



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ  
Διπλωματική Εργασία

**Εφαρμογή μεθόδου διόρθωσης φορτίων  
σε συνδυασμό με την χρήση αραιότερων πλεγμάτων  
σε υπολογισμούς γραμμής άνωσης**

Καλφάογλου Γεώργιος

AM 021116010

*Επιβλέπων:*

Βασίλειος Ριζιώτης

Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023



# Σύνοψη

Η μέθοδος Γραμμής Δράσης (ALM) είναι μία ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική για την αναπαράσταση των αναπτυσσόμενων φορτίων σε δρομείς ανεμογεννητριών στον τομέα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Στην ALM τα αεροδυναμικά μεγέθη υπολογίζονται τοπικά κατά μήκος μίας γραμμής, που αναπαριστά το πτερύγιο και μετέπειτα προβάλλονται στον 3D υπολογιστικό χώρο μέσω μίας κατανομής Gauss. Αποτέλεσμα της προβολής της δύναμης είναι η δημιουργία στροβιλότητας με συνεκτικό πυρήνα και άρα η υπερεκτίμηση των φορτίσεων στα άκρα των πτερυγίων, όπως θα αποδειχθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία. Για την αποφυγή του ανωτέρω φαινομένου οι ερευνητές χρησιμοποιούν την διόρθωση ακροπτερυγίου του Prandtl ή πολύ πυκνά υπολογιστικά πλέγματα που οδηγούν σε υψηλό υπολογιστικό κόστος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα διερευνηθεί η συμπεριφορά της μεθόδου Γραμμής Δράσης για αραιά υπολογιστικά πλέγματα και τα αίτια της υπερεκτίμησης των φορτίσεων στα πτερύγια δρομέα A/Γ. Στη συνέχεια θα προταθεί μία διόρθωση για την αποφυγή του προαναφερθέντος φαινομένου, η οποία θα μελετηθεί παραμετρικά στον δρομέα της A/Γ 10 MW του DTU. Θα εξεταστούν τόσο μία περιοδική μόνιμη περίπτωση όσο και μία μη μόνιμη περίπτωση σε συνθήκες αξονικής ροής ταχύτητας 11 m/s. Θα γίνει αντιληπτό από την παρούσα εργασία ότι η διόρθωση βελτιώνει αισθητά την εκτίμηση της φόρτισης στα πτερύγια ενώ επιτρέπει τη μείωση του κόστους της μεθόδου Γραμμής Δράσης μέσω της χρήσης αραιότερων πλεγμάτων. Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται με την χρήση υπάρχοντα κώδικα FORTRAN 90 του Εργαστηρίου Αεροδυναμικής, στον οποίο γίνονται προσθήκες στα πεδία που αναφέρθηκαν.

# Abstract

The Actuator Line Method (ALM) is a widely used technique for the representation of blade loading on wind turbine rotors in computational fluid dynamics (CFD). In ALM aerodynamic quantities are calculated locally on a line that represents the blade and then they are projected to the 3D CFD domain by a smearing function based on a Gauss normal distribution. As a result of the projection of body forces the shed vorticity inherits a viscous core which leads to the overestimation of blade loadings especially at the tip, as will be proved in this thesis. To avoid this effect, researchers either use Prandtl's tip correction or extremely fine grid resolutions which lead to overwhelming computational cost. In this thesis, a detailed investigation of the behavior of ALM with a coarse grid is made along with the causes of the overestimation of tip loadings. Based on these findings a new smearing correction will be introduced and tested parametrically on the 10 MW reference wind turbine of DTU. Both a periodic steady case and an unsteady case with an axisymmetric flow of 11 m/s will be investigated. It will be concluded that the smearing correction greatly improves tip blade loadings while allowing the use of coarser grids, reducing the computational cost of the ALM. All the included calculations are done using the existing FORTRAN 90 code of the lab of Aerodynamics of NTUA, in which the modifications of the smearing correction were added.

# Ευχαριστίες

Αρχικά θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω βαθύτατα τον κύριο Βασίλειο Ριζιώτη που αφενός μέσω της εκπαιδευτικής διαδικασίας με ενέπνευσε να εμβαθύνω στον τομέα της αεροδυναμικής και αφετέρου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτή την εργασία. Η εξαιρετική καθοδήγησή του καθώς και άμεση ανταπόκρισή του σε οποιονδήποτε προβληματισμό προέκυπτε συνέδραμαν δραστικά στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επιπρόσθετα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Νίκο Σπυρόπουλο για την στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας. Η προσφορά του ήταν ύψιστης σημασίας καθώς και αντιμετωπίστηκαν διάφορα προβλήματα που θα μπορούσαν να αποτελέσουν τροχοπέδη στην ομαλή ολοκλήρωση της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους οικείους μου για τη διαρκή συμπαράστασή τους κατά την διάρκεια αυτού του έργου.

# Περιεχόμενα

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Βιβλιογραφική Επισκόπηση</b>                         | <b>1</b>  |
| 1.1      | Γενική Περιγραφή Μεθόδου Γραμμής Δράσης . . . . .       | 1         |
| 1.2      | Παράμετροι Επίδοσης Μεθόδου Γραμμής Δράσης . . . . .    | 2         |
| 1.3      | Το Φαινόμενο του Ακροπτερυγίου και Διορθώσεις . . . . . | 7         |
| 1.4      | Διόρθωση Συνεκτικού Πυρήνα . . . . .                    | 10        |
| 1.5      | Βιβλιογραφικό Κενό . . . . .                            | 15        |
| <b>2</b> | <b>Η Μέθοδος Γραμμής Δράσης</b>                         | <b>16</b> |
| 2.1      | Γενική Περιγραφή . . . . .                              | 16        |
| 2.2      | Εξισώσεις . . . . .                                     | 18        |
| 2.3      | Επιβολή Όρων Πηγής . . . . .                            | 19        |
| 2.3.1    | Ισοτροπική Κατανομή Gauss . . . . .                     | 19        |
| 2.3.2    | Προβλήματα με την Προβολή Δύναμης . . . . .             | 20        |
| 2.4      | Πλεγματική Ανεξαρτησία . . . . .                        | 21        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>3</b> | <b>Διόρθωση Μεθόδου Γραμμής Δράσης για Περιοδική Περίπτωση</b>                            | <b>25</b> |
| 3.1      | Συσχέτιση ακτίνας προβολής της δύναμης με έλλειμα επαγωγής . . . . .                      | 26        |
| 3.2      | Περιγραφή Μεθόδου Διόρθωσης . . . . .   | 31        |
| 3.2.1    | Μέθοδος Διόρθωσης για Ρότορες . . . . .   | 35        |
| 3.3      | Παραμετρική Μελέτη Μεθόδου Διόρθωσης στην Μέθοδο Γραμμής Δράσης                           | 37        |
| 3.3.1    | Μήκος Εξάπλωσης Ομόρρου . . . . .   | 39        |
| 3.3.2    | Γωνία Ομόρρου . . . . .   | 41        |
| 3.3.3    | Αριθμός Strips . . . . .  | 42        |
| 3.3.4    | Χαρακτηριστικό Μήκος Πλέγματος . . . . .  | 44        |
| 3.4      | Σχολιασμός Αποτελεσμάτων . . . . .  | 47        |
| 3.5      | Συμπεράσματα για Περιοδική Μόνιμη Περίπτωση . . . . .                                     | 53        |
| <b>4</b> | <b>Διόρθωση Μεθόδου Γραμμής Δράσης για Μη Μόνιμη Περίπτωση</b>                            | <b>55</b> |
| 4.1      | Ορισμός Μη Μόνιμου Προβλήματος . . . . .  | 55        |
| 4.2      | Περιγραφή Μεθόδου Διόρθωσης για το Μη Μόνιμο Πρόβλημα . . . . .                           | 59        |
| 4.3      | Ισοδυναμία Αποτελεσμάτων Περιοδικής και Μη Μόνιμης Περίπτωσης                             | 61        |
| 4.4      | Ακτινικές κατανομές . . . . .   | 62        |
| 4.4.1    | Σύγκριση ακτινικών κατανομών για τη μέθοδο της Γραμμής Δράσης<br>χωρίς διόρθωση . . . . . | 63        |
| 4.4.2    | Σύγκριση ακτινικών κατανομών για τη μέθοδο της Γραμμής Δράσης<br>με διόρθωση . . . . .    | 68        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 4.4.3    | Σχολιασμός Αποτελεσμάτων  | 73        |
| <b>5</b> | <b>Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα - Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα</b> | <b>74</b> |
| 5.1      | Ανακεφαλαίωση   | 74        |
| 5.2      | Συμπεράσματα  | 75        |
| 5.3      | Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα                                       | 76        |
| <b>A</b> | <b>Συντομογραφίες</b>   | <b>87</b> |





# Κεφάλαιο 1

## Βιβλιογραφική Επισκόπηση

### 1.1 Γενική Περιγραφή Μεθόδου Γραμμής Δράσης

Οι υπολογισμοί των αναπτυσσόμενων φορτίων και των επιδόσεων των Α/Γ συνήθως διεκπεραιώνονται από την μέθοδο Blade Element Momentum (BEM), όπου η ροή κατακερματίζεται σε όγκους ελέγχου και εφαρμόζονται οι εξισώσεις διατήρησης. Παρά την απλότητα και την ταχύτητα του, το ανωτέρω υπολογιστικό μοντέλο αδυνατεί να επιλύσει ένα εύρος μεταβατικών και πιο περίπλοκων ροών που απαντώνται στην πράξη και πόσο μάλλον σε μία Α/Γ ή ένα αιολικό πάρκο. Έτσι αναπτύχθηκαν διάφορα υπολογιστικά μοντέλα όπως αυτά που είτε βασίζονται σε μεθόδους στροβιλότητας είτε σε μεθοδολογίες πεπερασμένων όγκων όπως η μέθοδος δίσκου ορμής για τον υπολογισμό του πεδίου ροής. Παρόλα αυτά, για την αποφυγή των αξονοσυμμετρικών περιορισμών της μεθόδου δίσκου ορμής αναπτύχθηκε από τους Sorensen J.N. και Shen [1], το Actuator Line Model (ALM) ή μέθοδος γραμμής δράσης. Το κύριο χαρακτηριστικό του AL μοντέλου είναι ότι κάθε πτερύγιο μοντελοποιείται ως ένα σύνολο σημείων ελέγχου που σχηματίζουν μία καμπύλη. Το AL μοντέλο είναι μία αναπαράσταση της γραμμής άνωσης του ρότορα μιας Α/Γ, όντας ικανό να αναπαραστήσει μεταβατικά φαινόμενα όπως την ύπαρξη στροβιλότητας στον ομόρροτο, την αλληλεπίδραση του με στερεά σύνορα, ελεύθερες επιφάνειες και τον ομόρροτο από άλλες Α/Γ (π.χ. αιολικό πάρκο). Το μεγάλο πλεονέκτημα που προσφέρει η αναφερόμενη μέθοδος είναι ότι αποφεύγεται το υπολογιστικό κόστος που αναλογεί σε μία τρισδιάστατη επίλυση της ροής στην οποία λαμβά-

νεται υπόψη η πλήρης τρισδιάστατη γεωμετρία του δρομέα (fully resolved). Η μέθοδος συνδυάζει τον επιλύτη των τρισδιάστατων ασυμπίεστων εξισώσεων N-S, σε διατύπωση στροβιλότητας-ταχύτητας είτε σε πίεσης-ταχύτητας, και ταυτόχρονα την κατανομή των δυνάμεων ακτινικά κατά μήκος μίας γραμμής που αντιπροσωπεύει το πτερύγιο της A/Γ.

Στην ALM προσδιορίζεται το πεδίο ροής με την επίλυση των 3D ασυμπίεστων Navier-Stokes, ενώ η παρουσία του δρομέα στο ροϊκό πεδίο λαμβάνεται υπόψη μέσω επιβολής όρων πηγής στις ανωτέρω εξισώσεις. Για την εύρεση αυτών των δυνάμεων στα σημεία ελέγχου, συνήθως στο  $c/4$  της εκάστοτε αεροτομής, εφαρμόζεται μία μεθοδολογία τύπου στοιχείων περύγωσης. Από την γνωστή ταχύτητα του πεδίου στις υπολογιστικές κυψέλες σε συνδυασμό με την κινηματική του αδρανειακού και τοπικού συστήματος του ρότορα υπολογίζεται η τοπική ταχύτητα της εκάστοτε αεροτομής και άρα η τοπική γωνία προσβολής. Μετέπειτα από 2D πινακοποιημένα μεγέθη υπολογίζονται οι αδιάστατοι αεροδυναμικοί συντελεστές φόρτισης των αεροτομών που απαρτίζουν την πτέρυγα και άρα η τοπική φόρτίσή τους. Απαραίτητο χαρακτηριστικό της ALM είναι η ύπαρξη μίας συνάρτησης κατανομής Gauss προς αποφυγή αριθμητικών ανωμαλιών. Οι τοπικές φορτίσεις προβάλλονται στον τρισδιάστατο πλεγματοειδή χώρο μέσω της συνέλιξης μίας συνάρτησης κατανομής Gauss και της δισδιάστατης δύναμης που υπολογίστηκε, όπως αρχικά έκριναν απαραίτητο οι Sorensen και Shen. Η ύπαρξη αυτής της συνάρτησης κατανομής είναι απαραίτητη καθώς και εξασφαλίζει την εξάλειψη ασυνεχειών ανάμεσα στην κατανομή της δύναμης κατά το μήκος του πτερυγίου της A/Γ, ενώ υπάρχουν πολλές θεωρήσεις για το αν θα είναι ισοτροπική ή ανισότροπη δισδιάστατη η τρισδιάστατη.

## 1.2 Παράμετροι Επίδοσης Μεθόδου Γραμμής Δράσης

Παρά το γεγονός ότι το ALM αποτελεί ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο υπολογιστικό εργαλείο η αξιοπιστία του εξαρτάται άμεσα από τρεις κύριες παραμέτρους : η τάξη του μεγέθους της χωρικής διακριτοποίησης  $\Delta x$ , την ακτίνα  $\epsilon$  της συνάρτησης προβολής της δύναμης και την απόσταση μεταξύ των σημείων ελέγχου  $\Delta b$  που μοντελοποιούν τον δρομέα.

Ο Troldborg [2], [3] βασιζόμενος στο αρχικό μοντέλο με την 3D ομοιόμορφη κατανομή Gauss τόνισε πως ιδανικό θα ήταν η κατανομή του  $\epsilon$  να ακολουθεί την γεωμετρία

του πτερυγίου,παρόλα αυτά λόγω ελλειπών υπολογιστικών πόρων κατέληξε στο συμπέρασμα ότι πολύ μικρές τιμές της ακτίνας  $\epsilon$  οδηγούν σε αριθμητικές ταλαντώσεις ενώ ένας ικανοποιητικός συμβιβασμός θα ήταν  $\epsilon=2\Delta x$ . Στα πλαίσια εύρεσης της βέλτιστης τιμής της ακτίνας  $\epsilon$ , ο Mikkelsen και εν συνεχεία οι Shives και Crawford [4] αποφαινόνται πως μια ομοιόμορφη 3D κατανομή κατανέμει την δύναμη εκτός των φυσικών ορίων του πτερυγίου,προβάλλοντας την σε διπλάνες υπολογιστικές κυψέλες και άρα αλλοιώνει την ροή ενέργειας και μάζας που διακινεί ο δρομέας. Έτσι οι Shives et al.[4] προβαίνουν σε μια 2D κατανομή της δύναμης σε ένα επίπεδο κάθετο στον άξονα των πτερυγίων. Από την μελέτη τους,που εστιάζει τόσο σε πτερύγιο απείρου μήκους όσο και σε πεπερασμένες πτέρυγες με σταθερή και ελλειπτική κατανομή κυκλοφορίας, για απλοποίηση των υπολογισμών, έχουν μια πρώτη εκτίμηση για τον προσδιορισμό των παραμέτρων  $\epsilon$  και  $\Delta x$ ,που επηρεάζουν άμεσα την επίδοση του Actuator Line Model. Παρόμοια λογική διδιάστατης κατανομής ακολούθησαν και οι Mikkelsen και Ivanell όπου αμφότεροι δοκίμασαν το  $\epsilon$  να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του στοιχειώδους μήκους του πλέγματος  $\Delta x$ , αποφαινόμενοι αφενός ότι αυτή η λογική δεν έδινε κοντινά με την αναλυτική λύση για ελλειπτικής κυκλοφορίας πτερύγιο και αφετέρου ότι το  $\epsilon$  πρέπει να λαμβάνει την μικρότερη δυνατή τιμή για να μην επηρεάζει την δομή του ομόρρου.

Η ερευνητική εργασία των Shives και Crawford έρχεται να συμπληρώσει ότι πρέπει συνάμα το  $\epsilon$  να συνάδει με την φυσική διάσταση του πτερυγίου και συγκεκριμένα με την χορδή. Στην έρευνα τους λοιπόν μελετήθηκαν τρεις περιπτώσεις πτερυγώσεων με γνωστές αναλυτικές λύσεις. Ειδικότερα μέσω της μελέτης της απείρου μήκους πτέρυγας αποδείχθηκε ότι χρησιμοποιώντας μικρότερη τιμή του  $\epsilon$  ο πυρήνας στροβιλότητας των στροβίλων του ομόρρου ήταν μικρότερος και άρα είχαμε μεγαλύτερες τοπικές ταχύτητες. Προτείνεται ακόμα ότι για όλες τις προσομοιώσεις με το ALM πρέπει να ισχύει  $\epsilon/\Delta x \geq 4$  με το όριο αυτό να πρέπει να αυξηθεί σε περίπτωση που  $\epsilon/c < 1/4$ . Τέλος το σφάλμα στην γωνία προσβολής προκύπτει από την ανεπαρκή πυκνότητα του πλέγματος που καθιστά ανέφικτη την επίλυση της ροής κοντά στο σημείο υπολογισμού των δυνάμεων, με τα αραιότερα πλέγματα να δίνουν εσφαλμένα αποτελέσματα στο επαγόμενο προφίλ ταχύτητας. Η τιμή του  $\epsilon$  επηρεάζει την τιμή αλλά και την κατανομή της επαγωγής απαιτώντας μια ελάχιστη ακρίβεια, μικρό  $\Delta x$  δηλαδή, του πλέγματος για ακριβή αποτελέσματα. Στη συνέχεια εξετάζοντας τη πτέρυγα με σταθερή κυκλοφορία, η οποία αποτελεί αναγκαίο βήμα για την επαλήθευση των αριθμητικών αποτελεσμάτων της μεθόδου AL, καθώς και πρέπει οι στροβιλότητες που αποβάλλονται από το ακροπτερύγιο

να μοντελοποιούνται ορθά. Προσομοιώσεις γίνονται για  $\varepsilon/c=1/4,1/2$  και συγκρίνονται τα αποτελέσματα με αυτά της αναλυτικής λύσης που προβλέπεται από το μοντέλο Scully για την μοντελοποίηση του πυρήνα της στροβιλότητας. Το μοντέλο Scully συμπεριλαμβάνει έναν συνεκτικό πυρήνα στην πηγή στροβιλότητας ώστε να αποφεύγονται αριθμητικές ανωμαλίες στο κέντρο της. Έτσι λοιπόν οι Shives και Crawford καταλήγουν στο ότι η επαγόμενη ταχύτητα είναι αρκετά κοντά στην αναλυτική λύση. Γενικά γνωρίζουν ότι η ακτίνα του πυρήνα στροβιλότητας για το ακροπτερύγιο πρέπει να είναι περίπου το 5-10 της τοπικής χορδής, αλλά και ότι ο πυρήνας στροβιλότητας είναι περίπου  $rn=0.4\varepsilon$  οπότε θέλουμε  $\varepsilon/c=1/8,1/4$ , απαίτηση που οδηγεί σε ανάγκη για πολύ πυκνά πλέγματα στην περιοχή του AL. Στα πλαίσια της έρευνας αυτής δοκιμάστηκε και η επίλυση για δύο διαφορετικής πυκνότητας πλέγματα όπου εμφανίζεται μία αύξηση στην επαγωγή κοντά στο ακροπτερύγιο για το πυκνότερο πλέγμα χωρίς να επηρεάζεται το προφίλ στο υπόλοιπο φτερό. Τέλος για πτέρυγα με ελλειπτική κατανομή κυκλοφορίας έγιναν δύο δοκιμές για τον προσδιορισμό του  $\varepsilon$ , η μία πρότεινε σταθερή τιμή του  $\varepsilon$  κατά το εκπέτασμα ενώ η δεύτερη πρότεινε το  $\varepsilon$  να είναι συνάρτηση της τοπικής χορδής της πτέρυγας. Ανεξάρτητα του πόσο μικρή τιμή λαμβάνει το  $\varepsilon$  πάντα παρατηρήθηκε μειωμένη επαγωγή σε σχέση με την αναλυτική λύση, στο ακροπτερύγιο, ενώ περαιτέρω μείωση του  $\varepsilon$  ( $\varepsilon/c < 1/4$ ) οδηγεί σε αριθμητικές αστάθειες. Για το δεύτερο σετ υπολογισμών, με την μεταβλητή τιμή του  $\varepsilon$ , τα αριθμητικά αποτελέσματα είναι πολύ πιο κοντά στην αναλυτική λύση. Οπότε τελικά όσο πιο απλωμένη είναι η κατανομή του όρου πηγής, δηλαδή της δύναμης, το επαγόμενο κατώρευμα είναι πιο αδύναμο.

Τα ανωτέρω ερευνητικά αποτελέσματα έρχεται να ενισχύσει η διδακτορική διατριβή των Tossas και Leonardì [5] όπου βλέπουμε την χρήση του ALM για ανεμογεννήτρια αναφοράς 5 MW σχεδιασμένη από τον Jonkman, οριζόντιου άξονα διαμέτρου 126 m σε συνθήκες ανέμου 8 m/s με λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου  $\lambda=7.55$ . Οι ίδιοι βλέπουν ότι όσο το πλέγμα γίνεται πυκνότερο η υπολογιζόμενη τελική ισχύς αυξάνεται. Ακόμη φαίνεται ότι η εξάρτηση της ισχύος από την πυκνότητα του πλέγματος γίνεται εντονότερη για μικρότερες τιμές του  $\varepsilon$ , καθώς και εντοπίζονται εντονότερες κλίσεις. Εξετάζοντας επιπρόσθετα την κατανομή της αξονικής ταχύτητας κατά το εκπέτασμα για διαφορετικές τιμές του στοιχειώδους μεγέθους του πλέγματος  $\Delta x$  και για διαφορετικές τιμές του πάχους της συνάρτησης κατανομής  $\varepsilon$ , παρατηρείται ότι όσο το  $\varepsilon$  μεγαλώνει τόσο μικρότερη επίδραση της επαγόμενης ταχύτητας από τον ομόροου έχουμε. Αυτό το ερμηνεύουν θεωρώντας ότι για για ίδιο  $\Delta x$  όσο η τιμή του  $\varepsilon$  αυξάνεται γίνεται πιο παχύ το οριακό

στρώμα γύρω από τον ομόρρου μειώνοντας έτσι την στροβιλότητα του πεδίου ροής. Αντιθέτως όσο το  $\varepsilon$  μειώνεται υπάρχει περισσότερη στροβιλότητα καθώς και όσο η τιμή του  $\Delta x$  μειώνεται και υπολογίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια η επίδραση του ομόρρου στο πεδίο ταχύτητας. Τέλος οι Tossas και Leonardi [5] εφαρμόζουν το μοντέλο απωλειών ακροπτερυγίου του Glauert και το συγκρίνουν με τα αριθμητικά αποτελέσματα του AL. Η διόρθωση μειώνει την συνολική δύναμη που ασκείται στην πτέρυγα ,δημιουργώντας έτσι μικρότερη ροπή και άρα παραγωγή χαμηλότερης ισχύος,ενώ η φυσική ερμηνεία που δίνεται είναι ότι η άνωση οδηγείται με μικρότερο ρυθμό στο μηδέν τόσο στην ρίζα όσο και στο άκρο του πτερυγίου της A/G μειώνοντας έτσι την συνολική φόρτισή του. Συμπερασματικά λοιπόν η διδακτορική διατριβή των Tossas και Leonardi για την 5 MW A/G του Jonkman έρχεται να συμφωνήσει με τα ευρήματα του Troldborg [3] όπου όλοι οι υπολογισμοί έγιναν πάνω στις A/G Tjæreborg και NM80 για ομοιόμορφη ροή με  $U_{inf}=10\text{m/s}$ . Όπως φαίνεται από τον Troldborg ,για τιμή του  $\varepsilon=1.5\Delta x$  υπάρχουν ταλαντώσεις στην τιμή του συντελεστή αξονικής επαγωγής  $a_z$ ,υποδεικνύοντας ότι έχει επιλεγεί πολύ μικρή τιμή. Αντιθέτως για μεγάλες τιμές του  $\varepsilon$ ,η διακύμανση της ταχύτητας εξομαλύνεται έντονα εξαλείφοντας έτσι το φαινόμενο του ακροπτερυγίου και της ρίζας του πτερυγίου.

Όπως έγινε αντιληπτό από τα παραπάνω οι τρεις βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την λειτουργικότητα και την αξιοπιστία του AL μοντέλου είναι : η ακτίνα προβολής της δύναμης  $\varepsilon$ ,η πυκνότητα του πλέγματος  $\Delta x/R$  και η πυκνότητα σημείων ελέγχου πάνω στην γραμμή δράσης  $\Delta b/R$ . Στο πλαίσιο περαιτέρω διερεύνησης αλλά και ακριβέστερου προσδιορισμού των κανόνων που διέπουν την επιλογή των προαναφερθέντων παραμέτρων ,έρχονται οι Jha et al.[6] με μία νέα μέθοδο επιλογής αυτών των παραμέτρων. Η μέθοδος τους βασίζεται στην θεώρηση των Shives και Crawford ότι για μία ορθογωνική πτέρυγα το  $\varepsilon/c$ =σταθερό είναι ισοδύναμο με  $\varepsilon/\Delta x$ =σταθερό,γεγονός που δεν ισχύει για μία πτέρυγα με συστροφή. Έτσι, εστιάζουν στην κατανομή της ακτίνας  $\varepsilon$  ,κατά το εκπέτασμα της πτέρυγας και ειδικότερα προτείνουν ελλειπτική κατανομή του  $\varepsilon$ . Η μεθοδολογία που ακολουθούν βασίζεται στην εύρεση μίας ισοδύναμης ελλειπτικής πτέρυγας με κατανομή χορδής  $c^*$  και AR ίδιο με αυτό της υπό μελέτη πτέρυγας,ενώ μέσω αυτής της διαδικασίας προκύπτει ότι  $\Delta x/R<1/30$  και  $\Delta b/\Delta x>1.5$ . Προς απόδειξη της προτεινόμενης μεθοδολογίας τους εξετάζουν αρχικά τις προϋπάρχουσες θεωρήσεις για  $\varepsilon/\Delta x$ =σταθερό και  $\varepsilon/c$ =σταθερό,όπου συγκρίνουν τα αριθμητικά αποτελέσματα των μεθοδολογιών ALM και BEM για τις A/G NREL Phase VI και 5 MW ,χρησιμοποιώντας

ταυτοχρόνως τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για την αεροτομή S809.

Για την πρωταρχική θεώρηση όπου  $e/\Delta x$ =σταθερό παρατηρούν από την ακτινική κατανομή της AoA ότι δεν υπάρχει ούτε μηδενισμός της και άρα υπάρχει υπερεκτίμηση του φορτίου προς το ακροπερύγιο ακόμα και για πολύ μικρούς λόγους  $e/\Delta x$ . Ταυτόχρονα τονίζουν οι ερευνητές ότι η διόρθωση του Prandtl όταν εφαρμόζεται σε AL μεθοδολογίες προκαλεί υποεκτίμηση των φορτίων σε σχέση με αυτά που προβλέπονται από τα πειραματικά μεγέθη για την NREL A/Γ. Πρόκειται λοιπόν για μία τεχνητή διόρθωση που δεν έχει φυσική σημασία αλλά προσπαθεί να διορθώσει την λάθος θεώρηση της λογικής  $e/\Delta x=ct$ . Άλλωστε οι διορθώσεις ακροπερυγίου εφαρμόζονται και έχουν νόημα στις μεθοδολογίες στοιχείων πετυγώσης και όχι στις μεθοδολογίες γραμμής δράσης,μίας και οι δεύτερες επιλύουν πλήρως την τρισδιάστατη ροή και άρα θα έπρεπε να συνυπολογίζουν την επίδραση των στροβίλων της ρίζας και του άκρου της πτέρυγας. Τελικώς η ισχύς υπερεκτιμάται κατά 4.26 % από αυτή της BEM και κατά 5.4 % από αυτή που προβλέπεται από τα πειραματικά δεδομένα.

Η δεύτερη θεώρηση που προτάθηκε από τους Shives και Crawford [4] είναι η ακτίνα  $e$  να είναι ανάλογη της τοπικής χορδής της πτέρυγας,συνιστώντας μάλιστα  $e/c=1/4$  και  $e/\Delta x>4$  που οδηγεί βέβαια σε πολύ πυκνά πλέγματα και άρα οικονομικά ανέφικτα για προσομοιώσεις αιολικών πάρκων ή του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Παρά την βελτίωση των υπολογιζόμενων φορτίσεων από τη γραμμή δράσης ,η αύξηση της φόρτισης στο ακροπερύγιο επιμένει ακόμα και για μειούμενες τιμές του λόγου  $e/c$ . Επιπρόσθετα παρατηρούν οι Jha et al.[6] ότι με αύξηση της απόστασης μεταξύ των σημείων ελέγχου πάνω στην γραμμή δράσης υπάρχει μία αισθητή βελτίωση στην πρόβλεψη των φορτίσεων στο ακροπερύγιο. Το γεγονός αυτό πηγάζει από το αν υπάρχει ακτίνα προβολής της δύναμης αρκετά μεγαλύτερη της απόστασης μεταξύ δύο σημείων ελέγχου τότε θα υπήρχε υπερκάλυψη των κατανομών των δυνάμεων. Ειδικότερα ,αν βρισκόμαστε κοντά στο ακροπερύγιο θα υπήρχε μείωση της ισχύος των αποβαλλόμενων στροβίλων οδηγώντας σε μειωμένες επαγόμενες ταχύτητες και άρα υπερεκτίμηση της γωνίας προσβολής και τελικώς των φορτίσεων. Στην περίπτωση αυτή η απόκλιση μεταξύ υπολογιζόμενη ισχύος από το ALM σε σχέση με αυτή που προκύπτει από το BEM μοντέλο,ανέρχεται στο 1.8 %επιδεικνύοντας εμφανή βελτίωση σε σχέση με την πρώτη περίπτωση.

Τέλος εξετάζοντας την ελλειπτική κατανομή της ακτίνας κατανομής  $e$  παρατηρούν-

ται εμφανείς βελτιώσεις για ένα μεγάλο πλήθος πτερυγίων αλλά και τύπων πλεγμάτων. Ειδικότερα οι εφαπτομενικές και αξονικές φορτίσεις των πτερυγίων της NREL phase VI προβλέπονται ικανοποιητικά από την μέθοδο γραμμής δράσης ,ενώ υπάρχει μείωση των φορτίσεων καθώς κινούμαστε προς το ακροπτερύγιο για  $\epsilon/c^*=0.67$   $\Delta x/R$ =σταθερό και  $\Delta b/\Delta x=1.5$  με ταχύτητα ανέμου 7 m/s. Παρά όμως την ικανοποιητική κατανομή των φορτίσεων η ισχύς δεν μοιάζει να συγκλίνει όσο κι αν γίνεται πυκνότερο το πλέγμα,για  $\Delta x=1/37,1/45,1/64$  ,της οποίας η τιμή έχει 8.4 % απόκλιση σε σχέση με την υπολογιζόμενη από την μεθοδολογία στοιχείων περύγωσης. Όσον αφορά στην A/G NREL 5 MW ,για λόγους  $\epsilon/c^*=1.33$  και  $\epsilon/c^*=0.67$  υπάρχει μία ελαφρά υπερεκτίμηση και αντίστοιχα υποεκτίμηση των φορτίσεων σε σχέση με τις προβλεπόμενες από την BEM μέθοδο,παρόλα αυτά δίνουν ικανοποιητικά και αξιόπιστα αποτελέσματα για ένα εύρος δρομέων εξασφαλίζοντας ταυτοχρόνως μια ρεαλιστικότερη αναπαράσταση των στροβιλών της ρίζας και του άκρου του πτερυγίου.

### 1.3 Το Φαινόμενο του Ακροπτερυγίου και Διορθώσεις

Έτσι διαφαίνεται ότι ένα από τα κυριότερα προβλήματα του ALM είναι η εξάρτηση της υπολογιζόμενης ισχύος από την επιλογή της ακτίνας προβολής της δύναμης  $\epsilon$  ,εμπόδιο που αποφεύγεται με πολύ πυκνά και άρα υπολογιστικά ακριβά πλέγματα.Σε συνδυασμό με το προαναφερθέν πρόβλημα έρχεται και το φαινόμενο του ακροπτερυγίου να ενισχύσει την υπερεκτίμηση των φορτίων που αναπτύσσονται πάνω στην πτέρυγα ειδικά προς το άκρο της.Οι διορθώσεις για τις απώλειες ακροπτερυγίου ,οι οποίες πρωτοεισήχθηκαν στα υπολογιστικά μοντέλα μέσω του Prandtl και του Glauert,ως τον τρόπο διαφοροποίησης μεταξύ του δίσκου ορμής με άπειρο πλήθος πτερυγίων και αυτού μίας πραγματικής ανεμογεννήτριας.Ο Prandtl έδειξε λοιπόν ότι η κυκλοφορία των πραγματικών δρομέων τείνει ασυμπτωτικά στο μηδέν καθώς πλησιάζουμε στο άκρο του πτερυγίου. Στην εργασία των Daniel Micallef et al. [7] , όπου διεξήγαγαν πειραματικές μετρήσεις στην δίπτερη πειραματική A/G TU Delft σε αεροδυναμική σήραγγα προσομοιώνοντας το χρονικά μεταβαλλόμενο φαινόμενο με την μέθοδο των panel και ειδικότερα με την διατύπωση πηγών-διπόλων προέκυψε από τα πειραματικά δεδομένα ότι υπάρχει μια περιοχή υψηλής στροβιλότητας η οποία ξεκινάει από την ακμή προσβολής. Ταυτόχρονα υπάρχει και κατανομή στροβιλότητας κατά το πάχος του πτερυγίου



προκαλούμενη από την κατανομή στροβιλότητας που υπάρχει κατά μήκος της χορδής του πτερυγίου. Πίσω από την ακμή εκφυγής σχηματίζεται ένας συμμετρικός στρόβιλος ακροπτερυγίου του οποίου η μέγιστη τιμή στροβιλότητας εντοπίζεται ελαφρώς πιο μέσα από την ακμή. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι κοντά στο πτερύγιο η ροή κυριαρχείται από την κατανομή στροβιλότητας που έχουμε πάνω του. Ως γνωστόν, για πεπερασμένα πτερύγια, εντοπίζουμε μια κατανομή πετάλου πάνω στο πτερύγιο όπου γύρω στο 90 % του εκπετάσματος η κατανομή γίνεται παράλληλη με την χορδή. Η ακτινική κατανομή της στροβιλότητας ειδικά κοντά στην ακμή εκφυγής αποκτά μεγάλο μέτρο και για να αντισταθμιστεί η διεύρυνση που προκαλείται λόγω του ομόρρου, μετατοπίζεται ο αποβαλλόμενος στρόβιλος προς το εσωτερικό του πτερυγίου. Τελικά επάγονται αξονικές ταχύτητες στο άκρο του πτερυγίου επηρεάζοντας την τοπική ταχύτητα και επομένως την γωνία προσβολής και την φόρτίσή του.

