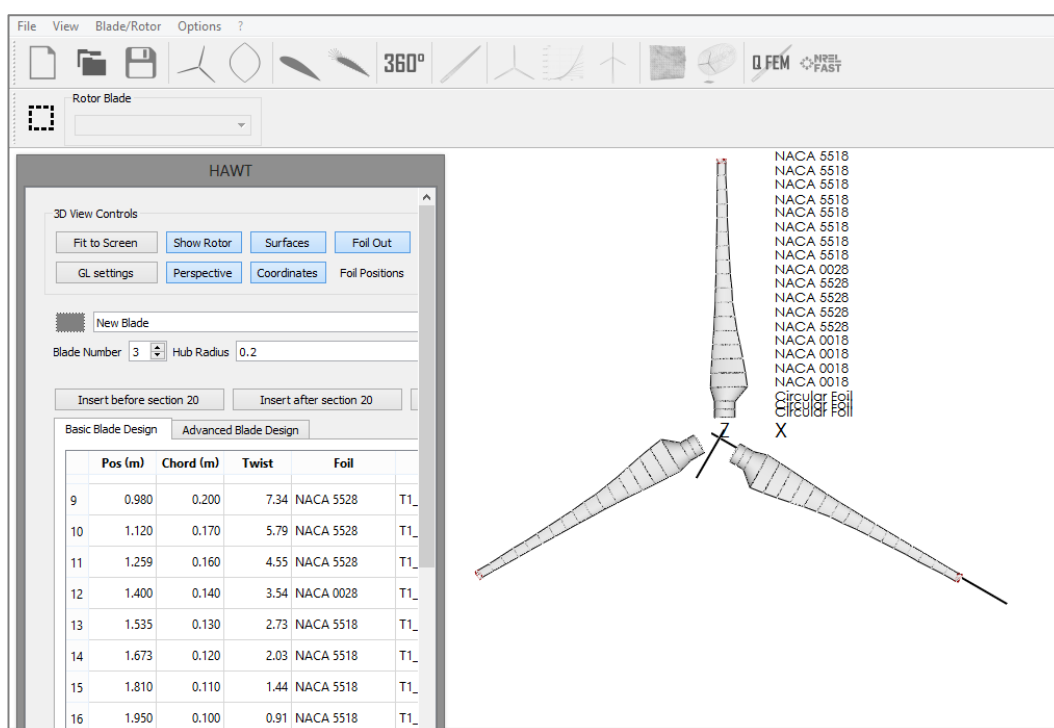
Διάγραμμα 15. Συντελεστής άνωσης. Εξαγωγή πολικών συντεταγμένων αεροτομών τύπου NACA 0018, 0028, 5518 και 5528 στις 360°.

Οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιεί το QBlade για την προβολή των σχετικών πολικών συντεταγμένων, αφορούν το μοντέλο Viterna-Corrigan, το οποίο χρησιμοποιείται

συχνά σε βιομηχανικές εφαρμογές, και το προσφάτως ανεπτυγμένο μοντέλο Montgomerie. (Marten et al. 2013a).

Σχεδιασμός και Βελτιστοποίηση Πτέρυγας

Η υπορουτίνα σχεδιασμού επιτρέπει τον επαρκή σχεδιασμό της γεωμετρίας των πτερύγων και του ρότορα. Πρόκειται για λειτουργία εύκολη στη χρήση, μιας και το παραθυρικό περιβάλλον παρέχει τρισδιάστατη απεικόνιση τόσο της γεωμετρίας της πτέρυγας, όσο και του ίδιου του ρότορα (Εικ. 17). Επιπλέον, ενσωματώνεται η λειτουργία εξαγωγής της γεωμετρίας σε τυποποίηση αρχείου .stl CAD.



Εικόνα 17. Περιβάλλον σχεδιασμού Α/Γ οριζοντίου άξονα στο QBlade.

Η κάθε πτέρυγα ορίζεται από διαδοχικά τοποθετημένες αεροτομές, οι οποίες είτε εισήχθησαν είτε κατασκευάστηκαν σε προηγούμενο στάδιο (σ.σ. «Σχεδιασμός και Ανάλυση Αεροτομών»). Η διάδοχη πραγματοποιείται κατά μήκος της ακτίνας του ρότορα ενώ δηλώνεται η θέση κάθε αεροτομής (position) με βάση την ακτινική της απόσταση από το κέντρο του ρότορα. Επιπλέον, υπάρχει δυνατότητα καθορισμού και άλλων μεγεθών, για κάθε μεμονωμένο τμήμα, όπως το μήκος χορδής (chord length), η γωνία συστροφής (twist angle), η πλάγια μετατόπιση (edgewise offset), η κυρτότητα

των πτερυγίων καμπυλότητας (flapwise curvature) και ο άξονας του βήματος μετατόπισης (pitch axis). (Marten et al., 2013a).

Η διακριτοποίηση μίας πτέρυγας κατά την προσομοίωση, εξαρτάται από τον αριθμό των μεμονωμένων τμημάτων που έχουν ορισθεί κατά το σχεδιασμό. Αν ένα στοιχείο, κατά την προσομοίωση, βρεθεί τοποθετημένο μεταξύ δύο διαφορετικών τμημάτων (αεροτομών), τότε ο αλγόριθμος καθορίζει τις πολικές συντεταγμένες αυτού του στοιχείου πραγματοποιώντας γραμμική παρεμβολή.

Για τη βέλτιστη κατανομή μεταξύ γωνιών συστροφής και μηκών χορδής υπάρχει η δυνατότητα εκτέλεσης αλγορίθμων βελτιστοποίησης της γεωμετρίας. Έτσι, δύναται να βελτιστοποιηθούν, αφενός η γωνία συστροφής έτσι ώστε ο λόγος C_l/C_d να μεγιστοποιείται για συγκεκριμένο λ , αφετέρου το μήκος χορδής, είτε σύμφωνα με τη θεωρία μόνιμης ροής του Betz είτε με τη θεωρία περιστρεφόμενου απορρεύματος του Schmitz. (Marten et al., 2013b).

Ορισμός Τύπου Γεννήτριας και Προσομοίωση

Μία A/Γ στο QBlade, περιγράφεται πλήρως από από τη γεωμετρία του ρότορα και κάποιες επιπλέον παραμέτρους που προσδιορίζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της γεννήτριας. Οι παράμετροι που πρέπει να καθορισθούν, είναι ο τύπος ρύθμισης ισχύος, το σύστημα ελέγχου της γωνιακής ταχύτητας του ρότορα, το εύρος ταχυτήτων ανέμου εντός του οποίου θα λειτουργεί η A/Γ, καθώς και ο βαθμός απόδοσής της.

Με την ολοκλήρωση της παραμετροποίησης, ακολουθεί η προσομοίωση, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Κατά την αδιάστατη προσομοίωση, δηλώνεται το επιθυμητό εύρος τιμών του συντελεστή λ , εξάγονται αποτελέσματα που αφορούν μόνο αδιάστατα μεγέθη, ενώ πρακτικά, αυτή η λειτουργία είναι χρήσιμη για τη μελέτη και σύγκριση πτερύγων με διαφορετική γεωμετρία. Με την επιλογή προσομοίωσης γεννήτριας, δηλώνονται αφενός τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας, της οποίας η απόδοση υπολογίζεται για ένα εύρος τιμών αδιατάρακτης ταχύτητας ανέμου, και αφετέρου τα στοιχεία αιολικού δυναμικού, με βάση τα οποία υπολογίζεται η ετήσια παραγωγή ενέργειας. Τέλος, κατά την πολυπαραμετρική προσομοίωση, δηλώνονται από το χρήστη εύρη τιμών γωνιακής ταχύτητας ρότορα,

γωνίας πρόνευσης και αδιατάρακτης ταχύτητας ανέμου, εξάγονται αποτελέσματα που παρέχουν λειτουργικές πληροφορίες των Α/Γ, και πρακτικά, αυτή η λειτουργία είναι χρήσιμη για τη διερεύνηση της απόδοσης των Α/Γ υπό συγκεκριμένες συνθήκες και την ανάπτυξη στρατηγικών ελέγχου.

3.4.1.2 Κώδικας προσομοίωσης

Στη βιομηχανία των Α/Γ, εφαρμόζονται κατά κόρον μέθοδοι που βασίζονται στη Θεωρία Στοιχείων Πτέρυγας και στην Αρχή Διατήρησης της Ορμής, με τη βοήθεια των οποίων η ανάπτυξη και η δυνατότητα σύγκρισης των διαφορετικών μοντέλων μεταξύ τους, γίνονται πραγματικότητα. Επιπλέον, η χρήση τεχνικών ανάλυσης οι οποίες δεν απαιτούν υψηλή ακρίβεια, στέκεται ικανή να παράσχει, σε προκαταρκτικό επίπεδο, τέτοιο σχεδιασμό των Α/Γ, που να μπορεί να μελετηθεί και αναλυθεί αργότερα με πιο εξειδικευμένες μεθόδους υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Οι υπολογιστικές μέθοδοι που ακολουθούνται στο QBlade, επαληθεύονται με αποτελέσματα από δοκιμές αεροδυναμικής σήραγγας και πειραματικές μετρήσεις, κι έτσι, η εφαρμογή του αιτιολογείται απόλυτα για την αεροδυναμική ανάλυση των πτερύγων του ρότορα Α/Γ. (Marten et al., 2013a).

Η ανάλυση των Α/Γ οριζοντίου άξονα βασίζεται στην κλασική BEM, όπως αυτή περιγράφεται από τον Hansen (2008). Η μέθοδος αποτελεί συνδυασμό της Θεωρίας Στοιχείου Πτέρυγας και της Γενικής Θεωρίας Ορμής. Με βάση την πρώτη, εξετάζονται οι πιέσεις που ασκούνται τοπικά στην πτέρυγα, ενώ με βάση τη δεύτερη, διατηρείται η ορμή του ρεύματος αέρα κατά τη μετάβασή του από τα ανάντη προς τα κατόντη του ρότορα. Η εφαρμογή των δύο θεωριών, οδηγεί σε ένα σύστημα εξισώσεων το οποίο επιλύεται με επαναληπτική διαδικασία.

Η BEM, στηρίζεται στις θεωρήσεις παροχής αέρα χωρίς ασυνέχειες, αμετάβλητου καθεστώτος ροής και μη ύπαρξης εξάρτησης των διδιάστατων αεροτομών της πτέρυγας μεταξύ τους.

Μετά τις παραπάνω παραδοχές, τα φαινόμενα τρισδιάστατης ανάλυσης, τα οποία παίζουν ρόλο στην αεροδυναμική των Α/Γ, δε λαμβάνονται υπόψη στις εξισώσεις υπολογισμού. Ωστόσο, η επίδραση των φαινομένων αυτών στα ασκούμενα φορτία και

στην απόδοση των Α/Γ, υπολογίζεται από εμπειρικές διορθωτικές εξισώσεις, κάποιες από τις οποίες ενσωματώνονται στο QBlade. Αυτές είναι οι εξής:

- Διόρθωση στροβίλων ακροπτερυγίου και βάσης κατά Prandtl (Hansen, 2008)
- Διόρθωση στροβίλων ακροπτερυγίου και βάσης κατά Shen (Shen et al., 2005)
- Τροποποίηση διόρθωσης Glauert στο τυρβώδες απόρρευμα (Buhl, 2005)

Η BEM είναι εκείνη που εφαρμόζεται κατά κόρον στη βιομηχανία, παρόλη την απλότητα που διέπει την προσέγγιση της μοντελοποίησης Α/Γ. Σχεδόν όλες οι υπάρχουσες Α/Γ οριζοντίου άξονα, σχεδιάστηκαν με μεθόδους που στηρίζονται στις αρχές της θεωρίας αυτής, λόγω των ισχυρών αλγορίθμων που χρησιμοποιεί, της υπολογιστικής επάρκειας που παρέχει και της μακρόχρονης εμπειρίας που έχει αποκτηθεί από την εφαρμογή της. (Marten et al., 2010).

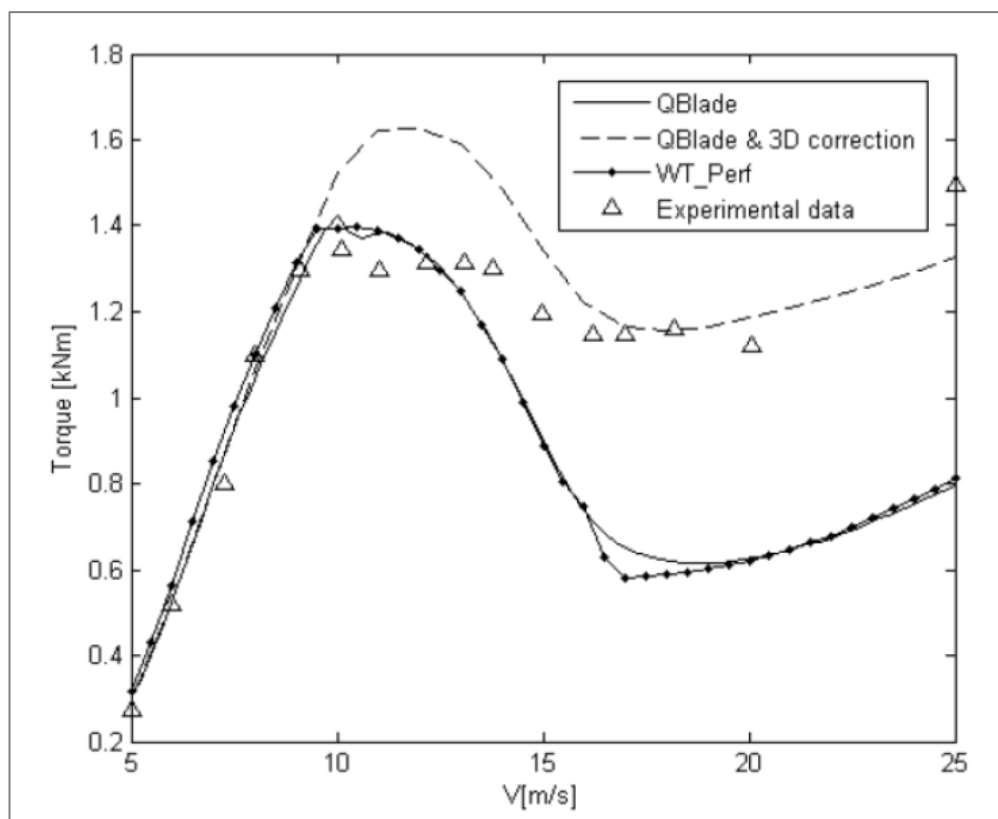
3.4.2 Αξιοπιστία και εγκυρότητα εργαλείου

Στα πλαίσια της διευκόλυνσης της έρευνας γύρω από τις ανεμογεννήτριες, το λογισμικό QBlade έχει διανεμηθεί ελεύθερα, ενώ χρησιμοποιεί κατά βάση συναρτήσεις και λειτουργίες προγενέστερων και ταυτόχρονα δοκιμασμένων εργαλείων ανοικτού κώδικα.

Από την ημερομηνία πρώτης έκδοσής του και έπειτα, έχει χρησιμοποιηθεί αρκετές φορές παγκοσμίως (20.000 έως το 2013), κυρίως από πανεπιστήμια, εταιρείες αλλά και ιδιώτες. Τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από την επιλογή του QBlade από μία τόσο μεγάλη βάση χρηστών, είναι η διαρκής συζήτηση, σύγκριση και επαλήθευσή των αποτελεσμάτων, η ανατροφοδότηση πληροφοριών, καθώς και ο άμεσος εντοπισμός των σφαλμάτων στην κωδικοποίηση των διαδικασιών προσομοίωσης και η αντιμετώπισή τους. (Marten et al., 2013a).

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί το QBlade για την επίλυση των εξισώσεων της BEM, έχει εξεταστεί ως προς την εγκυρότητα και την αξιοπιστία του, μέσω της σύγκρισης με πειραματικά δεδομένα και έγκυρα ερευνητικά εργαλεία, όπως το Flex5 του Πολυτεχνείου της Δανίας (DTU) και το WT_Perf του Τεχνικού Κολλεγίου του Ουισκόνσιν (NWTC). Από τη σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών εργαλείων, προέκυψε ότι τα αποτελέσματα σχεδόν ταυτίζονται, ενώ από την αξιολόγηση των

αποτελεσμάτων αποδείχθηκε ικανοποιητική ανταπόκριση στα πειραματικά δεδομένα (Διάγρ. 16). (Marten et al., 2010).



Διάγραμμα 16. Αεροδυναμική ροπή. Σύγκριση πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα των εργαλείων QBlade και WT_Perf. (Πηγή: Marten et al., 2010).

Όλα όσα προαναφέρθηκαν, καθιστούν το QBlade ως ένα εργαλείο αξιόπιστο και έγκυρο για το σχεδιασμό και την προσομοίωση των Α/Γ οριζοντίου άξονα.

3.4.3 Περιγραφή του θεωρητικού πλαισίου

Το μέγεθος των αερομεταφερόμενων κόκκων στο ύψος που τυπικά βρίσκονται οι πτέρυγες, κυμαίνεται από 0,2 mm έως 0,5 mm (Pechlivanoglou et al., 2010). Ωστόσο, τουλάχιστον απ' όσο είναι γνωστό, δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα μεγέθους κόκκων σκόνης για τις επιλεχθείσες περιοχές. Επειδή τα δεδομένα αφορούν συγκέντρωση και επικάλυψη σκόνης, η προσέγγιση του προβλήματος στηρίζεται στην υπόθεση της δημιουργίας ανομοιόμορφου στρώματος σκόνης στις επιφάνειες των πτερύγων. Έτσι, το συνεχώς μεταβαλλόμενο στρώμα μετατοπίζει το στερεό όριο της εκάστοτε πτέρυγας επηρεάζοντας τη ροή του αέρα γύρω από αυτήν.

Τα διαθέσιμα δεδομένα, εμπεριέχουν μάζα επικαθήμενης σκόνης m_σ , που αντιστοιχεί σε όγκο σκόνης V_σ , ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας. Έστω για τον όγκο, οι θεωρήσεις μέσου ύψους h_{av} και πυκνότητας $\rho_\sigma = 10^6 \text{ gr/m}^3$. Θα είναι τότε:

$$V_\sigma = \frac{m_\sigma}{\rho_\sigma} \rightarrow 1m \times 1m \times h_{av} = \frac{m_\sigma}{\rho_\sigma} \rightarrow h_{av} = \frac{m_\sigma}{\rho_\sigma} \quad (39)$$

Το ύψος h_{av} του ανομοιόμορφου στρώματος, ισοδυναμεί με το ύψος τραχύτητας, το οποίο σε αυτήν την περίπτωση, και ελλείψει περαιτέρω πληροφοριών, θεωρείται ότι αντιστοιχεί στην παράμετρο του αριθμητικού μέσου των απόλυτων τιμών, και συμβολίζεται με k .

Λόγω της συνεκτικότητας του ρευστού, αναπτύσσεται στην επιφάνεια της πτέρυγας διατμητική τάση τ_w , η αδιάστατη έκφραση της οποίας δίδεται από τον τοπικό συντελεστή τριβής C_f (Τσαγγάρης, 1995):

$$C_f = \frac{\tau_w}{\rho U_\infty^2} = \frac{0,664}{\sqrt{Re_x}} \quad (40)$$

όπου η αδιάστατη μεταβλητή Re_x ονομάζεται τοπικός αριθμός Reynolds και δίδεται από τη σχέση:

$$Re_x = \frac{U_\infty x}{\nu} \quad (41)$$

Ο τοπικός συντελεστής αντίστασης, εκφράζει τη σχέση της διατμητικής τάσης προς τη δυναμική πίεσης της ροής. Σύμφωνα με τον Schlichting (1979), στην πλήρως τραχεία περιοχή, ο τοπικός συντελεστής τριβής μπορεί να προσεγγιστεί από την ακόλουθη σχέση υπολογισμού:

$$C_f = \left(2,87 + 1,58 \log \frac{x}{\varepsilon_s}\right)^{-2,5} \quad (42)$$

όπου ε_s είναι η ισοδύναμη τραχύτητα άμμου και ο όρος x/ε_s αντιπροσωπεύει τη σχετική τραχύτητα σε οριζόντια απόσταση x κατά μήκος της χορδής. Για τις ανάγκες της παρούσας Μεταπτυχιακής Διατριβής, θεωρείται η απόσταση x ίση με το 10% του μήκους της χορδής (Pechlivanoglou et al., 2010).

Σύμφωνα με τους Adams et al. (2012), υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών ε_s και k , ως ακολούθως:

$$\varepsilon_s = 5,863k \quad (43)$$

Τελικά, η εξίσωση (42) δείχνει πως ο τοπικός συντελεστής τριβής και η ισοδύναμη τραχύτητα άμμου είναι ποσότητες ανάλογες, ενώ από την εξίσωση (40) φαίνεται πως

$Re_x \sim \frac{1}{C_f^2}$. Κατά την αύξηση λοιπόν της τραχύτητας, μειώνεται ο τοπικός αριθμός Reynolds.

Από τα δεδομένα επικάθισης και τις εξισώσεις (39) και (43), υπολογίζεται η ισοδύναμη τραχύτητα άμμου, και από τις εξισώσεις (40) και (42) ο τοπικός αριθμός Reynolds, ο οποίος στη συνέχεια συσχετίζεται με το γενικό αριθμό Reynolds με τη βοήθεια των εξισώσεων (1) και (41). Στον Πίνακα 4, καταγράφεται η αθροιστική επικάθιση σκόνης στις υπό μελέτη περιοχές, στο τέλος κάθε μήνα, και παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι αριθμοί Re , όπως εκτιμήθηκαν από τις παραπάνω εξισώσεις.

Πίνακας 4. Αθροιστική επικάθιση σκόνης στο τέλος κάθε μήνα (έτος 2014) και αντίστοιχοι αριθμοί Reynolds.

Μήνας	Πόλη							
	Λεμεσός		Σητεία		Θήβα		Αλεξ/πολη	
	Επικάθιση ($\mu\text{gr}/\text{m}^2$)	Re (10^5)	Επικάθιση ($\mu\text{gr}/\text{m}^2$)	Re (10^5)	Επικάθιση ($\mu\text{gr}/\text{m}^2$)	Re (10^5)	Επικάθιση ($\mu\text{gr}/\text{m}^2$)	Re (10^5)
<i>Ιανουάριος</i>	8.527	14,469	5.122	16,566	1.276	23,581	849	26,039
<i>Φεβρουάριος</i>	24.930	10,721	15.031	12,373	2.724	19,510	3.357	18,492
<i>Μάρτιος</i>	34.531	9,755	21.076	11,249	3.284	18,597	5.412	16,326
<i>Απρίλιος</i>	39.845	9,353	24.148	10,820	3.612	18,146	5.969	15,909
<i>Μάιος</i>	46.668	8,925	28.273	10,340	4.244	17,401	6.191	15,755
<i>Ιούνιος</i>	53.132	8,585	32.101	9,965	4.644	16,997	6.330	15,662
<i>Ιούλιος</i>	54.987	8,497	33.207	9,867	4.786	16,864	6.344	15,653
<i>Αύγουστος</i>	55.003	8,496	33.211	9,867	4.821	16,831	6.347	15,651
<i>Σεπτέμβριος</i>	55.083	8,493	33.262	9,862	4.855	16,800	6.417	15,605
<i>Οκτώβριος</i>	55.817	8,459	33.664	9,828	4.976	16,692	6.860	15,329
<i>Νοέμβριος</i>	60.241	8,266	36.295	9,614	5.171	16,524	7.281	15,087
<i>Δεκέμβριος</i>	67.171	7,998	40.361	9,318	5.992	15,892	9.370	14,094

Σύμφωνα με τους Diab et al. (2015), η περιοχή γύρω από το σημείο στο οποίο η εκάστοτε αεροτομή εμφανίζει το μέγιστο πάχος της, καθορίζει και την ευαισθησία της σε φαινόμενα τραχύτητας. Στην αρχική φάση ανάπτυξης, τα σωματίδια επικάθονται γύρω από το σημείο ανακοπής, στο χείλος προσβολής, και στη συνέχεια καλύπτουν την επιφάνεια της πτέρυγας σε οριζόντια απόσταση κατά μήκος της χορδής ίση

περίπου με το 10%. Στη συνέχεια, όσο επεκτείνεται η περίοδος λειτουργίας, αναμένεται περαιτέρω κάλυψη της επιφάνειας της πτέρυγας.

Οι Re και Ma της ροής, αποτελούν τα βασικά δεδομένα εισόδου στο QBlade. Διατηρώντας λοιπόν κατά την προσομοίωση, την αδιατάρακτη ταχύτητα του ανέμου σταθερή και μειώνοντας το γενικό αριθμό Reynolds αντίστοιχα με τα πραγματικά δεδομένα επικάθισης, μπορούμε να προσεγγίσουμε τη μείωση της αεροδυναμικής απόδοσης λόγω της επίδρασης της τραχύτητας.

3.5 Διαδικασία

Η γενική διαδικασία αφορά στην κατασκευή μοντέλου ρότορα και στην εκτέλεση προσομοιωτικών διεργασιών με σκοπό την εκτίμηση της αποδιδόμενης αεροδυναμικής ισχύος. Ωστόσο, αρχικά πραγματοποιούνται προσομοιώσεις με τυχαίους αριθμούς Re ώστε να αποδειχθεί η υποβάθμιση της αεροδυναμικής απόδοσης των πτερύγων μέσω της μείωσης του γενικού αριθμού Re .

Η διαδικασία περιλαμβάνει συνοπτικά την εκτέλεση των παρακάτω διεργασιών στο QBlade (Marten & Wendler, 2013):

- Σχεδιασμός αεροτομής
- Προσομοίωση ροής
- Προβολή σε πολικές συντεταγμένες
- Σχεδιασμός πτέρυγας και ρότορα
- Προσομοίωση ρότορα

Πιο αναλυτικά, πριν την κατασκευή του μοντέλου στο QBlade, πρέπει απαραίτητως να έχουν οριστεί οι γεωμετρίες όλων των αεροτομών που θα χρησιμοποιηθούν, καθώς και όλα τα σχετικά δεδομένα πολικών συντεταγμένων. Οι αεροτομές, είτε κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας καμπύλες *splines*, είτε δημιουργούνται μέσω γεννήτριας αεροτομών NACA, είτε ακόμα εισάγοντας έτοιμη γεωμετρία από το XFLR5. Παράλληλα, υπάρχει η δυνατότητα φόρτωσης κυλινδρικών αεροτομών, οι οποίες για κατασκευαστικούς λόγους, χρησιμοποιούνται στη βάση των πτερύγων, στο κέντρο του ρότορα.

Στη συνέχεια, δηλώνονται τα χαρακτηριστικά της ροής (αριθμοί Re και Ma) γύρω από τις αεροτομές. Τα χαρακτηριστικά της ροής, αποτελούν τα κύρια δεδομένα εισόδου στο QBlade. Ακολουθούν ο ορισμός ενός εύρους γωνιών προσβολής για την προσομοίωση της ροής και τη μετατροπή των καρτεσιανών συντεταγμένων σε πολικές.

Σε αυτό το σημείο, ολοκληρώνεται το πρώτο στάδιο της προσομοίωσης, στάδιο κατά το οποίο εξάγονται καμπύλες συσχέτισης των μεγεθών C_l , C_d και C_l/C_d με τις γωνίες προσβολής. Είναι γνωστό πως η ποιότητα των πολικών συντεταγμένων των συντελεστών άνωσης και αντίστασης, είναι καθοριστικής σημασίας στην προσομοίωση των Α/Γ (Marten & Wendler, 2013). Ωστόσο, η ανάλυση δίνει συγκλίνοντα αποτελέσματα για περιορισμένο εύρος γωνιών προσβολής το οποίο τυπικά κυμαίνεται μεταξύ -5° και $+25^\circ$. Επειδή η προσομοίωση του ρότορα προϋποθέτει πλήρη στοιχεία, ακολουθεί η προβολή στις 360° , η οποία όπως προαναφέρθηκε, ολοκληρώνεται με τη βοήθεια της σχετικής υπορουτίνας στο QBlade.

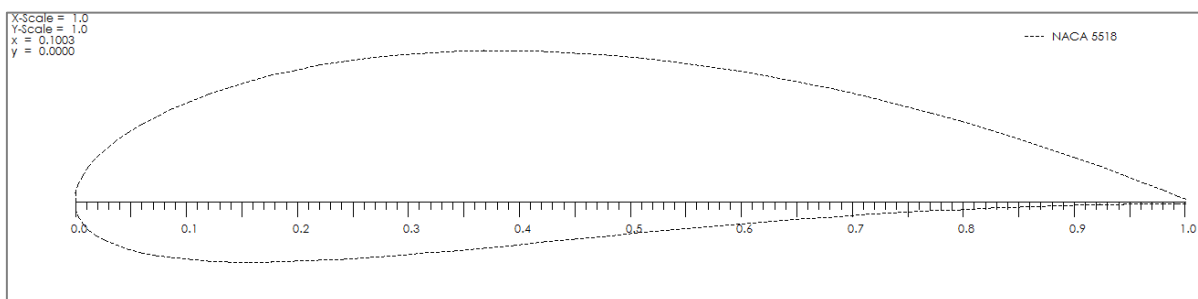
Μετά την ολοκλήρωση της παραπάνω διεργασίας, μπορούμε να προχωρήσουμε στο σχεδιασμό της πτέρυγας. Η πτέρυγα, αποτελείται από πεπερασμένο αριθμό τμημάτων, ενώ κάθε τμήμα της αντιπροσωπεύεται από την ακτινική του θέση, τον τύπο αεροτομής που περιλαμβάνει και τις σχετικές πληροφορίες πολικών συντεταγμένων που περιγράφουν τη ροή. Κατά το σχεδιασμό, υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης και αφαίρεσης τμημάτων, ενώ για καθένα από αυτά δηλώνονται το μήκος χορδής και η γωνία συστροφής του. Μόλις καθορισθούν πλήρως τα τμήματα, παρέχεται η δυνατότητα βελτιστοποίησης του σχεδιασμού, όσον αφορά στις γωνίες συστροφής και τα μήκη χορδής (Marten, 2014). Έπειτα, καθορίζεται το μήκος της βάσης και ορίζεται ο συνολικός αριθμός πτερύγων του μοντέλου. Τέλος, οι πληροφορίες γεωμετρίας του μοντέλου αποθηκεύονται, με παράλληλη δημιουργία αντιγράφου, έτσι ώστε για κάθε κατασκευή καινούριου μοντέλου όμοιας γεωμετρίας, να υπάρχει δυνατότητα τροποποίησης των παραμέτρων, χωρίς την απώλεια του αρχικού μοντέλου.

Σε αυτό το σημείο, μπορούμε να προχωρήσουμε στην προσομοίωση του ρότορα, αφού πρώτα καθορισθούν ο τύπος της διόρθωσης του αλγορίθμου (σ.σ. Παρ. 3.4.1.2), η τιμή του δυναμικού ιξώδους του ρευστού μέσου και κάποιες παράμετροι σχετικές με την επαναληπτική διαδικασία. Έπειτα, επιλέγονται το επιθυμητό εύρος των τιμών και το

βήμα μεταβολής του λ και εκτελείται η προσομοίωση. Κατά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, εξάγονται αποτελέσματα που αντιπροσωπεύουν μεγέθη αδιάστατα, ενώ σε αυτό το στάδιο, θεωρείται ότι η αδιατάρακτη ταχύτητα του ανέμου έχει την τιμή της μονάδας.

Επομένως, μετά την αδιάστατη προσομοίωση, καμία καμπύλη ισχύος ή φορτίου δεν είναι ακόμα υπολογίσιμη. Έτσι, μπορούμε να προχωρήσουμε στην πολυπαραμετρική προσομοίωση, η οποία αποτελεί και το τελευταίο στάδιο της διαδικασίας. Εδώ, πρέπει να καθορισθούν από το χρήστη το εύρος τιμών ταχύτητας του ανέμου και προαιρετικά, τιμές γωνίας πρόνευσης και γωνιακής ταχύτητας του ρότορα. Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, όλα τα αεροδυναμικά μεγέθη που σχετίζονται με το ρότορα είναι διαθέσιμα για μελέτη και ανάλυση.

Για της ανάγκες της παρούσας Μεταπτυχιακής Διατριβής, επιλέγεται και φορτώνεται αεροτομή τύπου NACA 5518. Σημειώνεται ότι οι αεροτομές τύπου NACA είναι κατάλληλες για A/Γ που προορίζονται για λειτουργία σε περιβάλλον στο οποίο επικρατούν άνεμοι υψηλής έντασης και σχετικά μικρών γωνιών προσβολής (Ram et al., 2013). Από τα τέσσερα ψηφία της τυποποίησης, τα οποία ορίζουν τη γεωμετρία της αεροτομής, το πρώτο αντιπροσωπεύει τη μέγιστη καμπυλότητα, το δεύτερο, την απόσταση του σημείου μέγιστης καμπυλότητας από το χείλος προσβολής (σε δεκάδες εκατοστών), και τα δύο τελευταία, το μέγιστο πάχος της αεροτομής, ενώ όλα τα προαναφερθέντα μεγέθη είναι εκφρασμένα σε ποσοστό του μήκους χορδής. Έτσι, για παράδειγμα, το μέγιστο πάχος της αεροτομής NACA 5518, θα είναι ίσο με $18\% \times c$. (Εικ. 18).



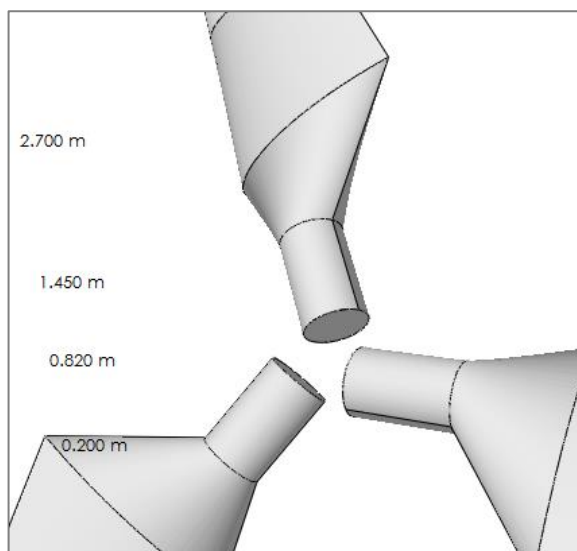
Εικόνα 18. Κατασκευή αεροτομής NACA 5518 στο QBlade.

Για την απόδειξη της υποβάθμισης της αεροδυναμικής απόδοσης των πτερύγων, εκτελούνται συνολικά 20 προσομοιώσεις για αριθμό Ma ίσο με 0,05 ($U_{\infty} = 17,16$ m/sec) και διαφορετικούς αριθμούς Re . Ειδικότερα, επιλέγονται οι αριθμοί Re : 10^5 , $1,93 \times 10^5$, 2×10^5 έως 10×10^5 με βήμα 10^5 και 2×10^6 έως 10×10^6 με βήμα 10^6 . Σε εφαρμογή της θεωρητικής προσέγγισης (σ.σ. παρ. 3.4.3), οι ανωτέρω αριθμοί Re αντιστοιχούν στις ποσότητες επικαθήμενης σκόνης του Πίνακα 5. Για τη μελέτη της επίδρασης της σκόνης στην αεροδυναμική απόδοση των πτερύγων, εκτελούνται 48 προσομοιώσεις για αριθμό Ma ίσο με 0,05 και τους αριθμούς Re που προέκυψαν από τη συσχέτιση με τα πραγματικά δεδομένα επικάθισης (Πίν. 4). Συνολικά, εκτελούνται 68 προσομοιώσεις, για καθεμία από τις οποίες ορίζεται εύρος γωνιών προσβολής -5° και $+25^\circ$, με σχετικό βήμα 1° .

Πίνακας 5. Αθροιστική επικάθιση σκόνης στο τέλος κάθε μήνα (έτος 2014) και αντίστοιχοι αριθμοί Reynolds.

Re	Επικάθιση	Re	Επικάθιση
10.000.000	1,38 μ gr	900.000	45,37 mgr
9.000.000	2,44 μ gr	800.000	67,10 mgr
8.000.000	4,53 μ gr	700.000	103,43 mgr
7.000.000	9,00 μ gr	600.000	168,04 mgr
6.000.000	19,42 μ gr	500.000	292,72 mgr
5.000.000	46,80 μ gr	400.000	561,00 mgr
4.000.000	131,60 μ gr	300.000	1,25 gr
3.000.000	466,98 μ gr	200.000	3,57 gr
2.000.000	2,47 mgr	193.000	3,90 gr
1.000.000	31,72 mgr	100.000	1,79 gr

Μετά την προβολή των C_l , C_d και C_l/C_d στις 360° , προχωρούμε στην κατασκευή τριπτέρυγου ρότορα, χρησιμοποιώντας αεροτομή NACA 5518 κατά μήκος της πτέρυγας και κυκλική αεροτομή στη βάση της (Εικ. 19). Η κάθε πτέρυγα, αποτελείται από επτά επιμέρους τμήματα, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στην Εικόνα 20.



Εικόνα 19. Αεροτομές βάσης μοντέλου.

