

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ



Βελτιστοποίηση χωροθέτησης θαλάσσιων  
αιολικών πάρκων με αντικειμενική συνάρτηση  
το σταθμισμένο κόστος ενέργειας  
**Διπλωματική Εργασία**

Συντάκτης: Αλέξανδρος Ρώτας mc18033

Επιβλέπων καθηγητής: Βασίλειος Ριζιώτης

Ιούλιος 2023

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ονοματεπώνυμο

Αλέξανδρος Ρώτας

# Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	2
1 Περίληψη εργασίας.....	8
1.1 Περίληψη.....	8
1.2 Abstract .....	9
2 Εισαγωγή .....	10
2.1 Αιολική Ενέργεια .....	10
2.2 Τεχνολογικό πρόβλημα .....	10
2.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση .....	12
3 Θεωρητικό υπόβαθρο .....	15
3.1 Μοντέλα Ομόρρου .....	15
3.1.1 Abramovich (Μπεργελές 2005).....	15
3.1.2 GCL old.....	17
3.1.3 GCL New .....	18
3.1.4 JENSEN.....	19
3.1.5 FLORIS.....	20
3.1.6 Μοντέλο με βάση την κατανομή Gauss (Takeshi Ishihara 2018).....	22
3.1.7 Συγκριτική παρουσίαση προφίλ ταχύτητας για τα διάφορα μοντέλα ομόρρου .....	23
3.1.8 Συγκριτική παρουσίαση πεδίου ομόρρου για τα διάφορα μοντέλα.....	24
3.2 Μοντέλα τύρβης.....	28
3.2.1 GCL model.....	28
3.2.2 Gauss model .....	29
3.2.3 Περιορισμός τύρβης.....	29
3.3 Συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας (CF) αιολικού πάρκου .....	30
3.4 Ανεμογεννήτρια αναφοράς.....	31
3.5 Ανεμολογικά δεδομένα.....	33
3.6 Κόστος καλωδίων και Α/Γ.....	34
3.6.1 Κόστος Α/Γ.....	34
3.6.2 Κόστος καλωδίων διασύνδεσης.....	36
3.6.3 Κόστος γραμμής μεταφοράς .....	37
3.7 Υπολογισμός LCOE.....	38
3.8 Ελάχιστο ζευγνύον δέντρο – Minimum spanning tree (MST) .....	39
3.8.1 Ζευγνύον δέντρο .....	39
3.8.2 Ελάχιστο ζευγνύον δέντρο .....	39
3.8.3 Kruskal algorithm.....	40

3.8.4	Prim algorithm .....	40
3.8.5	Σύγκριση .....	40
4	Αποτελέσματα-Συζήτηση .....	41
4.1	Διαφορετικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης .....	42
4.1.1	Mixed GA .....	42
4.1.2	Nelder Mead.....	42
4.1.3	Pattern Search .....	43
4.2	Διαφορετικά κριτήρια τύρβης.....	44
4.2.1	Κυκλικό όριο και κριτήριο μέγιστης σταθμισμένης τύρβης <0.07.....	44
4.2.2	Κυκλικό όριο και κριτήριο μέγιστης σταθμισμένης τύρβης <0.06.....	44
4.2.3	Κυκλικό όριο και κριτήριο μέγιστης έντασης τύρβης στην κύρια κατεύθυνση<0.07.....	45
4.2.4	Κυκλικό όριο και κριτήριο τυπικής απόκλισης έντασης τύρβης <0.004.....	45
4.3	Σύγκριση 6 μοντέλων ομόρρου.....	48
4.3.1	Abramovich.....	48
4.3.2	GCL.....	49
4.3.3	Jensen .....	50
4.3.4	Floris .....	51
4.3.5	GCL new.....	51
4.3.6	Gauss .....	52
4.3.7	Συγκρίσεις.....	53
4.4	Εξέταση επίδρασης κόστους καλωδίωσης.....	56
4.4.1	1.000k€ .....	56
4.4.2	800k€.....	57
4.4.3	600k€.....	57
4.4.4	400k€.....	58
4.4.5	300k€.....	58
4.4.6	100k€.....	59
4.4.7	Συγκρίσεις.....	59
4.5	Ίδιο χωρίο με διαφορετικό αριθμό Α/Γ.....	62
4.5.1	5 Α/Γ.....	62
4.5.2	8 Α/Γ.....	63
4.5.3	12 Α/Γ.....	64
4.5.4	15 Α/Γ.....	65
4.5.5	20 Α/Γ.....	66
4.5.6	Σύγκριση .....	67
4.6	Σύγκριση δύο ρόδων για 20 Α/Γ.....	68
4.6.1	Ρόδο Αναφοράς.....	68

4.6.2	Καινούριο Ρόδο .....	70
4.7	Σύγκριση με πραγματικά αιολικά πάρκα .....	73
4.7.1	Horns Rev.....	73
4.7.2	Middelgurden .....	80
5	Συμπεράσματα .....	86
6	Βιβλιογραφία.....	87
Εικόνα 1:	Πρότυπο ομόρρου κατά Abramovich (Μπεργελές 2005) .....	15
Εικόνα 2:	Πρότυπο ομόρρου κατά GCL (Sebastian Brusca 2018) .....	17
Εικόνα 3:	Πρότυπο ομόρρου κατά Jensen (Sebastian Brusca 2018).....	19
Εικόνα 4:	Πρότυπο ομόρρου κατά FLORIS (Θεολογίτου 2022).....	20
Εικόνα 5:	Προσομοίωση εκτροπής ομόρρου κατά FLORIS (Θεολογίτου 2022).....	21
Εικόνα 6:	Πρότυπο εκπομπής ομόρρου βασισμένο σε κατανομή Gauss (Takeshi Ishihara 2018).....	22
Εικόνα 7:	Κινητική ενέργεια τύρβης ( $kU^{\infty 2}$ ) συναρτήσει της κατάντι απόστασης.....	28
Εικόνα 8:	Ζευγνύον δέντρο .....	39
Εικόνα 9:	Γράφος με κόστη .....	39
Εικόνα 10:	Ελάχιστο ζευγνύον δέντρο .....	40
Εικόνα 11:	Αριστερά τα όρια του θαλάσσιου πάρκου (Pillai, και συν. 2017) και δεξιά το σχήμα της διάταξης του πάρκου (Sørensen, Hansen και Larsen 2002).....	83
Διάγραμμα 1:	Παρουσίαση των μοντέλων ομόρρου για εισερχόμενη ροή 10m/s και απόσταση Α/Γ ίση με 5 διαμέτρους.....	23
Διάγραμμα 2:	Τοπολογία για σύγκριση του πεδίου ομόρρου για τα διάφορα μοντέλα .....	24
Διάγραμμα 3:	Πεδίο ομόρρου και ένταση τύρβης στα 5m/s για Abramovich .....	25
Διάγραμμα 4:	Πεδίο ομόρρου και ένταση τύρβης στα 5m/s για GCL .....	25
Διάγραμμα 5:	Πεδίο ομόρρου και ένταση τύρβης στα 5m/s για Jensen .....	25
Διάγραμμα 6:	: Πεδίο ομόρρου και ένταση τύρβης στα 5m/s για Floris.....	26
Διάγραμμα 7:	Πεδίο ομόρρου και ένταση τύρβης στα 5m/s για νέο GCL.....	26
Διάγραμμα 8:	Πεδίο ομόρρου και ένταση τύρβης στα 5m/s για Gauss.....	26
Διάγραμμα 9:	Επίδραση ένταση τύρβης στην καμπύλη ισχύος (Chuanjun, Jianming και Yan 2021) .....	30
Διάγραμμα 10:	Καμπύλη ισχύος Α/Γ.....	32
Διάγραμμα 11:	Καμπύλη συντελεστή ώσης .....	32
Διάγραμμα 12:	Ρόδο Ανέμου (Pereira 2020) .....	33
Διάγραμμα 13:	Ιστόγραμμα ταχύτητας και κατανομή Weibull .....	34
Διάγραμμα 14:	ΤΙΑ συναρτήσει της ταχύτητας.....	41
Διάγραμμα 15:	12 Α/Γ Mixed GA.....	42
Διάγραμμα 16:	12 Α/Γ με Nelder Mead .....	42
Διάγραμμα 17:	12 Α/Γ με Pattern Search.....	43
Διάγραμμα 18:	Mixed GA με κυκλικό όριο και κριτήριο μέγιστης σταθμισμένης τύρβης<0.07 .....	44
Διάγραμμα 19:	Mixed GA με κυκλικό όριο και κριτήριο μέγιστης σταθμισμένης τύρβης<0.06.....	44
Διάγραμμα 20:	Mixed GA κυκλικό όριο και κριτήριο μέγιστης τύρβης στην κύρια κατεύθυνση<0.07 .....	45
Διάγραμμα 21:	Mixed GA με κυκλικό όριο και κριτήριο σταθμισμένης ΤΙΑ stdv <0.004.....	45
Διάγραμμα 22:	Μέγιστη σταθμισμένη ΤΙΑ - Μέση σταθμισμένη ΤΙΑ .....	46
Διάγραμμα 23:	Τυπική απόκλιση της σταθμισμένης ΤΙΑ - Μέση σταθμισμένη ΤΙΑ.....	47
Διάγραμμα 24:	Βελτιστοποίηση με μοντέλο Abramovich .....	48

Διάγραμμα 25: Βελτιστοποίηση με μοντέλο GCL .....	49
Διάγραμμα 26: : Βελτιστοποίηση με μοντέλο Jensen.....	50
Διάγραμμα 27: Βελτιστοποίηση με μοντέλο Floris.....	51
Διάγραμμα 28: Βελτιστοποίηση με μοντέλο GCL new .....	51
Διάγραμμα 29: Βελτιστοποίηση με μοντέλο Gaus.....	52
Διάγραμμα 30: Τοπολογία για κόστος καλωδίωσης 1000k€/km .....	56
Διάγραμμα 31: Τοπολογία για κόστος καλωδίωσης 800k€/km .....	57
Διάγραμμα 32: Τοπολογία για κόστος καλωδίωσης 600k€/km .....	57
Διάγραμμα 33: Τοπολογία για κόστος καλωδίωσης 400k€/km .....	58
Διάγραμμα 34: Τοπολογία για κόστος καλωδίωσης 300k€/km .....	58
Διάγραμμα 35: Τοπολογία για κόστος καλωδίωσης 100k€/km .....	59
Διάγραμμα 36: LCOE(k€/km) για την τοπολογία που έγινε με βάση τα 400 k€/km .....	61
Διάγραμμα 37: 5 A/Γ σε κυκλικό όριο.....	62
Διάγραμμα 38: 8 A/Γ σε κυκλικό όριο.....	63
Διάγραμμα 39: 12 A/Γ σε κυκλικό όριο.....	64
Διάγραμμα 40: 15 A/Γ σε κυκλικό όριο.....	65
Διάγραμμα 41: 20 A/Γ σε κυκλικό όριο.....	66
Διάγραμμα 42: Σύγκριση ως προς το πλήθος των A/Γ.....	67
Διάγραμμα 43: Βελτιστοποίηση με Mixed Variable GA για 20 A/Γ με το ρόδο αναφοράς και κριτήριο μέγιστης σταθμισμένης TIA.....	68
Διάγραμμα 44: Βελτιστοποίηση με Pattern Search για 20 A/Γ με το ρόδο αναφοράς και κριτήριο μέγιστης σταθμισμένης TIA.....	69
Διάγραμμα 45: Ρόδο ανέμου καινούριου case study (Pereira 2020).....	70
Διάγραμμα 46: Βελτιστοποίηση με Mixed Variable GA για 20 A/Γ με το καινούριο ρόδο και κριτήριο μέγιστης σταθμισμένης TIA.....	71
Διάγραμμα 47: Πεδίο ομόρρου για νέο ρόδο με 20 A/Γ .....	71
Διάγραμμα 48: Κατανομή Weibull για Horns Rev αριστερά και δεξιά οι κατανομές για κάθε κατεύθυνση... 73	
Διάγραμμα 49: Ρόδα ανέμου για Horns Rev 1. Πάνω αριστερά είναι αυτό που προέκυψε από την επεξεργασία των καμπύλων Weibull. Πάνω δεξιά το ρόδο με βάση τις χρονοσειρές από (TGS Wind AXIOM). Κάτω το ρόδο ανέμου από την εργασία του (Shen 2015), από όπου αντλήθηκαν τα δεδομένα. ....	74
Διάγραμμα 50: Vestas V80-2MW (Yu-Ting Wu 2015).....	75
Διάγραμμα 51: Καμπύλες ισχύος.....	75
Διάγραμμα 52: Καμπύλες συντελεστή αντίστασης, στροφών και βήματος της A/Γ.....	75
Διάγραμμα 53: Αρχική τοπολογία και συνδεσμολογία του Horns Rev 1 .....	76
Διάγραμμα 54: Σταθμισμένη τύρβη των A/Γ στο Horns Rev 1. ....	77
Διάγραμμα 55: Αρχική τοπολογία και συνδεσμολογία με βάση το MST, του Horns Rev 1 .....	77
Διάγραμμα 56: Horns rev μετά την βελτιστοποίηση: 1)Χωροταξία, 2)Μέση σταθμισμένη TIA, 3) Σύγκλιση κώδικα .....	79
Διάγραμμα 57: Κατανομή Weibull για το πάρκο Middelgurden .....	81
Διάγραμμα 58: Ρόδο ανέμου στο πάρκο Middelgurden. Αριστερά το ρόδο από την επεξεργασία των δεδομένων του (TGS Wind AXIOM) και δεξιά το ρόδο που προκύπτει από την εργασία του (Pillala, και συν. 2017).....	81
Διάγραμμα 59: Καμπύλη ισχύος της A/Γ στο Middelgurden. Αριστερά η κανονική (Sørensen, Hansen and Larsen 2002) και δεξιά αυτή που αναπτύχθηκε με το raft.exe .....	82
Διάγραμμα 60: Καμπύλες συντελεστή αντίστασης, στροφών και βήματος της A/Γ.....	82
Διάγραμμα 61: Αρχική χωροταξία Middelgurden και μέση ένταση τύρβης στις A/Γ.....	83
Διάγραμμα 62: Βελτιστοποιημένη χωροταξία Middelgurden και μέση ένταση τύρβης στις A/Γ .....	84

Πίνακας 1: Συντελεστές α για το νέο μοντέλο GCL.....	18
Πίνακας 2: Συγκριτική αξιολόγηση ενός αιολικού πάρκου, με τα διάφορα μοντέλα ομόρρου .....	27
Πίνακας 3: Κατασκευαστικά στοιχεία πρότυπης Α/Γ.....	32
Πίνακας 4: Κόστη για καλώδια εναλασσόμενης τάσης (Dhal 2008).....	36
Πίνακας 5: Κόστη καλωδίων ανάλογα την τάση του καλωδίου και το είδος του (Xiang, Merlin and Green n.d.) .....	37
Πίνακας 6 Τυπικές αποστάσεις αιολικών πάρκων από την ακτή σε km, με βάση το βάθος στο οποίο βρίσκεται το πάρκο (Χαλκιαδάκης 2018) .....	38
Πίνακας 7: Σύγκριση Kruskal και Prim.....	40
Πίνακας 8: Συγκριτική παρουσίαση των αλγορίθμων επίλυσης .....	43
Πίνακας 9: Συγκριτική παρουσίαση για περιορισμούς κόστος καλωδίου και TIA .....	46
Πίνακας 10: Αντιστοίχιση συντεταγμένων Χ'Χ με στήλες Πίνακας 9.....	47
Πίνακας 11: Συγκριτική παρουσίαση των λύσεων της βελτιστοποίησης Nelder Mead, με διαφορετικά μοντέλα ομόρρου.....	53
Πίνακας 12: Συγκριτική παρουσίαση του LCOE για όλες τις τοπολογίες με κάθε μοντέλο ομόρρου.....	54
Πίνακας 13: Συγκριτική παρουσίαση του CF για όλες τις τοπολογίες με κάθε μοντέλο ομόρρου .....	54
Πίνακας 14: Συγκριτική παρουσίαση του πλωτού αιολικού πάρκου για διάφορες τιμές του καλωδίου .....	59
Πίνακας 15: Συγκριτική παρουσίαση του LCOE για τις διάφορες τοπολογίες και κόστη καλωδίου .....	60
Πίνακας 16: Σύγκριση μεταξύ ρόδων ανέμου .....	72
Πίνακας 17: Παράμετρος κλίσης (c), παράμετρος κλίμακας (A) και πιθανότητα πνοής ανέμου για κάθε κατεύθυνση (Shen 2015).....	73
Πίνακας 18: Συγκριτικός πίνακας για το Horns Rev 1 .....	79
Πίνακας 19: Συγκριτική παρουσίαση των τοπολογιών του Middelgurden .....	84

---

## Ευχαριστίες

---

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με στήριξαν σε αυτά τα χρόνια της σχολής αλλά και της ζωής μου γενικότερα.

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κύριο Ριζιώτη που με εμπιστεύτηκε για να συνεργαστεί μαζί μου στην διπλωματική μου εργασία και με ενθάρρυνε να διαλέξω ένα θέμα που απαιτούσε προγραμματισμό, κάτι το οποίο πάντα με άγχωνε. Τον ευχαριστώ επίσης που όταν είχα απορίες τις άκουγε με διάθεση και αφιέρωνε χρόνο, εμπνέοντας μου σιγουριά ότι θα τα καταφέρω κάτι που με έκανε να πιστέψω παραπάνω στις δυνάμεις μου. Ευχαριστώ επίσης τον υποψήφιο διδάκτορα Γιάννη Σεραφείμ που με εισήγαγε στην έννοια της βελτιστοποίησης. Τέλος ευχαριστώ και όσους καθηγητές αυτά τα χρόνια μας αντιμετώπιζαν εγκάρδια.

Ευχαριστώ επίσης τους φίλους μου που πολλές φορές πίστεψαν σε μένα παραπάνω από ότι εγώ ο ίδιος και ήταν στήριγμα.

Σε επόμενο στάδιο θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου καθώς πάντα μου στέκονταν και με βοηθούσαν καθώς και ότι αυτά τα χρόνια συνέβαλαν τα μέγιστα ώστε η σχολή να αποτελεί την μόνη μου απασχόληση. Επίσης τους ευχαριστώ που μου στάθηκαν και με εμπύχωσαν όλες τις φορές που ένιωθα ότι πνίγομαι και τελικά κάθε φορά τα κατάφερα.

Τέλος ευχαριστώ την (TGS Wind AXIOM) και τον (New European Wind Atlas) για την παροχή των ανεμολογικών δεδομένων για τα αιολικά πάρκα του Horns Rev 1 και του Middelgurden.



# 1 Περίληψη εργασίας

## 1.1 Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει σκοπό την μελέτη της ταυτόχρονης βελτιστοποίησης της χωροθέτησης του αιολικού πάρκου και της συνδεσμολογίας των Α/Γ μεταξύ τους, δηλαδή των προβλημάτων WFLOP (wind farm layout optimization problem) και OWFCCLP (offshore wind farm cable connection layout problem) αντίστοιχα. Αυτό θα γίνει σειριακά ως εξής:

1. Εύρεση τυχαίας τοπολογίας των Α/Γ.
2. Μεταξύ τους σύνδεσης με τον αλγόριθμο του ελάχιστος ζευγνύοντος δέντρου.
3. Υπολογισμός Σταθμισμένου Κόστους Ενέργειας (Levelized Cost of Energy – LCOE).
4. Επανάληψη βημάτων 1 ως 3 μέχρι να συγκλίνει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης.

Η εργασία ξεκινά με την τοποθέτηση του τεχνολογικού προβλήματος καθώς και με μια βιβλιογραφική επισκόπηση άλλων εργασιών που έχουν παρεμφερές αντικείμενο με την παρούσα εργασία. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν 6 απλοποιημένα μοντέλα ομόρρου από την βιβλιογραφία. Αυτά τα μοντέλα είναι τα Abramovich, Jensen, GCL (παλιά και καινούρια έκδοση), Floris και Gauss. Ακολουθούν τα μοντέλα τύρβης τα οποία εξετάζονται, οι παραδοχές για τον υπολογισμό του LCOE, το πώς υπολογίζεται η φαινόμενη ταχύτητα σε κάθε Α/Γ μέσα στο πάρκο και εν τέλει θα παρουσιασθεί ποιοτικά το ελάχιστο ζευγνύον δέντρο (MST). Μετά την παρουσίαση της βιβλιογραφίας πραγματοποιούνται συγκρίσεις οι οποίες εξετάζουν την επίδραση διαφόρων παραμέτρων πάνω στην βέλτιστη λύση. Οι παράμετροι που εξετάζονται είναι, η μέθοδος βελτιστοποίησης, το μοντέλο ομόρρου, το κόστος καλωδίωσης, το κριτήριο για το όριο τύρβης καθώς και το πλήθος των Α/Γ που τοποθετούνται σε ένα χωρίο. Τέλος γίνονται και δύο μελέτες πάνω σε ήδη υφιστάμενα υπεράκτια αιολικά πάρκα, το Horns Rev 1 και το Middeguden. Έτσι εκτιμάται ότι θα υπάρχει μια σφαιρική αποτίμηση της χρησιμότητας της βελτιστοποίησης τόσο της τοπολογίας καθώς και της συνδεσμολογίας.

## 1.2 Abstract

The scope of this project is to investigate of the simultaneous optimization of the layout of an offshore wind turbine park. This problem takes into account two sub-problems. The first one is the WFLOP (wind farm layout optimization problem) and the other one is the OWFCCLP (offshore wind farm cable connection layout problem). The process will follow these steps:

1. Creation of a random wind farm configuration.
2. Optimal connection of wind turbines with MST algorithm.
3. LCOE calculation
4. Repetition of steps 1 to 3.

The thesis starts with the definition of the technological problem along with the presentation of the existing state of the art. After that, there is a brief report of the wake effect models that are examined in this thesis, namely Abramovich, Jensen, GCL (new and old one), Floris and one that has the Gaussian curve. Turbulence models and the LCOE calculation follow, along with the calculation of the phenomenal wind velocity of the turbines and a short explanation of MST algorithm (minimum spanning tree). Once the theoretical part is finished, several cases are examined, each one with different parameters taken into account. These parameters are: 1) The optimization algorithm, 2) The wake model, 3) The cable cost, 4) The maximum turbulence limit, 5) The number of wind turbines into a limited space, 6) The comparison between existing layouts (Middelgrunden and Horns Rev 1) and optimized one. All things considered, those parametrizations aim to a better understanding of the significance of cable costs in the optimal layout.

# 2 Εισαγωγή

## 2.1 Αιολική Ενέργεια

Οι ανεμογεννήτριες είναι μηχανές που αξιοποιούν την αιολική ενέργεια η οποία υπάρχει ελεύθερη στο περιβάλλον. Η ενέργεια αυτή αξιοποιείται από πολύ παλιά, με πρώτες αναφορές να σημειώνονται το 1700 π.Χ. στην Μεσοποταμία, όπου και δημιουργήθηκαν οι πρώτοι ανεμόμυλοι. Η έντονη ανάπτυξη των ανεμογεννητριών ξεκίνησε με ραγδαίους ρυθμούς κατά τον Β΄ Παγκόσμιο πόλεμο όπου και παρουσιάστηκε έλλειψη των γαιανθράκων και του πετρελαίου. Η ανάπτυξη συνεχίστηκε και με την πετρελαϊκή κρίση που ξέσπασε μερικές δεκαετίες αργότερα. Ωστόσο, η μεγάλη σημασία των Α/Γ ως μέσο παραγωγής ενέργειας άρχισε όταν υπήρξε ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης για το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής και επιδιώχτηκε η μείωση της εκπομπής των ρύπων. Ένα αιολικό πάρκο μπορεί να παράξει σημαντική ποσότητα ενέργειας, ενδεικτικό είναι ότι ένα αιολικό πάρκο εγκατεστημένης ισχύος 10MW μπορεί να παράγει 24,5GWh ετησίως, το οποίο αντιστοιχεί στην κάλυψη των αναγκών 7.000 νοικοκυριών. Επίσης το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου μειώνεται με την πάροδο των χρόνων καθιστώντας την παραγόμενη ενέργεια όλο και πιο οικονομικά-εκτός από περιβαλλοντικά- συμφέρουσα.

Καθώς η ανάγκη για μεγάλη και φθηνή παραγωγή ενέργειας αυξάνεται, απαιτούνται μεγαλύτερες εκτάσεις για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών. Ωστόσο σιγά-σιγά παρατηρείται κορεσμός στις διαθέσιμες θέσεις για εγκατάσταση αιολικών πάρκων στην ενδοχώρα. Λύση σε αυτό έχει δοθεί με την δημιουργία θαλάσσιων αιολικών πάρκων. Τα θαλάσσια αιολικά πάρκα έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα χερσαία. Αρχικά το αιολικό δυναμικό στην θάλασσα είναι «καλύτερης ποιότητας» από αυτό στην στεριά. Αυτό συμβαίνει καθώς η ροή είναι πιο στρωτή, δεν δημιουργείται τύρβη από το ανάγλυφο του εδάφους. Συνεπώς οι Α/Γ υφίστανται λιγότερη κόπωση. Επιπλέον οι ταχύτητες ανέμου είναι εν γένει μεγαλύτερες. Έπειτα, δεν τίθενται περιορισμοί χωροθέτησης όπως αποστάσεις από οικισμούς, αρχαιολογικούς χώρους, περιοχές νατούρα κλπ., ενώ η έκταση της θάλασσας είναι απεριόριστη. Επιπρόσθετα, στην θάλασσα είναι εφικτή η εγκατάσταση μεγαλύτερων Α/Γ καθώς παύει να είναι περιοριστικός παράγοντας μεταφοράς το μήκος της χορδής και το μήκος του πτερυγίου, μπορούν επίσης να τοποθετηθούν πολύ μακριά από την ακτή (>10km) ώστε να μην ενοχλούν οπτικά και ταυτόχρονα δεν υπάρχει το πρόβλημα του θορύβου το οποίο προκαλούν οι μεγάλες Α/Γ. Τέλος το νερό της θάλασσας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν φθινό και άφθονο ψυκτικό μέσο για τα διάφορα μέρη της Α/Γ (Francisco M. Gonzalez-Longatt 2012). Όλα αυτά συντελούν σε μεγαλύτερη παραγωγή.

## 2.2 Τεχνολογικό πρόβλημα

Η κύρια πρόκληση των αιολικών πάρκων είναι αυτή της βέλτιστης χωροθέτησης, για την εκμετάλλευση της μέγιστης δυνατής ποσότητας ενέργειας. Το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι κατάντι της Α/Γ δημιουργείται έλλειμμα ταχύτητας καθώς η επιφάνεια που σαρώνει το πτερύγιο της Α/Γ απορροφά κινητική ενέργεια. Επομένως λόγω της αρχής διατήρησης ενέργειας η κινητική ενέργεια κατάντι της Α/Γ είναι μικρότερη από ότι ανάντι, συνεπώς δημιουργείται έλλειμμα στην ταχύτητα. Το έλλειμμα αυτό προοδευτικά μειώνεται, μέχρι την αποκατάσταση της επ' άπειρον ροής. Ωστόσο αυτό για να γίνει χρειάζεται μεγάλη απόσταση, μεγαλύτερη από 10 διαμέτρους Α/Γ. Επιπλέον, δημιουργούνται και δίνες οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της τύρβης πίσω από την Α/Γ. Η τύρβη αυτή προκαλεί επιπλέον φόρτιση στις

κατάντι Α/Γ, κάτι που επιφέρει μείωση του χρόνου ζωής τους. Τα φαινόμενα φόρτισης λόγω τύρβης είναι έντονα αν η απόσταση μεταξύ δύο Α/Γ είναι μικρότερη από 5 διαμέτρους.

Όπως είναι εμφανές οι Α/Γ δεν μπορούν να τοποθετηθούν πάρα πολύ μακριά η μία από την άλλη, καθώς στα χερσαία αιολικά πάρκα υπάρχει περιορισμός της έκτασης που μπορεί να διατεθεί για το έργο, το οποίο συμβαίνει είτε για οικονομικούς είτε για περιβαλλοντικούς λόγους. Από την άλλη είναι ασύμφορο να μπουν πολλές ανεμογεννήτριες κοντά η μία στην άλλη καθώς λόγω του ελλείμματος ταχύτητας η απόδοση θα είναι πολύ μικρή και ταυτόχρονα σε αποστάσεις κάτω των 5 διαμέτρων (έναρξη μακρινού ομόρρου), η κόπωση λόγω αυξημένης τύρβης είναι τόσο μεγάλη που μπορεί να αποβεί καταστροφική για τις Α/Γ.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η βέλτιστη χωροθέτηση ανεμογεννητριών σε ένα θαλάσσιο αιολικό πάρκο. Η διαφορά του θαλάσσιου αιολικού πάρκου συγκριτικά με το χερσαίο είναι ότι στο θαλάσσιο περιβάλλον ο περιορισμός του χώρου είναι πολύ πιο χαλαρός, μιας και δεν υπάρχουν γειτονικά χωριά, αρχαιολογικοί χώροι ή προστατευόμενες περιοχές, παράμετροι δηλαδή που δημιουργούν περιορισμό στην έκταση του πάρκου. Επιπρόσθετα, το κόστος αγοράς των θαλασσίων εκτάσεων είναι αρκετά φθηνότερο από το κόστος των χερσαίων. Ωστόσο τη θέση του χωροθετικού περιορισμού παίρνει το κόστος των ηλεκτρικών απωλειών, το πλήθος των υποσταθμών και το κόστος καλωδίωσης. Το κόστος των απωλειών οφείλεται στην απόσταση που πρέπει να διανύσει το ρεύμα μέχρι τον χερσαίο υποσταθμό. Το κόστος των υποσταθμών είναι κόστος δημιουργίας και εγκατάστασής τους, ενώ υπάρχει και το κόστος της αγκύρωσης ή θεμελίωσης των Α/Γ το οποίο αλλάζει με το βάθος. Τέλος το κόστος καλωδίωσης είναι ουσιαστικά το κόστος που δημιουργείται για την διασύνδεση των Α/Γ τόσο μεταξύ τους όσο και με τους υποσταθμούς. Επομένως αξίζει να διερευνηθεί πόσο σημαντικό είναι να βρεθεί η βέλτιστη συνδεσμολογία μεταξύ των Α/Γ ώστε να μειωθεί ει δυνατόν το μήκος της καλωδίωσης και συνεπώς το κόστος της.

Στην εργασία του (Χαλκιαδάκης 2018) εξετάζεται πλωτό αιολικό πάρκο αποτελούμενο από 50 Α/Γ των 10MW ίδιες με τις Α/Γ αναφοράς της παρούσας εργασίας. Στο εξεταζόμενο πάρκο υπάρχει αιολικό δυναμικό που αποδίδει συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας  $CF_{\text{park}}=35\%$ , ενώ η μια Α/Γ με το δυναμικό αυτό έχει  $CF_{1\text{WT}}=45\%$ . Οι Α/Γ θεωρούνται ότι συνδέονται με τον τυπικό τρόπο σε στήλες, με ενδιάμεσες αποστάσεις ίσες με 7D. Επομένως προκύπτει συνολικό μήκος καλωδίων 52.3km, με κόστος καλωδίου 281k€/km προκύπτει συνολικό κόστος καλωδίων σύνδεσης ίσο με  $\text{Κόστος}_{\text{καλωδίων}}=14.7 \text{ Μ€}$ . Στη συνέχεια αναφέρεται ότι το κόστος αγοράς της Α/Γ είναι 1.5Μ€/MW, ενώ τα λοιπά κόστη του αιολικού πάρκου (Balance of Plants) υπολογίζονται ως  $\text{BoP}=2.1\text{Μ€/MW}$ . Συνεπώς το συνολικό κόστος του αιολικού πάρκου ανέρχεται στα  $\text{CAPEX} = 50[\text{ΑΓ}] * 10 \left[ \frac{\text{MW}}{\text{ΑΓ}} \right] * 3.6 \left[ \frac{\text{M€}}{\text{MW}} \right] = 1800\text{M€}$ . Άρα το κόστος καλωδίωσης αποτελεί το  $\frac{\text{Κόστος}_{\text{καλωδίων}}}{\text{CAPEX}} = \frac{14.7}{1800} = 0.82\%$  του συνόλου.

Η μελέτη του (Wade 2019) αποσκοπεί στην ταυτόχρονη εύρεση της βέλτιστης συνδεσμολογίας και τοπολογίας. Σε ένα από τα σενάρια του εξετάζει το Horns Rev το οποίο έχει 80 Α/Γ, συνολικής ισχύος 160MW. Ωστόσο δεν δίνεται η αναγωγή του CAPEX ανά MW. Συνεπώς θα θεωρηθεί η τιμή ίδια με πριν 3.6Μ€/MW. Συνεπώς  $\text{CAPEX} = 80[\text{ΑΓ}] * 2 \left[ \frac{\text{MW}}{\text{ΑΓ}} \right] * 3.6 \left[ \frac{\text{M€}}{\text{MW}} \right] = 576\text{M€}$ . Όσον αφορά το κόστος καλωδίωσης, αυτό ανέρχεται στα 600k€/km. Η συνολική έκταση μετά την βελτιστοποίηση τοπολογίας και συνδεσμολογίας ανέρχεται στα 65.6km (8.6% λιγότερο σε σχέση με την αρχική) και έτσι προκύπτει συνολικό κόστος καλωδίωσης  $\text{COST}_{\text{CABLE}}=39.4 \text{ Μ€}$ . Επομένως το κόστος καλωδίωσης προς το συνολικό κεφάλαιο αντιστοιχεί στο  $\frac{\text{COST}_{\text{CABLE}}}{\text{CAPEX}} = \frac{39.4}{576} = 6.84\%$  του συνόλου. Στην περίπτωση αυτή το κόστος είναι περίπου 8 φορές μεγαλύτερο από την προηγούμενη. Αυτό συμβαίνει αφενός γιατί το κόστος ανά χιλιόμετρο είναι διπλάσιο, αφετέρου επειδή το πάρκο έχει περίπου 3 φορές μικρότερη ισχύ, άρα και κόστος.

## 2.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Η βέλτιστη χωροθέτηση του αιολικού πάρκου αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του σταθμισμένου κόστους ενέργειας, δηλαδή στην ελάχιστη τιμή του LCOE (Levelized Cost of Energy). Για να συμβεί αυτό πρέπει να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο το κόστος καλωδίωσης και εγκατάστασης των Α/Γ και να αυξηθεί παράλληλα η ετήσια παραγόμενη ενέργεια, δηλαδή το ΑΕΡ (Annual Energy Production). Ωστόσο, οι δύο αυτές επιδιώξεις είναι αντικρουόμενες. Για την αύξηση του ΑΕΡ είναι απαραίτητη η αύξηση της απόστασης των Α/Γ μεταξύ τους ώστε να έχουν όσο το δυνατό μεγαλύτερη φαινόμενη ταχύτητα. Αντίθετα για την μείωση του κόστους διασύνδεσης χρειάζεται να μειωθούν οι μεταξύ τους αποστάσεις, ώστε να υπάρχουν λίγες απώλειες και μικρότερο μήκος καλωδίων.

Για την επίλυση του προβλήματος αυτού έχουν διατυπωθεί δύο κύριες προσεγγίσεις. Στην πρώτη προσέγγιση το πρόβλημα διαχωρίζεται σε δύο επί μέρους προβλήματα, την βέλτιστη χωροθέτηση των Α/Γ (WFLOP=wind farm layout optimization problem) προς την μεγιστοποίηση του ΑΕΡ και εν συνεχεία γίνεται η βέλτιστη διασύνδεση των ήδη τοποθετημένων Α/Γ (OWFCCLP = offshore wind farm cable connection layout problem). Στην άλλη προσέγγιση γίνεται ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της χωροθέτησης των Α/Γ μαζί με την βέλτιστη διασύνδεση τους.

Για την επίλυση του WFLOP, έχουν γίνει αρκετές μελέτες σε προηγούμενα χρόνια. Ο (Javier Serrano González 2012) αναφέρεται στην ύπαρξη δύο τρόπων για την επίλυση του WFLOP. Ο πρώτος είναι ο διαχωρισμός της διαθέσιμης επιφάνειας σε πλέγμα, επομένως οι Α/Γ μπορούν να μπουν σε διακριτές θέσεις. Συνήθως το πλέγμα είναι 10 επί 10 όπως φαίνεται στις ακόλουθες δημοσιεύσεις: (Grigorios Marmidi 2007), (Narasimha Prasad Prabhu 2013), (S.A. Grady 2004), (S.D.O. Turner 2013), (Sittichoke Pookpant 2013), (G. Mosetti 1992) και (Martin Bilbao 2009). Ωστόσο ο (Longyan Wang 2015) αναφέρει ότι η βέλτιστη εκδοχή είναι για πλέγμα 20 επί 20 καθώς αυτή δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα από το 10 επί 10, ενώ τα πυκνότερα πλέγματα δεν δίνουν σημαντική βελτίωση, απαιτώντας παράλληλα πολύ παραπάνω υπολογιστικό κόστος. Ο δεύτερος τρόπος θεωρεί το χωρίο ως συνεχές και η κάθε Α/Γ μπορεί να πάρει οποιαδήποτε θέση, έχοντας τις δικές της συντεταγμένες. Το 2<sup>ο</sup> μοντέλο εισάγεται καθώς με βάση το 1<sup>ο</sup> είναι πολύ πιθανό να χαθούν κάποιες βέλτιστες λύσεις. Με βάση τα συμπεράσματα του (Longyan Wang 2015) παρατηρείται ότι το υπολογιστικό κόστος της μεθόδου με το μη περιορισμένο σύστημα συντεταγμένων (unrestricted coordinate method) είναι εν γένει μεγαλύτερο από το κόστος για πλέγμα (αν και αυτό δεν ισχύει πάντα). Ενώ η βελτίωση των αποτελεσμάτων του συστήματος συντεταγμένων είναι μικρή σε σχέση με του πλέγματος, όπως μικρή είναι και η αύξηση του βέλτιστου αριθμού των Α/Γ. Στην έρευνα του ο (U. Aygun Ozturk 2004) χρησιμοποιεί το συνεχές μοντέλο καθώς θεωρεί ότι ακόμα και σε ένα μικρό πρόβλημα όπου το υπολογιστικό χωρίο είναι 40D x 40D - το οποίο το διαιρεί σε 100 τετράγωνα – ο χώρος των λύσεων θα είναι της τάξης του 2<sup>100</sup>.

Έχουν γίνει οι ακόλουθες μελέτες που βασίζονται στην χρήση πλέγματος. Ο (G. Mosetti 1992) παρουσιάζει μια μελέτη που διακριτοποιεί την υπάρχουσα επιφάνεια σε 100 κυψέλες, το κέντρο της κάθε μίας προσδιορίζει την πιθανή θέση της Α/Γ. Η μοντελοποίηση του αιολικού πάρκου γίνεται με το λογισμικό ROSE, ενώ η βελτιστοποίηση βασίζεται σε γενετικό αλγόριθμο. Στο ίδιο μήκος κύματος κινείται και ο (S.A. Grady 2004), όπου πάλι η βελτιστοποίηση γίνεται μέσω γενετικού αλγόριθμου. Επειδή ο γενετικός αλγόριθμος απαιτεί υψηλό υπολογιστικό χρόνο και το αποτέλεσμα δεν είναι τόσο καλό, έχουν αναπτυχθεί παραλλαγές του, όπως ο Διανεμημένος Γεννητικός Αλγόριθμος, DGA (distributed genetic algorithm) με τον οποίο ασχολείται ο (Huang 2007). Χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι πώς ο αρχικός πληθυσμός χωρίζεται σε επιμέρους δήμους οι οποίοι εξελίσσονται παράλληλα και ενίοτε κάποιες λύσεις μετακινούνται από τον έναν δήμο στον άλλον. Αυτό βοηθάει πολύ στην παραλληλοποίηση του προβλήματος, ωστόσο το αποτέλεσμα είναι καλύτερο ακόμα και χωρίς παραλληλοποίηση. Μία άλλη προσέγγιση είναι η επίλυση του WFLOP μέσω κλασικών μεθόδων βελτιστοποίησης όπως η γραμμικοποίηση, αυτό γίνεται και από τον

(S.D.O. Turner 2013) όπου χρησιμοποιούνται Τετραγωνικός Ακέραιος Προγραμματισμός QIP (quadric integer programming) και Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός MILP (mixed integer linear programming). Μία άλλη μέθοδος είναι η εφαρμογή της προσομοίωσης Monte Carlo, η οποία γίνεται από τον (Grigorios Marmidi 2007). Τα αποτελέσματά της μεθόδου αυτής συγκρίνονται με αυτά των (G. Mosetti 1992) (S.A. Grady 2004) και αποδεικνύεται ότι δίνει καλύτερα και οικονομικότερα αποτελέσματα, ενώ ταυτόχρονα έχει και μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Γενίκευση της Monte Carlo είναι και ο μεταερευνητικός αλγόριθμος SA (simulated annealing) τον οποίο μελετάει ο (Martin Bilbao 2009). Έχει αναπτυχθεί επίσης η μέθοδος ITHS (Intelligently Tuned Harmony Search), η οποία θέτει τους περιορισμούς στο UWFLOP (unrestricted WFLOP) και μελετάται στο (Narasimha Prasad Prabhu 2013). Εκτός των άλλων το πρόβλημα αυτό έχει επιλυθεί από τον (W. H. Peng Hou 2015) με τον αλγόριθμο σμήνους σωματιδίων PSO (Particle swarm optimization) ο οποίος βρίσκει ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι καλύτερα από την τοποθέτηση των Α/Γ με απόσταση 7 διαμέτρων μεταξύ τους. Τέλος ο (Sittichoke Pookrunt 2013) χρησιμοποιεί την Δυναμική Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Binary Particle Swarm Optimization BPSO) μαζί με την χρονικά μεταβαλλόμενη επιτάχυνση συντελεστών (Time-varying acceleration coefficients TVAC).

Όσον αφορά την επίλυση του WFLOP με βάση το μη περιορισμένο σύστημα συντεταγμένων, πρώτος ασχολήθηκε ο (Hans Georg Beyer 1996), στον οποίο για δεδομένη τοποθεσία και αριθμό Α/Γ βρίσκεται η βέλτιστη χωροθέτηση με χρήση γενετικού αλγορίθμου, με σκοπό την μεγιστοποίηση του οικονομικού κέρδους. Το ίδιο πρόβλημα μπορεί να λυθεί και με την χρήση εξελικτικού αλγορίθμου όπως κάνει ο (Andrew Kusiak 2009) που λύνει το μη γραμμικό πρόβλημα με εξελικτικό αλγόριθμο διπλού στόχου (bi-objective evolutionary strategy algorithm). Στο πρόβλημα αυτό μεταξύ άλλων περιορισμών είναι το περίγραμμα του «οικοπέδου» και η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των Α/Γ καθώς και ο αριθμός τους, ενώ ο σκοπός του είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ομόρρου. Μία άλλη μεθοδολογία είναι η επίλυση του προβλήματος μέσω της APO (ant colony optimization), η οποία παρουσιάζεται από τον (Yunus Eroglu 2012). Το συμπέρασμα της μελέτης αυτής είναι ότι μέσω της APO βρίσκεται καλύτερη χωροταξία του αιολικού πάρκου, αποφεύγοντας τα τοπικά μέγιστα που δημιουργούνται σε άλλες μεθόδους, έχοντας εύλογο υπολογιστικό κόστος. Εκτός αυτών των μεθόδων έχει αναπτυχθεί και η GPSO (Gauss particle swarm optimization) την οποία εξετάζει ο (Chunqiu Wan 2011) σε συνδυασμό με την στρατηγική τοπικής εύρεσης (local search strategy) για την αποφυγή του πρόωρου κορεσμού της βέλτιστης λύσης. Η επίλυση του μη περιορισμένου συστήματος συντεταγμένων εξετάζεται και από τον (U. Aytun Ozturk 2004) με χρήση ευρετικού αλγορίθμου, ωστόσο η μέθοδος αυτή έχει τον κίνδυνο την εύρεση του τοπικού και όχι του ολικού βέλτιστου όπως αναφέρει και ο (Chunqiu Wan 2011).

Ένα επόμενο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα θαλάσσια αιολικά πάρκα είναι ο τρόπος διασύνδεσης των Α/Γ τόσο μεταξύ τους όσο και με τον υποσταθμό καθώς και τον τρόπο μεταφοράς του ηλεκτρικού ρεύματος στα καλώδια, αν αυτό δηλαδή θα μεταφέρεται ως DC ή AC.

Ο τρόπος μεταφοράς του ηλεκτρικού ρεύματος, η χρήση η όχι AC/DC μετατροπών καθώς και η ύπαρξη ή όχι υποσταθμών εξετάζεται από τον (Lundberg 2003), σε μια συγκριτική μελέτη η οποία καταλήγει ότι για τις διάφορες διατάξεις οι ηλεκτρικές απώλειες είναι περίπου ίδιες, ενώ αν οι Α/Γ είναι συνδεδεμένες με DC καλώδια και η απόσταση μεταφοράς ενέργειας προς την ακτή είναι μεγαλύτερη των 10-20 km, τότε η διάταξη αυτή έχει το χαμηλότερο κόστος. Αντίστοιχες συγκρίσεις κάνει και ο (Himanshu J. Bahirat 2012), όπου καταλήγει μεταξύ άλλων συμπερασμάτων ότι τα DC πλωτά αιολικά πάρκα είναι πολύ αξιόπιστα, αλλά οι ηλεκτρικές απώλειες είναι μεγαλύτερες από ότι στα AC. Επίσης προτείνει ότι μελλοντικά ίσως εξλειφθούν οι πλωτοί υποσταθμοί και θα αντικατασταθούν με άλλο σύστημα μετατροπής. Τέλος ο (Dhal 2008) αναπτύσσει μοντέλο υπολογισμού του αρχικού κόστους, του κόστους απωλειών και της αξιοπιστίας διάφορων μορφών διασύνδεσης και μετάδοσης ενέργειας.

Διευρυμένο αντικείμενο μελέτης και βελτιστοποίησης είναι επίσης και η διασύνδεση των Α/Γ μεταξύ τους, δηλαδή η βέλτιστη διασύνδεσή τους με καλώδια. Το πρόβλημα αυτό λέγεται: Πρόβλημα συνδεσμολογίας

θαλάσσιων αιολικών πάρκων (offshore wind farm cable connection layout problem-OWFCCLP) και στις ακόλουθες μεθόδους προϋποθέτει την ήδη γνωστή θέση των Α/Γ. Για την επίλυση του έχουν αξιοποιηθεί αρκετές μεθοδολογίες, μεταξύ άλλων και αυτές της επιχειρησιακής έρευνας όπως το πρόβλημα του περιοδεύοντος πωλητή και του ελάχιστου ζευγνύοντος δέντρου. Μια παραλλαγή του ελάχιστου ζευγνύοντος δέντρου (MST minimum spanning tree) του Dijkstra δημιουργείται από τον (Sudipta Dutta 2012), ο οποίος εκτός από την παραλλαγή αυτή δημιουργεί και άλλους δύο κώδικες. Ο πρώτος υπολογίζει την μέγιστη έκταση των καλωδίων υπό τον περιορισμό του αριθμού των Α/Γ που μπορούν να συνδεθούν στο καλώδιο τροφοδοσίας και ο δεύτερος υπολογίζει το μέγεθος του κάθε καλωδίου. Με την μέθοδο MST ασχολείται και ο (Yuanhang Qi 2019), ο οποίος για την βελτιστοποίηση χρησιμοποιεί τον ευριστικό αλγόριθμο Bat. Σε άλλη έρευνα του, ο (Z. C. Peng Hou 2015) λαμβάνει υπόψιν και το διαφορετικό πάχος των καλωδίων ανάλογα με το πόσες Α/Γ εξυπηρετούν, τον επιπλέον αυτόν περιορισμό τον εισάγει με την DMST (Dynamic MST) και συγκρίνει τα αποτελέσματα με την απλή MST, από την οποία και είναι καλύτερα. Τέλος ο ίδιος αναπτύσσει (W. H. Peng Hou χ.χ.) μια άλλη παραλλαγή του MST, την οποία την λύνει μαζί με APSO (Adaptive Particle Swarm Optimization), έτσι μπορεί να γίνει η επιλογή της θέσης του θαλάσσιου υποσταθμού ταυτόχρονα με την διασύνδεση των Α/Γ. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με την MST και την DMST. Εκτός από το MST έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως και η επίλυση μέσω του προβλήματος του περιοδεύοντος πωλητή (TSP Traveling Salesman Problem). Ο (Francisco M. Gonzalez-Longatt 2012) λύνει το OPWFCCLP χρησιμοποιώντας γενετικό αλγόριθμο μαζί με το TSP σε μια προσπάθεια να βρει ταυτόχρονα την διασύνδεση των Α/Γ και την θέση και διασύνδεση των υποσταθμών. Άλλη προσέγγιση είναι η σύνδεση των Α/Γ με βάση τον Άπληστο αλγόριθμο (Greedy Algorithm), ωστόσο ο αλγόριθμος αυτός εκ φύσεως δεν ελαχιστοποιεί το μήκος των καλωδίων, ο (A.M. Jenkins) χρησιμοποιεί και έναν γενετικό αλγόριθμο για την βελτιστοποίηση αυτή. Γενετικούς αλγόριθμους χρησιμοποιούν επίσης οι (Huang Lingling 2009), (Dong Dong Li 2008). Ο (Sudipta. Dutta 2011) έχει επίσης αναπτύξει και έναν clustering based αλγόριθμο τα αποτελέσματα του οποίου συνέκρινε με την κλασική ακτινική σύνδεση Α/Γ και κατέληξε ότι οι απώλειες και το ανηγμένο κόστος ενέργειας είναι μικρότερα, το αρχικό κόστος είναι μεγαλύτερο και ότι η αξιοπιστία του συστήματος σε περίπτωση αστοχίας καλωδίου είναι μεγαλύτερη καθώς βγαίνουν εκτός λιγότερες Α/Γ. Τέλος ο (Wedzik, Siewierski και Szyrowski 2016) χρησιμοποιεί MILP για να επιλύσει ταυτόχρονα το πρόβλημα της διασύνδεσης των Α/Γ μεταξύ τους και την εύρεση της βέλτιστης διατομής του κάθε καλωδίου.

