



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Ρευστών  
Εργαστήριο Αεροδυναμικής

Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την εκτίμηση της υπολειπόμενης  
διάρκειας ζωής χερσαίων ανεμογεννητριών

Διπλωματική Εργασία

**Τσαρουχάς Θεμιστοκλής**

**Επιβλέπων: Ριζιώτης Βασίλειος, Αναπληρωτής Καθηγητής, ΕΜΠ**

**Συνεπιβλέπων: Προσπαθόπουλος Ιωάννης, Μέλος του ΕΔΙΠ, ΕΜΠ**

**Αθήνα, Ιούλιος 2024**



National Technical University of Athens  
School of Mechanical Engineering  
Fluids Department  
Lab. Of Aerodynamics

Development of a methodology for the estimation of the  
remaining lifetime of onshore wind turbines

Diploma Thesis

*Tsarouchas Themistoklis*

*Supervisor: Vasilios Riziotis, Associate Professor, NTUA*

*Co-Supervisor: Prospathopoulos Ioannis, Member of the HPS, NTUA*

Athens, July 2024



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....                                                      | 6  |
| Ευχαριστίες .....                                                          | 11 |
| Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας: ..... | 12 |
| Περίληψη .....                                                             | 13 |
| Abstract .....                                                             | 14 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....                                                | 15 |
| Πλαίσιο – Στόχος της έρευνας .....                                         | 15 |
| Οριοθέτηση .....                                                           | 16 |
| Διάρθρωση .....                                                            | 16 |
| Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....                                             | 17 |
| Επισκόπηση Μεθοδολογίας .....                                              | 17 |
| Επισκόπηση μικροκλιματικού μοντέλου .....                                  | 18 |
| Εξεταζόμενο μοντέλο Α/Γ & Τοπογραφία .....                                 | 18 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ .....                                        | 20 |
| 2.1 Υλοποίηση πλέγματος .....                                              | 20 |
| 2.1.1 Βασικά Χαρακτηριστικά .....                                          | 20 |
| 2.1.2 Μαθηματική Ανάλυση .....                                             | 21 |
| 2.1.3 Διαδικασία Υλοποίησης .....                                          | 23 |
| 2.1.4 Περιβαλλοντικές Συνθήκες .....                                       | 31 |
| 2.1.5 Τελικά αποτελέσματα & Ανάλυση .....                                  | 34 |
| 2.2 Συμπεράσματα .....                                                     | 46 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΥΠΟΚΛΙΜΑΚΩΣΗ Α/Γ ΑΝΑΦΟΡΑΣ 5MW .....                           | 47 |
| 3.1 Βασικά Χαρακτηριστικά .....                                            | 47 |
| 3.1.1 Επεξεργασία δομικών χαρακτηριστικών .....                            | 48 |
| 3.1.2 Επεξεργασία αυτομάτου ελέγχου .....                                  | 49 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ .....                                   | 53 |
| 4.1. Κατασκευή χρονοσειρών ανέμου .....                                    | 53 |
| 4.2. Προσομοίωση απόκρισης .....                                           | 58 |
| 4.3. Επεξεργασία αποτελεσμάτων .....                                       | 67 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ .....    | 77 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....                                              | 79 |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΟΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ..... | 80 |
| ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ.....                | 80 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1.....              | 81 |

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

|                                                                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΥΠΟΘΕΤΙΚΕΣ Α/Γ ΤΟΥ ΠΑΡΚΟΥ .....                                                                                                                                 | 18 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1.3.1: ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΡΧΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ .....                                                                                                                                                            | 23 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1.3.2: ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΝΕΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ .....                                                                                                                                                | 24 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1.3.3: ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΤΩΝ 10 Α/Γ ΓΙΑ ΤΟ ΕΠΕΚΤΑΜΕΝΟ ΠΛΕΓΜΑ ΤΩΝ 0 <sup>ο</sup> .....                                                                                                                    | 24 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1.3.4: ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΤΩΝ 10 Α/Γ ΓΙΑ ΤΑ 3 ΠΛΕΓΜΑΤΑ, ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΠΥΚΝΩΣΗ .....                                                                                                                            | 26 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1.5.1: ΎΨΗ ΤΩΝ 10 Α/Γ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΑΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΛΗΜΝΗ<br>.....                                                                                                            | 35 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2.1: ΜΕΣΟ ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΟ ΜΕΤΡΟ ΤΗΣ ΈΝΤΑΣΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ 10 Α/Γ ΤΟΥ ΠΑΡΚΟΥ .....                                                                                                                       | 46 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1.1: ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΉΔΗ ΥΠΆΡΧΟΥΣΑΣ Α/Γ ΑΝΑΦΟΡΑΣ “NREL” 5 MW .....                                                                                                                               | 47 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1.1: ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΥΡΒΗΣ ΚΑΙΜΑΛ.....                                                                                                                                  | 55 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1.2: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ Α/Γ ΣΕ ΚΛΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑ IEC 61400 .....                                                                                                                                 | 55 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1.3: ΤΕΛΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΥΡΒΗΣ, ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΥΡΒΗΣ ΚΑΙΜΑΛ. 56                                                                                                                    |    |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1.4: ΤΙΜΕΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ Α/Γ 8 – ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΑ .....                                                                                                                        | 56 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1.5: ΤΙΜΕΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ Α/Γ 8 – ΒΟΡΕΙΑ .....                                                                                                                                 | 56 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1.6: ΤΙΜΕΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ Α/Γ 8 – ΒΟΡΕΙΟΔΥΤΙΚΑ.....                                                                                                                            | 56 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1.7: ΤΙΜΕΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ Α/Γ 10 – ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΑ .....                                                                                                                       | 57 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1.8: ΤΙΜΕΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ Α/Γ 10 – ΒΟΡΕΙΑ .....                                                                                                                                | 57 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1.9: ΤΙΜΕΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ Α/Γ 10 – ΒΟΡΕΙΟΔΥΤΙΚΑ.....                                                                                                                           | 57 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1.10: ΤΙΜΕΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ Α/Γ ΤΟΥ IEC – ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΑ<br>.....                                                                                                              | 57 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1.11: ΤΙΜΕΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ Α/Γ ΤΟΥ IEC – ΒΟΡΕΙΑ .....                                                                                                                          | 57 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1.12: ΤΙΜΕΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ Α/Γ ΤΟΥ IEC – ΒΟΡΕΙΟΔΥΤΙΚΑ.....                                                                                                                     | 57 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3.1: ΟΙ 3 ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΡΟΠΕΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ RAINFLOW COUNTING ΓΙΑ ΤΑ 2 ΠΡΩΤΑ<br>ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΤΗΣ 8 <sup>ΗΞ</sup> Α/Γ ΓΙΑ ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΆΝΕΜΟ, ΚΑΙ ΟΙ ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΚΝΜ.....                        | 68 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3.2: ΟΙ 3 ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΡΟΠΕΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ RAINFLOW COUNTING ΓΙΑ ΤΟ 3 <sup>ο</sup> ΠΤΕΡΥΓΙΟ ΚΑΙ<br>ΤΟΝ ΠΥΡΓΟ ΤΗΣ 8 <sup>ΗΞ</sup> Α/Γ ΓΙΑ ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΆΝΕΜΟ, ΚΑΙ ΟΙ ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΚΝΜ .....  | 68 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3.3: ΟΙ 3 ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΡΟΠΕΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ RAINFLOW COUNTING ΓΙΑ ΤΑ 2 ΠΡΩΤΑ<br>ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΤΗΣ 8 <sup>ΗΞ</sup> Α/Γ ΓΙΑ ΒΟΡΕΙΟ ΆΝΕΜΟ, ΚΑΙ ΟΙ ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΚΝΜ.....                                 | 68 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3.4: ΟΙ 3 ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΡΟΠΕΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ RAINFLOW COUNTING ΓΙΑ ΤΟ 3 <sup>ο</sup> ΠΤΕΡΥΓΙΟ ΚΑΙ<br>ΤΟΝ ΠΥΡΓΟ ΤΗΣ 8 <sup>ΗΞ</sup> Α/Γ ΓΙΑ ΒΟΡΕΙΟ ΆΝΕΜΟ, ΚΑΙ ΟΙ ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΚΝΜ.....            | 69 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3.5: ΟΙ 3 ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΡΟΠΕΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ RAINFLOW COUNTING ΓΙΑ ΤΑ 2 ΠΡΩΤΑ<br>ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΤΗΣ 8 <sup>ΗΞ</sup> Α/Γ ΓΙΑ ΒΟΡΕΙΟΔΥΤΙΚΟ ΆΝΕΜΟ, ΚΑΙ ΟΙ ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΚΝΜ .....                          | 69 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3.6: ΟΙ 3 ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΡΟΠΕΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ RAINFLOW COUNTING ΓΙΑ ΤΟ 3 <sup>ο</sup> ΠΤΕΡΥΓΙΟ ΚΑΙ<br>ΤΟΝ ΠΥΡΓΟ ΤΗΣ 8 <sup>ΗΞ</sup> Α/Γ ΓΙΑ ΒΟΡΕΙΟΔΥΤΙΚΟ ΆΝΕΜΟ, ΚΑΙ ΟΙ ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΚΝΜ .....     | 69 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3.7: ΟΙ 3 ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΡΟΠΕΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ RAINFLOW COUNTING ΓΙΑ ΤΑ 2 ΠΡΩΤΑ<br>ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΤΗΣ 10 <sup>ΗΞ</sup> Α/Γ ΓΙΑ ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΆΝΕΜΟ, ΚΑΙ ΟΙ ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΚΝΜ.....                       | 70 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3.8: ΟΙ 3 ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΡΟΠΕΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ RAINFLOW COUNTING ΓΙΑ ΤΟ 3 <sup>ο</sup> ΠΤΕΡΥΓΙΟ ΚΑΙ<br>ΤΟΝ ΠΥΡΓΟ ΤΗΣ 10 <sup>ΗΞ</sup> Α/Γ ΓΙΑ ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΆΝΕΜΟ, ΚΑΙ ΟΙ ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΚΝΜ ..... | 70 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3.9: ΟΙ 3 ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΡΟΠΕΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ RAINFLOW COUNTING ΓΙΑ ΤΑ 2 ΠΡΩΤΑ<br>ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΤΗΣ 10 <sup>ΗΞ</sup> Α/Γ ΓΙΑ ΒΟΡΕΙΟ ΆΝΕΜΟ, ΚΑΙ ΟΙ ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΚΝΜ.....                                | 70 |

|                                                                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Πίνακας 4.3.10: Οι 3 Ισοδύναμες Ροπές του Αλγορίθμου Rainflow Counting για το 3 <sup>ο</sup> Πτερύγιο και τον Πύργο της 10 <sup>Hz</sup> Α/Γ για Βόρειο Άνεμο, και οι Μέσες Τιμές τους σε κNm .....          | 71 |
| Πίνακας 4.3.11: Οι 3 Ισοδύναμες Ροπές του Αλγορίθμου Rainflow Counting για τα 2 Πρώτα Πτερύγια της 10 <sup>Hz</sup> Α/Γ για Βορειοδυτικό Άνεμο, και οι Μέσες Τιμές τους σε κNm .....                         | 71 |
| Πίνακας 4.3.12: Οι 3 Ισοδύναμες Ροπές του Αλγορίθμου Rainflow Counting για το 3 <sup>ο</sup> Πτερύγιο και τον Πύργο της 10 <sup>Hz</sup> Α/Γ για Βορειοδυτικό Άνεμο, και οι Μέσες Τιμές τους σε κNm .....    | 71 |
| Πίνακας 4.3.13: Οι 3 Ισοδύναμες Ροπές του Αλγορίθμου Rainflow Counting για τα 2 Πρώτα Πτερύγια της Ονομαστικής (IEC) Α/Γ για Βορειοανατολικό Άνεμο, και οι Μέσες Τιμές τους σε κNm.....                      | 72 |
| Πίνακας 4.3.14: Οι 3 Ισοδύναμες Ροπές του Αλγορίθμου Rainflow Counting για το 3 <sup>ο</sup> Πτερύγιο και τον Πύργο της Ονομαστικής (IEC) Α/Γ για Βορειοανατολικό Άνεμο, και οι Μέσες Τιμές τους σε κNm..... | 72 |
| Πίνακας 4.3.15: Οι 3 Ισοδύναμες Ροπές του Αλγορίθμου Rainflow Counting για τα 2 Πρώτα Πτερύγια της Ονομαστικής (IEC) Α/Γ για Βόρειο Άνεμο, και οι Μέσες Τιμές τους σε κNm .....                              | 72 |
| Πίνακας 4.3.16: Οι 3 Ισοδύναμες Ροπές του Αλγορίθμου Rainflow Counting για το 3 <sup>ο</sup> Πτερύγιο και τον Πύργο της Ονομαστικής (IEC) Α/Γ για Βόρειο Άνεμο, και οι Μέσες Τιμές τους σε κNm .....         | 73 |
| Πίνακας 4.3.17: Οι 3 Ισοδύναμες Ροπές του Αλγορίθμου Rainflow Counting για τα 2 Πρώτα Πτερύγια της Ονομαστικής (IEC) Α/Γ για Βορειοδυτικό Άνεμο, και οι Μέσες Τιμές τους σε κNm .....                        | 73 |
| Πίνακας 4.3.18: Οι 3 Ισοδύναμες Ροπές του Αλγορίθμου Rainflow Counting για το 3 <sup>ο</sup> Πτερύγιο και τον Πύργο της Ονομαστικής (IEC) Α/Γ για Βορειοδυτικό Άνεμο, και οι Μέσες Τιμές τους σε κNm.....    | 73 |
| Πίνακας 4.3.19: Οι Συνολικές Ισοδύναμες Ροπές για το Μέσο Πτερύγιο & Πύργο της 8 <sup>Hz</sup> Α/Γ, για Όλες τις Διευθύνσεις σε κNm .....                                                                    | 74 |
| Πίνακας 4.3.20: Οι Συνολικές Ισοδύναμες Ροπές για το Μέσο Πτερύγιο & Πύργο της 10 <sup>Hz</sup> Α/Γ, για Όλες τις Διευθύνσεις σε κNm .....                                                                   | 74 |
| Πίνακας 4.3.21: Οι Συνολικές Ισοδύναμες Ροπές για το Μέσο Πτερύγιο & Πύργο της Ονομαστικής (IEC) Α/Γ, για Όλες τις Διευθύνσεις σε κNm .....                                                                  | 75 |

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ΕΙΚΟΝΑ 1.2: ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΣΧΥΟΣ & ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΩΣΗΣ $C_T$ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΟ ΥΨΟΣ ΤΗΣ ΠΛΗΜΝΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ Α/Γ ΤΟΥ ΠΑΡΚΟΥ V80 ..... | 19 |
| ΕΙΚΟΝΑ 1.1: ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΟ ΥΨΟΣ ΤΗΣ ΠΛΗΜΝΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ Α/Γ ΤΟΥ ΠΑΡΚΟΥ .....                             | 19 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.3.2: ΑΡΧΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ ΤΟΥ ΝΗΣΙΟΥ .....                                                                                           | 23 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.3.1: ΑΠΕΙΚΟΝΗΣΗ ΤΟΥ ΝΗΣΙΟΥ ΣΤΟΝ ΧΑΡΤΗ .....                                                                                   | 23 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.3.4: ΚΑΤΟΨΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ $22.5^\circ$ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΠΥΚΝΩΣΗ .....                                                                     | 25 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.3.3: ΚΑΤΟΨΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ $0^\circ$ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΠΥΚΝΩΣΗ .....                                                                        | 25 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.3.5: ΚΑΤΟΨΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ $337.5^\circ$ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΠΥΚΝΩΣΗ .....                                                                    | 26 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.3.6: ΑΡΧΕΙΟ ΕΙΣΟΔΟΥ ΜΕ ΤΙΣ ΘΕΣΕΙΣ & ΔΙΑΜΕΤΡΟΥΣ ΤΩΝ Α/Γ .....                                                                  | 27 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.3.7: ΑΡΧΕΙΟ ΕΙΣΟΔΟΥ ΜΕ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ, & ΤΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΤΗΣ ΠΡΟΟΔΟΥ .....                                   | 27 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.3.8: ΔΙΑΓΩΝΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΤΩΝ $337.5^\circ$ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΥΚΝΩΣΗ .....                                               | 27 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.3.8: ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ ΚΑΤΟΨΗ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΤΩΝ $0^\circ$ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΥΚΝΩΣΗ, ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ Α/Γ .....                               | 28 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.3.8: ΚΑΤΟΨΗ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΤΩΝ $0^\circ$ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΥΚΝΩΣΗ .....                                                                | 28 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.3.8: ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ ΚΑΤΟΨΗ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΤΩΝ $0^\circ$ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΥΚΝΩΣΗ, ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ Α/Γ .....                               | 29 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.3.8: ΚΑΤΟΨΗ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΤΩΝ $22.5^\circ$ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΥΚΝΩΣΗ .....                                                             | 29 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.3.8: ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ ΚΑΤΟΨΗ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΤΩΝ $337.5^\circ$ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΥΚΝΩΣΗ, ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ Α/Γ .....                           | 30 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.3.8: ΚΑΤΟΨΗ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΤΩΝ $337.5^\circ$ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΥΚΝΩΣΗ .....                                                            | 30 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.4.2: ΡΟΔΟ ΑΝΕΜΟΥ ΓΙΑ ΥΨΟΣ 50Μ .....                                                                                           | 32 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.4.1: ΡΟΔΟ ΑΝΕΜΟΥ ΓΙΑ ΥΨΟΣ 25Μ .....                                                                                           | 32 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.4.3: ΡΟΔΟ ΑΝΕΜΟΥ ΓΙΑ ΥΨΟΣ 115Μ .....                                                                                          | 32 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.4.4: ΡΟΔΟ ΑΝΕΜΟΥ ΓΙΑ ΥΨΟΣ 195Μ .....                                                                                          | 32 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.4.5: ΡΟΔΟ ΑΝΕΜΟΥ ΓΙΑ ΥΨΟΣ 298Μ .....                                                                                          | 32 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.1: ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΑΡΧΗΣ ΤΟΥ ΑΡΧΕΙΟΥ ΕΞΟΔΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΤΩΝ $0^\circ$ .....                                | 34 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.1.1: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 180\text{M}$ .....                              | 37 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.1.2: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 190\text{M}$ .....                              | 37 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.1.3: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 200\text{M}$ .....                              | 38 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.1.4: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 210\text{M}$ .....                              | 38 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.1.5: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 220\text{M}$ .....                              | 38 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.1.6: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 220\text{M}$ .....                              | 38 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.1.9: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 260\text{M}$ .....                              | 39 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.1.8: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 250\text{M}$ .....                              | 39 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.1.7: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 240\text{M}$ .....                              | 39 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.1.10: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 260\text{M}$ .....                             | 39 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.1.11: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ $V_x$ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 180\text{M}$ .....                                       | 40 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.1.12: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ $V_x$ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 200\text{M}$ .....                                       | 40 |



|                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.1.13: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ $V_x$ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 220\text{M}$ .....                                                                             | 40 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.1.14: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ $V_x$ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 240\text{M}$ .....                                                                             | 41 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.1.15: ΠΡΟΣΟΨΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ $V_x$ ΓΙΑ ΤΗΝ $1^{\text{H}}$ Α/Γ .....                                                                                | 41 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.1.16: ΠΡΟΣΟΨΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ $V_x$ ΓΙΑ ΤΗΝ $5^{\text{H}}$ Α/Γ .....                                                                                | 41 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.1.17: ΠΡΟΣΟΨΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ $V_x$ ΓΙΑ ΤΗΝ $6^{\text{H}}$ Α/Γ .....                                                                                | 41 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.2.1: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 180\text{M}$                                                                          | 42 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.2.2: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 200\text{M}$                                                                          | 42 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.2.3: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 220\text{M}$                                                                          | 43 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.2.4: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 240\text{M}$                                                                          | 43 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.2.5: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 260\text{M}$                                                                          | 43 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.2.6: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΠΛΑΤΟΣ $y = 4390\text{M}$ .....                                                                 | 43 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.2.7: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ $V_x$ ΓΙΑ ΠΛΑΤΟΣ $y = 4390\text{M}$ .....                                                                           | 44 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.3.1: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 200\text{M}$                                                                          | 44 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.3.2: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 220\text{M}$                                                                          | 45 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.3.3: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΓΙΑ ΥΨΟΣ $z = 240\text{M}$                                                                          | 45 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1.5.3.4: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ $V_x$ ΓΙΑ ΠΛΑΤΟΣ $y = 7291\text{M}$ .....                                                                           | 45 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3.1.2.1: ΤΜΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΕΝΟΣ ΑΠΟ ΤΑ ΑΡΧΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ, ΟΠΟΥ ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΟΝΤΑΙ ΟΡΙΣΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ .....   | 49 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3.1.2.2: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ ΓΙΑ ΒΗΜΑΤΙΚΗ ΕΙΣΟΔΟ .....                                                       | 51 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3.1.2.3: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ ΓΙΑ ΒΗΜΑΤΙΚΗ ΕΙΣΟΔΟ .....                                                                  | 51 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3.1.2.4: ΤΜΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΟΥ ΑΡΧΕΙΟΥ ΕΙΣΟΔΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΤΟΥ CONTROLLER .....                                                                   | 52 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.1.1: ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΕΝΟΣ ΠΟΛΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΜΕ 16 ΑΚΤΙΝΙΚΑ & 64 ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ .....                                                                        | 53 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.2.1: ΚΑΜΠΤΙΚΕΣ & ΣΤΡΕΠΤΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ ΣΕ ΠΑΚΤΩΜΕΝΟ ΠΤΕΡΥΓΙΟ Α/Γ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΘΕΤΗΣ ΣΕ ΑΥΤΟ ΔΥΝΑΜΗΣ “F” .....                                                        | 58 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.2.2: ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΡΟΠΗ & ΔΥΝΑΜΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΣΕ ΠΑΚΤΩΜΕΝΗ ΔΟΚΟ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΑ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ .....                                                      | 59 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.2.3: ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΡΟΠΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΣΤΗΝ ΒΑΣΗ ΤΩΝ 3 ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΤΗΣ $8^{\text{H}}$ Α/Γ ΣΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 350 – 360 SEC ΓΙΑ ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΑΝΕΜΟ .....          | 60 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.2.4: ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΡΟΠΗ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ $1^{\text{OY}}$ ΦΤΕΡΟΥ ΤΗΣ $8^{\text{H}}$ Α/Γ ΣΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 350 – 360 SEC ΓΙΑ ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΑΝΕΜΟ .....            | 61 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.2.5: ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΡΟΠΗ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΤΗΣ $8^{\text{H}}$ Α/Γ ΣΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 350 – 360 SEC ΓΙΑ ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΑΝΕΜΟ.....                             | 61 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.2.6: ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΡΟΠΗ ΠΤΕΡΥΓΙΣΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ $1^{\text{OY}}$ ΦΤΕΡΟΥ ΤΗΣ $8^{\text{H}}$ Α/Γ ΣΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 350 – 360 SEC ΓΙΑ ΒΟΡΕΙΟ ΑΝΕΜΟ ..... | 62 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.2.7: ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΡΟΠΗ ΠΥΡΓΟΥ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΤΗΣ $8^{\text{H}}$ Α/Γ ΣΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 350 – 380 SEC ΓΙΑ ΒΟΡΕΙΟ ΑΝΕΜΟ.....                                | 62 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.2.8: ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΡΟΠΗ ΠΤΕΡΥΓΙΣΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΡΙΖΑ ΤΩΝ 3 ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΤΗΣ $8^{\text{H}}$ Α/Γ ΣΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 350 – 380 SEC ΓΙΑ ΒΟΡΕΙΟ ΑΝΕΜΟ .....                 | 63 |

|                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ΕΙΚΟΝΑ 4.2.9: ΚΑΜΠΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΠΤΕΡΥΓΙΣΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΣΤΗΝ ΡΙΖΑ ΤΟΥ 1 <sup>ΟΥ</sup> ΦΤΕΡΟΥ ΤΗΣ 8 <sup>ΗΣ</sup> Α/Γ ΣΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 350 – 380 SEC ΓΙΑ ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΑΝΕΜΟ .....         | 64 |
| ΦΟΡΤ .....                                                                                                                                                                                 | 64 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.2.10: ΚΑΜΠΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΠΤΕΡΥΓΙΣΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΣΤΗΝ ΡΙΖΑ ΤΟΥ 1 <sup>ΟΥ</sup> ΦΤΕΡΟΥ ΤΗΣ 8 <sup>ΗΣ</sup> Α/Γ ΣΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 350 – 380 SEC ΓΙΑ ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΑΝΕΜΟ .....        | 64 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.2.12: ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΡΟΠΗ ΠΤΕΡΥΓΙΣΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΡΙΖΑ ΤΩΝ 3 ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΜΙΑΣ Α/Γ ΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ .....                                                       | 65 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.2.11: ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΡΟΠΗ ΠΤΕΡΥΓΙΣΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΡΙΖΑ ΤΩΝ 3 ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΤΗΣ 8 <sup>ΗΣ</sup> Α/Γ ΣΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 0 – 660 SEC ΓΙΑ ΒΟΡΕΙΟ ΑΝΕΜΟ .....                             | 65 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.2.14: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΡΟΠΗ ΠΥΡΓΟΥ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΤΗΣ 8 <sup>ΗΣ</sup> Α/Γ ΣΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 350 – 360 SEC ΓΙΑ ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΑΝΕΜΟ .....                                | 66 |
| ΑΝΕΜΟ .....                                                                                                                                                                                | 66 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.2.13: ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΡΟΠΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ 1 <sup>ΟΥ</sup> ΦΤΕΡΟΥ ΤΗΣ 8 <sup>ΗΣ</sup> Α/Γ ΣΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 350 – 360 SEC ΓΙΑ ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΑΝΕΜΟ ..... | 66 |
| ΑΝΕΜΟ .....                                                                                                                                                                                | 66 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.3.1: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΤΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΕ ΜΙΑ ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ RAINFLOW .....                                                            | 67 |

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ξεκινήσω αυτήν την εργασία εκφράζοντας την βαθιά μου ευγνωμοσύνη προς τον κ. Ριζιώτη Βασίλειο, αναπληρωτή καθηγητή της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, του οποίου η συνεχής καθοδήγηση, υποστήριξη και εμπειρογνωμοσύνη ήταν απαραίτητες, καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας αυτής.

Τις ευχαριστίες μου θέλω να επεκτείνω και στον κ. Προσπαθόπουλο Ιωάννη, μέλος του ΕΔΙΠ της σχολής, καθώς δίχως την επιμέλεια, εξειδίκευση & εκτενή υποστήριξή του, το 1<sup>ο</sup> τμήμα της εργασίας δεν θα ήταν εφικτό να πραγματοποιηθεί.

### 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.

Τσαρουχάς Θεμιστοκλής

## Περίληψη

Πολλά από τα αιολικά πάρκα που μπήκαν σε λειτουργία στις αρχές της 10ετίας του 2000, φτάνουν σήμερα στο τέλος του κύκλου ζωής τους, βάσει των προδιαγραφών που ορίζει ο κανονισμός πιστοποίησης των ανεμογεννητριών. Ανακύπτει λοιπόν το ερώτημα, αν η διάρκεια ζωής του πάρκου μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω, βάσει των πραγματικών περιβαλλοντικών συνθηκών στις οποίες εκτίθεται, σε σχέση με αυτές των προδιαγραφών. Το ερώτημα αυτό σκοπεύει να απαντήσει η εργασία αυτή, αποτυπώνοντας αρχικά τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά του πάρκου και υπολογίζοντας μέσω αεροελαστικών προσομοιώσεων, τα κοπωτικά φορτία σε συγκεκριμένες μηχανές ενδιαφέροντος για να συγκριθούν με αυτά του κανονισμού IEC – 61400. Η διαδικασία χωρίζεται σε 3 στάδια, στο 1<sup>ο</sup> στάδιο, πραγματοποιείται η υλοποίηση του υπολογιστικού χωρίου, για ένα υποθετικό πάρκο που βρίσκεται σε νησί του Αιγαίου, το οποίο περιλαμβάνει όλη την σύνθετη τοπογραφία της νήσου, καθώς και θαλάσσιες εκτάσεις σε κάθε κατεύθυνση ώστε να μπορεί να διαμορφωθεί κατάλληλα το οριακό στρώμα. Κατασκευάζονται συνολικά 3 πλέγματα, ένα για κάθε μια από τις 3 κατευθύνσεις ανέμου των  $22.5^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$  και  $337.5^{\circ}$  μοιρών αντιστοίχως. Σε 2 στάδιο προσομοιώνεται η ροή, μέσω της επίλυσης των τρισδιάστατων εξισώσεων Navier – Stokes πάνω από την σύνθετη τοπογραφία, χρησιμοποιώντας διαφορετικό προφίλ εισόδου ανέμου σε κάθε διεύθυνση, έχοντας λάβει ήδη μια εκτίμηση για τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Σε 3<sup>ο</sup> στάδιο τελικά, έχοντας αναγνωριστεί οι 2 ανεμογεννήτριες που δέχονται την ελάχιστη & μέγιστη κόπωση στο πάρκο, εισάγονται στο λογισμικό hGAST, αφού πρώτα μοντελοποιηθούν στην κατάλληλη κλίμακα, με σκοπό τον λεπτομερή υπολογισμό των φορτίων & καταπονήσεων που δέχονται, ώστε τελικά να συγκριθούν τα αποτελέσματα, με αυτά που ορίζει ο κανονισμός IEC 61400, και να αποφασιστεί αν μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω η διάρκεια ζωής τους.

## Abstract

Many of the wind farms that were commissioned in the early 2000s are now reaching the end of their life cycle, based on the specifications set by the wind turbine certification regulation. The question therefore arises as to whether the life of the farm can be further extended, based on the actual environmental conditions to which it is exposed, compared to those in the specifications. This paper intends to answer that question, by first capturing the wind characteristics of the park and calculating the fatigue loads on specific machines of interest through aero-elastic simulations, in order to compare them with those of the IEC - 61400 regulation. The process is divided into 3 stages. In stage 1, the implementation of the computational grid domain is carried out for a hypothetical park located on an Aegean island, which includes all the complex topography of the island, as well as marine areas in each direction so that the boundary layer can be properly developed. A total of 3 grids are constructed, one for each of the three wind directions of  $22.5^\circ$ ,  $0^\circ$  and  $337.5^\circ$  degrees respectively. In the second stage the flow is simulated by solving the 3D f - Stokes equations over the complex topography, using different wind input profiles in each direction, having already obtained an estimate for the environmental conditions. Finally, in a 3rd stage, having identified the 2 wind turbines that receive the minimum & maximum fatigue in the park, their characteristics are entered in the hGAST software, after being beforehand modeled in the proper scale, in order to produce a detailed calculation of the loads & stresses they receive, so that the results can finally be compared appropriately, with those defined by the IEC 61400 regulation, and decide if their lifetime can be further extended.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### Πλαίσιο – Στόχος της έρευνας

Στην σημερινή εποχή, ο ρόλος της αιολικής ενέργειας στο ενεργειακό μίγμα αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη βαρύτητα λόγω των πολυάριθμων πλεονεκτημάτων και εφαρμογών της, με κυριότερο την ανανεωσιμότητά της. Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα που είναι αναλώσιμα και την πυρηνική ενέργεια που παράγει απόβλητα, η αιολική ενέργεια πηγάζει από φυσικούς, άφθονους πόρους καθιστώντας την ανεξάντλητη και φιλική προς το περιβάλλον. Με την εκμετάλλευσή της, μέσω των ανεμογεννητριών στα αιολικά πάρκα, μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία με την σειρά της εξυπηρετεί πληθώρα καθημερινών ανθρώπινων εφαρμογών.

Την δεκαετία του 1990 ξεκίνησε να αναπτύσσεται το ενδιαφέρον για την αιολική ενέργεια, με μεγάλη αύξηση στις ετήσιες εγκαταστάσεις να παρατηρείται μετά το 2000, συνεχίζοντας να αυξάνεται έως σήμερα. Με το σύνολο των πάρκων που εγκαταστάθηκαν στις αρχές του 2000 να πλησιάζουν την σχεδιασμένη διάρκεια ζωής τους, γεννιέται το ερώτημα αν ο εναπομένον χρόνος ζωής τους έχει όντως τελειώσει, ή εάν βάσει των συνθηκών στις οποίες έχουν εκτεθεί κατά την λειτουργία τους, μπορεί να επεκταθεί λίγο περαιτέρω.

Το ερώτημα αυτό αποσκοπεί να απαντήσει αναλυτικά η μελέτη αυτή, μέσω της διερεύνησης της συσχέτισης που παρουσιάζουν τα φορτία κόπωσης που εμφανίζονται σε μια ανεμογεννήτρια εν λειτουργία, σε σχέση με αυτά που καθορίζει ο κανονισμός IEC 61400. Τελικός στόχος είναι να εξακριβωθεί αν και πόσο παραπάνω μπορεί να συνεχίσει την κανονική, ασφαλή λειτουργία της.

Για τον σκοπό αυτό, προσομοιώθηκε αρχικά μια τοπογραφία ενός αιολικού πάρκου, και με την βοήθεια ενός μικροκλιματικού μοντέλου υπολογίστηκε σε αυτήν το πεδίο ροής. Μέσω των αποτελεσμάτων αυτών, εξακριβώθηκαν οι μηχανές που δέχονται τη μέγιστη και ελάχιστη κόπωση στο πάρκο. Αφού το μοντέλο της μηχανής που εξετάζεται μοντελοποιήθηκε στην κατάλληλη κλίμακα, πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις της δυναμικής απόκρισής της για τις επικρατέστερες συνθήκες του πάρκου, και με την στάθμιση των αποτελεσμάτων έγινε η εξαγωγή των συμπερασμάτων για την εναπομένουσα διάρκεια ζωής του πάρκου.

Η έρευνα αυτή αναδεικνύει τη μεθοδολογία που πρέπει να ακολουθείται σε τέτοιες περιπτώσεις, με σκοπό την επέκταση της ζωής των ανεμογεννητριών και την προώθηση της αιολικής ενέργειας. Η διερεύνηση των συνθηκών κόπωσης και των φορτίων που δέχονται οι ανεμογεννήτριες εν λειτουργία, σε συνδυασμό με την προσομοίωση της τοπογραφίας και των μικροκλιματικών συνθηκών του αιολικού πάρκου, παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τη βέλτιστη διαχείριση και συντήρηση των εγκαταστάσεων. Η μεθοδολογική προσέγγιση αυτή ενισχύει τη βιωσιμότητα & την οικονομική αποδοτικότητα της αιολικής ενέργειας, προωθώντας την υιοθέτηση και ανάπτυξή της ως την κύρια πηγή ανανεώσιμης ενέργειας στο μέλλον.

## Οριοθέτηση

Στόχος της μελέτης αυτής είναι να διασαφηνίσει & εδραιώσει την διαδικασία η οποία πρέπει να ακολουθείται για την διερεύνηση της εναπομένουσας ζωής ενός αιολικού πάρκου. Όλη η διαδικασία, συγκεκριμένα οι CFD υπολογισμοί και τελικά οι αεροελαστικές προσομοιώσεις, είναι υπολογιστικά και χρονικά ακριβή, με συνέπεια η μελέτη να πρέπει να περιοριστεί σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις & ταχύτητες ανέμου, καθώς και σε υπολογιστικά πλέγματα ικανοποιητικής αξιοπιστίας. Με άλλα λόγια, καθώς ο γενικός σκοπός είναι ο καθορισμός της μεθοδολογίας, δίνεται πολύ μεγαλύτερη έμφαση στην εκτέλεση της σωστής ακολουθίας υπολογισμών, σε σχέση με την τεράστια αριθμητική ακρίβεια η την προέλευση ορισμένων πειραματικών δεδομένων, τα οποία λαμβάνονται ως δεδομένα και έχουν προκύψει ως αποτελέσματα ερευνών προηγούμενων ερευνητών πάνω στην ίδια τοπογραφία. Επιπρόσθετα, σχετικά με το τελευταίο κεφάλαιο της διαδικασίας, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το DEL (Damage Equivalent Load) για την εκτίμηση της κόπωσης των Α/Γ<sup>[1]</sup> χωρίς να γίνει η ανάλυση των φορτίων σε τάσεις, καθώς πρόκειται για ιδιαίτερος λεπτομερή & χρονοβόρα διαδικασία, η οποία ξεφεύγει από τα πλαίσια της έρευνας. Ο υπολογισμός επίσης των φορτίων έγινε στην βάση των πτερυγίων & πύργου για κάθε Α/Γ, όπου και η εμφανιζόμενη τιμή τους είναι μέγιστη, αντί για όλα τα διακριτοποιημένα σημεία αυτών.