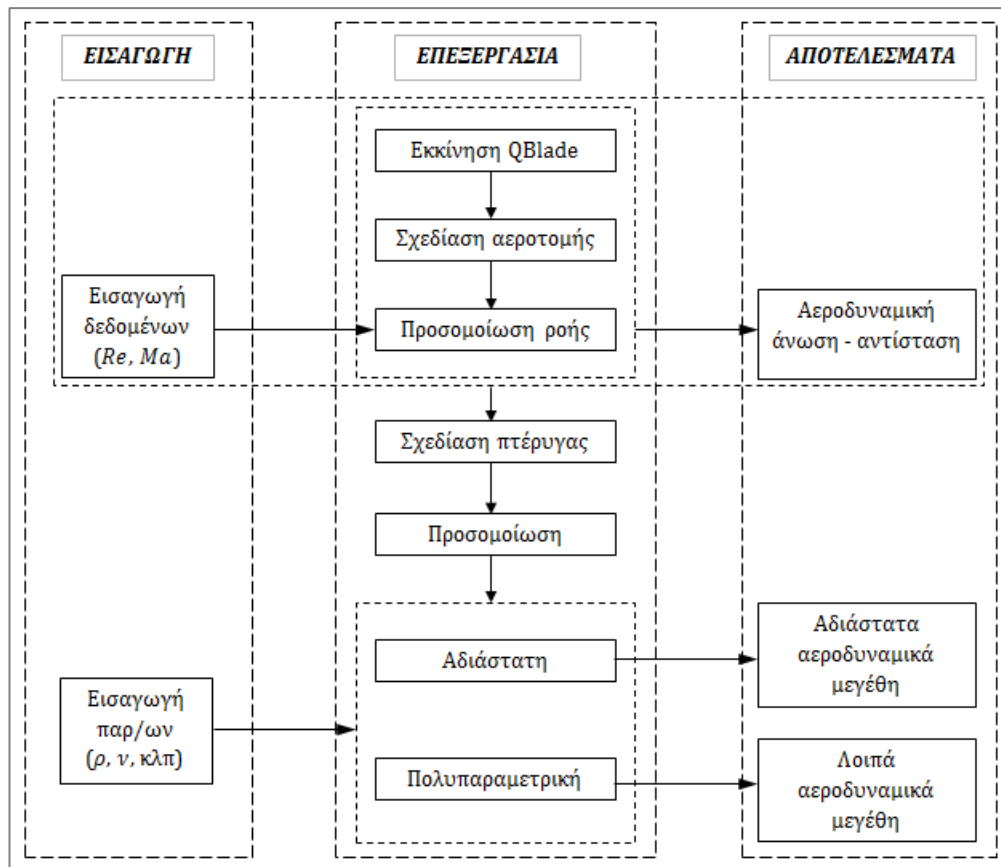
Ο ορισμός της πτέρυγας ολοκληρώνεται με τη συσχέτιση κάθε τμήματός της με τα χαρακτηριστικά της ροής γύρω από αυτό (σετ δεδομένων για τα C_l , C_d και C_l/C_d).

	Pos (m)	Chord (m)	Twist	Foil
1	0	0.4	24.74	Circular Foil
2	0.62	0.4	24.74	Circular Foil
3	1.25	1.4	24.74	NACA 5518
4	2.5	1	9	NACA 5518
5	5	0.7	5	NACA 5518
6	7.5	0.53	2	NACA 5518
7	10	0.42	0.5	NACA 5518

Εικόνα 20. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλου.

Έπειτα, προχωρούμε σε αδιάστατη και τέλος σε πολυπαραμετρική προσομοίωση, όπου επιλέγεται διόρθωση τρισδιάστατης ανάλυσης και ορίζονται το κινηματικό ιξώδες και η πυκνότητα του ρευστού μέσου, ως $1,647 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ και $1,225 \text{ kg/m}^3$ αντίστοιχα. Μερικές επιπλέον παράμετροι που σχετίζονται με την εκτέλεση του αλγορίθμου, ορίζονται ως εξής: αριθμός πεπερασμένων στοιχείων ίσος με 40, μέγιστη τιμή

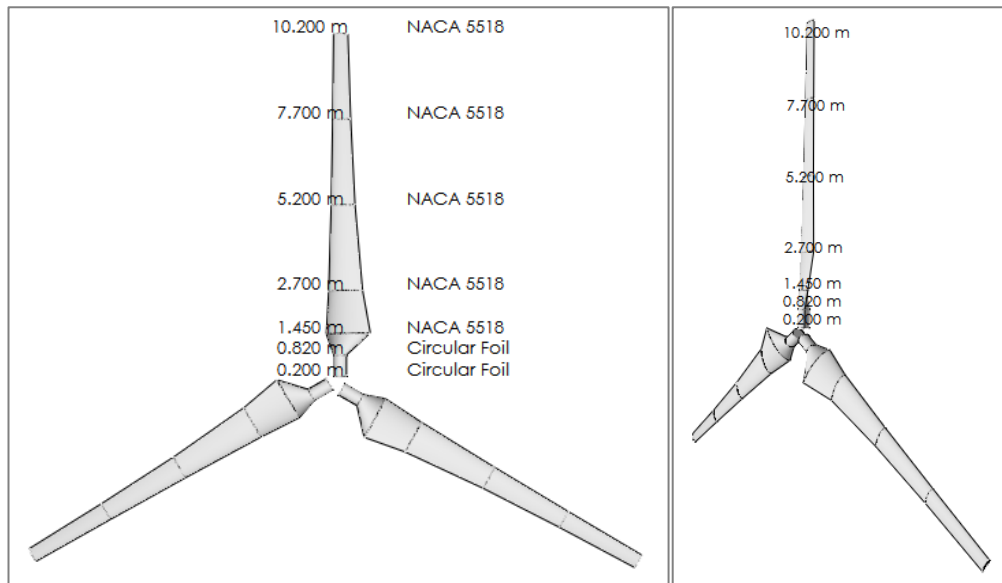
κριτηρίου σύγκλισης $\epsilon = 10^{-5}$, μέγιστος αριθμός επαναλήψεων 100 και βαθμός χαλάρωσης 0,35. (Marten & Wendler, 2013).



Εικόνα 21. Διάγραμμα ροής διεργασιών στο QBlade.

Η αδιάστατη προσομοίωση, εκτελείται για τιμές του λ από 1 έως 10 με βήμα μεταβολής 0,5. Για την πολυπαραμετρική προσομοίωση, επιλέγονται ταχύτητες ανέμου 3-25 m/sec (βήμα μεταβολής 1 m/sec), γωνιακή ταχύτητα ρότορα 20-50 rpm (βήμα μεταβολής 5 rpm) και γωνία πρόνευσης σταθερή, αρχικά μηδενική και τελικά ίση με 5° .

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλους τους συνδυασμούς αριθμών Re και Ma που έχουν επιλεγεί, ενώ το μοντέλο που κατασκευάστηκε (Εικ. 22), αποθηκεύεται και τροποποιείται ανάλογα, για κάθε διαφορετική εκτέλεση προσομοιωτικής διαδικασίας. Μετά την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων με τυχαίους αριθμούς Re , εξάγονται τα αποτελέσματα, τα οποία αναλύονται σε επόμενη παράγραφο.



Εικόνα 22. Πρόοψη και πλάγια όψη μοντέλου.

3.6 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Στα αποτελέσματα της αδιάστατης προσομοίωσης, περιλαμβάνονται τόσο τα ολικά μεγέθη όσο και τα τοπικά. Τα ολικά μεγέθη, είναι εκείνα που χαρακτηρίζουν συνολικά το ρότορα ή την Α/Γ, και προκύπτουν από τις εξισώσεις της ΒΕΜ, στις οποίες εμπλέκονται τα τοπικά μεγέθη.

Στα βασικά τοπικά μεγέθη, περιλαμβάνονται οι συντελεστές αξονικής και γωνιακής επαγωγής α και α' , ο τοπικός λόγος προχώρησης λ_r , και οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης C_l και C_d .

Ο συντελεστής ισχύος C_p , είναι ολικό μέγεθος και άρα αφορά το ρότορα. Έτσι, σε κάθε διαφορετική προσομοίωση εξάγεται μία τιμή για το C_p , η οποία παρέχει πληροφορίες για τη συνολική απόδοση του ρότορα και όχι για τα γεγονότα που λαμβάνουν χώρα τοπικά στις πτέρυγες. Το ίδιο ισχύει και για τους συντελεστές ροπής C_m , ώσης C_t και για το λόγο προχώρησης λ .

Από την εξίσωση (38) φαίνεται ότι τα μεγέθη P και C_p είναι ανάλογα. Αυτή η συσχέτιση, αναμένεται να φανεί και στα αποτελέσματα. Τότε, η μείωση του συντελεστή απόδοσης θα συνεπάγεται και τη μείωση της αεροδυναμικής ισχύος. Αρκεί

λοιπόν κατά την ανάλυση, να πραγματοποιηθεί σύγκριση των αντίστοιχων καμπυλών προκειμένου να αποδειχθεί η υποβάθμιση της αεροδυναμικής απόδοσης του ρότορα.

Από την πολυπαραμετρική προσομοίωση, εξάγονται οι καμπύλες αεροδυναμικών μεγεθών, για επιθυμητό εύρος ταχυτήτων ανέμου, γωνιακών ταχυτήτων αλλά και γωνιών πρόνευσης. Τα προαναφερθέντα μεγέθη, αφορούν το ρότορα και την απόδοσή του συνολικά, και ενδεικτικά αναφέρονται τα εξής: ισχύς P , ώση S , ροπή T και ροπή κάμψης πτέρυγας M_b . Έτσι λοιπόν, με σταθερές τιμές γωνιακής ταχύτητας και γωνίας πρόνευσης, προκύπτει η καμπύλη αεροδυναμικής ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου.

Μετά την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων, την εξαγωγή και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, μπορούμε να προχωρήσουμε στην κατάρτιση συγκριτικών πινάκων.

Κεφάλαιο 4

Αποτελέσματα

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας του Κεφαλαίου 3.

4.1 Έννοιες και θέματα

Τα αποτελέσματα, κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες και παρουσιάζονται ξεχωριστά. Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση των προσομοιώσεων με τυχαίους αριθμούς Re . Το σύνολο των προσομοιώσεων αυτών εντάσσονται στις Προσομοιώσεις Α' φάσης.

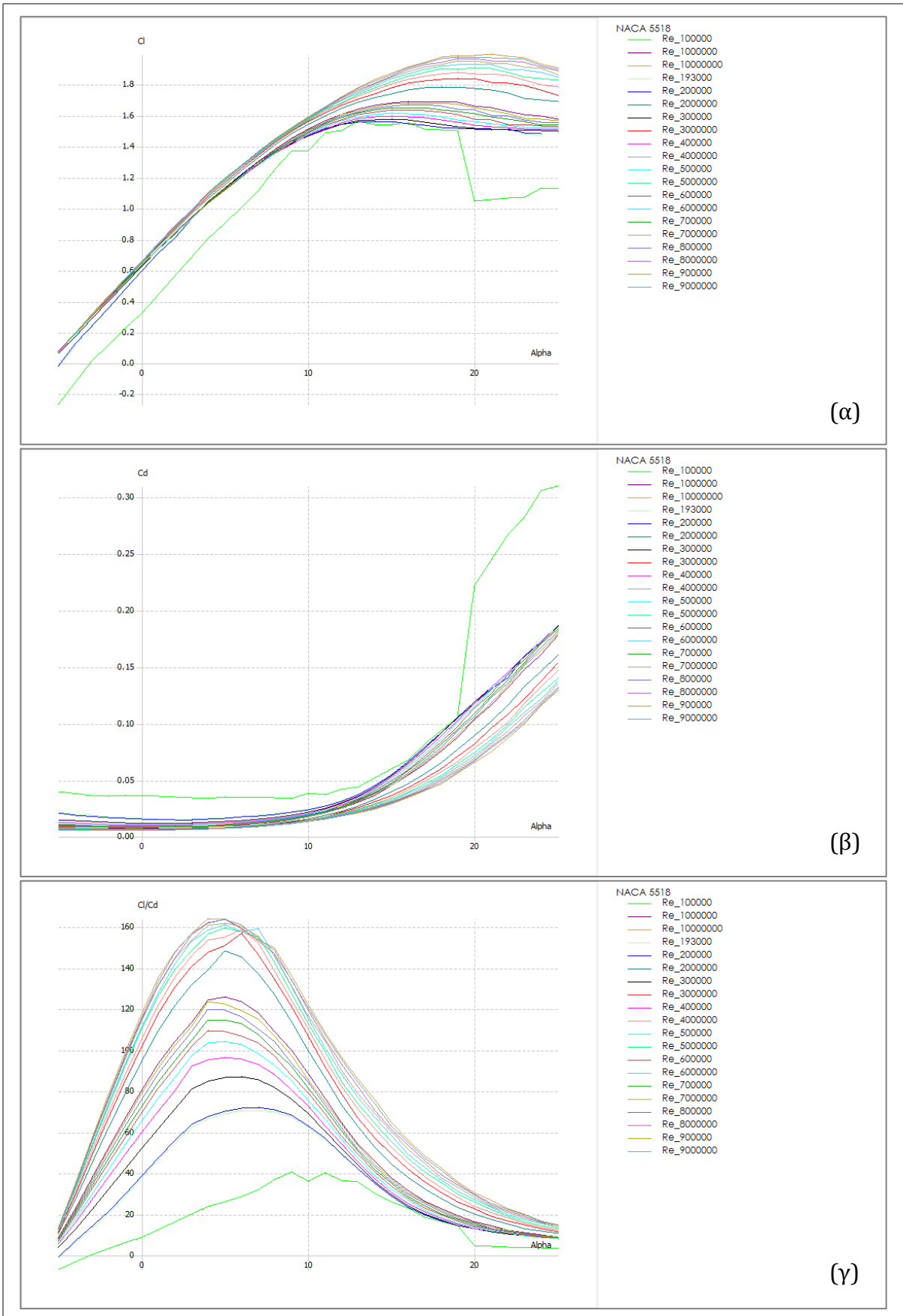
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση των προσομοιώσεων που σχετίζονται με τα πραγματικά δεδομένα επικάθισης και αφορούν τις Προσομοιώσεις Β' φάσης. Εδώ, οι πίνακες και τα διαγράμματα αρχικά παρατίθενται ξεχωριστά για κάθε περιοχή μελέτης, ενώ τα αποτελέσματα της μεταξύ τους σύγκρισης, παρατίθενται προς το τέλος της παρουσίασης.

4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Οι πίνακες και τα διαγράμματα που ακολουθούν, περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα των διαδικασιών που περιγράφονται στη μεθοδολογία του Κεφαλαίου 3.

4.2.1 Προσομοιώσεις Α' φάσης

Στα Διαγράμματα 17α, 17β και 17γ, παρίσταται γραφικά η μεταβολή των συντελεστών άνωσης C_l , αντίστασης C_d και του λόγου C_l/C_d συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης (AoA) για εύρος γωνιών -5° έως 25° . Οι αντίστοιχες προβολές στις 360° , απεικονίζονται γραφικά στα Διαγράμματα 19α, 19β και 19γ. Όλες οι καμπύλες αντιστοιχούν σε διαφορετικούς αριθμούς Re .

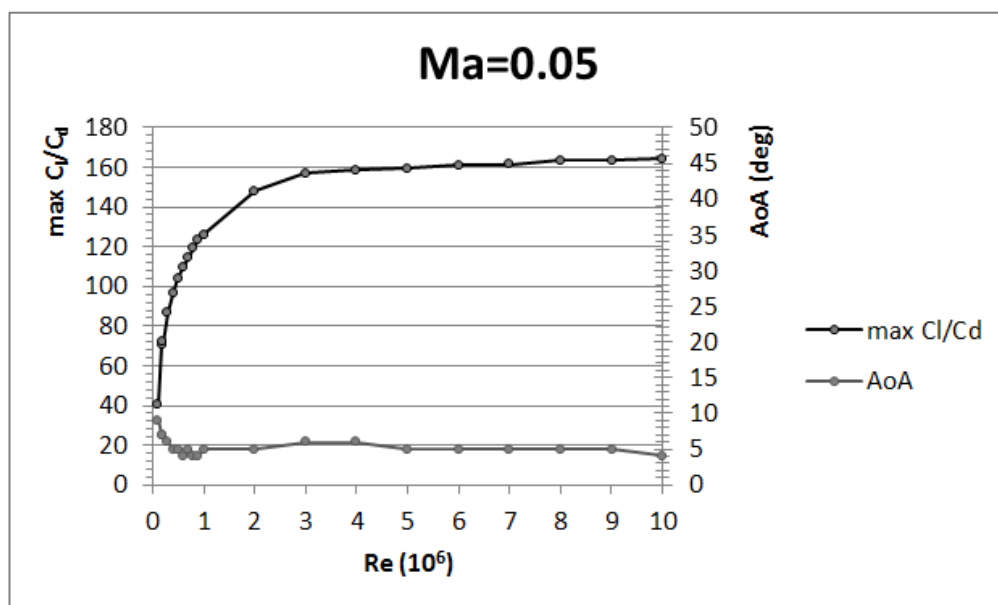


Διάγραμμα 17. Καμπύλες πολικών συντεταγμένων για εύρος γωνιών -5° έως 25° (AoA) και διαφορετικούς αριθμούς Re . (α) Συντελεστής άνωσης C_l . (β) Συντελεστής αντίστασης C_d . (γ) Λόγος C_l/C_d .

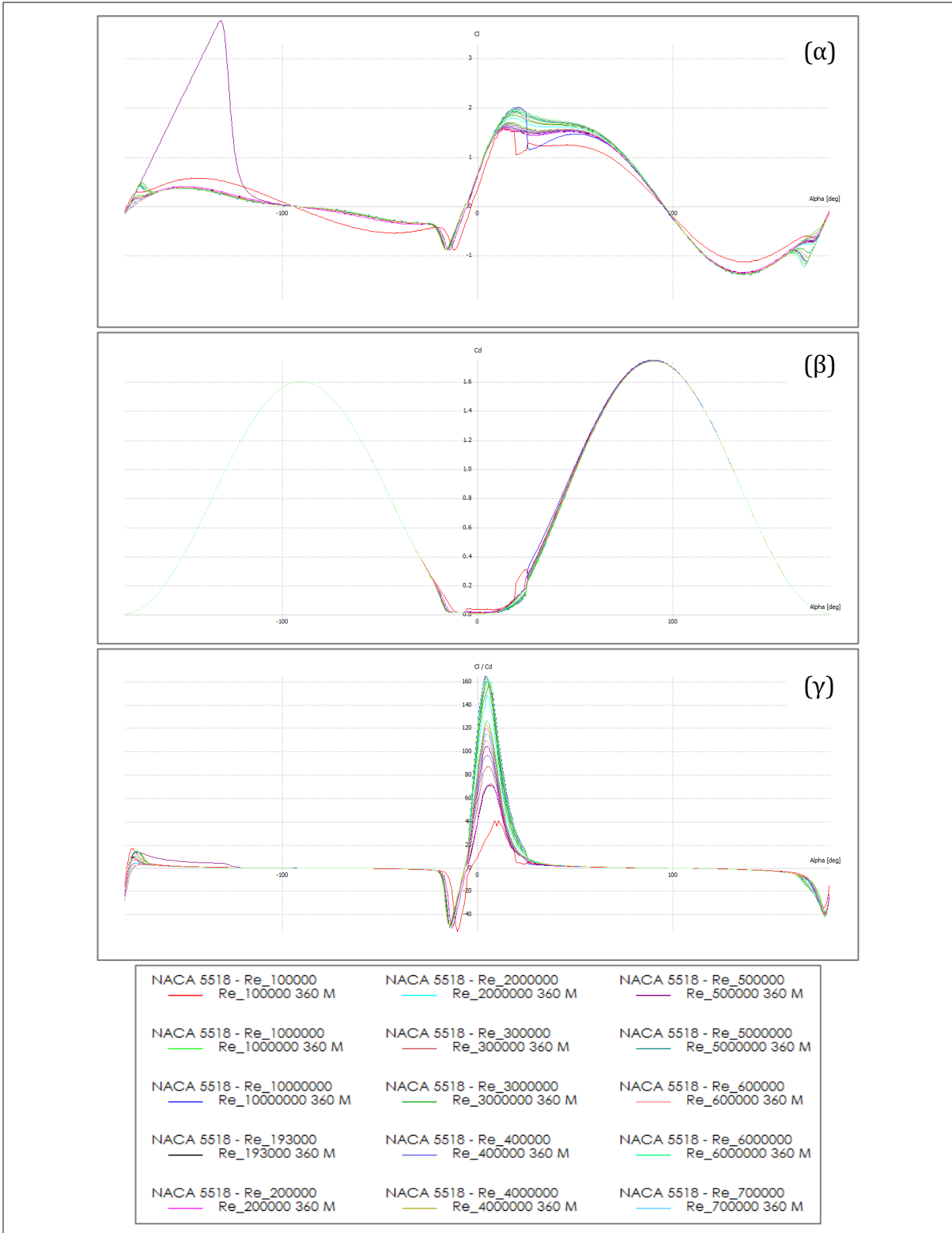
Πίνακας 6. Τιμές μέγιστου λόγου C_l/C_d και αντίστοιχες γωνίες πρόσπτωσης για διαφορετικούς αριθμούς Re .

Re	Μέγιστο C_l/C_d	Γωνία (AoA)	Re	Μέγιστο C_l/C_d	Γωνία (AoA)
10.000.000	164,079	4	900.000	123,464	4
9.000.000	163,628	5	800.000	119,764	4
8.000.000	163,408	5	700.000	114,667	5
7.000.000	161,609	5	600.000	109,319	4
6.000.000	161,020	5	500.000	104,151	5
5.000.000	159,264	5	400.000	96,364	5
4.000.000	158,763	6	300.000	86,971	6
3.000.000	156,820	6	200.000	71,994	7
2.000.000	148,077	5	193.000	70,634	7
1.000.000	125,835	5	100.000	40,586	9

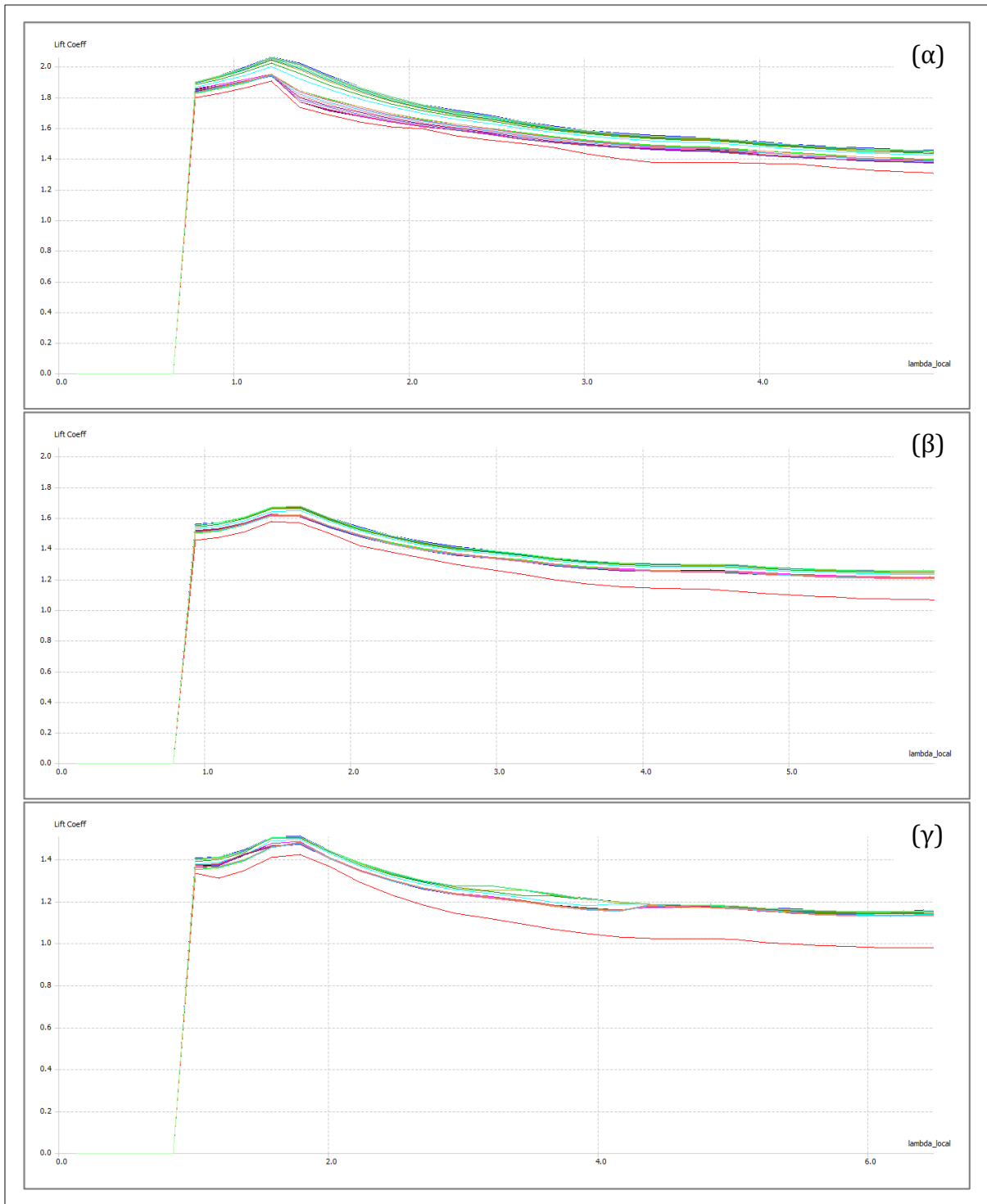
Στον Πίνακα 6, περιλαμβάνονται οι τιμές του μέγιστου λόγου C_l/C_d , που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις της Α' φάσης, ενώ σημειώνονται επιπλέον οι τιμές των γωνιών πρόσπτωσης στις οποίες σημειώθηκε ο μέγιστος λόγος C_l/C_d . Οι ανωτέρω τιμές, αποδίδουν τη γραφική απεικόνιση του Διαγράμματος 18.



Διάγραμμα 18. Μέγιστη τιμή λόγου C_l/C_d συναρτήσει του αριθμού Re .

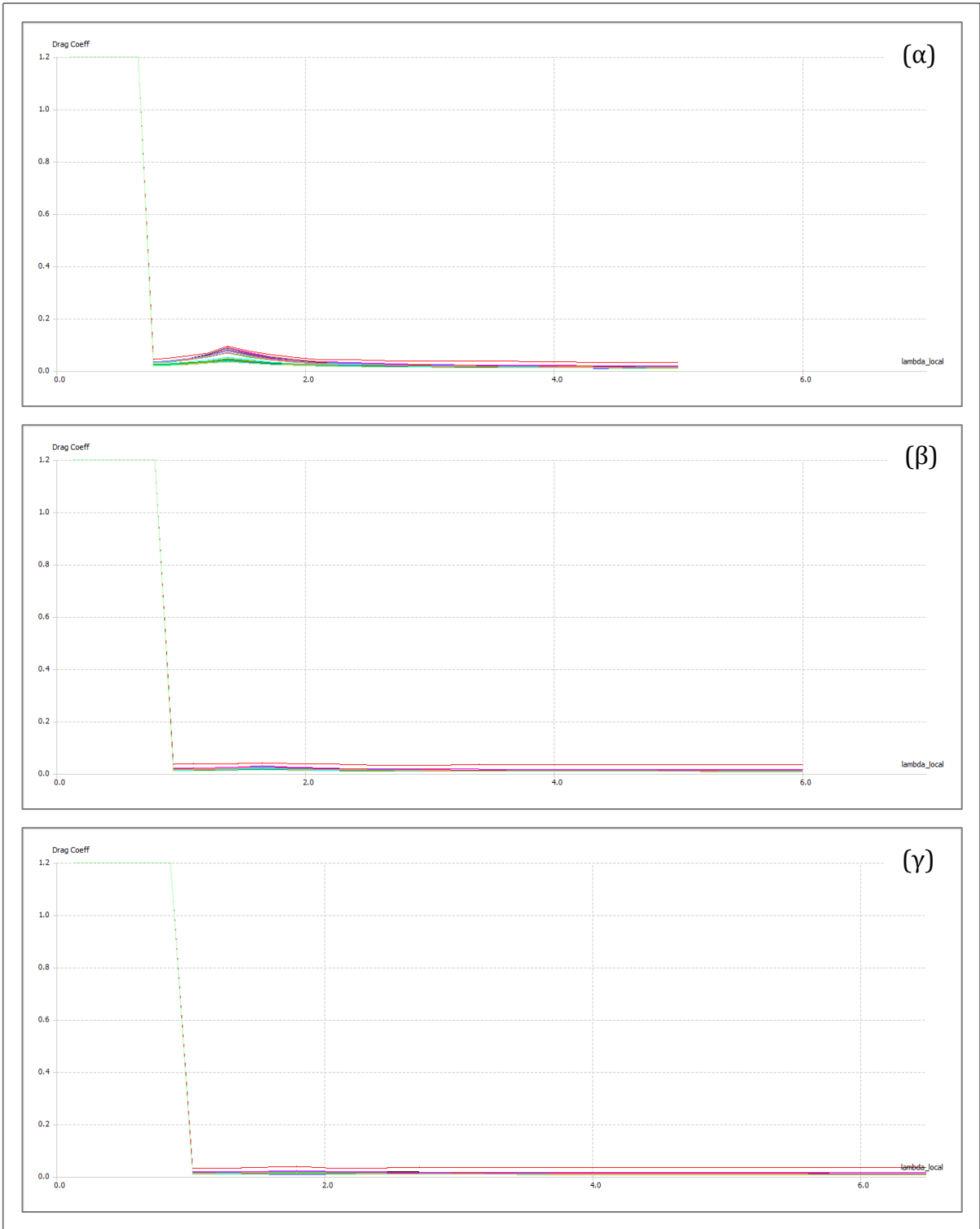


Διάγραμμα 19. Καμπύλες πολικών συντεταγμένων για εύρος γωνιών 0° έως 360° (AoA) για διαφορετικούς αριθμούς Re . (α) Συντελεστής άνωσης C_l . (β) Συντελεστής αντίστασης C_d . (γ) Λόγος C_l/C_d . (δ) Υπόμνημα.

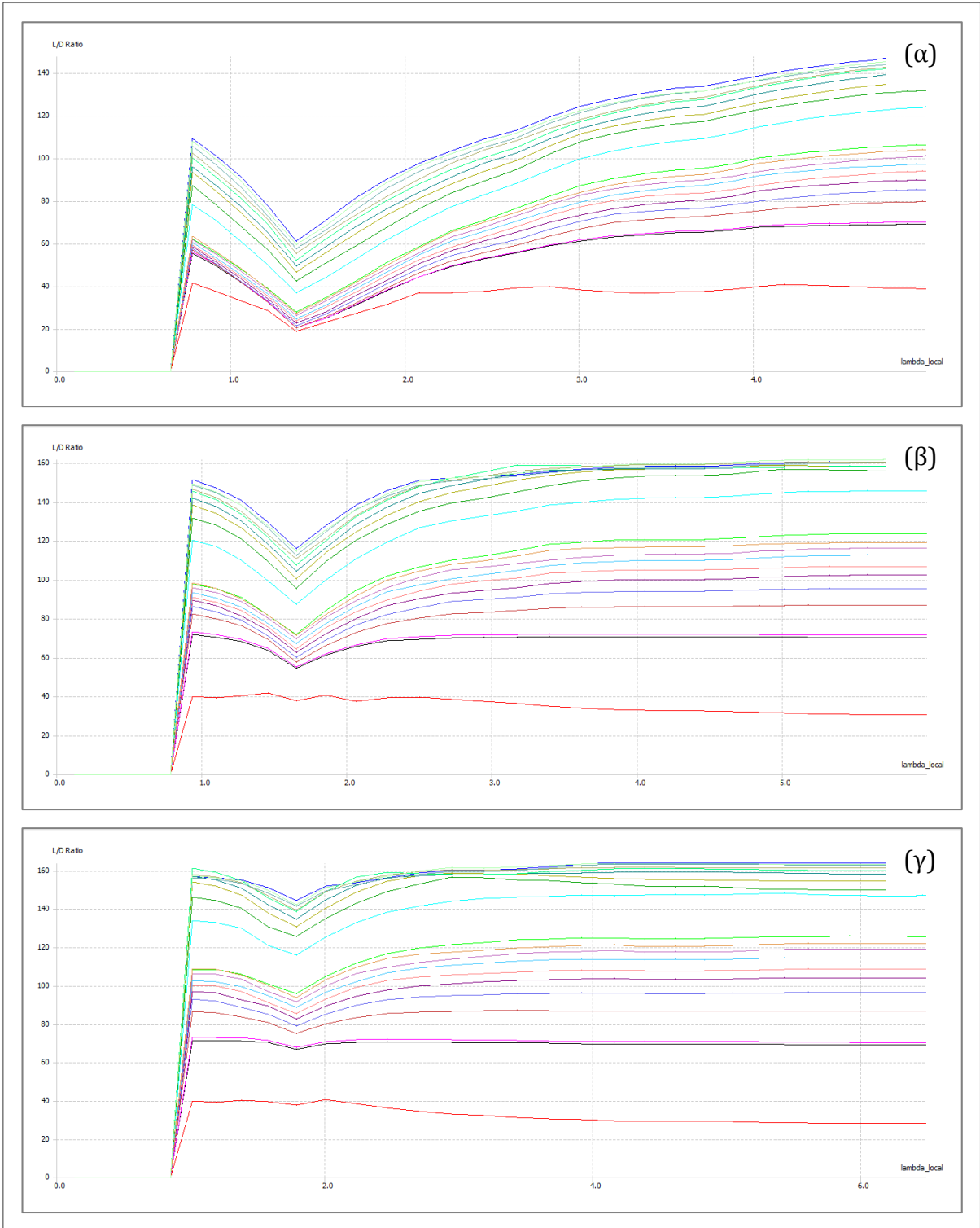


Διάγραμμα 20. Μεταβολή συντελεστή άνωσης C_l συναρτήσει του τοπικού λόγου προχώρησης λ_r για διαφορετικούς αριθμούς Re και επιλεγμένα λ . (α) $\lambda = 5$, (β) $\lambda = 6$, και (γ) $\lambda = 6,5$.

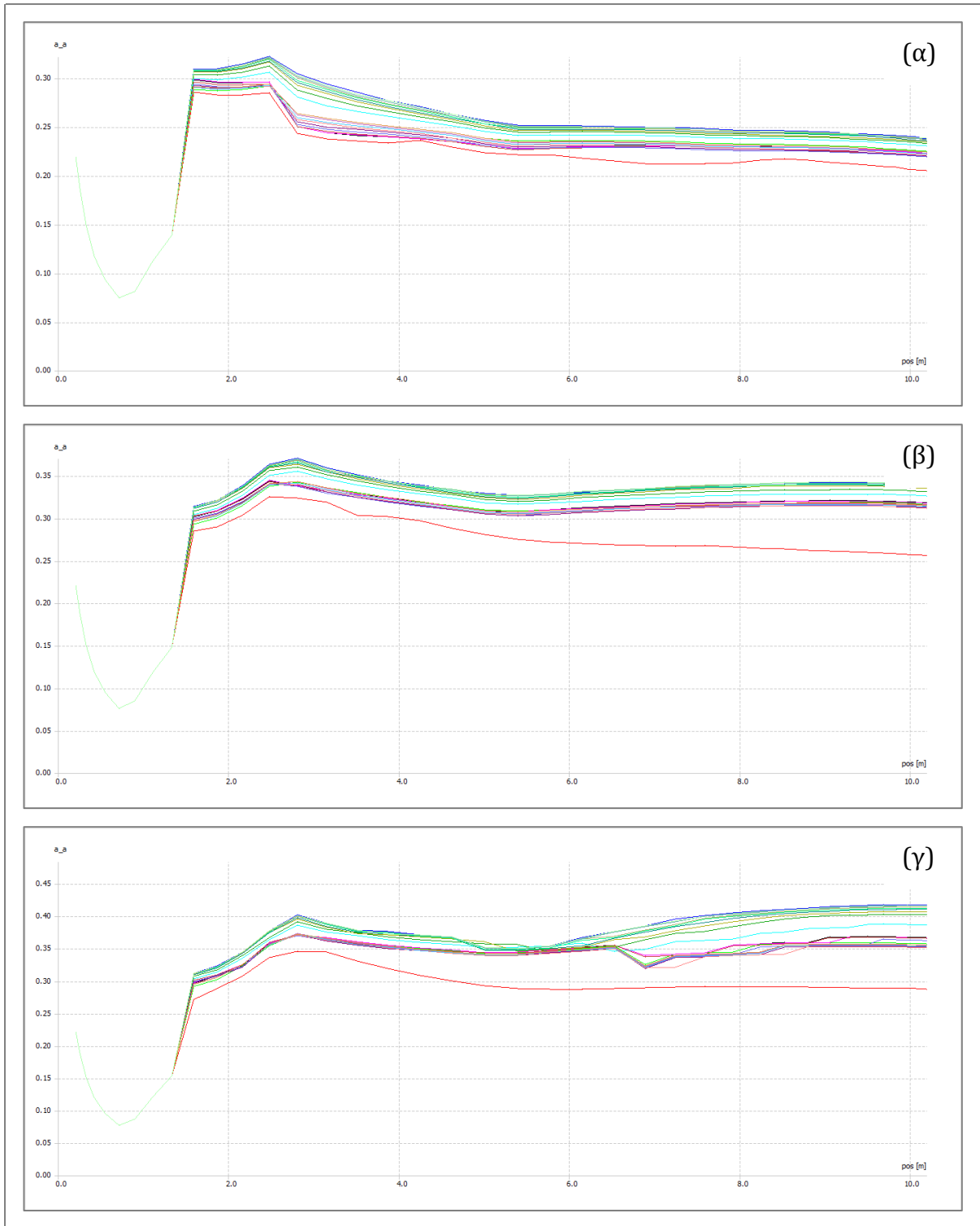
Στα Διαγράμματα 20α, 20β και 20γ, απεικονίζεται γραφικά η μεταβολή του συντελεστή άνωσης C_l συναρτήσει του τοπικού λόγου προχώρησης λ_r . Ομοίως, παρουσιάζονται οι αντίστοιχες απεικονίσεις για τον συντελεστή αντίστασης C_d (Διαγρ. 21α, 21β και 21γ) και το λόγο C_l/C_d (Διαγρ. 22α, 22β και 22γ).



