

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

*Σχεδίαση δρομέων μικρών ανεμογεννητριών με χρήση
πακέτων αεροδυναμικής βελτιστοποίησης (EASY) και
πακέτων μηχανολογικής σχεδίασης και εξοπλισμού
(SolidWorks)*

Διπλωματική Εργασία της
Βασιλικής-Ερασμίας Β. Κοκκίνη

Σπουδάστριας της Σχολής
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επιβλέποντες καθηγητές:

Γεώργιος Μπεργελές

Βασίλειος Ριζιώτης

Αθήνα, Ιούλιος 2012

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γ.Μπεργελέ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε δίνοντάς μου τη δυνατότητα να εκπονήσω την παρούσα Διπλωματική Εργασία, καθώς επίσης και για το πλούσιο βιβλιογραφικό υλικό που μου παραχώρησε.

Στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Β.Ριζιώτη οφείλω τις πιο θερμές μου ευχαριστίες για τη συνεχή καθοδήγηση και υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Η βοήθεια του ήταν καίριας σημασίας για την περάτωση της συγκεκριμένης εργασίας.

Ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Κ.Γιαννάκογλου για την ευγενική διάθεση του πακέτου αεροδυναμικής βελτιστοποίησης EASY v. 2.0.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τη φίλη μου Χριστιάνα Κ., για τη συνεχή υποστήριξή της καθώς και τους Γιάννη Μ., Βίβιαν Μ., Δέσποινα Χ., Αναστασία Π., Παναγιώτα Μ., Στάθη Β., Πάρι Π., Αλέξανδρο Η., Γιάννη Σ., Μανουέλα Λ., Κωνσταντίνο Γ., Χριστίνα Γ., Άρη Φ. και Κωνσταντίνο Φ. για το ενδιαφέρον τους και τη συμπαράστασή τους όλο αυτό το διάστημα, και φυσικά τον αγαπημένο μου Διονύση Χ. για την πολύτιμη βοήθεια, τη δύναμη και την αγάπη που μου δίνει.

Τέλος, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον αδερφό μου και τους γονείς μου που είναι πάντα δίπλα μου.

Βέρα Κοκκίνη

Αθήνα, Ιούλιος 2012

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
Abstract.....	5
Εισαγωγή.....	6
Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.....	8
Διάρθρωση εργασίας.....	9
Κεφάλαιο 1^ο	11
1.1 Κλιματική αλλαγή.....	11
1.2 Πρωτόκολλο του Κιότο	16
1.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	20
1.3.1 Αιολική Ενέργεια.....	21
1.3.2. Υδροηλεκτρική Ενέργεια	36
1.3.3. Ηλιακή Ενέργεια.....	40
1.3.4. Βιομάζα/Βιοκαύσιμα	43
1.3.5. Γεωθερμία.....	44
1.4 Ενεργειακό μίγμα	47
1.5 Η Ενεργειακή κατάσταση της Ελλάδας.....	48
Κεφάλαιο 2^ο	52
2.1 Καμπύλη ισχύος.....	52
2.2 Κατανομή Weibull	54
2.3 Θεωρία δίσκου ορμής.....	56
2.4 Θεωρία στοιχείων πτερύγωσης.....	62

Κεφάλαιο 3ο	65
3.1 Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	65
3.2 Γεννήτριες δινών (vortex generators).....	66
 Κεφάλαιο 4ο	 70
4.1 Εξελικτικοί Αλγόριθμοι	70
4.1.1 EASY.....	73
4.2 XFOIL	74
4.3 RAFT	76
4.4 SolidWorks	76
 Κεφάλαιο 5ο	 77
5.1 Περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού της βέλτιστης ετήσιας παραγόμενης ισχύος	77
5.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	84
5.2.1 NACA2415	84
5.2.2 NACA4415	90
5.2.3 Ntua_15.....	96
5.2.4 Ntua_18.....	102
5.3 Σύγκριση των εξεταζόμενων αεροτομών.....	108
 Κεφάλαιο 6ο	 112
6.1 Περιγραφή διαδικασίας σχεδίασης	112
 Κεφάλαιο 7ο	 117
 Παράρτημα 1ο - Παρεμβολή με συναρτήσεις splines.....	 118
 Παράρτημα 2ο - Γενικές Μέθοδοι Ολοκλήρωσης	 121
 Βιβλιογραφία.....	 123

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας (Δ.Ε.) είναι η βελτιστοποίηση δρομέα μικρών ανεμογεννητριών (Α/Γ). Συγκεκριμένα, σε αρχικό στάδιο της Δ.Ε. επιλέχθηκαν τέσσερις αεροτομές, από τις οποίες δύο είναι αναπτυγμένες από την Εθνική Συμβουλευτική Επιτροπή Αεροναυτικής των ΗΠΑ (National Advisory Committee for Aeronautics - NACA) και δύο είναι πειραματικές του εργαστηρίου Αεροδυναμικής της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.), οι οποίες αξιολογήθηκαν από το πρόγραμμα XFOIL (version 6.94, πρόγραμμα για το σχεδιασμό και την ανάλυση αεροτομών) για τιμές Reynolds και Mach κατάλληλες για μικρές Α/Γ. Επόμενο βήμα της παρούσας Δ.Ε. ήταν η κατάλληλη τροποποίηση του κώδικα RAFT (κώδικας για τον υπολογισμό τόσο των φορτίων που δέχεται η Α/Γ όσο και της απόδοσής της) έτσι ώστε ορισμένες εκ των μεταβλητών σχεδιασμού να επιδέχονται βελτιστοποίηση. Η βελτιστοποίηση έγινε με το πακέτο αεροδυναμικής βελτιστοποίησης EASY v.2.0, που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Το πρόβλημα είχε μόνο ένα στόχο (single objective problem) που ήταν η μεγιστοποίηση της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας από τη μικρή Α/Γ. Τα αποτελέσματα, τα οποία βασίστηκαν καθαρά σε υπολογιστικές μεθόδους, χρησιμοποιήθηκαν τελικά στο σχεδιασμό της μικρής Α/Γ με το πρόγραμμα τρισδιάστατου μηχανολογικού σχεδίου SolidWorks2011.

Abstract

Aim of this Diploma Thesis, is the rotor optimization of small wind turbines. Firstly, four airfoils were selected, two from the NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) airfoil family and two experimental airfoils developed by the laboratory of Aerodynamics of the National Technical University of Athens (N.T.U.A.), which were evaluated by the program XFOIL for values of Reynolds and Mach numbers suitable for small wind turbines. Furthermore, several modifications were made to the code RAFT, developed at the Laboratory of Aerodynamics of the N.T.U.A., in order to adjust the design variables to the problem. The optimization procedure has been made by the optimization software EASY v.2.0, developed at the laboratory of Thermal Turbomachines of the N.T.U.A., with single objective to maximize the annual energy production from the small wind turbine. The results, which were based only on computational methods, were used in the final design of the small wind turbine using the engineering software SolidWorks2011.

Εισαγωγή

Σε μία εποχή που η ανάγκη για αειφόρο ανάπτυξη είναι μεγαλύτερη από ποτέ, η ενέργεια, και κυρίως οι εναλλακτικές μορφές παραγωγής της, αποκτούν σημαντικότατο ρόλο και αποτελούν πρώτης τάξεως αναπτυξιακή ευκαιρία που μπορεί να ευνοήσει ολόκληρη την οικονομία.

Η χώρα μας έχει μοναδικά πλεονεκτήματα, τα οποία εάν αξιοποιηθούν με το σωστό τρόπο, είναι ικανά να διασφαλίσουν, χωρίς καμία αμφιβολία, μία αναπτυξιακή πορεία. Η υποστήριξη καθαρών μορφών ενέργειας έχει πολλά οφέλη για την Ελλάδα. Πέρα από το αυτονόητο, ότι υποστηρίζονται τεχνολογίες που βελτιώνουν την ποιότητα ζωής των πολιτών σε ένα καθαρότερο ατμοσφαιρικό περιβάλλον, επιπλέον διασφαλίζουν νέες ανταγωνιστικές θέσεις εργασίας. Η επένδυση στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελεί μονόδρομο για μία χώρα σαν την Ελλάδα. Μία χώρα με πλούσιο δυναμικό σε ηλιακή, αιολική, γεωθερμική, υδροηλεκτρική ενέργεια αλλά και πλούσια σε αποθέματα βιομάζας. Πράγματι, τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, γεγονός ιδιαίτερα ενθαρρυντικό. Πέραν της εγκατάστασης των μεγάλων έργων ΑΠΕ, παρατηρείται μία τάση προς εγκατάσταση μικρών αυτόνομων συστημάτων ΑΠΕ για εξοικονόμηση ενέργειας από πολίτες. Αυτή η τάση ξεκίνησε με τα μικρά φωτοβολταϊκά και εξελίσσεται με εγκατάσταση και μικρών ανεμογεννητριών (Α/Γ).

Πολλοί επιστήμονες ισχυρίζονται ότι αυτή η περεταίρω πράσινη ανάπτυξη θα διασφαλίσει την επιβίωση του ανθρώπου τους επόμενους αιώνες. Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μια αύξηση της τάξης του 10% παγκοσμίως στη χρήση μικρών ανεμογεννητριών, σύμφωνα με μελέτες της Αμερικανικής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας (AWEA). Η ιδέα των μικρών Α/Γ προέκυψε, κυρίως, από την ανάγκη για κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των μη διασυνδεδεμένων στο δίκτυο περιοχών. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε σπίτια, φάρμες, γήπεδα και μικρές επιχειρήσεις, με κατάλληλο σύστημα ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε περίπτωσης.

Μικρές ανεμογεννήτριες θεωρούνται εκείνες των οποίων η ισχύς κυμαίνεται από λίγα watts μέχρι μερικές δεκάδες kilowatts. Όλες οι Α/Γ ακολουθούν ένα διεθνές πρότυπο IEC, που στην περίπτωση των μικρών Α/Γ είναι το IEC 61400-2 και προβλέπει επιφάνεια ρότορα μικρότερη των 200m^2 , που χοντρικά αντιστοιχεί σε ισχύ $P < 50\text{kW}$.

Οι βασικές αρχές λειτουργίας είναι οι ίδιες για όλες τις Α/Γ, ανεξαρτήτως μεγέθους. Παρόλα αυτά υπάρχουν στοιχεία που διαφοροποιούνται όπως η εκκίνηση και η απόδοση σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Οι μικρές Α/Γ προορίζονται για χρήση κυρίως από ιδιώτες, με αποτέλεσμα να τοποθετούνται σε περιοχές όπου πιθανότατα οι ταχύτητες του ανέμου δεν είναι τόσο υψηλές.

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της παρούσας Δ.Ε. είναι ο σχεδιασμός δρομέα μικρών Α/Γ, έτσι ώστε να παρέχουν τη βέλτιστη ετήσια παραγόμενη ενέργεια. Οι μικρές Α/Γ προορίζονται κυρίως για οικιακή χρήση από ιδιώτες, συνεπώς, η βελτιστοποίηση στοχεύει στην μέγιστη κάλυψη των αναγκών τους σε ηλεκτρική ενέργεια. Με την έννοια της βελτιστοποίησης του δρομέα, η παρούσα Δ.Ε. επικεντρώθηκε στην εύρεση της κατάλληλης αεροτομής και στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πτερυγίου. Επιλέχθηκαν τέσσερις αεροτομές, εκ των οποίων δύο κλασικές NACA, μία με μικρή καμπυλότητα (NACA2415) και μία με μεγαλύτερη (NACA4415), και δύο μοντέρνες σχεδιασμένες στο εργαστήριο Αεροδυναμικής του Ε.Μ.Π., για υψηλή παραγωγή ενέργειας. Για τις τέσσερις αυτές αεροτομές και με δεδομένα που προέρχονται από έρευνα αγοράς, έγινε η επιλογή της γεωμετρίας του πτερυγίου και κατόπιν απαραίτητης επεξεργασίας έγινε η επιλογή της βέλτιστης αεροτομής.

Διάρθρωση εργασίας

Στο σημείο αυτό θα περιγραφεί εν συντομία το περιεχόμενο του κάθε κεφαλαίου της παρούσας Δ.Ε.:

Κεφάλαιο 1^ο

Στο πρώτο Κεφάλαιο αρχικά επισημαίνεται το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής του πλανήτη και η ανάγκη για μέτρα προστασίας του. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και η διείσδυσή τους τα τελευταία χρόνια στην αγορά, δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στην αιολική ενέργεια και τις ανεμογεννήτριες. Τέλος, γίνεται μια εκτενής αναφορά στην ενεργειακή κατάσταση που επικρατεί στις μέρες μας στον κόσμο και στην Ελλάδα.

Κεφάλαιο 2^ο

Στο Κεφάλαιο αυτό περιέχονται στοιχεία θεωρίας των ανεμογεννητριών και γενικότερα της αεροδυναμικής, που είναι απαραίτητα για την κατανόηση της πορείας της εργασίας. Επεξηγούνται εν συντομία όλες οι βασικές σχέσεις υπολογισμού των φορτίσεων και της απόδοσης της ανεμογεννήτριας.

Κεφάλαιο 3^ο

Το τρίτο Κεφάλαιο περιλαμβάνει μια εκτενή βιβλιογραφική επισκόπηση των γεννητριών δινών (vortex generators). Πρόκειται για τεχνολογία που, αν και ξεκίνησε πολλές δεκαετίες νωρίτερα, ερευνάται ακόμη από τους επιστήμονες, με σκοπό την ένταξή τους στις μικρές ανεμογεννήτριες για την περεταίρω βελτίωση της απόδοσής τους.

Κεφάλαιο 4^ο

Στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο γίνεται μία περιεκτική αναφορά στα υπολογιστικά προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία (XFOIL, EASY, RAFT).

Κεφάλαιο 5^ο

Στο πέμπτο Κεφάλαιο γίνεται η αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης. Ακολουθούν συγκρίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων ώστε τελικά να γίνει η επιλογή της κατάλληλης αεροτομής που διασφαλίζει την μέγιστη παραγωγή ενέργειας ετησίως. Τέλος, παρατίθενται σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 6^ο

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο σχεδιασμός, με χρήση του μηχανολογικού σχεδίου SolidWorks, του πτερυγίου που επιλέχθηκε καθώς και της τελικής μορφής της μικρής ανεμογεννήτριας.

Κεφάλαιο 7^ο

Στο τελευταίο Κεφάλαιο, γίνεται μία ανασκόπηση της εργασίας, δίνονται ορισμένες απόψεις επί των αποτελεσμάτων και παρατίθενται ιδέες για μελλοντικά πλάνα στον τομέα των μικρών ανεμογεννητριών.

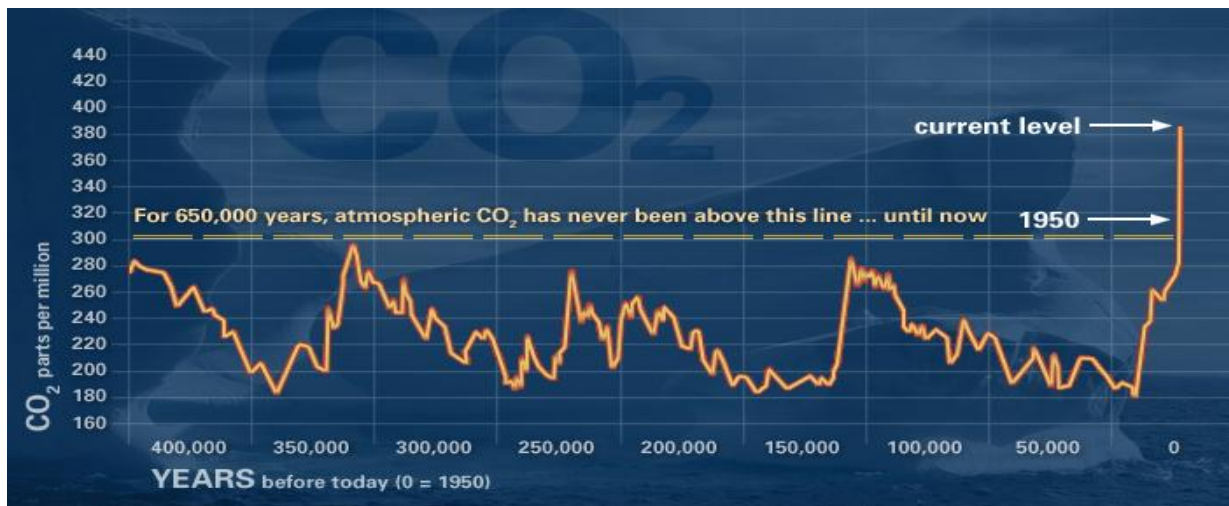
Κεφάλαιο 1^ο

1.1 Κλιματική αλλαγή

Σύμφωνα με αρκετές επιστημονικές μελέτες είναι πλέον γνωστό ότι η ιστορία του πλανήτη μας έχει χαρακτηριστεί από πλήθος κλιματικών αλλαγών. Το κλίμα της γης έχει αλλάξει πολλές φορές στην ιστορία, με τις περισσότερες αλλαγές να αποδίδονται σε μικρές διακυμάνσεις της γήινης τροχιάς, που μεταβάλλουν την ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που δέχεται ο πλανήτης μας. Σήμερα, επιπλέον παρατηρείται μία σταδιακή άνοδος της θερμοκρασίας του πλανήτη, που σύμφωνα με τους περισσότερους επιστήμονες οφείλεται στο «φαινόμενο του θερμοκηπίου». Το «φαινόμενο του θερμοκηπίου» αν και είναι ένα φυσικό φαινόμενο που παρουσιάζεται σε όλους τους πλανήτες του γαλαξία μας, συνδέεται άμεσα με την παγκόσμια θέρμανση της γης, ενώ η ένταση του φαινομένου ενισχύεται σημαντικά από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Κυρίως τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη μας η οποία σχετίζεται με τη συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου αλλά και την παραγωγή αρκετών ιχνοστοιχείων όπως οι χλωροφθοράνθρακες τα οποία περιέχονται στην ατμόσφαιρα, τα οποία εμποδίζουν και τελικά δεσμεύουν την ανακλώμενη από την επιφάνεια της γης ηλιακή ακτινοβολία. Τα κυριότερα αέρια που επιδρούν περισσότερο στην ένταση του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι τα εξής:

- Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2): Αποτελεί ένα μικρό αλλά αρκετά σημαντικό συστατικό της ατμόσφαιρας. Το διοξείδιο του άνθρακα απελευθερώνεται μέσω φυσικών διαδικασιών, όπως η ανθρώπινη αναπνοή και οι εκρήξεις ηφαιστειών. Το μεγαλύτερο τμήμα εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα είναι αποτέλεσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Δισεκατομμύρια τόνοι CO_2 παράγονται κάθε χρόνο από την καύση ορυκτών καυσίμων καθώς και από την αποψίλωση των δασών και τις αλλαγές χρήσεων γης. Το συγκεκριμένο αέριο θεωρείται υπεύθυνο για το 50% της υπερθέρμανσης της ατμόσφαιρας, ενώ σε λιγότερο από δύο αιώνες η ανθρώπινη δραστηριότητα είχε ως

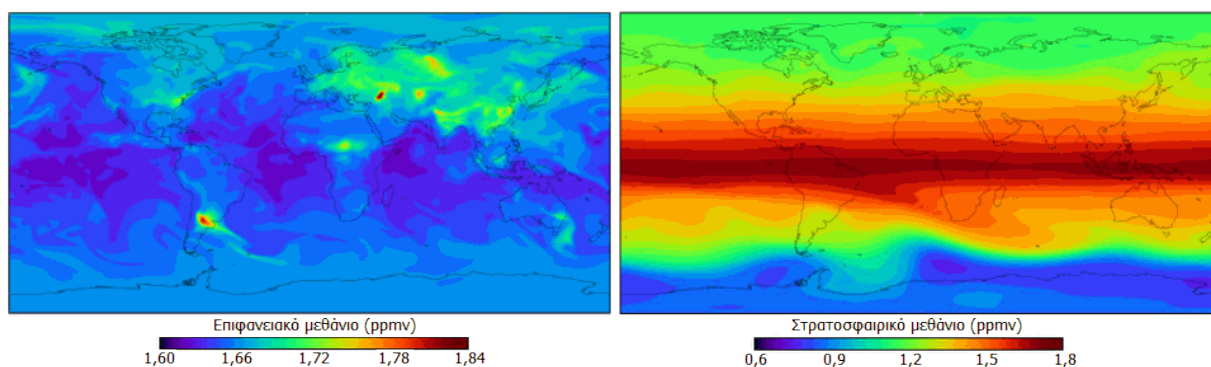
αποτέλεσμα την αύξηση κατά 25% της συνολικής ποσότητας του διοξειδίου του άνθρακα [Π.Ε. Κυριτσάκη Ο., 2009]. Όπως γίνεται εμφανές από το παρακάτω *διάγραμμα.1.*, η ατμοσφαιρική συγκέντρωση του CO₂ έχει αυξηθεί ραγδαία από την αρχή της Βιομηχανικής Επανάστασης (μέσα του 19^{ου} αιώνα).



Διάγραμμα.1.: [Πηγή: <http://climate.nasa.gov/evidence/>]

- Το **μεθάνιο (CH₄)**: Το μεθάνιο είναι ένα από τα αέρια που συνεισφέρουν σημαντικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Σε σχέση με τους υπόλοιπους υδρογονάνθρακες, το μεθάνιο είναι περιβαλλοντικά φιλικότερο αφού παράγει λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα ανά μονάδα παραγόμενης θερμότητας. Όμως το μεθάνιο παρατηρείται ως 21 φορές δραστικότερο, σε χρονικό ορίζοντα ενός αιώνα από το διοξείδιο του άνθρακα, λόγω της αυξημένης ικανότητας του να παγιδεύει θερμότητα. Το συγκεκριμένο αέριο παράγεται τόσο από φυσικές πηγές όσο και από ανθρώπινες δραστηριότητες, συμπεριλαμβανομένης της αποσύνθεσης των αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής, της γεωργίας, καθώς και της πέψης των μηρυκαστικών και της διαχείρισης κόπρου που σχετίζονται με κατοικίδια ζώα. Το μεθάνιο, όπως αναφέρθηκε, αν και είναι πολύ πιο ενεργό αέριο του θερμοκηπίου σε σχέση με το διοξείδιο του άνθρακα, βρίσκεται σε μικρότερες ποσότητες στην ατμόσφαιρα. Σε εργασία του Ramanujan K. [NASA, 2005], έχει παρατηρηθεί πως η σημερινή μέση συγκέντρωση μεθανίου είναι

μεγαλύτερη της διπλάσιας από την αντίστοιχη του 1750. Στο ακόλουθο **διάγραμμα.2.**, παρουσιάζεται η συγκέντρωση του μεθανίου σε δύο επίπεδα της ατμόσφαιρας (στην επιφάνεια και στην στρατόσφαιρα αντίστοιχα). Η παρουσία μεγάλων συγκεντρώσεων μεθανίου σε πετρελαιοπαραγωγικές περιοχές (άνω του 1,72ppmv) καθώς και οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις μεθανίου στο βόρειο ημισφαίριο παρουσιάζονται στο συγκεκριμένο **διάγραμμα.2.**



Διάγραμμα.2.: Συγκέντρωση του μεθανίου στην ατμόσφαιρα (στην επιφάνεια και στην στρατόσφαιρα) [Πηγή: <http://www.chem.uoa.gr>]

- Τα **οξειδία του αζώτου (NO_x)**: Αναφέρονται στο αέριο μίγμα μονοξειδίου του αζώτου (NO) και διοξειδίου του αζώτου (NO_2) το οποίο υπάρχει στην γήινη ατμόσφαιρα αποτελώντας έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες ρύπανσής της. Σημαντική μνεία γίνεται για το υποξείδιο του αζώτου (N_2O), ένα αέριο το οποίο συμβάλλει ιδιαίτερα στη δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου. Τα οξειδία του αζώτου παράγονται από φυσικούς ή ανθρωπογενείς σχηματισμούς. Παράγονται δηλαδή κατά τις ηλεκτρικές εκκενώσεις (αστραπές και κεραυνοί) που πραγματοποιούνται στην ατμόσφαιρα, στις ηφαιστειακές εκρήξεις, στις φωτοχημικές αντιδράσεις αζώτου-οξυγόνου στα ανώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα αλλά και μέσω ειδικών μηχανισμών που έχουν αναπτύξει συγκεκριμένες ομάδες βακτηρίων μέσω των οποίων είναι δυνατή η δέσμευση ατμοσφαιρικού αζώτου. Σύμφωνα με μελέτες [World Bank Group, 1998] το 10% της ετησίως παραγόμενης ποσότητας οξειδίων του αζώτου έχει ως προέλευση τις ανθρώπινες

δραστηριότητες. Ως ανθρώπινες δραστηριότητες μπορούν να χαρακτηριστούν οι καλλιέργειες του εδάφους, η χρήση εμπορικών και οργανικών λιπασμάτων, η καύση ορυκτών καυσίμων (βενζίνης, πετρελαίου, γαιανθράκων), η παραγωγή νιτρικού οξέος, καθώς και η καύση βιομάζας.

- *Χλωροφθοράνθρακες (CFC)*: Πρόκειται για ενώσεις εντελώς βιομηχανικής προέλευσης οι οποίες, παρότι χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, συμβάλλουν στην καταστροφή του στρώματος του όζοντος. Είναι γνωστοί με την ονομασία Freons και κατασκευάστηκαν για πρώτη φορά στη δεκαετία του 1930. Είναι αδρανείς ενώσεις και αφού καταλήξουν στην ατμόσφαιρα χωρίς να αντιδράσουν με άλλες ενώσεις, μένουν αναλλοίωτες για μεγάλα χρονικά διαστήματα και σταδιακά ανέρχονται στην στρατόσφαιρα. Οι χλωροφθοράνθρακες είναι μη τοξικοί, μη εύφλεκτοι και φθινοί, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται αθρόα σαν ψυκτικά σε ψυγεία και κλιματιστικά, σαν προωθητικά σε σπρέι, σαν διαλύτες στη βιομηχανία, σε συστήματα πυρόσβεσης και σε αρκετές άλλες εφαρμογές.

Η επιστημονική κοινότητα είναι πεπεισμένη ότι η παγκόσμια θερμοκρασία θα συνεχίσει να αυξάνεται τις επόμενες δεκαετίες. Μία από τις κυριότερες αιτίες είναι η ραγδαία αύξηση των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC), η οποία περιλαμβάνει περισσότερους από 1.300 επιστήμονες από τις Ηνωμένες Πολιτείες και άλλες χώρες, προβλέπει μια αύξηση της θερμοκρασίας από 1,4 έως 5,5 βαθμούς Κελσίου κατά τον επόμενο αιώνα. Επίσης, η ίδια πηγή αναφέρει πως στο χρονικό διάστημα 1995÷2006 παρατηρήθηκαν οι έντεκα από τις δώδεκα πιο θερμές χρονιές από το 1850. Σημειώνεται ακόμα, πως υπάρχει συσχέτιση της αύξησης της θερμοκρασίας με την αύξηση του επιπέδου της θάλασσας (από το 1993 έως σήμερα ο ρυθμός αύξησης είναι 3,1mm/y, όταν το 1961 ο ρυθμός ήταν σχεδόν ο μισός 1,8mm/y) καθώς και με τη μείωση των πάγων και του

χιονιού και στα δύο ημισφαίρια. Ακόμα σύμφωνα με την NASA σημειώνεται πως τα επίπεδα συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα έχουν φτάσει τα 393ppm, μία τιμή που είναι η μεγαλύτερη που έχει εμφανιστεί εδώ και 650.000 χρόνια ιστορίας του πλανήτη μας.

Παράλληλα σημειώνεται πως ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (International Energy Agency - IAE) εκτιμάει πως από το 2002 έως το 2030 θα έχει αυξηθεί κατά 60% η παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση. Τα δύο τρίτα αυτής της αύξησης θα προέλθουν από τις αναπτυσσόμενες χώρες, ενώ η ζήτηση ηλεκτρισμού θα διπλασιαστεί και ταυτόχρονα οι ανάγκες ορυκτών καυσίμων αναμένεται να αυξηθούν σημαντικά.

Παρατηρείται λοιπόν, πως ο πλανήτης μας βρίσκεται σε μία ιδιαίτερα κρίσιμη καμπή, όπου οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες σε συνδυασμό με τις ενεργειακές ανάγκες του πληθυσμού έχουν ως αποτέλεσμα την επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Η ατμόσφαιρα καταστρέφεται, ενώ η χλωρίδα και πανίδα της γης χάνουν αρκετά είδη. Η κατάσταση σχεδίου για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής αποτέλεσε κυρίαρχο διεθνές ζήτημα και από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 μπήκαν οι πρώτοι κανόνες για τη διασφάλιση της ευημερίας του περιβάλλοντος. Τον Μάιο του 1992 θεσπίστηκε η Σύμβαση - Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την αλλαγή του κλίματος (United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC), το οποίο ήταν και το πρώτο διεθνές μέτρο που έφερε το συγκεκριμένο παγκόσμιο ζήτημα στο τραπέζι συζητήσεων. Η συγκεκριμένη σύμβαση επέβαλλε σε όλα τα συμβαλλόμενα μέρη την υποχρέωση θέσπισης εθνικών προγραμμάτων για τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου καθώς και την επιβολή τακτικών εκθέσεων. Επίσης, αποτέλεσε τη βάση για τη στοχοθετημένη αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και προσδιόρισε το ρόλο της Συνόδου των Συμβαλλομένων Μερών της Σύμβασης (Conference of the Parties - COP) [Κακαράς Ε., Καρέλλας Σ., 2010]. Αυτή η πρώτη Σύμβαση αποτέλεσε τον προκάτοχο του Πρωτοκόλλου του Κιότο, το οποίο αναλύεται αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο 1.2.

1.2 Πρωτόκολλο του Κιότο

Το Πρωτόκολλο του Κιότο αποτελεί διεθνή συμφωνία που συνδέεται με το πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα οδικό χάρτη στον οποίο περιλαμβάνονται τα απαραίτητα βήματα για την μακροπρόθεσμη αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής που προκαλείται κυρίως λόγω της ραγδαίας αύξησης των ανθρωπογενών εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο 1.1. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο θεσπίστηκε στις 11 Δεκεμβρίου 1997 στο Κιότο της Ιαπωνίας και άρχισε να εφαρμόζεται στις 16 Φεβρουαρίου 2005, με τη συμμετοχή 191 χωρών. Για να τεθεί το Πρωτόκολλο του Κιότο σε ισχύ, έπρεπε να προσχωρήσουν στη συνθήκη ή να επικυρώσουν, να το δεχθούν ή να το εγκρίνουν τουλάχιστον 55 χώρες από αυτές που έχουν υπογράψει την UNFCCC (παράγραφος 1.1), καθώς και να καλύπτεται το 55% των εκπομπών του 1990 (ως βάση αναφοράς) των αναπτυγμένων χωρών κύριο χαρακτηριστικό του Πρωτοκόλλου του Κιότο είναι ότι θέτει δεσμευτικούς στόχους για 37 βιομηχανικές χώρες και την Ευρωπαϊκή Κοινότητα με σκοπό τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου. Συνολικά, οι στόχοι αυτοί προστίθενται σε μια κατά μέσο όρο 5% μείωση των εκπομπών κατά τη διάρκεια της πενταετούς περιόδου 2008 έως 2012, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Ακόμα το Πρωτόκολλο περιλαμβάνει άλλους δύο μηχανισμούς. Πρώτον, την επικύρωση του Πρωτοκόλλου από την Ευρωπαϊκή Ένωση με σχετική απόφαση του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου (2002/358/EK), και δεύτερον την επικύρωση του Πρωτοκόλλου σε εθνικό επίπεδο με αντίστοιχο Ελληνικό Νόμο (3017/2002 - ΦΕΚ117/Α/30.5.202) Αναγνωρίζοντας ότι οι ανεπτυγμένες χώρες είναι κυρίως υπεύθυνες για τα σημερινά υψηλά επίπεδα των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, ως αποτέλεσμα της περισσότερα από 150 χρόνια βιομηχανικής δραστηριότητάς τους, το Πρωτόκολλο δίνει μεγαλύτερο βάρος στις ανεπτυγμένες χώρες.

Η πρώτη διαπραγμάτευση για το Πρωτόκολλο του Κιότο έγινε τον Δεκέμβριο του 1997 στο Κιότο της Ιαπωνίας. Ο στόχος ήταν η μείωση των συνολικών

εκπομπών από έξι αέρια του θερμοκηπίου - διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, οξείδια του αζώτου, το εξαφθοριούχο θείο, υδροφθοράνθρακες και τα PFC. Σύμφωνα με στοιχεία του Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου (European Economic Area - EEA), η Ελλάδα παρήγαγε το έτος βάσης (1990) 103,3 εκατομμύρια τόνους αέρια του θερμοκηπίου και το Πρωτόκολλο του Κιότο έθετε ως στόχο μείωσης εκπομπών το 25% ως το 2012.

Για την επίτευξη των στόχων που προβλέπει το Πρωτόκολλο του Κιότο έχουν υιοθετηθεί συγκεκριμένα μέτρα καθώς και τρεις «ευέλικτοι μηχανισμοί» ή αλλιώς «μηχανισμοί Κιότο». Αυτοί είναι η Εμπορία Εκπομπών (Emissions Trading - ET), τα έργα Κοινής Εφαρμογής (Joint Implementation - JI) και ο μηχανισμός Καθαρής Ανάπτυξης (Clean Development Mechanism - CDM), οι οποίοι έχουν συμπληρωματικό ρόλο και σε καμία περίπτωση δεν έχουν ως στόχο την αντικατάσταση των εθνικών νομοθεσιών μείωσης εκπομπών. Οι «ευέλικτοι μηχανισμοί» βασίζονται στο σκεπτικό ότι οι εκπομπές αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου αποτελούν παγκόσμιο πρόβλημα και ότι ο τόπος/χώρος όπου επιτυγχάνεται ο περιορισμός τους έχει δευτερεύουσα σημασία. Με τον τρόπο αυτό, μπορούν να επέλθουν μειώσεις εκεί όπου το κόστος είναι χαμηλότερο, τουλάχιστον στην πρώτη φάση της καταπολέμησης της κλιματικής αλλαγής.

Η *Εμπορία Εκπομπών* σχετίζεται με την κατανομή των Δικαιωμάτων Εκπομπών για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε σταθερές πηγές εκπομπών, σύμφωνα πάντα με το σχεδιασμό και τις δράσεις κάθε εμπλεκόμενου κράτους. Αυτές οι άδειες μπορούν να εμπορεύονται από τους δικαιούχους επιτυγχάνοντας έτσι μία ευνοϊκή σχέση κόστους και αποτελέσματος. Τα Δικαιώματα Εκπομπών μπορούν να εμπορεύονται είτε απευθείας μεταξύ εταιρειών είτε μέσω κατάλληλων πρακτόρων. Σημειώνεται πως η κατανομή αδειών γίνεται σύμφωνα με τους περιβαλλοντικούς στόχους κάθε κυβέρνησης και τον αντίστοιχο στόχο που έχει τεθεί για το αντίστοιχο κράτος μέσω του Πρωτοκόλλου του Κιότο. Το περιβαλλοντικό όφελος εξασφαλίζεται από το συνολικό επιτρεπόμενο όριο εκπομπών το οποίο και καθορίζεται από το σύνολο των αδειών.

Ο δεύτερος μηχανισμός, αυτός της *Κοινής Εφαρμογής*, αφορά στην θεσμοθέτηση συγκεκριμένων έργων μείωσης εκπομπών τα οποία εφαρμόζουν βιομηχανοποιημένα κράτη σε βιομηχανοποιημένα κράτη. Πραγματοποιείται δηλαδή μία μεταφορά «πιστώσεων» μείωσης εκπομπών (Emission Reduction Units - ERUs). Το όφελος αυτού του μηχανισμού σχετίζεται με την μείωση των εκπομπών για τις αναπτυσσόμενες χώρες αλλά και η εκπλήρωση μέρους των υποχρεώσεων τους όπως έχουν τεθεί από το Πρωτόκολλο του Κιότο. Βασική προϋπόθεση αυτού του μηχανισμού, είναι οι δραστηριότητες οι οποίες θα πραγματοποιηθούν να επιφέρουν επιπλέον μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου στη χώρα εφαρμογής. Σημειώνεται, πως ο Μηχανισμός της Κοινής Εφαρμογής είναι ο πιο διαδεδομένος μηχανισμός μεταξύ των αναπτυσσόμενων χωρών του Παραρτήματος Ι (Annex I: 41 βιομηχανοποιημένα κράτη και κράτη με μεταβατική οικονομία) και των κρατών του πρώην ανατολικού μπλόκου.

Ο τελευταίος μηχανισμός ο οποίος αφορά την *Καθαρή Ανάπτυξης* σχετίζεται με τα έργα μείωσης εκπομπών τα οποία εφαρμόζουν βιομηχανοποιημένα κράτη σε αναπτυσσόμενες χώρες. Πραγματοποιείται δηλαδή μία μεταφορά «πιστώσεων» μείωσης εκπομπών (Certified Emission Reduction – CERs). Όσον αφορά τις αναπτυσσόμενες χώρες, το όφελος είναι η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και η εκπλήρωση μέρους των υποχρεώσεων τους, ενώ για τις αναπτυσσόμενες χώρες εμπεριέχεται το όφελος της μετάδοσης της τεχνογνωσίας στην εφαρμογή νέων τεχνολογιών. Προϋπόθεση αποτελεί η εθελοντική συμμετοχή και απαραίτητη είναι η πιστοποίηση επιπλέον μείωσης εκπομπών και τα υπαρκτά οφέλη για την αντιμετώπιση των κλιματικών αλλαγών στην αναπτυσσόμενη χώρα. Ο μηχανισμός Καθαρή Ανάπτυξης, δεδομένου ότι καλύπτει έργα σε χώρες που δεν έχουν αναλάβει συγκεκριμένες υποχρεώσεις, στοχεύει επιπλέον στην προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης στις αναπτυσσόμενες χώρες, μέσω έργων που χρηματοδοτούνται από ανεπτυγμένες χώρες και οδηγούν σε μείωση εκπομπών ή σε αντιμετώπιση των αλλαγών του κλίματος. Αφετέρου μέσω εισφορών που επιβάλλονται στα έργα αυτά, τροφοδοτείται ειδικό Ταμείο για την βοήθεια των αναπτυσσόμενων χωρών.

Τον Φεβρουάριο του 2005 το Πρωτόκολλο του Κιότο τέθηκε σε ισχύ και μαζί με αυτό έγινε και η δέσμευση της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) να μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 8% για την Ε.Ε. των 15 κρατών ως σύνολο. Για τα νέα κράτη μέλη (Ε.Ε. των 12 κρατών), ο στόχος ήταν μεταξύ 6% και 8%. Η Ευρωπαϊκή Ένωση Αιολικής Ενέργειας (European Wind Energy Association - EWEA) υπολογίζει ότι το 2012 με βάση την εγκατεστημένη αιολική ισχύ, η Ε.Ε. θα επιτύχει το 35% του στόχου που προβλέπει το πρωτόκολλο του Κιότο.

Σήμερα, η οικονομική κρίση έχει επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την τήρηση των υποσχέσεων των κρατών για τον περιορισμό των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές διεθνείς συνεδριάσεις για την κλιματική αλλαγή, με κυριότερες αυτές της Κοπεγχάγης το 2009, του Κανκούν το 2010, του Ντέμπραν το 2011 και του Ρίο το 2012. Βασικός στόχος αυτών των διασκέψεων είναι η εξεύρεση μίας διάδοχης κατάστασης του Πρωτοκόλλου του Κιότο, η οποία θα εξασφαλίσει την αειφόρο ανάπτυξη. Είναι βέβαιο, πως η αύξηση χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μπορεί και πρέπει να αποτελέσει κυρίαρχο μέλημα για την μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου.

1.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Με την πάροδο των χρόνων οι συζητήσεις περί βιώσιμης ανάπτυξης είναι όλο και εντονότερες. Από το 1950 η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση έχει τετραπλασιασθεί, ενώ από το τέλος της δεκαετίας του '60 έχουν αναγνωριστεί από την επιστημονική κοινότητα οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ραγδαίας βιομηχανικής ανάπτυξης και ιδιαίτερα των επιπτώσεων που προκαλεί η καύση των ορυκτών καυσίμων. Από το 1970 και μετά, η ενεργειακή κρίση ώθησε τους επιστήμονες να αναπτύξουν διάφορες τεχνικές που έχουν ως στόχο τη χρήση ενέργειας με αποδοτικότερο τρόπο. Συνεπώς ξεκίνησε να δίνεται έμφαση στην παραγωγή ενέργειας από τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Σύμφωνα με την Παγκόσμια Επιτροπή για το Περιβάλλον (World Commission on Environment and Development - WCED), όσο αξιοποιούνται οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας η βιωσιμότητα του πλανήτη είναι διασφαλισμένη.

Με τον όρο Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας εννοείται οποιαδήποτε πηγή ενέργειας μπορεί να ανανεώνεται και να χρησιμοποιείται εφόρου ζωής, λόγω της φυσικής της προέλευσης. Πρόκειται για «πράσινες» μορφές ενέργειας, οι οποίες δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον, και δε χρειάζονται κάποια διεργασία καθώς η φυσική ροή τους στο περιβάλλον είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμη. Αυτά τα δύο βασικά χαρακτηριστικά, αποτέλεσαν και το έναυσμα για την περαιτέρω ανάπτυξή τους με στόχο την ευημερία του πλανήτη. Η ηλιακή, η αιολική, η υδροδυναμική ενέργεια, η βιομάζα και η γεωθερμία αναβαθμίστηκαν τα τελευταία χρόνια στην παγκόσμια ενεργειακή σκηνή και τους δόθηκε ο χαρακτηρισμός των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

Στη συνέχεια της παρούσας παραγράφου, θα παρουσιαστούν οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, δίνοντας μία έμφαση στην αιολική ενέργεια, και η εφαρμογή τους στον κόσμο και την Ελλάδα.

1.3.1 Αιολική Ενέργεια

Η κινητική ενέργεια του ανέμου οφείλεται στην πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στον πλανήτη. Πρόκειται για μία μορφή ενέργειας ιδιαίτερα ήπια, που σημαίνει ότι μία μικρή ποσότητα της υπάρχουσας ενέργειας τελικά μπορεί να δεσμευτεί. Για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούνται ανεμογεννήτριες (Α/Γ) οι οποίες έχουν εξελιχθεί εντυπωσιακά όλα αυτά τα χρόνια, όπως φαίνεται και στις επόμενες εικόνες, από τους παλιούς ανεμόμυλους για την άλεση σιτηρών έως τη σημερινή υπερσύγχρονη για εκμετάλλευση ηλεκτρικής ενέργειας.