## Διάρθρωση

Η έρευνα αποτελείται από συνολικά 3 κύρια κεφάλαια, χωρίς την εισαγωγή στα οποία αναλύεται η αντίστοιχη μεθοδολογία:

- Το 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο επικεντρώνεται στην κατασκευή της τοπογραφίας, την ανάλυση των ανεμολογικών δεδομένων που λαμβάνονται, και την εισαγωγή τους τελικά σε ένα μικροκλιματικό μοντέλο CFD, το οποίο επιλύει επαναληπτικά τις εξισώσεις διατήρησης ορμής για τις 3 συνιστώσες της ταχύτητας & την εξίσωση συνέχειας πάνω στο πλέγμα. Μετά το πέρας των επαναλήψεων, ακολουθεί η οπτικοποίηση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το μικροκλιματικό μοντέλο με σκοπό την ανάλυση των αποτελεσμάτων, τα οποία περιλαμβάνουν τα πεδία ταχύτητας & κινητικής ενέργειας της τύρβης, με σκοπό την εξακρίβωση των μηχανών του πάρκου που δέχονται την μέγιστη και ελάχιστη φόρτιση.
- Το 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο επικεντρώνεται στην μείωση της κλίμακας του μοντέλου της ήδη υπάρχουσας ανεμογεννήτριας ονομαστικής ισχύος 5MW, διαμέτρου 126m και ύψους πλήμνης 90m, με σκοπό την κατασκευή ενός γενικής χρήσης μοντέλου Α/Γ ονομαστικής ισχύος 2MW, διαμέτρου & ύψους πλήμνης 80m το οποίο και χρησιμοποιείται στο υποθετικό πάρκο που εξετάζει η έρευνα. Αυτό συμπεριλαμβάνει την προσαρμογή των δομικών χαρακτηριστικών (διαστάσεις, μάζες, ροπές αδράνειας, μέτρα ελαστικότητας, αεροτομές) στα νέα μέτρα, ενώ παράλληλα ρυθμίζεται κατάλληλα ο αυτόματος έλεγχος του controller για να διασφαλιστεί η βέλτιστη απόδοσή του για όλες τις συνθήκες λειτουργίας.



- Το 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο επικεντρώνεται στην προσομοίωση της δυναμικής απόκρισης της Α/Γ στις συνθήκες ανέμου του πάρκου. Αρχικά κατασκευάζονται όλες οι απαιτούμενες χρονοσειρές ανέμου για κάθε μηχανή/διεύθυνση/realization που απαιτούνται για την προσομοίωση της απόκρισης και στην συνέχεια με τη βοήθεια του λογισμικού hGAST προκύπτουν τα αεροελαστικά φορτία, από τα οποία επιλέγονται τα κατάλληλα, σε ορισμένα σημεία για τον υπολογισμό του βαθμού της κόπωσης. Τελικά γίνεται η στάθμιση & σύγκριση των αποτελεσμάτων και ακολουθούν τα συμπεράσματα που πορίζουν από αυτά.

## Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### Επισκόπηση Μεθοδολογίας

Μια Α/Γ σχεδιασμένη σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κανονισμού IEC – 61400 μπορεί να λειτουργήσει για ένα χρονικό διάστημα  $\approx 20$  ετών, χωρίς να αστοχήσει λόγω κόπωσης. Πολλές φορές, οι συνθήκες σχεδιασμού δεν συμπίπτουν με τις συνθήκες που υφίσταται η μηχανή και τότε εξετάζεται αν η διάρκεια ζωής μπορεί να επεκταθεί μέσω μερικών βημάτων. Κατά τον κανονισμό, υπάρχουν 5 σχεδιαστικές περιπτώσεις φορτίων (design load cases – DLC) για την Α/Γ, μέσω των οποίων εκτιμάται η κόπωση που αυτή δέχεται, ή ένταση της κόπωσης, και η εναπομένουσα διάρκεια ζωής. Οι 5 αυτές περιπτώσεις αντιστοιχούν σε διάφορα σενάρια παραγωγής ενέργειας χωρίς π.χ. σφάλματα (DLC 1.2)/(DLC 2.4), παύσεις (DLC 4.1), εκκινήσεις (DLC 3.1) και αδράνεια (ακινησία) της μηχανής (DLC 6.4). Έχοντας εδραιώσει μια βάση, η διαδικασία που ακολουθείται για την εξέταση είναι η ακόλουθη:

- Προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά του ανέμου που δέχεται η κάθε Α/Γ στο πάρκο για την χρονική διάρκεια του έτους, λαμβάνοντας υπόψη την κατεύθυνση ανέμου και τις ιδιαιτερότητες της τοπογραφία
- Πραγματοποιούνται αεροελαστικοί υπολογισμοί για την λειτουργία όλων των Α/Γ του πάρκου, με βάση τα υπολογισμένα ανεμολογικά χαρακτηριστικά
- Επιλέγονται ορισμένες χρονοσειρές φορτίων για διάφορες συνιστώσες της Α/Γ όπως ο πύργος και τα πτερύγια της
- Μέσω αυτών πραγματοποιείται ανάλυση κόπωσης και ο υπολογισμός των (πρωτίστως) καμπτικών & στρεπτικών φορτίων στην βάση των πτερυγίων και του πύργου, όπου και λαμβάνουν την μέγιστη τιμή τους
- Τα τελικά φορτία, συγκρίνονται με αυτά που ορίζει ο κανονισμός, συνήθως μέσω του λόγου τους (DEL – Damage equivalent load) και από εκεί προκύπτει η υπολειπόμενη διάρκεια ζωής της Α/Γ

Βάση των παραπάνω βημάτων, τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες έρευνες (Malo Rosemeier et. al. 2020) που εξετάζουν διάφορες πτυχές του προβλήματος, η καθεμία χρησιμοποιώντας τις δικές της πτυχές & μεθόδους, προσαρμοζόμενη πάντα, στο αποτέλεσμα το οποίο θέλει να φτάσει τελικά, το οποίο στην συντριπτική πλειοψηφία, είναι η επέκταση του υπολειπόμενου χρόνου ζωής των Α/Γ. Ο σκοπός του

κεφαλαίου της βιβλιογραφικής επισκόπησης, είναι να τονίσει την σημασία ορισμένων βημάτων κατά την μεθοδολογία, τα οποία καθολικά ακολουθούνται από όσους πραγματοποιούν μελέτες, πάνω στην κόπωση/διάρκεια ζωής των Α/Γ.

### Επισκόπηση μικροκλιματικού μοντέλου

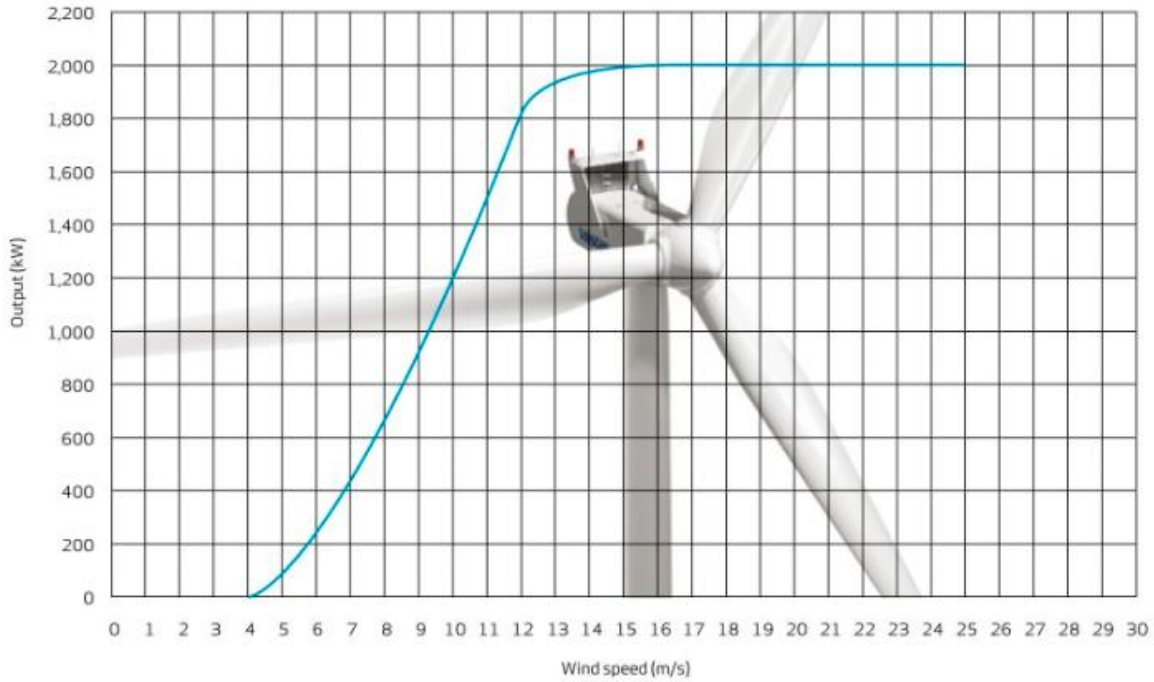
Τα μικροκλιματικά μοντέλα τείνουν συνήθως να χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται μεγάλη υπολογιστική ακρίβεια και κατά συνέπεια χρειάζεται αρκετός χρόνος εκτέλεσης. Αυτό συνεπάγεται πιο μικρά, πυκνά υπολογιστικά χωρία, έκτασης συνήθως 2-5 km ανά πλευρά, τα οποία σε συνδυασμό με την ανομοιομορφία του ελληνικού εδάφους, και το χωρίο το οποίο μελετάται στην περίπτωση αυτή, το καθιστά ιδανικό. Παρόμοιες εφαρμογές μικροκλιματικών μοντέλων, για την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών του ανέμου έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν στους λόφους Askervein στην Σκωτία (Javier Sanz Rodrigo et. al. 2014), και Bolund στην Δανία (A. Bechmann et. al. 2011)

### Εξεταζόμενο μοντέλο Α/Γ & Τοπογραφία

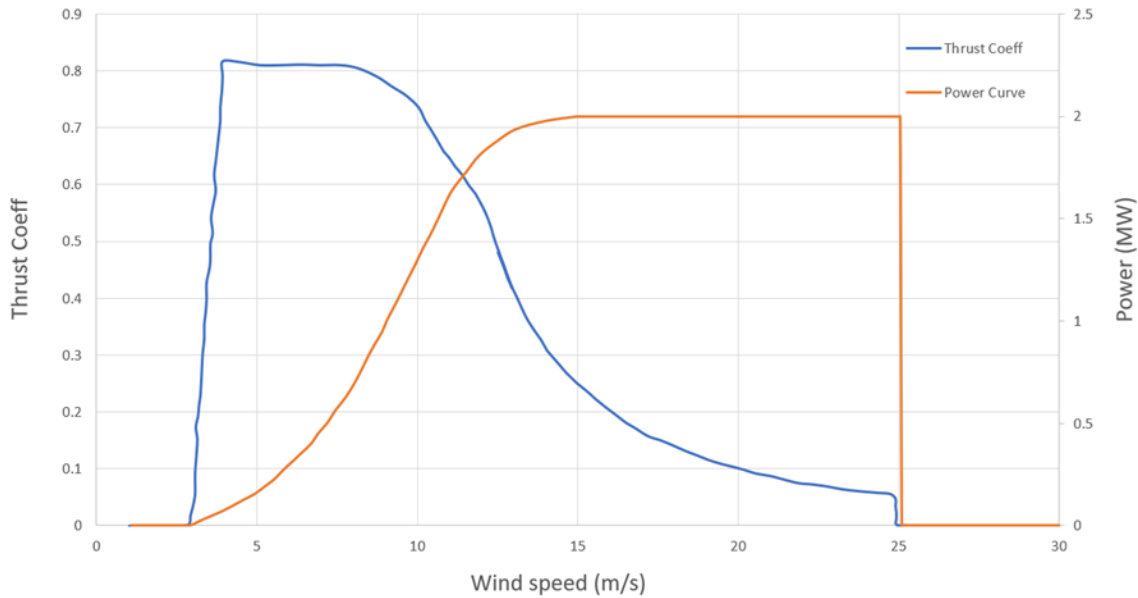
Για την προσομοίωση των Α/Γ του πάρκου επιλέχθηκε μια Α/Γ ακτίνας 80m και ονομαστικής ισχύος 2 MW. Παρακάτω παρατίθενται μερικά βασικά στοιχεία για αυτό, καθώς και οι καμπύλες της ισχύος και του συντελεστή ώσης  $C_T$  ως συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου. Αυτά τα δεδομένα παρέχονται από τον κατασκευαστή στο εγχειρίδιο οπότε και χρησιμοποιούνται, ενώ η καμπύλη του συντελεστή ώσης κατασκευάστηκε με πειραματικά δεδομένα :

Πίνακας 1: Βασικά στοιχεία λειτουργίας για τις υποθετικές Α/Γ του πάρκου

|                                                 |                       |
|-------------------------------------------------|-----------------------|
| <b>Ονομαστική ισχύς</b>                         | <b>2 MW</b>           |
| <b>Προσανατολισμός, Αρ. Πτερυγίων</b>           | Upwind, 3 Blades      |
| <b>Διάμετρος πτερυγίων, πλήμνης</b>             | 80 m, 3.3 m           |
| <b>Ύψος πλήμνης</b>                             | 80m                   |
| <b>Τάξη ανέμου</b>                              | IEC IA & IIA          |
| <b>Εμβαδόν ρότορα</b>                           | 5027 m <sup>2</sup>   |
| <b>Ταχύτητες: εκκίνησης, ονομαστική, παύσης</b> | 4 m/s, 16 m/s, 25 m/s |



Εικόνα 1.1: Καμπύλη ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου στο ύψος της πλήμνης για τις Α/Γ του πάρκου



Εικόνα 1.2: Καμπύλη ισχύος & συντελεστή ώσης  $C_T$  συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου στο ύψος της πλήμνης για τις Α/Γ του πάρκου

Η καμπύλη του συντελεστή ώσης  $C_T$  αξιοποιείται ως είσοδος για το 2<sup>ο</sup> σκέλος των προσομοιώσεων στο Κεφ. 4. Η τοποθεσία που επιλέχθηκε για την υλοποίηση του πάρκου, είναι ένα νησί του Αιγαίου, ενώ οι Α/Γ τοποθετήθηκαν στο βόρειο ήμισυ του νησιού. Περισσότερη ανάλυση πάνω σε αυτήν, θα ακολουθήσει στο επόμενο κεφάλαιο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ

### 2.1 Υλοποίηση πλέγματος

#### 2.1.1 Βασικά Χαρακτηριστικά

Για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων, επιλέχθηκε να υλοποιηθεί ένα υπολογιστικό πλέγμα, πάνω στο οποίο επιλύονται μέσω κώδικα οι εξισώσεις διατήρησης των 3 συνιστωσών της ορμής, μια για κάθε διεύθυνση του τρισδιάστατου επιπέδου, καθώς και η εξίσωση της συνέχειας. Καθώς επιλέχθηκε να προσομοιωθούν 3 κατευθύνσεις ανέμου, σε κάθε κατεύθυνση θα αντιστοιχεί ένα διαφορετικό πλέγμα. Πιο συγκεκριμένα, για τις  $0^\circ$  (για ανέμους βόρειας κατεύθυνσης) κατασκευάζεται το βασικό – «μητρικό» πλέγμα, και περιστρέφεται  $22.5^\circ$  &  $-22.5^\circ$  γύρω από το κέντρο του μέσω της βοήθειας ενός MATLAB script για να μετατραπεί στο πλέγμα των κατευθύνσεων των  $22.5^\circ$  και  $337.5^\circ$  (για ανέμους βορειοανατολικών (NNE) και βορειοδυτικών (NNW) κατευθύνσεων) αντιστοίχως. Βασικά κριτήρια για την επιλογή των διαστάσεων και της πυκνότητας αποτέλεσαν:

- Το εκτιμώμενο υπολογιστικό κόστος (χρόνος προσομοίωσης)
- Την εφαρμογή ρεαλιστικών συνοριακών συνθηκών

Για την κάλυψη του κριτηρίου των οριακών συνθηκών, προστέθηκαν γύρω από την νήσο κάθε πλέγματος, επαρκείς θαλάσσιες εκτάσεις, με σκοπό να εκμηδενιστεί η επίδραση της ανομοιομορφίας της τοπογραφίας της νήσου στο πεδίο ροής. Έτσι τελικά μπορεί να επιβληθεί μια συνοριακή συνθήκη για την πλήρως ανεπτυγμένη ροή, όπου στην περίπτωση που εξετάζουμε επιλέχθηκε να είναι η συνθήκη Neumann. Για την αποφυγή «περιττών» υπολογισμών και την ουσιαστική μείωση του υπολογιστικού κόστους, επιλέχθηκε να γίνει πύκνωση & αραιώση του πλέγματος, στους καρτεσιανούς άξονες  $x$  &  $y$ . Συγκεκριμένα, σε κελιά όπου απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια σε μετρήσεις, π.χ. στις τοποθεσίες που βρίσκονται τοποθετημένες οι Α/Γ του πάρκου η πυκνότητα των κελιών αυξάνεται δραστικά για να εξασφαλιστούν περισσότερες μετρήσεις, ενώ σε κελιά χαμηλότερης σημασίας, π.χ. σε τοποθεσίες της νήσου μακριά από τις Α/Γ και στις θαλάσσιες εκτάσεις, η πυκνότητα του πλέγματος αραιώνει αισθητά, για να μειώσει όσο το δυνατόν περισσότερο το υπολογιστικό κόστος, χωρίς να επιβαρύνει την ακρίβεια της προσομοίωσης. Χρειάστηκαν αρκετές δοκιμές για να βρεθεί ο ιδανικός λόγος πύκνωσης/αραιώσης για κάθε διεύθυνση ανέμου & άξονα που εξασφαλίζουν τα βέλτιστα αποτελέσματα. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του πλέγματος και την επίλυση του πεδίου ροής έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο αεροδυναμικής του ΕΜΠ. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν στον server του εργαστηρίου. Στα παρακάτω υποκεφάλαια παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε σε κάθε βήμα.

### 2.1.2 Μαθηματική Ανάλυση

Στο Υποκεφάλαιο 2.1.1. αναφέρθηκε πως πάνω στο πλέγμα επιλύονται οι εξισώσεις διατήρησης της ορμής για τις 3 συνιστώσες της ταχύτητας, καθώς και η εξίσωση της συνέχειας. Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν κομμάτι ενός μικροκλιματικού μοντέλου CFD, το οποίο τις επιλύει πρακτικά έως ότου αυτές να συγκλίνουν. Οι εξισώσεις εισάγονται ως είσοδος στο μοντέλο και αναγράφονται παρακάτω αναλυτικά, στην διανυσματική τους μορφή:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (\text{Εξ. 2.1.2.1})$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla)U - \frac{1}{Re} \nabla \{ (1 + \nu_t) [\nabla U + (\nabla U)^T] \} + \nabla p_{eff} = 0 \quad (\text{Εξ. 2.1.2.2})$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U \cdot \nabla k - \frac{1}{Re} \nabla [(1 + \sigma^* \nu_t) \nabla k] = \frac{1}{Re} P_k - \beta^* k \omega \quad (\text{Εξ. 2.1.2.3})$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U \cdot \nabla \omega - \frac{1}{Re} \nabla [(1 + \sigma \nu_t) \nabla \omega] = \frac{1}{Re} \frac{\alpha P_k}{\omega} - \beta \omega^2 \quad (\text{Εξ. 2.1.2.4})$$

Η πρώτη εξ. (2.1.2.1), είναι η εξίσωση συνέχειας, η οποία διασφαλίζει ότι η απόκλιση του διανυσματικού πεδίου της ταχύτητας “U” είναι μηδενική, καθιστώντας έτσι το ρευστό ασυμπίεστο ενώ 2<sup>η</sup> εξ. (2.1.2.2) αντιπροσωπεύει την εξίσωση της ορμής του ρευστού. Ο όρος “ $\nabla p_{eff}$ ” της εξ. (2.1.2.2) εξυπηρετεί την διόρθωση της πίεσης. Στην εξίσωση ορμής (2.1.2.2),  $\nu_t$  είναι η τυρβώδης συνεκτικότητα, που χρησιμοποιείται σύμφωνα με την υπόθεση Boussinesq για τη μοντελοποίηση των τυρβωδών τάσεων. Έτσι, ο 3ος όρος της (2.1.2.2) περιλαμβάνει το άθροισμα των συνεκτικών και των τυρβωδών τάσεων σε αδιάστατη μορφή. Ο υπολογισμός του  $\nu_t$  γίνεται με τη βοήθεια του μοντέλου τύρβης k- $\omega$  που επιλύει τις διαφορικές εξισώσεις (2.1.2.3) και (2.1.2.4) για τα μεγέθη k (κινητική ενέργεια τύρβης) και  $\omega$  (ειδικός ρυθμός καταστροφής του k) αντίστοιχα. Η ακόλουθη σχέση παρέχει το  $\nu_t$  σε αδιάστατη μορφή:

$$\nu_t = Re \frac{k}{\omega} \quad (\text{Εξ. 2.1.2.5})$$

Ενώ ο όρος “ $P_k$ ” στις εξισώσεις (2.1.2.3) και (2.1.2.4), ορίζεται ως όρος παραγωγής, και αναλυτικά εκφράζεται ως:

$$P_k = \frac{1}{2} \nu_t [\nabla U + (\nabla U)^T]^2 \quad (\text{Εξ. 2.1.2.6})$$

Ο αριθμός Reynolds (Re) με την σειρά του εισάγεται και αυτός στο μικροκλιματικό μοντέλο ως σταθερά με την τιμή:

$$Re = 6.7 \cdot 10^4 \quad (\text{Εξ. 2.1.2.7})$$

Στις εξισώσεις (2.1.2.3) & (2.1.2.4) οι όροι “ $\alpha$ ”, “ $\beta$ ”, “ $\beta^*$ ”, “ $\sigma$ ,” “ $\sigma^*$ ” προκύπτουν από τις οριακές συνθήκες των τοιχωμάτων (που θα σχολιαστούν παρακάτω) χρησιμοποιούνται για την επίλυση του μοντέλου τύρβης και διαφέρουν από μοντέλο σε μοντέλο. Για την

συγκεκριμένη έρευνα, λαμβάνονται από την διπλωματική εργασία του (Ευάγγελου Σ. Κουναλάκη (Αθήνα, 2020)), για ένα πανομοιότυπο πλέγμα με χρήση της μεθοδολογίας που καλύπτεται αναλυτικά από τους (Prospathopoulos et al. (2008)):

$$\alpha = 0.3706 \quad , \quad \beta = 0.0275 \quad , \quad \beta^* = 0.033 \quad , \quad \sigma = 0.5 \quad , \quad \sigma^* = 0.5 \quad (\text{Εξ. 2.1.2.8})$$

Στο μικροκλιματικό μοντέλο εισάγονται και άλλες παράμετροι, όπως το χρονικό βήμα επίλυσης, που επιλέχθηκε τελικά να είναι 0.3 sec, καθώς τα βήματα των 0.1 & 0.2 sec όχι μόνο αύξαναν το υπολογιστικό κόστος κατά πολύ, αλλά οδηγούσαν τελικά στην αριθμητική απόκλιση των αποτελεσμάτων. Το χρονικό βήμα των 0.3 παρείχε την βέλτιστη αναλογία σταθερότητας – ακρίβειας αποτελεσμάτων. Το μοντέλο είχε ρυθμιστεί να τρέχει για 30.000 επαναλήψεις, αλλά για κάθε περίπτωση σύγκλινε ικανοποιητικά στις ≈15.000 επαναλήψεις. Επιπλέον εισάγονται και 2 διαφορετικά μήκη τραχύτητας, ένα για την θάλασσα και ένα για το έδαφος:

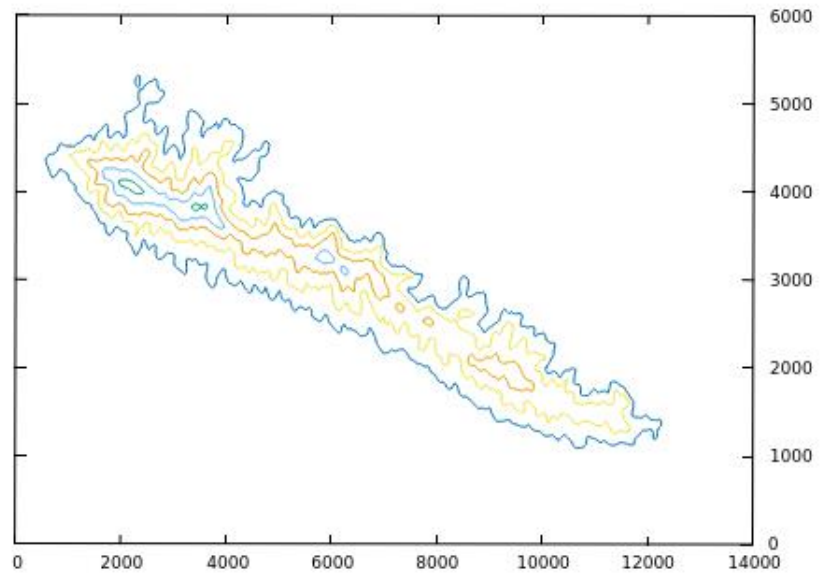
$$z_{\text{έδαφος}} = 5 \cdot 10^{-3} m \quad , \quad z_{\text{θάλασσα}} = 2 \cdot 10^{-4} m \quad (\text{Εξ. 2.1.2.9})$$

Το τρισδιάστατο υπολογιστικό χωρίο του μικροκλιματικού μοντέλου περικλείεται από συνολικά 6 έδρες, στα σύνορα των οποίων επιβάλλονται ορισμένες οριακές συνθήκες, οι οποίες αναλύονται παρακάτω:

- Για το σύνορο που βρίσκεται στην είσοδο της ροής, επιβάλλεται η συνοριακή συνθήκη Dirichlet. Συγκεκριμένα, η ταχύτητα παραμένει σταθερή κατά τον οριζόντιο άξονα, και μεταβάλλεται υψομετρικά, όπως ορίζει σε κάθε περίπτωση μελέτης το προφίλ εισόδου του ανέμου (κομμάτι που αναλύεται σε άλλο υποκεφάλαιο).
- Για το σύνορο που βρίσκεται στην έξοδο της ροής, επιβάλλεται η συνθήκη Neuman για πλήρως ανεπτυγμένη ροή. Σκοπός της είναι να επιτρέψει στην ροή να εξέλθει εκτός του υπολογιστικού χωρίου, χωρίς να μεταβάλλει την ταχύτητα. Αν  $\vec{n}$  είναι το κάθετο στην επιφάνεια διάνυσμα, ορίζεται ως:  $\frac{\partial \vec{v}}{\partial \vec{n}} = 0$
- Για τα πλευρικά σύνορα, επιβάλλεται η συνθήκη ολίσθησης. Παρόμοια και με την συνθήκη Neumann η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας ως προς το όριο είναι μηδενική και κατά συνέπεια η ταχύτητα παράλληλη με αυτό.
- Για τα σύνορα της «κάτω» επιφάνειας, εφαρμόζεται ξανά η συνθήκη μη ολίσθησης Dirichlet, δηλαδή η ταχύτητα μηδενίζεται κοντά σε αυτήν.

### 2.1.3 Διαδικασία Υλοποίησης

Στο πρώτο βήμα της διαδικασίας υλοποίησης του πλέγματος, πραγματοποιείται η επεξεργασία στο αρχικό πλέγμα για το νησί που διατίθεται από την διπλωματική εργασία του (Ευάγγελου Σ. Κουναλάκη (Αθήνα, 2020)). Η διαθέσιμη τοπογραφία αντιστοιχεί στην κάτοψη της νήσου (με κατεύθυνση βορά προς τα πάνω), η οποία έχει περιστραφεί ( $-90^\circ$ ) αριστερόστροφα, ώστε να προσομοιώνεται η είσοδος της ροής από τα αριστερά:



Εικόνα 2.1.3.2: Αρχικό πλέγμα του νησιού

Εικόνα 2.1.3.1: Απεικόνιση του νησιού στον χάρτη

Το αρχικό αυτό πλέγμα έχει τις ακόλουθες διαστάσεις:

Πίνακας 2.1.3.1: Διαστάσεις αρχικού πλέγματος

|                           | <b>X axis</b> | <b>Y axis</b> | <b>Z axis</b> |
|---------------------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Point Number</b>       | 434           | 200           | 35            |
| <b>Point Distance (m)</b> | 30            | 30            | -             |
| <b>Total Size</b>         | 12990         | 5970          | -             |

Το πλέγμα αυτό αντιστοιχεί στις  $0^\circ$ , δηλαδή στην βόρεια κατεύθυνση ανέμου, συνεπώς πρέπει να περιστραφεί  $22.5^\circ$  και  $-22.5^\circ$  για να προκύψουν τα πλέγματα για τις

κατευθύνει NNW (337.5°) & NNE (22.5°). Πριν την περιστροφή, πρέπει πρώτα το πλέγμα να επεκταθεί στους άξονες x' & y', ώστε κατά την περιστροφή να μην «κοπεί» η τοπογραφία της νήσου από τα όρια του πλέγματος. Επιπλέον πρέπει να οριστούν οι θέσεις των 10 Α/Γ στις οποίες θα μελετηθεί αργότερα η ροή, ώστε να γίνει σωστά η μετατροπή τους. Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας με τα κελιά που προστίθενται σε κάθε κατεύθυνση του πλέγματος, καθώς οι συντεταγμένες των Α/Γ πάνω στην τοπογραφία.

Πίνακας 2.1.3.2: Διαστάσεις νέου πλέγματος για περιστροφή

|                         | X axis               | Y axis                   |
|-------------------------|----------------------|--------------------------|
| <b>Added Cells</b>      | 5 (Left) + 5 (Right) | 122 (Left) + 122 (Right) |
| <b>Total Cells</b>      | 444                  | 444                      |
| <b>New Dimensions</b>   | 13290                | 13290                    |
| <b>New Center Point</b> | 6645                 | 6645                     |

Πίνακας 2.1.3.3: Συντεταγμένες των 10 Α/Γ για το επεκταμένο πλέγμα των 0°

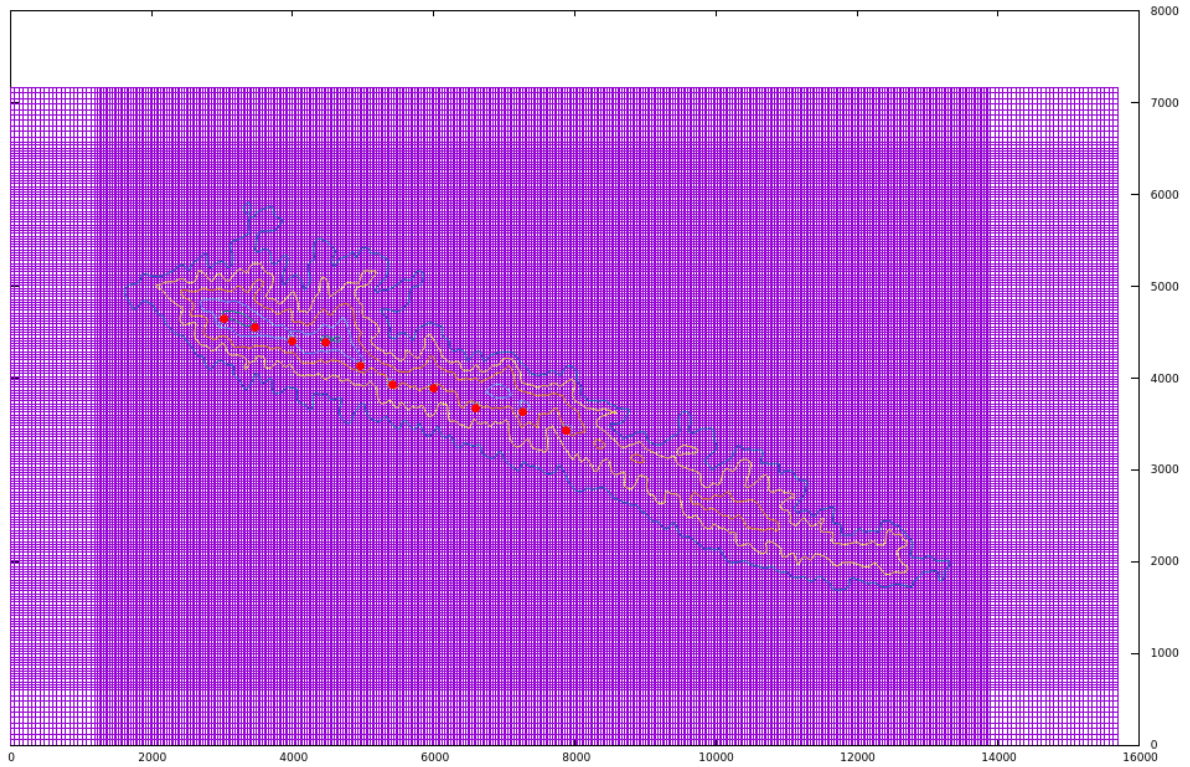
|                     | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>X Coordinate</b> | 2100 | 2570 | 3100 | 3570 | 4050 | 4560 | 5070 | 5700 | 6350 | 7000 |
| <b>Y Coordinate</b> | 7700 | 7600 | 7500 | 7450 | 7200 | 700  | 6950 | 6750 | 6700 | 6500 |

Η περιστροφή του πλέγματος έγινε με την βοήθεια ενός script στο προγραμματιστικό περιβάλλον “MATLAB”, που παρατίθεται αναλυτικά στο (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1). Αναφορικά, αν «θ» η γωνία περιστροφής, τότε το μητρώο περιστροφής που χρησιμοποιείται για την περιστροφή είναι το ακόλουθο (η περιστροφή γίνεται γύρω από τον z'z άξονα όποτε τα ύψη παραμένουν αμετάβλητα ανεξαρτήτως διεύθυνσης):

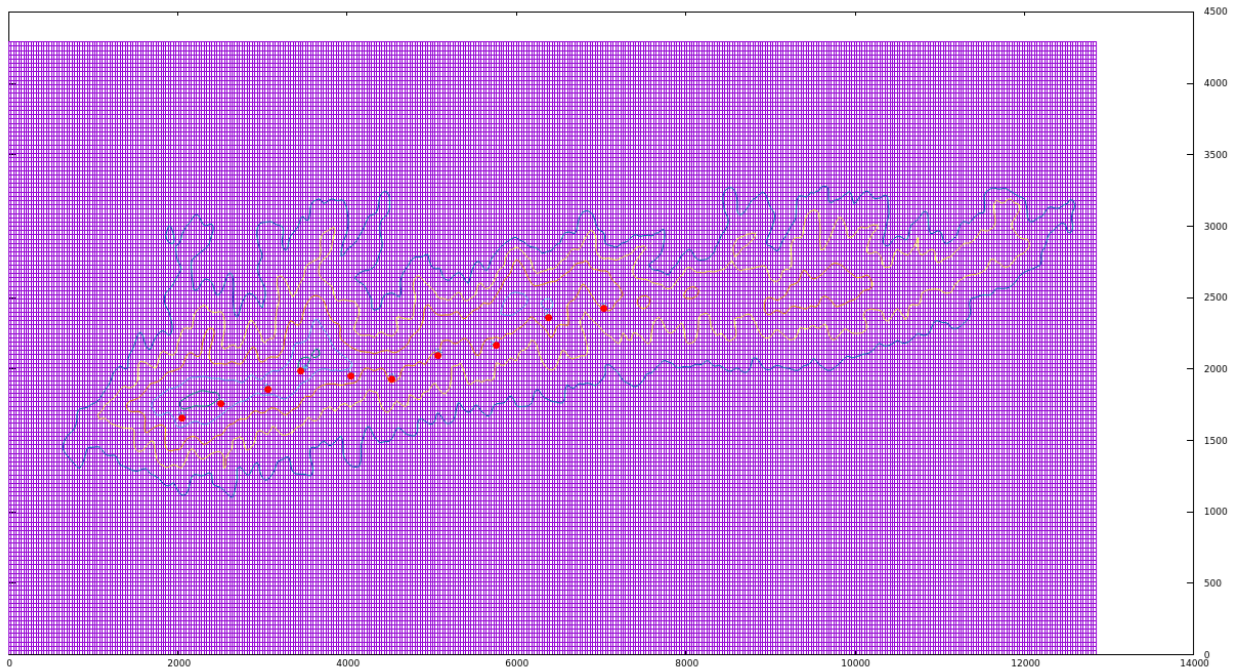
$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ. 2.1.3.1})$$

Τελικά μετά την ολοκλήρωση της περιστροφής, τα πλέγματα που προκύπτουν δέχονται περαιτέρω επεξεργασία, πριν την πύκνωση, συγκεκριμένα αποκόπτονται κόμβοι από τους άξονες x' & y', για να αποφευχθεί η ανάλωση της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος σε θαλάσσιες εκτάσεις οι οποίες έχουν από ελάχιστη έως μηδενική επίδραση, και προσαρμόζονται αναλόγως και οι νέες συντεταγμένες των Α/Γ ανά διεύθυνση. Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται με κόκκινες κουκίδες η νέες θέσεις των Α/Γ, οι συντεταγμένες των οποίων αναγράφονται αναλυτικά στον (Πίν. 2.1.3.4).