Διάγραμμα 21. Μεταβολή συντελεστή άνωσης C_d συναρτήσει του τοπικού λόγου προχώρησης λ_r για διαφορετικούς αριθμούς Re και επιλεγμένα λ . (α) $\lambda = 5$, (β) $\lambda = 6$, και (γ) $\lambda = 6,5$.

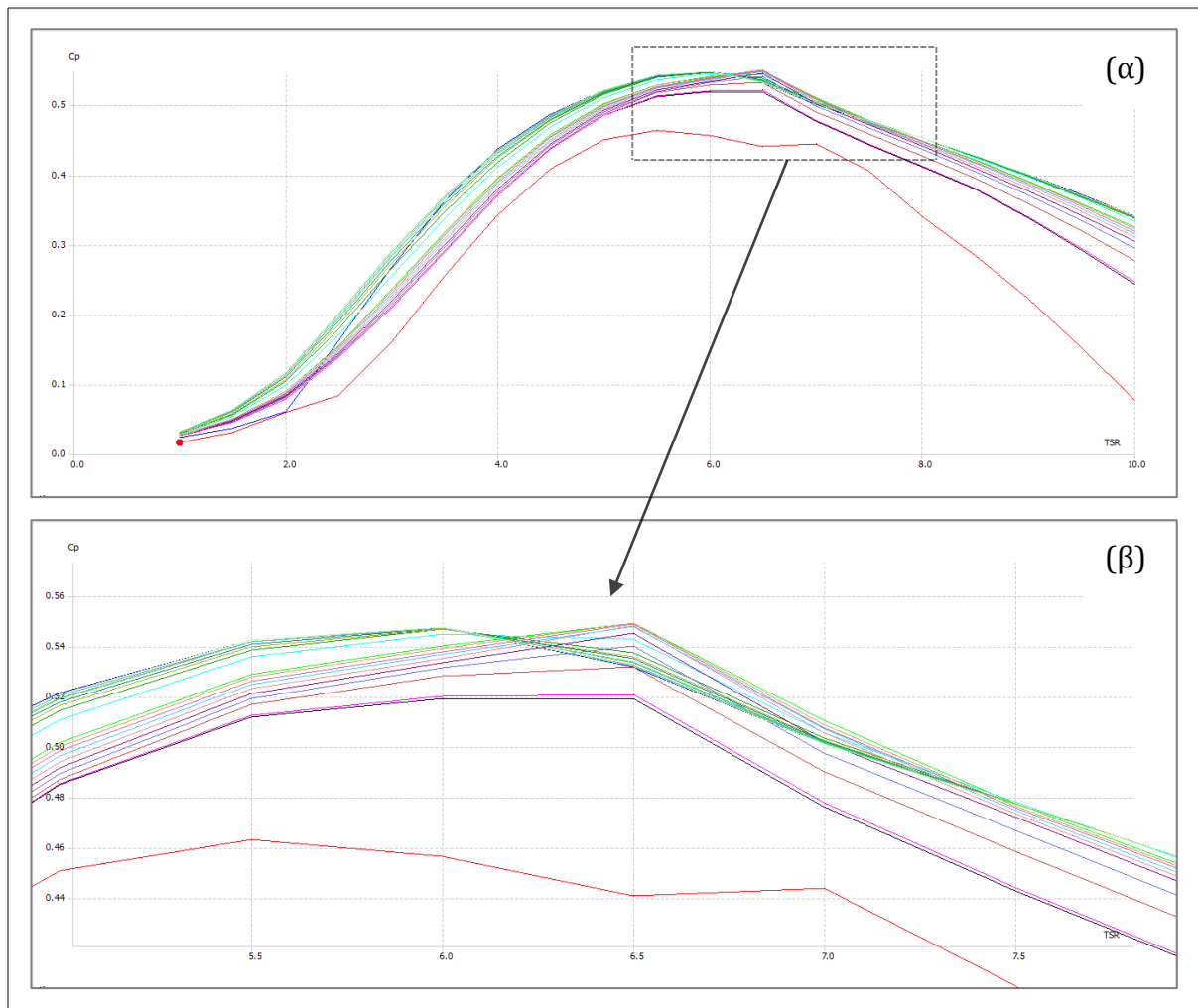


Διάγραμμα 22. Μεταβολή λόγου C_l/C_d συναρτήσει του τοπικού λόγου προχώρησης λ_r για διαφορετικούς αριθμούς Re και επιλεγμένα λ . (α) $\lambda = 5$, (β) $\lambda = 6$, και (γ) $\lambda = 6,5$.



Διάγραμμα 23. Μεταβολή συντελεστή αξονικής επαγωγής α συναρτήσει της ακτινικής θέσης για επιλεγμένα λ . (α) $\lambda = 5$, (β) $\lambda = 6$, και (γ) $\lambda = 6,5$.

Στα Διαγράμματα 23α, 23β και 23γ, απεικονίζεται γραφικά η μεταβολή του συντελεστή αξονικής επαγωγής α συναρτήσει της ακτινικής απόστασης από το κέντρο του ρότορα. Σε όλα τα έγχρωμα Διαγράμματα, η κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε διαφορετικό αριθμό Re .



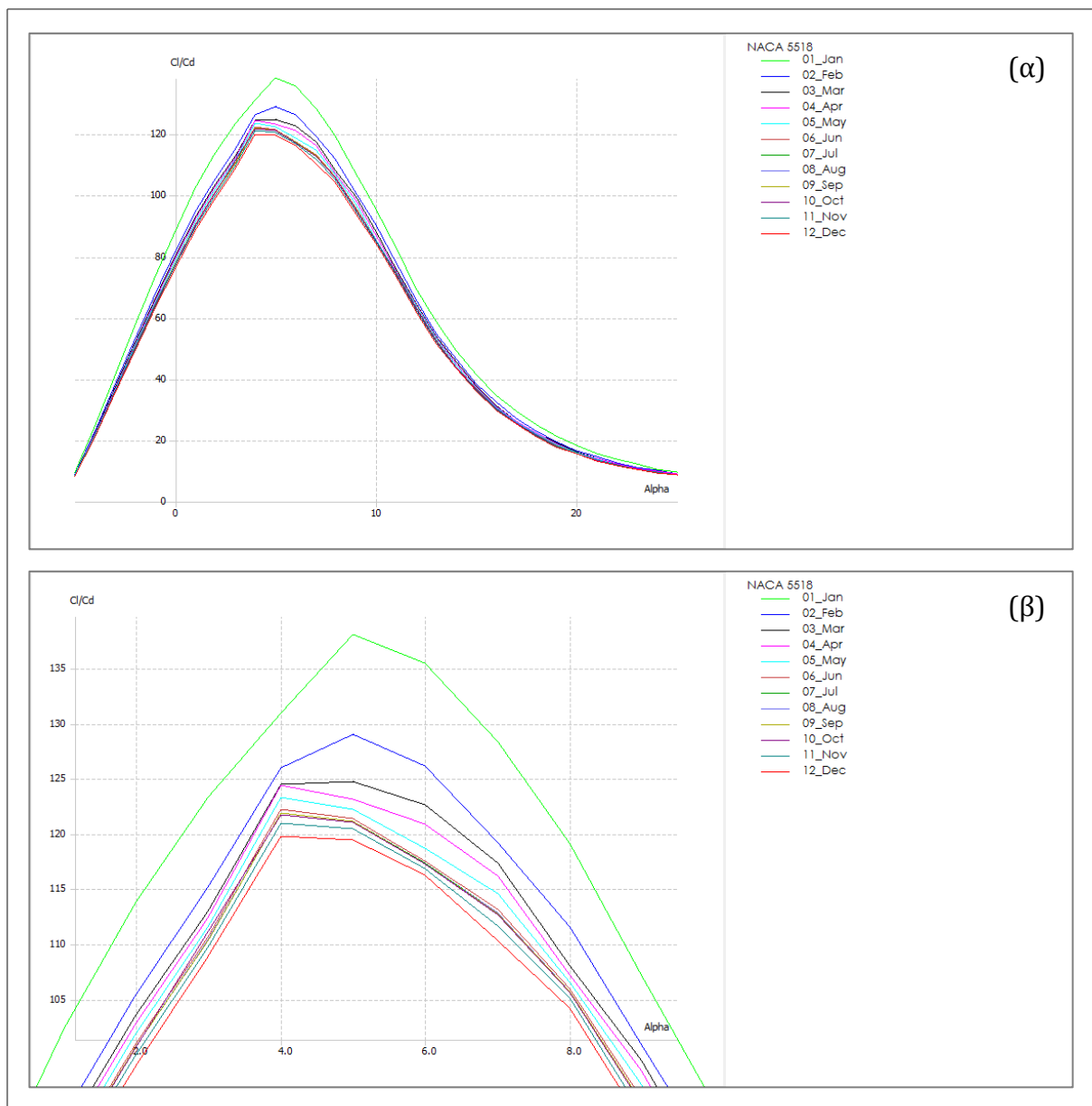
Διάγραμμα 24. Μεταβολή αδιάστατου συντελεστή ισχύος C_p συναρτήσει του λόγου προχώρησης λ . (α) Πλήρης ανάπτυξη, και (β) Μεγέθυνση επιλεγμένης περιοχής.

Στο Διάγραμμα 24α απεικονίζεται γραφικά ο αδιάστατος συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης C_p συναρτήσει του γενικού λόγου προχώρησης λ και διακρίνονται οι τιμές του λ κατά τις οποίες μεγιστοποιείται το ανωτέρω αεροδυναμικό μέγεθος. Ακολουθεί μεγέθυνση της κρίσιμης περιοχής (Διάγρ. 24β) για λόγους οπτικής άνεσης.

4.2.2 Προσομοιώσεις Β' φάσης

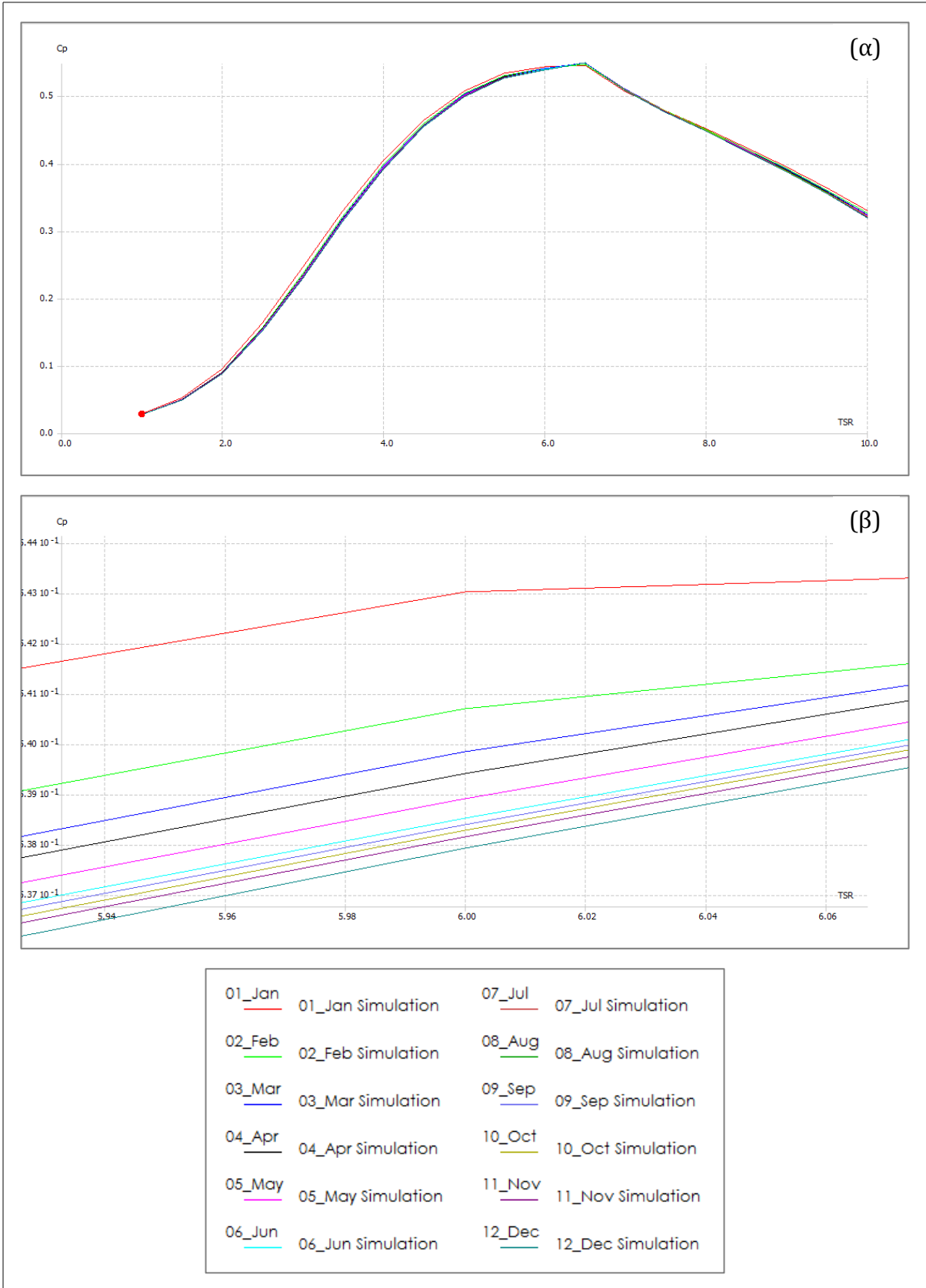
Στις ενότητες που ακολουθούν, παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση προσομοιώσεων με τα δεδομένα του Πίνακα 4. Για κάθε περιοχή μελέτης έχει μία σειρά αντιπροσωπευτικών Πινάκων και Διαγραμμάτων, τα οποία στη συνέχεια παρουσιάζονται ξεχωριστά, ενώ η σύγκριση πραγματοποιείται στην τελευταία ενότητα.

4.2.2.1 Λεμεσός



Διάγραμμα 25. Λεμεσός: Μηνιαία μεταβολή λόγου C_l/C_d για εύρος γωνιών -5° έως 25° (AoA). (α) Πλήρης ανάπτυξη. (β) Μεγέθυνση στην περιοχή της μέγιστης τιμής.

Στο Διάγραμμα 25α απεικονίζεται γραφικά η μηνιαία μεταβολή λόγου C_l/C_d συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης (AoA) και διακρίνονται οι γωνίες εκείνες κατά τις οποίες μεγιστοποιείται το ανωτέρω αεροδυναμικό μέγεθος. Ακολουθεί μεγέθυνση της κρίσιμης περιοχής (Διάγρ. 25β) για λόγους οπτικής άνεσης. Ακολούθως, στο Διάγραμμα 26α απεικονίζεται γραφικά ο αδιάστατος συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης C_p συναρτήσει του γενικού λόγου προχώρησης λ και επιλεγμένα σημεία της σχετικής καμπύλης περιλαμβάνονται στον Πίνακα 7.



Διάγραμμα 26. Λεμεσός: Μηνιαία μεταβολή C_p για $1 \leq \lambda \leq 10$. (α) Πλήρης ανάπτυξη. (β) Μεγέθυνση στην περιοχή της μέγιστης τιμής. (γ) Υπόμνημα.

Πίνακας 7. Λεμεσός: Μηνιαία διακύμανση αδιάστατου συντελεστή ισχύος C_p για επιλεγμένες τιμές λόγου προχώρησης λ .

λ	Αδιάστατος συντελεστής ισχύος C_p											
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΝ	ΙΟΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
1.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
2.00	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
3.00	0.25	0.24	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
4.00	0.40	0.40	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
5.00	0.51	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
6.00	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
7.00	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
8.00	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
9.00	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
10.00	0.33	0.33	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32

Πίνακας 8. Λεμεσός: Αεροδυναμική ισχύς P για μηδενική γωνία πρόνευσης.

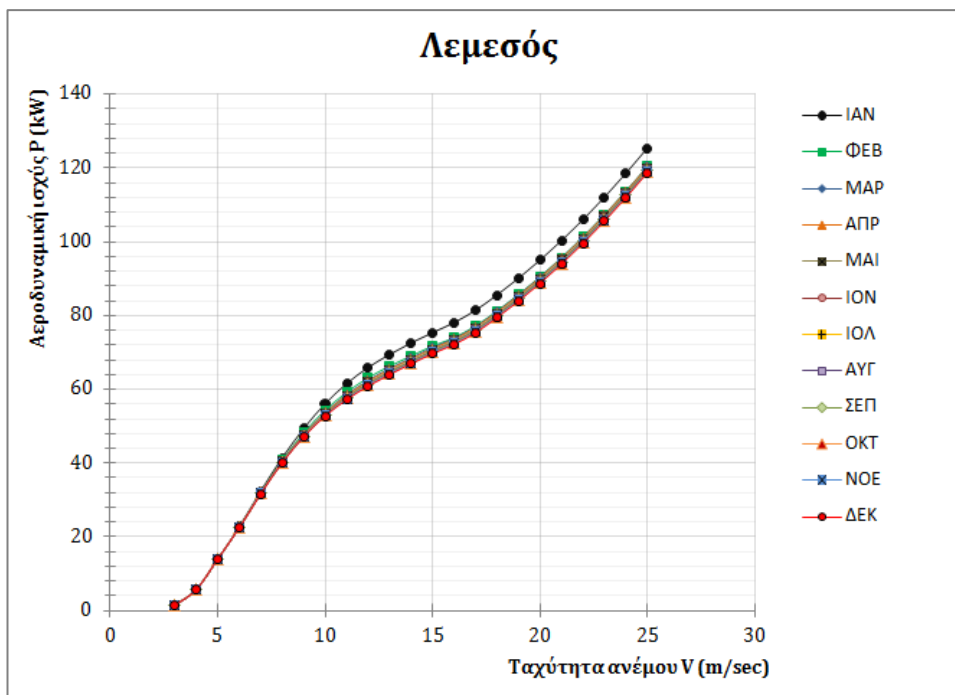
Ταχύτητα ανέμου V (m/sec)	Ισχύς P (kW)				Συνολικές απώλειες	
	Μέγιστη	Μήνας	Ελάχιστη	Μήνας	kW	%
5	14,021	Μάιος	14,015	Δεκέμβριος	0,006	0,04
10	56,103	Ιανουάριος	52,723	Δεκέμβριος	3,381	6,03
15	75,360	Ιανουάριος	69,675	Δεκέμβριος	5,686	7,54
20	94,986	Ιανουάριος	88,682	Δεκέμβριος	6,305	6,64
25	125,394	Ιανουάριος	118,704	Δεκέμβριος	6,690	5,34

Πίνακας 9. Λεμεσός: Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° .

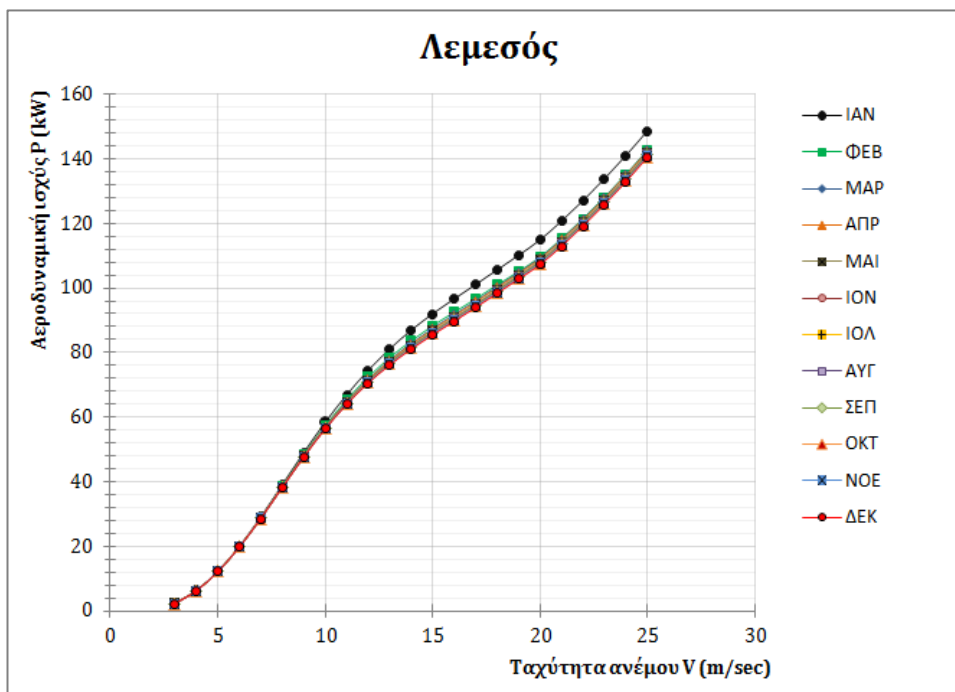
Ταχύτητα ανέμου V (m/sec)	Ισχύς P (kW)				Συνολικές απώλειες	
	Μέγιστη	Μήνας	Ελάχιστη	Μήνας	kW	%
5	12,319	Ιανουάριος	12,171	Δεκέμβριος	0,148	1,20
10	58,416	Ιανουάριος	56,337	Δεκέμβριος	2,078	3,56
15	92,008	Ιανουάριος	85,484	Δεκέμβριος	6,524	7,09
20	114,880	Ιανουάριος	107,214	Δεκέμβριος	7,666	6,67
25	148,623	Ιανουάριος	140,382	Δεκέμβριος	8,241	5,54

Στα Διαγράμματα 27 και 28 απεικονίζεται γραφικά η μεταβολή της αεροδυναμικής ισχύος P συναρτήσεως της ταχύτητας του ανέμου V , για γωνία πρόνευσης αρχικά ίση με

0° και τελικά ίση με 5°. Επιλεγμένα στοιχεία που αφορούν τις εν λόγω απεικονίσεις, περιλαμβάνονται στους Πίνακες 8 και 9.

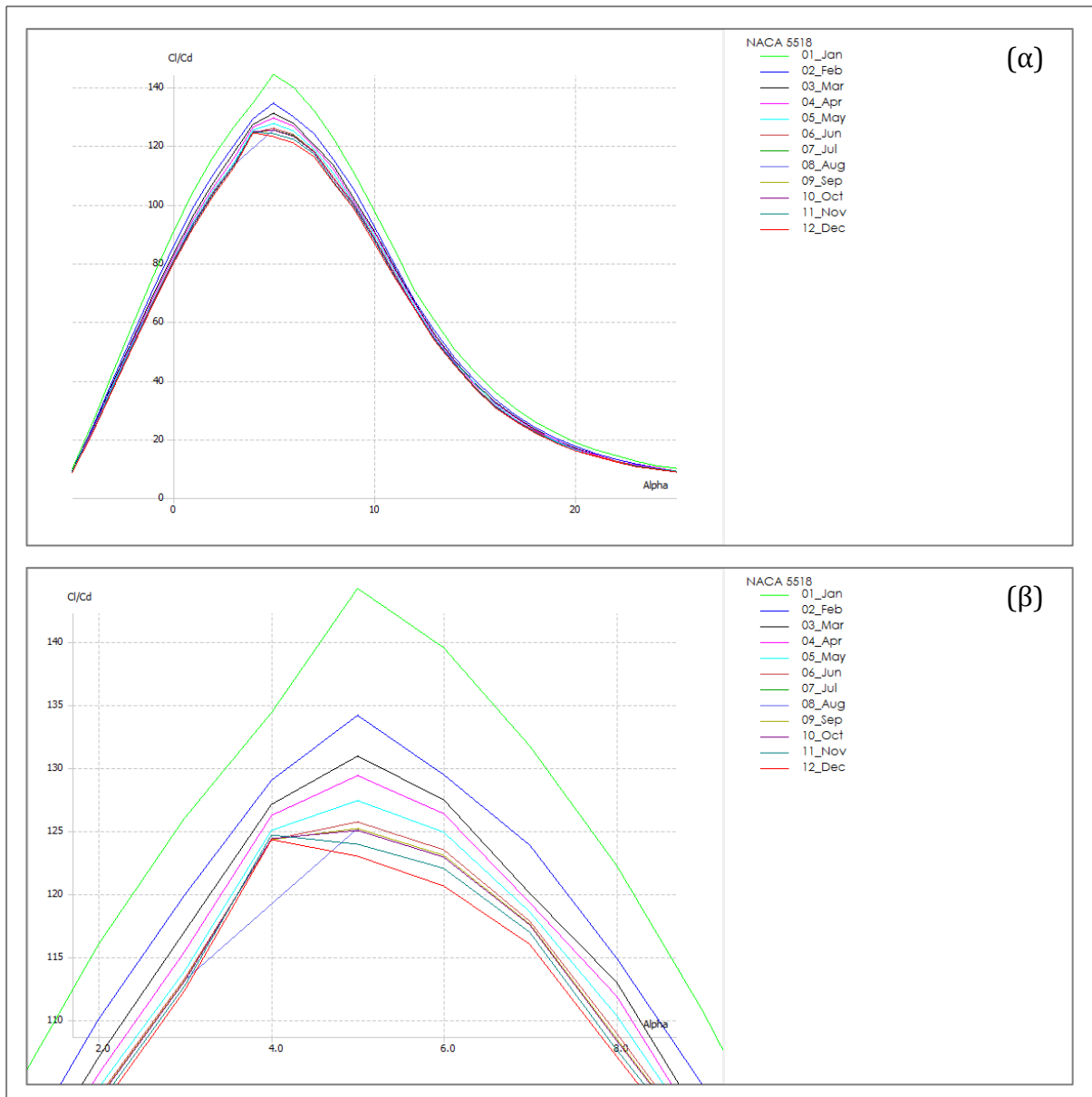


Διάγραμμα 27. Αεροδυναμική ισχύς P για μηδενική γωνία πρόνευσης.



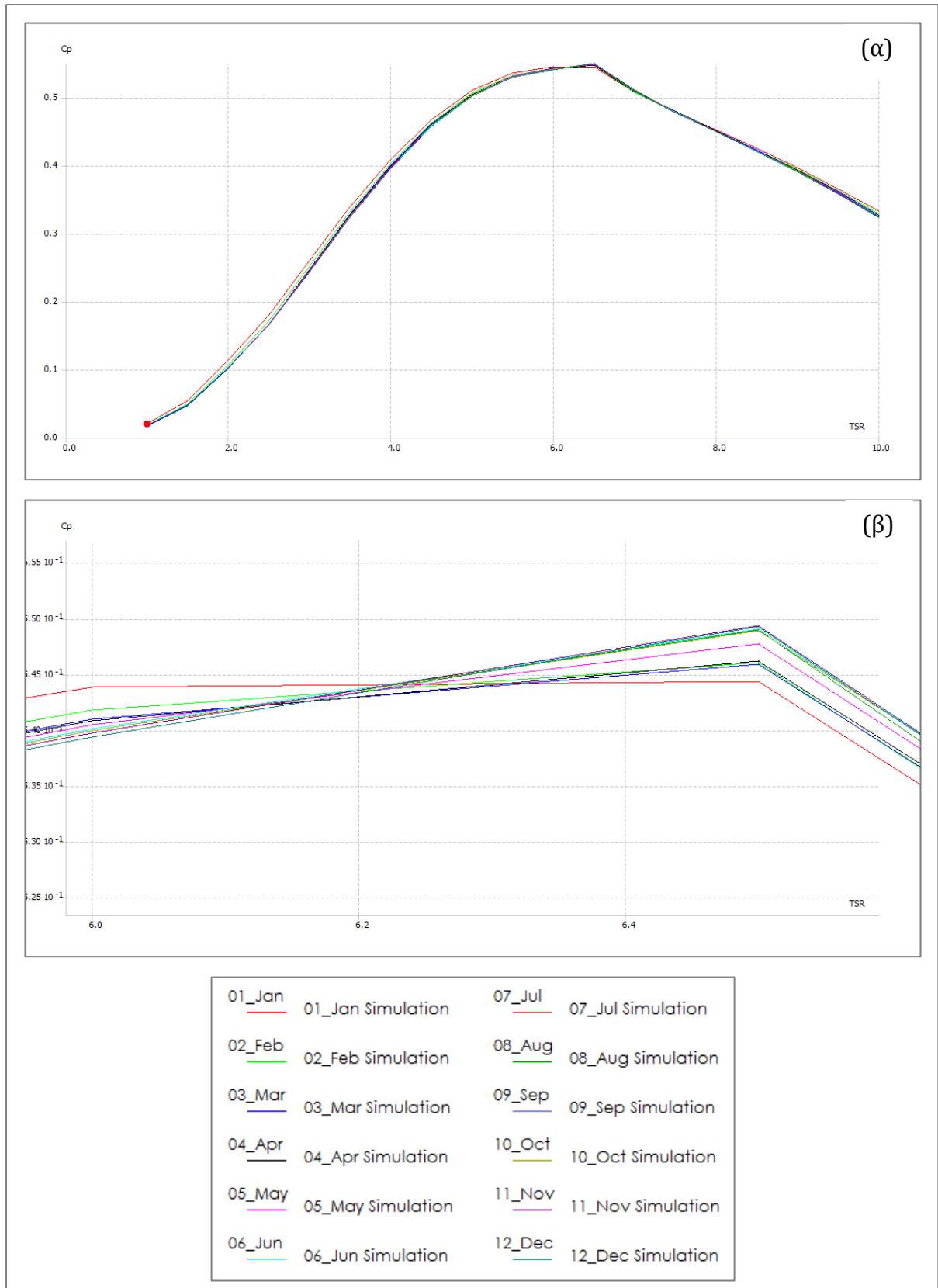
Διάγραμμα 28. Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5°.

4.2.2.2 Σητεία



Διάγραμμα 29. Σητεία: Μηνιαία μεταβολή λόγου C_l/C_d για εύρος γωνιών -5° έως 25° (AoA). (α) Πλήρης ανάπτυξη. (β) Μεγέθυνση στην περιοχή της μέγιστης τιμής.

Στο Διάγραμμα 29α απεικονίζεται γραφικά η μηνιαία μεταβολή λόγου C_l/C_d συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης (AoA) και διακρίνονται οι γωνίες εκείνες κατά τις οποίες μεγιστοποιείται το ανωτέρω αεροδυναμικό μέγεθος. Ακολουθεί μεγέθυνση της κρίσιμης περιοχής (Διάγρ. 29β) για λόγους οπτικής άνεσης. Ακολούθως, στο Διάγραμμα 30α απεικονίζεται γραφικά ο αδιάστατος συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης C_p συναρτήσει του γενικού λόγου προχώρησης λ και επιλεγμένα σημεία της σχετικής καμπύλης περιλαμβάνονται στον Πίνακα 10.



Διάγραμμα 30. Σητεία: Μηνιαία μεταβολή C_p για $1 \leq \lambda \leq 10$. (α) Πλήρης ανάπτυξη. (β) Μεγέθυνση στην περιοχή της μέγιστης τιμής. (γ) Υπόμνημα.

Πίνακας 10. Σητεία: Μηνιαία διακύμανση αδιάστατου συντελεστή ισχύος C_p για επιλεγμένες τιμές λόγου προχώρησης λ .

λ	Αδιάστατος συντελεστής ισχύος C_p											
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΝ	ΙΟΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
1.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
2.00	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
3.00	0.26	0.25	0.25	0.25	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
4.00	0.41	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
5.00	0.51	0.51	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
6.00	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
7.00	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
8.00	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
9.00	0.40	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
10.00	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32

Πίνακας 11. Σητεία: Αεροδυναμική ισχύς P για μηδενική γωνία πρόνευσης.

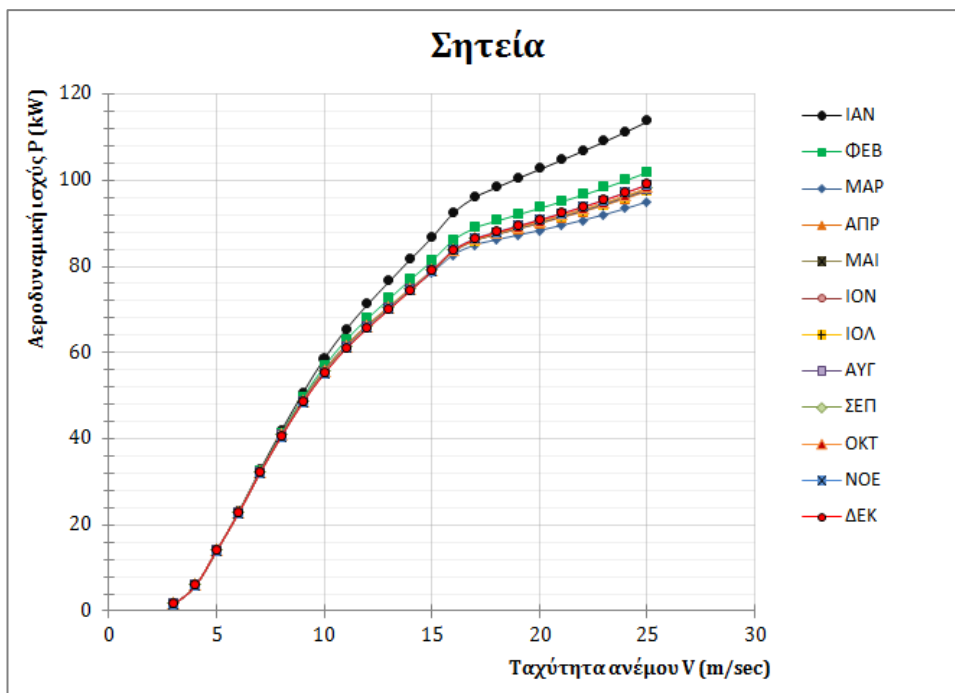
Ταχύτητα ανέμου V (m/sec)	Ισχύς P (kW)				Συνολικές απώλειες	
	Μέγιστη	Μήνας	Ελάχιστη	Μήνας	kW	%
5	14,009	Μάρτιος	13,986	Ιούνιος	0,022	0,16
10	58,550	Ιανουάριος	55,069	Δεκέμβριος	3,481	5,95
15	86,621	Ιανουάριος	78,482	Μάρτιος	8,139	9,40
20	102,464	Ιανουάριος	88,370	Μάρτιος	14,094	13,75
25	113,514	Ιανουάριος	94,972	Μάρτιος	18,542	16,33

Πίνακας 12. Σητεία: Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° .

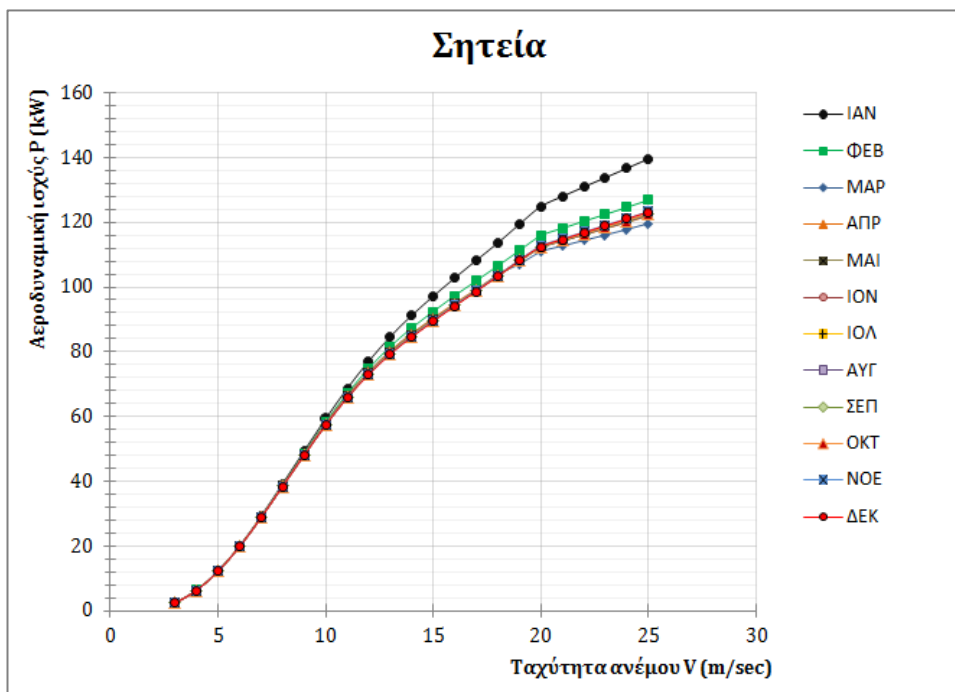
Ταχύτητα ανέμου V (m/sec)	Ισχύς P (kW)				Συνολικές απώλειες	
	Μέγιστη	Μήνας	Ελάχιστη	Μήνας	kW	%
5	12,343	Ιανουάριος	12,203	Δεκέμβριος	0,140	1,13
10	59,323	Ιανουάριος	57,293	Δεκέμβριος	2,029	3,42
15	97,174	Ιανουάριος	89,415	Δεκέμβριος	7,759	7,98
20	124,857	Ιανουάριος	110,905	Μάρτιος	13,952	11,17
25	139,604	Ιανουάριος	119,621	Μάρτιος	19,983	14,31

Στα Διαγράμματα 31 και 32 απεικονίζεται γραφικά η μεταβολή της αεροδυναμικής ισχύος P συναρτήσεως της ταχύτητας του ανέμου V , για γωνία πρόνευσης αρχικά ίση με

0° και τελικά ίση με 5°. Επιλεγμένα στοιχεία που αφορούν τις εν λόγω απεικονίσεις, περιλαμβάνονται στους Πίνακες 11 και 12.