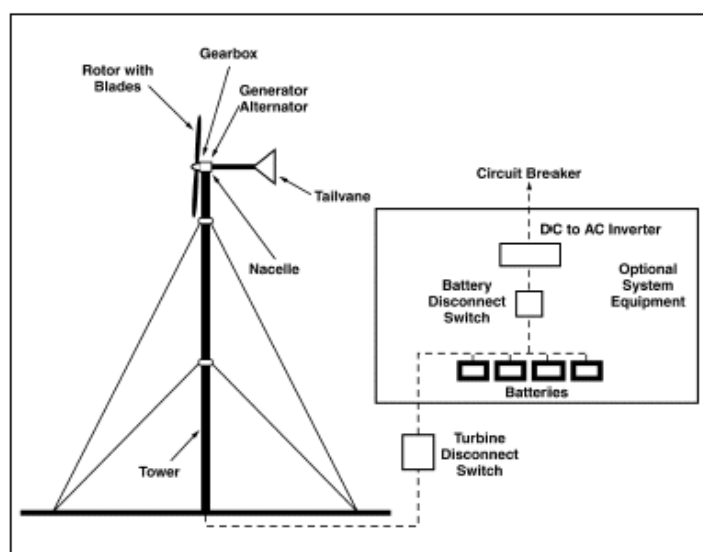


Εικόνα.1.: Ανεμόμυλος στον Απείρανθο Νάξου

1.3.1.1 Μέρη Ανεμογεννήτριας

Στις επόμενες υποπαραγράφους του κεφαλαίου πραγματοποιείται μία μικρή περιγραφή των επιμέρους μερών μίας Ανεμογεννήτριας (Α/Γ). Πιο συγκεκριμένα, δίνονται πληροφορίες για τον δρομέα της Α/Γ, για το σύστημα μετάδοσης ενέργειας και τέλος για τη γεννήτρια της Α/Γ. Στην ακόλουθη

εικόνα.2. παρουσιάζεται πλάγια όψη μίας τυπικής Α/Γ καθώς και τα κύρια μέρη που την απαρτίζουν.



Εικόνα.2.: Πλάγια όψη Α/Γ [Πηγή: <http://www.windenergy.net.in/>]

1.3.1.1.1 Δρομέας Ανεμογεννήτριας

Δρομέας καλείται το στρεφόμενο τμήμα των ανεμογεννητριών (Α/Γ), μέσω του οποίου η ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια στον περιστρεφόμενο άξονά του. Ο αριθμός των πτερυγίων του δρομέα μπορεί να ποικίλει, αν και έχει επικρατήσει οι Α/Γ να έχουν 3 πτερύγια, για αισθητικούς κυρίως λόγους. Σε σχέση με τη θέση του δρομέα ως προς τον πύργο στήριξης και τη διεύθυνση του ανέμου, οι Α/Γ χωρίζονται σε Α/Γ με δρομέα ανάντι και κατάντι του πύργου. Για την καλύτερη απόδοση της Α/Γ είναι απαραίτητο το επίπεδο του δρομέα να είναι κάθετο στη διεύθυνση πνοής του ανέμου. Για το σκοπό αυτό στις Α/Γ μεγάλης ισχύος, υπάρχει ειδικός μηχανισμός ρύθμισης της γωνίας απόκλισης που τη στρέφει αυτόματα κάθετα στον άνεμο. Στην περίπτωση των μικρών Α/Γ υπάρχει καθοδηγητικό πτερύγιο, που ευθυγραμμίζει τον άξονα του δρομέα με τον άνεμο. Στο πτερύγιο προσανατολισμού συχνά εφαρμόζεται η τεχνική furling tail κατά την οποία το πτερύγιο είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε όταν η ταχύτητα του ανέμου

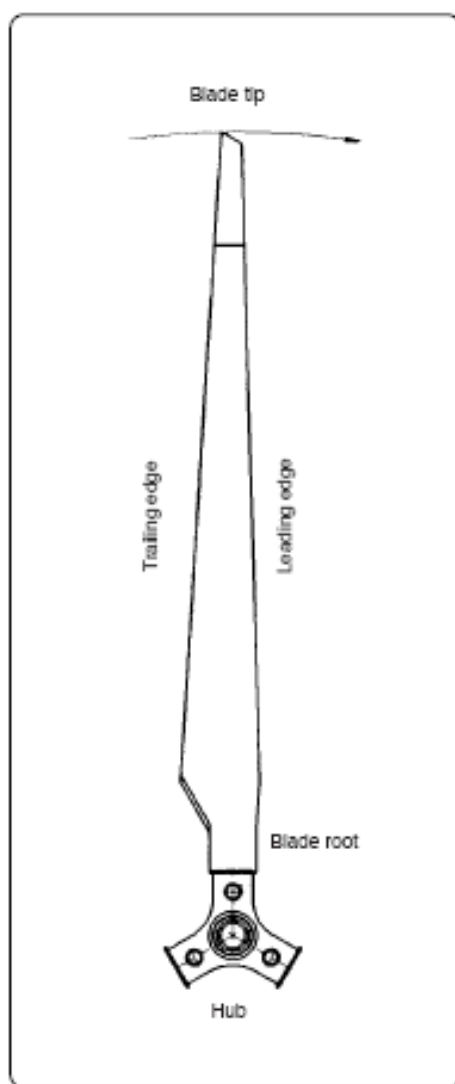
αρχίζει να προσεγγίζει την αντίστοιχη μέγιστη δυνατή ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας, στρέφει όλη την Α/Γ κατά τη φορά πνοής του ανέμου, όπως φαίνεται και στην κάτωθι *εικόνα.3*. Όταν η ταχύτητα του ανέμου μειωθεί τότε το πτερύγιο προσανατολισμού στρέφει ξανά την Α/Γ στην αρχική της θέση.



Εικόνα.3.: Πτερύγιο προσανατολισμού [Πηγή: Energy Self Sufficiency Newsletter, photo by Dan Bartmann]

1.3.1.1.2 Αεροτομές και πτερύγια

Στο σημείο αυτό θα αναλυθούν τα βασικά χαρακτηριστικά των αεροτομών και η συμπεριφορά τους κατά την περιστροφή, ιδίως σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds (Re), όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια.

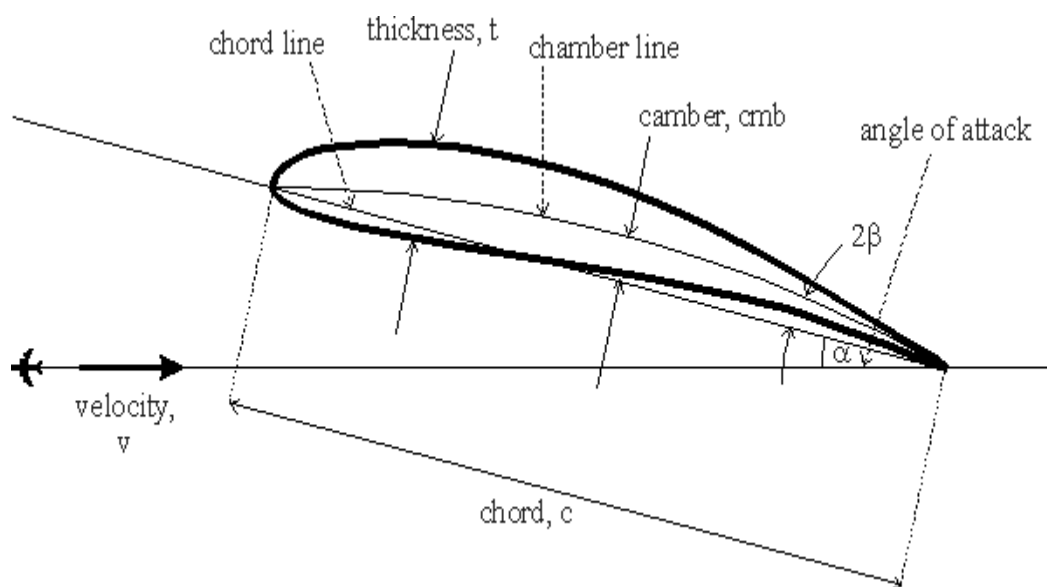


The different components of a wind turbine blade

Εικόνα.4.: Τυπική μορφή πτερυγίου Α/Γ [Πηγή: www.bonus.dk]

Ως ακτίνα του πτερυγίου ορίζεται η απόσταση που ξεκινάει από την πλήμνη της Α/Γ, εκεί δηλαδή που συνδέεται το πτερύγιο με την Α/Γ, και καταλήγει στην άκρη του πτερυγίου.

Στις μεγάλες Α/Γ, τα πτερύγια, προκειμένου να προστατεύονται από μηχανικές καταπονήσεις, έχουν ορισμένους αυτοματισμούς (όπως σταθερό πτερύγιο με ρυθμιζόμενο ακροπτερύγιο) για τη ρύθμιση βήματος του πτερυγίου. Οι μεγάλες Α/Γ εφαρμόζουν τη ρύθμιση της γωνίας βήματος για να διατηρείται η μέση ισχύς του σταθερή. Παρόλα αυτά στις μικρές Α/Γ δεν συναντώνται τέτοιες τεχνολογίες καθώς τα πτερύγια είναι μικρά και πιο απλά σε κατασκευή και επιπλέον ένας μηχανισμός ρύθμισης γωνίας βήματος θα ανέβαζε ιδιαίτερα το κόστος τους.

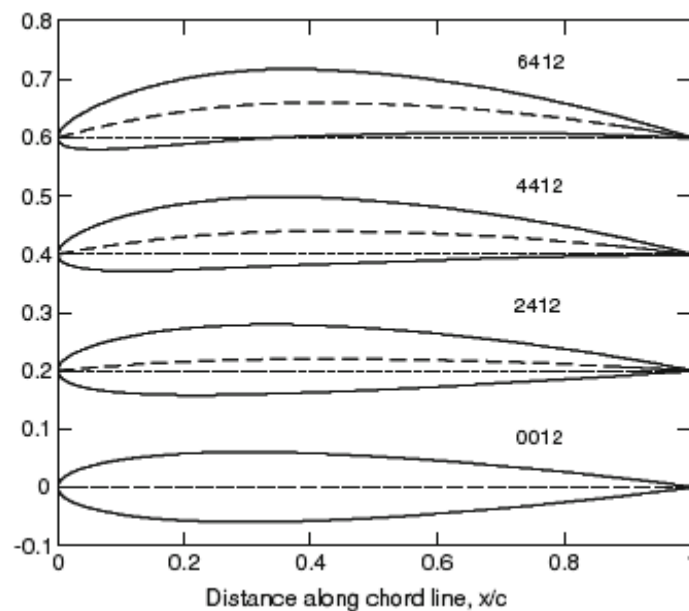


Εικόνα.5.: Προφίλ πτερυγίου [Πηγή: <http://www.av8n.com/irro/static/airfoil.gif>]

Εάν ένα πτερύγιο θεαθεί σε τομή, *εικόνα.5.*, τότε είναι εμφανές το προφίλ του πτερυγίου. Το προφίλ του πτερυγίου συμβάλει καθοριστικά στην απόδοση της Α/Γ. Ακόμη και η ελάχιστη αλλαγή στο προφίλ μπορεί να επηρεάσει την καμπύλη ισχύος της Α/Γ καθώς και τα επίπεδα θορύβου. Η επιλογή κατάλληλης αεροτομής είναι υψίστης σημασίας, για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν κατάλογοι αεροτομών, οι οποίες έχουν δοκιμαστεί στο παρελθόν σε αεροδυναμική σήραγγα. Τέτοια κατηγορία αεροτομών έχουν αναπτυχθεί από τη NACA (National Advisory Committee on Aeronautics).

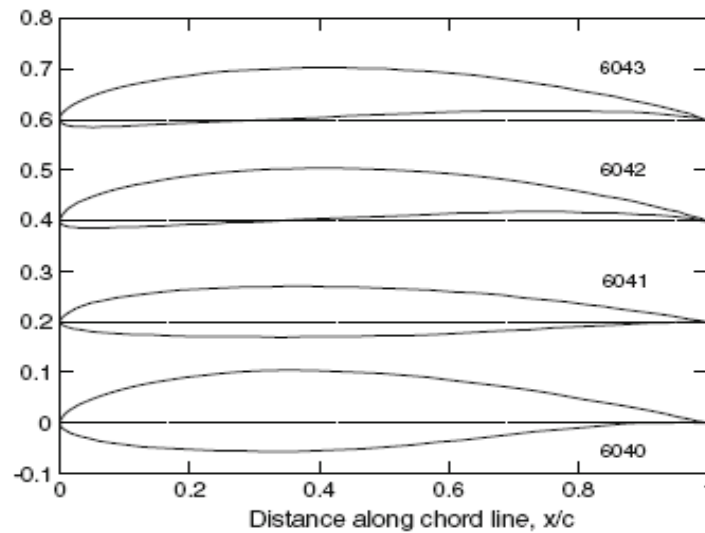
Η οικογένεια αεροτομών NACA συνοδεύεται από έναν αριθμό, ο οποίος υποδηλώνει τα βασικότερα χαρακτηριστικά της αεροτομής. Για παράδειγμα,

στον κωδικό μίας τετραψήφιας NACAxxxx, το πρώτο από τα τέσσερα ψηφία αντιστοιχεί στην καμπυλότητα, σαν ποσοστό της χορδής c (chord). Στην περίπτωση της συμμετρικής αεροτομής, το ψηφίο αυτό είναι το μηδέν (0). Ο δεύτερος αριθμός, όπως φαίνεται και στο επόμενο *διάγραμμα.3*, είναι το τέσσερα (4) και δηλώνει ότι η καμπυλότητα εμφανίζεται στο 40% της χορδής c . Αυτό είναι και το σημείο του μέγιστου πάχους για όλη την οικογένεια τετραψήφιας καμπυλών NACA. Ο αριθμός δώδεκα (12) που εμφανίζεται σε όλες τις παρακάτω αεροτομές, εξηγεί ότι οι συγκεκριμένες αεροτομές, έχουν μέγιστο πάχος t (thickness) ίσο με το 12% της χορδής.



Διάγραμμα.3.: Προφίλ αεροτομών NACA [Πηγή: Wood D., 2011]

Πέραν όμως, αυτής της κατηγορίας, υπάρχουν και οι πιο μοντέρνες αεροτομές της οικογένειας SG (Michael S. Selig και Phillipe Giguere), που σχεδιάστηκαν για χρήση σε μικρές Α/Γ. Ο σχεδιασμός τους και η γεωμετρία τους παρουσιάζονται στο ακόλουθο *διάγραμμα.4.*:



Διάγραμμα.4.: Προφίλ αεροτομών SG [Πηγή: Wood D., 2011]

Οι μικρές A/Γ λειτουργούν για μικρές τιμές του αριθμού Reynolds (Re). Ο αριθμός Re είναι ένας αδιάστατος αριθμός που ορίζεται από τη *σχέση.1.*:

$$Re = \frac{U_0 c}{\nu} \quad \text{Σχέση.1.}$$

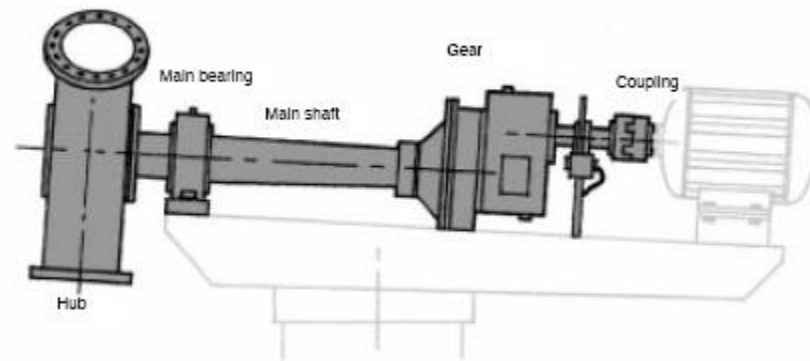
όπου:

- U_0 , η ταχύτητα του ανέμου,
- c , η χορδή της αεροτομής,
- ν , η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού ($\nu_{\text{αέρα}} = 15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν λίγα δεδομένα σχετικά με την απόδοση των αεροτομών για αριθμούς $Re < 10^5$, κυρίως επειδή είναι δύσκολο να μετρηθούν οι μικρές δυνάμεις που ασκούνται στην A/Γ . Αρκετοί επιστήμονες, μεταξύ των οποίων και ο Laitone [Laitone E., 1997], υποστηρίζουν ότι οι ιδανικότερες αεροτομές για $Re < 10^5$ είναι λεπτές, με πάχος μικρότερο του 2,5% της χορδής, και έχουν καμπυλότητα (camber) περίπου 5%. Πιθανώς το λεπτό πτερύγιο να αποτελεί τη μεγαλύτερη δυσκολία, καθώς υπάρχουν οι φυγόκεντρες δυνάμεις που ασκούνται στο πτερύγιο. Με άλλα λόγια, από την κατασκευαστική πλευρά θα ήταν επιθυμητό να χρησιμοποιείται μία αεροτομή μεγάλου πάχους κοντά

στη ρίζα του πτερυγίου που, όμως, θα οδηγούσε σε χαμηλή αεροδυναμική συμπεριφορά.

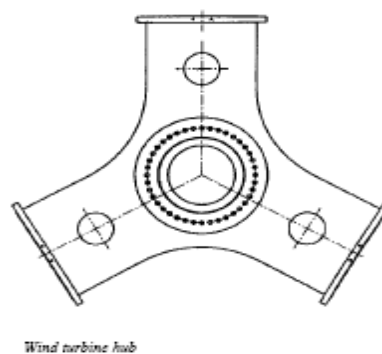
1.3.1.1.3 Σύστημα μετάδοσης ενέργειας



Εικόνα.6.: Σύστημα μετάδοσης ενέργειας Α/Γ [Πηγή: www.bonus.dk]

Όπως φαίνεται στην παραπάνω *εικόνα.6.*, η σύνδεση πτερυγίων και γεννήτριας, γίνεται μέσω της πλήμνης, του κύριου εδράνου κυλίσεως (ρουλεμάν), της κύριας ατράκτου, του κιβωτίου ταχυτήτων και του τελικού συνδέσμου με τη γεννήτρια, τα οποία στο σημείο αυτό θα επεξηγηθούν εν συντομία.

Πλήμνη



Εικόνα.7.: Πλήμνη Α/Γ [Πηγή: www.bonus.dk]

Μέσω της πλήμνης γίνεται η σύνδεση των πτερυγίων με την υπόλοιπη Α/Γ. Η πλήμνη αποτελεί μέρος της πτερωτής (δρομέα) και περιλαμβάνει εκείνο το μέρος της Α/Γ πάνω στο οποίο προσαρμόζονται τα πτερύγια. Η τελική της μορφή εξαρτάται τόσο από το είδος της πτερωτής όσο και από τους επιθυμητούς βαθμούς ελευθερίας στη θέση σύνδεσης πτερυγίων και άξονα. [Π.Ε. Παπαδούλης Θ., 2011]. Κατασκευάζεται συνήθως από ειδικό κράμα σιδήρου, ιδιαίτερα ανθεκτικό στα φορτία που δέχεται η Α/Γ.

Έδρανο κυλίσεως

Τα έδρανα κυλίσεως αποτελούνται από τέσσερα στοιχεία: τα σώματα κυλίσεως, τον κλωβό των σωμάτων κυλίσεως και το εσωτερικό και εξωτερικό στοιχείο. Τα σώματα κυλίσεως μπορεί να είναι Ball Bearings (ένσφαιρα) ή Roller Bearings (κυλινδρικά, κωνικά, βαρελοειδή κλπ) [Κωστόπουλος Θ., 2005]. Στις περισσότερες μοντέρνες Α/Γ συναντώνται έδρανα κυλίσεως Ball bearings και μάλιστα με δύο σειρές σωμάτων κυλίσεως. Αυτά τα έδρανα έχουν το πλεονέκτημα, λόγω της κατασκευής τους, να καταπονούνται λιγότερο. Στις Α/Γ οι δύο σειρές σωμάτων κυλίσεως στα έδρανα, εξασφαλίζουν την απορρόφηση των ακτινικών φορτίων, που προέρχονται από το βάρος του δρομέα, της ατράκτου, και των υψηλών αξονικών δυνάμεων, που προέρχονται από την πίεση του αέρα στο δρομέα.

Κλωβός

Ο κλωβός της ανεμογεννήτριας αποτελείται από ένα χαλύβδινο πλαίσιο και ένα περίβλημα το οποίο είναι κατασκευασμένο από πολυεστερικό υλικό. Ο κλωβός είναι κλειστός προς το εξωτερικό περιβάλλον και εδράζεται επί του πύργου της ανεμογεννήτριας μέσω συστήματος κορώνας-πινιόν έτσι ώστε να επιτρέπεται η περιστροφή του κατά 360 μοίρες σε σχέση με τον πύργο της ανεμογεννήτριας.

Κιβώτιο ταχυτήτων

Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι ένα από τα σημαντικότερα εξαρτήματα της Α/Γ. Βρίσκεται ανάμεσα στην κύρια άτρακτο και τη γεννήτρια, έτσι ώστε να μετατρέπει τη χαμηλή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε υψηλότερη, τέτοια ώστε να λειτουργήσει η γεννήτρια (ενδεικτικές τιμές 1.000rpm ή 1.500rpm). Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης περιλαμβάνει διβάθμιο ή τριβάθμιο κιβώτιο μετασχηματισμού της χαμηλής ταχύτητας περιστροφής της πτερωτής (συνήθως $20 \div 110$ rpm) σε υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής (άνω των 1.000rpm), στις οποίες λειτουργούν συνήθως οι ηλεκτρικές γεννήτριες. Ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός διβάθμιου συστήματος μετάδοσης είναι περίπου 96%, ενώ για λόγους ασφαλείας η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας.

Στις μικρές Α/Γ, που τα επίπεδα εξαγόμενης ισχύος τους είναι ορισμένα kW, δε χρησιμοποιείται κιβώτιο ταχυτήτων. Σε αντίθεση με τις μεγάλες Α/Γ, στις μικρές ο δρομέας περιστρέφεται με σημαντικά υψηλότερη ταχύτητα, η οποία επιτρέπει την απευθείας σύνδεσή του με την ηλεκτρική γεννήτρια. Τέλος, σχεδόν όλες οι μικρές Α/Γ λειτουργούν με γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη οι οποίες επιτρέπουν λειτουργία σε μεγάλο εύρος στροφών.

Σύνδεσμος κιβωτίου ταχυτήτων και γεννήτριας

Ο σύνδεσμος βρίσκεται ανάμεσα στο κιβώτιο ταχυτήτων και τη γεννήτρια. Πρόκειται για ένα εύκαμπτο εξάρτημα, υπό την έννοια ότι επιτρέπει εναλλαγές λίγων χιλιοστών, που επηρεάζουν την ευθυγράμμιση του κιβωτίου ταχυτήτων με τη γεννήτρια. Αυτός ο σύνδεσμος είναι απαραίτητος καθώς κατά τη λειτουργία της Α/Γ, εμφανίζονται τάσεις που προκαλούν τη σχετική κίνηση των εξαρτημάτων.

1.3.1.1.4 Γεννήτρια

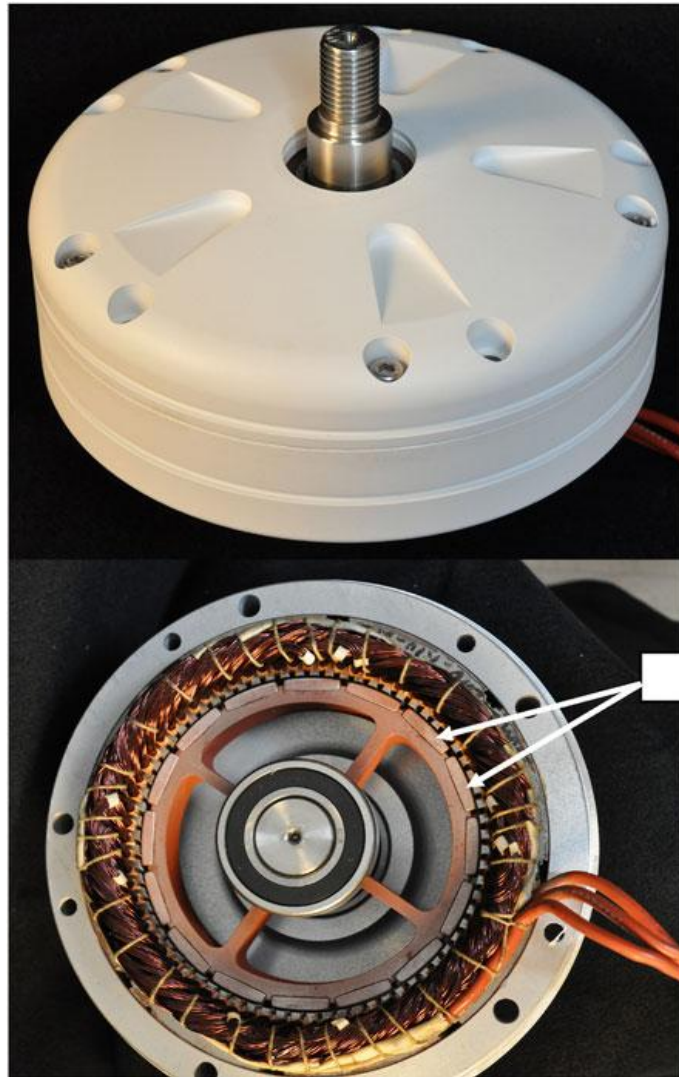
Η γεννήτρια είναι το τμήμα της Α/Γ που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Τα πτερύγια μεταφέρουν την κινητική ενέργεια του ανέμου, μέσω περιστροφής του συστήματος μετάδοσης (μηχανική ενέργεια) έως τη γεννήτρια, η οποία μεσολαβεί πριν τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Στο παρελθόν, οι μικρές Α/Γ χρησιμοποιούσαν γεννήτριες συνεχούς ρεύματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας Α/Γ είναι αυτή της παρακάτω *εικόνας.8.*, της γνωστής εταιρείας Jacobs Wind Electric Company.



Εικόνα.8.: Μικρή Α/Γ (2,5 kW) του 1940 [Πηγή: Jacobs Wind Electric Company]

Σήμερα όμως, προτιμούνται οι γεννήτριες τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Generators - PMGs). Υπάρχουν διάφορα είδη τέτοιων γεννητριών και μάλιστα έχουν κατασκευαστεί και ειδικές για χρήση αποκλειστικά σε μικρές Α/Γ. Κύρια χώρα κατασκευής τους είναι η Κίνα που διατηρεί τα μεγαλύτερα αποθέματα, των απαραίτητων για την κατασκευή τους, υλικών μαγνήτη. Οι γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη υπερτερούν έναντι άλλων λόγω της πολύ απλής κατασκευής τους. Ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα αυτών των γεννητριών είναι η πολύ καλή απόδοσή τους σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, που συνήθως σημαίνει ότι δε χρειάζεται

κιβώτιο ταχυτήτων. Τέλος, μία καλή επιλογή μαγνήτη μπορεί να εγγυηθεί την εφόρου ζωής διάρκεια της γεννήτριας.

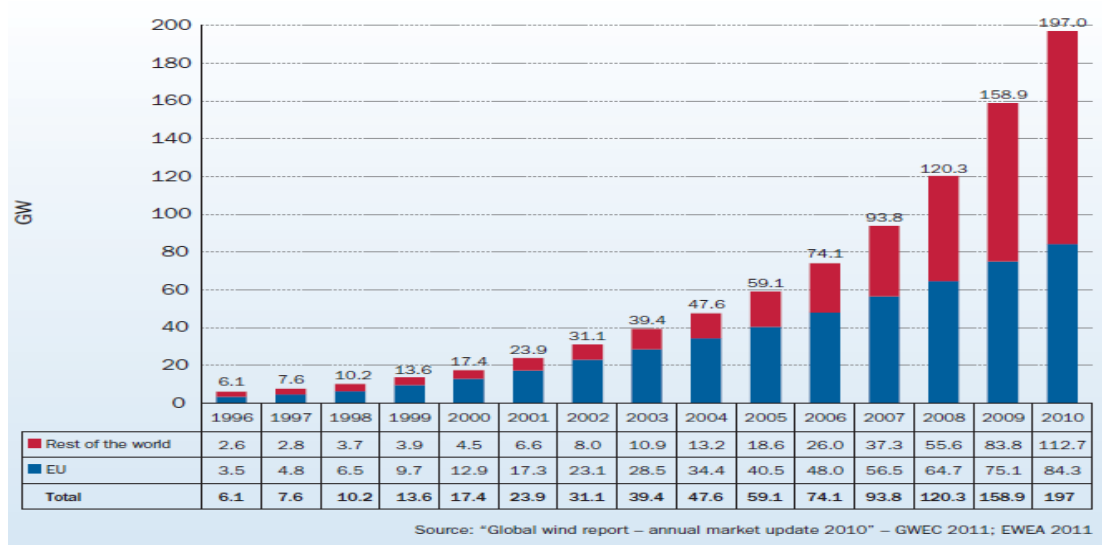


Εικόνα.9.: Εξωτερική και εσωτερική άποψη γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη [Πηγή: Wood D., 2011]

1.3.1.2 Η Αιολική Ενέργεια σε Παγκόσμιο Επίπεδο

Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο η Δανία αποτέλεσε την πρωτοπόρο χώρα στην ανάπτυξη και υιοθέτηση της αιολικής ενέργειας. Η πολιτική της συγκεκριμένης χώρας βασίστηκε στην παραγωγή ηλεκτρισμού από την αιολική ενέργεια και ακόμα μέχρι και σήμερα ο άνεμος αποτελεί κυρίαρχη πηγής ενέργειας. Από το 1990 και έπειτα άρχισε με γοργό ρυθμό να χρησιμοποιείται η αιολική ενέργεια, με αποτέλεσμα και άλλες χώρες, που διαθέτουν κατάλληλο αιολικό δυναμικό, να αρχίζουν να ασχολούνται με βελτιστοποίηση των ανεμογεννητριών, όπως η Γερμανία και η Ισπανία. Εκτός από το κατάλληλο αιολικό δυναμικό αυτές οι χώρες επωφελήθηκαν λόγω της ύπαρξης ισχυρών αγορών με ασφαλείς συνθήκες για τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά.

Σύμφωνα με το Παγκόσμιο Συμβούλιο Αιολικής Ενέργειας (Global Wind Energy Council - GWEC), κατά τη διάρκεια του 2010, εγκαταστάθηκαν σε παγκόσμιο επίπεδο 38,3GW αιολικής ενέργειας, φθάνοντας συνολικά τα 197GW έως το τέλος του έτους. Η αιολική ενέργεια καλύπτει σήμερα το 5,3% της ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης, από εγκατεστημένη ισχύ 84,3GW.



Διάγραμμα.5.: Συνολική ετήσια ισχύς αιολικής ενέργειας (1996÷2010) [Πηγή: GWEC, 2011]

Το 2010 όλα τα κράτη μέλη της Ε.Ε. υπέβαλαν Εθνικά Σχέδια Δράσης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (National Renewable Energy Action Plans - NREAPs) στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Τα σχέδια αυτά ακολουθούν ένα πρότυπο που εκπονήθηκε από το Ευρωπαϊκή Επιτροπή και δείχνουν εκτιμήσεις της τελικής κατανάλωσης ενέργειας, από ανανεώσιμες πηγές και μη, για κάθε έτος μεταξύ 2010 και 2020. Περιέχουν επίσης, την αναμενόμενη συνεισφορά των διαφόρων μορφών ενέργειας για τους τρεις τομείς ενέργειας: θέρμανση / ψύξη, ηλεκτρική ενέργεια και τις μεταφορές. Επιπροσθέτως, παρουσιάζουν ένα στόχο για κάθε τεχνολογία ΑΠΕ, συμπεριλαμβανομένων τόσο των χερσαίων όσο και των υπεράκτιων εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας, και καθορίζουν τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ (MW) και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (MWh), για κάθε έτος. Προβλέπεται ότι η αιολική ενέργεια θα παράγει 495 TWh του ηλεκτρικού ρεύματος το 2020.

Σενάρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας (European Wind Energy Association - EWEA) δείχνουν ότι η αιολική ενέργεια το 2020 θα πρέπει να καλύπτει το 15,7% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από 230GW εγκατεστημένα, ενώ μέχρι το 2030, 28,5% από 400GW εγκατεστημένα. Πράγματι, η EWEA θεωρεί ότι η αιολική ενέργεια θα μπορεί να καλύψει τη μισή ενεργειακή ζήτηση στην Ευρώπη μέχρι το 2050, με το υπόλοιπο από άλλες ανανεώσιμες πηγές.

Για να εξασφαλιστεί η περαιτέρω ανοδική τάση της αιολικής ενέργειας και η δυνατότητα για 100% κάλυψη από ΑΠΕ το 2050, απαιτείται νέα νομοθεσία για την περίοδο μετά το 2020 και ένας φιλόδοξος και δεσμευτικός στόχος για το 2030.

Η πορεία ανάπτυξης της αγοράς της αιολικής ενέργειας υπήρξε συνεχώς ανοδική και άκρως εντυπωσιακή. Στις αρχές 2012 η εγκατεστημένη ισχύς από αιολική ενέργεια ξεπερνούσε τα 238.000MW ανεμογεννητριών σε παραπάνω από 70 χώρες, σύμφωνα με ανακοίνωση του Παγκόσμιου Συμβουλίου Αιολικής Ενέργειας (Global Wind Energy Council - GWEC). Οι μισές ανεμογεννήτριες είναι εγκατεστημένες στην Ευρώπη, γεγονός που

αποδεικνύει την πολιτική απόφαση για «πράσινη» ενέργεια που έχει ληφθεί στην γηραιά ήπειρο.

Σήμερα, χώρες όπως η Γερμανία, η Ισπανία, οι ΗΠΑ, η Ινδία και η Κίνα αποτελούν τις σημαντικότερες αγορές αιολικής ενέργειας καλύπτοντας τα $\frac{3}{4}$ της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η Γερμανική αγορά κατέχει περίπου το 40% της Ευρωπαϊκής αγοράς και το 24% της παγκόσμιας αγοράς. Τα τελευταία χρόνια χώρες όπως η Ιταλία, η Γαλλία, η Αγγλία και η Πορτογαλία έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται ως νέες αγορές με εγκατεστημένη ισχύ άνω των 2.000MW. Οι συγκεκριμένες χώρες αναπτύσσονται με πολύ υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης.



Εικόνα.10.: Αιολικό Πάρκο Royd Moor (6.5MW) - South Yorkshire/Αγγλία

Σημειώνεται πως η βιομηχανία των ανεμογεννητριών αναπτύχθηκε στις χώρες που δημιούργησαν και στήριξαν την ανάπτυξη των αιολικών εγκαταστάσεων. Οι τέσσερις μεγαλύτεροι κατασκευαστές, από τους οποίους οι τρεις είναι Ευρωπαϊκοί, καλύπτουν τα $\frac{2}{3}$ της παγκόσμιας αγοράς ενώ στο σύνολο τους οι Ευρωπαϊκοί κατασκευαστές καλύπτουν το 75% της παγκόσμιας αγοράς. Μερικοί από τους σημαντικότερους κατασκευαστές στον κόσμο είναι η Δανέζικη Vestas, η Αμερικάνικη GE Wind, η Ισπανική GAMESA και η Γερμανική ENERCON [Ζερβός Α., 2008].

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό το γεγονός ότι στα 30 χρόνια ύπαρξης των ανεμογεννητριών στην αγορά των ΑΠΕ, το μέγεθος τους εκατονταπλασιάστηκε όσον αφορά την εγκατεστημένη ισχύ (από 50kW σε 5.000kW) και οχταπλασιάστηκε όσον αφορά τη διάμετρο τους (από 15m σε 124m). Επισημαίνεται πως το μέγεθος των Α/Γ που εγκαθίσταται ετησίως αυξάνεται συνεχώς από 240MW το 1993 σε 41.000MW το 2011.

Πιο συγκεκριμένα, αναφέρονται σημαντικά έργα που είναι σε εξέλιξη:

- offshore αιολικό πάρκο στο Anholt της Δανίας (400MW),
- offshore αιολικό πάρκο στο BARD της Γερμανίας (400MW),
- αιολικό πάρκο Clyde της Αγγλίας (548MW),
- αιολικό πάρκο Greater Gabbard της Αγγλίας (500MW),
- αιολικό πάρκο Shepherds Flat των ΗΠΑ (845MW),
- αιολικό πάρκο Macarthur της Αυστραλίας (420MW).

1.3.2. Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Η κατασκευή των υδροηλεκτρικών (μικρών ή μεγάλων) είναι μία αρκετά παλιά και γνωστή τεχνολογική εφαρμογή. Η αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας μέσω μετατροπής της σε μηχανική ήταν γνωστή από τους αρχαίους χρόνους, με τους γνωστούς νερόμυλους, κατασκευές μεγάλου μεγέθους και μικρής ισχύος. Η τεχνολογία των νερόμυλων δεν εξελίχθηκε ουσιαστικά μέχρι τις αρχές του 19^{ου} αιώνα, όταν εμφανίστηκαν οι πρώτες μηχανές που μπορούν να χαρακτηριστούν ως υδροστρόβιλοι. Σταδιακά η αύξηση των ενεργειακών αναγκών επέτρεψε την κατασκευή όλο και μεγαλύτερων έργων μετατροπής της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική. Στην Ευρώπη οι δύο-τρεις δεκαετίες μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο χαρακτηρίζονται ως η χρυσή περίοδος των μεγάλων Υδροηλεκτρικών έργων (ΥΗΕ), επειδή η έντονη αξιοποίηση του διαθέσιμου υδραυλικού δυναμικού έγινε με μονάδες μεγάλης ισχύος, μερικών εκατοντάδων MW η κάθε μία, ως αποτέλεσμα της μεγάλης αύξησης της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας και ύστερα από την καταστροφή της υποδομής που είχε λάβει χώρα μετά τον πόλεμο [Παπαντώνης Δ., 2008].

Σήμερα, ενώ το δυναμικό των μικρών ΥΗΕ (<10MW) είναι αρκετά μεγάλο και ανεκμετάλλευτο σε μεγάλο βαθμό, παρατηρείται πως το δυναμικό των μεγάλων ΥΗΕ είναι περιορισμένο. Το περιορισμένο δυναμικό οφείλεται στο γεγονός ότι αφενός έχει γίνει ήδη σε μεγάλο βαθμό η εκμετάλλευσή του και αφετέρου η δημιουργία νέων μονάδων παρουσιάζει δυσκολίες λόγω αρκετών περιβαλλοντικών προβλημάτων. Το διεθνές ενδιαφέρον για τα μικρά ΥΗΕ αντικατοπτρίζεται από την ανάπτυξη σημαντικού αριθμού κατασκευαστριών εταιρειών, τις περισσότερες φορές θυγατρικές των εταιρειών που κατασκευάζουν εξοπλισμό για τα μεγάλα ΥΗΕ, που ειδικεύονται στην κατασκευή τυποποιημένου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού για τα νέας γενιάς μικρά ΥΗΕ.

Τα ΥΗΕ και κυρίως τα μικρά έχουν πληθώρα πλεονεκτημάτων. Πρώτον, χρησιμοποιούν για την παραγωγή ενέργειας τις υδατοπτώσεις οι οποίες είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και δεν αντιμετωπίζουν ορατό κίνδυνο εξάντλησης. Επίσης, τα ΥΗΕ δεν έχουν απόβλητα ή κατάλοιπα, συνεπώς δεν μολύνουν το περιβάλλον, ενώ συνήθως η κατασκευή τους συνδυάζεται και με άλλες εργασίες όπως άρδευση, ύδρευση και άλλα. Ακόμα, οι υδροστρόβιλοι είναι στιβαρές και αξιόπιστες μηχανές που απαιτούν μικρή συντήρηση και επίβλεψη, ενώ επίσης κατά τις ανάγκες κατασκευής των ΥΗΕ κατασκευάζονται έργα υποδομής που βοηθούν στην αξιοποίηση απομακρυσμένων περιοχών. Τέλος, η διάρκεια ζωής των ΥΗΕ είναι πολύ μεγάλη (50 έτη για τα μεγάλα και 30 έτη για τα μικρά) και ίσως το σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα πολύ γρήγορης παραλαβής και απόρριψης φορτίου έτσι ώστε να γίνεται δυνατή η παρακολούθηση της μεταβολής της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και η κάλυψη των αιχμών ζήτησης του διασυνδεδεμένου δικτύου. Επιπλέον, τα υδροηλεκτρικά έργα, υποκαθιστούν σε πολλές περιπτώσεις τα ορυκτά καύσιμα, συμβάλλοντας έτσι αποφασιστικά στη μείωση των εκπομπών CO₂ και στον περιορισμό του φαινομένου του θερμοκηπίου.



**Εικόνα.11.: Το υδροηλεκτρικό φράγμα στην Λίμνη Πλαστήρα (400MW) -
Καρδίτσα /Ελλάδα**

Όσον αφορά την ενεργειακή συνεισφορά των ΥΗΕ σημειώνεται πως στην Ελλάδα για το έτος 2005, το 79% στην συμμετοχή των ΑΠΕ για την εγχώρια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προήλθε από τα μεγάλα ΥΗΕ της ΔΕΗ τα οποία καλύπτουν το 9,1% της παραγόμενης ενέργειας και παρήγαγαν 4.160GWh με συνολικά εγκατεστημένη ισχύ της τάξης των 3.000MW και η οποία αντιστοιχεί στον 27% περίπου της συνολικά εγκατεστημένης ισχύος των μονάδων παραγωγής της ΔΕΗ [Παπαντώνης Δ., 2008]. Η εγκατεστημένη ισχύς τους στην Ελλάδα, στα τέλη του 2011, έφτασε τα 205MW. Η ΔΕΗ προγραμματίζει την ένταξη νέων μεγάλων υδροηλεκτρικών σταθμών όπως τον Ιλαρίωνα με Εγκατεστημένη Ισχύ 153MW, το Μετσοβίτικο 29MW, τη Μεσοχώρα 160MW, το Τέμενος 18,9MW. Έχει ολοκληρωθεί η μελέτη των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών όπως του ΜΥΗΣ Ιλαρίωνα 4MW, του ΜΥΗΣ Μεσοχώρας 1,6MW και του ΜΥΗΣ Παπαδιάς 0,50MW.

Σε Ευρωπαϊκό και Διεθνές επίπεδο, η Γαλλία είναι μία από τις χώρες στις οποίες έχει ήδη αξιοποιηθεί πολύ μεγάλο ποσοστό του οικονομοτεχνικά εκμεταλλεύσιμου υδροδυναμικού, σε ποσοστό εκμετάλλευσης 95,8% το 1987. Σύμφωνα με στοιχεία του 2002, τα μικρά ΥΗΕ ισχύος μικρότερης των 10 MW είχαν συνολικά εγκατεστημένη ισχύ 1.737MW και ετήσια παραγωγή 6.621MWh/y. Σημειώνεται πως το 20% της παραγωγής των μικρών ΥΗΕ αντιστοιχεί σε μικρά ΥΗΕ που ανήκουν στην εθνική επιχείρηση ηλεκτρισμού (Électricité de France - EDF) ενώ το υπόλοιπο 80% σε μικρά ΥΗΕ που ανήκουν σε αυτόνομους παραγωγούς.