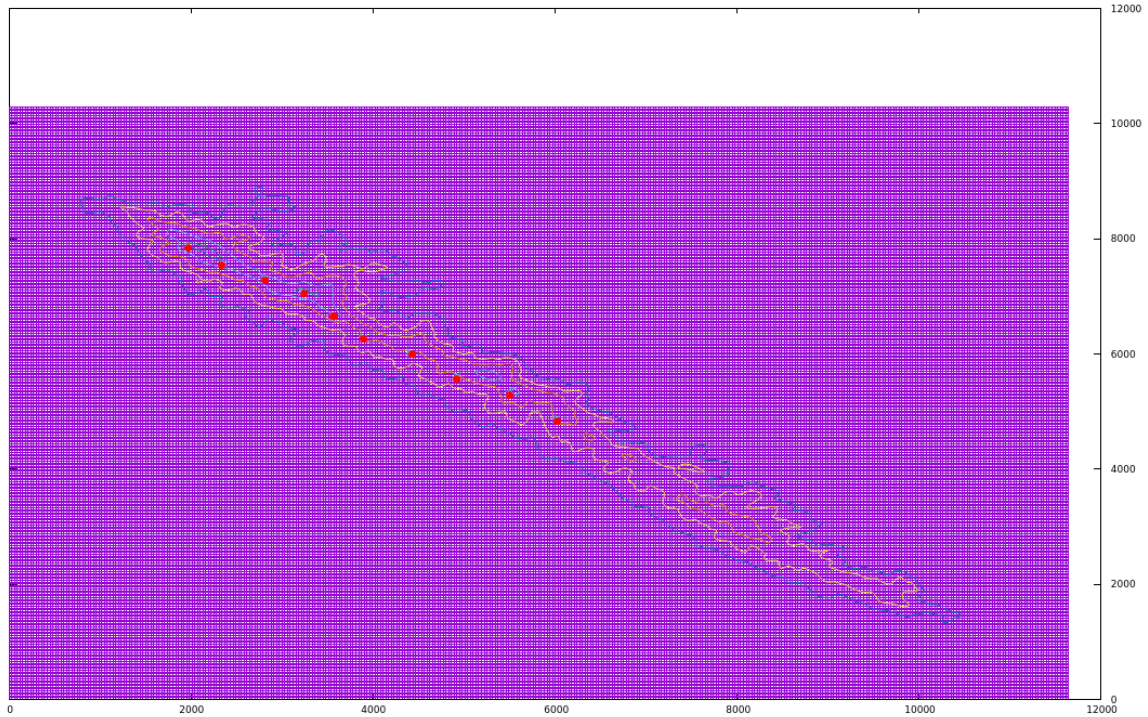




Εικόνα 2.1.3.3: Κάτοψη πλέγματος  $0^\circ$  πριν την πύκνωση



Εικόνα 2.1.3.4: Κάτοψη πλέγματος  $22.5^\circ$  πριν την πύκνωση



Εικόνα 2.1.3.5: Κάτοψη πλέγματος 337.5° πριν την πύκνωση

Πίνακας 2.1.3.4: Συντεταγμένες των 10 Α/Γ για τα 3 πλέγματα, πριν την πύκνωση

|                            | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>X Coordinate 0°</b>     | 3000 | 3470 | 4000 | 4470 | 4950 | 5400 | 5970 | 6600 | 7250 | 7900 |
| <b>Y Coordinate 0°</b>     | 4640 | 4540 | 4440 | 4390 | 4140 | 3940 | 3890 | 3690 | 3640 | 3440 |
| <b>X Coordinate 22.5°</b>  | 2049 | 2521 | 3049 | 3502 | 4042 | 4534 | 5080 | 5738 | 6358 | 7035 |
| <b>Y Coordinate 22.5°</b>  | 1675 | 1763 | 1873 | 2007 | 1960 | 1947 | 2119 | 2175 | 2378 | 2442 |
| <b>X Coordinate 337.5°</b> | 1949 | 2345 | 2797 | 3212 | 3559 | 3889 | 4406 | 4912 | 5493 | 6017 |
| <b>Y Coordinate 337.5°</b> | 7859 | 7586 | 7191 | 7065 | 6650 | 6293 | 6029 | 5603 | 5308 | 4875 |

Έπειτα ακολουθεί η πύκνωση & αραιώση των κελιών παράλληλα για την, όπως προαναφέρθηκε, βέλτιστη εκμετάλλευση του υπολογιστικού δυναμικού. Ο κώδικας λαμβάνει διάφορα δεδομένα ως είσοδο, όπως τις διαστάσεις του πλέγματος, τις ελάχιστες επιτρεπτές διαστάσεις πύκνωσης των κελιών (στην προκειμένη περίπτωση κοντά στις Α/Γ, είναι  $dx = 24$  &  $dy = 16$ , ώστε να διασφαλίζονται πάντα τουλάχιστον 5

σημεία πάνω στον δίσκο της Α/Γ κατά τον γ'γ) τον λόγο της γεωμετρικής προόδου, που μετά από δοκιμές επιλέχθηκε  $\lambda = 1.1$ . Επιπλέον συμπεριλαμβάνονται οι θέσεις των 10 Α/Γ στο πάρκο, καθώς και η απόσταση της 1<sup>ης</sup> και 10<sup>ης</sup> Α/Γ από τα όρια του πλέγματος, ώστε να πραγματοποιηθεί σωστά η αραιώση. Ενδεικτικά παρατίθενται 2 από τα αρχεία που χρησιμοποιεί ο κώδικας ως είσοδο:

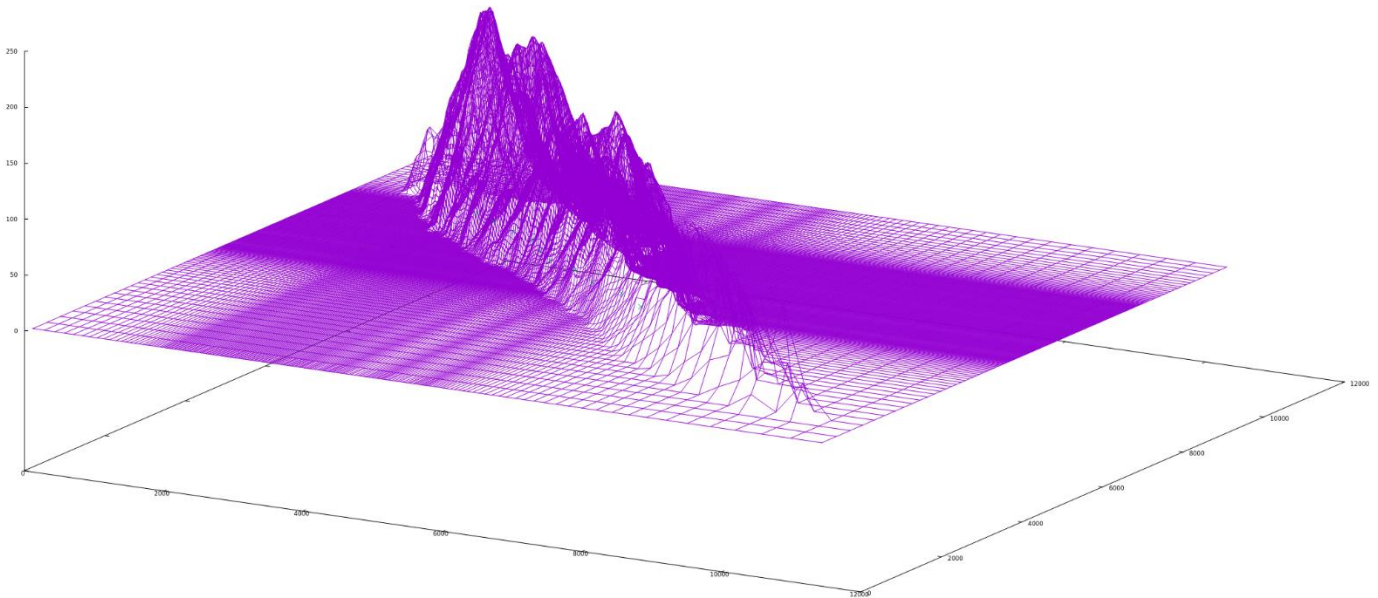
| NWT   | ZWT   | XWT   |         |    |
|-------|-------|-------|---------|----|
| 10    |       |       |         |    |
| 1     | 1949. | 8109. | 80.0000 | 10 |
| 2     | 2345. | 7700. | 80.0000 | 10 |
| 3     | 2797. | 7291. | 80.0000 | 10 |
| 4     | 3212. | 7065. | 80.0000 | 10 |
| 5     | 3559. | 6650. | 80.0000 | 10 |
| 6     | 3899. | 6293. | 80.0000 | 10 |
| 7     | 4406. | 6029. | 80.0000 | 10 |
| 8     | 4950. | 5603. | 80.0000 | 10 |
| 9     | 5600. | 5308. | 80.0000 | 10 |
| 10    | 6250. | 4875. | 80.0000 | 0  |
| ZWTIO | XWTIO |       |         |    |
| 10    | 6250. | 4875. | 80.0000 | 10 |
| 9     | 5600. | 5308. | 80.0000 | 10 |
| 8     | 4950. | 5603. | 80.0000 | 10 |
| 7     | 4406. | 6029. | 80.0000 | 10 |
| 6     | 3899. | 6293. | 80.0000 | 10 |
| 5     | 3559. | 6650. | 80.0000 | 10 |
| 4     | 3212. | 7065. | 80.0000 | 10 |
| 3     | 2797. | 7291. | 80.0000 | 10 |
| 2     | 2345. | 7700. | 80.0000 | 10 |
| 1     | 1949. | 8109. | 80.0000 | 10 |

Εικόνα 2.1.3.6: Αρχείο εισόδου με τις θέσεις & διαμέτρους των Α/Γ

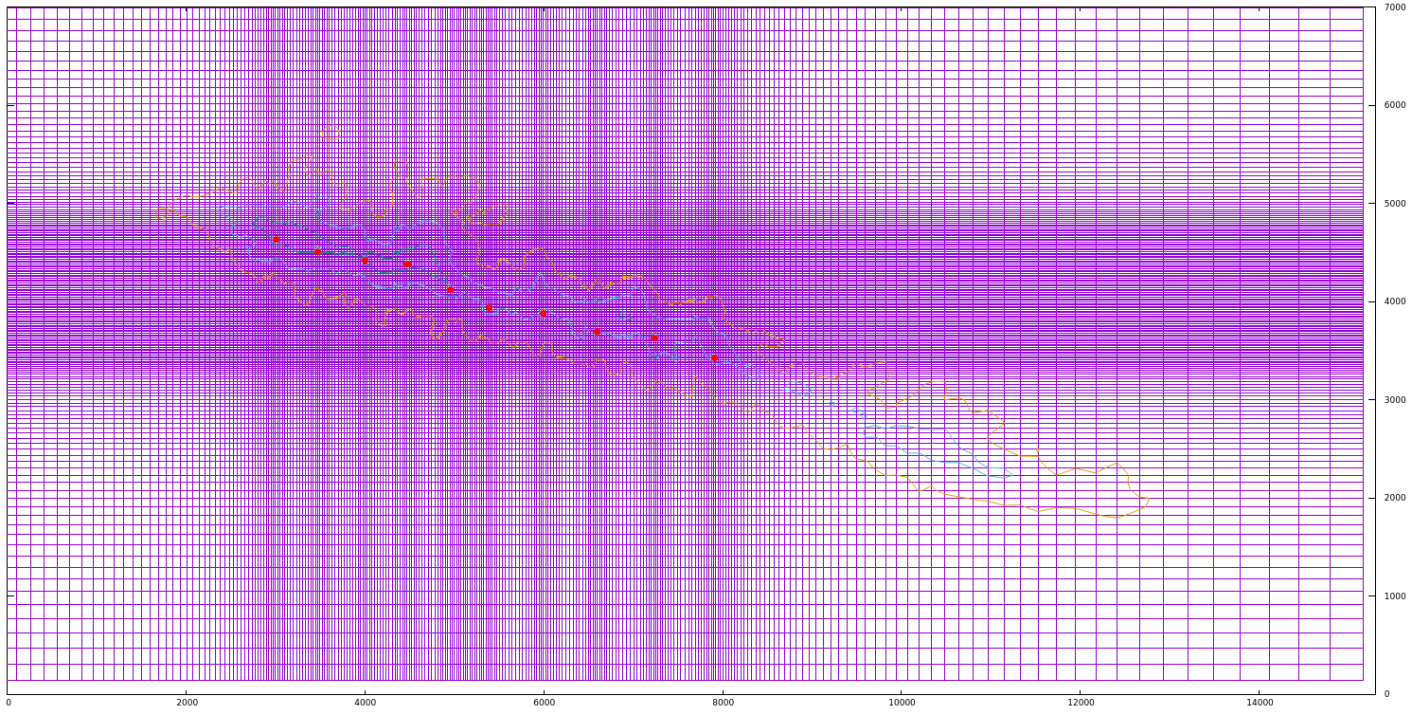
|       |       |
|-------|-------|
| NI    | NK    |
| 344   | 389   |
| ZO    | XO    |
| 0.    | 0.    |
| THW   |       |
| 0.    |       |
| DX    | RAXO  |
| 16.   | 1.10  |
| XTOTU | XTOTD |
| 4780. | 2130. |
| DZ    | RAZO  |
| 24.   | 1.10  |
| ZTOTU | ZTOTD |
| 1900. | 5330. |
| DIAM  |       |
| 80.   |       |

Εικόνα 2.1.3.7: Αρχείο εισόδου με τα χαρακτηριστικά του πλέγματος, & τις παραμέτρους της προόδου

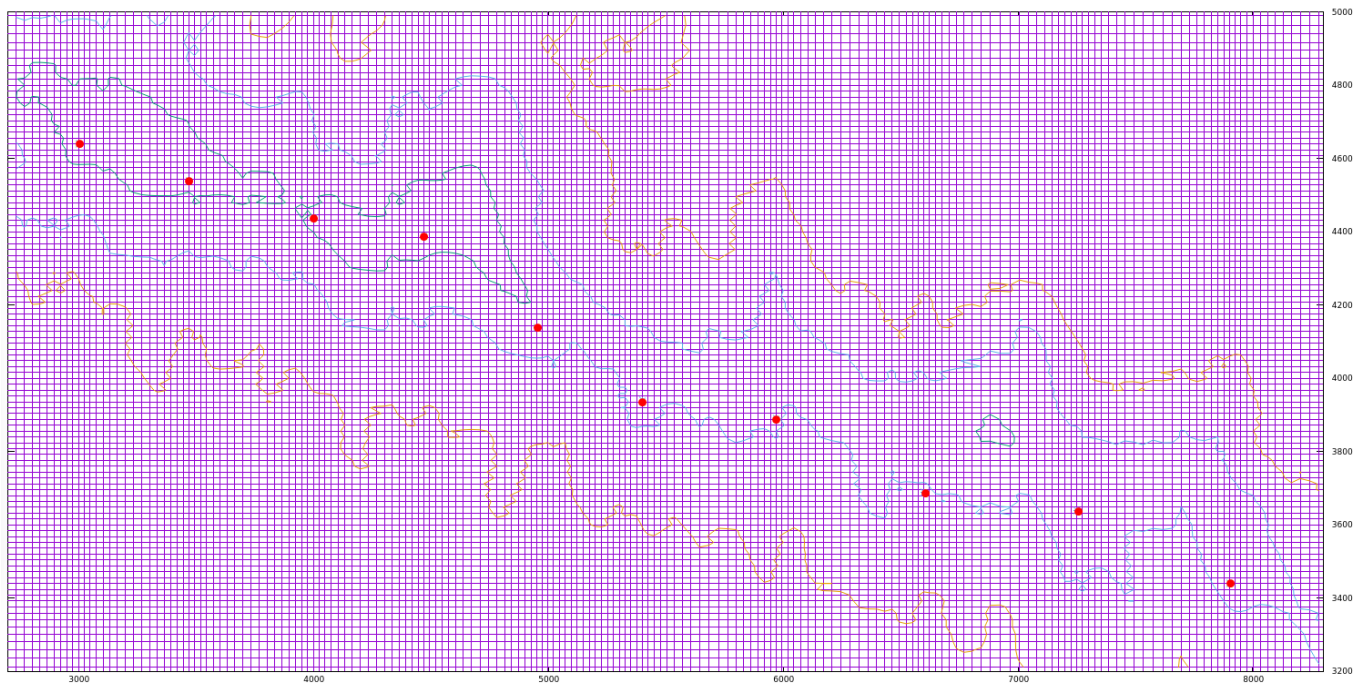
Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα του πλέγματος μετά την πυκνωση & αραιώσή τους για διάφορες κλίμακες:



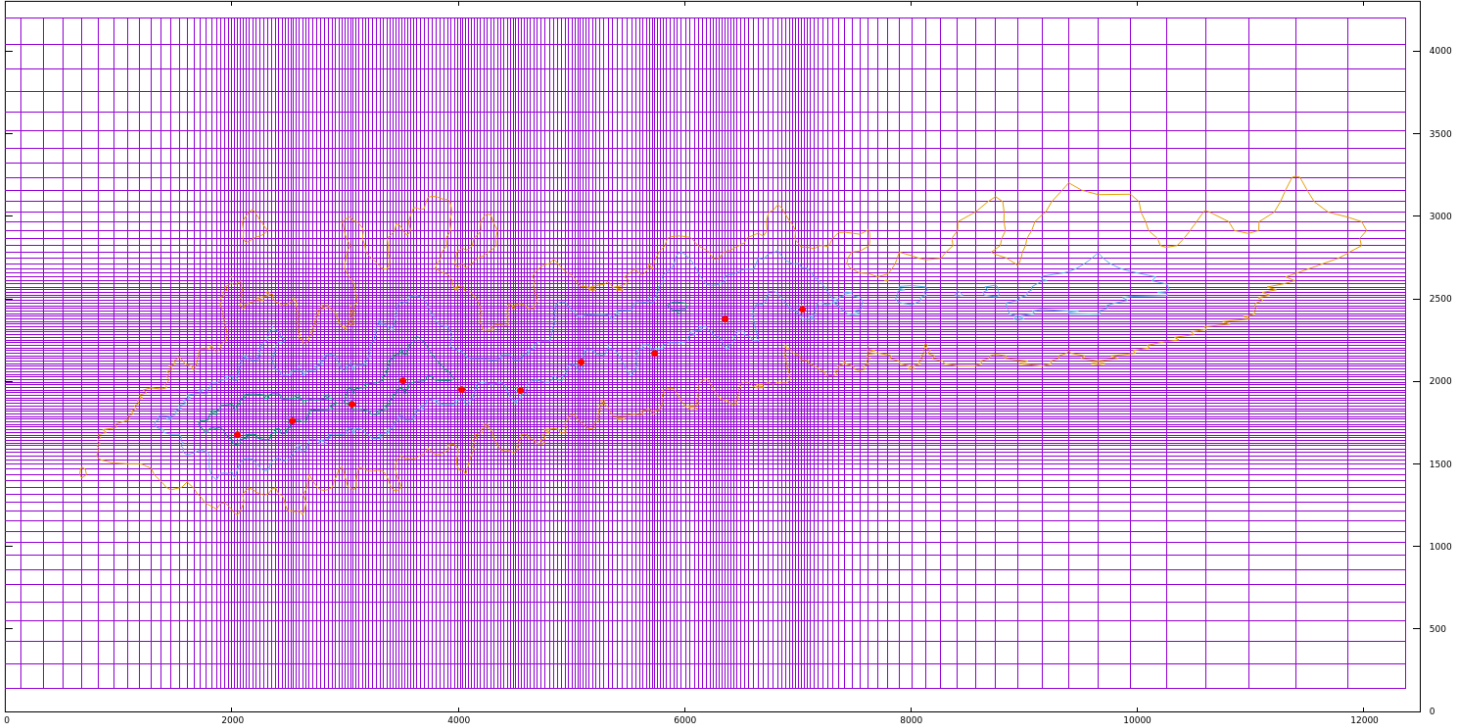
Εικόνα 2.1.3.8: Διαγώνια απεικόνιση του πλέγματος των 337.5° μετά την πυκνωση



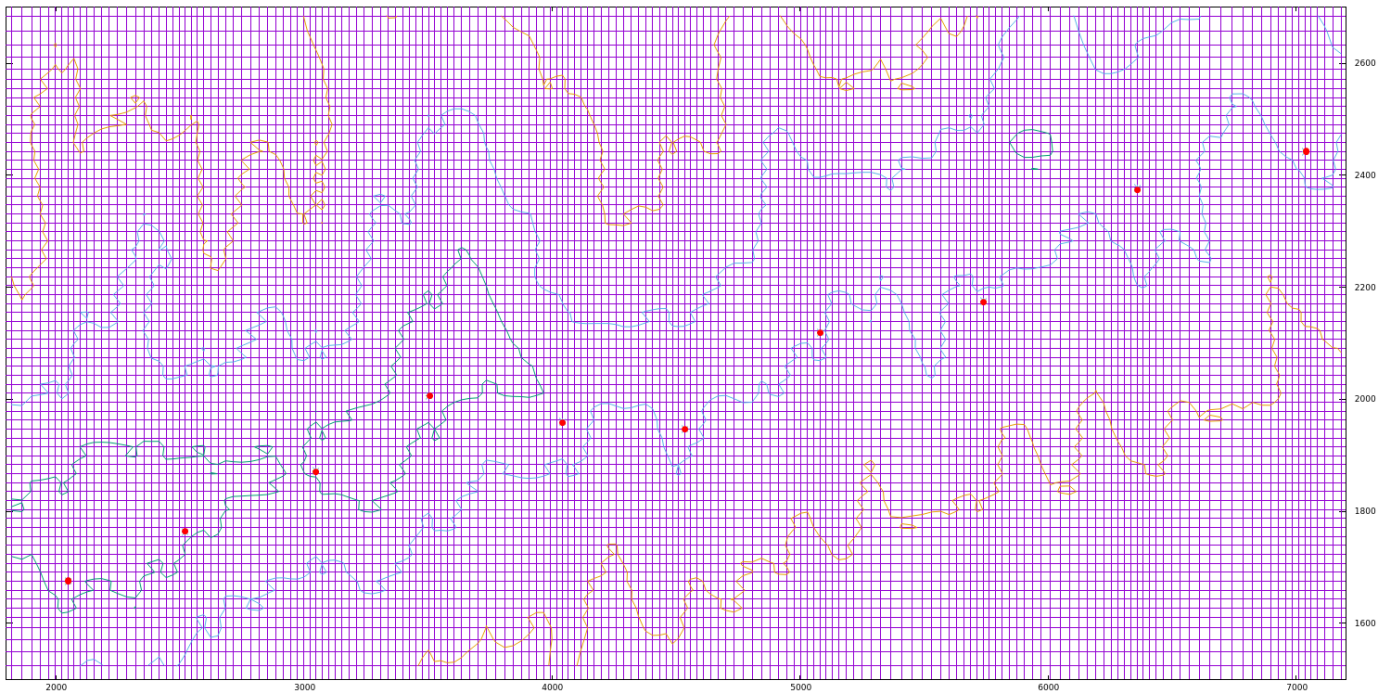
Εικόνα 2.1.3.8: Κάτοψη του πλέγματος των  $0^{\circ}$  μετά την πύκνωση



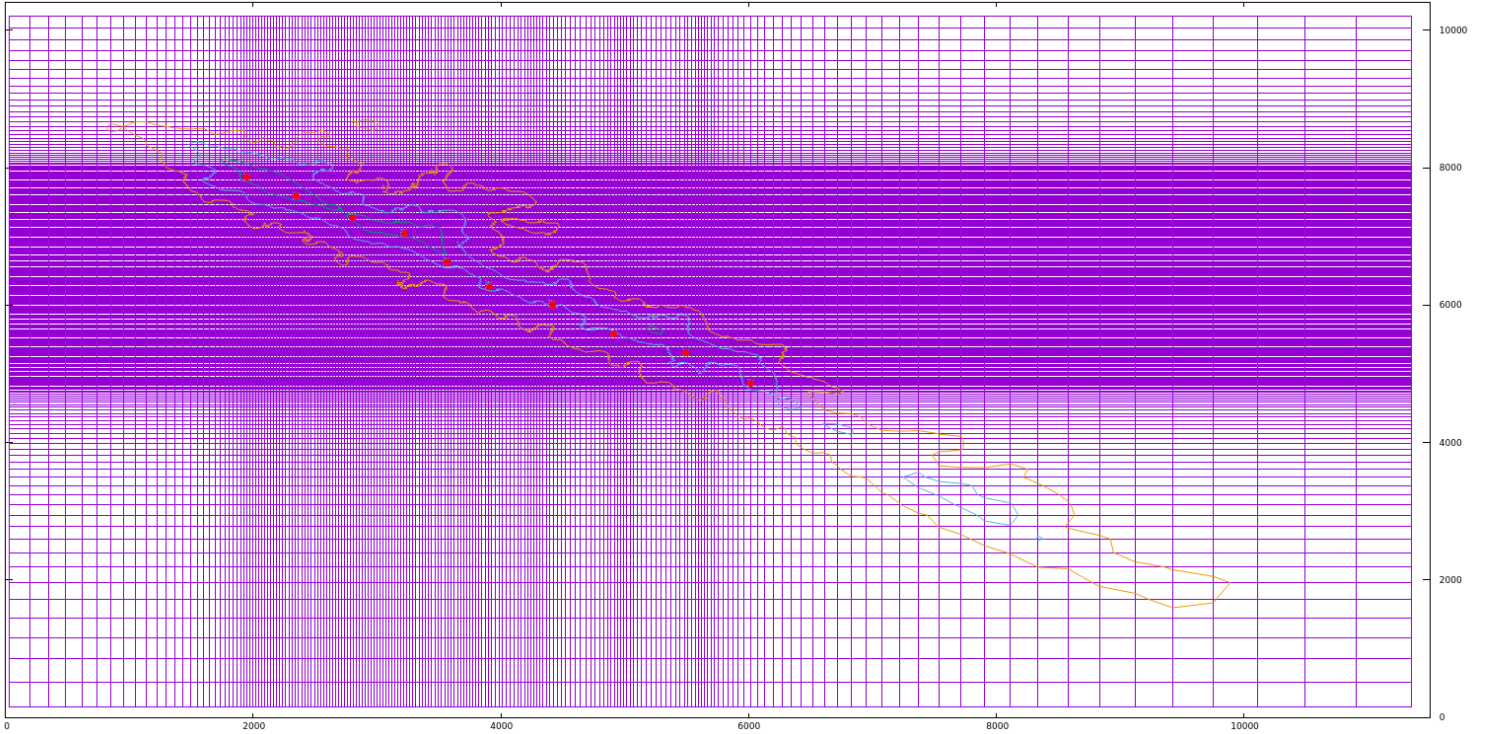
Εικόνα 2.1.3.8: Εστιασμένη κάτοψη του πλέγματος των  $0^{\circ}$  μετά την πύκνωση, στην περιοχή των A/Γ



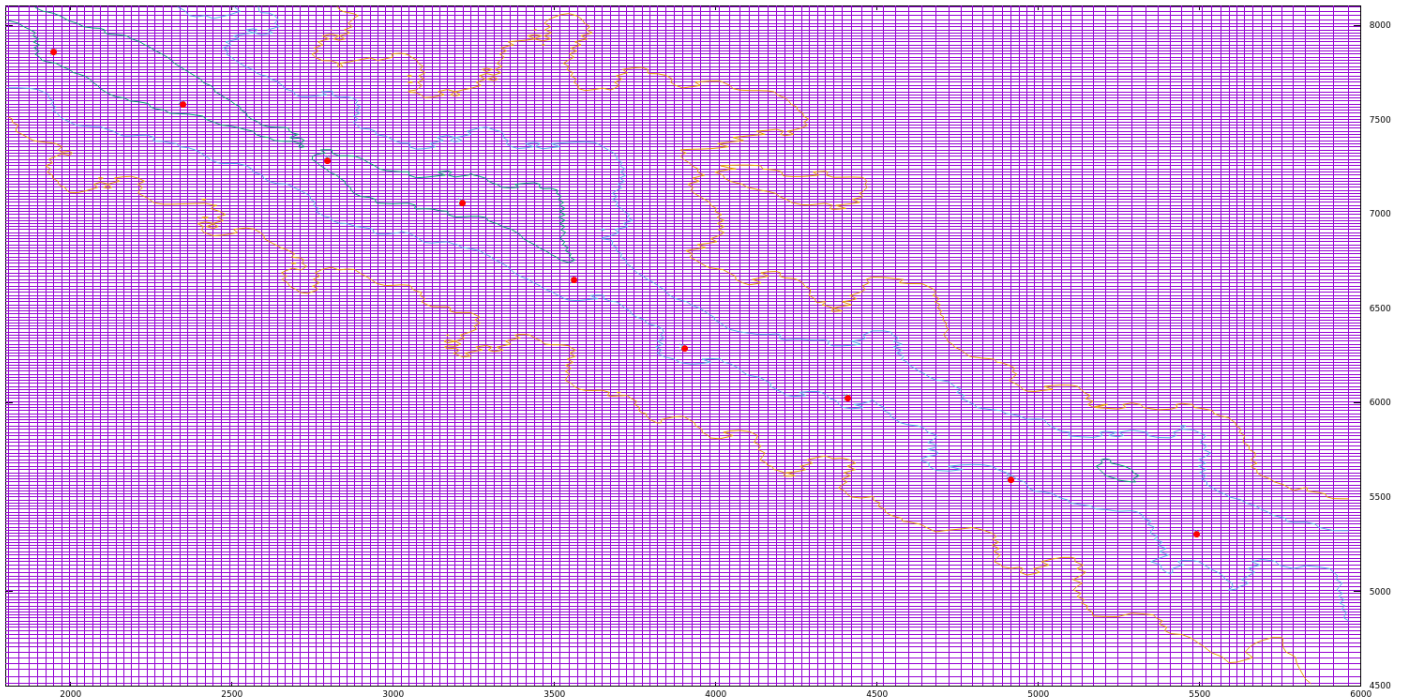
Εικόνα 2.1.3.8: Κάτοψη του πλέγματος των  $22.5^\circ$  μετά την πύκνωση



Εικόνα 2.1.3.8: Εστιασμένη κάτοψη του πλέγματος των  $0^\circ$  μετά την πύκνωση, στην περιοχή των ΑΓ



Εικόνα 2.1.3.8: Κάτοψη του πλέγματος των 337.5<sup>ο</sup> μετά την πύκνωση



Εικόνα 2.1.3.8: Εστιασμένη κάτοψη του πλέγματος των 337.5<sup>ο</sup> μετά την πύκνωση, στην περιοχή των ΑΓ

### 2.1.4 Περιβαλλοντικές Συνθήκες

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, πρέπει να καθοριστούν οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Καθώς η μελέτη αυτή αποκλίνει από τον σκοπό της εργασίας αυτής, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του μεσοκλιματικού μοντέλου WRF, από την μεταπτυχιακή εργασία του (Ευάγγελου Σ. Κουναλάκη, Αθήνα, Οκτώβριος 2020), για την τοπογραφία του νησιού. Αναφορικά, στο συγκεκριμένο μοντέλο, επιλύονται μη υδροστατικές μη μόνιμες Εξ. Euler πλήρως συμπιεστού ρευστού, συγκεκριμένα:

- Οι εξισώσεις διατήρησης της: ενέργειας (Εξ. 2.1.4.1), συνέχειας(Εξ. 2.1.4.2), υγρασίας – μάζας του νερού σε 3 φάσεις (Εξ. 2.1.4.3).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + (\bar{V} \cdot V_{\theta}) = F_{\theta} \quad (\text{Εξ. 2.1.4.1})$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + (\bar{V} \cdot V) = 0 \quad (\text{Εξ. 2.1.4.2})$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mu^{-1}[(V \cdot \bar{V}_{\phi}) - gW] = 0 \quad (\text{Εξ. 2.1.4.3})$$

- Οι εξισώσεις ορμής για τις 3 συνιστώσες (Εξ. 2.1.4.4), (Εξ. 2.1.4.5) & (Εξ. 2.1.4.6).

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (\bar{V} \cdot V_u) - \frac{\partial(p\phi_{\eta})}{\partial x} + \frac{\partial(p\phi_x)}{\partial \eta} = F_U \quad (\text{Εξ. 2.1.4.4})$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (\bar{V} \cdot V_V) - \frac{\partial(p\phi_{\eta})}{\partial y} + \frac{\partial(p\phi_x)}{\partial \eta} = F_V \quad (\text{Εξ. 2.1.4.5})$$

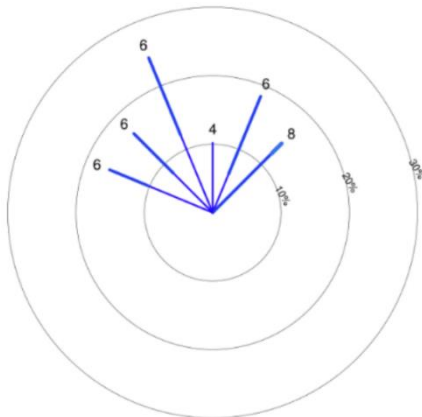
$$\frac{\partial W}{\partial t} + (\bar{V} \cdot V_W) - g \left( \frac{\partial p}{\partial \eta} - \mu \right) = F_W \quad (\text{Εξ. 2.1.4.6})$$

- Και η καταστατική εξίσωση των αερίων (Εξ. 2.1.4.7)

$$p = p_0 \left[ \frac{R_a \theta}{p_0 \alpha} \right]^{\gamma}, \quad \frac{\partial \phi}{\partial \eta} = -\alpha \mu \quad (\text{Εξ. 2.1.4.7})$$

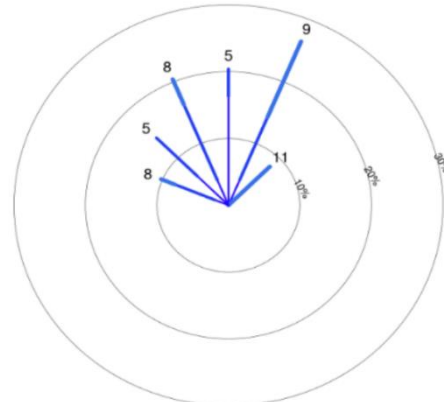
Για την μελέτη αυτή, χρειάζονται τα ρόδα ανέμου, και τα προφίλ εισόδου ανέμου για κάθε κατεύθυνση. Τα ρόδα ανέμου αρχικά, που προέκυψαν από το μεσοκλιματικό μοντέλο, είναι συνολικά 5, και το καθένα αντιστοιχεί σε ένα ύψος πάνω από την τοπογραφία. Συγκεκριμένα, οι επιφάνειες υπολογισμού των ρόδων βρίσκονται σε ύψη  $\approx 25, 50, 115, 195$  &  $298\text{m}$  από το έδαφος, ενώ τα ρόδα που έχουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, είναι αυτά για τα  $50$  &  $115\text{m}$  ( $2^{\circ}$  και  $3^{\circ}$  ρόδο), καθώς το μοντέλο της Α/Γ που

προσομοιώνεται έχει ύψος πλήμνης 80m, ενδιάμεσα δηλαδή των 2 ρόδων. Παρακάτω παρατίθενται τα κατασκευασμένα ρόδα:



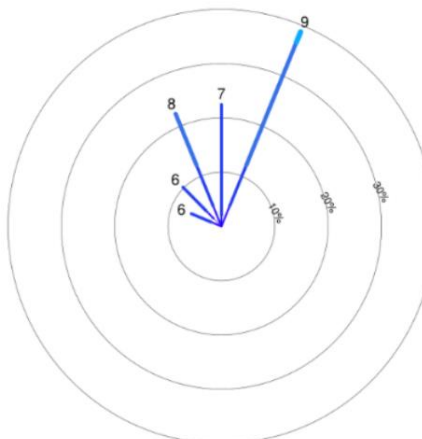
AverageSpd = 6  
AverageDir = 350

Εικόνα 2.1.4.1: Ρόδο ανέμου για ύψος 25m



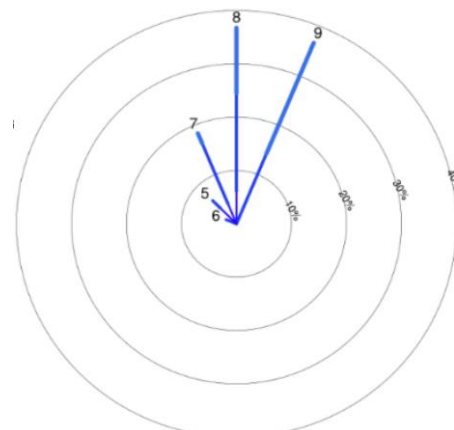
AverageSpd = 7  
AverageDir = 358

Εικόνα 2.1.4.2: Ρόδο ανέμου για ύψος 50m



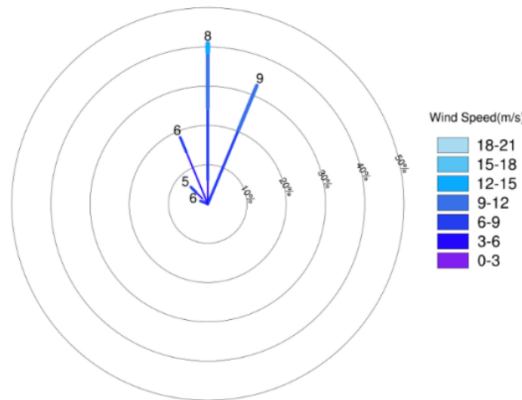
AverageSpd = 8  
AverageDir = 3

Εικόνα 2.1.4.3: Ρόδο ανέμου για ύψος 115m



AverageSpd = 8  
AverageDir = 5

Εικόνα 2.1.4.4: Ρόδο ανέμου για ύψος 195m



AverageSpd = 8  
AverageDir = 4

Εικόνα 2.1.4.5: Ρόδο ανέμου για ύψος 298m



Όπως και στην προσομοίωση, οι 3 επικρατέστερες κατευθύνσεις ανέμου στα ρόδα ανέμου για τα ύψη που εξετάζονται είναι οι (NNW, N, NNE). Στην συνέχεια ακολουθούν τα προφίλ ανέμου. Για τις 3 κατευθύνσεις, προκύπτουν τα προφίλ, με την χρήση των μέσων τιμών των ταχυτήτων του ανέμου ανά ύψος, π.χ. για τις 337.5° (NNW), συμπεριλαμβάνοντας ένα επιπλέον σημείο για ύψος 0 με μηδενική ταχύτητα, το μητρώο ταχυτήτων προκύπτει

$$U_{av,337} = [0 \ 6 \ 8 \ 8 \ 7 \ 6] \quad (\text{Εξ. 2.1.4.8})$$

Και μέσω της χρήσης κυβικών splines, προκύπτουν τα πολυώνυμα που περιγράφουν βέλτιστα το προφίλ εισόδου ανέμου για την κατεύθυνση των 337.5°

$$V_x(z) = \begin{cases} 3.0326e^{-5}(dz)^3 - 0.00547(dz)^2 + 0.357dz, & 0 < dz < 25 \\ 3.0326e^{-5}(dz - 25)^3 - 0.0032(dz - 25)^2 + 0.1405(dz - 25) + 6, & 25 < dz < 50 \\ 5.2004e^{-6}(dz - 50)^3 - 0.000925(dz - 50)^2 + 0.037(dz - 50) + 8, & 50 < dz < 113.9 \\ -2.162e^{-7}(dz - 113.9)^3 + 7.137e^{-5}(dz - 113.9)^2 - 0.0016(dz - 113.9) + 8, & 113.9 < dz < 195.2 \\ -2.162e^{-7}(dz - 195.2)^3 + 1.862e^{-5}(dz - 113.9)^2 - 0.009356(dz - 113.9) + 7, & 195.2 < dz < 298 \\ 6, & dz > 298 \end{cases}$$

Παρομοίως προκύπτουν και τα προφίλ εισόδου για τις άλλες 2 κατευθύνσεις, αυτή την φορά όμως με λογαριθμική παρεμβολή μέσω του παρακάτω τύπου:

$$V_x(z) = \frac{u^*}{k} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (\text{Εξ. 2.1.4.9})$$

Τελικά για τις 0° (N) το προφίλ διαμορφώνεται:

$$V_x(z) = \frac{0.26}{0.41} \cdot \ln\left(\frac{z}{2 \times 10^{-4}}\right) \quad (\text{Εξ. 2.1.4.10})$$

Έχοντας λάβει πάχος οριακού στρώματος  $z = 1000\text{m}$  &  $U_\infty = 10.026 \text{ m/s}$ . Για το ίδιο πάχος οριακού στρώματος αλλά  $U_\infty = 8.48 \text{ m/s}$  προκύπτει και το προφίλ των 22.5° (NNE):

$$V_x(z) = \frac{0.22}{0.41} \cdot \ln\left(\frac{z}{2 \times 10^{-4}}\right) \quad (\text{Εξ. 2.1.4.11})$$

Μόνο τα προφίλ εισάγονται ως είσοδος τελικά στο μικροκλιματικό μοντέλο, αλλά τα ρόδα είναι εξίσου σημαντικά τόσο για τον υπολογισμό των προφίλ, όσο και για την ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων στο επόμενο υποκεφάλαιο.