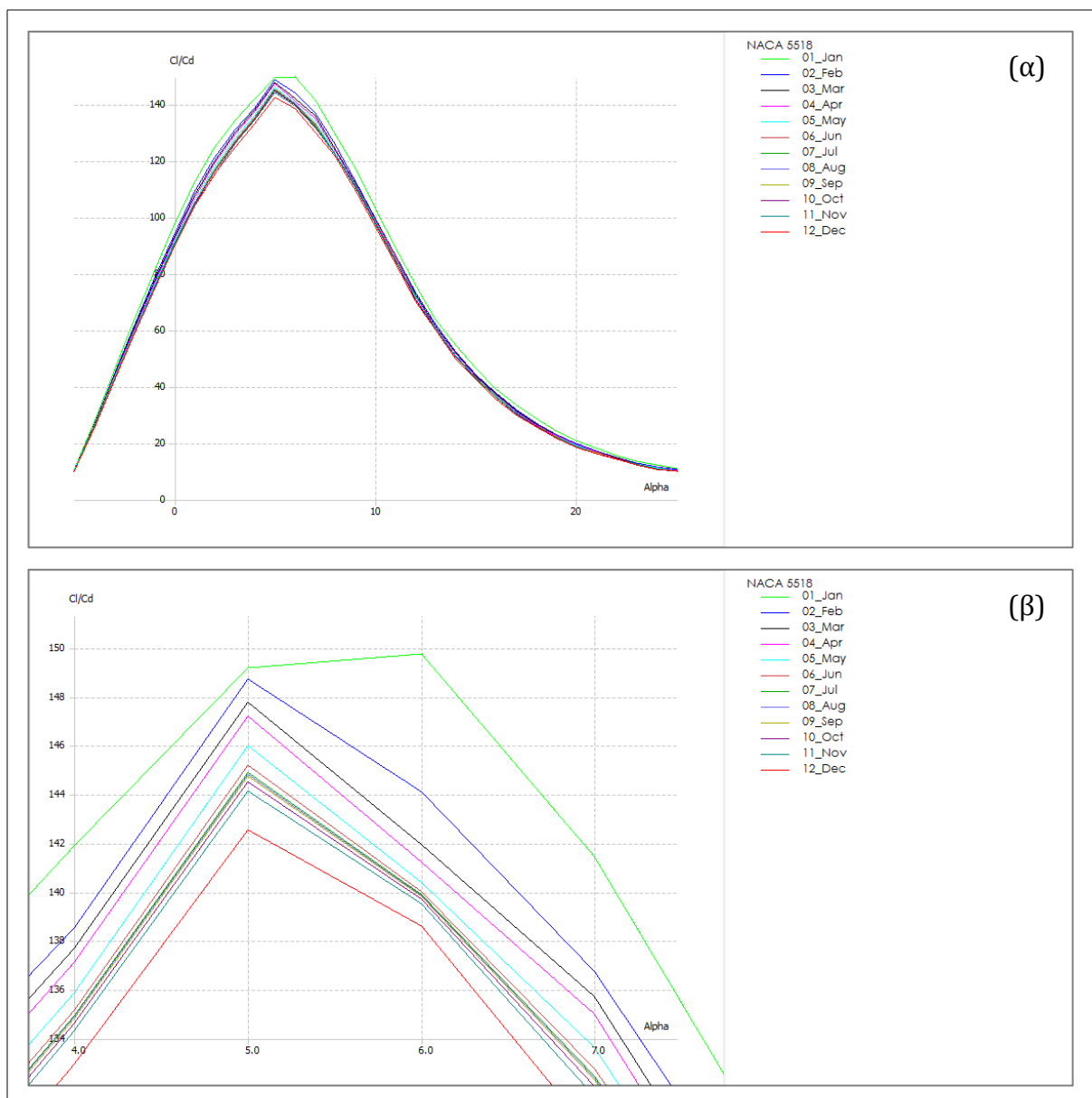


Διάγραμμα 31. Αεροδυναμική ισχύς P για μηδενική γωνία πρόνευσης.



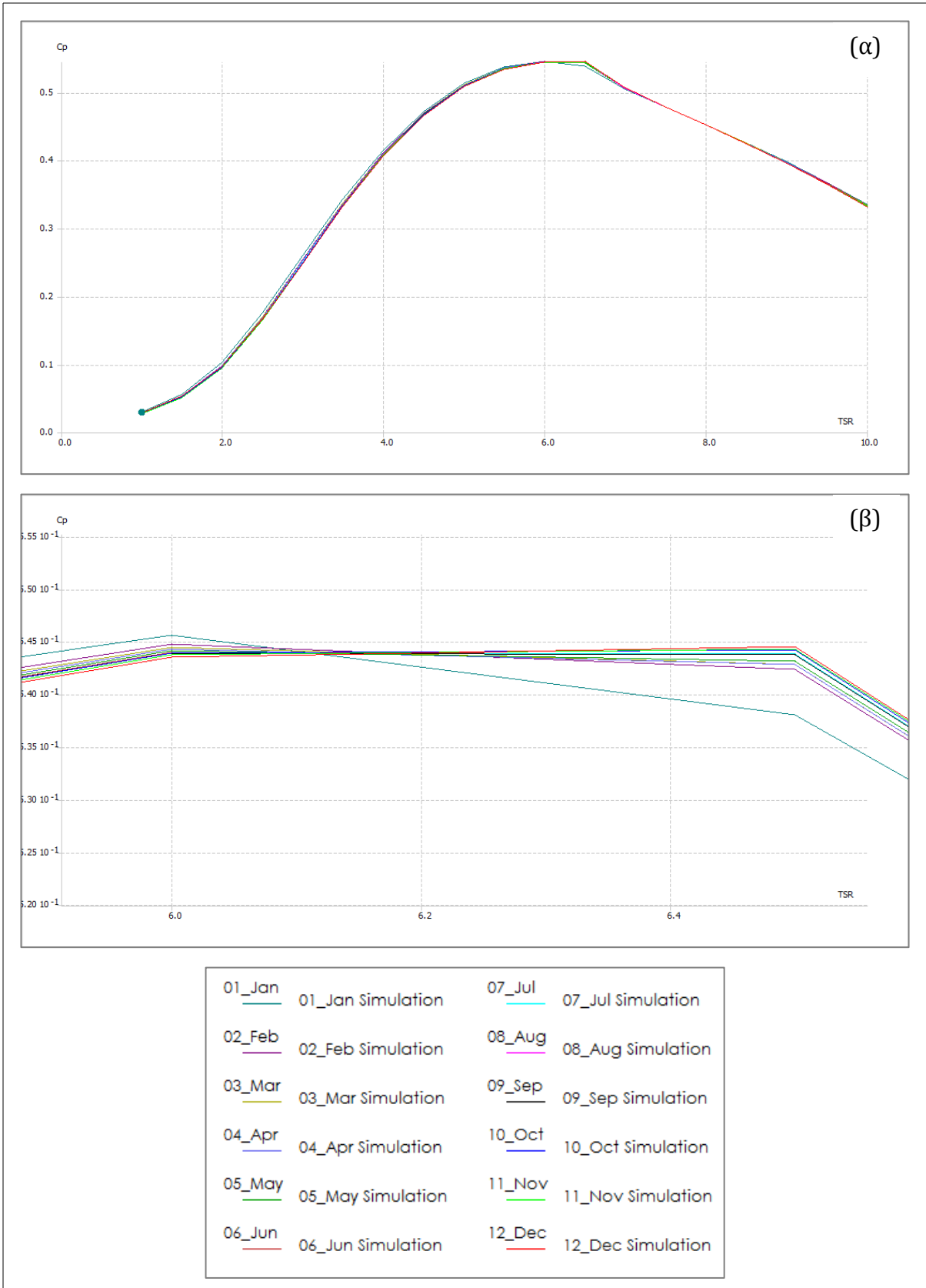
Διάγραμμα 32. Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5°.

4.2.2.3 Θήβα



Διάγραμμα 33. Θήβα: Μηνιαία μεταβολή λόγου C_l/C_d για εύρος γωνιών -5° έως 25° (AoA). (α) Πλήρης ανάπτυξη. (β) Μεγέθυνση στην περιοχή της μέγιστης τιμής.

Στο Διάγραμμα 33α απεικονίζεται γραφικά η μηνιαία μεταβολή λόγου C_l/C_d συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης (AoA) και διακρίνονται οι γωνίες εκείνες κατά τις οποίες μεγιστοποιείται το ανωτέρω αεροδυναμικό μέγεθος. Ακολουθεί μεγέθυνση της κρίσιμης περιοχής (Διάγρ. 33β) για λόγους οπτικής άνεσης. Ακολούθως, στο Διάγραμμα 34α απεικονίζεται γραφικά ο αδιάστατος συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης C_p συναρτήσει του γενικού λόγου προχώρησης λ και επιλεγμένα σημεία της σχετικής καμπύλης περιλαμβάνονται στον Πίνακα 13.



Διάγραμμα 34. Θήβα: Μηνιαία μεταβολή C_p για $1 \leq \lambda \leq 10$. (α) Πλήρης ανάπτυξη. (β) Μεγέθυνση στην περιοχή της μέγιστης τιμής. (γ) Υπόμνημα.

Πίνακας 13. Θήβα: Μηνιαία διακύμανση αδιάστατου συντελεστή ισχύος C_p για επιλεγμένες τιμές λόγου προχώρησης λ .

λ	Αδιάστατος συντελεστής ισχύος C_p											
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΝ	ΙΟΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
1.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
2.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10
3.00	0.26	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
4.00	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
5.00	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
6.00	0.55	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
7.00	0.50	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
8.00	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
9.00	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
10.00	0.34	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33

Πίνακας 14. Θήβα: Αεροδυναμική ισχύς P για μηδενική γωνία πρόνευσης.

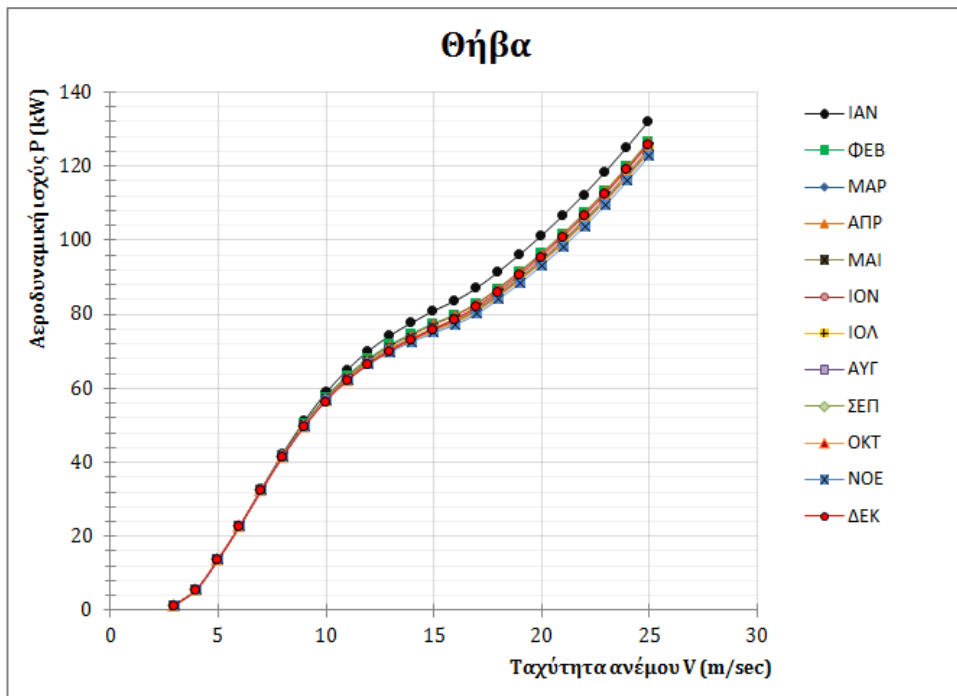
Ταχύτητα ανέμου V (m/sec)	Ισχύς P (kW)				Συνολικές απώλειες	
	Μέγιστη	Μήνας	Ελάχιστη	Μήνας	kW	%
5	13,881	Ιανουάριος	13,737	Δεκέμβριος	0,008	0,06
10	58,838	Ιανουάριος	56,653	Δεκέμβριος	2,185	3,71
15	80,977	Ιανουάριος	75,041	Νοέμβριος	5,936	7,33
20	101,239	Ιανουάριος	93,078	Νοέμβριος	8,161	8,06
25	132,398	Ιανουάριος	122,815	Νοέμβριος	9,583	7,24

Πίνακας 15. Θήβα: Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° .

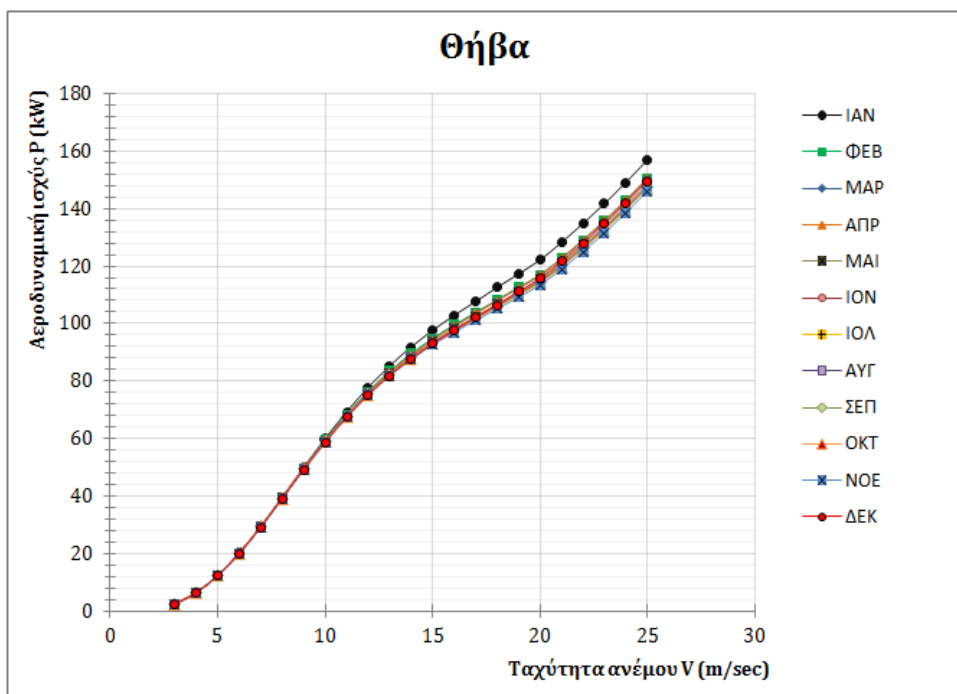
Ταχύτητα ανέμου V (m/sec)	Ισχύς P (kW)				Συνολικές απώλειες	
	Μέγιστη	Μήνας	Ελάχιστη	Μήνας	kW	%
5	12,435	Ιανουάριος	12,332	Δεκέμβριος	0,104	0,83
10	60,011	Ιανουάριος	58,719	Δεκέμβριος	1,293	2,15
15	97,667	Ιανουάριος	92,575	Νοέμβριος	5,092	5,21
20	122,113	Ιανουάριος	113,357	Νοέμβριος	8,756	7,17
25	156,958	Ιανουάριος	145,968	Νοέμβριος	10,990	7,00

Στα Διαγράμματα 35 και 36 απεικονίζεται γραφικά η μεταβολή της αεροδυναμικής ισχύος P συναρτήσεως της ταχύτητας του ανέμου V , για γωνία πρόνευσης αρχικά ίση με

0° και τελικά ίση με 5°. Επιλεγμένα στοιχεία που αφορούν τις εν λόγω απεικονίσεις, περιλαμβάνονται στους Πίνακες 14 και 15.

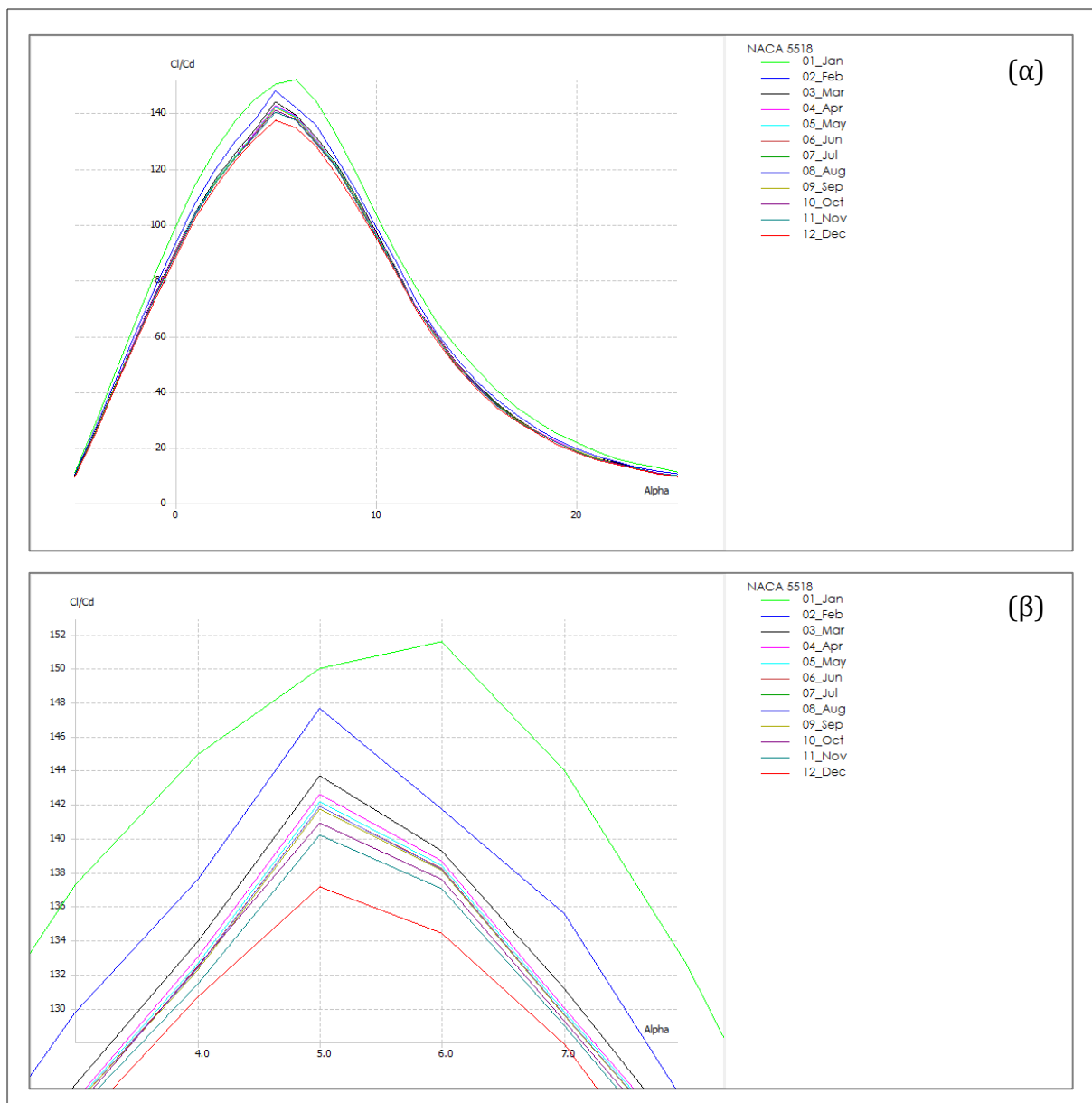


Διάγραμμα 35. Αεροδυναμική ισχύς P για μηδενική γωνία πρόνευσης.



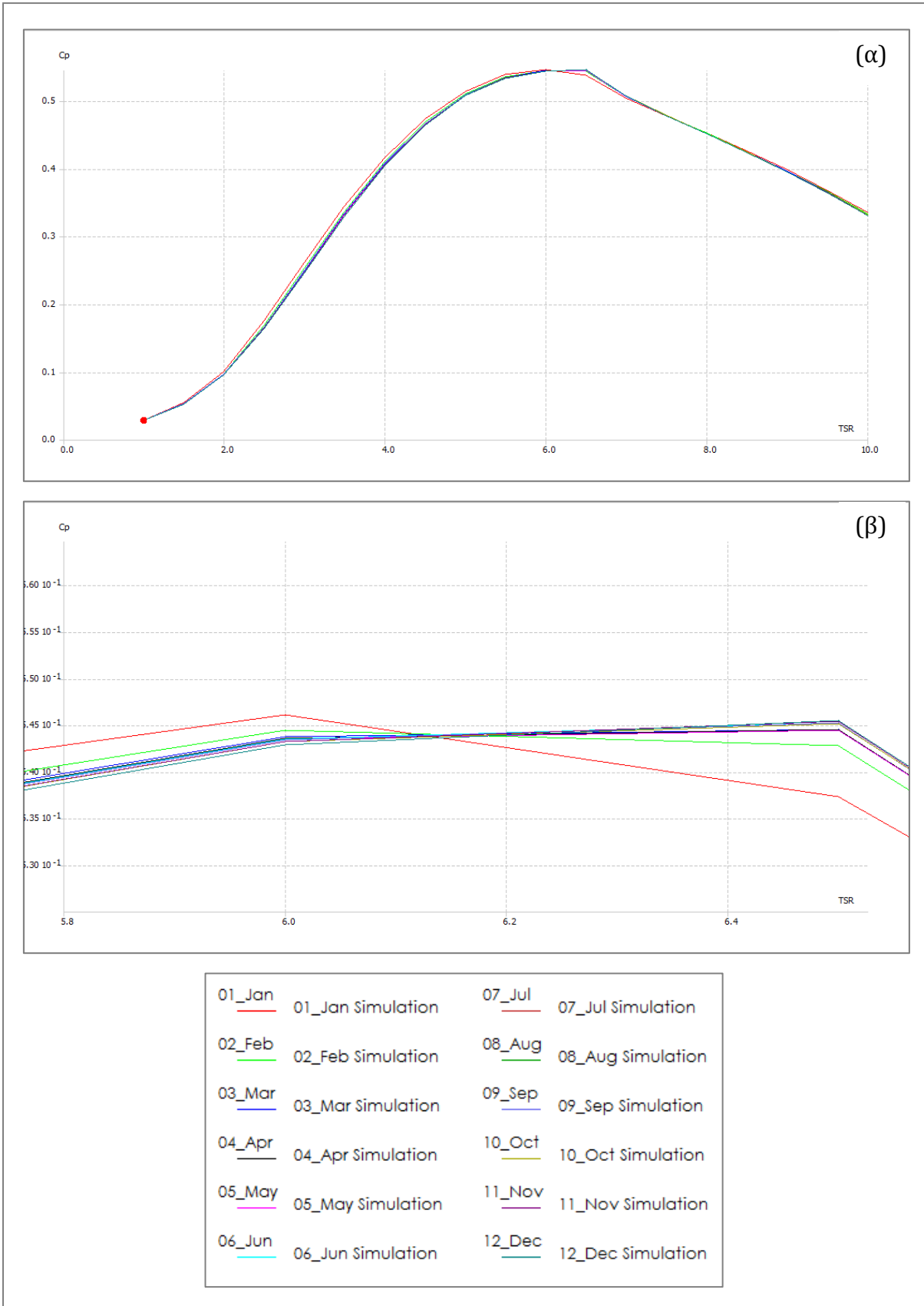
Διάγραμμα 36. Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5°.

4.2.2.4 Αλεξανδρούπολη



Διάγραμμα 37. Αλ/πολη: Μηνιαία μεταβολή λόγου C_l/C_d για εύρος γωνιών -5° έως 25° (AoA). (α) Πλήρης ανάπτυξη. (β) Μεγέθυνση στην περιοχή της μέγιστης τιμής.

Στο Διάγραμμα 37α απεικονίζεται γραφικά η μηνιαία μεταβολή λόγου C_l/C_d συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης (AoA) και διακρίνονται οι γωνίες εκείνες κατά τις οποίες μεγιστοποιείται το ανωτέρω αεροδυναμικό μέγεθος. Ακολουθεί μεγέθυνση της κρίσιμης περιοχής (Διάγρ. 37β) για λόγους οπτικής άνεσης. Ακολούθως, στο Διάγραμμα 38α απεικονίζεται γραφικά ο αδιάστατος συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης C_p συναρτήσει του γενικού λόγου προχώρησης λ και επιλεγμένα σημεία της σχετικής καμπύλης περιλαμβάνονται στον Πίνακα 16.



Διάγραμμα 38. Αλεξανδρούπολη: Μηνιαία μεταβολή C_p για $1 \leq \lambda \leq 10$. (α) Πλήρης ανάπτυξη. (β) Μεγέθυνση στην περιοχή της μέγιστης τιμής. (γ) Υπόμνημα.

Πίνακας 16. Αλεξανδρούπολη: Μηνιαία διακύμανση αδιάστατου συντελεστή ισχύος C_p για επιλεγμένες τιμές λόγου προχώρησης λ .

λ	Αδιάστατος συντελεστής ισχύος C_p											
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΝ	ΙΟΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
1.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
2.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09
3.00	0.26	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
4.00	0.42	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.40	0.40	0.40
5.00	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
6.00	0.55	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
7.00	0.50	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
8.00	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
9.00	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.39
10.00	0.34	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33

Πίνακας 17. Αλεξανδρούπολη: Αεροδυναμική ισχύς P για μηδενική γωνία πρόνευσης.

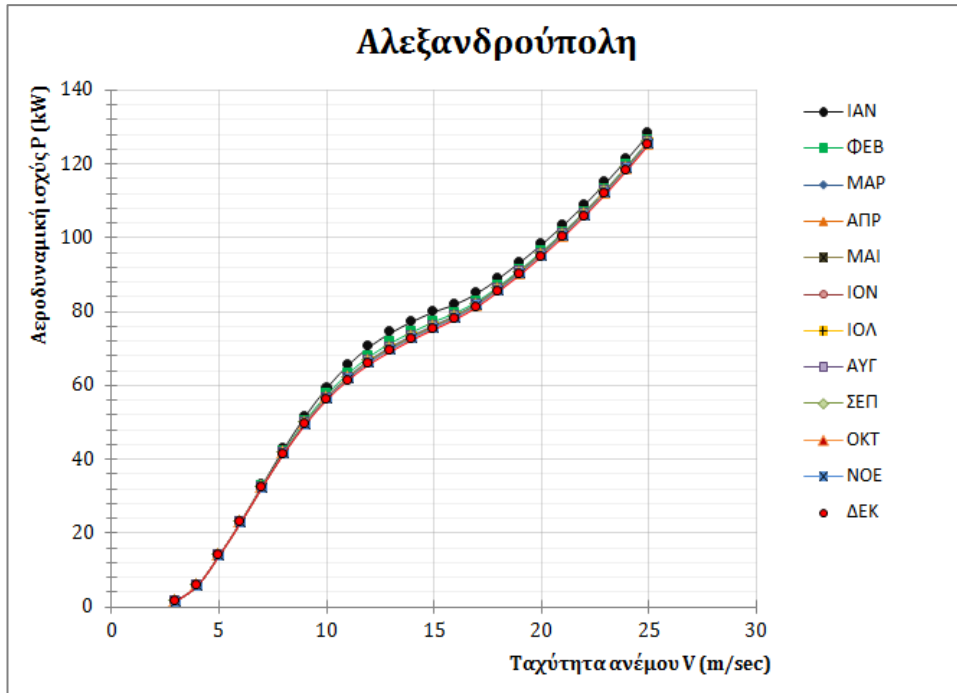
Ταχύτητα ανέμου V (m/sec)	Ισχύς P (kW)				Συνολικές απώλειες	
	Μέγιστη	Μήνας	Ελάχιστη	Μήνας	kW	%
5	13,921	Ιανουάριος	13,831	Δεκέμβριος	0,090	0,65
10	59,243	Ιανουάριος	55,971	Δεκέμβριος	3,272	5,52
15	79,944	Ιανουάριος	75,167	Δεκέμβριος	4,777	5,97
20	98,080	Ιανουάριος	94,801	Δεκέμβριος	3,280	3,34
25	128,197	Ιανουάριος	125,205	Δεκέμβριος	2,992	2,33

Πίνακας 18. Αλεξανδρούπολη: Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° .

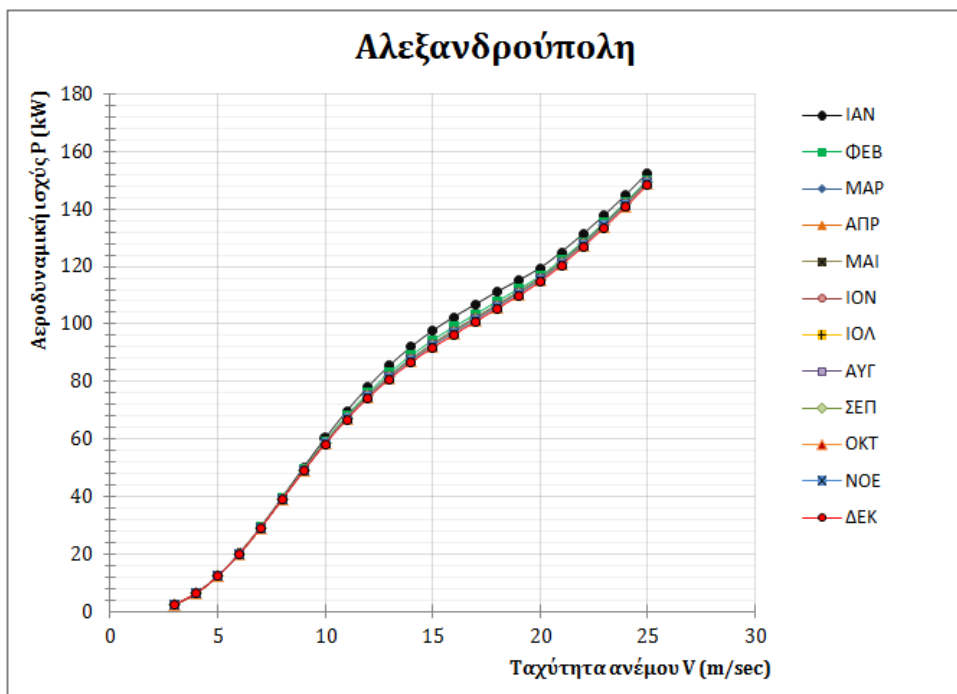
Ταχύτητα ανέμου V (m/sec)	Ισχύς P (kW)				Συνολικές απώλειες	
	Μέγιστη	Μήνας	Ελάχιστη	Μήνας	kW	%
5	12,457	Ιανουάριος	12,315	Δεκέμβριος	0,143	1,15
10	60,298	Ιανουάριος	58,338	Δεκέμβριος	1,960	3,25
15	97,720	Ιανουάριος	91,764	Δεκέμβριος	5,957	6,10
20	119,469	Ιανουάριος	114,640	Δεκέμβριος	4,829	4,04
25	152,560	Ιανουάριος	148,383	Δεκέμβριος	4,177	2,74

Στα Διαγράμματα 39 και 40 απεικονίζεται γραφικά η μεταβολή της αεροδυναμικής ισχύος P συναρτήσεως της ταχύτητας του ανέμου V , για γωνία πρόνευσης αρχικά ίση με

0° και τελικά ίση με 5°. Επιλεγμένα στοιχεία που αφορούν τις εν λόγω απεικονίσεις, περιλαμβάνονται στους Πίνακες 17 και 18.

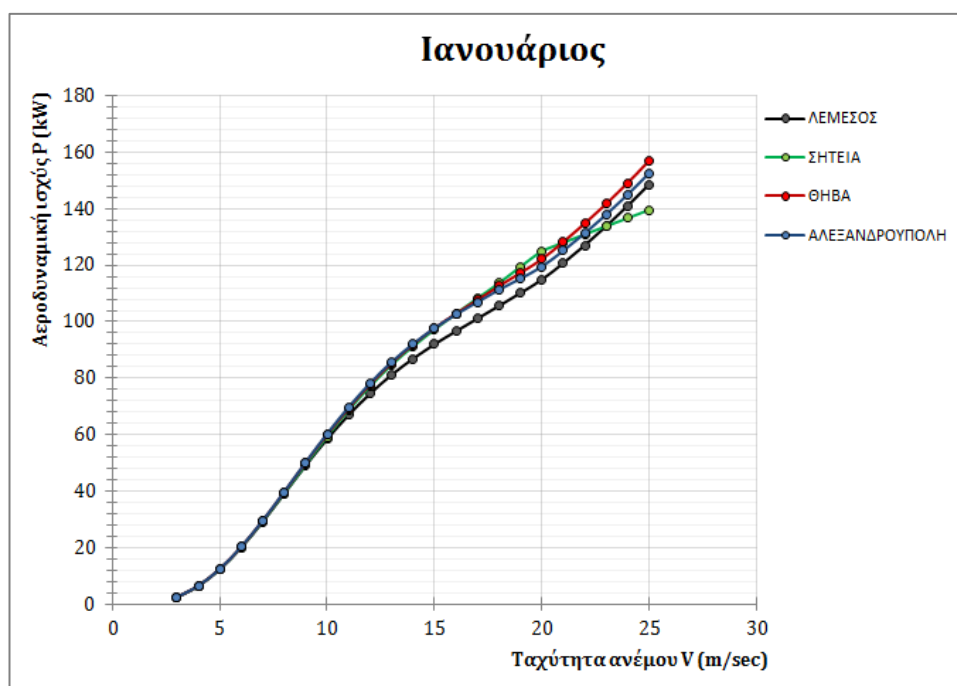


Διάγραμμα 39. Αεροδυναμική ισχύς P για μηδενική γωνία πρόνευσης.

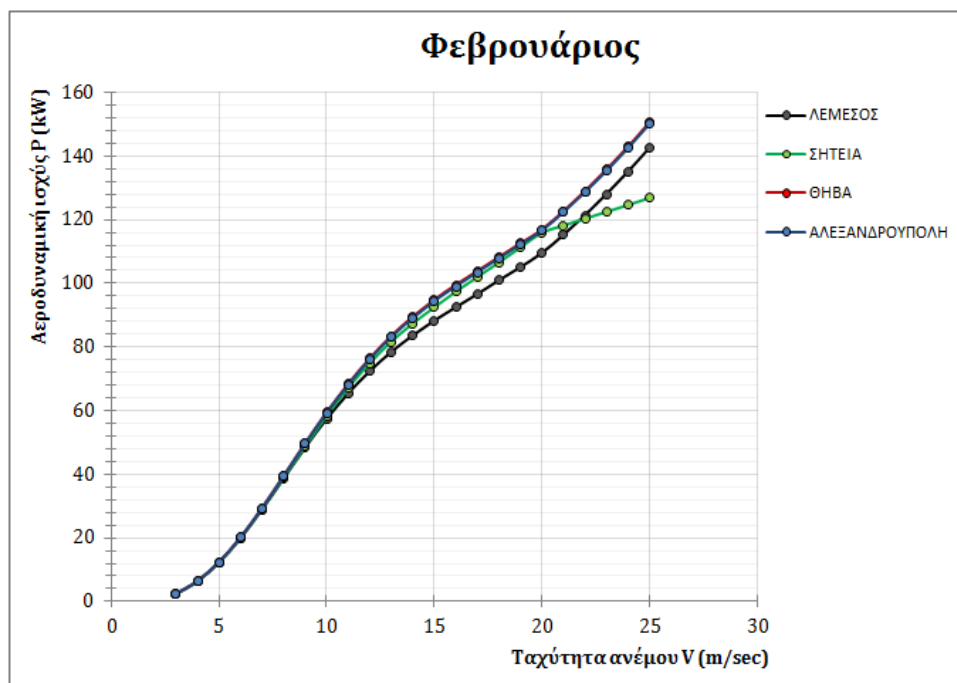


Διάγραμμα 40. Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5°.

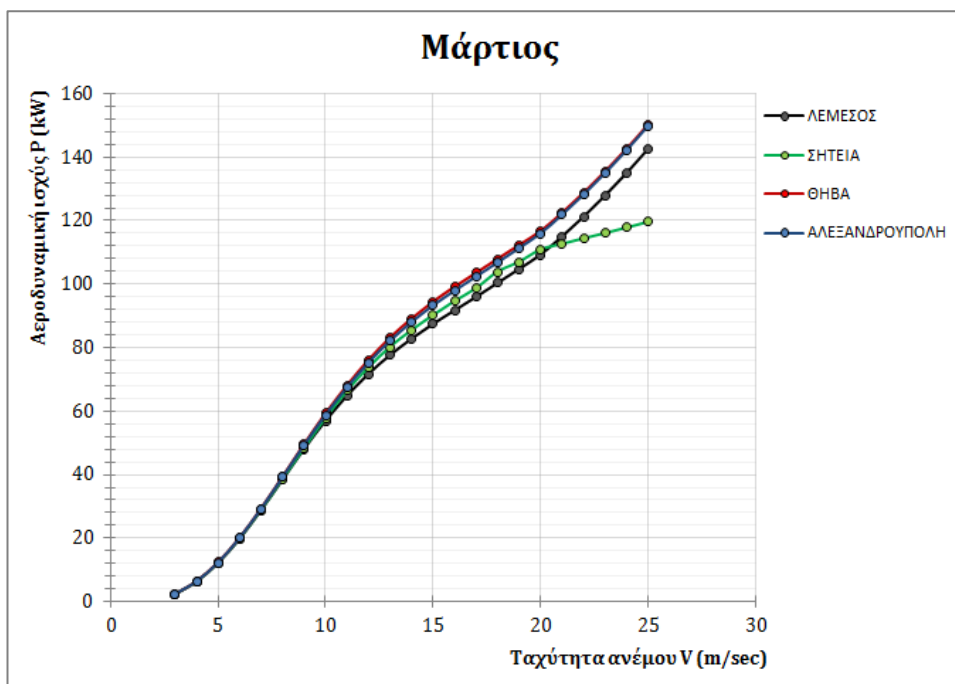
4.2.2.5 Σύγκριση πεδίων μελέτης



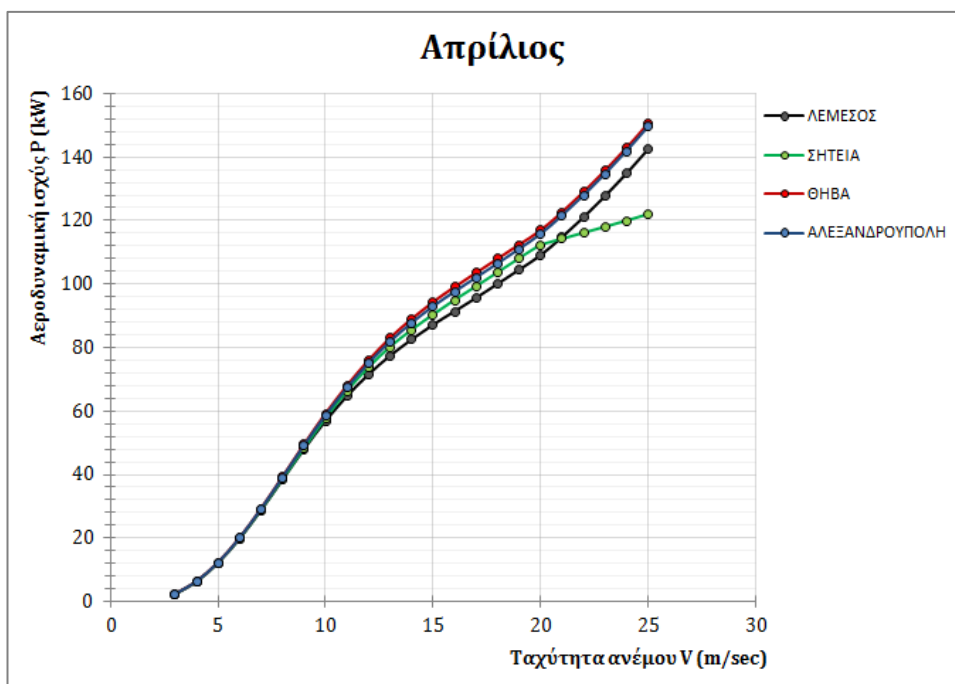
Διάγραμμα 41. Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Ιανουαρίου.