Ως εκ' τούτου ακολουθεί η σειρά του Shen [7] όπου προτείνει μία διόρθωση για την εξάλειψη του φαινομένου του ακροπτερυγίου, όπου μαζί με τους Mikkelsen και Sorensen [7] βασιζόμενοι στα προϋπάρχοντα μοντέλα διόρθωσης του φαινομένου του ακροπτερυγίου προτείνουν μία πιο γενική διόρθωση για τους αδιάστατους συντελεστές άνωσης και αντίστασης, χρησιμοποιώντας μια κατάλληλη συνάρτηση που πρότεινε ο Glauert για την μοντελοποίηση του φαινομένου που έθιξε ο Prandtl. Η διόρθωση βασίζεται στο γεγονός ότι η δύναμη στο ακροπτερύγιο πρέπει να τείνει στο μηδέν καθώς και ότι υπάρχει εξίσωση των πιέσεων στις πλευρές υπερπίεσης και υποπίεσης. Έτσι προτείνουν να πολλαπλασιάζονται με μία κατάλληλη συνάρτηση οι αδιάστατες μεταβλητές άνωσης και αντίστασης που έχουν προκύψει από 2D ανάλυση των στοιχείων πτερύγωσης. Ο Shen στην αρχή πρότεινε και η εφαπτομενική αλλά και η αξονική συνιστώσα να πολλαπλασιάζονται με την ίδια συνάρτηση  $F1$  που προέκυψε από το μοντέλο απωλειών ακροπτερυγίου του Glauert. Για την αξιολόγηση της ποιότητας του μοντέλου του, ο Shen χρησιμοποίησε τα πειραματικά δεδομένα που ήταν διαθέσιμα για τις A/G NREL και WG 500 για  $\lambda < 5.4$  και  $\lambda > 5.4$  αντίστοιχα, ενώ χρησιμοποίησε την BEM μέθοδο για την διεξαγωγή των υπολογισμών. Από τις προσομοιώσεις που έλαβαν χώρα για την A/G NREL φάνηκε ότι κανένα από τα κλασικά μοντέλα δεν κατάφερε να προβλέψει σωστά τις φορτίσεις στην περιοχή του ακροπτερυγίου. Υπήρχε όμως αισθητή βελτίωση μέσω της διόρθωσης του Shen, το οποίο όμως αδυνατούσε να λειτουργήσει για ταχύτητες ανέμου από 10-14 m/s. Όσον αφορά στα αποτελέσματα για τον σουηδικό ρότορα WG 500 οι πειραματικά προσδιορισμένες συνιστώσες δύναμης ώσης και περιστροφής προσεγγί-

ζονται καλύτερα από την BEM με την διόρθωση του Shen σε σχέση με την διόρθωση του Glauert. Από τις προσομοιώσεις που έλαβαν χώρα φάνηκε ότι η υπολογιζόμενη κανονική συνιστώσα της δύναμης για τις μεθόδους BEM και AL με την διόρθωση του Shen προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια τα πειραματικά δεδομένα, ενώ η BEM μέθοδος με την κλασική διόρθωση αδυνατεί να προβλέψει σωστά αποτελέσματα κοντά στην περιοχή του ακροπτερυγίου.

Τελικά μία νέα διόρθωση τύπου απωλειών ακροπτερυγίου ήρθε να καλύψει τις αδυναμίες της διόρθωσης του Shen, από τους Pirrung G.R. et al. [3], καθώς και αποδείχθηκε ότι είναι πιο κοντά στα πειραματικά δεδομένα η αξονική και εφαπτομενική συνιστώσα της δύναμης να διορθώνονται ανεξάρτητα η μία από την άλλη. Η θεώρηση αυτή προκύπτει από το φυσικό φαινόμενο της επαγόμενης ταχύτητας λόγω των στροβίλων ακροπτερυγίου, οι οποίοι μέσω του επαγόμενου κατωρεύματος επηρεάζουν την τοπική γωνία προσβολής και άρα τα φορτία των πτερυγώσεων τόσο σε μέτρο όσο και σε διεύθυνση. Επομένως η επαγόμενη αντίσταση, λόγω την στροφής του διανύσματος της άνωσης, προκαλεί μεγαλύτερη μείωση στην εφαπτομενική συνιστώσα της δύναμης σε σχέση με την αξονική στην περιοχή του ακροπτερυγίου. Τα παραπάνω ισοδυναμούν όχι μόνο με την αλλαγή του μέτρου της δύναμης αλλά και με την περιστροφή του διανύσματος της. Αυτή η πιο φυσικά αποδεκτή διόρθωση βασίζεται σε ορισμένες παραδοχές:

1. Η αξονική δύναμη αρχικά προσεγγίζεται επαρκώς από την διόρθωση του Shen.
2. Η γωνία της ροής είναι μικρή και άρα η επιρροή του στροβίλου του ακροπτερυγίου στην σχετική ταχύτητα της ροής.
3. Αλλαγές στην ανωστική δύναμη οφείλονται αποκλειστικά σε αλλαγές στην AoA.
4. Έχουμε χαμηλές ταχύτητες της ροής.

Έτσι για την αξιολόγηση της νέας διόρθωσης χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικοί ρότορες: αυτός της Vestas V29 διαμέτρου 29.2 m, αυτός της NREL 5MW διαμέτρου 126 m και της MEXICO διαμέτρου 4.5 m, με ταχύτητες ανέμου 7,8 και 15.6 m/s αντίστοιχα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου δίσκου δράσης (AD) έγινε με τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την BEM μέθοδο, την ALM αλλά και από την μέθοδο γραμμής άνωσης με ελεύθερο ομόρρο. Επιπροσθέτως προτάθηκε και μία

περεταίρω διόρθωση για την αξονική συνιστώσα της δύναμης οπότε η αξιολόγηση έγινε μέσω διαφορετικών συνδυασμών για τις δύο συνιστώσες της δύναμης. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε η διόρθωση του Shen και για τις 2 συνιστώσες, μετέπειτα χρησιμοποιήθηκε η τροποποιημένη έκφραση και για τις δύο συνιστώσες ενώ τέλος χρησιμοποιήθηκε η βελτίωση της εφαπτομενικής δύναμης με την αξονική δύναμη να δίνεται από την σχέση του Shen την μία περίπτωση και από την τροποποίηση την δεύτερη φορά. Συνολικά λοιπόν υπήρξαν 4 δοκιμαστικά σενάρια. Έτσι προέκυψε ότι η διόρθωση του Shen προσέγγιζε ικανοποιητικά τα αποτελέσματα της αξονικής δύναμης για τον ρότορα V29 ,έχοντας όμως κατά το εκπέτασμα περιοχές υποεκτίμησης της φόρτισης. Η χρήση της ίδιας διόρθωσης και για τις δύο συνιστώσες οδηγεί σε αισθητή υπερεκτίμηση της φόρτισης ενώ η χρήση της βελτιωμένης διόρθωσης για την εφαπτομενική δύναμη έδωσε πολύ κοντινά αποτελέσματα με αυτά της BEM μεθοδολογίας. Παρεμφερή αποτελέσματα εντοπίζονται και για τους άλλους δύο ρότορες όπου η χρήση της διόρθωσης του Shen οδηγεί σε έντονα σφάλματα στους υπολογισμούς ,που όμως εξαλείφονται με την χρήση της ξεχωριστής διόρθωσης για την εφαπτομενική συνιστώσα.

## 1.4 Διόρθωση Συνεκτικού Πυρήνα

Σειρά είναι πλέον του Dag K.O. και της διδακτορικής του εργασίας [8] ,όπου μαζί με τον Sørensen [9] σε μία αναφορά του 2017 επανέρχονται στο θέμα των απωλειών του ακροπτερυγίου και προτείνουν μία νέα διόρθωση για μεθοδολογίες AL. Για την επίτευξη ακριβών υπολογισμών στο ακροπτερύγιο μιας A/Γ είχε γίνει πλέον γνωστό από τα προηγούμενες ερευνητικές εργασίες ότι είναι απαραίτητη η προβολή της δύναμης σε πλάτος μικρότερο από την τοπική χορδή στο σημείο υπολογισμού. Η απαίτηση αυτή επιβάλλει τη χρήση πολύ πυκνών πλεγμάτων. Από την άλλη η προβολή της σημειακά υπολογιζόμενης δύναμης σε ένα μεγάλο πλάτος ενδεχομένως να οδηγεί σε αφύσικα μεγάλες φορτίσεις στην άκρη της πτέρυγας. Έτσι ο Sorensen και ο Dag K.O. διερευνούν τα όρια των τιμών που μπορεί να λάβει η διάσταση του πλέγματος,  $\Delta x$  και το πάχος της Gaussian προβολής της δύναμης,  $\epsilon$ .

Το φυσικό φαινόμενο που διέπει το υπο μελέτη πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι ο ομμόρους επάγει ταχύτητες επάνω στην πτέρυγα με αποτέλεσμα να μειώνεται η γωνία προσβολής στα πλαίσια συνεχούς κατανομής της κυκλοφορίας γύρω από την

πτέρυγα. Ως εκ τούτου βασιζόμενοι στην θεωρία γραμμής άνωσης του Prandtl η κυκλοφορία κοντά στην άκρη του πτερυγίου θα έπρεπε να τείνει στο μηδέν. Η προσέγγιση τους λοιπόν βασίζεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση προσομοίωσης της πτέρυγας με την μέθοδο AL καθοριστικό ρόλο παίζει η τιμή του πυρήνα  $\epsilon$  ή οποία με την σειρά της επηρεάζει το κέντρο των αποβαλλόμενων στροβίλων – το οποίο και δρα ως συνεκτικό ρευστό με αποτέλεσμα να επάγεται διαφορετικό πεδίο ταχυτήτων στην πτέρυγα σε σχέση με αυτό που προβλέπεται από την θεωρία γραμμής άνωσης (LL). Ο Dag K.O. τονίζει ότι η υπερεκτίμηση τις φόρτισης του ακροπτερυγίου μιας A/G είναι γνωστό φαινόμενο παρόλα αυτά δεν έχει αναπτυχθεί ακόμα ένα αξιόπιστο μοντέλο που να επιλυει το προαναφερθέν πρόβλημα. Υπάρχουν δύο κύρια αίτια για την εμφάνιση του προβλήματος. Αφενός η χρήση της κατανομής για την προβολή της δύναμης οδηγεί στην παραγωγή στροβίλων με σχετικά μεγάλους συνεκτικούς πυρήνες που οδηγούν σε υποεκτίμηση της επαγόμενης ταχύτητας στην πτέρυγα και άρα υπερεκτίμηση της φόρτισης. Αφετέρου η μοντελοποίηση των πτερυγίων γίνεται μέσω μιας γραμμής και έτσι δυσχαιρένεται ο υπολογισμός του επαγόμενου πεδίου ταχύτητας από τον ομόρρου κατά μήκος της χορδής. Στα πλαίσια σύγκρισης του ALM, διενεργούνται υπολογισμοί στην A/G NREL Phase VI Rotor για αραιό πλέγμα και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της θεωρίας BEM (blade element momentum). Διαπιστώνεται πως στο εσωτερικό κομμάτι του πτερυγίου έχουμε αρκετά όμοια αποτελέσματα, ενώ προς το εξωτερικό του πτερυγίου υπάρχει εμφανής υπερεκτίμηση του φορτίου, ενώ στο ακροπτερύγιο δεν υπάρχει μηδενισμός της δύναμης. Παρόλα αυτά η χρήση της διόρθωσης του Prandtl στους υπολογισμούς του ALM μοντέλου δεν διορθώνει την κατάσταση, και μάλιστα οδηγεί σε υποεκτίμηση της παραγόμενης δύναμης καθώς οδηγούμαστε προς το άκρο του πτερυγίου. Συμπεράσματα που όμως ισχύουν για υπολογισμούς σε αραιό πλέγμα. Για περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης που έχει η τιμή του πυρήνα  $\epsilon$  της κατανομής θεωρούν το απλουστευμένο παράδειγμα της μη περιστρεφόμενης παραλληλόγραμμης πτέρυγας απαρτιζόμενη από την αεροτομή NACA0012 εκπετάσματος 10 m και χορδής 1 m με ομοιόμορφη ταχύτητα εισόδου 8 m/s, με γεωμετρική AoA 5°. Θέλοντας λοιπόν οι Dag και Sorensen να κατανοήσουν την συσχέτιση της ακτίνας προβολής της δύναμης  $\epsilon$  με την υπολογιζόμενη δύναμη συνέκριναν τα αποτελέσματα της γραμμής δράσης (AL) με αυτά της μη συνεκτικής λύσης για την γραμμής άνωσης (LLT) όπου διαφαίνεται από την ακτινική κατανομή της κυκλοφορίας ότι όσο η τιμή του πάχους της προβολής της δύναμης μικραίνει τόσο τα αριθμητικά αποτελέσματα τείνουν προς την λύση της θεωρίας της γραμμής άνωσης και τόσο η υπερεκτίμηση της φόρτισης προς το ακροπτερύγιο μικραίνει. Έτσι ανεξαρτήτως

της τιμής του  $\epsilon$  υπάρχει μια αύξηση της κυκλοφορίας προς το ακροπερύγιο.

Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπάρχει υποεκτίμηση της επαγόμενης ταχύτητας από τον ομόροου στο άκρο της πτέρυγας οδηγώντας σε αύξηση της γωνίας προσβολής και άρα ισχυρότερη κυκλοφορία. Για να αποφευχθεί η επιρροή του ομόροου όσο και των στροβίλων του ακροπερυγίου, γίνονται οι ίδιοι υπολογισμοί για μια πτέρυγα απείρου μήκους. Παρατηρείται ότι για μεγάλες τιμές του  $\epsilon$  υπάρχει κατανομή ταχύτητας ενώ για μικρές τιμές του  $\epsilon$  η λύση τείνει στην μη συνεκτική λύση ενός διακριτού πεδίου ταχυτήτων. Ως εκ τούτου η χρήση μεγάλων τιμών του  $\epsilon$  οδηγεί σε υπερεκτίμηση της επαγόμενης ταχύτητας και άρα του φορτίου. Μια γρήγορη λύση θα ήταν η μείωση του  $\epsilon$ , που όμως οδηγεί σε ανακρίβειες για την θέση του κέντρου του αποβαλόμενου στροβίλου οδηγώντας σε φαινόμενα αυτεπαγωγής και άρα αριθμητικές αστάθειες κατά την επίλυση. Ακόμη λαμβάνοντας υπόψη ότι έχουμε πτέρυγα σταθερής χορδής και μηδενικής συστροφής ο μόνος παράγοντας που επηρεάζει την κυκλοφορία είναι η τοπική γωνία προσβολής, μιάς και όλοι οι υπολογισμοί γίνονται στο  $c/4$  και άρα δεν υπάρχει ο όρος της αυτεπαγωγής. Επιπρόσθετα ο Dag στην διατριβή του έχει ήδη καταλήξει στο ότι η επαγωγή αυξάνεται μειούμενου του πάχους  $\epsilon$  της κατανομής, παρόλο που ταυτόχρονα μειώνεται η κυκλοφορία και άρα έχουμε μειούμενης έντασης αποβαλόμενους στροβίλους στο ακροπερύγιο. Για την απόδειξη του ανωτέρου ο Dag χρησιμοποιεί μια γραμμή στροβιλότητας ισοδύναμης άνωσης με αυτή που θα αντιστοιχούσε σε πτέρυγα απείρου μήκους με συνθήκες ρόης  $8 \text{ m/s}$  και  $\text{AoA}=5$  μοίρες και πλοτάρει την μεταβολή της επαγόμενης ταχύτητας συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο της στροβιλότητας. Διαφαίνεται επομένως πως όσο μικρότερη η τιμή του  $\epsilon$  τόσο μικρότερος είναι ο συνεκτικός πυρήνας του αποβαλόμενου στροβίλου και άρα αύξηση του  $\epsilon$  μειώνει την υπολογιζόμενη επαγωγή στο ακροπερύγιο προκαλώντας μεγαλύτερη γωνία προσβολής από την αναμενόμενη. Η λύση του προβλήματος που περιέγραψαν οι Dag και Sorensen έρχεται να καλυφθεί από την θεώρηση ενός μοντέλου στροβιλότητας με συνεκτικό πυρήνα, και ειδικότερα του Lamb-Oseen στροβίλου. Χρησιμοποιώντας το αναλυτικό μοντέλο που αναπτύχθηκε από τους παραπάνω υπολογίζουν την ελλειπόμενη επαγωγή εξαιτίας της ύπραξης συνεκτικών δυνάμεων όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα για την ύπραξη συνεκτικών στροβίλων και την επαγωγή που προβλέπεται από τον νόμο των Biot-Savart για μη συνεκτικούς στροβίλους.

Η εν προκειμένω διόρθωση λαμβάνει χώρα κατά τον υπολογισμό των τοπικών γωνιών προσβολής, όπου η συνολική επιπρόσθετη επαγωγή προστίθεται στην τοπική τα-

χύτητα και άρα τροποποιείται και η AoA. Η αξιολόγηση της διόρθωσης γίνεται αρχικά μέσω της σύγκρισης της υπολογιζόμενης κυκλοφορίας με αυτή που προκύπτει από την τεχνική γραμμής άνωσης για απλώς μετατοπιζόμενη παραλληλόγραμμη πτέρυγα  $AR=10$  και  $AR=6$  m και σταθερής χορδής  $c=1$  m, όπου υπάρχει πολύ καλή προσέγγιση της αναλυτικά υπολογιζόμενης κυκλοφορίας συναρτήσεως του εκπετάσματος. Επόμενο βήμα για τον έλεγχο της αξιοπιστίας της διόρθωσης είναι η σύγκριση των φορτίσεων με αυτές που προκύπτουν από την BEM για τις A/Γ NREL Phase VI και NREL 5-MW, οι οποίες έχουν αντίστοιχα διαμέτρους 10,058 m και 126 m. Για όλες τις πιθανές δοκιμές που έγιναν με μεταβλητές τιμές του  $\epsilon$  αλλά και του στοιχειώδους μήκους του πλέγματος η διόρθωση επέφερε αποδεκτή βελτίωση των αποτελεσμάτων ακόμα και για αραιά πλέγματα της τάξης των 5 υπολογιστικών σημείων ανά πτερύγιο ενώ σίγουρα ήταν ανεξάρτητη πλεγματικά για τιμές της ακτίνας  $\epsilon$  ίσες με  $2\Delta x$  ως  $3\Delta x$ . Επιπλέον για αραιά πλέγματα η διόρθωση μείωνε την αύξηση φόρτισης που υπήρχε στο ακροπερύγιο από 23 σε 5 και από 77 σε 17 για τις αξονικές και ακτινικές συνιστώσες της φόρτισης αντίστοιχα και για τους 2 ρότορες. Τελικώς επέφερε καλύτερα αποτελέσματα για την NREL 5 MW A/Γ η οποία και είχε μικρή τιμή του  $\epsilon$ .

Τις παρατηρήσεις των Sorensen και Dag έρχονται να επιβεβαιώσουν με μαθηματικές αποδείξεις οι Forsting Pittung και Garcia [10], ότι δηλαδή η προβολής της δύναμης μέσω μίας συνάρτησης Gauss ισοδυναμεί με την παραγωγή στροβίλων Lamb-Oseen με συνεκτικό πυρήνα  $r$  ίσο με την ακτίνα προβολής της δύναμης  $\epsilon$ . Ενώ ακόμη αποδεικνύουν ότι ο παραγόμενος στρόβιλος που βρίσκεται πάνω στην πτέρυγα οδηγεί και στη δημιουργία στροβίλων ομόρου με τον ίδιο συνεκτικό πυρήνα. Συμπερασματικά πλέον το μείζον πρόβλημα στις Actuator Line μεθοδολογίας δεν είναι το φαινόμενο των απωλειών ακροπερυγίου ούτε η εύρεση διορθώσεων που στοχεύουν στην αλλαγή των ήδη υπολογισμένων φορτίσεων, αλλά είναι η διόρθωση του ελλείμματος επαγόμενης ταχύτητας που υπάρχει στην πτέρυγα λόγω της ύπαρξης συνεκτικών στροβίλων στον κοντινό ομόρου των πτερυγίων. Ως εκ τούτου οι Forsting et al. προτείνουν μία παρεμφερή με του Sorensen διόρθωση βασιζόμενοι στα μοντέλα κοντινού ομόρου και συγκεκριμένα στις έρευνες των NWM Pittung et al [11]. Έτσι, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα υπολογίζεται το συνολικό έλλειμμα επαγωγής σε κάθε τομή ή σημείο ελέγχου της πτέρυγας για την αρχική χρονική στιγμή όπου η γωνία μεταξύ της στοιχειώδους αποβαλλόμενης στροβιλότητας και της πτέρυγας είναι μηδενική. Μετέπειτα, προς αποφυγή των δαπανηρών υπολογισμών που προβλέπονται από την επίλυση των εξισώσεων

Biot-Savart για κάθε υπολογιστικό σημείο των πτερυγίων για κάθε χρονική στιγμή του φαινομένου, προσομοιώνεται η μείωση της επαγωγής λόγω της απομάκρυνσης του ομόρου μέσω εκθετικών συναρτήσεων, όπως πρότειναν οι Pirrung et al. [11], [12]. Κι έτσι τελικά διορθώνεται η ταχύτητα στα  $c/4$  της εκάστοτε αεροτομής που περιγράφει γεωμετρικά την πτέρυγα της Α/Γ. Όπως ανωτέρω σχολιάστηκε η στροβιλότητα του ομόρου έχει συνεκτικό πυρήνα επαγοντας μικρότερες ταχύτητες στο ακροπτερύγιο οδηγώντας σε υπερεκτίμηση της ισχύος. Στα πλαίσια διόρθωσης της σταθεράς  $\epsilon$ , της κατανομής της δύναμης, οι Forsting A.R M. Et al. συγκρίνουν τα αριθμητικά αποτελέσματα της διορθωμένης AL μεθόδου με αυτά της γραμμής άνωσης για την Α/Γ NREL 5MW. Συγκεκριμένα το έλλειμμα επαγόμενης ταχύτητας που προκύπτει λόγω του φαινομένου απωλειών του ακροπτερυγίου αντισταθμίζεται με την αναπαράσταση του ομόρου ως μια σειρά από πηγές στροβιλότητας η οποίες επάγουν ανά χρονική στιγμή και ανά σημείο του πλέγματος μια συνολική ταχύτητα βάσει τον νόμο των Biot-Savart. Ταυτόχρονα για επαλήθευση των υπολογισμών μέσω του διορθωμένου AL μοντέλου, επιλύεται η ροή με την μη συνεκτική επίλυση της LL αλλά και με την συνεκτική επίλυση της LL όπου χρησιμοποιείται εύρος συνεκτικού πυρήνα ίσο με την τιμή του  $\epsilon$  που χρησιμοποιήθηκε για το ALM. Οι υπολογισμοί έγιναν στη μέγιστη ώση και ισχύ ώστε να έχουμε τα μεγαλύτερα δυνατά αποτελέσματα του φαινομένου απωλειών ακροπτερυγίου. Η υπολογισμοί με τη διόρθωση του Shen παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στις αλλαγές του πλέγματος. Ταυτόχρονα η διόρθωση του  $\epsilon$  παρουσιάζει καλύτερη κατανομή των φορτίσεων στο πτερύγιο με μια ελαφρά υπερεκτίμηση των δυνάμεων προς το ακροπτερύγιο. Συγκεκριμένα για το αραιότερο πλέγμα έχουμε 3 % και 6 % για τις κατακόρυφες και εφαπτομενικές δυνάμεις αντίστοιχα ενώ για υποδιπλασιασμό του  $\Delta x$  καταλήγουν σε 0.5 % και 2% αντίστοιχα. Συμπερασματικά καταλήγουν ότι μπορούμε να λάβουμε μια ακριβή κατανομή των φορτίων στην πτέρυγα ακόμη και για αραιά πλέγματα. Ενδεχομένως δηλώνουν να υπάρχει χωρική εξάρτηση λόγω του ότι το τρέχον μοντέλο υπολογίζει το επαγόμενο πεδίο ταχύτητας στο εκάστοτε πτερύγιο μόνο από την στροβιλότητα που αυτό αποβάλλει. Τα διαγράμματα που παρατίθενται είναι για τους συντελεστές άνωσης και ισχύος για την NREL 5MW για τρεις διαφορετικές ταχύτητες ομοιόμορφης ροής, αλλά και για τις αξονικές και εφαπτομενικές δυνάμεις, όπου  $\Delta x=R/20$  και  $\epsilon=2\Delta x$ .

Οι Trolborg και Forsting [13] σε μία γενικότερη απόπειρα προσδιορισμού ακριβέστερων οδηγιών για την επιλογή της ακτίνας προβολής της δύναμης  $\epsilon$ , και του στοιχειώδους μήκους του υπολογιστικού πεδίου  $\Delta x$ , δημιουργούν μία συνάρτηση σφάλματος η

οποία συνδέει το σφάλμα στον υπολογισμό της άνωσης με τη χορδή, το  $\epsilon$  και τον λόγο  $\epsilon/\Delta x$ . Η συνάρτηση αυτή εκφράζει το σφάλμα λόγω αυτεπαγωγής που παλαιότερα θεωρούνταν αμελητέο ως πτώση της στροβιλικότητας κατά το μήκος ενός υπολογιστικού κελιού. Μέσω αυτής της συνάρτησης καταρρίπτεται η γενικότερη θεώρηση περί  $\epsilon/\Delta x < 2$  ως επαρκές όριο. Επιπροσθέτως για την διατήρηση της ανωστικής δύναμης σταθερής το στοιχειώδες μήκος της υπολογιστικής κυψέλης πρέπει να αυξάνεται με γρηγορότερο ρυθμό από το  $\epsilon$ . Τέλος συγκρίνουν το έλλειμα της υπολογιζόμενης ταχύτητας μεταξύ AL και Lamb-Oseen για την NREL 5MW A/Γ με  $\epsilon/\Delta x = 2,4$  για μη συνεκτική ροή με επίλυση των RANS. Καταλήγουν λοιπόν στο ότι μικρότερες τιμές του  $\epsilon$  οδηγούν σε μεγαλύτερο σφάλμα παρά το γεγονός ότι επιφέρει χαμηλότερη φόρτιση στο φτερό αλλά και καλύτερη προσομοίωση του κοντινού ομόρρου. Συμπερασματικά τονίζεται στο ερευνητικό έργο των Forsting και Troldborg ότι παρά το μικρό μέτρο της αυτεπαγωγής, επέρχονται αλλαγές στις τοπικές γωνίες προσβολής, οι οποίες έχουν αισθητή επίδραση στην υπολογιζόμενη ισχύ. Προτείνουν έτσι την χρήση όσο μεγαλύτερης ακτίνας προβολής  $\epsilon$  γίνεται, ανά περίπτωση, σε συνδυασμό με την χρήση της προταθείσας διόρθωσης από τους Forsting και Pirrung, καθώς και μέσω αυτής ελαχιστοποιείται το σφάλμα στις φορτίσεις των πτερυγίων.

## 1.5 Βιβλιογραφικό Κενό

Στόχος λοιπόν την παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της αξιοπιστίας της πιο πρόσφατης διόρθωσης που υπάρχει, της smearing correction, αλλά και η εφαρμογή της σε διαφορετικούς δρομείς από αυτούς που έχει ήδη δοκιμαστεί. Κατ' επέκταση όπως έγινε σαφές από τα ανωτέρω, κατά γενικό κανόνα ο έλεγχος της αξιοπιστίας των λειτουργικών παραμέτρων της μεθόδου γραμμής δράσης αλλά και των διαθέσιμων διορθώσεων γίνεται μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων με άλλες engineering μεθόδους, όπως αυτή των στοιχείων περύγωσης (BEM), γεγονός που δεν εγγυάται την ορθή αξιολόγηση των υπό μελέτη μοντέλων. Έτσι επιπλέον στόχος αποτελεί η χρήση ενός CFD μοντέλου ως μέτρο σύγκρισης των προκυπτόντων αριθμητικών αποτελεσμάτων για την περαιτέρω διερεύνηση της μεθόδου γραμμής δράσης.



## Κεφάλαιο 2

# Η Μέθοδος Γραμμής Δράσης

### 2.1 Γενική Περιγραφή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος γραμμής Δράσης η οποία χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική για την μοντελοποίηση της υπό μελέτης ανεμογεννήτριας κατά την αριθμητική επίλυση της χρονικά μεταβαλλόμενης ροής. Επιπρόσθετα αναλύονται βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου, τα οποία αργότερα θα χρειαστούν για την κατανόηση των αδυναμιών της μεθόδου αλλά και για την επεξήγηση της προτεινόμενης διόρθωσης. Συγκεκριμένα επεξηγείται :

- ▶ Ο υπολογισμός των αεροδυναμικών φορτίων
- ▶ Ο τρόπος κατανομής των αεροδυναμικών φορτίων ως όρων πηγής στα υπολογιστικά κελιά

Η μέθοδος γραμμής δράσης επιλύει το πεδίο ροής χωρίς να συνυπολογίζει την παρουσία σωμάτων εντός του υπολογιστικού χωρίου. Αντιθέτως αυτά εκφράζονται με την επιβολή όρων πηγής,  $f$ , στις υπολογιστικές κυψέλες, οι οποίοι προκύπτουν από την αλληλεπίδραση των σωμάτων με το περιβάλλον ρευστό. Έτσι το εκάστοτε σώμα που εξετάζεται μοντελοποιείται σαν γραμμή δράσης και έπειτα αυτή διακριτοποιείται σε έναν πεπερασμένο αριθμό ευθύγραμμων τμημάτων, των λωρίδων, που λειτουργούν με την

ίδια λογική με αυτή των στοιχείων περύγωσης. Στην περίπτωση κινούμενων ή στρεφόμενων σωμάτων, όπως τα περύγια μιας Ανεμογεννήτριας η μέθοδος γραμμής δράσης υπαγορεύει την διακριτοποίηση των σωμάτων σε μικρές πτέρυγες πεπερασμένου εκπετάσματος. Σε κάθε λωρίδα είναι γνωστά τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά λόγω της προηγηθείσας δισδιάστατης αεροδυναμικής ανάλυσης που λαμβάνει χώρα στο κέντρο ελέγχου της κάθε λωρίδας.

Η μέθοδος της γραμμής δράσης (Actuator Line Method ) είναι ένα πλήρως τρισδιάστατο και μη μόνιμο αεροδυναμικό μοντέλο για την μελέτη της ροής γύρω από ανεμογεννήτριες. Η μέθοδος συνδυάζει την τρισδιάστατη επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes με την ταυτόχρονη ακτινική κατανομή των δυνάμεων κατά μήκος γραμμών που αναπαριστούν τα περύγια της ανεμογεννήτριας. Έτσι η κινηματική του ομόρρου καθορίζεται πλήρως από την επίλυση των τρισδιάστατων εξισώσεων Navier-Stokes ενώ η επίδραση των περιστρεφόμενων πτερυγίων στο πεδίο ροής εμφανίζεται με την χρήση δισδιάστατων πινακοποιημένων μεγεθών αεροτομών που αντιπροσωπεύουν τις φορτίσεις στα περύγια. Τα μεγέθη των αεροτομών και κατ'επέκταση οι φορτίσεις στα περύγια καθορίζονται επαναληπτικά μέσω υπολογισμού τοπικών γωνιών προσβολής μέσω της κίνησης αυτών αλλά και του τοπικού πεδίου ροής. Η τεχνική λοιπόν αυτή επιτρέπει την αναλυτική μελέτη της δυναμικής του ομόρρου, των στροβίλων ακροπτερυγίου αλλά και της επίδρασής τους στις επαγόμενες ταχύτητες στο επίπεδο του δρομέα.

Στη μέθοδο γραμμής δράσης το κάθε περύγιο προσομοιώνεται από ένα σύνολο κόμβων που σχηματίζουν μία καμπύλη που έχει τη δυνατότητα πλήρους αναπαράστασης της κινηματικής των πτερυγίων ενός δρομέα. Η μέθοδος της γραμμής δράσης λοιπόν είναι ιδανική για την ακριβή αναπαράσταση μη μόνιμων και τρισδιάστατων φαινομένων. Στα πλαίσια της μεθόδου γραμμής δράσης η επίδραση του δρομέα στη ροή μοντελοποιείται μέσω κατάλληλης κατανομής όρων πηγής στο υπολογιστικό χωρίο, οι οποίοι εμφανίζονται στις εξισώσεις διατήρησης της ορμής και της ενέργειας. Οι όροι εφαρμόζονται στα κελιά από τα οποία διέρχονται τα περύγια του δρομέα κατά την περιστροφή τους ενώ προς αποφυγή ιδιομορφιών οι όροι πηγής κατανέμονται και στα γειτονικά κελιά με την χρήση τρισδιάστατων κατανομών Gauss.

## 2.2 Εξισώσεις

Η βάση του μοντέλου είναι οι ασυμπίεστες εξισώσεις Navier-Stokes και συγκεκριμένα η αρχική ιδέα ήταν διατυπωμένη σε μεταβλητές στροβιλότητας-ταχύτητας ενώ αργότερα αναδιατυπώθηκε σε μεταβλητές πίεσης-ταχύτητας. Η μαθηματική διατύπωση της μεθόδου γραμμής δράσης είναι :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V = \frac{-1}{\rho} + \nabla p + \nu \nabla^2 V - \frac{f}{\rho} \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (2.2)$$

Όπου  $f$  είναι οι δυνάμεις στα πτερύγια.

Μετάπειτα η τοπική ταχύτητα σε σχέση με το περιστρεφόμενο πτερύγιο ορίζεται ως :

$$V_{rel} = \sqrt{(V_z^2 + (\omega \cdot r - V_\theta)^2)} \quad (2.3)$$

Όπου  $\Omega$  η γωνιακή ταχύτητα ,  $V_z$  η αξονική συνιστώσα της ταχύτητας και  $V_\theta$  η εφαπτομενική

Η γωνία της ροής μεταξύ της  $V_{rel}$  και του επιπέδου του δρομέα υπολογίζεται ως :

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{V_z}{(\omega \cdot r - V_\theta)} \right) \quad (2.4)$$

Η τοπική γωνία προσβολής δίνεται ως :

$$\alpha = \phi - \gamma \quad (2.5)$$

Όπου  $\gamma$  η τοπική γωνία βήματος.