### 2.1.5 Τελικά αποτελέσματα & Ανάλυση

Εισάγοντας τελικά όλα τα δεδομένα στο μικροκλιματικό μοντέλο, μαζί την καμπύλη του συντελεστή ώσης “C<sub>T</sub>” από την (Εικ. 1.2), μπορεί να ξεκινήσει η επαναληπτική διαδικασία. Οι εξισώσεις του Υποκεφ. (2.1.2) επιλύονται επαναληπτικά πάνω στο πλέγμα, με διάρκεια προσομοιώσεων ≈ 1.5 – 3 ημέρες, αναλόγως το μέγεθος του κάθε πλέγματος. Το αρχείο εξόδου τελικά έχει την ακόλουθη μορφή, με την κάθε στήλη να δίνει την τιμή ενός μεγέθους για ένα σημείο, στο πεδίο μόνιμης ροής. Τα μεγέθη που έχουν προσομοιωθεί, είναι οι ταχύτητες της ροής στις 3 διευθύνσεις “V<sub>x</sub>, V<sub>y</sub>, V<sub>z</sub>”, η κινητική ενέργεια της τύρβης “k”, ο ρυθμός διάσπασης της κινητική ενέργειας της τύρβης “omega”, και η πίεση του ρευστού “p”:

```
TITLE="3D DATA,12000 ITERATIONS"
VARIABLES="X","Y","Z","Vx","Vy","Vz","p","k","om"
ZONE F=point, i= 179, j= 143, k= 35
-21.127441000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 -0.387032257 0.000817865 0.167746048
239.696930000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 -0.407747454 0.036359610 1.118461727
481.200990000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 -0.176778387 0.109769533 1.943356270
704.815860000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.022390405 0.149390455 2.267111828
911.866640000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.165414939 0.174455515 2.449931092
1103.580300000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.235670436 0.197917536 2.609478095
1281.093000000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.266871318 0.212916746 2.706552327
1445.456500000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.281163739 0.225483993 2.785283304
1597.645000000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.290074588 0.233649283 2.835265572
1738.560300000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.297030651 0.240266169 2.875132272
1869.037400000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.303286624 0.245048906 2.903607449
1989.849500000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.308926053 0.248958493 2.926678323
2101.712600000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.313987355 0.252019898 2.944617804
2205.289600000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.318456472 0.254542242 2.959316735
2301.194100000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.322394236 0.256598926 2.971248223
2389.994600000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.325855874 0.258308261 2.981128289
2472.217300000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.328896926 0.259732992 2.989338372
2548.349400000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.331559924 0.260932114 2.996230937
2618.842000000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.333876731 0.261948275 3.002059458
2684.113000000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.335873337 0.262816268 3.007029160
2744.549100000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.337578321 0.263562838 3.011297096
2800.508500000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.339022764 0.264209063 3.014986508
2852.322800000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.340238394 0.264770967 3.018190852
2900.298800000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.341256111 0.265261712 3.020986619
2944.721200000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.342103105 0.265691978 3.023435712
2985.853000000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.342802137 0.266071487 3.025594251
3023.938000000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.343377683 0.266409049 3.027512909
3059.201900000 272.906370000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.000000000 0.343864187 0.266709286 3.029218401
```

Εικόνα 2.1.5.1: Ενδεικτική απεικόνιση της αρχής του αρχείου εξόδου για την κατεύθυνση των 0°

Οι στόχοι που αποσκοπεί να καλύψει η ανάλυση, είναι:

- i) Πρωταρχικά, η εξακρίβωση των 2 Α/Γ από το σύνολο των 10, που δέχονται την μέγιστη και ελάχιστη κόπωση, ώστε με την σειρά τους να μπορέσουν να μελετηθούν εκτενώς στο 3<sup>ο</sup> τμήμα της μελέτης.
- ii) Σε δευτερεύουσα σημασία, ο σχολιασμός των φαινομένων & των μεγεθών που παρατηρούνται/καταγράφονται πάνω από την αυτήν.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν στο αρχείο εξόδου, εισάγονται στο λογισμικό ανάλυσης & οπτικοποίησης “TEC PLOT”, μέσω του οποίου θα γίνει η οπτικοποίηση της ροής. Τα ύψη των Α/Γ προέκυψαν από αντιστοίχιση των συντεταγμένων τους στο αρχείο της τοπογραφίας, και σύζευξη με το ύψος εκεί. Τα ύψη παρατίθενται αναφορικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.1.5.1: Ύψη των 10 Α/Γ από την επιφάνεια της θάλασσας για την βάση και την πλήμνη

|                       | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Height (ground level) | 163 | 162 | 151 | 178 | 131 | 113 | 104 | 99  | 135 | 114 |
| Height (hub)          | 243 | 242 | 231 | 258 | 211 | 193 | 184 | 179 | 215 | 194 |

Για την εξακρίβωση της κόπωσης που δέχονται οι Α/Γ, θα χρησιμοποιηθεί μια εκδοχή του μέσου σταθμισμένου μέτρου της έντασης τύρβης, για κάθε μια από αυτές, το οποίο δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\bar{I} = \frac{\left( \sum_{i=1}^{N_{wind}} \sum_{j=1}^{N_{direction}} \frac{f_{ij} \cdot \sigma u_{ij}}{U_{ref ij}} \right)}{f_{dir}} \quad (Εξ. 2.1.5.1)$$

Η παραπάνω σχέση διαφέρει από την συνήθη έκφραση για την ένταση της τύρβης, η οποία ορίζεται ως:

$$I = \frac{u'}{U} \cdot 100\% \quad (Εξ. 2.1.5.2)$$

Στην οποία η “u’” είναι η ρίζα του μέσου αθροίσματος των τετραγώνων της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας για τις 3 διευθύνσεις, και “U” η ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των συνιστωσών της ταχύτητας, κοινώς η ταχύτητα:

$$u' = \sigma_u = \sqrt{\frac{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2)}{3}} \quad (Εξ. 2.1.5.3)$$

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (Εξ. 2.1.5.4)$$

Αν για την (Εξ. 2.1.5.2) γίνει η υπόθεση πως τα «I, U» είναι συναρτήσεις μόνο του ύψους “z”, τότε η εξίσωση λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$I_x(z) = \frac{\sigma_x}{U_{ref}(z)} \quad (Εξ. 2.1.5.5)$$

Η κινητική ενέργεια της τύρβης ορίζεται ως συνάρτηση της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας ως:

$$k = \frac{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2)}{2} \quad (Εξ. 2.1.5.6)$$

Λαμβάνοντας τις παρακάτω παραδοχές για την ανισοτροπία της τύρβης (Εξ. 2.1.5.7) και το επίπεδο έδαφος (Εξ. 2.1.5.8), οι οποίες εκφράζονται μέσω των παρακάτω σχέσεων, η (Εξ. 2.1.5.6) μετατρέπεται στην (Εξ. 2.1.5.9):

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_x} = 0.8 \quad (\text{Εξ. 2.1.5.7})$$

$$\frac{\sigma_z}{\sigma_x} = 0.5 \quad (\text{Εξ. 2.1.5.8})$$

$$k = 0.945 \cdot \sigma_x^2 \quad (\text{Εξ. 2.1.5.9})$$

Η (Εξ. 2.1.5.9) χρησιμοποιείται σε Α/Γ οι οποίες δεν επηρεάζονται από το ομόρρου άλλων Α/Γ στο πάρκο, ενώ για την περίπτωση που επηρεάζονται, χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση (Εξ. 2.1.5.10):

$$\sigma_x = \sqrt{0.67k + 0.38k_\infty} \quad (\text{Εξ. 2.1.5.10})$$

$$k_\infty = 5.47 \cdot u_\infty^{*2} \quad (\text{Εξ. 2.1.5.11})$$

$$u_\infty^* = U_{ref} \cdot \left( \frac{\kappa}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \right) \quad (\text{Εξ. 2.1.5.12})$$

Όπου  $k_\infty$  η τύρβη εισόδου όπως εισάγεται στον κώδικα,  $u_\infty^*$  η ταχύτητα ροής και  $\kappa = 0.41$ . Επιλέχθηκε μόνο η πρώτη Α/Γ να χρησιμοποιεί την (Εξ. 2.1.5.9), ενώ για τις υπόλοιπες 9, χρησιμοποιείται η (Εξ. 2.1.5.10). Όλες οι παραπάνω μετατροπές είναι απαραίτητες, καθώς στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δεν παρέχονται οι τυπικές αποκλίσεις «σ», αλλά μόνο το “κ”. Τελικά μέσω της (Εξ. 2.1.5.9), η (Εξ. 2.1.5.5) γίνεται:

$$I_x(z) = \frac{1.02869 \cdot \sqrt{k}}{U_{ref}(z)} \quad (\text{Εξ. 2.1.5.13})$$

Εισάγοντας στην (Εξ. 2.1.5.13) τους όρους της συχνότητας, προκύπτει τελικά η (Εξ. 2.1.5.1), στην οποία:

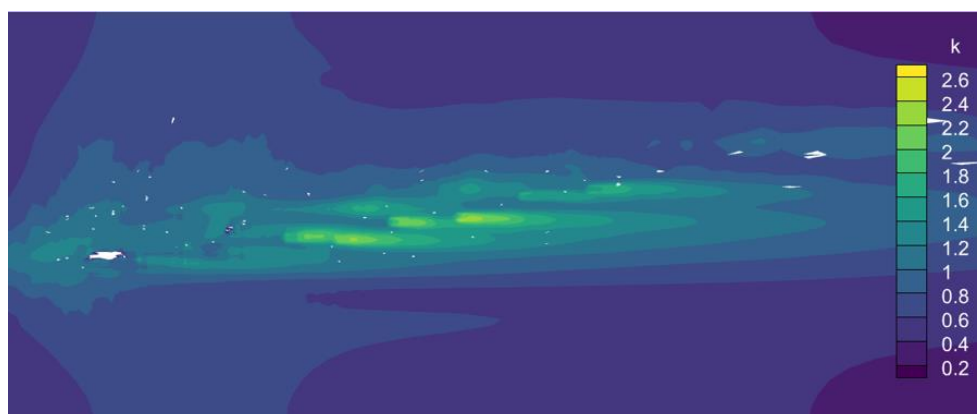
- $\sigma_{ij}$ : υπολογίζεται ως συνάρτηση του  $k$  μέσω της (Εξ. 2.1.5.9/10), το οποίο είναι η μέση τιμή της κινητικής ενέργειας της τύρβης πάνω στον δίσκο της Α/Γ.
- $U_{refij}$ : η τιμή της ταχύτητας της ελεύθερης ροής για το ύψος πλήμνης της κάθε Α/Γ.
- $f_{ij}$ : η συχνότητα εμφάνισης της ταχύτητας  $U_{refij}$  για κάθε όρο, στο πάρκο.
- $f_{dir}$ : η κανονικοποιημένη (στο 100%) ποσοστιαία συχνότητα εμφάνισης της κάθε κατεύθυνσης στο πάρκο.

Ουσιαστικά η διαδικασία που θα ακολουθηθεί είναι η εξής. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων υπολογίζεται μια μέση τιμή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας πάνω στον δίσκο της Α/Γ (ως ο μέσος όρος 13 σημείων κατανεμημένων ομοιόμορφα πάνω

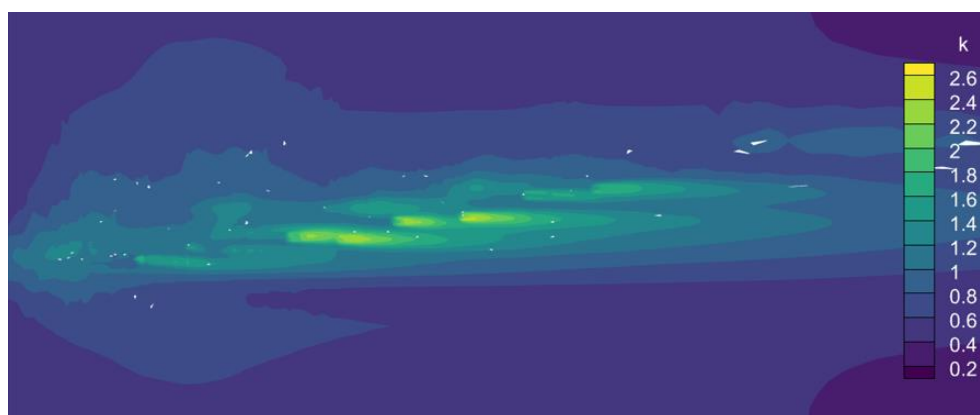
του). Καθώς τα ρόδα ανέμου που είναι διαθέσιμα είναι για ύψη 50 & 115m από το έδαφος, οι τιμές του “k” λαμβάνονται ως γραμμική παρεμβολή των 2 αυτών μετρήσεων, για το ύψος της πλήμνης της Α/Γ (80m), περίπου δηλαδή στο ενδιάμεσο. Από τα προφίλ εισόδου ανέμου υπολογίζεται η τιμή της  $U_{ref}$  στο hub height (ύψος πλήμνης) της κάθε Α/Γ, ενώ από τα ρόδα ανέμου λαμβάνονται οι συχνότητες εμφάνισης των ταχυτήτων στο πάρκο. Η κανονικοποιημένη συχνότητα εμφάνισης της κάθε διεύθυνσης στο 100% προκύπτει επίσης με ευκολία. Έχοντας όλα τα δεδομένα διαθέσιμα υπολογίζεται το μέσο σταθμισμένο μέτρο της έντασης τύρβης, το οποίο χρησιμοποιείται ως γνώμονας για την εξακρίβωση της κόπωσης που δέχεται η καθεμία, όσο μεγαλύτερο το μέτρο του, τόσο μεγαλύτερη η κόπωση. Τα τελικά αποτελέσματα θα παρουσιαστούν μετά την ανάλυση των προσομοιώσεων που ακολουθεί.

### 2.1.5.1 Αποτελέσματα για 22.5° (NNW)

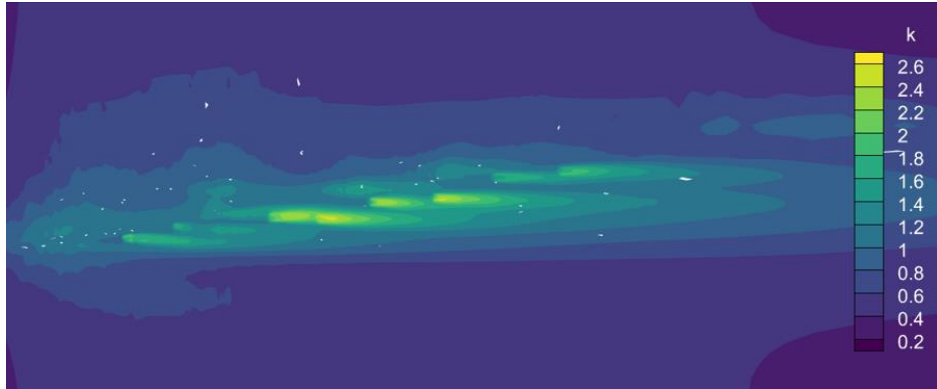
Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα για την τοπογραφία των 22° υπό την μορφή κατόψεων, όπως στην (Εικόνα 2.1.3.8), για διάφορα ύψη από τον (Πίνακα 2.1.5.1), με βήμα 10m. Μεγαλύτερη σημασία θα δοθεί στις απεικονίσεις της κινητικής ενέργειας της τύρβης αρχικά:



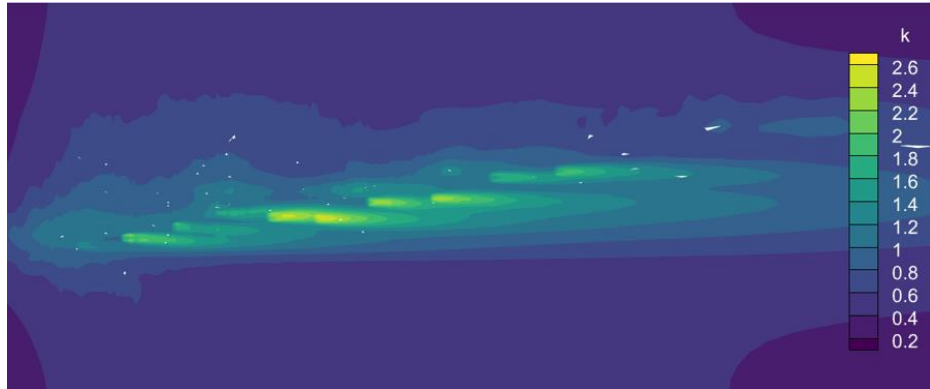
Εικόνα 2.1.5.1.1: Απεικόνιση του πεδίου της κινητικής ενέργειας της τύρβης για ύψος  $z = 180m$



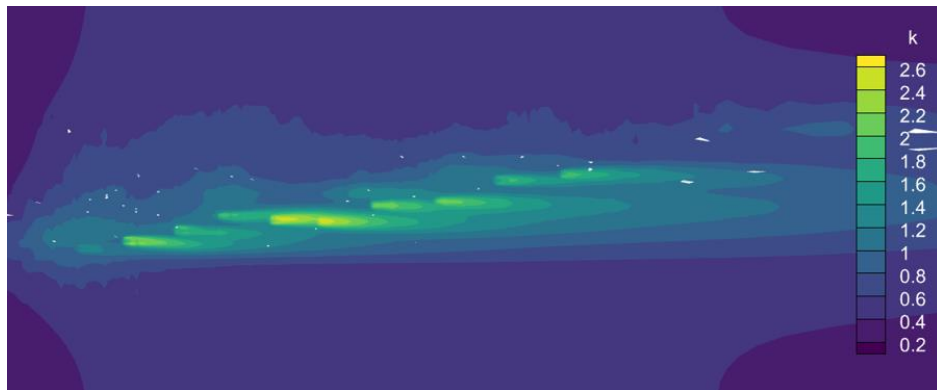
Εικόνα 2.1.5.1.2: Απεικόνιση του πεδίου της κινητικής ενέργειας της τύρβης για ύψος  $z = 190m$



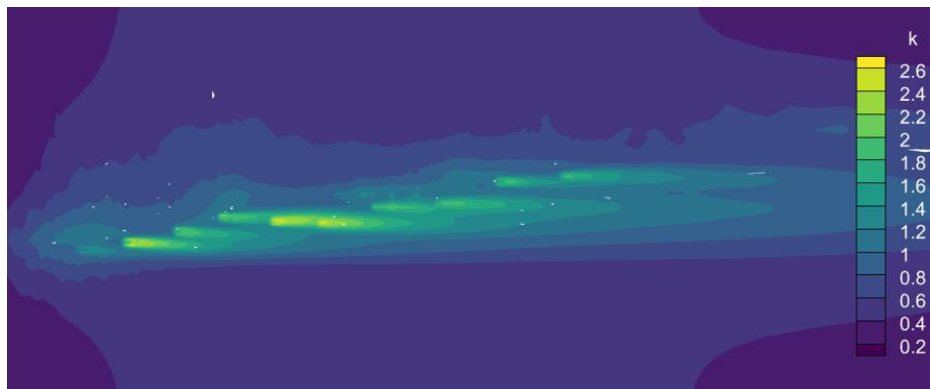
Εικόνα 2.1.5.1.3: Απεικόνιση του πεδίου της κινητικής ενέργειας της τύρβης για ύψος  $z = 200m$



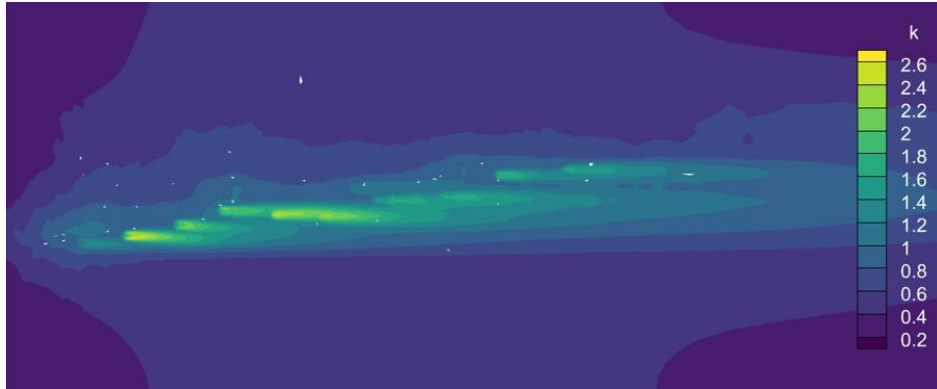
Εικόνα 2.1.5.1.4: Απεικόνιση του πεδίου της κινητικής ενέργειας της τύρβης για ύψος  $z = 210m$



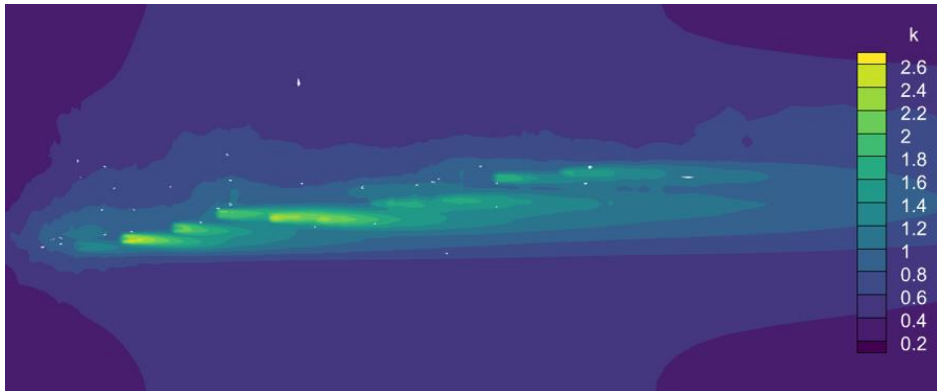
Εικόνα 2.1.5.1.5: Απεικόνιση του πεδίου της κινητικής ενέργειας της τύρβης για ύψος  $z = 220m$



Εικόνα 2.1.5.1.6: Απεικόνιση του πεδίου της κινητικής ενέργειας της τύρβης για ύψος  $z = 220m$



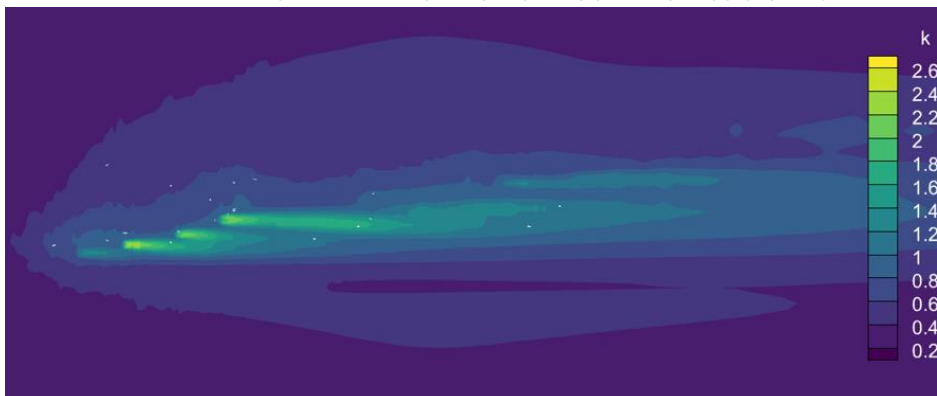
Εικόνα 2.1.5.1.7: Απεικόνιση του πεδίου της κινητικής ενέργειας της τύρβης για ύψος  $z = 240\text{m}$



Εικόνα 2.1.5.1.8: Απεικόνιση του πεδίου της κινητικής ενέργειας της τύρβης για ύψος  $z = 250\text{m}$



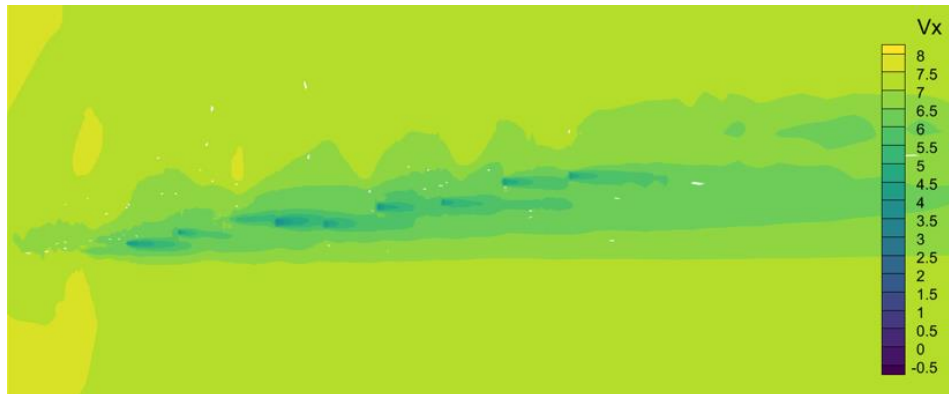
Εικόνα 2.1.5.1.9: Απεικόνιση του πεδίου της κινητικής ενέργειας της τύρβης για ύψος  $z = 260\text{m}$



Εικόνα 2.1.5.1.10: Απεικόνιση του πεδίου της κινητικής ενέργειας της τύρβης για ύψος  $z = 260\text{m}$



Εικόνα 2.1.5.1.11: Απεικόνιση του πεδίου της ταχύτητας ροής  $V_x$  για ύψος  $z = 180m$



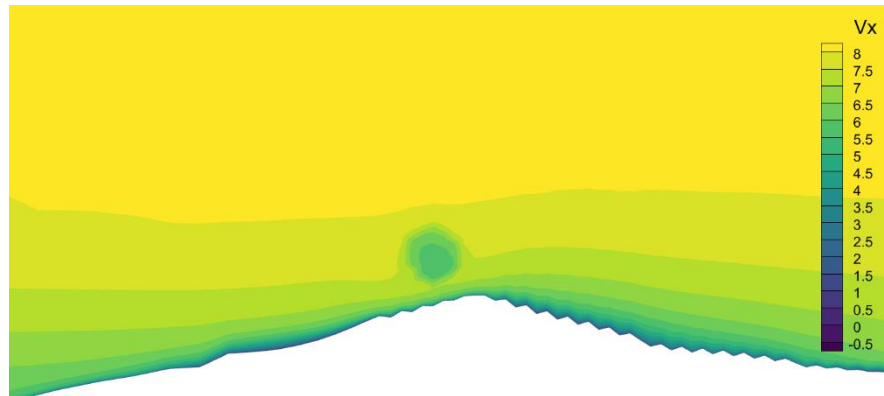
Εικόνα 2.1.5.1.12: Απεικόνιση του πεδίου της ταχύτητας ροής  $V_x$  για ύψος  $z = 200m$



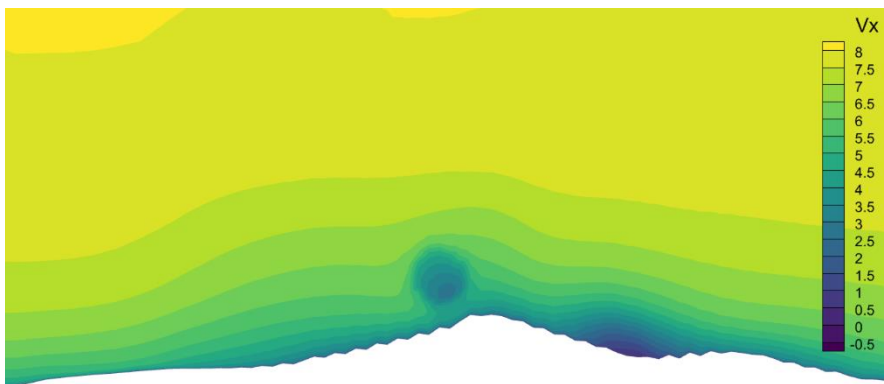
Εικόνα 2.1.5.1.13: Απεικόνιση του πεδίου της ταχύτητας ροής  $V_x$  για ύψος  $z = 220m$



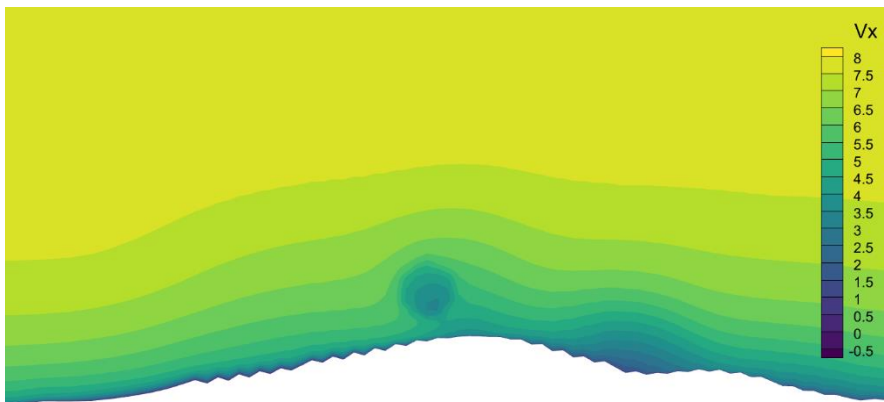




Εικόνα 2.1.5.1.15: Πρόσοψη του πεδίου της ταχύτητας ροής  $V_x$  για την 1<sup>η</sup> Α/Γ



Εικόνα 2.1.5.1.16: Πρόσοψη του πεδίου της ταχύτητας ροής  $V_x$  για την 5<sup>η</sup> Α/Γ

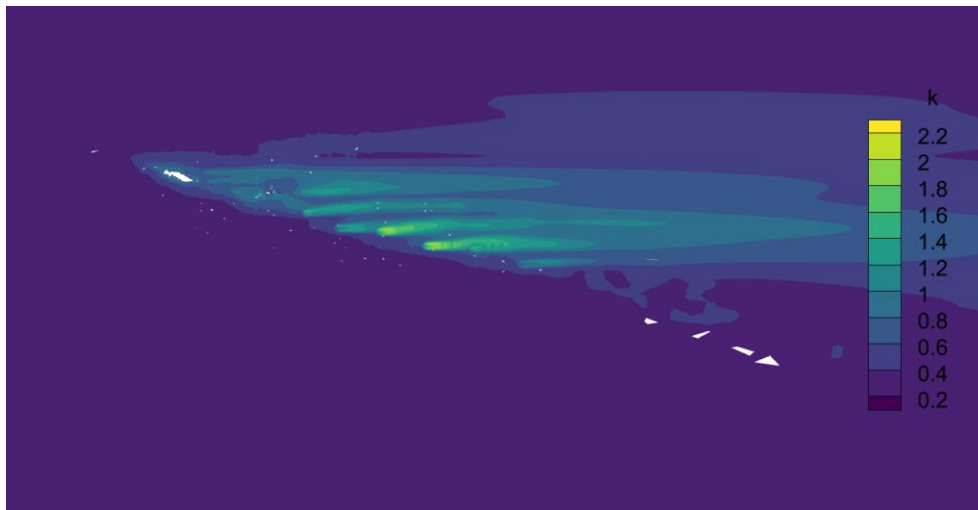


Εικόνα 2.1.5.1.17: Πρόσοψη του πεδίου της ταχύτητας ροής  $V_x$  για την 6<sup>η</sup> Α/Γ

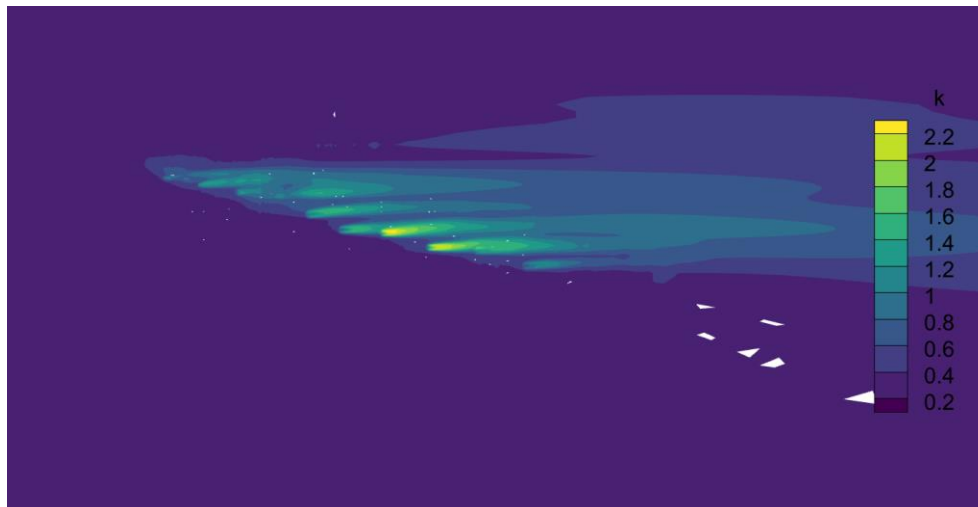
Επιλέχθηκαν να απεικονιστούν αναλυτικότερα τα διαγράμματα για τις 22<sup>ο</sup> καθώς εκεί η νήσος είναι πιο «οριζόντια», με αποτέλεσμα οι Α/Γ να απέχουν μικρότερες αποστάσεις, στον γ'γ, κάνοντας εμφανέστερη την επίδραση του ομόρρου & της ανομοιομορφίας της τοπογραφίας στο πεδίο ροής. Αυτό αναδεικνύεται ιδιαίτερα με την σύγκριση των Α/Γ 1-5-6. Η 1<sup>η</sup> Α/Γ, δεν επηρεάζεται από καμία άλλη, καθώς σε αυτήν φτάνει πρώτα η ροή, ούτε και από την τοπογραφία, λόγω της θέσης της, έτσι και η μεταβολές στο πεδίο της τύρβης, στην (Εικόνα 2.1.5.1.7) για το ύψος πλήμνης της 1<sup>ης</sup>, είναι μηδαμινές. Αντίθετα,

οι Α/Γ 5 & 6, δέχονται έντονα τόσο τις συνέπειες του ομόρρου, όσο και της τοπογραφίας. Καθώς βρίσκονται στην χαμηλότερη υψομετρικά πλευρά της τοπογραφίας, η ροή του ανέμου σε αυτές, παρεμποδίζεται από την ανομοιομορφία του εδάφους, και αναδεικνύεται καλύτερα στην (Εικόνα 2.1.3.1.7). Η επίδραση του ομόρρου από την άλλη σε αυτές, φαίνεται στην (Εικόνα 2.1.5.1.3), όπου στο ύψος της πλήμνης (περίπου) για αυτές, το μέτρο της τύρβης αυξάνεται ραγδαία. Στις (Εικόνες 2.1.5.1.15/16/17) γίνεται ακόμη πιο εμφανής η επιβράδυνση του πεδίου ροής της ταχύτητας εκεί, ιδιαίτερα όταν έρχεται σε σύγκριση με το πεδίο πάνω στον δίσκο της 1<sup>ης</sup> Α/Γ. Προφανώς για την σύγκριση θα μπορούσαν να είχαν επιλεγθεί οποιεσδήποτε άλλες Α/Γ στο πάρκο, αντί για τις 5 & 6.