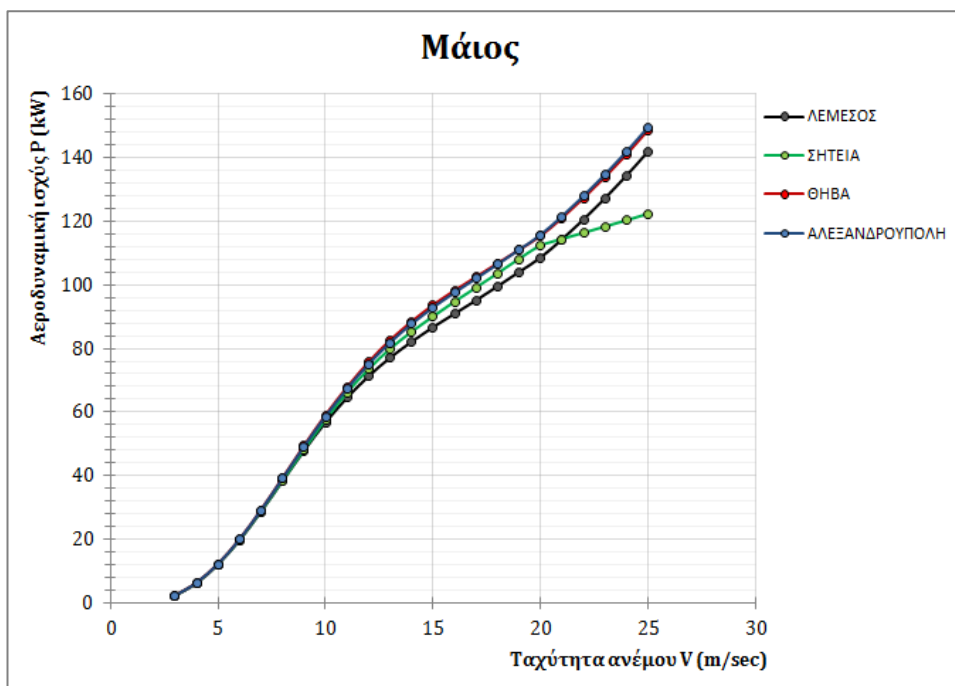
Διάγραμμα 42. Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Φεβρουαρίου.



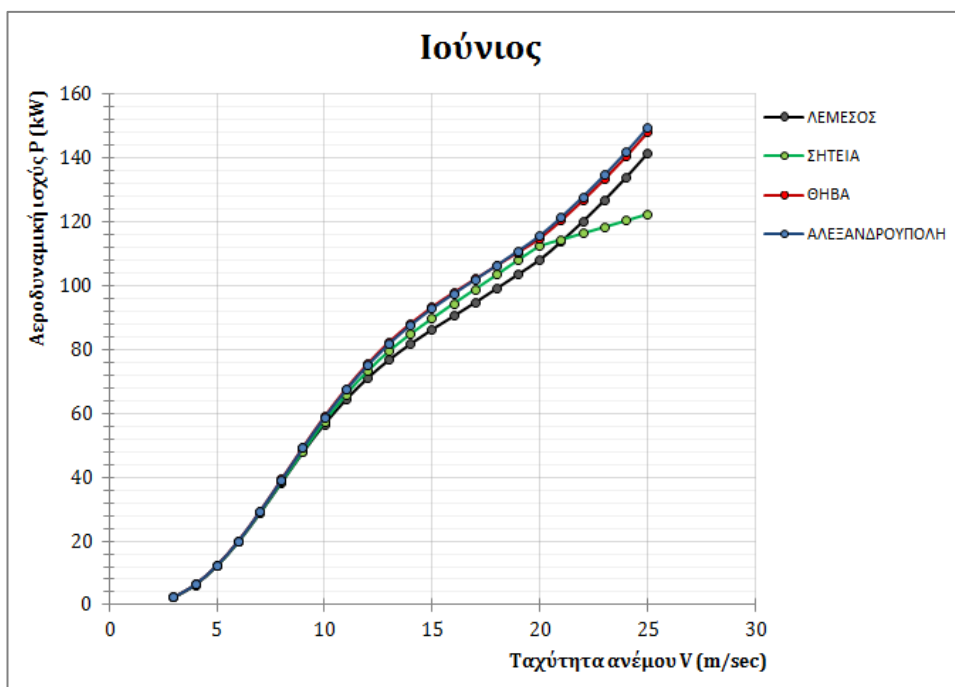
Διάγραμμα 43. Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Μαρτίου.



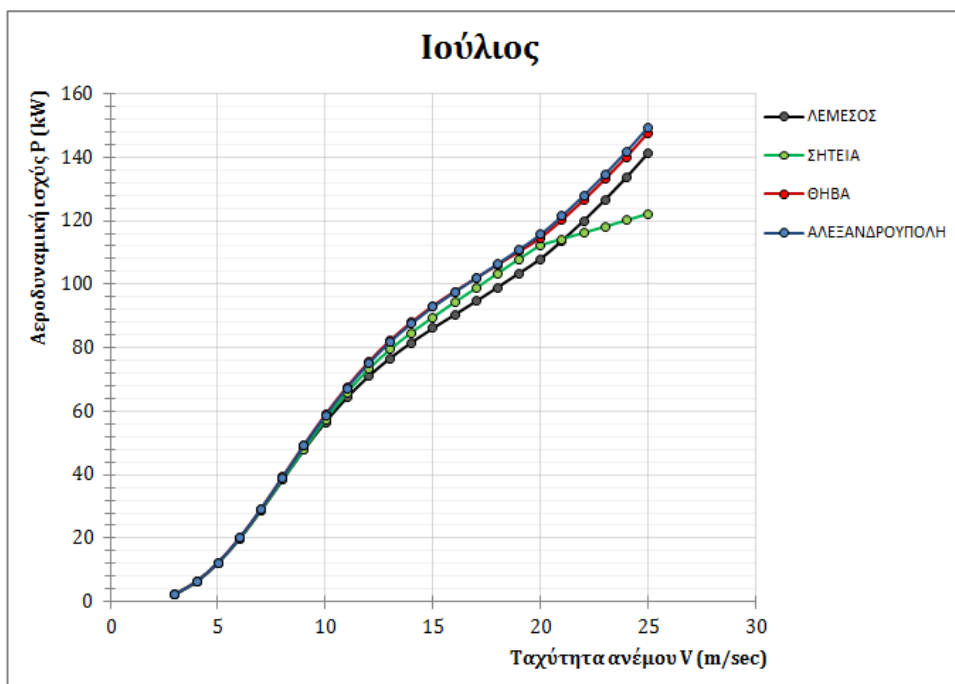
Διάγραμμα 44. Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Απριλίου.



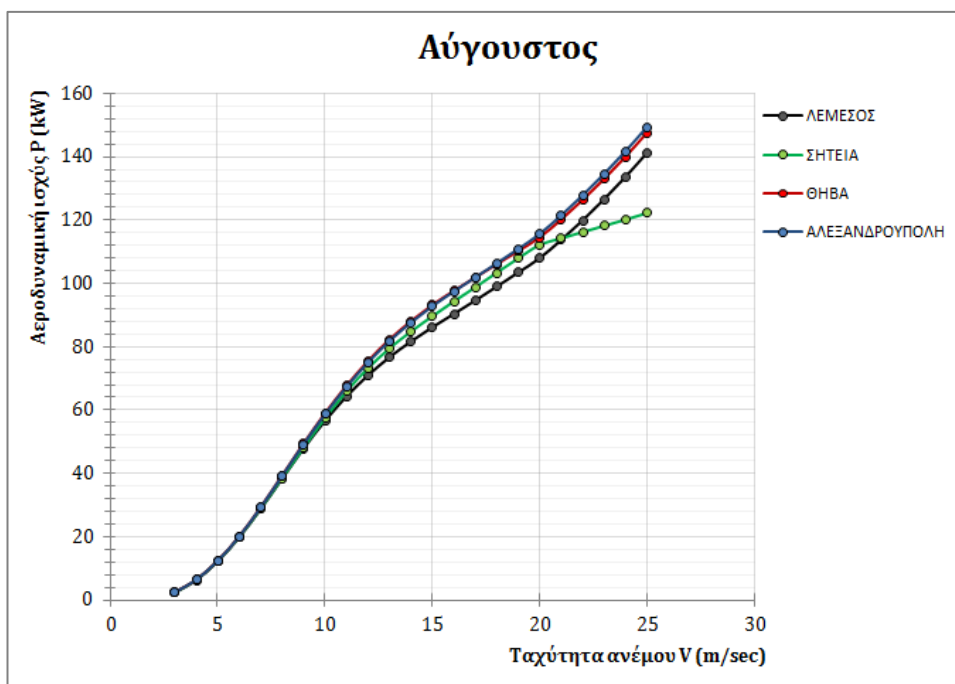
Διάγραμμα 45. Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Μαΐου.



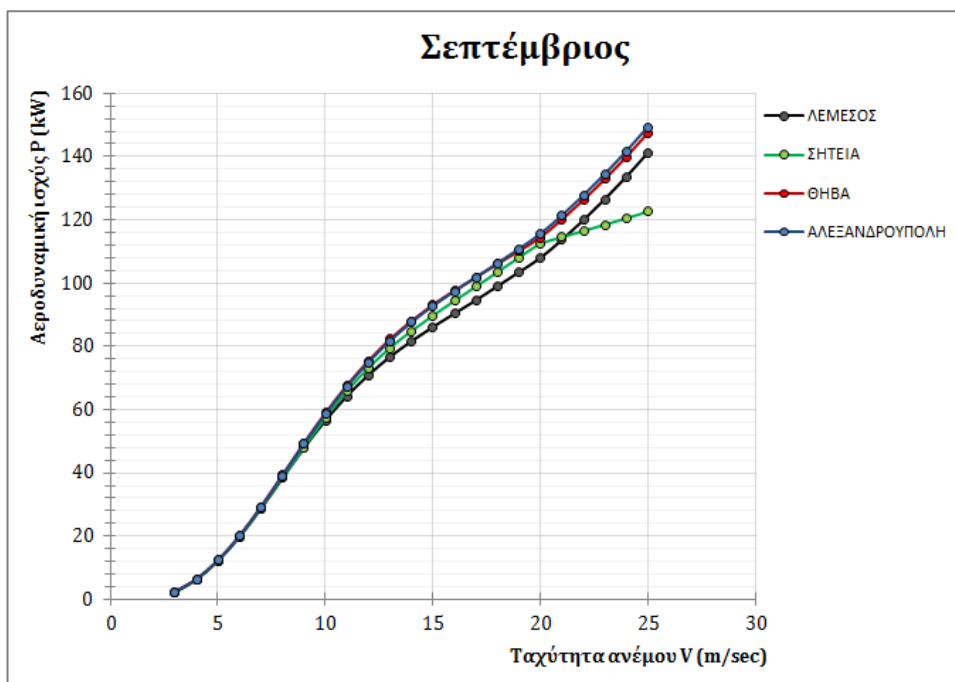
Διάγραμμα 46. Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Ιουνίου.



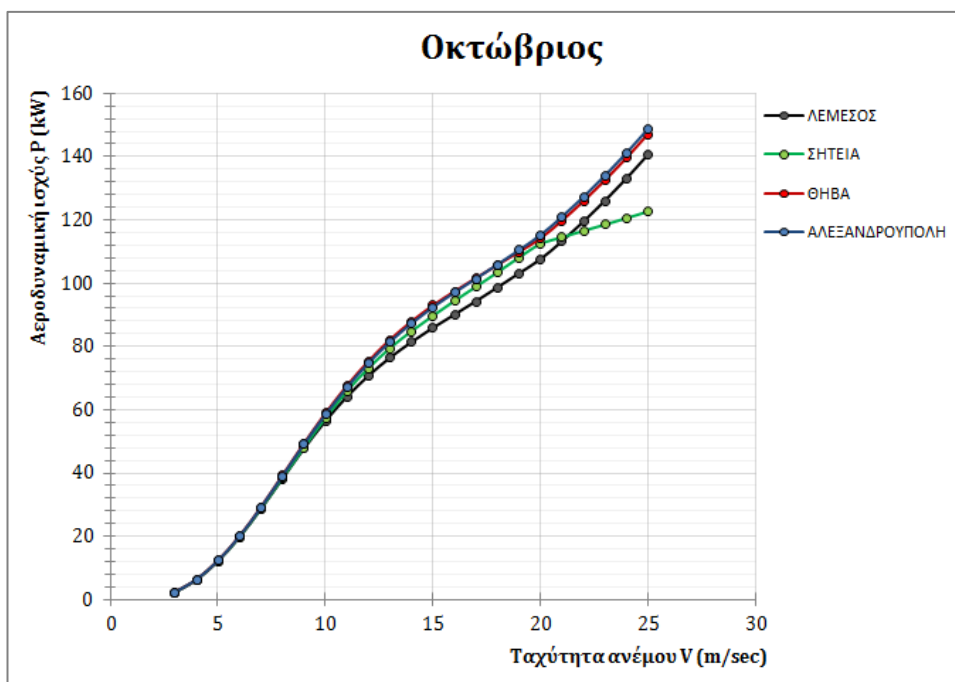
Διάγραμμα 47. Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Ιουλίου.



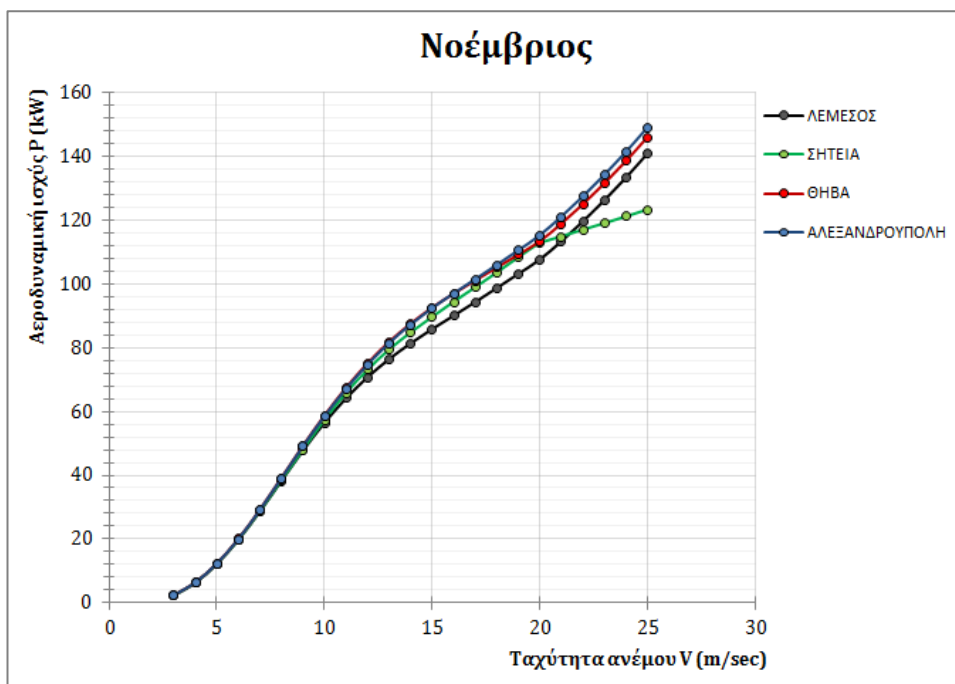
Διάγραμμα 48. Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Αυγούστου.



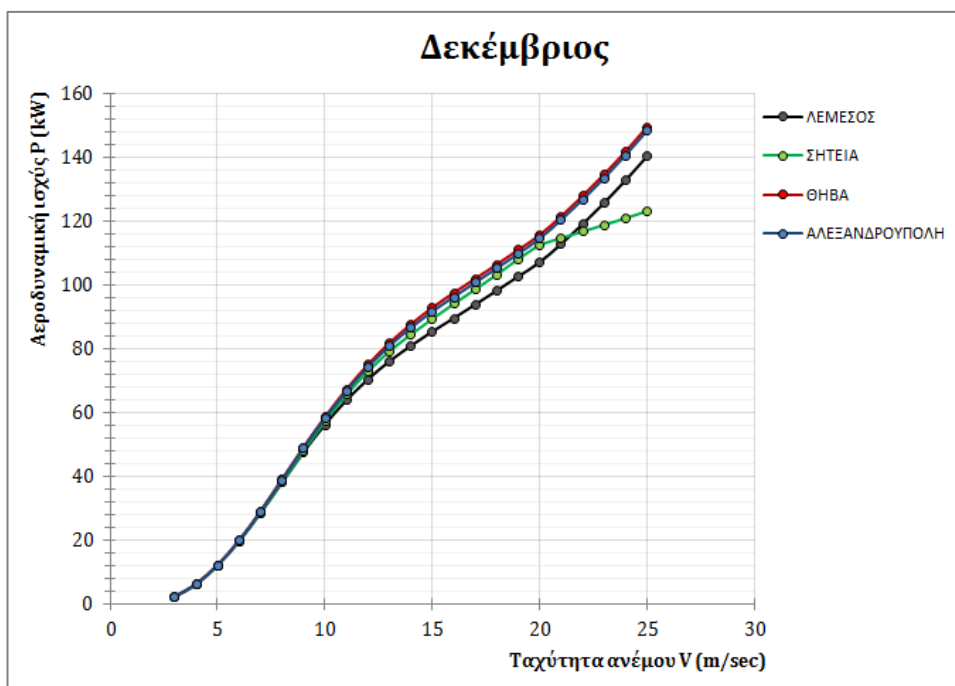
Διάγραμμα 49. Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Σεπτεμβρίου.



Διάγραμμα 50. Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Οκτωβρίου.



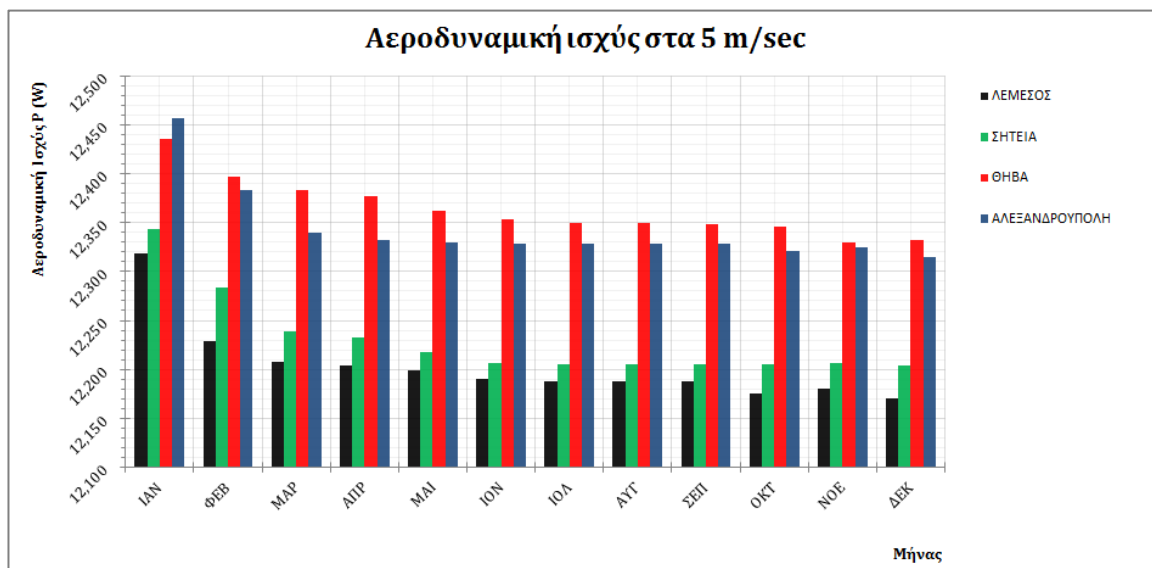
Διάγραμμα 51. Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Νοεμβρίου.



Διάγραμμα 52. Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Δεκεμβρίου.

Πίνακας 19. Εκτιμώμενη αεροδυναμική ισχύς στο τέλος κάθε περιόδου για ταχύτητα ανέμου $V = 5 \text{ m/sec}$.

Μήνας	Αεροδυναμική ισχύς P (kW)			
	Λεμεσός	Σητεία	Θήβα	Αλεξ/πολη
Ιανουάριος	12,319	12,343	12,435	12,457
Φεβρουάριος	12,229	12,283	12,397	12,383
Μάρτιος	12,207	12,239	12,383	12,339
Απρίλιος	12,204	12,233	12,377	12,332
Μάιος	12,198	12,218	12,362	12,330
Ιούνιος	12,190	12,206	12,353	12,329
Ιούλιος	12,188	12,205	12,350	12,329
Αύγουστος	12,188	12,205	12,349	12,329
Σεπτέμβριος	12,188	12,206	12,348	12,328
Οκτώβριος	12,175	12,206	12,346	12,321
Νοέμβριος	12,181	12,206	12,330	12,324
Δεκέμβριος	12,171	12,203	12,332	12,315



Διάγραμμα 53. Εκτίμηση αεροδυναμικής ισχύς στο τέλος κάθε περιόδου για ταχύτητα ανέμου $V = 5 \text{ m/sec}$.

Πίνακας 20. Απώλειες συνολικές και τμηματικές περιόδων έτους 2014 για ταχύτητα ανέμου $V = 5 \text{ m/sec}$.

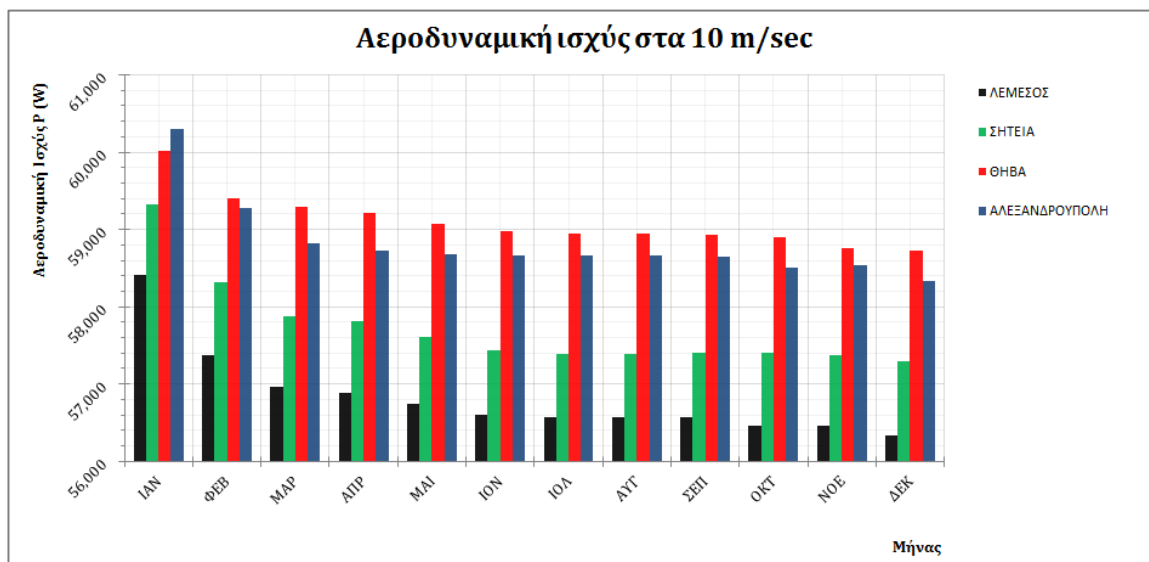
Μήνας	Απώλειες αεροδυναμικής ισχύος ΔP (kW)			
	Λεμεσός	Σητεία	Θήβα	Αλεξ/πολη
Ιανουάριος	0,000	0,000	0,000	0,000
Φεβρουάριος	0,090	0,060	0,038	0,074
Μάρτιος	0,021	0,044	0,014	0,044
Απρίλιος	0,004	0,006	0,006	0,008
Μάιος	0,005	0,015	0,015	0,002
Ιούνιος	0,008	0,011	0,009	0,001
Ιούλιος	0,003	0,001	0,003	0,000
Αύγουστος	0,000	0,000	0,001	0,000
Σεπτέμβριος	0,000	0,000	0,001	0,001
Οκτώβριος	0,012	0,000	0,003	0,007
Νοέμβριος	-0,005	0,000	0,016	-0,003
Δεκέμβριος	0,010	0,003	-0,002	0,010
Συνολικές απώλειες	0,148	0,140	0,105	0,143

Πίνακας 21. Απώλειες συνολικές και τμηματικές περιόδων έτους 2014 για ταχύτητα ανέμου $V = 5 \text{ m/sec}$.

Μήνας	Απώλειες αεροδυναμικής ισχύος ΔP (%)			
	Λεμεσός	Σητεία	Θήβα	Αλεξ/πολη
Ιανουάριος	0,00	0,00	0,00	0,00
Φεβρουάριος	0,73	0,48	0,31	0,59
Μάρτιος	0,17	0,36	0,11	0,36
Απρίλιος	0,03	0,05	0,05	0,06
Μάιος	0,04	0,12	0,12	0,01
Ιούνιος	0,07	0,09	0,07	0,01
Ιούλιος	0,02	0,01	0,03	0,00
Αύγουστος	0,00	0,00	0,01	0,00
Σεπτέμβριος	0,00	0,00	0,01	0,00
Οκτώβριος	0,10	0,00	0,02	0,06
Νοέμβριος	-0,04	0,00	0,13	-0,03
Δεκέμβριος	0,08	0,02	-0,01	0,08
Συνολικές απώλειες	1,20	1,13	0,85	1,15

Πίνακας 22. Εκτιμώμενη αεροδυναμική ισχύς στο τέλος κάθε περιόδου για ταχύτητα ανέμου $V = 10 \text{ m/sec}$.

Μήνας	Αεροδυναμική ισχύς P (kW)			
	Λεμεσός	Σητεία	Θήβα	Αλεξ/πολη
Ιανουάριος	58,416	59,323	60,011	60,298
Φεβρουάριος	57,371	58,310	59,409	59,271
Μάρτιος	56,970	57,877	59,288	58,826
Απρίλιος	56,882	57,820	59,220	58,723
Μάιος	56,736	57,614	59,071	58,685
Ιούνιος	56,607	57,440	58,984	58,664
Ιούλιος	56,570	57,392	58,953	58,661
Αύγουστος	56,570	57,392	58,944	58,661
Σεπτέμβριος	56,568	57,409	58,936	58,651
Οκτώβριος	56,456	57,401	58,907	58,509
Νοέμβριος	56,467	57,374	58,762	58,544
Δεκέμβριος	56,337	57,293	58,719	58,338



Διάγραμμα 54. Εκτίμηση αεροδυναμικής ισχύος στο τέλος κάθε περιόδου για ταχύτητα ανέμου $V = 10 \text{ m/sec}$.

Πίνακας 23. Απώλειες συνολικές και τμηματικές περιόδων έτους 2014 για ταχύτητα ανέμου $V = 10 \text{ m/sec}$.

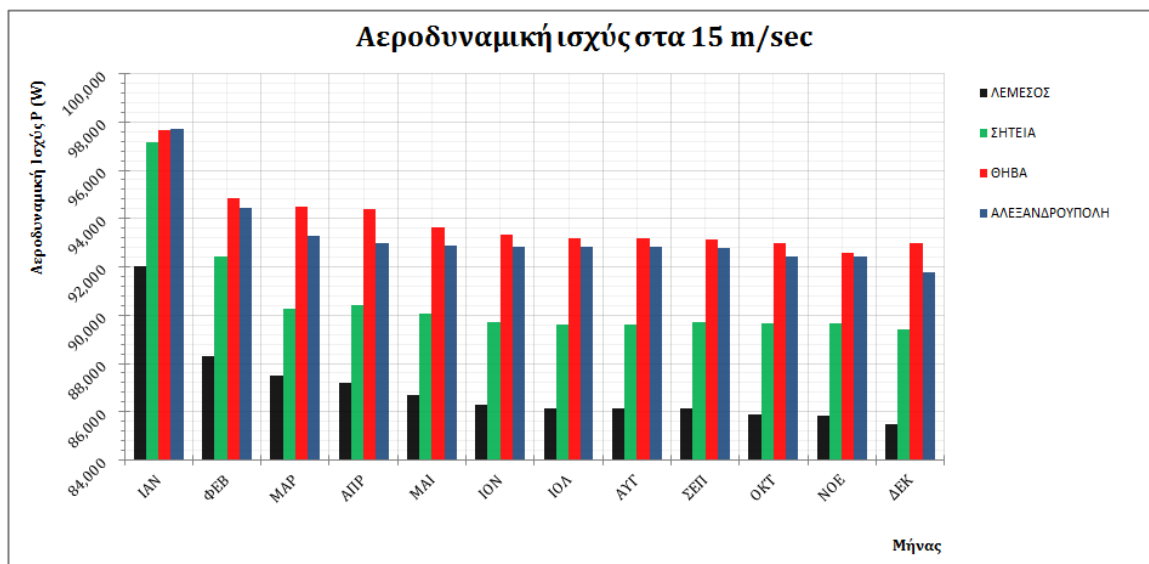
Μήνας	Απώλειες αεροδυναμικής ισχύος ΔP (kW)			
	Λεμεσός	Σητεία	Θήβα	Αλεξ/πολη
Ιανουάριος	0,000	0,000	0,000	0,000
Φεβρουάριος	1,045	1,012	0,603	1,027
Μάρτιος	0,401	0,433	0,121	0,445
Απρίλιος	0,088	0,057	0,068	0,103
Μάιος	0,146	0,206	0,148	0,038
Ιούνιος	0,129	0,174	0,087	0,022
Ιούλιος	0,036	0,048	0,032	0,002
Αύγουστος	0,000	0,000	0,008	0,000
Σεπτέμβριος	0,002	-0,017	0,008	0,011
Οκτώβριος	0,112	0,008	0,030	0,142
Νοέμβριος	-0,011	0,027	0,145	-0,035
Δεκέμβριος	0,130	0,081	0,043	0,206
Συνολικές απώλειες	2,078	2,029	1,293	1,960

Πίνακας 24. Απώλειες συνολικές και τμηματικές περιόδων έτους 2014 για ταχύτητα ανέμου $V = 10 \text{ m/sec}$.

Μήνας	Απώλειες αεροδυναμικής ισχύος ΔP (%)			
	Λεμεσός	Σητεία	Θήβα	Αλεξ/πολη
Ιανουάριος	0,00	0,00	0,00	0,00
Φεβρουάριος	1,79	1,71	1,00	1,70
Μάρτιος	0,70	0,74	0,20	0,75
Απρίλιος	0,15	0,10	0,12	0,17
Μάιος	0,26	0,36	0,25	0,06
Ιούνιος	0,23	0,30	0,15	0,04
Ιούλιος	0,06	0,08	0,05	0,00
Αύγουστος	0,00	0,00	0,01	0,00
Σεπτέμβριος	0,00	-0,03	0,01	0,02
Οκτώβριος	0,20	0,01	0,05	0,24
Νοέμβριος	-0,02	0,05	0,25	-0,06
Δεκέμβριος	0,23	0,14	0,07	0,35
Συνολικές απώλειες	3,56	3,42	2,15	3,25

Πίνακας 25. Εκτιμώμενη αεροδυναμική ισχύς στο τέλος κάθε περιόδου για ταχύτητα ανέμου $V = 15 \text{ m/sec}$.

Μήνας	Αεροδυναμική ισχύς P (kW)			
	Λεμεσός	Σητεία	Θήβα	Αλεξ/πολη
Ιανουάριος	92,008	97,174	97,667	97,720
Φεβρουάριος	88,293	92,447	94,858	94,434
Μάρτιος	87,489	90,243	94,501	93,279
Απρίλιος	87,180	90,422	94,390	92,994
Μάιος	86,691	90,057	93,645	92,886
Ιούνιος	86,268	89,733	93,326	92,820
Ιούλιος	86,154	89,612	93,207	92,813
Αύγουστος	86,153	89,611	93,174	92,812
Σεπτέμβριος	86,148	89,688	93,139	92,779
Οκτώβριος	85,899	89,677	92,997	92,421
Νοέμβριος	85,840	89,667	92,575	92,425
Δεκέμβριος	85,484	89,415	92,984	91,764



Διάγραμμα 55. Εκτίμηση αεροδυναμικής ισχύος στο τέλος κάθε περιόδου για ταχύτητα ανέμου $V = 15 \text{ m/sec}$.

Πίνακας 26. Απώλειες συνολικές και τμηματικές περιόδων έτους 2014 για ταχύτητα ανέμου $V = 15 \text{ m/sec}$.

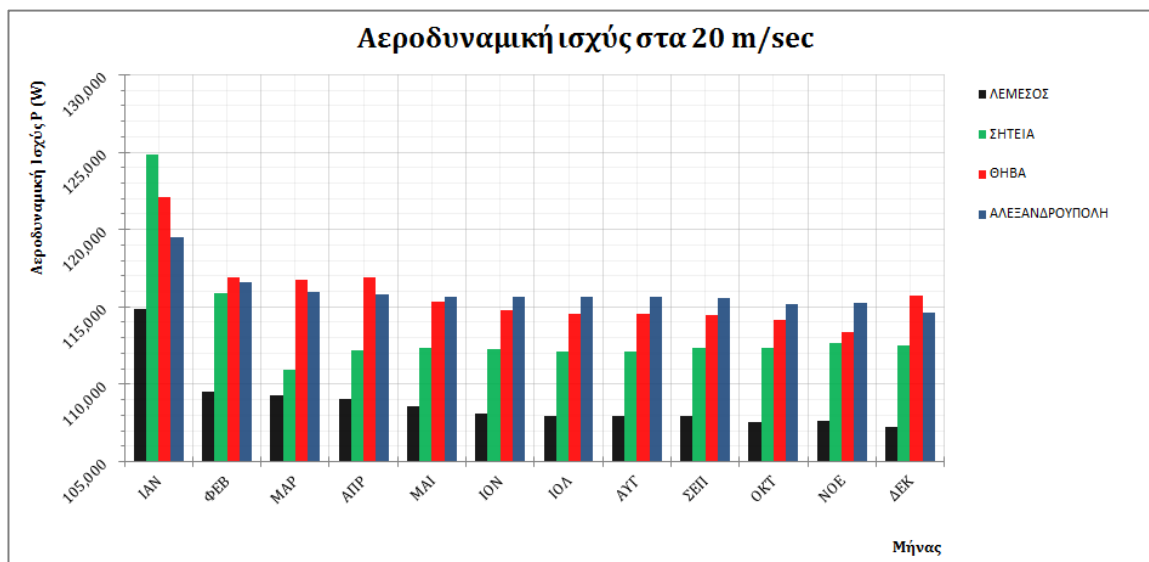
Μήνας	Απώλειες αεροδυναμικής ισχύος ΔP (kW)			
	Λεμεσός	Σητεία	Θήβα	Αλεξ/πολη
Ιανουάριος	0,000	0,000	0,000	0,000
Φεβρουάριος	3,715	4,727	2,809	3,286
Μάρτιος	0,804	2,204	0,356	1,155
Απρίλιος	0,309	-0,179	0,111	0,285
Μάιος	0,490	0,365	0,746	0,108
Ιούνιος	0,423	0,324	0,319	0,066
Ιούλιος	0,114	0,122	0,119	0,006
Αύγουστος	0,001	0,001	0,033	0,001
Σεπτέμβριος	0,005	-0,077	0,035	0,033
Οκτώβριος	0,249	0,012	0,142	0,358
Νοέμβριος	0,059	0,010	0,422	-0,004
Δεκέμβριος	0,357	0,252	-0,409	0,661
Συνολικές απώλειες	6,524	7,759	5,092	5,957

Πίνακας 27. Απώλειες συνολικές και τμηματικές περιόδων έτους 2014 για ταχύτητα ανέμου $V = 15 \text{ m/sec}$.