Από τις ανωτέρω εξισώσεις έχουν προσδιοριστεί η γωνία προσβολής και η σχετική ταχύτητα κι έτσι υπολογίζονται η άνωση και η αντίσταση ως:

$$f = (L, D) = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 \cdot c(C_{LeL}, C_{DeD}) \quad (2.6)$$

Όπου  $C_L = C_L(a, Re)$  και  $C_D = C_D(a, Re)$  οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης αντίστοιχα και  $Re$  ο αριθμός Reynolds

## 2.3 Επιβολή Όρων Πηγής

Οι όροι πηγής εκφράζουν δύναμη ανά μονάδα όγκου. Έχοντας πλέον υπολογίσει τις δυνάμεις στα πτερύγια, χρειάζεται η αναγωγή τους στον όγκο και η στάθμιση του μέτρου τους, διαδικασία που επιτυγχάνεται με διάφορες μεθόδους. Στην παρούσα εργασία ακολουθήθηκε μόνο ισοτροπική κατανομή Gauss. Ακόμη γίνεται μια προσπάθεια επεξήγησης των προβλημάτων που ανακύπτουν λόγω της προβολής της δύναμης στον τρισδιάστατο χώρο.

### 2.3.1 Ισοτροπική Κατανομή Gauss

Με την χρήση μίας κατανομής Gauss υπολογίζεται μία παράμετρος στάθμισης και αναγωγής της δύναμης της κάθε λωρίδας αν όρος πηγής για κάθε κόμβο του πλέγματος. Η αναγωγή αυτή πραγματοποιείται βάσει της απόστασης του κέντρου της υπολογιστικής κυψέλης από τον κόμβο του σώματος. Ουσιαστικά προκύπτει μία σφαιρική κατανομή των δυνάμεων του κάθε διακριτοποιημένου σώματος με κέντρο το σημείο ελέγχου του. Η παράμετρος στάθμισης υπολογίζεται

$$n_e(d) = \frac{1}{\epsilon^3 \cdot \pi^{\frac{3}{2}}} \exp\left(\frac{-d}{\epsilon^2}\right) \quad (2.7)$$

Όπου  $n_e$ : η παράμετρος αναγωγής για τον κόμβο του εξεταζόμενου κελιού με απόσταση  $d$  από το σώμα

$d = |x - se_i|$ : η απόσταση της θέσης του εξεταζόμενου κελιού από την θέση του σώματος

$\epsilon$ : η ακτίνα κατανομής Gauss, η παράμετρος δηλαδή που ρυθμίζει την συγκέντρωση της καταναμημένης δύναμης στον χώρο

Έτσι ο όρος πηγής για κάποιον κόμβο μίας υπολογιστικής κυψέλης με βάση τα αεροδυναμικά φορτία του σώματος υπολογίζεται  $f_e = f \otimes n_e(d)$

Συνηθίζεται η ακτίνα  $\varepsilon$  της ισοτροπικής κατανομής Gauss να επιλέγεται ως πολλαπλάσιο του χαρακτηριστικού μήκους της υπολογιστικής κυψέλης ή ως πολλαπλάσιο της χορδής των ανωστικών σωμάτων. Αν η ακτίνα  $\varepsilon$  ορίζεται ως πολλαπλάσιο της χωρικής διακριτοποίησης επιτυγχάνεται αναλογία με τις διαστάσεις των υπολογιστικών κυψελών, οδηγώντας σε ευσταθείς λύσεις. Αντιθέτως αν η ακτίνα  $\varepsilon$  δηλώνεται ως πολλαπλάσιο της χορδής επιτυγχάνεται ακριβέστερη αναπαράσταση της γεωμετρίας του εξεταζόμενου σώματος.

### 2.3.2 Προβλήματα με την Προβολή Δύναμης

Για την επίτευξη ποιοτικών αποτελεσμάτων ειδικά προς το ακροπερύγιο η ακτίνα  $\varepsilon$  της προβολής της δύναμης πρέπει να είναι μικρότερη από την τοπική χορδή, η οποία όμως όσο πλησιάζουμε στο ακροπερύγιο μικραίνει αισθητά. Έτσι οδηγούμαστε στην χρήση πολύ πυκνών πλεγμάτων που αυξάνουν αισθητά το υπολογιστικό κόστος, ενώ επίσης πολύ μικρές τιμές της ακτίνας  $\varepsilon$  οδηγούν σε τοπικές αστάθειες κατά την αριθμητική επίλυση.

Αντιθέτως η χρήση μεγάλων τιμών της ακτίνας  $\varepsilon$  οδηγεί σε εμφανή υπερεκτίμηση των φορτίων του περυγίου, ειδικά προς το άκρο του. Τα παραπάνω οδηγούν στο εύλογο συμπέρασμα ότι υπάρχει υποεκτίμηση της επαγόμενης ταχύτητας του ομόρρου, γεγονός που οδηγεί στον υπολογισμό μεγαλύτερων γωνιών προσβολής και άρα φορτίσεων. Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονιστεί ότι σημαντικό κομμάτι της μεθοδολογίας γραμμής δράσης είναι ο σωστός υπολογισμός της τοπικής γωνίας προσβολής από την τοπική ταχύτητα. Όμως όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2 η προβολή της δύναμης μέσω μίας γκαουσιανής προβολής με ακτίνα  $\varepsilon$ , δημιουργεί πηγές στροβιλότητας με συνεκτικό πυρήνα ακτίνας ίδιας με αυτής που έχει η γκαουσιανή προβολή. Ως εκ τούτου οι στροβιλότητες του ομόρρου υιοθετούν τον ίδιο συνεκτικό πυρήνα με αυτόν που έχουν οι προσδεδμεμένες στροβιλότητες του περυγίου, και άρα επηρεάζουν τον υπολογισμό της γωνίας προσβολής και των φορτίσεων του περυγίου. Το παρόν φυσικό φαινόμενο θα αναλυθεί διεξοδικά στο κεφάλαιο 3.1.

Στόχος λοιπόν της παρακάτω ενότητας είναι να γίνει μια διερεύνηση της πλεγματικής ανεξαρτησίας της μεθόδου της γραμμής δράσης για τρεις ισοτροπικές τεχνικές προσδιορισμού της γκαουσιανής ακτίνας  $\epsilon$ . Η μέθοδος που θα παρουσιάσει πλεγματικά ανεξάρτητες λύσεις αλλά και ικανοποιητικά αριθμητικά αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθεί για όλες τις προσομοιώσεις που θα γίνουν στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας.

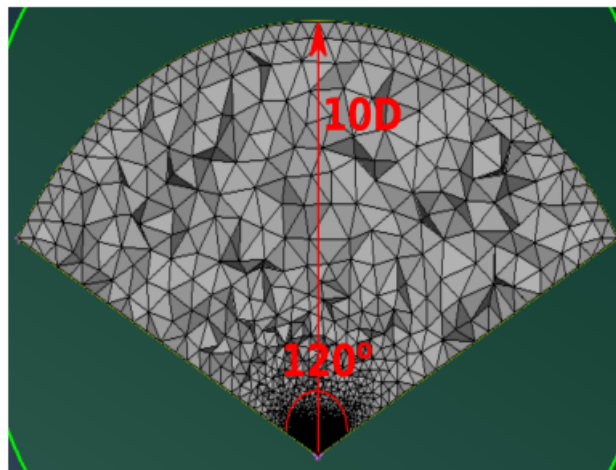
## 2.4 Πλεγματική Ανεξαρτησία

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω υπάρχουν πολλές τεχνικές για τον προσδιορισμό της ακτίνας  $\epsilon$  της γκαουσιανής προβολής της δύναμης. Συνοπτικά συνηθίζεται η ακτίνα  $\epsilon$  της ισοτροπικής κατανομής Gauss να επιλέγεται ως πολλαπλάσιο του χαρακτηριστικού μήκους της υπολογιστικής κυψέλης ή ως πολλαπλάσιο της χορδής των ανωστικών σωμάτων.

Η κλασική μέθοδος όπου το  $\epsilon$  προσδιορίζεται μόνο από το χαρακτηριστικό μήκος  $\Delta x$  αδυνατεί να δείξει πλεγματική ανεξαρτησία. Η μέθοδος αυτή αν και παρουσιάζει αριθμητική σταθερότητα, δεν λαμβάνει υπόψιν την γεωμετρία των πτερυγίων της A/G. Επόμενο είναι λοιπόν να επιλεγεί μία τεχνική μεταβλητής ακτίνας  $\epsilon$ , η οποία είναι ανάλογη της τοπικής χορδής του φτερού της A/G. Η λογική που ακολουθείται είναι η ακτίνα της γκαουσιανής προβολής να εκτείνεται σε μήκος ίσο με την τοπική χορδή. Το πάχος της γκαουσιανής προβολής είναι :  $3\sigma = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot \epsilon = c$  άρα η τοπική χορδή  $\approx 0.47 \cdot \epsilon$ . Η ανωτέρω τεχνική, ενώ επιτρέπει με ακρίβεια την αναπαράσταση της γεωμετρίας του πτερυγίου της A/G, καθώς η τοπική χορδή μειώνεται προς το ακροπτερύγιο μειώνεται δραματικά και η τιμή της ακτίνας  $\epsilon$  της προβολής της δύναμης, με αποτέλεσμα να υπάρχουν αριθμητικές ανωμαλίες. Επιπρόσθετα η μοντελοποίηση των φορτίων βασίζεται σε μόνο μία γεωμετρική ποσότητα αμελώντας έτσι τον τρισδιάστατο χαρακτήρα του προβλήματος οδηγώντας έτσι σε περιορισμένη ακρίβεια.

Για την μελέτη των αριθμητικών παραμέτρων της AL μεθοδολογίας, επιλέγεται η εφαρμογή της σε μία πλήρως αξονοσυμμετρική, μόνιμη περίπτωση ομοιόμορφης ταχύτητας ανέμου 11 m/s. Οι υπόλοιπες λειτουργικές παράμετροι του προβλήματος αμελούνται με στόχο η διάταξη να είναι όσο το δυνατόν πιο απλή. Επιπρόσθετα με στόχο την ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού κόστους επιλύεται ένα μόνο ένα φτερό σε περι-

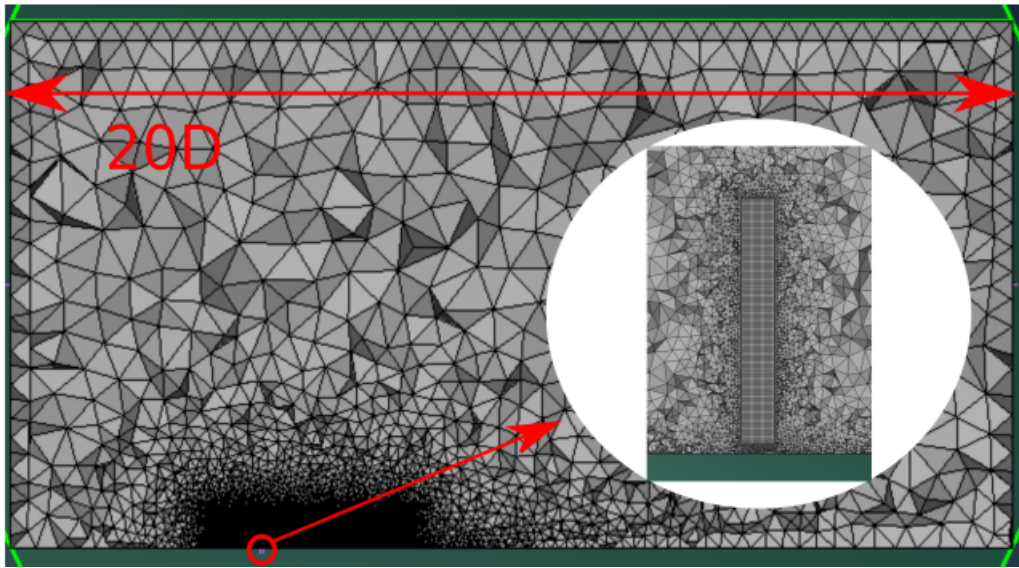
στρεφόμενο πλαίσιο με την εφαρμογή περιοδικών οριακών συνθηκών σε μόνιμη κατάσταση. Το υπολογιστικό χωρίο παρατίθεται στα διαγράμματα 2.4.1 και 2.4.2 και είναι μία κυλινδρική τομή μήκους 20 διαμέτρων του δρομέα της Α/Γ (20D) και ακτίνας 10 διαμέτρων (10D). Στο χωρίο διακρίνονται τρεις περιοχές. Η πρώτη περιβάλλει μία λεπτή περιοχή γύρω από την γραμμή δράσης (AL) και χαρακτηρίζεται από ομοιόμορφο και δομημένο πλέγμα χαρακτηριστικού μήκους  $\Delta x$ . Η λεπτή περιοχή αυτή απλώνεται κατάλληλα γύρω από το πτερύγιο ώστε η τρισδιάστατη προβολή της δύναμης να γίνεται πάνω στο πυκνό πλέγμα χαρακτηριστικού μήκους  $\Delta x$ . Η δεύτερη και ενδιάμεση περιοχή εκτείνεται σε μήκος 1D ανάντη και 3D κατάντη του πτερυγίου και χαρακτηρίζεται από ελαφρώς μεγαλύτερο χαρακτηριστικό μήκος  $\Delta w=10\Delta x$ . Ρόλος αυτής της περιοχής είναι η σωστή απεικόνιση της εξάπλωσης του ομόρρου του δρομέα της Α/Γ. Τέλος έχουμε την εξωτερική περιοχή με το αραιότερο πλέγμα χαρακτηριστικού μήκους  $D/2$ .



**Διάγραμμα 2.4.1.** Περιοδικό πλέγμα. Αξονική όψη

Στην μέθοδο της γραμμής δράσης πρώτο μέλημα είναι ο προσδιορισμός του χαρακτηριστικού μήκους  $\Delta x$ . Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατίθενται στον πίνακα 2.1 και στο διάγραμμα 2.4.3. Στον πίνακα κάθε στήλη περιέχει την υπολογιζόμενη ισχύ σε MW σε συνάρτηση διάφορων τιμών του χαρακτηριστικού μήκους  $\Delta x$  για τρεις τεχνικές προσδιορισμού της ακτίνας προβολής της δύναμης  $\varepsilon$ , οι οποίες παρουσιάστηκαν διεξοδικά στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου.

Παρατηρείται ότι αν ο καθορισμός του πυρήνα  $\varepsilon$  βασίζεται μόνο στο χαρακτηριστικό μήκος του πλέγματος  $\Delta x$  τότε δεν επέρχεται πλεγματική ανεξαρτησία στην μέθοδο. Φυσικό επόμενο είναι να εξεταστεί ο καθορισμός του πυρήνα  $\varepsilon$  με βάση την τιμή



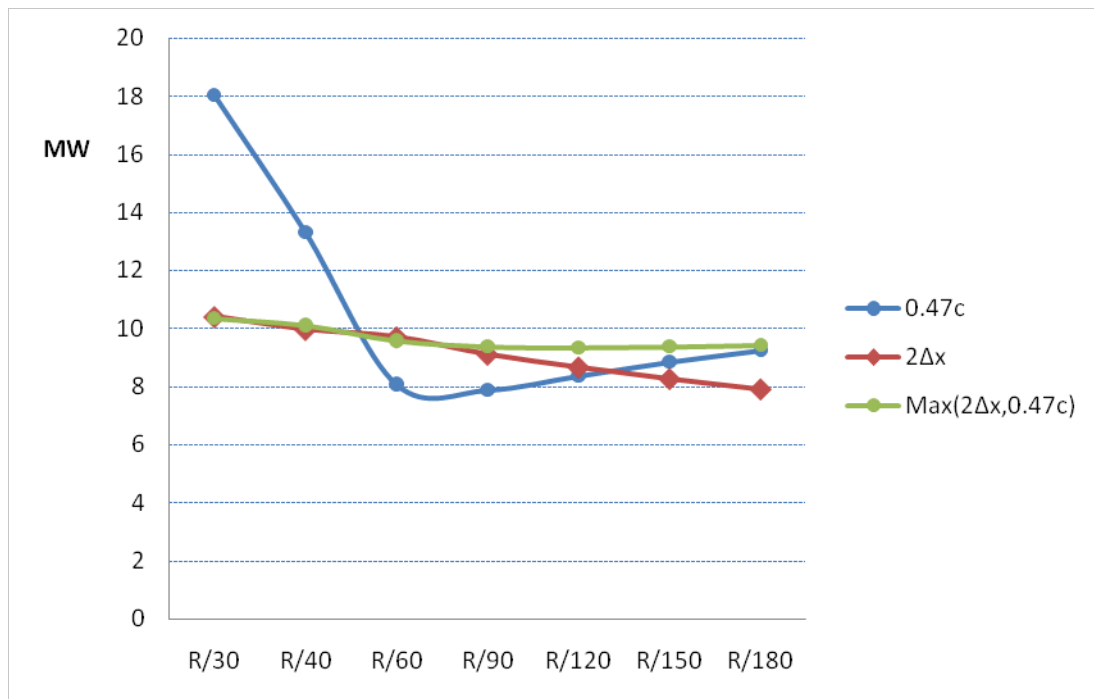
**Διάγραμμα 2.4.2.** Περιοδικό πλέγμα. Πλάγια όψη

| $\Delta x$                  | $\epsilon = 0.47c$ | $\epsilon = 2\Delta x$ | $\epsilon = \max(0.47c, 2\Delta x)$ |
|-----------------------------|--------------------|------------------------|-------------------------------------|
| R/30 (157 χιλιάδες κελιά)   | 94.9%              | 31.4%                  | 9.75%                               |
| R/60 (283 χιλιάδες κελιά)   | -12.6%             | 22.6%                  | 1.7%                                |
| R/90 (495 χιλιάδες κελιά)   | -14.8%             | 15.1%                  | -0.6%                               |
| R/120 (884 χιλιάδες κελιά)  | -9.5%              | 9.5%                   | -0.9%                               |
| R/150 (1500 χιλιάδες κελιά) | -4.3%              | 4.5%                   | -0.5%                               |
| R/180 (2230 χιλιάδες κελιά) | 9.242 MW           | 7.92 MW                | 9.52 MW                             |

Πίνακας 2.1: Μεταβολή της ισχύος με αυξανόμενη την τιμή του χαρακτηριστικού μήκους του δομημένου πλέγματος. Τιμή αναφοράς αντιστοιχεί για  $\Delta x = \frac{R}{180}$

της χορδής που έχει το περύγιο στην εκάστοτε θέση, αναπαριστώντας έτσι την γεωμετρία του. Παρά την επιθυμητή αναπαράσταση του περυγίου εντός του πεδίου ροής η τιμή της γκαουσιανής ακτίνας  $\epsilon$  μπορεί να μικρύνει αισθητά προς το ακροπερύγιο οδηγώντας σε αριθμητικές ανωμαλίες. Συμπερασματικά, παρατηρώντας το διάγραμμα (3) αλλά και λαμβάνοντας υπόψιν όσα αναλύθηκαν παραπάνω επιλέγεται ως μεθοδολογία καθορισμού της ακτίνας η  $\epsilon = \max(0.47 \cdot c, 2 \cdot x)$ , η οποία παρουσιάζει πλεγματικά ανεξάρτητες λύσεις. Αυτή η μεθοδολογία θα χρησιμοποιηθεί για όλες τις προσομοιώσεις που έγιναν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής. Ταυτόχρονα από το διάγραμμα 2.4.3 διαφαίνεται πως ένας πολύ καλός συμβιβασμός ανάμεσα σε υπολογιστικό κόστος και ακρίβεια είναι το χαρακτηριστικό μήκος  $\Delta x = \frac{R}{90}$ .





**Διάγραμμα 2.4.3.** Ανάλυση Πλεγματικής Ανεξαρτησίας. Ισχύς [MW] vs χαρακτηριστικό μήκος [m]

## Κεφάλαιο 3

# Διόρθωση Μεθόδου Γραμμής Δράσης για Περιοδική Περίπτωση

Η υπερεκτίμηση των φορτίσεων στο ακροπερύγιο μίας Α/Γ με την χρήση της μεθόδου γραμμής δράσης είναι γνωστό φαινόμενο. Ταυτόχρονα δεν έχει υπάρξει κάποιο αξιόπιστο ή φυσικό μοντέλο που συμβάλλει στο να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα. Υπάρχουν δύο κύρια αίτια για το φαινόμενο αυτό. Αφενός η χρήση της συνάρτησης προβολής της δύναμης δημιουργεί στροβίλους με σχετικά μεγάλους συνεκτικούς πυρήνες, γεγονός που οδηγεί στην υποεκτίμηση της αξονικής επαγωγής στο επίπεδο του δρομέα και άρα στην υπερεκτίμηση των φορτίσεων του πτερυγίου. Αφετέρου η μοντελοποίηση των πτερυγίων της Α/Γ χρησιμοποιώντας πληροφορίες που βρίσκονται πάνω σε γραμμή και όχι σε επιφάνεια εμποδίζει τον ορθή αναπαράσταση της αλλαγής της επαγωγής κατά μήκος της χορδής.

Μέρος των παραγόντων που οδηγούν στην υπερεκτίμηση της ισχύος αναλύθηκαν από τους [4] όπου συνδέθηκε η ύπαρξη των στροβίλων συνεκτικού πυρήνα με την ακτίνα προβολής της δύναμης, ενώ έγινε αναλυτική διερεύνηση των αριθμητικών παραμέτρων της μεθόδου. Οι συγγραφείς προτείνουν ορισμένους κανόνες στην επιλογή των παραμέτρων που θα συνεισφέρουν στην ακριβή αναπαράσταση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς μίας ελλειπτικής πτέρυγας. Παρόλα αυτά στο ενδεχόμενο προσομοίωσης ενός αεροδυναμικού πάρκου οι προταθείσες παράμετροι θα οδηγούσαν σε τεράστιο υπολογιστικό κόστος. Ο λόγος έγκειται στο ότι οι περισσότερες βιβλιογραφικές προτάσεις για τη βελ-

τίωση της ακρίβειας στον υπολογισμό των φορτίων με τη μέθοδο της Γραμμής Δράσης [6], [5], [12], στοχεύουν στη διαφοροποίηση του τρόπου προβολής των αεροδυναμικών δυνάμεων στο υπολογιστικό πλέγμα και καταλήγουν στην ανάγκη χρήσης πυκνών πλεγμάτων στις περιοχές που λειτουργούν οι Γραμμές Δράσης.

Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλά μηχανιστικά μοντέλα που επιβάλλουν τη μείωση των φορτίων στο ακροπερύγιο (Tip Loss Correction models) [14], τα οποία συνδιάζονται με τη χρήση αραιών υπολογιστικών πλεγμάτων και οδηγούν στην εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου. Ωστόσο, τέτοια μοντέλα βασίζονται σε εμπειρικές τεχνικές που ακολουθήθηκαν στο παρελθόν, όπως η μέθοδος της διόρθωσης των φορτίων στο ακροπερύγιο που προτάθηκε από τον Prandtl [15], σε απλούστερα αεροδυναμικά μοντέλα, όπως η μέθοδος των Στοιχείων Στροβιλότητας που συνδιάζεται με την επίλυση της μονοδιάστατης εξίσωσης Ορμής (Blade Element Momentum Theory). Αν και ιδιαίτερα αποτελεσματικά σε αυτό το πλαίσιο, τα συγκεκριμένα μηχανιστικά εργαλεία δεν βασίζονται σε φυσικά μοντέλα για τη διόρθωση του προβλήματος, με αποτέλεσμα να θυσιάζεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μεθόδου.

Η παρούσα εργασία θα εξετάσει μεθόδους που προτάθηκαν πρόσφατα στη βιβλιογραφία [9], [10] και προσθέτουν ένα επιπλέον κομμάτι επαγόμενης ταχύτητας στις περιοχές που βρίσκονται εντός των μεγάλων συνεκτικών πυρήνα που απελευθερώνονται από τις Γραμμές Δράσης. Στο παρόν κεφάλαιο, όλα τα προαναφερθέντα ζητήματα θα αναλυθούν σε βάθος ενώ θα προταθεί μία νέα μεθοδολογία διόρθωσης για να αποφευχθεί το πρόβλημα της υπερεκτίμησης της ισχύος στην μοντελοποίηση A/Γ με την μέθοδο AL.

### **3.1 Συσχέτιση ακτίνας προβολής της δύναμης με έλλειμα επαγωγής**

Η ισοδυναμία ανάμεσα στο πεδίο ταχύτητας που επάγεται από την γραμμή δράσης και τον συνεκτικό πυρήνα των στροβίλων του ομόρρου μπορεί να αποδειχθεί άμεσα από τις μη συμπίεστες εξισώσεις Navier-Stokes.

Ξεκινώντας από τον στροβιλισμό της ασυμπίεστης εξίσωσης ορμής λαμβάνουμε

την εξίσωση μεταφοράς της στροβιλότητας ως εξής:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \cdot \nabla \omega = \omega \cdot \nabla u + v \nabla^2 \omega + \nabla \frac{f}{\rho} \quad (3.1)$$

Όπου  $v$  η συνεκτικότητα,  $\rho$  η πυκνότητα και  $f$  αντιπροσωπεύει τις δυνάμεις που προκύπτουν από της μέθοδο γραμμής δράσης.

Η ροή γύρω από μία πτέρυγα με μεγάλο AR είναι οριακά δισδιάστατη καθώς και η ροή κατά το εκπέτασμα θεωρείται αμελητέα. Ακόμη συνεκτικά φαινόμενα αγνοούνται για υψηλές τιμές του αριθμού Reynolds. Τέλος για προσκολλημένη ροή θεωρείται ότι η συσχέτιση μεταξύ πεδίου ροής και δυνάμεων είναι σχεδόν μόνιμη. Οπότε τελικώς ισχύουν τα παρακάτω:  $\frac{\partial \omega}{\partial t} = 0$  λόγω μόνιμης ροής  $\omega \cdot \nabla u = 0$  λόγω δισδιάστατης θεώρησης και  $v \nabla^2 \omega = 0$  λόγω μη συνεκτικής ροής. Οπότε τελικά η εξίσωση 3.2.1 μετασχηματίζεται στην παρακάτω:

$$u \cdot \nabla \omega \cdot \vec{\omega}_x \cdot \vec{e}_x = \nabla \frac{f}{\rho} \quad (3.2)$$

Θεωρώντας επιπλέον την αντίσταση να είναι αμελητέα, η δύναμη, σε μορφή άνωσης, που ασκείται από την γραμμή δράσης στην ροή δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$f = -Lg(r) = \rho u \times \Gamma \vec{e}_x \quad (3.3)$$

Όπου  $g(r) = \frac{1}{\pi \epsilon^2} \exp\left(\frac{-r^2}{\epsilon^2}\right)$  μία δισδιάστατη συνάρτηση Gauss προβολής της δύναμης, με το  $r$  να συμβολίζει την απόσταση από την γραμμή δράσης.

Εισάγοντας τις ανωτέρω εξισώσεις στην εξίσωση 3.4 έχουμε :

$$u \cdot \nabla \omega \cdot \vec{\omega}_x \cdot \vec{e}_x = \nabla (\Gamma g \vec{e}_x \times u) = (u \cdot \nabla) \Gamma g \vec{e}_x \quad (3.4)$$

Όμως λόγω αρχής διατήρησης της μάζας ο όρος  $u \cdot \nabla$  μπορεί να αντιστραφεί δίνοντας μία άμεση σχέση ανάμεσα στην προβολή της δύναμης και την στροβιλότητα:

$$\omega_x = \Gamma g = \frac{\Gamma}{\pi \epsilon^2} \exp\left(\frac{-r^2}{\epsilon^2}\right) \quad (3.5)$$

Επειδή οι δυνάμεις είναι αξονικά συμμετρικές η στροβιλότητα επάγει μόνο εφαπτομενικές ταχύτητες

$$\omega_x(r) = \frac{1}{r} \left( \frac{\partial r u}{\partial r} - \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right) \quad (3.6)$$

όπου  $\frac{\partial u_r}{\partial \theta} = 0$  λόγω αξονικής συμμετρίας

Άρα

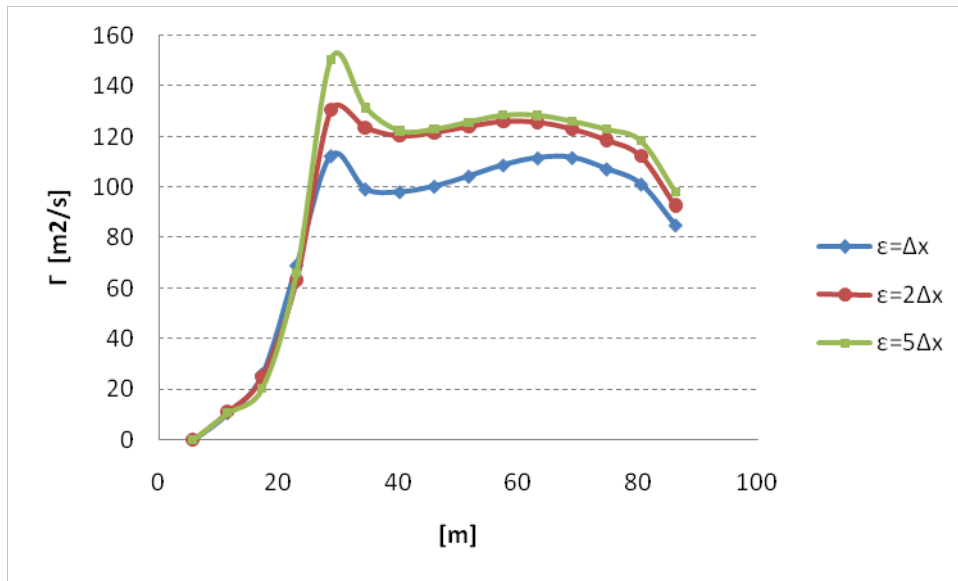
$$u = \frac{1}{r} \int_0^r r \omega_x(r) dr \quad (3.7)$$

Τελικά, εισάγοντας την εξίσωση 3.6 και ολοκληρώνοντας υπολογίζεται η ταχύτητα που επάγεται από την προβολή της δύναμης ως

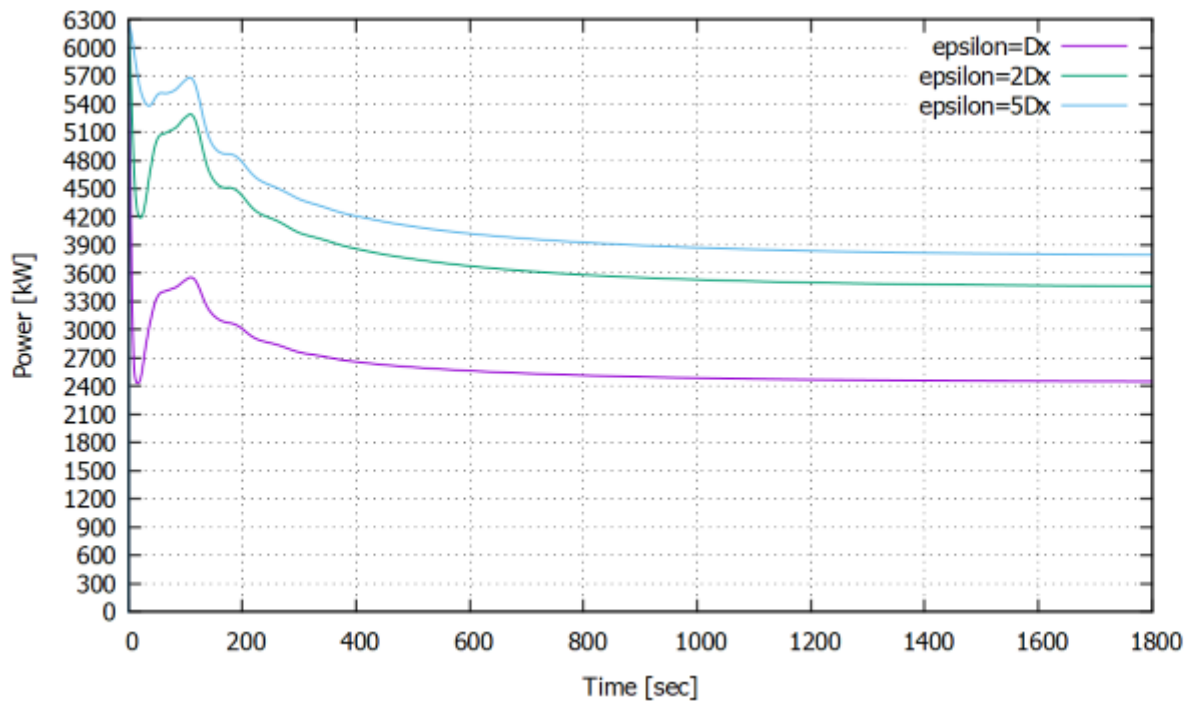
$$u = \frac{\Gamma}{2\pi r} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-r^2}{\epsilon^2}\right) \right] \quad (3.8)$$

Για το αξονοσυμμετρικό πρόβλημα, το οποίο περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2.4, παρατίθεται η ακτινική κατανομή της κυκλοφορίας, του συντελεστή αξονικής επαγωγής αλλά και της ταχύτητας των λωρίδων, για διάφορες τιμές της ακτίνας προβολής  $\epsilon$ . Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονιστεί ότι οι τα αποτελέσματα ελήφθησαν με την χρήση της μεθόδου προσδιορισμού του  $\epsilon$  ως πολλαπλάσιο μονάχα του χαρακτηριστικού μήκους του πλέγματος  $\Delta x$ , ώστε να είναι εμφανή τα αποτελέσματα.