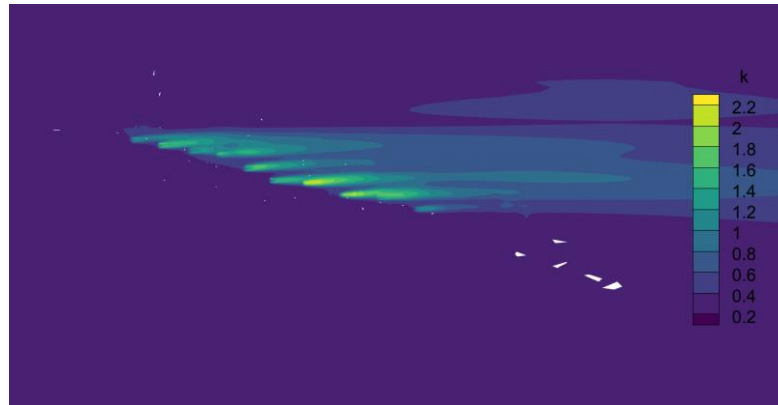
### 2.1.5.2 Αποτελέσματα για 0° (N)



Εικόνα 2.1.5.2.1: Απεικόνιση του πεδίου της κινητικής ενέργειας της τύρβης για ύψος  $z = 180m$



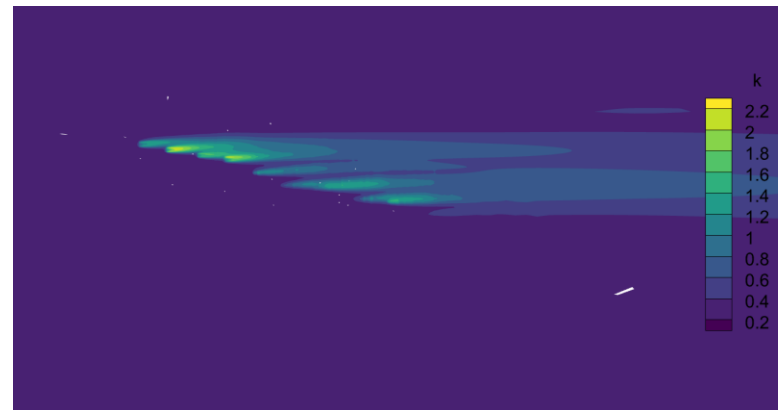
Εικόνα 2.1.5.2.2: Απεικόνιση του πεδίου της κινητικής ενέργειας της τύρβης για ύψος  $z = 200m$



Εικόνα 2.1.5.2.3: Απεικόνιση του πεδίου της κινητικής ενέργειας της τύρβης για ύψος  $z = 220\text{m}$



Εικόνα 2.1.5.2.4: Απεικόνιση του πεδίου της κινητικής ενέργειας της τύρβης για ύψος  $z = 240\text{m}$



Εικόνα 2.1.5.2.5: Απεικόνιση του πεδίου της κινητικής ενέργειας της τύρβης για ύψος  $z = 260\text{m}$



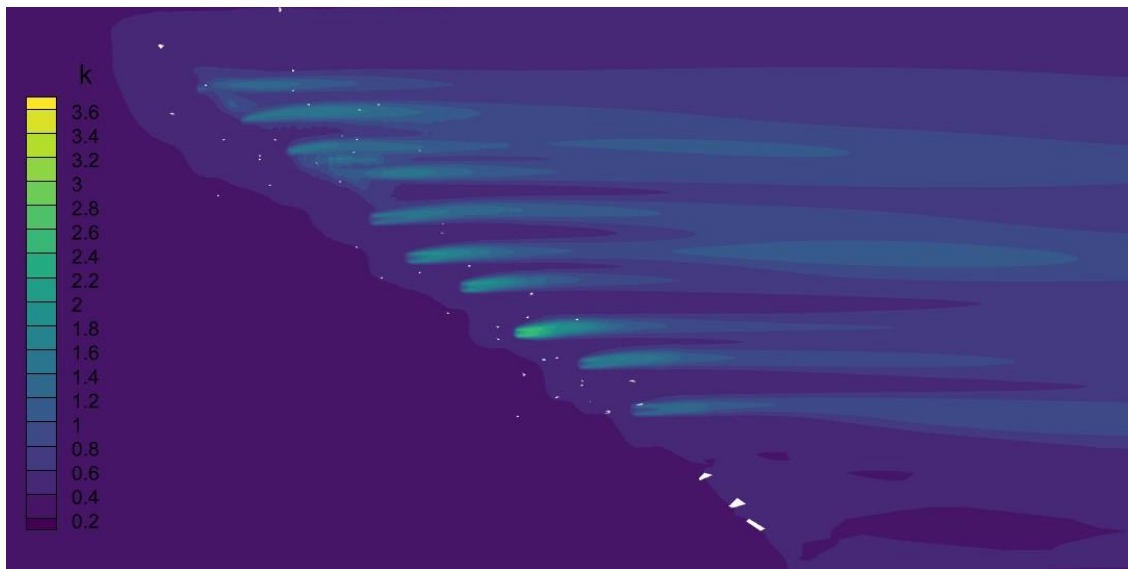
Εικόνα 2.1.5.2.6: Απεικόνιση του πεδίου της κινητικής ενέργειας της τύρβης για πλάτος  $y = 4390\text{m}$



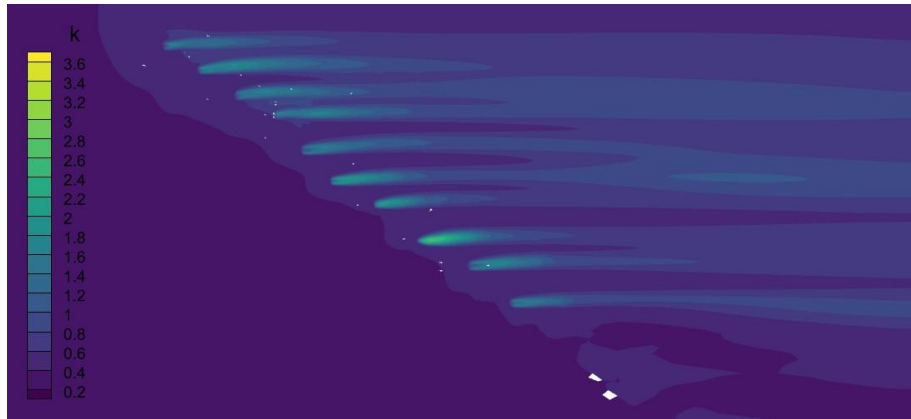
Εικόνα 2.1.5.2.7: Απεικόνιση του πεδίου της ταχύτητας ροής  $V_x$  για πλάτος  $y = 4390m$

Όπως και για την κατεύθυνση των  $22^\circ$  έτσι και εδώ μπορούν να γίνουν οι ίδιες παρατηρήσεις. Το φαινόμενο της σκίασης εδώ είναι λιγότερο έντονο, λόγω της αυξημένης κάθετης απόστασης των Α/Γ, ενώ η ροή προσπίπτει σε αυτές πριν συναντήσει κάποια αισθητή ανομοιομορφία στην τοπογραφία. Φαίνεται επίσης αναλυτικά πως αναπτύσσονται τα πεδία ροής τύρβης & ταχύτητας για την 4<sup>η</sup> Α/Γ στις (Εικόνες 2.1.5.2.6/7). Όπως είναι αναμενόμενο, σε όσα σημεία το η μεταβολή του μέτρου της ταχύτητας κορυφώνεται, εκεί παρατηρείται και η μέγιστη τύρβη, ενώ με την απομάκρυνση από την Α/Γ, η ροή γίνεται πιο στρωτή, και το “ $k$ ” όλο και μειώνεται. Γίνεται επίσης ιδιαίτερα εμφανής το μέγεθος της απόστασης για την οποία είναι αισθητές οι συνέπειες του ομόρρου σε άλλες Α/Γ, πίσω από αυτήν που το προκαλεί.

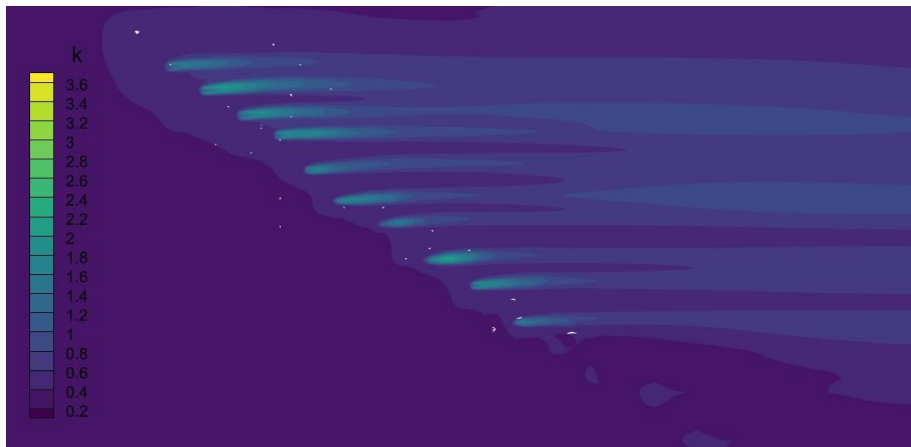
### 2.1.5.3 Αποτελέσματα για $337.5^\circ$ (NNE)



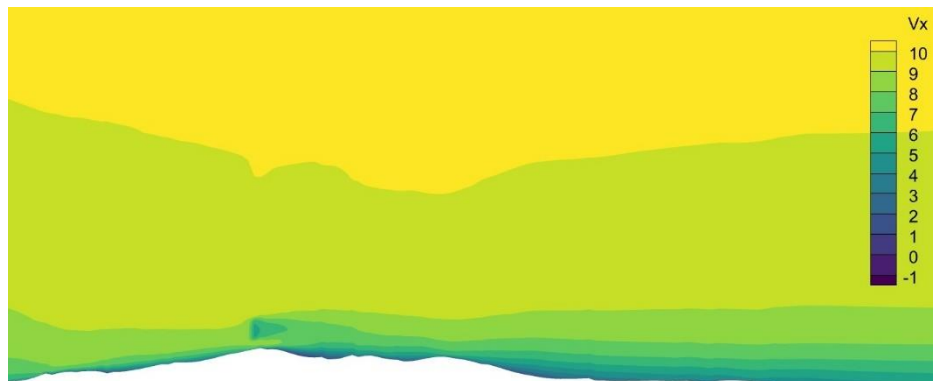
Εικόνα 2.1.5.3.1: Απεικόνιση του πεδίου της κινητικής ενέργειας της τύρβης για ύψος  $z = 200m$



Εικόνα 2.1.5.3.2: Απεικόνιση του πεδίου της κινητικής ενέργειας της τύρβης για ύψος  $z = 220m$



Εικόνα 2.1.5.3.3: Απεικόνιση του πεδίου της κινητικής ενέργειας της τύρβης για ύψος  $z = 240m$



Εικόνα 2.1.5.3.4: Απεικόνιση του πεδίου της ταχύτητας ροής  $V_x$  για πλάτος  $y = 7291m$

Παρόμοια και με την κατεύθυνση των  $0^\circ$  μοιρών, έτσι και στην περίπτωση αυτή, η ανάπτυξη του φαινομένου του ομόρρου φαίνεται ακόμη καλύτερα, ιδιαίτερα στις (Εικόνες 2.1.5.3.1/2/3). Οι ίδιες παρατηρήσεις που έγιναν στο υποκεφάλαιο (2.1.5.2) ισχύουν και εδώ, με τις Α/Γ να απέχουν ακόμη παραπάνω στον γ'γ μεταξύ τους. Επιπλέον, στις απεικονίσεις του πεδίου τύρβης, δεν φαίνεται καμία από τις Α/Γ να επηρεάζεται από το ομόρρου της άλλης. Έχοντας πλέον και τα αριθμητικά αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις, μπορεί πλέον να ολοκληρωθεί ο αναλυτικός υπολογισμός του

μέσου σταθμισμένου μέτρου της έντασης τύρβης, όπου ακολουθεί στο επόμενο υποκεφάλαιο.

## 2.2 Συμπεράσματα

Για τις Α/Γ του πάρκου προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

*Πίνακας 2.2.1: Μέσο σταθμισμένο μέτρο της έντασης τύρβης για τις 10 Α/Γ του πάρκου*

|                   | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\bar{I}_{total}$ | 0.1136 | 0.1068 | 0.1056 | 0.1162 | 0.1092 | 0.1088 | 0.1136 | 0.1168 | 0.1092 | 0.0994 |

Οι Α/Γ με την μεγαλύτερη τιμή, για το σταθμισμένο μέτρο τύρβης είναι οι 4 & 8, με οριακά μεγαλύτερη της 8, ενώ αυτή με την μικρότερη είναι η 10. Στην συνέχεια θα προσομοιωθεί η δυναμική απόκριση για τις παραπάνω Α/Γ, μέσω του υπολογιστικού λογισμικού hGAST που έχει αναπτυχθεί από το εργαστήριο αεροδυναμικής, αφού πρώτα ολοκληρωθεί η υποκλιμάκωση της Α/Γ αναφοράς 5MW της NREL που διατίθεται.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΥΠΟΚΛΙΜΑΚΩΣΗ Α/Γ ΑΝΑΦΟΡΑΣ 5MW

### 3.1 Βασικά Χαρακτηριστικά

Το ήδη υπάρχον μοντέλο της Α/Γ είναι γνωστό ως “NREL offshore 5-MW baseline wind turbine” και από την ονομασία είναι προφανές ότι πρόκειται για Α/Γ ονομαστικής ισχύος 5 MW και ακτίνας 63m. Όπως αναλύεται και στην εισαγωγή, η Α/Γ που προσομοιώνεται έχει ονομαστική ισχύ 2 MW και ακτίνα 40m, συνεπώς θα χρειαστεί να μειωθεί σε μέγεθος το 1<sup>ο</sup> μοντέλο ώστε να έρθει όσο το δυνατόν πιο κοντά στις διαστάσεις του ζητούμενου. Αρχικά είναι σημαντικό να παρατεθούν μερικά βασικά διαστασιολογικά & δομικά στοιχεία, ιδιαίτερα για την Α/Γ NREL καθώς και να αναλυθεί από μαθηματικής πλευράς η διαδικασία που θα ακολουθήσει.

Πίνακας 3.1.1: Βασικά στοιχεία της ήδη υπάρχουσας Α/Γ αναφοράς “NREL” 5 MW

| Ονομαστική ισχύς                             | 5 MW                               |
|----------------------------------------------|------------------------------------|
| Προσανατολισμός, Αρ. Πτερυγίων               | Upwind, 3 Blades                   |
| Τύπος ελέγχου                                | Variable Speed, Collective Pitch   |
| Σύστημα κίνησης                              | High Speed, Multiple-Stage Gearbox |
| Διάμετρος πτερυγίων, πλήμνης                 | 126 m, 3 m                         |
| Ύψος πλήμνης                                 | 90 m                               |
| Ταχύτητες: εκκίνησης, ονομαστική, παύσης     | 3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s            |
| Ταχύτητες περιστροφής: εκκίνησης, ονομαστική | 6.9 rpm, 12.1 rpm                  |
| Ονομαστική γραμμική ταχύτητα περιστροφής     | 80 m/s                             |
| Μάζα κινητήρα                                | 110,000 kg                         |
| Μάζα Nacelle                                 | 240,000 kg                         |
| Μάζα Πύργου                                  | 347,460 kg                         |

Για την μείωση των διαστάσεων θα χρησιμοποιηθεί κατά βάση ο λόγος των ακτίνων των 2 Α/Γ ή αλλιώς γεωμετρικός λόγος, που ισούται με:

$$s = \frac{R_{NREL}}{R_{Vestas}} = \frac{63}{40} = 1.575 \quad (\text{Εξ. 3.1.1})$$

Πρώτα θα γίνει η επεξεργασία των δομικών χαρακτηριστικών, η οποία ακολουθεί στο επόμενο υποκεφάλαιο.

### 3.1.1 Επεξεργασία δομικών χαρακτηριστικών

Για την ονομαστική Α/Γ “NREL” υπάρχουν αρχεία στα οποία έχουν οριστεί διάφορα δομικά μεγέθη για τα 3 πτερύγια, τον άξονα & τον πύργο, τα οποία προσαρμόζονται ακολούθως μέσω του γεωμετρικού λόγου «s»:

- Διαστάσεις (x, y, z)

Οι διαστάσεις x, y, z αποτελούν την βάση της διαδικασίας, και απλώς χρειάζεται να διαιρεθούν με τον λόγο «s», για να προκύψουν οι καινούργιες. (η διαίρεση με τον λόγο «s» γίνεται στις διαστάσεις της NREL, και προκύπτουν οι νέες για την ζητούμενη).

- Μάζα (m)

Η μάζα του κάθε σώματος προκύπτει συναρτήσει των συντεταγμένων x, y, z συνεπώς θα χρειαστεί να διαιρεθεί με το «s<sup>3</sup>». Να σημειωθεί πως στην μελέτη αυτή η μάζα ορίζεται ανά μέτρο (kg/m) συνεπώς η μετατροπή της πρακτικά θα είναι με την χρήση του «s<sup>2</sup>».

- Ροπές αδράνειας ( $mI_{xx}$ ,  $mI_{yy}$ ,  $mI_{xz}$ ,  $EI_{xx}$ ,  $EI_{yy}$ ,  $EI_{xz}$ ,  $GI_t$ )

Η ροπή αδράνειας επηρεάζεται από την μάζα και το τετράγωνο της απόστασης, συνεπώς θα χρειαστεί να διαιρεθεί με το «s<sup>4</sup>».

- Μέτρο ελαστικότητας (EA, EA<sub>x</sub>, EA<sub>z</sub>)

Το γινόμενο του μέτρου ελαστικότητας «E» και του εμβαδού διατομής «A», θα χρειαστεί να διαιρεθεί με το «s<sup>2</sup>», καθώς το μέτρο ελαστικότητας παραμένει αμετάβλητο οπότε επηρεάζεται από το εμβαδόν.

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται για κάθε τομή κατά μήκος των 3 πτερυγίων, του άξονα και του πύργου. Πραγματοποιούνται και άλλες μικρές, μη αξιοσημείωτες αλλαγές (π.χ. στην χορδή του πτερυγίου προς το «s», και ορισμένες γεωμετρικές ρυθμίσεις στις αεροτομές) και τελικά ολοκληρώνεται η δομική επεξεργασία.



```

1          ! Initial static solution [0:no,1:yes]
000.00    ! Blade 1: Azimuthal position [deg]
0.000 0.000 ! Blade 1: Pitch [for heli also qc and qs], Imbalance [deg]
0.000 0.000 ! Blade 2: Pitch [for heli also qc and qs], Imbalance [deg]
0.000 0.000 ! Blade 3: Pitch [for heli also qc and qs], Imbalance [deg]
19.0575   ! Rotors Speed [LSS] [RPM]
999999999 ! HSS Torque [not always needed] [Nm ]
* Geometry parameters
80.80256  ! Tower top Height [ m ]
0.000     ! Tower bottom Height [ m ]
0.0       ! Shaft offset from tower top [ m ]
3.187     ! Shaft length [ m ]
0.95238   ! Distance from hub to blade root [ m ]
0.000     ! Yaw angle of the nacelle [deg]
5.000     ! Tilt angle of the rotor [deg]
-2.500    ! Cone angle of the blade [deg]
19.0575   ! Rotor's Speed (nominal), defines period [RPM]
50.000    ! Gearbox Ratio [ - ]
1         ! Yaw mechanism [0:no, 1:yes] [ - ]
9.028323e9 ! Stiffness of yaw mechanism [Nm/ rad ]
1.916e7   ! Damping of yaw mechanism [Nm/(rad/s)]
    
```

Εικόνα 3.1.2.1: Τμηματική απεικόνιση ενός από τα αρχεία εισόδου, όπου και εισάγονται ορισμένα από τα δομικά χαρακτηριστικά και παράγοντες της διαδικασίας προσομοίωσης

### 3.1.2 Επεξεργασία αυτομάτου ελέγχου

Οι Α/Γ του πάρκου θα λειτουργούν με ενεργοποιημένο ελεγκτή, ο οποίος θα μεταβάλλει τις στροφές και την κλίση (pitch), ώστε η ισχύς να διατηρείται συνεχώς όσο το δυνατόν πιο κοντά στην ονομαστική των 2 MW. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι παρόμοια με αυτή για τα δομικά χαρακτηριστικά με μερικές διαφορές. Αρχικά ορίζονται ονομαστική & ελάχιστη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής, καθώς και ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης:

$$\omega_{min} = 11.91 \text{ rpm} \quad (\text{Εξ. 3.1.2.1})$$

$$\omega_{nominal} = 19.0575 \text{ rpm} \quad (\text{Εξ. 3.1.2.2})$$

$$n_{elec} = 0.94 \quad (\text{Εξ. 3.1.2.3})$$

Στην συνέχεια πρέπει να υπολογιστεί ο συντελεστής “K”, που ορίζει την βέλτιστη καμπύλη ροπής – στροφών για τα νέα δεδομένα. Ο συντελεστής “K” χρησιμοποιείται έπειτα για τον υπολογισμό της ροπής της γεννήτριας “Q<sub>g</sub>” μέσω της εξίσωσης:

$$Q_g = K \cdot \omega^2 \quad (\text{Εξ. 3.1.2.4})$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει μέσω μερικών μετατροπών, αρχικά ξεκινώντας με την εξίσωση που συνδέει την ισχύ της Α/Γ με μερικά άλλα μεγέθη, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$P = n \cdot C_p \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U^3 \cdot R^3 \quad (\text{Εξ. 3.1.2.5})$$

Όπου “n” ο βαθμός απόδοσης. Η ροπή των πτερυγίων με την σειρά της, συνδέεται με την ισχύ μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$T = \frac{P}{\omega} = n \cdot C_p \cdot \frac{\rho}{2 \cdot \omega} \cdot U^3 \cdot R^3 \quad (\text{Εξ. 3.1.2.6})$$

Ο λόγος της ταχύτητας στο άκρο του πτερυγίου, προς την ταχύτητα του ανέμου, συμβολίζεται με “λ”, ή αλλιώς ως “TSR – Tip Speed Ratio”. Όταν η Α/Γ λειτουργεί στις βέλτιστες στροφές, το “λ” λαμβάνει την βέλτιστη τιμή του, και έτσι προκύπτει:

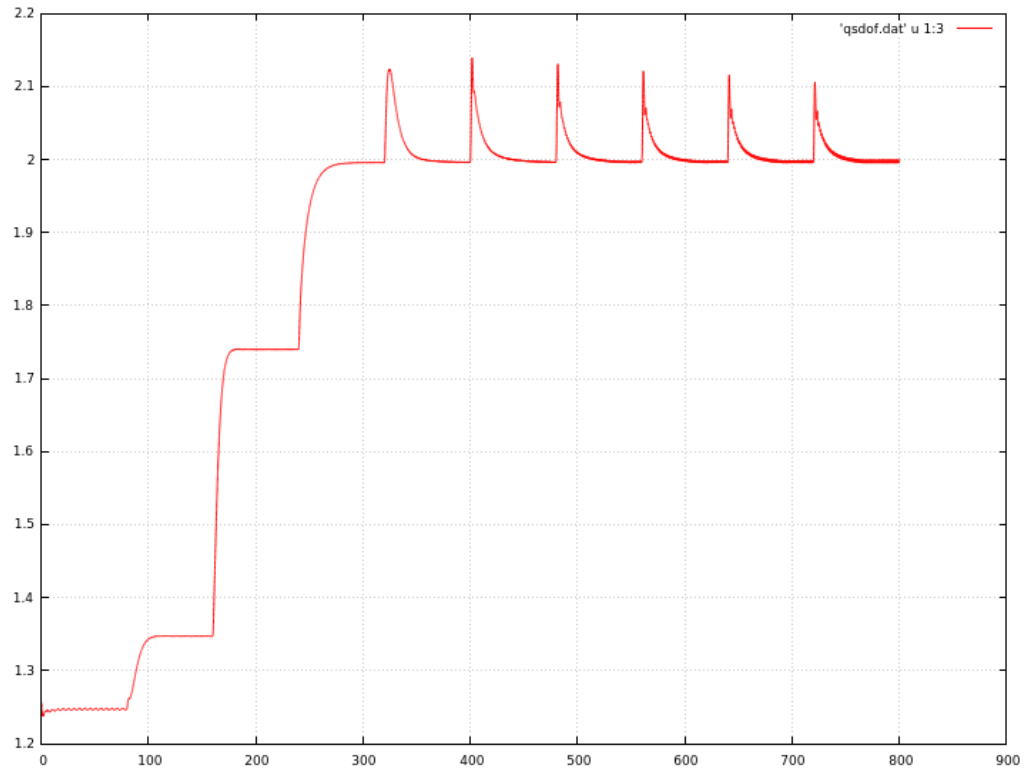
$$\lambda_{opt} = \frac{\text{blade tip speed}}{\text{wind speed}} = \frac{\omega_{opt} \cdot R}{U} \rightarrow U = \frac{\omega_{opt} \cdot R}{\lambda_{opt}} \quad (\text{Εξ. 3.1.2.7})$$

Αντικαθιστώντας την (Εξ. 3.1.2.7) στην (Εξ. 3.1.2.6), και λαμβάνοντας επίσης  $C_p = C_{p,max}$  προκύπτει η τελική μορφή της εξίσωσης:

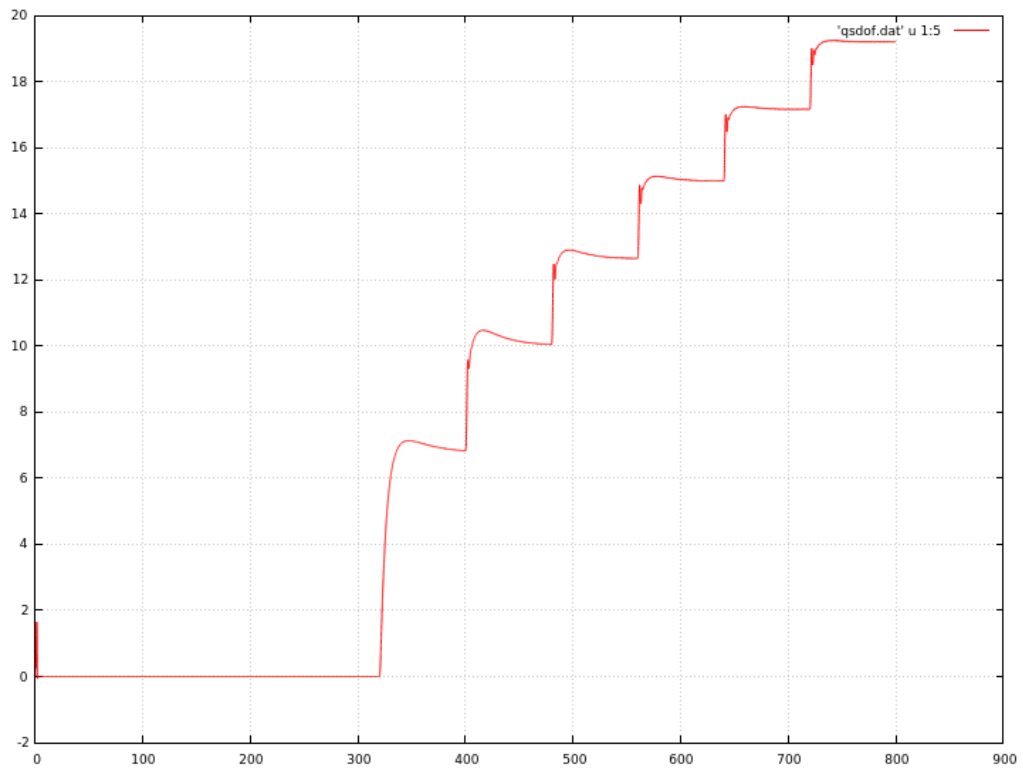
$$T = n \cdot C_{p,max} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{\omega^3 \cdot R^3}{\lambda_{opt}^3} \cdot \pi \cdot \frac{R^2}{\omega} = n \cdot C_{p,max} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{R^3 \cdot A}{\lambda_{opt}^3} = K \quad (\text{Εξ. 3.1.2.8})$$

Στην συνέχεια εισάγεται το “K” στην (Εξ. 3.1.2.4) μαζί με την κατάλληλη τιμή του “ω” και υπολογίζεται το “Q<sub>g</sub>”. Έπειτα πρέπει να υπολογιστούν οι βέλτιστες τιμές για:

- τα ολοκληρωτικά (Integral) & αναλογικά (Proportional) κέρδη για τον ελεγκτή τύπου PI για την ροπή & την κλίση των πτερυγίων. Συνεχώς κατά την λειτουργία της Α/Γ στις ονομαστικές στροφές, η ταχύτητα του αέρα αυξάνεται, με συνέπεια την αύξηση της αεροδυναμικής ροπής στα πτερύγια της Α/Γ (η ηλεκτρική παραμένει σταθερή) και την τάση της να αυξήσει την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της. Ο ελεγκτής (controller) αναγνωρίζει την αύξηση αυτή, ως σφάλμα το οποίο τροφοδοτείται στον PI ως διαφορά σε σχέση με την ονομαστική ισχύ των 2 MW, η οποία τελικά μετατρέπεται σε βήμα (pitch). Με την ρύθμιση του βήματος μειώνεται η αεροδυναμική ροπή και τελικά έρχεται σε ισορροπία με την ηλεκτρική, οπότε ρυθμίζονται οι στροφές. Για την κατάλληλη ρύθμιση των σταθερών, όπως και στη 1<sup>η</sup> προσομοίωση γίνονται διάφορες δοκιμές, χρησιμοποιώντας ως είσοδο μια βηματική συνάρτηση για τον άνεμο (λόγω των απότομων μεταβολών που έχει), και αναλύοντας τις γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν για την γωνιακή ταχύτητα, την ροπή και το βήμα. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά τα διαγράμματα για τις βέλτιστες τελικές τιμές των σταθερών που επιλέχθηκαν:



Εικόνα 3.1.2.2: Απεικόνιση της ρύθμισης της γωνιακής ταχύτητας σε συνάρτηση με το χρονικό βήμα για βηματική είσοδο



Εικόνα 3.1.2.3: Απεικόνιση της ρύθμισης του βήματος σε συνάρτηση με το χρονικό βήμα για βηματική είσοδο

- τα φίλτρα & το DTD (Drive Train Damper). Και τα 2 λειτουργούν ως φίλτρα για τις συχνότητες των ταλαντώσεων στην γωνιακή ταχύτητα την ροπή & το βήμα. Οι νέες συχνότητες μπορούν να βρεθούν μέσω της επίλυσης του προβλήματος των ιδιοσυχνοτήτων, ή στην συγκεκριμένη περίπτωση αυξάνοντας τις ήδη υπάρχουσες συχνότητες με τον λόγο των γωνιακών ταχυτήτων:

$$\lambda_{\omega} = \frac{19.0575}{9.6} = 1.985 \quad (\text{Εξ. 3.1.2.9})$$

Να σημειωθεί πως τα διαγράμματα στις (Εικόνες 3.1.2.2/3) προέκυψαν μετά την ρύθμιση των φίλτρων & του DTD. Όπως και προαναφέρθηκε παρατηρείται ιδιαίτερα στην (Εικόνα 3.1.2.3) πως προσαρμόζεται το βήμα στην απότομη αλλαγή της ταχύτητας του ανέμου. Συγκεκριμένα για την χρονική στιγμή  $t=320$  sec, όπου πρωτοεμφανίζεται το φαινόμενο, η ταχύτητα αυξάνεται ακαριαία κατά 2 m/s, και παρότι το βήμα αυξάνεται, πραγματοποιεί υπερακόντιση, ξεπερνώντας την βέλτιστη τιμή του βήματος και επιστρέφοντας μετέπειτα σταδιακά σε αυτήν. Το ίδιο επαναλαμβάνεται κάθε 80 μετέπειτα χρονικά βήματα σε όλο και μικρότερη κλίμακα. Επιλέχθηκε η χρήση βηματικής συνάρτησης εισόδου για τον έλεγχο των ρυθμίσεων του controller, καθώς αποτελεί την δυσμενέστερη περίπτωση στην οποία μπορεί να εκτεθεί κατά την λειτουργία της Α/Γ, λόγω της ακαριαίας αλλαγής της ταχύτητας ενώ η λειτουργία της έχει σταθεροποιηθεί (μηδενικό σφάλμα για σταθερή ταχύτητα ανέμου).

```

**Input for Generic controller of the DTU 10MW RWT **
2127.6      ! 1 ; Rated power, including electrical losses [kW]
1          ! 2 ; LSS(1) or HSS(2) reference [-]
1.2472     !=-11.91 rpm      ! 3 ; Minimum rotor (LSS) speed [rad/s]
1.9957     !=-19.0575 rpm   ! 4 ; Rated rotor (LSS) speed [rad/s]
2.6e6      ! 5 ; Maximum allowable generator torque [Nm]
00.        ! 6 ; Minimum pitch angle, PitchMin [deg], if |PitchMin|>90, then a table of <wsp,PitchMin> is read from a file named wptable.n,
90.        #82.00          ! 7 ; Maximum pitch angle [deg]
10.        ! 8 ; Maximum pitch velocity operation [deg/s]
**Partial load control parameters
180877.19  ! 9 ; Optimal Cp tracking K factor [Nm/(rad/s)^2], Qg=K*Omega^2, K=eta*0.5*rho*A*Cp_opt*R^3/lambda_opt^3
1.00056e7  ! 10 ; Proportional gain of torque controller [Nm/(rad/s)]
1.24597e6  ! 11 ; Integral gain of torque controller [Nm/rad]
0.         ! 12 ; Differential gain of torque controller [Nm/(rad/s^2)]
**Full load control parameters
1         ! 13 ; Generator control switch [1=constant power, 2=constant torque]
0.254485  !/ 3 ! 14 ; Proportional gain of pitch controller [rad/(rad/s)]
0.081233  !/10 ! 15 ; Integral gain of pitch controller [rad/rad]
0.        ! 16 ; Differential gain of pitch controller [rad/(rad/s^2)]
0.4e-8    ! 17 ; Proportional power error gain [rad/W]
0.4e-8    ! 18 ; Integral power error gain [rad/(Ws)]
198.32888 ! 19 ; Coefficient of linear term in aerodynamic gain scheduling, KK1 [deg]
693.22213 ! 20 ; Coefficient of quadratic term in aerodynamic gain scheduling, KK2 [deg^2], (if zero, KK1=pitch angle at double gain)
1.2       ! 21 ; Coefficient of nonlinear gain scheduling [-]
**Filters
3.176 10P ! 22 ; lowpass2 freq of speed & power error used in pitch PID [Hz]
0.7    ! 23 ; lowpass2 damp of speed & power error used in pitch PID [-]
6.61 free2 ! 28 ; notch2 freq1 of speed error used in pitch PID [Hz]
0.2    ! 29 ; notch2 damp1 of speed error used in pitch PID [-]
0.95287 3P ! 24 ; notch2 freq2 of speed error used in pitch PID [Hz]
0.2    ! 25 ; notch2 damp2 of speed error used in pitch PID [-]
3.6725 free1 ! 26 ; notch2 freq3 of speed error used in pitch PID [Hz]
0.2    ! 27 ; notch2 damp3 of speed error used in pitch PID [-]
2.5 2.5P ! 30 ; lowpass1 time lag of omega used in GS_NL, Qmax=P/w_LP1 [s]
6.25 1P ! 31 ; lowpass1 time lag of pitch used in GS, (derate) [s]
6.25 1P ! 32 ; lowpass1 time lag of power used in GS_IPC, (min pitch) [s]
2.5 2.5P ! 33 ; lowpass1 time lag of torque used in Torque limits [s]
**Drive Train Damper
1.0e7 ! 34 ; DTD1_gain [Nm/(rad/s^2)] 400*113.2^2=5125696.
3.613 ! 35 ; DTD1_freq 1st collective edge [Hz]
0.2 ! 36 ; DTD1_damp [-]
2.0e7 ! 37 ; DTD2_gain [Nm/(rad/s^2)]
6.65 ! 38 ; DTD2_freq 2nd collective edge [Hz]
0.2 ! 39 ; DTD2_damp [-]
1. 0e8 ! 40 ; DTD maximum Torque limit LSS [Nm] ~138kWatt
    
```

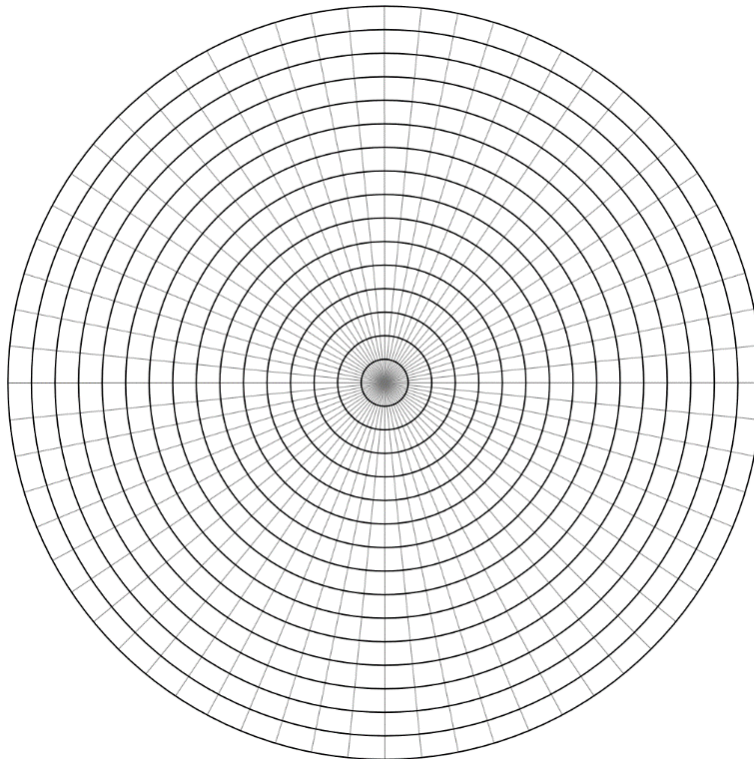
Εικόνα 3.1.2.4: Τμηματική απεικόνιση της ρύθμισης του αρχείου εισόδου για τις ρυθμίσεις του controller

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο της εργασίας, αναλύεται η διαδικασία κατασκευής των χρονοσειρών του ανέμου που χρησιμοποιούνται με την σειρά τους για την υλοποίηση της 2<sup>ης</sup> σειράς προσομοιώσεων για την δυναμική απόκριση των Α/Γ. Σκοπός αυτών είναι η παραγωγή & οπτικοποίηση των διαγραμμάτων ελαστικών φορτίων για τα πτερύγια και τον πύργο και η σύγκρισή τους με τις προδιαγραφές που ορίζει ο κανονισμός IEC – 61400, ώστε να εξακριβωθεί η κατάσταση της Α/Γ στο τέλος του προδιαγραφόμενου χρόνου ζωής της. Το επεξεργασμένο μοντέλο της Α/Γ από το Κεφ. 3 εισάγονται μαζί με τις χρονοσειρές του ανέμου στο υπολογιστικό λογισμικό hGAST που έχει αναπτυχθεί από το εργαστήριο αεροδυναμικής, το οποίο με την σειρά του παράγει τα ζητούμενα διαγράμματα τα οποία οπτικοποιούνται με την βοήθεια του GNU PLOT. Στην συνέχεια πραγματοποιείται η σύγκριση, σχολιάζονται τα αποτελέσματα και εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα.