Έχοντας πλέον παρουσιάσει τους αλγόριθμους με βάση τους οποίους επιλύονται τα δύο επιμέρους προβλήματα (WFLOP για χωροθέτηση των Α/Γ και OWFCCLP για την μεταξύ τους διασύνδεση) της βελτιστοποίησης της χωροθέτησης του θαλάσσιου αιολικού πάρκου είναι πλέον η κατάλληλη στιγμή να παρουσιαστούν κάποιες μελέτες οι οποίες προβαίνουν και στις δύο βελτιστοποιήσεις, είτε ταυτόχρονα είτε σειριακά. Συνήθως η διαδικασία είναι σειριακή, δηλαδή πρώτα επιλύεται το WFLOP και στη συνέχεια με βάση την χωροθέτηση που προκύπτει επιλύεται το OWFCCLP. Ωστόσο έχουν γίνει έρευνες στις οποίες λύνονται και τα δύο προβλήματα ταυτόχρονα. Οι μελέτες αυτές θεωρούνται και πιο αποδοτικές. Στην έρευνα του ο (Peng, και συν. 2017) χρησιμοποιεί το σύστημα συντεταγμένων για τις θέσεις των Α/Γ αντί για το σύστημα με πλέγμα. Επίσης ορίζει τον αριθμό των Α/Γ και των υποσταθμών, ενώ θεωρεί ότι το κόστος εγκατάστασης της κάθε Α/Γ είναι ανεξάρτητο του βάθους στο οποίο βρίσκεται. Στη συνέχεια επιλύει ταυτόχρονα το WFLOP χρησιμοποιώντας APSO αλγόριθμο και το OWFCCLP χρησιμοποιώντας APSO-MST αλγόριθμο. Η χρήση των ευριστικών αλγόριθμων βοηθάει στο να αποφευχθεί η διασταύρωση των καλωδίων, η οποία αυξάνει πολύ το κόστος. Τα συμπεράσματα του είναι ότι επιτυγχάνεται μείωση του LPC (levelized production cost) σε σχέση με τους παραδοσιακούς τρόπους βελτιστοποίησης της χωροθέτησης. Μία άλλη μελέτη που εκπονείται από τον (Wu, et al. 2014) βασίζεται στην τεχνητή νοημοσύνη για την ταυτόχρονη επίλυση των δύο συνιστωσών του προβλήματος χωροθέτησης. Στην μελέτη αυτή χρησιμοποιείται η μέθοδος πλέγματος και το χωρίο χωρίζεται σε πλέγμα 10X10. Αρχικά ο γενετικός αλγόριθμος GA δημιουργεί έναν τυχαίο πληθυσμό από πιθανές χωροθετήσεις του πάρκου, τα αποτελέσματα εισάγονται στο ACS για βέλτιστη διασύνδεση των Α/Γ του κάθε πάρκου, το αποτέλεσμα αυτό εισάγεται πάλι στον GA. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να εξαχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα





$$m = \frac{U_\infty}{U_T} \quad (2)$$

$$\left(\frac{dR(x)}{dx}\right)_a^2 = \frac{a}{0,51} \quad (3)$$

$$\left(\frac{dR(x)}{dx}\right)_m^2 = \frac{0.22(m-1)^2}{m^2 - 4m + 1} \quad (4)$$

$$\left(\frac{dR(x)}{dx}\right)^2 = \left(\frac{dR(x)}{dx}\right)_a^2 + \left(\frac{dR(x)}{dx}\right)_m^2 \quad (5)$$

Έχοντας πλέον την κλίση του κώνου και γνωρίζοντας την ακτίνα του δρομέα  $R_0$  δύναται να υπολογιστεί και το μήκος  $x_0$  του πυρήνα και εν συνεχεία η ακτίνα του ομόρρου σε κάθε κατάντι θέση  $x$ .

$$x_0 = R_0 \frac{\frac{\sqrt{35} - 1}{3}}{\frac{dR(x)}{dx}} \quad (6)$$

$$R_c(x) = R_0 \frac{x_0 - x}{x}, \quad x < x_0 \quad (7)$$

$$R(x) = R_0 + x \frac{dR(x)}{dx} \quad (8)$$

Τέλος πρέπει να υπολογιστεί το έλλειμμα ταχύτητας  $\Delta U(x)$  σε κάθε θέση  $x$  κατάντι της Α/Γ, πάνω στην κεντρική γραμμή του ομόρρου και η αδιάστατη παράμετρος  $\xi(x,r)$  η οποία καθορίζει το έλλειμμα της ταχύτητας σε κάθε θέση  $x$ , κατά πλάτος του  $r$ .

$$\Delta U(x) = \begin{cases} U_\infty - U_T, & x < x_0 \\ \frac{35}{9}(U_\infty - U_T) \left(\frac{R_0}{R(x)}\right)^2, & x > x_0 \end{cases} \quad (9)$$

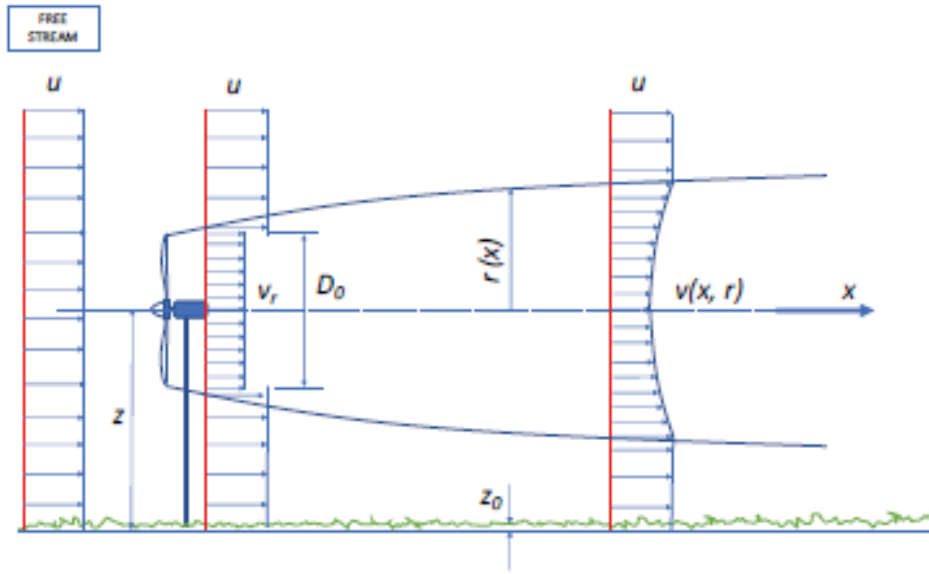
$$\xi(x,r) = \begin{cases} \frac{r - R_c(x)}{R(x) - R_c(x)}, & 0 < x < x_0 \text{ και } R_c(x) < r < R(x) \\ \frac{r}{R(x)}, & x \geq x_0 \text{ και } 0 < R(x) \end{cases} \quad (10)$$

$$u(x,r) = \begin{cases} U_\infty, & r > R(x) \\ U_T, & 0 < x < x_0 \text{ και } r < R_c(x) \\ U - \Delta U(x)[1 - \xi(x)^{1.5}]^2, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (11)$$

Επόμενη υποπεριοχή είναι η μεταβατική. Στην μεταβατική περιοχή η ταχύτητα βρίσκεται μεταξύ της  $U_T$  και της ταχύτητας επ' άπειρου ροής. Τέλος είναι η πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή όπου δεν υπάρχει δυναμικός πυρήνας και τα επίπεδα τύρβης λόγω περιστροφής είναι πολύ μικρά.

### 3.1.2 GCL old

Το μοντέλο αυτό θεωρεί σταθερή κατανομή ταχύτητας ανάντι της Α/Γ. Κατάντι της Α/Γ θεωρεί ότι η διάμετρος του ομόρρου δεν μεταβάλλεται με σταθερό ρυθμό. Η επίλυση του προβλήματος γίνεται με βάση τις απλοποιημένες εξισώσεις Navier-Stokes για αξονοσυμμετρική ροή θεωρώντας λεπτό στρώμα διάτμησης. Αξιοσημείωτο είναι ότι το μοντέλο GCL λαμβάνει υπόψιν την ένταση της τύρβης  $I_a$ , στη συγκεκριμένη περιοχή.



Εικόνα 2: Πρότυπο ομόρρου κατά GCL (Sebastian Brusca 2018)

Αρχικά πρέπει να υπολογιστεί η παράμετρος  $x_0$  η οποία προκύπτει με βάση την ακτίνα του ομόρρου σε απόσταση 9.5 διαμέτρων  $D_0$  του δρομέα κατάντι της Α/Γ, την ένταση τύρβης της περιοχής και του ύψους πλήμνης  $H_{hub}$ . Έχοντας υπολογίσει την παράμετρο  $x_0$  είναι δυνατός ο υπολογισμός της ακτίνας ομόρρου σε κάθε θέση  $x$  κατάντι της Α/Γ.

$$R_{nb} = \max[1.08D_0, 1.08D_0 + 21.7D_0(I_a - 0.05)] \quad (12)$$

$$R_{9.5} = 0.5[R_{nb} + \min(H_{hub}, R_{nb})] \quad (13)$$

$$x_0 = \frac{9.5 D_0}{\left(2 * \frac{R_{9.5}}{D_0}\right)^3 - 1} \quad (14)$$

$$R(x) = 0.5D_0 \left(1 + \frac{C_T * x}{x_0}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

Έχοντας υπολογίσει τις ανωτέρω ποσότητες, γίνεται να βρεθεί η τιμή της ταχύτητας πάνω στην κεντρική γραμμή του ομόρρου και εν συνεχεία γίνεται να υπολογιστεί η τιμή της ταχύτητας σε κάθε θέση του επιπέδου, με βάση τον συντελεστή  $f$ . Τέλος μπορεί να υπολογιστεί η ένταση τύρβης σε κάθε θέση  $x$ .

$$f\left(\frac{r}{R(x)}\right) = \left[1 - \left(\frac{r}{R(x)}\right)^{\frac{3}{2}}\right]^2 \quad (16)$$

$$U_s(x) = U_\infty \frac{35}{72} \left( \frac{D_0}{R(x)} \right)^2 C_T \quad (17)$$

$$u(x, r) = U_\infty \left[ 1 - \frac{U_s(x)}{U_\infty} * f \left( \frac{r}{R(x)} \right) \right] \quad (18)$$

### 3.1.3 GCL New

Σε αυτή την ανανεωμένη θεώρηση του GCL το πρόβλημα απλοποιείται θεωρώντας τον ομόρρου ως μια διακύμανση της μέσης ταχύτητας του ανέμου, όπου εκτός από τις διακυμάνσεις της ροής του αέρα, υπάρχουν και οι διακυμάνσεις λόγω της ύπαρξης του ομόρρου. Η παραδοχή αυτή θεωρεί γραμμική υπέρθεση των δύο αυτών διαταραχών. Επίσης το ότι οι διαταραχές της ταχύτητας είναι πολύ μεγαλύτερες στην ακτινική διεύθυνση από ότι στην κατά μήκος διεύθυνση οδηγεί στην παραδοχή της χρήσης των εξισώσεων Navier-Stokes για λεπτό οριακό στρώμα. Αυτά συντελούν στην αξονοσυμμετρική ροή και μείωση της τάξης του προβλήματος από 3<sup>ων</sup> σε 2 διαστάσεων. Επίσης η ανάντι ροή θεωρείται σταθερή, ενώ παραλείπονται οι όροι ιξώδους τάσης θεωρώντας την ροή ομογενή και το ρευστό ασυμπίεστο. Τέλος η διάχυση λαμβάνεται υπόψιν με βάση την επέκταση του ομόρρου και την δημιουργία του κώνου. (Larsen 2009)

Αρχικά υπολογίζεται η ακτίνα του ομόρρου σε απόσταση 9.6 διαμέτρων κατάντι της Α/Γ. Η τιμή αυτή προκύπτει εμπειρικά και προκύπτει από την ένταση τύρβης του περιβάλλοντος και τον συντελεστή ώσης της Α/Γ.

$$R_{9.6} = a_1 * \exp(a_2 * C_T^2 + a_3 C_T + a_4) (b_1 I_a + 1) D \quad (19)$$

α1	α2	α3	α4	b1
0 435449861	0 797853685	-0.124807893	0 136821858	15 6298

Πίνακας 1: Συντελεστές α για το νέο μοντέλο GCL

Στη συνέχεια υπολογίζονται διάφορες παράμετροι εξαρτώμενες από την διάμετρο D του δρομέα, την επιφάνεια σάρωσης του δρομέα A και τον συντελεστή ώσης C<sub>T</sub> της Α/Γ.

$$m = \frac{1}{\sqrt{1 - C_T}} \quad (20)$$

$$k = \sqrt{\frac{m + 1}{2}} \quad (21)$$

$$x_0 = \frac{9.6D}{\left(2 \frac{R_{9.6}}{Dk}\right)^3 - 1} \quad (22)$$

$$c_1 = \left(\frac{kD}{2}\right)^{\frac{5}{2}} \left(\frac{105}{2\pi}\right)^{-\frac{1}{2}} (C_T A x_0)^{-\frac{5}{6}} \quad (23)$$

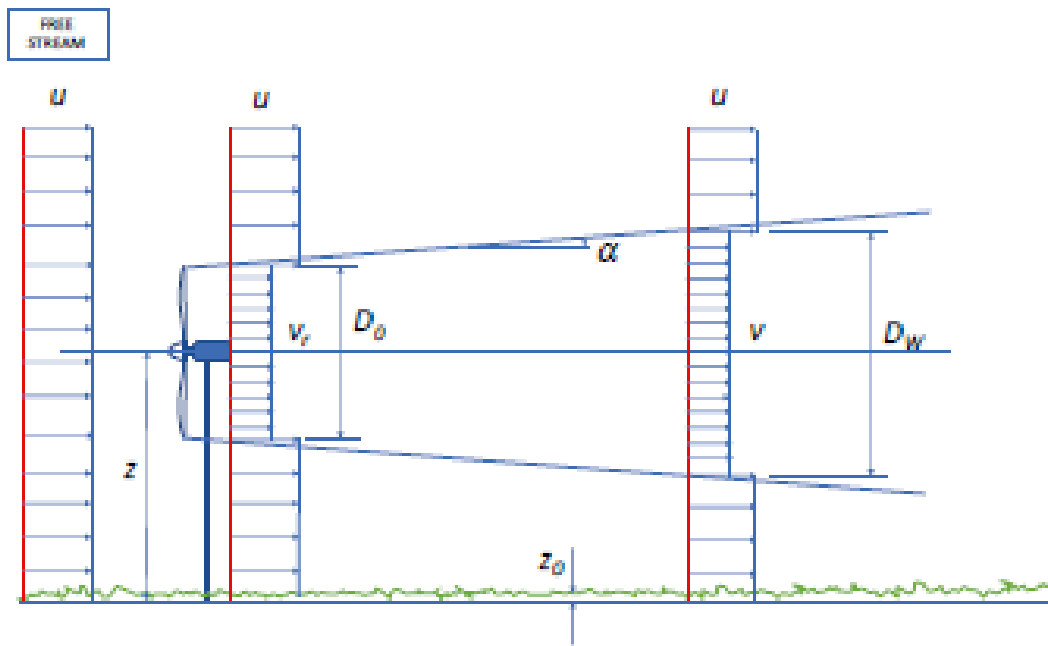
Τέλος μπορεί να υπολογιστεί η ακτίνα του ομόρρου σε κάθε θέση κατάντι της Α/Γ καθώς και το έλλειμμα ταχύτητας σε κάθε θέση x,r στο επίπεδο.

$$R_w(x) = \left( \frac{105c_1^2}{2\pi} \right)^{\frac{1}{5}} (C_T A(x + x_0))^{\frac{1}{3}} \quad (24)$$

$$\Delta U(x, r) = -\frac{U_\infty}{9} (C_T A(x + x_0))^{-\frac{1}{3}} \left[ r^{\frac{3}{2}} (3c_1^2 C_T A(x + x_0))^{-\frac{1}{2}} - \left( \frac{35}{2\pi} \right)^{\frac{3}{10}} (3c_1^2)^{-\frac{1}{5}} \right]^2 \quad (25)$$

### 3.1.4 JENSEN

Το μοντέλο του Jensen δεν αναπτύχθηκε για να δώσει ακριβή αναπαράσταση του ομόρρου σε κάθε θέση κατάντι της Α/Γ. Αυτό είναι άλλωστε εμφανές καθώς σε κάθε θέση  $x$  το προφίλ ταχύτητας είναι βηματικό, με μόνο δύο διαφορετικές τιμές, μία εντός του ομόρρου και μια εκτός η οποία είναι ίση με την επ' άπειρο ροή. Ωστόσο, η χρησιμότητα του μοντέλου αυτού είναι ότι αν και έχει μικρό υπολογιστικό κόστος δίνει πολύ καλή προσέγγιση της παραγόμενης ενέργειας ενός αιολικού πάρκου. Στο μοντέλο του Jensen η κλίση του κώνου  $a$  του ομόρρου είναι σταθερή και εξαρτώμενη από το ύψος πλήμνης  $H_{hub}$  και το μήκος τραχύτητας του εδάφους  $z_0$ . Κύριο χαρακτηριστικό του μοντέλου είναι η θεώρηση ότι η μάζα διατηρείται σε κάθε τομή της κατάντι περιοχής του ομόρρου.



Εικόνα 3: Πρότυπο ομόρρου κατά Jensen (Sebastian Brusca 2018)

Αρχικά πρέπει να υπολογιστεί η κλίση του κώνου. Στη συνέχεια υπολογίζεται η ακτίνα σε κάθε θέση  $x$  κατάντι της Α/Γ και η αντίστοιχη ταχύτητα η οποία εξαρτάται μόνο από την θέση  $x$ .

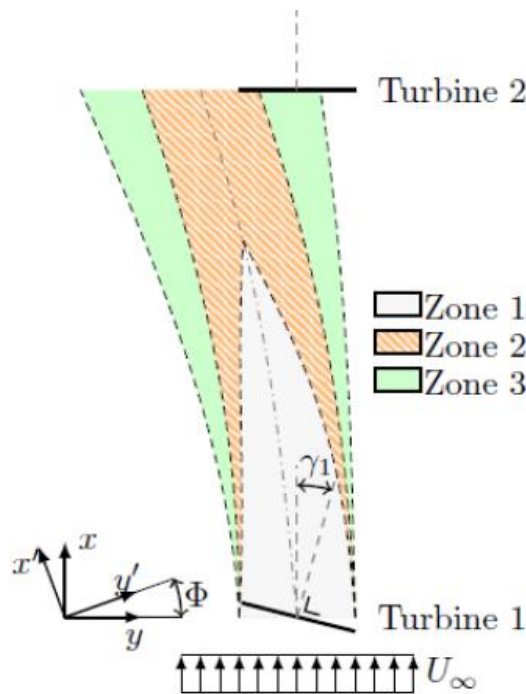
$$a = \frac{0.5}{\ln\left(\frac{H_{hub}}{z_0}\right)} \quad (26)$$

$$R(x) = R_0 + ax \quad (27)$$

$$u(x) = U_{\infty} \left[ 1 - \frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{\left(1 + a \frac{x}{R_0}\right)^2} \right] \quad (28)$$

### 3.1.5 FLORIS

Το μοντέλο FLORIS βασίζεται στο υπολογιστικό εργαλείο Flow Redirection and Induction in Steady-state (Padrón, et al. 2019). Αποτελεί συνδυασμό του μοντέλου Jensen και ενός μοντέλου για την εκτροπή του ομόρρου λόγω της γωνίας απόκλισης. Διαφοροποιείται από τον Jensen στο ότι έχει 3 ζώνες εντός του κώνου ομόρρου αντί για 1 που έχει το μοντέλο Jensen. Το έλλειμμα ταχύτητας εξαρτάται από την γωνία απόκλισης και την σχετική θέση της Α/Γ προς την ταχύτητα που δέχεται η Α/Γ. Ο ομόρρος χωρίζεται σε τρεις ζώνες, 1<sup>η</sup> είναι ο κοντινός, 2<sup>η</sup> ο μακρινός και 3<sup>η</sup> η ζώνη μετάβασης. (Θεολογίτου 2022)



Εικόνα 4: Πρότυπο ομόρρου κατά FLORIS (Θεολογίτου 2022)

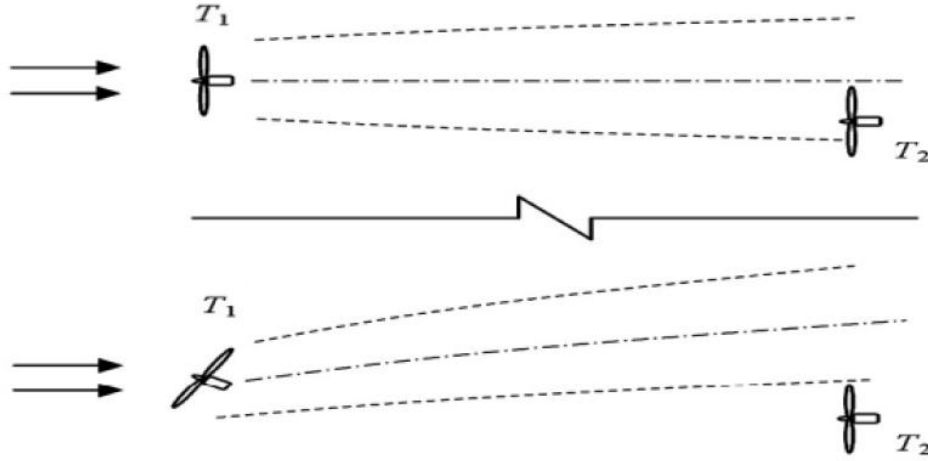
Η πλευρική εκτροπή του ρότορα λόγω της γωνίας απόκλισης προκαλεί περιστροφή της δύναμης ώσης που ασκείται στη ροή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μιας πλευρικής συνιστώσας του ανέμου η οποία εκτρέπει την ροή αντίθετα από την γωνία απόκλισης. Συνεπώς υπάρχει μεταβολή του συντελεστή ώσης σε σχέση με την περίπτωση της κάθετης πρόσπτωσης του ανέμου πάνω στην Α/Γ. Έτσι ο συντελεστής ώσης  $C_T$  πλέον ορίζεται ως:

$$C_T = \begin{cases} 4a(1 - a) & , a \leq 0.99 \\ 0.425 + 1.39a & , a > 0.99 \end{cases} \quad (29)$$

$$C_T(\gamma) = \frac{1}{2} \sigma \nu^2(\gamma) * \eta_m(\gamma) * C_T \quad (30)$$

Με γνωστό τον νέο συντελεστή ώσης είναι πλέον εφικτός ο υπολογισμός της τροχιάς της κεντρικής γραμμής του ομόρρου. Η τροχιά εξαρτάται από τον συντελεστή ώσης, την διάμετρο D της Α/Γ

$$\delta y_{yaw}(x, \gamma) = \frac{C_T(\gamma) \left( 15 \left( 2k_d \frac{x}{D} + 1 \right)^4 + C_T(\gamma)^2 \right)}{30 \frac{k_d}{D} \left( 2k_d \frac{x}{D} + 1 \right)^5} - \frac{C_T(\gamma) D (15 + C_T(\gamma)^2)}{30k_d} \quad (31)$$



Εικόνα 5: Προσομοίωση εκτροπής ομόρρου κατά FLORIS (Θεολογίτου 2022)

Στη συνέχεια υπολογίζεται η διάμετρος της κάθε ζώνης του ομόρρου. Η διάμετρος εξαρτάται από τις εξής παραμέτρους του ομόρρου:

- $k_{e,\gamma}$ = μείωση της διαστολής του ομόρρου λόγω εκτροπής της A/Γ
- $k_{e,i}$ =διαστολή ομόρρου, όπου  $i=1,2,3$  και αντιστοιχεί στην κάθε περιοχή. Για τον κοντινό ομόρρου, η παράμετρος αυτή παίρνει και αρνητικές τιμές

$$D_i(x, \gamma) = \max[0, (D + 2k_{e,i}x) \text{συν}(\gamma^{k_{e,\gamma}})] \quad (32)$$

Τέλος για τον υπολογισμό της ταχύτητας σε κάθε ζώνη πρέπει να υπολογιστεί ο τοπικός συντελεστής εξασθένισης του ομόρρου ο οποίος αποτελεί μια σταθερή συνάρτηση της πλευρικής μετατόπισης  $r$  του κέντρου του ομόρρου της ανεμογεννήτριας και δίνεται από την εξής πολύκλαδη συνάρτηση.

$$c_i(x) = \begin{cases} c_1 & , |r| \leq \frac{D_1}{2} \\ c_2, & \frac{D_1}{2} \leq |r| \leq \frac{D_2}{2} \\ c_2, & \frac{D_2}{2} \leq |r| \leq \frac{D_3}{2} \\ c_1 & , |r| > \frac{D_3}{2} \end{cases} \quad (33)$$

Όπου  $r = y - \delta y_{yaw}(x, \gamma)$  με  $\gamma$  το όριο του ομόρρου. Ο συντελεστής  $c_i$  προκύπτει και ακολούθως ως

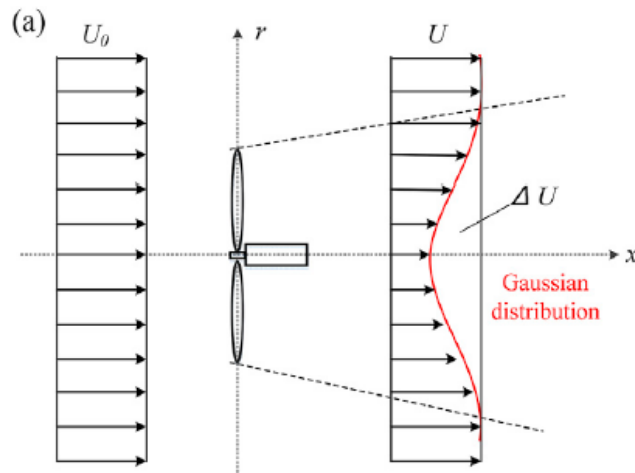
$$c_i(x) = \left( \frac{D}{D + 2k_{r,i}x} \right)^2 \quad (34)$$

Τέλος υπολογίζεται το προφίλ ταχύτητας του ανέμου σε κάθε μια από τις τρεις ζώνες για κάθε θέση  $x$  κατάντι της A/Γ.

$$U_i(x) = U_\infty (1 - 2ac_i(x)) \quad (35)$$

### 3.1.6 Μοντέλο με βάση την κατανομή Gauss (Takeshi Ishihara 2018)

Στο μοντέλο αυτό θεωρείται πως η κατάντι ροή είναι αξονοσυμμετρική και έχει όμοια προφίλ ταχύτητας κατά μήκος του ομόρρου για το έλλειμμα ταχύτητας. Για την εύρεση του ελλείμματος ταχύτητας απαιτείται η εύρεση του μέγιστου ελλείμματος πάνω στην κεντρική γραμμή του ομόρρου και μετά η αναγωγή του σε κάθε ακτινική θέση μέσω της κανονικής κατανομής κατά Gauss.



Εικόνα 6: Πρότυπο εκπομπής ομόρρου βασισμένο σε κατανομή Gauss (Takeshi Ishihara 2018)

Αρχικά υπολογίζεται ο συντελεστής  $F(C_T, I_a, x/D)$ , ο οποίος αντιπροσωπεύει το μέγιστο έλλειμμα ταχύτητας σε κάθε κατάντι θέση  $x$ , ανηγμένο με την ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πλήμνης.

$$F\left(C_T, I_a, \frac{x}{D}\right) = \frac{1}{\left(a + b \frac{x}{D} + p\right)^2} \quad (36)$$

$$a = 0.93 C_T^{-0.75} I_a^{0.17} \quad (37)$$

$$b = 0.42 C_T^{0.6} I_a^{0.2} \quad (38)$$

$$p = 0.15 C_T^{-0.25} I_a^{-0.7} \left(1 + \frac{x}{D}\right)^{-2} \quad (39)$$

Ο συντελεστής  $p$  αποτελεί συντελεστή διόρθωσης που λαμβάνει υπόψιν την μεγάλη κλίση στην τύρβη στην περιοχή κοντινού ομόρρου.

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής  $\phi(r/\sigma)$  ο οποίος δίνει το ποσοστό του ελλείμματος ταχύτητας για κάθε κατάντι θέση  $x$ , στην ακτινική διεύθυνση. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από την τυπική απόκλιση της κατανομής, οποίος με την σειρά του εξαρτάται από την ένταση τύρβης και τον συντελεστή ώσης.

$$\phi\left(\frac{r}{\sigma}\right) = \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (40)$$

$$\frac{\sigma}{D} = k^* \frac{x}{D} + \varepsilon \quad (41)$$

$$k^* = 0.11 C_T^{1.07} I_a^{0.2} \quad (42)$$

$$\varepsilon = 0.23 C_T^{-0.25} I_a^{0.17} \quad (43)$$

Τέλος υπολογίζεται το έλλειμμα ταχύτητας σε κάθε θέση ως ακολούθως:

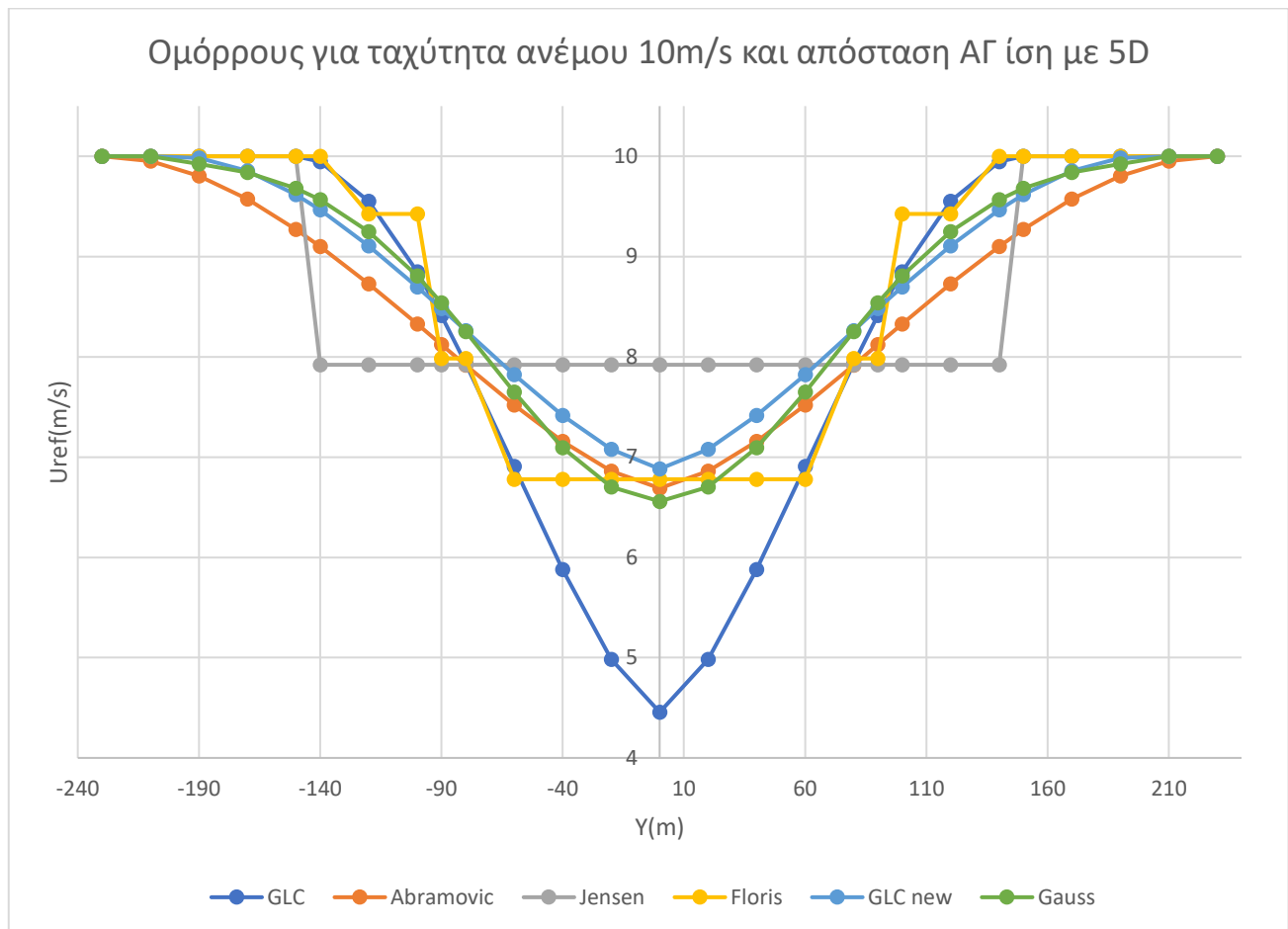
$$\Delta U(x, r) = U_{\infty} \varphi\left(\frac{r}{\sigma}\right) F\left(C_T, I_a, \frac{x}{D}\right) \quad (44)$$

$$u(x, r) = U_{\infty} - \Delta U(x, r) \quad (45)$$

Εφεξής, στην εργασία το μοντέλο αυτό θα καλείται μοντέλο Gauss.

### 3.1.7 Συγκριτική παρουσίαση προφίλ ταχύτητας για τα διάφορα μοντέλα ομόρρου

Για την καλύτερη σύγκριση των μοντέλων, υπολογίστηκε το προφίλ ταχύτητας για το κάθε μοντέλο υπό τις ίδιες συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές ήταν ένταση τύρβης  $I_a=0.05$ ,  $U_{\infty}=10\text{m/s}$  και κατάντι απόσταση ίση με 5 διαμέτρους A/Γ.



Διάγραμμα 1: Παρουσίαση των μοντέλων ομόρρου για εισερχόμενη ροή 10m/s και απόσταση A/Γ ίση με 5 διαμέτρους

Παρατηρώντας το ανωτέρω διάγραμμα μπορούν να εξαχθούν μερικά ποιοτικά συμπεράσματα για το μέγεθος του ελλείμματος με βάση την κάθε μέθοδο αλλά και για την ακτίνα το ομόρρου.

- Όπως ήταν αναμενόμενο τα μοντέλα Jensen και Floris είναι ουσιαστικά βηματικές συναρτήσεις. Το μοντέλο Jensen είναι μονόκλαδη μέσα στον ομόρρου, ενώ το Floris είναι τρίκλαδη. Επίσης παρατηρείται ότι έχουν σχεδόν ίδια ακτίνα ομόρρου.
- Συγκρίνοντας τα δύο ημιεμπειρικά πρότυπα του GCL παρατηρείται ότι το παλιό πρότυπο έχει πολύ μεγάλο έλλειμμα ταχύτητας, το μεγαλύτερο από όλα τα μοντέλα. Το νέο πρότυπο έχει σχεδόν το μισό έλλειμμα, το οποίο είναι πιο κοντά στα υπόλοιπα μοντέλα ομόρρου. Επίσης λόγω του ότι το



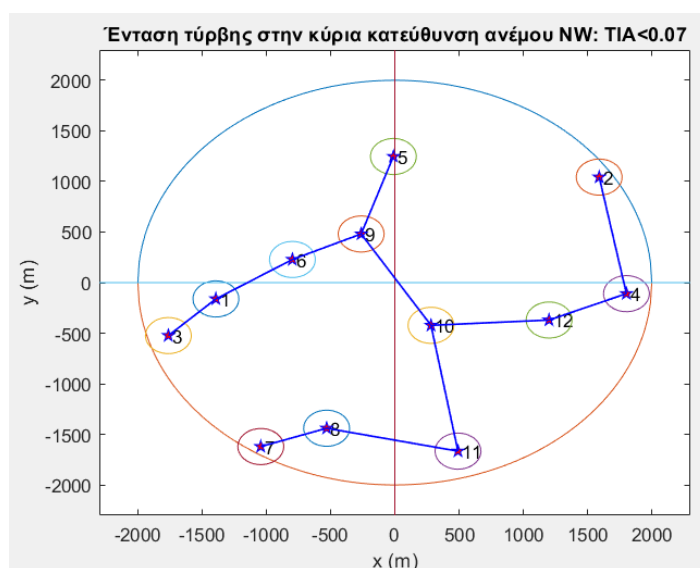
παλιό έχει μεγάλο έλλειμμα, η ακτίνα του ομόρρου είναι μικρότερη σε σχέση με το νέο, το οποίο προκύπτει λόγω διατήρησης ορμής.

- Τα μοντέλα τα οποία έχουν μια πιο αληθοφανή μορφή είναι το νέο μοντέλο GCL, το Abramovich και το Gauss. Αυτό συμβαίνει καθώς το έλλειμμα ταχύτητας δεν είναι ούτε πολύ μεγάλο, αλλά ούτε και πολύ μικρό. Επίσης η κλίση είναι μικρή στο προφίλ ταχύτητας.
- Το μοντέλο στο οποίο ο ομόρρος έχει μεγαλύτερη ακτίνα είναι αυτό του Abramovich.
- Τέλος παρατηρείται ότι τα μοντέλα που έχουν μεγάλο έλλειμμα ταχύτητας, παρουσιάζουν μεγαλύτερη ακτίνα ομόρρου. Αυτό συμβαίνει καθώς ισχύει η αρχή διατήρησης ορμής. Επομένως αν η ταχύτητα είναι μικρή, θέλει μεγάλη επιφάνεια ώστε το ολοκλήρωμα της να είναι το ίδιο με ένα μοντέλο που έχει μεγάλη ταχύτητα και επομένως μικρή επιφάνεια.

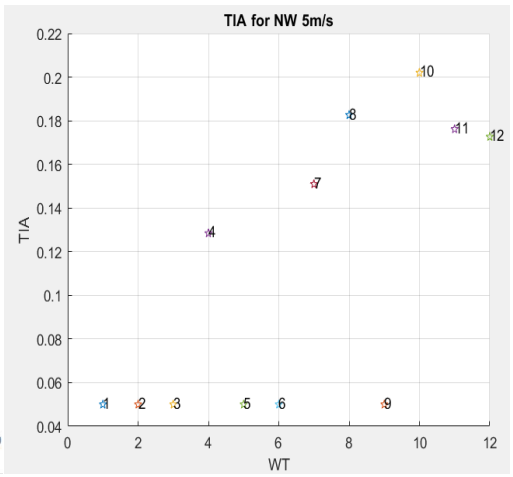
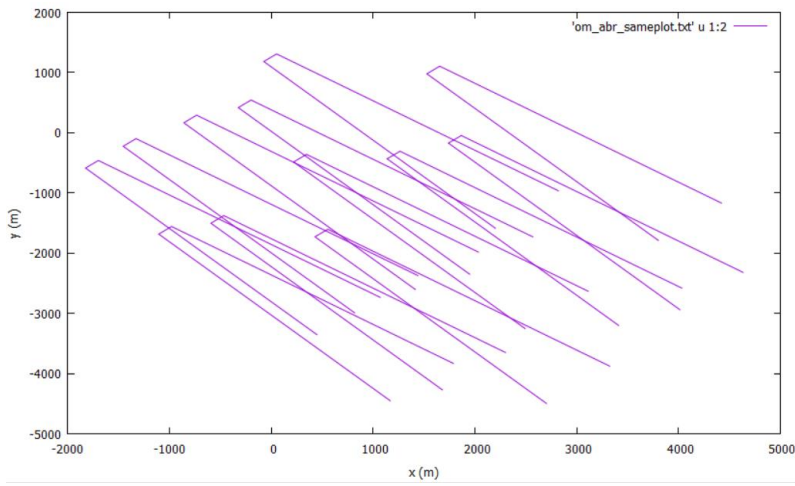
### 3.1.8 Συγκριτική παρουσίαση πεδίου ομόρρου για τα διάφορα μοντέλα

Όπως ήδη έχει φανεί στην προηγούμενη υποπαράγραφο, το κάθε μοντέλο δίνει διαφορετικό έλλειμμα ταχύτητας καθώς και διαφορετικό εύρος στο οποίο το εμφανίζει. Επομένως είναι εύλογο να εξετασθεί μια δεδομένη τοπολογία με τα διάφορα μοντέλα ομόρρου ως προς τον CF, ως προς το LCOE καθώς και ως προς το πεδίο ταχυτήτων του ομόρρου. Το πεδίο θα εξετασθεί μόνο για τα μοντέλα Jensen, Abramovich, GCL old, για τα οποία δύναται να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός του, από ήδη υπάρχοντες κώδικες.

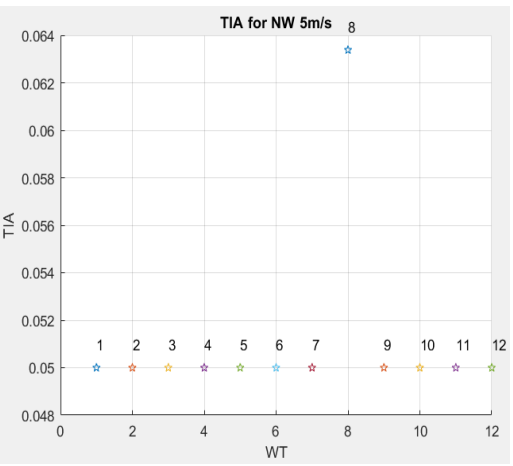
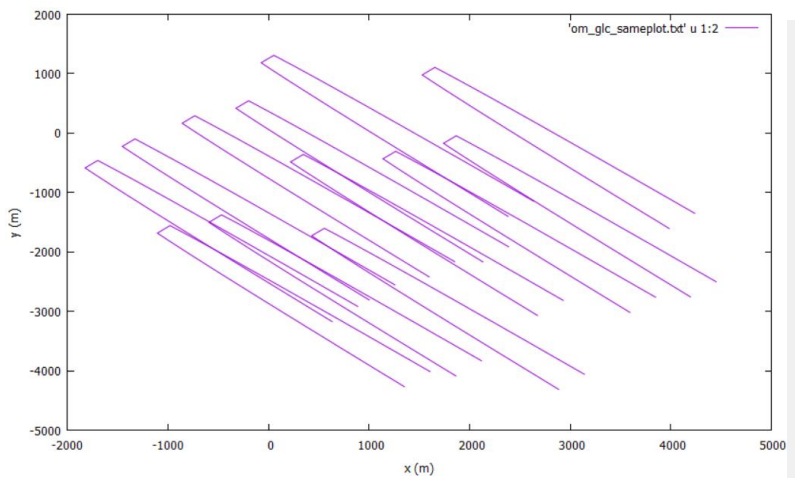
Το αιολικό πάρκο που θα εξετασθεί είναι αυτό που προέκυψε για κυκλικό χωρίο και με περιορισμό η μέγιστη ένταση τύρβης που παρατηρείται στην κύρια διεύθυνση να μην ξεπερνάει το 0.07. Μέθοδος βελτιστοποίησης ήταν η Mixed Variable GA και ως μοντέλο ομόρρου για την δημιουργία της τοπολογίας αποτέλεσε το old GCL. Στην ακόλουθη παράγραφο (όπως και στις επόμενες) θα εξετασθεί το LCOE για τιμή καλωδίου 400κ€/km



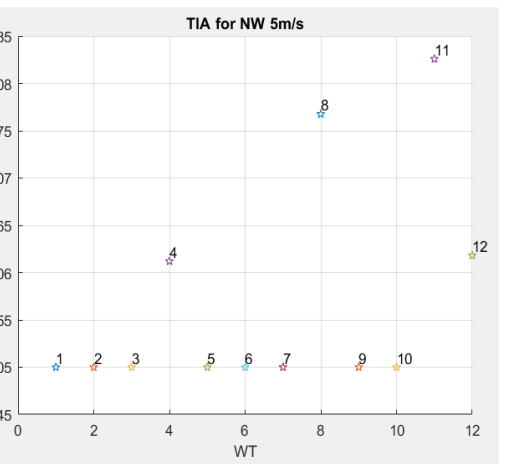
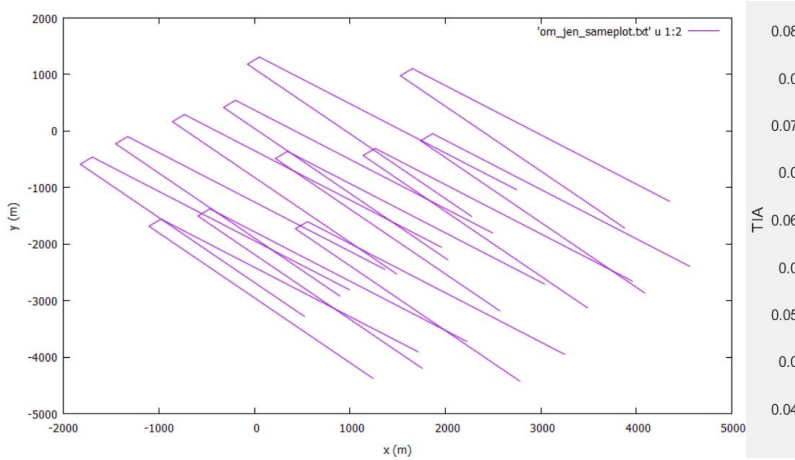
Διάγραμμα 2: Τοπολογία για σύγκριση του πεδίου ομόρρου για τα διάφορα μοντέλα



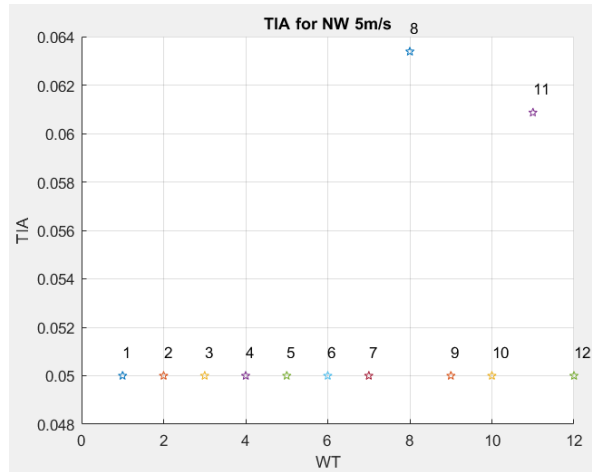
Διάγραμμα 3: Πεδίο ομόρρου και ένταση τύρβης στα 5m/s για Abramovich



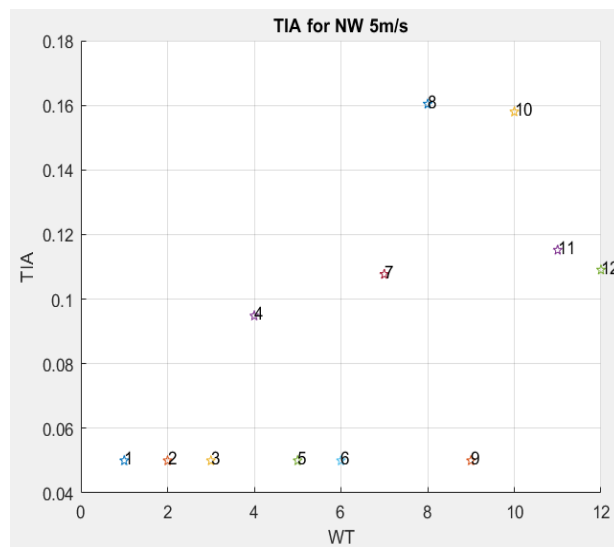
Διάγραμμα 4: Πεδίο ομόρρου και ένταση τύρβης στα 5m/s για GCL



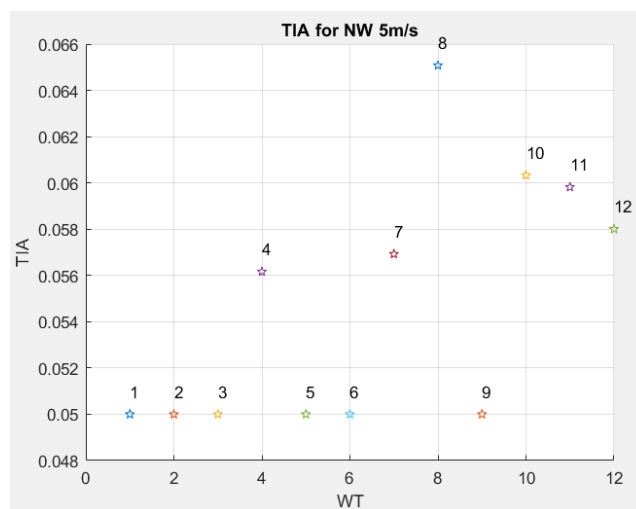
Διάγραμμα 5: Πεδίο ομόρρου και ένταση τύρβης στα 5m/s για Jensen



Διάγραμμα 6 : Πεδίο ομόρρου και ένταση τύρβης στα 5m/s για Floris



Διάγραμμα 7: Πεδίο ομόρρου και ένταση τύρβης στα 5m/s για νέο GCL



Διάγραμμα 8: Πεδίο ομόρρου και ένταση τύρβης στα 5m/s για Gauss

	Abramovich	GCL	Jensen	Floris	GCL new	Gauss
CF	0.3498	0.3563	0.3498	0.3576	0.3540	0.3528
AEP (kWh)	3.6775 E+8	3.7458 E+8	3.6773 E+8	3.7596 E+8	3.7211 E+8	3.7091 E+8
LCOE €	0.090702	0.089686	0.090705	0.089484	0.090048	0.090227
Max mean TIA	0.08277	0.06454	0.07038	0.06652	0.07482	0.05323
Mean mean TIA	0.07087	0.05633	0.05966	0.05666	0.06311	0.05173
Stdv mean TIA	0.00903	0.00412	0.00511	0.00446	0.00632	0.0008

Πίνακας 2: Συγκριτική αξιολόγηση ενός αιολικού πάρκου, με τα διάφορα μοντέλα ομόρρου

Παρατηρώντας τα προηγούμενα διαγράμματα εξάγεται το γενικό συμπέρασμα, ότι ο ομόρρους που δημιουργείται κατάντι των μετωπικών Α/Γ διαφέρει μεταξύ των διάφορων μοντέλων. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν άλλωστε αναμενόμενο από την στιγμή που τα προφίλ των ταχυτήτων στο Διάγραμμα 1 έδειχναν διαφορετικό εύρος ομόρρου καθώς και μεγέθους ελλείματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ανάλογα την εξεταζόμενη μέθοδο, να αλλάζει το πλήθος των Α/Γ που επηρεάζονται από τις ανάντι μηχανές. Επομένως θα παρατεθούν κάποια ενδεικτικά σχόλια.