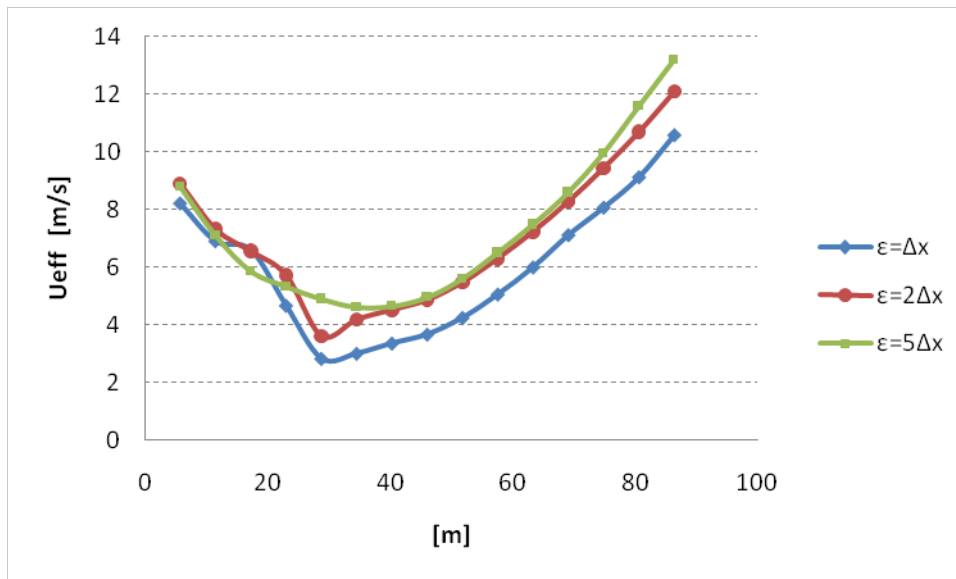
Διαπιστώνεται ότι, όσο μικρότερη η ακτίνα προβολής της δύναμης  $\epsilon$ , τόσο η υπερεκτίμηση στο ακροπερύγιο μειώνεται. Ειδικότερα, μειώνοντας το πάχος της συνάρτησης κατανομής Gauss αναμένεται η μέθοδος γραμμής δράσης να τείνει στα αποτελέσματα που αντιστοιχούν στην μη συνεκτική αναλυτική λύση, όπου η επαγωγή τείνει στο άπειρο και άρα η κυκλοφορία στο μηδέν. Παρόλα αυτά δεν εντοπίζεται τέτοια συμπεριφορά καθώς και υπάρχει υποεκτίμηση της επαγωγής στο άκρο του περυγίου προκαλώντας αύξηση στην γωνία προσβολής και άρα στην κυκλοφορία.



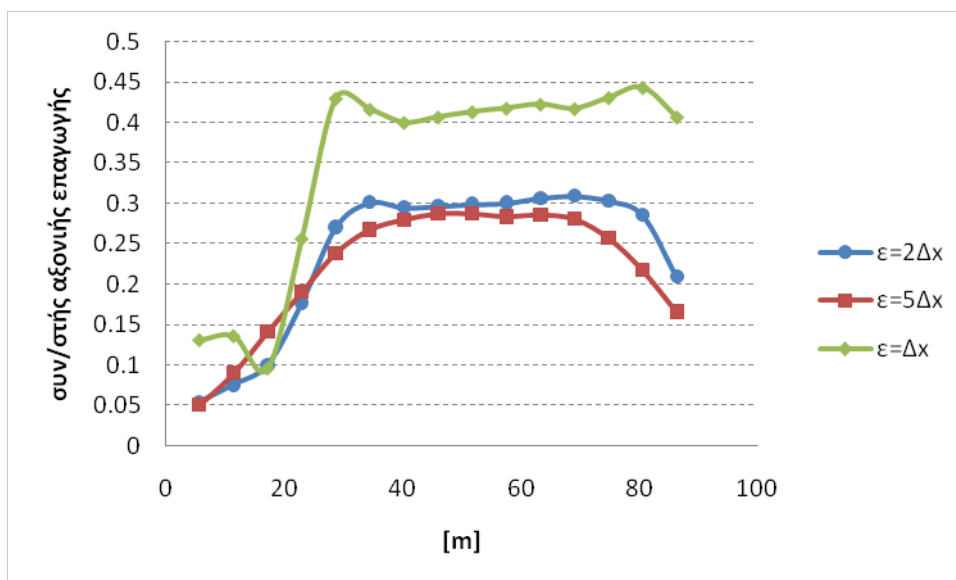
**Διάγραμμα 3.1.1.** Σύγκριση της κατανομής της κυκλοφορίας για περιοδικό αξονοσυμμετρικό πρόβλημα με χαρακτηριστικό μήκος πλέγματος  $R/30$



**Διάγραμμα 3.1.2.** Χρονική εξέλιξη της τιμής της ισχύος ενός φτερού της  $A/\Gamma$  για διάφορες τιμές του  $\epsilon$



**Διάγραμμα 3.1.3.** Επαγόμενη ταχύτητα κατά μήκος του φτερού για διάφορες τιμές του  $\epsilon$



**Διάγραμμα 3.1.4.** Ακτινική κατανομή συντελεστή αξονικής επαγωγής για διάφορες τιμές του  $\epsilon$

Για περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου παρατίθενται οι ακτινικές κατανομές του συντελεστή αξονικής επαγωγής και της φαινόμενης ταχύτητας του υπολογιστικού κέντρου της εκάστοτε λωρίδας. Παρατηρείται ουσιαστικά από το διάγραμμα 3.1.3 ότι υψηλότερες τιμές του  $\epsilon$  τείνουν να απλώνουν την δύναμη ενώ μικρότερες τιμές δημιουργούν πιο διακριτή κατανομή αυτής. Ένα από τα σημαντικότερα σημεία της μεθόδου γραμμής δράσης είναι ο σωστός υπολογισμός της τοπικής γωνίας προσβολής που προσδιορίζεται από τη την τοπική ταχύτητα του εκάστοτε υπολογιστικού σημείου. Ως εκ τούτου υψηλότερες τιμές της ακτίνας  $\epsilon$  οδηγούν σε υπερεκτίμηση των φορτίων. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι δεν είναι η επαγωγή των προσδεδεμένων στροβίλων που καθορίζει την τοπική ταχύτητα αλλά των στροβίλων του ομόρρου, οι οποίοι όμως υιοθετούν τον συνεκτικό πυρήνα τους από τις προσδεδεμένες στροβιλότητες της πτέρυγας. Μία γρήγορη λύση στο ανωτέρω προβληματάτων θα ήταν η χρήση μικρότερων τιμών της ακτίνας  $\epsilon$ , αλλά κάτι τέτοιο απαιτεί αντίστοιχα και τη χρήση πυκνότερων υπολογιστικών πλεγμάτων μειώνοντας την ακρίβεια της φυσικής τοποθεσίας των στροβίλων προκαλώντας αριθμητικές αστάθειες στην λύση.

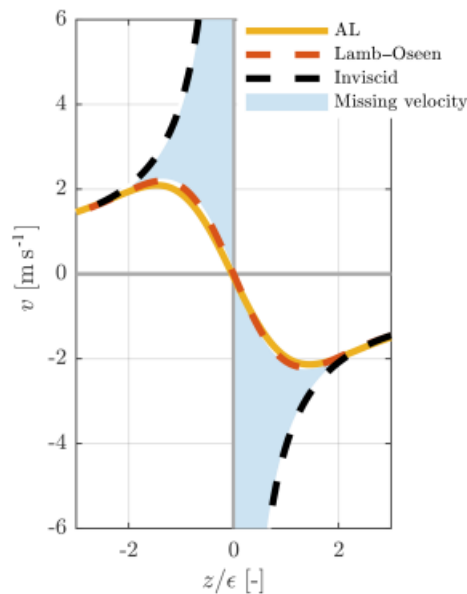
## 3.2 Περιγραφή Μεθόδου Διόρθωσης

Όπως εξηγήθηκε και στο ανωτέρω κεφάλαιο, αναμένεται από την μέθοδο διόρθωσης να καλύπτει το έλλειμμα επαγόμενης ταχύτητας λόγω της ύπαρξης πυρήνων συνεκτικότητας στους αποβαλλόμενους στροβίλους. Μπορεί να ειπωθεί ότι αύξηση του  $\epsilon$  θα οδηγήσει σε μείωση της επαγόμενης ταχύτητας κοντά στο άκρο του πτερυγίου προκαλώντας στην συνέχεια σε υπερεκτίμηση της γωνίας προσβολής και άρα του φορτίου. Η λογική λύση σε αυτό το πρόβλημα θα ήταν η χρήση μικρότερης τιμής του  $\epsilon$  που όμως επιφέρει τοπικές αστάθειες στο υπολογιστικό χωρίο και ταλαντώσεις στην λύση.

Το Actuator Line και το Lifting Line είναι δύο μέθοδοι σχεδόν ίδιες, αλλά με μία ουσιώδη διαφορά το Lifting Line παράγει singular wake elements, δηλαδή νήματα στροβιλότητας μη συνεκτικού πυρήνα που απειρίζουν την επαγόμενη ταχύτητα όσο πλησιάζουμε στο κέντρο τους όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 3.2.1. Αντιθέτως το Actuator Line, λόγω της προβολής των δυνάμεων στο υπολογιστικό πλέγμα, φτιάχνει δομές στροβιλότητας (δεν παράγει δηλαδή singular filaments όπως το Lifting Line) με συνεκτικό πυρήνα ακτίνας  $\epsilon$ , αυτό σημαίνει ότι όσο πλησιάζουμε σε μία δομή στροβιλότητας που



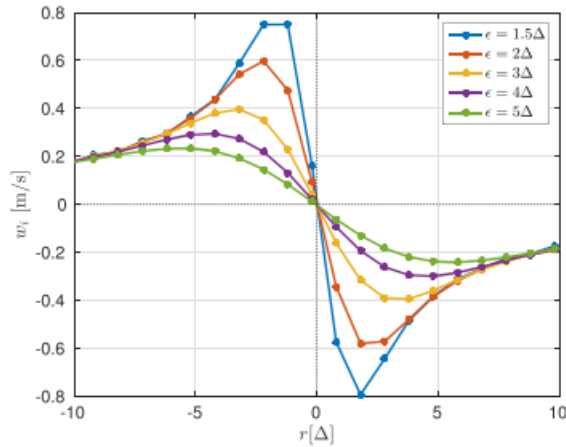
δημιουργήθηκε με Actuator Line, η ταχύτητα θα μεγαλώνει, αλλά στο κέντρο αυτής της δομής η ταχύτητα θα πηγαίνει στο 0, όπως φαίνεται από τις εικόνες 3.2.1 και 3.2.2. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η κυκλοφορία που υπολογίζει το Lifting Line να μηδενίζεται προς το ακροπτερύγιο, ενώ του Actuator Line να τείνει στο 0 όσο πλησιάζουμε προς το άκρο του πτερυγίου, αλλά τελικά στο άκρο να αυξάνει όπως φαίνεται από το διάγραμμα 3.2.3.



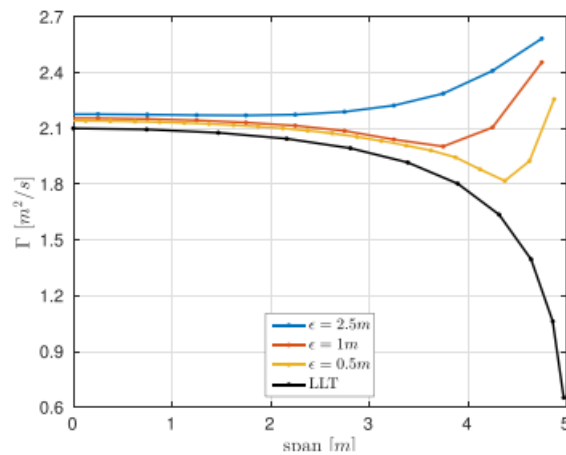
**Διάγραμμα 3.2.1.** Κατανομή της εφαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας σε επίπεδο κάθετο σε ένα νήμα στροβιλότητας άπειρου μήκους, που επάγεται είτε από ένα μη συνεκτικό (Inviscid) ή συνεκτικό (viscous) θεωρητικό στρόβιλο είτε από μία προσομοίωση Γραμμής Δράσης (AL). Η εικόνα λήφθηκε από την δημοσίευση των Forsting et al. [3]

Μετά από αυτό οι ερευνητές παρατήρησαν ότι η επαγωγή που δημιουργεί ένα Lamb-Oseen στρόβιλος έχει την ίδια μορφή με αυτή που δημιουργεί η δομή στροβιλότητας ενός actuator line, όταν η προβολή των δυνάμεων ακολουθεί την 3D ισοτροπική Gauss κατανομή, σύμφωνα με το διάγραμμα 3.2.4.

Επομένως στην εξίσωση της επαγόμενης ταχύτητας από έναν πυρήνα Lamb-Oseen πρέπει να αντικατασταθεί η ακτίνα του συνεκτικού πυρήνα, το  $\Delta$  που υπάρχει στην εικόνα 3.2.4, με την ακτίνα προβολής  $\epsilon$  της κατανομής Gauss. Τότε είναι εφικτό να δημιουργηθεί ένα μοντέλο επαγωγής ταχύτητας από τις δομές στροβιλότητας, που δημιουργεί η Γραμμή Δράσης, που να βασίζεται στον παρακάτω τύπο:



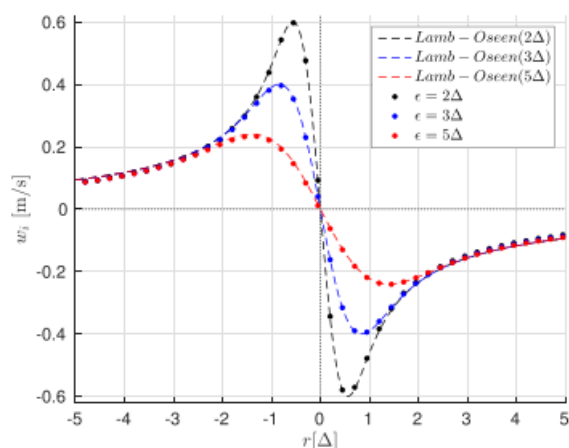
**Διάγραμμα 3.2.2.** Ακτινική κατανομή της επαγωγής για διάφορες τιμές της ακτίνας προβολής  $\epsilon$ , σε παραλληλόγραμμη πτέρυγα με  $AR=10$ . Η εικόνα λήφθηκε από την δημοσίευση της διδακτορικής διατριβής του Dag [8]



**Διάγραμμα 3.2.3.** Σύγκριση της κατανομής της κυκλοφορίας που λαμβάνεται σε μία πτέρυγα  $AR=10$  με τη μέθοδο Γραμμής Άνωσης (LLT) και τη μέθοδο Γραμμής Δράσης (ALM) για διάφορες τιμές του  $\epsilon$ . Η εικόνα λήφθηκε από την δημοσίευση της διδακτορικής διατριβής του Dag [8]

$$w_i = \frac{\Gamma}{4\pi r} \left(1 - \exp\left(\frac{-r^2}{r_v^2}\right)\right) \quad (3.9)$$

Όπου  $\Gamma$  είναι η κυκλοφορία,  $r$  η απόσταση του κέντρου του στροβίλου από το σημείο υπολογισμού και  $r_v$  η ακτίνα του συνεκτικού πυρήνα. Το  $r_v$  αντικαθίσταται από



**Διάγραμμα 3.2.4.** Σύγκριση της επαγόμενης ταχύτητας από το μοντέλο Lamb-Oseen με αυτή που λαμβάνεται από υπολογισμό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) για διάφορες τιμές του  $\epsilon$ . Η εικόνα λήφθηκε από την δημοσίευση της διδακτορικής διατριβής του Dag [8]

την ακτίνα προβολής  $\epsilon$ , της Gauss κατανομής.

Επομένως από τη συναλλαγή ορμής που πραγματοποιείται μεταξύ ρευστού και Γραμμής Δράσης λαμβάνεται μέσω του Ufl, δηλαδή από τη λύση των εξισώσεων Navier-Stokes στη διακριτοποιημένη τους μορφή, μια επαγόμενη ταχύτητα όπως η κίτρινη καμπύλη στην εικόνα 3.2.1. Στόχος είναι να λαμβάνεται μία επαγόμενη ταχύτητα όπως αυτή της Γραμμής Άνωσης, δηλαδή σαν την μαύρη διακεκομμένη καμπύλη στην εικόνα 3.2.1. Για να γίνει εφικτό αυτό αρκεί να προστεθεί το μπλε γεμισμένο κομμάτι της εικόνας 3.2.1, δηλαδή το έλλειμμα επαγόμενης ταχύτητας που υπάρχει ανάμεσα στη μη συνεκτική και τη συνεκτική λύση.

Έτσι η προταθείσα λύση της παρούσας διπλωματικής βασίζεται στον προσδιορισμό νημάτων στροβιλότητας των οποίων η επαγωγή πρέπει να δίνει αυτό το συμπλήρωμα ταχύτητας που λείπει. Για την εύρεση μιας αναλυτικής σχέσης που θα περιγράψει το έλλειμμα ταχύτητας αρκεί να αφαιρεθεί από την επαγωγή των νημάτων στροβιλότητας της μεθόδου Γραμμής Άνωσης η επαγωγή των νημάτων στροβιλότητας της Γραμμής Δράσης, όπως φαίνεται στον παρακάτω τύπο.

$$w_c = \frac{\Gamma}{4\pi r} - \frac{\Gamma}{4\pi r} \left(1 - \exp\left(\frac{-r^2}{\epsilon^2}\right)\right) \quad (3.10)$$

Από την ανωτέρω έκφραση ο πρώτος όρος αντιστοιχεί στο μη συνεκτικό τμήμα της επαγόμενης ταχύτητας και ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει την επιρροή του συνεκτικού πυρήνα. Η σχέση 3.10 ισχύει για ημιάπειρα νήματα ενώ για πεπερασμένου μήκους νήματα ισχύει :

$$\vec{w}_c = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\vec{dl} \times \vec{r}}{|\vec{r}^3|} \exp\left(\frac{-|\vec{r}^2|}{\epsilon^2}\right) \quad (3.11)$$

### 3.2.1 Μέθοδος Διόρθωσης για Ρότορες

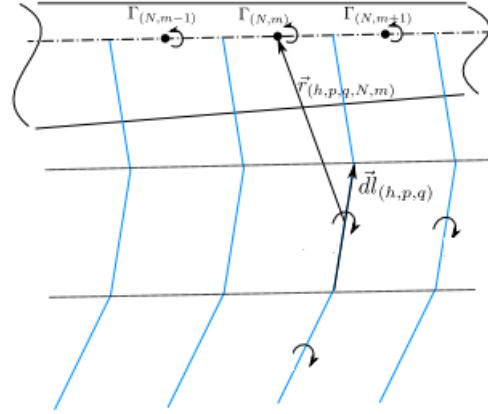
Για την εφαρμογή του Smearing Correctionon σε δρομέα A/Γ χρειάζεται να ορισθεί η θέση των σημείων του ομόρρου του για την δημιουργία των γραμμών στροβιλότητας που θα επάγουν το κατώρευμα στα σημεία υπολογισμού της τοπικής γωνίας προσβολής.

Λόγω της τρισδιάστατης δομής του ομόρρου είναι απαραίτητο να οριστούν διακριτά νήματα στροβιλότητας και να υπολογιστούν οι επαγόμενες ταχύτητες στον τρισδιάστατο χώρο αντίστοιχα. Όπως αποδείχθηκε στην ενότητα 3.2 η επαγωγή από ένα νήμα στροβιλότητας μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\vec{w}_c = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\vec{dl} \times \vec{r}}{|\vec{r}^3|} \exp\left(\frac{-|\vec{r}^2|}{\epsilon^2}\right) \quad (3.12)$$

Όπου  $\vec{dl}$  είναι το διάνυσμα που αναπαριστά την κατεύθυνση και το μήκος του νήματος στροβιλότητας,  $\vec{r}$  είναι το διάνυσμα που συνδέει το κέντρο της γραμμής στροβιλότητας με το σημείο υπολογισμού της τοπικής ταχύτητας όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 3.2.4

Έπειτα για κάθε σημείο της γραμμής δράσης η συνολική επαγωγή μπορεί να υπολογιστεί ως το άθροισμα όλων των επαγόμενων ταχυτήτων από το σύστημα του ομόρρου



**Διάγραμμα 3.2.5.** Κοντινή αναπαράσταση της δομής του ομόρρου ενός πτερυγίου. Εικόνα που επιλέχθηκε από την διδακτορική διατριβή του Dag [8]

ως:

$$\vec{w}_c(n) = \sum_n \sum_j \frac{\Gamma(n)}{4\pi} \frac{dl(\vec{n}, j) \times r(\vec{n}, j)}{|r(\vec{n}, j)|^3} \exp\left(\frac{-|r(\vec{n}, j)|^2}{\epsilon^2}\right) \quad (3.13)$$

Όπου οι δείκτες  $n, j$  αντιπροσωπεύουν την θέση κατά το εκπέτασμα και την αξιωματική θέση τόσο των στροβίλων του ομόρρου όσο και των σημείων υπολογισμού της επαγόμενης ταχύτητας. Ειδικότερα ο δείκτης  $n$  κυμαίνεται από τον αριθμό 1 ως τον αριθμό των strips+1, ενώ ο δείκτης  $j$  καθορίζεται ουσιαστικά από το μήκος εξάπλωσης του ομόρρου κατά την κατεύθυνση της ροής.

Σε μόνιμα προβλήματα η κυκλοφορία  $\Gamma$  θεωρείται σταθερή για την εκάστοτε θέση  $n$ , ενώ για μη μόνιμα προβλήματα η τιμή της παραμένει σταθερή στο χρόνο και καθορίζεται από την κυκλοφορία της λωρίδας από την οποία παράχθηκε.

Γνωρίζοντας πλέον την συνολική επαγωγή λόγω του Smearing Correction σε κάθε σημείο ελέγχου της γραμμής δράσης, υπολογίζεται η φαινόμενη ταχύτητα στο απόλυτο σύστημα συντεταγμένων ως  $U_{eff}(n) = U_{flow}(n) - U_{strip}(n) + W_c(n)$ . Όπου  $U_{flow}(n)$  η ταχύτητα του πεδίου ροής,  $U_{strip}(n)$  η ταχύτητα του σημείου ελέγχου λόγω περιστροφής του δρομέα,  $W_c(n)$  η επαγόμενη ταχύτητα λόγω του Smearing Correction.

Στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων των σημείων ελέγχου της γραμμής δράσης

ισχύει:

$$Uefflocal(n) = [A^T]Ueff(n) \quad (3.14)$$

Άρα και η τοπική γωνία προσβολής υπολογίζεται ως:

$$aeff(n) = \arctan\left(\frac{Uefflocal_x}{Uefflocal_z}\right) \quad (3.15)$$

### 3.3 Παραμετρική Μελέτη Μεθόδου Διόρθωσης στην Μέθοδο Γραμμής Δράσης

Όπως περιγράφηκε και στο κεφάλαιο 3.2 υπάρχουν ορισμένες αριθμητικοί παράμετροι στην μεθοδολογία του Smearing Correction, για την μόνιμη αξονοσυμμετρική περίπτωση ενός πτερυγίου, που επηρεάζουν την απόδοσης της. Η παραμετρική ανάλυση στο αξονοσυμμετρικό πρόβλημα επιτρέπει την εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου καθώς και επιλύεται ένα μόνο πτερύγιο. Έτσι έγινε εφικτή η μελέτη της προταθείσας διόρθωσης στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ως εκ' τούτου στο παρόν κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί ενδελεχής παραμετρική ανάλυση των μεταβλητών που επηρεάζουν την λειτουργία του Smearing Correction με απώτερο σκοπό την διατύπωση ορισμένων κανόνων για την επιλογή αυτών.

Εν συντομία τα σημεία του ομόρρου για την περιοδική μόνιμη αξονοσυμμετρική περίπτωση δημιουργούνται όλα μαζί, δηλαδή ο ομόρρος της Α/Γ δημιουργείται πριν ξεκινήσει ο οποιοσδήποτε υπολογισμός στα σημεία ελέγχου της γραμμής δράσης. Για την δημιουργία του ομόρρου, χρησιμοποιούνται ως αρχικά σημεία του τα όρια των λωρίδων ελέγχου (strips). Έπειτα για κάθε σημείο του ομόρρου υπολογίζεται η ταχύτητα του πεδίου ροής  $U_p$  και εν συνεχεία δημιουργείται η επόμενη γραμμή σημείων στον χώρο ως εξής:

$$xwake_n = (U_p - \Omega \times xwake_p) * Dt + xwake_p \quad (3.16)$$

Όπου  $xwake_n$  η επόμενη γραμμή σημείων του ομόρρου,  $xwake_p$  η προηγούμενη

γραμμή σημείων του ομόρρου,  $U_p$  η ταχύτητα του πεδίου ροής στο εκάστοτε σημείο  $xwake_p$ ,  $Dt$  ένα ψευδοχρονικό βήμα που συμβολίζει τη γωνία βήματος δημιουργίας του ομόρρου και τέλος  $\Omega$  είναι η ταχύτητα του περιστρεφόμενου πλαισίου όπου λαμβάνει χώρα η προσομοίωση. Όταν έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία δημιουργίας του ομόρρου για το μόνιμο περιοδικό πρόβλημα, φτάνει να εφαρμοστεί η διόρθωση για κάθε σημείο ελέγχου του πτερυγίου.

Οι μεταβλητές  $j$  και  $Dt$  που καθορίζουν το μήκος εξάπλωσης του ομόρρου και τη γωνία βήματός του αντίστοιχα. Η μεταβλητή  $j$  θα ορίζεται ως ανάλογο της διαμέτρου του δρομέα ενώ το ψευδοχρονικό βήμα ορίζεται ως κάποιο υποπολλαπλάσιο της περιόδου του δρομέα  $T$ . Τέλος εξίσου σημαντική παράμετρος είναι το χαρακτηριστικό μήκος του καρτεσιανού πλέγματος γύρω από το πτερύγιο,  $\Delta x$ . Όπως δείχθηκε στο κεφάλαιο 2.3.2 πλεγματική ανεξαρτησία στην λύση επέρχεται για χαρακτηριστικό μήκος μεγαλύτερο του  $R/90$ . Στόχος λοιπόν της παρακάτω παραμετρικής μελέτης είναι η ανάλυση της επίδωσης της διόρθωσης για αραιά πλέγματα, δηλαδή για  $\Delta x = \frac{R}{20}, \frac{R}{30}, \frac{R}{40}$ . Το ενδιαφέρον αυτό προκύπτει διότι, όπως σχολιάστηκε παραπάνω, αραιότερα πλέγματα οδηγούν στη χρήση όλο και μεγαλύτερης ακτίνας προβολής  $\epsilon$  και στη δημιουργία όλο και μεγαλύτερου ελλείματος επαγόμενης ταχύτητας σε σχέση με τη θεωρία της μη-συνεκτικής λύσης (Lifting Line). Το αποτέλεσμα θα είναι έντονη υπερεκτίμηση της υπολογιζόμενης ισχύος και του φορτίου ειδικά προς το ακροπτερύγιο.

Για τον έλεγχο της μεθόδου του Smearing Correction χρησιμοποιείται η ανεμογεννήτρια της NREL ισχύος 10 MW. Επιπρόσθετα χαρακτηριστικά της υπό μελέτη Α/Γ παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα

|                       |           |
|-----------------------|-----------|
| διάμετρος δρομέα      | 178.32 m  |
| ύψος ρίζας πτερυγίου  | 2.8 m     |
| ταχύτητα ανέμου       | 11 m/s    |
| γωνιακή ταχύτητα      | 8.836 rpm |
| collective flap angle | 0 μοίρες  |
| collective tilt angle | 0 μοίρες  |
| collective edge angle | 0 μοίρες  |

Πίνακας 3.1: Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Α/Γ αναφοράς DTU 10 MW

Ακόμη παρατίθενται ορισμένες αριθμητικές παράμετροι που επιλέχθηκαν κατάλληλα. Αρχικά ακολουθούμε την μέθοδο, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2.4, όπου η

ακτίνα της προβολής της δύναμης  $\epsilon = \max(2\Delta x, 0.47c)$ . Επίσης ο αριθμός των λωρίδων, δηλαδή των γραμμικών τμημάτων από τα οποία απαρτίζεται το πτερύγιο, ορίζεται με την λογική  $Strips = \frac{R}{2\Delta x}$ , όπου  $\Delta x$  το χαρακτηριστικό μήκος του καρτεσιανού ομοιόμορφου πλέγματος και  $R=89.16$  m η ακτίνα του δρομέα.

Έχοντας λοιπόν ορίσει τις βασικές λειτουργικές παραμέτρους της περιοδικής μόνιμης αξονοσυμμετρικής περίπτωσης, είναι εφικτό να διεξαχθή η παραμετρική μελέτη του Smearing Correction, για τον προσδιορισμό των επιμέρους παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση της διορθωμένης μεθόδου Γραμμής Δράσης για αραιά πλέγματα.

### 3.3.1 Μήκος Εξάπλωσης Ομόρρου

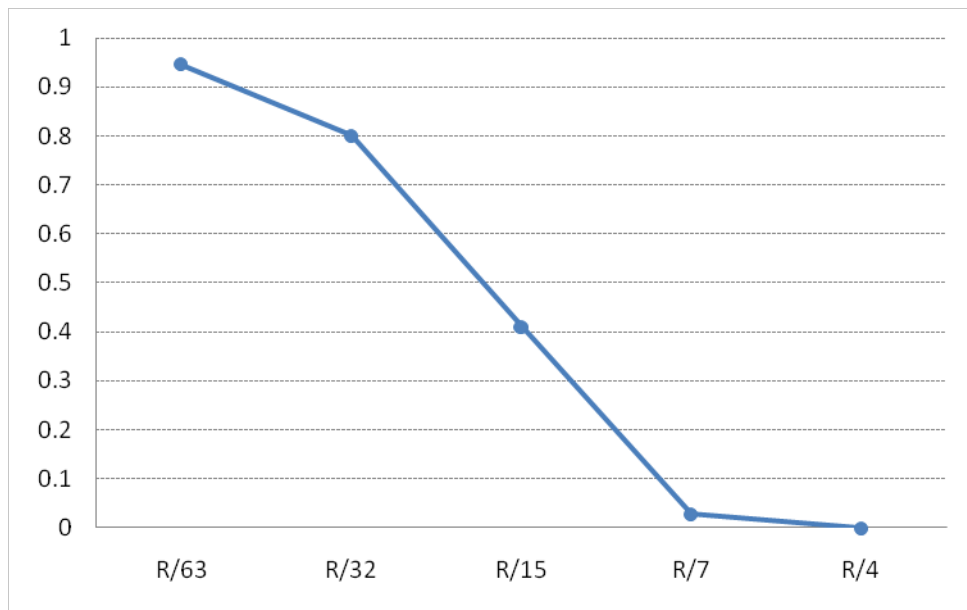
Για την μελέτη του τρόπου που επηρεάζει το μήκος εξάπλωσης του ομόρρου του Smearing Correction πρέπει πρώτα να σχολιαστεί η συνάρτηση  $\exp\left(\frac{-r^2}{\epsilon^2}\right)$ . Από το διάγραμμα 3.3.1 διαφαίνεται ότι για μήκος εξάπλωσης μεγαλύτερο του  $\frac{R}{7}$  η επαγωγή των πιο απομακρυσμένων στοιχείων θα είναι αμελητέα. Ουσιαστικά λοιπόν η ανωτέρω συνάρτηση φιλτράρει την επαγωγή του μακρινού ομόρρου ενώ διατηρεί αισθητή την επιρροή του κοντινού ομόρρου του δρομέα. Ως εκ τούτου στην παρούσα μελέτη θα εξεταστούν μήκη εξάπλωσης ομόρρου μέχρι  $\frac{R}{7}$ , καθώς και για μεγαλύτερο μήκος εξάπλωσης λαμβάνεται από την συνάρτηση φίλτρου τιμή της τάξης του  $10^{-7}$  και άρα η επίδραση του ομόρρου είναι μηδενική.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατίθενται στον πίνακα 3.1 και στο διάγραμμα 3.3.3

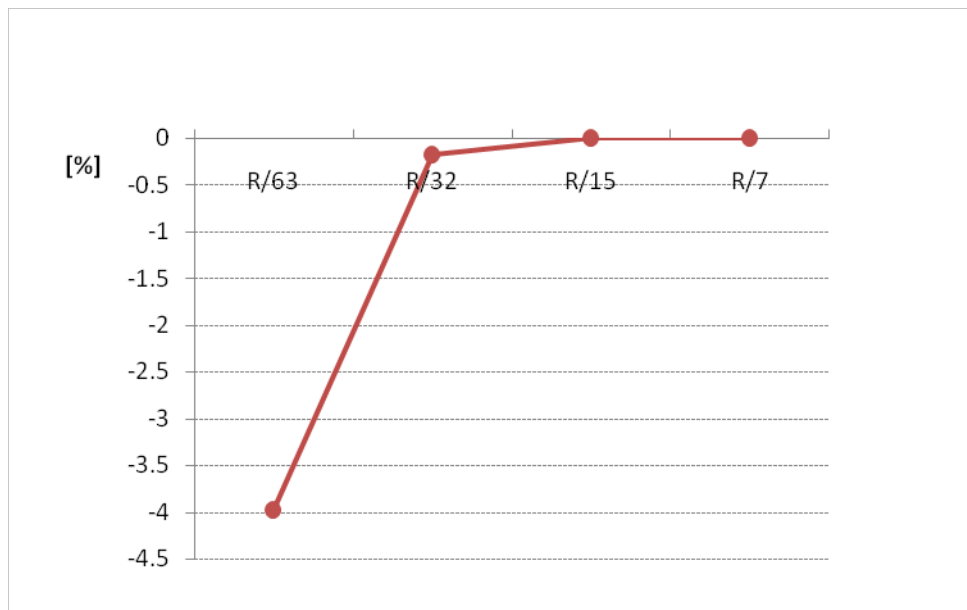
| Μήκος Εξάπλωσης | Ισχύς [MW] | Σχετική Απόκλιση |
|-----------------|------------|------------------|
| R/63            | 9.78       | -3.98 %          |
| R/32            | 10.17      | -0.18 %          |
| R/15            | 10.183     | -0.0011 %        |
| R/7             | 10.184     | -                |

Πίνακας 3.2: Ποσοστιαία απόκλιση της εκτιμώμενης ισχύος για διάφορα μήκη εξάπλωσης ομόρρου. Σαν τιμή αναφοράς λαμβάνεται η ισχύς που υπολογίζεται για μήκος ομόρρου ίσο με R/7





**Διάγραμμα 3.3.1.** Συνάρτηση  $\exp\left(-\frac{\gamma^2}{\epsilon^2}\right)$  για διάφορες τιμές του μήκους εξάπλωσης του ομόρρου



**Διάγραμμα 3.3.2.** Ποσοστιαία απόκλιση της εκτιμώμενης ισχύος για διάφορα μήκη εξάπλωσης ομόρρου. Σαν τιμή αναφοράς λαμβάνεται η ισχύς που υπολογίζεται για μήκος ομόρρου ίσο με R/7.

Παρατηρείται λοιπόν, ότι η βέλτιστη επιλογή μήκους εξάπλωσης ομόρρου που παρουσιάζει μικρό υπολογιστικό κόστος αλλά και αριθμητική ακρίβεια είναι  $\frac{R}{32} = 2.833m$ .