### 4.1. Κατασκευή χρονοσειρών ανέμου

Για την κατασκευή των χρονοσειρών του ανέμου, υλοποιείται αρχικά ένα πολικό πλέγμα, το οποίο δρα ως ένας επεκταμένος δίσκος της Α/Γ, το οποίο διακριτοποιείται σε 16 ακτινικά σημεία, και 64 περιφερειακά σημεία. Για ακτίνα Α/Γ 40m επιλέχθηκε μήκος διαστήματος 3.5m, ώστε το πλέγμα να έχει ακτίνα 52.5m, και να υπερκαλύπτει τις ανάγκες του δίσκου.



Εικόνα 4.1.1: Ενδεικτική απεικόνιση ενός πολικού πλέγματος με 16 ακτινικά & 64 περιμετρικά σημεία

Η χρονοσειρά συνολικά αποτελείται από 8192 βήματα, ενώ η συνολική διάρκεια της προσομοίωσης πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 λεπτά = 600 sec. Επιλέγοντας διάρκεια προσομοίωσης 11 λεπτά = 660 sec, το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ 2 βημάτων είναι:

$$\Delta t = \frac{660}{8192} = 0.080566 \text{ sec} \quad (\text{Εξ. 4.1.1})$$

Ο κώδικας τελικά λαμβάνει ως είσοδο την συχνότητα  $f_{\max}$ :

$$f = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} = 6.25 \text{ Hz} \quad (\text{Εξ. 4.1.2})$$

Για τους υπολογισμούς της φόρτισης που δέχεται η Α/Γ, ο κώδικας χρησιμοποιεί το μοντέλο φάσματος Kaimal και εκθετικό μοντέλο χωρικής συσχέτισης (Kaimal spectral and exponential coherence model – 1972), για το οποίο οι διακυμάνσεις της τυρβώδους ταχύτητας λαμβάνονται ως ένα στάσιμο (σε σταθερά σημεία του χώρου), τυχαίο διανυσματικό πεδίο, οι συνιστώσες του οποίου έχουν μηδενικό μέσο όρο και ακολουθούν κατανομή Gauss. Συγκεκριμένα, η παρακάτω εξίσωση εκφράζει τις φασματικές πυκνότητες ισχύος των συνιστωσών στην αδιανυσματική τους μορφή:

$$\frac{f \cdot S_k(f)}{\sigma_k^2} = \frac{\frac{4 \cdot f \cdot L_k}{V_{hub}}}{\left(1 + \frac{6 \cdot f \cdot L_k}{V_{hub}}\right)^{\frac{5}{3}}} \quad (\text{Εξ. 4.1.3})$$

Όπου:

- $f$  είναι η συχνότητα σε Hertz
- $k$  είναι ο δείκτης που αναφέρεται στην κατεύθυνση της συνιστώσας ταχύτητας (δηλ. 1 = διαμήκης, 2 = πλευρική, και 3 = προς τα πάνω)
- $S_k$  είναι το φάσμα της μονόπλευρης συνιστώσας ταχύτητας
- $\sigma_k$  είναι η τυπική απόκλιση της συνιστώσας ταχύτητας (όπως σχολιάστηκε αναλυτικά στο Κεφ. 2)
- $L_k$  είναι η παράμετρος ολοκλήρωσης κλίμακας, για την συνιστώσα της ταχύτητας
- $V_{hub}$  η μέση τιμή 10λέπτου για την ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πλήμνης

Λαμβάνοντας το:

$$\sigma_k^2 = \int_0^{\infty} S_k(f) df \quad (\text{Εξ. 4.1.4})$$

Οι φασματικές παράμετροι για την τύρβη δίνονται από τον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 4.1.1: Φασματικές παράμετροι τύρβης για το μοντέλο τύρβης *Kaimal*

|                                       | Δείκτης συνιστώσας ταχύτητας ( $\kappa$ ) |                       |                        |
|---------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------|------------------------|
|                                       | 1                                         | 2                     | 3                      |
| Τυπική απόκλιση $\sigma_\kappa$ (m/s) | $\sigma_1$                                | $0.8 \cdot \sigma_1$  | $0.5 \cdot \sigma_1$   |
| Παράμετρος ολοκλήρωσης $L_\kappa$ (m) | $8.1 \cdot \Lambda_1$                     | $2.7 \cdot \Lambda_1$ | $0.66 \cdot \Lambda_1$ |

Οι δείκτες 1, 2, 3 στον (Πιν. 4.1) δείχνουν την κατεύθυνση της τυρβώδους ταχύτητας, συγκεκριμένα:

- 1 – διαμήκης: κατά μήκος της κατεύθυνσης της μέσης ταχύτητας του ανέμου
- 2 – πλευρική: οριζόντια και κάθετη στη διαμήκη διεύθυνση
- 3 – κάθετη: κάθετα τόσο στη διαμήκη όσο και στην πλάγια διεύθυνση, δηλαδή κεκλιμένα από την κατακόρυφο κατά τη γωνία κλίσης της μέσης ροή

Για να επιλεγθούν οι τιμές των σταθερών πρέπει πρώτα να κατηγοριοποιηθεί η Α/Γ που αναλύεται σε μια τυποποιημένη κλάση, βάση και της οποίας πραγματοποιείται η μελέτη πάνω της όπως ορίζει ο κανονισμός IEC 61400. Οι κλάσεις καθορίζονται γενικά από την ταχύτητα του ανέμου που επικρατεί στο πάρκο και τις παραμέτρους της τύρβης σε αυτό, στοχεύουν στο να καλύπτουν πληθώρα σεναρίων, και όσο μεγαλύτερη η κλάση τόσο μεγαλύτερη η φόρτιση. Οι κλάσεις επιλέγονται από τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.1.2: Παράμετροι κατηγοριοποίησης Α/Γ σε κλάσεις κατά IEC 61400

| Wind Turbine Class | I    | II   | III  |
|--------------------|------|------|------|
| $V_{ref}$ (m/s)    | 50   | 42.5 | 37.5 |
| $V_{hub}$ (m/s)    | 10   | 8.5  | 7.5  |
| $A - I_{ref}$      | 0.16 |      |      |
| $B - I_{ref}$      | 0.14 |      |      |
| $C - I_{ref}$      | 0.12 |      |      |

Οι τιμές των ταχυτήτων λαμβάνονται για χρονοσειρές 10λέπτου, ενώ η τιμή του  $I_{ref}$ , δηλαδή του σταθμισμένου μέτρου της έντασης τύρβης (όπως αναλύθηκε στο Κεφ. 2) είναι η αναμενόμενη τιμή για ταχύτητα ανέμου 15 m/s. Όπως φαίνεται στην (Εικ. 2.1.4.5) η μέση ταχύτητα για τα ύψη πλήμνης των Α/Γ που εξετάζονται προκύπτει μέσω γραμμικής παρεμβολής και είναι  $\approx 7.5$  m/s, η οποία αντιστοιχεί ταυτίζεται με την ταχύτητα της κλάσης III, ενώ για την τύρβη επιλέγεται η πιο δυσμενής περίπτωση, δηλαδή η Α. Τελικά η κλάση που επιλέγεται είναι η "IIIΑ". Στην συνέχεια επιλέγεται ένα μοντέλο τύρβης, βάση του οποίου θα εξεταστούν οι προδιαγραφές στο πάρκο, και με γνώμονα τις ταχύτητες που επικρατούν σε αυτό, επιλέγεται το κανονικό μοντέλο τύρβης, γνωστό και ως NTM (Normal Turbulence Model). Στο μοντέλο αυτό η αντιπροσωπευτική

τιμή για την τυπική απόκλιση της τύρβης μέσω της κλάσης της A/Γ, δίνεται από την εξίσωση:

$$\sigma_1 = I_{ref} \cdot (0.75 \cdot V_{hub} + b), \quad b = 5.6 \frac{m}{s} \quad (Εξ. 4.1.5)$$

Ενώ η παράμετρος  $L_1$  ισούται με 42 και προκύπτει από:

$$L_1 = \begin{cases} 0.7 \cdot z, & z \leq 60m \\ 42, & z \geq 60m \end{cases} \quad (Εξ. 4.1.6)$$

Τελικά αντικαθιστώντας τις τιμές στις φασματικές παραμέτρους τύρβης, ο (Πιν. 4.1) μετατρέπεται σε:

Πίνακας 4.1.3: Τελικές τιμές φασματικών παραμέτρων τύρβης, για το μοντέλο τύρβης *Kaimal*

|                                                    | Δείκτης συνιστώσας ταχύτητας ( $\kappa$ ) |       |       |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------|-------|
|                                                    | 1                                         | 2     | 3     |
| <b>Τυπική απόκλιση <math>\sigma_k</math> (m/s)</b> | 1.88                                      | 1.73  | 1.91  |
| <b>Παράμετρος ολοκλήρωσης <math>L_k</math> (m)</b> | 340.2                                     | 113.4 | 27.72 |

Οι τιμές του (Πιν. 4.2) εισάγονται τελικά στον κώδικα, μαζί με τις τιμές της  $U_{ref}$  για κάθε κατεύθυνση & A/Γ, και τελικά παράγονται οι χρονοσειρές του ανέμου. Για κάθε κατεύθυνση πραγματοποιούνται 3 διαφορετικές δοκιμές (seeds/realizations) για την καλύτερη ανάλυση των αποτελεσμάτων. Οι παράμετροι εισόδου τελικά προκύπτουν στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 4.1.4: Τιμές φασματικών παραμέτρων τύρβης για την A/Γ 8 – βορειοανατολικά

| Highest – NNE                     | Longitudinal | Transversal | Vertical |
|-----------------------------------|--------------|-------------|----------|
| <b><math>V_{hub}</math> (m/s)</b> | 8.41         |             |          |
| <b><math>\sigma</math> (m/s)</b>  | 1.210        | 0.968       | 0.605    |
| <b><math>L_k</math> (m)</b>       | 340.2        | 113.4       | 27.72    |

Πίνακας 4.1.5: Τιμές φασματικών παραμέτρων τύρβης για την A/Γ 8 – βόρεια

| Highest – N                       | Longitudinal | Transversal | Vertical |
|-----------------------------------|--------------|-------------|----------|
| <b><math>V_{hub}</math> (m/s)</b> | 6.92         |             |          |
| <b><math>\sigma</math> (m/s)</b>  | 1.183        | 0.947       | 0.592    |
| <b><math>L_k</math> (m)</b>       | 340.2        | 113.4       | 27.72    |

Πίνακας 4.1.6: Τιμές φασματικών παραμέτρων τύρβης για την A/Γ 8 – βορειοδυτικά

| Highest – NNW                     | Longitudinal | Transversal | Vertical |
|-----------------------------------|--------------|-------------|----------|
| <b><math>V_{hub}</math> (m/s)</b> | 8.18         |             |          |
| <b><math>\sigma</math> (m/s)</b>  | 1.233        | 0.987       | 0.617    |
| <b><math>L_k</math> (m)</b>       | 340.2        | 113.4       | 27.72    |



Πίνακας 4.1.7: Τιμές φασματικών παραμέτρων τύρβης για την Α/Γ 10 – βορειοανατολικά

| Lowest – NNE    | Longitudinal | Transversal | Vertical |
|-----------------|--------------|-------------|----------|
| $V_{hub}$ (m/s) | 8.41         |             |          |
| $\sigma$ (m/s)  | 1.112        | 0.889       | 0.556    |
| $L_k$ (m)       | 340.2        | 113.4       | 27.72    |

Πίνακας 4.1.8: Τιμές φασματικών παραμέτρων τύρβης για την Α/Γ 10 – βόρεια

| Lowest – N      | Longitudinal | Transversal | Vertical |
|-----------------|--------------|-------------|----------|
| $V_{hub}$ (m/s) | 6.92         |             |          |
| $\sigma$ (m/s)  | 0.937        | 0.750       | 0.469    |
| $L_k$ (m)       | 340.2        | 113.4       | 27.72    |

Πίνακας 4.1.9: Τιμές φασματικών παραμέτρων τύρβης για την Α/Γ 10 – βορειοδυτικά

| Lowest – NNW    | Longitudinal | Transversal | Vertical |
|-----------------|--------------|-------------|----------|
| $V_{hub}$ (m/s) | 8.18         |             |          |
| $\sigma$ (m/s)  | 1.007        | 0.806       | 0.504    |
| $L_k$ (m)       | 340.2        | 113.4       | 27.72    |

Πίνακας 4.1.10: Τιμές φασματικών παραμέτρων τύρβης για την Α/Γ του IEC – βορειοανατολικά

| Reference – NNE | Longitudinal | Transversal | Vertical |
|-----------------|--------------|-------------|----------|
| $V_{hub}$ (m/s) | 8.41         |             |          |
| $\sigma$ (m/s)  | 1.905        | 1.524       | 0.953    |
| $L_k$ (m)       | 340.2        | 113.4       | 27.72    |

Πίνακας 4.1.11: Τιμές φασματικών παραμέτρων τύρβης για την Α/Γ του IEC – βόρεια

| Reference – N   | Longitudinal | Transversal | Vertical |
|-----------------|--------------|-------------|----------|
| $V_{hub}$ (m/s) | 6.92         |             |          |
| $\sigma$ (m/s)  | 1.726        | 1.381       | 0.863    |
| $L_k$ (m)       | 340.2        | 113.4       | 27.72    |

Πίνακας 4.1.12: Τιμές φασματικών παραμέτρων τύρβης για την Α/Γ του IEC – βορειοδυτικά

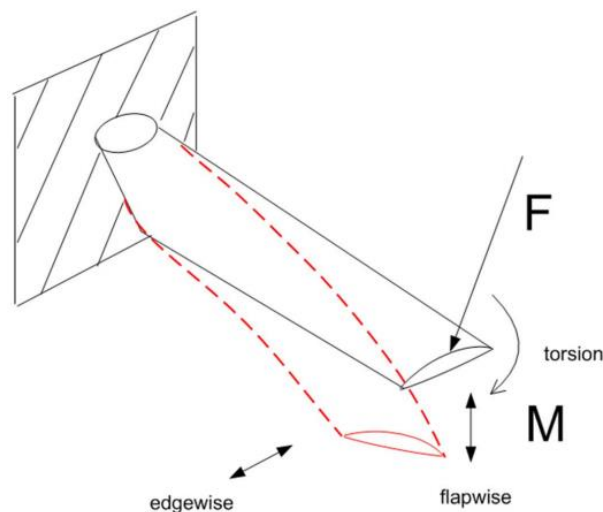
| Reference – NNW | Longitudinal | Transversal | Vertical |
|-----------------|--------------|-------------|----------|
| $V_{hub}$ (m/s) | 8.18         |             |          |
| $\sigma$ (m/s)  | 1.878        | 1.502       | 0.939    |
| $L_k$ (m)       | 340.2        | 113.4       | 27.72    |

## 4.2. Προσομοίωση απόκρισης

Το αποτέλεσμα μετά την εκτέλεση του κώδικα, είναι οι 27 συνολικά χρονοσειρές, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως είσοδος στο hGAST, για την προσομοίωση της δυναμικής απόκρισης και τον υπολογισμό των αεροελαστικών φορτίων στα πτερύγια και τον πύργο της Α/Γ. Επιπλέον εισάγονται τα δομικά χαρακτηριστικά της Α/Γ από το προηγούμενο κεφάλαιο, οι γεωμετρίες των αεροτομών, οι ρυθμίσεις του ελεγκτή, οι χρονικές παράμετροι της προσομοίωσης, καθώς και τα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου ανέμου σε κάθε περίπτωση (κλίση ανέμου επιλέγεται 0°). Η διάρκεια των προσομοιώσεων είναι 3 – 5 ώρες σε κάθε περίπτωση, στις οποίες χρησιμοποιείται η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων. Τα αρχεία εξόδου που τελικά προκύπτουν περιέχουν τα παρακάτω μεγέθη για κάθε ένα από τα διακριτοποιημένα τμήματα του γεωμετρικού μοντέλου της Α/Γ, ο αριθμός των οποίων καθορίστηκε κατά την διαδικασία μείωσης της κλίμακας στο προηγούμενο κεφάλαιο (15 για τα πτερύγια, 11 για τον πύργο, 4 για την πλήμνη τα οποία δεν αξιοποιούνται):

- Χρονικό βήμα υπολογισμού ( $dt = 0.05 \text{ sec}$ )
- Καμπτικά φορτία κατά μήκος της ρίζας του πτερυγίου (edgewise για τα πτερύγια, fore alt για τον πύργο)
- Στρεπτικά φορτία κατά μήκος της ακτίνας του πτερυγίου (radial για τα πτερύγια, vertical για τον πύργο)
- Καμπτικά φορτία κατά μήκος της διεύθυνσης του πτερυγίου (flapwise για τα πτερύγια, side to side για τον πύργο)
- Στρεπτική ροπή (pitching για τα πτερύγια, twisting για τον πύργο)
- Edgewise καμπτική ροπή περιστροφής πτερυγίου (fore alt για τον πύργο)
- Flapwise καμπτική ροπή πτερυγίωσης πτερυγίου (side to side για τον πύργο)

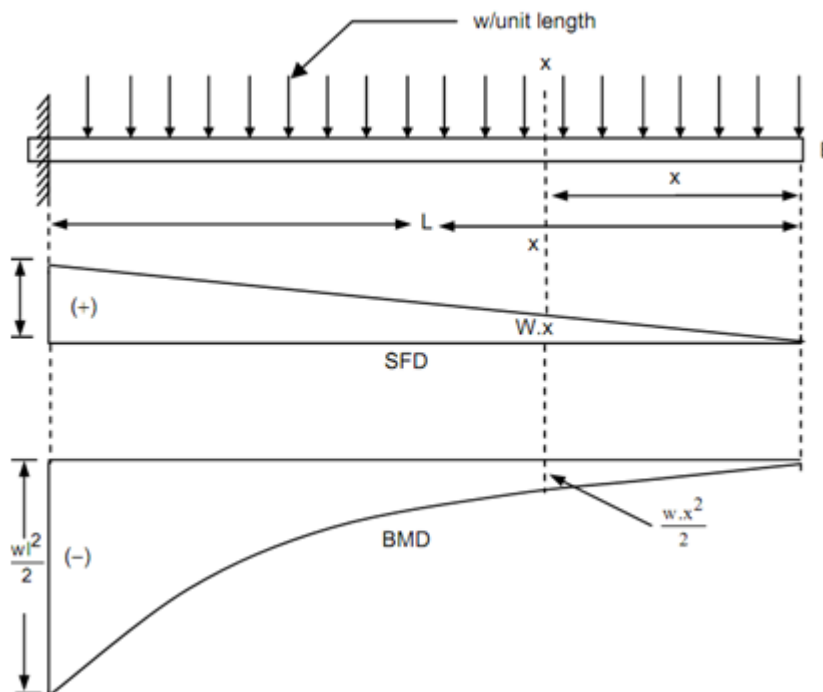
Οι ροπές που μόλις αναφέρθηκαν, απεικονίζονται πάνω στο πτερύγιο της Α/Γ στην (Εικ. 4.2.1):



Εικόνα 4.2.1: Καμπτικές & στρεπτικές ροπές σε πακτωμένο πτερύγιο Α/Γ υπό την επίδραση κάθετης σε αυτό δύναμης “F”

Επιπλέον διατίθενται και οι παραμορφώσεις πτερυγίων /πλήμνης/πύργου, καθώς και άλλα μεγέθη όπως  $C_p$ ,  $C_T$ , TSR,  $\omega$ , κ.α. Για την εξαγωγή των συμπερασμάτων, θα χρησιμοποιηθούν και οι 3 ροπές στην βάση των 3 πτερυγίων και του πύργου, καθώς εκεί παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές τους. Οι κύριες συνιστώσες των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα πτερύγια είναι οι ορθές τάσεις που προκύπτουν από τα καμπτικά φορτία και συνεπώς τις καμπτικές ροπές, καθιστώντας τες έτσι μεγαλύτερης σημασίας από τις στρεπτικές ροπές στην μελέτη, παρόλαυτα λαμβάνονται υπόψιν στους υπολογισμούς και οι 3. Όπως φαίνεται αναλυτικά στην (Εικ. 4.2.6), όπου απεικονίζεται για την 8<sup>η</sup> Α/Γ και για βόρεια κατεύθυνση η καμπτική ροπή flapwise σε διάφορα σημεία του πτερυγίου, από την βάση έως και την άκρη του, εμφανίζει την μέγιστη τιμή στην βάση και ξεκινά να μειώνεται αναλογικά αυτής για κάθε σημείο, έως ότου και «μηδενίζεται» στην άκρη του πτερυγίου. Το ίδιο παρατηρείται και στο διάγραμμα της καμπτικής ροπής edgewise (Εικ. 4.2.13). Παρομοιάζοντας το πτερύγιο της Α/Γ το οποίο βρίσκεται πακτωμένο στην πλήμνη, με μια δοκό μήκους “L” πακτωμένη από την μια άκρη σε έναν τοίχο, στην οποία εφαρμόζεται ένα ομοιόμορφα καταναμημένο φορτίο “q”, η ροπή στην πάκτωση/βάση δίνεται από την (Εξ. 4.2.1) και περιγράφεται οπτικά, από το 3<sup>ο</sup> σχήμα της (Εικ. 4.2.2):

$$M_{\text{πακτωση}} = -\frac{qL^2}{2} \quad (\text{Εξ. 4.2.1})$$

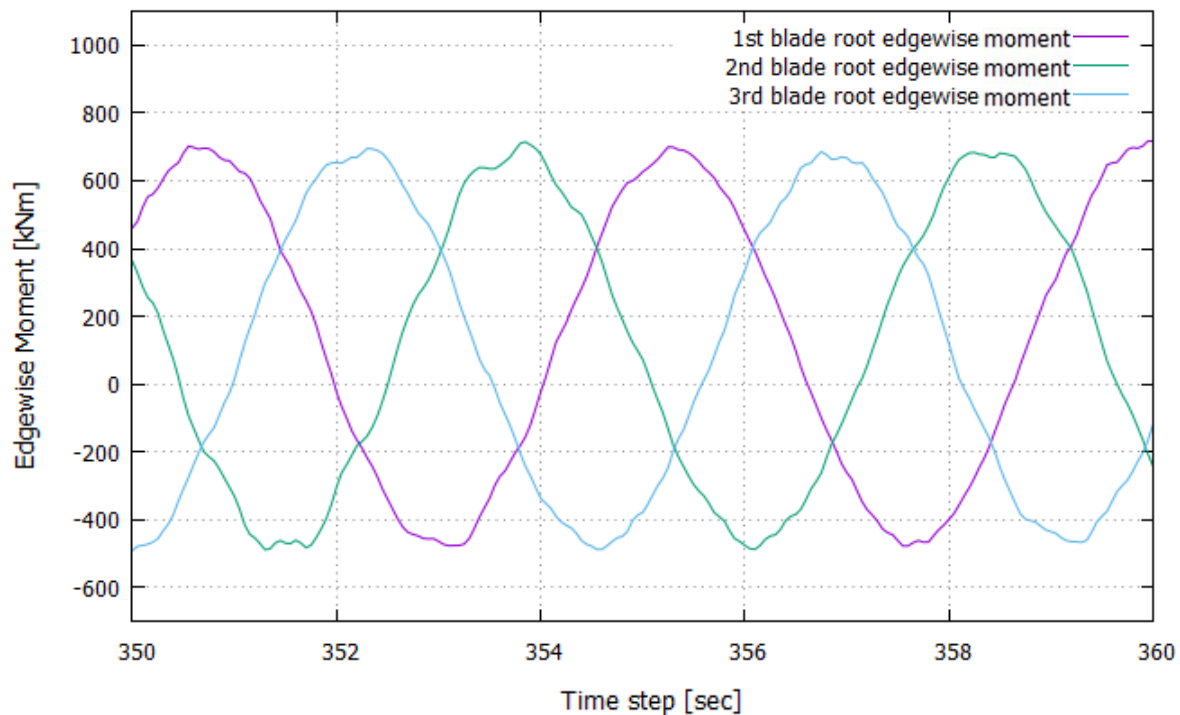


Εικόνα 4.2.2: Καμπτική ροπή & δύναμη αντίδρασης σε πακτωμένη δοκό υπό την επίδραση ομοιόμορφα καταναμημένου φορτίου

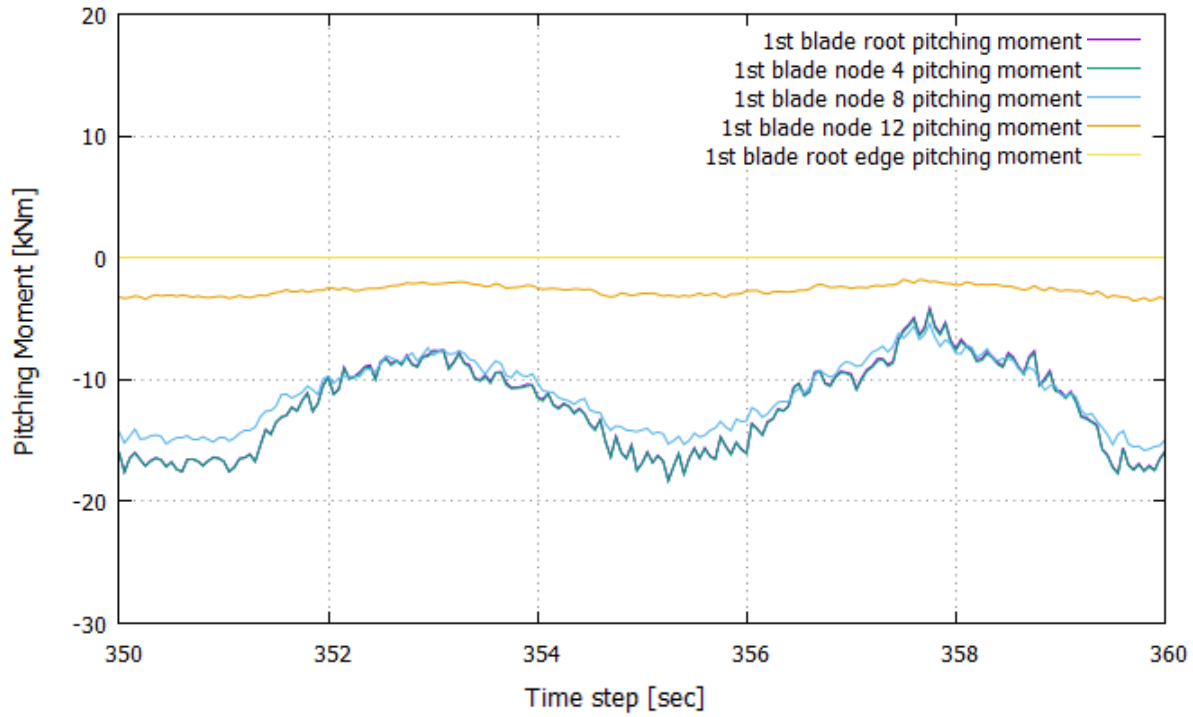
Παρομοίως στην (Εικ. 4.2.7), όπου για την ίδια Α/Γ & κατεύθυνση απεικονίζεται πλευρική ροπή πύργου δεν παρατηρείται η ίδια ανάλογη σχέση μεταξύ των μέτρων της ροπής, αλλά πάλι η μέγιστη τιμή της εμφανίζεται στο 1<sup>ο</sup> node, στην βάση του πύργου, ενώ στην κορυφή του, μηδενίζεται. Με την απεικόνιση των φορτίων και της αντίστοιχης ροπής στην βάση για ένα πτερύγιο, φαίνεται και γραφικά η συσχέτιση που παρουσιάζουν τα μεγέθη, βάση της (Εξ. 4.2.1).

Αναλύοντας τις στρεπτικές ροπές σε διάφορα τμήματα του πτερυγίου (Εικ. 4.2.4) και τις στρεπτικές του πύργου (Εικ. 4.2.5), το πτερύγιο εμφανίζει μικρές σχετικά μεταβολές στο μέτρο της ροπής, φαινόμενο το οποίο οφείλεται στο γεγονός του ότι ο ελεγκτής δεν χρειάζεται να μεταβάλλει αισθητά το μέτρο του βήματος του πτερυγίου, λόγω της χαμηλής σχετικά έντασης τύρβης και του μικρού “bin” των ταχυτήτων του ανέμου οι οποίες προσομοιώνονται ( $\approx 6-10$  m/s είσοδος).

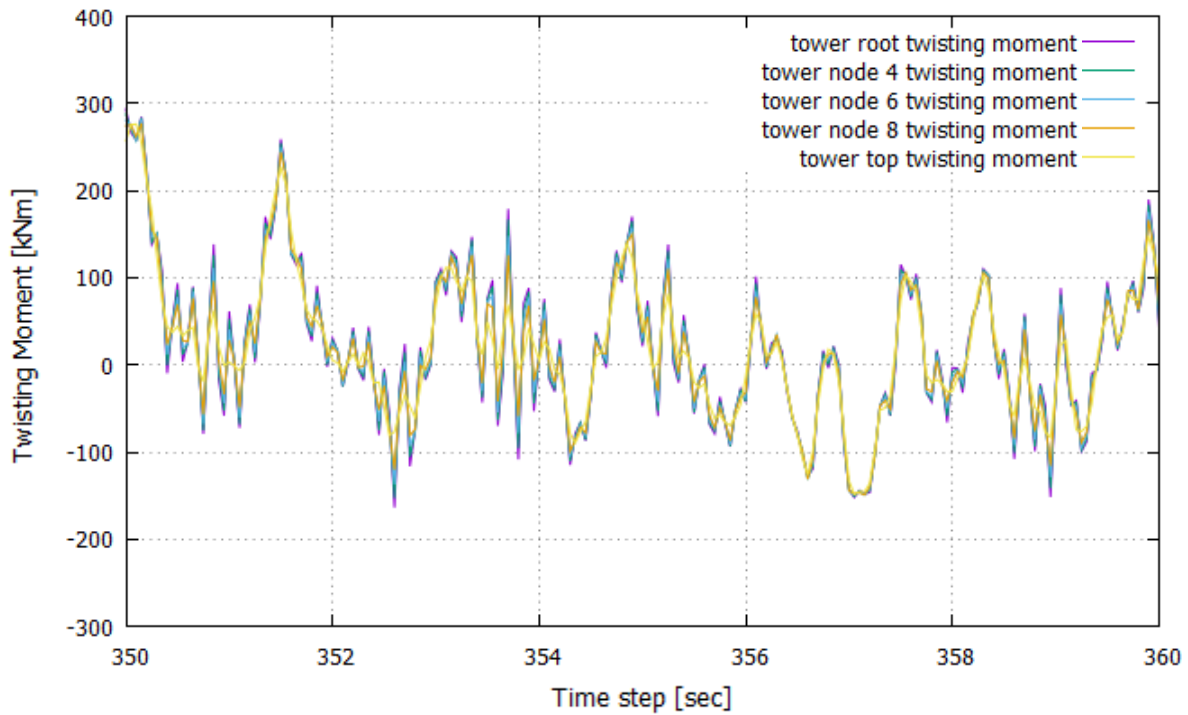
Η καμπτική ροπή περιστροφής πτερυγίου τελικά, οφείλεται πρωτίστως στο βάρος των πτερυγίων και παρουσιάζει ταλάντωση γύρω από το 0, βάση της θέσης που βρίσκεται το πτερύγιο στην περιστροφή. Οι καμπύλες των 3 πτερυγίων παρουσιάζουν διαφορές φάσεις 120° μεταξύ τους και έχουν την ίδια περίοδο. Όταν η ροπή ενός πτερυγίου φτάνει την μέγιστη τιμή, το πτερύγιο είναι κατακόρυφο στο πάνω σημείο, ενώ τα άλλα 2 πτερύγια βρίσκονται συμμετρικά ως προς την κάθετό του, αριστερά και δεξιά του, και εμφανίζουν την ίδια ροπή (με μικρές διαφορές στα διαγράμματα λόγω των εξωτερικών δυνάμεων από τον άνεμο) (Εικ. 4.2.3/13/14).