Εικόνα.12.: Το ΥΗΕ Rance (240MW) - Brittany /Γαλλία

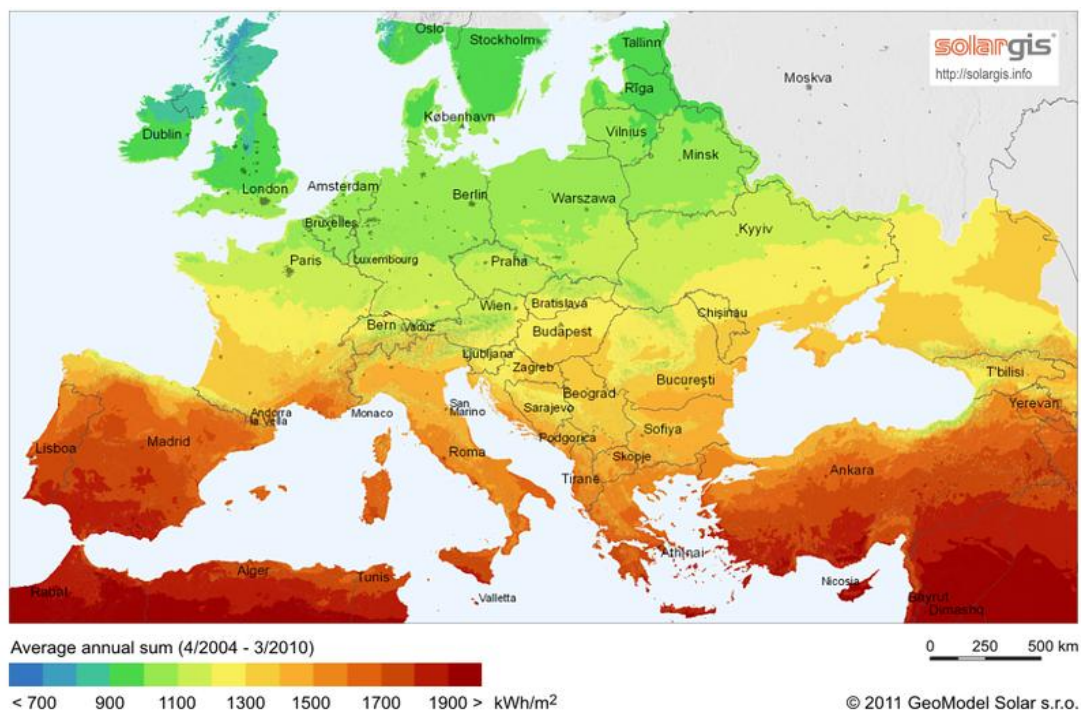
Στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής το οικονομικά και τεχνικά αξιοποιήσιμο υδροδυναμικό ανέρχεται σε 171.000MW και από αυτά έχουν εγκατασταθεί 61.000MW. Αξίζει να τονιστεί πως η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται σε 3.000TWh ενώ από την αξιοποίηση του υδροδυναμικού παρήχθησαν 468TWh. Παρουσιάζεται, συνεπώς, ιδιαίτερο ενδιαφέρον ανάπτυξης και εξέλιξης της τεχνολογίας των ΥΗΕ, η οποία αποτελεί ένα κυρίαρχο εργαλείο των ΑΠΕ.



Εικόνα.13.: Το φράγμα Hoover (2.080MW) - Nevada/ΗΠΑ

1.3.3. Ηλιακή Ενέργεια

Την περασμένη δεκαετία η παγκόσμια αγορά ηλεκτρισμού από ηλιακή ενέργεια σημείωσε εντυπωσιακά σημαντικούς ρυθμούς ανάπτυξης, υπερκαλύπτοντας μάλιστα άλλους τομείς τεχνολογίας. Την περίοδο 1987÷2000 η παραγωγή φωτοβολταϊκών αυξήθηκε σημαντικά σε ετήσιο ποσοστό 18,9%, ενώ έως το 2005 η ανάπτυξη του τομέα υπήρξε ακόμα μεγαλύτερη. Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών με καταλύτη μία σειρά προγραμμάτων μεγάλης κλίμακας για την ενίσχυση της αγοράς τους ανά τον κόσμο, γνώρισε την περίοδο 2000÷2007 μία ετήσια ανάπτυξη μεγαλύτερης του 40%, φτάνοντας να παράγει 3.000MWp το 2006 [Ζερβός Α., 2008]. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς έφθασε το 1GWp το 1999 και δεκαπλασιάστηκε μέχρι το 2007. Σημειώνεται πως στα τέλη του 2004 συμπληρώθηκε και το 1GW στην Ευρώπη ενώ στα τέλη του 2006 επιτεύχθηκε ο στόχος των 3GWp της Λευκής Βίβλου (Ευρωπαϊκή Οδηγία, 2009).



Εικόνα.14.: Το ηλιακό δυναμικό ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη [Πηγή:

<http://solargis.info>]

Ένα μεγάλο μέρος της ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών οφείλεται σε καλά στοχευμένα εθνικά προγράμματα υποστήριξης τους. Αυτή την ανάπτυξη την στήριξαν αποφάσεις και εθνικά θεσμικά πλαίσια θετικά προς τον τομέα των ηλιακών. Για παράδειγμα μία τέτοια απόφαση ήταν η σύνδεση των φωτοβολταϊκών συστημάτων με το εθνικό δίκτυο και η ενίσχυση της τιμής πώλησης της κιλοβατώρας. Χώρες όπως η Γερμανία και η Ιαπωνία, αλλά και άλλες Ευρωπαϊκές χώρες περιλαμβανομένης της Ελλάδας, υιοθέτησαν και υποστήριξαν τέτοιες πολιτικές. Αυτά τα προγράμματα ενίσχυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων αποδείχθηκαν άκρως αποτελεσματικά και οδήγησαν σε εντυπωσιακή αύξηση της συμμετοχής των τεχνολογιών ηλιακών συστημάτων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο διασυνδεδεμένο δίκτυο.



Εικόνα .15.: Το Ηλιακό Πάρκο Nellis (14,2MW) Nevada/ΗΠΑ

Σήμερα, λειτουργούν 36 ηλιακά πάρκα σε χώρες όπως οι ΗΠΑ, η Ισπανία, η Αλγερία, το Ιράν, το Μαρόκο, η Αίγυπτος, η Ιταλία, η Ταϊλάνδη και η Γερμανία,

με συνολική εγκατεστημένη ισχύ που ανέρχεται στα 1.702,65MW. Μόνο στις ΗΠΑ έχει ανακοινωθεί η κατασκευή 25 ηλιακών πάρκων συνολικής ισχύος 6.510MW, με μεγαλύτερο το Rio Mesa Solar Project 750MW στην πολιτεία της Καλιφόρνια. Στην Ισπανία έχουν προγραμματιστεί άλλα 16 ηλιακά πάρκα συνολικής ισχύος 1.080,08MW, ενώ άλλα 6.656MW έχουν ανακοινωθεί να κατασκευαστούν σε χώρες όπως το Σουδάν, την Κίνα, το Μαρόκο, το Ισραήλ και το Μεξικό. Παρατηρείται δηλαδή, πως η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών είναι κυρίαρχης σημασίας για τις περισσότερες χώρες του κόσμου που διαθέτουν υψηλό ηλιακό δυναμικό.

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των διασυνδεδεμένων στο δίκτυο φωτοβολταϊκών της Ελλάδας, στις αρχές του 2012 ήταν 439MW. Η ΔΕΗ - Ανανεώσιμες προχωρά στην ανάπτυξη σημαντικών φωτοβολταϊκών έργων, όπως αυτό στην περιοχή της Μεγαλόπολης. Το συγκεκριμένο πάρκο θα έχει συνολική ισχύ 50MW και υπολογίζεται ότι η ενεργειακή παραγωγή του θα καλύπτει το 42% των ενεργειακών αναγκών του Ν. Αρκαδίας, ποσοστό το οποίο αντιστοιχεί σε 28.000 νοικοκυριά. Η συμβολή του έργου στην προστασία του περιβάλλοντος πρόκειται να είναι ανεκτίμητη, καθώς από τη λειτουργία του θα παράγονται περίπου 70.000MWh/y και θα αποφεύγεται η εκπομπή 70.000 τόνων CO₂, 680 τόνων SO₂ και 131 τόνων NO_x ετησίως. Παράλληλα, το έργο αποτελεί το πρώτο βήμα για την ανάδειξη της περιοχής σε ενεργειακό κέντρο ΑΠΕ της χώρας μας. Επιπλέον, η ίδια εταιρεία προχωρά στην ανάπτυξη φωτοβολταϊκών πάρκων ισχύος 200MW στην περιοχή της Πτολεμαΐδας.

Τέλος, αναφέρονται σημαντικά έργα που είναι σε εξέλιξη:

- ηλιακό πάρκο Ivaḡrah των ΗΠΑ (370MW),
- ηλιακό πάρκο Solana των ΗΠΑ (280MW),
- ηλιακό πάρκο Ashalim του Ισραήλ (250MW),
- ηλιακό πάρκο Solaben της Ισπανίας (100MW),
- ηλιακό πάρκο Shams των ΗΑΕ (100MW),
- ηλιακό πάρκο Guj της Ινδίας (50MW).

1.3.4. Βιομάζα/Βιοκαύσιμα

Η αξιοποίηση της βιομάζας αποτελεί έναν σημαντικό τομέα των ΑΠΕ με ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες προοπτικές για το μέλλον. Επίσης, η αξιοποίηση της βιομάζας για την παραγωγή ενέργειας μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο με ευρύτερο κοινωνικό και οικονομικό όφελος ιδιαίτερα σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο.

Η βιομάζα και τα βιοκαύσιμα θεωρούνται ισχυροί συντελεστές της αγοράς με υψηλές προοπτικές ανάπτυξης. Η αξιοποίηση της βιοενέργειας συμβάλλει σημαντικά στην ενεργειακή οικονομία των αγροτικών περιοχών. Μεγάλο ενδιαφέρον εντοπίζεται στην εφαρμογή νέων τεχνολογιών για την ενεργειακή αξιοποίηση είτε γεωργικών παραπροϊόντων είτε ενεργειακών καλλιεργειών σε εκτάσεις που προβλέπεται να αποσυρθούν. Η βιομάζα είναι η μοναδική Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας που μπορεί να συνεισφέρει σε όλες τις μορφές ενεργειακής χρήσης, δηλαδή τον ηλεκτρισμό, τη θερμότητα και τις μεταφορές [Ζερβός Α., 2008]. Παρόλα αυτά οι ρυθμοί αύξησης της χρήσης της βιομάζας στην Ευρωπαϊκή ένωση είναι μικρότεροι από ότι στην αιολική ή στην ηλιακή ενέργεια. Πάντως υπάρχουν τομείς, όπως του βιοαερίου, της παραγωγή ηλεκτρισμού και των υγρών καυσίμων που εμφανίζουν σημαντικό ρυθμό αύξησης τα τελευταία χρόνια.

Ορισμένα πλεονεκτήματα χρήσης της βιομάζας είναι τα εξής. Πρώτον, η καύση της βιομάζας έχει μηδενικό ισοζύγιο διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και δεν συνεισφέρει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, ενώ παράλληλα η μηδαμινή ύπαρξη του θείου στη βιομάζα συμβάλλει σημαντικά στον περιορισμό των εκπομπών του διοξειδίου του θείου (SO_2) που είναι υπεύθυνο για την όξινη βροχή. Ακόμα, από τη στιγμή που η βιομάζα είναι εγχώρια πηγή ενέργειας, η αξιοποίησή της σε ενέργεια συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενα καύσιμα και βελτίωση του εμπορικού ισοζυγίου, στην εξασφάλιση του ενεργειακού εφοδιασμού και στην εξοικονόμηση του συναλλάγματος [Κοδοσάκης Δ., 1994]. Τέλος, η ενεργειακή αξιοποίηση της

βιομάζας σε μια περιοχή, αυξάνει την απασχόληση στις αγροτικές περιοχές με τη χρήση εναλλακτικών καλλιεργειών, τη δημιουργία εναλλακτικών αγορών για τις παραδοσιακές καλλιέργειες και τη συγκράτηση του πληθυσμού στις εστίες τους, συμβάλλοντας έτσι στη κοινωνικό-οικονομική ανάπτυξη της περιοχής. Σημειώνεται πως μελέτες έχουν δείξει ότι η παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων έχει θετικά αποτελέσματα στον τομέα της απασχόλησης τόσο στον αγροτικό όσο και στο βιομηχανικό χώρο.

1.3.5. Γεωθερμία

Η απαιτούμενη τεχνολογία για την αξιοποίηση της γεωθερμίας που εμπεριέχεται σε υπόγεια ρευστά είναι πλέον μία δοκιμασμένη μέθοδος σε ευρεία κλίμακα, οικονομικά ανταγωνιστική και σε διεθνές επίπεδο. Σημαντική συνεισφορά μπορούν να έχουν οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας οι οποίες εκμεταλλεύονται το γεγονός της σταθερής θερμοκρασίας του εδάφους σε βάθος από 15m έως 100m [Ζερβός Α., 2008]. Σημειώνεται πως η εφαρμογή τους για παροχή θέρμανσης, ψύξης καθώς και ζεστού νερού έχει ήδη αρχίσει σε αρκετές χώρες τα τελευταία χρόνια.

Η πρώτη βιομηχανική εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας έγινε στο Lardarello της Ιταλίας, όπου από τα μέσα του περασμένου αιώνα χρησιμοποιήθηκε ο φυσικός ατμός για να εξατμίσει τα νερά που περιείχαν βορικό οξύ αλλά και να θερμάνει διάφορα κτήρια. Στο ίδιο μέρος η πρώτη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από τη γεωθερμία (σήμερα παράγονται εκεί 2,5 δισ. kWh/y). Σπουδαία είναι η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας από την Ισλανδία, όπου καλύπτεται πολύ μεγάλο μέρος των αναγκών της χώρας σε ηλεκτρική ενέργεια και θέρμανση.



Εικόνα.16.: Το Γεωθερμικό Πάρκο Nesjavellir (120MW) Thingvellir/Ισλανδία

Κατά το έτος 2005, 72 χώρες είχαν αναπτύξει γεωθερμικές εφαρμογές χαμηλής-μέσης θερμοκρασίας, κάτι που δηλώνει σημαντική πρόοδο σε σχέση με το 1995, όταν είχαν αναφερθεί εφαρμογές μόνο σε 28 χώρες. Η εγκατεστημένη θερμική ισχύς γεωθερμικών μονάδων μέσης και χαμηλής θερμοκρασίας ανήλθε το 2007 στα 28.268MWt, παρουσιάζοντας αύξηση 75% σε σχέση με το 2000, με μέση ετήσια αύξηση 12% [Φυτίκας Μ., κ.α., 2008]. Αντίστοιχα, η χρήση ενέργειας αυξήθηκε κατά 43% σε σχέση με το 2000 και ανήλθε στα 273.372TJ (75.940GWh/y).

Σημειώνεται πως παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος με γεωθερμική ενέργεια το 2008 γινόταν σε 24 χώρες. Το 2007 η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων παραγωγής ενέργειας στον κόσμο ανήλθε στα 9.735MWe, σημειώνοντας αύξηση περισσότερων από 800MWe σε σχέση με το 2005.



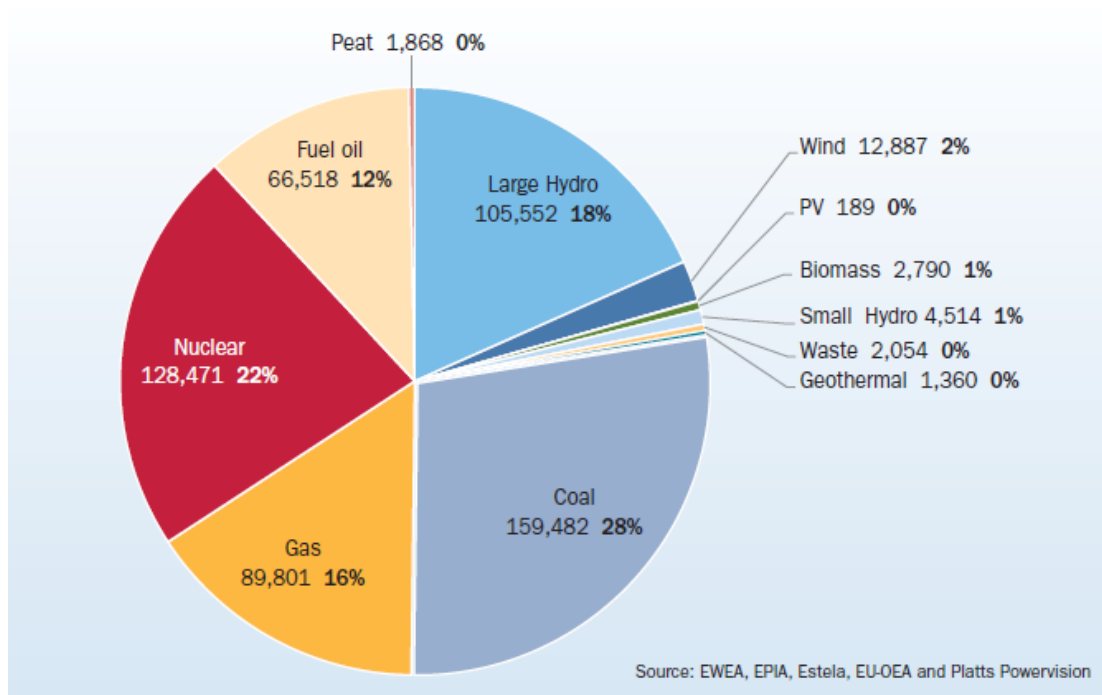
Εικόνα.17.: Το Γεωθερμικό Πάρκο Palinpinon Sitio Nasulo/Φιλιππίνες

Επισημαίνεται πως, η εγκατεστημένη ισχύς εφαρμογών γεωθερμίας για ηλεκτροπαραγωγή στην Ευρώπη αποτελεί το 9% της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος και είναι συγκεντρωμένη κατά 99% στην Ιταλία. Επισημαίνεται πως το δυναμικό αλλά και ο ρυθμός αύξησης της γεωθερμίας για ηλεκτροπαραγωγή είναι μικροί. Όμως οι γεωθερμικές εγκαταστάσεις για θερμικές χρήσεις και ιδιαίτερα οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας παρουσιάζουν αρκετά υψηλότερους ρυθμούς αύξησης.

Τα περιβαλλοντικά οφέλη της γεωθερμίας μπορούν να συνοψιστούν ως εξής. Πρώτον υπάρχει συνεχής παροχή ενέργειας, με μικρό λειτουργικό κόστος, αν και το κόστος παγίων είναι σημαντικά αυξημένο σε σχέση και με τις συμβατικές μορφές ενέργειας. Ακόμα παρατηρούνται μηδενικές ή μικρές εκπομπές αερίων στο περιβάλλον και μικρή απαίτηση γης. Η χρήση γεωθερμίας συμβάλει στην επίτευξη των στόχων της Λευκής Βίβλου της Ε.Ε. και του Πρωτοκόλλου του Κιότο, όπως έχει παρουσιασθεί στην παράγραφο 1.2. Τέλος, η γεωθερμία αποτελεί τοπική μορφή ενέργειας με συνέπεια την οικονομική ανάπτυξη της γεωθερμικής περιοχής και συμβάλει στην μείωση της ενεργειακής εξάρτησης μιας χώρας, με τον περιορισμό των εισαγωγών ορυκτών καυσίμων.

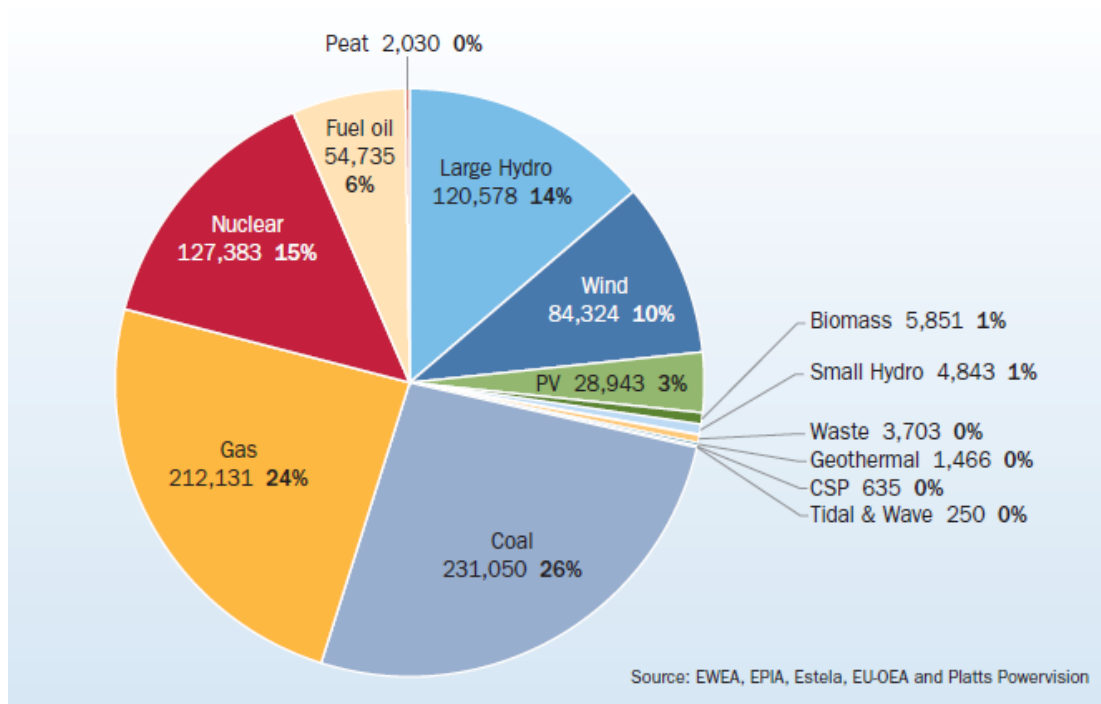
1.4 Ενεργειακό μίγμα

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της αυστηρής ενεργειακής πολιτικής στην Ε.Ε. είναι εμφανή. Εξετάζοντας τα παρακάτω *διαγράμματα.6. και .7.*, από το 2000 έως το 2010 , είναι φανερό ότι έγιναν αρκετές αλλαγές στα ποσοστά ανά μέθοδο παραγωγής ενέργειας, με σημαντική αύξηση στην αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας.



Διάγραμμα.6.: Ευρωπαϊκό ενεργειακό μίγμα 2000 (575,5GW) [Πηγή: EWEA, EPIA, Estela, EU-OEA and Platts Powervision]

Σημειώνεται, πως το Ευρωπαϊκό ενεργειακό μίγμα αυξήθηκε κατά 52% μέσα σε μία δεκαετία, γεγονός που υποδηλώνει την ραγδαία αύξηση της ενεργειακής αύξησης στην γηραιά ήπειρο αλλά και της ταυτόχρονης τεχνολογικής ανάπτυξης. Μέσα σε δέκα χρόνια η συμβολή της Αιολικής ενέργειας αυξήθηκε από 12,887GW σε 84,324GW φανερώνοντας την αλλαγή πορείας που έχουν θεσπίσει τα κράτη/μέλη της Ε.Ε.

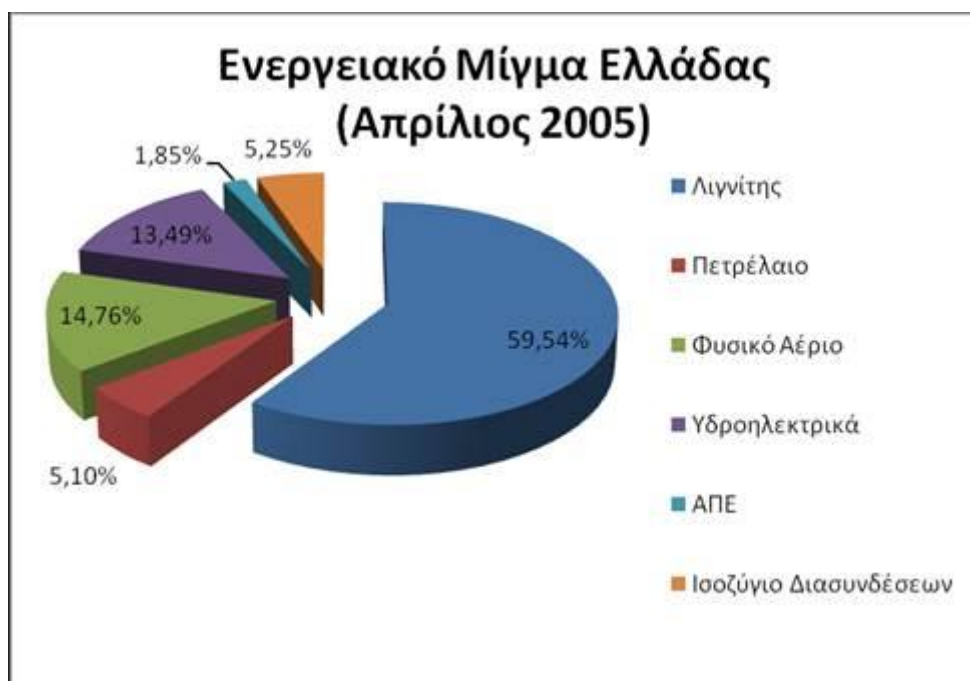


Διάγραμμα.7.: Ευρωπαϊκό ενεργειακό μίγμα 2010 (877,9GW) [Πηγή: EWEA, EPIA, Estela, EU-OEA and Platts Powervision]

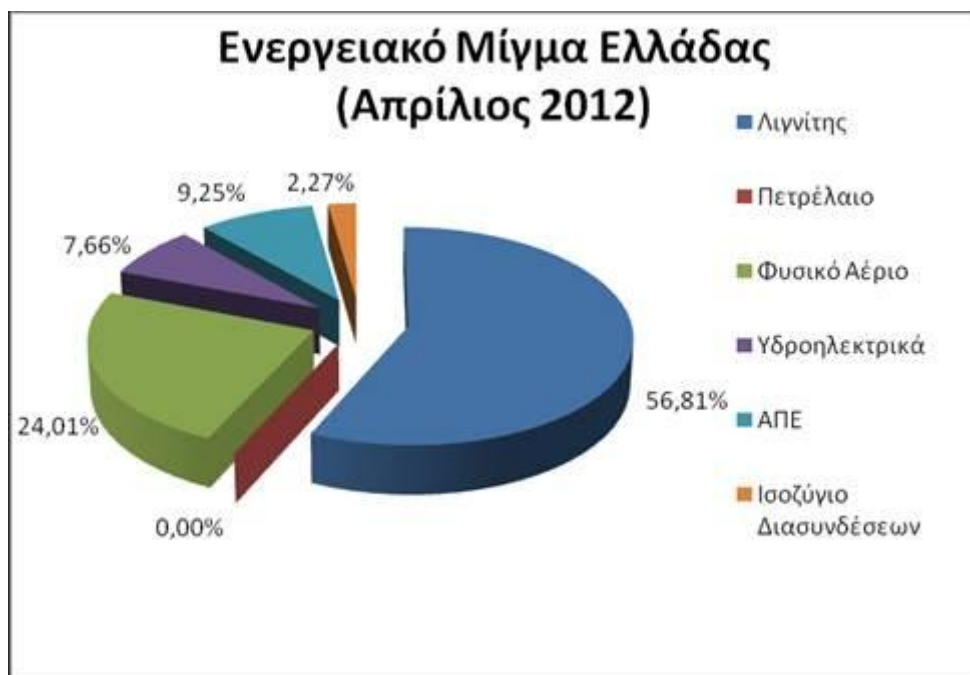
1.5 Η Ενεργειακή κατάσταση της Ελλάδας

Η ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα μέχρι και το πρόσφατο παρελθόν βασιζόταν στην καύση των μεγάλων αποθεμάτων της σε λιγνίτη. Σύμφωνα όμως με τις όλο και αυστηρότερες οδηγίες για την περιβαλλοντική διάσωση του πλανήτη, απαιτούνται δραστικές αλλαγές, με κυρίαρχη την αντικατάσταση όλων των παλαιών λιγνιτικών ατμοηλεκτρικών σταθμών από νέα, «πράσινα» μέσα παραγωγής ενέργειας.

Συνεπώς, έγινε επιτακτική η ανάγκη για διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα της Ελλάδας. Πράγματι, παρατηρήθηκε αλλαγή στο ενεργειακό μίγμα της Ελλάδας, από το 2005 έως σήμερα, με σημαντική αύξηση των ΑΠΕ και του φυσικού αερίου και ταυτόχρονη εξάλειψη της κατανάλωσης του πετρελαίου. Ο λιγνίτης, όμως, εξακολουθεί να κατέχει την πρώτη θέση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σύμφωνα με τον ΑΔΜΗΕ (Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας).



Διάγραμμα.8.: Ενεργειακό μίγμα Ελλάδας - Απρίλιος 2005 [Δεδομένα: ΑΔΜΗΕ 2005]



Διάγραμμα.9.: Ενεργειακό μίγμα Ελλάδας - Απρίλιος 2012 [Δεδομένα: ΑΔΜΗΕ 2012]

Η Ελλάδα εισάγει πετρέλαιο από τη Σαουδική Αραβία, τη Ρωσία, το Ιράκ και τη Λιβύη, προσπαθώντας να καλύψει τη μεγάλη απώλεια, από την πρόσφατη

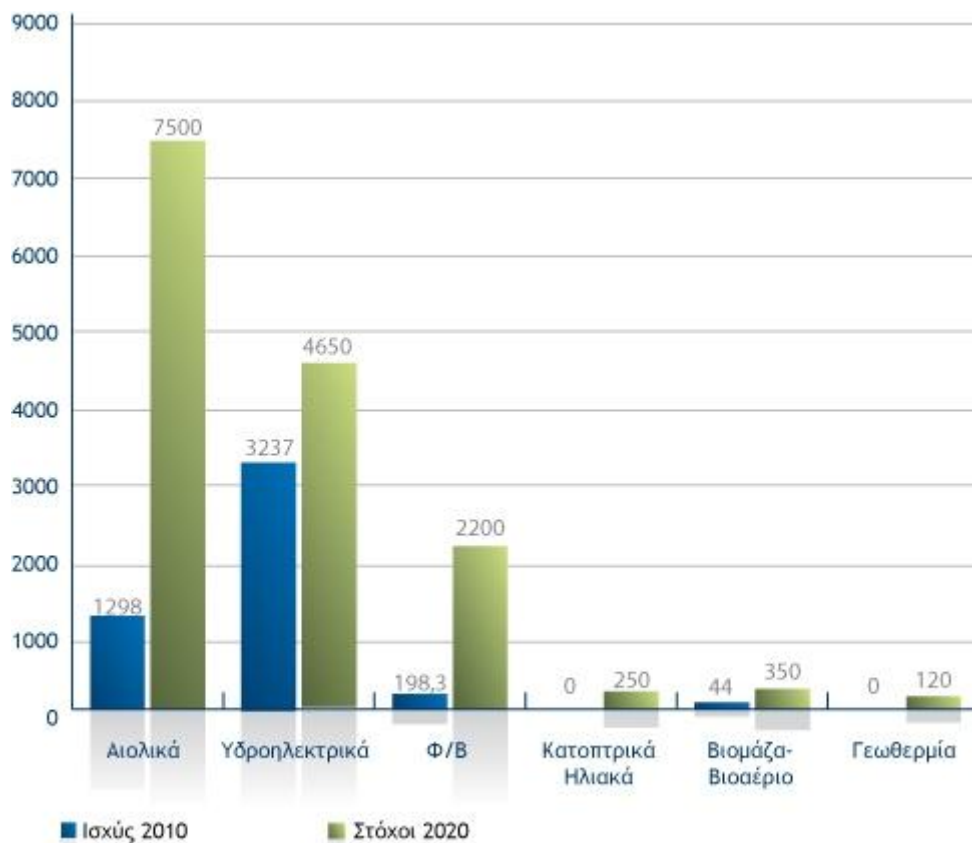
διακοπή των εισαγωγών από το Ιράν, που κάλυπτε το $\frac{1}{3}$ της ελληνικής ζήτησης σε πετρέλαιο.

Το φυσικό αέριο εισάγεται στην Ελλάδα από τη Ρωσία μέσω αγωγών μεταφοράς, με σημείο παραλαβής τα ελληνοβουλγαρικά σύνορα. Επίσης ως χώρα εισάγουμε φυσικό αέριο από την Αλγερία, σε υγροποιημένη μορφή (Liquefied Natural Gas - LNG), με ειδικό δεξαμενόπλοιο στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης της Ρεβυθούσας, και τέλος από την Τουρκία, με τον διασυνδεδετήριο αγωγό Τουρκίας - Ελλάδας - Ιταλίας.

Ακόμα σημειώνεται πως πραγματοποιείται μία συνεχιζόμενη ανάπτυξη στις κατασκευές ΥΗΕ. Το φυσικό ανάγλυφο της χώρας μας είναι ιδιαίτερα έντονο, με αποτέλεσμα να συνεχίζονται οι κατασκευές φραγμάτων κατά τη ροή των ποταμών και η δημιουργία τεχνητών λιμνών ή αλλιώς ταμιευτήρων, αξιοποιώντας το υδροδυναμικό της χώρας. Με αυτόν τον τρόπο, τα ΥΗΕ διασυνδέονται με το δίκτυο και γίνεται πιο εύκολη η παρακολούθηση της μεταβολής της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και ως εκ τούτου οι αιχμές ζήτησης του δικτύου μπορεί να καλύπτονται πιο εύκολα.

Οι ποικίλες πηγές ενέργειας αποτελούν τον πυρήνα της επενδυτικής και ενεργειακής πολιτικής της Ελλάδας. Το πρώτο εξάμηνο του 2011, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των ανανεώσιμων πηγών έφτασε τα 2.022,2MW. Το 75% της ισχύος αυτής παράγεται από αιολική ενέργεια, το 11,5% από ηλιακή ενέργεια, ενώ το υπόλοιπο 13,5% από βιομάζα και υδροηλεκτρική ενέργεια.

Οι στόχοι της Ελλάδας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, είναι να καλύψουν το 40% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής μέχρι το 2020. Στο ακόλουθο *διάγραμμα.10*, φαίνεται η εγκατεστημένη ισχύς σε MW, ανά πηγή ενέργειας, και οι προσδοκώμενοι στόχοι για το 2020:



Διάγραμμα.10.: Εγκατεστημένη ισχύς [MW] από ΑΠΕ το 2010 και στόχοι για το 2020 [Πηγή: <http://www.investingreece.gov.gr>]

Προκειμένου να υλοποιηθούν οι παραπάνω στόχοι, είναι αναγκαία η ένταξη νέας ισχύος με ταυτόχρονη απόσυρση παλιών μονάδων, η αναβάθμιση και ο εκσυγχρονισμός των υφισταμένων εγκαταστάσεων καθώς και η λειτουργία τους με βάση τις βέλτιστες διαθέσιμες τεχνικές. Είναι, επίσης, απαραίτητη η εντατικότερη αξιοποίηση των ΑΠΕ, η περαιτέρω ανάπτυξη και ορθολογική εκμετάλλευση του υδροδυναμικού της χώρας στην ηλεκτροπαραγωγή και προώθηση δράσεων εξοικονόμησης και ορθολογικής χρήσης ενέργειας, τόσο στην παραγωγή, όσο και στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Κεφάλαιο 2^ο

Στο παρόν Κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται κατά την ανάλυση αεροδυναμικών προβλημάτων. Αρχικά δίνονται πληροφορίες για τη μορφή της καμπύλης ισχύος μίας ανεμογεννήτριας (Α/Γ), ενώ παρουσιάζεται και η κατανομή Weibull που περιγράφει την συχνότητα πνοής των διαφόρων ταχυτήτων ανέμου. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα βασικά μέρη της θεωρίας δίσκου ορμής και τέλος παρουσιάζονται πληροφορίες αναφορικά με τη θεωρεία στοιχείων πτερύγωσης.

2.1 Καμπύλη ισχύος

Οι μεγάλες μάζες του ανέμου που κινούνται συνεχώς στην ατμόσφαιρα περιέχουν τεράστια ποσά ενέργειας που είναι και τα πιο εύκολα αξιοποιήσιμα, συγκριτικά με άλλες μορφές ενέργειας. Όπως είναι φανερό, ο πρωταρχικός σκοπός δημιουργίας μίας Α/Γ ήταν και εξακολουθεί να είναι, η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική (κυρίως) ενέργεια. Συγκεκριμένα, η *στιγμιαία ισχύς* που περιέχεται σε ένα ρεύμα αέρα υπολογίζεται από τη *σχέση.2.*:

$$P = \frac{\rho}{2} V^3 A$$

Σχέση.2.

όπου:

- P , η ισχύς του αέρα [Watt],
- ρ , η πυκνότητα του αέρα (περίπου $1,23\text{kg/m}^3$),
- V , η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου [m/s],
- A , η επιφάνεια που καλύπτει ο δρομέας [m^2] που ισούται με $\pi D^2/4$ για Α/Γ οριζοντίου άξονα διαμέτρου D .

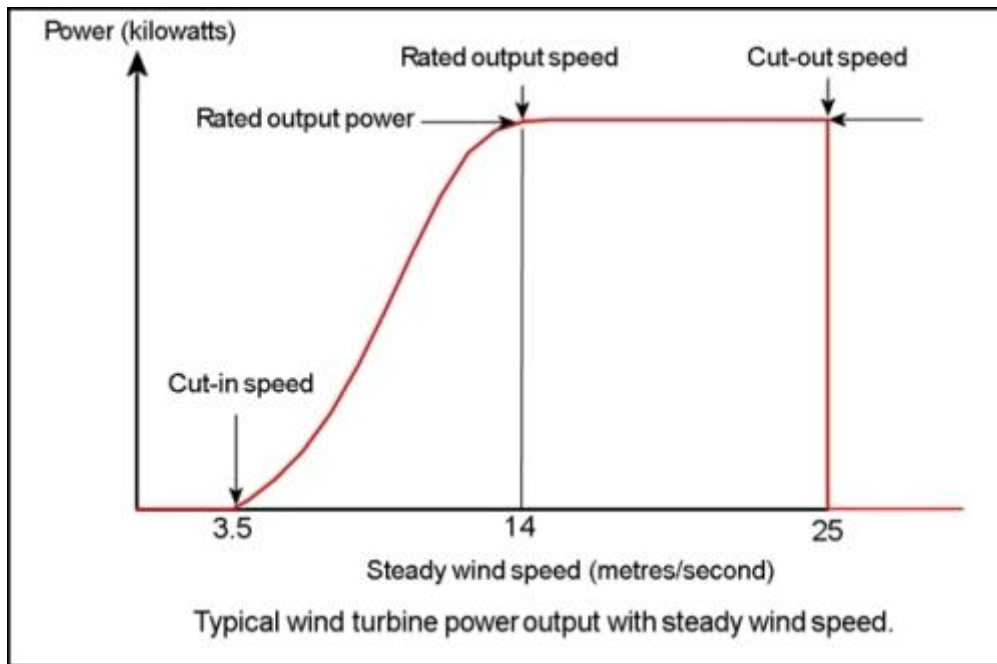
Η εξίσωση αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς φαίνεται η εξάρτηση της ισχύος από τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου, η οποία μάλιστα δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται σε ευρύτατα όρια με το χρόνο. Μία Α/Γ, ακόμα και με ιδανική έλικα, δεν μπορεί να αξιοποιήσει όλη την προσφερόμενη ισχύ από τον άνεμο και τελικά η ισχύς που παρέχει η έλικα είναι, από τη σχέση.3.:

$$P_{A/\Gamma} = C_p \frac{\rho}{2} V^3 A$$

Σχέση.3

όπου C_p είναι ο *συντελεστής ισχύος*, ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί από κατάλληλα υπολογιστικά μοντέλα. Ο συντελεστής ισχύος, C_p , πρόκειται για ένα αδιάστατο μέγεθος που εκφράζει την αναλογία της ισχύος που παράγει η Α/Γ προς αυτή που θα παρήγαγε εάν αξιοποιούσε όλη την ισχύ του ανέμου. Στις μεγάλες Α/Γ ($D > 20m$) η τιμή του συντελεστή ισχύος είναι περίπου 0,45 για την ταχύτητα σχεδίασης. Σε μικρότερες μηχανές, οι τιμές του κυμαίνονται σε ελαφρώς χαμηλότερες τιμές. Ο συντελεστής αυτός δεν μπορεί να ξεπεράσει την τιμή $C_p = 16/27$, όπως θα αποδειχθεί στη συνέχεια (*παράγραφος 2.3*), που αποτελεί το όριο του Betz.

Κάθε Α/Γ περιγράφεται από μία *καμπύλη ισχύος* σαν συνάρτηση της ταχύτητας του πνέοντος ανέμου. Στο παρακάτω *διάγραμμα.11*, φαίνεται η τυπική μορφή μίας τέτοιας καμπύλης. Η Α/Γ ξεκινάει τη λειτουργία της, επομένως και την απορρόφηση ισχύος, σε μία ταχύτητα ένταξης V_{cut-in} και λειτουργεί μέχρι μία ταχύτητα αποκοπής $V_{cut-out}$. Στο εύρος αυτών των ταχυτήτων βρίσκεται και η ονομαστική ταχύτητα V_R (Rated), που αποδίδει ισχύ P_R . Για την περίπτωση που τα πτερύγια έχουν λειτουργία μεταβλητού βήματος, όπως αυτά του *διαγράμματος.11.*, για κάθε ταχύτητα μεγαλύτερη της ονομαστικής, η ισχύς παραμένει σταθερή και ίση με την ονομαστική ισχύ P_R .



Διάγραμμα.11.: Τυπική μορφή καμπύλης ισχύος Α/Γ [Πηγή: <http://www.wind-power-program.com/>]

2.2 Κατανομή Weibull

Ο υπολογισμός του τεχνικά αξιοποιήσιμου αιολικού δυναμικού είναι μία αρκετά περίπλοκη διαδικασία, ακόμη και αν ληφθούν υπόψη η διαθεσιμότητα του ανέμου και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της Α/Γ που θα χρησιμοποιηθεί. Πολλές φορές για τον υπολογισμό της ετήσιας ενεργειακής απόδοσης του δρομέα σε μία περιοχή, είναι απαραίτητη η καμπύλη διάρκειας πνοής του ανέμου στην εν λόγω περιοχή, η οποία είναι μία καμπύλη κατανομής ταχυτήτων Weibull.

Στη θεωρία πιθανοτήτων και στη στατιστική, η κατανομή Weibull είναι μία συνεχής κατανομή πιθανότητας. Συγκεκριμένα, στις εφαρμογές της αιολικής ενέργειας, η κατανομή Weibull εξυπηρετεί στον υπολογισμό του αιολικού δυναμικού μίας περιοχής. Η έκφραση της εν λόγω κατανομής περιγράφεται από τη σχέση.4.:

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k \right]$$

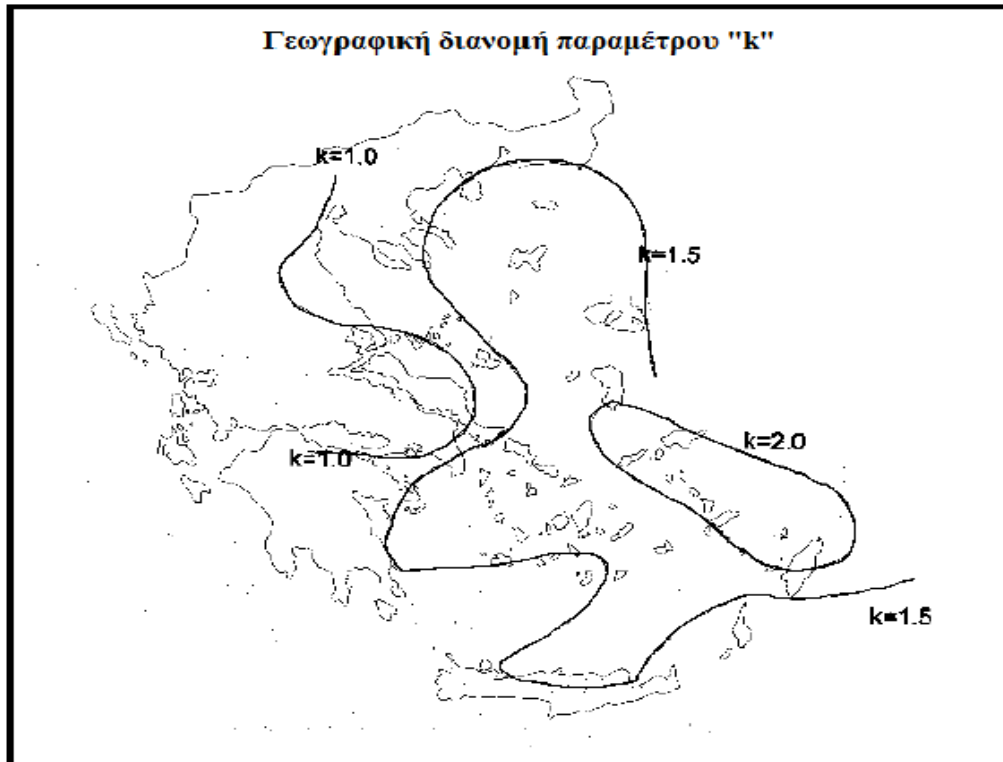
Σχέση.4.