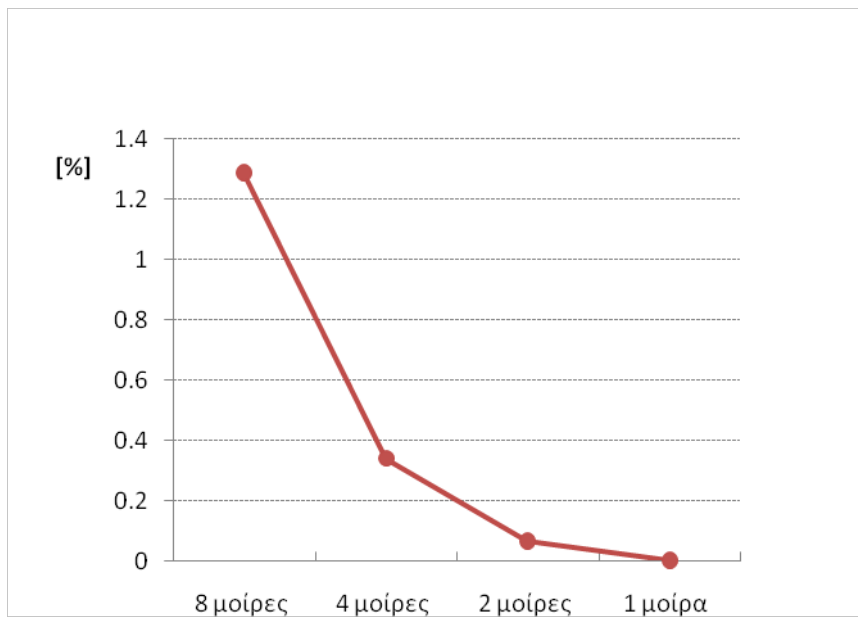
Για την παρούσα παραμετρική μελέτη το χρονικό βήμα δημιουργίας του ομόρρου αντιστοιχεί σε βήμα 8 μοιρών.

### 3.3.2 Γωνία Ομόρρου

Έχοντας προσδιορίσει το μήκος εξάπλωσης του ομόρρου, επόμενη ανάγκη είναι η εύρεση του χρονικού βήματος δημιουργίας του ομόρρου. Το χρονικό βήμα στον αλγόριθμο του Smearing Correction προσδιορίζεται ως  $Dt = \frac{2\pi}{\alpha\omega}$ , όπου  $\omega = 0.9253rad/sec$  για ταχύτητα ανέμου 11 m/s και  $\alpha = \{45, 90, 180, 360\}$  για χρονικό βήμα  $\{8,4,2,1\}$  μοιρών αντίστοιχα.

Σημαντικό είναι να σχολιαστεί ότι το μήκος εξάπλωσης του ομόρρου παραμένει σταθερό για όλες τις περιπτώσεις, αλλά η πυκνότητα των σημείων που απαρτίζεται ο ομόρρος αυξάνεται όσο μειώνεται το χρονικό βήμα δημιουργίας του.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατίθενται στον πίνακα 3.3 και στο διάγραμμα 3.3.5, από τα οποία διαφαίνεται εμφανώς ότι η ιδανική επιλογή είναι το χρονικό βήμα που αντιστοιχεί σε 4 μοίρες. Με αυτήν την επιλογή επιτυγχάνεται ικανοποιητική ακρίβεια με το ελάχιστο δυνατό υπολογιστικό κόστος.



**Διάγραμμα 3.3.3.** Ποσοστιαία απόκλιση της εκτιμώμενης ισχύος για διάφορες γωνίες δημιουργίας του ομόρρου. Σαν τιμή αναφοράς λαμβάνεται η ισχύς που υπολογίζεται για γωνία του ομόρρου ίση με 1 μοίρα.

| Γωνία Ομόρρου | Ισχύς [MW] | Σχετική Απόκλιση |
|---------------|------------|------------------|
| 8 μοίρες      | 10.17      | 1.29%            |
| 4 μοίρες      | 10.07      | 0.35 %           |
| 2 μοίρες      | 10.044     | 0.07%            |
| 1 μοίρα       | 10.036     | -                |

Πίνακας 3.3: Ποσοστιαία απόκλιση της εκτιμώμενης ισχύος για διάφορες γωνίες δημιουργίας του ομόρρου. Σαν τιμή αναφοράς λαμβάνεται η ισχύς που υπολογίζεται για γωνία του ομόρρου ίση με 1 μοίρα.

### 3.3.3 Αριθμός Strips

Μέλημα επίσης αποτελεί ο έλεγχος της συμπεριφοράς του κώδικα διόρθωσης για διαφορετικό αριθμό λωρίδων, δηλαδή ευθυγράμμων τμημάτων στο κέντρο των οποίων βρίσκεται το σημείο ελέγχου της γραμμής δράσης. Στην παραμετρική μελέτη που προηγήθηκε όλες οι προσομοιώσεις έλαβαν χώρα για αριθμό λωρίδων (strips) ίσο με  $\frac{R}{2\Delta x}$ . Επιπρόσθετα στην παρούσα εργασία όλα τα σημεία ελέγχου θεωρούνται ομοιόμορφα καταναμημένα

κατά μήκος του πτερυγίου οδηγώντας σε σταθερό μήκος λωρίδας, που συμβολίζεται με  $\Delta r$ .

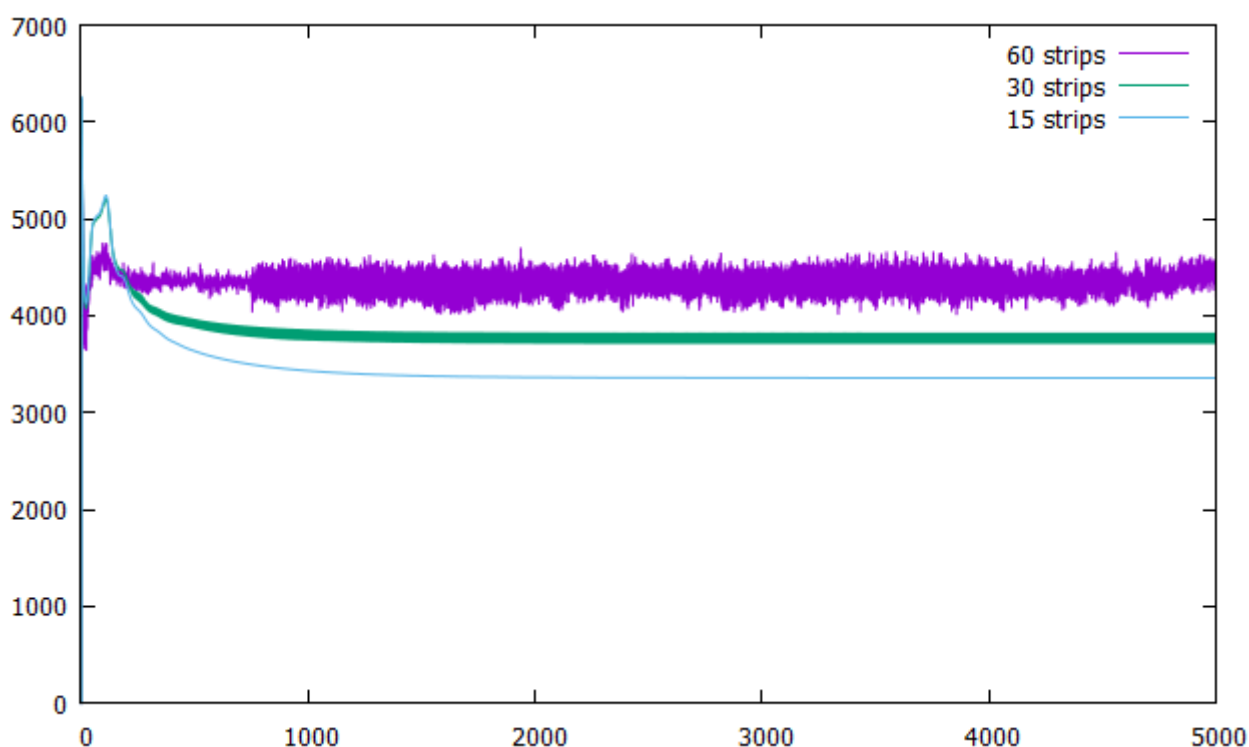
| Αριθμός Strips | Ισχύς [MW] | Σχετική Απόκλιση |
|----------------|------------|------------------|
| 15 strips      | 10.07      | 6.91%            |
| 30 strips      | 11.34      | 20.39 %          |
| 60 strips      | 13.04      | 38.4 %           |

Πίνακας 3.4: Μεταβολή της ισχύος και ποσοστιαία απόκλιση της εκτιμώμενης ισχύος για διάφορους αριθμούς λωρίδων ελέγχου (strips). Σαν τιμή αναφοράς λαμβάνεται η ισχύς που υπολογίζεται για πυκνότητα πλέγματος ίση με  $R/180$ .

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκε ως τιμή αναφοράς για την σχετική απόκλιση η υπολογιζόμενη ισχύς για πυκνότητα πλέγματος ίση με  $\frac{R}{180}$  και χωρίς διόρθωση φορτίων με στόχο να φανεί ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των λωρίδων ή αντίστοιχα μειώνεται το μήκος τους  $\Delta r$ , τόσο αποκλίνει η μέθοδος διόρθωσης από τον στόχο της. Το γεγονός αυτό ενισχύεται από το παρακάτω διάγραμμα όπου διαφαίνεται ότι η αύξηση των αριθμού των λωρίδων οδηγεί σε έντονες ταλαντώσεις κατά την σύγκλιση της υπολογιζόμενης ισχύος που ουσιαστικά μεταφράζεται σε αριθμητικό θόρυβο ενώ ταυτοχρόνως η ισχύς υπερεκτίματα.

Είναι εμφανές ότι για  $\frac{R}{\Delta x}$  και  $\frac{R}{0.5\Delta x}$  δεν λαμβάνονται ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ως εκ τούτου για την μελέτη που έπεται θα υιοθετηθεί η λογική  $\frac{R}{2\Delta x}$  και όπου χρειαστεί θα τροποποιηθεί με την χρήση λιγότερων λωρίδων με την λογική  $\frac{R}{3\Delta x}$ .

Το παραπάνω φαινόμενο πιθανότητα οφείλεται στην ανάγκη χρήσης λωρίδων συγκρίσιμου μήκους με το χαρακτηριστικό μήκος  $\Delta x$  των κελιών μέσα στα οποία δουλεύουν και του πυρήνα  $\epsilon$  προβολής των δυνάμεων τους στο υπολογιστικό πλέγμα. Στη δημοσίευση [13] αναφέρεται πως ο αριθμός των λωρίδων που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλος, ούτε ώστε να υπάρχει επικάλυψη των προβολών των αεροδυναμικών δυνάμεων μεταξύ γειτονικών λωρίδων και έτσι να αποφεύγονται κενά διαστήματα κατά το εκπέτασμα του πτερυγίου. Από την άλλη μεριά, υπερβολικά μεγάλος αριθμός λωρίδων με πυρήνα  $\epsilon$  που θα είναι δυσανάλογα μεγάλος σε σχέση με το εκπέτασμά τους  $\Delta r$ , σημαίνει ότι οι δυνάμεις που υπολογίζονται σε συγκεκριμένα τμήματα του πτερυγίου επηρεάζουν τη ροή ακόμα και πολύ μακριά από αυτά, κοντά σε τμήματα όπου επικρατούν διαφορετικές συνθήκες. Σαν αποτέλεσμα, προκαλείται αστάθεια κατά τη διαδικασία της επίλυσης των εξισώσεων, η οποία αποτυπώνεται με μία έντονη διακύ-



**Διάγραμμα 3.3.4.** Σύγκλιση του μεγέθους της ισχύος για διαφορετικό αριθμό λωρίδων. Ισχύς [kW] στον κατακόρυφο άξονα και αριθμός χρονικών βημάτων στον οριζόντιο.

μανση γύρω από τη μέση τιμή της ισχύος, καθώς και τη λανθασμένη εκτίμηση της τιμής αυτής.

### 3.3.4 Χαρακτηριστικό Μήκος Πλέγματος

Τέλος αφότου έχουν προσδιοριστεί το μήκος εξάπλωσης το ομόρρου, το "χρονικό βήμα" δημιουργίας του (διακριτοποίηση κατά το μήκος εξάπλωσης) και ο αριθμός των λωρίδων (διακριτοποίηση κατά το εκπέτασμα του φτερού), μένει να διερευνηθεί η τιμή του χαρακτηριστικού μήκους του υπολογιστικού πλέγματος. Στόχος του Smearing correction είναι να λαμβάνονται αποτελέσματα επαρκώς ικανοποιητικά από αραιότερα πλέγματα σε σχέση με το  $\frac{R}{90}$ . Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι στα αραιότερα πλέγματα χωρίς το Smearing correction η τιμή της ακτίνας προβολής της δύναμης γίνεται αρκετά μεγάλη οδηγώντας οδηγώντας σε υποεκτίμηση της επαγόμενης ταχύτητας του ομόρρου και συνεπώς σε υπερεκτίμηση των γωνιών προσβολής στα διάφορα τμήματα των πτε-

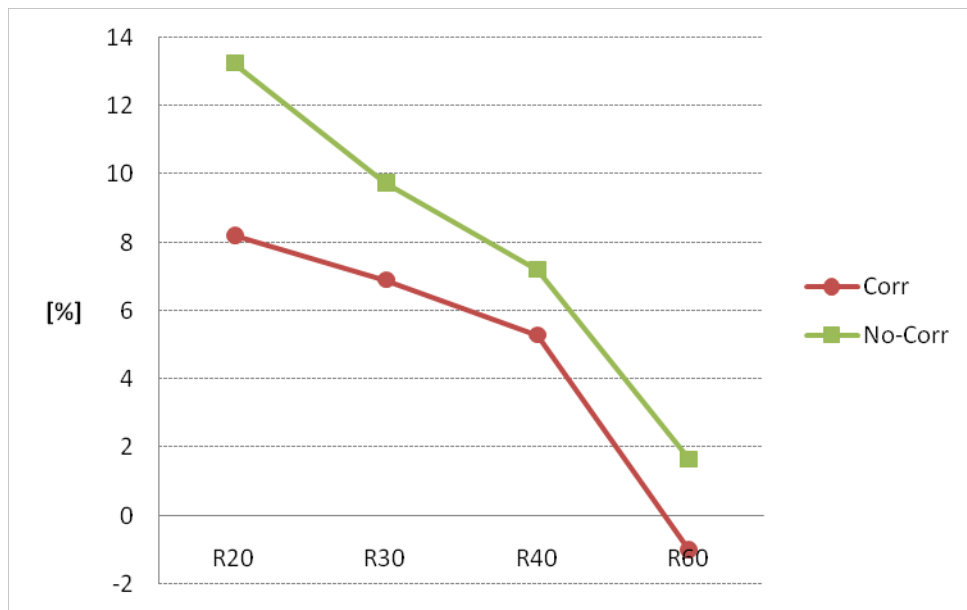
ρυγίων και της συνολικής ισχύος του δρομέα. Ως εκ' τούτου θα δοκιμαστούν τιμές του χαρακτηριστικού μήκους του πλέγματος ίσες με  $\{\frac{R}{20}, \frac{R}{30}, \frac{R}{40}, \frac{R}{60}\}$

Τα αποτελέσματα της παραπάνω παραμετρικής μελέτης παρατίθενται στον πίνακα 3.4 και στα διαγράμματα 3.3.7 και 3.3.8.

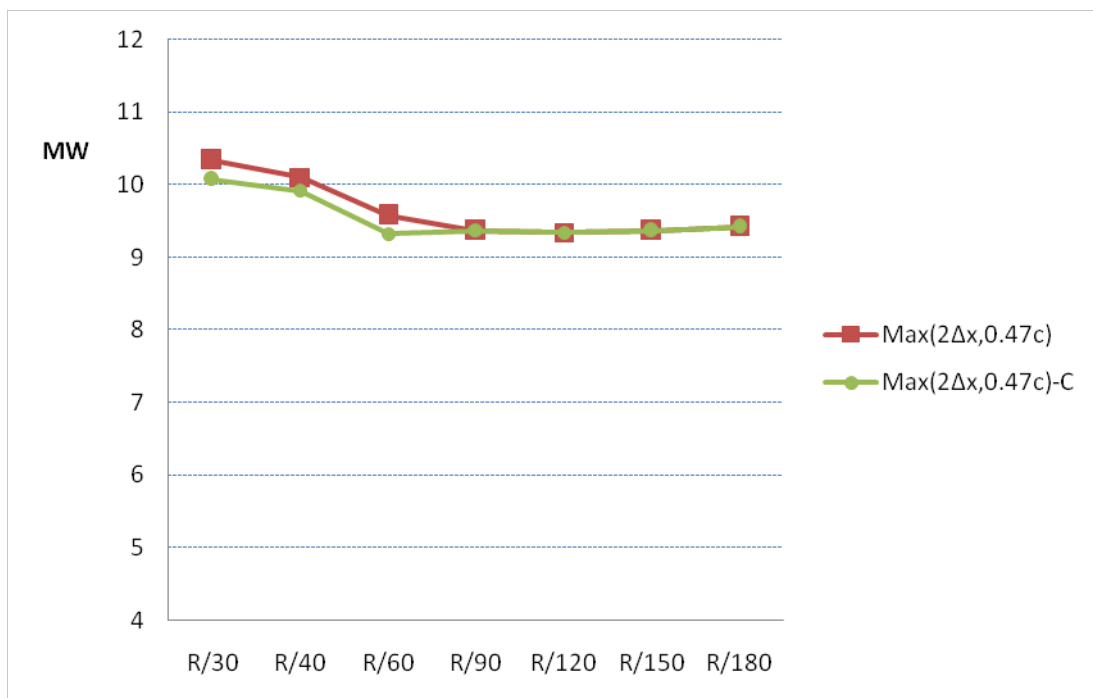
| Δx Πλέγματος | Ισχύς [MW]     |             | Απόκλιση ως προς R/180 [%] |             |
|--------------|----------------|-------------|----------------------------|-------------|
|              | χωρίς διόρθωση | με διόρθωση | χωρίς διόρθωση             | με διόρθωση |
| R/20         | 10.67          | 10.19       | 13.3%                      | 8.2 %       |
| R/30         | 10.34          | 10.07       | 9.7%                       | 6.9%        |
| R/40         | 10.098         | 9.92        | 7.2%                       | 5.3%        |
| R/60         | 9.58           | 9.42        | 1.7 %                      | -0.999%     |
| R/90         | 9.46           | -           | -0.6 %                     | -           |
| R/180        | 9.52           | -           | -                          | -           |

Πίνακας 3.5: Μεταβολή της ισχύος και ποσοστιαία απόκλιση της εκτιμώμενης ισχύος για διάφορα χαρακτηριστικά μήκη πλέγματος. Σαν τιμή αναφοράς λαμβάνεται η ισχύς που υπολογίζεται για πυκνότητα πλέγματος ίση με R/180

Στόχος είναι η επιλογή του βέλτιστου χαρακτηριστικού μήκους Δx, παρατηρώντας τα διαγράμματα 3.3.7 και 3.3.8 διαφαίνεται ότι την μικρότερη απόκλιση από την ισχύ που υπολογίζεται για  $\Delta x = \frac{R}{180}$  την εμφανίζει το  $\Delta x = \frac{R}{60}$ . Ενώ η συμπεριφορά της υπολογιζόμενης ισχύος από την μέθοδο γραμμής δράσης με του Smearing Correction για  $\Delta x = \{\frac{R}{20}, \frac{R}{30}, \frac{R}{40}\}$  ακολουθεί την ίδια συμπεριφορά με την απλή μέθοδο γραμμής δράσης.



**Διάγραμμα 3.3.5.** Ποσοστιαία απόκλιση της εκτιμώμενης ισχύος για διάφορα χαρακτηριστικά μήκη πλέγματος. Σαν τιμή αναφοράς λαμβάνεται η ισχύς που υπολογίζεται για πυκνότητα πλέγματος ίση με R/180



**Διάγραμμα 3.3.6.** Τροποποιημένη ανάλυση πλεγματικής ανεξαρτησίας. Ισχύς [MW] vs χαρακτηριστικό μήκος [m]. Με C συμβολίζονται οι λύσεις για το Smearing correction

### 3.4 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

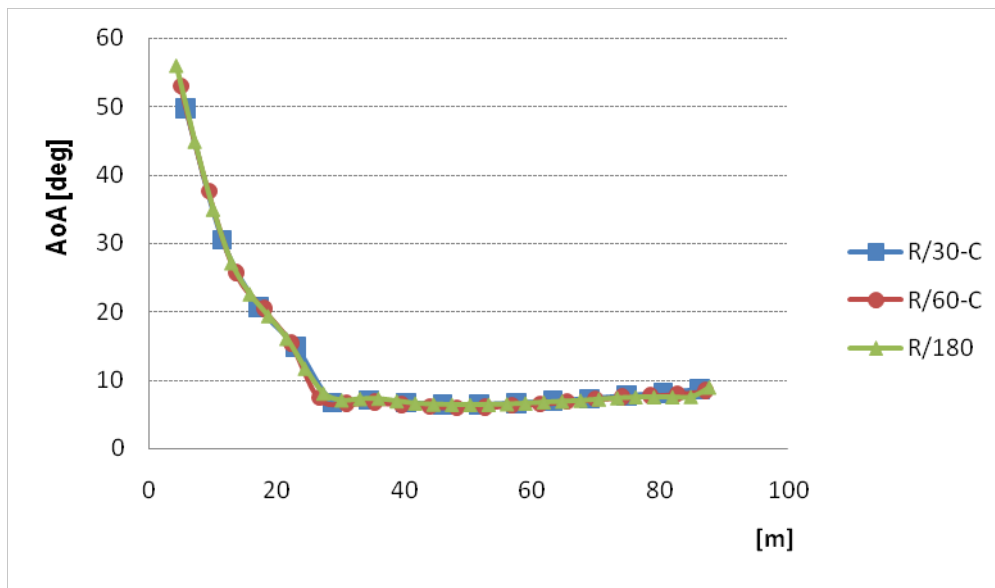
Για την καλύτερη μελέτη της απόδοσης της μεθόδου, στο παρακάτω υποκεφάλαιο θα εξεταστούν οι ακτινικές κατανομές ορισμένων αεροδυναμικών μεγεθών για το Smearing Correction στην AL μέθοδο. Όπως αποδείχθηκε και στην υποενότητα 3.3.5 το βέλτιστο χαρακτηριστικό μήκος πλέγματος για την εφαρμογή της διόρθωσης στην μέθοδο γραμμής δράσης είναι  $\Delta x = \frac{R}{60}$ . Συνεπώς τα διαγράμματα που ακολουθούν αφορούν σε αυτό το χαρακτηριστικό μήκος, παρατίθενται όμως και οι ακτινικές κατανομές για  $\Delta x = \frac{R}{30}$  καθώς και η δημιουργία του μοντέλου διόρθωσης έγινε πρωταρχικά για αυτό το  $\Delta x$ , αλλά και για λόγους σύγκρισης ως προς το υπολογιστικό κόστος.

Ουσιαστικός σκοπός του Smearing Correction είναι η μείωση των φορτίων στο ακροπερύγιο. Η άνωση δίνεται από τον τύπο  $L = C_l(a)Wef f^2$ , άρα μείωση της άνωσης έρχεται συνεπώς από την αλλαγή στη γωνία πρόσπτωσης, αλλά και από τη μείωση στο μέτρο της φαινόμενης ταχύτητας. Μάλιστα επειδή η ταχύτητα είναι στο τετράγωνο, ο δεύτερος παράγοντας είναι πολύ πιο σημαντικός από τον πρώτο. Τελικώς λοιπόν, αφού τα φορτία στα περύγια της Α/Γ είναι συνάρτηση του συντελεστή άνωσης και της ταχύτητας, σκοπός της διόρθωσης είναι η μείωση του φορτίου στο άκρο του περυγίου. Από το διάγραμμα 3.4.1 διαφαίνεται πως η γωνία προσβολής που προκύπτει από την μέθοδο γραμμής δράσης με διόρθωση για  $\Delta x = \frac{R}{60}$  είναι ιδιαίτερα κοντά στην λύση που προκύπτει για  $\Delta x = \frac{R}{180}$ , όπως και αυτή που προκύπτει για  $\Delta x = \frac{R}{30}$ .

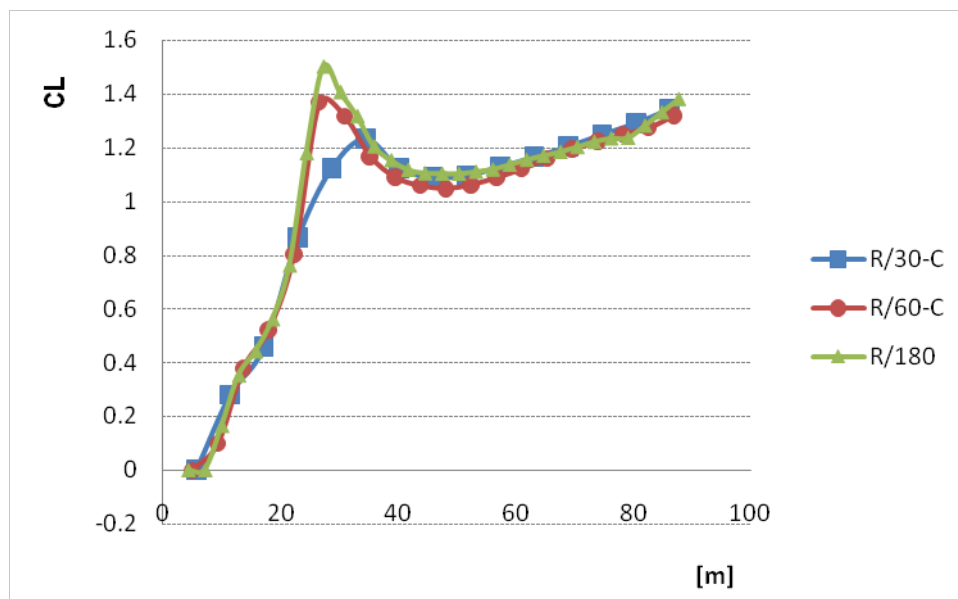
Συνεχίζοντας παρατηρώντας τα διαγράμματα 3.4.2 που αφορά στον υπολογιζόμενο συντελεστή άνωσης. Αν και παρατηρείται πολύ ικανοποιητική προσέγγιση του από την μέθοδο γραμμής δράσης με τη διόρθωση σε σχέση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν για  $\Delta x = \frac{R}{180}$ , υπάρχει μικρή απόκλιση. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η γωνία προσβολής στο ακροπερύγιο για τις δύο μεθόδους δεν είναι πανομοιότυπη όπως και η ταχύτητα, ως εκ τούτου υπολογίζονται διαφορετικοί συντελεστές άνωσης ανάμεσα στις δύο μεθόδους. Το γεγονός αυτό εντείνεται επειδή η ταχύτητα υψώνεται στο τετράγωνο οπότε πιθανά σφάλματα γίνονται πιο εμφανή. Παρόλα αυτά η μέθοδος με το Smearing Correction για  $\Delta x = \frac{R}{60}$  προσεγγίζει καλύτερα τα αποτελέσματα.

Στα διαγράμματα 3.4.3 και 3.4.4 γίνεται σύγκριση ανάμεσα στην απλή μέθοδο γραμμής δράσης με πυκνό πλέγμα  $\Delta x = \frac{R}{180}$  και την μέθοδο γραμμής δράσης με διόρ-





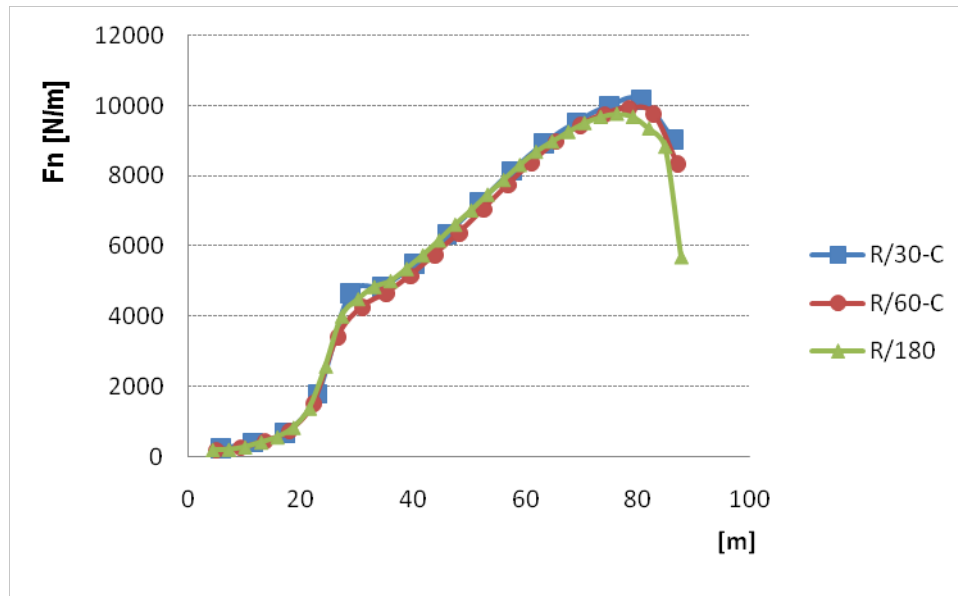
**Διάγραμμα 3.4.1.** Ακτινική κατανομή της γωνίας προσβολής για διάφορα χαρακτηριστικά μήκη πλέγματος. Με τον δείκτη C συμβολίζεται η μέθοδος διόρθωσης.



**Διάγραμμα 3.4.2.** Ακτινική κατανομή του συντελεστή άωσης για διάφορα χαρακτηριστικά μήκη πλέγματος. Με τον δείκτη C συμβολίζεται η μέθοδος διόρθωσης.

θωση για δύο χαρακτηριστικά μήκη αραιού πλέγματος. Το αξονικό φορτίο καθ'όλο το εκπέτασμα προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τα αραιά πλέγματα ενώ στην στο άκρο του πτερυγίου η μέθοδος με την διόρθωση αδυνατεί να αναπαραστήσει επαρκώς την ραγδαία πτώση της αξονικής δύναμης. Η τάση των φορτίων προς το μηδέν ερμηνεύεται από το

γεγονός ότι στη τελευταία λωρίδα του πτερυγίου υπάρχει μη μηδενική κυκλοφορία ενώ αμέσως μετά η κυκλοφορία είναι μηδενική. Ισοδύναμα η κλίση της κυκλοφορίας είναι πολύ μεγάλη με αποτέλεσμα να επάγονται στρόβιλοι ακροπτερυγίου μεγάλης έντασης που οδηγούν με την σειρά τους στο μηδέν την αξονική συνιστώσα της δύναμης αλλά και τον συντελεστή αξονικής επαγωγής, όπως διαφαίνεται από τα διαγράμματα 3.4.3 και 3.4.6.

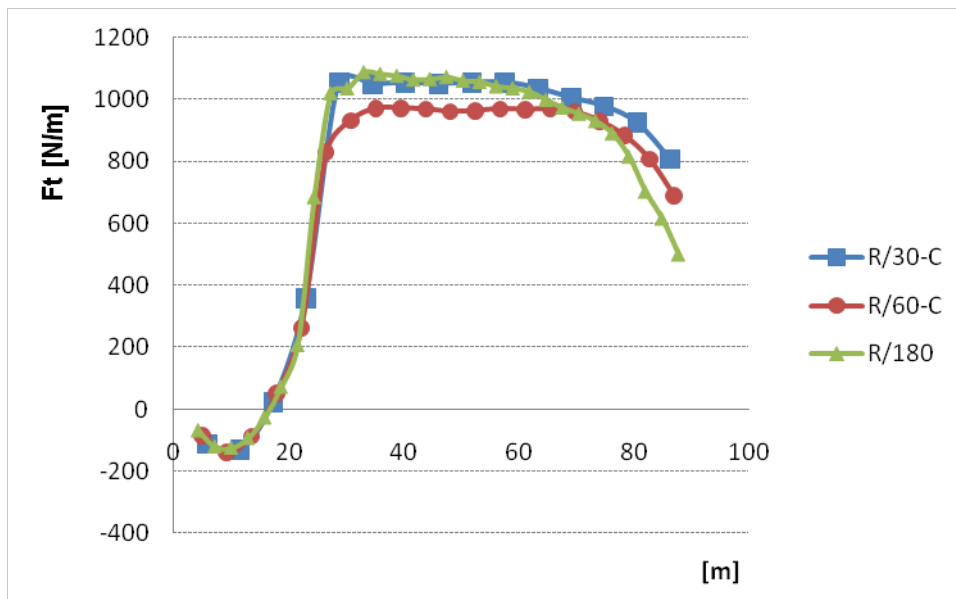


**Διάγραμμα 3.4.3.** Ακτινική κατανομή της αξονικής συνιστώσας της δύναμης για διάφορα χαρακτηριστικά μήκη πλέγματος. Με τον δείκτη C συμβολίζεται η μέθοδος διόρθωσης.

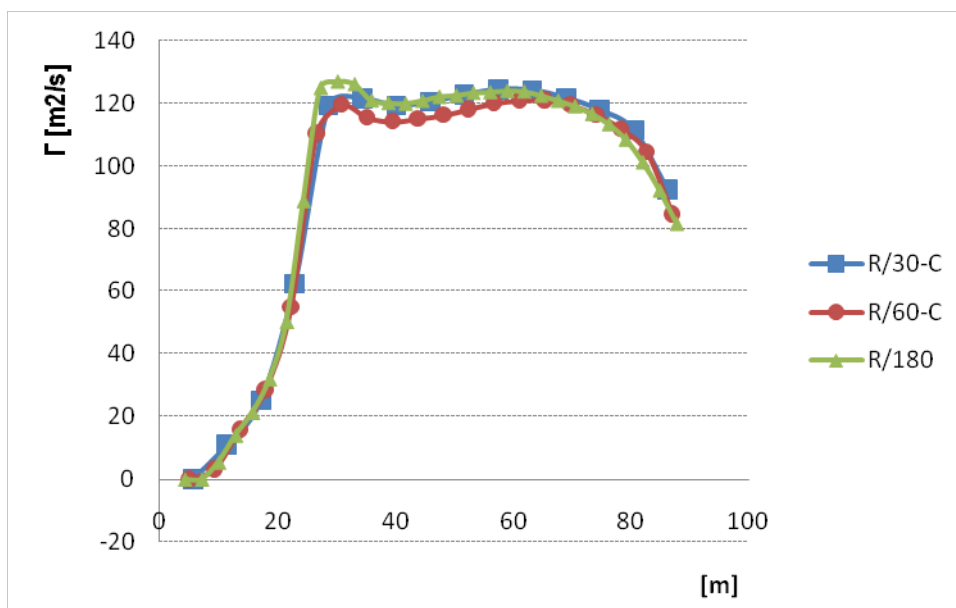
Στο διάγραμμα 3.4.5 γίνεται σύγκριση της ακτινικής κατανομής της κυκλοφορίας. Η μέθοδος με το Smearing Correction για χαρακτηριστικό μήκος  $\Delta x = \frac{R}{60}$  καταφέρνει να προσεγγίζει πολύ καλά τα αποτελέσματα του πυκνού υπολογιστικού πλέγματος, προς το άκρο του πτερυγίου.

Τέλος στα διαγράμματα 3.4.6 και 3.4.7 φαίνονται οι κατανομές των συντελεστών αξονικής και περιφερειακής επαγωγής για την απλή και την διορθωμένη μέθοδο. Το χαρακτηριστικό μήκος  $\Delta x = \frac{R}{60}$  προβλέπει με ικανοποιητική ακρίβεια στο ακροπτερύγιο την τιμή του συντελεστή αξονικής επαγωγής.