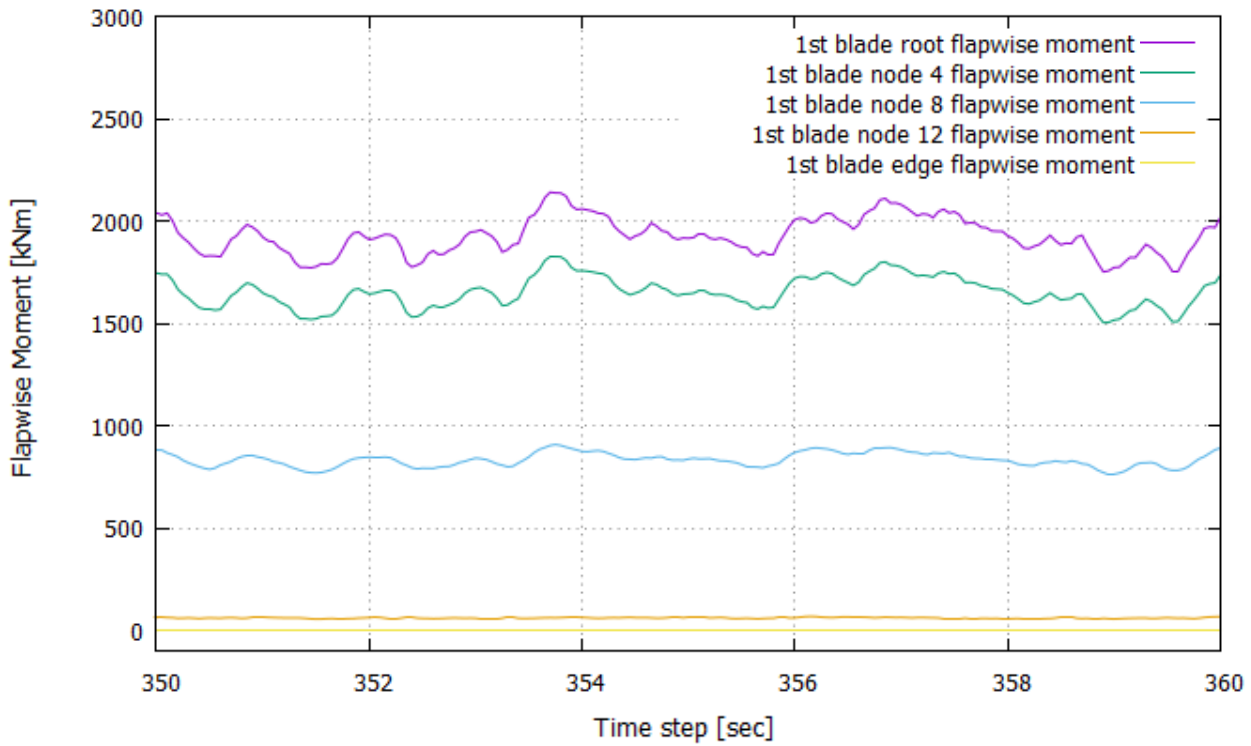
Εικόνα 4.2.3: Καμπτική ροπή περιστροφής πτερυγίου στην βάση των 3 πτερυγίων της 8<sup>ης</sup> Α/Γ στο χρονικό διάστημα 350 – 360 sec για βορειοανατολικό άνεμο



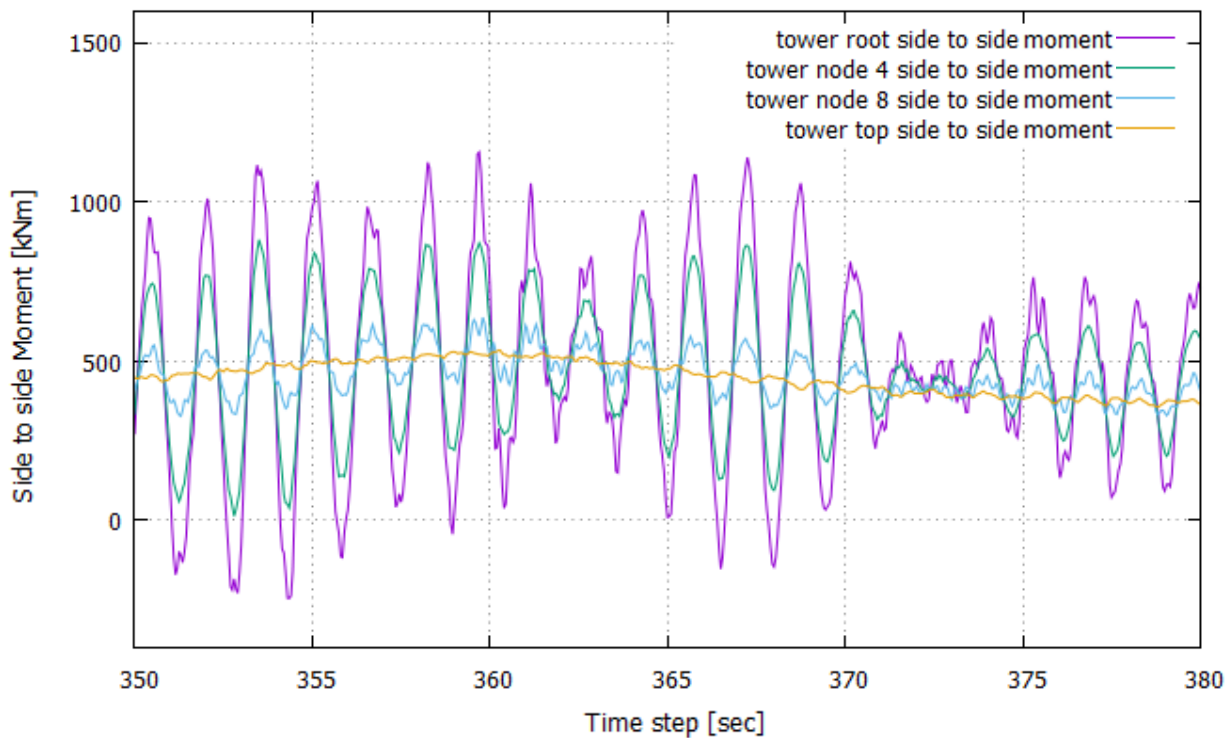
Εικόνα 4.2.4: Στρεπτική ροπή σε διάφορα σημεία του 1<sup>ου</sup> φτερού της 8<sup>ης</sup> Α/Γ στο χρονικό διάστημα 350 – 360 sec για βορειοανατολικό άνεμο



Εικόνα 4.2.5: Στρεπτική ροπή σε διάφορα σημεία του πύργου της 8<sup>ης</sup> Α/Γ στο χρονικό διάστημα 350 – 360 sec για βορειοανατολικό άνεμο



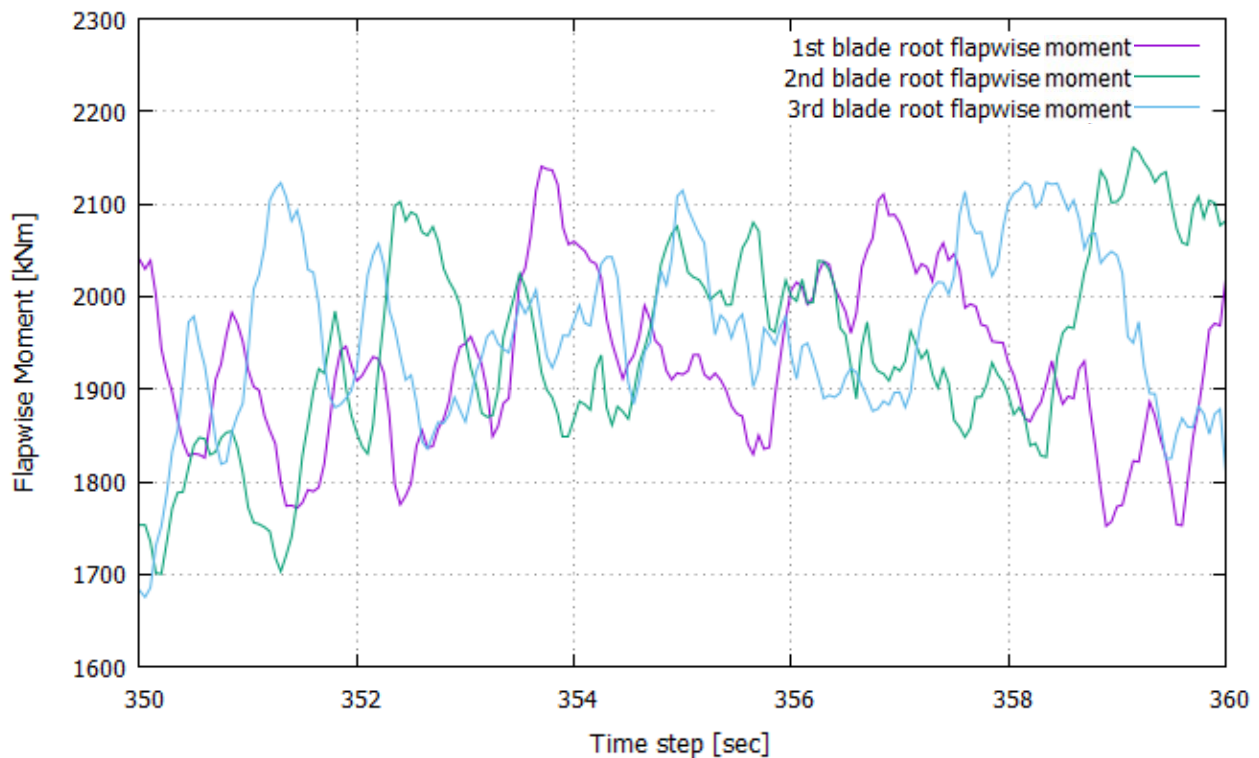
Εικόνα 4.2.6: Καμπτική ροπή πτερύγισης πτερυγίου σε διάφορα σημεία του 1<sup>ου</sup> φτερού της 8<sup>ης</sup> Α/Γ στο χρονικό διάστημα 350 – 360 sec για βόρειο άνεμο



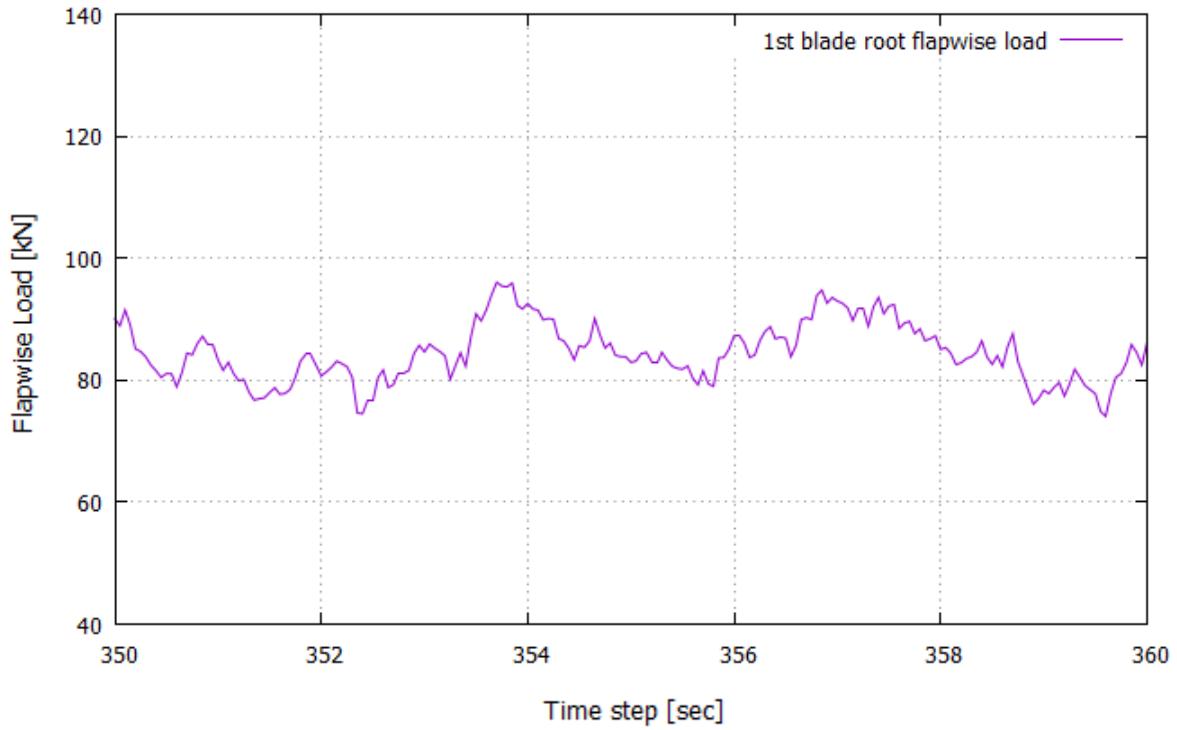
Εικόνα 4.2.7: Πλευρική ροπή πύργου σε διάφορα σημεία του πύργου της 8<sup>ης</sup> Α/Γ στο χρονικό διάστημα 350 – 380 sec για βόρειο άνεμο

Από την κατασκευή του διαγράμματος των καμπτικών ροπών πτερύγισης των πτερυγίων και για τα 3 πτερύγια της 8<sup>ης</sup> Α/Γ σε διάφορες κλίμακες, παρατηρούνται τα εξής:

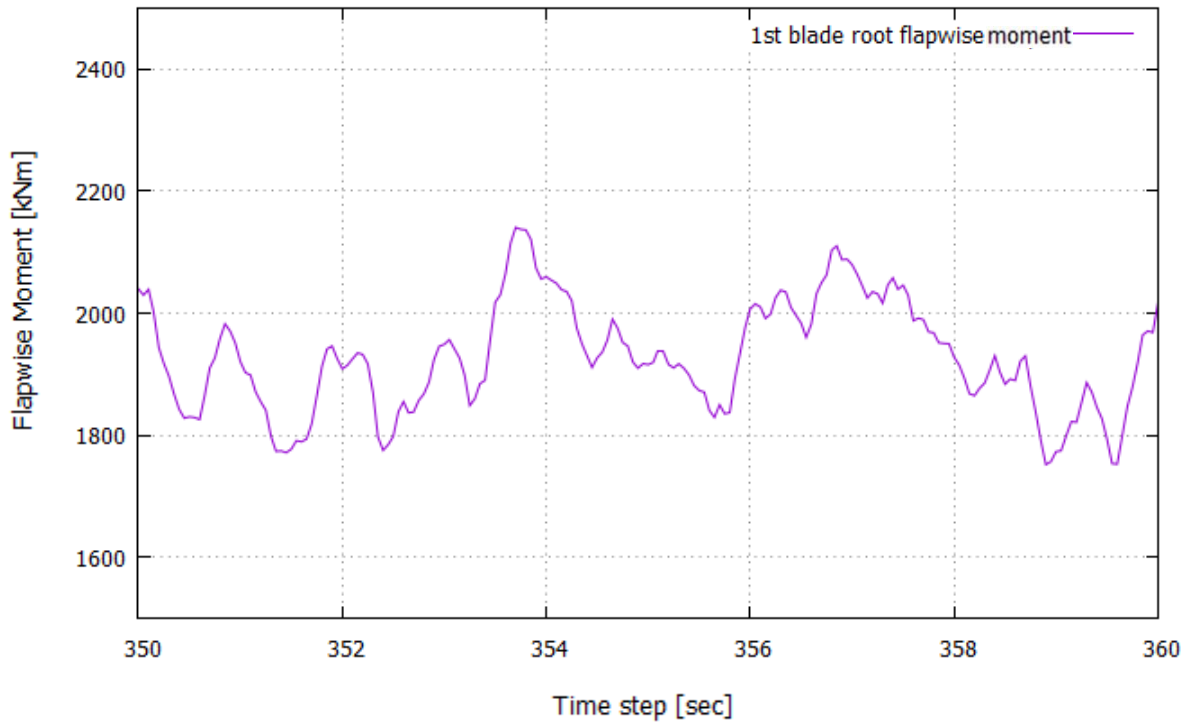
- (Εικ. 4.2.11) οι τιμές των καμπτικών ροπών πτερύγισης κινούνται μέσα στο ίδιο διάστημα του πεδίου τιμών, κοινώς δεν διαφέρουν πολύ, αποτέλεσμα αναμενόμενο καθώς οι συνθήκες ανέμου με τις οποίες έρχονται σε επαφή διαφέρουν ελάχιστα, λόγω της υψομετρικής διαφοράς και της ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων (το ένα έρχεται μονίμως στην θέση του άλλου και ακολούθως).
- Σε περίπτωση που αντί για τυρβώδη ροή ανέμου εξεταζόταν ροή σταθερής και ομοιόμορφης ταχύτητας (υποθετικό σενάριο), στο διάγραμμα των ροπών για τα 3 πτερύγια θα ήταν εμφανής η διαφορά φάσης μεταξύ των 3 καμπυλών. Παρότι το εξεταζόμενο σενάριο εδώ διαφέρει αρκετά, παρατηρώντας την (Εικ. 4.2.8) διακρίνεται μια ασυνεπής αισθητή διαφορά φάσης μεταξύ των κορυφών των 3 καμπυλών σε διάφορα σημεία του χρονικού διαστήματος που απεικονίζεται, η οποία και επαναλαμβάνεται καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης.
- Η καμπτική ροπή πτερύγισης οφείλεται ώση λόγω του ανέμου στην επιφάνεια του πτερυγίου της Α/Γ, ο οποίος στην εξεταζόμενη περίπτωση δεν αλλάζει διεύθυνση, με συνέπεια οι τιμές που λαμβάνει η ροπή και κατά συνέπεια το καμπτικό φορτίο να είναι παντού θετικές (Εικ. 4.2.11).



Εικόνα 4.2.8: Καμπτική ροπή πτερύγισης πτερυγίου για την ρίζα των 3 πτερυγίων της 8<sup>ης</sup> Α/Γ στο χρονικό διάστημα 350 – 380 sec για βόρειο άνεμο

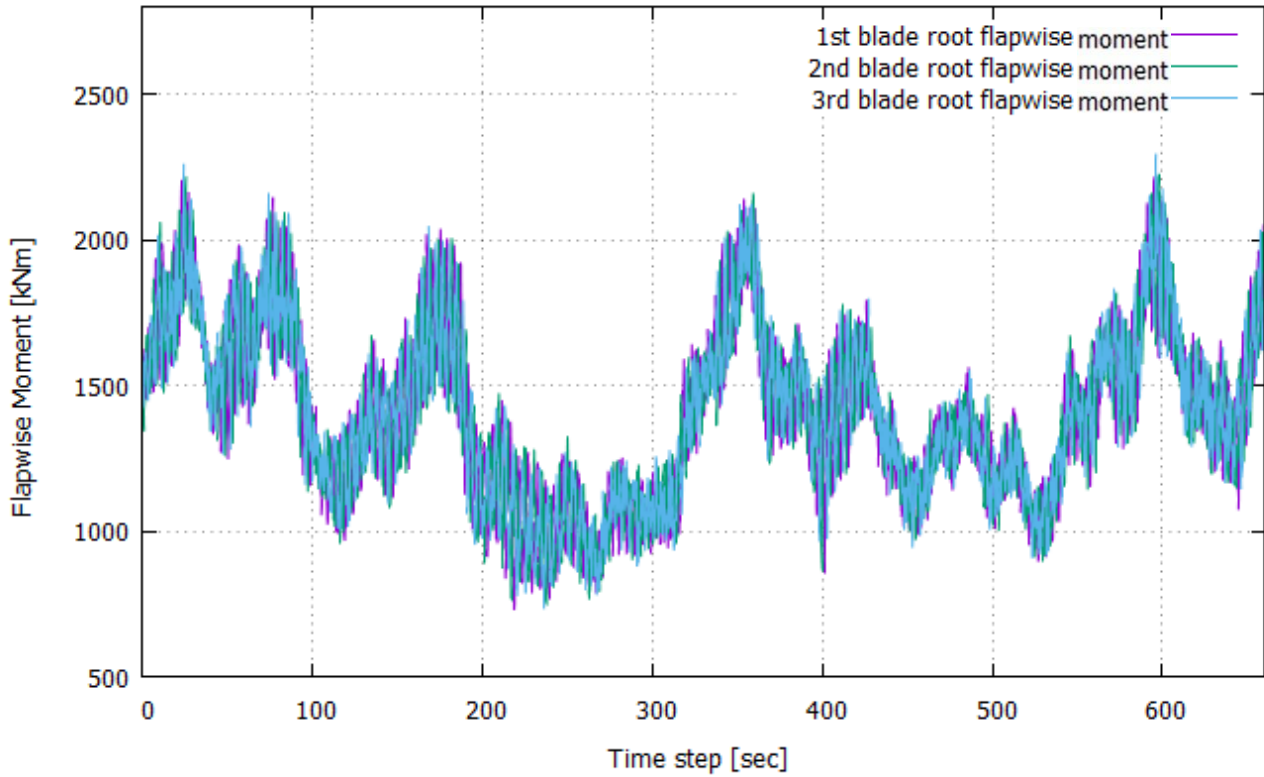


Εικόνα 4.2.9: Καμπτικό φορτίο περύγισης πτερυγίου στην ρίζα του 1<sup>ου</sup> φτερού της 8<sup>ης</sup> Α/Γ στο χρονικό διάστημα 350 – 380 sec για βορειοανατολικό άνεμο

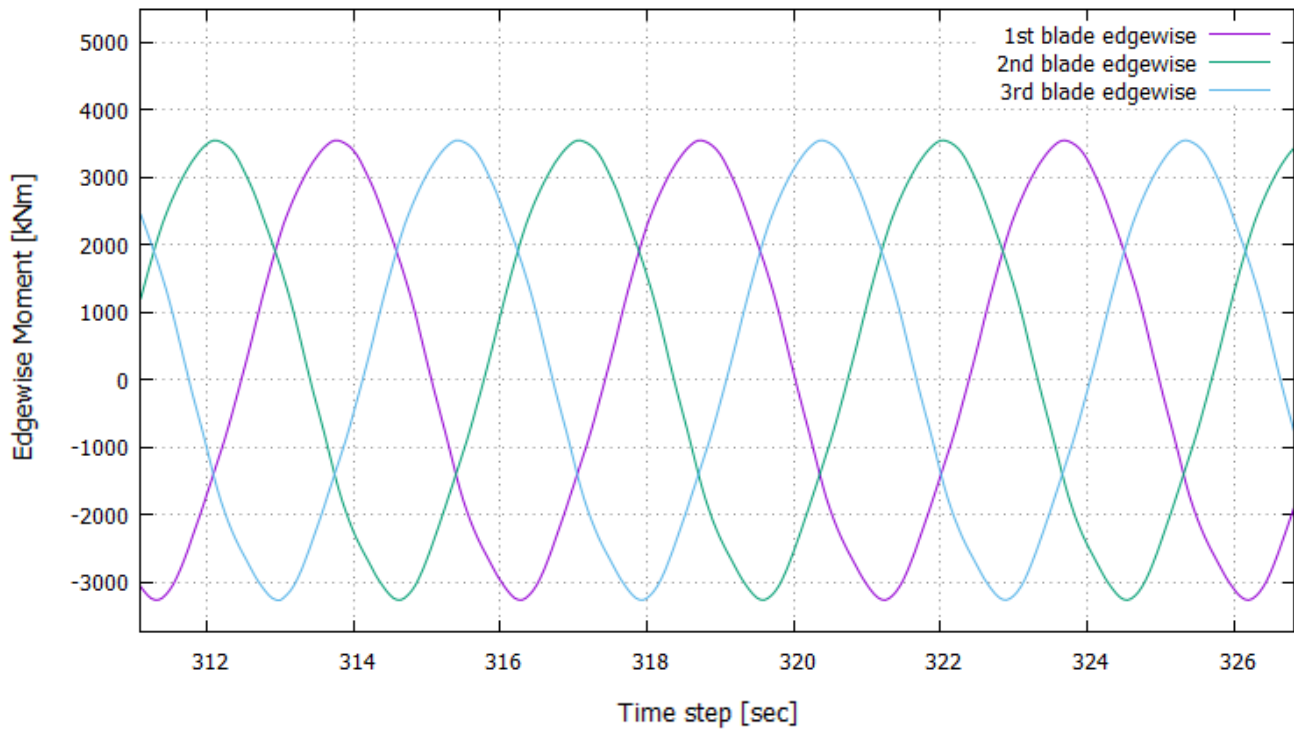


Εικόνα 4.2.10: Καμπτικό φορτίο περύγισης πτερυγίου στην ρίζα του 1<sup>ου</sup> φτερού της 8<sup>ης</sup> Α/Γ στο χρονικό διάστημα 350 – 380 sec για βορειοανατολικό άνεμο

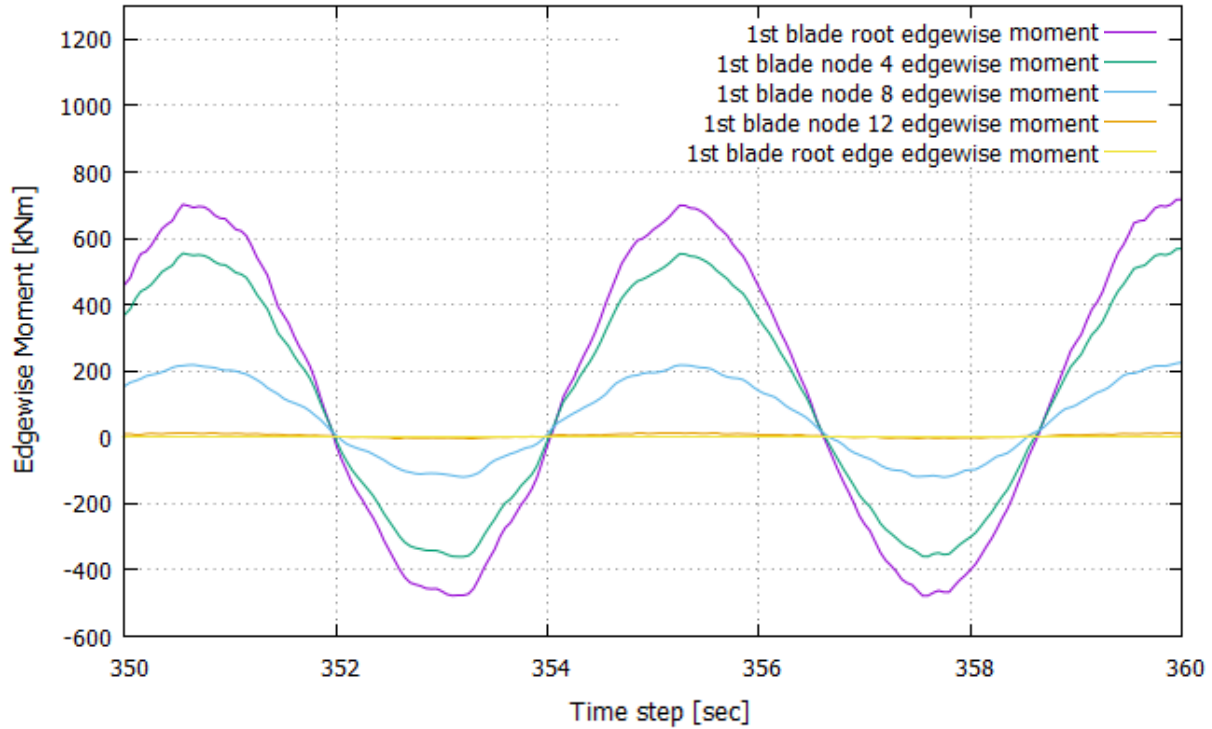




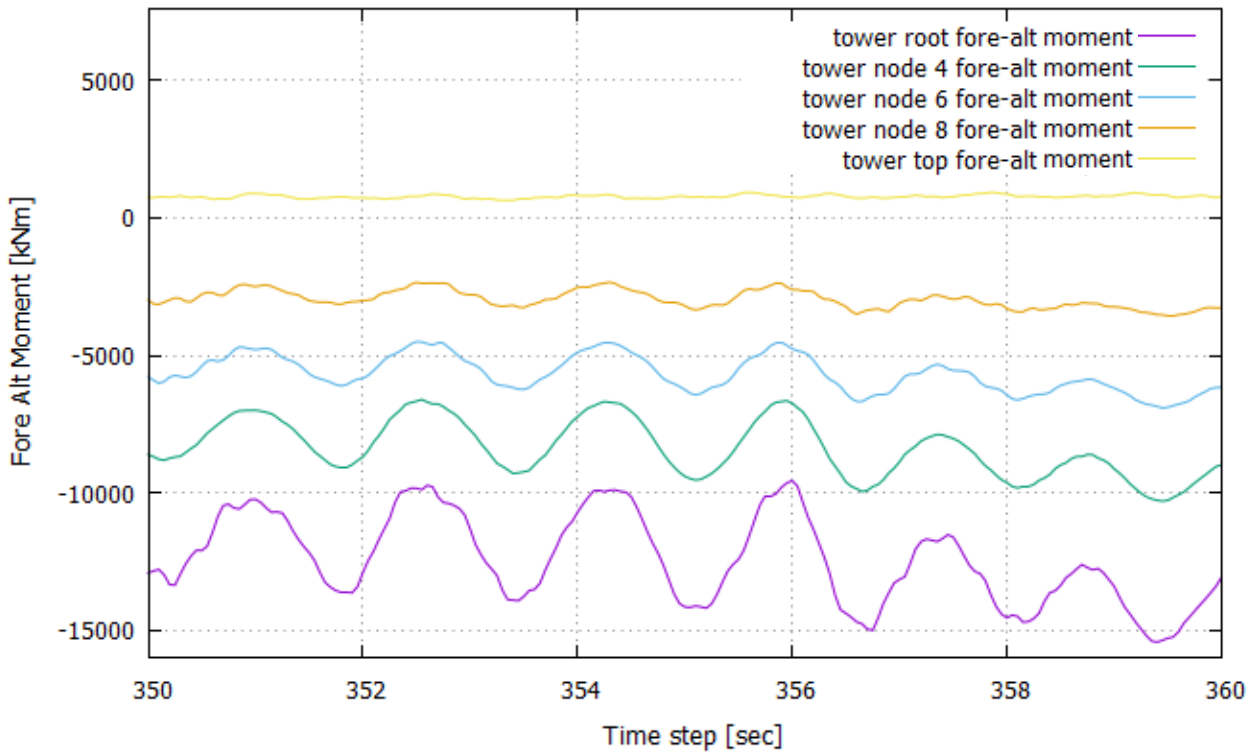
Εικόνα 4.2.11: Καμπτική ροπή περύγισης πτερυγίου για την ρίζα των 3 πτερυγίων της 8ης Α/Γ στο χρονικό διάστημα 0 – 660 sec για βόρειο άνεμο



Εικόνα 4.2.12: Καμπτική ροπή περύγισης πτερυγίου για την ρίζα των 3 πτερυγίων μιας Α/Γ για σταθερή ομοιόμορφη ταχύτητα ανέμου



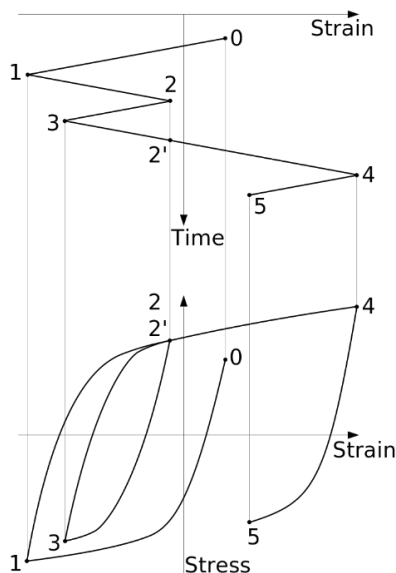
Εικόνα 4.2.13: Καμπτική ροπή περιστροφής πτερυγίου σε διάφορα σημεία του 1<sup>ου</sup> φτερού της 8<sup>ης</sup> Α/Γ στο χρονικό διάστημα 350 – 360 sec για βορειοανατολικό άνεμο



Εικόνα 4.2.14: Διαμήκης ροπή πύργου σε διάφορα σημεία του πύργου της 8<sup>ης</sup> Α/Γ στο χρονικό διάστημα 350 – 360 sec για βορειοανατολικό άνεμο

### 4.3. Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Καθώς για κάθε ένα από τα 15 διακριτοποιημένα σημεία των 3 πτερυγίων της Α/Γ και των 11 του πύργου υπάρχουν 13202 μετρήσεις, για 3 διαφορετικές κατευθύνσεις με 3 διαφορετικές δοκιμές σε κάθε μια, δεν είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων στην παρούσα τους μορφή. Για αυτό τον λόγο, με την βοήθεια ενός `python script`, το οποίο εκτελείται στα αποτελέσματα του hGAST, δύναται να υπολογιστούν οι ισοδύναμες ροπές αντίδρασης σε κάθε διεύθυνση για τον πύργο και τα πτερύγια, ώστε να γίνουν οι συγκρίσεις. Σε πρώτο στάδιο θα καταγραφούν τα αριθμητικά αποτελέσματα και στην συνέχεια θα εισαχθεί η συχνότητα εμφάνισης της κάθε ταχύτητας αναφοράς, κοινώς η συχνότητα της κάθε κατεύθυνσης. Το `script` συμπεριλαμβάνει έναν αλγόριθμο τύπου `rainflow counting`, ο οποίος διαδοχικά εντοπίζει & εξάγει τους μικρότερους κύκλους φόρτισης από μια μεγαλύτερη ακολουθία, το οποίο μοντελοποιεί ουσιαστικά το αποτύπωμα στην «μνήμη» του υλικού, που παρατηρείται με τους κύκλους υστέρησης για τάση – παραμόρφωση (Εικ. 4.2.15). Η απλούστευση αυτή επιτρέπει τον προσδιορισμό του αριθμού των κύκλων μέχρι και την αστοχία του εξεταζόμενου στοιχείου για κάθε κύκλο βροχής χρησιμοποιώντας είτε τον κανόνα του Miner για τον υπολογισμό της εμφάνισης αστοχίας λόγω κόπωσης, είτε κάποια άλλη μέθοδο. Ο κώδικας τελικά παράγει ένα ισοδύναμο διάγραμμα που συνδέει τους κύκλους κόπωσης με το εύρος της καταπόνησης, και εξάγει από αυτό μια ισοδύναμη καταπόνηση, η οποία πρακτικά επιφέρει το ίδιο αποτέλεσμα κόπωσης με την καταπόνηση που δέχεται το κάθε στοιχείο αντιστοίχως. Με την εκτέλεση του αλγορίθμου προκύπτουν τελικά 3 ροπές για την βάση κάθε πτερυγίου και 3 ροπές για την βάση του πύργου, 3 για κάθε κατεύθυνση ανέμου και άλλες 3 για κάθε `realization`. Αρχικά λαμβάνεται ο μέσος όρος των 3 τιμών από τα 3 διαφορετικά `realizations`, και στην συνέχεια αξιοποιείται η κανονικοποιημένη στο 100% συχνότητα εμφάνισης της κάθε ταχύτητας για να γίνει η σύγκριση των ισοδύναμων ροπών.