Μήνας	Απώλειες αεροδυναμικής ισχύος ΔP (%)			
	Λεμεσός	Σητεία	Θήβα	Αλεξ/πολη
Ιανουάριος	0,00	0,00	0,00	0,00
Φεβρουάριος	4,04	4,86	2,88	3,36
Μάρτιος	0,91	2,38	0,38	1,22
Απρίλιος	0,35	-0,20	0,12	0,31
Μάιος	0,56	0,40	0,79	0,12
Ιούνιος	0,49	0,36	0,34	0,07
Ιούλιος	0,13	0,14	0,13	0,01
Αύγουστος	0,00	0,00	0,04	0,00
Σεπτέμβριος	0,01	-0,09	0,04	0,04
Οκτώβριος	0,29	0,01	0,15	0,39
Νοέμβριος	0,07	0,01	0,45	0,00
Δεκέμβριος	0,42	0,28	-0,44	0,72
Συνολικές απώλειες	7,09	7,98	5,21	6,10

Πίνακας 28. Εκτιμώμενη αεροδυναμική ισχύς στο τέλος κάθε περιόδου για ταχύτητα ανέμου $V = 20 \text{ m/sec}$.

Μήνας	Αεροδυναμική ισχύς P (kW)			
	Λεμεσός	Σητεία	Θήβα	Αλεξ/πολη
Ιανουάριος	114,880	124,857	122,113	119,469
Φεβρουάριος	109,553	115,857	116,900	116,605
Μάρτιος	109,294	110,905	116,718	115,991
Απρίλιος	109,053	112,231	116,906	115,775
Μάιος	108,545	112,314	115,326	115,681
Ιούνιος	108,090	112,272	114,789	115,623
Ιούλιος	107,968	112,135	114,581	115,618
Αύγουστος	107,967	112,134	114,517	115,617
Σεπτέμβριος	107,961	112,346	114,446	115,588
Οκτώβριος	107,580	112,371	114,134	115,169
Νοέμβριος	107,628	112,693	113,357	115,267
Δεκέμβριος	107,214	112,510	115,765	114,640



Διάγραμμα 56. Εκτίμηση αεροδυναμικής ισχύος στο τέλος κάθε περιόδου για ταχύτητα ανέμου $V = 20 \text{ m/sec}$.

Πίνακας 29. Απώλειες συνολικές και τμηματικές περιόδων έτους 2014 για ταχύτητα ανέμου $V = 20 \text{ m/sec}$.

Μήνας	Απώλειες αεροδυναμικής ισχύος ΔP (kW)			
	Λεμεσός	Σητεία	Θήβα	Αλεξ/πολη
Ιανουάριος	0,000	0,000	0,000	0,000
Φεβρουάριος	5,327	9,000	5,213	2,864
Μάρτιος	0,259	4,952	0,182	0,614
Απρίλιος	0,241	-1,326	-0,188	0,216
Μάιος	0,508	-0,083	1,580	0,094
Ιούνιος	0,455	0,042	0,537	0,058
Ιούλιος	0,122	0,137	0,208	0,005
Αύγουστος	0,001	0,001	0,064	0,001
Σεπτέμβριος	0,006	-0,212	0,071	0,029
Οκτώβριος	0,381	-0,025	0,312	0,419
Νοέμβριος	-0,048	-0,322	0,777	-0,098
Δεκέμβριος	0,414	0,183	-2,408	0,627
Συνολικές απώλειες	7,666	12,723	8,756	4,829

Πίνακας 30. Απώλειες συνολικές και τμηματικές περιόδων έτους 2014 για ταχύτητα ανέμου $V = 20 \text{ m/sec}$.

Μήνας	Απώλειες αεροδυναμικής ισχύος ΔP (%)			
	Λεμεσός	Σητεία	Θήβα	Αλεξ/πολη
Ιανουάριος	0,00	0,00	0,00	0,00
Φεβρουάριος	4,64	7,21	4,27	2,40
Μάρτιος	0,24	4,27	0,16	0,53
Απρίλιος	0,22	-1,20	-0,16	0,19
Μάιος	0,47	-0,07	1,35	0,08
Ιούνιος	0,42	0,04	0,47	0,05
Ιούλιος	0,11	0,12	0,18	0,00
Αύγουστος	0,00	0,00	0,06	0,00
Σεπτέμβριος	0,01	-0,19	0,06	0,03
Οκτώβριος	0,35	-0,02	0,27	0,36
Νοέμβριος	-0,04	-0,29	0,68	-0,09
Δεκέμβριος	0,38	0,16	-2,12	0,54
Συνολικές απώλειες	6,67	10,19	7,17	4,04

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα - Συζήτηση

Στην παρούσα ενότητα, θα συζητηθούν και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο. Θεωρείται εξόχως σημαντική η ερμηνεία των εν λόγω αποτελεσμάτων, η εκτίμηση της σημαντικότητάς τους και η συσχέτισή τους με άλλες μελέτες της διεθνούς αρθρογραφίας.

5.1 Συζήτηση

Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων οποιασδήποτε προσομοιωτικής διαδικασίας, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι συνθήκες της μοντελοποίησης και οι περιορισμοί της τεχνολογίας. Η ακρίβεια των εκτιμήσεων που παρέχει η προσομοίωση, πάντοτε καθορίζεται από την ποιότητα και την καταλληλότητα των διαθέσιμων δεδομένων και από την παραμετροποίηση του μοντέλου.

Επειδή δεν κατέστη δυνατό για τα πραγματικά δεδομένα επικάθισης να ενταχθούν στις παραμέτρους, αυτά συσχετίστηκαν με το ύψος τραχύτητας, τον τοπικό συντελεστή τριβής και τελικά με τον γενικό αριθμό Re . Μεταβάλλοντας ανάλογα τον αριθμό Re και τη γωνία πρόσπτωσης, εξήχθησαν οι αντίστοιχες πληροφορίες σχετικά με τη μεταβολή των συντελεστών άνωσης, αντίστασης και του λόγου που τους συνδέει. Ειδικότερα, αυξάνοντας τον αριθμό Re , παρατηρείται αύξηση της μέγιστης τιμής του συντελεστή άνωσης και μείωση της μέγιστης τιμής του συντελεστή αντίστασης. Καθώς μεγαλώνει η γωνία πρόσπτωσης, η μέγιστη τιμή του λόγου των δύο συντελεστών αυξάνεται μέχρι οριακής τιμής και στη συνέχεια μειώνεται, με τις αντίστοιχες καμπύλες να τείνουν ασυμπτωτικά στον οριζόντιο άξονα του γραφήματος.

Όπως ρητώς αναφέρεται στη βιβλιογραφία (Τσαγγάρης, 1995), το ύψος τραχύτητας δεν είναι μέγεθος το οποίο προσεγγίζεται εύκολα, η δε αύξησή του υπεισέρχεται στους υπολογισμούς μέσω της μείωσης του αριθμού Re . Οι προσομοιώσεις Α' φάσης, πραγματοποιήθηκαν για να δειχθεί ευκρινέστερα η επίδραση της μείωσης του αριθμού

Re της ροής, και άρα της αύξησης της τραχύτητας, στις τιμές των αεροδυναμικών μεγεθών C_l , C_d και C_l/C_d υπό σταθερό αριθμό Ma .

Ο συντελεστής άνωσης C_l μειώνεται καθώς μειώνεται ο αριθμός Re , για το εύρος γωνιών πρόσπτωσης που έχει επιλεγεί (-5° έως 25°). Οι διαφορές μεταξύ των τιμών του συντελεστή για κάθε Re , είναι μικρότερες στο εύρος γωνιών -5° έως 12° , ωστόσο το φαινόμενο εξελίσσεται πιο έντονα όταν η γωνία πρόσπτωσης ξεπεράσει τις 12° . Εξάιρεση αποτελεί η καμπύλη που αντιστοιχεί σε $Re = 10^5$, και απεικονίζει σαφώς κατώτερες τιμές του υπό εξέταση συντελεστή. Στο Διάγραμμα 17α, βρίσκεται στην κορυφή η καμπύλη που αντιστοιχεί σε $Re = 10^7$, ενώ οι υπόλοιπες, αντιστοιχούν σε φθίνουσα σειρά των επιλεγμένων αριθμών Re , γεγονός που καταδεικνύει σαφώς τη μείωση του συντελεστή άνωσης. Ωστόσο, αντίστροφες προκύπτουν οι μεταβολές του συντελεστή αντίστασης C_d . Εδώ, η μείωση του αριθμού Re οδηγεί καταφανώς στην αύξηση του συντελεστή αντίστασης, γεγονός που απεικονίζεται στο Διάγραμμα 17β.

Όσον αφορά στο λόγο C_l/C_d των ανωτέρω μεγεθών, αυτός μειώνεται καθώς μειώνεται ο αριθμός Re , ενώ οι αντίστοιχες καμπύλες μετατοπίζονται δεξιά (Διάγρ. 17γ). Έτσι, το μέγιστο της καμπύλης που αντιστοιχεί σε $Re = 10^7$, σημειώνεται στη γωνία 4° , καθώς μειώνεται ο αριθμός Re η γωνία πρόσπτωσης μεγαλώνει και τελικά μέγιστο της καμπύλης που αντιστοιχεί σε $Re = 10^5$ σημειώνεται στις 9° . Για την επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης της πτέρυγας, είναι επιθυμητή η μεγιστοποίηση του λόγου άνωσης προς αντίσταση L/D (Hansen, 2008). Συνεπώς, καθώς μειώνεται η τιμή του λόγου, μειώνεται η απόδοση της πτέρυγας, και τελικά (Διαγρ. 17γ και 18) αποδεικνύεται η αεροδυναμική υποβάθμιση που επιφέρει η μείωση του αριθμού Re , ή ταυτόσημα η αύξηση της τραχύτητας.

Για το σκέλος της ανάλυσης που ακολουθεί, σημειώνεται ότι οι τιμές του λ οι οποίες αντιστοιχούν στα σχετικά γραφήματα, μόνο τυχαίες δεν είναι, αλλά έχουν επιλεγεί με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του συντελεστή απόδοσης C_p , για όλους του επιλεγμένους αριθμούς Re των προσομοιώσεων Α' φάσης.

Εξετάζοντας τα ανωτέρω αεροδυναμικά μεγέθη συναρτήσει του τοπικού συντελεστή προχώρησης (Διαγρ. 20, 21 και 22), διερευνούμε πώς αυτά μεταβάλλονται με την αύξηση των στροφών τοπικά στην πτέρυγα. Οι καμπύλες που βρίσκονται ψηλότερα

στα γραφήματα του C_l αντιστοιχούν στους υψηλότερους αριθμούς Re , ενώ η κατώτερη καμπύλη αντιστοιχεί σε $Re = 10^5$. Από την ανάλυση, προκύπτει ότι ο συντελεστής C_l έχει αρχικά μηδενική τιμή η οποία αυξάνεται απότομα μέχρι $\lambda_r \approx 1$ και στη συνέχεια παρουσιάζει μικρή αύξηση, εμφανίζοντας τοπικό μέγιστο στο σημείο όπου $\lambda_r \approx 1,5$. Αντίστροφες φαίνονται οι μεταβολές του συντελεστή C_d , ο οποίος αρχικά μειώνεται ραγδαίως και σταθεροποιείται σε τιμές πολύ κοντά στο μηδέν για $\lambda_r \approx 1$. Ο μικρότερος αριθμός Re αντιστοιχεί στην καμπύλη που βρίσκεται ψηλότερα στο διάγραμμα και άρα στις μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή αντίστασης. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το Διάγραμμα 22, όπου παρίσταται γραφικά η καμπύλη του λόγου L/D για κάθε επιλεγμένο αριθμό Re . Η καμπύλη που αντιστοιχεί σε $Re = 10^5$ βρίσκεται πάντα χαμηλότερα στο γράφημα και άρα αντιστοιχεί σε χαμηλότερες τιμές του υπό εξέταση λόγου. Εδώ οι καμπύλες των μεγάλων αριθμών Re , παρουσιάζουν ραγδαία αύξηση μέχρι $\lambda_r \approx 1$, ακολούθως απότομη μείωση μέχρι $\lambda_r \approx 1,6$ και τελικά εμφανίζουν σταθεροποίηση για $\lambda_r \approx 3,5$. Καθώς μειώνεται ο αριθμός Re οι ανωτέρω καμπύλες σταθεροποιούνται για $\lambda_r \leq 3,5$.

Όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, ουσιαστικά αναδεικνύουν τις τοπικές συσχετίσεις μεταξύ αεροδυναμικών μεγεθών και γωνιακής ταχύτητας αλλά και φανερώνουν σαφώς την αεροδυναμική υποβάθμιση που επιφέρει η μείωση του αριθμού Re .

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο συντελεστής αξονικής επαγωγής α είναι το μέγεθος που ουσιαστικά εκφράζει το ύψος αξιοποίησης του αιολικού δυναμικού στην πτέρυγα. Μπορούμε να εξετάσουμε τις μεταβολές του συντελεστή κατά τη διεύθυνση της ακτίνας του ρότορα, για τους επιλεγμένους αριθμούς Re , παρατηρώντας τα Διαγράμματα 23α έως 23γ. Οι υπό εξέταση καμπύλες είναι φθίνουσες και ταυτόχρονα συμπίπτουν μέχρι $r \approx 0,8 m$ (τέλος περιοχής κυκλικών αεροτομών). Στη συνέχεια η καθεμία είναι αύξουσα με σημείο καμπής (τοπικό μέγιστο) στη θέση $r \approx 3 m$ και ξαναγίνεται αύξουσα στη θέση $r \approx 5 m$. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η καμπύλη που αντιστοιχεί σε $Re = 10^5$, η οποία βρίσκεται πάντα χαμηλότερα στο γράφημα και άρα αντιστοιχεί σε χαμηλότερες τιμές του υπό εξέταση μεγέθους, ενώ διαγράφεται χαρακτηριστικά φθίνουσα μετά τη θέση $r \approx 3 m$, γεγονός που φανερώνει την επίδραση της μείωσης του αριθμού Re στην αεροδυναμική απόδοση του ρότορα.

Σύμφωνα με τη θεωρία, το μεγαλύτερο μέρος από την ενέργεια του ανέμου, αξιοποιείται στο τμήμα της πτέρυγας από $r \approx 0,5R$ έως το ακροπτερύγιο όπου $r = R$. Έτσι, το συγκεκριμένο τμήμα, αποτελεί το λειτουργικό τμήμα της εκάστοτε πτέρυγας, και αυτό φαίνεται και από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων Α' φάσης.

Για το τέλος της παρούσας ανάλυσης, κρατήθηκε ίσως το ουσιαστικότερο σχετικό με την παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή, αεροδυναμικό μέγεθος. Αυτό, δεν είναι άλλο από τον αδιάστατο συντελεστή αεροδυναμικής απόδοσης C_p (Διάγρ. 24). Για τους επιλεγμένους αριθμούς Re , το ανωτέρω μέγεθος φαίνεται να μεγιστοποιείται για τιμές του λ από 5 έως 6,5 (σύμφωνα με το προκαθορισμένο βήμα μεταβολής). Στις χαμηλές στροφές του άξονα, ο συντελεστής προκύπτει πολύ χαμηλός, ενώ η καμπύλη που αντιστοιχεί σε $Re = 10^7$, βρίσκεται χαμηλότερα στο γράφημα, κάτι που σαφώς φανερώνει μεγάλο ύψος απωλειών, είτε λόγω της μικρής αναλογίας μεταξύ στροφών και ταχύτητας ανέμου, είτε λόγω του έντονα τυρβώδους ροϊκού καθεστώτος που επιβάλλεται για $Re \geq 10^7$ (Τσαγγάρης, 1995). Από την ανάλυση, προκύπτει ότι, καθώς μειώνεται ο αριθμός Re , ο ρότορας πρέπει να έχει περισσότερες στροφές για να διατηρείται σε υψηλά επίπεδα ο συντελεστής απόδοσης (μετατόπιση σημείου καμπής δεξιά στα γραφήματα 24α και 24β). Έτσι, από τη γενική εντύπωση των μεταβολών του συντελεστή απόδοσης, αναδεικνύεται η αεροδυναμική υποβάθμιση των πτερύγων του ρότορα λόγω της μείωσης του αριθμού Re .

Μετά το πέρας της εκτέλεσης των προσομοιώσεων Β' φάσης, προσεγγίζονται τα αεροδυναμικά μεγέθη και εκτιμάται το ύψος της αποδιδόμενης αεροδυναμικής ισχύος του ρότορα, ξεχωριστά για κάθε περιοχή μελέτης. Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα πλέον χαρακτηριστικά αεροδυναμικά μεγέθη, είναι ο λόγος C_l/C_d και ο συντελεστής ισχύος C_p . Η γωνία μεγιστοποίησης του λόγου C_l/C_d χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις ως γωνία πρόνευσης, για τον προσδιορισμό της μέγιστης αεροδυναμικής απόδοσης.

Το Διάγραμμα 25, αφορά την πόλη της Λεμεσού και απεικονίζει τη μεταβολή του λόγου C_l/C_d συναρτήσεως της γωνίας πρόσπτωσης (AoA). Παρατηρείται ότι ο λόγος μεγιστοποιείται για γωνία 5° ενώ αρκετές καμπύλες συμπίπτουν, γεγονός που δικαιολογείται απόλυτα αφού δεν διαφαίνονται εξαιρετικά μεγάλες μεταβολές των αντίστοιχων αριθμών Re (Πίν. 4). Στο Διάγραμμα 25β, η ανώτερη καμπύλη αντιστοιχεί στον μήνα Ιανουάριο και η κατώτερη στον μήνα Δεκέμβριο. Με το πέρας του χρόνου,

προκύπτει σαφώς η μείωση της μέγιστης τιμής του λόγου. Κατά τους μήνες Ιανουάριο έως Μάρτιο, η μείωση της τιμής του μέγιστου λόγου χαρακτηρίζεται ως αυξημένη και δυσανάλογη σε σχέση με τη μείωση που σημειώνεται έως και το τέλος του έτους, η οποία χαρακτηρίζεται ως ομαλή. Αντίστοιχα, οι καμπύλες που περιγράφουν τη μεταβολή του συντελεστή αεροδυναμικής ισχύος C_p , φαίνεται να συμπίπτουν στο Διάγραμμα 26α ενώ οι μεταβολές απεικονίζονται ευκρινέστερα στο Διάγραμμα 26β. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 7, η τιμή του συντελεστή είναι μέγιστη τον Ιανουάριο, μειώνεται ελαφρώς τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο και παραμένει αμετάβλητη κατά τις υπόλοιπες περιόδους για $\lambda > 3$. Ωστόσο, στο Διάγραμμα 26β απεικονίζεται σαφώς η μείωση του υπό εξέταση συντελεστή.

Στο Διάγραμμα 28, φαίνονται οι καμπύλες μεταβολής της αποδιδόμενης αεροδυναμικής ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου. Η καμπύλη που βρίσκεται ανώτερα αντιστοιχεί στον Ιανουάριο, ενώ είναι φανερό πως η καμπύλη που βρίσκεται κατώτερα, αντιστοιχεί στο μήνα Δεκέμβριο. Η αεροδυναμική υποβάθμιση του ρότορα, αποτιμάται στους Πίνακες 8 και 9, στους οποίους καταγράφονται η μέγιστη και η ελάχιστη προσδιορισθείσα ισχύς και οι συνολικές απώλειες ισχύος, για επιλεγμένες τιμές ταχύτητας ανέμου. Ανάλογα λοιπόν με όσα ήδη έχουν αναλυθεί, για τις επιλεγμένες τιμές ταχύτητας ανέμου, το ύψος της εκτιμώμενης αεροδυναμικής ισχύος κυμαίνεται κατά την πρώτη περίοδο (2014, Ιανουάριος) από 12,319 kW έως 148,623 kW, ενώ κατά τη δωδέκατη περίοδο (2014, Δεκέμβριος) από 12,171 kW έως 140,382 kW. Η ελάττωση της αποδιδόμενης αεροδυναμικής ισχύος ανά περίοδο, οφείλεται στην επίδραση της σκόνης και ταιριάζει απόλυτα με το μοτίβο της επικάθισης, όπως αυτό αναλύθηκε για την περιοχή της Λεμεσού (Κεφ. 3, παρ. 3.3.2). Έτσι, καταγράφηκαν απώλειες ισχύος ύψους 0,091-8,241 kW, ήτοι σε ποσοστά 1,20-7,16%, ενώ είναι διακριτή η σταδιακή υποβάθμιση της αεροδυναμικής απόδοσης του ρότορα, ανά μήνα υποθετικής λειτουργίας για την υπό εξέταση χρονική περίοδο. Σημειώνεται ότι στις υψηλές ταχύτητες ανέμου, είναι αναμενόμενο να προκύπτει και υψηλή η αριθμητική τιμή των απωλειών, ωστόσο, το ενδιαφέρον εστιάζεται και στην ποσοστιαία τιμή, η οποία ουσιαστικά περιγράφει τις μελετώμενες μεταβολές.

Ενδεικτικά αναφέρονται οι συνολικές απώλειες, ως μέγιστη απόλυτη τιμή, οι οποίες καταγράφηκαν ως εξής: για ταχύτητα ανέμου 5 m/sec σε 0,148 kW, για ταχύτητα ανέμου 10 m/sec σε 2,078 kW, για ταχύτητα ανέμου 15 m/sec σε 6,524 kW, για

ταχύτητα ανέμου 20 m/sec σε 7,666 kW και για ταχύτητα ανέμου 25 m/sec σε 8,241 kW. Αντίστοιχα, οι συνολικές απώλειες, ως μέγιστη ποσοστιαία τιμή, καταγράφηκαν ως εξής: για ταχύτητα ανέμου 5 m/sec σε 1,20%, για ταχύτητα ανέμου 10 m/sec σε 3,56%, για ταχύτητα ανέμου 15 m/sec σε 7,09%, για ταχύτητα ανέμου 20 m/sec σε 6,67% και για ταχύτητα ανέμου 25 m/sec σε 5,54%. Τελικά, από τη μελέτη της κάθε περιόδου ξεχωριστά, προκύπτει ότι αυξανόμενη της ταχύτητας ανέμου αυξάνεται και η αποδιδόμενη αεροδυναμική ισχύς, γεγονός που συμφωνεί απόλυτα με τα διαλαμβανόμενα στο Κεφάλαιο 2 (παρ. 2.3.3, εξ. 5 – η αεροδυναμική ισχύς ανάλογη του τετραγώνου της αδιατάρακτης ταχύτητας ανέμου). Ωστόσο, οι απώλειες εκφρασμένες ως ποσοστό επί της αρχικά αποδιδόμενης ισχύος δίνουν την πραγματική διάσταση του φαινομένου, και στην περίπτωση της Λεμεσού, η μέγιστη τιμή τους βρέθηκε ίση με 7,16% στα 16 m/sec.

Το Διάγραμμα 29, αφορά την πόλη της Σητείας και απεικονίζει τη μεταβολή του λόγου C_l/C_d συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης (AoA). Και σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρείται μεγιστοποίηση του λόγου για γωνία 5° ενώ αρκετές καμπύλες συμπίπτουν, γεγονός που δικαιολογείται απόλυτα αφού δεν διαφαίνονται εξαιρετικά μεγάλες μεταβολές των αντίστοιχων αριθμών Re (Πίν. 4). Στο Διάγραμμα 29β, η ανώτερη καμπύλη αντιστοιχεί στον μήνα Ιανουάριο και η κατώτερη στον μήνα Δεκέμβριο. Με το πέρασ του χρόνου, προκύπτει σαφώς η μείωση της μέγιστης τιμής του λόγου. Κατά τους μήνες Ιανουάριο έως Ιούνιο, η μείωση της τιμής του μέγιστου λόγου χαρακτηρίζεται ως αυξημένη και δυσανάλογη σε σχέση με τη μείωση που σημειώνεται έως και το τέλος του έτους, η οποία χαρακτηρίζεται ως ομαλή. Αντίστοιχα, οι καμπύλες που περιγράφουν τη μεταβολή του συντελεστή αεροδυναμικής ισχύος C_p , φαίνεται να συμπίπτουν στο Διάγραμμα 30α ενώ οι μεταβολές απεικονίζονται ευκρινέστερα στο Διάγραμμα 30β. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 10, για $2 < \lambda < 5$ η τιμή του συντελεστή είναι μέγιστη τον Ιανουάριο, μειώνεται ελαφρώς τον Φεβρουάριο και παραμένει αμετάβλητη κατά τις υπόλοιπες περιόδους, ενώ για $\lambda = 1$, $\lambda = 6$, $\lambda = 7$ και $\lambda = 8$ δε σημειώνεται καμία απολύτως μεταβολή. Ωστόσο, στο Διάγραμμα 30β απεικονίζεται σαφώς η μείωση του υπό εξέταση συντελεστή για $\lambda \leq 6,2$, όμως η κατάσταση αντιστρέφεται για $\lambda = \lambda_{C_p,max} = 6,5$, οπότε και δεν μπορεί να εξαχθεί κανένα συμπέρασμα.

Στο Διάγραμμα 32, φαίνονται οι καμπύλες μεταβολής της αποδιδόμενης αεροδυναμικής ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου. Η καμπύλη που βρίσκεται ανώτερα αντιστοιχεί στον Ιανουάριο, ενώ η καμπύλη που βρίσκεται κατώτερα, αντιστοιχεί στο μήνα Μάρτιο. Είναι φανερό, ότι η καμπύλη του Δεκεμβρίου δε βρίσκεται κατώτερα όπως άλλωστε θα αναμενόταν, όμως, όπως προκύπτει από τις απόλυτες τιμές της ισχύος, οι καμπύλες Μαρτίου και Δεκεμβρίου δεν αποκλίνουν δραματικά. Η αεροδυναμική υποβάθμιση του ρότορα, αποτιμάται στους Πίνακες 11 και 12, στους οποίους καταγράφονται η μέγιστη και η ελάχιστη προσδιορισθείσα ισχύς και οι συνολικές απώλειες ισχύος, για επιλεγμένες τιμές ταχύτητας ανέμου. Ανάλογα λοιπόν με όσα ήδη έχουν αναλυθεί, για τις επιλεγμένες τιμές ταχύτητας ανέμου, το ύψος της εκτιμώμενης αεροδυναμικής ισχύος κυμαίνεται κατά την πρώτη περίοδο (2014, Ιανουάριος) από 12,343 kW έως 139,604 kW, ενώ κατά τις περιόδους ελάχιστης καταγεγραμμένης ισχύος (2014, Μάρτιος και Δεκέμβριος) από 12,203 kW έως 119,621 kW. Η ελάττωση της αποδιδόμενης αεροδυναμικής ισχύος ανά περίοδο, οφείλεται στην επίδραση της σκόνης και ταιριάζει απόλυτα με το μοτίβο της επικάθισης, όπως αυτό αναλύθηκε για την περιοχή της Σητείας (Κεφ. 3, παρ. 3.3.2). Έτσι, καταγράφηκαν απώλειες ισχύος ύψους 0,078-19,983 kW, ήτοι σε ποσοστά 1,13-14,31%, ενώ είναι διακριτή η σταδιακή υποβάθμιση της αεροδυναμικής απόδοσης του ρότορα, ανά μήνα υποθετικής λειτουργίας για την υπό εξέταση χρονική περίοδο.

Ενδεικτικά αναφέρονται οι συνολικές απώλειες, ως μέγιστη απόλυτη τιμή, οι οποίες καταγράφηκαν ως εξής: για ταχύτητα ανέμου 5 m/sec σε 0,140 kW, για ταχύτητα ανέμου 10 m/sec σε 2,029 kW, για ταχύτητα ανέμου 15 m/sec σε 7,759 kW, για ταχύτητα ανέμου 20 m/sec σε 13,952 kW και για ταχύτητα ανέμου 25 m/sec σε 19,983 kW. Αντίστοιχα, οι συνολικές απώλειες, ως μέγιστη ποσοστιαία τιμή, καταγράφηκαν ως εξής: για ταχύτητα ανέμου 5 m/sec σε 1,13%, για ταχύτητα ανέμου 10 m/sec σε 3,42%, για ταχύτητα ανέμου 15 m/sec σε 7,98%, για ταχύτητα ανέμου 20 m/sec σε 11,17% και για ταχύτητα ανέμου 25 m/sec σε 14,31%. Τελικά, από τη μελέτη της κάθε περιόδου ξεχωριστά, προκύπτει ότι αυξανόμενης της ταχύτητας ανέμου αυξάνεται και η αποδιδόμενη αεροδυναμική ισχύς, γεγονός που συμφωνεί απόλυτα με τα διαλαμβανόμενα στο Κεφάλαιο 2 (παρ. 2.3.3, εξ. 5 – η αεροδυναμική ισχύς ανάλογη του τετραγώνου της αδιατάρακτης ταχύτητας ανέμου). Ωστόσο, οι απώλειες εκφρασμένες ως ποσοστό επί της αρχικά αποδιδόμενης ισχύος δίνουν την πραγματική διάσταση του

φαινομένου, και στην περίπτωση της Σητείας, η μέγιστη τιμή τους βρέθηκε ίση με 14,31% στα 25 m/sec.

Το Διάγραμμα 33, αφορά την πόλη της Θήβας και απεικονίζει τη μεταβολή του λόγου C_l/C_d συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης (AoA). Και εδώ, παρατηρείται μεγιστοποίηση του λόγου για γωνία 5° ενώ σχεδόν όλες οι καμπύλες συμπίπτουν, γεγονός που δικαιολογείται απόλυτα αφού δεν διαφαίνονται εξαιρετικά μεγάλες μεταβολές των αντίστοιχων αριθμών Re (Πίν. 4). Στο Διάγραμμα 33β, η ανώτερη καμπύλη αντιστοιχεί στον μήνα Ιανουάριο και η κατώτερη στον μήνα Δεκέμβριο. Με το πέρασ του χρόνου, προκύπτει σαφώς η μείωση της μέγιστης τιμής του λόγου. Κατά τους μήνες Ιανουάριο έως Μάρτιο, Απρίλιο έως Μάιο και Νοέμβριο έως Δεκέμβριο, η μείωση της τιμής του μέγιστου λόγου χαρακτηρίζεται ως αυξημένη και δυσανάλογη σε σχέση με τη μείωση που σημειώνεται μεταξύ των υπολοίπων περιόδων, η οποία χαρακτηρίζεται ως ομαλή. Αντίστοιχα, οι καμπύλες που περιγράφουν τη μεταβολή του συντελεστή αεροδυναμικής ισχύος C_p , φαίνεται να συμπίπτουν στο Διάγραμμα 34α ενώ οι μεταβολές απεικονίζονται ευκρινέστερα στο Διάγραμμα 34β. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 13, για $\lambda = 3$, $\lambda = 6$ και $\lambda = 10$, η τιμή του συντελεστή είναι μέγιστη τον Ιανουάριο, μειώνεται ελαφρώς και μέχρι τελικής τιμής τον Φεβρουάριο, ενώ για τις υπόλοιπες τιμές του λ δε σημειώνεται καμία απολύτως μεταβολή. Ωστόσο, στο Διάγραμμα 34β απεικονίζεται σαφώς η μείωση του υπό εξέταση συντελεστή για $\lambda \leq \lambda_{C_p,max} = 6$, όμως η κατάσταση αντιστρέφεται περίπου για $\lambda > \lambda_{C_p,max}$, οπότε και δεν μπορεί να εξαχθεί κανένα συμπέρασμα.

Στο Διάγραμμα 36, φαίνονται οι καμπύλες μεταβολής της αποδιδόμενης αεροδυναμικής ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου. Η καμπύλη που βρίσκεται ανώτερα αντιστοιχεί στον Ιανουάριο, ενώ η καμπύλη που βρίσκεται κατώτερα, αντιστοιχεί στο μήνα Νοέμβριο. Είναι φανερό, ότι η καμπύλη του Δεκεμβρίου δε βρίσκεται κατώτερα όπως άλλωστε θα αναμενόταν, όμως, όπως προκύπτει από τις απόλυτες τιμές της ισχύος, οι καμπύλες Νοεμβρίου και Δεκεμβρίου δεν αποκλίνουν δραματικά. Η αεροδυναμική υποβάθμιση του ρότορα, αποτιμάται στους Πίνακες 14 και 15, στους οποίους καταγράφονται η μέγιστη και η ελάχιστη προσδιορισθείσα ισχύς και οι συνολικές απώλειες ισχύος, για επιλεγμένες τιμές ταχύτητας ανέμου. Ανάλογα λοιπόν με όσα ήδη έχουν αναλυθεί, για τις επιλεγμένες τιμές ταχύτητας ανέμου, το ύψος της εκτιμώμενης αεροδυναμικής ισχύος κυμαίνεται κατά

την πρώτη περίοδο (2014, Ιανουάριος) από 12,435 kW έως 156,958 kW, ενώ κατά τις περιόδους ελάχιστης καταγεγραμμένης ισχύος (2014, Νοέμβριος και Δεκέμβριος) από 12,332 kW έως 145,968 kW. Η ελάττωση της αποδιδόμενης αεροδυναμικής ισχύος ανά περίοδο, οφείλεται στην επίδραση της σκόνης και ταιριάζει απόλυτα με το μοτίβο της επικάθισης, όπως αυτό αναλύθηκε για την περιοχή της Θήβας (Κεφ. 3, παρ. 3.3.2). Έτσι, καταγράφηκαν απώλειες ισχύος ύψους 0,047-10,990 kW, ήτοι σε ποσοστά 0,83-7,26%, ενώ είναι διακριτή η σταδιακή υποβάθμιση της αεροδυναμικής απόδοσης του ρότορα, ανά μήνα υποθετικής λειτουργίας για την υπό εξέταση χρονική περίοδο.

Ενδεικτικά αναφέρονται οι συνολικές απώλειες, ως μέγιστη απόλυτη τιμή, οι οποίες καταγράφηκαν ως εξής: για ταχύτητα ανέμου 5 m/sec σε 0,104 kW, για ταχύτητα ανέμου 10 m/sec σε 1,293 kW, για ταχύτητα ανέμου 15 m/sec σε 5,092 kW, για ταχύτητα ανέμου 20 m/sec σε 8,756 kW και για ταχύτητα ανέμου 25 m/sec σε 10,990 kW. Αντίστοιχα, οι συνολικές απώλειες, ως μέγιστη ποσοστιαία τιμή, καταγράφηκαν ως εξής: για ταχύτητα ανέμου 5 m/sec σε 0,83%, για ταχύτητα ανέμου 10 m/sec σε 2,15%, για ταχύτητα ανέμου 15 m/sec σε 5,21%, για ταχύτητα ανέμου 20 m/sec σε 7,17% και για ταχύτητα ανέμου 25 m/sec σε 7,00%. Τελικά, από τη μελέτη της κάθε περιόδου ξεχωριστά, προκύπτει ότι αυξανόμενη της ταχύτητας ανέμου αυξάνεται και η αποδιδόμενη αεροδυναμική ισχύς, γεγονός που συμφωνεί απόλυτα με τα διαλαμβανόμενα στο Κεφάλαιο 2 (παρ. 2.3.3, εξ. 5 – η αεροδυναμική ισχύς ανάλογη του τετραγώνου της αδιατάρακτης ταχύτητας ανέμου). Ωστόσο, οι απώλειες εκφρασμένες ως ποσοστό επί της αρχικά αποδιδόμενης ισχύος δίνουν την πραγματική διάσταση του φαινομένου, και στην περίπτωση της Θήβας, η μέγιστη τιμή τους βρέθηκε ίση με 7,26% στα 22 m/sec.

Το Διάγραμμα 37, αφορά την πόλη της Αλεξανδρούπολης και απεικονίζει τη μεταβολή του λόγου C_l/C_d συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης (AoA). Και στην παρούσα περίπτωση, ο λόγος μεγιστοποιείται για γωνία 5° ενώ σχεδόν όλες οι καμπύλες συμπίπτουν, γεγονός που επίσης δικαιολογείται απόλυτα αφού δεν διαφαίνονται εξαιρετικά μεγάλες μεταβολές των αντίστοιχων αριθμών Re (Πίν. 4). Στο Διάγραμμα 37β, η ανώτερη καμπύλη αντιστοιχεί στον μήνα Ιανουάριο και η κατώτερη στον μήνα Δεκέμβριο. Με το πέρασ του χρόνου, προκύπτει σαφώς η μείωση της μέγιστης τιμής του λόγου. Κατά τους μήνες Ιανουάριο έως Μάρτιο και Νοέμβριο έως Δεκέμβριο, η μείωση της τιμής του μέγιστου λόγου χαρακτηρίζεται ως αυξημένη και δυσανάλογη σε

σχέση με τη μείωση που σημειώνεται μεταξύ των υπολοίπων περιόδων, η οποία χαρακτηρίζεται ως ομαλή. Αντίστοιχα, οι καμπύλες που περιγράφουν τη μεταβολή του συντελεστή αεροδυναμικής ισχύος C_p , φαίνεται να συμπίπτουν στο Διάγραμμα 38α ενώ οι μεταβολές απεικονίζονται ευκρινέστερα στο Διάγραμμα 38β. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 16, για $\lambda = 3$, $\lambda = 4$, $\lambda = 6$ και $\lambda = 10$, η τιμή του συντελεστή είναι μέγιστη τον Ιανουάριο, μειώνεται ελαφρώς και μέχρι τελικής τιμής τον Φεβρουάριο, ενώ για τις υπόλοιπες τιμές του λ δε σημειώνεται καμία απολύτως μεταβολή. Ωστόσο, στο Διάγραμμα 38β απεικονίζεται σαφώς η μείωση του υπό εξέταση συντελεστή για $\lambda = \lambda_{C_p, max} = 6$, όμως η κατάσταση αντιστρέφεται για $\lambda > 6,1$, οπότε και δεν μπορεί να εξαχθεί κανένα συμπέρασμα.