Συμπερασματικά, η μέθοδος γραμμής δράσης για αραιά πλέγματα με τη χρήση του Smearing Correction προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα το οποίο αποδείχθηκε

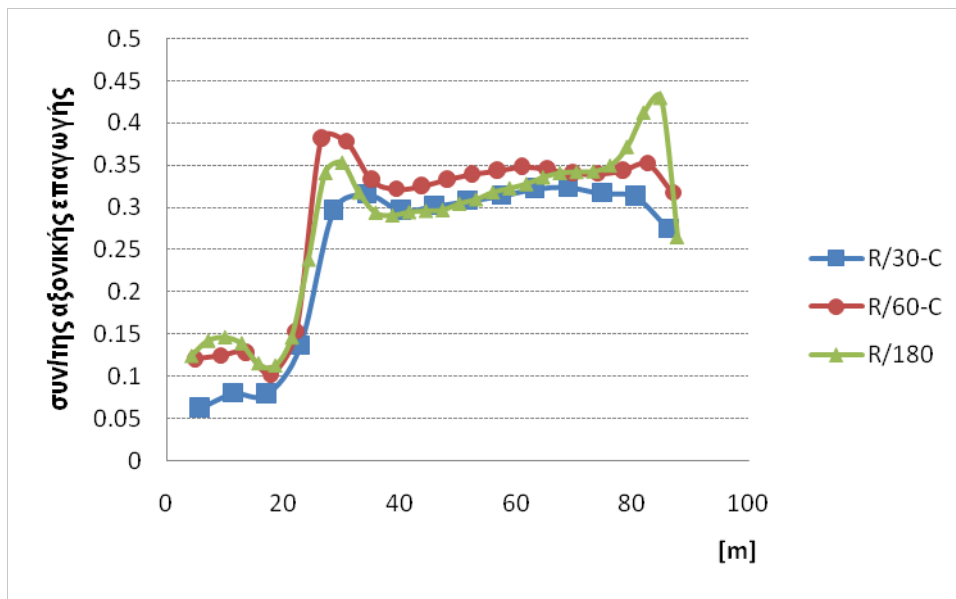


**Διάγραμμα 3.4.4.** Ακτινική κατανομή της εφαπτομενικής συνιστώσας της δύναμης για διάφορα χαρακτηριστικά μήκη πλέγματος. Με τον δείκτη C συμβολίζεται η μέθοδος διόρθωσης.

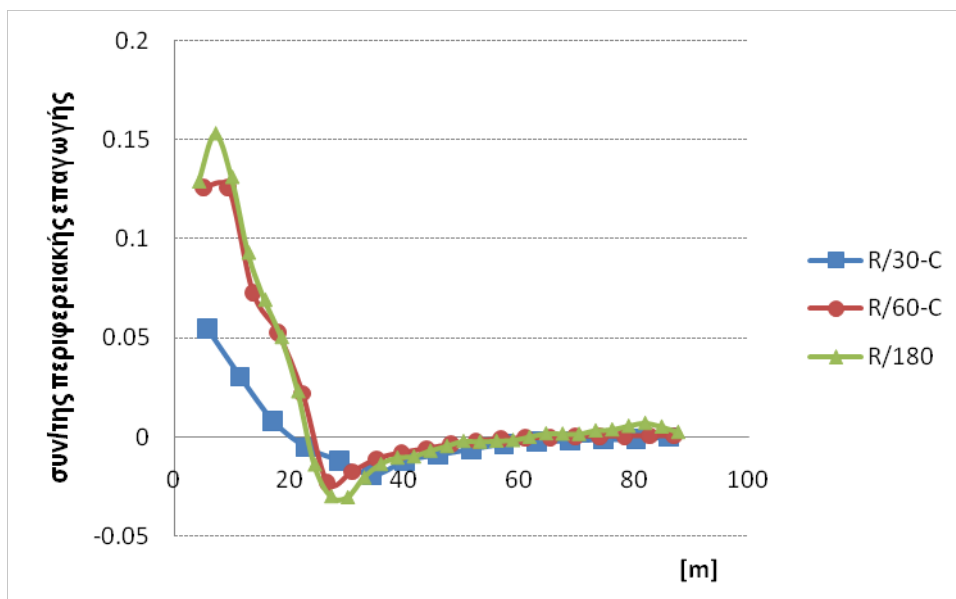


**Διάγραμμα 3.4.5.** Ακτινική κατανομή της κυκλοφορίας για διάφορα χαρακτηριστικά μήκη πλέγματος. Με τον δείκτη C συμβολίζεται η μέθοδος διόρθωσης.

μέσω της σύγκρισης των ολοκληρωμένων μεγεθών στο κεφάλαιο 3.3.5 αλλά και από τις ακτινικές κατανομές των αεροδυναμικών μεγεθών του κεφαλαίου 3.4. Παρόλο που δεν



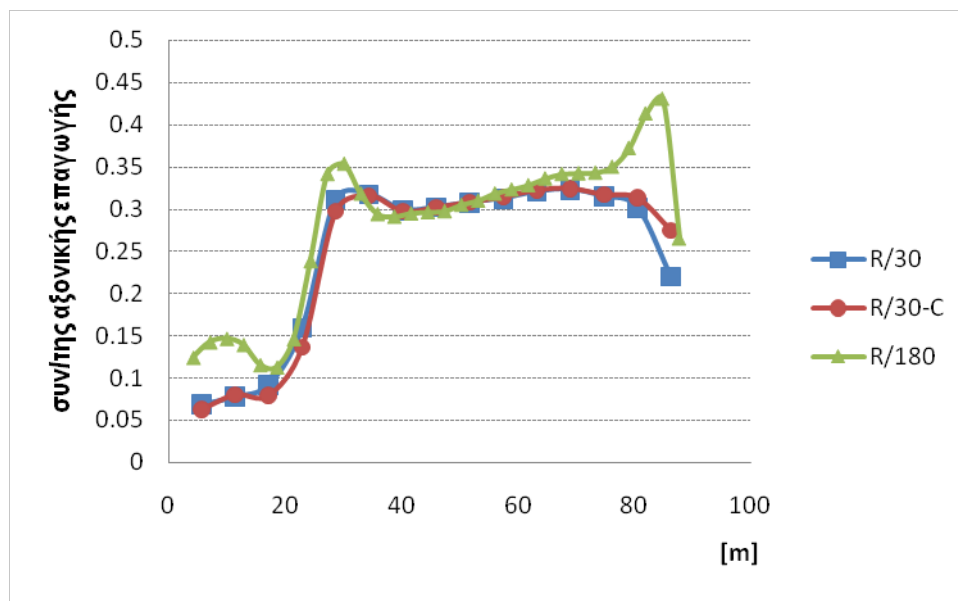
**Διάγραμμα 3.4.6.** Ακτινική κατανομή του συντελεστή αξονικής επαγωγής για διάφορα χαρακτηριστικά μήκη πλέγματος. Με τον δείκτη C συμβολίζεται η μέθοδος διόρθωσης.



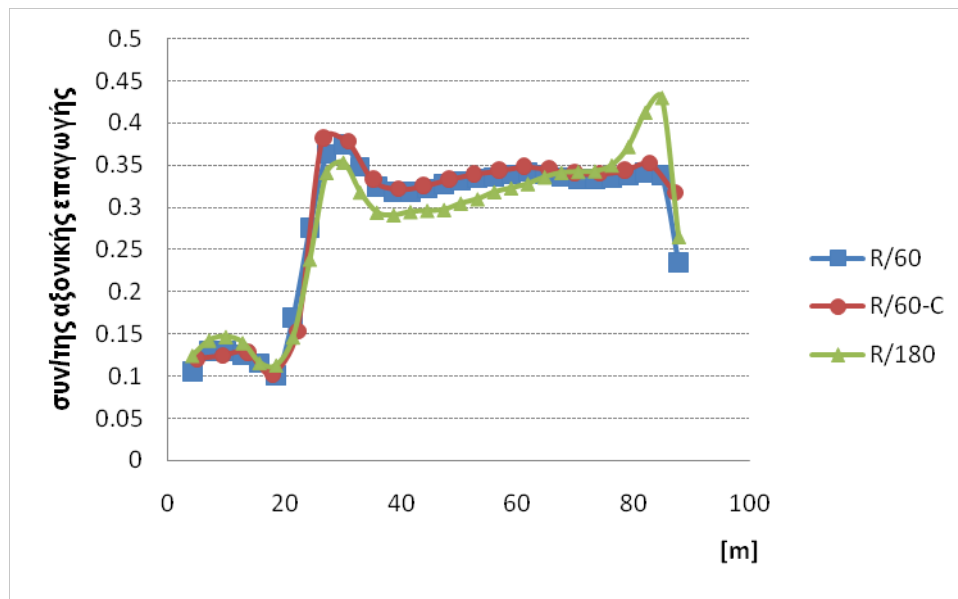
**Διάγραμμα 3.4.7.** Ακτινική κατανομή του συντελεστή περιφερειακής επαγωγής για διάφορα χαρακτηριστικά μήκη πλέγματος. τον δείκτη C συμβολίζεται η μέθοδος διόρθωσης.

υπήρχε πλήρης ταύτιση στις κατανομές υπήρξαν εμφανείς βελτιώσεις σε σχέση με την χρήση αραιών πλεγμάτων χωρίς την διόρθωση όπως φαίνεται από τα διαγράμματα 3.4.8

και 3.4.9. Η πράσινη καμπύλη του  $\frac{R}{180}$  έχει τη χαρακτηριστική κατανομή της μεθόδου Γραμμής Δράσης χωρίς διόρθωση ενώ οι καμπύλες των σχημάτων με διόρθωση έπρεπε να ακολουθούν την κατανομή της Γραμμής Άνωσης. Παρόλο που δεν ακολουθούν επακριβώς την μορφή αυτή, παρατηρείται ότι το Smearing Correction επιφέρει αύξηση της επαγόμενης ταχύτητας στο ακροπτερύγιο σε σχέση με την κλασική μέθοδο της Γραμμής Δράσης. Έτσι γίνεται εφικτός ο πρωταρχικός στόχος αυτής της διπλωματικής που είναι η εύρεση φθηνότερων αλλά αριθμητικά ορθών λύσεων με την χρήση της μεθόδου γραμμής δράσης.



**Διάγραμμα 3.4.8.** Σύγκριση ακτινικών κατανομών του συντελεστή αξονικής επαγωγής για τη μέθοδο με διόρθωση και χωρίς αυτή για χαρακτηριστικό μήκος πλέγματος  $\Delta x=R/30$ . Με τον δείκτη C συμβολίζεται η μέθοδος διόρθωσης.



**Διάγραμμα 3.4.9.** Σύγκριση ακτινικών κατανομών του συντελεστή αξονικής επαγωγής για τη μέθοδο με διόρθωση και χωρίς αυτή για χαρακτηριστικό μήκος πλέγματος  $\Delta x=R/60$ . Με τον δείκτη C συμβολίζεται η μέθοδος διόρθωσης.

Στο παρακάτω κεφάλαιο θα γίνει ανασκόπηση όσων εξετάστηκαν και προέκυψαν στο κεφάλαιο 3 για τη χρήση της διόρθωσης στη μόνιμη περιοδική περίπτωση ταχύτητας ανέμου 11 m/s για την Α/Γ 10 MW του DTU.

### 3.5 Συμπεράσματα για Περιοδική Μόνιμη Περίπτωση

Μετά την ανάλυση που προηγήθηκε στο κεφάλαιο 3 διαφαίνεται ότι η χρήση του Smearing Correction για την μεθοδολογία γραμμής δράσης η υπολογιζόμενη ισχύς μειώνεται σε σχέση με τις λύσεις χωρίς την διόρθωση. Επιπρόσθετα η σχετική απόκλιση ως προς  $\frac{R}{180}$  μειώνεται με αποτέλεσμα να λαμβάνονται ικανοποιητικά αποτελέσματα πλέον για χαρακτηριστικό μήκος πλέγματος ίσο με  $\frac{R}{60}$  ενώ χωρίς την διόρθωση χρειάζεται χαρακτηριστικό μήκος πλέγματος ίσο με  $\frac{R}{90}$ . Με άλλα λόγια μειώνεται η ανάγκη σε υπολογιστικές κυψέλες από 495 χιλιάδες σε 283 χιλιάδες, όπως παρατίθεται και στον πίνακα 3.5

Αντίστοιχα λοιπόν ανάγοντας τα αποτελέσματα σε ώρες επεξεργαστών (core hours)

| $\Delta x$      | υπολογιστικές κυψέλες   | Μείωση κυψελών<br>ως προς $\frac{R}{180}$ | Μείωση κυψελών<br>ως προς $\frac{R}{90}$ |
|-----------------|-------------------------|---|--|
| $\frac{R}{30}$  | 157000 (157 χιλιάδες)   | 89.5%                                     | 67.3%                                    |
| $\frac{R}{60}$  | 283000 (283 χιλιάδες)   | 87.7%                                     | 42.8%                                    |
| $\frac{R}{90}$  | 495000 (495 χιλιάδες)   | 77.8%                                     | -  |
| $\frac{R}{180}$ | 2230000 (2230 χιλιάδες) | -   | -  |

Πίνακας 3.6: Αριθμός κελιών και μείωση αυτών για διάφορα μήκη πλέγματος. Στην 3η στήλη τιμή αναφοράς είναι  $\Delta x = \frac{R}{180}$  και στην 4η  $\Delta x = \frac{R}{90}$

είναι εφικτό να φανεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου του Smearing Correction. Όπως αποδείχθηκε στο κεφάλαιο 2 η επιθυμητή αριθμητική ακρίβεια στα αποτελέσματα της μεθόδου γραμμής δράσης επέρχεται με την πυκνωση των υπολογιστικών πλεγμάτων. Με βάση την παραμετρική ανάλυση που προηγήθηκε στο υποκεφάλαιο 2.4 ικανοποιητικά αποτελέσματα λαμβάνονται για πυκνότητα πλέγματος ίση με  $\frac{R}{90}$ . Ο πίνακας 3.6 παραθέτει τον υπολογιστικό χρόνο σε ώρες επεξεργαστών για διάφορα χαρακτηριστικά μήκη πλέγματος και την μείωση αυτού που επιτυγχάνεται αν χρησιμοποιηθεί η διόρθωση. Είναι πλέον δυνατό να παράγονται αριθμητικά αξιόπιστα αποτελέσματα στο 57% του αρχικού χρόνου ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπολογιστικά πλέγματα με 43% λιγότερες υπολογιστικές κυψέλες.

| $\Delta x$                 | core hours | Μείωση υπολογιστικού<br>χρόνου ως προς $\frac{R}{180}$ | Μείωση υπολογιστικού<br>χρόνου ως προς $\frac{R}{90}$ |
|----------------------------|------------|--|---|
| $\frac{R}{30}$ με διόρθωση | 27.66126   | 85.6%  | 64.8%   |
| $\frac{R}{60}$ με διόρθωση | 45.04566   | 76.6 %   | 42.7%   |
| $\frac{R}{90}$             | 78.6375    | 59.1%  | -   |
| $\frac{R}{180}$            | 192.461    | -  | -   |

Πίνακας 3.7: Υπολογιστικός χρόνος και μείωση αυτού για διάφορα μήκη πλέγματος. Στην 3η στήλη τιμή αναφοράς είναι  $\Delta x = \frac{R}{180}$  και στην 4η  $\Delta x = \frac{R}{90}$

## Κεφάλαιο 4

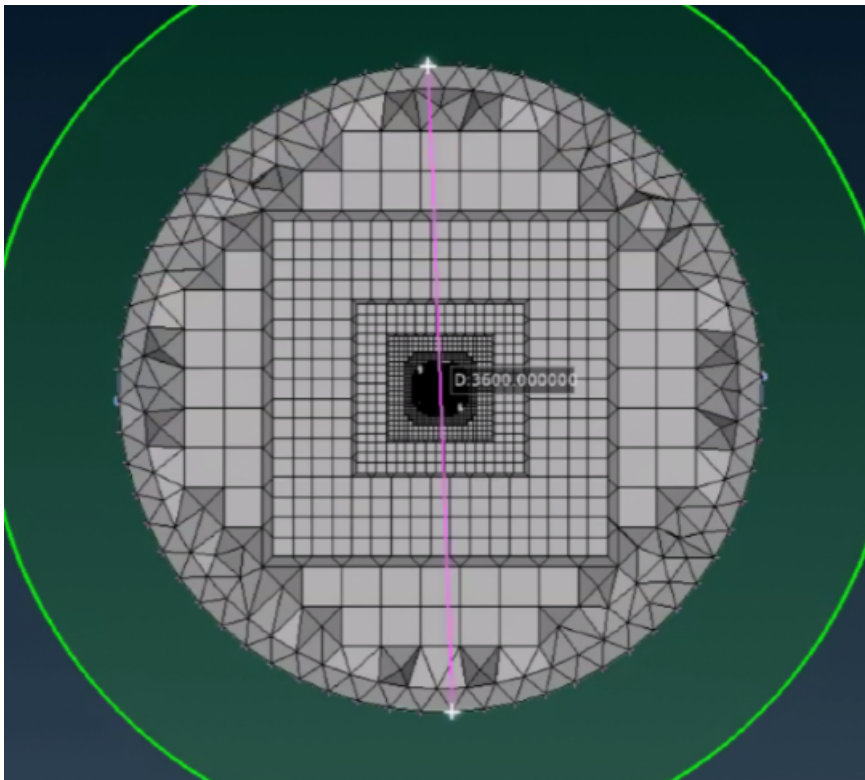
# Διόρθωση Μεθόδου Γραμμής Δράσης για Μη Μόνιμη Περίπτωση

### 4.1 Ορισμός Μη Μόνιμου Προβλήματος

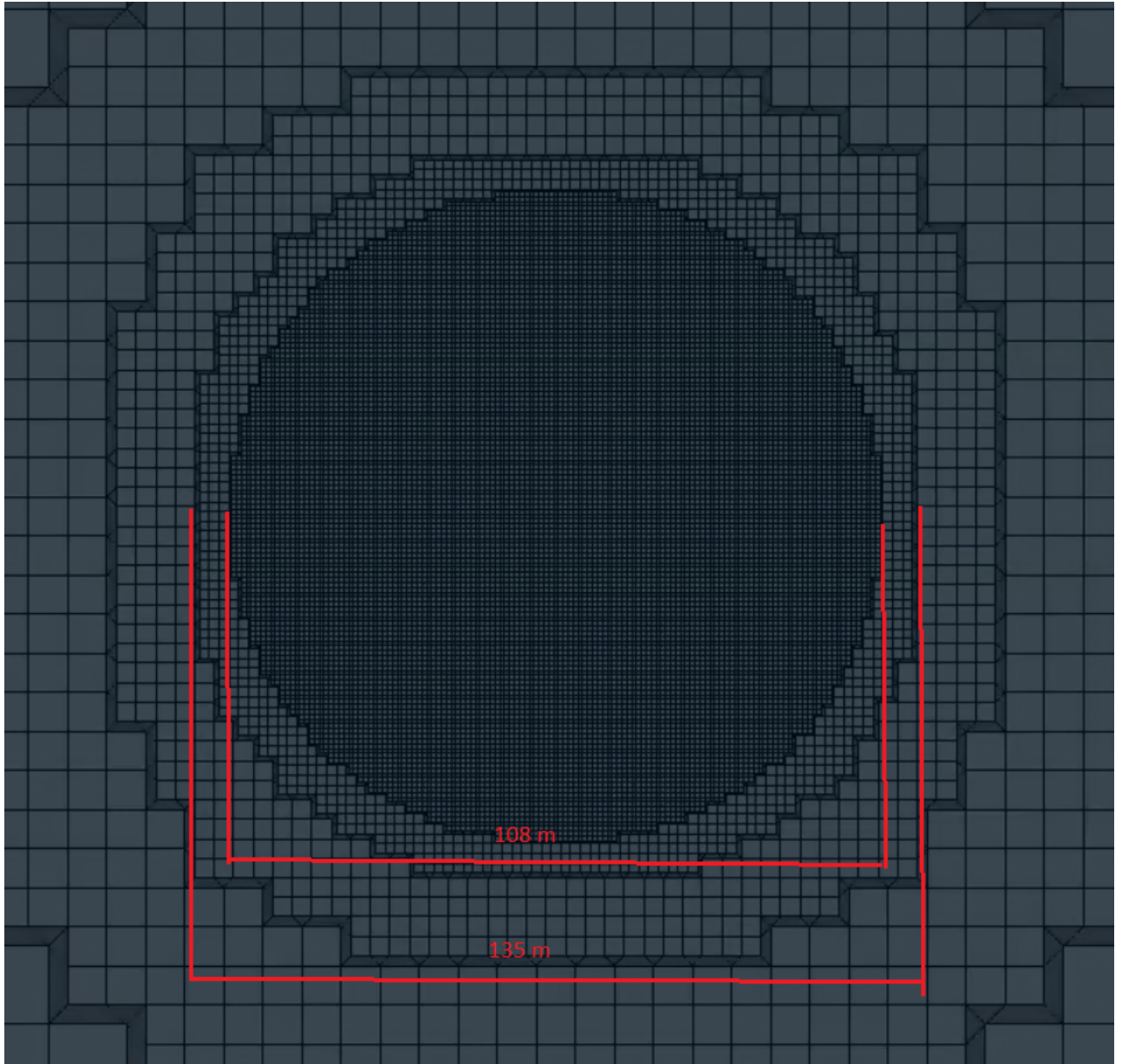
Όπως και στην περιοδική περίπτωση το πλέγμα απαρτίζεται από τρεις διακριτές περιοχές, όπως φαίνεται και στα διαγράμματα 4.1.1 ως 4.1.3. Η πρώτη περιοχή απαρτίζεται από δομημένο πλέγμα χαρακτηριστικού μήκους  $\Delta x$  και αναπαριστά την περιοχή όπου περιστρέφονται τα πτερύγια. Η περιοχή αυτή δε ορίζεται από κυλινδρικό χωρίο ακτίνας  $R + 6\Delta x$  και μήκους  $6.5\Delta x$  εκατέρωθεν των πτερυγίων. Η δεύτερη περιοχή ορίζεται από κυλινδρικό χωρίο μήκους τεσσάρων διαμέτρων (4D), μία διάμετρο (1D) ανάντη της γραμμής δράσης και τρεις διαμέτρους (3D) κατόντη, και διαμέτρου ίση με  $3R$ , όπου  $R$  η ακτίνα και  $D$  η διάμετρος του δρομέα της Α/Γ. Ρόλος αυτής της περιοχής είναι η ακριβής αναπαράσταση της εξέλιξης του ομόρρου του δρομέα, γι αυτό και χαρακτηρίζεται από ομοιόμορφο πλέγμα χαρακτηριστικού μήκους  $10\Delta x$ . Τέλος διακρίνεται ο ευρύτερος χώρος προσομοίωσης όπου αποτελείται από κυλινδρικό χωρίο μήκους και διαμέτρου είκοσι διαμέτρων (20D). Το χαρακτηριστικό μήκος αυτής της περιοχής ορίζεται ως  $\Delta x = D = 180m$ . Λεπτομέρειες για την επιλογή του συγκεκριμένου τύπου πλέγματος και των παραπάνω παραμέτρων αναλύονται στη δημοσίευση [16]

Ακόμη είναι απαραίτητος ο ορισμός ενός χρονικού βήματος,  $\Delta t$ , που θα καθορίζει

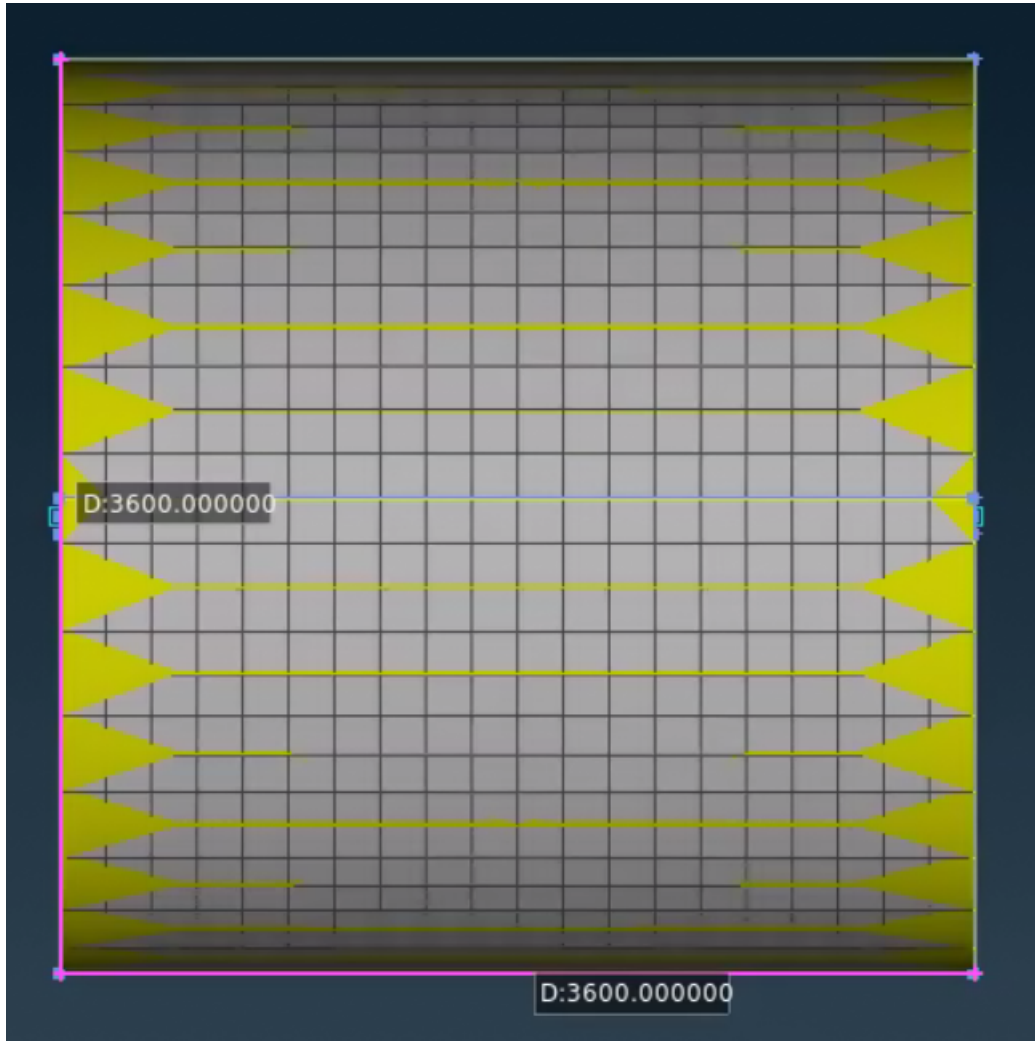




**Διάγραμμα 4.1.1.** Αξονική όψη του πλέγματος για μη μόνιμη περίπτωση. Τα μήκη παρατίθενται σε m.



**Διάγραμμα 4.1.2.** Εστιασμένη αξονική όψη του πλέγματος. Διακρίνονται οι δύο κυκλικές περιοχές οι οποίες αφορούν στα πτερύγια και στον ομόρροο αντίστοιχα. Τα μήκη που παρατίθενται είναι σε m.



**Διάγραμμα 4.1.3.** Πλάγια όψη του πλέγματος για μη μόνιμη περίπτωση. Τα μήκη παρατίθενται σε m.

την εξέλιξη του μη μόνιμου προβλήματος. Η τιμή αυτή ορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε σε κάθε χρονικό βήμα τα πτερύγια να περιστρέφονται το μέγιστο κατά μισό μήκος υπολογιστικού κελιού. Άρα  $Dt = \frac{\Delta x}{2V_{tip}}$ . Όπου  $V_{tip} = \Omega R = 83.28m/s$  με γωνιακή ταχύτητα του δρομέα  $\Omega = 0.9253037rad/s$  για ταχύτητα ανέμου ίση με 11 m/s και  $R=90$  m για την υπό μελέτη Α/Γ. Έτσι προσδιορίζεται το χρονικό βήμα, για πλέγμα χαρακτηριστικού μήκους  $\frac{R}{60} = 1.5m$ , ως  $Dt = 0.00904sec$ .

## 4.2 Περιγραφή Μεθόδου Διόρθωσης για το Μη Μόνιμο Πρόβλημα

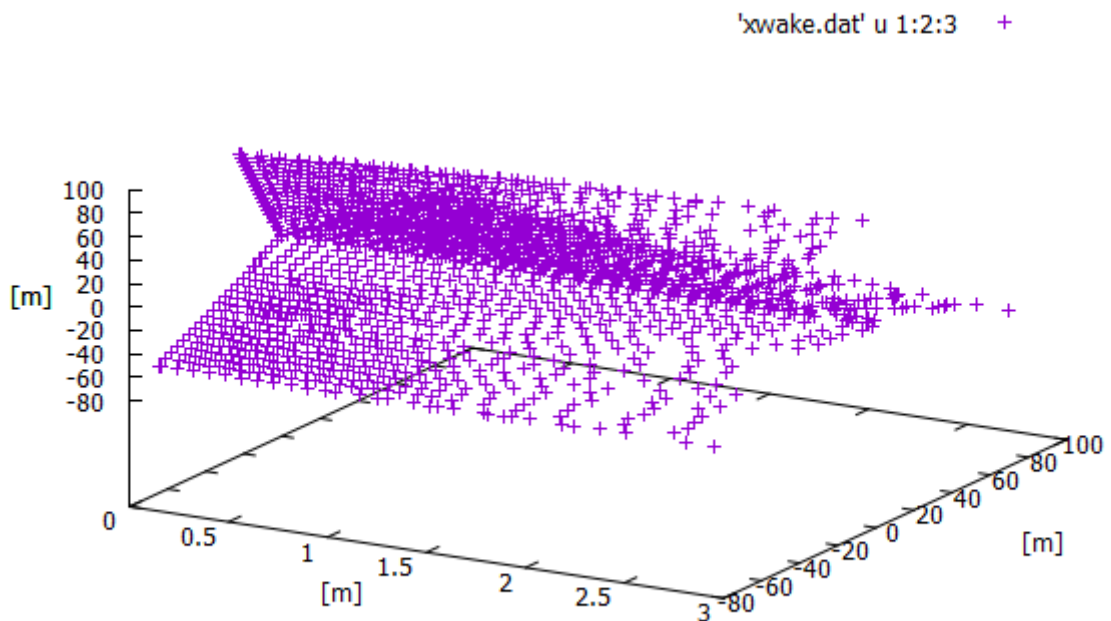
Ο αλγόριθμος υλοποίησης του Smearing Correction, αν και βασίζεται στην διαφορά του νόμου των Biot-Savart από το Lamb-Oseen που παρατέθηκε στο υποκεφάλαιο 2.3.2, παρουσιάζει κάποιες εμφανείς διαφορές λόγω της ύπαρξης μη μόνιμου πεδίου ροής.

Η κυριότερη διαφορά ανάμεσα στην μόνιμη περιοδική και στην μη μόνιμη περίπτωση εντοπίζεται στον τρόπο δημιουργίας του ομόρρου. Όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.2.1, για την μόνιμη περίπτωση, πρώτο μέλημα είναι η τοποθέτηση όλων των σημείων του ομόρρου στον χώρο. Μετέπειτα εφαρμόζεται η εξίσωση των Biot-Savart από όλα τα νήματα στροβιλότητας προς όλα τα κέντρα ελέγχου (strip centers) της γραμμής δράσης. Η κυκλοφορία, που έχουν τα νήματα στροβιλότητας, κληρονομείται από την εκάστοτε γραμμή ελέγχου (strip) από την οποία δημιουργήθηκαν.

Αντίθετα, για την μη μόνιμη περίπτωση, ο ομόρρος του δρομέα δημιουργείται τμηματικά προσθέτοντας μία σειρά από στοιχεία κάθε χρονικό βήμα. Ταυτόχρονα η κυκλοφορία, σε κάθε χρονικό βήμα, προσδιορίζεται μέσω μίας εσωτερικής επανάληψης. Αυτό συμβαίνει διότι τα στοιχεία του κοντινού ομόρρου κληρονομούν την κυκλοφορία της γραμμής ελέγχου από την οποία παράχθηκαν, επάγοντας έτσι κατώρευμα και άρα μεταβάλλοντας τη φαινόμενη ταχύτητα του πτερυγίου, τα φορτία και την κυκλοφορία. Ως εκ' τούτου χρειάζεται, για κάθε χρονικό βήμα, μία εσωτερική επανάληψη για να συγκλίνει η κυκλοφορία του κοντινού ομόρρου με βάση το κριτήριο  $\frac{(\Gamma_n - \Gamma_{n-1})}{\Gamma_n} < 0.001$ , όπου n ο δείκτης των εσωτερικών επαναλήψεων. Εν ολίγοις στην μη μόνιμη περίπτωση η κυκλοφορία ενός πάνελ του ομόρρου δεν είναι μόνο συνάρτηση των λωρίδων από τα

οποία προέκυψε αλλά και του χρονικού βήματος στο οποίο δημιουργήθηκε.

Για την μετάβαση στο επόμενο χρονικό βήμα υπάρχουν δύο βασικά στάδια. Το πρώτο βήμα είναι η αποθήκευση όλης της ιστορίας του ομόρρου και η μεταφορά του στον χώρο. Δεύτερο βήμα είναι η παραγωγή του κοντινού ομόρρου. Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονιστεί ότι τα σημεία του κοντινού ομόρρου αλλάζουν μέχρις ότου να προκύψει σύγκλιση στην κυκλοφορία τους. Το τελικό αποτέλεσμα του ομόρρου της ανεμογεννήτριας παρατίθεται στην εικόνα 4.2.1.



**Διάγραμμα 4.2.1.** Παραγόμενος ομόρρος του δρομέα για το μη μόνιμο πρόβλημα.

Στην ενότητα 3.2.1, για την μόνιμη περιοδική περίπτωση, για την δημιουργία του ομόρρου εισήχθησαν ως αριθμητικές παράμετροι οι μεταβλητές  $j$  και  $Dt$ . Η πρώτη καθορίζει το μήκος εξάπλωσης του ομόρρου ενώ η δεύτερη είναι το ψευδοχρονικό βήμα που ορίζει το κάθε πότε θα τοποθετούνται νέα σημεία του στον χώρο. Όπως προέκυψε από την παραμετρική μελέτη των υποκεφαλαίων 3.3.1 ως 3.3.4, το μήκος εξάπλωσης του ομόρρου που επέφερε αριθμητική ανεξαρτησία είναι ίσο με  $\frac{R}{32} = 2.82m$ . Η παράμετρος χρησιμοποιήθηκε και στο μη μόνιμο πρόβλημα όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 4.2.1. Το ψευδοχρονικό βήμα που χρησιμοποιήθηκε στην περιοδική περίπτωση καταργήθηκε καθώς και πλέον υπάρχει το φυσικό χρονικό βήμα του μη μόνιμου προβλήματος που είναι εμφανώς μικρότερο του ψευδοχρονικού βήματος. Έτσι παρατηρείται η δημιουργία ενός πυκνότερου ομόρρου στην μη μόνιμη περίπτωση σε σχέση με αυτόν της περιοδικής περίπτωσης.