όπου:

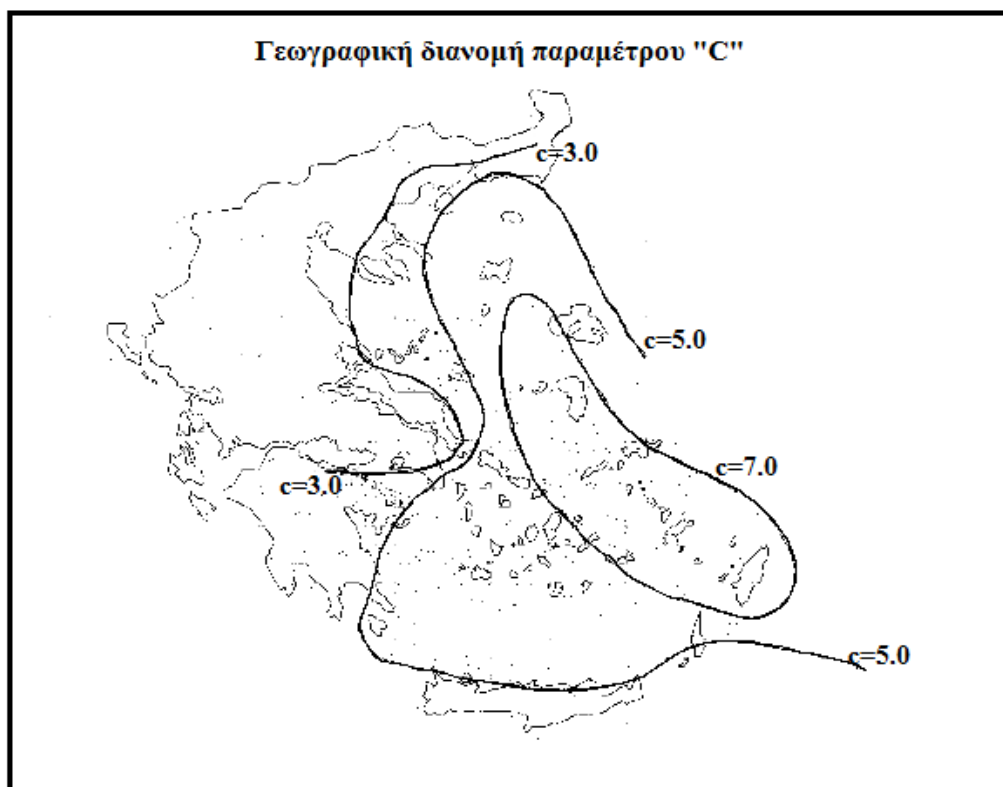
- V , η ταχύτητα του ανέμου [m/s],
- k , η παράμετρος μορφής της κατανομής,
- c , η παράμετρος κλίμακας της κατανομής.

Η παράμετρος k καθορίζει το ύψος της κατανομής Weibull, ενώ η παράμετρος c επηρεάζει την κατανομή κατά τον οριζόντιο άξονα. Όσο μικρότερη είναι η τιμή της παραμέτρου k , τόσο η κατανομή γίνεται πιο ομοιόμορφη και οι ταχύτητες κοντά στη μέση είναι συχνότερες.

Στα παρακάτω *διαγράμματα.12. και .13.* παρουσιάζονται οι διανομές των δύο αυτών παραμέτρων στο γεωγραφικό χώρο της Ελλάδας.



Διάγραμμα.12.: Γεωγραφική κατανομή της παραμέτρου μορφής k της κατανομής Weibull στην Ελλάδα [Πηγή: Δ.Ε. Γκίκας Δ., 2011]



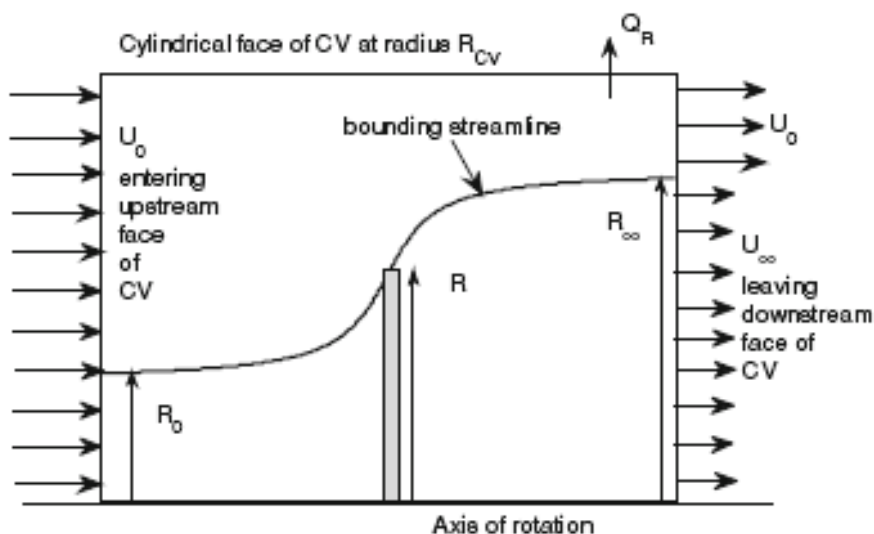
Διάγραμμα.13.: Γεωγραφική κατανομή της παραμέτρου κλίμακας c της κατανομής Weibull στην Ελλάδα [Πηγή: Δ.Ε. Γκίκας Δ., 2011]

Συγκεκριμένα, κατά την συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκαν δύο ζεύγη τιμών παραμέτρων k, c . Το πρώτο ζεύγος παραμέτρων έχει τιμές $k=1,7$ και $c=7$ που όπως φαίνεται στα παραπάνω *διαγράμματα.12.* και *.13.* αντιστοιχούν κυρίως στη νησιωτική Ελλάδα όπου η παρουσία ανέμου είναι συχνότερη και εντονότερη συγκριτικά με την υπόλοιπη χώρα. Οι μικρές Α/Γ όμως προορίζονται για οικιακή χρήση, συνεπώς έγιναν υπολογισμοί και με τιμές παραμέτρων $k=1$ και $c=3$, που είναι αντιπροσωπευτικές για το χερσαίο τμήμα της Ελλάδας.

2.3 Θεωρία δίσκου ορμής

Ο πρωταρχικός σκοπός μίας Α/Γ είναι η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Σύμφωνα με τη θεωρία δίσκου ενέργειας, ο μηχανισμός δέσμμευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου από το δρομέα της

Α/Γ θεωρείται ιδανικός, δηλαδή άνευ απωλειών, με το δρομέα να εξετάζεται σαν «μαύρο κουτί» και επιπλέον με το δρομέα να θεωρείται ως δίσκος που ενεργεί πάνω στο ρευστό, εξ' ου και η ονομασία του «δίσκος ενέργειας». Ξεκινώντας, ορίζεται ένας όγκος ελέγχου (Control Volume - CV), που είναι ένας κύλινδρος με ακτίνα R_{CV} αρκετά μεγαλύτερη της ακτίνας R του πτερυγίου της Α/Γ, όπως φαίνεται στην *εικόνα.18.*:



Εικόνα.18.: Ροϊκός σωλήνας [Πηγή: Wood D., 2011]

Ο άνεμος εισέρχεται στον όγκο ελέγχου, αρκετά πριν το δρομέα της Α/Γ (ανάντι), με ταχύτητα U_0 και πίεση περιβάλλοντος p , συνεπώς η ροή δεν επηρεάζεται από την παρουσία των πτερυγίων. Ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από τον αέρα, επομένως, αρκετά μακριά από το δίσκο (κατάντι), όταν πια η πίεση έχει αποκατασταθεί σε πίεση περιβάλλοντος p , η ταχύτητα του ανέμου είναι U_∞ και πάντα μικρότερη της U_0 . Όπως φαίνεται και από την *εικόνα.18.*, η ροή του αέρα μαζί με τον ομόρρο της Α/Γ, δηλαδή η στροβιλή περιοχή κατάντι της ροής, δημιουργούν το λεγόμενο «ροϊκό σωλήνα». Η διάμετρος του ροϊκού σωλήνα αυξάνει πίσω από το δρομέα μέχρι μία τιμή R_∞ , δηλαδή υπάρχει μία διαστολή του ομόρρου της Α/Γ. Το ρευστό, μετά από τον δίσκο, έχει μικρότερη ενέργεια από την τιμή πίσω από το δίσκο. Ακόμα, επειδή η αξονική ταχύτητα του ρευστού πάνω στο δίσκο και οριακά λίγο πριν και μετά από το δίσκο παραμένει ίδια για λόγους διατήρησης μάζας τότε η στατική

πίεση του ρευστού μετά από το δίσκο θα είναι μικρότερη από τη στατική πίεση πριν από το δίσκο. Για την αεροδυναμική μελέτη ενός δίσκου ενέργειας εφαρμόζονται οι εξισώσεις διατήρησης της Μηχανικής των Ρευστών.

- Εξίσωση διατήρησης μάζας:

Η εξίσωση διατήρησης μάζας εκφράζει τον πρώτο βασικό νόμο της Μηχανικής, ότι η μάζα δεν καταστρέφεται ούτε δημιουργείται από το μηδέν. Επομένως στην περίπτωση μας η μάζα που ρέει μέσα στο ροϊκό σωλήνα διατηρείται σταθερή και ίση με:

$$\dot{m} = \rho AU = \rho \pi R^2 U \quad \text{Σχέση.5.}$$

όπου,

- ρ , η πυκνότητα του ρευστού [Kg/m^3],
- A , η διατομή του ροϊκού σωλήνα [m^2] πάνω στο δίσκο ακτίνας R [m]
- U , η ταχύτητα του ρευστού δια μέσου του δίσκου [m/s].

- Εξίσωση διατήρησης της ορμής:

Η εξίσωση διατήρησης της ορμής εκφράζει το δεύτερο βασικό νόμο της κλασικής Μηχανικής, που είναι ουσιαστικά ο δεύτερος νόμος του Newton. Εκφράζει δηλαδή, ότι η χρονική μεταβολή της ορμής ισούται με το άθροισμα των δρωσών δυνάμεων. Στην περίπτωση του ροϊκού σωλήνα μέσα σε κυλινδρικό όγκο ισολογισμού, η παροχή Q διαμέσου της παράπλευρης επιφάνειας του κυλινδρικού όγκου ισολογισμού είναι:

$$Q = \rho A_{\infty} U_0 - \rho AU \quad \text{Σχέση.6.}$$

Το ρευστό εισέρχεται στον όγκο ισολογισμού και εξέρχεται αξονικά, οπότε σύμφωνα με το θεώρημα διατήρησης της ορμής, ότι δηλαδή η ώση ισούται με την εν θέσει μεταβολή της ροής της ορμής προκύπτει ότι:

$$T = \rho U_0^2 A_\infty - \rho A U U_\infty - Q U_0 \quad \text{Σχέση.7.}$$

ή αλλιώς:

$$T = \rho A U (U_0 - U_\infty) \quad \text{Σχέση.8.}$$

- Εξίσωση διατήρησης της ροπής της ορμής (στροφορμής):

Η εξίσωση διατήρησης της ροπής της ορμής εκφράζει ότι η χρονική μεταβολή της στροφορμής ισούται με το άθροισμα των ροπών των δρυσών δυνάμεων. Η ροπή που ασκείται στα πτερύγια είναι ίση και αντίθετη με αυτή που ασκείται στον αέρα. Η εξίσωση για την ορμή είναι η ακόλουθη:

$$M = -\rho \int \mathbf{r} \times \mathbf{U} U \, dA \quad \text{Σχέση.9.}$$

Και ο τοπικός συντελεστής ροπής C_M είναι:

$$C_M = \frac{Q}{\frac{1}{2} \rho U_0^2 \pi R^3} \quad \text{Σχέση.10.}$$

- Εξίσωση διατήρησης της ενέργειας:

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας εκφράζει το γενικευμένο νόμο της Θερμοδυναμικής. Στην περίπτωση του δίσκου ενέργειας εφαρμόζεται η εξίσωση Bernoulli μέσα στο ροϊκό σωλήνα δύο φορές, μία πριν και μία μετά το δίσκο. Στο χώρο ανάντι του δρομέα, δηλαδή από την είσοδο στον όγκο ελέγχου μέχρι το δίσκο, η εξίσωση Bernoulli είναι η ακόλουθη:

$$P_1 = \frac{1}{2} \rho U_0^2 - U^2 \quad \text{Σχέση.11.}$$

και ομοίως, κατάντι του δρομέα:

$$P_2 = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 - U^2 \quad \text{Σχέση.12.}$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η εξίσωση Bernoulli δε μπορεί να εφαρμοσθεί μεταξύ των θέσεων πριν και μετά του δίσκου, καθώς ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από το ρευστό όταν διέρχεται από αυτόν. Εξισώνοντας τις δύο τελευταίες σχέσεις.11. και .12., προκύπτει:

$$P = Q_1 \quad P_1 - P_2 = U \quad P_1 - P_2 \quad \pi R^2 \quad \text{Σχέση.13.}$$

ή αλλιώς:

$$U = \frac{U_0 + U_\infty}{2} \quad \text{Σχέση.14.}$$

Η τελευταία σχέση.14. παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς δηλώνει ότι η ταχύτητα με την οποία διέρχεται το ρευστό από το δίσκο ισούται με το ημίαθροισμα των ταχυτήτων εισόδου U_0 και εξόδου U_∞ .

Από την προηγούμενη ανάλυση προκύπτουν σχέσεις για τις βασικές παραμέτρους λειτουργίας των Α/Γ, με σημαντικότερη παράμετρο το συντελεστή ισχύος C_p , που ορίζεται ως:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U_0^3 \pi R^2} = 4 U^2 \frac{U_0 - U}{U_0^3} = 4 a \quad 1 - a^2 \quad \text{Σχέση.15.}$$

Όπου a ο συντελεστής αξονικής επαγωγής που καθορίζεται από τη ακόλουθη σχέση.16.:

$$a = 1 - \frac{U}{U_0} > 0 \quad \text{Σχέση.16.}$$

Επισημαίνεται ότι, αυξανόμενης της τιμής του συντελεστή αξονικής επαγωγής a , αυξάνεται και η επιβράδυνση του ρευστού στα πτερύγια του δίσκου. Η μέγιστη απόδοση θα επιτευχθεί όταν $dC_p/da=0$. Από τη σχέση του συντελεστή ισχύος, το μέγιστο επιτυγχάνεται για $a=1/3$ από όπου αυτομάτως προκύπτει ότι:

$$C_{P,max} = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad \text{Σχέση.17.}$$

αφού για $a = \frac{1}{3}$ έχουμε $\frac{U}{U_0} = \frac{2}{3}$ και $\frac{U_\infty}{U_0} = \frac{1}{3}$

Αυτή η τιμή του συντελεστή ισχύος είναι γνωστή σαν το όριο του Betz (όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.1) και αποδεικνύει ότι καμία Α/Γ δεν μπορεί να αξιοποιήσει πλήρως την κινητική ενέργεια του διερχόμενου, από τα πτερύγια του δίσκου, ρευστού.

Άλλες χρήσιμες παράμετροι που προκύπτουν είναι ο τοπικός συντελεστής ώσης, που περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση.18.:

$$C_T = 4a(1-a) \quad \text{Σχέση.18.}$$

και ο τοπικός συντελεστής ροπής:

$$C_M = 4a'(1-a)\frac{\Omega r}{U} \quad \text{Σχέση.19.}$$

όπου, a' είναι ο συντελεστής περιφερειακής επαγωγής και ορίζεται ως:

$$a' = \frac{V_{\theta s}}{\Omega r} \quad \text{Σχέση.20.}$$

όπου $V_{\theta s}$ η περιφερειακή ταχύτητα του ρευστού πάνω στο δίσκο ενέργειας.

2.4 Θεωρία στοιχείων πτερύγωσης

Σύμφωνα με την ανάλυση, η οποία πραγματοποιήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο 2.3, προκύπτει ότι η ταχύτητα κατά τη διεύθυνση πνοής του ανέμου εκφράζεται από τη *σχέση.21.*:

$$U = U_0 (1 - a) \quad \text{Σχέση.21.}$$

και η περιφερειακή ταχύτητα:

$$\Omega r (1 + a') \quad \text{Σχέση.22.}$$

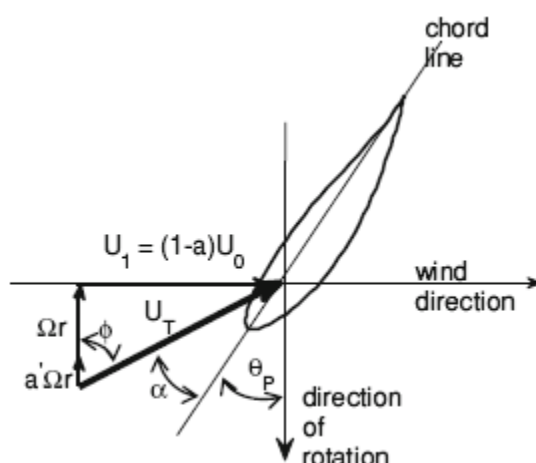
Επομένως, η *συνισταμένη των ταχυτήτων* U_T περιγράφεται από την ακόλουθη *σχέση.23.*:

$$U_T = \sqrt{U_0^2 (1 - a)^2 + \Omega^2 r^2 (1 + a')^2} \quad \text{Σχέση.23.}$$

Επιπλέον, ορίζεται στην αεροδυναμική, και η *αδιάστατη ταχύτητα ακροπτερυγίου* ως εξής:

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U} \quad \text{Σχέση.24.}$$

Καθώς οι Α/Γ δουλεύουν για μεγάλες τιμές της ταχύτητας λ (τυπικές τιμές $7 \div 10$), η περιφερειακή συνιστώσα ΩR της ταχύτητας στη ρίζα του πτερυγίου είναι περίπου 10 φορές μεγαλύτερη της αξονικής συνιστώσας U . Στην άκρη του πτερυγίου, η περιφερειακή συνιστώσα ΩR είναι σχεδόν μηδέν, επομένως η συστροφή του πτερυγίου θ_p πρέπει να είναι τέτοια ώστε κατά μήκος της ακτίνας να διατηρείται η γωνία πρόσπτωσης α , σε τέτοιο εύρος τιμών, ώστε να αποφεύγεται η αποκόλληση της ροής.

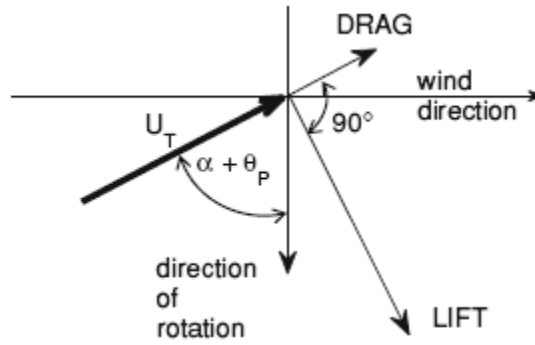


Διάγραμμα.14.: Γεωμετρικό τρίγωνο ταχυτήτων [Πηγή: Wood D., 2011]

Η γωνία α που σχηματίζεται μεταξύ της συνισταμένης ταχύτητας και της χορδής, ονομάζεται *γωνία πρόσπτωσης*, ενώ η γωνία θ_p που σχηματίζεται μεταξύ της χορδής και του επιπέδου περιστροφής του πτερυγίου αποτελεί τη γωνία βήματος με την υπάρχουσα συστροφή. Όπως φαίνεται και από το παραπάνω *διάγραμμα.14.*, προκύπτει εύκολα ότι :

$$\theta_p + \alpha = \phi \quad \text{Σχέση.25.}$$

Η αλληλεπίδραση της ροής και του στοιχείου πτερύγωσης οδηγεί στην εμφάνιση των *δυνάμεων άνωσης* L (Lift) και *αντίστασης* ή *οπισθέλκουσας* D (Drag), όπως φαίνονται στο παρακάτω *διάγραμμα.15.:*



Διάγραμμα.15.: Δυνάμεις άνωσης και αντίστασης [Πηγή: Wood D., 2011]

Οι εκφράσεις των δυνάμεων αυτών είναι για την άωση:

$$L = \frac{1}{2} \rho U_T^2 C_l c \quad \text{Σχέση.26.}$$

και για την αντίσταση:

$$D = \frac{1}{2} \rho U_T^2 C_d c \quad \text{Σχέση.27.}$$

όπου, C_l και C_d οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης της αεροτομής και c η χορδή της αεροτομής.

Κεφάλαιο 3^ο

3.1 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Οι μικρές Α/Γ παρά το γεγονός ότι έκαναν την εμφάνισή τους αρκετά παλιά, ακόμη δεν υπάρχουν κατάλληλα λογισμικά για την ανάλυση και σχεδιάσή τους. Τα υπολογιστικά πακέτα που υπάρχουν σήμερα είναι βασισμένα σε εμπειρικούς κανόνες, επιβεβαιωμένους από πειράματα και μετρήσεις σε Α/Γ μεγάλης ισχύος, για χρήση σε αιολικά πάρκα. Αν και οι μικρές Α/Γ, όσον αφορά την εμφάνισή τους αποτελούν μία μικρογραφία των μεγαλύτερων, εμφανίζουν διαφορετική συμπεριφορά στις ίδιες συνθήκες. Δύο από τα βασικότερα προβλήματα που φαίνεται να υπάρχουν στην περίπτωση των μικρών Α/Γ είναι η εκκίνηση και η απόδοση σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Ένα πτερύγιο σχεδιασμένο με τη βέλτιστη, ως προς την απορρόφηση ισχύος, χορδή και συστροφή μπορεί να προκαλέσει μία υψηλή τιμή στην ταχύτητα ένταξης (V_{cut-in}) της Α/Γ, που είναι ανεπιθύμητη, μιας και οι περισσότερες Α/Γ μικρής ισχύος προορίζονται για περιοχές όπου δεν πνέει υποχρεωτικά, συχνός και ισχυρός άνεμος. Επιπλέον, αυτές οι χαμηλές ταχύτητες ανέμου ευθύνονται και για τις χαμηλές τιμές του αριθμού Reynolds, ο οποίος επιδρά σημαντικά στη συμπεριφορά και την απόδοση του πτερυγίου και κατ' επέκταση της Α/Γ.

Υπάρχουν τουλάχιστον τρεις λόγοι που οι χαμηλές ταχύτητες ανέμου παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για περαιτέρω έρευνα. Πρώτον, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα οι μικρές Α/Γ συνήθως τοποθετούνται σε σημεία που δεν είναι πάντα εκτεθειμένα σε ισχυρούς ανέμους. Δεύτερον, μόνο λίγες μικρές Α/Γ έχουν ρύθμιση βήματος στα πτερύγια (pitch control), με αποτέλεσμα το πτερύγιο που είναι σχεδιασμένο για τη βέλτιστη απορρόφηση ισχύος σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, να παρουσιάζει μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης όταν βρίσκεται στάσιμο. Τρίτον, οι Α/Γ ξεκινούν τη λειτουργία

τους όταν η ροπή λόγω του αέρα που θα εφαρμοσθεί στα ακίνητα πτερύγια ξεπεράσει τη ροπή αντίστασης που φέρει η γεννήτρια.

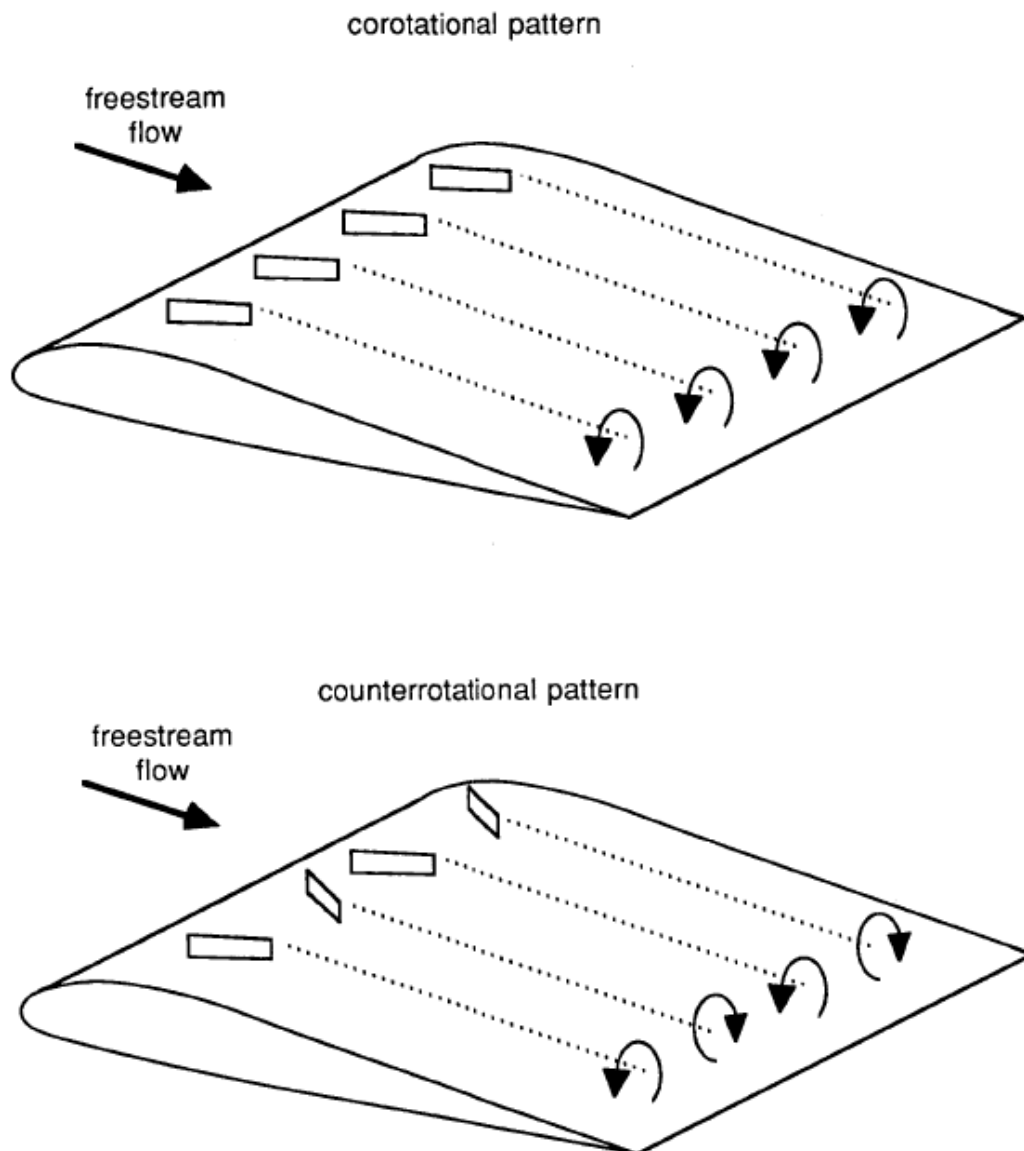
3.2 Γεννήτριες δινών (vortex generators)

Στη συνεχή προσπάθεια για βελτίωση της απόδοσης των Α/Γ, η ενσωμάτωση γεννητριών δινών σε υπάρχουσες ή μελλοντικές Α/Γ είναι η πιο απλή και οικονομική λύση για αύξηση της ετήσιας εξαγόμενης ενέργειας. Μία τυπική διάταξη Α/Γ οριζοντίου άξονα έχει ανάγκη από αεροτομές τέτοιες, οι οποίες να έχουν υψηλό λόγο πάχους προς χορδή για λόγους αντοχής, υψηλό λόγο άνωσης προς αντίσταση για καλή απόδοση ισχύος και τέλος υψηλό μέγιστο συντελεστή άνωσης C_{lmax} προκειμένου να διατηρείται η στερεότητα (σ) σε χαμηλά επίπεδα (τυπικές τιμές για μοντέρνα πτερύγια $\sigma < 0.2$). Αυτά τα χαρακτηριστικά βέβαια είναι αλληλοσυγκρουόμενα για τον σχεδιαστή του πτερυγίου. Επιπροσθέτως, πολλές Α/Γ υφίστανται σημαντική μείωση στην απόδοσή τους εξαιτίας συσσωρευμένων εντόμων και ρύπων στα πτερύγια, που οδηγούν σε αύξηση του συντελεστή αντίστασης C_d και κατ' επέκταση μπορεί να προκαλέσει πρόωρη αποκόλληση της ροής από το πτερύγιο.

Αυτές οι προβληματικές περιοχές σίγουρα θα επωφελούνταν από κάποιου είδους έλεγχο του οριακού στρώματος που θα καθυστερούσε την αποκόλληση και θα διασφάλιζε ένα καλύτερο μέγιστο συντελεστή άνωσης C_{lmax} , χωρίς να έχει παράλληλα μεγάλο αντίκτυπο στη δύναμη αντίστασης D . Στην περίπτωση των αεροτομών, το παραπάνω μπορεί να επιτευχθεί βάζοντας ένα μικρό «σκαλοπάτι» στην άνω επιφάνεια, το οποίο θα προκαλέσει τη μετάβαση του στρωτού οριακού στρώματος σε τυρβώδες. Οι γεννήτριες δινών βασίζονται σε αυτό το σκεπτικό.

Η έννοια των γεννητριών δινών εισήχθη από τον Taylor το 1947 και έπειτα από τον Bruyens το 1951 ώστε να εφαρμοσθούν εκείνη την εποχή από την United Aircraft Corporation - UAC.

Η πιο απλή τους μορφή αποτελείται από μικρά κατευθυντήρια πτερύγια που προβάλλουν στην επιφάνεια του πτερυγίου υπό μία γωνία πρόσπτωσης, ως προς την ροή του ρευστού, τα οποία συμπεριφέρονται ώστε να δημιουργούν δίνες πίσω τους. Οι γεννήτριες δινών μπορούν να τοποθετηθούν παράλληλα ή με θετικές και αρνητικές γωνίες εναλλάξ, δημιουργώντας ζεύγη δινών. Οι δύο αυτές περιπτώσεις φαίνονται στις παρακάτω αριθμήσεις, από εφαρμογή σε πτέρυγες αεροσκάφους.



Εικόνα.19.: [Πηγή: Gyatt G.W., 1986]

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι γεννήτριες δινών, δημιουργώντας τις δίνες, σίγουρα προκαλούν μία αύξηση της αντίστασης D , παρόλα αυτά σε μία καλά

μελετημένη εφαρμογή η επίδραση είναι αμελητέα ποσότητα συγκριτικά με το κέρδος σε απόδοση. Η καλή τους απόδοση εξαρτάται από τη σχετική τους θέση ως προς το σημείο που αναμένεται να γίνει η αποκόλληση. Γενικώς, σύμφωνα με τον G.W.Gyatt, κρίνεται αποτελεσματικό οι γεννήτριες δινών να τοποθετούνται στο άνω μέρος του πτερυγίου σε μία σειρά από επίπεδα πτερύγια, κάθετα στην επιφάνεια και στο σημείο που αντιστοιχεί το 10% της χορδής. Το ύψος τους θα πρέπει να είναι $1 \div 2\%$ της χορδής και το μήκος τους $2 \div 3\%$ της χορδής και σε μία γωνία πρόσπτωσης που να κυμαίνεται από 15° έως 20° και με απόσταση μεταξύ τους περίπου 10 φορές το ύψος τους.

Μία πιο πρόσφατη έρευνα [Kogaki T., et al., 2011] μελετά τις τροποποιημένες γεννήτριες δινών για αεροτομές. Τα πειράματα έγιναν σε αεροδυναμική σήραγγα και εξετάστηκε κυρίως η σημαντική αύξηση του λόγου άνωσης προς την αντίσταση για μικρούς αριθμούς Reynolds, της τάξης των $100.000 \div 400.000$. Συγκεκριμένα, οι εν λόγω επιστήμονες ξεκίνησαν την έρευνά τους χρησιμοποιώντας τις επίπεδες γεννήτριες δινών, που όμως δεν έφεραν τα αναμενόμενα αποτελέσματα, καθώς σε χαμηλές γωνίες πρόσπτωσης λειτουργούσαν περισσότερο σαν αντιστάσεις παρά σαν γεννήτριες δινών και επιπλέον, ο συντελεστής αντίστασης αυξανόταν. Έτσι ξεκίνησε η ιδέα για τις τροποποιημένες γεννήτριες δινών. Η τροποποιημένη μορφή των γεννητριών ήταν αυτή που φαίνεται στο *εικόνα.21*. που ακολουθεί.

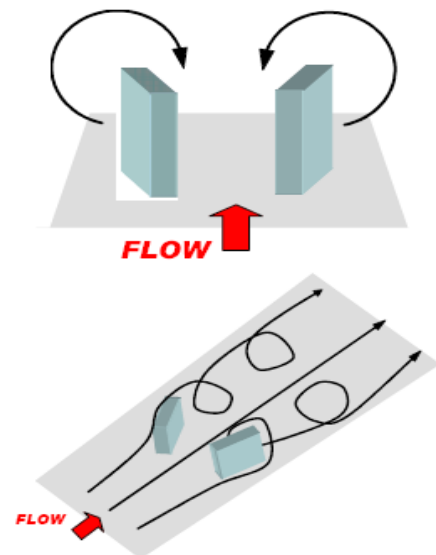
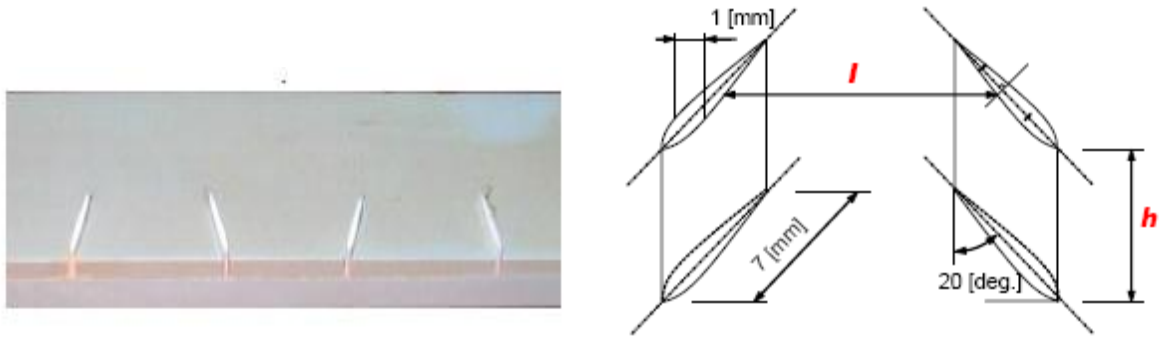


Figure 1 The flat plate vortex generator.

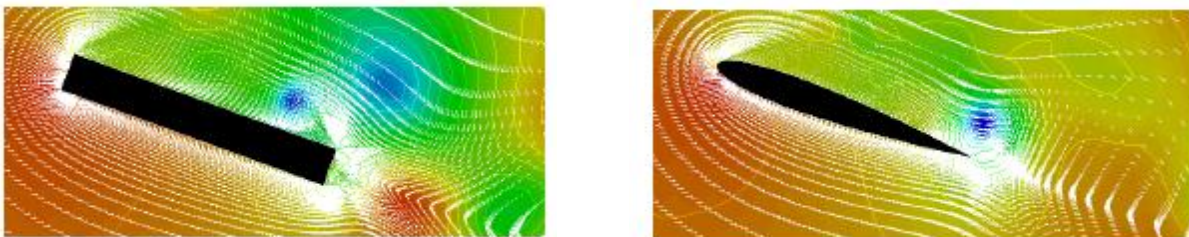
Εικόνα.20.: Επίπεδες γεννήτριες δινών[Πηγή: Kogaki T. et al., 2011]

Ξεκίνησε η ιδέα για τις τροποποιημένες γεννήτριες δινών. Η τροποποιημένη μορφή των γεννητριών ήταν αυτή που φαίνεται στο *εικόνα.21*. που ακολουθεί.



Εικόνα.21.: Οι τροποποιημένες γεννήτριες δινών [Πηγή: Kogaki T. et al., 2011]

Χρησιμοποιώντας πακέτα Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (Computational fluid dynamics - CFD) έγιναν προσομοιώσεις της ροής γύρω από το πτερύγιο για την περίπτωση τόσο της επίπεδης όσο και της τροποποιημένης γεννήτριας δινών.



Εικόνα.22.: Προσομοίωση της ροής γύρω από επίπεδη γεννήτρια δινών (αριστερά) και γύρω από τροποποιημένη γεννήτρια δινών (δεξιά) [Πηγή: Kogaki T. et al., 2011]

Επιπρόσθετα, έγιναν και πειράματα σε αεροδυναμική σήραγγα για αριθμούς Reynolds $1,0 \times 10^5$, $2,0 \times 10^5$, $4,0 \times 10^5$ και $8,0 \times 10^5$. Τα αποτελέσματα για τους μικρούς αριθμούς Reynolds ήταν εντυπωσιακά και οι επιστήμονες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι τροποποιημένη μορφή των γεννητριών δινών είναι κατάλληλη για εφαρμογή σε μικρές Α/Γ, καθώς βοηθούν στην εντυπωσιακή βελτίωση της απόδοσης στις χαμηλές τιμές της ταχύτητας του ανέμου, επομένως και του αριθμού Reynolds.

Κεφάλαιο 4^ο

Στον παρόν Κεφάλαιο αρχικά, αναλύεται η έννοια των εξελεκτικών αλγορίθμων. Επεξηγείται η λογική που ακολουθούν οι εξελεκτικοί αλγόριθμοι και τα οφέλη που παρουσιάζονται κατά τη χρήση τους. Στην παρούσα Δ.Ε. χρησιμοποιήθηκε ο εξελεκτικός αλγόριθμος EASY, που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του Ε.Μ.Π., για τη βελτιστοποίηση δρομέα μικρής ανεμογεννήτριας. Βασικά στοιχεία τους συγκεκριμένου αλγορίθμου παρουσιάζονται στην υποπαράγραφο 4.1.1. Στη συνέχεια περιγράφεται το λογισμικό XFOIL το οποίο έχει αναπτυχθεί για επίλυση ροής σε αεροτομές κυρίως για μεγάλους αριθμούς Re και τέλος παρουσιάζεται ο κώδικας RAFT που υπολογίζει την αεροδυναμική απόδοση του δρομέα και το μηχανολογικό πρόγραμμα SolidWorks με τη βοήθεια του οποίου σχεδιάστηκαν τρισδιάστατα όλα τα μέρη της βέλτιστης μικρής Α/Γ.

4.1 Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

Τις τελευταίες δεκαετίες, κατά τις οποίες η τεχνολογία των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχει παρουσιάσει ραγδαία εξέλιξη ως προς το κόστος τους, το οποίο είναι πλέον προσιτό, αλλά και ως προς την υπολογιστική ισχύ τους, η αποδοχή και η χρήση των στοχαστικών μεθόδων βελτιστοποίησης παρουσίασε ιδιαίτερη άνθηση. Ο βασικότερος εκπρόσωπος των μεθόδων αυτών είναι οι εξελικτικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης (Evolutionary Algorithms - EA). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι EA προσαρμόζονται εύκολα σε κάθε νέο πρόβλημα και δεν εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα. Συγκριτικά με άλλες μεθόδους, η χρήση τους θεωρείται άμεση, χωρίς πολλές παρεμβάσεις στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Παρόλα αυτά, οι EA θεωρούνται κατά συγκεκριμένες περιπτώσεις χρονοβόροι (για παράδειγμα για επίλυση Navier-Stokes) με την έννοια ότι χρειάζονται μεγάλο αριθμό αξιολογήσεων για τον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης. Αν και αρχικά οι EA αναπτύχθηκαν για επίλυση προβλημάτων ενός στόχου, με κατάλληλες ενέργειες μπορούν να αντιμετωπίσουν προβλήματα πολλών στόχων.

Η ιδέα των ΕΑ βασίζεται στην εξέλιξη των φυσικών πληθυσμών, όπως διατυπώθηκε από τη θεωρία εξέλιξης του Δαρβίνου. Συγκεκριμένα, κατά την εξέλιξη, που είναι η βασική διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης λύσης, ένας πληθυσμός μ υποψήφιων λύσεων (γονείς) εξελίσσεται στον πληθυσμό των λ απογόνων. Αυτοί οι απόγονοι είναι νέες λύσεις, που προκύπτουν από τους μ γονείς, έχοντας ενδεχομένως καλύτερα χαρακτηριστικά. Από τους λ απογόνους, με κριτήριο την καταλληλότητά τους, επιλέγονται οι μ γονείς της επόμενης γενιάς. Αυτό συνεχίζεται, γενιά με γενιά, μέχρι την ικανοποίηση κάποιου κριτηρίου σύγκλισης. Τέτοια κριτήρια υπάρχουν πολλά και ένας ΕΑ μπορεί να έχει σε ισχύ περισσότερα του ενός από αυτά. Μεταξύ αυτών είναι:

- η μη περαιτέρω βελτίωση της λύσης για έναν αριθμό αξιολογήσεων ή γενεών,
- η ομογενοποίηση του πληθυσμού ή/και
- η ανάλωση του υπολογιστικού χρόνου που επιτρέπει ο χρήστης.

Κατά τη διάρκεια των αξιολογήσεων, δημιουργείται ένα σύνολο ελίτ ατόμων, το οποίο αποτελείται από τα επίλεκτα-καλύτερα άτομα (υποψήφιες λύσεις) που έχουν προκύψει μέχρι τη συγκεκριμένη γενιά. Αυτή η διαλογή συμβαίνει για δύο λόγους. Πρώτον, αυτό το σύνολο περιέχει τη βέλτιστη λύση που έχει προκύψει μέχρι τη διακοπή ή ολοκλήρωση της διαδικασίας, και δεύτερον, χρησιμοποιείται σαν δεδομένο για την εξέλιξη των επόμενων γενεών ώστε να είναι ενισχυμένες με τα καλά χαρακτηριστικά της βέλτιστης λύσης. Αυτή η ενίσχυση αποτελεί το λεγόμενο ελιτισμό στους ΕΑ.

Επιπροσθέτως, υπάρχει ο *τελεστής επιλογής γονέων* T_μ , σύμφωνα με τον οποίο δημιουργείται το σύνολο των γονέων της επόμενης γενιάς, επιλέγοντας άτομα από τα σύνολα απογόνων και γονέων της τρέχουσας γενιάς. Αυτή η διαδικασία επιλογής γονέων αναλαμβάνει να δώσει μεγαλύτερες πιθανότητες στα άτομα με καλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης να συμμετάσχουν στη δημιουργία απογόνων.