1. Όπως είναι αναμενόμενο, με την μέθοδο GCL υπάρχει ο ελάχιστος αριθμός Α/Γ που βρίσκονται σε πεδίο ομόρρου άλλης Α/Γ. Ήταν αναμενόμενο, καθώς το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για στην εύρεση αυτής της τοπολογίας ήταν το μοντέλο του GCL. Συνεπώς, αφού ο κώδικας αποσκοπεί στην ελάττωση των απωλειών λόγω ομόρρου είναι λογικό στην κύρια διεύθυνση να προκύψουν όσο το δυνατόν λιγότερες Α/Γ που να έχουν έλλειμμα ταχύτητας, ώστε να υπάρχει η καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού.
2. Τα μοντέλα στα οποία υπάρχουν οι περισσότερες (6) Α/Γ μέσα σε πεδίο ομόρρου άλλης Α/Γ, είναι το νέο μοντέλο GCL, το μοντέλο Abramovich και Gauss. Αυτό αιτιολογείται άλλωστε, από το γεγονός ότι στο Διάγραμμα 1, τα 3 αυτά μοντέλα έχουν το μεγαλύτερο εύρος ομόρρου και άρα αναμένεται κάποιες Α/Γ που στον υπολογισμό με βάση το GCL μοντέλο ήταν οριακά εκτός του παραγόμενου ομόρρου, τώρα να βρίσκονται οριακά εντός του.
3. Τα μοντέλα Abramovich και το νέο μοντέλο GCL, παρουσιάζουν επίσης και την μεγαλύτερη ένταση τύρβης στην κύρια διεύθυνση καθώς αυτή ξεπερνάει το 0.15 σε αρκετές Α/Γ.
4. Τα σχόλια 2 και 3 εξηγούν το γεγονός ότι τα μοντέλα Abramovich και το νέο μοντέλο GCL έχουν την μεγαλύτερη σταθμισμένη ένταση τύρβης, ειδικά το Abramovich ξεπερνάει το 0.08. Ωστόσο, στο μοντέλο Gauss παρατηρείται σταθμισμένη TIA πολύ κοντά σε αυτή του περιβάλλοντος, καθώς, ακόμα και στην δυσμενέστερη περίπτωση της κύριας διεύθυνσης με ταχύτητα 5m/s, η τύρβη είναι κάτω από το 0.07, σε αντίθεση με τις έτερες 2 μεθόδους, όπου οι τιμές είναι ως και τριπλάσιες.
5. Ενδιαφέρον παρουσιάζει πως τα μοντέλα Jensen και Abramovich, παρουσιάζουν ίδια CF και AEP, τιμές που είναι και οι χαμηλότερες μεταξύ των μοντέλων. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο ότι το μοντέλο Jensen παρουσιάζει τον ομόρρου ως κλιμακωτή συνάρτηση και όχι ως συνεχή, ενώ είναι γενικά παραδεκτό ότι δεν εστιάζει στην καλύτερη δυνατή εύρεση του ελλείματος ταχύτητας, αλλά στην γρήγορη και άμεση εύρεση του συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας του αιολικού πάρκου. Ο προηγούμενος ισχυρισμός μπορεί να επιβεβαιωθεί αν υπολογιστεί το ολοκλήρωμα του προφίλ ταχύτητας όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 1. Πράγματι στο προηγούμενο διάγραμμα φαίνεται ότι το ολοκλήρωμα που περικλείουν τα εξεταζόμενα μοντέλα είναι σχεδόν ίδιο, ενδεικτικά για τα 27 σημεία του διαγράμματος, η ολοκλήρωση βγάζει 3918 m<sup>2</sup>/s για το Abramovich, ενώ για τον Jensen είναι 3997 m<sup>2</sup>/s. Όσον αφορά την διαφορά των 79 m<sup>2</sup>/s, αυτή αποδίδεται στην αραιή διακριτοποίηση που υπάρχει, καθώς δημιουργείται ένα τρίγωνο στο ολοκλήρωμα του Jensen το οποίο δεν θα έπρεπε να υπάρχει αφού η μεταβολή από το ένα σκαλοπάτι στο άλλο είναι σημαία. Επομένως τα δύο μοντέλα είναι πολύ πιθανό να εμφανίσουν εν τέλει ίδιο CF. Πράγματι προς

απόδειξη του προηγούμενου ισχυρισμού, υπολογίστηκε το AEP για 2 Α/Γ και ένα σημείο NPOIN (αριθμός σημείων πάνω στην πτερωτή της Α/Γ), για τα δύο μοντέλα και το αποτέλεσμα ήταν ίσο. Το ίδιο έγινε και για 2 Α/Γ με 7 NPOIN, οδηγώντας στο ίδιο αποτέλεσμα. Συνεπώς συνάγεται το συμπέρασμα ότι τα 2 μοντέλα έχουν ίδιο αποτέλεσμα ως προς την παραγόμενη ενέργεια. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι έχουν ίδια παραγωγή ενέργειας διαφέρουν σημαντικά στην ένταση τύρβης που δημιουργείται. Το επίπεδο τύρβης αποδίδεται στην διαφορετική φαινόμενη ταχύτητα που υπολογίζει το κάθε μοντέλο, καθώς και το ότι το μοντέλο Αbraμονίχ έχει μεγαλύτερο εύρος ομόρρου, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη επικάλυψη μεταξύ των Α/Γ. Για 2 Α/Γ είχαν και οι 2 μέθοδοι ίδια ΤΙΑ στην κατάντι Α/Γ, αλλά για πολλές Α/Γ είχαν διαφορετικό. Επομένως παίζει πολύ ρόλο το εύρος ομόρρου.

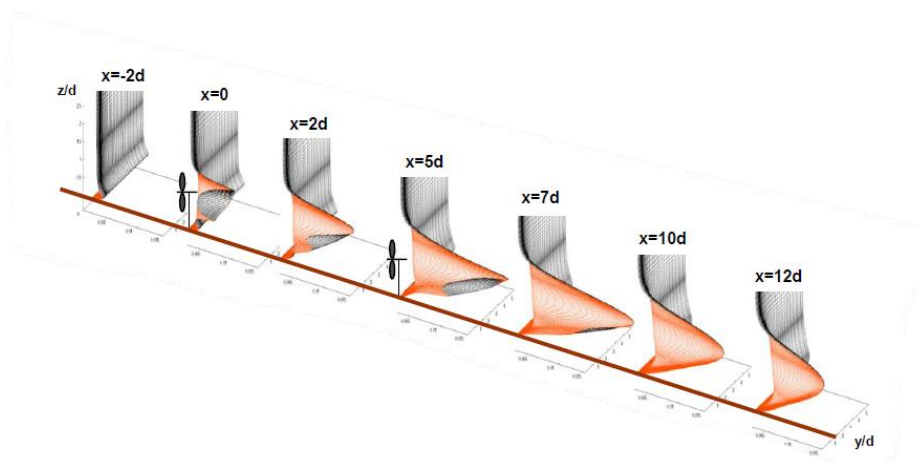
6. Το μοντέλο Floris έχει τον υψηλότερο CF, οδηγώντας σε τιμή LCOE κάτω από το 0.09, κοντά στην τιμή αυτή είναι και το μοντέλο GCL. Το ότι το μοντέλο Floris αποδίδει εξίσου καλά με το GCL, αποδίδεται στο ότι εμφανίζει μόλις 2 Α/Γ να βρίσκονται σε πεδίο ομόρρου, στην κύρια διεύθυνση.
7. Με βάση την ανωτέρω διαφορά μπορεί να υπολογιστεί πόσο επηρεάζει η αύξηση του CF κατά 0.01, το LCOE. Η διαφορά του CF μεταξύ των 2 περιπτώσεων του σχολίου 6 ήταν 0.0013 και οδήγησε σε αύξηση 0.000202€, επομένως η πτώση του CF κατά 0.01 οδηγεί σε αύξηση τιμής του LCOE κατά 0.001554€.
8. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι το μοντέλο Gauss δίνει την χαμηλότερη σταθμισμένη ένταση τύρβης καθώς και ιδιαίτερα μικρή τυπική απόκλιση.

## 3.2 Μοντέλα τύρβης

Στην παρούσα εργασία έχουν χρησιμοποιηθεί δύο μοντέλα τύρβης. Το ένα προκύπτει από το πρότυπο GCL και το άλλο από την θεωρία ομόρρου με βάση την κατανομή Gauss. Επειδή τα υπόλοιπα μοντέλα δεν είχαν μοντέλο για τον υπολογισμό της τύρβης στον ομόρρου, θα χρησιμοποιηθεί σε αυτά το μοντέλο που προκύπτει από το GCL. Η ένταση τύρβης της ροής του αέρα θεωρείται σε όλη την εργασία ως:  $I_a=0.05$ .

### 3.2.1 GCL model

Η ένταση τύρβης της κάθε Α/Γ αποτελεί πυθαγόρεια τριάδα μεταξύ της επαγόμενης τύρβης από άλλη Α/Γ και της τύρβης περιβάλλοντος. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι με αυτούς τους τύπους η ένταση τύρβης υπολογίζεται στον κεντρικό άξονα του ομόρρου, όπου και η τύρβη είναι μεγαλύτερη λόγω φαινομένων διάχυσης που συμβαίνουν.



Εικόνα 7: Κινητική ενέργεια τύρβης ( $\frac{k}{U_{\infty}^2}$ ) συναρτήσει της κατάντι απόστασης

$$I_w(x) = 0.29 \left( \frac{x}{D_0} \right)^{-\frac{1}{3}} \sqrt{1 - \sqrt{1 - C_T}} \quad (46)$$

$$I_{wt}(x) = \sqrt{I_w^2 + I_a^2} \quad (47)$$

### 3.2.2 Gauss model

Για την εύρεση της έντασης τύρβης σε κάθε Α/Γ υπολογίζεται ένα έλλειμα τύρβης που προκύπτει από κάθε Α/Γ. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση τύρβης είναι ο συντελεστής ώσης και η ένταση τύρβης περιβάλλοντος. Για τον υπολογισμό του ελλείματος αξιοποιούνται οι ακόλουθοι τύποι (Takeshi Ishihara 2018).

$$d = 2.3 C_T^{-1.2} \quad (48)$$

$$e = I_a^{0.1} \quad (49)$$

$$f = 0.7 C_T^{-3.2} * I_a^{-0.45} \quad (50)$$

$$k_1 = \begin{cases} \cos^2 \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{r}{D} - 0.5 \right) \right], & \frac{r}{D} \leq 0.5 \\ 1, & \frac{r}{D} > 0.5 \end{cases} \quad (51)$$

$$k_2 = \begin{cases} \cos^2 \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{r}{D} + 0.5 \right) \right], & \frac{r}{D} \leq 0.5 \\ 0, & \frac{r}{D} > 0.5 \end{cases} \quad (52)$$

Έχοντας υπολογίσει αυτές τις παραμέτρους υπολογίζεται άμεσα η αύξηση της τύρβης.

$$\Delta I(x, r) = \frac{1}{d + e * \frac{x}{D} + f \left( 1 + \frac{x}{D} \right)^{-2}} \left\{ k_1 \exp \left( -\frac{\left( r - \frac{D}{2} \right)^2}{2\sigma^2} \right) + k_2 \exp \left( -\frac{\left( r + \frac{D}{2} \right)^2}{2\sigma^2} \right) \right\} \#() \quad (53)$$

$$I_{wt} = I_a + \Delta I(x, r)$$

### 3.2.3 Περιορισμός τύρβης

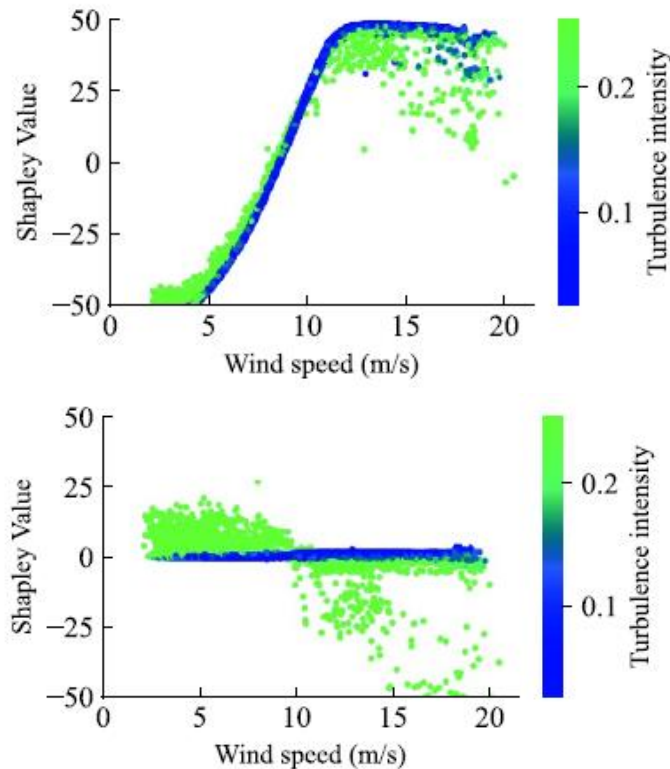
Για να είναι ασφαλές το αιολικό πάρκου και να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής, πρέπει οι Α/Γ να βρίσκονται σε καλή κατάσταση. Κύριος λόγος κόπωσης των Α/Γ είναι η έκθεσή τους σε υψηλά επίπεδα τύρβης. Η τύρβη ισοδυναμεί με γρήγορα εναλλασσόμενη φόρτιση, κάτι το οποίο έχει αποτέλεσμα την υψηλή κόπωση των Α/Γ και τη μείωση της διάρκειας ζωής τους. Για αυτό τον λόγο εισάγεται ένα κριτήριο έντασης τύρβης στην βελτιστοποίηση του πάρκου. Αυτό είναι ότι καμία Α/Γ να μην έχει μέση σταθμισμένη (με βάση την ταχύτητα ανέμου) ένταση τύρβης μεγαλύτερη από ένα όριο. Το όριο αυτό δεν είναι κοινό σε όλη την εργασία και κυμαίνεται από 0.06 μέχρι 0.10, ανάλογα την επιδίωξη της κάθε σύγκρισης.

$$TIA_{WT}^{mean} = \sum_{i=1}^{Ndir} \sum_{j=1}^{Nvel} I_{ij}(\theta_j, U_i) * p_{ij}(\theta_j, U_i) \quad (54)$$

Εκτός από το να μην ξεπερνάει η μέγιστη παρατηρούμενη ένταση τύρβης το επιτρεπτό όριο, είναι επίσης σημαντικό να δέχονται όλες οι Α/Γ παρόμοια φόρτιση. Εξασφαλίζοντας ότι όλες οι Α/Γ έχουν παρόμοια φόρτιση, διασφαλίζεται ότι δεν θα υπάρχει κάποια Α/Γ που θα χρειάζεται να αντικατασταθεί πιο σύντομα

από τις άλλες λόγω αστοχίας σε κόπωση. Για την εφαρμογή του περιορισμού αυτού, ελέγχεται η τυπική απόκλιση των σταθμισμένων εντάσεων τύρβης των Α/Γ να μην ξεπερνάει ένα όριο, πχ 0.005. Αυτό ωστόσο δεν εφαρμόζεται σε όλη την εργασία, αλλά αποτελεί επιμέρους σενάριο μελέτης.

Ένας τελευταίος περιορισμός τύρβης είναι να μην ξεπερνάει η ένταση τύρβης το όριο του 0.07 στην κύρια κατεύθυνση του ανέμου. Ο περιορισμός αυτός διασφαλίζει ότι στην επικρατούσα διεύθυνση, άρα και στην πιο πιθανή, η εμφάνιση υψηλής τύρβης και άρα η φόρτιση της Α/Γ είναι πιο σπάνια. Ωστόσο είναι σημαντικός στην εν λόγω εργασία καθώς στην κύρια διεύθυνση ανέμου επικρατούν και πιο μεγάλες ταχύτητες στις οποίες η αυξημένη ένταση τύρβης δημιουργεί μείωση στην απορροφούμενη ισχύ (Chuanjun, Jianming και Yan 2021).



Διάγραμμα 9: Επίδραση ένταση τύρβης στην καμπύλη ισχύος (Chuanjun, Jianming και Yan 2021)

Στο ανωτέρω διαγράμματα φαίνεται ότι για υψηλές ταχύτητες ανέμου φαίνεται ότι η αύξηση της έντασης τύρβης οδηγεί σε χαμηλότερη εκμετάλλευση της αιολικής ισχύος, ενώ σε χαμηλές ταχύτητες σε υψηλότερη. Αυτό απεικονίζεται μέσω της αύξησης ή μείωσης του συντελεστή Shapley ο οποίος όταν μεγαλώνει συμβάλλει σε αύξηση της απορρόφησης ισχύος.

### 3.3 Συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας (CF) αιολικού πάρκου

Σε ένα αιολικό πάρκο όπως έχει ήδη αναφερθεί, κύριο ρόλο παίζει η χωροθέτηση των Α/Γ. Πρέπει να βρεθούν οι κατάλληλες θέσεις ώστε ο συνολικός συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας του αιολικού πάρκου να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στον συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας την μίας Α/Γ. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει οι Α/Γ να έχουν φαινόμενη ταχύτητα όσο το δυνατόν πιο κοντά στην ταχύτητα ανέμου, όσο πιο συχνά γίνεται.

Για να μπορέσει να υπολογιστεί ο CF του πάρκου, πρέπει να υπολογιστεί ο λόγος της αθροιστικά παραγόμενης ενέργειας κατά την διάρκεια του χρόνου  $AEP_{tot}$ , προς την ετήσια ενέργεια της μίας Α/Γ ( $AEP_{1wt}$ ) πολλαπλασιασμένη με το πλήθος των Α/Γ ( $N_{wt}$ ).



$$CF_{tot} = \frac{AEP_{tot}}{AEP_{1wt} N_{wt}} \quad (55)$$

Για τον υπολογισμό της ολικής ενέργειας του πάρκου, πρέπει να βρεθεί πρώτα η φαινόμενη ταχύτητα της εκάστοτε Α/Γ ( $U_i$ ), για όλες τις ταχύτητες και διευθύνσεις ανέμου.

$$(U_w - U_i(x))^2 = \sum_{j=1}^N (U_w - u_{ij}(x))^2 \quad (56)$$

Στον ανωτέρω τύπο υπάρχουν οι εξής ποσότητες:  $U_w$  = ονομαστική ταχύτητα ανέμου, αμελώντας την παρουσία του αιολικού πάρκου,  $U_i$  = φαινόμενη ταχύτητα εξεταζόμενης μηχανής (μηχανή-θύμα),  $U_j$  = φαινόμενη ταχύτητα μηχανής που επάγει ταχύτητα στην εξεταζόμενη (μηχανή-θύτης),  $u_{ij}$  = επαγόμενο έλλειμα ταχύτητας από μηχανή  $j$  (θύτης) σε μηχανή  $i$  (θύμα).

Έχοντας τον τύπο που υπολογίζει την φαινόμενη ταχύτητα της κάθε Α/Γ μπορεί πλέον να εξαχθεί η ισχύς που παράγει η Α/Γ σε κάθε περίπτωση. Εν τέλει δύναται να υπολογιστεί η συνολική ενέργεια της Α/Γ, αν ληφθεί υπόψιν το ρόδο ανέμου και η συχνότητα πνοής της κάθε ταχύτητας και διεύθυνσης.

$$AEP_{tot} = 8760 \int_0^{2\pi} d\theta_w \int_0^{\infty} dU_w p_u(U_w, \theta_w) \sum_{i=1}^{N_{wt}} P(U_i) \quad (57)$$

Όπου  $\theta_w$ ,  $U_w$  αποτελούν την γωνία και την ταχύτητα ροής του εκάστοτε εξεταζόμενου ανέμου, ο οποίος πνέει με πυκνότητα πιθανότητας  $p_u(U_w, \theta_w)$ ,  $U_i$  είναι η φαινόμενη ταχύτητα της  $i$ -οστής Α/Γ που αντιστοιχεί στην  $U_w$  ταχύτητα ανέμου και τέλος  $P(U_i)$  είναι η παραγόμενη ισχύς για την φαινόμενη ταχύτητα της εξεταζόμενης  $i$ -μηχανής.

Τέλος, μπορεί να υπολογιστεί ο βαθμός απόδοσης του αιολικού πάρκου  $n_i$ , το οποίο μπορεί να συμβεί με δύο τρόπους:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^{N_{wt}} P(U_i)}{N_{wt} P(U_w)} \quad (58)$$

$$n = \frac{CF_{park}}{CF_{1wt}} \quad (59)$$

Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εξετασθεί κατά πόσο αποδοτικά έχουν χωροθετηθεί οι Α/Γ, ώστε να εκμεταλλεύονται καλύτερα το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό και να μην υπάρχουν μεγάλες απώλειες λόγω του ομόρρου (Καρκάνη 2021).

### 3.4 Ανεμογεννήτρια αναφοράς

Για την παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί μια Α/Γ αναφοράς με βάση την οποία θα γίνονται όλες οι προσομοιώσεις. Η Α/Γ είναι κατασκευασμένη από το DTU και έχει ονομαστική ισχύ 10MW. Τα κατασκευαστικά στοιχεία της Α/Γ αυτής είναι τα ακόλουθα:

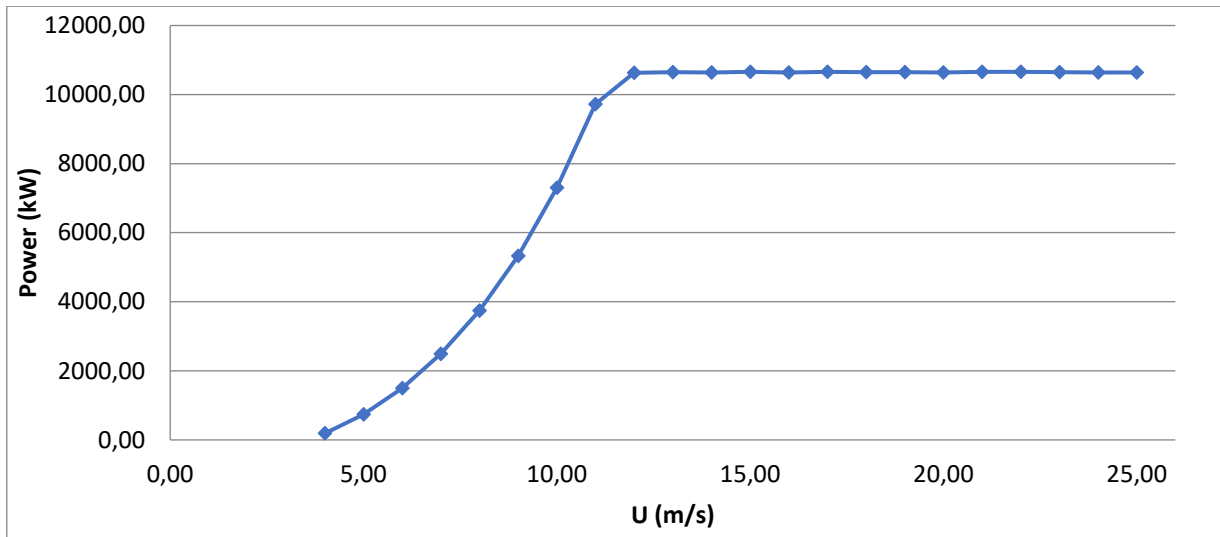
Ονομαστική Ισχύς	10 MW
Τύπος πτερυγίου	Innwind EU 10 MW RWT Blade
Μετάδοση κίνησης	Medium Speed (40:1) Innwind EU RWT Scaled
Πύργος	RWT 10 MW Standard-Scaled
Θεμελίωση	Reference Floater for the 10 MW RWT Scaled
Διάμετρος δρομέα	178 m
Ύψος πλήμνης (HH hub height)	118 m



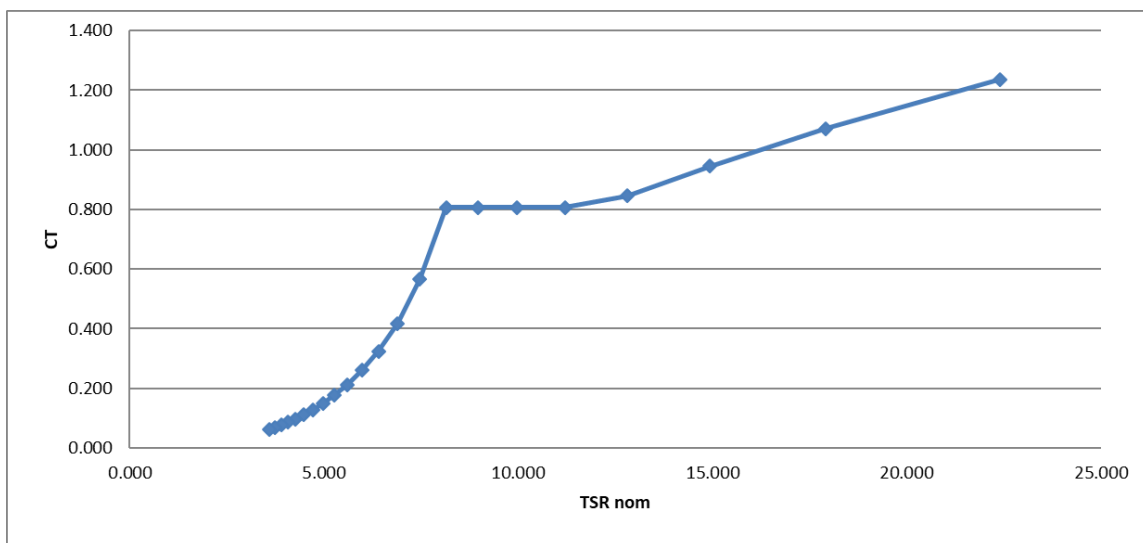
Ονομαστική ταχύτητα	11,4 m/s
Μέγιστη ταχύτητα ακροπτερυγίου	90 m/s
Εμβαδόν πτερωτής (RA rotor area)	24.969 m <sup>2</sup>
Ειδική ισχύς (SP specific power)	427 W/m <sup>2</sup>
Τιμή	1927 k€/MW

Πίνακας 3: Κατασκευαστικά στοιχεία πρότυπης Α/Γ

Οι καμπύλες λειτουργίας της Α/Γ παρουσιάζονται ακολούθως.



Διάγραμμα 10: Καμπύλη ισχύος Α/Γ

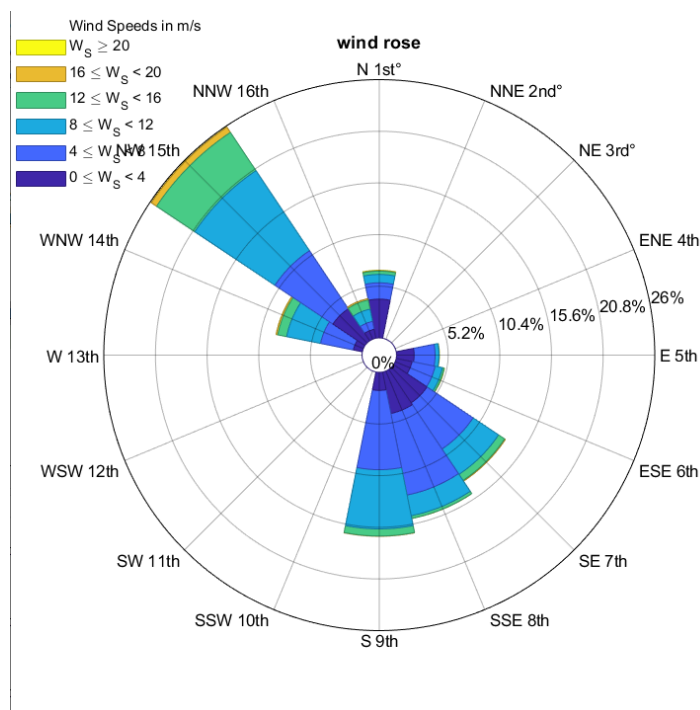


Διάγραμμα 11: Καμπύλη συντελεστή ώσης

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι επειδή σε κάποια μοντέλα ομόρρου υπήρχε ο όρος  $\sqrt{1 - C_T}$ , αποφασίστηκε ότι για λόγους  $TSR > 16$ , η τιμή να ληφθεί ίση με 0.99, προς αποφυγή ύπαρξης μιγαδικών αποτελεσμάτων.

### 3.5 Ανεμολογικά δεδομένα

Η κύρια παράμετρος του προβλήματος της βέλτιστης χωροθέτησης είναι το ρόδο ανέμου. Για την ευκολότερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε το ακόλουθο ρόδο ανέμου, το οποίο έχει ουσιαστικά κύριες διευθύνσεις πάνω στον ίδιο άξονα. Επίσης επιλέχθηκε τοποθεσία η οποία έχει μέση τιμή ανέμου  $\bar{u} = 6,989 \frac{m}{s}$  και τυπική απόκλιση  $\sigma = 3,667 \frac{m}{s}$ . Τέλος η ένταση τύρβης του ανέμου περιβάλλοντος επιλέγεται ως TIA=0.05.



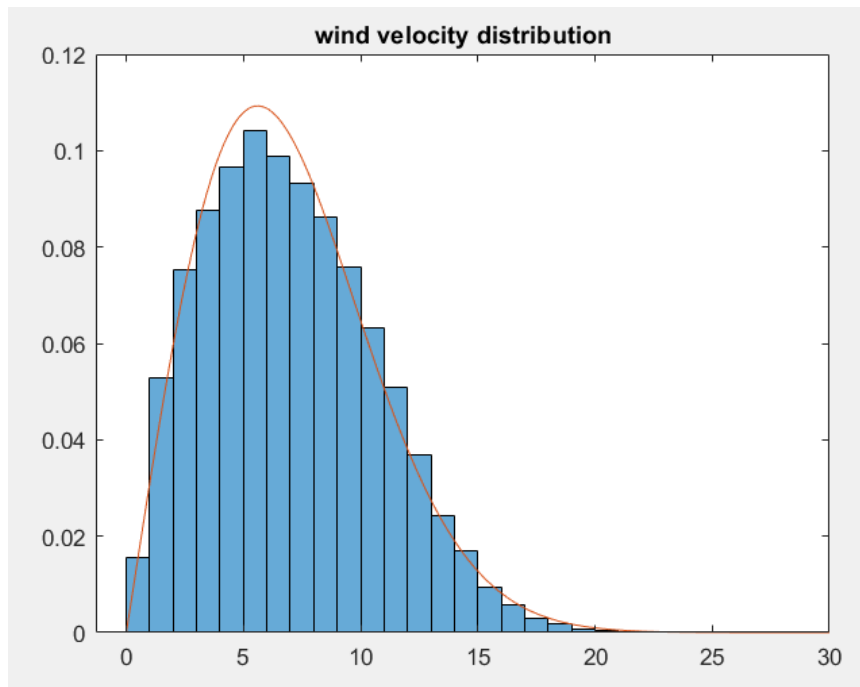
Διάγραμμα 12: Ρόδο Ανέμου (Pereira 2020)

Στη συνέχεια φαίνεται το ιστόγραμμα της ταχύτητας του ανέμου καθώς και η προσαρμογή της καμπύλης Weibull στα ανεμολογικά δεδομένα. Οι παράμετροι της Weibull προσδιορίζονται με βάση τους εμπειρικούς τύπους του Bowden.

$$k = \left(\frac{\sigma}{U_{mean}}\right)^{-1,086} = 2.014, \quad \text{παράμετρος κλίσης} \quad (60\alpha)$$

$$c = \frac{2U_{mean}}{\sqrt{\pi}} = 7.886, \quad \text{παράμετρος κλίμακας} \quad (60\beta)$$

$$f(u) = \left(\frac{k}{c}\right) * \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} * \exp\left(-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right) \quad (61)$$



Διάγραμμα 13: Ιστόγραμμα ταχύτητας και κατανομή Weibull

Με βάση αυτά τα ανεμολογικά δεδομένα προκύπτουν τα εξής στοιχεία για την παραγωγή ενέργειας από την Α/Γ:

$$LCOE=0.0883496\text{€}$$

$$AEP=3.14912 \text{ E}+7 \text{ kWh/year}$$

$$CF=0.359489$$

## 3.6 Κόστος καλωδίων και Α/Γ

### 3.6.1 Κόστος Α/Γ

Το κύριο κόστος ενός πλωτού αιολικού πάρκου προκύπτει από το κόστος αγοράς και εγκατάστασης των Α/Γ. Για την εύρεση του κόστους των Α/Γ έχει αναπτυχθεί από τον τομέα ρευστών της σχολής ένα υπολογιστικό φύλλο excel το οποίο δίνει το κόστος για Α/Γ ξηράς από 1 ως 5 MW. Με βάση αυτό το εργαλείο, το κόστος αγοράς της Α/Γ και του λοιπού εξοπλισμού είναι  $1234 \text{ k€}/MW$  ενώ το συνολικό κόστος υπολογίζεται ως  $1714 \text{ k€}/MW$ .

Με βάση την εργασία του (Χαλκιαδάκης 2018) η οποία έχει ως case study την ίδια Α/Γ με την παρούσα εργασία, προτείνεται η τιμή των  $1234 \text{ k€}/MW$  για αγορά της Α/Γ και του εξοπλισμού των θεμελίων με βάση τιμές 2005, ενώ με αναπροσαρμογή στις τιμές του 2018, αυτή προκύπτει ως  $1501 \text{ k€}/MW$ . Στην εργασία αυτή, τα λοιπά κόστη του πλωτού αιολικού πάρκου, θεωρούνται εξαρτώμενα της εγκατεστημένης ισχύος των αιολικών ως  $BoP = 2110 \text{ k€}/MW$ , επομένως το αθροιστικό κόστος αγοράς του συνόλου του εξοπλισμού και της εγκατάστασης του ανέρχεται στα  $3611 \text{ k€}/MW$ .

Ωστόσο επειδή η Α/Γ είναι πλωτή, θα βρεθεί το ενδεδειγμένο κόστος της Α/Γ από την βιβλιογραφία και συγκεκριμένα από την μελέτη κόστους πλωτών αιολικών πάρκων του (Nielsen 2022)

### 3.6.1.1 Συμβολισμοί

- MWt – Ονομαστική ισχύς της Α/Γ (MW)
- MWf – Ονομαστική ισχύς του πάρκου (MW)
- RD – Διάμετρος της Α/Γ (m)
- RA – Εμβαδόν της Α/Γ (m<sup>2</sup>)
- HH – Ύψος πλήμνης (m)
- SP – Ειδική ισχύς (W/m<sup>2</sup>)
- IA – Μήκος καλωδίων διασύνδεσης των Α/Γ(m)
- No – Αριθμός Α/Γ
- WD – Βάθος θάλασσας στο σημείο του πάρκου
- DS – Απόσταση από την ακτή

### 3.6.1.2 Αγορά της Α/Γ

$$AΓ_{αγορά} = \left( A * SP + B + \frac{C * HH * RA + D}{1000MW_t} \right) E = 754 \frac{k€}{MW} \quad (62)$$

$$A = -0,5 \left[ \frac{\frac{k€}{MW}}{\frac{W}{m^2}} \right], \quad B = 750 \frac{k€}{MW}, \quad C = 0,53 \frac{€}{m^3}, \quad D = 5500 €, \quad E = 1,1$$

### 3.6.1.3 Εγκατάσταση της Α/Γ

$$AΓ_{εγκατάσταση} = B * MW_t^C = 73 \frac{k€}{MW} \quad (63)$$

$$B = 750 \frac{k€}{MW^2}, \quad C = -0,6$$

### 3.6.1.4 Εξοπλισμός για την εγκατάσταση

$$Εξοπλισμός = (A * SP + B) [1 + (C * (350 - \min(D; SP)))] = 706 \frac{k€}{MW} \quad (64)$$

$$A = 8 \left[ \frac{\frac{k€}{MW}}{m} \right], \quad B = 30 \frac{k€}{MW}, \quad C = 0,003 \frac{m^2}{W}, \quad D = 400 \frac{W}{m^2}$$

### 3.6.1.5 Εγκατάσταση θεμελίων/βάσης

$$Θεμελίωση = A * WD + B * MW_t^C = 395 \frac{k€}{MW} \quad (65)$$

$$A = 600 \left[ \frac{\frac{k€}{MW}}{m} \right], \quad B = 30 \frac{k€}{MW^2}, \quad C = -0,06, \quad WD = 100m \text{ (θεώρηση)}$$

### 3.6.1.6 Συνολικό κόστος

Αθροίζοντας όλες τις παραπάνω τιμές προκύπτει το συνολικό κόστος αγοράς της Α/Γ και των θεμελίων της ως 1459 k€/MW, ενώ η εγκατάσταση της Α/Γ και των θεμελίων της κοστίζουν 468 k€/MW. Συνολικά η αγορά και η εγκατάσταση της Α/Γ και των θεμελίων είναι 1927 k€/MW. Η τιμή αυτή θα είναι εφεξής η τιμή που θα χρησιμοποιηθεί σε υπολογισμούς.

### 3.6.2 Κόστος καλωδίων διασύνδεσης

Μία από τις δύο κύριες παραμέτρους στην παρούσα εργασία είναι το κόστος καλωδίωσης και συγκεκριμένα το κόστος της καλωδίωσης που συνδέει τις Α/Γ. Για το κόστος αυτό υπάρχουν πίνακες, εμπειρικές τιμές ή και εμπειρικές σχέσεις οι οποίες λαμβάνουν υπ' όψιν την τάση και την ένταση του ρεύματος που διαπερνάει τα καλώδια. Ο (Χαλκιαδάκης 2018) ορίζει το κόστος ως 281κ€/km, ανεξάρτητο των προηγούμενων παραμέτρων. Σε μια οικονομοτεχνική μελέτη για εγκατάσταση πλωτών Α/Γ ο (Nielsen, Wind Turbines, Offshore - Annex 2022) αναφέρει ότι το κόστος ανέρχεται στα 500 κ€/km. Σε παλιότερη μελέτη του ιδίου (Nielsen 2001) αναφέρεται ότι τυπικά καλώδια είναι αυτά των 30-33 kV, διαμέτρου 150 mm<sup>2</sup>, τα οποία κοστίζουν 85κ€/km και το κόστος τοποθέτησης της τους είναι στο εύρος 15κ€/km-70κ€/km ανάλογα το είδος του βυθού. Τέλος στην εργασία του (Wade 2019) αναφέρεται κόστος 600 κ€/km

Σε μία άλλη εργασία από τον (Dhal 2008) όπου μελετάται πάρκο 100 MW, αντίστοιχο δηλαδή με το πάρκο που θα εξετασθεί στα case studies στη συνέχεια, προτείνεται εμπειρικός τύπος για το κόστος των καλωδίων, ο οποίος δίνεται ως:

$$Cost_{cable\ array} = A_p + B_p * \exp\left(\frac{C_p S_n}{10^8}\right)^2 \quad (66)$$

Όπου  $A_p$ ,  $B_p$ ,  $C_p$  είναι σταθερές κόστους που εξαρτώνται από την τάση των καλωδίων και  $S_n$  είναι η ονομαστική ισχύς των καλωδίων σε MVA και υπολογίζεται ως:

$$S_n = \sqrt{3}V_{rated}I_{rated} \quad (67)$$

Στο κόστος αυτό προστίθενται και 152 κ€/km για την μεταφορά και εγκατάσταση των καλωδίων στο πλωτό αιολικό πάρκο. Στην έκθεση αυτή προέκυψε ότι για 16km ξοδεύτηκαν 2.4 Μ€ για την αγορά, το οποίο αντιστοιχεί σε 150 κ€/km. Επομένως συνολικά κόστη αγοράς και εγκατάστασης είναι περίπου 300 κ€/km.

COST PARAMETERS FOR AC CABLES, FOR DIFFERENT VOLTAGES.

Rated voltage [kV]	$A_p [10^6]$	$B_p [10^5]$	$C_p [10^6]$
22	0.04828	0.09911	1.0455
33	0.06987	0.10132	0.697
45	0.08772	0.10404	0.51
66	0.11696	0.10625	0.3485
132	0.33507	0.03553	0.2822
220	0.54077	0.0187	0.1972

Πίνακας 4: Κόστη για καλώδια εναλλασσόμενης τάσης (Dhal 2008)

Στην παρούσα εργασία θα ληφθεί ως τιμή για το κόστος καλωδίωσης τα 400 κ€/km, στην οποία συμπεριλαμβάνονται κόστη αγοράς, μεταφοράς και τοποθέτησης των καλωδίων. Ως καλώδια θεωρούνται αυτά ονομαστικής τάσης 33kV, μιας και είναι τα πιο συνήθη με βάση τον (Nielsen 2001).

### 3.6.3 Κόστος γραμμής μεταφοράς

Τέλος υπάρχει και το κόστος για την διασύνδεση του θαλάσσιου υποσταθμού με τον υποσταθμό που βρίσκεται στην στεριά. Η καλωδίωση αυτή λέγεται και γραμμή μεταφοράς.

Για την τιμή των καλωδίων υπάρχουν πίνακες με βάση το είδος και την τάση του καλωδίου όπως ο ακόλουθος ο οποίος παρέχεται από τον (Xiang, Merlin και Green)

#### A.2 Cable Parameters <sup>[26]</sup>

**Appendix Table I** Electrical parameters of some common cables in HVAC

Voltage $V_n$ (kV)	Size (mm <sup>2</sup> )	Resistance $r_c$ (mΩ/km)	Capacitance $C$ (nF/km)	Steady state current $I_{loss}$ (A)	Cable cost per set $t_c$ (k€/km)
132	630	39.5	209	818	685
	800	32.4	217	888	795
	1000	27.5	238	949	860
220	500	48.9	136	732	815
	630	39.1	151	808	850
	800	31.9	163	879	975
400	1000	27.0	177	942	1000
	800	31.4	130	870	1400
	1000	26.5	140	932	1550
	1200	22.1	170	986	1700
	1400	18.9	180	1015	1850
	1600	16.6	190	1036	2000
	2000	13.2	200	1078	2150

**Appendix Table II** Electrical parameters of some common VSC-HVDC cables

Voltage $V_n$ (kV)	Size (mm <sup>2</sup> )	Resistance $r_c$ (mΩ/km)	Steady state current $I_{loss}$ (A)	Cables cost per set $t_c$ (k€/km)
± 150	1000	22.4	1644	670
	1200	19.2	1791	730
	1400	16.5	1962	785
	1600	14.4	2123	840
	2000	11.5	2407	900
± 300	1000	22.4	1644	855
	1200	19.2	1791	940
	1400	16.5	1962	1015
	1600	14.4	2123	1090
	2000	11.5	2407	1175

**Appendix Table III** Electrical parameters of some common cables in LFAC

Voltage $V_n$ (kV)	Size (mm <sup>2</sup> )	Resistance $r_c$ (mΩ/km)	Capacitance $C$ (nF/km)	Steady state current $I_{loss}$ (A)	Cable cost per set $t_c$ (k€/km)
132	630	26.2	209	995	685
	800	21.5	217	1080	795
	1000	18.2	238	1154	860
220	500	32.4	136	890	815
	630	25.9	151	982	850
	800	21.1	163	1069	975
400	1000	17.9	177	1145	1000
	800	20.8	130	1058	1400
	1000	17.5	140	1133	1550
	1200	14.6	170	1199	1700
	1400	12.5	180	1234	1850
	1600	11.0	190	1260	2000
	2000	8.7	200	1310	2150

Πίνακας 5: Κόστη καλωδίων ανάλογα την τάση του καλωδίου και το είδος του (Xiang, Merlin and Green n.d.)

Στην εργασία του (Χαλκιαδάκης 2018) αναφέρεται ότι το κόστος της γραμμής μεταφοράς ανέρχεται στα 443 k€/km. Ενώ ο (Nielsen, Wind Turbines, Offshore - Annex 2022) δίνει έναν τύπο ο οποίος εξαρτάται από την απόσταση αλλά και από την συνολικά μεταφερόμενη ισχύ.

$$Cost_{transmission\ line} = 2.8 \left[ \frac{k\text{€}}{km} \right] * D_s * P_t \quad (68)$$

$D_s$ = απόσταση μεταξύ θαλάσσιου και σταθμού ξηράς σε km

$P_t$ = συνολικά μεταφερόμενη ισχύς σε MW

Η απόσταση από τον θαλάσσιο υποσταθμό μέχρι τον σταθμό ξηράς διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Τυπικές αποστάσεις για πλωτά αιολικά πάρκα είναι:

Περιοχή	50-200 m βάθος	200-1000 m βάθος
Κόλπος Λέοντα	50,57	65,92
Μενόρκα	17,17	25,84
Αλγερία	16,28	20,31
Σικελία Σαρδηνία Τυνησία	38	69,16

Πίνακας 6 Τυπικές αποστάσεις αιολικών πάρκων από την ακτή σε km, με βάση το βάθος στο οποίο βρίσκεται το πάρκο (Χαλκιαδάκης 2018)

### 3.7 Υπολογισμός LCOE

Το πιο σημαντικό στοιχείο για ένα αιολικό πάρκο είναι αυτό του σταθμισμένου κόστους ενέργειας, LCOE. Η τιμή αυτή δείχνει ουσιαστικά πόσο κοστίζει η παραγωγή μιας kWh. Στην τιμή αυτή συμπεριλαμβάνονται τόσο τα αρχικά κόστη επένδυσης όσο και το κόστος λειτουργίας του πάρκου, ο χρόνος ζωής της επένδυσης, το κόστος δανεισμού, καθώς και το πόσες kWh αναμένεται να παραχθούν σε ένα έτος.

$$LCOE = \frac{CAPEX * R + OPEX}{AEP_{total}} \quad (69)$$

- CAPEX: Στην παρούσα εργασία έχει υπολογιστεί ως αρχικό κεφάλαιο μόνο το άθροισμα του κόστους καλωδίωσης και του κόστους αγοράς και εγκατάστασης των Α/Γ. Συνήθως στο CAPEX συμπεριλαμβάνονται και άλλα κόστη όπως κόστος θαλάσσιου ή παράκτιου υποσταθμού ο οποίος είναι υπεύθυνος για την μετατροπή AC/DC, το κόστος καλωδίου από τον θαλάσσιο υποσταθμό, μέχρι την ακτή, το οποίο έχει μήκος μερικές δεκάδες km κ.ά. Αυτά τα κόστη περιλαμβάνονται στον όρο BoP (Balance of plants), ο οποίος είναι περίπου 1.5-2.5 φορές μεγαλύτερος από το κόστος αγοράς και εγκατάστασης της Α/Γ.
- R: Αποτελεί τον συντελεστή αναγωγής του αρχικού κεφαλαίου στο βάθος του χρόνου ζωής της εγκατάστασης.  $R = \frac{i_r}{1 - (i_r + 1)^{-N}} = 0.0872$ , όπου  $i_r = 6\%$  (επιτόκιο δανεισμού) και  $N = 20$  τα χρόνια για την διάρκεια ζωής του πάρκου.
- OPEX: Αποτελεί το κόστος λειτουργίας, συντήρησης και εγκατάστασης ενός αιολικού πάρκου. Στην περίπτωση των θαλάσσιων αιολικών πάρκων, το κόστος αυτό είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τα χερσαία όπου συνήθως ανέρχεται στο 3% του CAPEX. Αυτό συμβαίνει καθώς χρειάζεται να ναυλωθούν σκάφη για τις απαραίτητες εργασίες συντήρησης. Στην παρούσα εργασία, θεωρήθηκε με βάση τον (Χαλκιαδάκης 2018) ότι το OPEX εκφράζεται ως συνάρτηση της παραγόμενης ενέργειας και ισούται με:

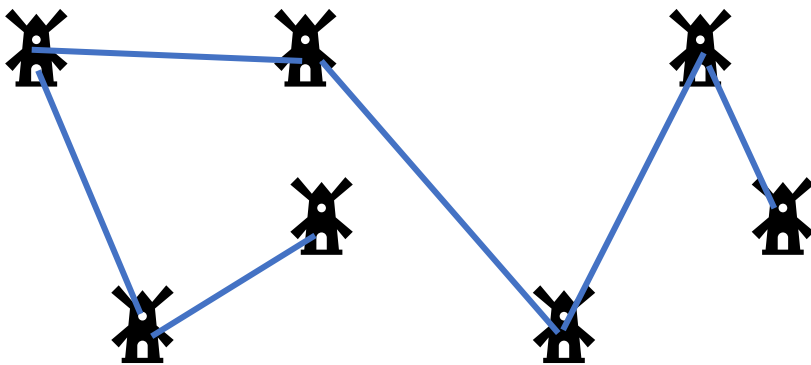
$$OPEX = 0.035 \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) * AEP_{total} (\text{kWh}) \quad (70)$$

## 3.8 Ελάχιστο ζευγνύον δέντρο – Minimum spanning tree (MST)

Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για την σύνδεση των Α/Γ με το ελάχιστο δυνατό μήκος καλωδίου είναι το MST. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιείται επίσης διαδοχικά για την δημιουργία τηλεπικοινωνιακών και οδικών δικτύων.

### 3.8.1 Ζευγνύον δέντρο

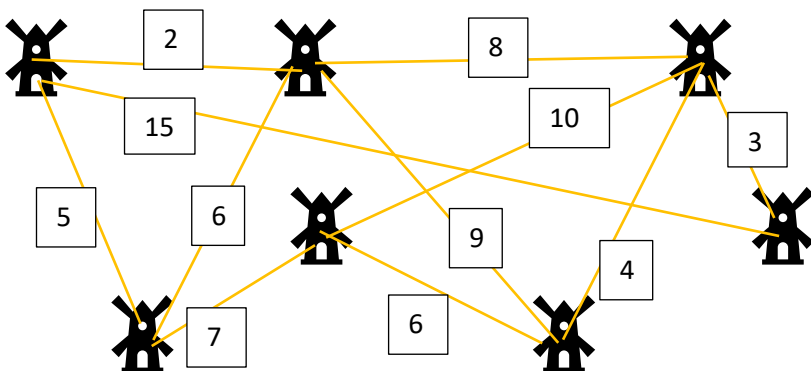
Έστω ένας συνεκτικός γράφος  $G=(P(\text{peak}),A(\text{acne}))$ . Σκοπός του ζευγνύοντος δέντρου είναι η σύνδεση όλων των κορυφών μεταξύ τους χωρίς την δημιουργία κάποιου κλειστού βρόχου. Άμεση συνέπεια της μη ύπαρξης κλειστού βρόχου είναι πως για  $N$  κορυφές, θα υπάρχουν  $N-1$  ακμές στο δέντρο. Το αποτέλεσμα που προκύπτει ονομάζεται ζευγνύον δέντρο.



Εικόνα 8: Ζευγνύον δέντρο

### 3.8.2 Ελάχιστο ζευγνύον δέντρο

Συνήθως οι ακμές που συνδέουν τις κορυφές σε ένα δέντρο έχουν κάποια 'βάρη', αυτά τα βάρη μπορεί να είναι χιλιομετρικές αποστάσεις, κόστη για την μεταφορά μεταξύ των δύο κόμβων κλπ. Στην περίπτωση αυτή κρίνεται σκόπιμο η εύρεση της σύνδεσης που θα ελαχιστοποιεί το άθροισμα αυτών των βαρών. Το δέντρο που δημιουργείται έχοντας το ελάχιστο αυτό άθροισμα ονομάζεται ελάχιστο ζευγνύον δέντρο.



Εικόνα 9: Γράφος με κόστη

Η παραπάνω εικόνα δείχνει έναν γράφο, ο οποίος έχει και τα κόστη των διαδρομών μεταξύ των Α/Γ. Για την εύρεση της πιο οικονομικής σύνδεσης έχουν δημιουργηθεί δύο αλγόριθμοι, οι οποίοι θα παρουσιαστούν στην πορεία.



### 3.8.3 Kruskal algorithm

Χαρακτηριστικό του αλγόριθμου αυτού είναι ότι δίνεται έμφαση στην ταξινόμηση των ακμών με αύξουσα σειρά κόστους και η εν συνεχεία επιλογή των ακμών που θα συμπεριληφθούν στο MST. Τα βήματα έχουν την εξής αλληλουχία:

1. Διάταξη όλων των ακμών σε αύξουσα σειρά ως προς το βάρος τους.
2. Επιλογή της ακμής με μικρότερο βάρος, αν υπάρχουν παραπάνω από μια ακμές με ίδιο βάρος, η επιλογή γίνεται τυχαία.
3. Από τις υπολειπόμενες ακμές επιλέγεται αυτή η οποία έχει το μικρότερο βάρος και συνάμα δεν δημιουργεί κλειστή διαδρομή.
4. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 2 και 3 μέχρι να συνδεθούν όλες οι κορυφές.