### **4.3 Ισοδυναμία Αποτελεσμάτων Περιοδικής και Μη Μόνιμης Περίπτωσης**

Πρωταρχικό μέλημα της παρούσας ενότητας είναι να αποδειχθεί η ισοδυναμία των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από το περιοδικό τρέξιμο και το μη μόνιμο τρέξιμο. Το περιοδικό τρέξιμο αφορά στην προσομοίωση ενός φτερού που κινείται μέσα σε περιοδικό πλέγμα γωνίας  $120^\circ$  ενώ η ροή θεωρείται πλήρως διαμορφωμένη και άρα μόνιμη. Αντιθέτως το μη μόνιμο αφορά στην μοντελοποίηση και των τριών πτερυγίων της A/G σε κυλινδρικό πλέγμα. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, λόγω της παραμετρικής μελέτης που προηγήθηκε, τόσο στην μέθοδο γραμμής δράσης όσο και σε αυτή με την διόρθωση, δεν θα ήταν χρονικά εφικτό όλα τα τρεξίματα να γινόντουσαν για τρία πτερύγια και μη μόνιμη ροή. Συμπερασματικά κρίνεται απαραίτητο να διερευνηθεί ότι λαμβάνονται αριθμητικά όμοια αποτελέσματα για τις δύο περιπτώσεις και άρα να αποδειχθεί η ισοδυναμία τους.

Κύριος δείκτης της ανωτέρω διερεύνησης θα είναι οι σχετικές αποκλίσεις ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις για τα ολοκληρωμένα μεγέθη, δηλαδή για την υπολογιζόμενη ώση και ισχύ. Ταυτοχρόνως θα παρατεθούν οι ακτινικές κατανομές ορισμένων αεροδυναμικών μεγεθών για περαιτέρω μελέτη του θέματος.

Παρατίθενται και πινακοποιημένα τα υπό εξέταση μεγέθη, ώστε να γίνει πιο εύκολα αντιληπτό στον αναγνώστη ότι η μη μόνιμη περίπτωση και η περιοδική μόνιμη επιφέρουν αριθμητικά όμοια αποτελέσματα. Δείκτης αυτής της διερεύνησης θα αποτελέσει το σχετικό σφάλμα της ισχύος και της ώσης αντίστοιχα για τις δύο περιπτώσεις να μην υπερβαίνει το 1%

|                | Ισχύς Περιοδικής Περίπτωσης | Ισχύς Μη Μόνιμης Περίπτωσης | Απόκλιση |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------|----------|
| Χωρίς Διόρθωση | 9.58                        | 9.66                        | 0.9%     |
| Με Διόρθωση    | 9.33                        | 9.29                        | -0.354%  |

Πίνακας 4.1: Υπολογιζόμενη ισχύς για τις δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Η ισχύς παρατίθεται σε MW.

|                | Ώση Περιοδικής Περίπτωσης | Ώση Μη Μόνιμης Περίπτωσης | Απόκλιση |
|----------------|---------------------------|---------------------------|----------|
| Χωρίς Διόρθωση | 1469.2                    | 1472.2                    | 0.21%    |
| Με Διόρθωση    | 1454.7                    | 1447.04                   | -0.53%   |

Πίνακας 4.2: Υπολογιζόμενη ώση για τις δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Η ώση παρατίθεται σε kN.

## 4.4 Ακτινικές κατανομές

Αφότου εξασφαλίστηκε η ισοδυναμία των δύο περιπτώσεων με την σύγκριση των ολοκληρωμένων μεγεθών της ώσης και της ισχύος, στο παρόν υποκεφάλαιο θα γίνει μια ενδελεχής διερεύνηση βασιζόμενη στις ακτινικές κατανομές ορισμένων χαρακτηριστικών αεροδυναμικών μεγεθών. Ειδικότερα θα συγκριθούν οι ακτινικές κατανομές συγκεκριμένων αεροδυναμικών μεγεθών για την απλή περίπτωση της μεθόδου γραμμής δράσης και για αυτήν με την διόρθωση τόσο για την περιοδική περίπτωση όσο και για το μη μόνιμο πρόβλημα.

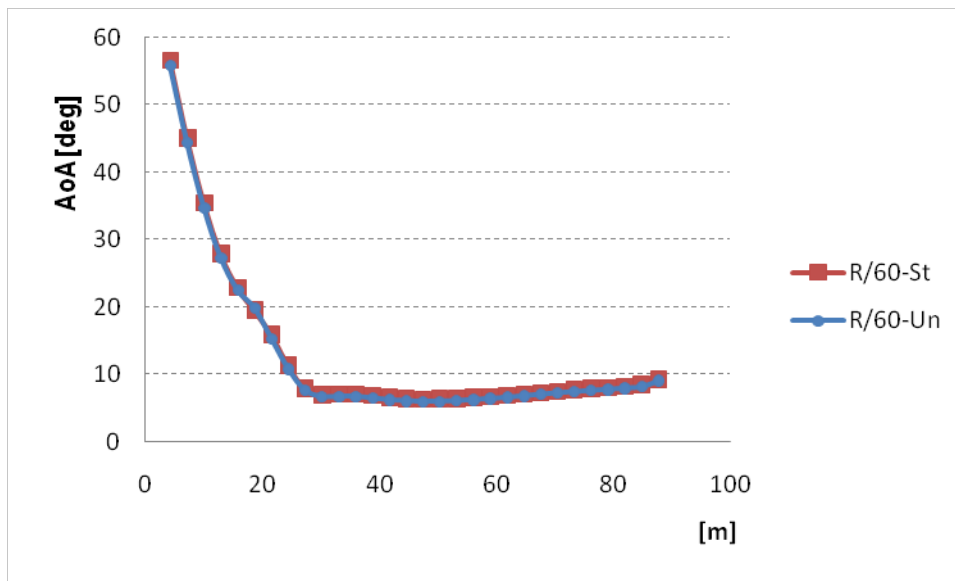
#### 4.4.1 Σύγκριση ακτινικών κατανομών για τη μέθοδο της Γραμμής Δράσης χωρίς διόρθωση

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρατίθενται οι ακτινικές κατανομές ορισμένων αεροδυναμικών μεγεθών με στόχο την επαλήθευση της ισοδυναμίας των αριθμητικών αποτελεσμάτων ανάμεσα στην περιοδική μόνιμη περίπτωση και την μη μόνιμη περίπτωση για την κλασική μέθοδο της γραμμής δράσης. Προς διευκόλυνση του αναγνώστη τονίζεται ότι με τον δείκτη  $St$  συμβολίζεται η περιοδική μόνιμη περίπτωση ενώ με τον δείκτη  $Un$  η μη μόνιμη περίπτωση.

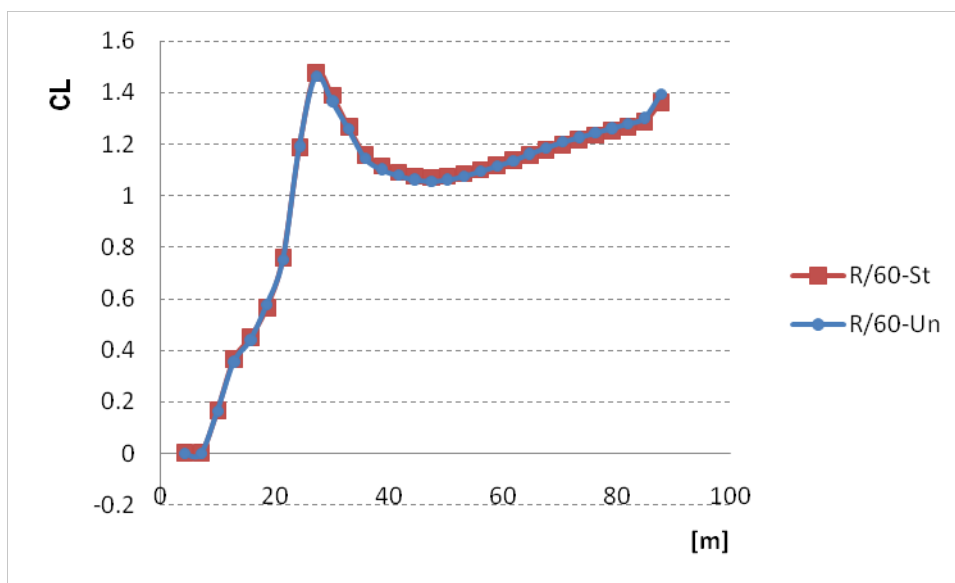
Παρατηρώντας τα διαγράμματα 4.4.1 ως 4.4.8, φαίνεται η αριθμητική ισοδυναμία των δύο περιπτώσεων που εξετάστηκαν στην διπλωματική εργασία. Η περιοδική μόνιμη περίπτωση για ένα πτερύγιο και η μη μόνιμη περίπτωση για τρία πτερύγια δίνουν οριακά ταυτόσημες ακτινικές κατανομές σε όλα τα αεροδυναμικά μεγέθη. Η ισοδυναμία, για τις δύο περιπτώσεις, της ακτινικής κατανομής της γωνίας προσβολής είναι ύψιστης σημασίας καθώς και η μέθοδος της γραμμής δράσης βασίζεται στον σωστό υπολογισμό αυτής ώστε μέσω αυτής και της δισδιάστατης ανάλυσης αεροτομής να προκύψουν οι συντελεστές των αεροδυναμικών φορτίων και εν τέλει οι φορτίσεις των πτερυγίων.

Από το διάγραμμα 4.4.1 παρατηρείται ικανοποιητική ταύτιση των γωνιών προσβολής για τις δύο περιπτώσεις, οπότε εν συνεχεία έχουμε και ταύτιση των συντελεστών άνωσης και αντίστασης όπως δείχνουν και τα διαγράμματα 4.4.2 και 4.4.3. Η κατανομή της αξονικής και της εφαπτομενικής συνιστώσας του φορτίου παρουσιάζεται στα διαγράμματα 4.4.4 και 4.4.5 όπου και εκεί λαμβάνονται ταυτόσημα αποτελέσματα, ειδικά προς το άκρο του περυγίου, ενώ υπάρχει σχετική απόκλιση στο μέσο του για την εφαπτομενική συνιστώσα πράγμα που δικαιολογεί και τις μικρές αποκλίσεις που προκύπτουν στα ολοκληρωμένα μεγέθη των πινάκων 4.1 και 4.2. Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται από τα διαγράμματα 4.4.7 και 4.4.8 όπου παρατίθενται οι ακτινικές κατανομές των συντελεστών αξονικής και περιφερειακής επαγωγής για τις δύο περιπτώσεις αντίστοιχα. Πλέον δεν παρατηρείται πλήρης ταύτιση των ακτινικών κατανομών, υπάρχουν μικροδιαφορές οι οποίες ερμηνεύονται από την χρήση διαφορετικού τρόπου παρεμβολής της ταχύτητας στο κέντρο ελέγχου της λωρίδας. Παρόλα αυτά ειδικά προς το ακροπτερύγιο επιτυγχάνονται επαρκή αποτελέσματα για την θεώρηση της ισοδυναμίας των δύο περιπτώσεων που εξετάστηκαν.

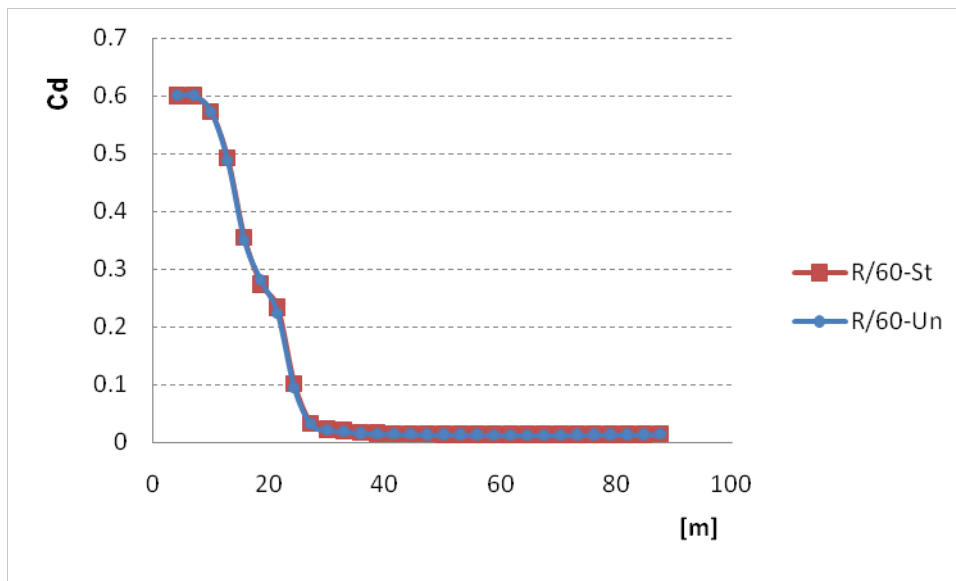




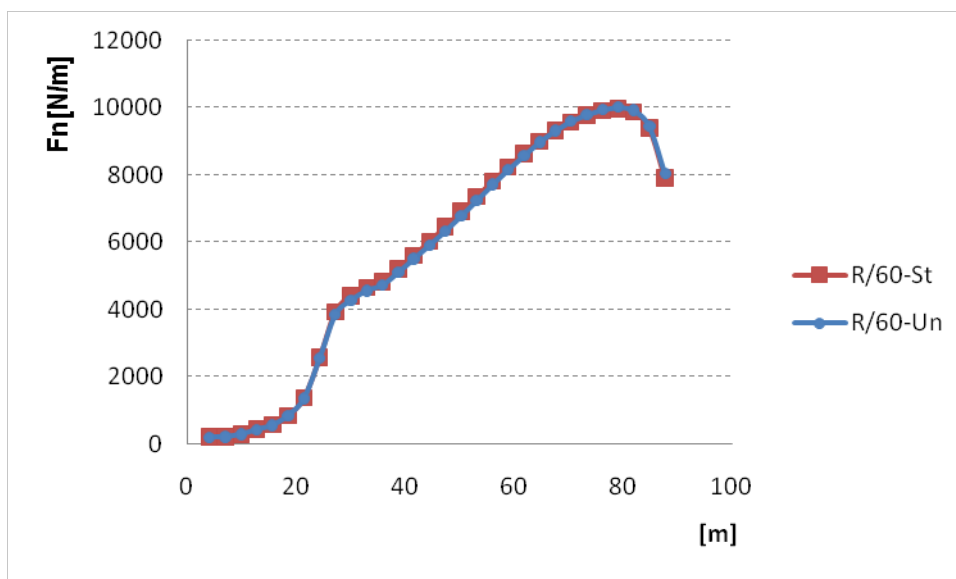
**Διάγραμμα 4.4.1.** Ακτινική κατανομή της γωνίας προσβολής για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση.



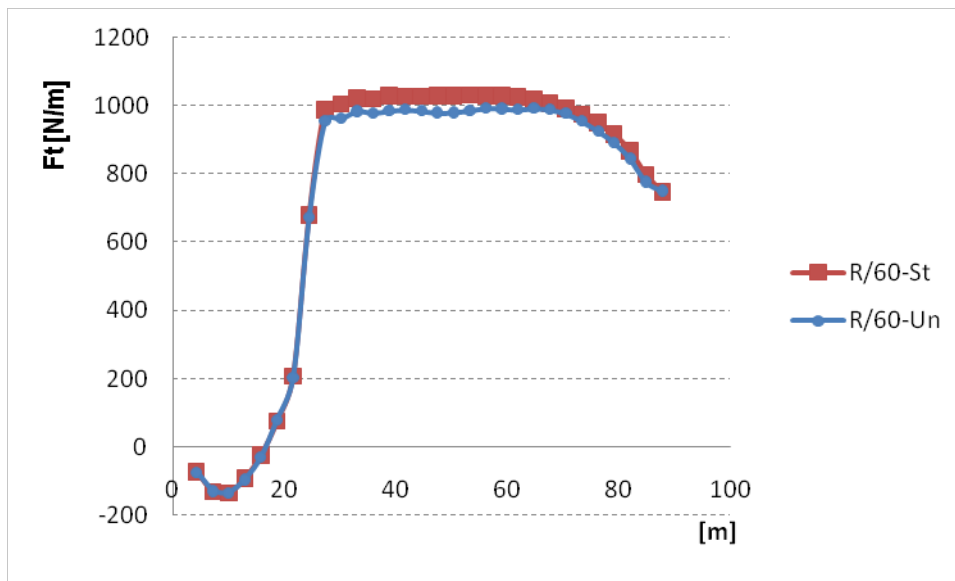
**Διάγραμμα 4.4.2.** Ακτινική κατανομή του συντελεστή άνωσης για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση.



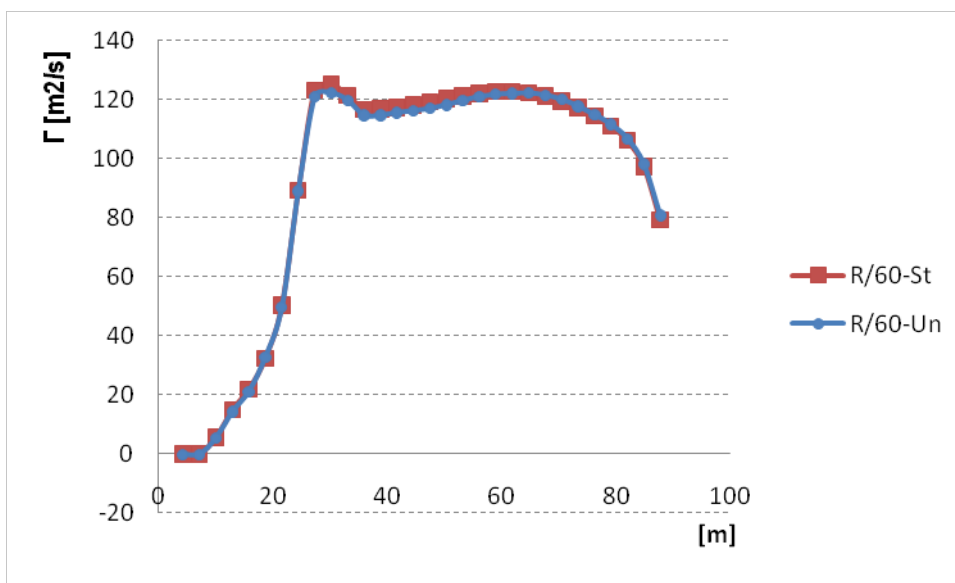
**Διάγραμμα 4.4.3.** Ακτινική κατανομή του συντελεστή αντίστασης για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση.



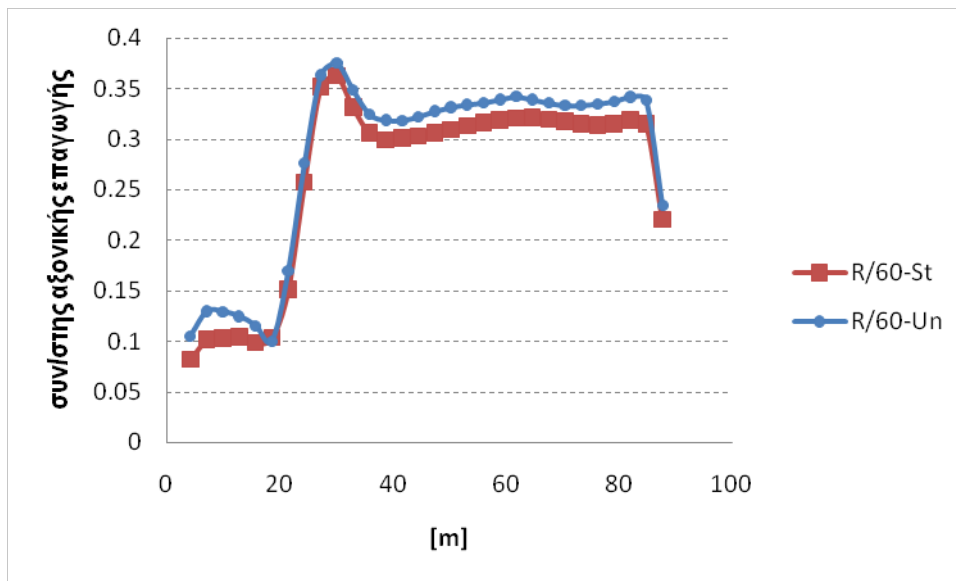
**Διάγραμμα 4.4.4.** Ακτινική κατανομή της αξονικής συνιστώσας της δύναμης για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση.



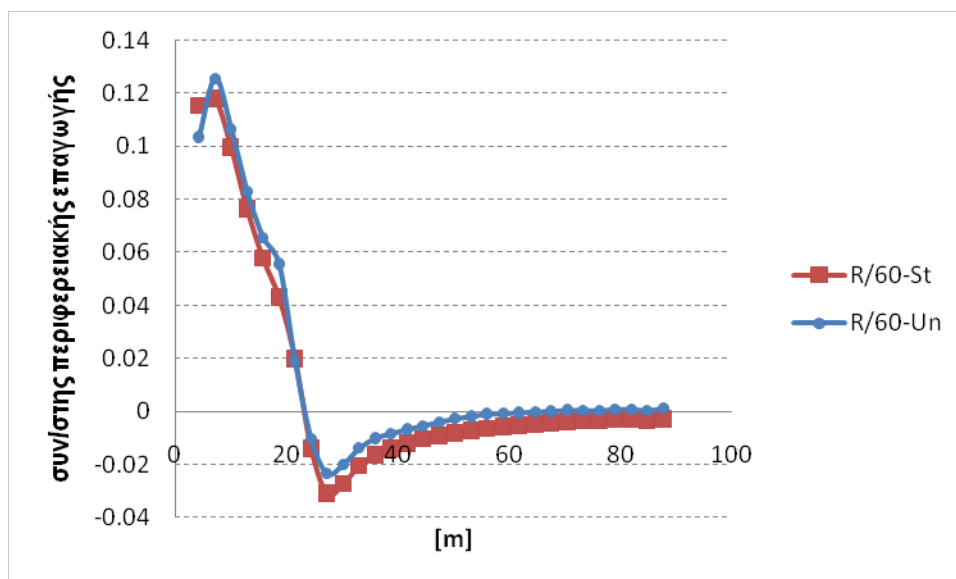
**Διάγραμμα 4.4.5.** Ακτινική κατανομή της εφαπτομενικής συνιστώσας της δύναμης για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση.



**Διάγραμμα 4.4.6.** Ακτινική κατανομή της κυκλοφορίας για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση.



**Διάγραμμα 4.4.7.** Ακτινική κατανομή του συντελεστή αξονικής επαγωγής για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση.



**Διάγραμμα 4.4.8.** Ακτινική κατανομή του συντελεστή περιφερειακής επαγωγής για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση.

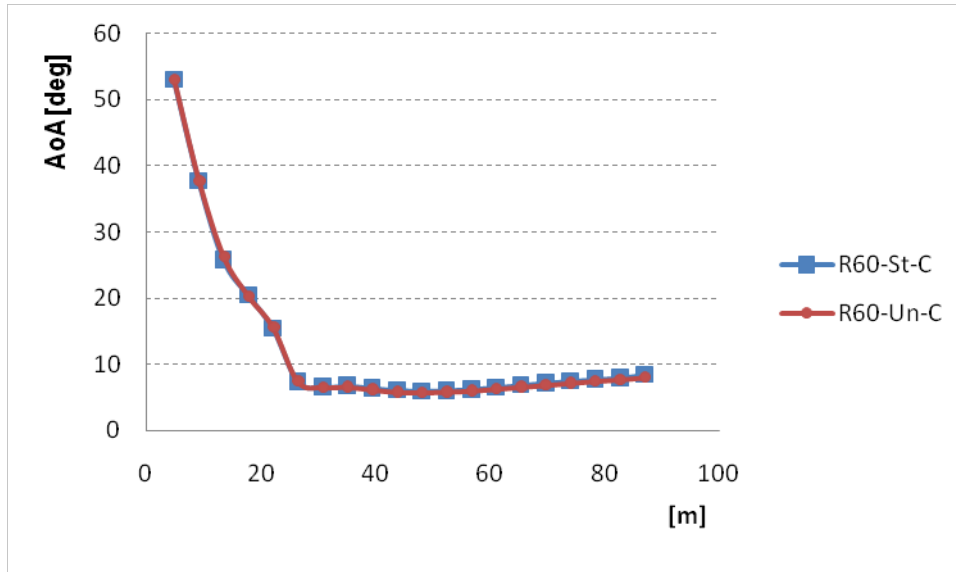
#### 4.4.2 Σύγκριση ακτινικών κατανομών για τη μέθοδο της Γραμμής Δράσης με διόρθωση

Αντίστοιχα με το υποκεφάλαιο 4.4.1, διερευνάται η ομοιότητα των ακτινικών κατανομών ανάμεσα στην μόνιμη και τη μη μόνιμη περίπτωση για την μέθοδο της γραμμής δράσης με το Smearing Correction. Προς διευκόλυνση του αναγνώστη ο δείκτης C συμβολίζει τα αποτελέσματα που ελήφθησαν για την διόρθωση, ενώ με St συμβολίζονται τα αποτελέσματα του μόνιμου προβλήματος και με Un του μη μόνιμου αντίστοιχα.

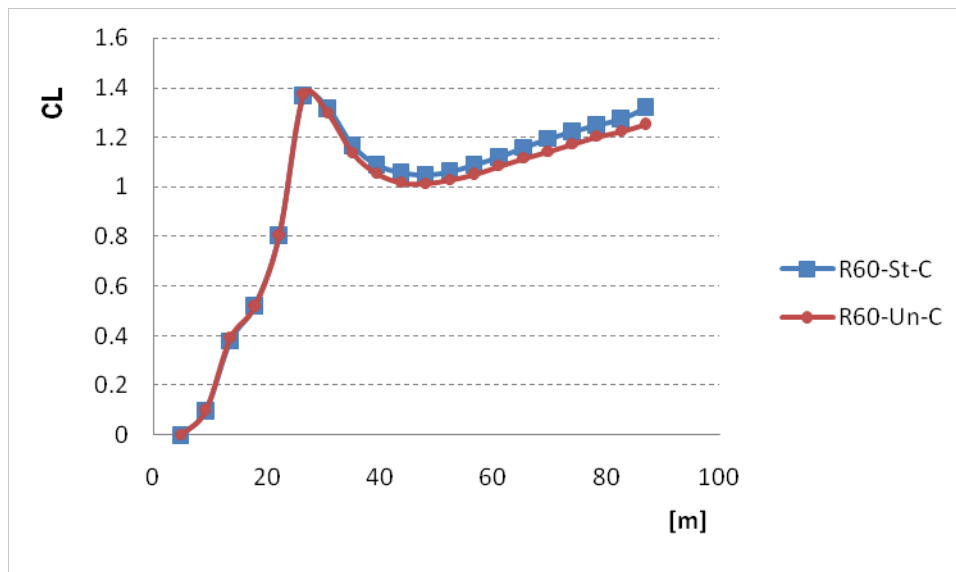
Στο διάγραμμα 4.4.9 παρατίθεται η ακτινική κατανομή της γωνίας προσβολής για την διόρθωση στη γραμμή δράσης για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση. Παρατηρούνται ικανοποιητικά αποτελέσματα χωρίς όμως να υπάρχει πλήρης ταύτιση των γωνιών προσβολής και έτσι αναμένονται διαφορές και στις κατανομές των συντελεστών άνωσης και αντίστασης. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται από τα διαγράμματα 4.4.10 και 4.4.11 όπου εμφανίζονται αποκλίσεις στους προαναφερθέντες συντελεστές, ειδικά κοντά στο ακροπερύγιο. Το φαινόμενο πιθανώς να δημιουργείται από την διαφορετική ρύθμιση του dynamic stall για τις δύο περιπτώσεις. Στην μόνιμη περιοδική περίπτωση το dynamic stall είναι απενεργοποιημένο καθ' όλο το μήκος του πτερυγίου. Αντίθετα στην μη μόνιμη περίπτωση το dynamic stall μοντέλο ενεργοποιείται στο  $\frac{1}{3}$  του πτερυγίου.

Παρά τις ανωτέρω διαφορές από τα διαγράμματα 4.4.12 και 4.4.13 λαμβάνονται ως ένα βαθμό ικανοποιητικά αποτελέσματα ανάμεσα στις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις, για τις φορτίσεις των πτερυγίων. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται προς το άκρο του πτερυγίου και είναι πιο έντονες στις κατανομές της εφαπτομενικής συνιστώσας του φορτίου. Ταυτόχρονα παρατηρούνται ακόμη πιο ισχυρές αποκλίσεις, όπως δείχνουν και τα διαγράμματα 4.4.15 και 4.4.16 στις κατανομές των συντελεστών αξονικής και περιφερειακής επαγωγής αντίστοιχα. Οι αποκλίσεις που περιγράφηκαν παραπάνω ερμηνεύονται από την χρήση διαφορετικού τρόπου παρεμβολής της ταχύτητας στα κέντρα των λωρίδων. Στην περιοδική μόνιμη περίπτωση η ταχύτητα υπολογίζεται απευθείας στο κέντρο ελέγχου της εκάστοτε λωρίδας ενώ στην μη μόνιμη περίπτωση χρησιμοποιούνται ακτινικές συναρτήσεις βάσης (RBF) για την παρεμβολή της ταχύτητας. Το γεγονός αυτό επηρεάζει το κατώρευμα που επάγεται, δηλαδή τον συντελεστή αξονικής επαγωγής. Όταν υπάρχει σταθμισμένη χωρική παρεμβολή της ταχύτητας το κατώρευμα που επάγεται είναι πιο ήπιο, οπότε και η επαγωγή μικρότερη. Η παρατήρηση

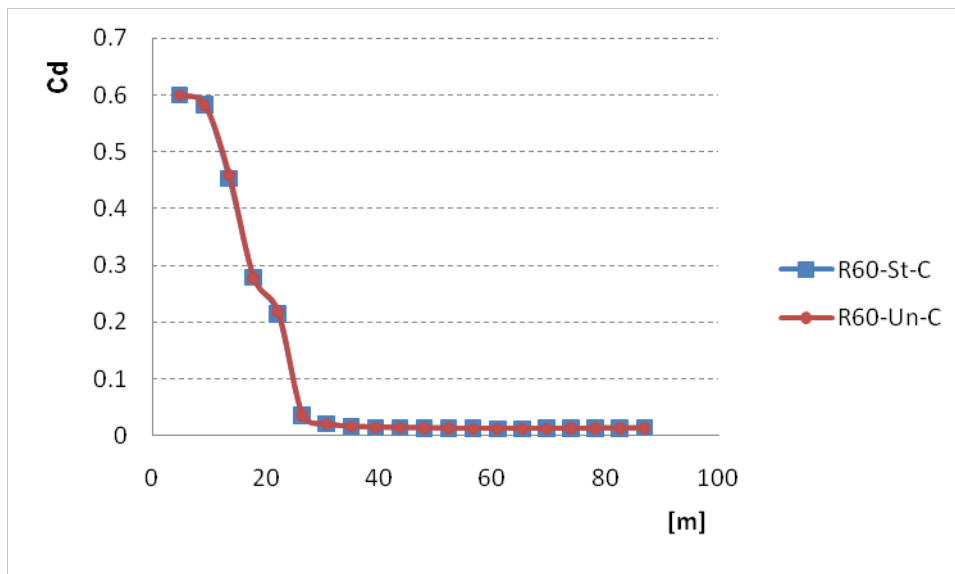
αυτή αποδεικνύεται εμφανώς από το διάγραμμα 4.4.15.



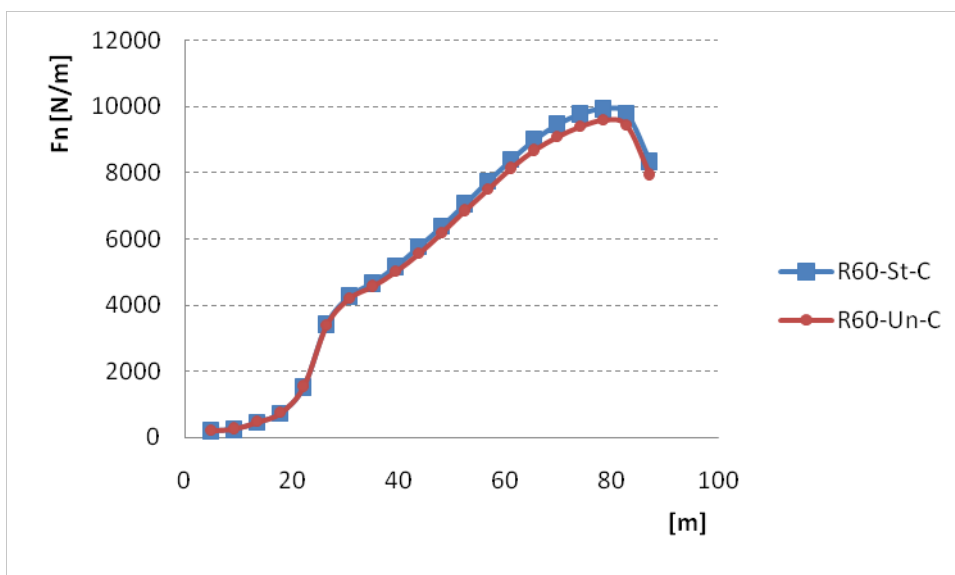
**Διάγραμμα 4.4.9.** Ακτινική κατανομή της γωνίας προσβολής για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση.



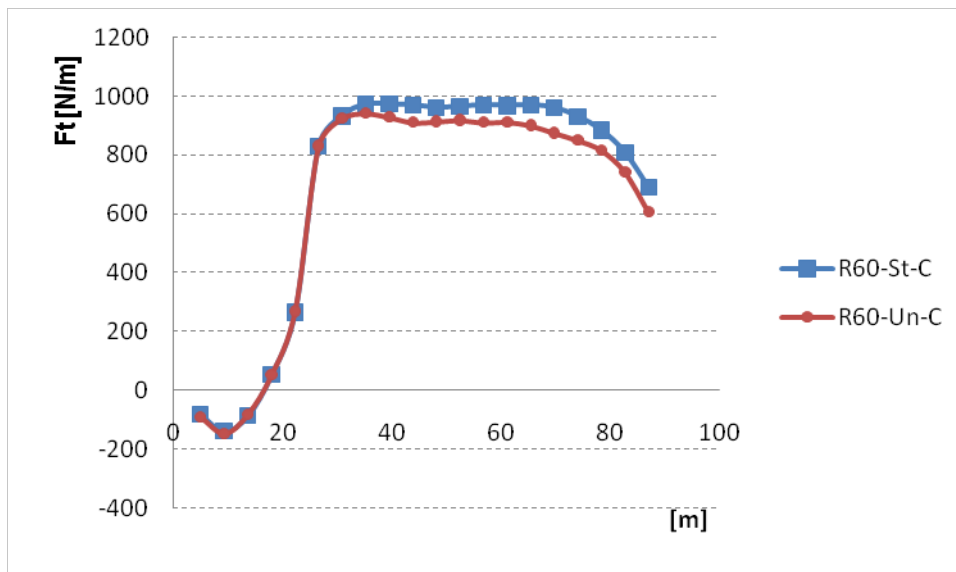
**Διάγραμμα 4.4.10.** Ακτινική κατανομή του συντελεστή άνωσης για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση.