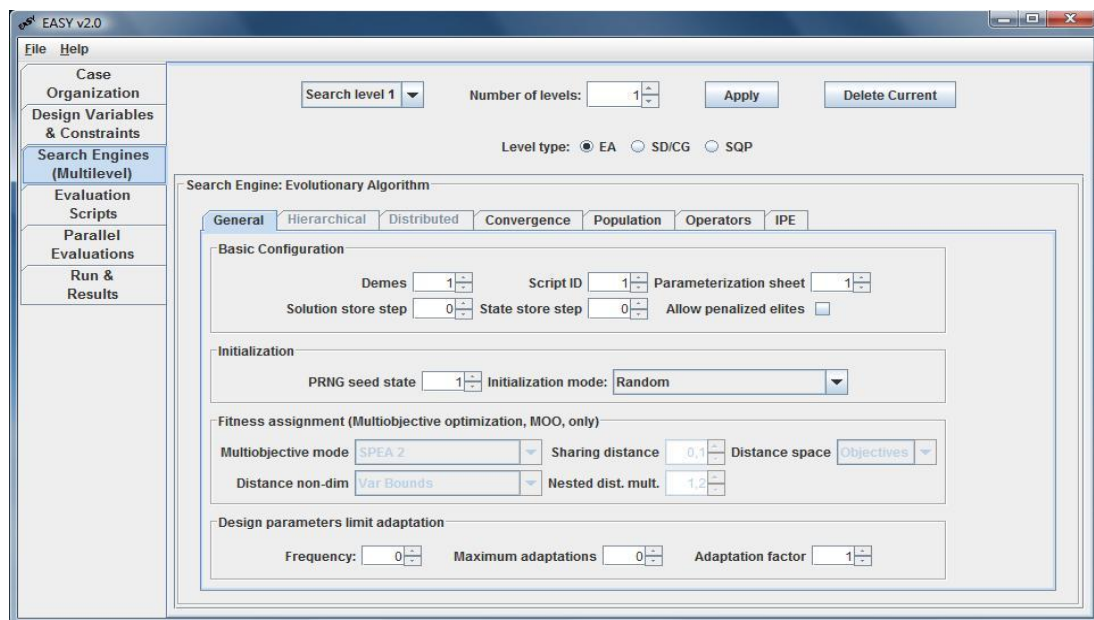
Υπάρχει, επιπλέον, ο *τελεστής διασταύρωσης* (crossover) ο οποίος συνδυάζει δύο τυχαία επιλεγμένους γονείς για να δημιουργήσει ισόποσους απογόνους. Στη βιβλιογραφία μπορούμε να συναντήσουμε και διασταύρωση στην οποία συμμετέχουν περισσότεροι από δύο γονείς. Στους ΕΑ, η διασταύρωση πραγματοποιείται με πιθανότητα P_r που η τιμή της κυμαίνεται κοντά στη μονάδα. Ο ρόλος της μη μοναδιαίας πιθανότητας διασταύρωσης, είναι να επιτρέπει με μικρή πιθανότητα ($1-P_r$) τη μεταφορά αναλλοίωτων χαρακτηριστικών των γονέων στους απογόνους. Ενεργοποιείται δηλαδή μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών όπου με πιθανότητα P_r γίνεται κανονικά η διασταύρωση, ενώ με πιθανότητα ($1-P_r$) οι απόγονοι ταυτίζονται με τους γονείς. Σε κάθε νέο απόγονο, που προέκυψε από την εφαρμογή του τελεστή διασταύρωσης, εφαρμόζεται ο *τελεστής μετάλλαξης* (mutation). Η μετάλλαξη στοχεύει στην εισαγωγή νέου γενετικού υλικού στον πληθυσμό των απογόνων, με πιθανότητα P_m (που συνήθως έχει πολύ μικρή τιμή, ενδεικτικά $P_m=0.01$) [Γιαννάκογλου Κ., 2006].

Σήμερα, οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (ΕΑ) επιλέγονται για την επίλυση ενός ευρέως φάσματος πολύπλοκων προβλημάτων σε διάφορους τομείς όπως στη μηχανική, στη βιομηχανία, στην επιστήμη, και σε αρκετούς άλλους. Οι ΕΑ παρουσιάζουν ιδιαίτερη ευκολία ως προς τη μεθοδολογία τους ενώ παράλληλα μπορούν να χειριστούν δύσκολα προβλήματα. Επιπλέον, στην συνέχεια του κεφαλαίου επισημαίνονται ορισμένα από τα αδιαμφισβήτητα πλεονεκτήματά τους, όπως:

- η αξιοπιστία τους,
- η ικανότητά τους να ξεφύγουν από τοπικά ακρότατα και να εντοπίζουν την ολική βέλτιστη λύση,
- η ικανότητά τους να φιλοξενήσουν άνετα οποιοδήποτε λογισμικό ανάλυσης,
- η ικανότητά τους να εντοπίσουν τις βέλτιστες εφικτές λύσεις, ακόμη και σε προβλήματα βελτιστοποίησης με περιορισμούς και
- η ικανότητά τους να χειρίζονται τα προβλήματα βελτιστοποίησης με περισσότερους από έναν αντιφατικούς στόχους.

4.1.1 EASY

Στην παρούσα Δ.Ε. επιλέχθηκε για τη βελτιστοποίηση του δρομέα της μικρής Α/Γ η χρήση του εξελικτικού αλγορίθμου EASY (Evolutionary Algorithms Systems) ο οποίος αναπτύχθηκε και κυκλοφόρησε στην αγορά από ερευνητική ομάδα του Ε.Μ.Π. με επικεφαλή τον Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Κ. Γιαννάκογλου. Έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς καθώς έχει εύκολο περιβάλλον χρήσης χτισμένο σε πλατφόρμα Java™, ενώ ο πυρήνας του εξελικτικού συστήματος είναι προγραμματισμένος σε C++ για μέγιστη απόδοση.

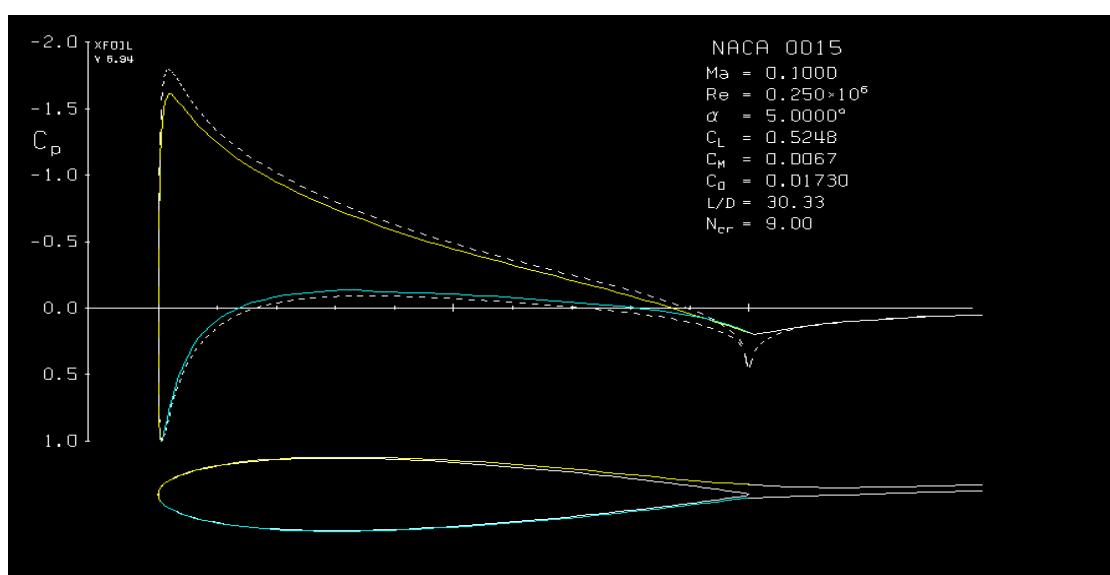


Εικόνα.23.: Το εικονικό περιβάλλον του EASY (v.2.0)

4.2 XFOIL

Στα πλαίσια της βελτιστοποίησης, η επιλογή κατάλληλης αεροτομής ήταν απαραίτητη. Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών απόδοσης των αεροτομών χρησιμοποιήθηκε κατά την παρούσα Δ.Ε. το XFOIL [Drela M.,1989] που αποτελεί ένα ελεύθερο λογισμικό σχεδιασμένο από τον Mark Drela στο Τεχνολογικό Ίδρυμα Μασαχουσέτης των ΗΠΑ (Massachusetts Institute of Technology - MIT). Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και αρχικά κατασκευάστηκε το 1980. Το XFOIL είναι ένα γρήγορο και αξιόπιστο πρόγραμμα, που έχει αναπτυχθεί για επίλυση ροής σε αεροτομές μεγάλων Α/Γ. Στην παρούσα Δ.Ε. χρησιμοποιήθηκε με τροποποιήσεις ώστε να ανταποκρίνεται κατά τον δυνατόν περισσότερο σε μικρές Α/Γ.

Συγκεκριμένα, το XFOIL για μία συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης, βρίσκει τη ροή γύρω από την αεροτομή, και σε αναδυόμενο παράθυρο εμφανίζει διάγραμμα με την κατανομή του συντελεστή ισχύος όπου υπάρχουν καμπύλες με διακεκομμένη γραμμή, που αντιστοιχούν στην ιδεατή κατανομή και με συνεχή γραμμή για την πραγματική κατανομή της εκάστοτε αεροτομής, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.24.:



Εικόνα.24.: Εικονικό περιβάλλον XFOIL (v. 6.94)

Εκτελώντας το XFOIL για μια σειρά γωνιών πρόσπτωσης προκύπτει ένα αρχείο εξόδου αντίστοιχης μορφής με αυτό που παρουσιάζεται στην *εικόνα 25*. Στην πρώτη στήλη φαίνονται οι γωνίες πρόσπτωσης α , στις επόμενες οι συντελεστές άνωσης C_l , αντίστασης C_d , αντίστασης λόγω πίεσης C_{dp} και ώσης C_m , ενώ οι δύο τελευταίες στήλες (Top_xtr και Bot_xtr) δηλώνουν το σημείο που γίνεται η μετάβαση της ροής από στρωτή σε τυρβώδη για το άνω και κάτω τμήμα της αεροτομής αντίστοιχα. Στην περίπτωση των μικρών A/Γ , όπου οι ταχύτητες ανέμου είναι μικρές, συνεπώς και ο αριθμός Reynolds, για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας του XFOIL επιλέχθηκε να ορισθούν εξ αρχής τα σημεία αυτά στο 1% της χορδής για το άνω και στο 30% της χορδής για το κάτω τμήμα. Αυτή η διαδικασία, που λέγεται *boundary layer tripping*, προτιμάται επειδή ο αριθμός Re στις μικρές A/Γ είναι μικρός και η πρόλεξη για το σημείο μετάβασης της ροής από στρωτή σε τυρβώδη του προγράμματος XFOIL δε θεωρείται αξιόπιστη. Έτσι τοποθετούμε το σημείο μετάβασης της ροής νωρίτερα με αποτέλεσμα να μειώνεται ο συντελεστής άνωσης C_l και να αυξάνεται ο συντελεστής C_d και να γίνεται η διαδικασία πιο συντηρητική.

```

XFOIL                      Version 6.94

Calculated polar for: NACA 0015

1 1 Reynolds number fixed      Mach number fixed

xtrf = 0.010 (top)             0.300 (bottom)
Mach = 0.100      Re = 0.250 e 6      Ncrit = 9.000

alpha      CL      CD      CDp      CM      Top_Xtr  Bot_Xtr
-----
-4.000    -0.4529   0.01455  0.00410  -0.0015  0.0100  0.3000
-2.000    -0.2329   0.01438  0.00330   0.0001  0.0100  0.3000
 0.000    -0.0124   0.01465  0.00317   0.0015  0.0100  0.3000
 2.000     0.2062   0.01535  0.00368   0.0031  0.0100  0.3000
 4.000     0.4203   0.01651  0.00484   0.0053  0.0100  0.3000
 6.000     0.6267   0.01825  0.00675   0.0085  0.0100  0.3000
 8.000     0.8193   0.02073  0.00957   0.0133  0.0100  0.3000
10.000     0.9846   0.02426  0.01360   0.0214  0.0100  0.3000
12.000     1.1030   0.03016  0.02018   0.0324  0.0100  0.3000
14.000     1.1715   0.04247  0.03336   0.0373  0.0100  0.3000
16.000     1.1579   0.06933  0.06128   0.0288  0.0100  0.3000

```

Εικόνα.25.: Τυπική μορφή αρχείου αποτελεσμάτων XFOIL

4.3 RAFT

Ο RAFT είναι ένας κώδικας, που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Αεροδυναμικής της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. [Βουτσινάς Σ.Γ., κ.ά., 1996]. Χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς δρομέα Α/Γ και προτιμάται καθώς παρέχει ιδιαίτερα ικανοποιητικές προβλέψεις φορτίων με πολύ χαμηλό υπολογιστικό κόστος.

Ο κώδικας αυτός χρειάζεται αρχεία εισόδου την κατανομή του προφίλ των πτερυγίων της Α/Γ, τη γεωμετρία τους, την κατανομή των συντελεστών άνωσης και αντίστασης καθώς και ένα αρχείο με πληροφορίες του πνέοντος ανέμου. Κατόπιν επεξεργασίας τους, προκύπτουν δύο αρχεία εξόδου, που περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με την ισχύ που αποδίδει η Α/Γ καθώς και τις δυνάμεις που της ασκούνται. Η διαδικασία θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5.

4.4 SolidWorks

Το μηχανολογικό πρόγραμμα SolidWorks είναι ένα πακέτο, τύπου CAD (Computer - Aided Design), με τη βοήθεια του οποίου αναπαριστώνται σε υπολογιστή τρισδιάστατα μηχανολογικά σχέδια και απευθύνεται σε μηχανολόγους μηχανικούς και σε σχεδιαστές μηχανολογικού σχεδίου. Έχει αναπτυχθεί από την Dassault Systèmes SolidWorks Corp., θυγατρική εταιρία της Γαλλικής Dassault Systèmes, S. A., ενώ είναι συμβατό με λειτουργικό σύστημα Microsoft Windows. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα το χρησιμοποιούν πάνω από 1,3 εκατομμύρια μηχανικοί και σχεδιαστές στον κόσμο και περισσότερες από 130.000 εταιρίες παγκοσμίως. Η πρώτη έκδοση SolidWorks95 παρουσιάστηκε το 1995 και από τότε κάθε χρόνο κατασκευάζεται ανανεωμένη έκδοση. Στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. χρησιμοποιήθηκε η έκδοση SolidWorks2011 για την απεικόνιση και προσομοίωση της προς βελτιστοποίησης μικρής Α/Γ.

Κεφάλαιο 5^ο

5.1 Περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού της βέλτιστης ετήσιας παραγόμενης ισχύος

Σκοπός της παρούσας Δ.Ε. είναι η βελτιστοποίηση του δρομέα μίας μικρής Α/Γ, έτσι ώστε να διασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή ετήσια παραγόμενη ενέργεια με στόχο να καλύπτει το 50% των ενεργειακών αναγκών ενός νοικοκυριού, δηλαδή περίπου 2000÷2500kWh/y. Η αεροδυναμική ανάλυση, πραγματοποιήθηκε με χρήση του κώδικα RAFT, του οποίου η δομή περιγράφεται παρακάτω και με τη βοήθεια του λογισμικού αεροδυναμικής βελτιστοποίησης EASY.

Η δομή του κώδικα RAFT βασίζεται σε συγκεκριμένα βήματα, τα οποία και θα περιγραφούν στην συνέχεια της παραγράφου.

```
5.00      ! VELHUB
1.225     ! AIRDEN
340.0     ! SSPEED

3         ! NBLADE
65.0000   ! OMEGA (rad/s)
0.0000    ! Collective Pitch
0.0238    ! RROOT
0.1746    ! RAERO
1.0000    ! RTIP
20        ! NSTRIP
1         ! ITIPLOS
0         ! IHUBLOS
0.1       ! a
0.01      ! a'
```

**Εικόνα.26.: Τυπική μορφή αρχείου
*aero.inp***

Στην αρχή ο κώδικας διαβάζει δεδομένα από το αρχείο εισόδου *aero.inp*, το οποίο περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τον πνέοντα άνεμο, αλλά και πληροφορίες που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης Α/Γ όπως ο αριθμός των πτερυγίων της και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής.

Αφού γίνει η απαραίτητη επεξεργασία των δεδομένων αυτών, ο κώδικας RAFT διαβάζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης Α/Γ που βρίσκονται στο αρχείο εισόδου *geom.b.inp*. Ενδεικτικά, ένα τέτοιο αρχείο έχει την ακόλουθη μορφή:

```

-- Input geometry for 1kw Reference wind turbine
19      ! NSPANB
      r      chord  twist   xaer    zaer
0.000    0.071    13.308   -0.862  -0.204
0.046    0.071    13.308   -0.857  -0.203
0.089    0.077    13.308   -0.832  -0.197
0.132    0.083    13.308   -0.764  -0.181
0.187    0.091    13.308   -0.649  -0.154
0.252    0.093    11.480   -0.570  -0.116
0.317    0.089    10.162   -0.549  -0.098
0.382    0.085     9.011   -0.525  -0.083
0.447    0.080     7.795   -0.496  -0.068
0.512    0.075     6.544   -0.465  -0.053
0.577    0.070     5.361   -0.436  -0.041
0.642    0.065     4.188   -0.406  -0.030
0.707    0.060     3.125   -0.376  -0.021
0.772    0.055     2.319   -0.345  -0.014
0.837    0.050     1.526   -0.315  -0.008
0.892    0.046     0.863   -0.289  -0.004
0.935    0.042     0.370   -0.261  -0.002
0.978    0.028     0.106   -0.177   0.000
1.000    0.007     0.000   -0.044   0.000

```

Εικόνα.27.: Τυπική μορφή αρχείου *geom.b.inp*

Επιπλέον, υπάρχει το αρχείο εισόδου *profilb.inp* το οποίο περιγράφει τη σύνθεση του πτερυγίου από επιμέρους αεροτομές. Φυσικά στην περίπτωση των μικρών Α/Γ που εξετάστηκαν στην παρούσα Δ.Ε., το πτερύγιο είναι πιο απλό και αποτελείται από ένα ή δύο είδη αεροτομών. Παρακάτω παρουσιάζεται η τυπική μορφή ενός τέτοιου αρχείο εισόδου:

```

-- Input geometry for 1kw Reference wind turbine
19      ! NSPANB
      r      profil
0.000      "cylinder"
0.046      "cylinder"
0.089      "cylinder"
0.132      "cylinder"
0.187      "naca0015"
0.252      "naca0015"
0.317      "naca0015"
0.382      "naca0015"
0.447      "naca0015"
0.512      "naca0015"
0.577      "naca0015"
0.642      "naca0015"
0.707      "naca0015"
0.772      "naca0015"
0.837      "naca0015"
0.892      "naca0015"
0.935      "naca0015"
0.978      "naca0015"
1.000      "naca0015"

```

Εικόνα.28.: Τυπική μορφή αρχείου *profilb.inp*

Για όλες τις επιμέρους αεροτομές που εμφανίζονται στο αρχείο *profilb.inp*, υπάρχουν αντίστοιχα αρχεία τύπου *.dat* τα οποία περιλαμβάνουν πληροφορίες για τις τιμές των συντελεστών άνωσης, αντίστασης και ώσης για κάθε γωνία πρόσπτωσης. Αυτά τα αρχεία δεδομένων προκύπτουν από το πρόγραμμα XFOIL για τιμές του αδιάστατου αριθμού Reynolds, $Re=250.000$ και αριθμό Mach, $M=0,1$ όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 4.

Από την επεξεργασία όλων των παραπάνω δεδομένων, ο κώδικας RAFT εξαγει δύο αρχεία δεδομένων τα *loads.dat* και *strip.dat*, που παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για την απόδοση της εξεταζόμενης Α/Γ. Το αρχείο *loads.dat*, του οποίου η μορφή φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα, περιλαμβάνει πληροφορίες όπως την ταχύτητα του ανέμου, την αδιάστατη ταχύτητα λ , την ισχύ.

5.00000	14.29022	0.10768	0.06394	1.00000	65.00000
6.00000	11.90851	0.23114	0.08408	1.00000	65.00000
7.00000	10.20730	0.38567	0.10694	1.00000	65.00000
8.00000	8.93138	0.57794	0.12812	1.00000	65.00000
9.00000	7.93901	0.80317	0.14948	1.00000	65.00000
10.00000	7.14511	1.04877	0.16795	1.00000	65.00000
11.00000	6.49555	1.27563	0.18218	1.00000	65.00000
12.00000	5.95426	1.30756	0.18508	1.00000	65.00000
13.00000	5.49624	1.34208	0.18817	1.00000	65.00000
14.00000	5.10365	1.37923	0.19145	1.00000	65.00000

Εικόνα.29. : Τυπική μορφή αρχείου *loads.dat*

Το αρχείο *strip.dat* παρέχει διάφορες πληροφορίες σχετικά με τη γωνία πρόσπτωσης, τους συντελεστές αξονικής και περιφερειακής επαγωγής κ.ά. για διάφορες θέσεις στην ακτίνα του πτερυγίου. Για μία συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου το αρχείο αυτό έχει την μορφή που παρουσιάζεται στην παρακάτω *εικόνα.30.:*

0.05344	52.33821	3.47343	8.00000	0.00000	0.00000	1.95468	-0.84806
0.13421	28.69907	8.72381	8.00000	0.00000	0.00000	6.81584	5.56273
0.20030	10.52284	13.01967	8.00000	0.24952	0.05958	12.31910	4.78627
0.25171	7.24050	16.36100	8.00000	0.25602	0.03950	15.74591	4.96774
0.30311	5.20994	19.70233	8.00000	0.26324	0.02798	19.30668	5.05387
0.35452	3.94610	23.04367	8.00000	0.27180	0.02077	23.04377	5.07276
0.40592	3.17592	26.38500	8.00000	0.28031	0.01593	26.89372	5.04091
0.45733	2.69093	29.72634	8.00000	0.28881	0.01256	30.85002	4.98335
0.50873	2.38817	33.06767	8.00000	0.29818	0.01013	34.96369	4.90987
0.56014	2.21054	36.40900	8.00000	0.30775	0.00833	39.18872	4.82449
0.61154	2.13304	39.75034	8.00000	0.31684	0.00694	43.47061	4.72980
0.66295	2.15380	43.09167	8.00000	0.32566	0.00586	47.80500	4.62886
0.71435	2.27298	46.43301	8.00000	0.33515	0.00500	52.22538	4.52019
0.76576	2.48113	49.77434	8.00000	0.34520	0.00431	56.82054	4.41273
0.81716	2.73994	53.11567	8.00000	0.35440	0.00375	61.38222	4.30124
0.86857	3.05264	56.45701	8.00000	0.35549	0.00326	65.02944	4.19756
0.91997	3.43106	59.79834	8.00000	0.33600	0.00280	65.80570	4.09382
0.97138	3.75094	63.13968	8.00000	0.29659	0.00235	61.97803	3.88106
1.02278	3.86619	66.48101	8.00000	0.26702	0.00198	53.96743	3.33320
1.07419	3.51664	69.82234	8.00000	0.29989	0.00185	41.31906	2.22082

Εικόνα.30. : Τυπική μορφή αρχείου *strip.dat*

Προκειμένου να γίνει η βελτιστοποίηση είναι απαραίτητο να γίνουν ορισμένες τροποποιήσεις στη μορφή του κώδικα RAFT που περιγράφηκε προηγουμένως. Πολλά από τα σταθερά δεδομένα πρέπει να πάρουν παραμετρική μορφή έτσι ώστε το πακέτο αεροδυναμικής βελτιστοποίησης EASY να επιλέξει τις κατάλληλες τιμές για τις παραμέτρους αυτές.

Η πρώτη τροποποίηση που πραγματοποιήθηκε σχετίζεται με τη χορδή του πτερυγίου. Στόχος αυτής της τροποποίησης είναι ο κώδικας RAFT να δημιουργεί αυτόματα το αρχείο *geom.b.inp*, αντί να το δέχεται έτοιμο από το χρήστη, όπως γινόταν στην αρχική μορφή του κώδικα.

Η καμπύλη της χορδής δημιουργείται από πολυώνυμα παρεμβολής splines (Παράρτημα 1^ο). Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει το βαθμό του πολυωνύμου και τον αριθμό των σημείων ελέγχου (control points). Η καμπύλη της χορδής από τη θεωρία της αεροδυναμικής μελέτης είναι μία ομαλή καμπύλη, συνεπώς ένα πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού αποτελεί μία πολύ καλή προσέγγιση δίνοντας παράλληλα και ένα σχετικά μικρό σφάλμα παρεμβολής. Παρόλα αυτά, και καθαρά για προγραμματιστικούς λόγους επιλέχθηκε στην παρούσα Δ.Ε., η καμπύλη της χορδής να περιγράφεται από πολυώνυμο 5^{ου} βαθμού. Επιπλέον, επιλέχθηκαν εννέα σημεία ελέγχου (control points) για τη δημιουργία της καμπύλης, κατανομημένα από τη ρίζα έως την άκρη του πτερυγίου. Συνεπώς, με χρήση των πολυωνύμων δημιουργείται η καμπύλη της χορδής και αναλόγως με τον αριθμό των σημείων που επιλέγει ο χρήστης, συμπληρώνεται το αρχείο *geom.b.inp*. Όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια της παραγράφου, το πρόγραμμα βελτιστοποίησης EASY καλείται να εντοπίσει τις βέλτιστες τιμές για αυτά τα εννέα σημεία ελέγχου (control points) που θα ορίσουν και την τελική μορφή της καμπύλης.

Με όμοιο τρόπο μετατρέπεται σε παραμετρική μορφή και η καμπύλη της συστροφής του πτερυγίου. Στην περίπτωση της συστροφής κρίνεται αναγκαίο τα σημεία ελέγχου να είναι αρκετά και ο βαθμός του πολυωνύμου παρεμβολής spline να είναι υψηλός, έτσι ώστε να προσεγγίζει το πολυώνυμο καλύτερα τις απότομες αλλαγές στις τιμές της συστροφής. Στην παρούσα Δ.Ε.

επιλέχθηκε το πολυώνυμο να είναι 5^{ου} βαθμού και τα σημεία ελέγχου (control points) εννέα. Όπως και στην περίπτωση της χορδής, έτσι και για τη συστροφή τα εννέα αυτά σημεία θα τεθούν προς βελτιστοποίηση.

Κατά τη βελτιστοποίηση με το πρόγραμμα EASY είναι απαραίτητο να δοθεί στις μεταβλητές σχεδιασμού ένα εύρος δυνατών τιμών, ώστε το λογισμικό να διαλέξει το συνδυασμό εκείνων των τιμών που δίνουν το βέλτιστο αποτέλεσμα. Για τη χορδή τέθηκαν τα εννέα σημεία ελέγχου προς βελτιστοποίηση καθώς και οι αντίστοιχες εννέα θέσεις τους ως προς την ακτίνα. Αντίστοιχα, και για τη συστροφή τέθηκαν τα εννέα σημεία ελέγχου για να βελτιστοποιηθούν, και μάλιστα αυτά που αντιστοιχούν στις εννέα θέσεις ακτίνας που είναι προς βελτιστοποίηση. Επομένως υπάρχουν συνολικά 27 μεταβλητές σχεδιασμού, οι $c_1, c_2, \dots, c_9$ για τη χορδή, οι $r_1, r_2, \dots, r_9$ για την ακτίνα και οι $t_1, t_2, \dots, t_9$ για τη συστροφή. Τα εύρη που επιλέχθηκαν για την εκάστοτε μεταβλητή φαίνονται στον παρακάτω *πίνακα.1*:

design variables for EASY								
	min	max		min	max		min	max
r_1	0,01	0,05	c_1	0,07	0,075	t_1	13,3	13,4
r_2	0,1	0,15	c_2	0,08	0,085	t_2	13,2	13,3
r_3	0,23	0,27	c_3	0,092	0,094	t_3	11,3	12
r_4	0,43	0,52	c_4	0,074	0,081	t_4	6,5	8
r_5	0,62	0,66	c_5	0,062	0,067	t_5	3,5	4,2
r_6	0,75	0,79	c_6	0,052	0,057	t_6	1	2,5
r_7	0,87	0,91	c_7	0,045	0,048	t_7	0,5	0,9
r_8	0,95	0,98	c_8	0,025	0,04	t_8	0,1	0,2
r_9	0,99	1,1	c_9	0,006	0,015	t_9	0	0,1

Πίνακας 1: Εύρος τιμών μεταβλητών σχεδιασμού

Η μέγιστη και ελάχιστη τιμή για κάθε μεταβλητή σχεδιασμού προέκυψε κατόπιν downscaling σε αεροτομή μεγάλης Α/Γ.

```

27
0.073797653958944
0.084481915933529
0.092043010752688
0.077893450635386
0.064766373411535
0.05274780058651
0.04649853372434
0.027565982404692
0.014797653958944
0.022043010752688
0.12717497556207
0.2411045943304
0.47222873900293
0.65839687194526
0.75840664711632
0.90777126099707
0.9533724340176
1.1
13.303616813294
13.229032258065
11.691397849462
6.6143695014663
3.5458455522972
2.0513196480938
0.82258064516129
0.11994134897361
0.093548387096774

```

**Εικόνα.31. :Τυπική
μορφή αρχείου *task.dat***

Η επιλογή των τιμών που θα διαλέξει ο EASY επηρεάζονται από τις τιμές των συντελεστών διασταύρωσης, μετάλλαξης όπως αναφέρθηκαν και στο Κεφάλαιο 4.

Η επικοινωνία μεταξύ του προγράμματος EASY και του κώδικα RAFT επιτυγχάνεται με ένα batch αρχείο, το *task.bat*, το οποίο περιλαμβάνει μία σειρά εντολών που ο χρήστης έχει ορίσει προς εκτέλεση και στην παρούσα Δ.Ε. έχει την παρακάτω μορφή:

```

@echo off
erase loads.dat
erase results.dat
raft.exe >nul
postprocessor.exe >nul

```

**Εικόνα.32. :Τυπική μορφή
αρχείου *task.bat***

Η εντολή στην πρώτη γραμμή του αρχείου *task.bat*, αποτρέπει το πρόγραμμα να εμφανίσει αποτελέσματα από κάθε επανάληψη στην οθόνη. Η δεύτερη γραμμή μπήκε για να διαγράψει το αρχείο *loads.dat* που δημιούργησε το εκτελέσιμο πρόγραμμα *raft.exe*, την προηγούμενη φορά που εκτελέστηκε. Η τρίτη γραμμή έχει αντίστοιχη λειτουργία, να διαγράψει δηλαδή το αρχείο *results.dat* που δημιούργησε επίσης το *raft.exe*, την προηγούμενη φορά που εκτελέστηκε. Η τέταρτη γραμμή καθώς και η πέμπτη υποδεικνύουν στο πρόγραμμα να χρησιμοποιήσει ως τυπική έξοδό του το προσωρινό αρχείο *nul*, το οποίο και σβήνεται στο τέλος της εντολής.

Σε κάθε αξιολόγηση, ο EASY δημιουργεί ένα αρχείο εξόδου *task.dat* το οποίο έχει την ακόλουθη μορφή:

Ο αριθμός στην πρώτη γραμμή του αρχείου εξόδου *task.dat* υποδηλώνει το πλήθος των μεταβλητών σχεδιασμού (στο συγκεκριμένο παράδειγμα 27), η κάθε μία από τις επόμενες γραμμές δίνει την τιμή της εκάστοτε μεταβλητής, που επέλεξε ο EASY να αξιολογήσει από το εύρος τιμών που ο χρήστης επιθυμεί.

Το αρχείο εξόδου *task.dat* αποτελεί αρχείο εισόδου για τον κώδικα RAFT, καθώς δέχεται τις τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού που επέλεξε ο EASY και εφαρμόζει τα πολυώνυμα splines για τη χορδή και τη

Το τελευταίο εκτελέσιμο πρόγραμμα, δημιουργείται από το χρήστη, προκειμένου να αποθηκεύονται σε ένα αρχείο *task.res* το προς βελτιστοποίηση μέγεθος, που στην εργασία αυτή είναι η ετήσια παραγόμενη ενέργεια. Ο EASY περιμένει το αρχείο *task.res* ως επιστροφή, προκειμένου να συνεχίσει τη διαδικασία. Το αρχείο αυτό έχει τόσες γραμμές όσοι είναι οι στόχοι, δηλαδή στην περίπτωσή μας έχει την παρακάτω μορφή:

-2281.3489871083|

Εικόνα.33. :Τυπική μορφή αρχείου *task.res* Πρέπει να σημειωθεί ότι ο EASY είναι ένα πακέτο αεροδυναμικής βελτιστοποίησης που κάνει μόνο ελαχιστοποίηση, συνεπώς στο *task.res* μπορεί να γίνει κατανοητό ότι το αρνητικό πρόσημο «-» μπροστά από την τιμή της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας μπαίνει προκειμένου να ελαχιστοποιεί την αντίθετη τιμή της ζητούμενης, επομένως κατά απόλυτο τιμή να προκύπτει μεγιστοποίηση.

Τέλος, ο χρήστης ορίζει πόσες αξιολογήσεις πρέπει να γίνουν. Στην παρούσα Δ.Ε., ύστερα από σειρά δοκιμαστικών τρεξιμάτων, κρίθηκε ικανοποιητικό το πλήθος των 1000 αξιολογήσεων.

Ο EASY στο τέλος όλων των αξιολογήσεων έχει δημιουργήσει αρχεία που περιέχουν λεπτομέρειες για την πορεία της βελτιστοποίησης καθώς και τη βέλτιστη λύση με τις αντίστοιχες τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού.

Στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. οι αεροτομές οι οποίες αξιολογήθηκαν ήταν οι: NACA2415, NACA4415, Ntua_15 και Ntua_18 με τις δύο τελευταίες να αποτελούν αεροτομές σχεδιασμένες στο Εργαστήριο Αεροδυναμικής της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Έγινε η επιλογή των συγκεκριμένων αεροτομών, προκειμένου να συγκρίνουμε δύο κλασικές αεροτομές NACA, με μικρή και μεγάλη καμπυλότητα αντίστοιχα, με δύο νέες αεροτομές, σχεδιασμένες για υψηλή παραγωγή ενέργειας. Οι συγκεκριμένες αεροτομές, αξιολογήθηκαν από το πρόγραμμα XFOIL (το οποίο περιγράφηκε

στο Κεφάλαιο 4) για την περίπτωση των μικρών A/Γ και προέκυψαν οι κατανομές των συντελεστών άνωσης, αντίστασης και ώσης.

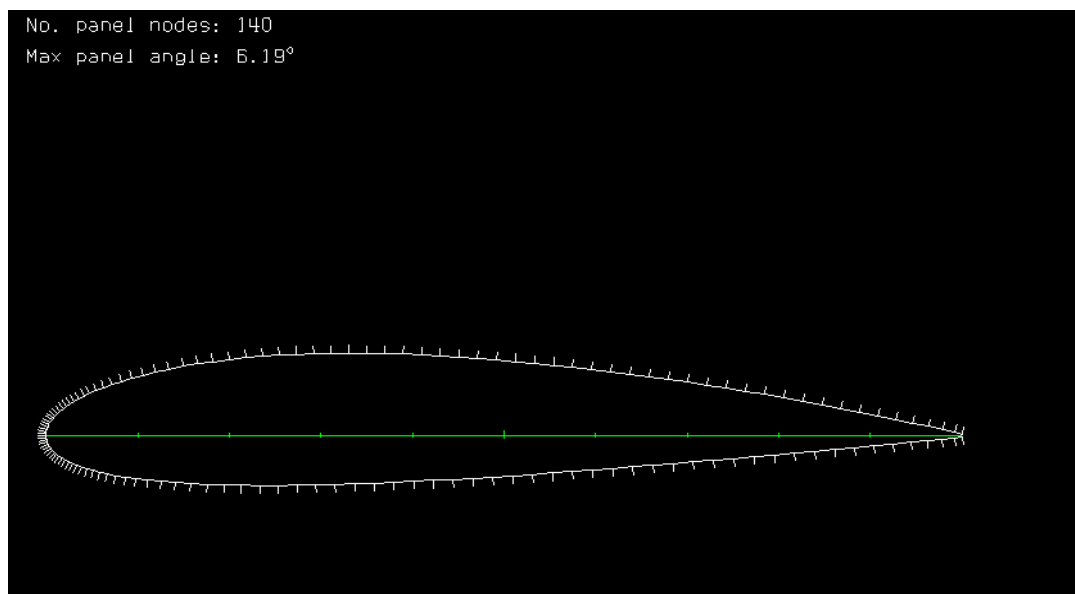
Στις μικρές A/Γ είναι ιδιαίτερα δύσκολο να εφαρμοσθεί η τεχνολογία ρύθμισης γωνίας βήματος λόγω μικρού μεγέθους και αυξημένου κόστους. Για το λόγο αυτό έγιναν επιπλέον αξιολογήσεις για κάθε αεροτομή για γωνίες βήματος -2° , -1° , 0° , 1° , 2° . Προτιμήθηκαν μικρές γωνίες βήματος καθώς τέτοιες τιμές εμφανίζουν το βέλτιστο συντελεστή ισχύος C_p .

5.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στο σημείο αυτό θα γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων κάθε αεροτομής ξεχωριστά και κατόπιν, αφού γίνουν οι απαραίτητες συγκρίσεις μεταξύ τους, επιλέγεται εκείνη που δίνει τη βέλτιστη τιμή ετήσιας παραγόμενης ενέργειας.

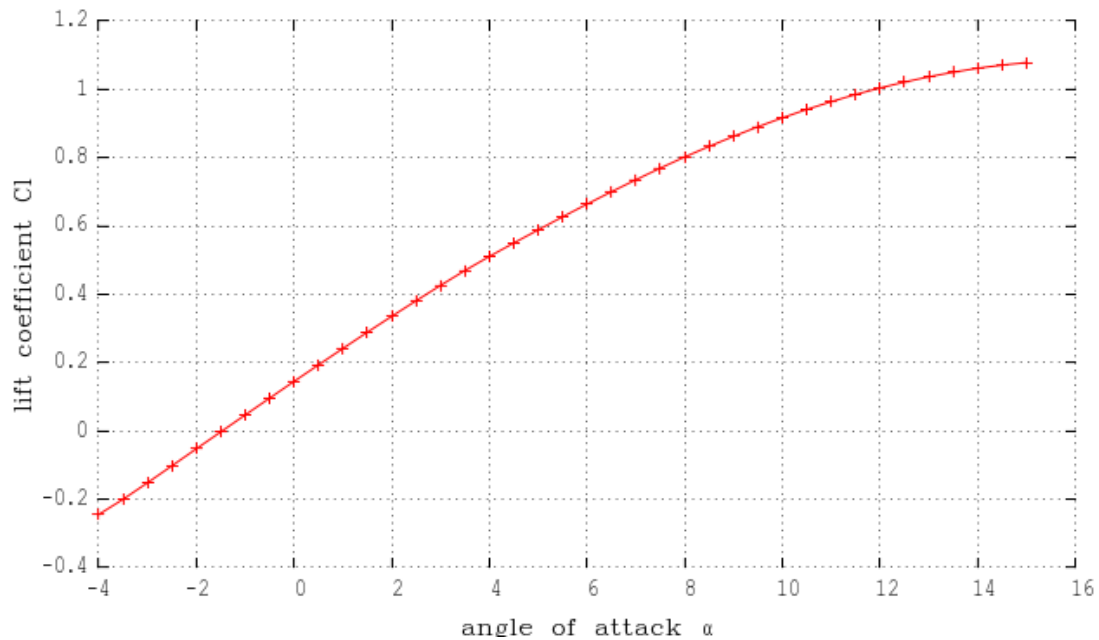
5.2.1 NACA2415

Η εν λόγω αεροτομή, όπως σχεδιάστηκε από το πρόγραμμα XFOIL (Κεφάλαιο 4), έχει το παρακάτω προφίλ:

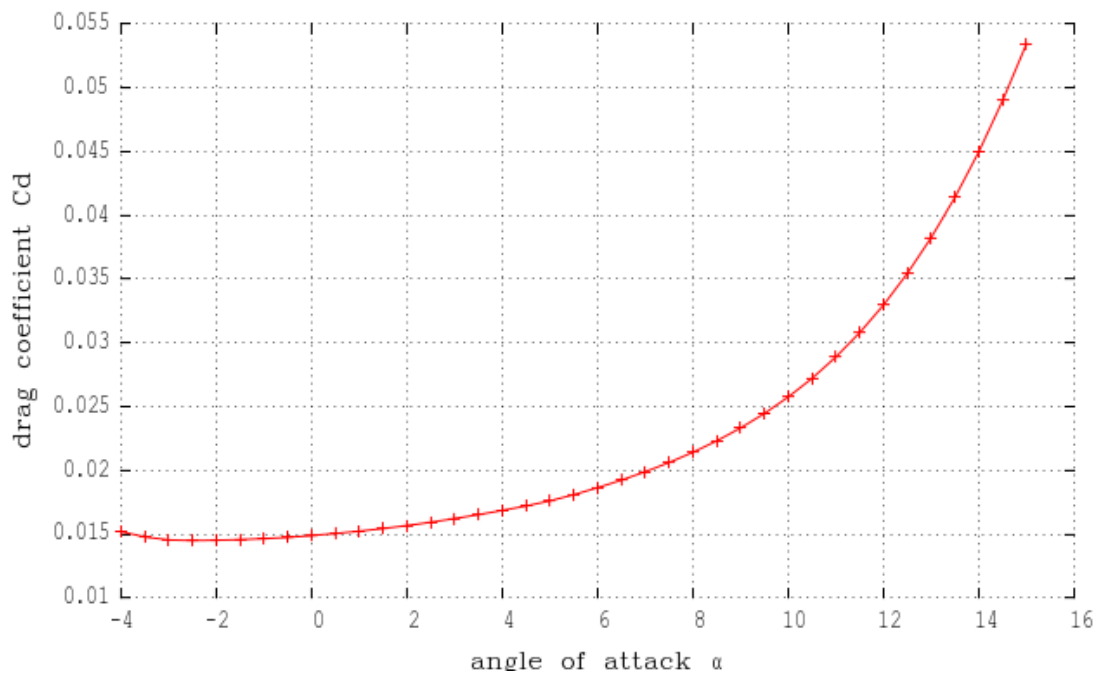


Εικόνα.33.: Προφίλ αεροτομής NACA2415

Έπειτα από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων για αριθμούς $Re=250.000$, προέκυψαν τα διαγράμματα.16. και .17. για τους συντελεστές άνωσης και αντίστασης, αντίστοιχα:

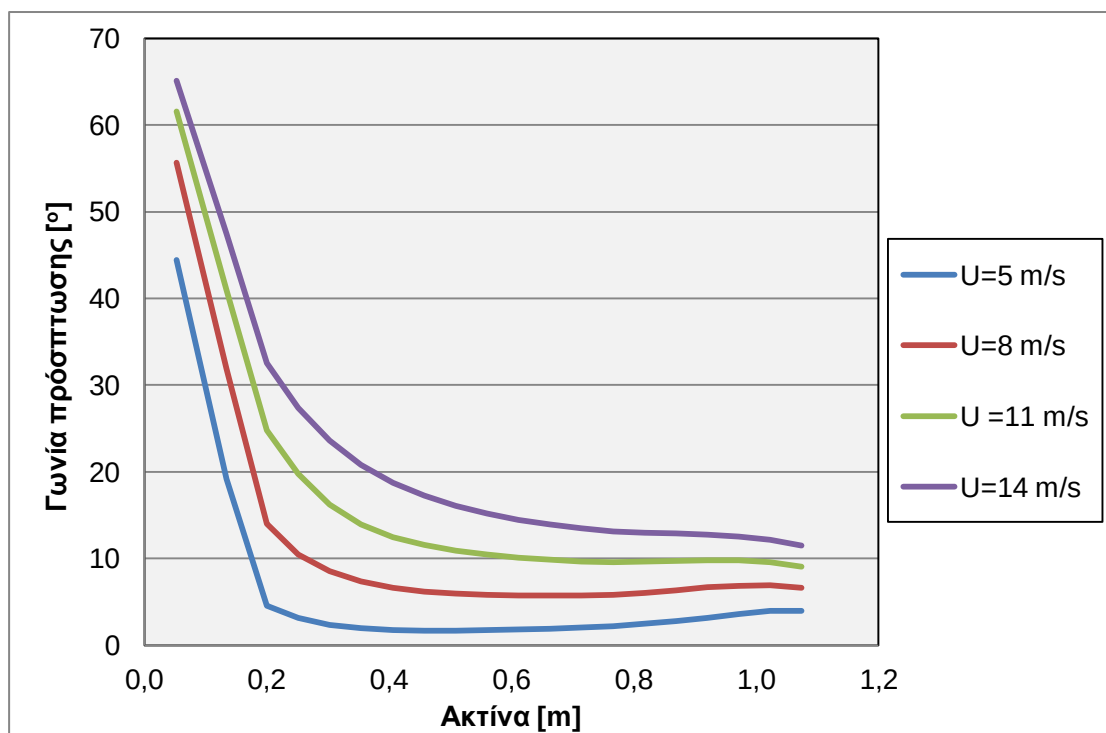


Διάγραμμα.16.: Συντελεστής άνωσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης - NACA2415



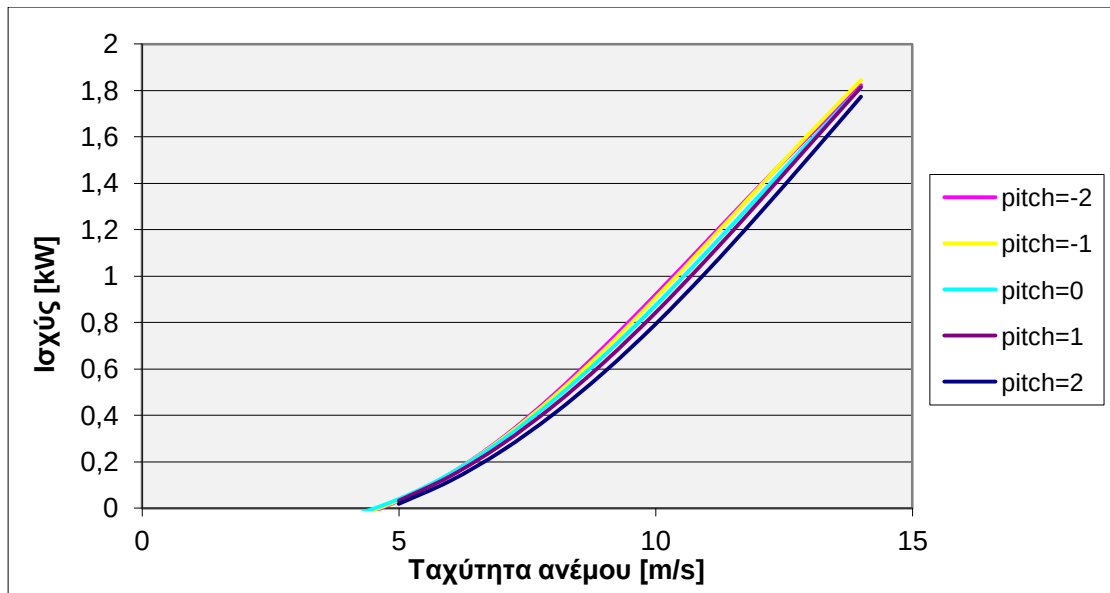
Διάγραμμα.17.: Συντελεστής αντίστασης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης - NACA2415

Η συγκεκριμένη αεροτομή αξιολογήθηκε για μικρούς αριθμούς Reynolds και γωνίες πρόσπτωσης στο διάστημα $[-4^\circ, 15^\circ]$. Επιλέχθηκε αυτό το εύρος γωνιών καθώς περί τις 15° εμφανίζεται η μέγιστη τιμή του συντελεστή άνωσης και πέραν αυτής δε γνωρίζουμε εάν τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα. Από το αρχείο *strip.dat* του κώδικα RAFT προέκυψε ότι πράγματι η NACA2415 λειτουργεί σε αυτό το διάστημα, εάν εξαιρεθεί η ρίζα του πτερυγίου που αποτελεί μη-αεροδυναμικό τμήμα (κύλινδρος) και λαμβάνει υψηλές τιμές γωνιών, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο **διάγραμμα.18**.