Στο Διάγραμμα 40, φαίνονται οι καμπύλες μεταβολής της αποδιδόμενης αεροδυναμικής ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου. Η καμπύλη που βρίσκεται ανώτερα αντιστοιχεί στον Ιανουάριο, ενώ είναι φανερό πως η καμπύλη που βρίσκεται κατώτερα, αντιστοιχεί στο μήνα Δεκέμβριο. Η αεροδυναμική υποβάθμιση του ρότορα, αποτιμάται στους Πίνακες 17 και 18, στους οποίους καταγράφονται η μέγιστη και η ελάχιστη προσδιορισθείσα ισχύς και οι συνολικές απώλειες ισχύος, για επιλεγμένες τιμές ταχύτητας ανέμου. Ανάλογα λοιπόν με όσα ήδη έχουν αναλυθεί, για τις επιλεγμένες τιμές ταχύτητας ανέμου, το ύψος της εκτιμώμενης αεροδυναμικής ισχύος κυμαίνεται κατά την πρώτη περίοδο (2014, Ιανουάριος) από 12,457 kW έως 152,560 kW, ενώ κατά τη δωδέκατη περίοδο (2014, Δεκέμβριος) από 12,315 kW έως 148,383 kW. Η ελάττωση της αποδιδόμενης αεροδυναμικής ισχύος ανά περίοδο, οφείλεται στην επίδραση της σκόνης και ταιριάζει απόλυτα με το μοτίβο της επικάθισης, όπως αυτό αναλύθηκε για την περιοχή της Αλεξανδρούπολης (Κεφ. 3, παρ. 3.3.2). Έτσι, καταγράφηκαν απώλειες ισχύος ύψους 0,069-6,197 kW, ήτοι σε ποσοστά 1,15-6,10%, ενώ είναι διακριτή η σταδιακή υποβάθμιση της αεροδυναμικής απόδοσης του ρότορα, ανά μήνα υποθετικής λειτουργίας για την υπό εξέταση χρονική περίοδο.

Ενδεικτικά αναφέρονται οι συνολικές απώλειες, ως μέγιστη απόλυτη τιμή, οι οποίες καταγράφηκαν ως εξής: για ταχύτητα ανέμου 5 m/sec σε 0,143 kW, για ταχύτητα ανέμου 10 m/sec σε 1,960 kW, για ταχύτητα ανέμου 15 m/sec σε 5,957 kW, για ταχύτητα ανέμου 20 m/sec σε 4,829 kW και για ταχύτητα ανέμου 25 m/sec σε 4,177 kW. Αντίστοιχα, οι συνολικές απώλειες, ως μέγιστη ποσοστιαία τιμή, καταγράφηκαν ως εξής: για ταχύτητα ανέμου 5 m/sec σε 1,15%, για ταχύτητα ανέμου 10 m/sec σε

3,25%, για ταχύτητα ανέμου 15 m/sec σε 6,10%, για ταχύτητα ανέμου 20 m/sec σε 4,04% και για ταχύτητα ανέμου 25 m/sec σε 2,74%. Τελικά, από τη μελέτη της κάθε περιόδου ξεχωριστά, προκύπτει ότι αυξανόμενη της ταχύτητας ανέμου αυξάνεται και η αποδιδόμενη αεροδυναμική ισχύς, γεγονός που συμφωνεί απόλυτα με τα διαλαμβανόμενα στο Κεφάλαιο 2 (παρ. 2.3.3, εξ. 5 – η αεροδυναμική ισχύς ανάλογη του τετραγώνου της αδιατάρακτης ταχύτητας ανέμου). Ωστόσο, οι απώλειες εκφρασμένες ως ποσοστό επί της αρχικά αποδιδόμενης ισχύος δίνουν την πραγματική διάσταση του φαινομένου, και στην περίπτωση της Αλεξανδρούπολης, η μέγιστη τιμή τους βρέθηκε ίση με 6,10% στα 15 m/sec.

Τα Διαγράμματα 41 έως 52 απεικονίζουν γραφικά τη μεταβολή της αποδιδόμενης αεροδυναμικής ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου ανά περίοδο και αφορούν όλες τις περιοχές μελέτης. Σε καθένα εκ των ως άνω Διαγραμμάτων, παρατηρείται ταύτιση των τεσσάρων καμπυλών για ταχύτητες ανέμου $V \leq 8$ m/sec, ενώ για $V > 8$ m/sec οι καμπύλες που αντιστοιχούν σε Λεμεσό, Θήβα και Αλεξανδρούπολη ακολουθούν το ίδιο μοτίβο μεταβολής και χαρακτηρίζονται ως όμοιες.

Στο τέλος της πρώτης περιόδου (2014, Ιανουάριος), οι καμπύλες Σητείας, Θήβας και Αλεξανδρούπολης ταυτίζονται για $V \leq 16$ m/sec, ενώ η καμπύλη της Σητείας βρίσκεται ανώτερα στο Διάγραμμα 41 για $V \geq 18$ m/sec και $V < 20$ m/sec. Κατά την ίδια περίοδο, για $V \geq 17$ m/sec, η καμπύλη της Θήβας βρίσκεται σε ανώτερη θέση σε σχέση με την καμπύλη της Αλεξανδρούπολης. Στο ίδιο Διάγραμμα, για $V > 9$ m/sec, η καμπύλη της Λεμεσού βρίσκεται πάντοτε σε κατώτερη θέση σε σχέση με τις καμπύλες που αντιστοιχούν στις υπόλοιπες περιοχές. Εξαίρεση αποτελεί η περιοχή του Διαγράμματος 41 όπου $V > 23$ m/sec, οπότε και η καμπύλη της Λεμεσού ξεπερνάει την καμπύλη της Σητείας.

Στο τέλος της δεύτερης περιόδου (2014, Φεβρουάριος), οι καμπύλες Θήβας και Αλεξανδρούπολης ταυτίζονται απολύτως, ενώ για $V > 9$ m/sec, βρίσκονται στην ανώτερη θέση στο Διάγραμμα 42 και ακολουθούν μετατοπισμένες προς τα κάτω οι καμπύλες Σητείας και Λεμεσού. Για $V > 9$ m/sec, η καμπύλη της Λεμεσού βρίσκεται πάντοτε σε κατώτερη θέση σε σχέση με τις καμπύλες που αντιστοιχούν στις υπόλοιπες

περιοχές. Εξαίρεση αποτελεί η περιοχή του Διαγράμματος 42 όπου $V > 22$ m/sec, οπότε και η καμπύλη της Λεμεσού ξεπερνάει την καμπύλη της Σητείας.

Στο τέλος της τρίτης περιόδου (2014, Μάρτιος), οι καμπύλες Θήβας και Αλεξανδρούπολης σχεδόν ταυτίζονται, ενώ για $V > 9$ m/sec, βρίσκονται στην ανώτερη θέση στο Διάγραμμα 43 και ακολουθούν μετατοπισμένες προς τα κάτω οι καμπύλες Σητείας και Λεμεσού. Για $V > 9$ m/sec, η καμπύλη της Λεμεσού βρίσκεται πάντοτε σε κατώτερη θέση σε σχέση με τις καμπύλες που αντιστοιχούν στις υπόλοιπες περιοχές. Εξαίρεση αποτελεί η περιοχή του Διαγράμματος 43 όπου $V > 21$ m/sec, οπότε και η καμπύλη της Λεμεσού ξεπερνάει την καμπύλη της Σητείας.

Στο τέλος της τέταρτης περιόδου (2014, Απρίλιος), για $V > 12$ m/sec, η καμπύλη της Θήβας βρίσκεται ελαφρώς μετατοπισμένη προς τα άνω σε σχέση με την καμπύλη της Αλεξανδρούπολης. Οι δύο καμπύλες βρίσκονται στην ανώτερη θέση στο Διάγραμμα 44 και ακολουθούν μετατοπισμένες προς τα κάτω οι καμπύλες Σητείας και Λεμεσού. Στο ίδιο Διάγραμμα, για $V > 9$ m/sec, η καμπύλη της Λεμεσού βρίσκεται πάντοτε σε κατώτερη θέση σε σχέση με τις καμπύλες που αντιστοιχούν στις υπόλοιπες περιοχές. Εξαίρεση αποτελεί η περιοχή του Διαγράμματος 44 όπου $V > 21$ m/sec, οπότε και η καμπύλη της Λεμεσού ξεπερνάει την καμπύλη της Σητείας.

Στο τέλος της πέμπτης περιόδου (2014, Μάιος), οι καμπύλες Θήβας και Αλεξανδρούπολης σχεδόν ταυτίζονται, ενώ για $V > 9$ m/sec, βρίσκονται στην ανώτερη θέση στο Διάγραμμα 45 και ακολουθούν μετατοπισμένες προς τα κάτω οι καμπύλες Σητείας και Λεμεσού. Στο ίδιο Διάγραμμα, για $V > 9$ m/sec, η καμπύλη της Λεμεσού βρίσκεται πάντοτε σε κατώτερη θέση σε σχέση με τις καμπύλες που αντιστοιχούν στις υπόλοιπες περιοχές. Εξαίρεση αποτελεί η περιοχή του Διαγράμματος 45 όπου $V > 21$ m/sec, οπότε και η καμπύλη της Λεμεσού ξεπερνάει την καμπύλη της Σητείας.

Το ίδιο μοτίβο επαναλαμβάνεται και για τις επόμενες περιόδους (Διαγρ. 46-52), παρατηρούνται όμως κάποιες διαφοροποιήσεις οι οποίες εδώ αναφέρονται για λόγους πληρότητας. Κατά τις περιόδους Ιουνίου έως και Σεπτεμβρίου και για $V > 20$ m/sec, η καμπύλη της Θήβας διαφοροποιείται ελαφρώς από την καμπύλη της Αλεξανδρούπολης και βρίσκεται ελαφρώς μετατοπισμένη προς τα κάτω. Το ίδιο συμβαίνει κατά τις

περιόδους Οκτωβρίου και Νοεμβρίου και για $V > 18$ m/sec, ενώ τον Δεκέμβριο για $V > 12$ m/sec ελαφρώς υπερβαίνει την καμπύλη της Αλεξανδρούπολης.

Από την ανάλυση των Διαγραμμάτων 41 έως 52, δεν προέκυψε ουσιαστική επίδραση της σκόνης όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι κατώτερη των 9 m/sec. Έπειτα, από τη συσχέτιση του Διαγράμματος 14 με τα Διαγράμματα 41-52, για τις περιοχές Λεμεσού και Σητείας στις οποίες καταγράφηκε συγκριτικά μεγαλύτερη συγκέντρωση σκόνης, εκτιμήθηκε σαφώς χαμηλότερη παραγωγή ενέργειας όταν η ταχύτητα ανέμου είναι ανώτερη των 9 m/sec. Μεταξύ των δύο περιοχών, η επίδραση της σκόνης γίνεται αντιληπτή για $V \geq 9$ m/sec. Σύμφωνα με τα παραπάνω, θα έπρεπε η εκτιμηθείσα τιμή ισχύος της Σητείας να υπερβαίνει εκείνη της Λεμεσού, αυτό όμως δε συμβαίνει για $V > 21 - 23$ m/sec, ανάλογα με την περίοδο μελέτης. Το γεγονός αυτό δηλώνει ότι οι υψηλή ταχύτητα του ανέμου υπερκαλύπτει την όποια επίδραση ασκούν τα επικαθήμενα σωματίδια στην αεροδυναμική απόδοση του ρότορα. Αντίθετα, για τις περιοχές Θήβας και Αλεξανδρούπολης στις οποίες καταγράφηκε συγκριτικά μικρότερη συγκέντρωση σκόνης, εκτιμήθηκε υψηλότερη παραγωγή ενέργειας όταν η ταχύτητα ανέμου είναι ανώτερη των 9 m/sec. Η ανά περίοδο μελέτης εκτιμηθείσα τιμή της αποδιδόμενη ισχύος κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα για τις δύο αυτές περιοχές, με την τιμή της Θήβας να υπερβαίνει ελαφρώς εκείνη της Αλεξανδρούπολης. Τέλος, σε σχέση με τις καμπύλες Θήβας και Αλεξανδρούπολης, η καμπύλη που αντιστοιχεί στην περιοχή της Λεμεσού βρίσκεται πάντα στην κατώτερη θέση, όταν η ταχύτητα ανέμου είναι ανώτερη των 9 m/sec, γεγονός που καταδεικνύει την υποβάθμιση της παραγωγής ενέργειας, μιας και η σύγκριση πραγματοποιείται με χρήση του ίδιου μοντέλου ρότορα και κάτω από όμοιες υποθέσεις συνθηκών λειτουργίας.

Για τις ανάγκες της σύγκρισης των υπό μελέτη περιοχών, κατασκευάσθηκαν τα Διαγράμματα 53-56, των οποίων οι τιμές καταγράφονται και στους Πίνακες 19, 22, 25 και 28. Πρόκειται για καταγραφές της εκτιμώμενης αεροδυναμικής ισχύος ανά περιοχή στο τέλος κάθε περιόδου για ταχύτητες ανέμου 5 m/sec, 10 m/sec, 15 m/sec και 20 m/sec αντίστοιχα.

Το Διάγραμμα 53 αντιστοιχεί σε ταχύτητα ανέμου 5 m/sec (3 Beaufort). Κατά το τέλος της πρώτης περιόδου (2014, Ιανουάριος) οι τιμές καταγράφηκαν ως εξής: στα 12,319 kW στη Λεμεσό, στα 12,343 kW στη Σητεία, στα 12,435 kW στη Θήβα και στα 12,457

kW στην Αλεξανδρούπολη (Πίν.19). Κατά το τέλος της δωδέκατης περιόδου (2014, Δεκέμβριος) οι τιμές καταγράφηκαν ως εξής: στα 12,171 kW στη Λεμεσό, στα 12,203 kW στη Σητεία, στα 12,315 kW στην Αλεξανδρούπολη και στα 12,332 kW στη Θήβα (Πίν. 19). Οι συνολικές απώλειες ισχύος που καταγράφηκαν έως και το τέλος της δωδέκατης περιόδου έχουν ως εξής: στα 0,148 kW ή ποσοστό 1,20% για τη Λεμεσό, στα 0,140 kW ή ποσοστό 1,13% για τη Σητεία, στα 0,143 kW ή ποσοστό 1,15% για την Αλεξανδρούπολη και στα 0,105 kW ή ποσοστό 0,85% για τη Θήβα (Πίν. 20-21). Η ταχύτητα ανέμου του σεναρίου, είναι εκ των πραγμάτων χαμηλή, συνεπώς αναμένεται χαμηλό και το ύψος της αιολικής παραγωγής. Εδώ, η σημαντικότερη υποβάθμιση συντελείται κατά τις πρώτες τρεις περιόδους, όταν δηλαδή το φαινόμενο της επικάθισης είναι εντονότερο, και αυτό ισχύει για όλες τις περιοχές. Οι απώλειες συνολικού χρόνου που καταγράφηκαν είναι της τάξης του 1%, ήτοι ισχύος 100-150 W. Επιπλέον, δεν προέκυψε ουσιαστική διαφοροποίηση των υπό μελέτη περιοχών όσον αφορά στην υπολογισθείσα τιμή αεροδυναμικής ισχύος, η οποία κυμαίνεται γύρω από τα 12 kW. Συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν υπάρχει ουσιαστική επίδραση της σκόνης για ταχύτητα ανέμου ίση με 5 m/sec.

Το Διάγραμμα 54 αντιστοιχεί σε ταχύτητα ανέμου 10 m/sec (5 Beaufort). Κατά το τέλος της πρώτης περιόδου (2014, Ιανουάριος) οι τιμές καταγράφηκαν ως εξής: στα 58,416 kW στη Λεμεσό, στα 59,323 kW στη Σητεία, στα 60,011 kW στη Θήβα και στα 60,298 kW στην Αλεξανδρούπολη (Πίν.22). Κατά το τέλος της δωδέκατης περιόδου (2014, Δεκέμβριος) οι τιμές καταγράφηκαν ως εξής: στα 56,337 kW στη Λεμεσό, στα 57,293 kW στη Σητεία, στα 58,338 kW στην Αλεξανδρούπολη και στα 58,719 kW στη Θήβα (Πίν. 22). Οι συνολικές απώλειες ισχύος που καταγράφηκαν έως και το τέλος της δωδέκατης περιόδου έχουν ως εξής: στα 2,078 kW ή ποσοστό 3,56% για τη Λεμεσό, στα 2,029 kW ή ποσοστό 3,42% για τη Σητεία, στα 1,960 kW ή ποσοστό 3,25% για την Αλεξανδρούπολη και στα 1,293 kW ή ποσοστό 2,15% για τη Θήβα (Πίν. 23-24). Εδώ, οι περισσότερες απώλειες αφορούν την περιοχή της Λεμεσού, και είναι της τάξης του 3%, ενώ ακολουθούν με φθίνουσα σειρά οι περιοχές Σητείας, Αλεξανδρούπολης και Θήβας. Επιπλέον, η σημαντικότερη υποβάθμιση συντελείται κατά τις πρώτες τρεις περιόδους, όταν δηλαδή το φαινόμενο της επικάθισης είναι εντονότερο. Παρατηρείται δηλαδή πως οι περισσότερες απώλειες αφορούν την περιοχή με το εντονότερο φαινόμενο συγκέντρωσης σκόνης, ενώ οι απώλειες λιγοστεύουν καθώς μετακινούμαστε σε περιοχές όπου το φαινόμενο εξασθενεί.

Το Διάγραμμα 55 αντιστοιχεί σε ταχύτητα ανέμου 15 m/sec (7 Beaufort). Κατά το τέλος της πρώτης περιόδου (2014, Ιανουάριος) οι τιμές καταγράφηκαν ως εξής: στα 92,008 kW στη Λεμεσό, στα 97,174 kW στη Σητεία, στα 97,667 kW στη Θήβα και στα 97,720 kW στην Αλεξανδρούπολη (Πίν.25). Κατά το τέλος της δωδέκατης περιόδου (2014, Δεκέμβριος) οι τιμές καταγράφηκαν ως εξής: στα 85,484 kW στη Λεμεσό, στα 89,415 kW στη Σητεία, στα 91,764 kW στην Αλεξανδρούπολη και στα 92,984 kW στη Θήβα (Πίν. 25). Οι συνολικές απώλειες ισχύος που καταγράφηκαν έως και το τέλος της δωδέκατης περιόδου έχουν ως εξής: στα 7,759 kW ή ποσοστό 7,98% για τη Σητεία, στα 6,524 kW ή ποσοστό 7,09% για τη Λεμεσό, στα 5,957 kW ή ποσοστό 6,10% για την Αλεξανδρούπολη και στα 5,092 kW ή ποσοστό 5,21% για τη Θήβα (Πίν. 26-27). Εδώ, οι περισσότερες απώλειες αφορούν την περιοχή της Σητείας, και είναι της τάξης του 8%, ενώ ακολουθούν με φθίνουσα σειρά οι περιοχές Λεμεσού, Αλεξανδρούπολης και Θήβας. Επιπλέον, η σημαντικότερη υποβάθμιση συντελείται κατά τις πρώτες τρεις περιόδους, όταν δηλαδή το φαινόμενο της επικάθισης είναι εντονότερο σε όλες τις περιοχές. Παρατηρείται δηλαδή πως οι περισσότερες απώλειες χαρακτηρίζουν τις περιοχές που έχουν σαφώς μεγαλύτερη συγκέντρωση σκόνης, ενώ οι απώλειες λιγοστεύουν καθώς μετακινούμαστε σε περιοχές όπου το φαινόμενο εξασθενεί.

Το Διάγραμμα 56 αντιστοιχεί σε ταχύτητα ανέμου 20 m/sec (8 Beaufort). Κατά το τέλος της πρώτης περιόδου (2014, Ιανουάριος) οι τιμές καταγράφηκαν ως εξής: στα 114,880 kW στη Λεμεσό, στα 124,857 kW στη Σητεία, στα 122,113 kW στη Θήβα και στα 119,469 kW στην Αλεξανδρούπολη (Πίν.28). Κατά το τέλος της δωδέκατης περιόδου (2014, Δεκέμβριος) οι τιμές καταγράφηκαν ως εξής: στα 107,214 kW στη Λεμεσό, στα 112,510 kW στη Σητεία, στα 119,469 kW στην Αλεξανδρούπολη και στα 122,113 kW στη Θήβα (Πίν. 28). Οι συνολικές απώλειες ισχύος που καταγράφηκαν έως και το τέλος της δωδέκατης περιόδου έχουν ως εξής: στα 12,723 kW ή ποσοστό 10,19% για τη Σητεία, στα 7,666 kW ή ποσοστό 6,67% για τη Λεμεσό, στα 8,756 kW ή ποσοστό 7,17% για τη Θήβα και στα 4,829 kW ή ποσοστό 4,04% για την Αλεξανδρούπολη (Πίν. 29-30). Εδώ, οι περισσότερες απώλειες αφορούν την περιοχή της Σητείας, και είναι της τάξης του 10%, ενώ ακολουθούν με φθίνουσα σειρά οι περιοχές Λεμεσού, Θήβας και Αλεξανδρούπολης. Επιπλέον, η σημαντικότερη υποβάθμιση, συντελείται κατά τις δύο πρώτες περιόδους, οπότε και χάνεται το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος (περίπου 75% των συνολικών απωλειών).

Σε κάθε περίπτωση, και όπως αποδεικνύεται από τους Πίνακες 20, 23, 25 και 28, στο τέλος της δωδέκατης και τελευταίας περιόδου, η υψηλότερη τιμή της αεροδυναμικής ισχύος, καταγράφεται πάντα στη περιοχή της θήβας, ενώ ακολουθούν με φθίνουσα σειρά οι τιμές που αφορούν τις περιοχές Αλεξανδρούπολης, Σητείας και Λεμεσού. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη και τα Διαγράμματα 12, 13 και 14, μπορούμε να κατανοήσουμε το βαθμό της επίδρασης της επικαθήμενης στην παραγωγή αιολικής ισχύος. Γενικεύοντας λοιπόν την παραπάνω παρατήρηση, συμπεραίνουμε ότι η παραγωγή αιολικής ισχύος διέπεται από απώλειες αεροδυναμικής φύσεως, όταν το περιβάλλον λειτουργίας χαρακτηρίζεται από αυξημένη συγκέντρωση και έντονη επικάθιση σκόνης.

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας λόγω επικάθισης σκόνης στις πτέρυγες του ρότορα, όμως τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτίμηση του φαινομένου σε περιοχές που εμφανίζουν διέπονται από παρόμοιες περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις προσομοιώσεις Α' και Β' φάσης, συμφωνούν απόλυτα με τη θεωρία και αποδεικνύουν την συσχέτιση τραχύτητας και αριθμού Re , και την επίδρασή τους στα αεροδυναμικά μεγέθη C_l , C_d και στην απόδοση της παραγωγής. Επίσης, συμφωνούν με την πλειοψηφία των δημοσιευμένων μελετών που υπέπεσαν στη αντίληψη του συγγραφέα και στις οποίες υποστηρίζεται πως η επιφανειακή τραχύτητα αλληλεπιδρά με τον αριθμό Re με αποτέλεσμα τη μεταβολή των αεροδυναμικών μεγεθών και την καταγραφή απωλειών.

5.2 Περιορισμοί της μελέτης

Ο σημαντικότερος περιορισμός της μελέτης, αφορά στην τραχύτητα ως μεταβλητή και την προσέγγιση της επίδρασής της στην ηλεκτροπαραγωγή. Τα πραγματικά δεδομένα, αφορούν συγκέντρωση σκόνης σε ύψος 10 m, οι αιολικές μηχανές λειτουργούν σε υψόμετρο 70-80 m, ενώ δεν υπάρχουν πληροφορίες για το ρυθμό επικάθισης και την κατανομή των σωματιδίων στις επιφάνειες. Επιπλέον, παρόλο που το QBlade αποτελεί εργαλείο ιδανικό για την πραγματοποίηση μίας τέτοιας μελέτης, το ύψος τραχύτητας ως μεταβλητή δεν μπορεί να εισαχθεί σε καμία από τις υπορουτίνες του. Έτσι, η συσχέτιση επικαθήμενης σκόνης, ύψους τραχύτητας και δεδομένων εισαγωγής στο QBlade, υποβοηθήθηκε από χρήση εμπειρικών σχέσεων και άλλων προσεγγίσεων της εγχώριας και της διεθνούς βιβλιογραφίας. Ωστόσο, κατά την αναζήτηση κατάλληλων

πληροφοριών, διαπιστώθηκε απουσία εξειδικευμένων επιστημονικών άρθρων, τέτοιων που να μπορούν να υποστηρίξουν το αντικείμενο της παρούσας μελέτης. Το ερευνητικό ενδιαφέρον εστιάζεται στην πιθανή επίδραση της σκόνης και στην επίδραση που ασκούν οι αριθμοί Re και Ma στις μεταβολές των αεροδυναμικών μεγεθών και δη του λόγου C_l/C_d . Για το λόγο αυτό, στην παρούσα μελέτη θεωρείται δεδομένη η αρνητική επίδραση της τραχύτητας στα αεροδυναμικά μεγέθη, αν και στην πραγματικότητα, όταν το περιβάλλον λειτουργίας χαρακτηρίζεται από αυξημένη συγκέντρωση σκόνης, μεγάλο μέρος των απωλειών οφείλεται σε τριβολογικά φαινόμενα.

Ένας άλλος περιορισμός, είναι η απουσία της πειραματικής διάταξης. Δεν υπάρχει δυνατότητα ούτε συλλογής πειραματικών δεδομένων απευθείας από Α/Π, ούτε και πρόσβασης σε κατάλληλο εργαστηριακό εξοπλισμό. Αυτό συνεπάγεται ολοκλήρωση της μελέτης χωρίς τη βοήθεια συμβουλευτικών και υποστηρικτικών πληροφοριών. Μελέτες τέτοιου είδους, όταν περιλαμβάνουν πειραματική διάταξη, ιδανικά ολοκληρώνονται με λιγότερες θεωρητικές προσεγγίσεις και τη δυνατότητα εξαγωγής ασφαλέστερων συμπερασμάτων.

Για την επίτευξη των στόχων της μελέτης χρειάστηκε να πραγματοποιηθούν αρκετές δοκιμές μέχρι να οριστικοποιηθεί η παραμετροποίηση των προσομοιώσεων. Αρχικά, με την προσέγγιση της ελάττωσης του αριθμού Re και την εκλογή σταθερού αριθμού Ma , προσδιορίστηκαν τα δεδομένα που χρειάζεται το QBlade για να εκτελέσει το πρώτο στάδιο των προσομοιώσεων. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη βιβλιογραφική έρευνα, ώστε να προσδιορισθούν ο τύπος της αεροτομής και η γεωμετρία του μοντέλου, και να κριθούν ως προς την καταλληλότητα τους για την υποθετική λειτουργία στις επιλεχθείσες συνθήκες πεδίου. Η πραγματοποίηση δοκιμών, λαμβάνει χώρα κατά την αδιάστατη και κατά την πολυπαραμετρική προσομοίωση, όπου ο αριθμός παραμετρικών συνδυασμών, είναι μεν πεπερασμένος, αλλά πρακτικά μεγάλος για τα πλαίσια της παρούσας μελέτης. Έτσι, η εκλογή των κατάλληλων παραμέτρων χρήζει μεγάλης προσοχής και για τις ανάγκες της παρούσας Μεταπτυχιακής Διατριβής έγινε συνοπτικά και δικαιολογημένα, έτσι ώστε να φανεί η επίδραση των επικαθήμενων σωματιδίων στην απόδοση αιολικής παραγωγής.

Κάθε προσομοίωση, παράγει αποτελέσματα τα οποία δίνουν πληροφορίες για όλα τα αεροδυναμικά μεγέθη που αφορούν τις αεροτομές, τις πτέρυγες και συνολικά το

ρότορα. Το γεγονός αυτό, αποτελεί ένα θετικό αλλά και χρηστικό χαρακτηριστικό του QBlade, για ευνόητους όμως λόγους, στην παρούσα μελέτη δεν παρουσιάζονται και δεν αναλύονται όλα τα μεγέθη. Έτσι, η εκλογή των κατάλληλων μεγεθών είναι ενδεικτική και αφορά στα μεγέθη που σχετίζονται με την απόδοση της αιολικής παραγωγής.

Μετά την ολοκλήρωση της στατιστικής επεξεργασίας των πραγματικών δεδομένων, ακολούθησε η συσχέτιση επικάθισης σκόνης και καθεστώτος ροής, από την οποία μπορεί να προσδιορισθούν οι αριθμοί Re που αντιστοιχούν σε κάθε ωριαία τιμή αθροιστικής επικάθισης σκόνης. Για κάθε αριθμό Re μπορεί να εκτελεστεί πολυπαραμετρική προσομοίωση και να δώσει ακριβείς πληροφορίες για την απόδοση αεροδυναμικής ισχύος. Ειδικότερα, για κάθε ωριαία τιμή αθροιστικής επικάθισης, δίνεται η δυνατότητα προσδιορισμού της ωριαίας τιμής ισχύος για επιλεγμένη ταχύτητα ανέμου. Εάν είχαμε στη διάθεσή μας ωριαίες μετρήσεις ταχύτητας ανέμου, θα μπορούσαμε να προσδιορίσουμε σε κάθε περιοχή την ωριαία αποδιδόμενη ισχύ, την ωριαία παραγωγή και το σύνολο των ετήσιων απωλειών παραγωγής ενέργειας σε πραγματικούς αριθμούς. Κάτι τέτοιο όμως απαιτεί την εκτέλεση περίπου 35.000 προσομοιώσεων, γεγονός που υπερβαίνει τις απαιτήσεις της παρούσας Μεταπτυχιακής Διατριβής. Για το λόγο αυτό, η μελέτη περιορίζεται στην εκτίμηση της ωριαίας τιμής ισχύος στο τέλος του κάθε μήνα (τελευταία ώρα) έτσι ώστε να αποτιμηθεί ενδεικτικά η επίδραση του φαινομένου της επικάθισης σκόνης στην απόδοση αιολικής παραγωγής, και σε καμία περίπτωση οι απώλειες που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4 δεν επιτρέπεται να αθροισθούν, και οποιαδήποτε αριθμητική πράξη μεταξύ των αποτελεσμάτων με σκοπό τον υπολογισμό των ετήσιων απωλειών ενέργειας, αντιβαίνει στις βασικές μαθηματικές αρχές.

5.3 Συμπεράσματα

Από την επικάθιση της σκόνης στις επιφάνειες των πτερύγων του ρότορα ή ταυτόσημα την αύξηση της επιφανειακής τραχύτητας, προκαλείται υποβάθμιση της αεροδυναμικής απόδοσης και υπό δυσμενέστερες συνθήκες, απώλεια στήριξης. Είναι λοιπόν αναγκαία η ποιοτική και ποσοτική προσέγγιση των μεταβολών στα ασκούμενα φορτία, για λόγους διευκόλυνσης των σχεδιαστών ως προς την πρόγνωση και εξάλειψη των ενεργειακών απωλειών.

Καθώς η σκόνη συσσωρεύεται στις επιφάνειες, και δη στην περιοχή του χείλους προσβολής, αυξάνεται η αντίσταση και ελαττώνεται η άνωση, με αρνητικές συνέπειες στην αεροδυναμική του ρότορα. Τότε, υποβαθμίζεται η απόδοσή του και η τιμή της αεροδυναμικής ισχύος σταδιακά αποκλίνει από την επιθυμητή, την τιμή δηλαδή που καθορίστηκε κατά τον αρχικό σχεδιασμό. Παρόλο που οι απώλειες που προσδιορίστηκαν είναι της τάξης ακόμα και του 10%, η ανεξέλεγκτη συσσώρευση σκόνης, θα μπορούσε να δημιουργήσει μεγάλα διαστήματα παύσης λειτουργίας και κατά συνέπεια μηδενική παραγωγή ενέργειας.

Στις περιοχές όπου το φαινόμενο της επικάθισης είναι εντονότερο εκτιμήθηκε μεγάλο ύψος ενεργειακών απωλειών, ενώ αυτές λιγοστεύουν καθώς μετακινούμαστε σε περιοχές όπου το φαινόμενο εξασθενεί. Όσον αφορά στην ανάλυση και την αποτίμηση του φαινομένου, ορισμένες προσεγγίσεις έχουν καταγραφεί στο σκέλος της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

Τα Α/Π που λειτουργούν σε περιβάλλον που χαρακτηρίζεται από ανάλογες συνθήκες εμφανίζουν ενεργειακές απώλειες, οι οποίες σχετίζονται με την αύξηση της επιφανειακής τραχύτητας στις πτέρυγες, λόγω της ύπαρξης σκόνης. Οι απώλειες αυτές, κρίνονται ως σημαντικές, καθώς, όσον αφορά στην παραγωγή ενέργειας, οποιαδήποτε απόκλιση από την επιθυμητή τιμή δυσχεραίνει τη λειτουργία της εγκατάστασης και απειλεί ολόκληρη την επένδυση.

5.4 Εισηγήσεις

Όπως κατέστη ήδη σαφές, η πρόγνωση και η αντιμετώπιση των επιπτώσεων της επικάθισης σωματιδίων στις πτέρυγες, είναι κριτικής σημασίας για την ορθή λειτουργία των Α/Γ. Οι εμπλεκόμενοι με τη διαχείριση αιολικής ενέργειας θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την επίδραση του φαινομένου ώστε να κρίνουν το αν, το πότε και το πώς θα ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα αντιμετώπισης και εξομάλυνσης της λειτουργίας των Α/Π που βρίσκονται υπό ανάλογες συνθήκες.

Όσον αφορά στην πρόγνωση συγκεκριμένου πεδίου μελέτης, προτείνεται η περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου με σχεδιασμό μοντέλου κατάλληλου για το εν λόγω πεδίο και χρήση δεδομένων επικάθισης και στοιχείων αιολικού δυναμικού που να περιγράφουν πλήρως τις υφιστάμενες συνθήκες πεδίου.

Όσον αφορά την αντιμετώπιση των επιπτώσεων, προτείνονται τακτικοί καθαρισμοί των πτερύγων, ήτοι ανά τρίμηνο ή τετράμηνο και όχι συχνότερα για Α/Γ που λειτουργούν υπό ανάλογες συνθήκες. Αν από την εις βάθος χρόνου μελέτη του φαινομένου φανεί ότι αυτό εμφανίζει περιοδικότητα, ο προσδιορισμός των περιόδων καθαρισμού δε θα είναι τόσο περίπλοκος. Τότε, προτείνεται οι καθαρισμοί να πραγματοποιούνται μετά από τις περιόδους έντονης επικάλυψης.

Επειδή οι εργασίες συντήρησης και καθαρισμού απαιτούν παύση λειτουργίας των Α/Γ για κάποιο διάστημα, αυτές δεν πρέπει να πραγματοποιούνται ποτέ κατά τη θερινή περίοδο, γιατί τότε αναμένεται η μέγιστη αιολική εκμετάλλευση και τα Α/Π χρήζουν συνεχούς λειτουργίας. Προτείνονται λοιπόν οπωσδήποτε δύο καθαρισμοί, ένας μόλις πριν και ένας αμέσως μετά τη θερινή περίοδο ή την περίοδο μέγιστης εκμετάλλευσης, η οποία δύναται να προσαρμοσθεί αποκλειστικά στα δεδομένα αιολικού δυναμικού της εκάστοτε περιοχής.

Κεφάλαιο 6

Επίλογος

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή, μελετήθηκε και αναλύθηκε η επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας των πτερύγων του ρότορα στην αεροδυναμική τους απόδοση. Το φαινόμενο προσεγγίστηκε τόσο βιβλιογραφικά όσο και υπολογιστικά, και με τη βοήθεια του εργαλείου QBlade κατασκευάστηκε πρότυπο μοντέλο ρότορα, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση προσομοιωτικών διαδικασιών. Από τις εκτελεσθείσες προσομοιώσεις, αποδείχθηκε η αεροδυναμική υποβάθμιση και εκτιμήθηκαν, ως έναν βαθμό, οι απώλειες αιολικής ισχύος.

Στο υπολογιστικό μέρος της μελέτης, οι προσομοιώσεις αφορούσαν σε δοκιμές για διαφορετικά καθεστώτα ροής. Μεταβάλλοντας τους αριθμούς Re και Ma , στην πραγματικότητα μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά της ροής και καθεμία από τις δοκιμές, αντιστοιχήθηκε πρακτικά σε διαφορετικό καθεστώς ροής. Έτσι, εισήχθησαν στο QBlade διαφορετικοί συνδυασμοί αριθμών Re και Ma , και μελετήθηκαν οι μεταβολές των συντελεστών άνωσης και αντίστασης, οι οποίοι ευθύνονται για τις αεροδυναμικές μεταβολές που λαμβάνουν χώρα στις αεροτομές και τις αυξομειώσεις της αεροδυναμικής απόδοσης.

Αποδείχθηκε ότι η συσσώρευση σκόνης στις επιφάνειες των πτερύγων υποβαθμίζει την αεροδυναμική απόδοση του ρότορα και επιδρά σημαντικά στο μέγεθος της ηλεκτροπαραγωγής από Α/Γ. Οι δυνατότητες διερεύνησης του φαινομένου δεν εξαντλήθηκαν, μιας και οι συνδυασμοί μεταξύ των μεταβλητών που εισάγονται στο πρόγραμμα και των παραμέτρων μοντελοποίησης και προσομοίωσης είναι πρακτικά άπειροι και εδώ χρησιμοποιούνται μόνο ενδεικτικά. Έτσι, τα αποτελέσματα της μελέτης αφήνουν περιθώρια για περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης της τραχύτητας και αποτίμηση του φαινομένου με χρήση του QBlade.