### 3.8.4 Prim algorithm

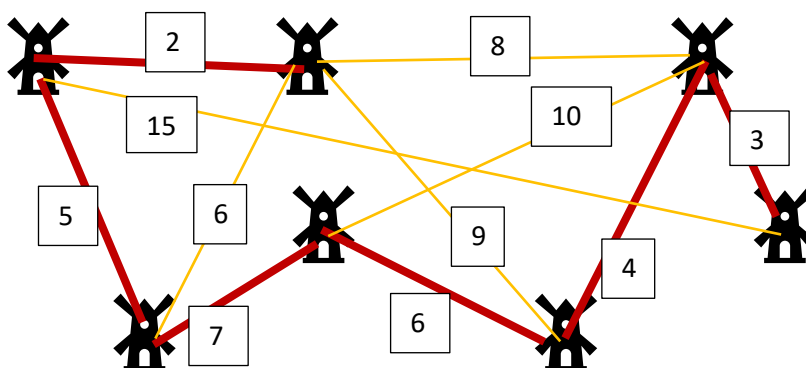
Αυτός ο αλγόριθμος επικεντρώνεται κάθε φορά στην εύρεση της φθηνότερης ακμής που θα συνδέσει κάποιον από τους ήδη συνδεδεμένους κόμβους με τους επόμενους. Επίσης δίνει την δυνατότητα επιλογής του εναρκτήριου κόμβου. Τα βήματα είναι τα εξής:

1. Επιλογή του κόμβου εκκίνησης (τυχαία ή με βάση κάποια προτίμηση).
2. Εύρεση των ακμών που συνδέουν τους ήδη συνδεδεμένους κόμβους με μη συνδεδεμένους και επιλογή της φθηνότερης ακμής.
3. Επανάληψη του προηγούμενου βήματος μέχρι να έχουν συνδεθεί όλες οι κορυφές.

### 3.8.5 Σύγκριση

<b>Kruskal</b>	<b>Prim</b>
Διατηρεί δάσος, όχι συνεκτική συνιστώσα	Διατηρεί συνεκτική συνιστώσα
Εκκίνηση με ακμή	Εκκίνηση με κορυφή
Επιλέγει ακμές	Επιλέγει σύνδεση μεταξύ συνδεδεμένων και μη συνδεδεμένων κορυφών
Εξετάζει κάθε ακμή μία φορά	Ίσως εξετάσει κάποια ακμή πάνω από μία φορές
Λειτουργεί και σε μη συνεκτικά γραφήματα	Το γράφημα οφείλει να είναι συνεκτικό
Προτιμάται για αραιά γραφήματα	Προτιμάται για πυκνά γραφήματα
$O(n^2 \log n)$ για πυκνά γραφήματα	$O(n^2)$
$O(n \log n)$ για αραιά γραφήματα	

Πίνακας 7: Σύγκριση Kruskal και Prim

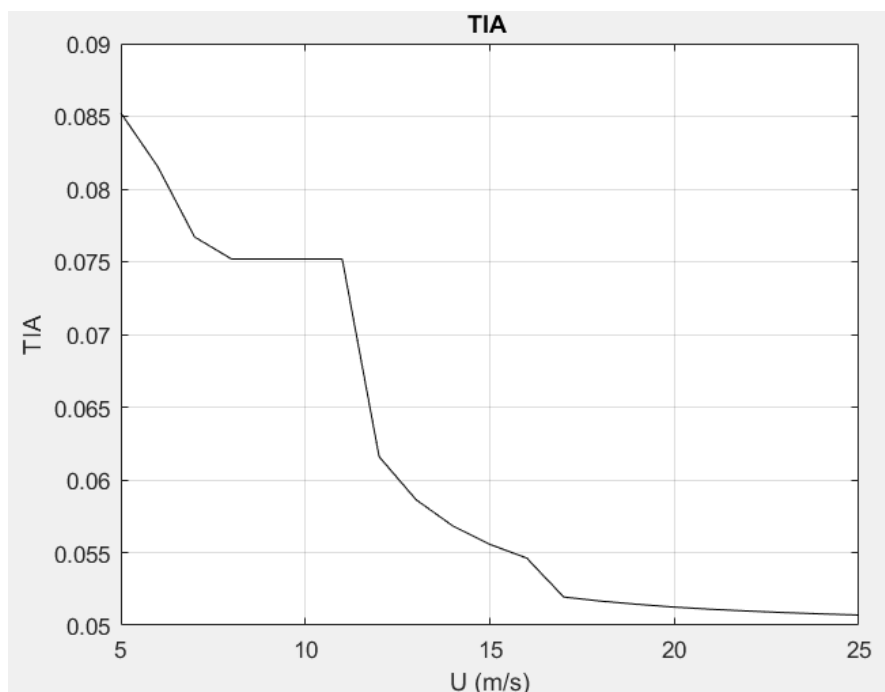


Εικόνα 10: Ελάχιστο ζευγνύον δέντρο

# 4 Αποτελέσματα–Συζήτηση

Στις παρακάτω παραγράφους θα δίνονται δύο τύποι διαγραμμάτων για κάθε περίπτωση καθώς και ένας συγκεντρωτικός πίνακας που θα περιέχει το CF, CAPEX, LCOE, AEP, μέση σταθμισμένη TIA όλων των Α/Γ και μήκος καλωδίωσης. Το αριστερό διάγραμμα θα απεικονίζει την δεδομένη χωροταξία, ενώ το δεξί θα δείχνει την ένταση τύρβης σε κάθε Α/Γ σε ταχύτητα ανέμου 5m/s. Η ταχύτητα αυτή επιλέγεται καθότι σε αυτή εμφανίζεται πάντα η μέγιστη ένταση τύρβης. Αυτό συμβαίνει καθώς η ένταση τύρβης μειώνεται για αύξουσα ταχύτητα, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι η κινητική ενέργεια των μορίων του αέρα είναι μικρή στις μικρές ταχύτητες και επομένως είναι δύσκολο να αποκατασταθεί η ροή.

Τέλος είναι σημαντικό να τονισθεί, πως στα ακόλουθα χωρία, η μέθοδος για τον υπολογισμό της τύρβης ομόρρου που εφαρμόζεται είναι αυτή του GCL, εκτός του μοντέλου Gauss που έχει δικό του μοντέλο τύρβης. Επίσης ως βελτιστοποιητής χρησιμοποιείται ο Mixed Variable GA εκτός αν αναφερθεί διαφορετικά.



Διάγραμμα 14: TIA συναρτήσει της ταχύτητας

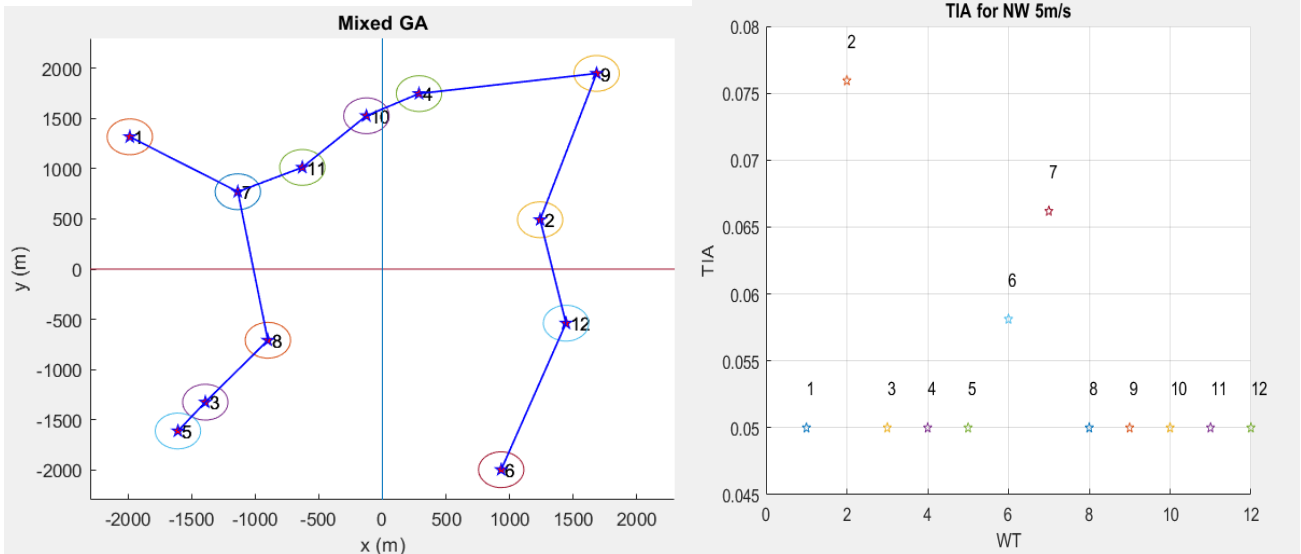
Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται ξεκάθαρα ότι η TIA είναι φθίνουσα συνάρτηση της ταχύτητας. Ξεκινάει με υψηλή τιμή και αυτή προοδευτικά μειώνεται. Αξιοσημείωτο είναι ότι υπάρχει ένα διάστημα όπου η TIA μένει σταθερή καθώς και ότι στις μεγάλες ταχύτητες (17<), η μείωση είναι πάρα πολύ μικρή, μέχρις ότου αποκαθίσταται στην ένταση τύρβης του περιβάλλοντος.

Στα διαγράμματα που θα ακολουθήσουν οι Α/Γ συμβολίζονται με αστεράκια και ο κύκλος που τις περιβάλλει έχει ακτίνα όσο η διάμετρος της Α/Γ. Επιλέγεται αυτή η σχέση για να είναι εμφανές ότι η ελάχιστη απόσταση που μπορούν να έχουν οι Α/Γ είναι ίση με δύο διαμέτρους, κάτι το οποίο συμβαίνει όταν εφάπτονται οι κύκλοι.

## 4.1 Διαφορετικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

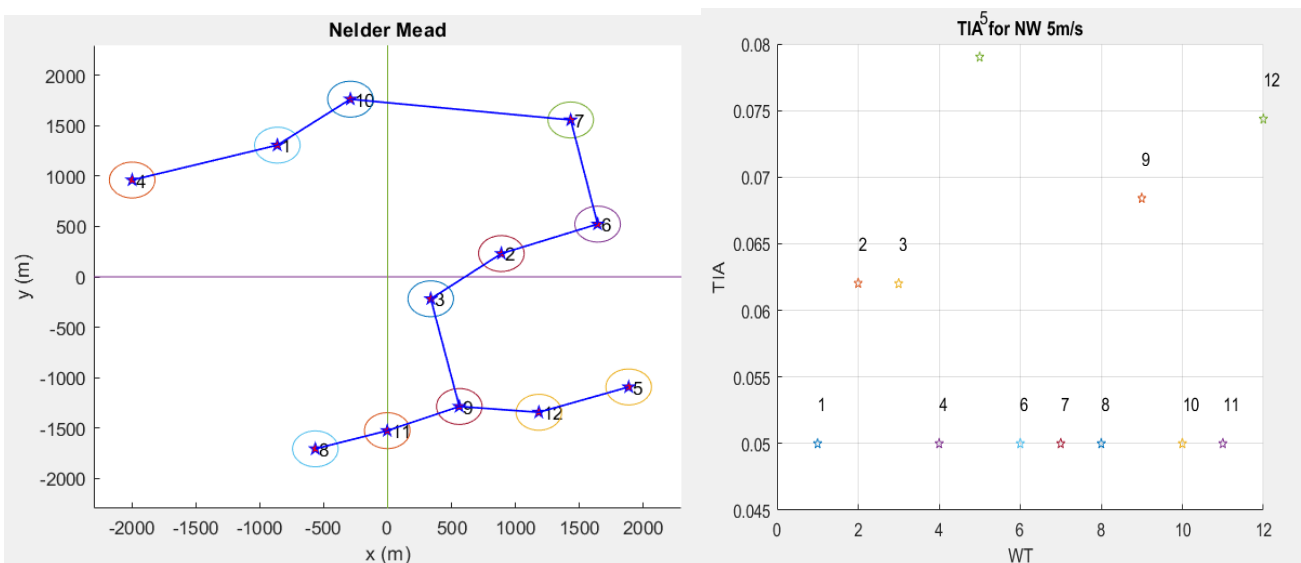
Ως μοντέλο ομόρρου χρησιμοποιήθηκε το GCL old και για την τύρβη μπήκε ο περιορισμός η μέγιστη σταθμισμένη ένταση τύρβης κάποιας Α/Γ να μην ξεπερνάει το 0.07.

### 4.1.1 Mixed GA



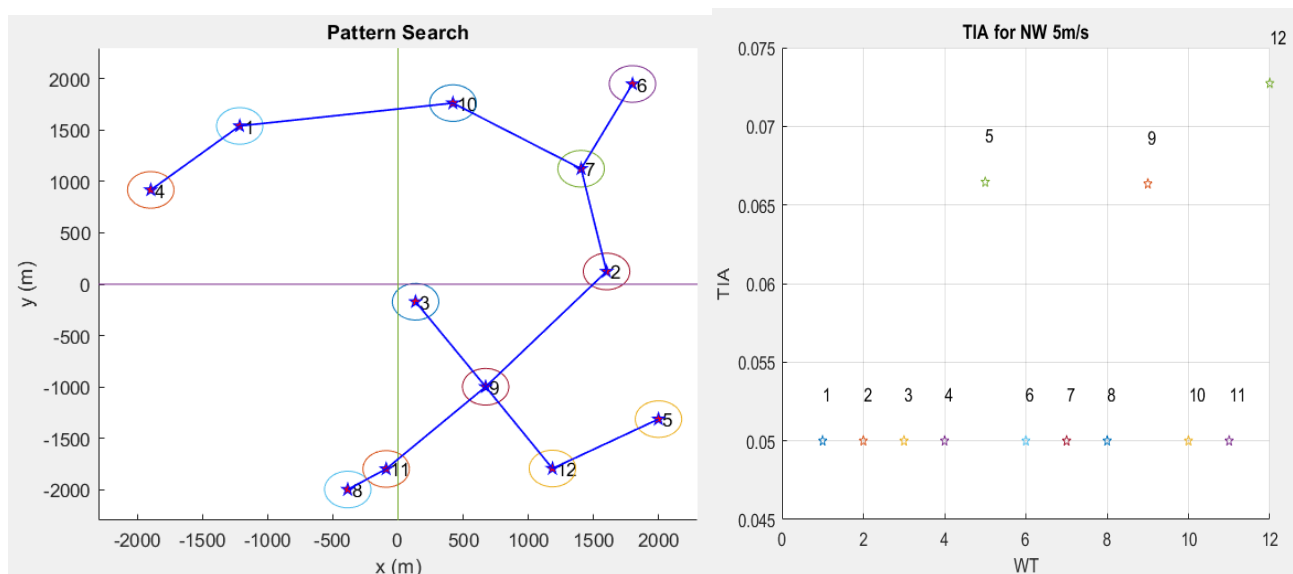
Διάγραμμα 15: 12 Α/Γ Mixed GA

### 4.1.2 Nelder Mead



Διάγραμμα 16: 12 Α/Γ με Nelder Mead

### 4.1.3 Pattern Search



Διάγραμμα 17: 12 Α/Γ με Pattern Search

	Mixed GA	Nelder Mead	Pattern Search
CF	0.3589	0.3576	0.3575
AEP (kWh)	3.7722 E+8	3.7586 E+8	3.7579 E+8
Cable length (km)	10.945	9.902	11.486
Capex	2.3562 E+8	2.3520 E+8	2.3583 E+8
LCOE €	0.089456	0.089557	0.089715
Max mean TIA	0.06405	0.06086	0.06017
Χρόνος (hours:minutes)	11:56	3:01	4:15

Πίνακας 8: Συγκριτική παρουσίαση των αλγορίθμων επίλυσης

Είναι εμφανές ότι και οι 3 μέθοδοι έχουν σχεδόν ίδια αποτελέσματα όσον αφορά το LCOE και τον CF, τους κύριους δηλαδή παράγοντες που καθορίζουν την απόδοση του αιολικού πάρκου. Υπάρχει μικρή απόκλιση +/-1km στο συνολικό μήκος της καλωδίωσης, ωστόσο λόγω του μικρού κόστους που έχει αυτή συγκριτικά με το κόστος των Α/Γ και του κόστους λειτουργίας του αιολικού πάρκου, η συνεισφορά αυτή στο CAPEX και εν τέλει στο LCOE είναι ανεπαίσθητη. Ειδικότερα, συγκρίνοντας την Mixed GA με την Nelder Mead φαίνεται πως αν και η πρώτη έχει μεγαλύτερο μήκος καλωδίων, το ότι έχει μεγαλύτερη ετήσια παραγωγή ενέργειας οδηγεί σε μικρότερο LCOE. Όσον αφορά την τοπολογία που δημιουργήθηκε με την Pattern Search, υπολείπεται τόσο ως προς τον CF όσο και ως προς το αυξημένο μήκος καλωδίων, τα οποία εξηγούν και την ακριβότερη τιμή του LCOE. Τέλος, όσον αφορά την ένταση τύρβης, σε όλες τις περιπτώσεις φαίνεται ότι η μέγιστη σταθμισμένη ένταση τύρβης είναι κοντά στην φυσική ένταση τύρβης ( $TIA_{\text{περιβάλλοντος}}=0.05$ ) αν και στην Mixed GA παρατηρείται λίγο μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με τις άλλες δύο.

Στο κομμάτι της τοπολογίας φαίνεται ότι δημιουργούνται δύο μέτωπα κάθετα στην κύρια διεύθυνση του ανέμου που είναι η NW. Οι Α/Γ παρατάσσονται σε αυτά τα μέτωπα, τα οποία απέχουν μεταξύ τους πάνω από 8 διαμέτρους στις περισσότερες των περιπτώσεων.

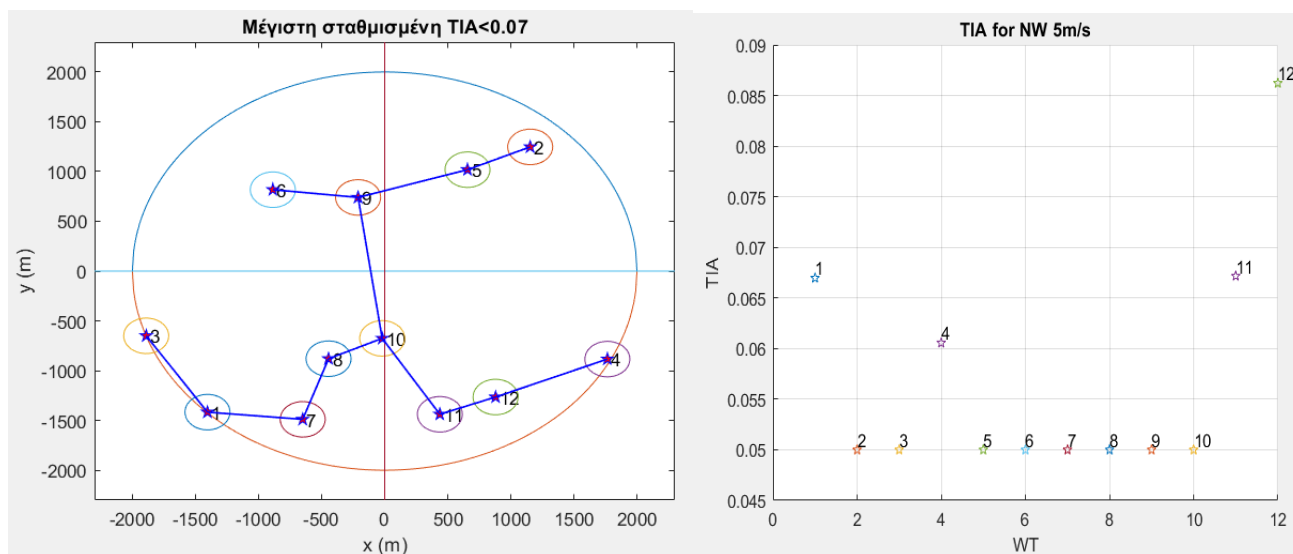
Πλευρικά οι Α/Γ τείνουν να έρχονται όσο το δυνατόν κοντύτερα γίνεται (δηλαδή να απέχουν 2 διαμέτρους). Αυτό γίνεται αντιληπτό στην 1<sup>η</sup> και την 3<sup>η</sup> τοπολογία στις Α/Γ 3 και 5, 8 και 11 αντίστοιχα. Είναι εμφανές ότι οι Α/Γ αυτές δεν βρίσκονται στο πεδίο ομόρρου άλλων στην κύρια διεύθυνση. Επίσης στο ρόδο ανέμου της μελέτης, δεν υπάρχει συνιστώσα ανέμου ομοαξονική με το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει τα κέντρα των Α/Γ αυτών, επομένως οι Α/Γ έρχονται όσο πιο κοντά γίνεται, μέχρι για να υπάρξει ελάττωση του μήκους

καλωδίωσης. Η ελάχιστη απόσταση προκύπτει όταν εφάπτονται οι κύκλοι που περιβάλλουν τις Α/Γ, ο καθένας ακτίνας ίσης με την διάμετρο της Α/Γ.

Τέλος πιο γρήγορος βελτιστοποιητής είναι ο Nelder Mead, ωστόσο η πολύ μεγάλη τιμή του Mixed Variable, είναι γιατί στην εν λόγω βιβλιοθήκη της ργthon μπορείς να θέσεις αριθμό επαναλήψεων και όχι όριο σύγκλισης, συνεπώς το πρόγραμμα συνέχιζε να τρέχει, ενώ ουσιαστικά υπήρχε ικανοποιητική σύγκλιση.

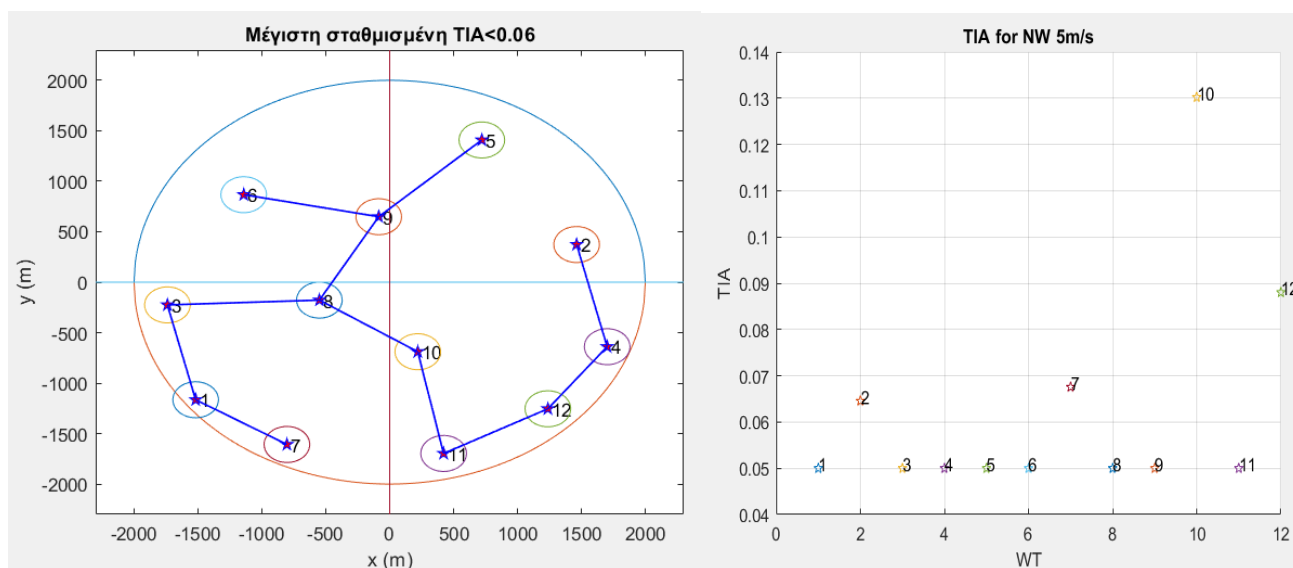
## 4.2 Διαφορετικά κριτήρια τύρβης

### 4.2.1 Κυκλικό όριο και κριτήριο μέγιστης σταθμισμένης τύρβης <0.07



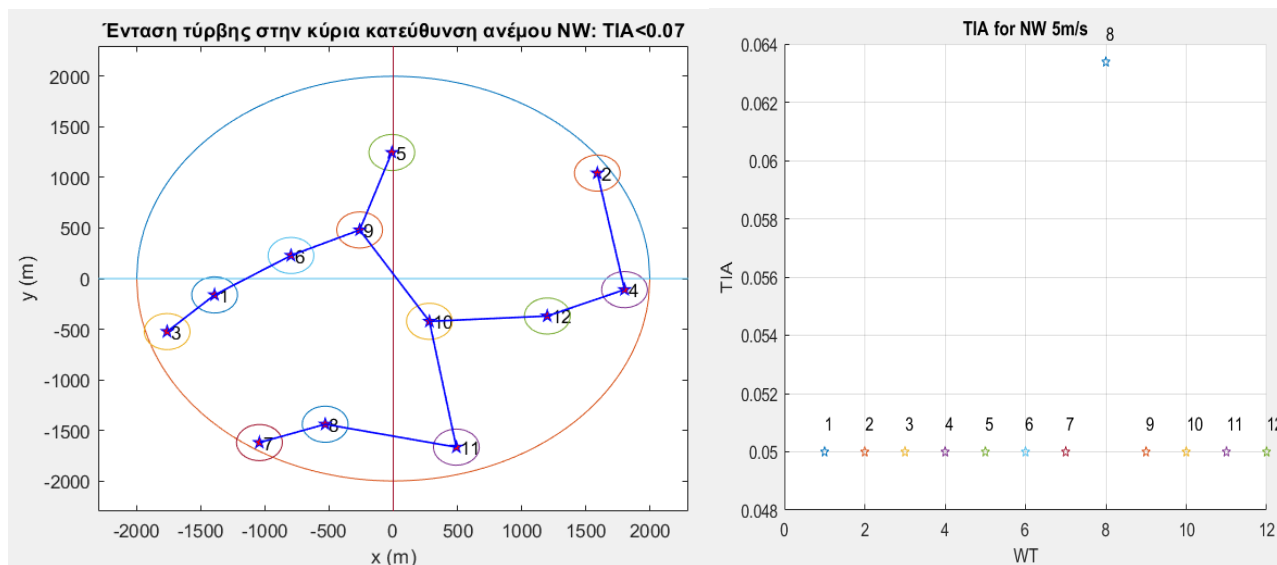
Διάγραμμα 18: Mixed GA με κυκλικό όριο και κριτήριο μέγιστης σταθμισμένης τύρβης <0.07

### 4.2.2 Κυκλικό όριο και κριτήριο μέγιστης σταθμισμένης τύρβης <0.06



Διάγραμμα 19: Mixed GA με κυκλικό όριο και κριτήριο μέγιστης σταθμισμένης τύρβης <0.06

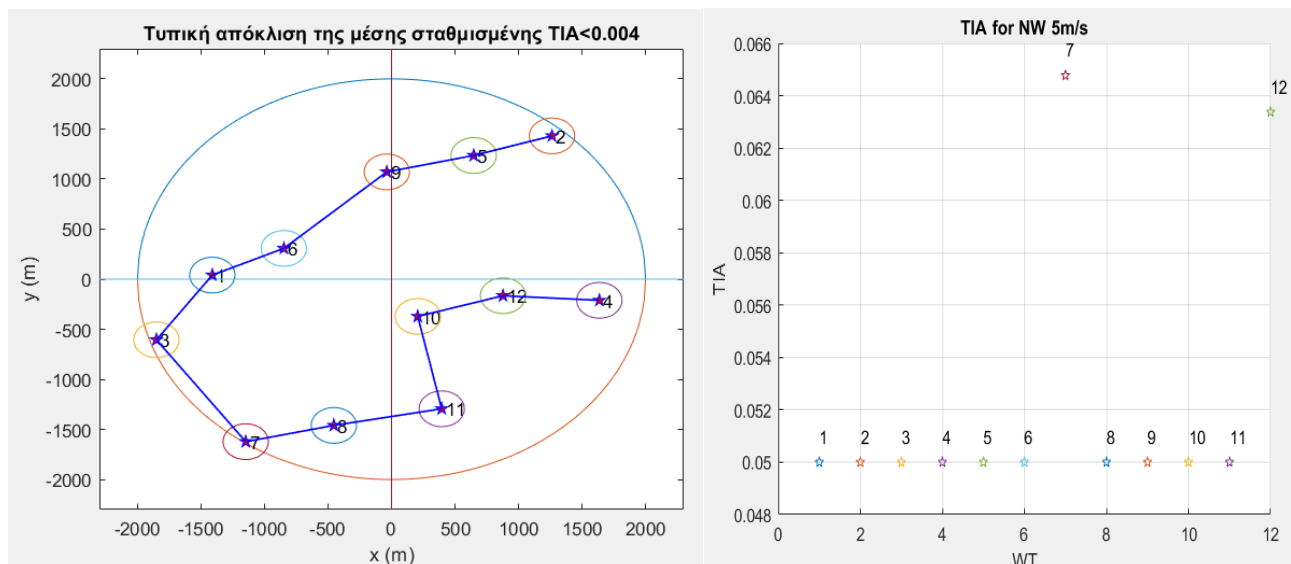
### 4.2.3 Κυκλικό όριο και κριτήριο μέγιστης έντασης τύρβης στην κύρια κατεύθυνση <math>TIA < 0.07</math>



Διάγραμμα 20: Mixed GA κυκλικό όριο και κριτήριο μέγιστης τύρβης στην κύρια κατεύθυνση <math>TIA < 0.07</math>

Στο παραπάνω σχήμα δεν χρησιμοποιείται η σταθμισμένη ένταση τύρβης να είναι κάτω από ένα όριο της στα προηγούμενα, αντίθετα, ελέγχεται η μέγιστη παρατηρούμενη ένταση τύρβης στην κύρια διεύθυνση (NW) να είναι μικρότερη από 0.07. Στο δεξί διάγραμμα φαίνεται η ένταση τύρβης σε κάθε Α/Γ στην ταχύτητα των 5m/s, στην οποία της έχει όπως έχει ήδη αναφερθεί παρατηρείται και η μέγιστη ένταση τύρβης.

### 4.2.4 Κυκλικό όριο και κριτήριο τυπικής απόκλισης έντασης τύρβης <math>TIA\_{std} < 0.004</math>



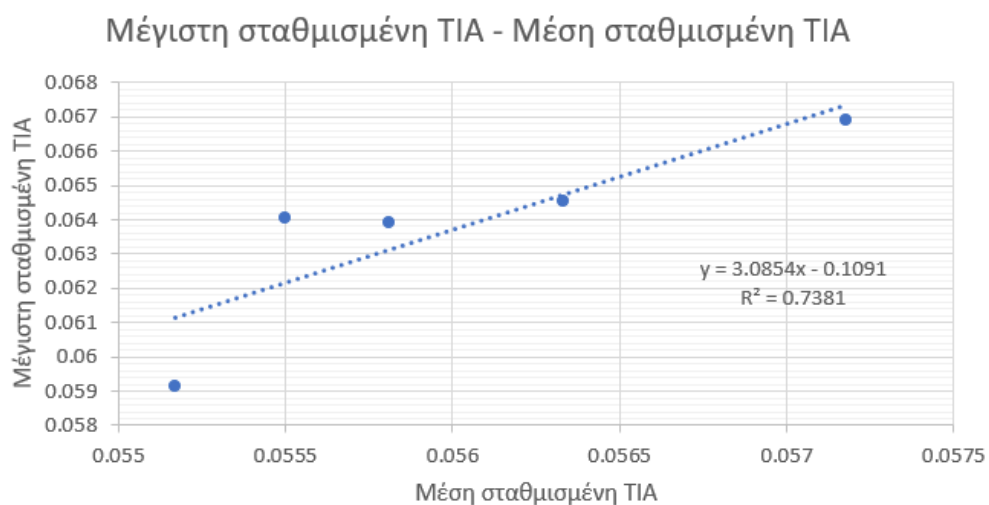
Διάγραμμα 21: Mixed GA με κυκλικό όριο και κριτήριο σταθμισμένης TIA std <math>TIA\_{std} < 0.004</math>

	Mixed GA, stdv TIA<0.04	Mixed GA, χωρίς κυκλικό όριο, max σταθμισμένη TIA<0.07	Mixed GA, TIA,NW dir max<0.07	Mixed GA, max σταθμισμένη TIA<0.06	Mixed GA, max σταθμισμένη TIA<0.07
CF	0.3585	0.3589	0.3563	0.3498	0.3543
AEP (kWh)	3.7687 E+8	3.7722 E+8	3.7458 E+8	3.6773 E+8	3.7244 E+8
Cable length (km)	9.087	10.945	9.281	10.821	8.676
Capex €	2.3487 E+8	2.3562 E+8	2.3495 E+8	2.3557 E+8	2.3471 E+8
LCOE €	0.089335	0.089456	0.089686	0.090850	0.089944
Max mean TIA	0.06390	0.06405	0.06454	0.05915	0.06692
Mean mean TIA	0.05581	0.05550	0.05633	0.05517	0.05718
Stdv mean TIA	0.00397	0.00377	0.00412	0.00317	0.00508

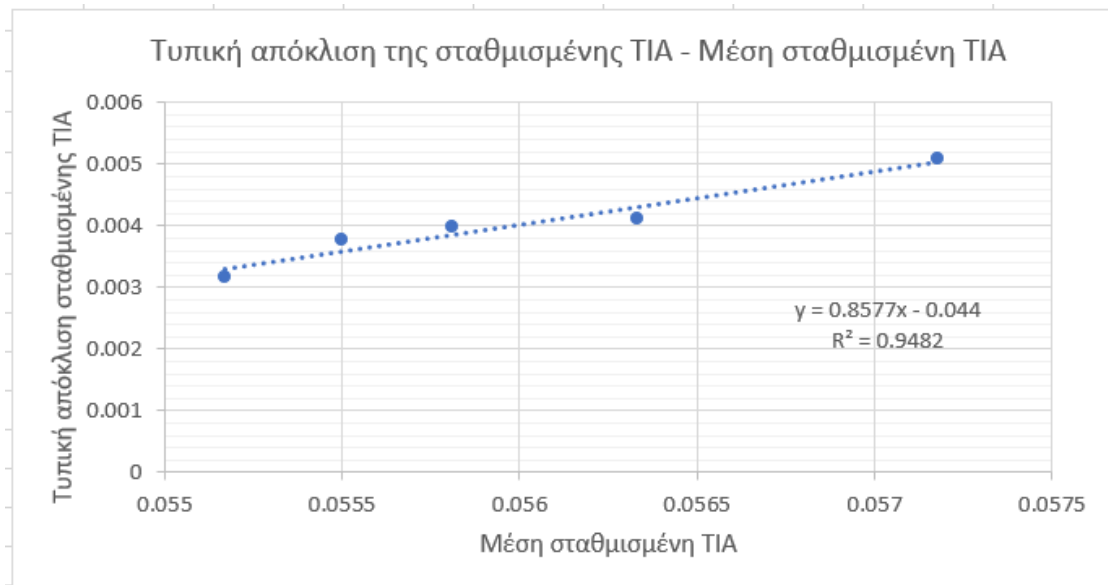
Πίνακας 9: Συγκριτική παρουσίαση για περιορισμούς κόστους καλωδίου και TIA

Πριν σχολιασθούν τα αποτελέσματα τονίζεται ότι η 2<sup>η</sup> στήλη αντιστοιχεί στην 1<sup>η</sup> περίπτωση της παραγράφου 4.1 (Διάγραμμα 15) . Για την εξαγωγή συμπερασμάτων έχουν νόημα οι εξής συγκρίσεις:

1. Το μεγαλύτερο CF προκύπτει για την επίλυση στο τετράγωνο χωρίο πλευράς 2000m, το οποίο είναι αναμενόμενο, μιας και υπάρχει περισσότερος χώρος να σκορπιστούν οι Α/Γ -σε σχέση με κυκλικό χωρίο ακτίνας 2000m- και άρα να μην υπάρχουν Α/Γ σε πεδίο ομόρρου.
2. Συγκρίνοντας τον μεγαλύτερο CF με τον 2<sup>ο</sup> μεγαλύτερο, δηλαδή αυτόν της 1<sup>ης</sup> στήλης, προκύπτει το συμπέρασμα ότι στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει αντιστοιχία ως προς το φθηνότερο LCOE. Ειδικότερα, η 1<sup>η</sup> στήλη σε σχέση με την 2<sup>η</sup> έχει μικρότερο CF κατά 0.0004, έχει όμως και λιγότερο εκτεταμένη καλωδίωση κατά 1.858km. Το αποτέλεσμα είναι το LCOE της 1<sup>ης</sup> στήλης να είναι κατά 0.000121€ φθηνότερο. Επομένως συνάγεται το συμπέρασμα ότι οι 35E+8 kWh που παράγονται στην στήλη 2 δεν υπερνικούν το κόστος του παραπάνω καλωδίου, που ανέρχεται στα 743.2κ€.
3. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι η μέση σταθμισμένη TIA των Α/Γ είναι πολύ κοντά σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, σε αντίθεση με την μέγιστη σταθμισμένη TIA, η οποία έχει μεγαλύτερη διακύμανση.



Διάγραμμα 22: Μέγιστη σταθμισμένη TIA - Μέση σταθμισμένη TIA



Διάγραμμα 23: Τυπική απόκλιση της σταθμισμένης ΤΙΑ - Μέση σταθμισμένη ΤΙΑ

Τιμή άξονα Χ'Χ	0.05517	0.05550	0.05581	0.05633	0.05718
Στήλη πίνακα 8	4 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	1 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>

Πίνακας 10: Αντιστοίχιση συντεταγμένων Χ'Χ με στήλες Πίνακα 9

Στα ανωτέρω διαγράμματα φαίνεται κατά σειρά η συσχέτιση της μέσης σταθμισμένης ΤΙΑ με την μέγιστη σταθμισμένη ΤΙΑ και με την τυπική της απόκλιση. Είναι φανερό ότι η συσχέτιση με την μέγιστη τιμή δεν είναι γραμμική, σε αντίθεση με την τυπική απόκλιση όπου φαίνεται να υπάρχει γραμμικότητα. Αυτό εξηγείται καθώς ο βελτιστοποιητής προσπαθεί εν γένει να φέρει όλες τις Α/Γ σε θέση τέτοια ώστε να έχουν καλή εκμετάλλευση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού. Επομένως οι Α/Γ πρέπει να έχουν παραπλήσιες απώλειες και να εκτίθενται σε πεδίο ομόρρου με αντίστοιχη συχνότητα. Επιπρόσθετα όσο αυξάνεται η μέση σταθμισμένη ΤΙΑ, αυξάνεται και η τυπική απόκλιση καθώς για να υπάρχει συνολικά καλή εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού, πρέπει κάποια Α/Γ να φορτίζεται περισσότερο και κάποια λιγότερο. Επίσης, επειδή υπάρχουν και οι χωροθετικοί περιορισμοί είναι πολύ πιθανόν κάποια Α/Γ να πρέπει να 'θυσιασθεί' και να υφίσταται μεγαλύτερη ένταση τύρβης, κάτι το οποίο χαλάει την γραμμικότητα στο Διάγραμμα 22.

4. Συγκρίνοντας τις 2 τελευταίες στήλες μεταξύ τους, οι οποίες έχουν ίδιο κριτήριο, αλλά με άλλη τιμή προκύπτει ότι όσο η απαίτηση για μέγιστη επιτρεπτή σταθμισμένη ΤΙΑ μικραίνει, τόσο μεγαλώνει το μήκος των καλωδίων, το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς πρέπει οι Α/Γ να είναι απομακρυσμένες, έτσι ώστε να υπάρχει όσο το δυνατόν μικρότερη αλληλεπίδραση. Επίσης προκύπτει το εκ πρώτης όψεως παράδοξο, ότι παρόλο που η μέγιστη σταθμισμένη ΤΙΑ μειώνεται (μαζί της μειώνεται και η μέση σταθμισμένη ΤΙΑ), άρα οι Α/Γ δέχονται σπανιότερα πεδίο ομόρρου, ο CF αντί να αυξηθεί μειώνεται. Μια εξήγηση είναι πως επειδή το κάτω όριο για την ελάχιστη ΤΙΑ είναι φραγμένο ίσο με την ατμοσφαιρική ΤΙΑ  $\text{περιβάλλοντος}=0.05$  και επειδή το κυκλικό όριο είναι στενό, οι Α/Γ αναγκάζονται να έρθουν πιο κοντά στην μέση τιμή, όπως άλλωστε επιβεβαιώνεται και από την μείωση της τυπικής απόκλισης. Επομένως οι Α/Γ είναι συγκεντρωμένες κοντά στην μέση τιμή και έχουν τέτοιο έλλειμα το οποίο είναι τελικά μεγαλύτερο. Επίσης όταν η ένταση τύρβης είναι μικρότερη, αυτό σημαίνει ότι η ροή αποκαθίσταται πιο δύσκολα στην ταχύτητα ανέμου της επ' άπειρης ροής, επομένως υπάρχουν μεγαλύτερες απώλειες.
5. Συγκρίνοντας την 3<sup>η</sup> στήλη με την 5<sup>η</sup> και 6<sup>η</sup> προκύπτει ότι το CF και το LCOE υπερέχουν στην περίπτωση όπου εξετάζεται να είναι χαμηλή η ένταση τύρβης στην κύρια διεύθυνση ανέμου. Αυτό ισχύει στο συγκεκριμένο ρόδο ανέμου, καθώς προκύπτει ότι στην κύρια κατεύθυνση ανέμου, υπάρχουν μεγαλύτερες ταχύτητες, στις οποίες η αυξημένη ΤΙΑ δρα αρνητικά ως προς την παραγόμενη ενέργεια, ενώ στις χαμηλές δρα βοηθητικά (Chuanjun, Jianming και Yan 2021).

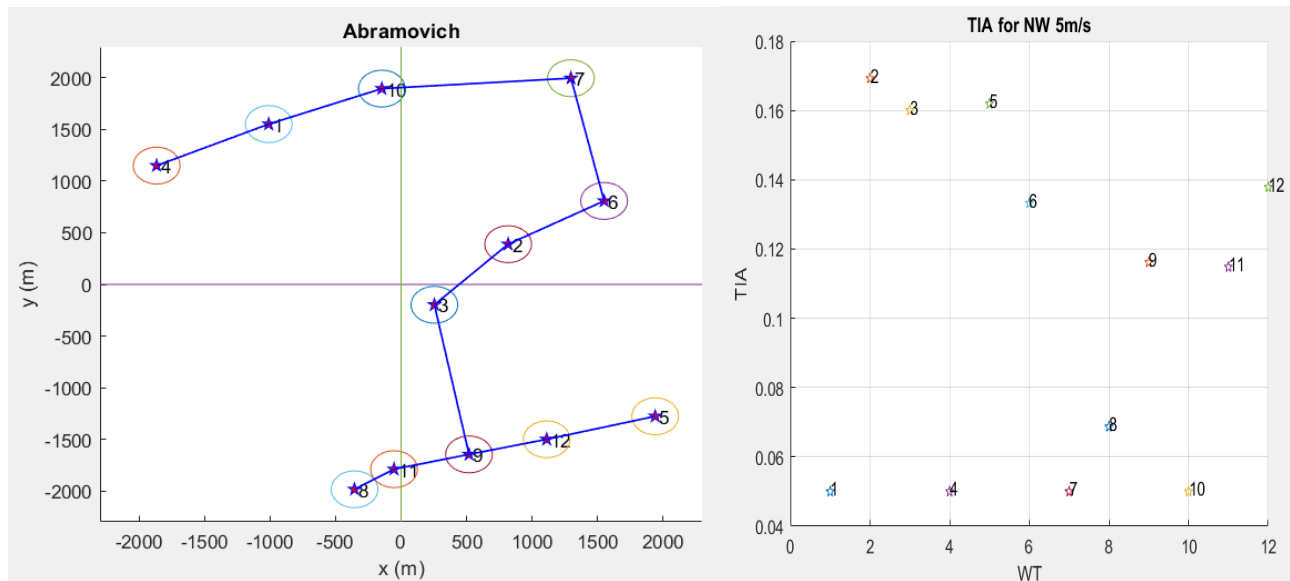


Επομένως στην 3<sup>η</sup> στήλη η ένταση τύρβης είναι ίση με αυτή του περιβάλλοντος στις περισσότερες περιπτώσεις και άρα δεν υπάρχουν απώλειες λόγω αυτής στην κύρια διεύθυνση όπου επικρατούν και μεγαλύτερες ταχύτητες.

## 4.3 Σύγκριση 6 μοντέλων ομόρρου

Ακολούθως θα παρουσιασθούν οι τοπολογίες, οι εντάσεις τύρβης καθώς και τα διαγράμματα ομόρρου (όπου είναι αυτό δυνατόν) που επάγεται από την κάθε Α/Γ για τα 6 διαφορετικά μοντέλα ομόρρου. Ως μέθοδος βελτιστοποίησης θα χρησιμοποιηθεί η Nelder Mead καθώς είχε πιο γρήγορη σύγκλιση σε σχέση με την Mixed Variable GA.

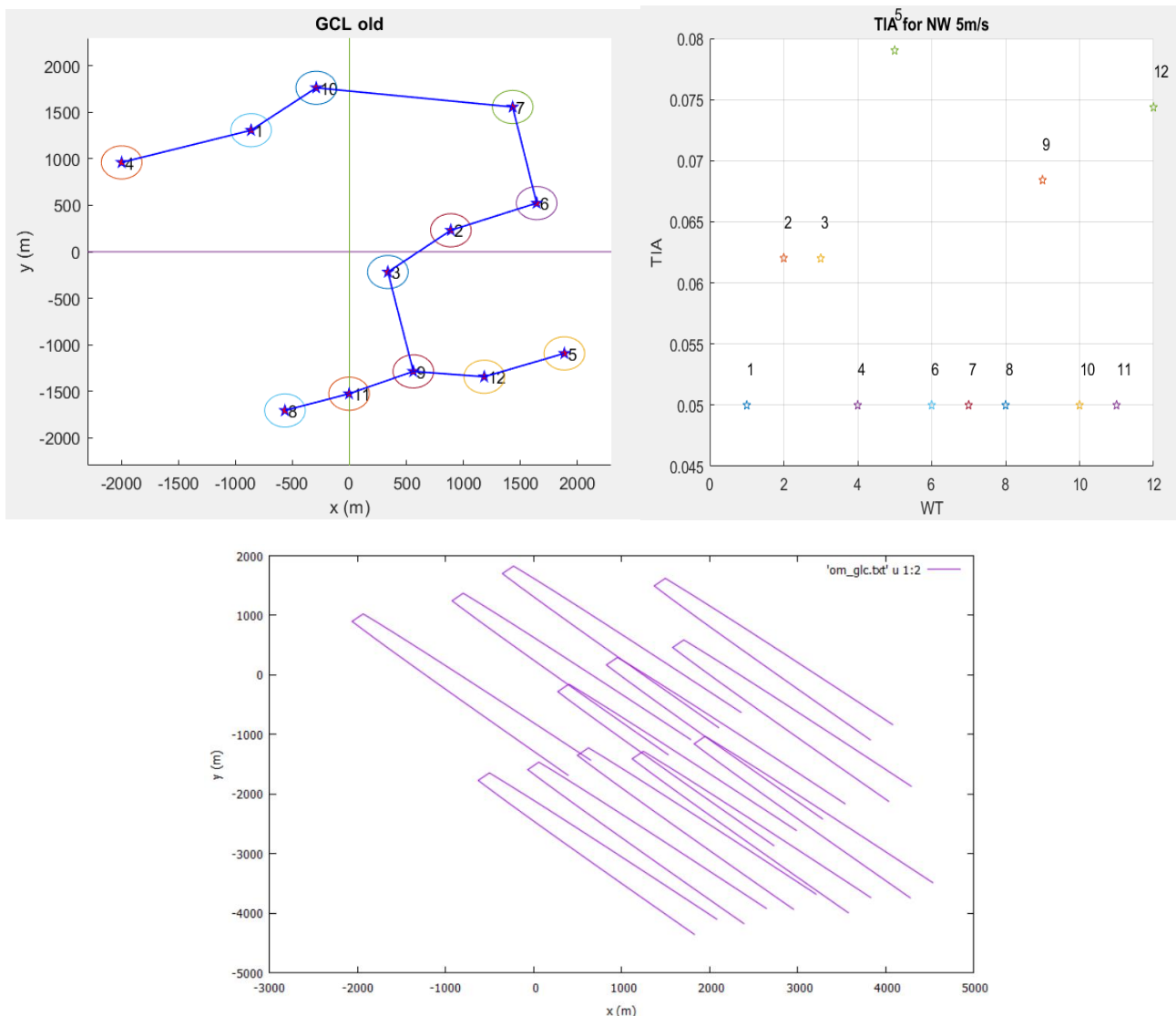
### 4.3.1 Abramovich



Διάγραμμα 24: Βελτιστοποίηση με μοντέλο Abramovich

Είναι εμφανές ότι σε αυτό το μοντέλο οι εντάσεις τύρβης στις χαμηλές ταχύτητες είναι αρκετά μεγάλες καθώς αγγίζουν το 0.18. Αυτό συμβαίνει καθώς το μοντέλο του Abramovich έχει εν γένει τον πιο πλατύ ομόρρου όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 1. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι Α/Γ 8 και 11 παρότι δεν βρίσκονται σε πεδίο ομόρρου κάποιας Α/Γ, έχουν ΤΙΑ μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος. Αυτό εξηγείται καθώς εξετάζεται η δυσμενέστερη περίπτωση, δηλαδή αυτή για ταχύτητα ανέμου 5m/s όπου οι διαταραχές τείνουν να συντηρούνται. Επίσης ο ομόρρους έχει υπολογιστεί για την μεγαλύτερη ταχύτητα λειτουργίας της Α/Γ, δηλαδή τα 25m/s, όπου είναι πιο στενός. Συνεπώς στα 5m/s ενδέχεται οι Α/Γ 8 και 11 να είναι στο πεδίο ομόρρου της 4. Τέλος, φαίνεται πως οι Α/Γ έχουν διαταχθεί άτυπα σε 3 μέτωπα, σχεδόν κάθετα στην κύρια διεύθυνση του ανέμου.