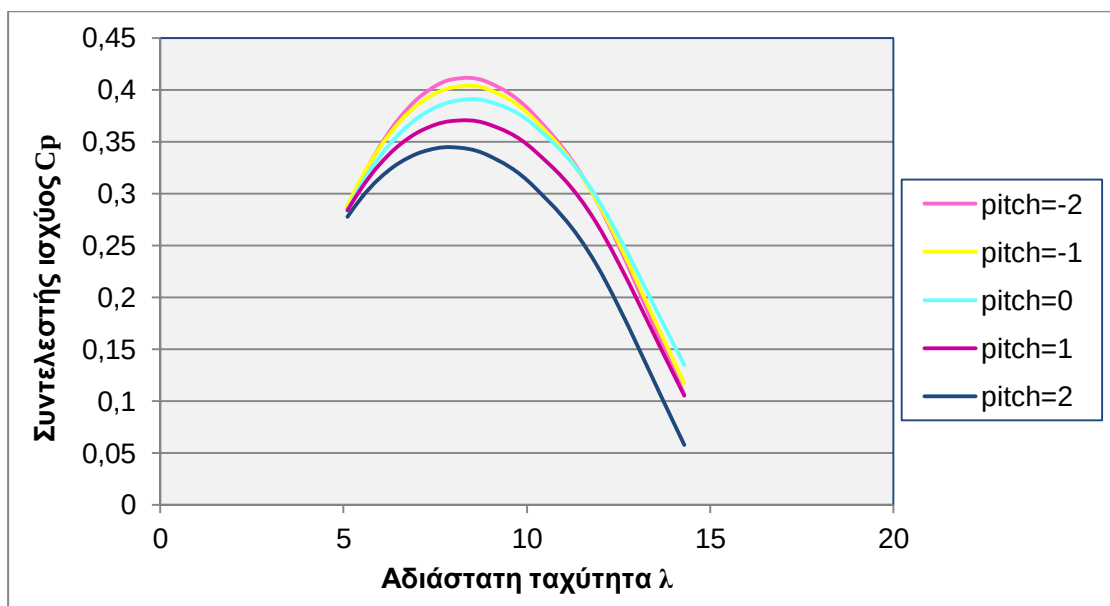
Διάγραμμα.18.: Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει της ακτίνας για διάφορες ταχύτητες ανέμου- NACA2415

Μετά από 1000 αξιολογήσεις, με το πακέτο αεροδυναμικής βελτιστοποίησης EASY (Κεφάλαιο 4), για κάθε μία από τις επιλεγμένες γωνίες βήματος, προέκυψαν οι καμπύλες ισχύος του πτερυγίου NACA2415, που αντιστοιχούν στη βέλτιστη λύση κάθε περίπτωσης, όπως φαίνεται στο ακόλουθο **διάγραμμα.19.:**



Διάγραμμα.19.: Καμπύλες ισχύος για διάφορες γωνίες βήματος - NACA2415

Η ισχύς που συνεισφέρει καθοριστικά στην αύξηση της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας, είναι αυτή που παράγεται για ταχύτητες ανέμου από 7m/s έως και περίπου 12m/s. Καθώς οι διαφορές τους δεν είναι ιδιαίτερα εμφανείς στο διάγραμμα, παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες του συντελεστή ισχύος σαν συνάρτηση της αδιάστατης ταχύτητας λ . Η βέλτιστη τιμή του συντελεστή ισχύος εμφανίζεται για γωνία βήματος -2° με τιμή περίπου 0,42.



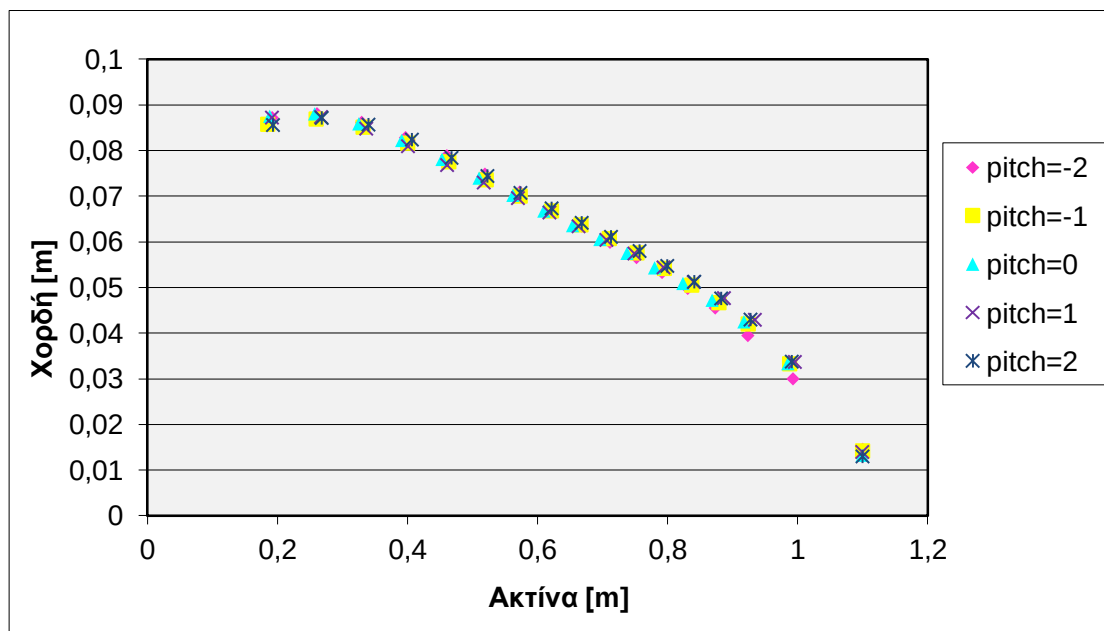
Διάγραμμα.20.: Καμπύλη συντελεστή ισχύος-αδιάστατης ταχύτητας - NACA2415

Στον παρακάτω *πίνακα.2.* αναγράφονται οι τιμές της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας, όπως προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση, για κάθε μία από τις εξεταζόμενες γωνίες βήματος:

pitch	E [kWh/y]
-2°	2.288,88
-1°	2.271,89
0°	2.223,09
1°	2.190,29
2°	2.038,91

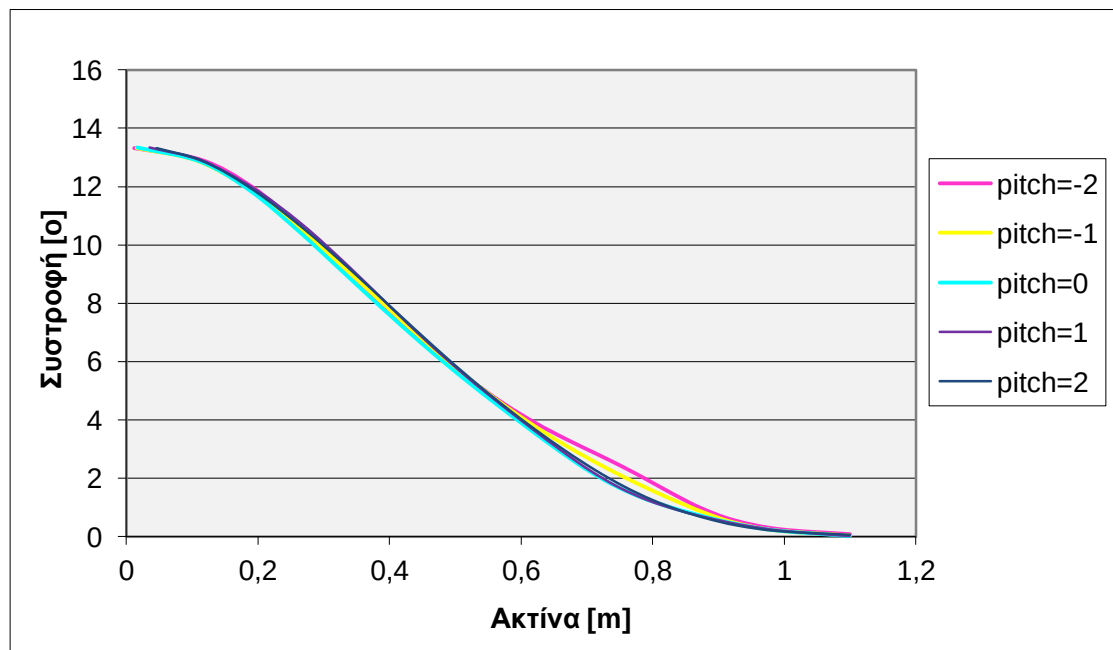
Πίνακας.2.: Τιμές ετήσιας παραγόμενης ενέργειας για κάθε γωνία βήματος - NACA2415

Τα διαγράμματα χορδής και συστροφής, δεν παρουσίασαν σημαντική διαφορά σε κάθε περίπτωση. Οι καμπύλες για τη χορδή για τη συγκεκριμένη αεροτομή για κάθε περίπτωση είναι:



Διάγραμμα.21.: Καμπύλες χορδής για διάφορες γωνίες βήματος - NACA2415

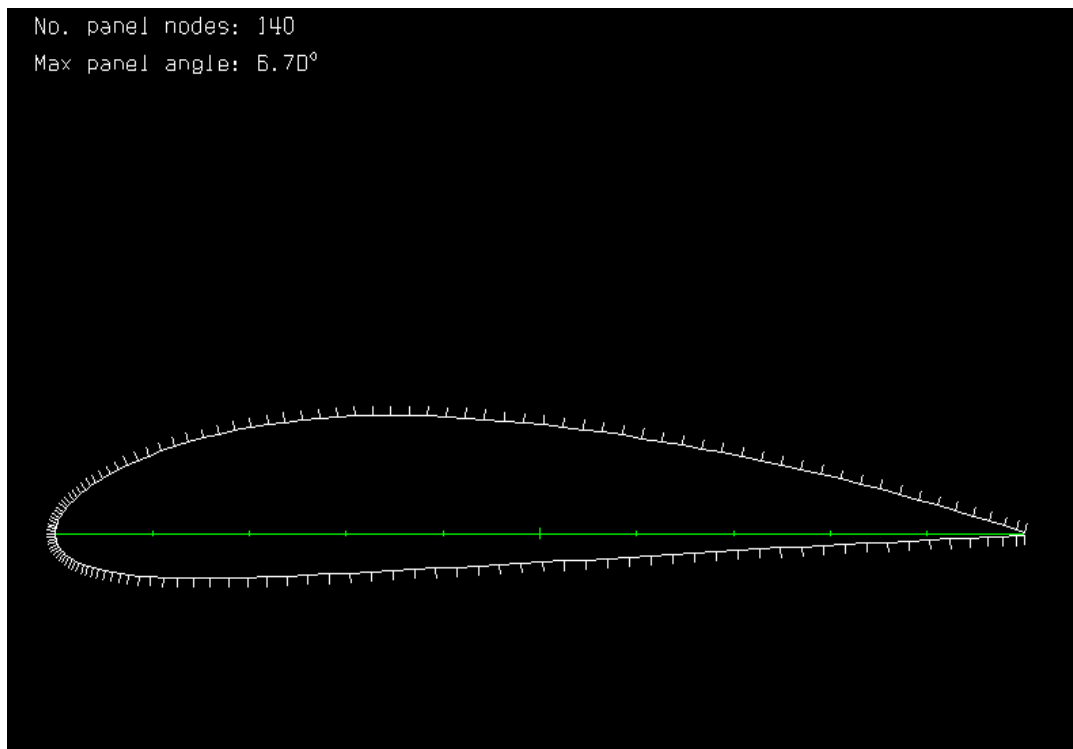
Ενώ για τη συστροφή οι καμπύλες είναι:



Διάγραμμα.22.: Καμπύλες συστροφής για διάφορες γωνίες βήματος - NACA2415

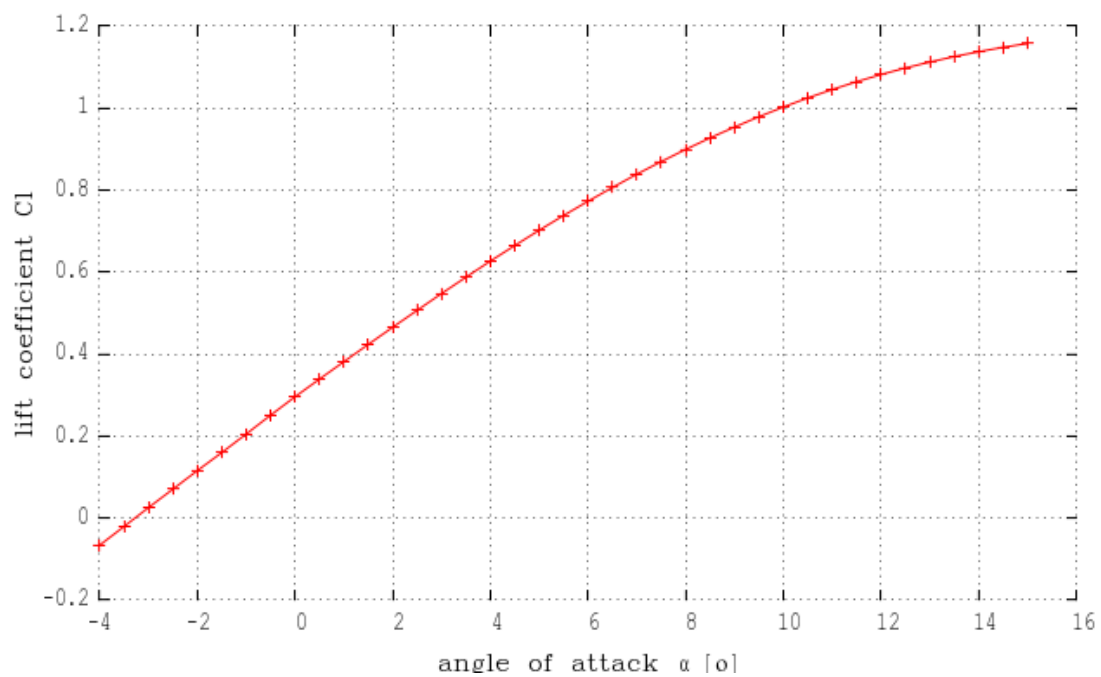
5.2.2 NACA4415

Στο σημείο αυτό θα αναλυθεί η αεροτομή NACA4415, που έχει το παρακάτω προφίλ:

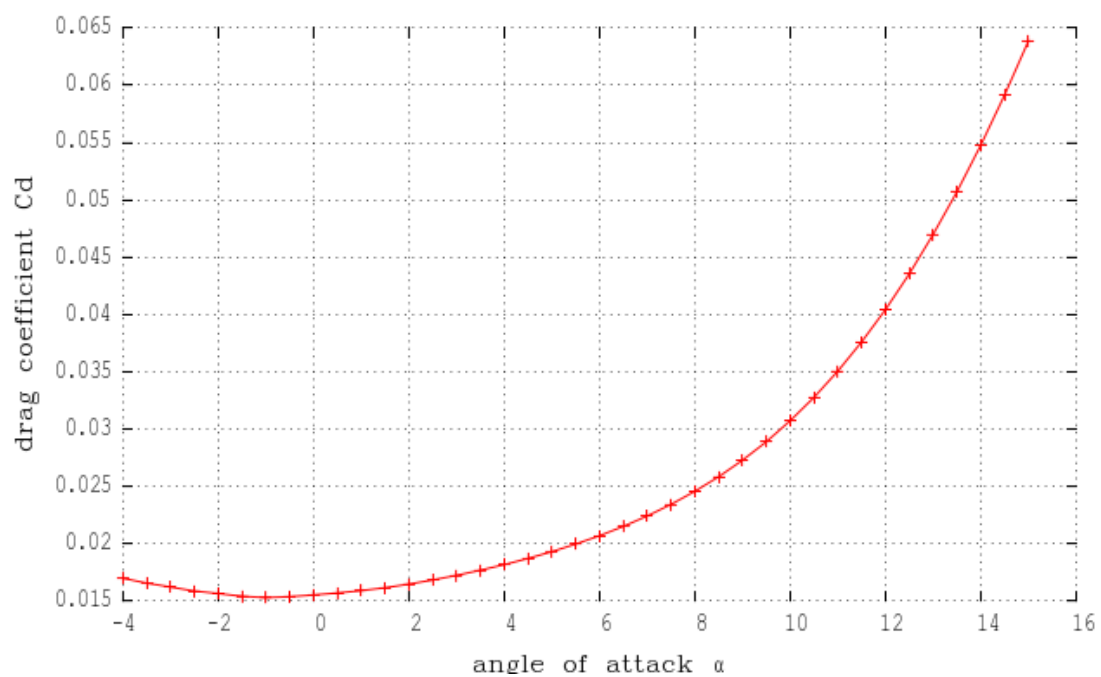


Εικόνα.34.: Προφίλ αεροτομής NACA4415

Από την αεροδυναμική ανάλυση της NACA4415 με το πρόγραμμα XFOIL, προέκυψαν οι τιμές των συντελεστών άνωσης και αντίστασης για γωνίες πρόσπτωσης στο διάστημα $[-4^\circ, 15^\circ]$. Στα επόμενα *διαγράμματα.23.* και *.24.*, φαίνονται οι καμπύλες των συντελεστών, όπως προέκυψαν για τιμές του αριθμού $Re=250.000$:

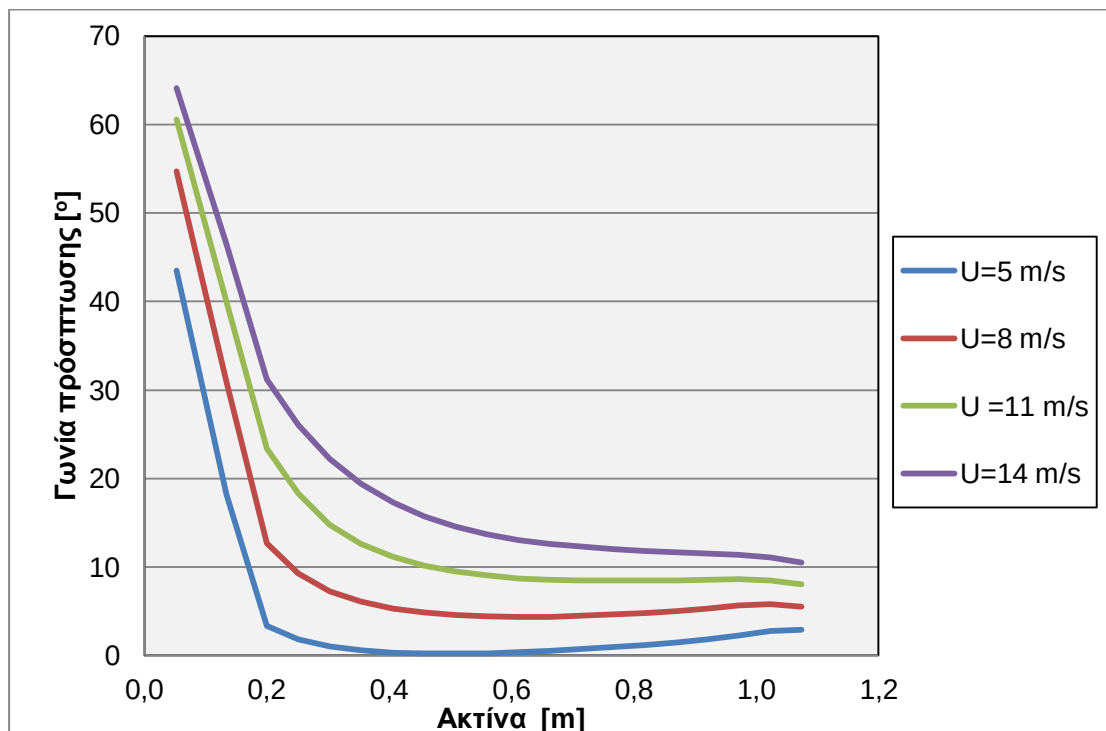


Διάγραμμα.23.: Συντελεστής άνωσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης - NACA4415



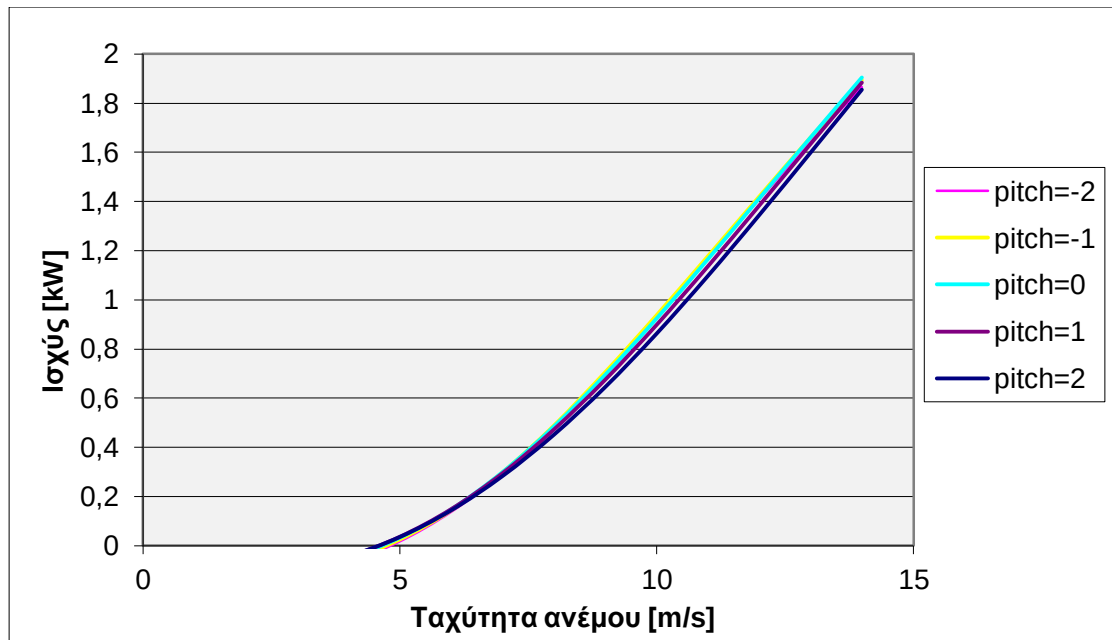
Διάγραμμα.24.: Συντελεστής αντίστασης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης - NACA4415

Καθώς η παρούσα Δ.Ε. αναφέρεται σε μικρές A/Γ , η συγκεκριμένη αεροτομή αξιολογήθηκε για μικρούς αριθμούς Reynolds και γωνίες πρόσπτωσης στο διάστημα $[-4^\circ, 15^\circ]$. Η επιλογή των 15° ως άνω ορίου έγινε γιατί πέραν αυτού δεν γνωρίζουμε αν τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα και επιπλέον είναι εκείνη η γωνία στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη τιμή του συντελεστή άνωσης. Τα αποτελέσματα του κώδικα RAFT για τη NACA4415 έδειξαν ότι η αεροτομή αυτή λειτουργεί σε αυτό το διάστημα γωνιών πρόσπτωσης, εάν εξαιρεθεί η ρίζα του πτερυγίου που αποτελεί μη-αεροδυναμικό τμήμα (κύλινδρος) και λαμβάνει υψηλές τιμές γωνιών. Συγκεκριμένα, οι τιμές των γωνιών για διάφορες ταχύτητες ανέμου φαίνονται στο ακόλουθο *διάγραμμα.25*.



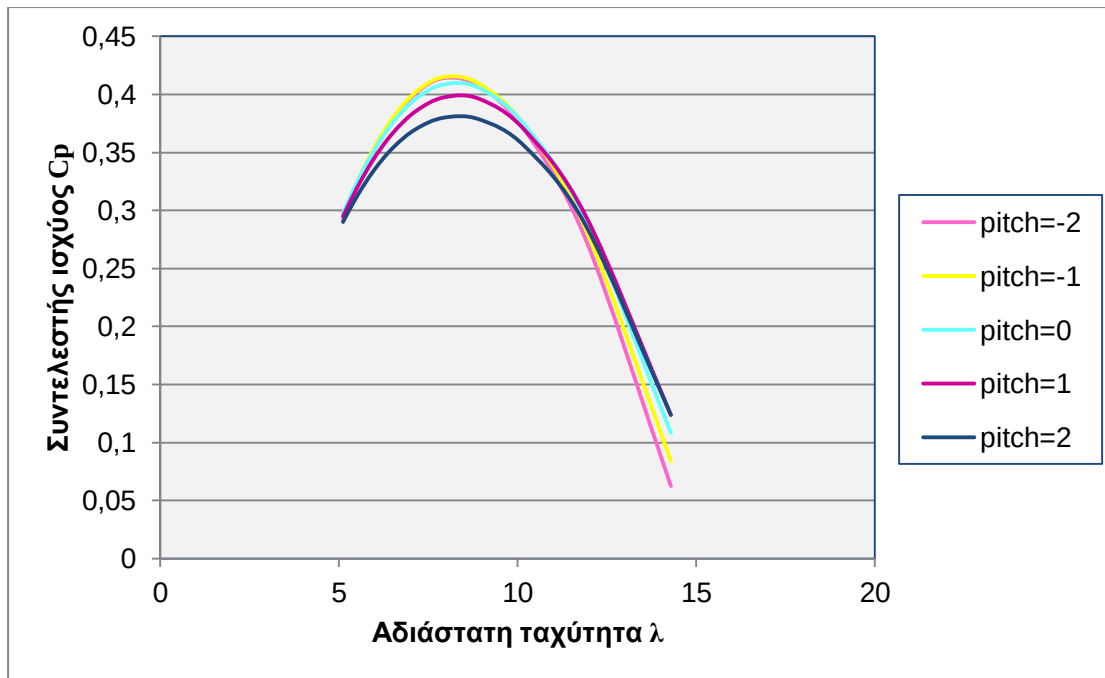
Διάγραμμα.25.: Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει της ακτίνας για διάφορες ταχύτητες ανέμου - NACA4415

Μετά από 1000 αξιολογήσεις, με το πακέτο αεροδυναμικής βελτιστοποίησης EASY (Κεφάλαιο 4), για κάθε μία από τις επιλεγμένες γωνίες βήματος, προέκυψαν οι καμπύλες ισχύος του πτερυγίου NACA4415, που αντιστοιχούν στη βέλτιστη λύση κάθε περίπτωσης, όπως φαίνεται στο ακόλουθο *διάγραμμα.26*.



Διάγραμμα.26.: Καμπύλες ισχύος για διάφορες γωνίες βήματος - NACA4415

Η ισχύς που συνεισφέρει καθοριστικά στην αύξηση της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας, είναι αυτή που παράγεται για ταχύτητες ανέμου από 7m/s έως και περίπου 12m/s. Από τις καμπύλες ισχύος του παραπάνω *διαγράμματος.26.*, όμως, δεν είναι εμφανείς οι διαφορές ανά γωνία βήματος, συνεπώς κρίθηκε αναγκαίο να παρουσιαστούν οι καμπύλες του συντελεστή ισχύος σαν συνάρτηση της αδιάστατης ταχύτητας λ . Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η μέγιστη τιμή του συντελεστή ισχύος εμφανίζεται για $\text{pitch}=-1^\circ$ και δεν ξεπερνά 0,42.



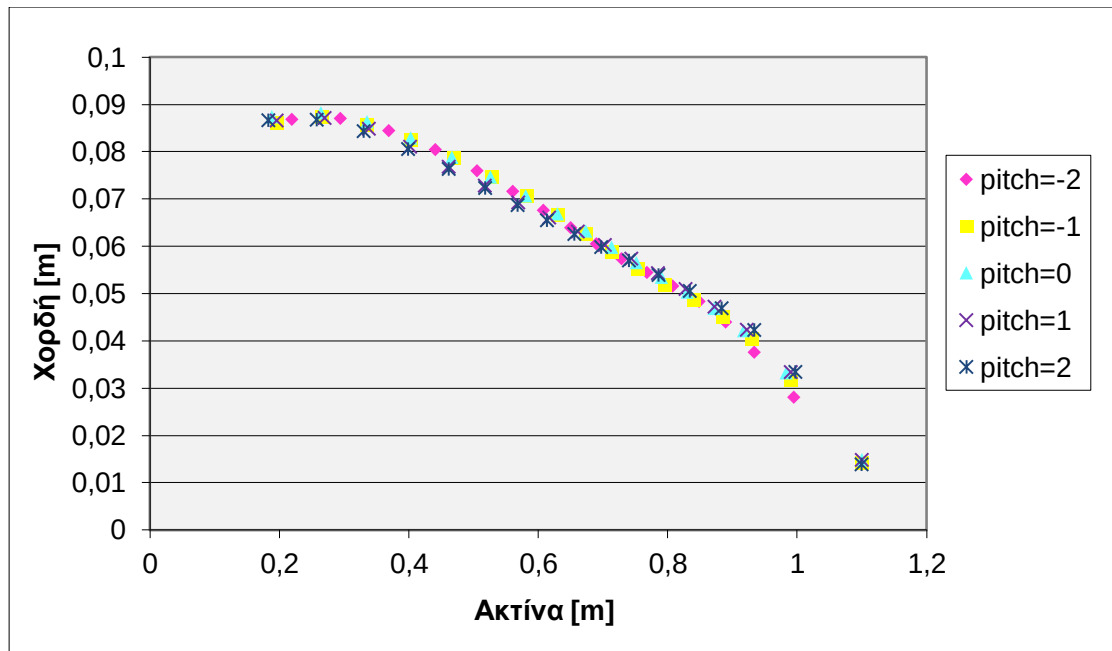
Διάγραμμα.27.: Καμπύλη συντελεστή ισχύος-αδιάστατης ταχύτητας - NACA4415

Στον παρακάτω *πίνακα.3.* αναγράφονται οι τιμές της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας, όπως προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση, για κάθε μία από τις εξεταζόμενες γωνίες βήματος:

pitch	E [kWh/y]
-2°	2.278,59
-1°	2.302,66
0°	2.301,41
1°	2.262,21
2°	2.180,83

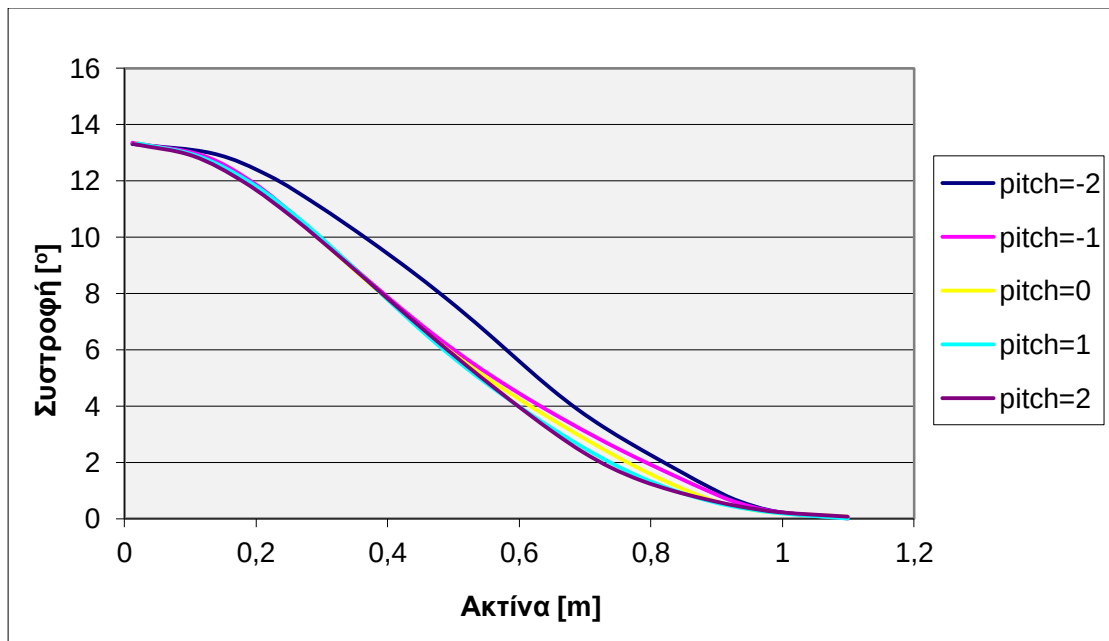
Πίνακας.3.: Τιμές ετήσιας παραγόμενης ενέργειας για κάθε γωνία βήματος- NACA4415

Όπως παρατηρείται και στα παρακάτω *διαγράμματα* χορδής και συστροφής, δεν παρουσιάζεται σημαντική στατιστική διαφορά σε κάθε περίπτωση. Οι καμπύλες για τη χορδή για τη συγκεκριμένη αεροτομή για κάθε περίπτωση είναι:



Διάγραμμα.28.: Καμπύλες χορδής για διάφορες γωνίες βήματος - NACA4415

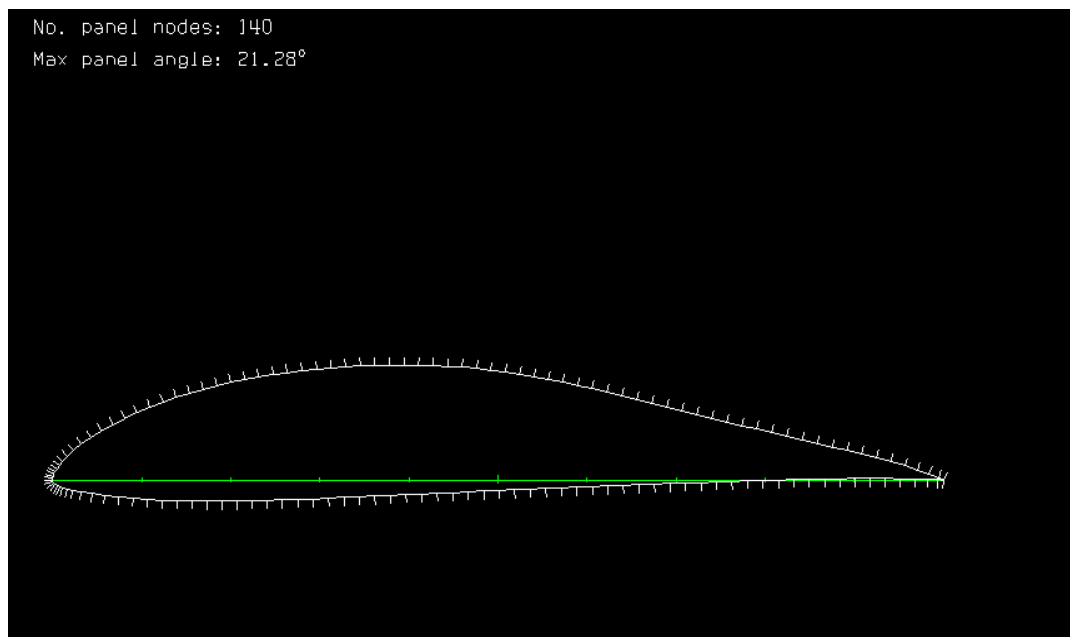
Ενώ για τη συστροφή οι καμπύλες είναι:



Διάγραμμα.29.: Καμπύλες συστροφής για διάφορες γωνίες βήματος - NACA4415

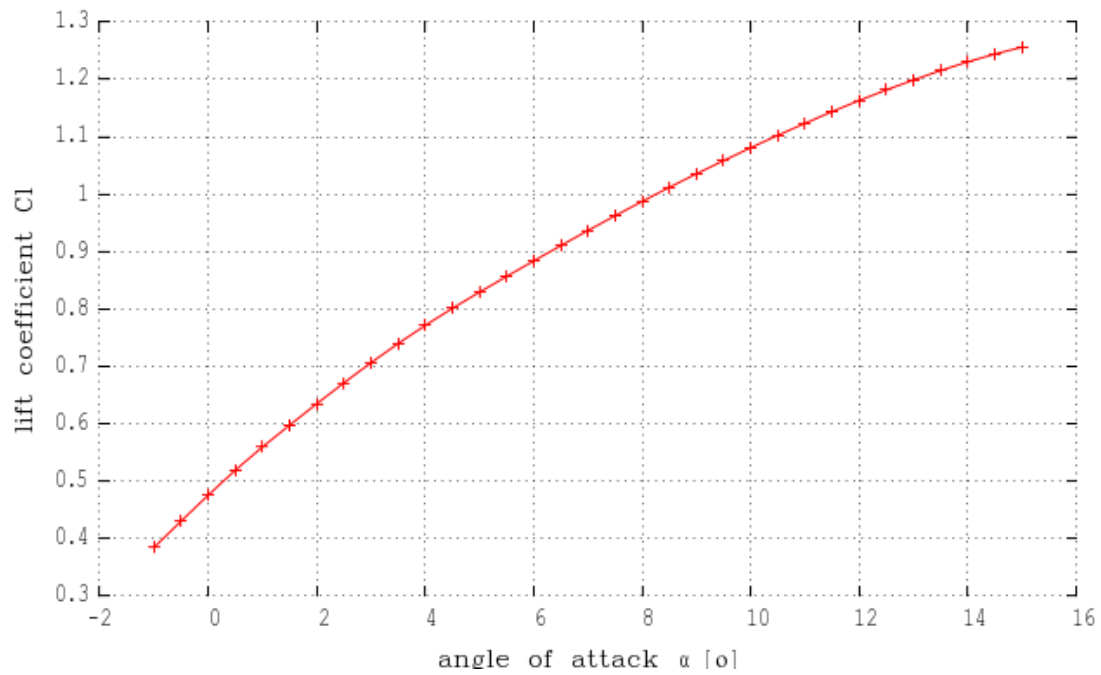
5.2.3 Ntua_15

Η αεροτομή Ntua_15, είναι σχεδιασμένη στο Εργαστήριο Αεροδυναμικής της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., και έχει το ακόλουθο προφίλ:

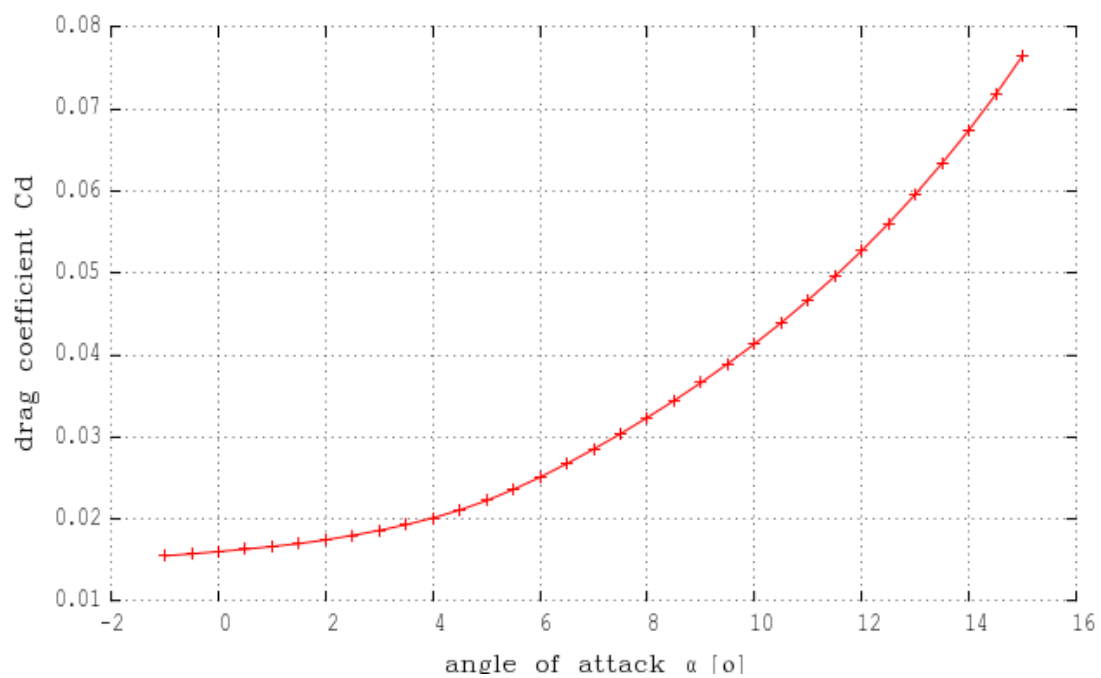


Εικόνα.35.: Προφίλ αεροτομής Ntua_15

Στα ακόλουθα *διαγράμματα.30.* και *.31.*, φαίνονται οι καμπύλες των συντελεστών άνωσης και αντίστασης της αεροτομής Ntua_15, σαν συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης, όπως προέκυψαν κατόπιν επεξεργασίας των αποτελεσμάτων του προγράμματος XFOIL (Κεφάλαιο 4).