Παράρτημα Α

Συντομογραφίες και Σύμβολα

A.1 Κατάλογος Ακρωνυμίων

A/Γ	Ανεμογεννήτρια
A/Π	Αιολικό Πάρκο
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΑοΑ	Angle of Attack
BEM	Blade Element Momentum
CAD	Computer-Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
DTU	Danmarks Tekniske Universitet
ΕΚΠΑ	Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
ΕΛΕΤΑΕΝ	Ελληνική Εταιρεία Αιολικής Ενέργειας (μετον. Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας)
GWEK	Global Wind Energy Council
ΙΕΣΕ	Ινστιτούτο Επιταχυντικών Συστημάτων & Εφαρμογών
ΚΑΠΕ	Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας
ΚΥΤ	Κέντρα Υψηλής Τάσης
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NREL	National Renewable Energy Laboratory
NWTC	Northeast Wisconsin Technical College
ΟΑΜ&ΠΚ	Ομάδα Ατμοσφαιρικών Μοντέλων και Πρόγνωσης Καιρού
SERI	Solar Energy Research Institute
TUB	Technische Universität Berlin
ΥΠΕ	Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας
ΥΠΕΚΑ	Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας & Κλιματικής Αλλαγής
Φ/Β	Φωτοβολταϊκά

A.2 Επεξήγηση συμβόλων

α	Συντελεστής αξονικής επαγωγής (αδιάστατος)
α'	Συντελεστής γωνιακής επαγωγής (αδιάστατος)
α_∞	Τοπική ταχύτητα μετάδοσης ήχου (m/sec)
A	Επιφάνεια κυκλικού δίσκου που σαρώνει ο ρότορας (m^2)
A_b	Επιφάνεια πτέρυγας (m^2)
β	Γωνία μεταξύ ταχύτητας ανέμου και σχετικής ταχύτητας
B	Αριθμός πτερύγων ρότορα
b	Πλάτος πτέρυγας (m)
γ	Εκθέτης ισεντροπικής μεταβολής
C_d	Συντελεστής αντίστασης (αδιάστατος)
C_f	Τοπικός συντελεστής τριβής (αδιάστατος)
C_l	Συντελεστής άνωσης (αδιάστατος)
C_m	Συντελεστής ροπής (αδιάστατος)
C_p	Συντελεστής ισχύος (αδιάστατος)
C_t	Συντελεστής ώσης (αδιάστατος)
c	Μήκος χορδής αεροτομής (m)
D	Αεροδυναμική αντίσταση (N)
ε_s	Ισοδύναμη τραχύτητα άμμου (mm)
f	Συχνότητα περιστροφής (Hz)
h_{av}	Μέσο ύψος στρώματος επικαθήμενης σκόνης (m)
I	Ροπή αδράνειας κυκλικού δίσκου (m^4)
k	Ύψος τραχύτητας (mm)
λ	Λόγος προχώρησης (αδιάστατος)
λ_r	Τοπικός λόγος προχώρησης (αδιάστατος)
L	Αεροδυναμική άνωση (N)
L_δ	Στροφορμή κυκλικού δίσκου ($(kg \cdot m^2)/sec$)
μ	Δυναμικό ιξώδες ($kg/(m \cdot sec)$)
M_b	Ροπή κάμψης πτέρυγας ($N \cdot m$)
Ma	Αριθμός Mach (αδιάστατος)
MPL	Μέση απώλεια ισχύος (%)
m	Μάζα αέρα (kg)
\dot{m}	Παροχή αέρα (kg/sec)

m_σ	Μάζα επικαθήμενης σκόνης (gr)
ν	Κινηματικό ιξώδες (m^2/sec)
P	Αεροδυναμική ισχύς (W)
P_{wind}	Αιολική ισχύς (W)
Q	Συντελεστής διόρθωσης (αδιάστατος)
ρ	Πυκνότητα ρευστού μέσου (kg/m^3)
ρ_σ	Πυκνότητα σκόνης (kg/m^3)
R	Μήκος ακτίνας ρότορα (m)
Re	Αριθμός Reynolds (αδιάστατος)
Re_x	Τοπικός αριθμός Reynolds (αδιάστατος)
r	Ακτινική θέση κατά μήκος της πτέρυγας (m)
r_{hub}	Ακτινική θέση βάσης πτέρυγας (m)
σ	Συντελεστής πληρότητας (αδιάστατος)
σ_r	Τοπικός συντελεστής πληρότητας (αδιάστατος)
T	Στρεπτική ροπή κυκλικού δίσκου ($N \cdot m$)
T_∞	Απόλυτη θερμοκρασία ($^\circ C$)
U_∞	Αδιατάρακτη ταχύτητα ανέμου (m/sec)
V_σ	Όγκος επικαθήμενης σκόνης (m^3)
W	Σχετική ταχύτητα ανέμου στην πτέρυγα (m/sec)
Ω	Γωνιακή ταχύτητα ρότορα (sec^{-1})
ω	Γωνιακή ταχύτητα απορρέυματος (sec^{-1})

Παράρτημα Β

Εικόνες, Πίνακες, Διαγράμματα

Β.1 Κατάλογος Εικόνων

- Εικόνα 1.** Βασικά μέρη Α/Γ οριζοντίου άξονα.
- Εικόνα 2.** Συγκέντρωση σκόνης στην περιοχή της Μεσογειακής Ευρώπης.
- Εικόνα 3.** Τρισδιάστατη άποψη μεμονωμένης αεροτομής και τμήμα πτέρυγας.
- Εικόνα 4.** Δυνάμεις και κατανομή πιέσεων σε αεροτομή.
- Εικόνα 5.** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αεροτομής.
- Εικόνα 6.** Ελικοειδής τροχιά στοιχειώδους σωματιδίου ρευστού.
- Εικόνα 7.** Αξονικό ρεύμα αέρα γύρω από το ρότορα της Α/Γ.
- Εικόνα 8.** Περιστρεφόμενο απόρρευμα γύρω από την Α/Γ.
- Εικόνα 9.** Τρίγωνο ταχυτήτων σε πτέρυγα Α/Γ.
- Εικόνα 10.** Δυνάμεις που αναπτύσσονται στην πτέρυγα.
- Εικόνα 11.** Πρόβλεψη εγκατάστασης αιολικής ισχύος ανά Δήμο.
- Εικόνα 12.** Προφίλ αεροτομής μετά από τρίμηνη περίοδο λειτουργίας σε περιβάλλον με σκόνη.
- Εικόνα 13.** Χαρακτηριστική θέση των υπό μελέτη περιοχών στην Ελλάδα.
- Εικόνα 14.** Χαρακτηριστική θέση της υπό μελέτη περιοχής στην Κύπρο.
- Εικόνα 15.** Εκτελέσιμες υπορουτίνες στο περιβάλλον του QBlade.
- Εικόνα 16.** Κατανομή πιέσεων γύρω από αεροτομή τύπου NACA 5518 υπολογισμένη στο XFRLR5 ($Re=2 \times 10^6$, $Ma=0,1$, $AoA=15^\circ$).
- Εικόνα 17.** Περιβάλλον σχεδιασμού Α/Γ οριζοντίου άξονα στο QBlade.
- Εικόνα 18.** Κατασκευή αεροτομής NACA 5518 στο QBlade.
- Εικόνα 19.** Αεροτομές βάσης μοντέλου.
- Εικόνα 20.** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλου.
- Εικόνα 21.** Διάγραμμα ροής διεργασιών στο QBlade.
- Εικόνα 22.** Πρόοψη και πλάγια όψη μοντέλου.

B.2 Κατάλογος Πινάκων

- Πίνακας 1.** Γεωγραφική θέση των υπό μελέτη περιοχών.
- Πίνακας 2.** Μέση ωριαία επικάθιση σκόνης ανά μήνα το 2014 ($\mu\text{gr}/\text{m}^2$).
- Πίνακας 3.** Αθροιστική επικάθιση σκόνης στο τέλος κάθε μήνα το έτος 2014 (gr/m^2).
- Πίνακας 4.** Αθροιστική επικάθιση σκόνης στο τέλος κάθε μήνα (έτος 2014) και αντίστοιχοι αριθμοί Reynolds.
- Πίνακας 5.** Αθροιστική επικάθιση σκόνης στο τέλος κάθε μήνα (έτος 2014) και αντίστοιχοι αριθμοί Reynolds.
- Πίνακας 6.** Τιμές μέγιστου λόγου C_l/C_d και αντίστοιχες γωνίες πρόσπτωσης για διαφορετικούς αριθμούς Re .
- Πίνακας 7.** Λεμεσός: Μηνιαία διακύμανση αδιάστατου συντελεστή ισχύος C_p για επιλεγμένες τιμές λόγου προχώρησης λ .
- Πίνακας 8.** Λεμεσός: Αεροδυναμική ισχύς P για μηδενική γωνία πρόνευσης.
- Πίνακας 9.** Λεμεσός: Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° .
- Πίνακας 10.** Σητεία: Μηνιαία διακύμανση αδιάστατου συντελεστή ισχύος C_p για επιλεγμένες τιμές λόγου προχώρησης λ .
- Πίνακας 11.** Σητεία: Αεροδυναμική ισχύς P για μηδενική γωνία πρόνευσης.
- Πίνακας 12.** Σητεία: Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° .
- Πίνακας 13.** Θήβα: Μηνιαία διακύμανση αδιάστατου συντελεστή ισχύος C_p για επιλεγμένες τιμές λόγου προχώρησης λ .
- Πίνακας 14.** Θήβα: Αεροδυναμική ισχύς P για μηδενική γωνία πρόνευσης.
- Πίνακας 15.** Θήβα: Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° .
- Πίνακας 16.** Αλεξανδρούπολη: Μηνιαία διακύμανση αδιάστατου συντελεστή ισχύος C_p για επιλεγμένες τιμές λόγου προχώρησης λ .
- Πίνακας 17.** Αλεξανδρούπολη: Αεροδυναμική ισχύς P για μηδενική γωνία πρόνευσης.
- Πίνακας 18.** Αλεξανδρούπολη: Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° .
- Πίνακας 19.** Εκτιμώμενη αεροδυναμική ισχύς στο τέλος κάθε περιόδου για ταχύτητα ανέμου $V = 5 \text{ m/sec}$.
- Πίνακας 20.** Απώλειες συνολικές και τμηματικές περιόδων έτους 2014 για ταχύτητα ανέμου $V = 5 \text{ m/sec}$.

- Πίνακας 21.** Απώλειες συνολικές και τμηματικές περιόδων έτους 2014 για ταχύτητα ανέμου $V = 5 \text{ m/sec}$.
- Πίνακας 22.** Εκτιμώμενη αεροδυναμική ισχύς στο τέλος κάθε περιόδου για ταχύτητα ανέμου $V = 10 \text{ m/sec}$.
- Πίνακας 23.** Απώλειες συνολικές και τμηματικές περιόδων έτους 2014 για ταχύτητα ανέμου $V = 10 \text{ m/sec}$.
- Πίνακας 24.** Απώλειες συνολικές και τμηματικές περιόδων έτους 2014 για ταχύτητα ανέμου $V = 10 \text{ m/sec}$.
- Πίνακας 25.** Εκτιμώμενη αεροδυναμική ισχύς στο τέλος κάθε περιόδου για ταχύτητα ανέμου $V = 15 \text{ m/sec}$.
- Πίνακας 26.** Απώλειες συνολικές και τμηματικές περιόδων έτους 2014 για ταχύτητα ανέμου $V = 15 \text{ m/sec}$.
- Πίνακας 27.** Απώλειες συνολικές και τμηματικές περιόδων έτους 2014 για ταχύτητα ανέμου $V = 15 \text{ m/sec}$.
- Πίνακας 28.** Εκτιμώμενη αεροδυναμική ισχύς στο τέλος κάθε περιόδου για ταχύτητα ανέμου $V = 20 \text{ m/sec}$.
- Πίνακας 29.** Απώλειες συνολικές και τμηματικές περιόδων έτους 2014 για ταχύτητα ανέμου $V = 20 \text{ m/sec}$.
- Πίνακας 30.** Απώλειες συνολικές και τμηματικές περιόδων έτους 2014 για ταχύτητα ανέμου $V = 20 \text{ m/sec}$.

B.3 Κατάλογος Διαγραμμάτων

- Διάγραμμα 1.** Παγκόσμια ετήσια εγκατάσταση αιολικής ισχύος 2000 – 2015.
- Διάγραμμα 2.** Παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς 2000 – 2015.
- Διάγραμμα 3.** Κατάταξη χωρών σύμφωνα με την εγκατεστημένη αιολική ισχύ.
- Διάγραμμα 4.** Εγκατεστημένη αιολική ισχύς. Κατανομή στον ελλαδικό χώρο.
- Διάγραμμα 5.** Χαρακτηριστική καμπύλη της A/Γ για διαφορετικές περιόδους λειτουργίας κατά τις οποίες δεν πραγματοποιούνται καθαρισμοί.
- Διάγραμμα 6.** Μέση απώλεια ισχύος A/Γ για τις υπό εξέταση περιόδους λειτουργίας.
- Διάγραμμα 7.** Ισχύς A/Γ για διαφορετικά πάχη στρώματος σκόνης και για εύρος τιμών ταχύτητας ανέμου.
- Διάγραμμα 8.** Απώλεια ισχύος A/Γ για διαφορετική διάμετρο κόκκων σκόνης.
- Διάγραμμα 9.** Μεταβολή συντελεστών άνωσης και οπισθέλκουσας.
- Διάγραμμα 10.** Μεταβολή συντελεστών άνωσης και οπισθέλκουσας.
- Διάγραμμα 11.** Ποσοστιαία μεταβολή συντελεστή άνωσης.
- Διάγραμμα 12.** Μέση ωριαία επικάθιση σκόνης ανά ημέρα (2014).
- Διάγραμμα 13.** Μέση ωριαία επικάθιση σκόνης ανά μήνα (2014).
- Διάγραμμα 14.** Ετήσια αθροιστική επικάθιση σκόνης (έτος 2014).
- Διάγραμμα 15.** Συντελεστής άνωσης. Εξαγωγή πολικών συντεταγμένων αεροτομών τύπου NACA 0018, 0028, 5518 και 5528 στις 360°.
- Διάγραμμα 16.** Αεροδυναμική ροπή. Σύγκριση πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα των εργαλείων QBlade και WT_Perf.
- Διάγραμμα 17.** Καμπύλες πολικών συντεταγμένων για εύρος γωνιών -5° έως 25° (AoA) και διαφορετικούς αριθμούς Re . (α) Συντελεστής άνωσης C_l . (β) Συντελεστής αντίστασης C_d . (γ) Λόγος C_l/C_d .
- Διάγραμμα 18.** Μέγιστη τιμή λόγου C_l/C_d συναρτήσει του αριθμού Re .
- Διάγραμμα 19.** Καμπύλες πολικών συντεταγμένων για εύρος γωνιών 0° έως 360° (AoA) για διαφορετικούς αριθμούς Re . (α) Συντελεστής άνωσης C_l . (β) Συντελεστής αντίστασης C_d . (γ) Λόγος C_l/C_d . (δ) Υπόμνημα.
- Διάγραμμα 20.** Μεταβολή συντελεστή άνωσης C_l συναρτήσει του τοπικού λόγου προχώρησης λ_r για διαφορετικούς αριθμούς Re και επιλεγμένα λ . (α) $\lambda = 5$, (β) $\lambda = 6$, και (γ) $\lambda = 6,5$.

- Διάγραμμα 21.** Μεταβολή συντελεστή άνωσης C_d συναρτήσει του τοπικού λόγου προχώρησης λ_r για διαφορετικούς αριθμούς Re και επιλεγμένα λ . (α) $\lambda = 5$, (β) $\lambda = 6$, και (γ) $\lambda = 6,5$.
- Διάγραμμα 22.** Μεταβολή λόγου C_l/C_d συναρτήσει του τοπικού λόγου προχώρησης λ_r για διαφορετικούς αριθμούς Re και επιλεγμένα λ . (α) $\lambda = 5$, (β) $\lambda = 6$, και (γ) $\lambda = 6,5$.
- Διάγραμμα 23.** Μεταβολή συντελεστή αξονικής επαγωγής α συναρτήσει της ακτινικής θέσης για επιλεγμένα λ . (α) $\lambda = 5$, (β) $\lambda = 6$, και (γ) $\lambda = 6,5$.
- Διάγραμμα 24.** Μεταβολή αδιάστατου συντελεστή ισχύος C_p συναρτήσει του λόγου προχώρησης λ . (α) Πλήρης ανάπτυξη, και (β) Μεγέθυνση επιλεγμένης περιοχής.
- Διάγραμμα 25.** Λεμεσός: Μηνιαία μεταβολή λόγου C_l/C_d για εύρος γωνιών -5° έως 25° (AoA). (α) Πλήρης ανάπτυξη. (β) Μεγέθυνση στην περιοχή της μέγιστης τιμής.
- Διάγραμμα 26.** Λεμεσός: Μηνιαία μεταβολή C_p για $1 \leq \lambda \leq 10$. (α) Πλήρης ανάπτυξη. (β) Μεγέθυνση στην περιοχή της μέγιστης τιμής. (γ) Υπόμνημα.
- Διάγραμμα 27.** Αεροδυναμική ισχύς P για μηδενική γωνία πρόνευσης.
- Διάγραμμα 28.** Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° .
- Διάγραμμα 29.** Σητεία: Μηνιαία μεταβολή λόγου C_l/C_d για εύρος γωνιών -5° έως 25° (AoA). (α) Πλήρης ανάπτυξη. (β) Μεγέθυνση στην περιοχή της μέγιστης τιμής.
- Διάγραμμα 30.** Σητεία: Μηνιαία μεταβολή C_p για $1 \leq \lambda \leq 10$. (α) Πλήρης ανάπτυξη. (β) Μεγέθυνση στην περιοχή της μέγιστης τιμής. (γ) Υπόμνημα.
- Διάγραμμα 31.** Αεροδυναμική ισχύς P για μηδενική γωνία πρόνευσης.
- Διάγραμμα 32.** Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° .
- Διάγραμμα 33.** Θήβα: Μηνιαία μεταβολή λόγου C_l/C_d για εύρος γωνιών -5° έως 25° (AoA). (α) Πλήρης ανάπτυξη. (β) Μεγέθυνση στην περιοχή της μέγιστης τιμής.
- Διάγραμμα 34.** Θήβα: Μηνιαία μεταβολή C_p για $1 \leq \lambda \leq 10$. (α) Πλήρης ανάπτυξη. (β) Μεγέθυνση στην περιοχή της μέγιστης τιμής. (γ) Υπόμνημα.
- Διάγραμμα 35.** Αεροδυναμική ισχύς P για μηδενική γωνία πρόνευσης.
- Διάγραμμα 36.** Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° .

- Διάγραμμα 37.** Αλεξανδρούπολη: Μηνιαία μεταβολή λόγου C_l/C_d για εύρος γωνιών - 5° έως 25° (AoA). (α) Πλήρης ανάπτυξη. (β) Μεγέθυνση στην περιοχή της μέγιστης τιμής.
- Διάγραμμα 38.** Αλεξανδρούπολη: Μηνιαία μεταβολή C_p για $1 \leq \lambda \leq 10$. (α) Πλήρης ανάπτυξη. (β) Μεγέθυνση στην περιοχή της μέγιστης τιμής. (γ) Υπόμνημα.
- Διάγραμμα 39.** Αεροδυναμική ισχύς P για μηδενική γωνία πρόνευσης.
- Διάγραμμα 40.** Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° .
- Διάγραμμα 41.** Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Ιανουαρίου.
- Διάγραμμα 42.** Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Φεβρουαρίου.
- Διάγραμμα 43.** Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Μαρτίου.
- Διάγραμμα 44.** Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Απριλίου.
- Διάγραμμα 45.** Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Μαΐου.
- Διάγραμμα 46.** Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Ιουνίου.
- Διάγραμμα 47.** Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Ιουλίου.
- Διάγραμμα 48.** Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Αυγούστου.
- Διάγραμμα 49.** Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Σεπτεμβρίου.
- Διάγραμμα 50.** Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Οκτωβρίου.
- Διάγραμμα 51.** Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Νοεμβρίου.
- Διάγραμμα 52.** Αεροδυναμική ισχύς P για γωνία πρόνευσης 5° στο τέλος του Δεκεμβρίου.
- Διάγραμμα 53.** Εκτίμηση αεροδυναμικής ισχύος στο τέλος κάθε περιόδου για ταχύτητα ανέμου $V = 5 \text{ m/sec}$.
- Διάγραμμα 54.** Εκτίμηση αεροδυναμικής ισχύος στο τέλος κάθε περιόδου για ταχύτητα ανέμου $V = 10 \text{ m/sec}$.

Διάγραμμα 55. Εκτίμηση αεροδυναμικής ισχύος στο τέλος κάθε περιόδου για ταχύτητα ανέμου $V = 15 \text{ m/sec}$.

Διάγραμμα 56. Εκτίμηση αεροδυναμικής ισχύος στο τέλος κάθε περιόδου για ταχύτητα ανέμου $V = 20 \text{ m/sec}$.

Βιβλιογραφία

Αντωνιάδης, Ι. (2016) *Δυναμική και Έλεγχος Πτήσης*.

http://courseware.mech.ntua.gr/ml23229/lecture_pdfs/KEFALAIO_1/Dynamikh_Ptisis_Kef_1.pdf [Πρόσβαση: 17.06.2016]

Abbott, I.H. & Von Doenhoff, A.E. (1959) *Theory of Wing Sections*. New York: Dover Publications Inc.

<https://aeroknowledge77.files.wordpress.com/2011/09/58986488-theory-of-wing-sections-including-a-summary-of-airfoil-data.pdf> [Πρόσβαση: 26.06.2016]

Acharya, M., Bornstein, J. & Escudier M.P. (1986) Turbulent Boundary Layers on Rough Surfaces. *Experiments in Fluids*, 4(1), 33-47.

Adams, T., Grant, C. and Watson, H. (2012) A Simple Algorithm to Relate Measured Surface Roughness to Equivalent Sand-grain Roughness. *International Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics*, 1(1), 66-71.

Antonia, R.A. & Krogstad, P.A. (2001) Turbulence Structure in Boundary Layers Over Different Types of Surface Roughness. *Fluid Dynamics Research*, 28(2), 139-157.

Antonia, R.A. & Luxton, R.E. (1971) The Response of a Turbulent Boundary Layer to a Step Change in Surface Roughness Part 1. Smooth to Rough. *Journal of Fluid Mechanics*, 48(4), 721-761.

Asim, T. & Mishra, R. (2015) Numerical Investigations on the Performance Degradation of a Vertical Axis Wind Turbine Operating in Dusty Environment. In: *FLUVISU 2015*. Pleumeur-Bodou/Lannion, France 16-20 November 2015.

<http://eprints.hud.ac.uk/26094/> [Πρόσβαση: 17.05.2016]

Botta, G., Cavaliere, M. & Holttinen, H. (1998) Ice Accretion at Acqua Spruzza and its Effects on Wind Turbine Operation and Loss of Energy Production. In: *BOREAS IV*. Hetta, Finland, 77–86.

https://www.researchgate.net/profile/Hannele_Holttinen/publication/265244514_ICE_ACCRETION_AT_ACQUA_SPRUZZA_AND_ITS_EFFECTS_ON_WIND_TURBINE_OPERATION_AND_LOSS_OF_ENERGY_PRODUCTION/links/55926d3108ae15962d8e69da.pdf

[Πρόσβαση: 10.04.2016]

Buhl, M.L. (2005) *A New Empirical Relationship Between Thrust Coefficient and Induction Factor for the Turbulent Windmill State*.

<http://www.nrel.gov/docs/fy05osti/36834.pdf> [Πρόσβαση: 17.07.2016]

Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. & Bossanyi, E. (2001) *Wind Energy Handbook*.

http://library.uniteddiversity.coop/Energy/Wind/Wind_Energy_Handbook.pdf

[Πρόσβαση: 16.06.2016]

Dalili, N., Edrisy, A. & Carriveau, R. (2009) A Review of Surface Engineering Issues Critical to Wind Turbine Performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 428-438.

Deperrois, A. (2009) *XFLR5 Analysis of Foils and Wings Operating at Low Reynolds Numbers*.

[https://engineering.purdue.edu/~aerodyn/AAE333/FALL10/HOMEWORKS/HW13/XFLR5_v6.01_Beta_Win32\(2\)/Release/Guidelines.pdf](https://engineering.purdue.edu/~aerodyn/AAE333/FALL10/HOMEWORKS/HW13/XFLR5_v6.01_Beta_Win32(2)/Release/Guidelines.pdf) [Πρόσβαση: 26.06.2016]

Dhillon, J., Kumar, A. & Singal, S.K. (2014) Optimization Methods Applied for Wind – PSP Operation and Scheduling Under Deregulated Market: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 682-700.

Diab, A., Alaa, M., El-Din, A.H., Salem, H. & Ghoneim, Z. (2015) Performance Degradation of Wind Turbine Airfoils Due to Dust Contamination: A Comparative Numerical Study. In: *Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition*. Montreal, Canada 15–19 June 2015.

Drela, M. & Giles, M. (1987) Viscous – Inviscid Analysis of Transonic and Low Reynolds Number Airfoils. *AIAA Journal*, 25(10), 1347-1355.

ΕΚΠΑ. (2016α) *Πρόγνωση σκόνης*.

<http://forecast.uoa.gr/greek/dustindx.php?domain=med> [Πρόσβαση: 17.06.2016]

ΕΚΠΑ. (2016β) *Ομάδα Ατμοσφαιρικών Μοντέλων και Πρόγνωσης καιρού – ΟΑΜ&ΠΚ*.

<http://forecast.uoa.gr/greek/about.php> [Πρόσβαση: 17.06.2016]

ΕΛΕΤΑΕΝ. (2016α) *Η Αιολική Ενέργεια στην Ελλάδα*.

http://www.cres.gr/kape/publications/pdf/ENERGYRES_08/5th%20session/5.1_ELET_AEN%20Faitatzoglou_ELETAEN.pdf [Πρόσβαση: 18.05.2016]

ΕΛΕΤΑΕΝ. (2016β) *Η Στατιστική της Αιολικής Ενέργειας για το 2015*.

http://eletaen.gr/wp-content/uploads/2016/01/2015_-HWEA_Statistics_Greece.pdf

[Πρόσβαση: 18.05.2016]

Ferrer, E. & Manduate, X. (2009) CFD Predictions of Transition and Distributed Roughness Over a Wind Turbine Airfoil. In: *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. Orlando, Florida 5 - 8 January 2009.

Fiore, G. & Selig, M.S. (2015) Simulation of Damage for Wind Turbine Blades Due to Airborne Particles. *Wind Engineering*, 39(4), 399-418.

Furuya, Y. & Fujita, H. (1967) Turbulent Boundary Layers on Wire – Screen Roughnesses. *Bulletin of JSME*, 10(37), 77-86.

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsme1958/10/37/10_37_77/article

[Πρόσβαση: 10.04.2016]

GWEC. (2016a) *Global Statistics*.

<http://www.gwec.net/global-figures/graphs/> [Πρόσβαση: 17.05.2016]

GWEC. (2016b) *Global Status of Wind Power*.

<http://www.gwec.net/global-figures/wind-energy-global-status/>

[Πρόσβαση: 17.05.2016]

Hansen, A.C. & Butterfield, C.P. (1993) Aerodynamics of Horizontal – Axis Wind Turbines. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 25, 115-149.

Hansen, M.O.L. (2008) *Aerodynamics of Wind Turbines, Second Edition*. London: Routledge.

Hochart, C., Fortin, G., Perron, J. & Ilinca, A. (2007) Wind Turbine Performance Under Icing Conditions. *Wind Energy*, 11(4), 319-333.

Homola, M.C., Virk, M.S., Nicklasson, P.J. & Sundsbo, P.A. (2011) Performance Losses Due to Ice Accretion for a 5 MW Wind Turbine. *Wind Energy*, 15(3), 379-389.

Howell, R., Qin, N., Edwards, J. & Durrani, N. (2010) Wind Tunnel and Numerical Study of a Small Vertical Axis Wind Turbine. *Renewable Energy*, 35(2), 412-422.

Huang, C.W., Yang, K., Liu, Q., Zhang, L., Bai, J.Y. & Xu J.Z. (2011) A Study on Performance Influences of Airfoil Aerodynamic Parameters and Evaluation Indicators for the Roughness Sensitivity on Wind Turbine Blade. *Science China Technological Sciences*, 54(11), 2993-2998.

Θεοδώρου, Μ., Αντωνίου, Α., Ρούσσος, Ι. & Χατζηευθυμίου, Μ. (2010) *Μελέτη Εκτίμησης Επιπτώσεων στο Περιβάλλον από την Κατασκευή και Λειτουργία Αιολικού Πάρκου Ισχύος 1MW στην Επαρχία Λευκωσίας*.

[http://www.moa.gov.cy/moa/environment/environment.nsf/0/22C92163F8B5221AC225790A00264B9A/\\$file/175-2010.pdf](http://www.moa.gov.cy/moa/environment/environment.nsf/0/22C92163F8B5221AC225790A00264B9A/$file/175-2010.pdf) [Πρόσβαση: 22.05.2016]

Ingram, G. (2011) *Wind Turbine Blade Analysis Using the Blade Element Momentum Method*, Version 1.1.

https://community.dur.ac.uk/g.l.ingram/download/wind_turbine_design.pdf

[Πρόσβαση: 21.06.2016]

Jasinski, W.J., Noe, S.C., Selig, M.S. & Bragg, M.B. (1998) Wind Turbine Performance Under Icing Conditions. *Journal of Solar Energy Engineering*, 120(1), 60-65.

ΚΑΠΕ. (2016α) *Αιολική Ενέργεια*.

http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_wind.htm

[Πρόσβαση: 22.05.2016]

ΚΑΠΕ. (2016β) *Ανεμογεννήτριες*.

http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_windmill.htm

[Πρόσβαση: 10.04.2016]

Kaldellis, J.K. (2005) Social Attitude Towards Wind Energy Applications in Greece. *Energy Policy*, 33(5), 595-602.

Kaldellis, J.K., Kavadias, K.A., Filios, A.E. & Garofallakis, S. (2004) Income Loss Due to Wind Energy Rejected by the Crete Island Electrical Network – The Present Situation. *Applied Energy*, 79(2), 127-144.

Keegan, M.H., Nash, D.H. & Stack, M.M. (2013) On Erosion Issues Associated with the Leading Edge of Wind Turbine Blades. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(38).

Khalfallah, M.G. & Koliub, A.M. (2007) Effect of Dust on the Performance of Wind Turbines. *Desalination*, 209(1-3), 209-220.

Kulunk, E. (2011) Aerodynamics of Wind Turbines. In: Dr. R. Carriveau, ed. 2011. *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*. Intech, Ch. 1. DOI: 10.5772/17854.

[http://www.intechopen.com/books/fundamental-and-advanced-topics-in-wind-](http://www.intechopen.com/books/fundamental-and-advanced-topics-in-wind-power/aerodynamics-of-wind-turbines)

[power/aerodynamics-of-wind-turbines](http://www.intechopen.com/books/fundamental-and-advanced-topics-in-wind-power/aerodynamics-of-wind-turbines) [Πρόσβαση: 21.06.2016]

Li, D., Li, R., Yang, C. & Wang, X. (2010) Effects of Surface Roughness on Aerodynamic Performance of a Wind Turbine Airfoil. In: *Asia – Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. IEEE, DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5448702.

Μαθιουλάκης, Δ.Σ. & Αναγνωστόπουλος, Ι.Σ. (2003) *Σημειώσεις για το μάθημα της Βιομηχανικής Ρευστομηχανικής*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Marten, D. (2014) *QBlade Short Manual, v0.8*.

<http://qblade.npage.de/downloads.html> [Πρόσβαση: 21.04.2016]

Marten, D., Pechlivanoglou, G., Nayeri, C.N. & Pascherit, C.O. (2010) Integration of a WT Blade Design Tool in XFOIL/XFLR5. In: *Proceedings of the 10th German Wind Energy Conference (DEWEK)*. Bremen, Germany 17–18 November 2010.

Marten, D & Wendler, J. (2013) *QBlade Guidelines, v0.6*.

[http://q-blade.org/project_images/files/guidelines_v06\(1\).pdf](http://q-blade.org/project_images/files/guidelines_v06(1).pdf)

[Πρόσβαση: 21.04.2016]

Marten, D., Wendler, J., Pechlivanoglou, G., Nayeri, C.N. & Paschereit, C.O. (2013a) QBlade: An Open Source Tool for Design and Simulation of Horizontal and Vertical Axis Wind Turbines. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(3), 264-269.

Marten, D., Wendler, J., Pechlivanoglou, G., Nayeri, C.N. & Paschereit, C.O. (2013b) Development and Application of a Simulation Tool for Vertical and Horizontal Axis Wind Turbines. In: *Proceedings of ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition*. San Antonio, Texas, USA 3–7 July 2013.

Mishra, P.R. & Patel, B. (2015) Design and Simulation of Horizontal Axis Wind Turbine Using Open Source Software QBlade. *International Journal for Technological Research in Engineering*, 2(9), 2033-2036.

Monteiro, J.P., Silvestre, M.R., Piggott, H. & André, J.C. (2013) Wind Tunnel Testing of a Horizontal Axis Wind Turbine Rotor and Comparison with Simulations from two Blade Element Momentum Codes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 123(A), 99-106.

Mueller-Vahl, H., Pechlivanoglou, G., Nayeri, C.N. & Paschereit, C.O. (2012) Vortex Generators for Wind Turbine Blades: A Combined Wind Tunnel and Wind Turbine Parametric Study. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*. Copenhagen, Denmark 11–15 June 2012.

NASA. (2016a) *Role of Mach Number in Compressible Flows*.

<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/machrole.html>

[Πρόσβαση: 17.06.2016]

NASA. (2016b) *The Drag Coefficient*.

<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dragco.html> [Πρόσβαση: 17.06.2016]

NASA. (2016c) *The Lift Coefficient*.

<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/liftco.html> [Πρόσβαση: 17.06.2016]

NASA. (2016d) *Terra Satellite Measures Dangerous Dust*.

<http://spacemath.gsfc.nasa.gov/news/7Page39.pdf> [Πρόσβαση: 30.06.2016]

Patel, B. & Patel, D.A. (2012) A Review on Aerodynamic Analysis of Wind Turbine Blade Using CFD Technique. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 1(10), 1-5.

Parent, O. & Ilinca, A. (2011) Anti-icing and De-icing Techniques for Wind Turbines: Critical Review. *Cold Regions Science and Technology*, 65(1), 88-96.

Pechlivanoglou, G., Fuehr, S., Nayeri, C.N. & Paschereit, C.O. (2010) The Effect of Distributed Roughness on the Power Performance of Wind Turbines. In: *Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air*. Glasgow, UK 14–18 June 2010.

Perry, A.E., Schofield, W.H. & Joubert, P.N. (1969) Rough Wall Turbulent Boundary Layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 37(2), 383-413.

- Ram, K.R., Lal, S. & Ahmed, M.R. (2013) Low Reynolds Number Airfoil Optimization for Wind Turbine Applications Using Genetic Algorithm. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5, 052007.
- Raupach, M.R., Antonia, R.A. & Rajagopalan, S. (1991) Rough – Wall Boundary Layers. *Applied Mechanics Reviews*, 44(1), 1-25.
- Ren, N. & Ou, J. (2009) Dust Effect on the Performance of Wind Turbine Airfoils. *Journal of Electromagnetic Analysis & Applications*, 1(2), 102-107.
- Sagol, E., Reggio, M. & Ilinca, A. (2013) Issues Concerning Roughness on Wind Turbine Blades. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 514-525.
- Salem, H., Diab, A. & Ghoneim, Z. (2013) CFD Simulation and Analysis of Performance Degradation of Wind Turbine Blades in Dusty Environments. In: *International Conference of Renewable Energy Research and Applications*. Madrid, Spain 20–23 October 2013.
- Sarren, A., Sapre, C.A. & Selig, M.S. (2014) Effects of Leading Edge Erosion on Wind Turbine Blade Performance. *Wind Energy*, 17(10), 1531-1542.
- Schlichting, H. (1979) *Boundary – Layer Theory, Seventh Edition*. USA, McGraw-Hill Book Company.
- Schultz, M.P. & Flack, K.A. (2003) Turbulent Boundary Layers Over Surfaces Smoothed by Sanding. *Journal of Fluids Engineering*, 125(5), 863-870.
- Shen, W.Z., Mikkelsen, R., Sorensen, J.N. & Bak, C. (2005) Tip Loss Corrections for Wind Turbine Computations. *Wind Energy*, 8(4), 457-475.
- Soland, T.H. (2012) *Investigations of Different Airfoils on Outer Sections of Large Rotor Blades*. Bachelor Thesis, Mälardalen University, Sweden.

Soltani, M.R., Birjandi, A.H. & Seddighi Moorani, M. (2011) Effect of Surface Contamination on the Performance of a Section of a Wind Turbine Blade. *Scientia Iranica B*, 18(3), 349-357.

Τσαγγάρης, Σ. (1995) *Μηχανική των Ρευστών*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμewών.

Tachie, M.F., Bergstrom, D.J. & Balachandar, R. (2000) Rough Wall Turbulent Boundary Layers in Shallow Open Channel Flow. *Journal of Fluids Engineering*, 122(3), 533-541.

ΥΠΕ. (2015) *Αιολική Ενέργεια*.

<http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=287> [Πρόσβαση: 10.04.2016]

ΥΠΕΚΑ. (2012) *Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός: Οδικός Χάρτης για το 2050*.

<http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=Xm5Lg9N0eKg%3D&tabid=367&>

[Πρόσβαση: 10.04.2016]

Van Rooij, R.P.J.O.M. & Timmer, W.A. (2003) Roughness Sensitivity Considerations for Thick Rotor Blade Airfoils. *Journal of Solar Energy Engineering*, 125(4), 468-478.

Vey, S., Marten, D., Pechlivanoglou, G., Nayeri, C.N. & Paschereit, C.O. (2015) Experimental and Numerical Investigations of a Small Research Wind Turbine. In: *33rd AIAA Applied Aerodynamics Conference*. Dallas, Texas, USA 22–26 June 2015.