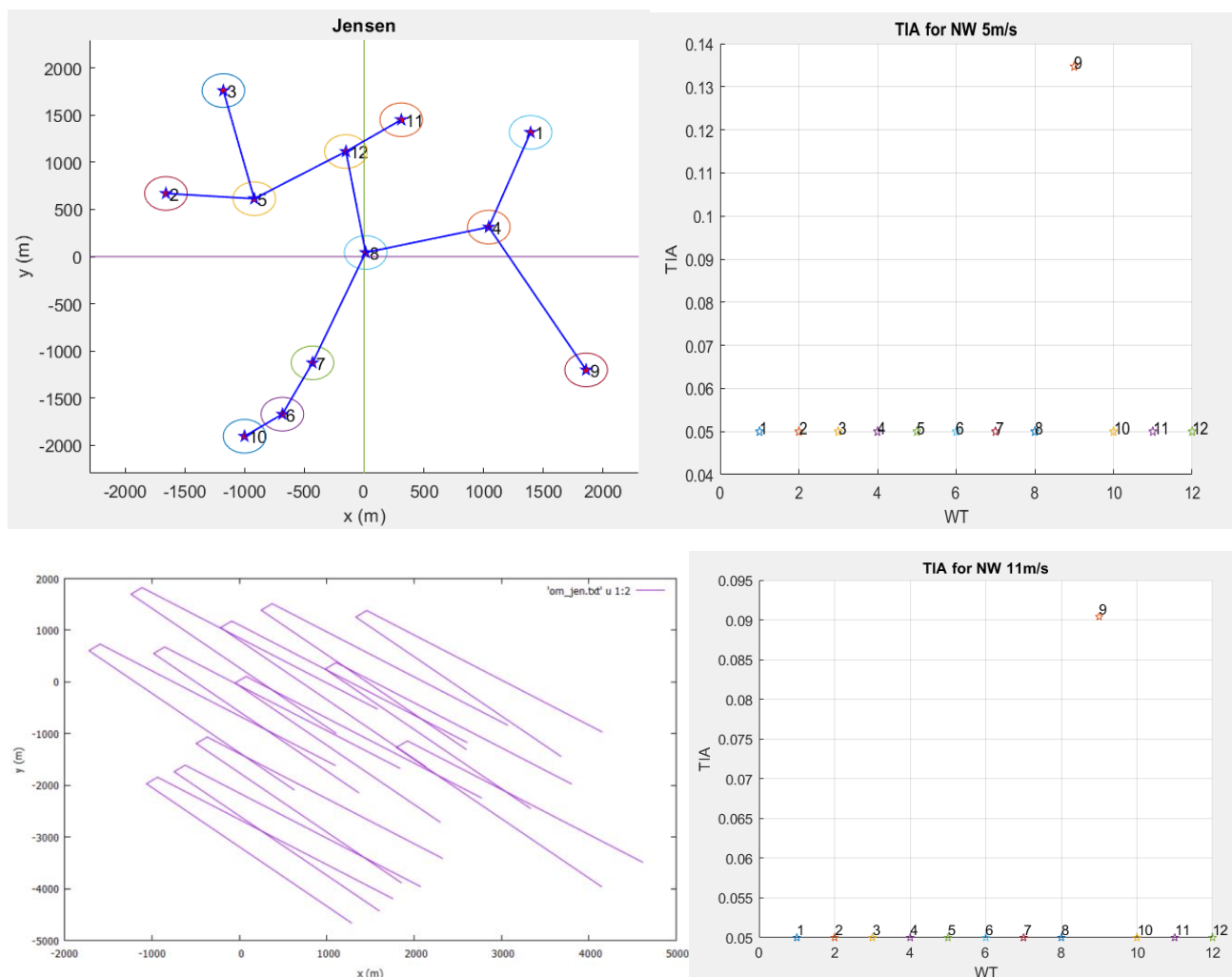
### 4.3.2 GCL



Διάγραμμα 25: Βελτιστοποίηση με μοντέλο GCL

Στην περίπτωση αυτή οι εντάσεις τύρβης δεν ξεπερνάνε το 0.08 ακόμα και στην δυσμενέστερη περίπτωση όπως αυτή των 5m/s. Παρατηρείται ότι ο ομόρρους είναι πιο στενός κατάντι των Α/Γ, ενώ για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται και άλλο μοντέλο, με αναλυτικές σχέσεις για πολλά σημεία, σε αντίθεση με τον Abramovich που τα σημεία είναι λιγότερα. Η τοπολογία μοιάζει με την προηγούμενη καθώς και σε αυτή την περίπτωση είναι 3 διακριτά μέτωπα από Α/Γ. Επίσης φαίνεται ότι οι Α/Γ που είναι εκτός του πεδίου ομόρρου άλλων Α/Γ, δεν έχουν τύρβη μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος, σε αντίθεση με ότι συνέβαινε στο προηγούμενο μοντέλο. Τέλος αξίζει να σημειωθεί η διαφορά στην τύρβη της 9 με της 2. Η απόσταση 2-10 είναι 11D, ενώ η απόσταση 4-9 είναι 19D. Ωστόσο, η 9 δέχεται μεγαλύτερη ένταση τύρβης το οποίο συμβαίνει καθώς βρίσκεται μέσα στο πεδίο του ομόρρου της 4, αντίθετα η 2 ίσα ίσα που ακουμπάει το πλευρικό όριο του ομόρρου που δημιουργεί η 10.

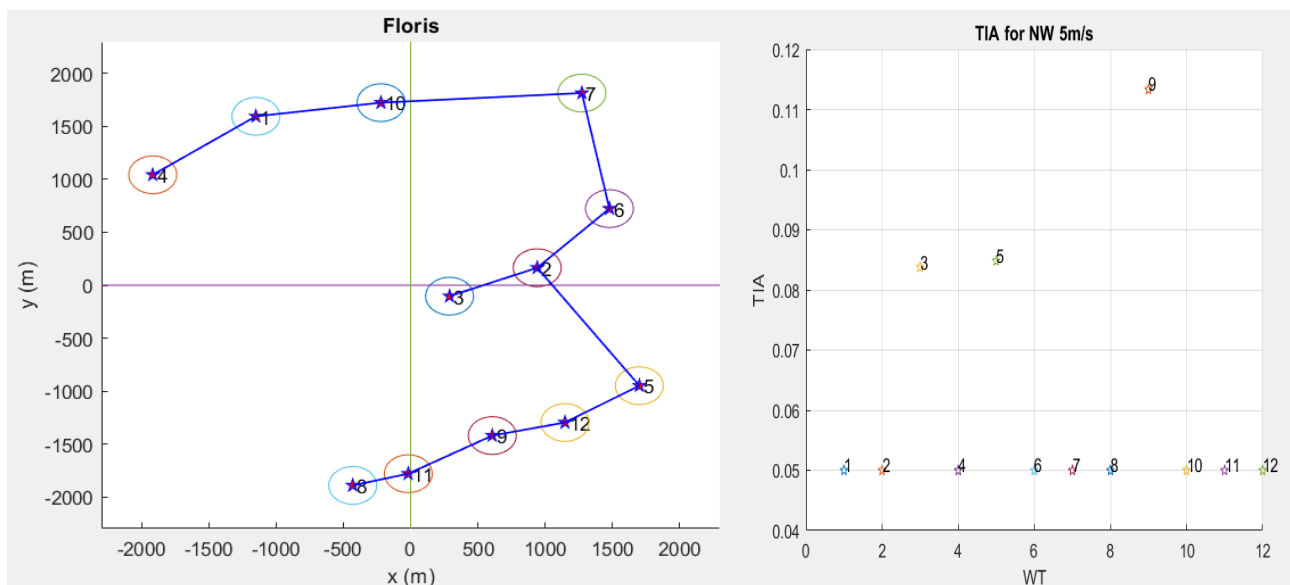
### 4.3.3 Jensen



Διάγραμμα 26: : Βελτιστοποίηση με μοντέλο Jensen

Με το μοντέλο του Jensen παρατηρείται ένα ενδιαφέρον αποτέλεσμα, ότι σταματάει πια η δημιουργία 3 μετώπων Α/Γ, οι οποίες πλέον έχουν τοποθετηθεί πιο 'διάσπαρτα'. Στην περίπτωση αυτή η χωροταξία έχει γίνει έτσι ώστε μόνο η 9<sup>η</sup> Α/Γ να βρίσκεται μέσα στο πεδίο ομόρρου άλλης Α/Γ, συγκεκριμένα της 12<sup>ης</sup>, εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι απέχουν 17D, η εν λόγω φαινόμενη ταχύτητα της 9<sup>ης</sup> Α/Γ είναι 4.56m/s . Ακριβώς επειδή η παρατήρηση αυτή ήταν απρόσμενη, παρουσιάζεται και το διάγραμμα για ταχύτητα 11m/s, όπου φαίνεται ότι η υφιστάμενη τύρβη έχει μειωθεί παραπάνω από το 1/3, ενώ η αντίστοιχη φαινόμενη ταχύτητα είναι 10.34m/s . Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι η 4<sup>η</sup> και η 8<sup>η</sup> έχουν τοποθετηθεί έτσι ώστε να βρίσκονται οριακά απέξω από τα πεδία ομόρρου που περνάνε δίπλα τους.

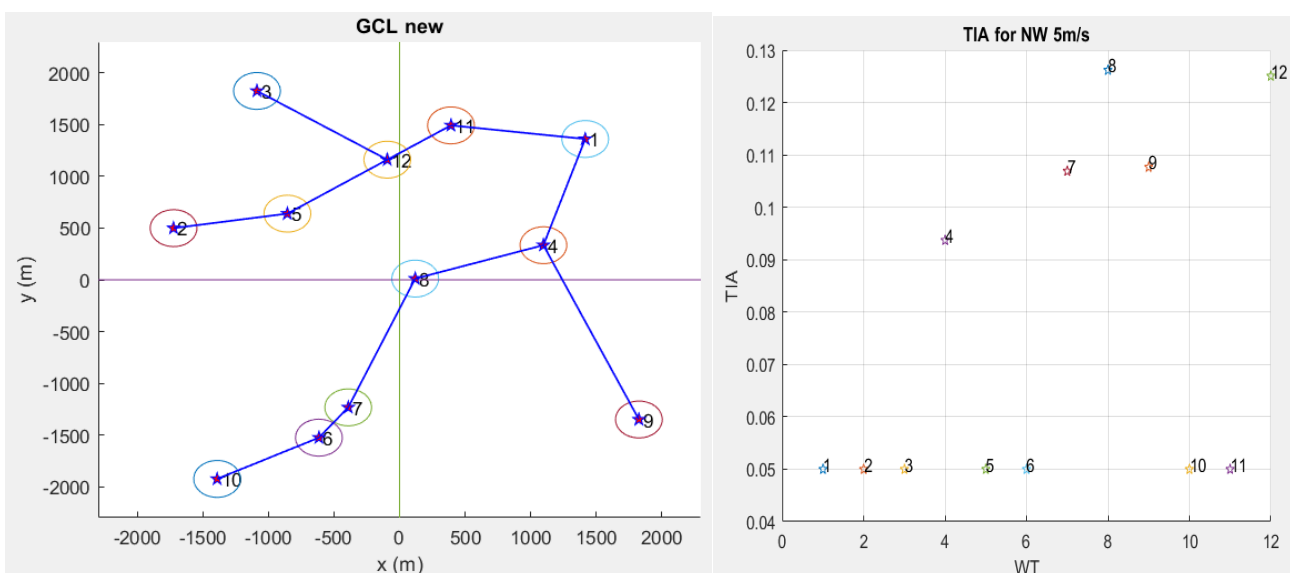
### 4.3.4 Floris



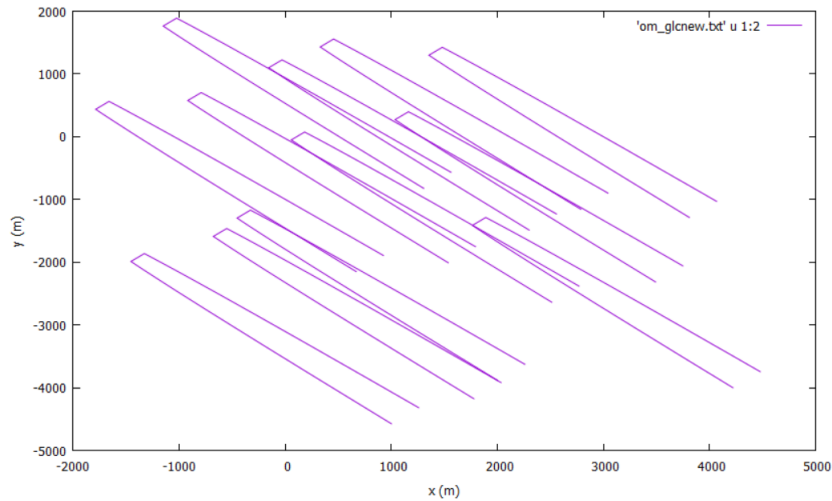
Διάγραμμα 27: Βελτιστοποίηση με μοντέλο Floris

Η διάταξη που προκύπτει με την επίλυση αυτού του μοντέλου μοιάζει παραπάνω με την διάταξη του GCL και του Abramovich, παρά με του Jensen όπως ίσως περίμενε κανείς, μιας και τα Floris, Jensen είναι βηματικά και όχι συνεχή μοντέλα. Ωστόσο φαίνεται πως τα 3 βήματα που έχει το Floris είναι αρκετά για να οδηγηθεί σε τοπολογία παραπλήσια με τα δύο άλλα προαναφερόμενα μοντέλα. Επίσης αξιοσημείωτο είναι η 3<sup>η</sup> Α/Γ δείχνει να βρίσκεται στο πεδίο τύρβης της 1<sup>ης</sup> και 10<sup>ης</sup> Α/Γ, παρότι είναι μακριά τους.

### 4.3.5 GCL new

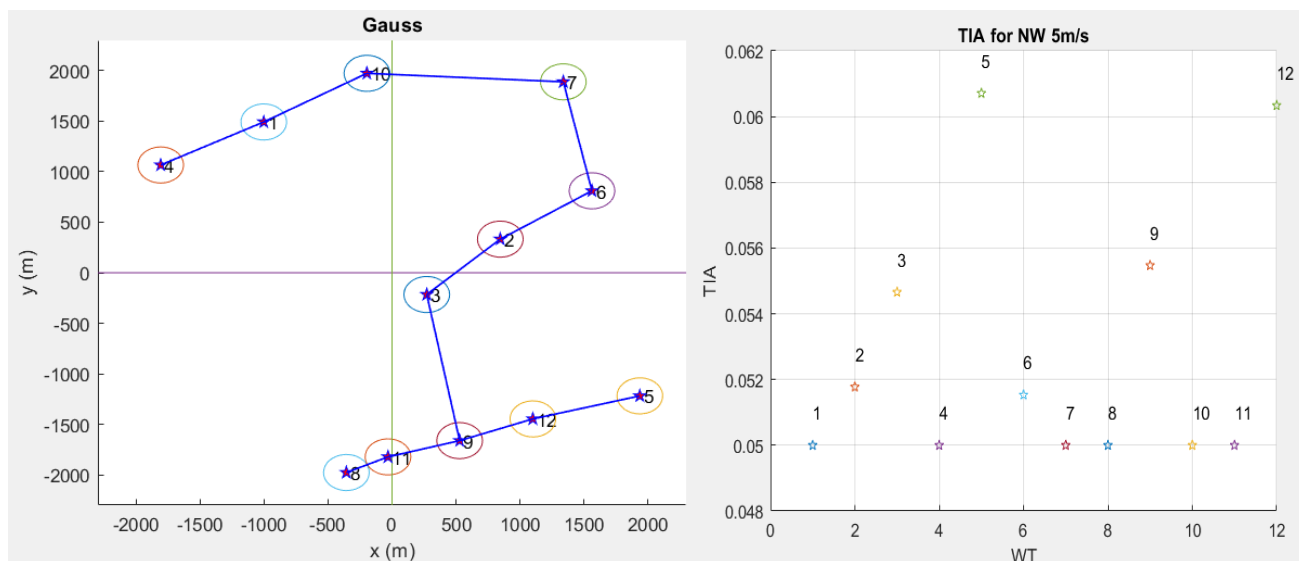


Διάγραμμα 28: Βελτιστοποίηση με μοντέλο GCL new



Στην τοπολογία που δημιουργήθηκε με βάση το καινούριο πρότυπο του GCL, φαίνεται ότι δεν υπάρχει δημιουργία σαφών μετώπων κάθετα στην κύρια διεύθυνση. Η τοπολογία δεν ακολουθεί συγκεκριμένο μοτίβο, μοιάζει ωστόσο αρκετά στο πρότυπο που έγινε με βάση το Jensen. Όσον αφορά την ένταση της τύρβης στη δυσμενέστερη περίπτωση των 5m/s, αυτή προκύπτει σχεδόν η διπλάσια σε σχέση με το αρχικό μοντέλο. Αυτό έχει αντίκρυσμα και στην σταθμισμένη ένταση τύρβης όπου η διαφορά είναι σημαντική (0.07645 σε σχέση με 0.06086). Επίσης αξιοσημείωτο είναι ότι στην δυσμενέστερη περίπτωση των 5m/s, οι A/Γ 8 και 12 έχουν TIA κοντά στο 0.13, παρότι βρίσκονται στο πλευρικό τέλος του ομόρρου των 5 και 3 αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει καθώς το διάγραμμα ομόρρου έγινε με βάση τους τύπους για τον υπολογισμό του ομόρρου του παλιού μοντέλου GCL. Το παλιό μοντέλο όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 1 έχει πιο στενό εύρος ομόρρου σε σχέση με το νέο μοντέλο. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο ότι το παλιό μοντέλο είχε μεγαλύτερο έλλειμμα ταχύτητας. Επιπρόσθετα, παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση ότι οι A/Γ τείνουν να καταλαμβάνουν θέσεις στις οποίες οι πτερωτές τους έχουν όσο το δυνατόν μικρότερη επιφάνεια εντός πεδίου ομόρρου άλλης A/Γ. Σε αυτή την περίπτωση δε, φαίνεται ότι καμία δεν είναι μέσα στο κατάντι πεδίο ομόρρου άλλης και ότι όλες βρίσκονται στα πλευρικά όρια του ομόρρου, σε περιοχές δηλαδή όπου το έλλειμμα ταχύτητας είναι το κατά δυνατόν μικρότερο.

#### 4.3.6 Gauss



Διάγραμμα 29: Βελτιστοποίηση με μοντέλο Gauss

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μεθοδολογία που βασίζεται στην κατανομή Gauss έχουν αρκετό ενδιαφέρον καθώς η τοπολογία είναι πολύ παραπλήσια με αυτή που προκύπτει από τα μοντέλα Abramovich, GCL, Floris. Ωστόσο στο κομμάτι της έντασης τύρβης υπάρχει σημαντική απόκλιση. Πιο συγκεκριμένα στο πρότυπο Abramovich οι TIA στη δυσμενέστερη περίπτωση των 5m/s είναι αρκετά υψηλές, παραπάνω από 0.12 ,ενώ στην περίπτωση της κατανομής Gauss καμία τύρβη δεν ξεπερνάει το 0.062. Επομένως προκύπτει το συμπέρασμα ότι στο πρότυπο Gauss θεωρείται ότι η TIA αποκαθίσταται πιο γρήγορα στα φυσικά επίπεδα, κάτι που δεν συνέβαινε στον Abramovich. Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και για την σύγκριση με τα άλλα δύο μοντέλα, απλά σε μικρότερη κλίμακα.

#### 4.3.7 Συγκρίσεις

	Abramovich	GCL	Jensen	Floris	GCL new	Gauss
CF	0.3534	0.3576	0.3507	0.3569	0.3539	0.3545
AEP (kWh)	3.7144 E+8	3.7586 E+8	3.6863 E+8	3.7522 E+8	3.7202 E+8	3.7264 E+8
Cable length (km)	10.091	9.902	10.592	9.681	11.153	10.038
Capex	2.3528 E+8	2.3520 E+8	2.3562 E+8	2.3511 E+8	2.3570 E+8	2.3526 E+8
LCOE €	0.090223	0.089557	0.090692	0.089630	0.090238	0.090041
Max mean TIA	0.08099	0.06086	0.07954	0.06849	0.07645	0.06029

Πίνακας 11: Συγκριτική παρουσίαση των λύσεων της βελτιστοποίησης Nelder Mead, με διαφορετικά μοντέλα ομίχρου.

Από τον ανωτέρω πίνακα μπορούν να εξαχθούν άμεσα ποιοτικά και ποσοτικά συμπεράσματα όπως:

1. Το CF του αιολικού είναι πολύ κοντά στο 0.3594 ( της μίας Α/Γ), το οποίο σημαίνει ότι ο χώρος είναι αρκετός για την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση των Α/Γ. Πιο μεγάλο CF παρουσιάζεται στο παλιό μοντέλο GCL και το μικρότερο στο Jensen.
2. Το μήκος καλωδίωσης ανήκει στο εύρος [9.7 , 11.2], τιμές που παρουσιάζονται στο μοντέλο Floris και GCL new αντίστοιχα. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί με βάση ότι η τοπολογία στο μοντέλο Floris είναι σε 3 σαφή μέτωπα, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλές εν σειρά συνδέσεις και άρα μικρότερο συνολικό μήκος. Στον αντίποδα, το GCL new δεν έχει σαφή μέτωπα ( όπως και το μοντέλο Jensen) και οι Α/Γ είναι πιο «άναρχα» χωροθετημένες. Συνεπώς υπάρχουν διακλαδώσεις, οι οποίες συντελούν σε αύξηση του συνολικού μήκους καλωδίων.
3. Είναι εμφανές ότι υπάρχει σχεδόν πλήρης αντιστοίχιση μεταξύ υψηλού CF και χαμηλού LCOE, καθώς όπως φαίνεται η αύξουσα σειρά CF είναι ίδια με την φθίνουσα σειρά του LCOE. Αυτό συμβαίνει καθώς όπως έχει προ ειπωθεί, το CF καθορίζει το AEP το οποίο είναι και η κύρια παράμετρος βελτιστοποίησης, μιας και το κύριο κόστος του CAPEX είναι οι Α/Γ και όχι τα καλώδια. Ωστόσο παρατηρείται ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα ως προς την ανάλυση ευαισθησίας. Αν συγκριθούν τα αιολικά πάρκα που χωροθετήθηκαν χρησιμοποιώντας τα μοντέλα Abramovich και του GCL new, φαίνεται το μοντέλο Abramovich δίνει μικρότερο CF, κατά 0.005 (άρα και μικρότερο AEP κατά 58 E+8kWh ), έχει όμως και μικρότερο μήκος καλωδίωσης, σχεδόν 1km, το οποίο μεταφράζεται σε 425k€ λιγότερα. Το αποτέλεσμα είναι ότι το LCOE του Abramovich είναι μικρότερο κατά 1.5 E-05 € σε σχέση με το GCL new. Επομένως μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το κόστος του 1km επιπλέον καλωδίου είναι πιο σημαντικό από τις 58 E+8 kWh.
4. Τέλος είναι προφανές ότι η σταθμισμένη TIA είναι μεγαλύτερη για το Abramovich, το οποίο έχει μεγαλύτερη ένταση τύρβης και στις μεμονωμένες ταχύτητες. Από την άλλη μικρότερη σταθμισμένη TIA παρουσιάζουν τα μοντέλα GCL old και Gauss. Αυτό αποδίδεται τόσο στην χωροταξία την οποία απέκτησαν όσο και στα ίδια τα μοντέλα. Αρχικά η χωροταξία που έχει προκύψει είναι αρκετά

παρεμφερής έχοντας ουσιαστικά 3 μέτωπα. Έπειτα όπως φάνηκε και στην παράγραφο 3.1.7 το μεν μοντέλο old GCL έχει πολύ στενό ομόρρου, άρα οι Α/Γ βρίσκονται σπάνια εντός πεδίο ομόρρου, το δε μοντέλο κατά Gauss θεωρεί εν γένει χαμηλή ένταση τύρβης.

Για καλύτερη ερμηνεία των δεδομένων θα ακολουθήσει πίνακας όπου θα κρατηθεί η τοπολογία που προέκυψε από την βελτιστοποίηση κάθε μοντέλου και εν συνεχεία θα υπολογιστεί το LCOE της κάθε τοπολογίας, με βάση όλα τα μοντέλα ομόρρου. Ειδικότερα, οι στήλες αντιπροσωπεύουν την τοπολογία που προέκυψε από την βελτιστοποίηση του εκάστοτε μοντέλου. Ενώ οι γραμμές αποτελούν τον υπολογισμό της κάθε τοπολογίας με διάφορα μοντέλα ομόρρου. Στον πίνακα με τον υπολογισμό του LCOE η κλίμακα πράσινο-κόκκινο αποδίδει με πράσινο τις υψηλές τιμές και με κόκκινο τις χαμηλές. Αντίθετα, στον πίνακα με τον CF, στις υψηλές τιμές αντιστοιχεί το κόκκινο και στις χαμηλές το πράσινο. Αυτή η αντίθετη προσέγγιση της κλίμακας στους δύο πίνακες γίνεται, καθώς θεωρήθηκε πιο εύληπτο να υπάρχει αντιστοίχιση των τιμών, ότι δηλαδή υψηλό CF δίνει χαμηλό LCOE. Τέλος θα παρατεθούν τα αθροίσματα των στηλών και των γραμμών, τα οποία θα βοηθήσουν για μια ποιοτική αξιολόγηση τόσο των μοντέλων όσο και των τοπολογιών. Για παράδειγμα στον πίνακα του LCOE, η στήλη με το μικρότερο άθροισμα καθορίζει την τοπολογία που εν γένει αποδίδει καλύτερα, ενώ η γραμμή με το μικρότερο άθροισμα θα δείχνει το μοντέλο ομόρρου που κάνει την πιο αισιόδοξη εκτίμηση για την εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού. Σκοπός είναι να καταδειχθεί κατά πόσο η κάθε τοπολογία έχει βέλτιστη συμπεριφορά στο μοντέλο για το οποίο βελτιστοποιήθηκε η ίδια, ποια τοπολογία δίνει καλύτερα αποτελέσματα καθώς και ποιο μοντέλο υπερεκτιμά και ποιο υποεκτιμά το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό.

LCOE							
Στήλες: τοπολογία Γραμμές: μοντέλο	Abramovich	GCL	Jensen	Floris	GCL new	Gauss	
							sum
Abramovich	0.090223	0.090889	0.090815	0.090801	0.090754	0.090283	0.543765
GCL	0.090642	0.089557	0.091711	0.090971	0.089972	0.090028	0.542881
Jensen	0.090329	0.091400	0.090692	0.091139	0.090902	0.090354	0.544816
Floris	0.089535	0.089513	0.090075	0.089630	0.089655	0.089468	0.537876
GCL new	0.090332	0.090275	0.090967	0.090855	0.090238	0.090132	0.542799
Gauss	0.090041	0.090472	0.090545	0.090533	0.090338	0.090041	0.541970
sum	0.541102	0.542106	0.544805	0.543929	0.541859	0.540306	

Πίνακας 12: Συγκριτική παρουσίαση του LCOE για όλες τις τοπολογίες με κάθε μοντέλο ομόρρου

CF							
Στήλες: τοπολογία Γραμμές: μοντέλο	Abramovich	GCL	Jensen	Floris	GCL new	Gauss	
							sum
Abramovich	0.35335	0.34903	0.34991	0.34945	0.35062	0.35294	2.10530
GCL	0.35069	0.35756	0.34438	0.34839	0.35561	0.35458	2.11121
Jensen	0.35273	0.34587	0.35068	0.34735	0.34969	0.35249	2.09881
Floris	0.35781	0.35784	0.35461	0.35694	0.35767	0.35822	2.14309
GCL new	0.35266	0.35291	0.34897	0.34911	0.35390	0.35390	2.11145
Gauss	0.35452	0.35166	0.35161	0.35114	0.35326	0.35449	2.11668
Sum	2.12176	2.11487	2.10016	2.10238	2.12075	2.12662	

Πίνακας 13: Συγκριτική παρουσίαση του CF για όλες τις τοπολογίες με κάθε μοντέλο ομόρρου

Με βάση τους ανωτέρω πίνακες μπορούν να εξαχθούν πολύτιμα συμπεράσματα, τα οποία θα παρατεθούν στη συνέχεια.

1. Αρχικά παρατηρείται ότι τα κελιά έχουν ίδιο χρώμα και στους δύο πίνακες. Αυτό συμβαίνει καθώς χάρις τον αντίθετο χρωματισμό που εξηγήθηκε προηγουμένως, υπάρχει πλήρης αντιστοίχιση των



υψηλών συντελεστών εκμεταλλευσιμότητας (CF), με την χαμηλή τιμή της ενέργειας (LCOE), καθώς όσο υψηλότερος συντελεστής υπάρχει, τόσο περισσότερη ενέργεια παράγεται για τα ίδια κόστη, επομένως αυτή κοστίζει λιγότερο.

Στη συνέχεια τα σχόλια θα λαμβάνουν υπόψιν τους τον πίνακα των LCOE, καθώς μιας και έχει άμεση συσχέτιση με τον πίνακα των CF, ο σχολιασμός και του άλλου πίνακα θα αποτελούσε επανάληψη.

2. Αφού ο πίνακας έχει δημιουργηθεί για κάθε τοπολογία (όπως αυτή έχει προκύψει από την βελτιστοποίηση των 6 μοντέλων ομόρρου) και για κάθε μοντέλο ομόρρου, ήταν αναμενόμενο, οι πιο υψηλές τιμές (πιο κόκκινες) να ήταν στην κύρια διαγώνιο, καθώς εκεί είναι η τοπολογία υπολογισμένη για το μοντέλο όπου αυτή βελτιστοποιήθηκε. Εντούτοις, αυτό εν γένει δεν έγινε. Πιο συγκεκριμένα, η προσδοκία έχει επιτευχθεί στις περιπτώσεις του GCL old και του Floris. Αντίθετα, τα μοντέλα Gauss, Abramovich, Jensen και GCL new έχουν την 3<sup>η</sup> καλύτερη επίδοση όταν υπολογίζονται για την τοπολογία τους, αν και η διαφορά από την 2<sup>η</sup> καλύτερη είναι πολύ μικρή.
3. Συγκρίνοντας την 1<sup>η</sup> και την 3<sup>η</sup> γραμμή που αντιστοιχούν στα μοντέλα Jensen και Abramovich προκύπτει ότι οι διαφορές του CF είναι πολύ μικρές στις περισσότερες των περιπτώσεων, κάτι που δικαιολογεί τα αποτελέσματα της παραγράφου 3.1.8. Ωστόσο αυτή την φορά δεν έχουν ακριβώς την ίδια τιμή όπως είχε γίνει στην παράγραφο αυτή. Συνεπώς πλέον το συμπέρασμα είναι ότι εν γένει τα μοντέλα αυτά βγάζουν παραπλήσιο βαθμό απόδοσης, ωστόσο η ταύτιση που έγινε στην προηγούμενη παράγραφο θεωρείται τυχαία και αποδίδεται στο γεγονός ότι το πεδίο ομόρρου του αιολικού πάρκου ήταν παραπλήσιο για τα δύο μοντέλα, επηρεάζοντας ισόποσα τις κατάντι A/G.
4. Παρατηρώντας τον πίνακα προκύπτει ότι η 4<sup>η</sup> γραμμή είναι αυτή που σε κάθε στήλη παρουσιάζει την μέγιστη τιμή. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο Floris, υπερεκτιμά το αιολικό δυναμικό που μπορεί να εκμεταλλευτεί το πάρκο, δίνοντας υψηλότερες τιμές από ότι τα άλλα μοντέλα.
5. Εξετάζοντας στη συνέχεια την 4<sup>η</sup> στήλη (τοπολογία με βάση την βελτιστοποίηση του Floris) του πίνακα προκύπτει ότι αυτή αντιστοιχεί στην στήλη με τις περισσότερες πράσινες τιμές, δηλαδή είναι η στήλη της οποίας η τοπολογία είναι η λιγότερο ευνοϊκή για την εκμετάλλευση του αιολικού πάρκου. Ωστόσο η τιμή που προκύπτει για την τοπολογία αυτή με εφαρμογή του μοντέλου Floris (αυτουνού για το οποίο υπολογίστηκε) είναι η 5<sup>η</sup> καλύτερη του πίνακα.
6. Από τα σχόλια 4 και 5 προκύπτει ότι το μοντέλο Floris υπερεκτιμάει το εκμεταλλεύσιμο δυναμικό του αιολικού πάρκου γιατί πιθανότατα έχει πολύ στενό πεδίο ομόρρου. Αυτό φαίνεται και από την παράγραφο 3.1.8, όπου μόνο 2 A/G βρίσκονται εντός πεδίου ομόρρου, σε αντίθεση με άλλα μοντέλα που έχουν περισσότερες A/G σε πεδίο ομόρρου. Η αιτιολογία είναι πως στην τοπολογία που βελτιστοποιήθηκε με το μοντέλο Floris, όλα τα άλλα μοντέλα έδωσαν πολύ χαμηλά CF. Συνεπώς με βάση την τοπολογία αυτή μόνο το μοντέλο Floris αποδίδει καλά, άρα όταν η τοπολογία αυτή υπολογίζεται με άλλα μοντέλα, υπάρχουν πολλές A/G μέσα σε πεδία ομόρρου. Επίσης το γεγονός ότι σε όλες τις τοπολογίες το μοντέλο Floris δίνει πολύ μεγάλο CF σημαίνει πως A/G οι οποίες αρχικά βρίσκονταν έστω και μερικώς σε πεδίο ομόρρου, όταν υπολογιστούν με το μοντέλο Floris πολύ πιθανόν να μην βρίσκονται πλέον εντός επαγόμενου ομόρρου.
7. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η ανταγωνιστική συμπεριφορά των μοντέλων Jensen και GCL old. Ειδικότερα, η τοπολογία που βελτιστοποιήθηκε για GCL παρουσιάζει τον υψηλότερο LCOE για υπολογισμό με βάση το μοντέλο Jensen και αντίστοιχα ότι η τοπολογία βελτιστοποιημένη για Jensen παρουσιάζει το υψηλότερο LCOE σε υπολογισμό με βάση το GCL.
8. Η προηγούμενη παρατήρηση είναι και ο λόγος για τον οποίο η στήλη του Jensen έχει αθροιστικά το υψηλότερο LCOE, το οποίο θα μπορούσε να είναι ενδεικτικό ότι η τοπολογία που βελτιστοποιήθηκε με βάση τον Jensen είναι η χειρότερη. Η 2<sup>η</sup> χειρότερη τοπολογία είναι η Floris όπως προ λέχθηκε στο σχόλιο 5. Ωστόσο ακριβώς επειδή Jensen και GCL είναι τόσο ανταγωνιστικά μεταξύ τους κρίθηκε σκόπιμο να εξετασθεί το άθροισμα των στηλών Jensen και GCL χωρίς την γραμμή GCL. Τότε



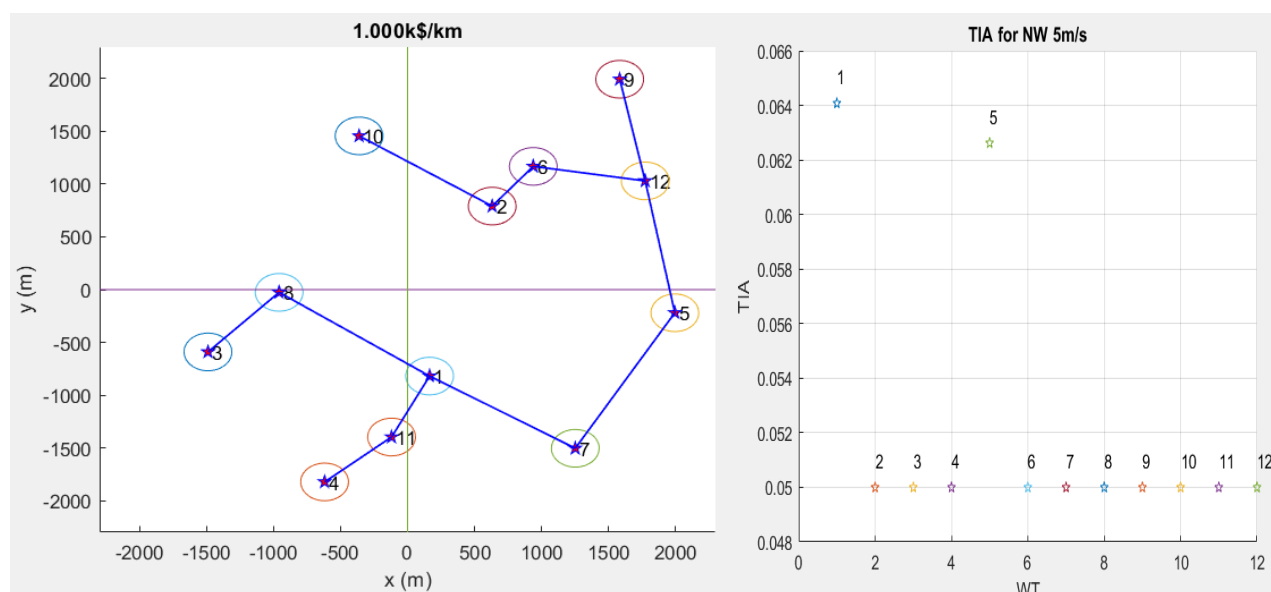
πράγματι η τοπολογία Floris κρίνεται ως η πιο ασύμφορη και ότι έχει ουσιαστικό αποτέλεσμα μόνο αν υπολογιστεί με το εν λόγω μοντέλο της.

9. Το μικρότερο άθροισμα LCOE το εμφανίζει η τοπολογία που δημιουργήθηκε με βάση το μοντέλο Gauss και ακολουθεί αυτή με βάση το μοντέλο Abramovich. Επομένως οι τοπολογίες αυτές κρίθηκαν και ως οι πιο καλές.
10. Η μέθοδος που δίνει τις περισσότερες απώλειες είναι αυτή του Jensen και ακολουθεί αυτή του Abramovich. Το ότι αυτές οι δύο μέθοδοι έχουν παρόμοια αποτελέσματα ενισχύει και τον ισχυρισμό της παραγράφου 3.1.8 καθώς και του σχολίου 3.
11. Το σχόλιο 10 αποδεικνύει το σχόλιο 9. Αυτό συμβαίνει καθώς το μοντέλο Abramovich είναι αυτό που οδηγεί στην χειρότερη εκτίμηση του αιολικού δυναμικού. Επομένως όταν η τοπολογία βελτιστοποιείται με βάση αυτό, οι Α/Γ τείνουν να τοποθετούνται πολύ απομακρυσμένα ώστε να μην βρίσκονται στο διευρυμένο πεδίο ομόρρου που εκτιμάει το Abramovich. Συνεπώς, όταν η ίδια τοπολογία εξετασθεί με βάση άλλα μοντέλα, στα οποία το εύρος ομόρρου είναι μικρότερο, θα υπάρξει μεγαλύτερο CF.

## 4.4 Εξέταση επίδρασης κόστους καλωδίωσης

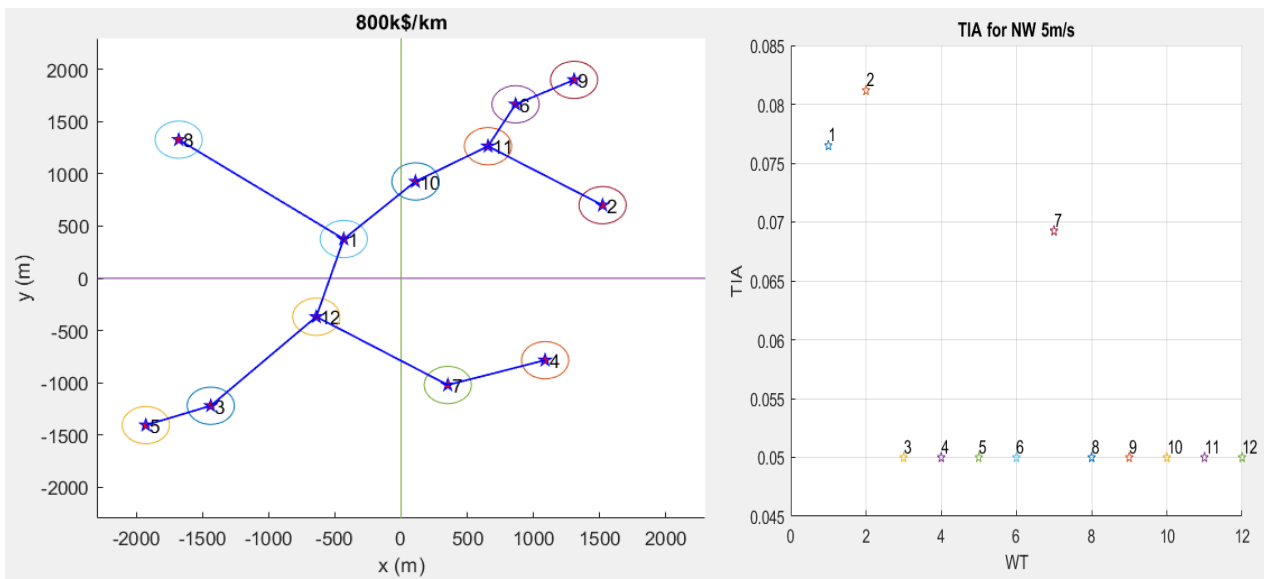
Στόχος της παρούσας ενότητας είναι να εξετασθεί το κατά πόσο επηρεάζεται η τοπολογία του πλωτού αιολικού πάρκου καθώς και οι δείκτες του πάρκου, όταν αλλάζει το κόστος καλωδίου. Όπως έχει ήδη ειπωθεί, το κόστος των καλωδίων εντός του πάρκου ποικίλει σε ένα εύρος από 100k€ ως 1.000k€. Επομένως, μέσα σε αυτό το εύρος θα εξετασθεί κατά πόσον μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα ως προς τα ανωτέρω χαρακτηριστικά. Τέλος, η βελτιστοποίηση αυτή την φορά γίνεται με την μέθοδο του Mixed Variable GA, μοντέλο ομόρρου αποτέλεσε το GCL και κριτήριο τύρβης ήταν η μέγιστη σταθμισμένη TIA να μην ξεπεράσει το 0.07.

### 4.4.1 1.000k€



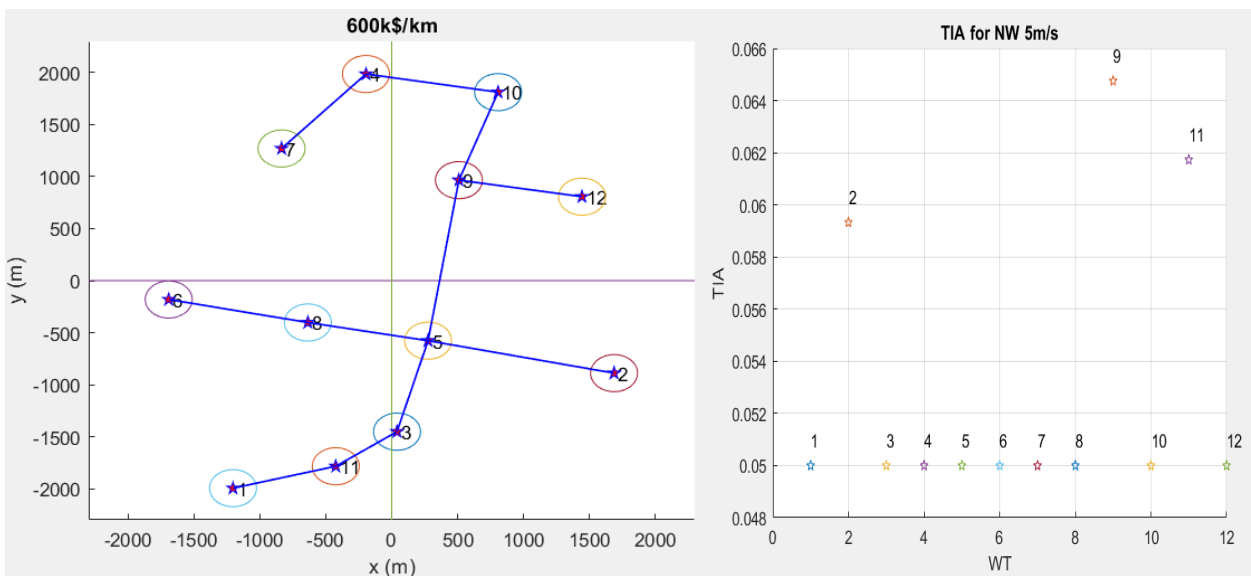
Διάγραμμα 30: Τοπολογία για κόστος καλωδίωσης 1000k€/km

#### 4.4.2 800k€



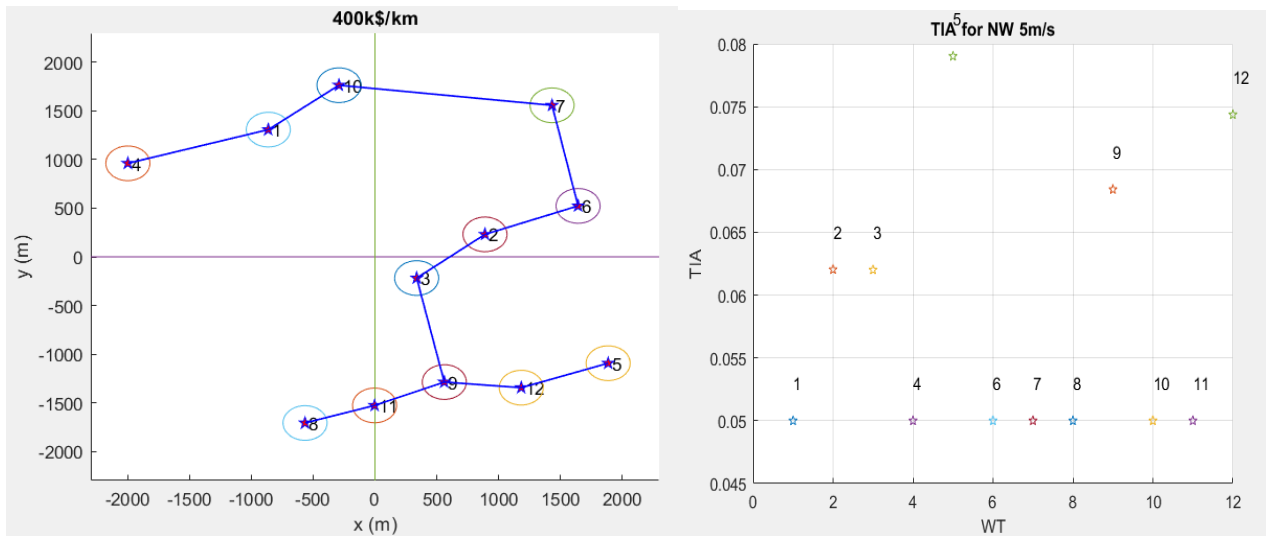
Διάγραμμα 31: Τοπολογία για κόστος καλωδίωσης 800k€/km

#### 4.4.3 600k€



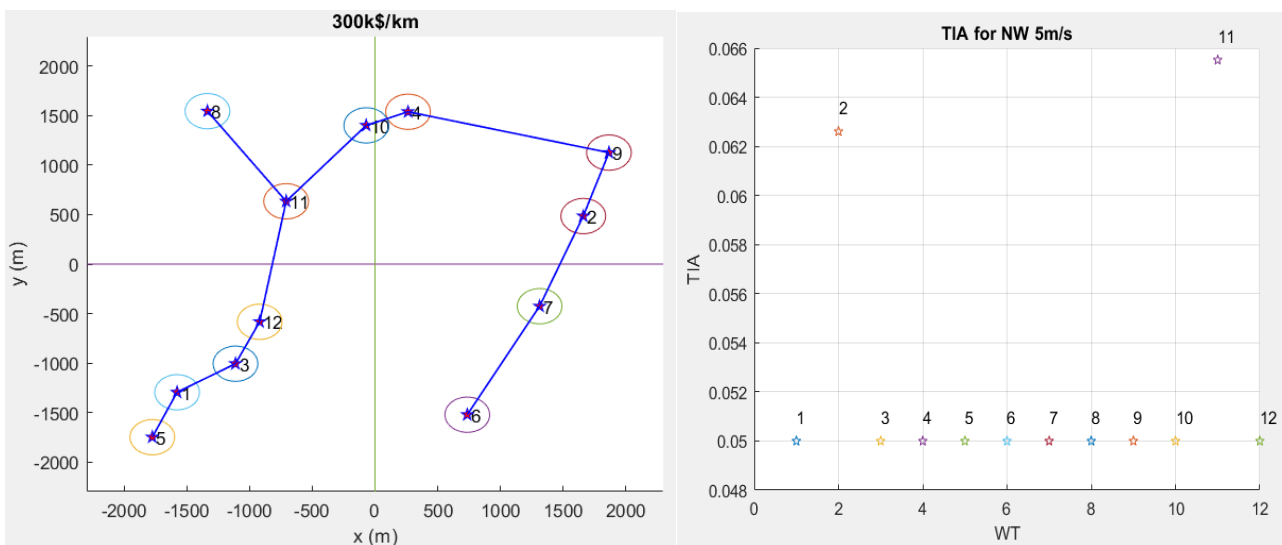
Διάγραμμα 32: Τοπολογία για κόστος καλωδίωσης 600k€/km

#### 4.4.4 400k€



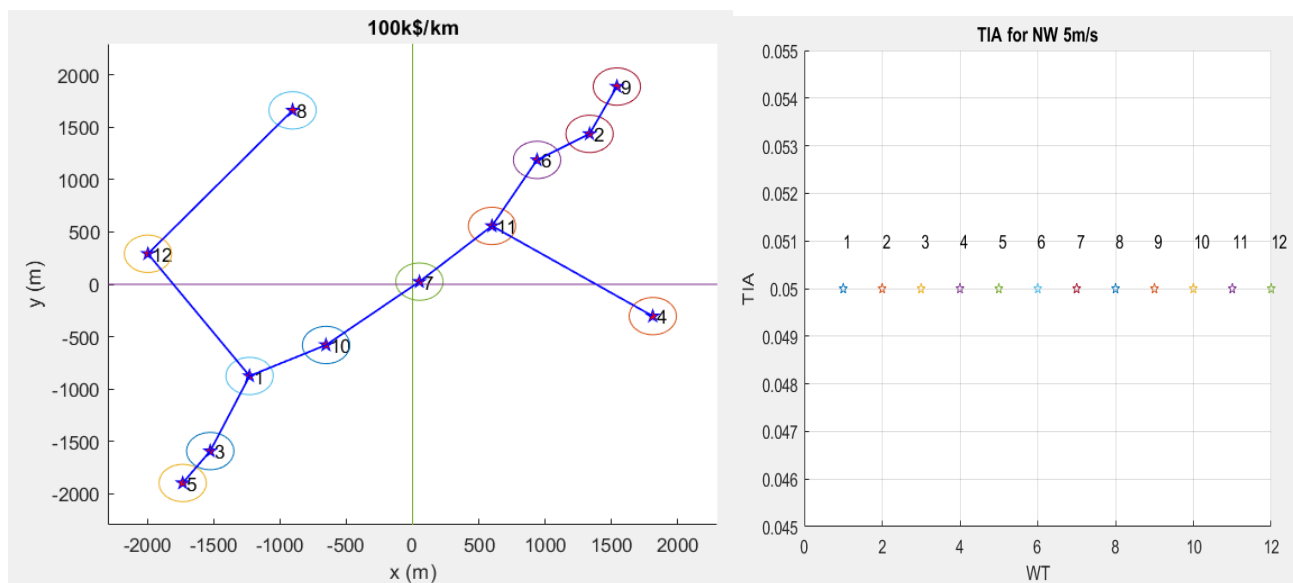
Διάγραμμα 33: Τοπολογία για κόστος καλωδίωσης 400k€/km

#### 4.4.5 300k€



Διάγραμμα 34: Τοπολογία για κόστος καλωδίωσης 300k€/km

#### 4.4.6 100k€



Διάγραμμα 35: Τοπολογία για κόστος καλωδίωσης 100k€/km

#### 4.4.7 Συγκρίσεις

	100k€	300k€	400k€	600k€	800k€	1000k€
CF	0.3595	0.3578	0.3576	0.3588	0.3585	0.3587
AEP (kWh)	3.7787 E+8	3.7609 E+8	3.7586 E+8	3.7713 E+8	3.7685 E+8	3.7705 E+8
Cable length (km)	9.809	9.755	9.902	11.124	9.403	11.003
Capex	2.3222 E+8	2.3417 E+8	2.3520 E+8	2.3791 E+8	2.3876 E+8	2.4224 E+8
LCOE €	0.088579	0.089284	0.089557	0.090002	0.090238	0.091014
Max mean TIA	0.06479	0.06795	0.06086	0.06291	0.06547	0.06210
cable cost/CAPEX	0.422%	1.250%	1.684%	2.805%	3.154%	4.542%

Πίνακας 14: Συγκριτική παρουσίαση του πλωτού αιολικού πάρκου για διάφορες τιμές του καλωδίου

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις εξετασθείσες τιμές προκύπτει ότι δεν μπορεί να εξαχθεί μια σαφής τάση, ούτε ως προς τον συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας του πάρκου, ούτε ως προς το μήκος καλωδίων. Συνοπτικά γίνονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις.