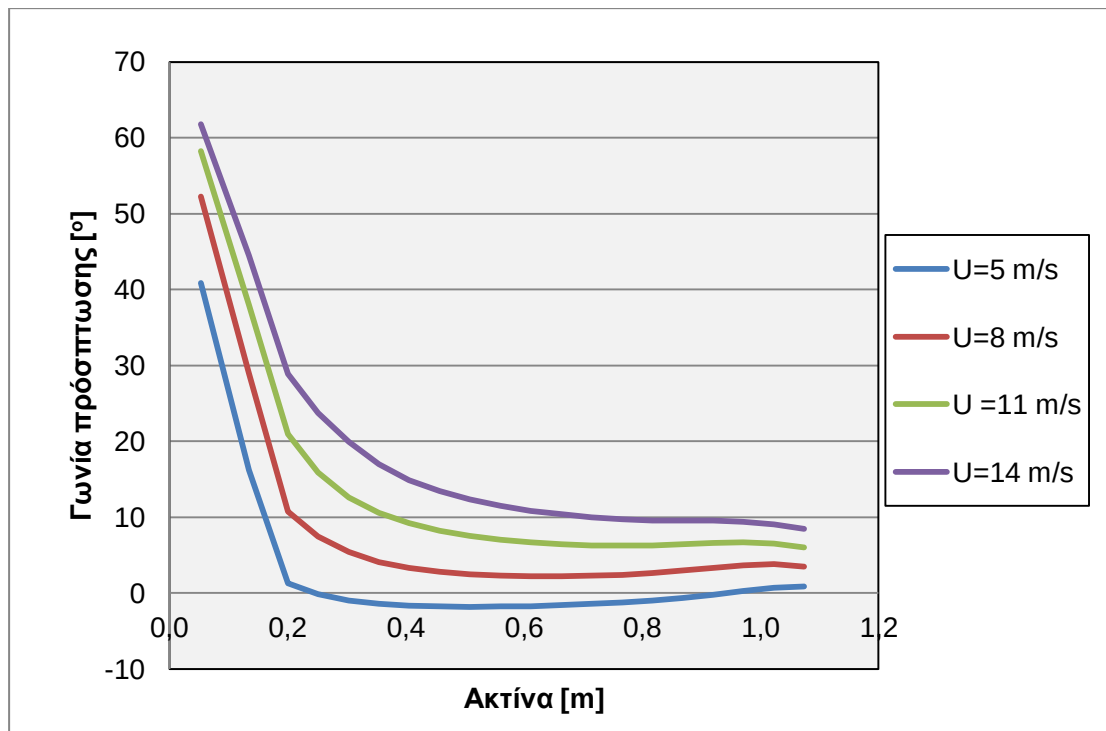
Διάγραμμα.30.: Συντελεστής άνωσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης - Ntua_15



Διάγραμμα.31.: Συντελεστής αντίστασης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης - Ntua_15

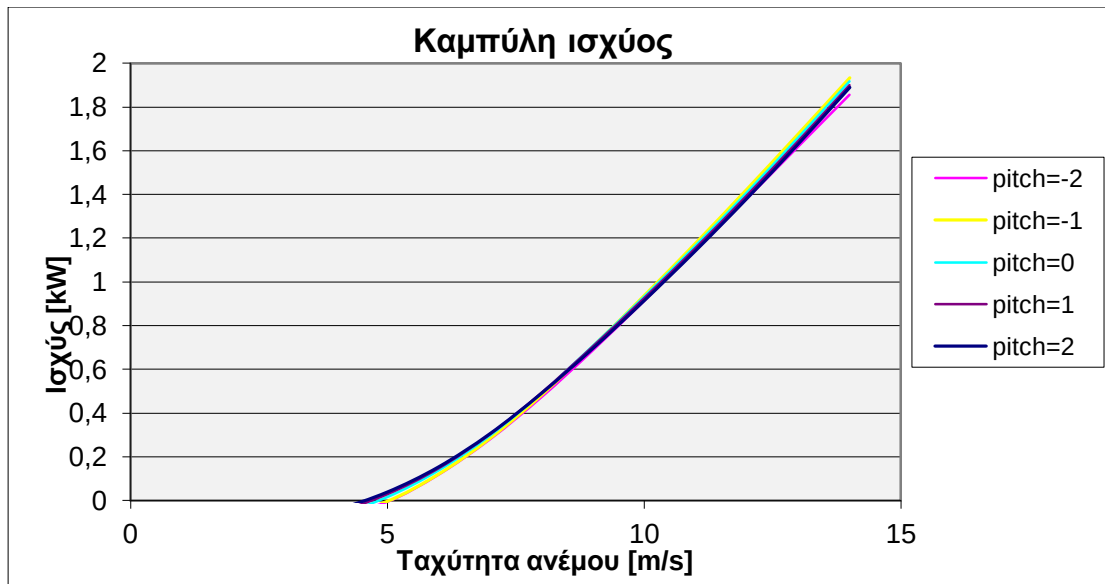
Η συγκεκριμένη αεροτομή αξιολογήθηκε για αριθμό $Re=250.000$ και γωνίες πρόσπτωσης στο διάστημα $[-1^\circ, 15^\circ]$. Μετά από τις 15° το πρόγραμμα δεν είναι με βεβαιότητα αξιόπιστο και εκτός αυτού σε αυτή τη γωνία εμφανίζεται και η μέγιστη τιμή του συντελεστή άνωσης C_{lmax} . Από το αρχείο εξόδου *strip.dat* του

κώδικα RAFT προέκυψε ότι η Ntua_15 λειτουργεί σε αυτό το διάστημα, εάν εξαιρεθεί η ρίζα του πτερυγίου που αποτελεί μη-αεροδυναμικό τμήμα (κύλινδρος) και λαμβάνει υψηλές τιμές γωνιών, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα.32.:



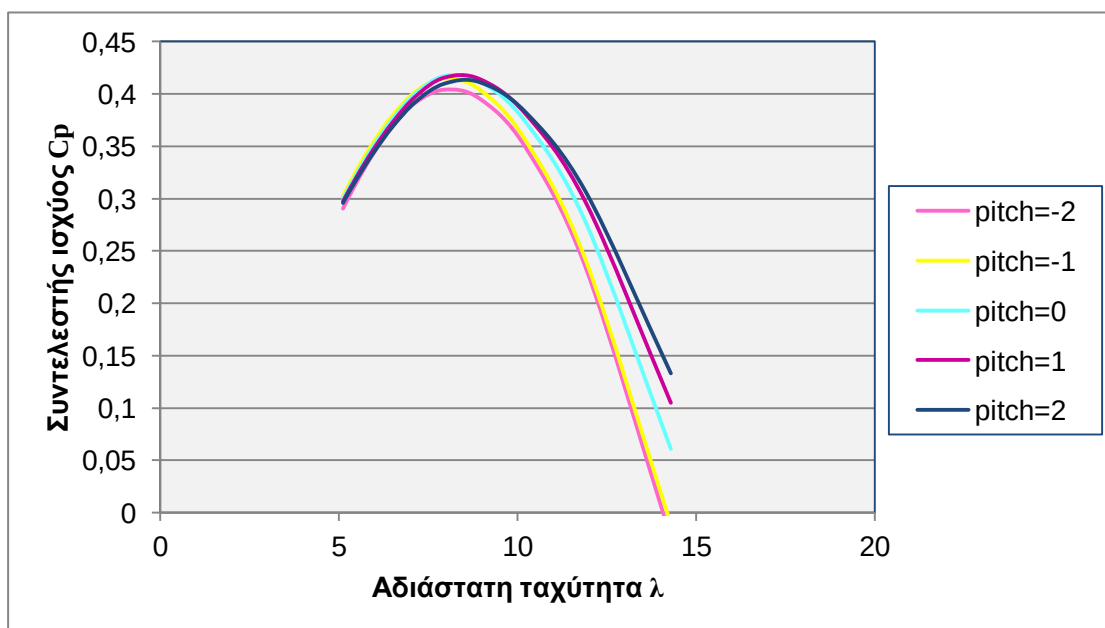
Διάγραμμα.32.: Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει της ακτίνας για διάφορες ταχύτητες ανέμου - Ntua_15

Κατόπιν 1000 αξιολογήσεων, μέσω του πακέτου αεροδυναμικής βελτιστοποίησης EASY (Κεφάλαιο 4), για κάθε μία από τις επιλεγμένες γωνίες βήματος, προέκυψαν οι καμπύλες ισχύος του πτερυγίου Ntua_15, που αντιστοιχούν στη βέλτιστη λύση κάθε περίπτωσης, όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα.33.:



Διάγραμμα.33.: Καμπύλες ισχύος για διάφορες γωνίες βήματος - Ntua_15

Η καλύτερη αξιοποίηση της ισχύος του ανέμου για εξαγωγή ενέργειας είναι αυτή που παράγεται για ταχύτητες ανέμου από 7 έως και περίπου 12 m/s. Καθώς οι καμπύλες ισχύος του παραπάνω *διαγράμματος.33.* φαίνεται σχεδόν να ταυτίζονται, στη συνέχεια παρουσιάζονται οι καμπύλες του συντελεστή ισχύος σαν συνάρτηση της αδιάστατης ταχύτητας λ . Η μέγιστη τιμή του συντελεστή ισχύος είναι περίπου 0,42 που είναι αναμενόμενη τιμή για μικρές Α/Γ.



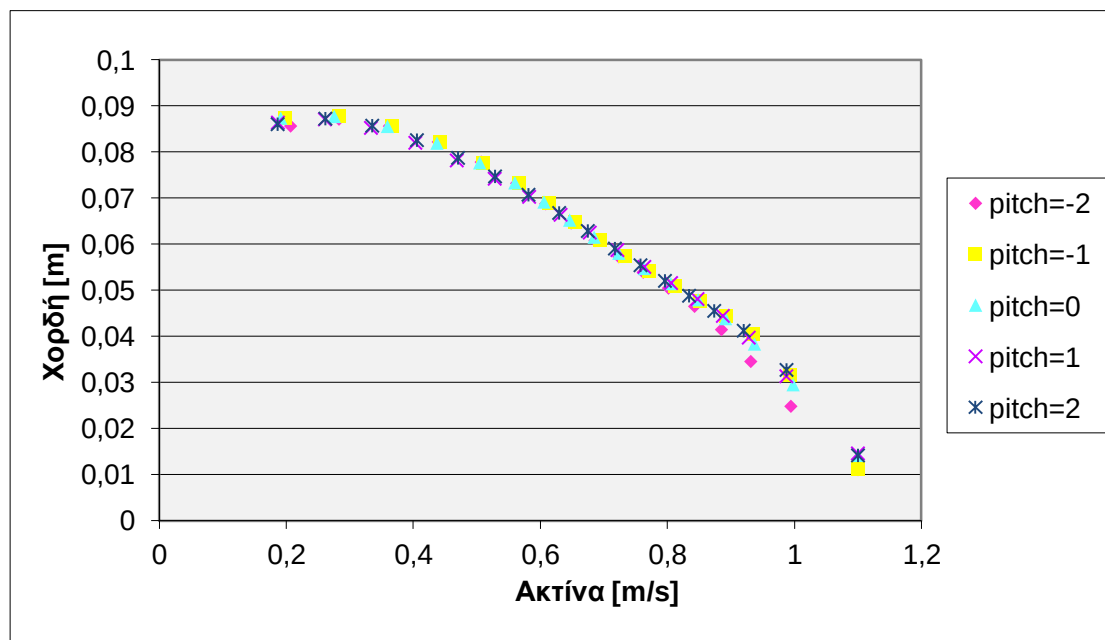
Διάγραμμα.34.: Καμπύλη συντελεστή ισχύος-αδιάστατης ταχύτητας - Ntua_15

Στον παρακάτω *πίνακα.4.* αναγράφονται οι τιμές της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας, όπως προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση, για κάθε μία από τις εξεταζόμενες γωνίες βήματος:

pitch	E [kWh/y]
-2°	2.187,22
-1°	2.246,19
0°	2.289,65
1°	2.315,8
2°	2.315,47

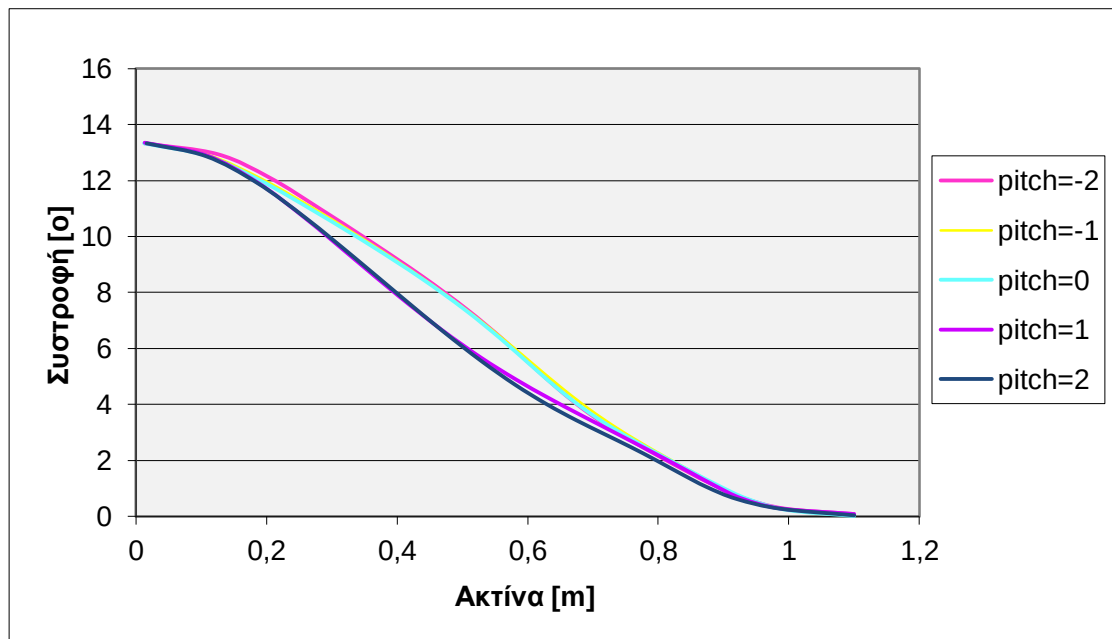
Πίνακας.4: Τιμές ετήσιας παραγόμενης ενέργειας για κάθε γωνία βήματος - Ntua_15

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα χορδής και συστροφής, τα οποία δε σημείωσαν ιδιαίτερες διαφορές για τις εξεταζόμενες γωνίες βήματος. Για τη χορδή οι καμπύλες έχουν την ακόλουθη μορφή:



Διάγραμμα.35.: Καμπύλες χορδής για διάφορες γωνίες βήματος - Ntua_15

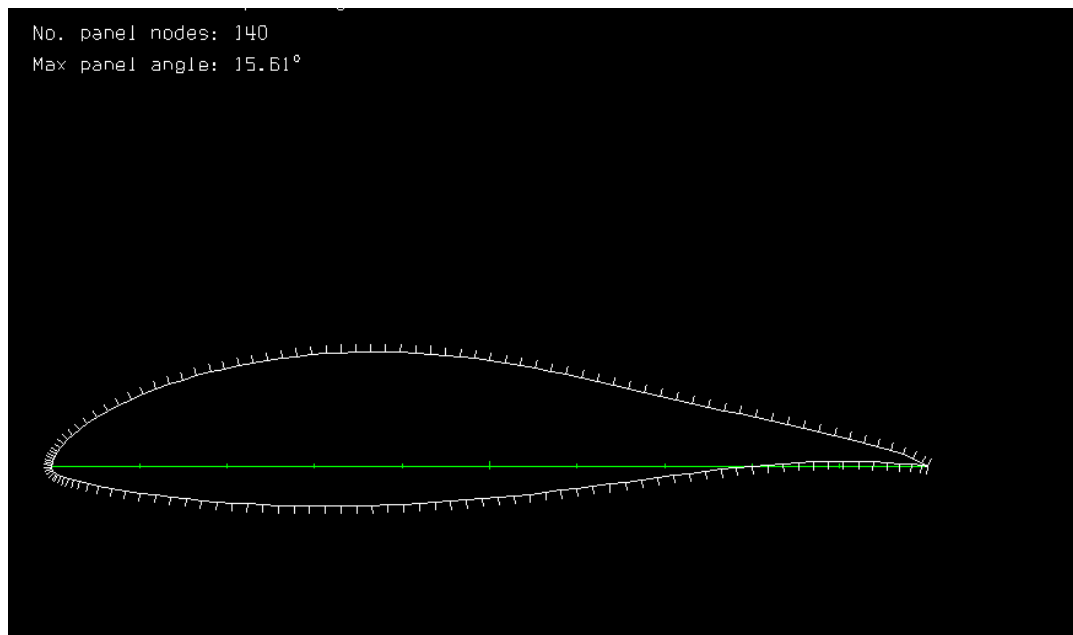
Ενώ για τη συστροφή οι καμπύλες έχουν τη μορφή που φαίνεται στο *διάγραμμα.36.:*



Διάγραμμα.36.: Καμπύλες συστροφής για διάφορες γωνίες βήματος - Ntua_15

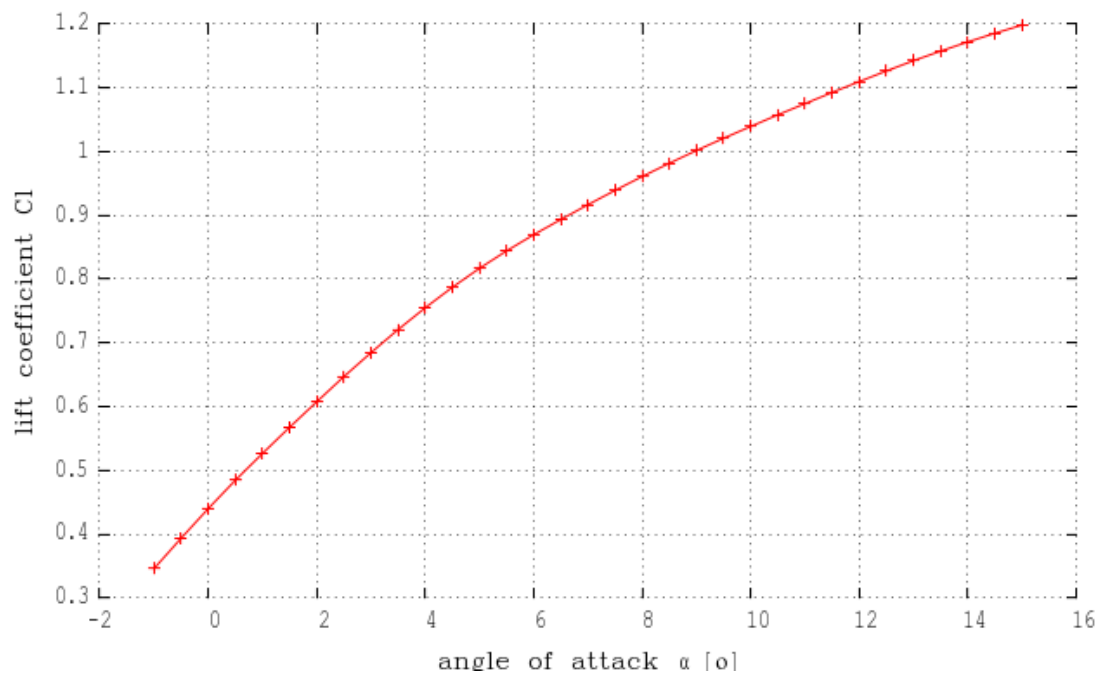
5.2.4 Ntua_18

Η συγκεκριμένη αεροτομή, σχεδιάστηκε επίσης στο Εργαστήριο Αεροδυναμικής της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., είναι η τελευταία που εξετάστηκε στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. και έχει το ακόλουθο προφίλ:

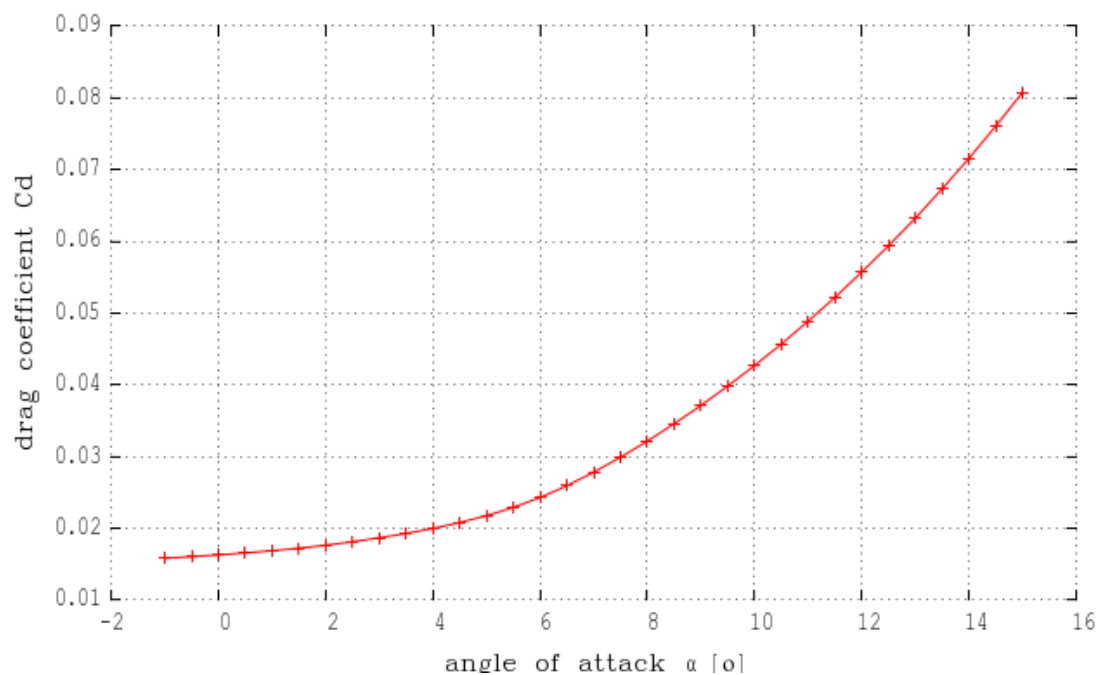


Εικόνα.36.: Προφίλ αεροτομής Ntua_18

Τα αποτελέσματα του προγράμματος XFOIL για τους συντελεστές άνωσης και αντίστασης της αεροτομής αυτής φαίνονται στα επόμενα *διαγράμματα.37.* και *.38.:*



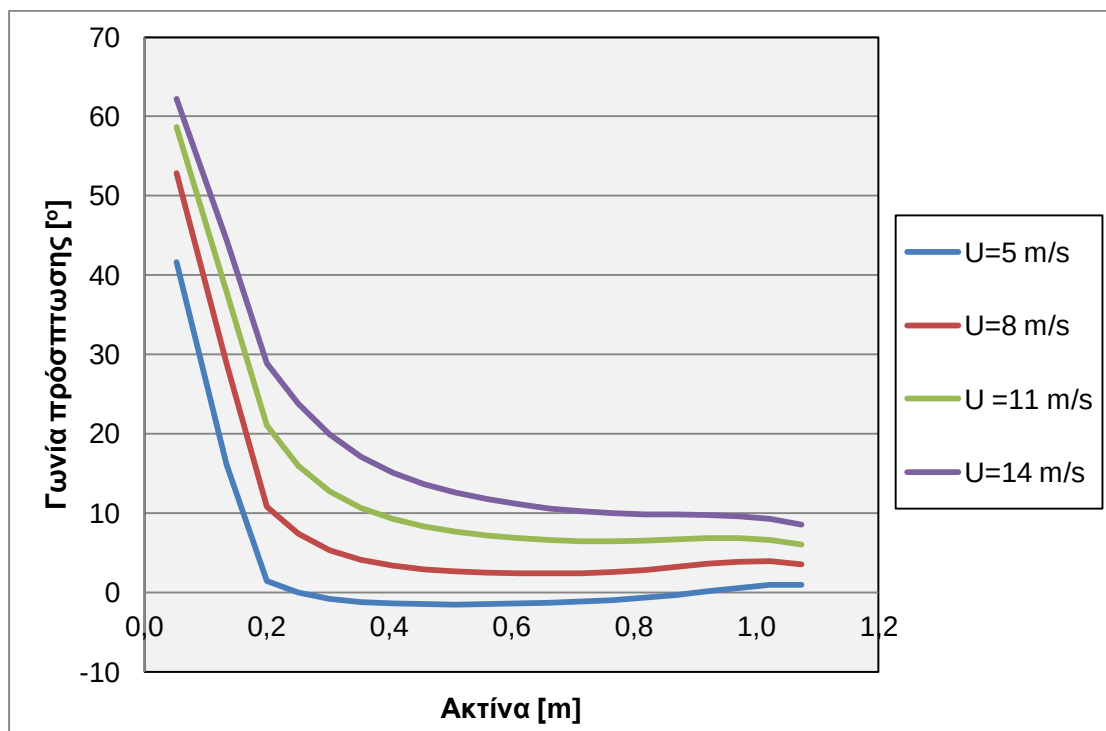
Διάγραμμα.37.: Συντελεστής άνωσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης - Ntua_18



Διάγραμμα.38.: Συντελεστής αντίστασης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης - Ntua_18

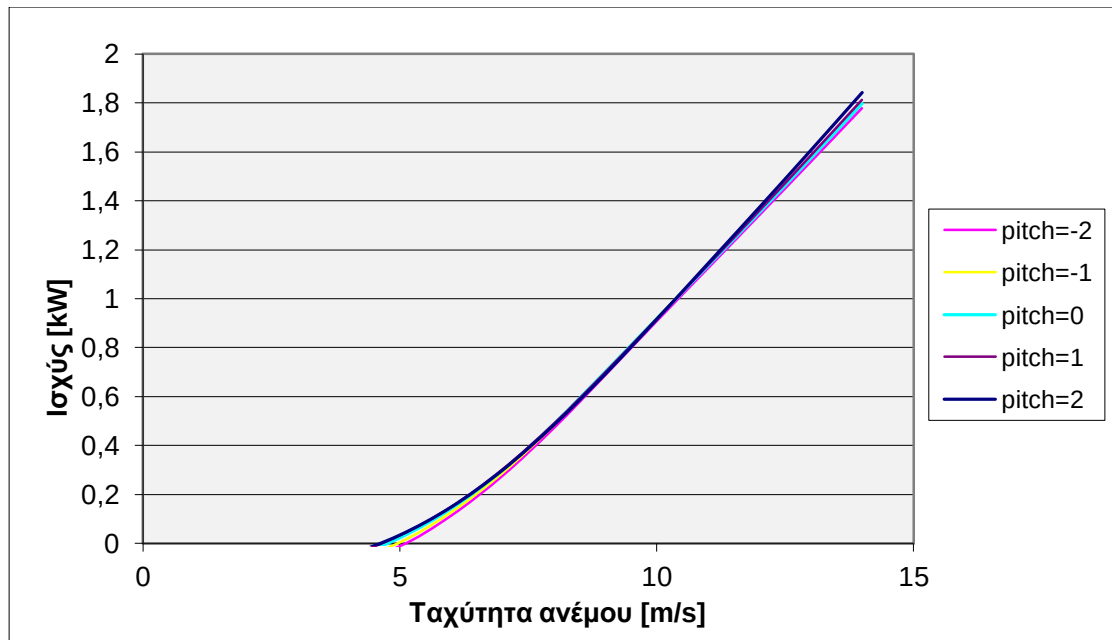
Η Ntua_18, αξιολογήθηκε για αριθμό $Re=250.000$ και γωνίες πρόσπτωσης στο διάστημα $[-1^\circ, 15^\circ]$. Στις 15° εμφανίζεται ο μέγιστος συντελεστής άνωσης και για μεγαλύτερες τιμές του, δεν ήταν βέβαια η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων,

γι' αυτό και επιλέχθηκε σαν άνω όριο. Προκειμένου να ελεγχθεί ότι η εν λόγω αεροτομή λειτουργεί σε αυτό το διάστημα γωνιών πρόσπτωσης, απεικονίστηκαν στο *διάγραμμα.39*. τα δεδομένα του αρχείου εξόδου *strip.dat* του κώδικα RAFT που αφορούν στη γωνία πρόσπτωσης. Όπως προέκυψε, πράγματι η Ntua_18 λειτουργεί σε αυτό το διάστημα, εάν εξαιρεθεί η ρίζα του πτερυγίου που αποτελεί μη-αεροδυναμικό τμήμα (κύλινδρος) και λαμβάνει υψηλές τιμές γωνιών.



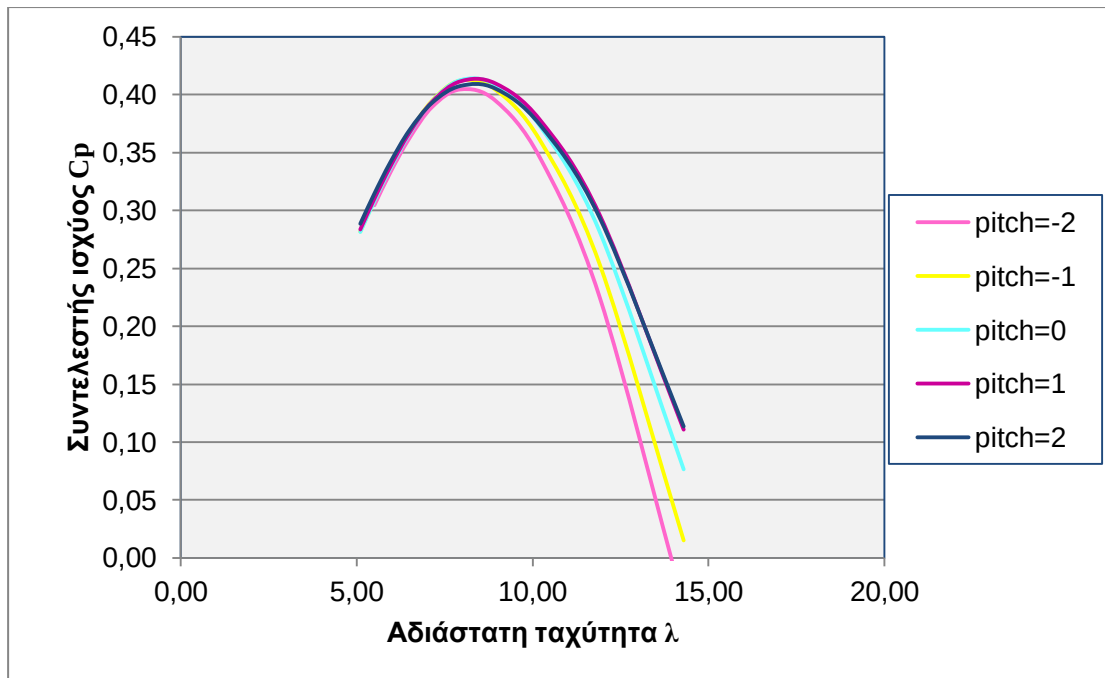
Διάγραμμα.39: Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει της ακτίνας για διάφορες ταχύτητες ανέμου - Ntua_18

Στο πακέτο αεροδυναμικής βελτιστοποίησης EASY (Κεφάλαιο 4) έγιναν 1000 αξιολογήσεις για κάθε μία από τις επιλεγμένες γωνίες βήματος. Από τις αξιολογήσεις αυτές, τελικά προέκυψαν οι καμπύλες ισχύος του πτερυγίου Ntua_18, που αντιστοιχούν στη βέλτιστη λύση κάθε περίπτωσης, όπως φαίνεται στο ακόλουθο *διάγραμμα.40*.



Διάγραμμα.40.: Καμπύλες ισχύος για διάφορες γωνίες βήματος - Ntua_18

Η μεγαλύτερη συνεισφορά της ισχύος για την αύξηση της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας, παρατηρείται συνήθως για ταχύτητες ανέμου από 7m/s έως και περίπου 12m/s. Καθώς όμως οι διαφορές τους δεν είναι ιδιαίτερα εμφανείς στο *διάγραμμα.40.*, παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες του συντελεστή ισχύος σαν συνάρτηση της αδιάστατης ταχύτητας λ . Η μέγιστη τιμή του συντελεστή ισχύος είναι περίπου 0,42 που είναι αναμενόμενη τιμή για μικρές A/Γ .



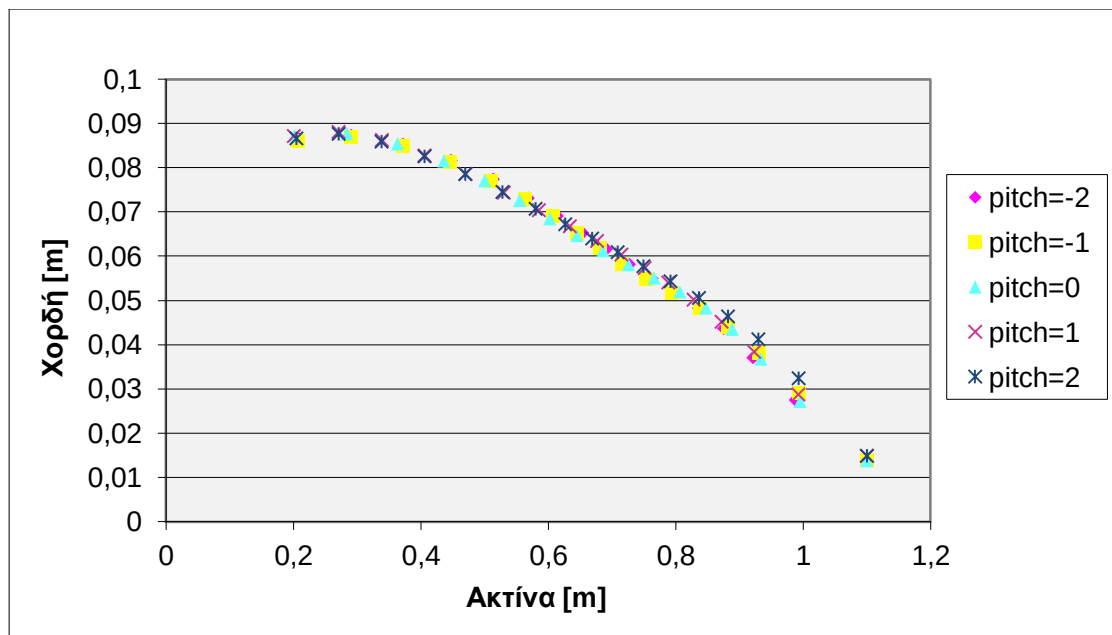
Διάγραμμα.41.: Καμπύλη συντελεστή ισχύος-αδιάστατης ταχύτητας - Ntua_18

Στον παρακάτω πίνακα.5. αναγράφονται οι τιμές της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας, όπως προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση, για κάθε μία από τις εξεταζόμενες γωνίες βήματος:

pitch	E [kWh/y]
-2°	2.142,32
-1°	2.207,52
0°	2.252,61
1°	2.284,51
2°	2.280,93

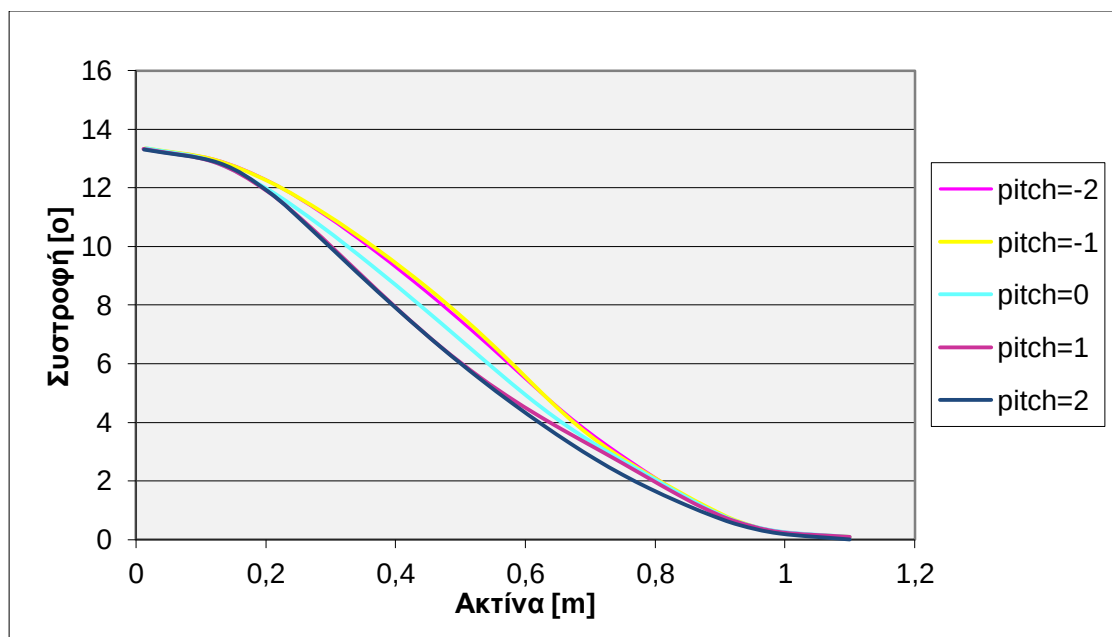
Πίνακας.5.: Τιμές ετήσιας παραγόμενης ενέργειας για κάθε γωνία βήματος- Ntua_18

Τα διαγράμματα χορδής και συστροφής, δεν παρουσίασαν σημαντική στατιστική διαφορά σε κάθε περίπτωση. Οι καμπύλες για τη χορδή για τη συγκεκριμένη αεροτομή για κάθε περίπτωση είναι:



Διάγραμμα.42.: Καμπύλες χορδής για διάφορες γωνίες βήματος - Ntua_18

Ενώ για τη συστροφή οι καμπύλες είναι:

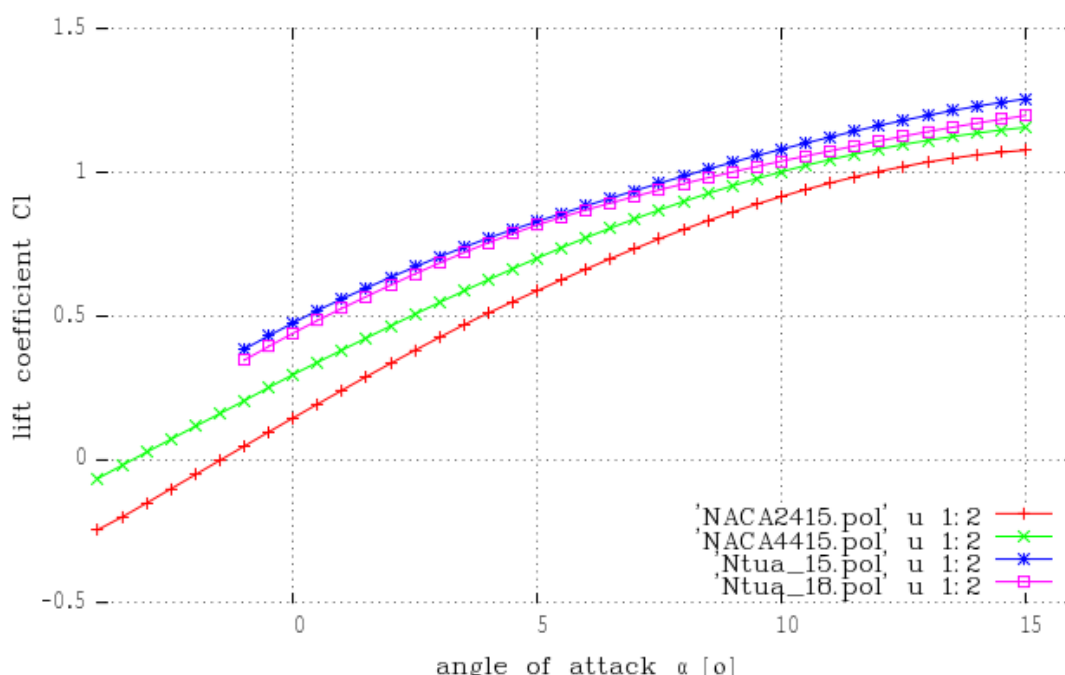


Διάγραμμα.43.: Καμπύλες συστροφής για διάφορες γωνίες βήματος - Ntua_18

5.3 Σύγκριση των εξεταζόμενων αεροτομών

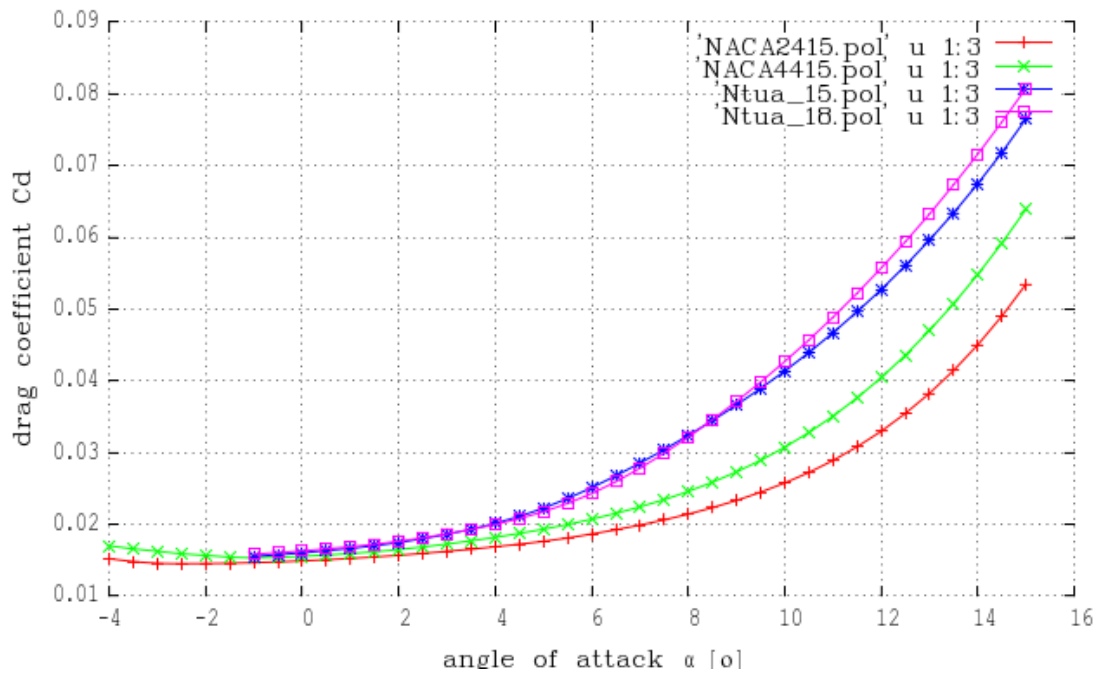
Από τα παραπάνω αποτελέσματα θα τεθούν προς σύγκριση τα βέλτιστα της κάθε αεροτομής, έτσι ώστε να επιλεγεί η καταλληλότερη, με την έννοια πάντα της μέγιστης ετήσιας παραγόμενης ενέργειας από μικρή ΑΓ.