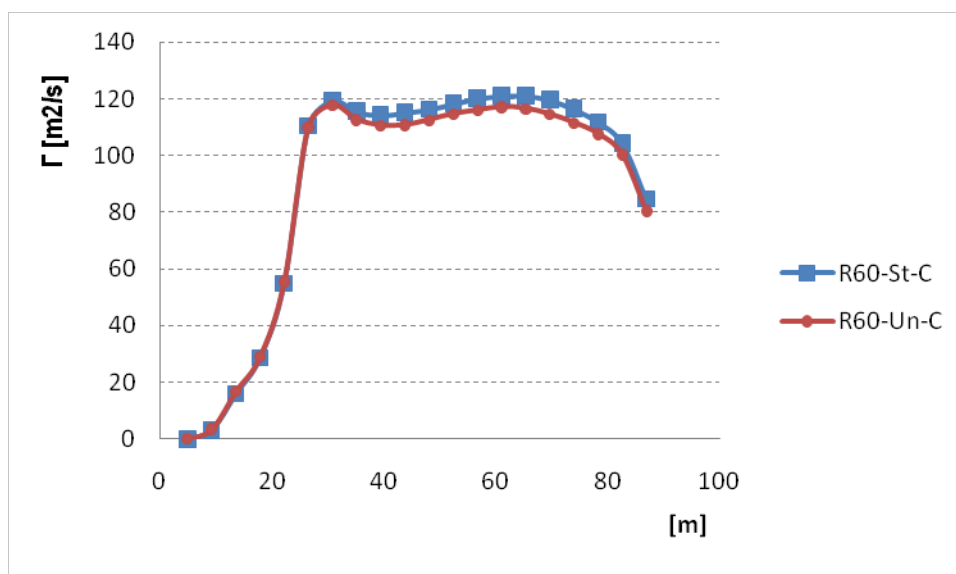
**Διάγραμμα 4.4.11.** Ακτινική κατανομή του συντελεστή αντίστασης για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση.



**Διάγραμμα 4.4.12.** Ακτινική κατανομή της αξονικής συνιστώσας της δύναμης για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση.

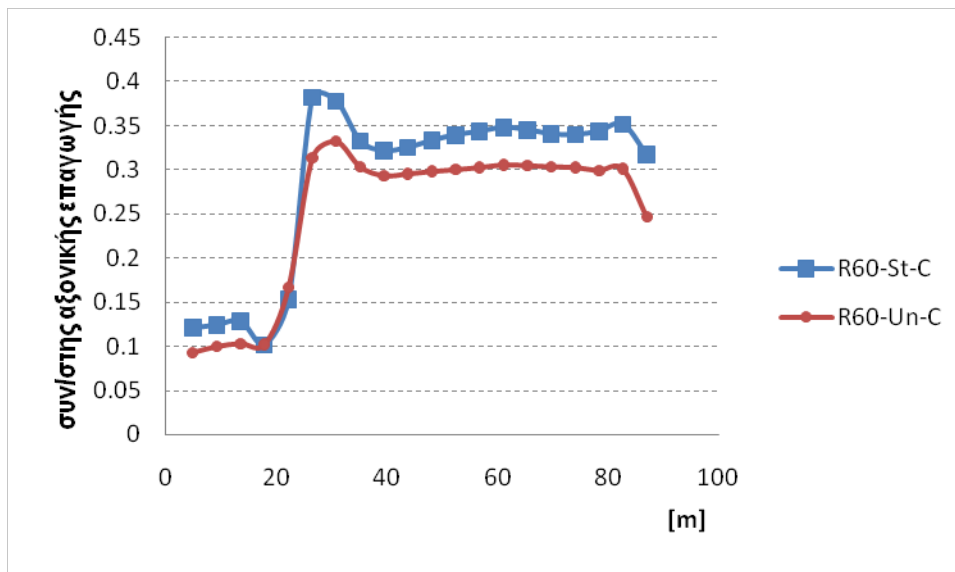


**Διάγραμμα 4.4.13.** Ακτινική κατανομή της εφαπτομενικής συνιστώσας της δύναμης για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση.

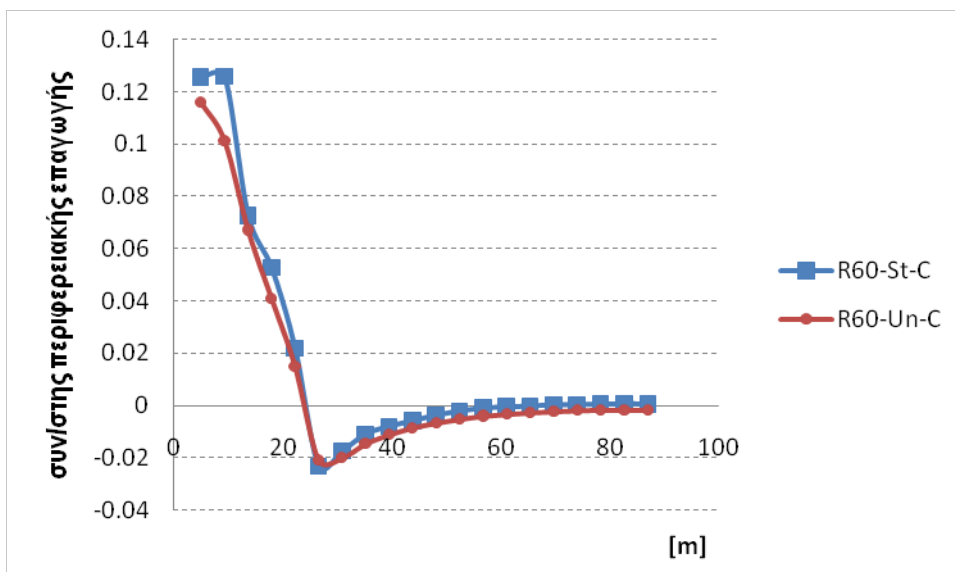


**Διάγραμμα 4.4.14.** Ακτινική κατανομή της κυκλοφορίας για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση.





**Διάγραμμα 4.4.15.** Ακτινική κατανομή του συντελεστή αξονικής επαγωγής για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση.



**Διάγραμμα 4.4.16.** Ακτινική κατανομή του συντελεστή περιφερειακής επαγωγής για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση.

### 4.4.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Δεδομένης της ανάλυσης που προηγήθηκε στα κεφάλαια 4.2 και 4.3 είναι εμφανές πλέον ότι υπάρχει ικανοποιητική ταύτιση των αριθμητικών αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από την περιοδική μόνιμη περίπτωση και την μη μόνιμη. Έτσι στόχος του παρόντος υποκεφαλαίου είναι να εξετασθεί κατά πόσο επωφελείται η κλασική μέθοδος γραμμής δράσης από το Smearing Correction για μη μόνιμες περιπτώσεις.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης που προηγήθηκε στο κεφάλαιο 2.4 αλλά και στις υποενότητες 3.3.1 ως 3.3.5 είναι γνωστό ότι η κλασική μέθοδος της γραμμής δράσης παρουσιάζει αριθμητικά ανεξάρτητες λύσεις για πυκνότητες πλέγματος μικρότερες ή ίσες του  $\Delta x = \frac{R}{90} = 1m$ . Αντίστοιχα η μέθοδος της γραμμής δράσης με την διόρθωση παρουσιάζει πλεγματική ανεξαρτησία για  $\Delta x < \frac{R}{60} = 1.5m$ . Στη δεύτερη στήλη του πίνακα 4.1 παρατίθενται ο αριθμός των υπολογιστικών κελιών που χρειάζονται για την μη μόνιμη περίπτωση δρομέα A/Γ με τρία πτερύγια ενώ στην παρατίθεται η μείωση που επέρχεται στις υπολογιστικές κυψέλες αν χρησιμοποιήσουμε το Smearing Correction. Καθώς λοιπόν όπως αναλύθηκε εκτενώς στο υποκεφάλαιο 3.3.4 η χρήση της διόρθωσης επιτρέπει την αύξηση του χαρακτηριστικού μήκους του πλέγματος, για την μη μόνιμη επίλυση δρομέα A/Γ με την μέθοδο γραμμής δράσης επέρχεται μείωση 53.7 % στις υπολογιστικές κυψέλες που απαιτούνται για την ορθή προσομοίωση του φαινομένου.

| $\Delta x$      | αριθμός υπολογιστικών κυψελών | μείωση υπολογιστικών κυψελών |
|-----------------|-------------------------------|------------------------------|
| $\frac{R}{30}$  | 162555                        | 95.4%                        |
| $\frac{R}{60}$  | 626734                        | 53.7%                        |
| $\frac{R}{90}$  | 3510293                       | -                            |
| $\frac{R}{180}$ | 5285100                       | -                            |

Πίνακας 4.3: Αριθμός υπολογιστικών κελιών για διάφορα μήκη πλέγματος για την μη μόνιμη περίπτωση. Μείωση υπολογιστικών κυψελών ως προς  $\Delta x = \frac{R}{90}$ .

## **Κεφάλαιο 5**

# **Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα - Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα**

### **5.1 Ανακεφαλαίωση**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιτεύχθηκαν δύο βασικοί στόχοι. Στο πρώτο σκέλος της διερευνήθηκε η λειτουργία της μεθόδου γραμμής δράσης (ALM) και η εξάρτηση των αποτελεσμάτων που αυτή δίνει ανάλογα της πυκνότητας του υπολογιστικού πλέγματος και της ακτίνας προβολής της δύναμης. Πραγματοποιήθηκε μελέτη για την εύρεση της βέλτιστης τιμής των υπολογιστικών παραμέτρων αλλά και της μεθόδου προσδιορισμού της ακτίνας προβολής της δύναμης, που χρησιμοποιούνται στην κλασική μέθοδο της γραμμής δράσης. Ταυτόχρονα μέσω της μελέτης αναδύθηκαν τα προβλήματα, αριθμητικής φύσεως, που υποβαθμίζουν την ποιότητα των λαμβανόμενων αποτελεσμάτων από την μέθοδο όταν χρησιμοποιούνται αραιά πλέγματα. Έτσι προκύπτει το δεύτερο σκέλος της παρούσας εργασίας που είναι ο προγραμματισμός μίας νέας τεχνικής υλοποίησης της μεθόδου Γραμμής Δράσης σε ήδη υπάρχοντα κώδικα του εργαστηρίου Αεροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η νέα αυτή τεχνική αφορά στην εφαρμογή του Smearing Correction στην μέθοδο Γραμμής Δράσης για την υπερνίκηση των προβλημάτων που προκύπτουν λόγω της προβολής της δύναμης σε αραιά υπολογιστικά πλέγματα. Η συνάρτηση προβολής της δύνα-

μης που εισήχθηκε στην μέθοδο Γραμμής Δράσης αλλοιώνει τις επαγόμενες ταχύτητες στα πτερύγια της εκάστοτε Α/Γ, οδηγώντας σε λανθασμένες φορτίσεις. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα αισθητό στο ακροπτερύγιο όπου ισχυροί στρόβιλοι αποβάλλονται από αυτό. Η ιδέα πίσω από την νέα αυτή τεχνική βασίζεται στην διόρθωση της υποεκτίμησης της επαγωγής με την χρήση του νόμου των Biot-Savart και Lamb-Oseen από τους στρόβιλους του ομόρρου του δρομέα της Α/Γ. Η τεχνική του Smearing Correction λοιπόν διορθώνει το κατώρευμα και άρα την γωνία προσβολής και το μέτρο της φαινόμενης ταχύτητας οπότε και τα φορτία στα πτερύγια. Η νέα αυτή διόρθωση, αφότου δοκιμάστηκε σε απλώς μεταφερόμενη παραλληλόγραμμη πτέρυγα στην έρευνα των [9] δείχνοντας πως λειτουργεί, εφαρμόζεται στην παρούσα διπλωματική στον ρότορα της ανεμογεννήτριας αναφοράς του DTU 10 MW.

## 5.2 Συμπεράσματα

Από την παραπάνω μελέτη προκύπτει ότι οι ήδη υπάρχουσες τεχνικές υλοποίησης της Γραμμής Δράσης για ρότορες Α/Γ είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικές με την χρήση υπολογιστικών πλεγμάτων χαρακτηριστικού μήκους  $\Delta x \leq \frac{R}{90}$ , με το πρόβλημα του υψηλού υπολογιστικού κόστους ειδικά για μη μόνιμες περιπτώσεις. Παρόλα αυτά αποδείχθηκε η αδυναμία της μεθόδου να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα για αραιά πλέγματα λόγω της δημιουργίας στροβίλων Lamb-Oseen με συνεκτικό πυρήνα που έχουν ως αποτέλεσμα μειωμένη επαγωγή στα πτερύγια σε σχέση με τη μη συνεκτική λύση. Η προταθείσα διόρθωση έρχεται να καλύψει αυτό το έλλειμμα επαγωγής επιτρέποντας την χρήση αραιότερων και άρα οικονομικότερων υπολογιστικών πλεγμάτων.

Εξετάστηκε λοιπόν παραμετρικά το Smearing Correction για αξονική μόνιμη ροή σε δρομέα Α/Γ και προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες παράμετροι για την σωστή λειτουργία της στη ALM. Προσδιορίστηκαν έτσι το μήκος εξάπλωσης του ομόρρου, το βήμα δημιουργίας του και τα αραιότερα χαρακτηριστικά μήκη πλέγματος που επιφέρουν αποτελέσματα εξίσου ικανοποιητικά με την κλασική μέθοδο Γραμμής Δράσης όταν αυτή εφαρμόζεται σε επαρκώς πυκνά πλέγματα. Τέλος εξετάστηκε η ισοδυναμία ανάμεσα στη περιοδική μόνιμη περίπτωση και την μη μόνιμη περίπτωση ώστε να αποδειχθεί εν τέλει η δυνατότητα χρήσης της Γραμμής Δράσης με τη διόρθωση και σε μη μόνιμες περιπτώσεις. Αφότου προηγήθηκε αυτή η ανάλυση είναι ασφαλές πλέον να ειπωθεί ότι

το Smearing Correction προσφέρει δυνατότητα χρήσης αραιότερων πλεγμάτων και άρα αποτελεί μία οικονομικότερη λύση για την απόκτηση αριθμητικά ορθών αποτελεσμάτων ως προς την εκτίμηση των φορτίων του δρομέα. Αυτό γιατί αυτή είναι μια μέθοδος με εντοπισμένη δράση μόνο στο δρομέα. Αν στόχος είναι να γίνει αεροελαστική προσομοίωση, τότε η διόρθωση είναι επαρκής και αξιόπιστη. Αν όμως στόχος είναι να παραχθούν δομές στροβιλότητας και να διερευνηθεί πώς αυτές αλληλεπιδρούν με άλλα σώματα τριγύρω, για παράδειγμα πώς αλληλεπιδρά ο ομόρρους του δρομέα με τον πύργο ή το έδαφος, τότε χρειάζονται πυκνά πλέγματα για να μην διαχέεται η στροβιλότητα. Συγκεκριμένα ήταν εφικτό να ληφθούν σωστά αποτελέσματα για χαρακτηριστικό μήκος  $\frac{R}{60}$  οδηγώντας έτσι σε μείωση 43 % των απαιτούμενων υπολογιστικών κυψελών και του υπολογιστικού χρόνου τόσο στη μόνιμη όσο και στη μη μόνιμη περίπτωση, σε σχέση με την χρήση υπολογιστικών κυψελών μήκους  $\Delta x = \frac{R}{90}$ . Η μείωση αυτή μπορεί να φτάσει και το 80% αν χρησιμοποιούνται υπολογιστικά πλέγματα πυκνότερα του  $\Delta x = \frac{R}{90}$ .

### 5.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας έδωσε σαφή συμπεράσματα για τις παραμέτρους που καθορίζουν την λειτουργία του Smearing Correction στη μέθοδο Γραμμής Δράσης. Εξαίρεση του ανωτέρου συμπεράσματος αποτέλεσε η εξάρτηση της μεθόδου από τον αριθμό των λωρίδων που απαρτίζεται το πτερύγιο, όπως υποδηλώνει και το διάγραμμα (3.3.6) της υποενότητας 3.3.3. Το φαινόμενο αυτό χρήζει περαιτέρω διερεύνησης και πιθανώς να έχει σχέση με τον τρόπο δημιουργίας του ομόρρου.

Επιπρόσθετα, καθώς στόχος της παρούσας διπλωματικής ήταν η χρήση αραιότερων πλεγμάτων στην ALM, για την περαιτέρω μείωση του κόστους αυτής θα μπορούσε να διεξαχθεί περισσότερη έρευνα στην ρύθμιση των παραμέτρων του Smearing Correction ώστε αυτή να επιτρέπει την χρήση ακόμη πιο οικονομικών υπολογιστικών χωρίων. Ταυτόχρονα μία κατάλληλη κατεύθυνση για μελλοντική διερεύνηση θα ήταν η δοκιμή της διόρθωσης σε διαφορετικές και πιο περίπλοκες συνθήκες ροής, πέραν της πλήρους αξονικής ροής 11 m/s σε δρομέα Α/Γ. Τέλος θα μπορούσαν να συγκριθούν τα αποτελέσματα της διόρθωσης στη μέθοδο Γραμμής Δράσης με τα αντίστοιχα αποτελέσματα άλλων μεθόδων, όπως αυτών της BEM και LL, ώστε να υπάρχει μία πληρέστερη εικόνα γύρω

από την απόδοση της διόρθωσης.

# Κατάλογος Σχημάτων

|  |    |
|--|----|
| 2.4.1 Περιοδικό πλέγμα.Αξονική όψη . . . . .   | 22 |
| 2.4.2 Περιοδικό πλέγμα.Πλάγια όψη . . . . .  | 23 |
| 2.4.3 Ανάλυση Πλεγματικής Ανεξαρτησίας.Ισχύς [MW] vs χαρακτηριστικό μήκος [m] . . . . .  | 24 |
| 3.1.1 Σύγκριση της κατανομής της κυκλοφορίας για περιοδικό αξονοσυμμετρικό πρόβλημα με χαρακτηριστικό μήκος πλέγματος $R/30$ . . . . .   | 29 |
| 3.1.2 Χρονική εξέλιξη της τιμής της ισχύος ενός φτερού της A/Γ για διάφορες τιμές του $\epsilon$ . . . . .   | 29 |
| 3.1.3 Επαγόμενη ταχύτητα κατά μήκος του φτερού για διάφορες τιμές του $\epsilon$ . . . . .   | 30 |
| 3.1.4 Ακτινική κατανομή συντελεστή αξονικής επαγωγής για διάφορες τιμές του $\epsilon$ . . . . .   | 30 |
| 3.2.1 Κατανομή της εφαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας σε επίπεδο κάθετο σε ένα νήμα στροβιλότητας άπειρου μήκους, που επάγεται είτε από ένα μη συνεκτικό (Inviscid) ή συνεκτικό (viscous) θεωρητικό στρόβιλο είτε από μία προσομοίωση Γραμμής Δράσης (AL). Η εικόνα λήφθηκε από την δημοσίευση των Forsting et al. [3] . . . . . | 32 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.2.2 | Ακτινική κατανομή της επαγωγής για διάφορες τιμές της ακτίνας προβολής $\epsilon$ , σε παραλληλόγραμμη πτέρυγα με $AR=10$ . Η εικόνα λήφθηκε από την δημοσίευση της διδακτορικής διατριβής του Dag [8]   | 33 |
| 3.2.3 | Σύγκριση της κατανομής της κυκλοφορίας που λαμβάνεται σε μία πτέρυγα $AR=10$ με τη μέθοδο Γραμμής Άνωσης (LLT) και τη μέθοδο Γραμμής Δράσης (ALM) για διάφορες τιμές του $\epsilon$ . Η εικόνα λήφθηκε από την δημοσίευση της διδακτορικής διατριβής του Dag [8] | 33 |
| 3.2.4 | Σύγκριση της επαγόμενης ταχύτητας από το μοντέλο Lamb-Oseen με αυτή που λαμβάνεται από υπολογισμό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) για διάφορες τιμές του $\epsilon$ . Η εικόνα λήφθηκε από την δημοσίευση της διδακτορικής διατριβής του Dag [8]             | 34 |
| 3.2.5 | Κοντινή αναπαράσταση της δομής του ομόρρου ενός πτερυγίου. Εικόνα που επιλέχθηκε από την διδακτορική διατριβή του Dag [8]  | 36 |
| 3.3.1 | Συνάρτηση $\exp\left(-\frac{r^2}{\epsilon^2}\right)$ για διάφορες τιμές του μήκους εξάπλωσης του ομόρρου   | 40 |
| 3.3.2 | Ποσοστιαία απόκλιση της εκτιμώμενης ισχύος για διάφορα μήκη εξάπλωσης ομόρρου. Σαν τιμή αναφοράς λαμβάνεται η ισχύς που υπολογίζεται για μήκος ομόρρου ίσο με $R/7$ .  | 40 |
| 3.3.3 | Ποσοστιαία απόκλιση της εκτιμώμενης ισχύος για διάφορες γωνίες δημιουργίας του ομόρρου. Σαν τιμή αναφοράς λαμβάνεται η ισχύς που υπολογίζεται για γωνία του ομόρρου ίση με 1 μοίρα.  | 42 |
| 3.3.4 | Σύγκλιση του μεγέθους της ισχύος για διαφορετικό αριθμό λωρίδων. Ισχύς [kW] στον κατακόρυφο άξονα και αριθμός χρονικών βημάτων στον οριζόντιο.   | 44 |
| 3.3.5 | Ποσοστιαία απόκλιση της εκτιμώμενης ισχύος για διάφορα χαρακτηριστικά μήκη πλέγματος. Σαν τιμή αναφοράς λαμβάνεται η ισχύς που υπολογίζεται για πυκνότητα πλέγματος ίση με $R/180$   | 46 |



|   |    |
|---|----|
| 3.3.6 Τροποποιημένη ανάλυση πλεγματικής ανεξαρτησίας. Ισχύς [MW] vs χαρακτηριστικό μήκος [m]. Με C συμβολίζονται οι λύσεις για το Smearing correction . . .   | 46 |
| 3.4.1 Ακτινική κατανομή της γωνίας προσβολής για διάφορα χαρακτηριστικά μήκη πλέγματος. Με τον δείκτη C συμβολίζεται η μέθοδος διόρθωσης. . .   | 48 |
| 3.4.2 Ακτινική κατανομή του συντελεστή άνωσης για διάφορα χαρακτηριστικά μήκη πλέγματος. Με τον δείκτη C συμβολίζεται η μέθοδος διόρθωσης. . .  | 48 |
| 3.4.3 Ακτινική κατανομή της αξονικής συνιστώσας της δύναμης για διάφορα χαρακτηριστικά μήκη πλέγματος. Με τον δείκτη C συμβολίζεται η μέθοδος διόρθωσης. . . . .  | 49 |
| 3.4.4 Ακτινική κατανομή της εφαπτομενικής συνιστώσας της δύναμης για διάφορα χαρακτηριστικά μήκη πλέγματος. Με τον δείκτη C συμβολίζεται η μέθοδος διόρθωσης. . . . .   | 50 |
| 3.4.5 Ακτινική κατανομή της κυκλοφορίας για διάφορα χαρακτηριστικά μήκη πλέγματος. Με τον δείκτη C συμβολίζεται η μέθοδος διόρθωσης. . . . .  | 50 |
| 3.4.6 Ακτινική κατανομή του συντελεστή αξονικής επαγωγής για διάφορα χαρακτηριστικά μήκη πλέγματος. Με τον δείκτη C συμβολίζεται η μέθοδος διόρθωσης. . . . .   | 51 |
| 3.4.7 Ακτινική κατανομή του συντελεστή περιφερειακής επαγωγής για διάφορα χαρακτηριστικά μήκη πλέγματος. τον δείκτη C συμβολίζεται η μέθοδος διόρθωσης. . . . .   | 51 |
| 3.4.8 Σύγκριση ακτινικών κατανομών του συντελεστή αξονικής επαγωγής για τη μέθοδο με διόρθωση και χωρίς αυτή για χαρακτηριστικό μήκος πλέγματος $\Delta x=R/30$ . Με τον δείκτη C συμβολίζεται η μέθοδος διόρθωσης. . . . . | 52 |
| 3.4.9 Σύγκριση ακτινικών κατανομών του συντελεστή αξονικής επαγωγής για τη μέθοδο με διόρθωση και χωρίς αυτή για χαρακτηριστικό μήκος πλέγματος $\Delta x=R/60$ . Με τον δείκτη C συμβολίζεται η μέθοδος διόρθωσης. . . . . | 53 |

|  |    |
|--|----|
| 4.1.1 Αξονική όψη του πλέγματος για μη μόνιμη περίπτωση. Τα μήκη παρατίθενται σε m. . . . .  | 56 |
| 4.1.2 Εστιασμένη αξονική όψη του πλέγματος. Διακρίνονται οι δύο κυκλικές περιοχές οι οποίες αφορούν στα πτερύγια και στον ομόρρου αντίστοιχα. Τα μήκη που παρατίθενται είναι σε m. . . . . | 57 |
| 4.1.3 Πλάγια όψη του πλέγματος για μη μόνιμη περίπτωση. Τα μήκη παρατίθενται σε m. . . . .   | 58 |
| 4.2.1 Παραγόμενος ομόρρους του δρομέα για το μη μόνιμο πρόβλημα. . . .   | 60 |
| 4.4.1 Ακτινική κατανομή της γωνίας προσβολής για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση. . . . .   | 64 |
| 4.4.2 Ακτινική κατανομή του συντελεστή άνωσης για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση. . . . .  | 64 |
| 4.4.3 Ακτινική κατανομή του συντελεστή αντίστασης για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση. . . . .  | 65 |
| 4.4.4 Ακτινική κατανομή της αξονικής συνιστώσας της δύναμης για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση. . . . .  | 65 |
| 4.4.5 Ακτινική κατανομή της εφαπτομενικής συνιστώσας της δύναμης για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση. . . . .   | 66 |
| 4.4.6 Ακτινική κατανομή της κυκλοφορίας για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση. . . . .  | 66 |
| 4.4.7 Ακτινική κατανομή του συντελεστή αξονικής επαγωγής για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση. . . . .   | 67 |
| 4.4.8 Ακτινική κατανομή του συντελεστή περιφερειακής επαγωγής για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση. . . . .  | 67 |

|   |    |
|---|----|
| 4.4.9 Ακτινική κατανομή της γωνίας προσβολής για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση. . . . .                      | 69 |
| 4.4.10 Ακτινική κατανομή του συντελεστή άνωσης για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση. . . . .                    | 69 |
| 4.4.11 Ακτινική κατανομή του συντελεστή αντίστασης για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση. . . . .                | 70 |
| 4.4.12 Ακτινική κατανομή της αξονικής συνιστώσας της δύναμης για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση. . . . .      | 70 |
| 4.4.13 Ακτινική κατανομή της εφαπτομενικής συνιστώσας της δύναμης για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση. . . . . | 71 |
| 4.4.14 Ακτινική κατανομή της κυκλοφορίας για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση. . . . .                          | 71 |
| 4.4.15 Ακτινική κατανομή του συντελεστή αξονικής επαγωγής για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση. . . . .         | 72 |
| 4.4.16 Ακτινική κατανομή του συντελεστή περιφερειακής επαγωγής για την μόνιμη και την μη μόνιμη περίπτωση. . . . .    | 72 |



## Κατάλογος Πινάκων

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Μεταβολή της ισχύος με αυξανόμενη την τιμή του χαρακτηριστικού μήκους του δομημένου πλέγματος. Τιμή αναφοράς αντιστοιχεί για $\Delta x = \frac{R}{180}$ . . . . .  | 23 |
| 3.1 | Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Α/Γ αναφοράς DTU 10 MW . . . . .  | 38 |
| 3.2 | Ποσοστιαία απόκλιση της εκτιμώμενης ισχύος για διάφορα μήκη εξάπλωσης ομόρρου. Σαν τιμή αναφοράς λαμβάνεται η ισχύς που υπολογίζεται για μήκος ομόρρου ίσο με $R/7$ . . . . .  | 39 |
| 3.3 | Ποσοστιαία απόκλιση της εκτιμώμενης ισχύος για διάφορες γωνίες δημιουργίας του ομόρρου. Σαν τιμή αναφοράς λαμβάνεται η ισχύς που υπολογίζεται για γωνία του ομόρρου ίση με 1 μοίρα. . . . .                                | 42 |
| 3.4 | Μεταβολή της ισχύος και ποσοστιαία απόκλιση της εκτιμώμενης ισχύος για διάφορους αριθμούς λωρίδων ελέγχου (strips). Σαν τιμή αναφοράς λαμβάνεται η ισχύς που υπολογίζεται για πυκνότητα πλέγματος ίση με $R/180$ . . . . . | 43 |
| 3.5 | Μεταβολή της ισχύος και ποσοστιαία απόκλιση της εκτιμώμενης ισχύος για διάφορα χαρακτηριστικά μήκη πλέγματος. Σαν τιμή αναφοράς λαμβάνεται η ισχύς που υπολογίζεται για πυκνότητα πλέγματος ίση με $R/180$ . . . . .       | 45 |
| 3.6 | Αριθμός κελιών και μείωση αυτών για διάφορα μήκη πλέγματος. Στην 3η στήλη τιμή αναφοράς είναι $\Delta x = \frac{R}{180}$ και στην 4η $\Delta x = \frac{R}{90}$ . . . . .   | 54 |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 3.7 | Υπολογιστικός χρόνος και μείωση αυτού για διάφορα μήκη πλέγματος. Στην 3η στήλη τιμή αναφοράς είναι $\Delta x = \frac{R}{180}$ και στην 4η $\Delta x = \frac{R}{90}$ . . . . . | 54 |
| 4.1 | Υπολογιζόμενη ισχύς για τις δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Η ισχύς παρατίθεται σε MW. . . . .  | 62 |
| 4.2 | Υπολογιζόμενη ώση για τις δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Η ώση παρατίθεται σε kN. . . . .  | 62 |
| 4.3 | Αριθμός υπολογιστικών κελιών για διάφορα μήκη πλέγματος για την μη μόνιμη περίπτωση. Μείωση υπολογιστικών κυψελών ως προς $\Delta x = \frac{R}{90}$ . . . . .                  | 73 |



# Παράρτημα Α □

## Συντομογραφίες

ALM Actuator Line Method (Μέθοδος Γραμμής Δράσης)

CFD Computational Fluid Dynamics (Υπολογιστική Ρευστοδυναμική)

BEM Blade Element Momentum

AoA Angle of Attack (Γωνία Προσβολής)

3D τρισδιάστατη

A/Γ ανεμογεννήτρια

W/T wind turbine

DTU Denmark Technical University

NTUA National Technical University of Athens

MW Μεγαβάτ (Megawatt)

D διάμετρος δρομέα

R ακτίνα δρομέα

strip ευθύγραμμο τμήμα στο κέντρο του οποίου λαμβάνει χώρα η δισδιάστατη αεροδυναμική ανάλυση. Το πτερύγιο απαρτίζεται από πολλά strips.

Ufl ταχύτητα πεδίου ροής

$\epsilon$  ακτίνα προβολής της δύναμης

$\Delta x$  χαρακτηριστικό μήκος υπολογιστικού πλέγματος

$\Delta t$  χρονικό βήμα



## Βιβλιογραφία

- [1] Sorensen Jens Nork and Shen Wen Zhong. Numerical modeling of wind turbine wakes. *J. Fluids Eng.*, 124(2):393–399, 2002.
- [2] Troldborg Niels, Sørensen Jens, and Mikkelsen Robert. Numerical simulations of wake characteristics of a wind turbine in uniform flow. *Wind Energy*, 13:86 – 99, 01 2010.
- [3] Georg Raimund Pirrung, Maarten Paul van der Laan, Néstor Ramos-García, and Alexander Raul Meyer Forsting. A simple improvement of a tip loss model for actuator disc simulations. *Wind Energy*, 23(4):1154–1163, 2020.
- [4] Michael Shives and Curran Crawford. Mesh and load distribution requirements for actuator line cfd simulations. *Wind Energy*, 16, 08 2012.
- [5] Luis A Martinez Tossas and Stefano Leonardi. Wind turbine modeling for computational fluid dynamics: December 2010-december 2012. Technical report, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2013.
- [6] Pankaj Jha, Matthew Churchfield, Patrick Moriarty, and Sven Schmitz. Guidelines for volume force distributions within actuator line modeling of wind turbines on large-eddy simulation-type grids. *Journal of Solar Energy Engineering*, 136:031003, 08 2014.
- [7] W.Z. Shen, J.N. Sorensen, and Christian Bak. Tip loss corrections for wind turbine computations. *Wind Energy*, 8:457–475, 2005.
- [8] Kaya Onur Dag. *Combined pseudo-spectral / actuator line model for wind turbine applications*. PhD thesis, 2017.

- [9] Kaya Onur Dağ and Jens Nørkær Sørensen. A new tip correction for actuator line computations. *Wind Energy*, 23(2):148–160, 2020.
- [10] Alexander R Meyer Forsting, Georg R. Pirrung, and Néstor Ramos-García. The wake of an actuator line with a vortex-based tip/smearing correction in uniform and turbulent inflow. *Journal of Physics: Conference Series*, 1256(1):012020, jul 2019.
- [11] Georg Pirrung, Helge Madsen, Taeseong Kim, and J. Heinz. A coupled near and far wake model for wind turbine aerodynamics. *Wind Energy*, 19:n/a–n/a, 03 2016.
- [12] Georg Pirrung, Helge Madsen, and S. Schreck. Trailed vorticity modeling for aeroelastic wind turbine simulations in stand still. *Wind Energy Science Discussions*, pages 1–20, 03 2017.
- [13] AR Meyer Forsting and Niels Troldborg. Generalised grid requirements minimizing the actuator line angle-of-attack error. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 1618, page 052001. IOP Publishing, 2020.
- [14] Wen Zhong Shen, Jens Nørkær Sørensen, and Robert F Mikkelsen. Tip loss correction for actuator/navier–stokes computations. *Journal of Solar Energy Engineering-transactions of The Asme*, 127:209–213, 2005.
- [15] H. Glauert. *Airplane Propellers*, pages 169–360. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1935.
- [16] Nikos Spyropoulos, George Papadakis, John Prospathopoulos, and V. Riziotis. Investigating the level of fidelity of an actuator line model in predicting loads and deflections of rotating blades under uniform free-stream flow. *Applied Sciences*, 11, 12 2021.