1. Ο μέγιστος βαθμός εκμεταλλευσιμότητας υφίσταται για την περίπτωση με το μικρότερο κόστος καλωδίου. Αυτό εξηγείται καθώς στην μεν φθηνότερη περίπτωση οι Α/Γ χωροθετούνται έτσι ώστε οι απώλειες ομόρρου να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες, μιας και το κόστος καλωδίωσης έχει ελάχιστη συνεισφορά στο LCOE. Πιο συγκεκριμένα οι Α/Γ παρατάσσονται στην διαγώνιο, κάθετα δηλαδή στην κύρια διεύθυνση του ανέμου, με επαρκή πλευρική απόσταση. Όσες δεν χωράνε σε αυτή την 'ευθεία' τοποθετούνται πιο μακριά, σε απόσταση τέτοια ώστε οι κατόντι Α/Γ να βρίσκονται όσο το δυνατόν μακρύτερα.
2. Όσον αφορά τις περιπτώσεις με 300k€/km και 400k€/km, φαίνεται ότι το μήκος καλωδίωσης είναι λίγο λιγότερο από 10km και το LCOE κάτω από 0.09€. Στις περιπτώσεις 600k€/km και 1.000k€/km το μήκος είναι λίγο πάνω από 11km και το LCOE πάνω από 0.09€. Μια εξήγηση που μπορεί να δοθεί είναι πως όταν το καλώδιο είναι φθινό δεν υπάρχει 'ρητή ανάγκη' να είναι πολύ μεγάλη η

απόδοση του αιολικού πάρκου καθώς το κόστος είναι γενικά μικρό και ο βελτιστοποιητής εγκλωβίζεται σε τοπικό ελάχιστο. Όταν όμως το κόστος των καλωδίων είναι μεγαλύτερο, τότε πρέπει να ευρεθούν καλύτερες θέσεις ώστε να γίνεται εκμετάλλευση όλου του αιολικού δυναμικού, για να υπερνικηθούν τα κόστη καλωδίων. Για να γίνει αυτό υπάρχει απομάκρυνση των Α/Γ.

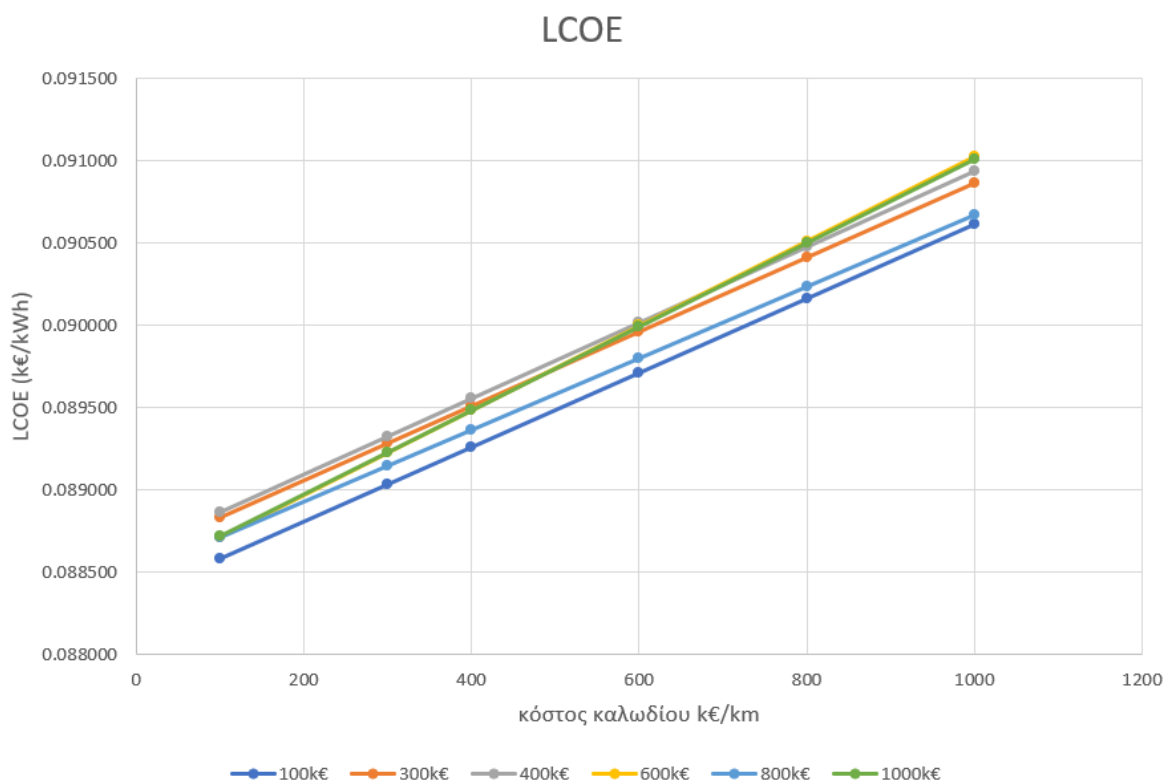
3. Εξετάζοντας την τύρβη στην κύρια διεύθυνση αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλες τις περιπτώσεις αυτή είναι λίγο κάτω από 0.066 ,με εξαίρεση την περίπτωση του φθηνότερου κόστους καλωδίωσης όπου τότε στην κύρια διεύθυνση, όλες οι Α/Γ υφίστανται την ατμοσφαιρική ένταση τύρβης. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι η ευελιξία του φθηνού καλωδίου οδήγησε σε χωροθέτηση τέτοια ώστε να μην υπάρχουν Α/Γ σε πεδίο ομόρρου, κατά την κύρια διεύθυνση.
4. Τέλος η σταθμισμένη ένταση τύρβης μένει σε χαμηλά επίπεδα, κάτω από 0.07 σε όλες τις περιπτώσεις, ενώ δεν μπορεί να εξαχθεί γνησίως μονότονη σχέση μεταξύ κόστους καλωδίωσης και της σταθμισμένης έντασης τύρβης.
5. Ο λόγος κόστος καλωδίου προς συνολικές αρχικές δαπάνες μεγαλώνει όσο μεγαλώνει και το κόστος καλωδίου. Ενδεικτικά όταν αυτό είναι 100κ€/km, αυτό είναι μόλις 0.422% του συνόλου, ενώ όταν το κόστος γίνεται 1000κ€/km, τότε η συνεισφορά είναι στο 4.542% του συνολικού κόστους.

Στη συνέχεια θα ακολουθήσει πίνακας που θα περιέχει το LCOE υπολογισμένο για κάθε κόστος καλωδίου, για όλες τις διατάξεις Α/Γ που αναπτύχθηκαν στην δεδομένη παράγραφο. Πιο συγκεκριμένα, κάθε στήλη θα αντικατοπτρίζει την τοπολογία που προέκυψε από την βελτιστοποίηση ενός συγκεκριμένου κόστους καλωδίου. Ενώ οι γραμμές θα απεικονίζουν το LCOE που προκύπτει αν η δεδομένη τοπολογία υπολογιστεί για το κόστος καλωδίου της κάθε γραμμής. Η χρωματική προσέγγιση απεικονίζει με κόκκινο χρώμα τις υψηλές τιμές και με πράσινο τις χαμηλές.

LCOE							
στήλες τοπολογία γραμμές κόστος	100κ€	300κ€	400κ€	600κ€	800κ€	1000κ€	SUM
100κ€	0.088579	0.088832	0.088868	0.088715	0.088715	0.088724	0.532433
300κ€	0.089032	0.089284	0.089328	0.089229	0.089150	0.089232	0.535256
400κ€	0.089258	0.089510	0.089557	0.089486	0.089368	0.089487	0.536667
600κ€	0.089711	0.089963	0.090017	0.090001	0.089803	0.089996	0.539490
800κ€	0.090164	0.090415	0.090476	0.090515	0.090238	0.090505	0.542312
1000κ€	0.090616	0.090867	0.090935	0.091029	0.090673	0.091013	0.545135
SUM	0.537361	0.538870	0.539181	0.538976	0.537947	0.538957	

Πίνακας 15: Συγκριτική παρουσίαση του LCOE για τις διάφορες τοπολογίες και κόστη καλωδίου

Παρατηρώντας τον ανωτέρω πίνακα είναι φανερό ότι όσο ανεβαίνει το κόστος καλωδίου, τόσο ανεβαίνει και το LCOE. Ο συσχετισμός αυτή την φορά είναι πιο εύληπτος σε σχέση με πριν, καθώς τώρα η κάθε τοπολογία υπολογίζεται για όλα τα δυνατά κόστη. Επομένως η αύξηση είναι πλέον φανερή.



**Διάγραμμα 36: LCOE(€/km) για την τοπολογία που έγινε με βάση τα 400 €/km**

Η γραμμική τάση του ανωτέρω διαγράμματος είναι λογική καθώς στην κάθε τοπολογία παραμένει ίδια η παραγωγή ενέργειας και το σταθερό κόστος των Α/Γ, ενώ αλλάζει μόνο το κόστος του καλωδίου επομένως υπάρχει γραμμική συσχέτιση του κόστους του καλωδίου με το LCOE.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι η τοπολογία που έγινε για τα 800€/km έχει γραφική παράσταση που είναι πολύ πιο κοντά στην τοπολογία για τα 100€/km παρά για τις πιο κοντινές τιμές των 1000€/km ή 600€/km. Αυτό συμβαίνει καθότι η τοπολογία έχει σχεδόν ίδιο CF με τις δύο προαναφερόμενες, το μήκος όμως των καλωδίων είναι αισθητά μικρότερο και έτσι προκύπτει η διαφορά αυτή.

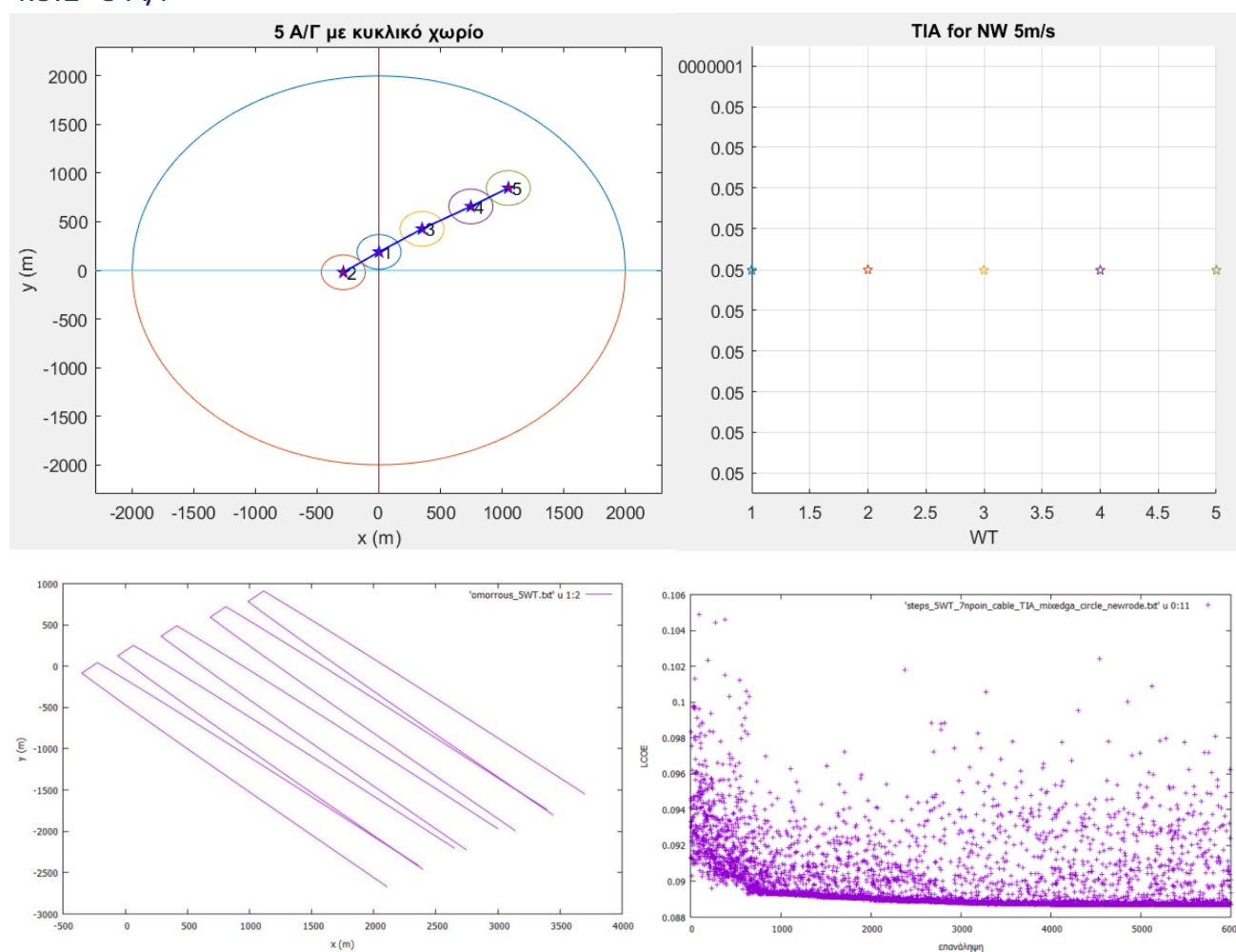
Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι οι τοπολογίες 600€/km, 1000€/km (εφεξής τοπολογίες [α]) είναι πιο φθηνές από τις τοπολογίες 300€/km, 400€/km (εφεξής τοπολογίες [β]), για χαμηλές τιμές του κόστους καλωδίου, ενώ στην συνέχεια είναι ακριβότερες. Αυτό συμβαίνει καθώς όταν το κόστος καλωδίου είναι φθινό [100 €/km, 600€/km] η αυξημένη παραγωγή ενέργειας των τοπολογιών [α] είναι αρκετή για να έχουν φθηνότερο LCOE. Ωστόσο όταν το κόστος καλωδίου αυξηθεί [600€/km, 1000 €/km], τότε η αυξημένη παραγωγή ενέργειας των τοπολογιών [α] δεν μπορεί να υπερνικήσει το αυξημένο κόστος καλωδίωσης λόγω του μεγαλύτερου μήκους της. Έτσι οι τοπολογίες [α] αν και έχουν μικρότερη παραγωγή ενέργειας, λόγω του λιγότερου κόστους καλωδίου είναι φθηνότερες σε αυτό το πεδίο τιμών.

Συνοπτικά, το ότι η αύξηση κόστους καλωδίωσης δεν έφερε μικρότερο μήκος καλωδίωσης οφείλεται στο γεγονός ότι ο λόγος κόστος καλωδίου/CAPEX είναι πολύ μικρός επομένως η βελτιστοποίηση γίνεται «αναίσθητη» στην παράμετρο αυτή. Το ότι στα φθηνά κόστη το πάρκο δεν έχει πάντα καλύτερο CF αποδίδεται στο ότι αν και η βελτιστοποίηση έχει συγκλίνει, πιθανόν, να παγιδεύτηκε σε κάποιο τοπικό ελάχιστο.

## 4.5 Ίδιο χωρίο με διαφορετικό αριθμό Α/Γ

Στην παρούσα παράγραφο θα εξετασθούν η χωροταξία, το μήκος καλωδίου, η εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού, το κόστος της παραγόμενης ενέργειας καθώς και η τύρβη αν τα όρια του χωρίου κρατηθούν σταθερά και αλλάζει το πλήθος των Α/Γ. Μέθοδος βελτιστοποίησης θα αποτελεί η Mixed Variable GA, μοντέλο υπολογισμού ομόρρου του GCL old και ο άνεμος θα πνέει σύμφωνα με το ρόδο αναφοράς. Επίσης, εξαιτίας του περιορισμένου χώρου το όριο της τύρβης σε αυτή την περίπτωση θα είναι πιο χαλαρό, ώστε να μπορέσει να βρει λύσεις ο αλγόριθμος. Επομένως θα ελεγχθεί να είναι η μέγιστη σταθμισμένη τύρβη των Α/Γ μικρότερη από 0.10. Τέλος στην παράγραφο αυτή θα παρουσιασθούν και διαγράμματα σύγκλισης, όπου ο κάθετος άξονας θα είναι το LCOE και ο οριζόντιος θα αποτελεί το πλήθος των τρεξιμάτων του κώδικα.

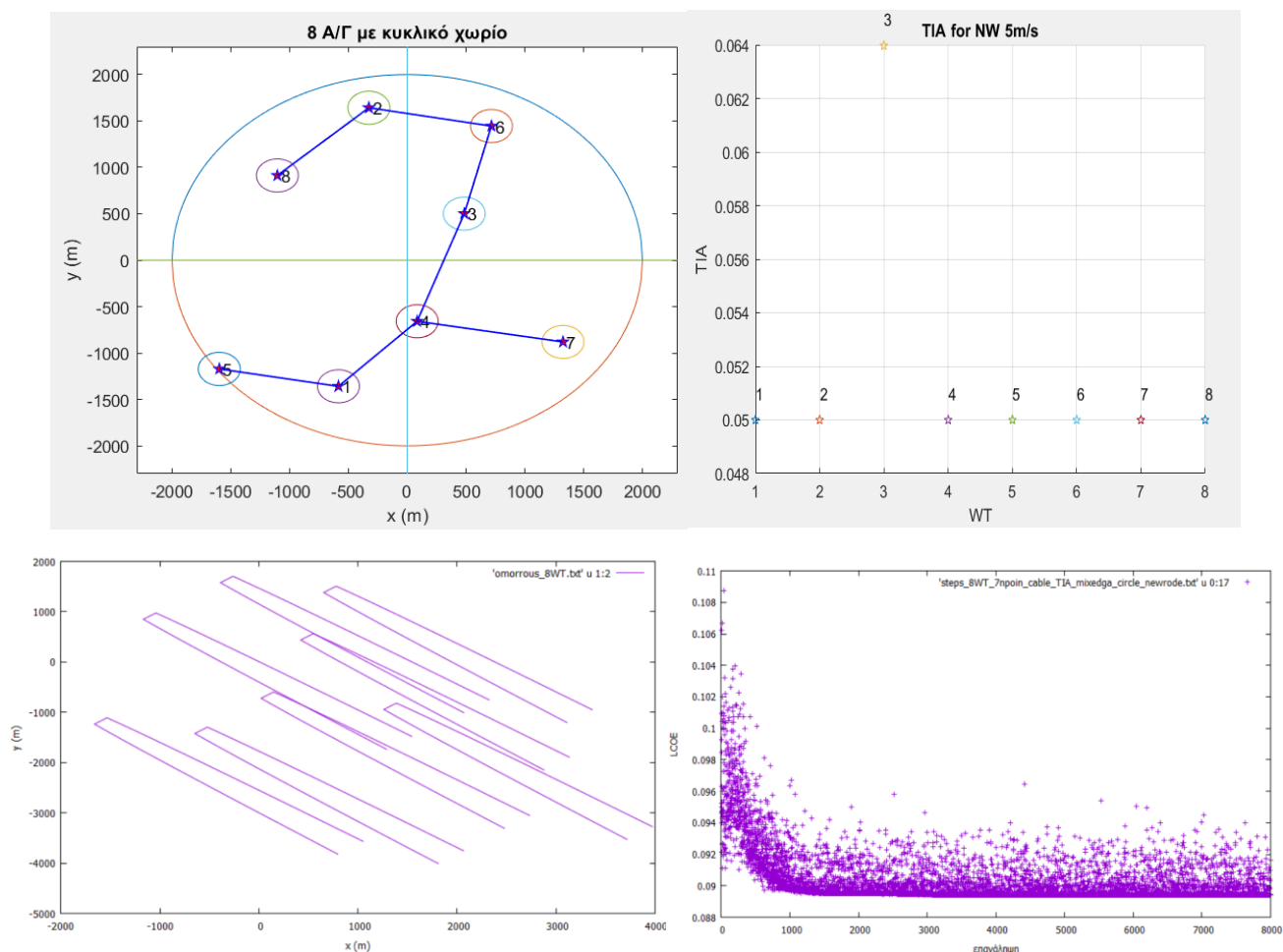
### 4.5.1 5 Α/Γ



Διάγραμμα 37: 5 Α/Γ σε κυκλικό όριο

Για την εξεταζόμενη περίπτωση είναι πασιφανής η δημιουργία ενός μετώπου Α/Γ οι οποίες είναι στοιχισμένες σε μια ευθεία κάθετη προς την κύρια διεύθυνση του ανέμου. Επίσης έχουν έρθει όσο το δυνατόν κοντύτερα γίνεται, δηλαδή απέχοντας πλευρικά 2D (το οποίο φαίνεται καθώς εφάπτονται οι κύκλοι ακτίνας 1D, συνεπώς όταν αυτοί εφάπτονται τα κέντρα απέχουν δύο ακτίνες, δηλαδή 2D) όσος και ο περιορισμός που έχει εισαχθεί. Προφανώς στην κύρια διεύθυνση η ένταση τύρβης είναι ίση με την ατμοσφαιρική και επιτυγχάνεται πολύ καλή εκμετάλλευση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού.

## 4.5.2 8 Α/Γ

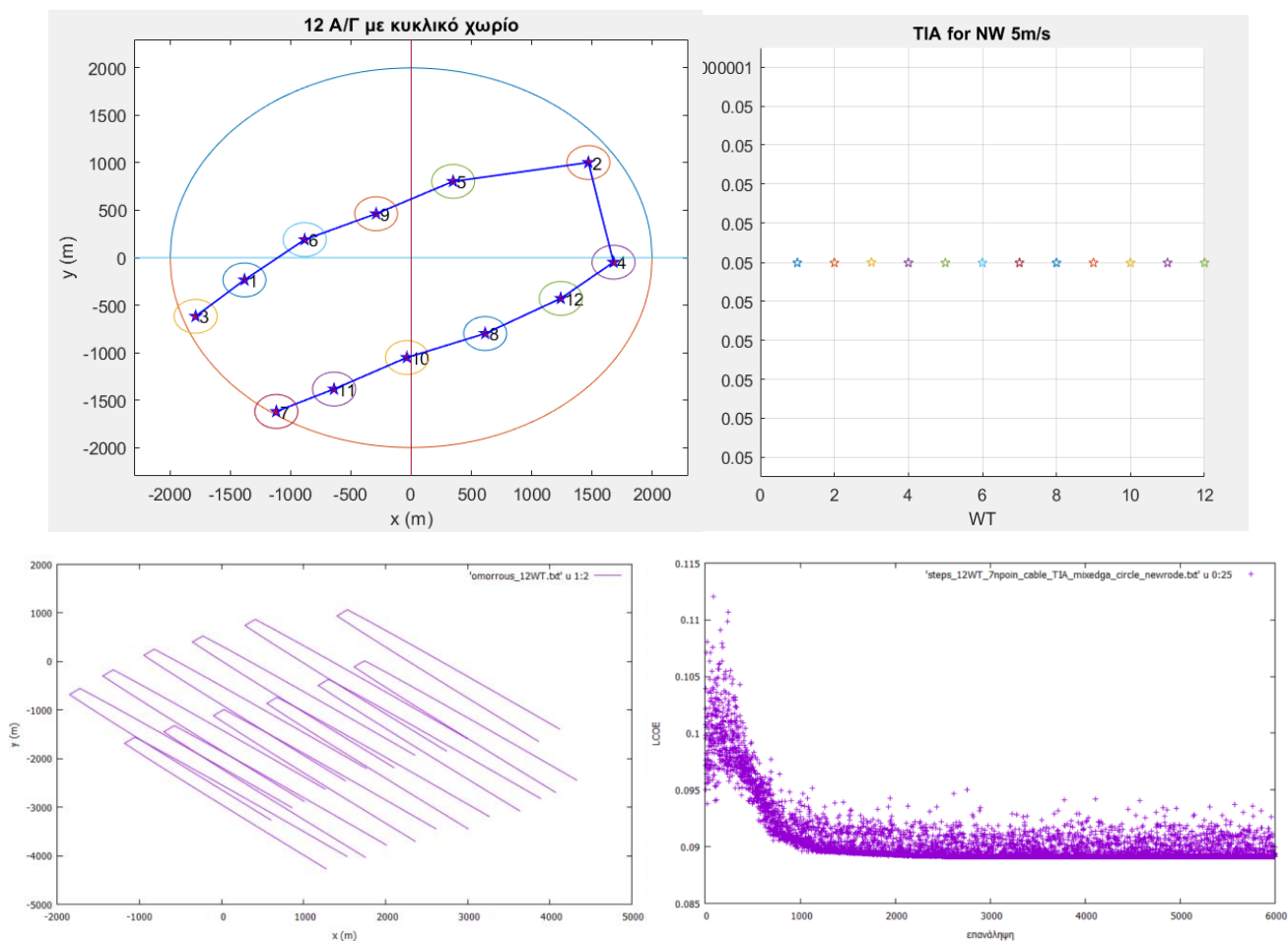


Διάγραμμα 38: 8 Α/Γ σε κυκλικό όριο

Είναι εμφανές ότι μόνο μια Α/Γ βρίσκεται σε πεδίο ομόρρου στην κύρια διεύθυνση και αυτή οριακά. Ειδικότερα, η ένταση τύρβης είναι αρκετά χαμηλή καθώς ίσα που ακουμπάει το άκρο της Α/Γ το άκρο του πλευρικού ομόρρου της άλλης. Επομένως μόνο ένα από τα σημεία στα οποία έχει χωρισθεί η Α/Γ δέχεται τύρβη, το οποίο διαιρούμενο δια το πλήθος των σημείων που έχει η Α/Γ, δίνει αυτή την χαμηλή τιμή. Επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι στην περίπτωση αυτή δεν έχουν δημιουργηθεί σαφή μέτωπα, το οποίο αποδίδεται στο ότι οι Α/Γ είναι λιγότερες και άρα η καλή εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού είναι δυνατή ακόμα και με πιο άναρχες θέσεις. Επίσης συγκρίνοντας με το Διάγραμμα 37 προκύπτει το εύλογο ερώτημα γιατί δεν υπήρξε και εδώ η δημιουργία ενός μετώπου όπως πριν. Όπως δηλώνει το διάγραμμα σύγκλισης, η μη δημιουργία μετώπου δεν οφείλεται στο ότι δεν έχει συγκλίνει ο κώδικας, αλλά στην παγίδευση του πεδίου λύσεων σε τοπικό ελάχιστο. Αυτή η παγίδευση είναι αρκετά πιθανή, καθώς ήδη το CF του πάρκου είναι πολύ κοντά με το CF της μίας Α/Γ, επομένως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ήδη η μέγιστη δυνατή. Συνυπολογίζοντας ότι το κόστος των καλωδίων είναι πολύ μικρό ως προς το αρχικό κεφάλαιο, συνάγεται το συμπέρασμα ότι ο βελτιστοποιητής καθίσταται αναισθητός στην μικρή μεταβολή που επιφέρει το αυξημένο κόστος καλωδίων και άρα είναι εύκολη η παγίδευση σε τοπικό ελάχιστο.



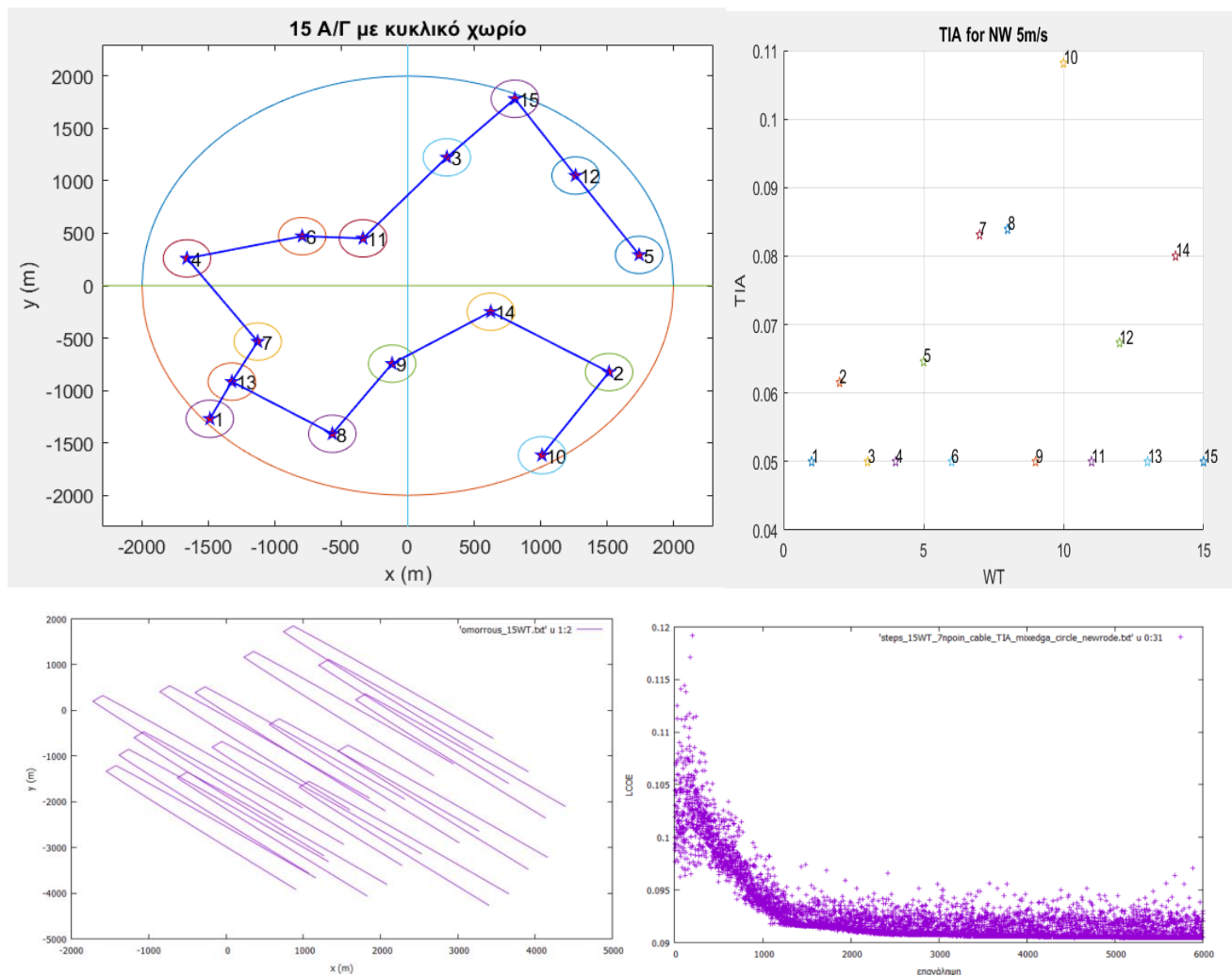
### 4.5.3 12 Α/Γ



Διάγραμμα 39: 12 Α/Γ σε κυκλικό όριο

Στην περίπτωση αυτή παρουσιάζει ενδιαφέρον ότι τα 2 μέτωπα που δημιουργήθηκαν είναι φτιαγμένα έτσι ώστε στην κύρια διεύθυνση να μην υπάρχει καμία Α/Γ μέσα σε πεδίο ομόρρου. Τα δύο μέτωπα απέχουν μεταξύ τους 7D ως 8D, το οποίο συνάδει με το γεγονός ότι στα πρώτα αιολικά πάρκα οι Α/Γ τοποθετούνταν με αποστάσεις 7D ως 8D κατά μήκος και κατά πλάτος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι οι Α/Γ δεν τοποθετήθηκαν όσο το δυνατόν μακρύτερα π.χ. στα όρια του 2<sup>ου</sup> και του 4<sup>ου</sup> τεταρτημόριου, καθώς τότε αναγκαστικά θα υπήρχε επίδραση ομόρρου καθώς και μεγαλύτερο μήκος καλωδίου. Με αυτόν τρόπο επιτυγχάνεται άριστη εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού, με αποτέλεσμα η τοπολογία αυτή έχει το χαμηλότερο κόστος ενέργειας από όλες τις τοπολογίες που εξετάσθηκαν με το κυκλικό όριο και τις 12 Α/Γ. Αυτό δείχνει ότι αν η βελτιστοποίηση γίνει πιο ελεύθερη χωρίς αυστηρούς περιορισμούς τύρβης, τότε ο βελτιστοποιητής οδηγείται σε καλύτερες θέσεις. Αξίζει δε να σημειωθεί ότι και πάλι το επίπεδο τύρβης είναι πολύ χαμηλό, παρά το γεγονός ότι ο περιορισμός τύρβης ήταν λιγότερο ‘αυστηρός’.

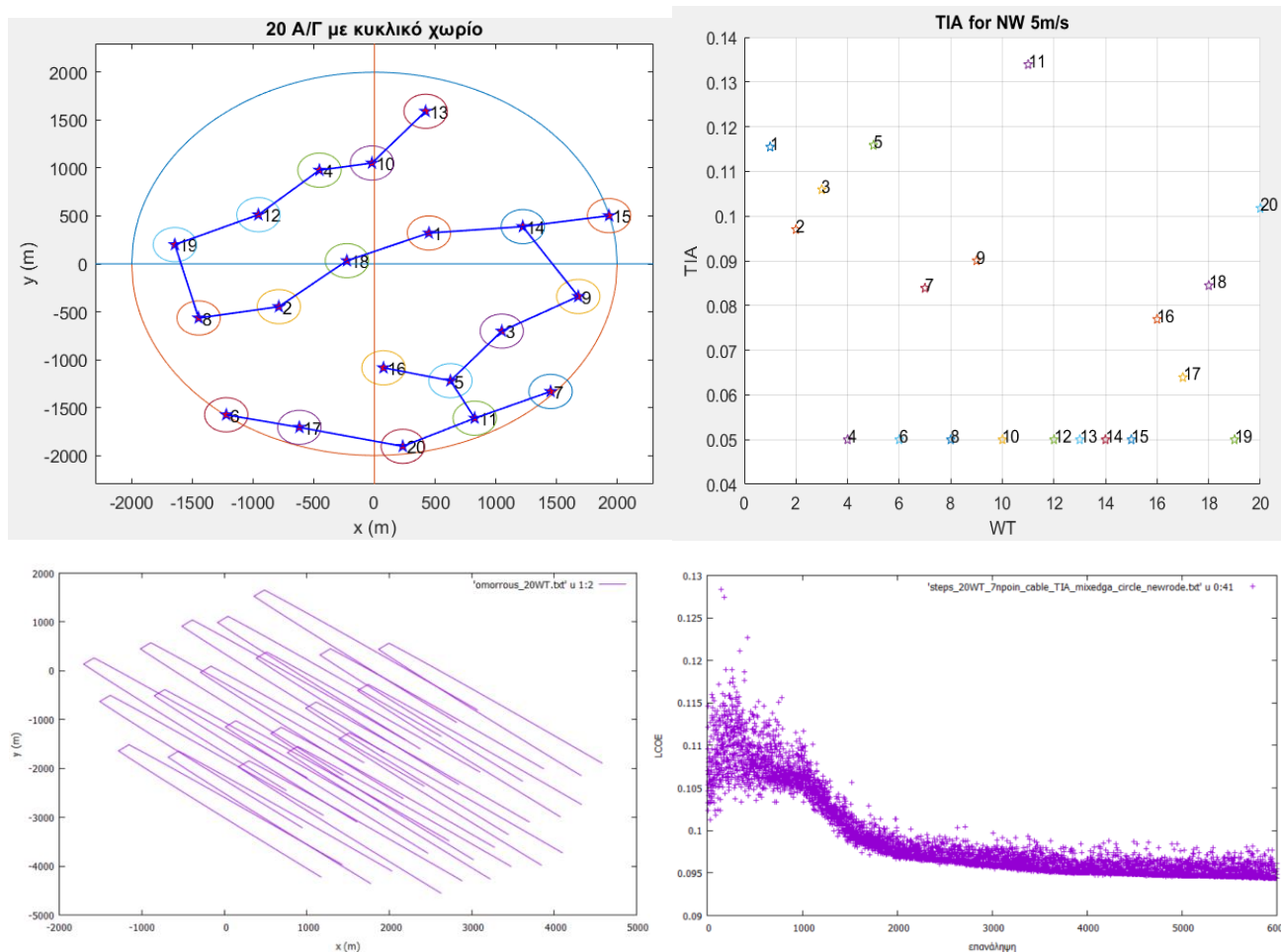
#### 4.5.4 15 Α/Γ



Διάγραμμα 40: 15 Α/Γ σε κυκλικό όριο

Στο σχήμα αυτό είναι ξεκάθαρη η δημιουργία 3<sup>ων</sup> μετώπων κάθετα στην κύρια κατεύθυνση του ανέμου. Τα μέτωπα αυτά είναι: Πρώτο=[1,13,7,4,6,11,3,15], δεύτερο=[8,9,14,12] και τρίτο=[10,2,5]. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι η 4<sup>η</sup> Α/Γ είναι πιο μπροστά από τις άλλες Α/Γ του 1<sup>ου</sup> μετώπου, το οποίο αποδίδεται στο ότι αν η 4<sup>η</sup> και η 6<sup>η</sup> ήταν συνευθειακές με τις 1,13 και 7 τότε η 9 θα ήταν εντός πεδίου ομόρρου, κάτι που δεν συμβαίνει στην παρούσα διάταξη. Επίσης φαίνεται ότι πάνω από τις μισές Α/Γ βρίσκονται μέσα σε πεδίο ομόρρου άλλης Α/Γ, ενώ στην προηγούμενη περίπτωση καμία Α/Γ δεν βρισκόταν εντός ομόρρου. Συνάγεται λοιπόν το συμπέρασμα ότι ο χώρος είναι πλέον ‘κορεσμένος’ και ότι περαιτέρω αύξηση θα μειώσει ακόμα περισσότερο το CF, οδηγώντας σε ακριβότερη τιμή ενέργειας. Ότι ο χώρος έχει πλέον κορεσθεί φαίνεται και από το ότι ο CF αρχίζει να μειώνεται.

## 4.5.5 20 Α/Γ



Διάγραμμα 41: 20 Α/Γ σε κυκλικό όριο

Στο διάγραμμα αυτό είναι ξεκάθαρη η δημιουργία 3 μετώπων κάθετα σχεδόν στην κύρια διεύθυνση του ανέμου. Τα μέτωπα έχουν μεταξύ τους αποστάσεις 4D ως 6D, κάτι το οποίο συνάδει και με την θεώρηση ότι μετά την απόσταση 5D ενδείκνυται η κατάντι τοποθέτηση Α/Γ. Επίσης όπως είναι αναμενόμενο αρκετές Α/Γ βρίσκονται εντός πεδίου ομόρρου, μιας και ο χώρος είναι περιορισμένος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι η 11<sup>η</sup> Α/Γ παρότι απέχει περίπου 2.5D από την 5<sup>η</sup> έχει τύρβη 0.135 το οποίο είναι χαμηλό νούμερο για τόσο κοντινή απόσταση. Όσον αφορά την σύγκλιση, παρατηρείται ότι αυτή έρχεται πιο αργά σε σχέση με προηγούμενα διαγράμματα και ότι δεν υπάρχει μεγάλη διασπορά των θέσεων που εξετάζονται. Αυτό συμβαίνει καθώς η εύρεση των βέλτιστων τοποθεσιών αργεί να γίνει και όταν γίνει λόγω του μεγάλου πλήθους των Α/Γ μέσα στο χωρίο αυτό, δεν υπάρχουν πολλές θέσεις που να έχει νόημα να εξετασθούν, άρα υπάρχει μικρή διασπορά.

#### 4.5.6 Σύγκριση

	5 Α/Γ	8 Α/Γ	12 Α/Γ	15 Α/Γ	20 Α/Γ
CF	0.3595	0.3594	0.3593	0.3511	0.3273
ΑΕΡ (kWh)	1.5746 E+8	2.5189 E+8	3.7769 E+8	4.6139 E+8	5.7337 E+8
Cable length (km)	1.596	7.585	8.032	11.246	13.110
Capex €	9.6988 E+7	1.5719 E+8	2.3445 E+8	2.9806 E+8	3.9064 E+8
LCOE €	0.088703	0.089407	0.089120	0.091318	0.094400
Max mean TIA	0.05852	0.05800	0.06315	0.08050	0.07338
Mean mean TIA	0.05573	0.05368	0.05552	0.06001	0.06312
Stdv mean TIA	0.00341	0.00276	0.00348	0.00830	0.00747
Κόστος καλωδίου/CAPEX	0.66%	1.93%	1.37%	1.51%	1.34%

Διάγραμμα 42: Σύγκριση ως προς το πλήθος των Α/Γ

Από τον πίνακα αυτόν προκύπτουν ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις οι οποίες θα εξεταστούν στην πορεία:

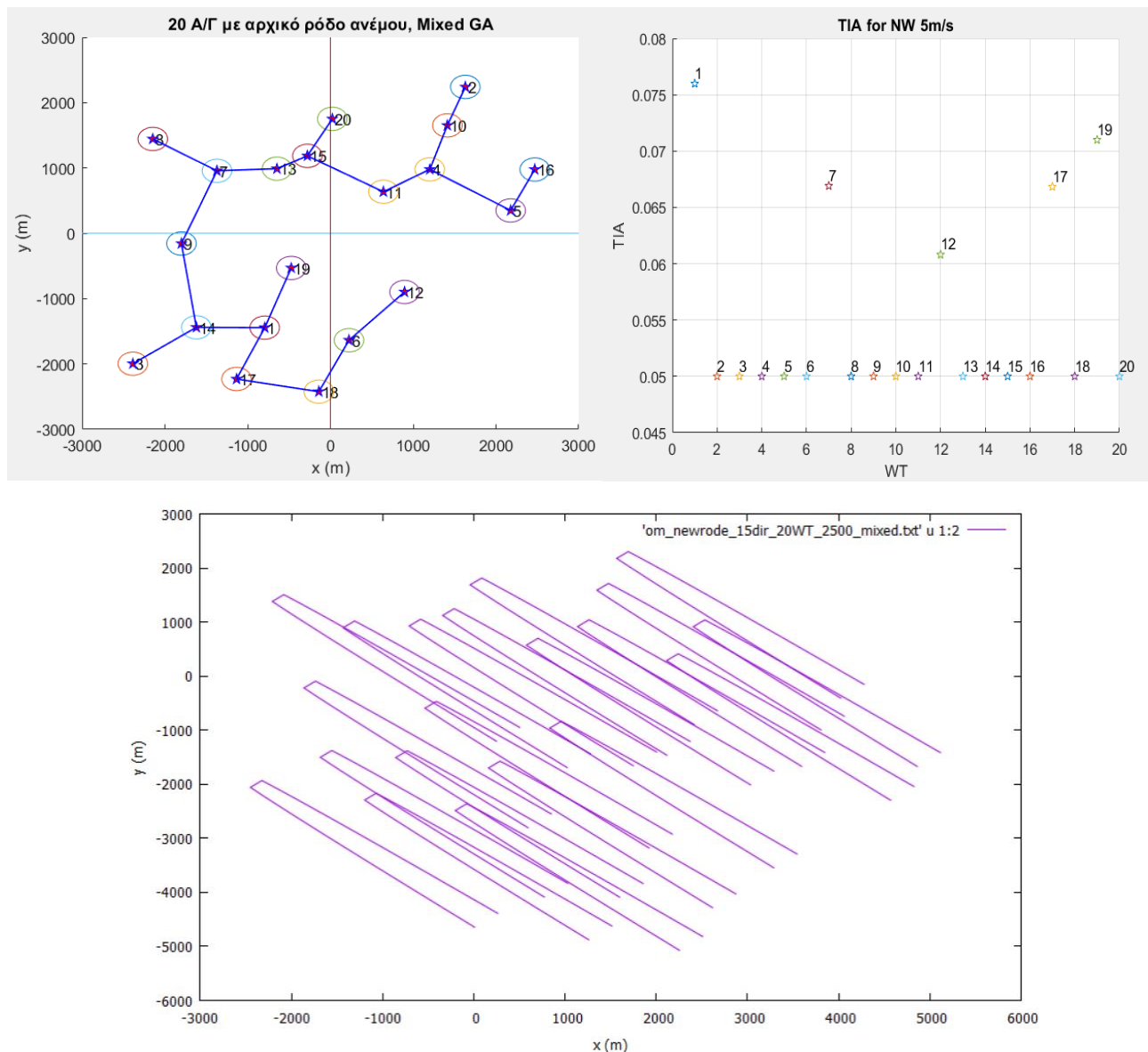
1. Όταν το χωρίο είναι περιορισμένο, τότε όσο αυξάνει ο αριθμός των Α/Γ τόσο μειώνεται ο CF. Αυτό συμβαίνει καθώς οι Α/Γ δεν δύναται να τοποθετηθούν σε θέσεις που να μην επηρεάζουν η μία την άλλη και επομένως υπάρχει επαγόμενο πεδίο ομόρρου.
2. Το LCOE αυξάνεται για μεγαλύτερο πλήθος Α/Γ, μετά το όριο κορεσμού του χώρου. Όπου όριο κορεσμού σημαίνει, το μέγιστο πλήθος Α/Γ για το οποίο το  $CF_{\text{park}} \approx CF_{1\text{wt}}$ . Αυτό προκύπτει καθώς αν οι Α/Γ του πάρκου είναι  $N_{\text{park}} > N_{\text{κορεσμού}}$ , τότε το CF πέφτει αρκετά γρήγορα και άρα το LCOE αυξάνεται. Αντίθετα, αν οι Α/Γ είναι  $N_{\text{park}} < N_{\text{κορεσμού}}$ , τότε επειδή οι διαφορές στο CF είναι αμελητέες το παραπάνω κόστος καλωδίου που προκύπτει για μικρές διαφορές στην χωροθέτηση έχει αισθητή επίδραση στο LCOE.
3. Ο λόγος του κόστους καλωδίωσης προς το συνολικό CAPEX δεν έχει κάποια τάση, ωστόσο κυμαίνεται μεταξύ 1.3% και 2%. Ο λόγος που δεν υπάρχει τάση είναι ότι το κόστος καλωδίωσης είναι πολύ μικρό. Συνεπώς παρότι και το μήκος του καλωδίου και το CAPEX έχουν αύξουσα τάση για αυξανόμενο αριθμό Α/Γ, ο λόγος τους δεν είναι γραμμικός και άρα μπορεί να υπάρχουν διακυμάνσεις. Τέλος στην περίπτωση με τις 5 Α/Γ ο λόγος αυτός είναι ακόμα μικρότερος, το οποίο γίνεται καθώς οι Α/Γ έχουν την επιλογή να τοποθετηθούν σειριακά και άρα να μειωθεί πάρα πολύ το μήκος του καλωδίου.
4. Η μέση σταθμισμένη TIA αυξάνεται για αυξανόμενο πλήθος Α/Γ, το οποίο είναι λογικό καθώς υπάρχουν παραπάνω αλληλεπιδράσεις. Η παρατήρηση αυτή δεν ισχύει για την περίπτωση των 5 Α/Γ καθώς οι Α/Γ δεν έχουν αρκετό χώρο πλευρικά τους για να πέφτει η μέση σταθμισμένη TIA. Όσον αφορά την μέγιστη σταθμισμένη TIA αυτή δεν ακολουθεί την προαναφερθείσα συμπεριφορά, το οποίο συμβαίνει καθώς σε κάποιες τοπολογίες είναι πολύ πιθανόν μια Α/Γ να 'θυσιασθεί' προκειμένου οι άλλες να αποδίδουν καλά. Συνεπώς είναι και λίγο τυχαίο το αν θα υπάρχει μια Α/Γ που θα δέχεται αρκετά παραπάνω φόρτιση σε σχέση με τις υπόλοιπες.
5. Παρατηρώντας τα διαγράμματα σύγκλισης είναι εμφανές ότι όσο περισσότερες είναι οι Α/Γ τόσο πιο αργά γίνεται η σύγκλιση και τόσο μειώνεται το εύρος των εξεταζόμενων θέσεων που αποκλίνουν πολύ από το βέλτιστο.

## 4.6 Σύγκριση δύο ρόδων για 20 Α/Γ

### 4.6.1 Ρόδο Αναφοράς

Ακολούθως θα παρουσιασθούν δύο τοπολογίες όπως αυτές προέκυψαν για το ρόδο αναφοράς, για 20 Α/Γ, σε όρια [-2500, 2500], με δύο διαφορετικές μεθόδους βελτιστοποίησης και με μοντέλο ομόρρου το GCL.

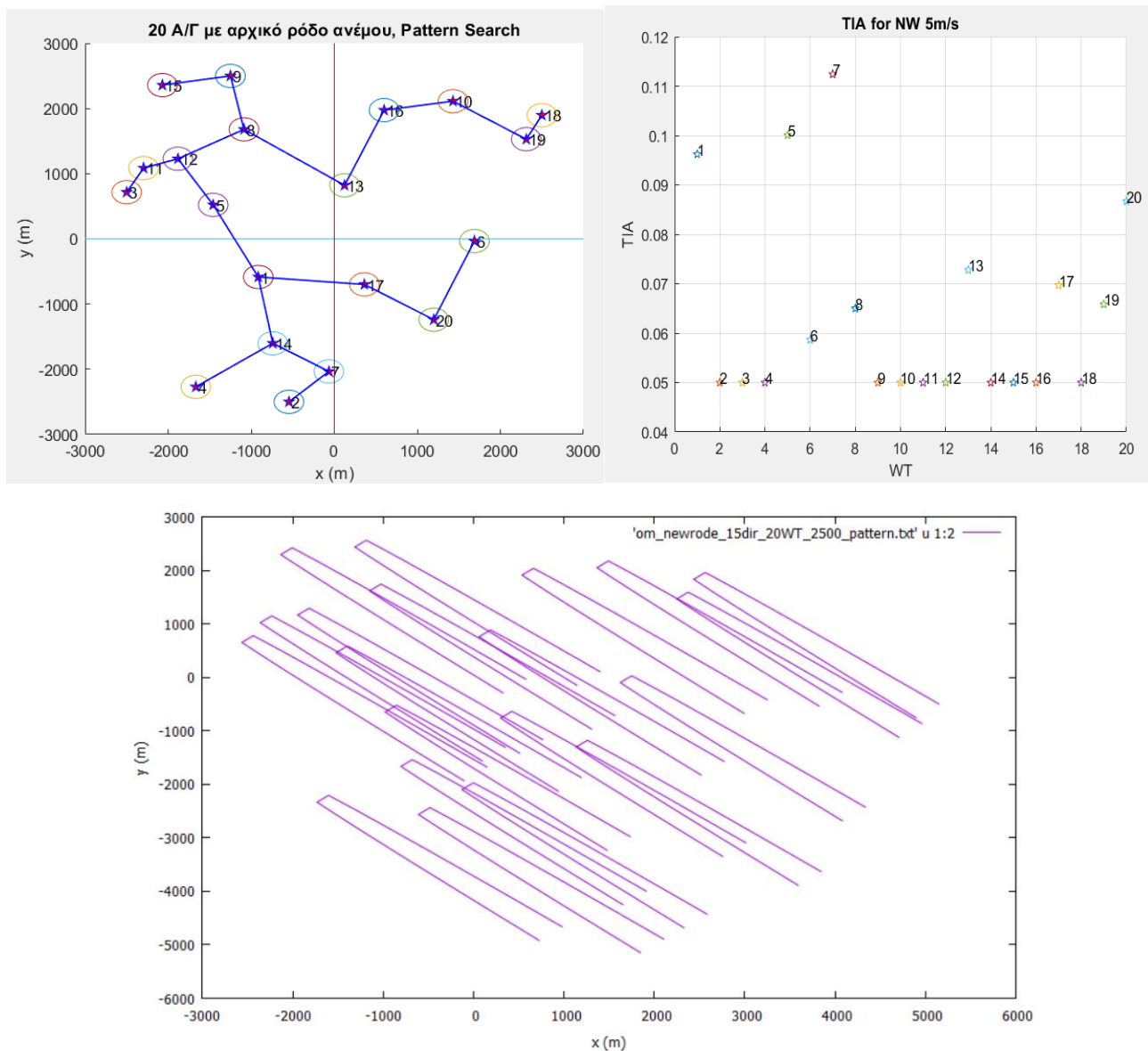
#### 4.6.1.1 *Mixed Variable GA*



Διάγραμμα 43: Βελτιστοποίηση με *Mixed Variable GA* για 20 Α/Γ με το ρόδο αναφοράς και κριτήριο μέγιστης σταθμισμένης TIA

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα του ομόρρου οι περισσότερες Α/Γ τοποθετούνται στην κύρια διεύθυνση σε θέσεις ώστε να μην είναι μέσα σε πεδία ομόρρου άλλων Α/Γ. Πράγματι, συγκρίνοντας με το διάγραμμα της έντασης τύρβης για 5m/s στην κύρια διεύθυνση προκύπτει ότι οι Α/Γ που έχουν TIA πάνω από την ατμοσφαιρική βρίσκονται έστω και μερικώς σε πεδίο ομόρρου και πώς όσο λιγότερο βρίσκονται τόσο μικρότερη και η TIA.