Ξεκινώντας, θα γίνει η σύγκριση των καμπυλών συντελεστή άνωσης. Όπως είναι εμφανές από το *διάγραμμα.44.*, τις καλύτερες τιμές σε όλο το εξεταζόμενο εύρος γωνιών έχει η αεροτομή Ntua_15 του Ε.Μ.Π. Η βέλτιστη τιμή του συντελεστή άνωσης είναι περίπου $C_{lmax}=1,25$.



Διάγραμμα.44.: Καμπύλες συντελεστή άνωσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης διαφόρων αεροτομών

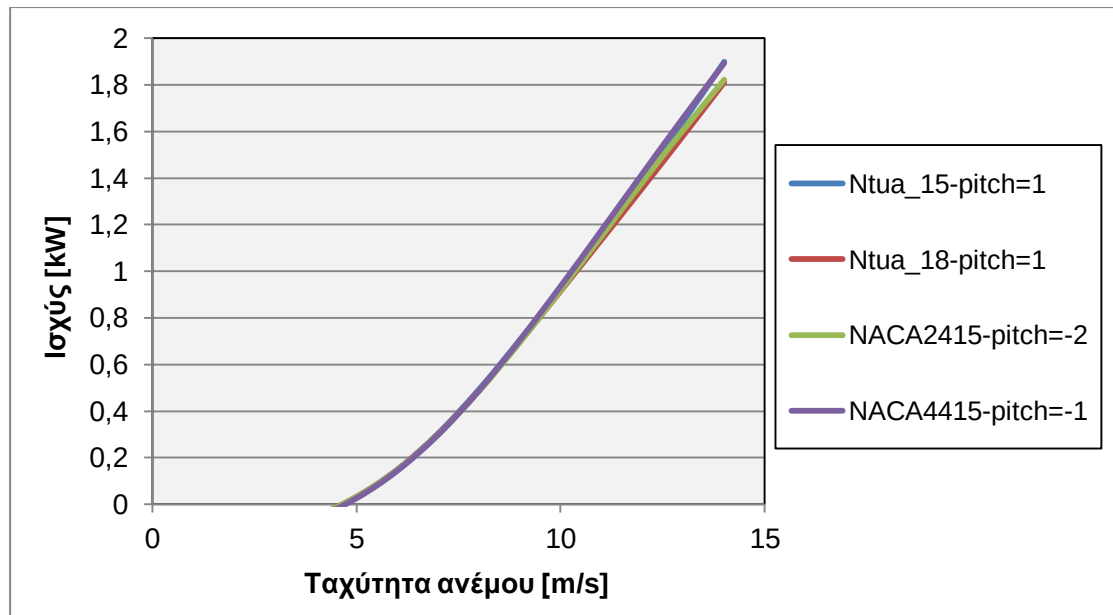
Όσον αφορά στο συντελεστή αντίστασης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης, *διάγραμμα.45.*, παρατηρείται ότι οι αεροτομές NACA έχουν καλύτερη συμπεριφορά μιας και κρατούν σε χαμηλότερα επίπεδα τις τιμές του συντελεστή τους.



Διάγραμμα.45.: Καμπύλες συντελεστή αντίστασης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης διαφόρων αεροτομών

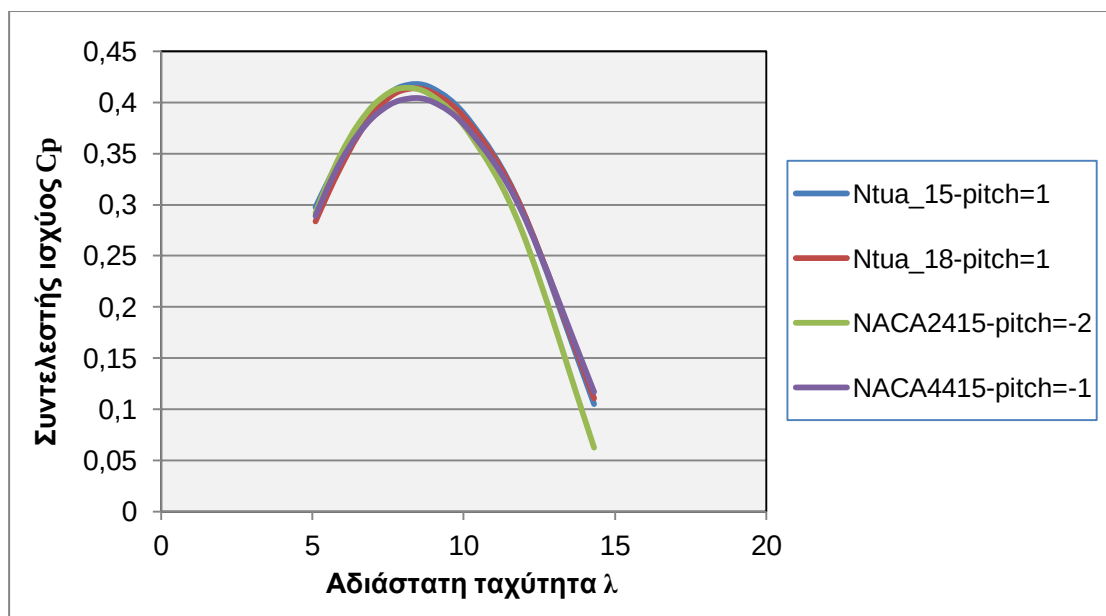
Πρέπει να σημειωθεί ότι τα παραπάνω *διαγράμματα.44.* και *.45.* των συντελεστών άνωσης και αντίστασης θα χαρακτηρίζονταν συντηρητικά με την έννοια ότι χρησιμοποιήθηκε boundary layer tripping κατά την ανάλυση των αεροτομών. Το tripping μειώνει τις τιμές του συντελεστή άνωσης ενώ αυξάνει τις τιμές του συντελεστή αντίστασης, έτσι ώστε να είναι τα αποτελέσματα πιο αξιόπιστα, παράλληλα, όμως, και συντηρητικά.

Στο ακόλουθο *διάγραμμα.46.* παρουσιάζονται οι τέσσερις καμπύλες ισχύος των τεσσάρων εξεταζόμενων αεροτομών για εκείνη τη γωνία βήματος (pitch) που σημείωσαν τη βέλτιστη ετήσια παραγόμενη ενέργεια:



Διάγραμμα.46.: Βέλτιστη καμπύλη ισχύος ανά εξεταζόμενη αεροτομή

Όπως είναι εμφανές από το παραπάνω *διάγραμμα.46.*, οι καμπύλες ισχύος σχεδόν ταυτίζονται. Στο ακόλουθο *διάγραμμα.47.* παρουσιάζεται ο συντελεστής ισχύος συνάρτησι της αδιάστατης ταχύτητας λ με σκοπό να δοθεί μία λίγο πιο σαφή εικόνα στη σύγκριση των αεροτομών, που παρόλα αυτά εξακολουθούν να εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά:



Διάγραμμα.47.: Βέλτιστες καμπύλες συντελεστών ισχύος ανά αεροτομή

Από τα αναλυτικά αποτελέσματα για κάθε αεροτομή, τον μέγιστο συντελεστή ισχύος παρουσιάζει η αεροτομή Ntua_15 με $C_{pmax}=0,42$ για αδιάστατη ταχύτητα $\lambda=8$.

Τελικά, όπως φαίνεται και στον ακόλουθο *πίνακα.6.*, η αεροτομή **Ntua_15**, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες εξεταζόμενες αεροτομές, εμφανίζει τη **βέλτιστη ετήσια παραγωγή ενέργειας**, φτάνοντας τις **2.315,8 kWh/y**.

Αεροτομή	E [kWh/y]
Ntua_15	2315,8
NACA4415	2302,66
NACA2415	2288,88
Ntua_18	2284,51

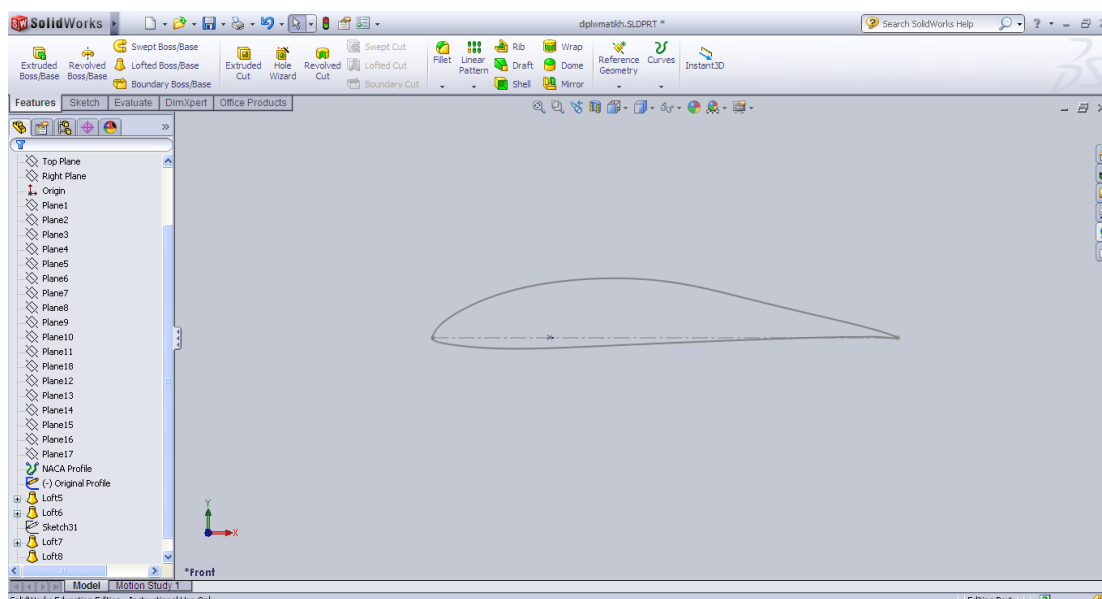
Πίνακας.6. Βέλτιστη ετήσια παραγόμενη ενέργεια ανά εξεταζόμενη αεροτομή

Υπενθυμίζεται, πως όλα τα παραπάνω διαγράμματα προέκυψαν για παραμέτρους της κατανομής Weibull (παράγραφος 2.2) $k=1,7$ και $c=7$. Αυτές οι τιμές, για την Ελλάδα αντιπροσωπεύουν κυρίως τις ανεμολογικές συνθήκες που επικρατούν στο Αιγαίο πέλαγος, με το σκεπτικό ότι οι μικρές Α/Γ απευθύνονται και σε μη διασυνδεδεμένες περιοχές. Έγιναν ενδεικτικά και ορισμένα επιπλέον τρεξίματα για άλλο ένα ζεύγος τιμών, που αντιπροσωπεύουν περιοχές με χαμηλότερες τιμές ταχυτήτων ανέμου κατά τη διάρκεια του έτους, όπως το χερσαίο τμήμα της Ελλάδας, με τιμές παραμέτρων Weibull $k=1$ και $c=3$. Τα αποτελέσματα των αξιολογήσεων αυτών έδωσαν ιδιαίτερα χαμηλές τιμές στην ετήσια παραγόμενη ενέργεια, που σημείωσε πτώση 70% συγκριτικά με το αρχικό ζεύγος τιμών παραμέτρων, δίνοντας τιμές ετήσιας παραγόμενης ενέργειας της τάξης των 600kWh/y. Πιθανότατα, για το χερσαίο τμήμα της Ελλάδας η επένδυση μίας μικρής Α/Γ δεν είναι ακόμη ιδιαίτερα συμφέρουσα. Στο μέλλον, που η τεχνολογία θα έχει εξελιχθεί περαιτέρω στον τομέα των μικρών Α/Γ, η τιμή τους θα σημειώσει μείωση, επομένως, θα είναι μία πιο συμφέρουσα επιλογή.

Κεφάλαιο 6^ο

6.1 Περιγραφή διαδικασίας σχεδίασης

Από τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, επιλέχθηκε να σχεδιαστεί η A/Γ με πτερύγια από την πειραματική αεροτομή Ntua_15, του Εργαστηρίου Αεροδυναμικής της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Η συγκεκριμένη αεροτομή έχει την ακόλουθη μορφή:



Εικόνα.37.: Προφίλ αεροτομής Ntua_15 σχεδιασμένο σε SolidWorks2011

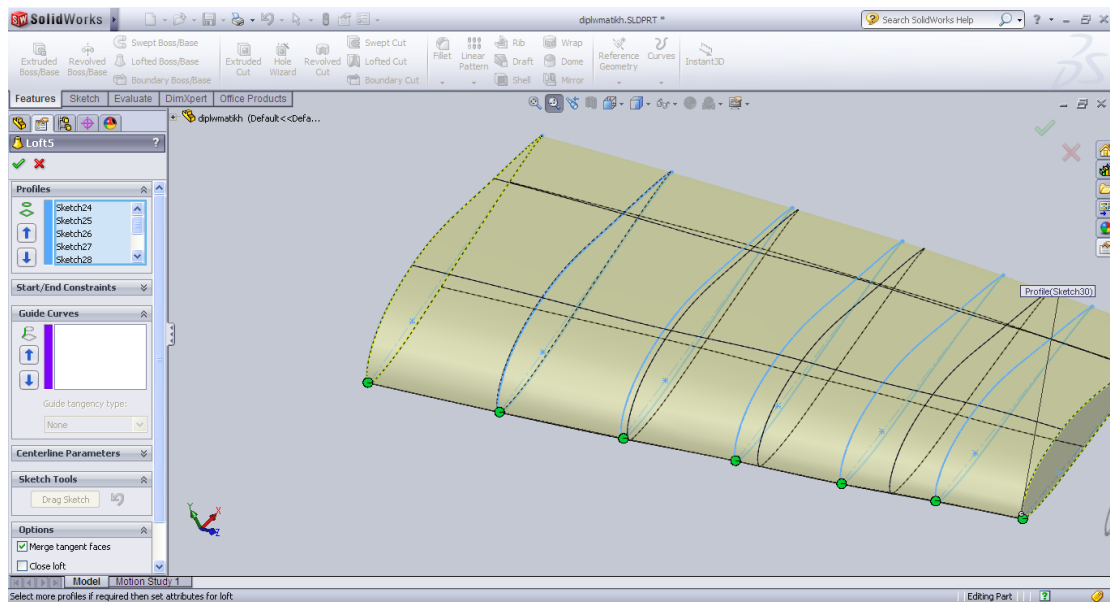
Από τη διαδικασία βελτιστοποίησης έχει προκύψει η βέλτιστη γεωμετρία του πτερυγίου, που βρίσκεται στο αρχείο *geom.b.inp*, όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο 5^ο Κεφάλαιο. Τα δεδομένα για τη χορδή και τη συστολή αντιστοιχούν σε ορισμένες τιμές της ακτίνας r του πτερυγίου.

r	chord	twist
3,746330000000000E-002	7,696290000000000E-002	13,2063539000000
9,352590000000000E-002	7,654400000000000E-002	13,2405278000000
0,147079500000000	7,573030000000000E-002	13,0265851000000
0,197951600000000	7,452150000000000E-002	12,5102040000000
0,245956700000000	7,291789999999999E-002	11,7456158000000
0,290894100000000	7,091920000000000E-002	10,8684289000000
0,332540100000000	6,852569999999999E-002	9,9915287000000
0,370645400000000	6,573720000000000E-002	9,1618611000000
0,404968800000000	6,255370000000000E-002	8,3611977000000
0,435986200000000	5,897530000000000E-002	7,5414801000000
0,465988000000000	5,500200000000000E-002	6,6795069000000
0,499251400000000	5,063370000000000E-002	5,7855691000000
0,541563300000000	4,587040000000000E-002	4,8975292000000
0,597196900000000	4,071220000000000E-002	4,0433020000000
0,666958300000000	3,515910000000000E-002	3,2166055000000
0,748182900000000	2,921100000000000E-002	2,3767406000000
0,838920800000000	2,286800000000000E-002	1,4920938000000
0,948016800000000	1,613000000000000E-002	0,6449301000000
1,097741900000000	8,997099999999999E-003	5,874880000000000E-002

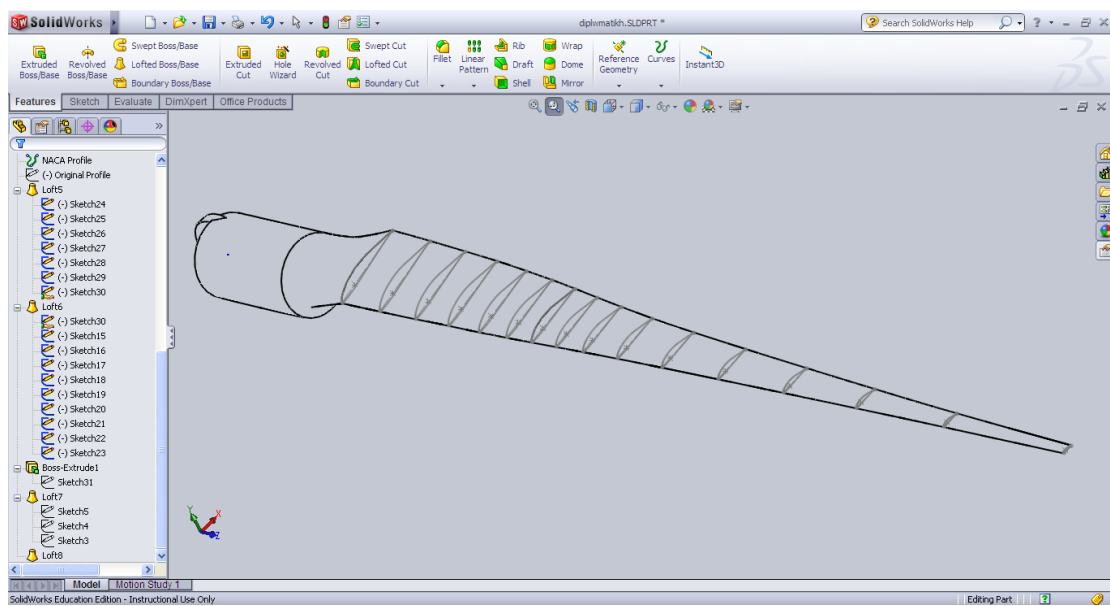
Πίνακας.7.: Τμήμα του αρχείου *geom.b.inp* απαραίτητο για το σχεδιασμό σε SolidWorks2011

Για να ξεκινήσει η κατασκευή του πτερυγίου, έγινε εισαγωγή παράλληλων επιπέδων κατά μήκος της ακτίνας r, στις θέσεις που αναγράφονται στο αρχείο *geom.b.inp*. Σε κάθε τέτοιο επίπεδο προβάλλεται το προφίλ του πτερυγίου, όπως περιγράφεται στο αρχείο *profil.b.inp* (5^ο Κεφάλαιο).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάστηκαν 19 παράλληλα επίπεδα, όπου στα τρία πρώτα το προφίλ είναι κύλινδρος, ενώ στα υπόλοιπα, το προφίλ είναι της αεροτομής Ntua_15. Η χορδή και η συστροφή του πτερυγίου, εφαρμόζεται σε κάθε αεροτομή, κάθε επιπέδου σχεδιασμού. Η συστροφή εφαρμόστηκε στο ¼ της εκάστοτε χορδής, όπως ορίζεται από την αεροδυναμική του πτερυγίου. Αφού σχεδιαστούν τα προφίλ σε κάθε επίπεδο σχεδιασμού, το επόμενο βήμα είναι η ένωση των προφίλ, με την εντολή loft του SolidWorks2011, σε ένα ενιαίο σώμα. Στις επόμενες εικόνες.38. και .39. φαίνεται η διαδικασία ένωσης των επιμέρους προφίλ, καθώς και το πτερύγιο μετά την ολοκλήρωση της εντολής loft.

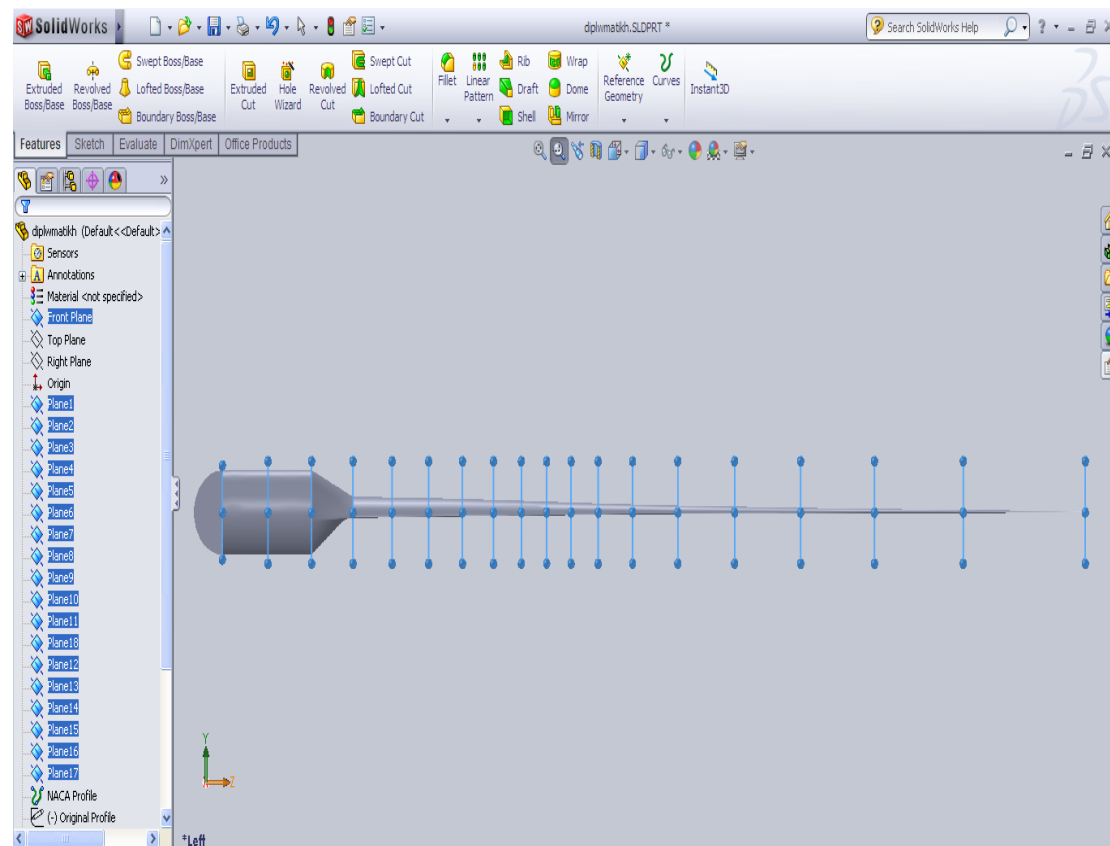


Εικόνα.38.: Ένωση προφίλ (Loft) για τη δημιουργία του πτερυγίου, SolidWorks2011



Εικόνα.39.: Μορφή του πτερυγίου μετά την ολοκλήρωση της ένωσης των προφίλ, SolidWorks2011

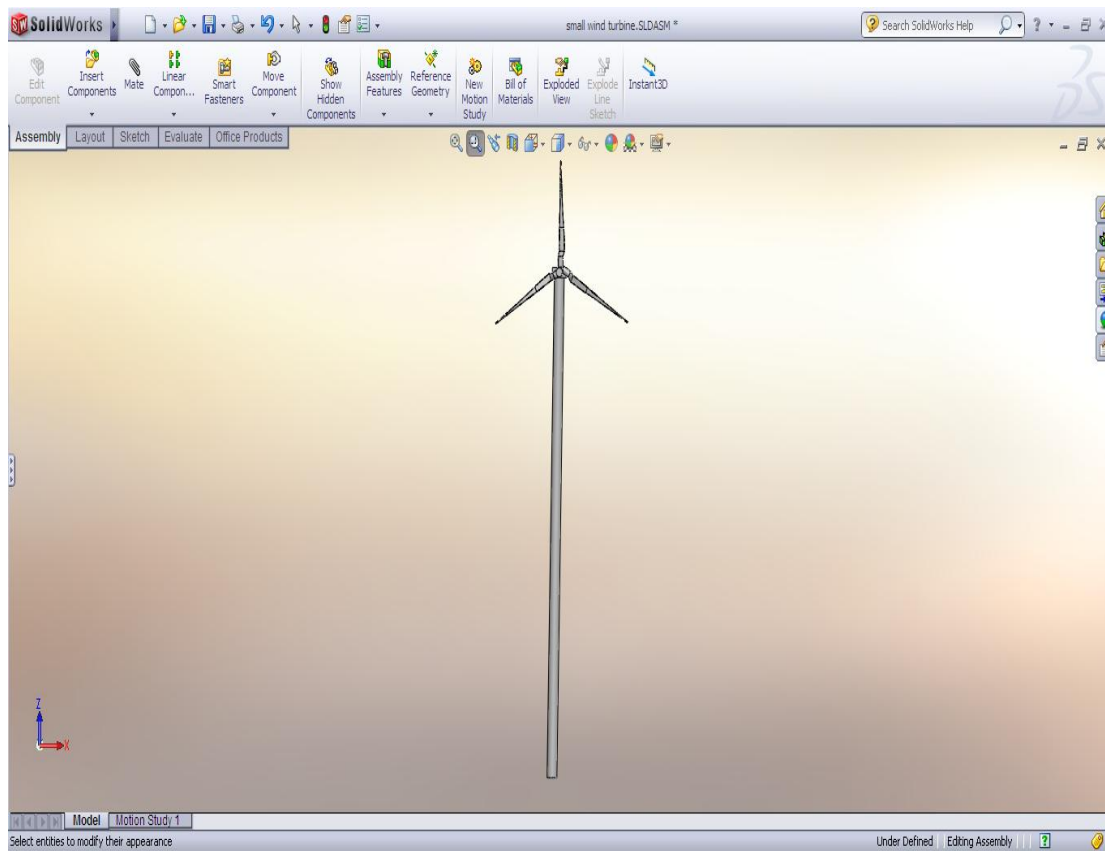
Τελικά, η μορφή του πτερυγίου είναι η ακόλουθη:



Εικόνα.39.: Πλάγια όψη πτερυγίου μετά την ολοκλήρωσή του με εμφανή τα 19 επίπεδα σχεδίασης, SolidWorks2011

Εν συνεχεία, σχεδιάστηκε ο πύργος της Α/Γ με το κουβούκλιο της γεννήτριας (nacelle). Το σχέδιο ήταν απλό, σύμφωνα με πύργους μικρών Α/Γ, που κυκλοφορούν στην αγορά και χωρίς να αποτελεί μέρος της βελτιστοποίησης. Επιλέχθηκε το ύψος του πύργου να είναι στα 5m, μιας και η ακτίνα του δρομέα της Α/Γ να μην ξεπερνά τα 1,1m.

Τελικό στάδιο του σχεδιασμού αποτελεί η συναρμολόγηση του πύργου με τα τρία πτερύγια. Το αποτέλεσμα είναι το ακόλουθο:



Εικόνα.40.: Πρόοψη μικρής Α/Γ με πτερύγιο Ntua_15 σχεδιασμένο σε SolidWorks2011

Κεφάλαιο 7^ο

Σε μία εποχή που η ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας είναι πιο επιτακτική από ποτέ, η εγκατάσταση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας αυξάνεται όλο και περισσότερο και μάλιστα και από ιδιώτες για οικιακή χρήση. Η παρούσα Διπλωματική Εργασία επικεντρώθηκε στις μικρές ανεμογεννήτριες και σκοπός της ήταν η βελτιστοποίηση του δρομέα τους ώστε να παρέχουν τη μέγιστη δυνατή ετήσια παραγόμενη ενέργεια. Αρχικά, παρουσιάστηκαν ορισμένα στοιχεία θεωρίας και περιγράφηκαν τα προγράμματα RAFT, EASY, XFOIL και SolidWorks που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση των αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια στο 5^ο Κεφάλαιο έγινε η παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Για κάθε μία από τις επιλεγμένες προς εξέταση αεροτομές (NACA2415, NACA4415, Ntua_15, Ntua_18) έγινε έρευνα της απόδοσής της και της συμπεριφοράς της για συνθήκες που αντιστοιχούν σε μικρές Α/Γ (πχ. μικρός αριθμός Reynolds). Κατόπιν, έγινε σύγκριση μεταξύ των αεροτομών, ώστε να επιλεγεί η καταλληλότερη. Το συμπέρασμα ήταν ότι η Ntua_15 κάλυπτε το μεγαλύτερο ποσό ετήσιας παραγόμενης ενέργειας (2.300kWh/y) για μικρή Α/Γ ακτίνας δρομέα 1,1m. Σε όλες τις αεροτομές εφαρμόσθηκε *boundary layer tripping*, συνεπώς τα αποτελέσματα ήταν πιο συντηρητικά από τα αναμενόμενα αλλά παράλληλα πιο αξιόπιστα. Τέλος, η Α/Γ αυτή σχεδιάστηκε με χρήση του πακέτου μηχανολογικού σχεδιασμού SolidWorks2011.

Πιθανότατα, σε μεταγενέστερη εργασία να γίνει η αντίστοιχη διαδικασία για άλλες αεροτομές, για παράδειγμα της οικογένειας SG που έχουν σχεδιαστεί αποκλειστικά για χρήση σε μικρές Α/Γ. Επιπροσθέτως, προτείνεται να γίνει μία έρευνα για την αποτελεσματικότητα των γεννητριών δινών (vortex generators) σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds με πείραμα σε αεροδυναμική σήραγγα.

Παράρτημα 1^ο - Παρεμβολή με συναρτήσεις splines

Με τον όρο κυβικές συναρτήσεις παρεμβολής splines¹, εννοούμε συναρτήσεις που είναι κατά τμήματα πολυώνυμα 3^{ου} βαθμού και με ομαλότητα C^2 . Οι συναρτήσεις αυτές έχουν το πλεονέκτημα να δίνουν σχετικά μικρό σφάλμα παρεμβολής, προσεγγίζοντας καλά και την παράγωγο της συνάρτησης f που παρεμβάλλεται. Παρόμοια με τις κυβικές, ορίζονται και splines μεγαλύτερου βαθμού (>3), που όμως δεν προτιμώνται μιας και κατά κανόνα οι κυβικές δίνουν μικρό σφάλμα με απλές υπολογιστικές διαδικασίες.

Έστω μια συνάρτηση f ορισμένη στο διάστημα $[a,b]$ και $x_0, \dots, x_n$, $n+1$ ισαπέχοντα σημεία με $x_i < x_{i+1}$, $x_0 = a$, $x_n = b$.

Ορισμός:

Συμβολίζουμε με S_3 το σύνολο των συναρτήσεων s που ικανοποιούν:

- $s \in \Pi_3$ σε κάθε διάστημα $[x_i, x_{i+1}]$
- $s \in C^2 [a,b]$

μία συνάρτηση $s \in S_3$ καλείται (κυβική) spline.

Μία spline $s \in S_3$ καλείται spline παρεμβολής της f στο σημεία x_i αν ικανοποιεί επιπλέον τις σχέσεις:

$$s(x_i) = f(x_i), i=0, \dots, n$$

θα χρησιμοποιήσουμε παρακάτω μία από τις πρόσθετες συνθήκες:

$$s''(a) = d_0, s''(b) = d_n, d_0, d_n \text{ δοθέντα}$$

ή

$$s'(a) = c_0, s'(b) = c_n, c_0, c_n \text{ δοθέντα.}$$

¹ Το Παράρτημα 1 της παρούσας Δ.Ε. αποτελεί απόσπασμα του βιβλίου 'Εισαγωγή στην Αριθμητική Ανάλυση' των Καθηγητών Ε.Μ.Π. κ.κ. Μπακόπουλου Α. και Χρυσοβέργη Ι.

Κατασκευή συνάρτησης spline παρεμβολής:

Ζητούμε τώρα μία συνάρτηση spline παρεμβολής, για τη συνάρτηση f , που ικανοποιεί και τις συνθήκες iv.

Θέτουμε

$$h = \frac{b-a}{n}$$

Και

$$s''(x_i) = d_i, \quad i = 0, \dots, n$$

Επειδή $s \in \Pi_3$ στο $[x_i, x_{i+1}]$, έχουμε $s'' \in \Pi_3$ στο $[x_i, x_{i+1}]$, άρα:

$$s''(x) = d_i \frac{x_{i+1} - x}{h} + d_{i-1} \frac{x - x_i}{h}$$

για $x \in [x_i, x_{i+1}]$. Ολοκληρώνοντας δύο φορές την s'' , βρίσκουμε από την iii.

$$s(x) = d_i \frac{(x_{i+1} - x)^3}{6h} + d_{i-1} \frac{(x - x_i)^3}{6h} + \left(\frac{f_{i+1}}{h} - \frac{d_{i+1}h}{6}\right)(x - x_i) + \left(\frac{f_i}{h} - \frac{hd_i}{6}\right)(x_{i+1} - x)$$

Για $x \in [x_i, x_{i+1}]$, όπου θέτουμε $f_i = f(x_i)$. Από τη συνθήκη ii., η s' πρέπει να είναι συνεχής στο $[a, b]$, άρα πρέπει να ισχύει:

$$s'(x_i^+) = s'(x_i^-), \quad i = 0, \dots, n-1$$

Επομένως,

$$-\frac{d_i h}{2} + \frac{f_{i+1}}{h} - \frac{d_{i+1} h}{6} + \frac{hd_i}{6} - \frac{f_i}{h} = \frac{d_i h}{2} + \frac{f_i}{h} - \frac{d_i h}{6} + \frac{hd_{i-1}}{6} - \frac{f_{i-1}}{h}$$

ή

$$d_{i+1} + 4d_i + d_{i-1} = \frac{6}{h^2}(f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}) := F_i$$

$$i = 0, \dots, n-1$$

Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν ένα γραμμικό σύστημα $n-1$ εξισώσεων με $n+1$ αγνώστους $d_0, \dots, d_n$. Γνωρίζοντας τα d_0, d_n τα $d_1, \dots, d_{n-1}$ υπολογίζονται λύνοντας το τριδιαγώνιο σύστημα, το οποίο έχει διαγώνια υπεροχή και άρα μία και μοναδική λύση.

Παράρτημα 2^ο - Γενικές Μέθοδοι Ολοκλήρωσης²

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μέθοδοι Τραπεζίου και Simpson. Όπως συμβαίνει και στην αριθμητική προσέγγιση (παράρτημα splines), έτσι και εδώ, η συνάρτηση $f(x)$ προσεγγίζεται με μία απλή, αναλυτική συνάρτηση, που εδώ είναι ένα πολυώνυμο $p_m(x)$ βαθμού m , οπότε ισχύει:

$$I = \int_a^b f(x)dx = \int_a^b p_m(x)dx$$

Έτσι προκύπτουν οι ακόλουθες περιπτώσεις:

Για $m=0$, το πολυώνυμο είναι μία οριζόντια γραμμή που διέρχεται από το σημείο $f(a)$ ή $f(b)$. Η μέθοδος αυτή αναφέρεται ως μέθοδος των ορθογωνίων τμημάτων.

$$I = (b - a)f(a) \quad \text{ή} \quad I = (b - a)f(b)$$

Για $m=1$, το πολυώνυμο είναι μία ευθεία γραμμή που συνδέει τα $f(a), f(b)$ και έχει την ακόλουθη μαθηματική έκφραση:

$$I = (b - a) \frac{f(a) + f(b)}{2}$$

Αυτή η μορφή αποτελεί τη μέθοδο ή κανόνα του τραπεζίου, με βάσεις τα $f(a)$ και $f(b)$.

Για $m=2$ απαιτεί ακόμη ένα σημείο για να ορισθεί το πολυώνυμο παρεμβολής, επομένως η περιοχή ολοκλήρωσης πρέπει να περιέχει δύο ίσα

² Το Παράρτημα 2 της παρούσας Δ.Ε. αποτελεί απόσπασμα του βιβλίου 'Αριθμητική Ανάλυση για Μηχανικούς' των Καθηγητών Ε.Μ.Π. κ.κ. Γιαννάκογλου Κ., Αναγνωστόπουλου Γ. και Μπεργελέ Γ.

υποδιαστήματα. Το ορισμένο ολοκλήρωμα του δευτεροβάθμιου αυτού πολυωνύμου, το οποίο διέρχεται από τα σημεία $x_0 \equiv a$, $x_1 \equiv (a+b)/2$ και $x_2 \equiv b$ είναι μετά από πράξεις:

$$I = (b - a) \frac{f(x_0) + 4f(x_1) + f(x_2)}{6}$$

Αυτή η μέθοδος είναι γνωστή ως μέθοδος Simpson 1/3, όπου το 1/3 είναι ο αριθμητικός συντελεστής που προκύπτει εάν τεθεί $(b-a)=2h$, όπου h το πλάτος του υποδιαστήματος.

Για $m=3$ το πολυώνυμο είναι 3^{ου} βαθμού, συνεπώς απαιτούνται τέσσερα ισαπέχοντα σημεία και τρία υποδιαστήματα. Η αναλυτική έκφραση που προκύπτει μετά από πράξεις είναι:

$$I = (b - a) \frac{f(x_0) + 3f(x_1) + 3f(x_2) + f(x_3)}{8}$$

Αυτή η μέθοδος είναι γνωστή ως μέθοδος Simpson 3/8, όπου το 3/8 είναι ο αριθμητικός συντελεστής που προκύπτει εάν τεθεί $(b-a)=3h$, όπου h το πλάτος του υποδιαστήματος.

Βιβλιογραφία

1. Βουτσινάς Σ.Γ., Κατώπης Κ.Γ., Μπέλεσης Μ.Α., Ριζιώτης Β.Α. και Χασαπογιάννης Π.,Ι., 'Ανάλυση της δυναμικής καταπόνησης πτερυγίων ΑΓΟΑ με υπολογιστικές μεθόδους', Πρακτικά 5^{ου} Εθνικού Συνεδρίου για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Τόμος ΙΙ, 1-10, Αθήνα 1996.
2. Γιαννάκογλου Κ., 'Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στην Αεροδυναμική', Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2006.
3. Γιαννάκογλου Κ., Αναγνωστόπουλος Γ., Μπεργελές Γ., 'Αριθμητική Ανάλυση για Μηχανικούς (3^η έκδοση)', Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2003.
4. Γκίκας Δ., 'Δημιουργία αρχείου ανεμολογικών δεδομένων και ανάπτυξη προγράμματος υπολογισμού καμπυλών Weibull για τη διαχείριση της αιολικής ενέργειας', Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2011.
5. Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), Διαδικτυακός Ιστότοπος.
(www.dei.gr)
6. Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΣΜΗΕ), Διαδικτυακός Ιστότοπος.
(www.desmie.gr)
7. Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ), 'Οδηγός Μικρών Ανεμογεννητριών (2^η έκδοση), 2012.
8. Ζερβός Α., 'Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας', Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2008.
9. Κακαράς Ε. και Καρέλλας Σ., 'Αντιρρυπαντική τεχνολογία θερμικών σταθμών (Παρουσιάσεις μαθήματος)', Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2010.
10. Κατώπης Κ.Γ., 'Ανάλυση συμπεριφοράς και πιστοποίηση ΑΓΟΑ. Συμβολή στην ανάπτυξη κατάλληλου υπολογιστικού εργαλείου', Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 1995.
11. Κοδοσάκης Δ., 'Διαχείριση φυσικών πόρων και ενέργεια', Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα 1994.

12. Κούκουρα Χ., 'Αεροδυναμική Ανάλυση Πλωτών Ανεμοκινητήρων', Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011.
13. Κυριτσάκη Ο., 'Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στην Ελλάδα', Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Διοίκησης Επιχειρήσεων Τ.Ε.Ι. Κοζάνης, Κοζάνη 2009.
14. Μπακόπουλος Α. και Χρυσοβέργης Ι., 'Εισαγωγή στην Αριθμητική Ανάλυση', Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1994.
15. Μπεργελές Γ., 'Ανεμοκινητήρες', Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2005.
16. Νομπιλάκης Σ., 'Διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε Διασυνδεδεμένη Κατοικία', Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011.
17. Παπαδούλης Θ., 'Σχεδιομελέτη και κατασκευή καλουπιού Ανεμοπτερυγίου με σύγχρονες CAD/CAM-CAE υπολογιστικές μεθόδους και κατεργασίες', Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Χανιά 2011.
18. Παπαντώνης Δ., 'Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα', Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2008.
19. Τσαγγάρης Σ., 'Μηχανική των Ρευστών', Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2005.
20. Φυτίκας Μ., Ανδρίτσος Ν. και Δρακουλάκης Ρ., 'Γεωθερμία και Τυποποίηση', Διήμερο συμπόσιο για την τυποποίηση Τ.Ε.Ε. 27÷28 Νοεμβρίου 2008, Αθήνα 2008.
21. Bonus Energy A/S, 'Bonus-Info 1998 Newsletter', Denmark 1988.
22. Burton T., Jenkins N., Sharpe D., Bossanyi E., 'Wind Energy Handbook, Wiley Publications, Chichester – West Sussex 2001.
23. Drela M., 'XFOIL: An analysis and design system for low Reynolds number airfoils', Conference on Low Reynolds number Aerodynamics, University Notre Dame, Indiana 1989.
24. Drela M. and Giles M., 'Viscous-Inviscid Analysis of Transonic and Low Reynolds Number Airfoils', American Institute of Aeronautics and Astronautic Journal, vol. 25, issue 10, 1987.
25. Energy Self Sufficiency Newsletter (ESSN), 'Small Wind Turbine Basics', ESSN Newsletter, 2005.

26. European Wind Energy Association (EWEA), 'Pure Power - Wind energy targets for 2020 and 2030', EWEA Report, 2011.
27. Forsythe G., Malcolm M. and Moler C., 'Computer Methods for Mathematical Computations', Prentice-Hall, New Jersey 1977.
28. Goethals R., 'Energie Eolienne', Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d' Aérotechnique, Université de Poitiers, Poitiers 1980.
29. Gyatt G.W., 'Development and Testing of Vortex Generators for Small Horizontal Axis Wind Turbines', NASA, 1986.
30. Kogaki T., Matsumiya H., Kieda K., Yoshimizu N. and Yamamoto Y., 'Performance improvement of airfoils for wind turbines by modified vortex generator', Middle East Technical University, AEE 495, 2011.
31. Laitone E, 1997, 'Aerodynamic lift at Reynolds numbers below 70.000', American Institute of Aeronautics and Astronautic Journal, vol. 34, issue 9, pp. 1941-1942, 1996.
32. Mauclore X., 'Automatic 2D Airfoil Generation, Evaluation and Optimisation using MATLAB and XFOIL' Master Thesis, Department of Mechanical Engineering DTU, Denmark 2009.
33. Migliore P. and Oerlemans S., 'Wind tunnel aerocoustic tests of six airfoils for use on small wind turbines', Journal of Solar Energy Engineering, vol.126, pp.976÷988, 2004.
34. National Aeronautics and Space Administration – Global Climate Change, Web Site.
<http://climate.nasa.gov>
35. Ramanujan K., 'Methane's impacts on climate change may be twice previous estimates', NASA, 2005.
36. Renewable Energy Systems (RES), 'Plugging The Gap', RES Final Report, 2006.
37. United Nations – Framework Convention on Climate Change, Web Site.
<http://unfccc.int/kyoto-protocol/items/2830.php>
38. Wood D., 'Small Wind Turbines. Analysis, Design and Application' Springer Publications, London 2011.
39. World Bank Group, 'Pollution Prevention and Abatement Handbook', The International Bank for Reconstruction and Development, 1998.

40. Wright AK, 'Aspects of the aerodynamics and operation of a small horizontal axis wind turbine', PhD Thesis, School of Engineering, University of Newcastle, Newcastle 2005.
41. Zhou Y., Mahbub A., Yang H.X., Guo H. and Wood D.H., 'Fluid forces on a very low Reynolds number and their prediction', International Journal of Heat & Fluid Flow vol. 32, pp.329÷339, 2010.