#### 4.6.1.2 Pattern Search



Διάγραμμα 44: Βελτιστοποίηση με Pattern Search για 20 Α/Γ με το ρόδο αναφοράς και κριτήριο μέγιστης σταθμισμένης ΤΙΑ

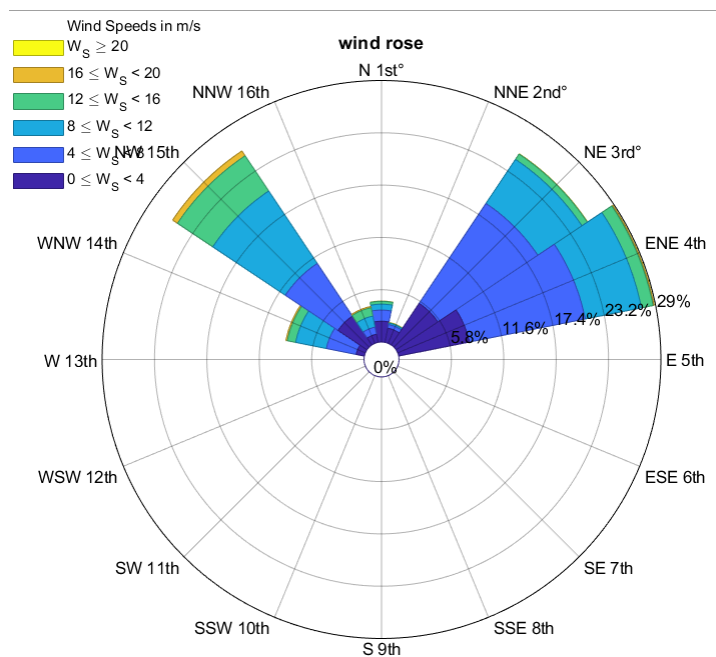
Στην περίπτωση αυτή φαίνεται ότι παρόλο που έχει συγκλίνει ο κώδικας, υπάρχουν αρκετές Α/Γ μέσα στο πεδίο ομόρρου άλλων Α/Γ στην κύρια διεύθυνση. Αξιοσημείωτο είναι πως από ότι φαίνεται πιο σημαντικό είναι για την τύρβη το πόσο κοντά είναι η Α/Γ που επάγει τον ομόρρου με αυτή που τον δέχεται και όχι πόσο μέρος της καλύπτεται. Για παράδειγμα θα συγκριθεί η τύρβη της 7 με την 1. Από την μία η 1 είναι σε πεδίο ροής και της 3 και της 11, έχοντας αποστάσεις 11 και 12 διαμέτρους αντίστοιχα, συν από ότι φαίνεται σχεδόν τα 2/3 της 1 είναι εντός του πεδίου ομόρρου. Από την άλλη η 7 απέχει από την 14 μόλις 5 διαμέτρους και με βάση το σχήμα, το πολύ το 1/5 της βρίσκεται εντός του πεδίου ομόρρου. Εν τέλει, η 7<sup>η</sup> Α/Γ έχει μεγαλύτερη ΤΙΑ από την 1<sup>η</sup> Α/Γ.



## 4.6.2 Καινούριο Ρόδο

Στο κομμάτι αυτό θα εξετασθεί κατά πόσο θα αλλάξει η τοπολογία των Α/Γ καθώς και τα τεχνικοοικονομικά χαρακτηριστικά του πλωτού αιολικού πάρκου, αν η τοποθεσία έχει άλλο ρόδο ανέμου. Θα εξετασθεί λοιπόν μια τοποθεσία στην οποία το ρόδο ανέμου δεν θα είναι αντιδιαμετρικό όπως στην περίπτωση αναφοράς, αλλά οι κατευθύνσεις θα είναι σχεδόν κάθετες. Αυτό αναμένεται να έχει ως αποτέλεσμα να μην μπορούν οι Α/Γ να βρίσκονται σε μέτωπα κάθετα στην κύρια διεύθυνση όπως γινόταν πριν, αλλά να πρέπει να βρεθούν άλλες, πιο 'ακανόνιστες' θέσεις.

Για να εξαχθούν συγκρίσιμα αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν μετρήσεις οι οποίες έχουν ίδια μέση τιμή και διασπορά όσον αφορά την ταχύτητα, με σημαντική ωστόσο διαφορά στο ρόδο ανέμου. Πιο συγκεκριμένα, η συγκεκριμένη θέση έχει μέση τιμή ανέμου  $\bar{u} = 6.989 \frac{m}{s}$  και τυπική απόκλιση  $\sigma = 3.667 \frac{m}{s}$ . Επομένως προκύπτουν και ίδιοι συντελεστές  $k$ ,  $c$ , οι οποίοι έχουν την τιμή  $k = 2.014$  και  $c = 7.886 \frac{m}{s}$ .



Διάγραμμα 45: Ρόδο ανέμου καινούριου case study (Pereira 2020)

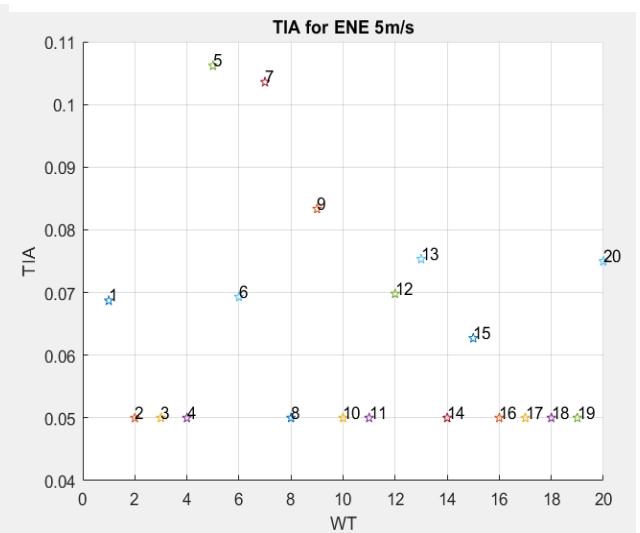
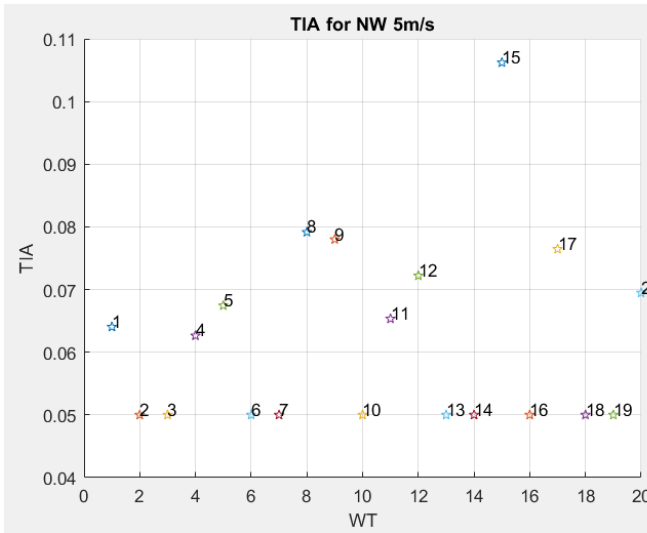
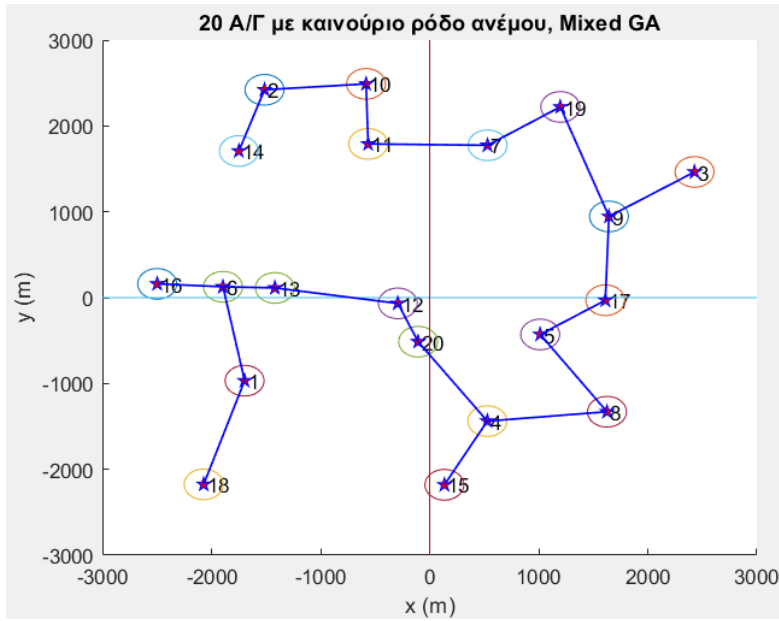
Με βάση αυτά τα ανεμολογικά δεδομένα προκύπτουν τα εξής στοιχεία για την παραγωγή ενέργειας από την Α/Γ:

$$LCOE = 0.0883469 \text{ €}$$

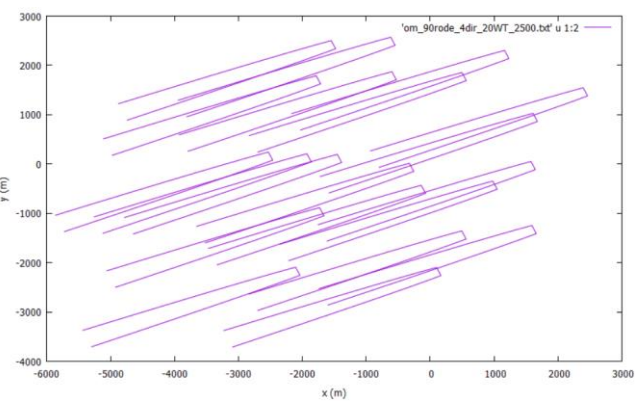
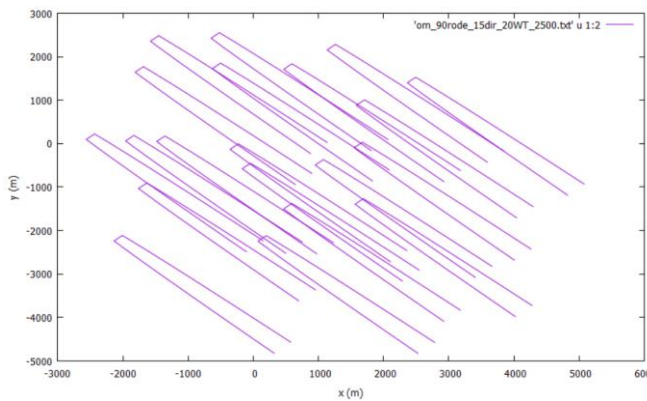
$$AEP = 3.14929 \text{ E+7}$$

$$CF = 0.359507$$

Οι ελάχιστες διαφορές που παρατηρούνται στις τιμές αυτές συγκριτικά με το ρόδο ανέμου αναφοράς οφείλονται στο γεγονός ότι τα ανεμολογικά δεδομένα είναι διαφορετικά, απλά η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση είναι ίδιες στα σημαντικά ψηφία τα οποία παρατίθενται ανωτέρω. Αν δίνονταν περισσότερα δεκαδικά θα υπήρχαν διαφορές και εκεί.



Διάγραμμα 46: Βελτιστοποίηση με Mixed Variable GA για 20 Α/Γ με το καινούριο ρόδο και κριτήριο μέγιστης σταθμισμένης ΤΙΑ



Διάγραμμα 47: Πεδίο ομόρρου για νέο ρόδο με 20 Α/Γ



	Ρόδο αναφοράς Mixed GA	Ρόδο αναφοράς Pattern	Ρόδο με 2 κύριες κατευθύνσεις. Mixed GA
CF	0.3519	0.3503	0.3323
AEP (kWh)	6.1645 E+8	6.1366 E+8	5.8221 E+8
Cable length (km)	16.578	17.767	17.503
Capex	3.9203 E+8	3.9251 E+8	3.9240 E+8
LCOE €	0.090445	0.090764	0.093761
Max mean TIA	0.06943	0.07113	0.08032

Πίνακας 16: Σύγκριση μεταξύ ρόδων ανέμου

Παρατηρώντας τα ανωτέρω διαγράμματα καθώς και τον συγκεντρωτικό πίνακα με τα αποτελέσματα, μπορούν να προκύψουν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

1. Μεταξύ των 2 μεθόδων βελτιστοποίησης δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές. Ωστόσο η επίλυση με τον Mixed GA δίνει καλύτερο CF, με ταυτόχρονη ελάττωση του μήκους καλωδίωσης. Αυτά τα δύο μαζί συντελούν σε μικρότερο κόστος ενέργειας. Αξιοσημείωτο είναι επίσης πως παρά το γεγονός ότι η επίλυση με Pattern Search οδηγεί σε μεγαλύτερο μήκος καλωδίωσης και άρα θεωρητικά σε μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ των Α/Γ, η σταθμισμένη ένταση τύρβης είναι ελαφρώς μεγαλύτερη. Την ίδια συμπεριφορά παρουσιάζει και η TIA στην κύρια διεύθυνση για την ταχύτητα αναφοράς. Αυτά συμβαίνουν καθότι όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 44 αρκετές Α/Γ βρίσκονται εντός πεδίου ομόρρου άλλων Α/Γ.
2. Η σταθμισμένη TIA του καινούριου ρόδου ανέμου είναι σαφώς μεγαλύτερη από τις περιπτώσεις με το ρόδο αναφοράς, ανεξαρτήτου μεθόδου επίλυσης. Αυτό αιτιολογείται καθώς στην περίπτωση με τις 2 κύριες κατευθύνσεις δεν γίνεται να υπάρχουν Α/Γ που βρίσκονται πάντα εκτός πεδίου ομόρρου, μιας και οι 2 κατευθύνσεις είναι αντικρουόμενες μεταξύ τους.
3. Συγκρίνοντας την TIA για την ταχύτητα αναφοράς, μεταξύ των 2 ρόδων για την επίλυση με Mixed GA, προκύπτει ότι είναι μεγαλύτερη για το νέο ρόδο στην NW διεύθυνση κατά 0.03, η οποία διαφορά είναι αρκετά μεγάλη.
4. Στο νέο ρόδο, φαίνεται ότι η μέγιστη TIA στις 2 κύριες διευθύνσεις έχει σχεδόν ίδια τιμή. Επίσης παρατηρείται ότι πολλές Α/Γ έχουν TIA ίση με αυτή του περιβάλλοντος στην μία κύρια διεύθυνση ενώ στην άλλη έχουν αρκετά υψηλή και το αντίστροφο. Άλλες πάλι έχουν μια μεσαία τιμή TIA και στις 2 κατευθύνσεις. Καμία όμως δεν έχει υψηλή τιμή και στις δύο. Αυτό προκύπτει καθώς ο βελτιστοποιητής προσπαθεί να βρει τοποθεσίες τέτοιες ώστε να γίνεται όσο το δυνατόν καλύτερη εκμετάλλευση και των 2 κατευθύνσεων. Το παραπάνω πόρισμα συμπεραίνεται και από το Διάγραμμα 47 του πεδίου ομόρρου, όπου φαίνεται πως οι περισσότερες Α/Γ βρίσκονται μέσα σε πεδίο ομόρρου, μόνο σε μία από τις 2 κύριες κατευθύνσεις.
5. Το νέο ρόδο ανέμου έχει μικρότερο συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας καθότι κάποιες Α/Γ αποδίδουν καλύτερα στην μία διεύθυνση και κάποιες στην άλλη, όπως αναφέρθηκε και στο σχόλιο 4. Αυτό συντελεί σε ακριβότερο LCOE. Προσεγγιστικά φαίνεται ότι η πτώση του CF κατά 0.01 οδηγεί σε αύξηση του LCOE κατά 0.00166

## 4.7 Σύγκριση με πραγματικά αιολικά πάρκα

Το μοντέλο ομόρρου που χρησιμοποιήθηκε αυτή την φορά ήταν το Jensen, η βελτιστοποίηση έγινε με τον Mixed Variable GA, ενώ δεν μπήκε κάποιο κριτήριο τύρβης.

### 4.7.1 Horns Rev

Το αιολικό αυτό πάρκο βρίσκεται στην Δανία και αποτελείται από 80 Α/Γ ονομαστικής ισχύος 2MW εκάστη. Επίσης το πάρκο αυτό είναι αντικείμενο μελέτης αρκετών εργασιών και εκθέσεων δρώντας ως πάρκο αναφοράς για συγκρίσεις και έρευνα.

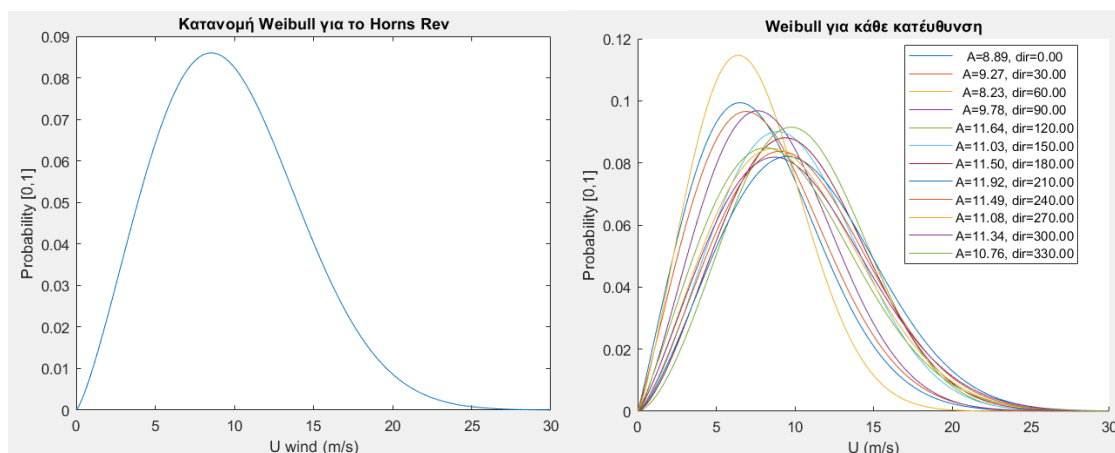
#### 4.7.1.1 Ρόδο ανέμου

Το ρόδο ανέμου αναπτύχθηκε με δύο τρόπους. Αρχικά λόγω έλλειψης εύκολης και δωρεάν πρόσβασης σε ανεμολογικά δεδομένα ακολουθήθηκε η τεχνητή δημιουργία τους με βάση τα τελικά αποτελέσματα άλλων εργασιών. Πιο συγκεκριμένα, από την εργασία του (Shen 2015) αντλήθηκαν οι συντελεστές της καμπύλης Weibull σε κάθε μία από τις 12 διευθύνσεις στις οποίες χωρίζεται το ρόδο ανέμου. Μαζί με αυτό δίνεται και η πιθανότητα πνοής ανέμου από την κάθε διεύθυνση. Δίνονται επίσης οι σταθερές αυτές για συνολικά τις ταχύτητες ανεξαρτήτου κατεύθυνσης:  $A=10.97\text{m/s}$  και  $c=2.29$ . Ενώ η μέση τιμή της ταχύτητας είναι  $u_{\text{mean}}=9.72\text{ m/s}$ , το οποίο αιτιολογεί και τον μεγάλο CF της Α/Γ.

$\theta$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
Direction	N	NNE	ENE	E	ESE	SSE	S	SSW	WSW	W	WNW	NNW
A [m/s]	8.89	9.27	8.23	9.78	11.64	11.03	11.50	11.92	11.49	11.08	11.34	10.76
c [-]	2.09	2.13	2.29	2.30	2.67	2.45	2.51	2.40	2.35	2.27	2.24	2.19
f [%]	4.82	4.06	3.59	5.27	9.12	6.97	9.17	11.84	12.41	11.34	11.70	9.69

Πίνακας 17: Παράμετρος κλίσης (c), παράμετρος κλίμακας (A) και πιθανότητα πνοής ανέμου για κάθε κατεύθυνση (Shen 2015).

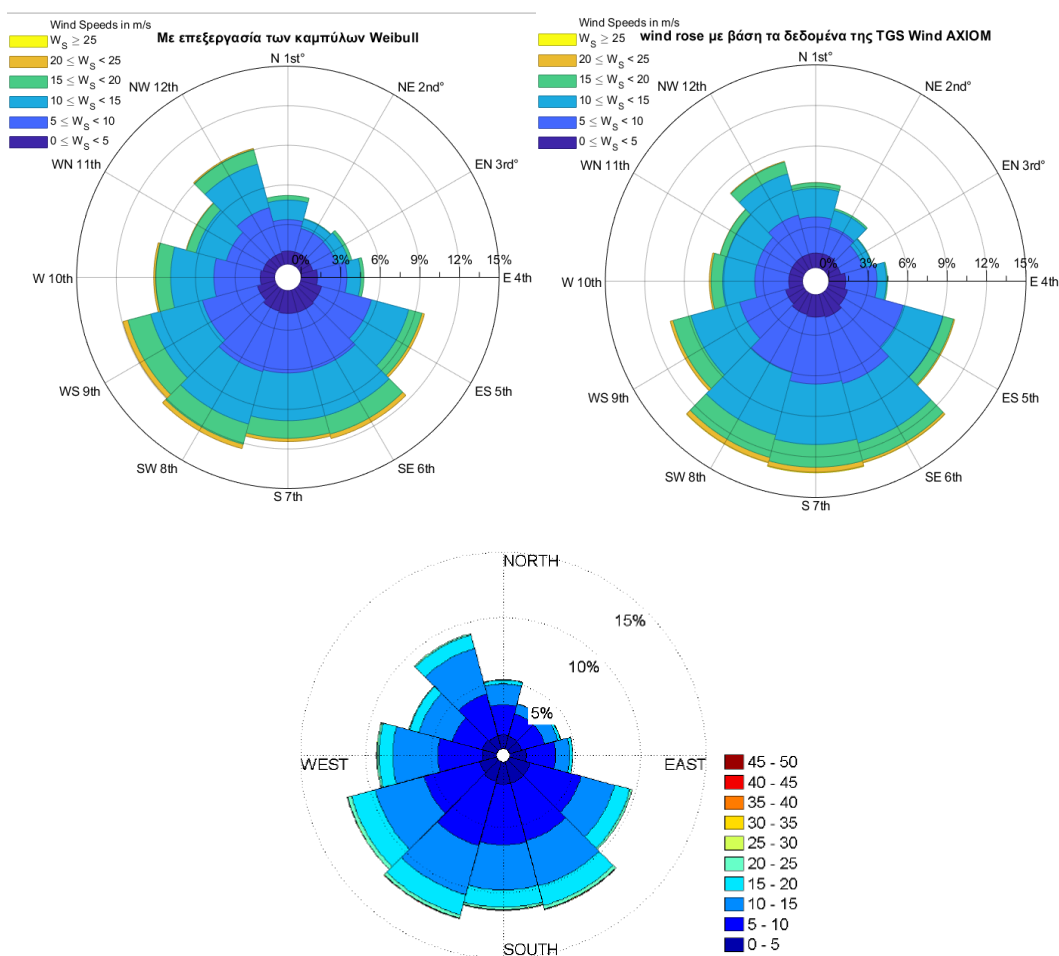
Έχοντας αυτά τα στοιχεία μπορεί να υπολογιστεί η καμπύλη Weibull για κάθε κατεύθυνση και εν συνεχεία να δημιουργηθούν οι κλάσεις ταχυτήτων, υπολογίζοντας την διαφορά της πιθανότητας των άκρων της κάθε κλάσης. Εν συνεχεία επειδή η κάθε διεύθυνση αθροίζει στο 100% της, μιας και εξετάζεται ως αυτόνομη, πρέπει να πολλαπλασιαστεί με την πιθανότητα πνοής στην διεύθυνση αυτή. Επομένως πλέον δημιουργείται ένας πίνακας με κατευθύνσεις και ταχύτητες.



Διάγραμμα 48: Κατανομή Weibull για Horns Rev αριστερά και δεξιά οι κατανομές για κάθε κατεύθυνση

Σε επόμενο στάδιο, επειδή ο κώδικας που δημιουργεί το ρόδο ανέμου απαιτεί σαν δεδομένα δύο στήλες με τιμές ταχύτητας και κατεύθυνσης, πρέπει να 'δημιουργηθούν' τα ζεύγη αυτά που αντιστοιχούν σε εικονικές μετρήσεις. Για να συμβεί αυτό επιλέγεται ένα πλήθος αριθμών που θα είναι οι 'εικονικές' αυτές μετρήσεις. Για τον κάθε συνδυασμό ταχύτητας και κατεύθυνσης, πολλαπλασιάζεται η πιθανότητα που του αντιστοιχεί στον συνδυασμό με το πλήθος των μετρήσεων για να βρεθεί πόσα ζεύγη τιμών χρειάζονται στον κάθε συνδυασμό. Τέλος, μέσω μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών παράγονται οι τιμές ζευγών που αντιστοιχούν στα όρια της κάθε κλάσης ταχύτητας και κατεύθυνσης. Έτσι πλέον έχουν δημιουργηθεί τα εικονικά αυτά ζεύγη που θα αποτελέσουν το ρόδο ανέμου.

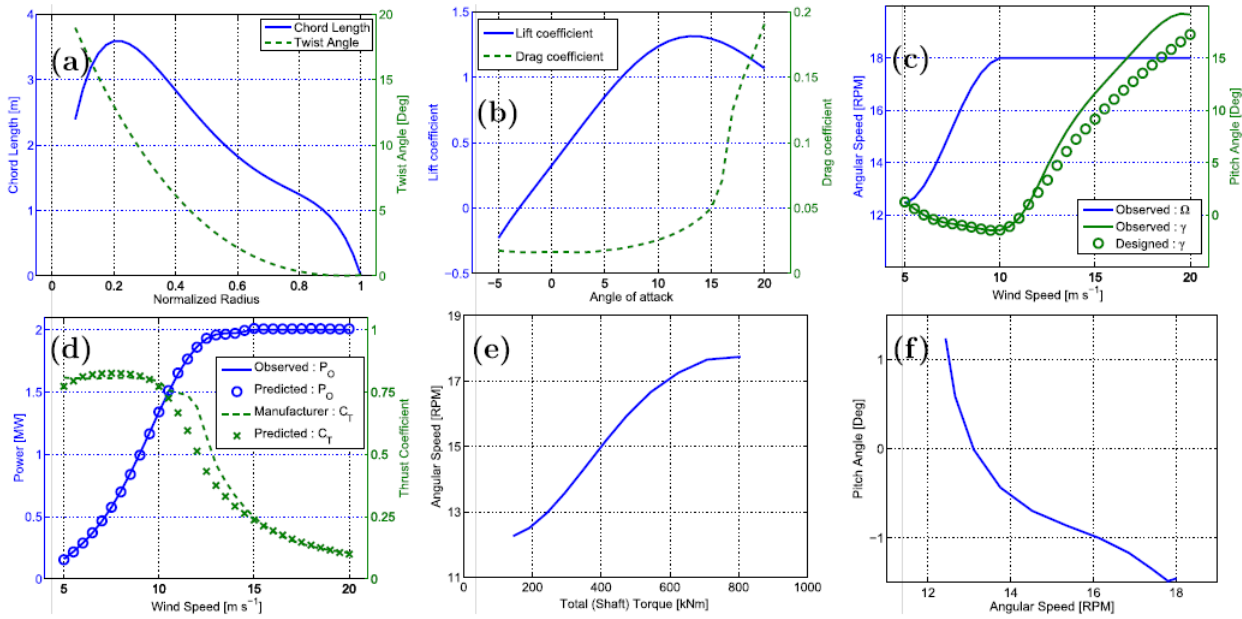
Ωστόσο σε επόμενη φάση μετά από επικοινωνία με την (TGS Wind AXIOM) μου δόθηκαν οι χρονοσειρές ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου για το Horns Rev 1.



**Διάγραμμα 49: Ρόδα ανέμου για Horns Rev 1. Πάνω αριστερά είναι αυτό που προέκυψε από την επεξεργασία των καμπύλων Weibull. Πάνω δεξιά το ρόδο με βάση τις χρονοσειρές από (TGS Wind AXIOM). Κάτω το ρόδο ανέμου από την εργασία του (Shen 2015), από όπου αντλήθηκαν τα δεδομένα.**

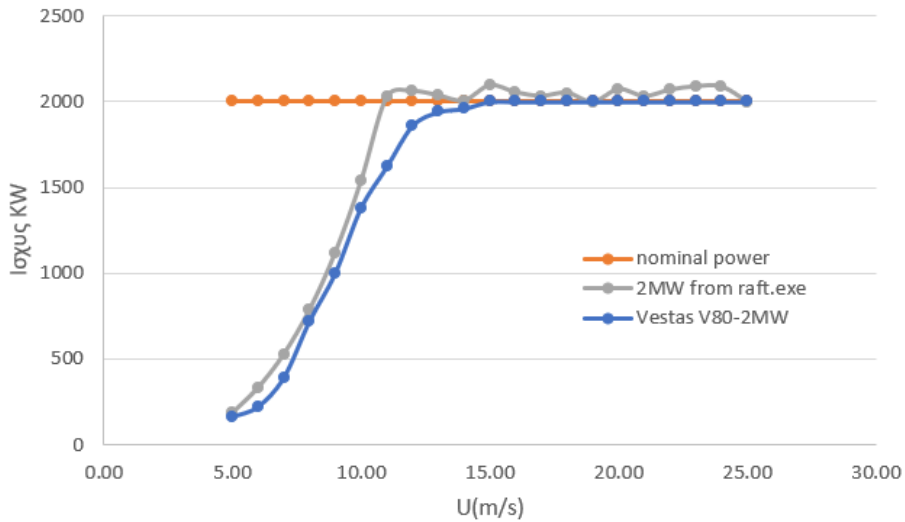
#### 4.7.1.2 Η ανεμογεννήτρια του πάρκου

Στο πάρκο αυτό χρησιμοποιούνται Vestas V80 – 2MW, η οποία έχει διάμετρο 80m ύψος πλήμνης 70m. Για την Α/Γ αυτή βρέθηκαν οι καμπύλες ισχύος και συντελεστή αντίστασης, χωρίς όμως αναλυτικά δεδομένα. Επομένως με βάση το εκτελέσιμο raft.exe που παρέχεται από τον τομέα ρευστών της σχολής δημιουργήθηκε μία Α/Γ μεταβλητών στροφών και βήματος ονομαστικής ισχύος 2MW. Θα ακολουθήσουν οι καμπύλες τόσο της Α/Γ που 'δημιουργήθηκε' από το εκτελέσιμο, όσο και οι καμπύλες της Vestas, όπως αυτή δίνεται στην βιβλιογραφία.



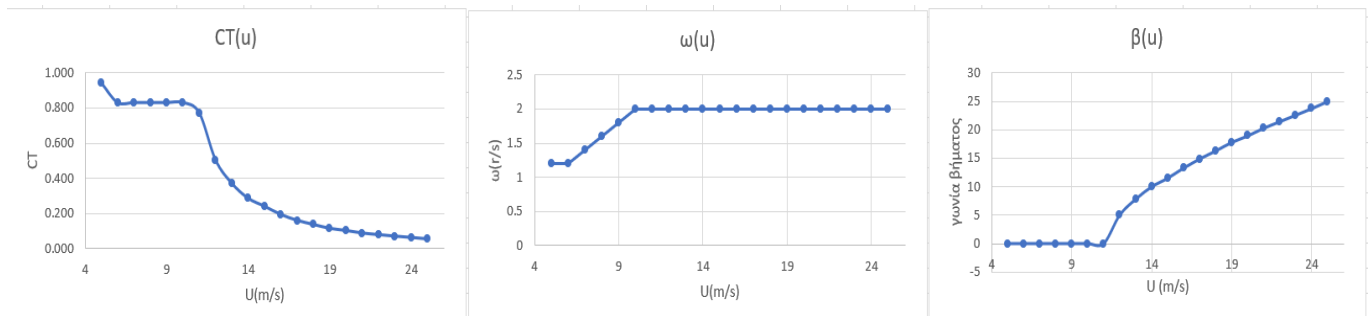
Διάγραμμα 50: Vestas V80-2MW (Yu-Ting Wu 2015)

Καμπύλες ισχύος



Διάγραμμα 51: Καμπύλες ισχύος

Είναι εμφανές ότι η A/Γ που δημιουργήθηκε με βάση το εκτελέσιμο raft.exe φτάνει πιο γρήγορα στην ονομαστική ισχύ και ταυτόχρονα έχει και υψηλότερες τιμές ισχύος στις υψηλές ταχύτητες.



Διάγραμμα 52: Καμπύλες συντελεστή αντίστασης, στροφών και βήματος της A/Γ

Από τις καμπύλες είναι εμφανές ότι πρόκειται για Α/Γ μεταβλητών στροφών και μεταβλητού βήματος. Η Α/Γ λειτουργεί στο εύρος  $[1.2, 2]$  rad/s το οποίο προκύπτει καθώς η μέγιστη ταχύτητα ακροπερυγίου (τουλάχιστον για τις χερσαίες Α/Γ) είναι στα 80m/s, επομένως για ακτίνα ίση με 40m προκύπτει  $\omega_{max}=2r/s$  και η ελάχιστη προκύπτει από τον περιορισμό ότι πρέπει να είναι τουλάχιστον το 60% της ονομαστικής ταχύτητας περιστροφής.

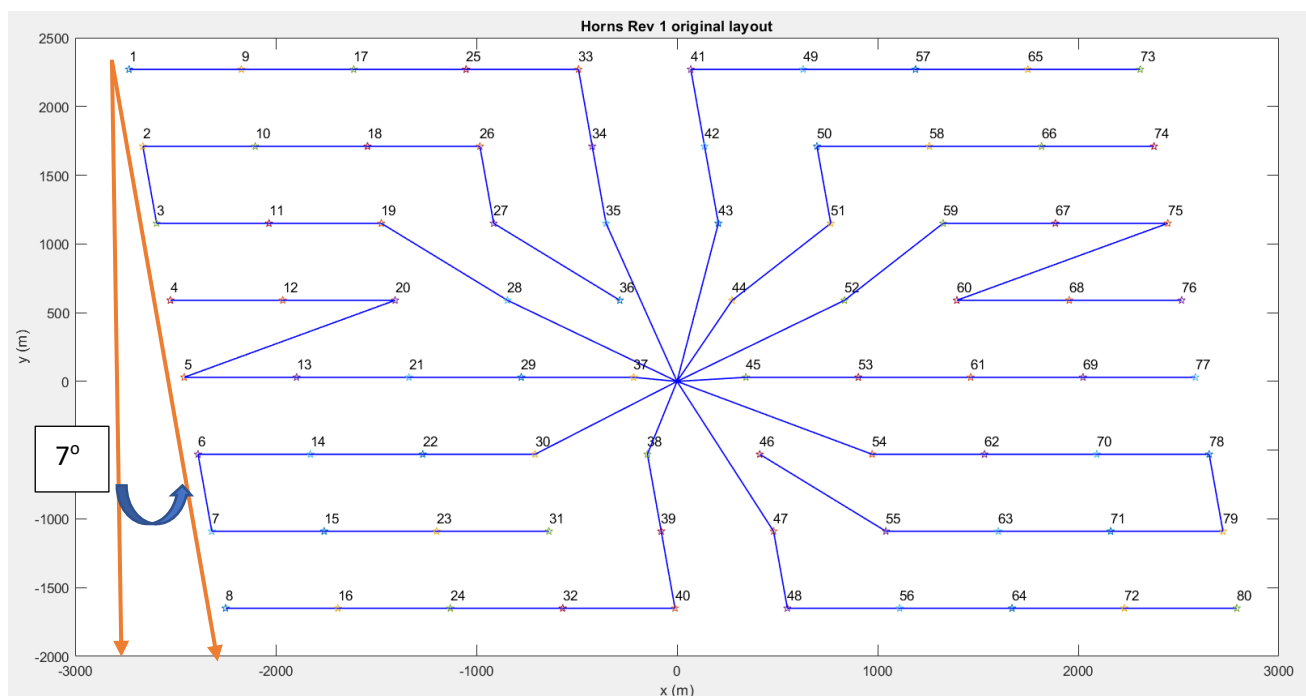
Παρόλο που υπάρχουν τα δεδομένα για την Vestas V80-2MW αυτά είναι σε μορφή καμπύλης, οπότε η εξαγωγή ακριβών τιμών είναι δύσκολη, επομένως κρίθηκε καλύτερο να χρησιμοποιηθεί για την βελτιστοποίηση η καμπύλη ισχύος από το raft.exe. Εξάλλου τα αποτελέσματα θα είναι συγκριτικά μεταξύ της χωροταξίας πριν και μετά την βελτιστοποίηση.

Με βάση αυτή την Α/Γ και Weibull όπως αυτή δίνεται από τον (Shen 2015), προκύπτει ότι το CF της μίας Α/Γ είναι πολύ μεγάλο, και ίσο με  $CF_{1wt} = 0.596$ . Η τιμή αυτή είναι πολύ μεγάλη, αλλά δικαιολογείται καθώς ο άνεμος έχει μέση τιμή ίση με 9.71m/s και η Α/Γ έχει ονομαστική ισχύ 2MW, την οποία επιτυγχάνει την ταχύτητα ανέμου 11m/s.

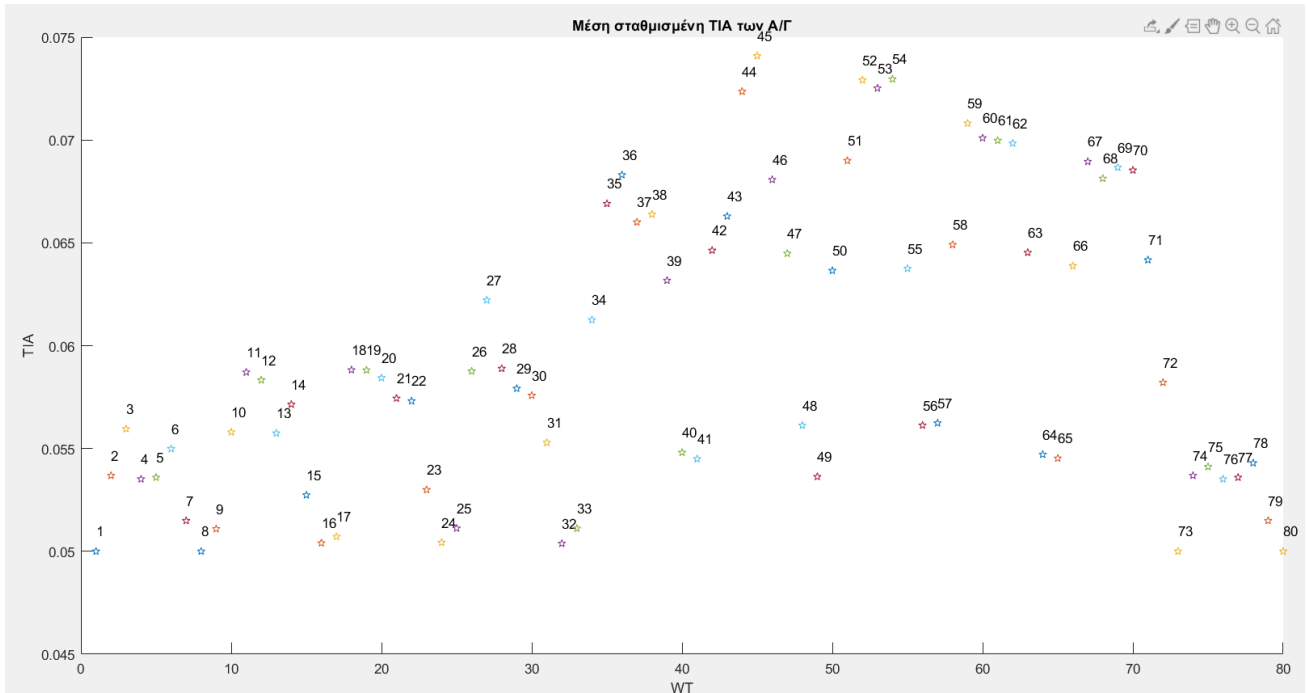
Τέλος όσον αφορά το κόστος των Α/Γ, αυτό θα εξαχθεί από το cost\_model.xlsx της σχολής το οποίο δίνει το ανηγμένο κόστος ανά MW, το οποίο προκύπτει ως 1.13Μ€/MW. Αυτή την φορά δεν επιλέχθηκαν οι σχέσεις του κεφαλαίου 3.6.1 (οι οποίες δίνουν το κόστος ως 1.425Μ€/MW), καθώς θεωρήθηκε ότι η τιμή από το excel είναι πιο κοντινή στο ζητούμενο. Αυτό συμβαίνει καθώς στο θαλάσσιο αιολικό πάρκο του Middelgurden η τιμή είναι 1.2Μ€/MW (Hansen και Vølund). Τα κόστη λειτουργίας ίσα με 0.035€/kWh, απόσβεση σε 20 χρόνια με επιτόκιο 6%, ενώ το κόστος καλωδίου θεωρήθηκε 400k€/km όσο και στις προηγούμενες περιπτώσεις.

#### 4.7.1.3 Αρχική Τοπολογία και συνδεσμολογία Horns Rev 1

Το πάρκο αυτό αποτελείται από 80 Α/Γ ονομαστικής ισχύος 2 MW κατασκευής Vestas. Οι Α/Γ έχουν τοποθετηθεί σε σειρές και στήλες όπου η κάθε Α/Γ απέχει από την επόμενη Α/Γ της ίδιας σειράς κατά 7D και οι σειρές απέχουν κάθετα μεταξύ τους κατά 7D. Επίσης το παραλληλόγραμμο δεν είναι ορθογώνιο, αλλά υπάρχει μια κλίση  $7^\circ$  από την βόρεια προς την ανατολική διεύθυνση.

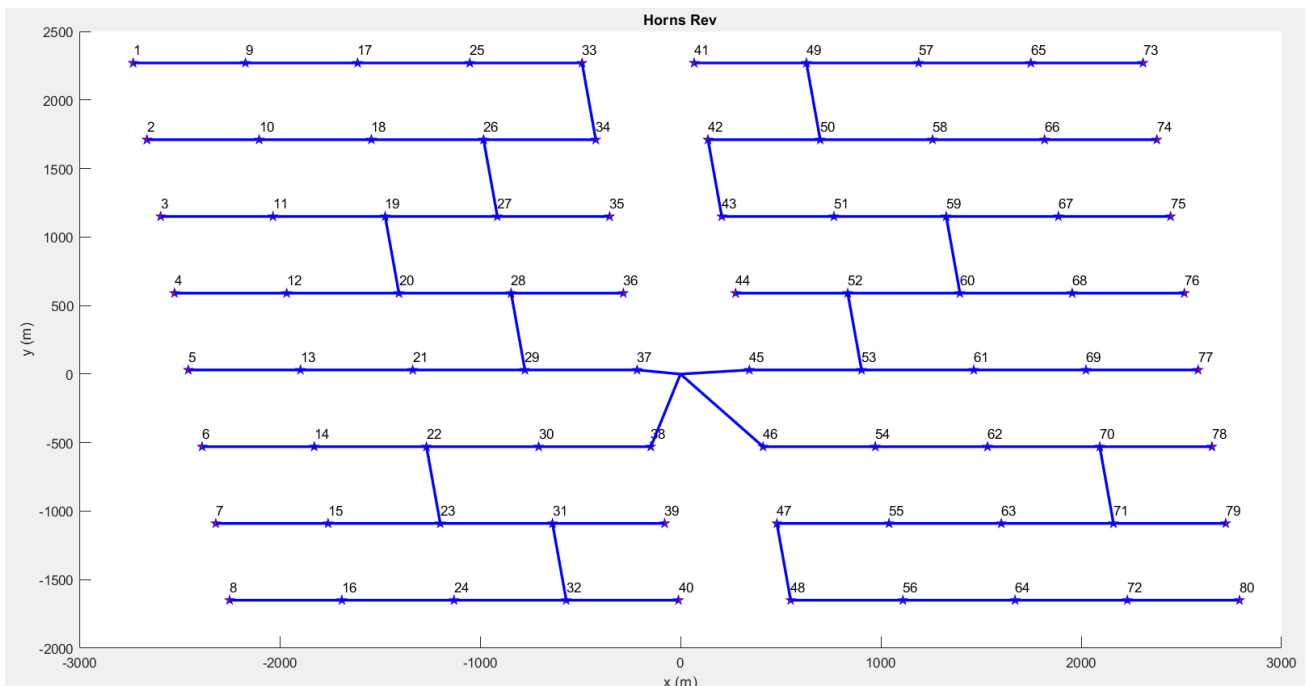


Διάγραμμα 53: Αρχική τοπολογία και συνδεσμολογία του Horns Rev 1



**Διάγραμμα 54: Σταθμισμένη τύρβη των Α/Γ στο Horns Rev 1.**

Στην συνδεσμολογία του Horns Rev 1 έχει επιλεγθεί η ύπαρξη ενός θαλάσσιου υποσταθμού στο κέντρο του πλωτού αιολικού πάρκου ο οποίος συνδέεται ακτινικά με τις Α/Γ. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν 8 καλώδια, ενώ έκαστο συνδέει μέχρι 10 Α/Γ. Αυτό γίνεται ώστε αν υπάρξει βλάβη ενός καλωδίου να υπάρχουν όσο το δυνατόν λιγότερες Α/Γ οι οποίες θα μείνουν εκτός σύνδεσης με το δίκτυο. Ακολούθως θα παρουσιασθεί πώς προκύπτει η συνδεσμολογία του πάρκου, αν χρησιμοποιηθεί το MST και μόνο 4 καλώδια αντί για 8.

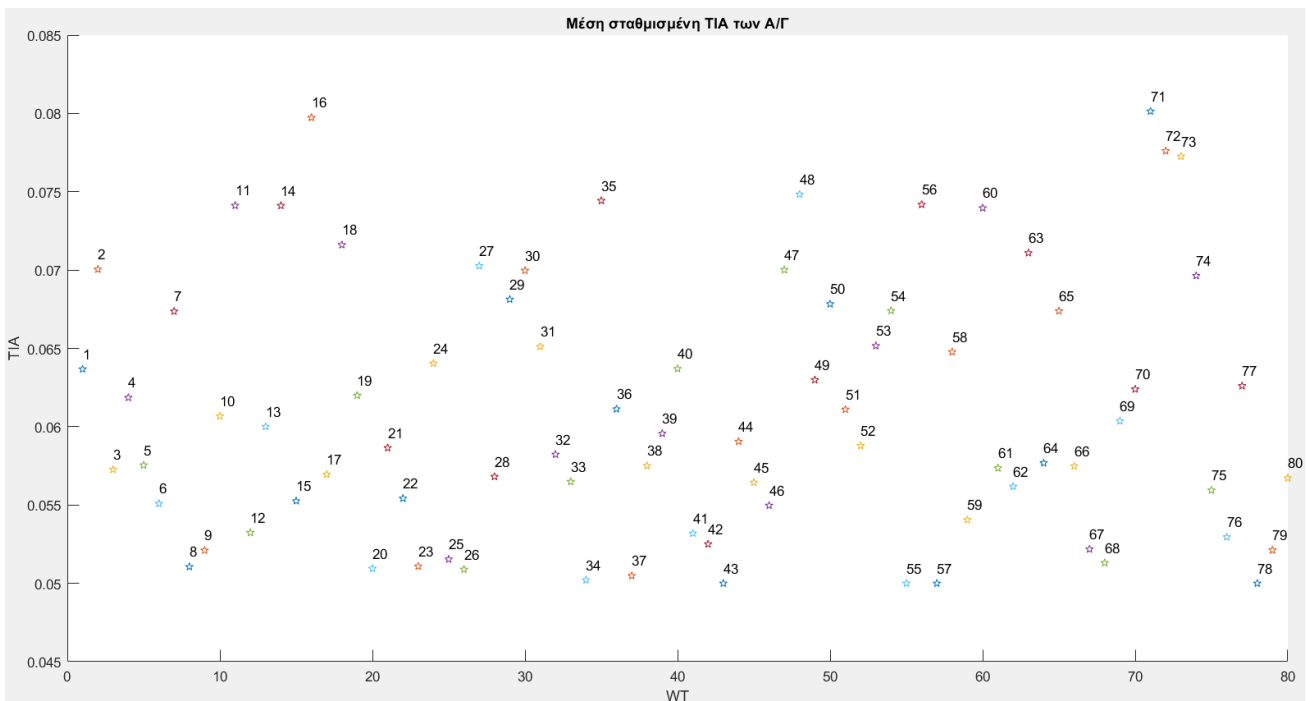
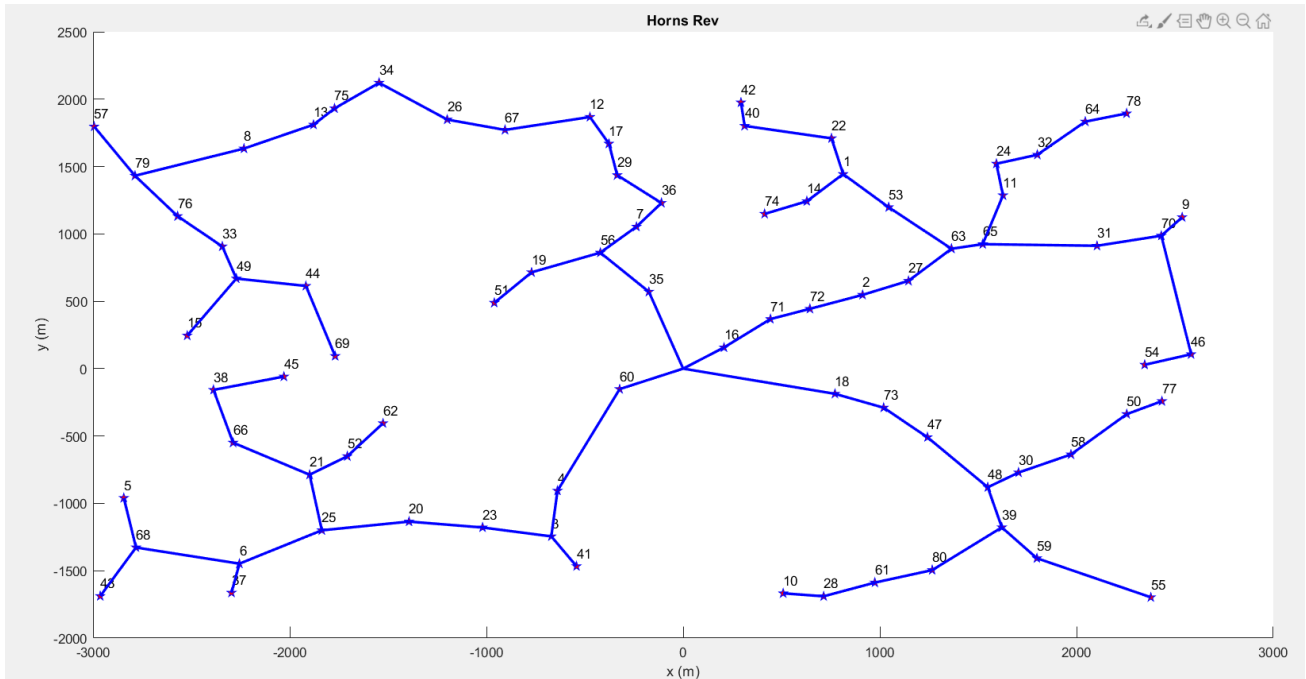


**Διάγραμμα 55: Αρχική τοπολογία και συνδεσμολογία με βάση το MST, του Horns Rev 1**

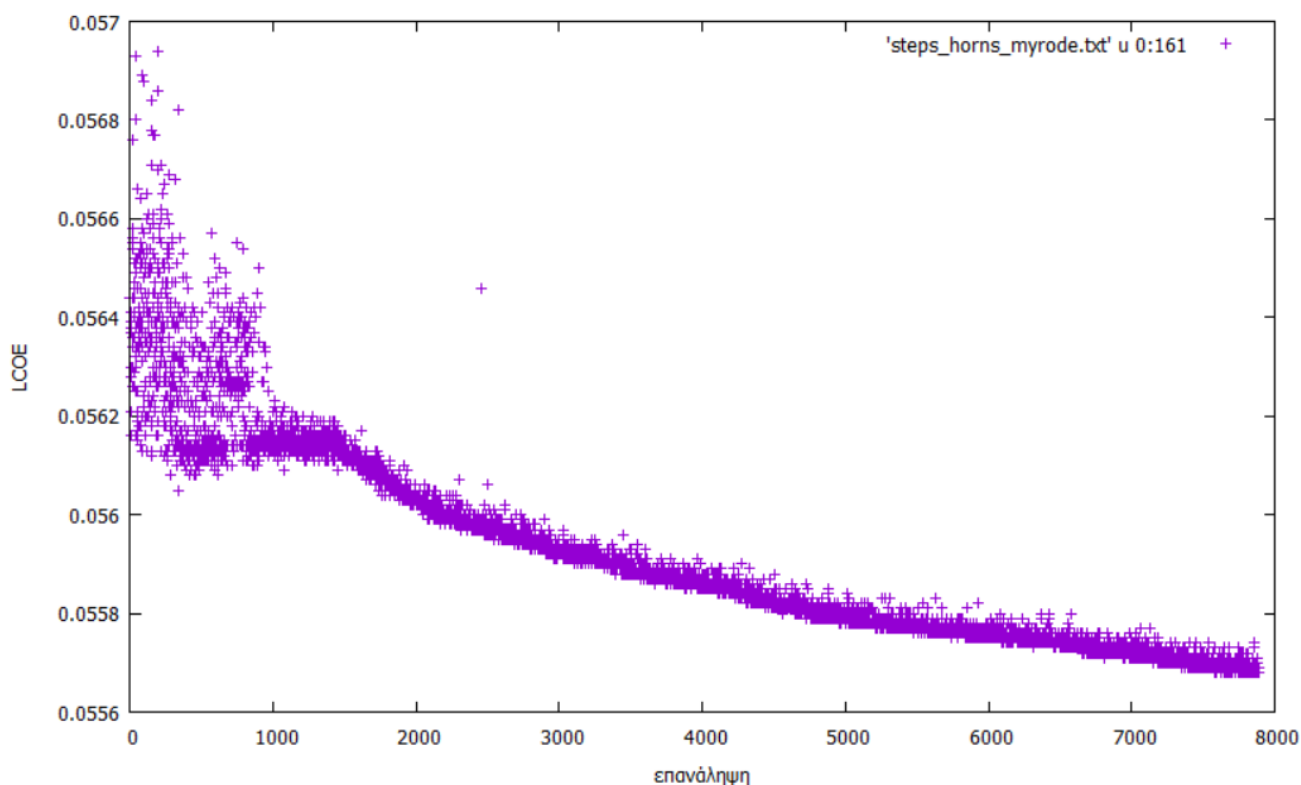
Όπως φαίνεται με βάση την νέα συνδεσμολογία υπάρχουν αρκετές διακλαδώσεις των καλωδίων και τα καλώδια που συνδέονται στον υποσταθμό είναι μόλις 4. Η συνδεσμολογία αυτή εξασφαλίζει μείωση του συνολικού μήκους καλωδίωσης καθώς από 50.541km το μήκος πέφτει στα 44.400km, το οποίο ισοδυναμεί με μια πτώση της τάξης του 12.15%. Η αλλαγή αυτή από την μία δημιουργεί μείωση του συνολικού

κεφαλαίου, από την άλλη όμως δημιουργεί μεγαλύτερο ρίσκο για να τεθούν πολλές Α/Γ εκτός λειτουργίας αν κάποιο καλώδιο κοπεί.

#### 4.7.1.4 Βελτιστοποιημένη τοπολογία και συνδεσμολογία Horns Rev 1







Διάγραμμα 56: Horns rev μετά την βελτιστοποίηση: 1)Χωροταξία, 2)Μέση σταθμισμένη TIA, 3) Σύγκλιση κώδικα

Είναι εμφανές ότι υπάρχουν μεγάλες περιοχές στις οποίες δεν υπάρχουν Α/Γ. Αυτό συμβαίνει καθώς θα δημιουργούνταν διακλαδώσεις οι οποίες θα αύξαναν ακόμα περισσότερο το μήκος της καλωδίωσης όπως στην αρχική τοπολογία, κάτι που θα συνέβαλε στην αύξηση του κόστους. Επίσης οι Α/Γ οι οποίες έχουν μέση σταθμισμένη ένταση τύρβης κοντά στην ατμοσφαιρική βρίσκονται στα άκρα του χωρίου. Τέλος η σύγκλιση φαίνεται να μην έχει επιτευχθεί παρόλο που ο κώδικας έτρεχε λίγο παραπάνω από 32 ώρες, ωστόσο για λειτουργικούς λόγους τερματίστηκε ο κώδικας.

#### 4.7.1.5 Συγκρίσεις με βάση το Horns Rev 1

	Horns rev αρχικό	Horns rev αρχικό με σύνδεση MST	Horns rev βελτιστοποιημένο
CF	0.5756	0.5756	0.5769
AEP (kWh)	8.0671 E+8	8.0671 E+8	8.086 2 E+8
Cable length (km)	50.541	44.400	27.546
Capex €	2.0102 E+8	1.9856 E+8	1.9182 E+8
LCOE €	0.056725	0.056459	0.055682
Max mean TIA	0.07409	0.07409	0.08014
Mean mean TIA	0.05950	0.05950	0.06097
Stdv mean TIA	0.00710	0.00710	0.00831
Κόστος καλωδίου/CAPEX	10.06%	8.94%	5.74%

Πίνακας 18: Συγκριτικός πίνακας για το Horns Rev 1

Μετά από την παρουσίαση της υφιστάμενης τοπολογίας και συνδεσμολογίας του εξεταζόμενου θαλάσσιου αιολικού πάρκου καθώς, βελτιωμένης συνδεσμολογίας με βάση την ήδη υπάρχουσα τοπολογία και της συνολικά βελτιωμένης τοπολογίας και συνδεσμολογίας είναι πλέον εφικτή η σύγκριση μεταξύ των επιλογών.



1. Όταν στην ήδη υπάρχουσα τοπολογία μειώθηκαν τα καλώδια σύνδεσης με τον υποσταθμό και εφαρμόστηκε το MST, το μήκος καλωδίωσης μειώθηκε κατά 12.15% όπως αναφέρθηκε και στην υποπαράγραφο 4.7.1.3. Το οποίο συντελεί στην μείωση του κόστους ενέργειας στο 4<sup>ο</sup> δεκαδικό του ευρώ.
2. Στην χωροθετική βελτιστοποίηση του πάρκου παρατηρείται αύξηση του συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας κατά 0.0023% το οποίο σημαίνει ότι η κλασική μέθοδος χωροθέτησης σε γραμμές και στήλες είναι πολύ κοντά στην βέλτιστη από άποψη απωλειών ομόρρου.
3. Η μείωση του μήκους του καλωδίου ήταν σαφής καθώς σε σχέση με το αρχικό μοντέλο υπήρξε μείωση της τάξης του 45.5% η οποία αντιστοιχεί και σε μείωση 9.18Μ€.
4. Το ποσοστό συμμετοχής των καλωδίων στο αρχικό κόστος κεφαλαίου πέφτει σημαντικά καθώς το μήκος μειώνεται ενώ τα λοιπά κόστη παραμένουν αμετάβλητα.
5. Με την βελτιστοποιημένη χωροταξία το LCOE μειώνεται κατά 1.84%.
6. Το ότι πλέον οι Α/Γ δεν απέχουν 7D αλλά αρκετές φορές πολύ λιγότερο συντελεί στην αύξηση της μέσης σταθμισμένης των Α/Γ ακόμα και αν αυτή είναι μικρή. Η μικρή αυτή αύξηση αιτιολογείται καθώς πριν υπήρχαν περισσότερες Α/Γ που δέχονταν μιας μέτριας έντασης τύρβης, ενώ στο βελτιστοποιημένο υπάρχει μεγαλύτερη διασπορά. Δηλαδή, άλλες δέχονται υψηλή τύρβη και άλλες χαμηλή, ωστόσο ο μέσος όρος παραμένει περίπου ίδιος με πριν. Αυτόν τον ισχυρισμό τον αποδεικνύει και η αύξηση της τυπικής απόκλισης.
7. Τέλος παρατηρείται ότι το CF και στις δύο τοπολογίες είναι πολύ κοντά σε αυτό της μίας Α/Γ.

## 4.7.2 Middelgurden

Το εν λόγω θαλάσσιο αιολικό πάρκο βρίσκεται στην Δανία, ανατολικά της Κοπεγχάγης, παρέχοντας περίπου το 3% της καταναλισκόμενης ισχύος της. Δημιουργήθηκε το 2000 ως το μεγαλύτερο θαλάσσιο αιολικό πάρκο της εποχής. Αποτελείται από 20 Α/Γ, των 2MW εκάστη με διάμετρο 76m και ύψος πλήμνης 64m (Sørensen, Hansen and Larsen 2002).

### 4.7.2.1 Ρόδο ανέμου

Για το συγκεκριμένο αιολικό πάρκο τα δεδομένα δόθηκαν από την (TGS Wind AXIOM) μετά από επικοινωνία μαζί τους. Ως δεδομένα δόθηκαν οι χρονοσειρές από το 2009 ως το 2018 με βήμα μισή ώρας για ύψος 100m. Συνεπώς έπρεπε να γίνει αναγωγή της ταχύτητας αυτής στο ύψος πλήμνης με βάση τον λογαριθμικό νόμο.

Αρχικά πρέπει για κάθε ταχύτητα να υπολογιστεί η ταχύτητα τύρβης που της αντιστοιχεί και ορίζεται ως εξής:

$$u_* = \left( \frac{\tau_s}{\rho} \right)^{0.5} \quad (71)$$

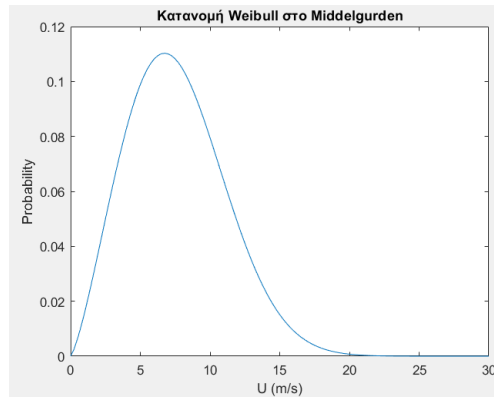
Όπου  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα και  $\tau_s$  η διατμητική τάση που εξασκεί στο έδαφος, η κίνηση της αέριας μάζας ως προς το έδαφος.

Ωστόσο επειδή με βάση αυτόν τον ορισμό είναι δύσκολο να υπολογιστεί, μπορεί να υπολογιστεί και από τον λογαριθμικό τύπο της ταχύτητας γνωρίζοντας την ταχύτητα του ανέμου σε ένα συγκεκριμένο ύψος, κάτι το οποίο το έχουμε ως δεδομένο.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (72)$$

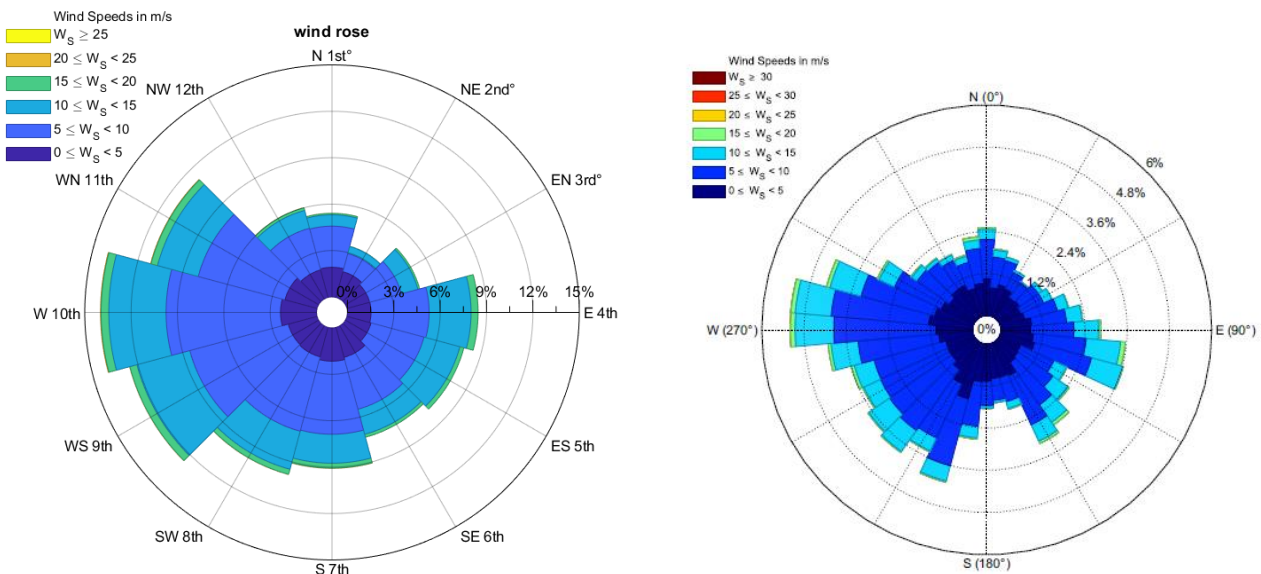
Όπου  $k$  η σταθερά Von Karman ίση με 0.4 και  $z_0$  είναι το ύψος τραχύτητας, δηλαδή η απόσταση από το έδαφος όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι μηδέν, για ήρεμη θάλασσα ισχύει ότι  $z_0=0.001$  (Μεργελές 2006).

Έχοντας υπολογίσει το  $u_*$  για κάθε ταχύτητα στην θέση αναφοράς μπορεί πλέον να γίνει η αναγωγή στο ύψος πλήμνης, αν για  $z=H_{hub}$ . Επομένως προκύπτουν οι ταχύτητες στο ύψος πλήμνης. Μετά από την επεξεργασία των ανεμολογικών δεδομένων προκύπτει ότι η μέση τιμή είναι  $u_{mean}=7.64\text{m/s}$  και η τυπική απόκλιση ισούται με  $\sigma=3.53\text{m/s}$ . Με βάση τις σχέσεις (60) και (61) προκύπτουν οι σταθερές Weibull οι οποίες είναι  $k=2.31$  και  $c=8.62\text{m/s}$ .



Διάγραμμα 57: Κατανομή Weibull για το πάρκο Middelgurden

Τέλος συνδυάζοντας τις κατευθύνσεις και τις ταχύτητες προκύπτει το ρόδο ανέμου, το οποίο για επαλήθευση συγκρίνεται με το ρόδο ανέμου μίας άλλης εργασίας.



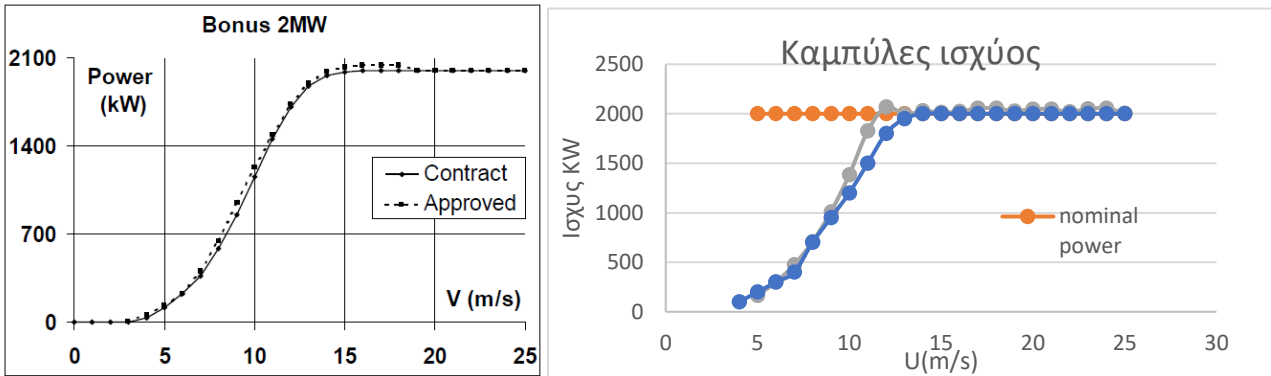
Διάγραμμα 58: Ρόδο ανέμου στο πάρκο Middelgurden. Αριστερά το ρόδο από την επεξεργασία των δεδομένων του (TGS Wind AXIOM) και δεξιά το ρόδο που προκύπτει από την εργασία του (Pillaia, και συν. 2017).

Όπως φαίνεται δεν υπάρχει ξεκάθαρη κύρια διεύθυνση ωστόσο είναι εμφανές ότι ο άνεμος φυσάει ως επί των πλείστων στον άξονα Ανατολής-Δύσης. Ωστόσο δεν είναι αμελητέα και η πνοή ανέμου από τις άλλες διευθύνσεις.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι στο πάρκο αυτό η ένταση τύρβης περιβάλλοντος θεωρήθηκε 0.12 όπως αναφέρεται στις εν λόγω εργασίες (Vikkelsø, Larsen and Sørensen 2003).

#### 4.7.2.2 Η ανεμογεννήτρια του πάρκου

Στο εν λόγω πάρκο χρησιμοποιείται Α/Γ ονομαστικής ισχύος 2MW και διαμέτρου 76m, ενώ το ύψος πλήμνης είναι στα 64m. Και σε αυτή την περίπτωση υπολογίστηκαν οι καμπύλες ισχύος, ώσης, βήματος και ταχύτητας στο υπολογιστικό εργαλείο raft.exe που παρέχεται από την σχολή.



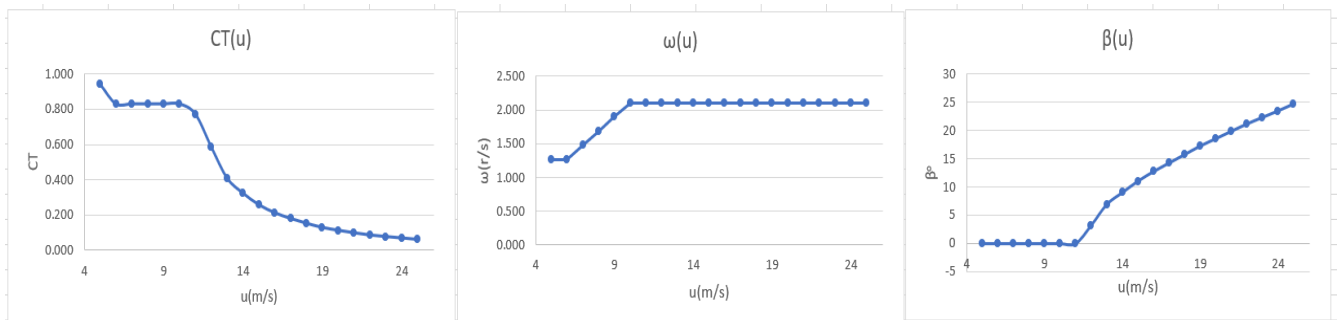
Διάγραμμα 59: Καμπύλη ισχύος της Α/Γ στο Middelgurden. Αριστερά η κανονική (Sørensen, Hansen and Larsen 2002) και δεξιά αυτή που αναπτύχθηκε με το raft.exe

Με βάση την παραπάνω καμπύλη, η ταχύτητα ανέμου, στην οποία επιτυγχάνεται η ονομαστική ισχύς είναι τα 12m/s.

Από τις καμπύλες είναι εμφανές ότι πρόκειται για Α/Γ μεταβλητών στροφών και μεταβλητού βήματος. Η Α/Γ λειτουργεί στο εύρος  $[1.26, 2.11]$ rad/s το οποίο προκύπτει καθώς η μέγιστη ταχύτητα ακροπερυγίου είναι στα 80m/s, επομένως για ακτίνα ίση με 38m προκύπτει  $\omega_{max}=2.11r/s$  και η ελάχιστη προκύπτει από τον περιορισμό ότι πρέπει να είναι τουλάχιστον το 60% της ονομαστικής ταχύτητας περιστροφής.

Με βάση την Α/Γ από το raft.exe και την Weibull όπως αυτή υπολογίστηκε, προκύπτει το CF της μίας Α/Γ το οποίο ισούται με  $CF_{1wt} = 0.3923$ . Η τιμή αυτή είναι μια ενδεικτική τιμή συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας για θαλάσσιες Α/Γ. Αξιοσημείωτο είναι ότι παρόλο που η ονομαστική ισχύς της Α/Γ είναι ίδια με αυτή της Α/Γ του Horns Rev 1 και η διάμετρος είναι μόλις 4m μικρότερη, το CF είναι μικρότερο κατά 20%, το οποίο αιτιολογείται από την μεγάλη διαφορά μεταξύ των μέσων ταχυτήτων των δύο πάρκων.

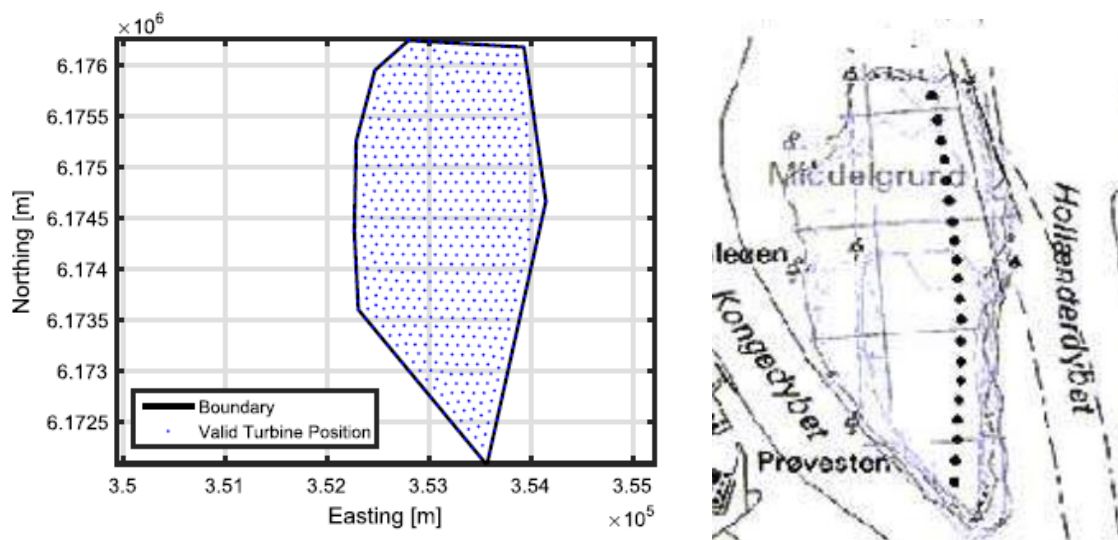
Τέλος όσον αφορά το κόστος των Α/Γ, αυτό είναι ίσο με 1.2 Μ€/MW (Hansen και Nølund). Με βάση το εργαλείο cost\_model.xlsx της σχολής το κόστος προκύπτει ίσο με 1.07 Μ€/MW. Ενώ οι σχέσεις του κεφαλαίου 3.6.1 δίνουν το κόστος 1.35Μ€/MW. Όπως φαίνεται οι σχέσεις είναι προσεγγιστικές και δίνουν καλά μόνο την τάξη μεγέθους του κόστους. Επίσης για τα λειτουργικά κόστη θεωρήθηκε OPEX=0.01€/kWh, διάρκεια ζωής 25 χρόνια  $i=5\%$  (Vikkelsø, Larsen and Sørensen 2003) και κόστος καλωδίου 400κ€/km



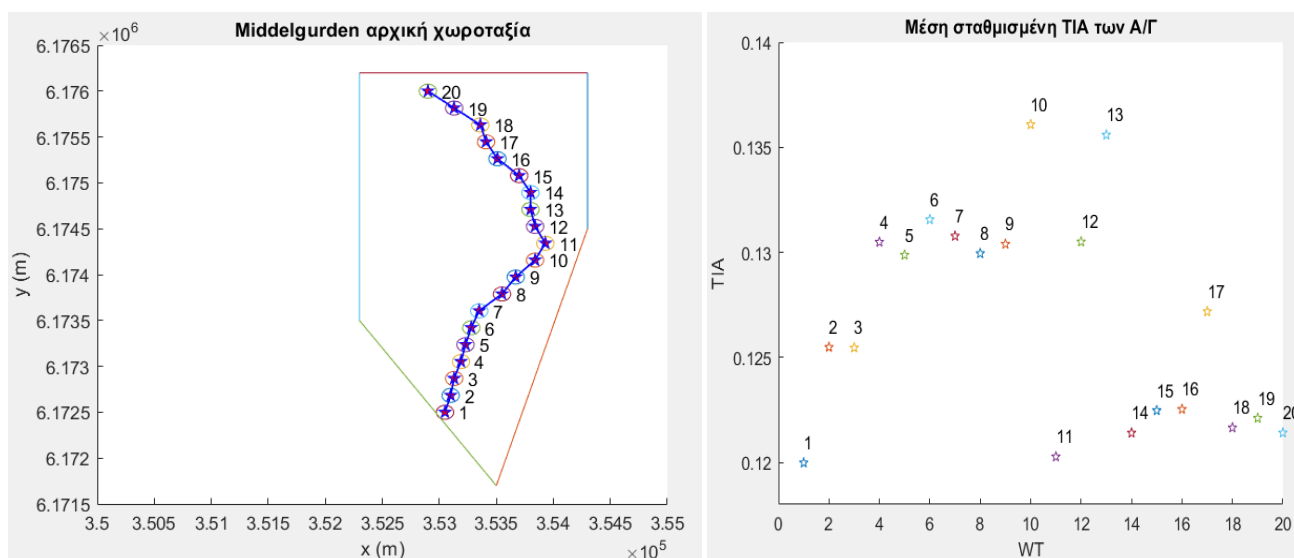
Διάγραμμα 60: Καμπύλες συντελεστή αντίστασης, στροφών και βήματος της Α/Γ

### 4.7.2.3 Αρχική χωροταξία Middelgurden

Για το πλωτό αυτό πάρκο δεν βρέθηκαν ακριβή στοιχεία για την χωροταξία των Α/Γ με συντεταγμένες. Βρέθηκαν ωστόσο τα όρια του καθώς και η σχηματική τοπολογία των Α/Γ. Με βάση αυτά τα δεδομένα έγινε μια προσεγγιστική εκτίμηση ορίων και θέσεων. Τα όρια που επιλέχθηκαν δεν έγιναν με μεγάλη ακρίβεια, ώστε να είναι πιο εύκολη η εισαγωγή τους στους περιορισμούς του βελτιστοποιητή.



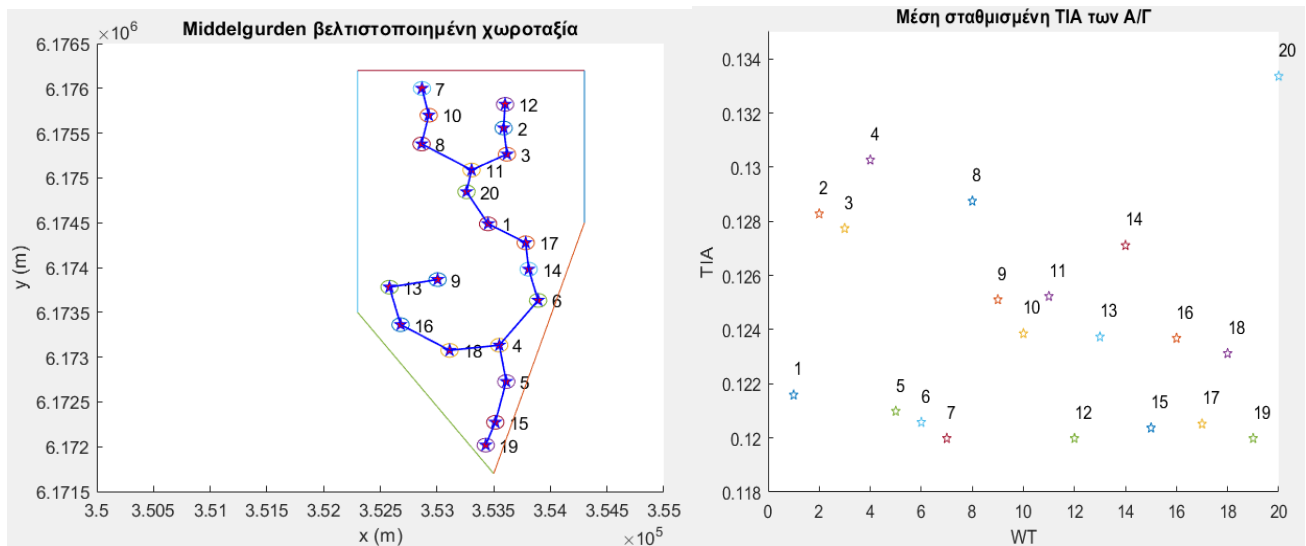
Εικόνα 11: Αριστερά τα όρια του θαλάσσιου πάρκου (Pillai, και συν. 2017) και δεξιά το σχήμα της διάταξης του πάρκου (Sørensen, Hansen και Larsen 2002)



Διάγραμμα 61: Αρχική χωροταξία Middelgurden και μέση ένταση τύρβης στις Α/Γ

Οι Α/Γ έχουν τοποθετηθεί έτσι ώστε στην κατεύθυνση Ανατολή-Δύση να μην βρίσκονται μέσα σε επαγόμενο ομόρρου και ταυτόχρονα με την καμπύλη που δημιουργείται, τι περισσότερες φορές δεν βρίσκονται εντός επαγόμενου ομόρρου ούτε στην κατεύθυνση Βορρά-Νότου.

#### 4.7.2.4 Βελτιστοποιημένη χωροταξία



Διάγραμμα 62: Βελτιστοποιημένη χωροταξία Middelgurden και μέση ένταση τύρβης στις Α/Γ

Είναι εμφανές ότι οι Α/Γ δεν είναι τόσο κοντά μεταξύ τους όπως πριν, όπου απείχαν σχεδόν όσο το ελάχιστο επιτρεπτό όριο. Αυτό αναμένεται λογικά να συνεισφέρει σε αύξηση του συντελεστή απόδοσης του αιολικού πάρκου, καθώς οι Α/Γ έχουν μεγαλύτερη απόσταση και επομένως υπάρχει δυνατότητα ανάκτησης του ομόρρου.

#### 4.7.2.5 Συγκρίσεις των δύο τοπολογιών

	Middelgurden αρχικό	Middelgurden βελτιστοποιημένο	Middelgurden documentation
CF	0.3647	0.3831	
AEP (kWh)	1.2778 E+8	1.3422 E+8	1 E+8
Cable length (km)	4.137	7.350	
Capex €	4.9655 E+7	5.0940 E+7	4.8 E+7
LCOE €	0.037571	0.036928	0.044
Max mean TIA	0.13608	0.13336	
Mean mean TIA	0.12676	0.12421	
Stdv mean TIA	0.00512	0.00394	
Κόστος καλωδίου/CAPEX	3.33%	5.77%	
$N_{\text{park}}\%$	93.0%	97.7%	93.0%

Πίνακας 19: Συγκριτική παρουσίαση των τοπολογιών του Middelgurden

Με βάση τον ανωτέρω πίνακα υπάρχει νόημα στην σύγκριση της αρχικής τοπολογίας του Middelgurden με αυτή που βελτιστοποιήθηκε και των αποτελεσμάτων της αρχικής τοπολογίας, σε σχέση με αυτά που παρέχονται από την βιβλιογραφία (Vikkelsø, Larsen και Sørensen 2003).

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του αναπτυχθέντα κώδικα με αυτά της βιβλιογραφίας προκύπτουν οι εξής συγκρίσεις:

1. Με βάση τον αναπτυχθέντα κώδικα προβλέπεται μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας κατά 28%. Η αύξηση αυτή εν μέρει εξηγείται καθώς τα ημειμπερική μοντέλα υποεκτιμούν το έλλειμμα ισχύος που δημιουργείται και ταυτόχρονα, η μέση ταχύτητα των δεδομένων της παρούσας εργασίας είναι μεγαλύτερη από αυτή της βιβλιογραφίας. Ειδικότερα στην έκθεση των (Vikkelsø, Larsen και Sørensen 2003) αναφέρεται ότι σε ύψος 50m η μέση ταχύτητα είναι 7.2m/s που αν αναχθεί στο ύψος πλήμνης προκύπτει ότι είναι 7.36m/s το οποίο είναι μικρότερο από την υπολογισθείσα 7.64m/s. Επίσης σημαντικός παράγοντας μπορεί να είναι και η χωροταξία, καθώς όπως προαναφέρθηκε δεν είναι η ακριβής του πάρκου, παρά μόνο μια προσεγγιστική εκτίμηση. Τέλος παίζει ρόλο και η διαθεσιμότητα του πάρκου, καθώς και το ποσοστό διείσδυσης της παραγόμενης ενέργειας στο δίκτυο.
2. Η αύξηση της παραγωγής ενέργειας οδήγησε και σε μείωση του κόστους ενέργειας κατά 14.61%. Η μείωση αυτή δεν είναι τόσο μεγάλη καθώς το αρχικό κεφάλαιο θεωρήθηκε ακριβότερο κατά 3.4%.
3. Η απόδοση των δύο πάρκων βρέθηκε ακριβώς ίδια.

Στη συνέχεια θα συγκριθεί το βελτιστοποιημένο πάρκο με την αρχική τοπολογία, όπως αυτή υπολογίστηκε.

1. Αρχικά παρατηρείται σαφής αύξηση του μήκους καλωδίωσης κατά 77.5%, καθώς πλέον οι Α/Γ τοποθετούνται μακριά η μία από την άλλη και υπάρχουν αρκετές διακλαδώσεις οι οποίες προσθέτουν αρκετό μήκος στην διασύνδεση. Η αύξηση αυτή του μήκους οδηγεί σε αύξηση του αρχικού κόστους κεφαλαίου κατά 2.3%.
2. Έπειτα είναι εμφανής η αύξηση της αιολικής εκμετάλλευσης κατά 4.8% η οποία οδηγεί ακολούθως σε αύξηση της απόδοσης του αιολικού πάρκου και της παραγόμενης ενέργειας.
3. Με βάση τα σχόλια 1 και 2 είναι εμφανές πως η αύξηση του μήκους του CF, είναι πιο σημαντική από την αύξηση του κόστους καλωδίωσης και εν τέλει προκύπτει μείωση του LCOE κατά 1.6%.

# 5 Συμπεράσματα

Μετά την παρουσίαση των διάφορων παραμετροποιήσεων ήρθε η ώρα να εξαχθούν τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας καθώς και να γίνει πρόταση για περαιτέρω έρευνα πάνω στην παρούσα εργασία.

1. Τα μοντέλα Abramovich και Jensen έχουν παραπλήσια ενεργειακά αποτελέσματα (συνήθως υπερεκτιμούν το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό), διαφέρουν όμως σημαντικά ως προς το επίπεδο τύρβης, λόγω του διαφορετικού εύρους ομόρρου.
2. Τα μοντέλα Abramovich, GCL new και Gauss δίνουν μεγαλύτερο εύρος πεδίου ομόρρου και ακριβώς για αυτό τοπολογίες βελτιστοποιημένες με αυτά τα μοντέλα, θα δώσουν καλύτερο αποτέλεσμα αν υπολογιστούν με άλλα μοντέλα που έχουν μικρότερο εύρος ομόρρου.
3. Το μοντέλο Floris υπερεκτιμά την παραγόμενη ενέργεια.
4. Το μοντέλο Gauss υποεκτιμά την τύρβη.
5. Τα μοντέλα Abramovich και GCL new υπερεκτιμούν την τύρβη.
6. Το κόστος καλωδίωσης προς το CAPEX κυμαίνεται από 1% μέχρι 10% (και πιο συχνά στο εύρος 1% με 5%) και εξαρτάται από το ανηγμένο κόστος των καλωδίων, το ανηγμένο κόστος του αιολικού πάρκου, το πλήθος και την ονομαστική ισχύ των Α/Γ.
7. Οι διαφορετικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης δίνουν σχεδόν ίδιες λύσεις με διαφορά μικρότερη από 0.03%.
8. Η αυστηροποίηση του ορίου τύρβης οδηγεί σε αύξηση του μήκους καλωδίωσης ώστε να είναι πιο απομακρυσμένες οι Α/Γ μεταξύ τους και σε πτώση του CF καθώς τα χαμηλά επίπεδα τύρβης οδηγούν σε πιο αργή αποκατάσταση του ομόρρου.
9. Όταν σε ένα πάρκο οι Α/Γ είναι παραπάνω από το όριο κορεσμού του πάρκου (πόσες Α/Γ μπορούν να χωρέσουν ώστε ο βαθμός απόδοσης να είναι κοντά στο 99%), το CF πέφτει πολύ γρήγορα.
10. Όταν το ρόδο είναι μονοδιευθυντικό οι Α/Γ τείνουν να μπαίνουν σε μέτωπα κάθετα στην διεύθυνση του ανέμου με απόσταση μεταξύ των μετώπων ίση με 7D-8D.
11. Σε ρόδο με κάθετες τις κύριες κατευθύνσεις η απόδοση μπορεί να πέσει πάνω από 5%, ανάλογα και τα όρια του πάρκου.
12. Η παράταξη των Α/Γ σε γραμμές και στήλες όπου οι Α/Γ απέχουν κατά Χ'Χ και Υ'Υ απόσταση ίση με 7D είναι αρκετά αποδοτική ως προς την εκμετάλλευση του αιολικού πάρκου, προσθέτει όμως μεγάλα κόστη καλωδίωσης.

Έχοντας παρουσιάσει τα συμπεράσματα μπορούν να γίνουν προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση. Η κύρια πρόταση είναι να δημιουργηθεί μοντέλο επίλυσης με DMST (Dynamic MST) αντί του απλού μοντέλου, το οποίο να λαμβάνει υπόψιν του πόσες Α/Γ είναι συνδεδεμένες σε σειρά και να βάζει άλλο κόστος στο καλώδιο ανάλογα με το πόσες Α/Γ είναι εν σειρά. Επομένως θα λαμβάνει υπόψιν αν η πιο μικρή ακμή για νέα σύνδεση θα είναι φθηνότερη αν υπάρξει αύξηση του κόστους του καλωδίου ή αν θα είναι καλύτερη η σύνδεση 2 κόμβων μεγαλύτερης απόστασης αλλά με μικρότερο κόστος καλωδίου.

# 6 Βιβλιογραφία

- A.M. Jenkins, M. Scutariu and K.S. Smith. «Offshore Wind Farm Inter-Array Cable Layout.» Glasgow, United Kingdom, χ.χ.
- Andrew Kusiak, Zhe Song. «Design of wind farm layout for maximum wind energy capture.» *Renewable Energy An international journal*, 2009.
- Chuanjun, Pang, Yu Jianming, και Liu Yan. *Correlation analysis of factors affecting wind power based on machine learning and Shapley value*. IET Energy Systems Integration, 2021.
- Chunqiu Wan, Jun Wang, Geng Yang, Huajie Gu, Xing Zhang. «Wind farm micro-siting by Gaussian particle swarm optimization with local search strategy.» *Renewable Energy An international Journal*, 2011.
- Dhal, Mahidhar Nandigam and Shirshak K. «Optimal Design of an Offshore Wind Farm Layout.» *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. 2008.
- Dong Dong Li, Chao He, Hai Yan Shu. «Optimization of Electric Distribution System of Large Offshore Wind Farm with Improved Genetic Algorithm.» *IEEE power and energy society general meeting - conversion and delivery of electrical energy in the 21st century*. 2008. 1-6.
- Francisco M. Gonzalez-Longatt, Peter Wall, Pawel Regulski, Pawel Regulski, Vladimir Terzija. «Optimal Electric Network Design for a Large Offshore Wind Farm Based on a Modified Genetic Algorithm Approach.» *IEEE SYSTEMS JOURNAL, VOL. 6, NO. 1*, 2012.
- G. Mosetti, C. Poloni and B. Diviacco. *Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm*. Τεργέστη: Πανεπιστήμιο Τεργέστης, 1992.
- Grigorios Marmidi, Stavros Lazarou, Eleftheria Pyrgioti. *Optimal placement of wind turbines in a wind park using Monte Carlo Simulation*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, 2007.
- Hans Georg Beyer, Torsten Ruger, Gisela Schafer, Hans Peter Waldl. «Optimization of wind farm configurations with variable number of turbines.» *In the proceedings of the European Union Wind Energy Conference*. Goteborg, 1996.
- Hansen, Jens, και Per Vølund. «Middelgrunden 40 MW offshore wind farm near Middelgrunden 40 MW offshore wind farm near.» χ.χ.
- Himanshu J. Bahirat, Dr. Bruce A. Mork, Hans Kr. Høidalen. «Comparison of Wind Farm Topologies for Offshore Applications.» *IEEE power and energy society general meeting*. 2012. 1-8.
- Huang Lingling, Fu Yang and Guo Xiaoming. «Optimization of Electrical Connection Scheme for Large Offshore Wind Farm with Genetic Algorithm.» *International conference on sustainable power generation and supply*. 2009.
- Huang, H.S. «Distributed Genetic Algorithm for Optimization of Wind Farm Annual Profits.» *International Conference on Volume*. 2007.
- Javier Serrano González, Manuel Burgos Payán,, Jesús Manuel Riquelme Santos,. «A review and recent developments in the optimal wind-turbine micro siting problem.» Στο *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012.



- Larsen, Gunner C. *A simple stationary semi-analytical wake model*. Copenhagen: Technical University of Denmark, 2009.
- Longyan Wang, Andy C.C. Tan, Yuantong Gu. «Comparative study on optimizing the wind farm layout using different design methods and cost models.» Στο *Journal of Wind Engineering and industrial aerodynamics*. Queensland University of Technology, Australia, 2015.
- Lundberg, Stefan. *Configuration study of large wind parks*. Thesis statement, Göteborg, Sweden: Department of Electric Power Engineering, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2003.
- Martin Bilbao, Enrique Alba. «Simulated Annealing for Optimization of Wind Farm Annual Profit.» *International Symposium on Logistics and Industrial Informatics*. Lints, Austria, 2009.
- Narasimha Prasad Prabhu, Parikshit Yadav, Bhuneshwar Prasad and Sanjib Kumar Panda. «Optimal placement of off-shore wind turbines and subsequent micro-siting using Intelligently Tune Harmony Search algorithm.» *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2013.
- New European Wind Atlas*. χ.χ. <https://map.neweuropeanwindatlas.eu/>.
- Nielsen, Per. «Offshore Wind Energy Projects Feasibility Study Guidelines SEAWIND.» Aalborg, 2001.
- Nielsen, Per. *Wind Turbines, Offshore - Annex*. Danish Energy Agency, 2022.
- Padrón, Andrés Santiago, Jared Thomas, Andrew P. J. Stanley, Juan J. Alonso, και Andrew Ning. *Polynomial chaos to efficiently compute the annual energy production in wind farm layout optimization*. *Wind Energy Science*, 2019, 211-231.
- Peng Hou, Weihao Hu, Mohsen Soltani. «Optimized Placement of Wind Turbines in Large-Scale Offshore Wind Farm Using Particle Swarm Optimization Algorithm.» *IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, VOL. 6, NO. 4, Οκτώβριος 2015*.
- Peng Hou, Weihao Hu, Zhe Chen. *Optimization for Offshore Wind Farm Cable Connection Layout using APSO-MST Method*. Department of Energy Technology, Aalborg University, χ.χ.
- Peng Hou, Z. Chen, Weihao Hu. «Optimisation of offshore wind farm cable connection layout considering levelised production cost using dynamic minimum spanning tree algorithm.» *IET Renewable Power Generation*, Αύγουστος 2015.
- Peng, Hou, Hu Weihao, Soltani Mohsen, Chen Cong, και Chen Zhe. «Combined optimization for offshore wind turbine micro siting.» Στο *Applied Energy*, 271-282. 2017.
- Pereira, Daniel. *WIND ROSE FOR MATLAB 20 ABR 2021*. 20 4 2020.
- Pillaia, Ajit C., John Chicka, Mahdi Khorasanchia, Sami Barbouchib, και Lars Johanninga. «Application of an offshore wind farm layout optimization methodology at Middelgrunden wind farm.» Στο *Ocean Engineering* 139, 287-297. 2017.
- S.A. Grady, M.Y. Hussaini, M.M. Abdullah b. *Placement of wind turbines using genetic algorithms*. Florida: The Florida State University, 2004.
- S.D.O. Turner, D.A. Romero, P.Y. Zhang, C.H. Amon, T.C.Y. Chan. «A new mathematical programming approach to optimize wind farm layouts.» *Renewable Energy, An international Journal*, 2013.
- Sebastian Brusca, Rosario Lanzafame, Fabio Famoso, Antonio Galvagno, Michele Messina, Stefano Mauro, Mauro Prestipino. «On the Wind Turbine Wake Mathematical Modelling.» *73rd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association*. Pisa, Italy, 2018.

- Shen, Ju Feng Wen Zhong. «Modelling Wind for Wind Farm Layout Optimization Using Joint Distribution of Wind Speed and Wind Direction.» 2015.
- Sittichoke Pookpant, Weerakorn Ongsakul. «Optimal placement of wind turbines within wind farm using binary particle swarm optimization with time-varying acceleration coefficients.» *Renewable Energy An international Journal*, 2013.
- Sørensen, Hans Christian, Lars Kjeld Hansen, και Jens H. Mølgaard Larsen. «MIDDELGRUNDEN 40 MW OFFSHORE WIND FARM DENMARK - LESSONS LEARNED.» Munich, 2002.
- Sudipta Dutta, Thomas J. Overbye. «Optimal Wind Farm Collector System Topology Design Considering Total Trenching Length.» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2012.
- Sudipta. Dutta, Thomas. J. Overbye. «A Clustering based Wind Farm Collector System Cable Layout Design.» 2011.
- Takeshi Ishihara, Guo-Wei Qian. «A new Gaussian-based analytical wake model for wind turbines considering ambient turbulence intensities and thrust coefficient effects.» Στο *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 275-292. 2018.
- TGS Wind AXIOM. χ.χ. <https://www.tgs.com/wind>.
- U. Aytun Ozturk, Bryan A. Norman. «Heuristic methods for wind energy conversion system positioning.» Στο *Electric Power Systems Research*, 179-185. 2004.
- Vikkelsø, Ann, Jens H M Larsen, και Hans Chr. Sørensen. *The Middelgrunden Offshore Wind Farm*. Copenhagen: Copenhagen Environment and Energy Office CEEO, 2003.
- Wade, Bryce Wade Ricardo Pereira Cameron. «Investigation of offshore wind farm layouts regarding wake effects and cable topology.» 2019.
- Wedzik, Andrzej, Tomasz Siewierski, και Michał Szykowski. «A new method for simultaneous optimizing of wind farm's network layout and cable cross-sections by MILP optimization.» Στο *Applied Energy* , 525-538. 2016.
- Wu, Yuan-Kang, Ching-Yin Lee, Chao-Rong Chen, Kun-Wei Hsu, και Huang-Tien Tseng. «Optimization of the Wind Turbine Layout and Transmission System Planning for a Large-Scale Offshore Wind Farm by AI Technology.» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 50, NO. 3., May/June 2014*.
- Xiang, Merlin, και Green. *Cost Analysis and Comparison of HVAC, LFAC and HVDC for Offshore Wind Power Connection*. London: Imperial College London, χ.χ.
- Yuanhang Qi, Peng Hou, Liang Yang and Guangya Yang. «Simultaneous Optimisation of Cable Connection Schemes and Capacity for Offshore Wind Farms via a Modified Bat Algorithm.» 2019.
- Yunus Eroglu, Serap Ulusam Seçkiner. «Design of wind farm layout using ant colony algorithm.» *Renewable Energy An international Journal*, 2012.
- Yu-Ting Wu, Fernando Porte-Agel. «Modeling turbine wakes and power losses within a wind farm using LES: An application to the Horns Rev offshore wind farm.» Στο *Renewable Energy 75 (2015)*, 945-955. 2015.
- Θεολογίτου, Παρασκευή. «ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΜΕΣΩ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΟΜΟΡΡΟΥ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥΣ.» Μεταπτυχιακή Εργασία, Αθήνα, 2022.
- Καρκάνη, Αναστασία. Υπολογιστικό θέμα, Αθήνα, 2021.

Μεργελές, Γεώργιος. *Πηγές, Διασπορά και Έλεγχος Αέριας Ρύπανσης*. Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, 2006.

Μπεργελές, Γεώργιος. *ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ*. Αθήνα: Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, 2005.

Ορφέας-Γεώργιος, Ρόβος. *Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την πρόλεξη του πεδίου ροής στον ομόρρου ανεμογεννήτριας και εφαρμογή στην εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης αιολικού πάρκου*. Διπλωματική Εργασία, Αθήνα: Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, χ.χ.

Χαλκιαδάκης, Νικόλαος. *Εκτίμηση οικονομικοτεχνικά εκμεταλλευσιμου θαλάσσιου αιολικού δυναμικού με πλωτές ανεμογεννήτριες στη Μεσόγειο*. Διπλωματική εργασία, Αθήνα: Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, 2018.