Εικόνα 4.3.1: Παράδειγμα αναγνώρισης των κύκλων φόρτισης σε μια καμπύλη φόρτισης – παραμόρφωσης με τον αλγόριθμο `rainflow`

Πίνακας 4.3.1: Οι 3 Ισοδύναμες ροπές του αλγορίθμου *rainflow counting* για τα 2 πρώτα πτερύγια της 8<sup>ης</sup> Α/Γ για βορειοανατολικό άνεμο, και οι μέσες τιμές τους σε kNm

| 8 <sup>th</sup> Wind Turbine (NNE) |    | 1 <sup>st</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   | 2 <sup>nd</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   |
|------------------------------------|----|------------------------------------|--------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------|-------------------|
|                                    |    | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> |
| Realization                        | R1 | 1268.77                            | 18.95              | 1567.05           | 1243.52                            | 19.84              | 1565.52           |
|                                    | R2 | 1382.22                            | 18.87              | 1561.06           | 1397.88                            | 18.67              | 1564.36           |
|                                    | R3 | 1557.84                            | 20.54              | 1567.57           | 1584.45                            | 19.72              | 1564.90           |
| Average moment (kNm)               |    | 1402.94                            | 19.45              | 1565.22           | 1408.61                            | 19.41              | 1564.92           |

Πίνακας 4.3.2: Οι 3 Ισοδύναμες ροπές του αλγορίθμου *rainflow counting* για το 3<sup>ο</sup> πτερύγιο και τον πύργο της 8<sup>ης</sup> Α/Γ για βορειοανατολικό άνεμο, και οι μέσες τιμές τους σε kNm

| 8 <sup>th</sup> Wind Turbine (NNE) |    | 3 <sup>rd</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   | Tower moment (kNm)    |                    |                           |
|------------------------------------|----|------------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------|
|                                    |    | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>fore alt</sub> | M <sub>twist</sub> | M <sub>side to side</sub> |
| Realization                        | R1 | 1300.47                            | 20.15              | 1567.75           | 7141.95               | 980.42             | 18926.33                  |
|                                    | R2 | 1369.75                            | 18.50              | 1566.33           | 6331.09               | 887.86             | 23880.36                  |
|                                    | R3 | 1556.53                            | 20.18              | 1569.95           | 6346.47               | 1002.35            | 22319.29                  |
| Average moment (kNm)               |    | 1408.91                            | 19.61              | 1567.87           | 6606.5                | 956.87             | 21708.66                  |

Πίνακας 4.3.3: Οι 3 Ισοδύναμες ροπές του αλγορίθμου *rainflow counting* για τα 2 πρώτα πτερύγια της 8<sup>ης</sup> Α/Γ για βόρειο άνεμο, και οι μέσες τιμές τους σε kNm

| 8 <sup>th</sup> Wind Turbine (N) |    | 1 <sup>st</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   | 2 <sup>nd</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   |
|----------------------------------|----|------------------------------------|--------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------|-------------------|
|                                  |    | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> |
| Realization                      | R1 | 1621.54                            | 25.61              | 1606.10           | 1625.00                            | 25.66              | 1604.85           |
|                                  | R2 | 1719.99                            | 25.42              | 1593.88           | 1699.09                            | 24.65              | 1594.11           |
|                                  | R3 | 1553.53                            | 25.00              | 1600.50           | 1499.88                            | 25.09              | 1600.67           |
| Average moment (kNm)             |    | 1631.69                            | 25.34              | 1600.16           | 1607.99                            | 25.13              | 1599.88           |

Πίνακας 4.3.4: Οι 3 Ισοδύναμες ροπές του αλγορίθμου *rainflow counting* για το 3<sup>ο</sup> πτερύγιο και τον πύργο της 8<sup>ης</sup> Α/Γ για βόρειο άνεμο, και οι μέσες τιμές τους σε kNm

| 8 <sup>th</sup> Wind Turbine (N) |    | 3 <sup>rd</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   | Tower moment (kNm) |                    |                   |
|----------------------------------|----|------------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
|                                  |    | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>flap</sub>  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> |
| Realization                      | R1 | 1607.47                            | 24.96              | 1604.81           | 4575.11            | 1205.81            | 18228.23          |
|                                  | R2 | 1752.85                            | 25.69              | 1594.40           | 4412.57            | 1202.03            | 16540.31          |
|                                  | R3 | 1574.60                            | 25.22              | 1602.34           | 3764.82            | 1211.25            | 19244.05          |
| Average moment (kNm)             |    | 1644.97                            | 25.29              | 1600.52           | 4250.83            | 1206.36            | 18004.20          |

Πίνακας 4.3.5: Οι 3 Ισοδύναμες ροπές του αλγορίθμου *rainflow counting* για τα 2 πρώτα πτερύγια της 8<sup>ης</sup> Α/Γ για βορειοδυτικό άνεμο, και οι μέσες τιμές τους σε kNm

| 8 <sup>th</sup> Wind Turbine (NNW) |    | 1 <sup>st</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   | 2 <sup>nd</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   |
|------------------------------------|----|------------------------------------|--------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------|-------------------|
|                                    |    | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> |
| Realization                        | R1 | 1661.92                            | 25.46              | 1606.00           | 1698.79                            | 25.05              | 1600.55           |
|                                    | R2 | 1598.06                            | 24.486             | 1589.60           | 1671.14                            | 24.612             | 1589.33           |
|                                    | R3 | 1571.76                            | 22.868             | 1599.70           | 1529.84                            | 23.732             | 1603.94           |
| Average moment (kNm)               |    | 1610.58                            | 24.27              | 1598.44           | 1633.26                            | 24.46              | 1597.94           |

Πίνακας 4.3.6: Οι 3 Ισοδύναμες ροπές του αλγορίθμου *rainflow counting* για το 3<sup>ο</sup> πτερύγιο και τον πύργο της 8<sup>ης</sup> Α/Γ για βορειοδυτικό άνεμο, και οι μέσες τιμές τους σε kNm

| 8 <sup>th</sup> Wind Turbine (NNW) |    | 3 <sup>rd</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   | Tower moment (kNm) |                    |                   |
|------------------------------------|----|------------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
|                                    |    | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>flap</sub>  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> |
| Realization                        | R1 | 1677.63                            | 25.951             | 1600.97           | 5300.12            | 1093.58            | 17642.59          |
|                                    | R2 | 1641.36                            | 24.68              | 1589.84           | 4297.17            | 1139.71            | 17159.16          |
|                                    | R3 | 1567.15                            | 24.012             | 1603.95           | 4073.79            | 1180.90            | 18431.87          |
| Average moment (kNm)               |    | 1628.71                            | 24.88              | 1598.26           | 4557.03            | 1138.07            | 17744.54          |

Πίνακας 4.3.7: Οι 3 Ισοδύναμες ροπές του αλγορίθμου *rainflow counting* για τα 2 πρώτα πτερύγια της 10<sup>ης</sup> Α/Γ για βορειοανατολικό άνεμο, και οι μέσες τιμές τους σε kNm

| 10 <sup>th</sup> Wind Turbine (NNE) |    | 1 <sup>st</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   | 2 <sup>nd</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   |
|-------------------------------------|----|------------------------------------|--------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------|-------------------|
|                                     |    | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> |
| Realization                         | R1 | 1274.58                            | 21.46              | 1591.08           | 1293.76                            | 22.62              | 1589.38           |
|                                     | R2 | 1324.41                            | 21.96              | 1588.59           | 1308.82                            | 22.89              | 1590.26           |
|                                     | R3 | 1304.78                            | 22.25              | 1587.84           | 1308.60                            | 21.94              | 1588.08           |
| Average moment (kNm)                |    | 1301.25                            | 21.89              | 1589.17           | 1303.72                            | 22.48              | 1589.24           |

Πίνακας 4.3.8: Οι 3 Ισοδύναμες ροπές του αλγορίθμου *rainflow counting* για το 3<sup>ο</sup> πτερύγιο και τον πύργο της 10<sup>ης</sup> Α/Γ για βορειοανατολικό άνεμο, και οι μέσες τιμές τους σε kNm

| 10 <sup>th</sup> Wind Turbine (NNE) |    | 3 <sup>rd</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   | Tower moment (kNm)    |                    |                           |
|-------------------------------------|----|------------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------|
|                                     |    | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>fore alt</sub> | M <sub>twist</sub> | M <sub>side to side</sub> |
| Realization                         | R1 | 1295.99                            | 22.13              | 1590.66           | 2847.61               | 900.13             | 15856.55                  |
|                                     | R2 | 1327.97                            | 21.67              | 1588.44           | 3723.78               | 915.33             | 12265.73                  |
|                                     | R3 | 1290.01                            | 22.36              | 1587.90           | 3133.56               | 905.83             | 14002.12                  |
| Average moment (kNm)                |    | 1304.65                            | 22.05              | 1589.00           | 3234.98               | 907.10             | 14041.47                  |

Πίνακας 4.3.9: Οι 3 Ισοδύναμες ροπές του αλγορίθμου *rainflow counting* για τα 2 πρώτα πτερύγια της 10<sup>ης</sup> Α/Γ για βόρειο άνεμο, και οι μέσες τιμές τους σε kNm

| 10 <sup>th</sup> Wind Turbine (N) |    | 1 <sup>st</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   | 2 <sup>nd</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   |
|-----------------------------------|----|------------------------------------|--------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------|-------------------|
|                                   |    | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> |
| Realization                       | R1 | 1624.72                            | 24.58              | 1605.11           | 1596.15                            | 25.54              | 1606.39           |
|                                   | R2 | 1430.36                            | 24.66              | 1595.94           | 1400.55                            | 24.61              | 1592.45           |
|                                   | R3 | 1307.06                            | 23.86              | 1595.23           | 1350.48                            | 23.12              | 1592.26           |
| Average moment (kNm)              |    | 1454.04                            | 24.37              | 1598.76           | 1449.06                            | 24.42              | 1597.03           |

Πίνακας 4.3.10: Οι 3 Ισοδύναμες ροπές του αλγορίθμου rainflow counting για το 3<sup>ο</sup> πτερύγιο και τον πύργο της 10<sup>ης</sup> Α/Γ για βόρειο άνεμο, και οι μέσες τιμές τους σε kNm

| 10 <sup>th</sup> Wind Turbine (N) |    | 3 <sup>rd</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   | Tower moment (kNm) |                    |                   |
|-----------------------------------|----|------------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
|                                   |    | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>flap</sub>  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> |
| Realization                       | R1 | 1555.32                            | 25.74              | 1602.91           | 3190.87            | 1076.16            | 16850.78          |
|                                   | R2 | 1460.35                            | 24.54              | 1596.79           | 3328.19            | 1115.86            | 15579.32          |
|                                   | R3 | 1290.86                            | 23.27              | 1595.55           | 3269.93            | 1086.58            | 15072.02          |
| Average moment (kNm)              |    | 1435.51                            | 24.52              | 1598.42           | 3263.00            | 1092.87            | 15834.04          |

Πίνακας 4.3.11: Οι 3 Ισοδύναμες ροπές του αλγορίθμου rainflow counting για τα 2 πρώτα πτερύγια της 10<sup>ης</sup> Α/Γ για βορειοδυτικό άνεμο, και οι μέσες τιμές τους σε kNm

| 10 <sup>th</sup> Wind Turbine (NNW) |    | 1 <sup>st</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   | 2 <sup>nd</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   |
|-------------------------------------|----|------------------------------------|--------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------|-------------------|
|                                     |    | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> |
| Realization                         | R1 | 1400.23                            | 22.63              | 1587.16           | 1391.74                            | 23.55              | 1588.88           |
|                                     | R2 | 1456.92                            | 22.85              | 1587.80           | 1411.47                            | 23.17              | 1593.50           |
|                                     | R3 | 1446.39                            | 23.54              | 1591.56           | 1409.53                            | 23.99              | 1588.44           |
| Average moment (kNm)                |    | 1434.51                            | 23.01              | 1588.84           | 1404.24                            | 23.57              | 1590.27           |

Πίνακας 4.3.12: Οι 3 Ισοδύναμες ροπές του αλγορίθμου rainflow counting για το 3<sup>ο</sup> πτερύγιο και τον πύργο της 10<sup>ης</sup> Α/Γ για βορειοδυτικό άνεμο, και οι μέσες τιμές τους σε kNm

| 10 <sup>th</sup> Wind Turbine (NNW) |    | 3 <sup>rd</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   | Tower moment (kNm) |                    |                   |
|-------------------------------------|----|------------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
|                                     |    | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>flap</sub>  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> |
| Realization                         | R1 | 1429.94                            | 23.04              | 1587.50           | 3445.55            | 1047.36            | 14842.80          |
|                                     | R2 | 1433.46                            | 22.56              | 1592.39           | 2852.86            | 943.75             | 13239.09          |
|                                     | R3 | 1401.55                            | 24.14              | 1590.74           | 2816.70            | 977.04             | 15549.88          |
| Average moment (kNm)                |    | 1421.65                            | 23.24              | 1590.21           | 3038.37            | 989.38             | 14543.93          |

Πίνακας 4.3.13: Οι 3 Ισοδύναμες ροπές του αλγορίθμου *rainflow counting* για τα 2 πρώτα πτερύγια της ονομαστικής (IEC) Α/Γ για βορειοανατολικό άνεμο, και οι μέσες τιμές τους σε kNm

| Reference Wind Turbine (NNE) |    | 1 <sup>st</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   | 2 <sup>nd</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   |
|------------------------------|----|------------------------------------|--------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------|-------------------|
|                              |    | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> |
| Realization                  | R1 | 2469.66                            | 32.14              | 1687.00           | 2529.82                            | 31.47              | 1682.44           |
|                              | R2 | 2351.30                            | 31.62              | 1669.60           | 2358.94                            | 32.87              | 1679.98           |
|                              | R3 | 2349.37                            | 39.14              | 1730.85           | 2293.38                            | 38.38              | 1756.99           |
| Average moment (kNm)         |    | 2390.11                            | 34.30              | 1695.81           | 2394.05                            | 34.24              | 1706.47           |

Πίνακας 4.3.14: Οι 3 Ισοδύναμες ροπές του αλγορίθμου *rainflow counting* για το 3<sup>ο</sup> πτερύγιο και τον πύργο της ονομαστικής (IEC) Α/Γ για βορειοανατολικό άνεμο, και οι μέσες τιμές τους σε kNm

| Reference Wind Turbine (NNE) |    | 3 <sup>rd</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   | Tower moment (kNm)    |                    |                           |
|------------------------------|----|------------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------|
|                              |    | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>fore alt</sub> | M <sub>twist</sub> | M <sub>side to side</sub> |
| Realization                  | R1 | 2494.37                            | 32.41              | 1677.73           | 9732.97               | 2090.99            | 31133.16                  |
|                              | R2 | 2410.42                            | 32.27              | 1673.55           | 6289.75               | 1870.41            | 26870.56                  |
|                              | R3 | 2261.30                            | 40.12              | 1754.11           | 6804.97               | 1963.37            | 27603.49                  |
| Average moment (kNm)         |    | 2388.70                            | 34.93              | 1701.79           | 7609.23               | 1974.92            | 28535.74                  |

Πίνακας 4.3.15: Οι 3 Ισοδύναμες ροπές του αλγορίθμου *rainflow counting* για τα 2 πρώτα πτερύγια της ονομαστικής (IEC) Α/Γ για βόρειο άνεμο, και οι μέσες τιμές τους σε kNm

| Reference Wind Turbine (N) |    | 1 <sup>st</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   | 2 <sup>nd</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   |
|----------------------------|----|------------------------------------|--------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------|-------------------|
|                            |    | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> |
| Realization                | R1 | 2438.28                            | 34.46              | 1645.77           | 2515.05                            | 33.54              | 1648.77           |
|                            | R2 | 2555.92                            | 31.95              | 1658.72           | 2620.11                            | 32.28              | 1668.71           |
|                            | R3 | 2598.03                            | 33.88              | 1664.28           | 2586.76                            | 33.94              | 1661.96           |
| Average moment (kNm)       |    | 2530.74                            | 33.43              | 1656.26           | 2573.97                            | 33.26              | 1659.81           |



Πίνακας 4.3.16: Οι 3 Ισοδύναμες ροπές του αλγορίθμου *rainflow counting* για το 3<sup>ο</sup> πτερύγιο και τον πύργο της ονομαστικής (IEC) Α/Γ για βόρειο άνεμο, και οι μέσες τιμές τους σε kNm

| Reference Wind Turbine (N) |    | 3 <sup>rd</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   | Tower moment (kNm)    |                    |                           |
|----------------------------|----|------------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------|
|                            |    | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>fore alt</sub> | M <sub>twist</sub> | M <sub>side to side</sub> |
| Realization                | R1 | 2506.20                            | 34.47              | 1651.01           | 7998.05               | 1720.47            | 31471.63                  |
|                            | R2 | 2587.00                            | 31.46              | 1660.75           | 6192.05               | 1905.90            | 26655.88                  |
|                            | R3 | 2675.63                            | 32.81              | 1672.65           | 9879.38               | 2138.64            | 25438.86                  |
| Average moment (kNm)       |    | 2589.61                            | 32.91              | 1661.47           | 8023.16               | 1921.67            | 27855.46                  |

Πίνακας 4.3.17: Οι 3 Ισοδύναμες ροπές του αλγορίθμου *rainflow counting* για τα 2 πρώτα πτερύγια της ονομαστικής (IEC) Α/Γ για βορειοδυτικό άνεμο, και οι μέσες τιμές τους σε kNm

| Reference Wind Turbine (NNW) |    | 1 <sup>st</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   | 2 <sup>nd</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   |
|------------------------------|----|------------------------------------|--------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------|-------------------|
|                              |    | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> |
| Realization                  | R1 | 2349.58                            | 32.95              | 1650.22           | 2516.75                            | 31.05              | 1648.72           |
|                              | R2 | 2379.10                            | 31.05              | 1650.49           | 2432.39                            | 30.25              | 1649.18           |
|                              | R3 | 2424.81                            | 33.13              | 1653.29           | 2408.25                            | 31.64              | 1656.58           |
| Average moment (kNm)         |    | 2384.50                            | 32.38              | 1651.33           | 2452.46                            | 30.98              | 1651.49           |

Πίνακας 4.3.18: Οι 3 Ισοδύναμες ροπές του αλγορίθμου *rainflow counting* για το 3<sup>ο</sup> πτερύγιο και τον πύργο της ονομαστικής (IEC) Α/Γ για βορειοδυτικό άνεμο, και οι μέσες τιμές τους σε kNm

| Reference Wind Turbine (NNW) |    | 3 <sup>rd</sup> Blade moment (kNm) |                    |                   | Tower moment (kNm)    |                    |                           |
|------------------------------|----|------------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------|
|                              |    | M <sub>flap</sub>                  | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>fore alt</sub> | M <sub>twist</sub> | M <sub>side to side</sub> |
| Realization                  | R1 | 2467.05                            | 32.41              | 1661.38           | 8942.74               | 1999.06            | 26165.35                  |
|                              | R2 | 2418.45                            | 31.47              | 1652.86           | 6794.58               | 1914.12            | 28713.89                  |
|                              | R3 | 2391.91                            | 31.39              | 1653.29           | 9730.97               | 2065.80            | 25303.82                  |
| Average moment (kNm)         |    | 2425.80                            | 31.76              | 1655.84           | 8489.43               | 1992.99            | 26727.69                  |

Τα μέσα ισοδύναμα κοπωτικά φορτία που προκύπτουν για τα 3 πτερύγια της κάθε Α/Γ, διαφέρουν ελάχιστα αριθμητικά, και για αυτά υπολογίζεται επίσης η τιμή ενός «μέσου» πτερυγίου το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την σύγκριση μεταξύ των Α/Γ. Παράλληλα στις τιμές αυτές εισάγονται οι κανονικοποιημένες στο 100 % συχνότητες εμφάνισης της κάθε κατεύθυνσης ανέμου, και τελικά προκύπτουν οι τελικές τιμές των ισοδύναμων φορτίων για κάθε Α/Γ (Πιν. 4.3.19/20/21).

Στην συνέχεια λαμβάνονται οι λόγοι των ροπών μεταξύ των 2 εξεταζόμενων Α/Γ του υποθετικού πάρκου, και της ονομαστικής Α/Γ του IEC οι οποία είναι σχεδιασμένη και προσομοιωμένη βάση των προδιαγραφών και συγκρίνονται μεταξύ τους για την εξαγωγή του συμπεράσματος. Σε πιο λεπτομερείς υπολογισμούς το ισοδύναμο φορτίο προκύπτει έχοντας λάβει υπόψιν σε αυτούς, τους κύκλους της 20ετίας (συνήθης διάρκεια ζωής), αλλά στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν είναι απαραίτητο. Επιπλέον, για μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα, ιδανικά θα έπρεπε να φορτία να μετατραπούν με την σειρά τους σε τάσεις, και να επεξεργαστούν αναλόγως και αυτές, αλλά στα πλαίσια τις εργασίας, και λόγω της δομής της, η επιλογή αυτή δεν ήταν εφικτή.

Πίνακας 4.3.19: Οι συνολικές Ισοδύναμες ροπές για το μέσο πτερύγιο & πύργο της 8<sup>ης</sup> Α/Γ, για όλες τις διευθύνσεις σε kNm

| 8 <sup>th</sup> Wind Turbine         |     | Average Blade moment (kNm) |                    |                   | Tower moment (kNm)    |                    |                           | Frequency |
|--------------------------------------|-----|----------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------|-----------|
|                                      |     | M <sub>flap</sub>          | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>fore alt</sub> | M <sub>twist</sub> | M <sub>side to side</sub> | %         |
| Wind Direction                       | NNE | 1406.82                    | 19.49              | 1566.00           | 6606.5                | 956.87             | 21708.66                  | 43.3      |
|                                      | N   | 1628.22                    | 25.25              | 1600.19           | 4250.83               | 1206.36            | 18004.20                  | 28        |
|                                      | NNW | 1624.18                    | 24.54              | 1598.21           | 4557.03               | 1138.07            | 17744.54                  | 28.7      |
| <b>Total equivalent moment (kNm)</b> |     | <b>1531.19</b>             | <b>22.55</b>       | <b>1584.82</b>    | <b>5358.71</b>        | <b>1078.73</b>     | <b>19533.71</b>           | -         |

Πίνακας 4.3.20: Οι συνολικές Ισοδύναμες ροπές για το μέσο πτερύγιο & πύργο της 10<sup>ης</sup> Α/Γ, για όλες τις διευθύνσεις σε kNm

| 10 <sup>th</sup> Wind Turbine        |     | Average Blade moment (kNm) |                    |                   | Tower moment (kNm)    |                    |                           | Frequency |
|--------------------------------------|-----|----------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------|-----------|
|                                      |     | M <sub>flap</sub>          | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>fore alt</sub> | M <sub>twist</sub> | M <sub>side to side</sub> | %         |
| Wind Direction                       | NNE | 1303.21                    | 22.14              | 1589.14           | 3234.98               | 907.1              | 14041.47                  | 43.3      |
|                                      | N   | 1446.20                    | 24.44              | 1598.07           | 3263                  | 1092.87            | 15834.04                  | 28        |
|                                      | NNW | 1420.13                    | 23.27              | 1589.77           | 3038.37               | 989.38             | 14543.93                  | 28.7      |
| <b>Total equivalent moment (kNm)</b> |     | <b>1376.80</b>             | <b>23.11</b>       | <b>1591.82</b>    | <b>3186.40</b>        | <b>982.73</b>      | <b>14687.60</b>           | -         |

Πίνακας 4.3.21: Οι συνολικές Ισοδύναμες ροπές για το μέσο πτερύγιο & πύργο της ονομαστικής (IEC) Α/Γ, για όλες τις διευθύνσεις σε kNm

| Reference Wind Turbine        |     | Average Blade moment (KNm) |                    |                   | Tower moment (KNm)    |                    |                           | Frequency |
|-------------------------------|-----|----------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------|-----------|
|                               |     | M <sub>flap</sub>          | M <sub>pitch</sub> | M <sub>edge</sub> | M <sub>fore alt</sub> | M <sub>twist</sub> | M <sub>side to side</sub> | %         |
| Wind Direction                | NNE | 2390.95                    | 34.49              | 1701.36           | 7609.23               | 1974.92            | 28535.74                  | 43.3      |
|                               | N   | 2564.77                    | 33.20              | 1659.18           | 8023.16               | 1921.67            | 27855.46                  | 28        |
|                               | NNW | 2477.86                    | 33.85              | 1680.27           | 8489.43               | 1992.99            | 26727.69                  | 28.7      |
| Total equivalent moment (kNm) |     | <b>2464.57</b>             | <b>33.94</b>       | <b>1683.49</b>    | <b>7977.75</b>        | <b>1965.20</b>     | <b>27826.35</b>           | -         |

$$DEL_{flap,8-IEC} = \frac{1531.19}{2464.57} = 0.621 \quad (\text{Εξ. 4.3.1})$$

$$DEL_{pitch,8-IEC} = \frac{22.55}{33.94} = 0.664 \quad (\text{Εξ. 4.3.2})$$

$$DEL_{edge,8-IEC} = \frac{1584.82}{1683.49} = 0.941 \quad (\text{Εξ. 4.3.3})$$

$$DEL_{fore\ alt,8-IEC} = \frac{5358.71}{7977.75} = 0.672 \quad (\text{Εξ. 4.3.4})$$

$$DEL_{twist,8-IEC} = \frac{1078.73}{1965.2} = 0.549 \quad (\text{Εξ. 4.3.5})$$

$$DEL_{side\ to\ side,8-IEC} = \frac{19533.71}{27826.35} = 0.702 \quad (\text{Εξ. 4.3.6})$$

$$DEL_{flap,10-IEC} = \frac{1376.8}{2464.57} = 0.559 \quad (\text{Εξ. 4.3.7})$$

$$DEL_{pitch,10-IEC} = \frac{23.11}{33.94} = 0.681 \quad (Eξ. 4.3.8)$$

$$DEL_{edge,10-IEC} = \frac{1591.82}{1683.49} = 0.946 \quad (Eξ. 4.3.9)$$

$$DEL_{fore alt,10-IEC} = \frac{3186.4}{7977.75} = 0.399 \quad (Eξ. 4.3.10)$$

$$DEL_{twist,10-IEC} = \frac{982.73}{1965.2} = 0.500 \quad (Eξ. 4.3.11)$$

$$DEL_{side to side,10-IEC} = \frac{14687.6}{27826.35} = 0.528 \quad (Eξ. 4.3.12)$$

Συγκρίνοντας τους λόγους ίδιων ροπών (καμπτική ροπή περιστροφής πτερυγίου με καμπτική ροπή περιστροφής πτερυγίου) για την 8<sup>η</sup> & 10<sup>η</sup> Α/Γ, η 8<sup>η</sup> παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές λόγων για την flapwise ροπή, παραπλήσιες τιμές για pitch και edgewise, και αρκετά μεγαλύτερες τιμές σε όλες τις ροπές του πύργου από αυτές της 10<sup>ης</sup>. Παρότι οι τιμές της flap για την ονομαστική Α/Γ είναι αρκετά μεγαλύτερες των 2 εξεταζόμενων, όπως φαίνεται στους λόγους, η τιμή των λόγων για την edgewise, πλησιάζει την μονάδα και στις 2 περιπτώσεις ( $\approx 0.94$ ), φαινόμενο που αποδίδεται στο ότι εξετάζονται οι 3 κύριες διευθύνσεις ταχυτήτων, οι οποίες διαφέρουν  $\pm 22.5^\circ$  μεταξύ τους, καθιστώντας τα φορτία της edgewise να μην διαφέρουν κατά πολύ, ανεξαρτήτως των συνθηκών της τύρβης που επικρατούν στην καθεμία Α/Γ. Όπως προαναφέρθηκε, απαιτείται περαιτέρω ανάλυση των φορτίων σε τάσεις για να δοθεί ένα ακριβές αριθμητικό αποτέλεσμα, δεν μπορεί να εξακριβωθεί με ακρίβεια η εναπομένουσα διάρκεια ζωής των Α/Γ 8 & 10. Παρόλαυτα, με την χρήση των λόγων των ροπών ως προσεγγιστικό γνώμονα, οι τιμές των οποίων εκτός της edgewise, κυμαίνονται στο διάστημα 0.5 – 0.7, μπορεί να εκτιμηθεί πως οι Α/Γ του υποθετικού πάρκου έχουν εκτείνει το **65 – 70%** της συνολικής διάρκειας ζωής τους, με την 8<sup>η</sup> Α/Γ στην οποία η επίδραση του ομόρρου είναι μέγιστη, να έχει την λιγότερη εναπομένουσα. Το νούμερο αυτό, ξανά, είναι μια συντηρητική εκτίμηση, βάση των υπολογισμένων λόγων, εκτός του edgewise, που αποδίδεται στην έλλειψη περισσότερων κατευθύνσεων ανέμου. Εάν αντί για 3 εξεταζόντουσαν και οι 12 κατευθύνσεις, με περισσότερα bins ανέμου (4 – 25 m/s), και πραγματοποιούταν η ανάλυση σε τάσεις, τα αποτελέσματα για τον λόγο της edgewise θα διέφεραν για να συμπίπτουν με αυτά του IEC – 61400 στις άλλες περιπτώσεις, και η υπολειπόμενη διάρκεια ζωής θα ήταν πολύ πιο ξεκάθαρη.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στο κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται η παρούσα μελέτη, και συνοψίζονται τα ευρήματα – αποτελέσματα που προέκυψαν, και ερχόμενα σε σύγκριση με τους στόχους της έρευνας, αναλύεται η σημασία τους στα πλαίσια της ήδη υπάρχουσας βιβλιογραφίας. Ο βασικός σκοπός της έρευνας, ήταν να εξετάσει πως επηρεάζεται η υπολειπόμενη διάρκεια ζωής μιας Α/Γ ενός αιολικού πάρκου, η οποία δέχεται μεγάλη επίδραση από τον ομόρρου, σε σχέση με την ζωή, μιας που δεν επηρεάζεται αισθητά, βάση των προτύπων που ορίζει ο κανονισμός IEC – 61400.

Για την απάντηση του ερωτήματος αυτού, υλοποιήθηκε ένα υποθετικό αιολικό πάρκο σε ένα νησί του Αιγαίου, για την οποία τα περιβαλλοντικά δεδομένα ήταν ήδη διαθέσιμα, καθιστώντας έτσι τα αποτελέσματα της μελέτης ακόμη πιο ρεαλιστικά. Με την βοήθεια ενός πλεγματοποιητή, υλοποιήθηκε η τοπογραφία της νήσου, και πραγματοποιήθηκαν σε αυτήν οι κατάλληλες αλλαγές, όπως η πύκνωση, αραιώση, περικοπή και επαύξηση του πλέγματος, σε όσα σημεία παρουσίαζαν ενδιαφέρον στην έρευνα, στις θέσεις των 10 Α/Γ. Τελικά επιλύθηκαν οι εξισώσεις ροής πάνω στο πλέγμα, για να παραχθεί ως αποτέλεσμα το πεδίο ροής, το οποίο και χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση των Α/Γ στις οποίες η επίδραση του ομόρρου είναι μέγιστη & ελάχιστη.

Μετάπειτα ακολούθησε η επεξεργασία των δομικών χαρακτηριστικών του μοντέλου της ήδη υπάρχουσας Α/Γ, και του controller αυτής για την προσαρμογή τους στις ανάγκες της έρευνας. Με την εισαγωγή των φασματικών παραμέτρων της τύρβης, παράχθηκαν στην συνέχεια οι χρονοσειρές του ανέμου, και με όλα τα δεδομένα πλέον διαθέσιμα, έγινε η εισαγωγή των 3 Α/Γ, αυτή με την μέγιστη επίδραση του ομόρρου στο πάρκο, αυτή με την ελάχιστη, και αυτήν που ανταποκρίνεται στις συνθήκες λειτουργίας που ορίζει ο κανονισμός IEC – 61400, στο λογισμικό hGAST, όπου και προσομοιώθηκε η δυναμική απόκριση τους στις συνθήκες του πάρκου & του κανονισμού

Ολοκληρώνοντας την διαδικασία λόγω της πολυπλοκότητας του εγχειρήματος επιλέχθηκαν τα φορτία στις βάσεις των πτερυγίων και του πύργου της κάθε Α/Γ, και με την κατάλληλη στάθμιση του αριθμού των πτερυγίων, των αριθμό των realizations σε κάθε κατεύθυνση, και την συχνότητα εμφάνισης της κάθε κατεύθυνσης, προέκυψαν οι τελικές τιμές αυτών. Διερευνώντας και συγκρίνοντας τους λόγους των φορτίων των 2 Α/Γ με αυτά της ονομαστικής, παρότι των περιορισμένο αριθμό κατευθύνσεων και bin ταχυτήτων ανέμου, προέκυψε το συμπέρασμα ότι η κόπωση που δέχεται η Α/Γ με την μεγαλύτερη επίδραση του ομόρρου, είναι μεγαλύτερη και κατά συνέπεια η εναπομένουσα διάρκεια ζωής της είναι μικρότερη, σε σχέση με αυτήν που επηρεάζεται λιγότερο.

Μέσω των τελικών ποσοστών που προέκυψαν, μπορεί να αποφανθεί ότι οι Α/Γ 8 & 10 έχουν εκτείνει το 65 – 70% του χρόνου ζωής τους. Τα αποτελέσματα και η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε, συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό, με αυτά της βιβλιογραφίας. Ως προτάσεις για μελλοντική έρευνα αρχικά, προτείνονται η χρήση λεπτομερότερων

υπολογιστικών εργαλείων – μέσων, για την υλοποίηση των προσομοιώσεων, βαθύτερη ανάλυση σε σημεία ενδιαφέροντος για την έρευνα (π.χ. περισσότερα διακριτοποιημένα σημεία στο πλέγμα στις θέσεις των Α/Γ), καθώς και η εφαρμογή ακριβέστερων υπολογιστικά παραμέτρων στον υπολογισμό των τελικών ισοδύναμων φορτίων, όπως:

1. Η εισαγωγή του αριθμού των κύκλου κόπωσης στους υπολογισμούς
2. Η μετατροπή των φορτίων σε τάσης, και διερεύνηση αυτών στην συνέχεια

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Ziegler, L., Gonzalez, E., Rubert, T., Smolka, U., and Melero, J. J.: "Lifetime extension of onshore wind turbines: A review covering Germany, Spain, Denmark, and the UK," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(1), 1261–1271, 2018.
- [2] T. Rubert ,D. McMillan, P. Niewczas, Title: "A decision support tool to assist with lifetime extension of wind turbines" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 423-433, 2018.
- [3] hu, Z., L. Duan, Y. Guo, Z. Kou, S. Yang, and W. Xu. "Comprehensive Review of Renewable Energy Curtailment and Avoidance: A Specific Example in China." *Renewable Energy* 141 (2019): 1167-1176
- [4] J. M. Prospathopoulos et. al. "Modelling Wind Turbine Wakes in Complex Terrain" Centre of Renewable Energy Sources, Wind Energy Department, Attiki, Greece 2008
- [5] J.G. Schepers, "ENDOW: Validation and improvement of ECN's wake model" p. 17 – 19, MARCH 2003
- [6] Canet, H., Bortolotti, P., and Bottasso, C. L.: On the scaling of wind turbine rotors, *Wind Energ. Sci.*, 6, 601–626, 1 2021.
- [7] Chengyu Wang, et. al. "How realistic are the wakes of scaled wind turbine models?", Wind Energy Institute, Technische Universität München Germany. 10 2020
- [8] Liu, W., Z. Liu, C. Zou, Y. Xu, H. Li, and S. Huang. "Thermal Analysis of Composite Lithium-Ion Battery with Dynamic and Reversible Adjusting Thermal Management System." *Renewable Energy* 139 (2019): 1087-1101.
- [9] Malo Rosemeier and Matthias Saathoff, "Assessment of a rotor blade extension retrofit as a supplement to the lifetime extension of wind turbines" *Wind Energ. Sci.*, 5, 897–909, 2020
- [10] Tao Tao et. al. "Quantitative assessment on fatigue damage induced by wake effect and yaw misalignment for floating offshore wind turbines", *Ocean Engineering* 288 (2023) 116004
- [11] *Wind Energy Engineering, A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*, Edited by Trevor M. Letcher, 2017
- [12] IEC TC88-MT1, *Wind turbines - Part 1: Design requirements* , December 3<sup>rd</sup> 2003
- [13] Peter Hauge Madsen et. al. , *Predicting Ultimate Loads for Wind Turbine Design*, Reno, Nevada, January 11–14, 1999

[14] Ευάγγελος Σ. Κουναλάκης, «Εκτίμηση αιολικού δυναμικού και χωροθέτηση ανεμογεννητριών σε σύνθετη τοπογραφία», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα, Οκτώβριος 2020

[15] Luis Vera-Tudela et. al. “Analysing wind turbine fatigue load prediction: The impact of wind farm flow conditions”, Renewable Energy 107 (2017): 352 – 360

[16] Ανδρέου-Σεραφείμ, Γιάννης, «Αξιολόγηση της δυνατότητας μείωσης της μάζας πτερυγίου ανεμογεννήτριας 10MW, με εφαρμογή παθητικού ελέγχου κάμψης/στρέψης», Αθήνα 20/5/2019

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΟΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ

[1] [https://en.wikipedia.org/wiki/IEC\\_61400](https://en.wikipedia.org/wiki/IEC_61400)

[2] [https://en.wikipedia.org/wiki/Rainflow-counting\\_algorithm](https://en.wikipedia.org/wiki/Rainflow-counting_algorithm)

[3] <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/19-vestas-v80-2.0>

## ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ

<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

<http://www.gnuplot.info/>

<https://tecplot.com/>

<https://www.putty.org/>



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Ο κώδικας στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB που χρησιμοποιήθηκε για την περιστροφή του πλέγματος:

```
% Define the center of rotation
p = 6645;
q = 6645;

% Define the angles of rotation in degrees
theta_degrees_1 = 22.5;
theta_degrees_2 = -22.5;

% Convert the angles of rotation to radians
theta_radians_1 = theta_degrees_1 * pi / 180;
theta_radians_2 = theta_degrees_2 * pi / 180;

modifx = 30*0;
modify = 30*0;

% Define the points to be rotated
points = [modifx+2100, modify+7700; % Add more points here
          modifx+2570, modify+7600;
          modifx+3100, modify+7500;
          modifx+3570, modify+7450;
          modifx+4050, modify+7200.
          modifx+4500, modify+7000;
          modifx+5070, modify+6950;
          modifx+5700, modify+6750.
          modifx+6350, modify+6700;
          modifx+7000, modify+6500];

% Initialize arrays to store the new coordinates
new_points_1 = zeros(size(points));
new_points_2 = zeros(size(points));

% Calculate the new coordinates for each point
for i = 1:size(points, 1)
    x = points(i, 1);
    y = points(i, 2);

    new_points_1(i, 1) = p + (x - p) * cos(theta_radians_1)
- (y - q) * sin(theta_radians_1);
    new_points_1(i, 2) = q + (x - p) * sin(theta_radians_1)
+ (y - q) * cos(theta_radians_1);
    new_points_2(i, 1) = p + (x - p) * cos(theta_radians_2)
- (y - q) * sin(theta_radians_2);
```

```

        new_points_2(i, 2) = q + (x - p) * sin(theta_radians_2)
+ (y - q) * cos(theta_radians_2);
end

% Print the new coordinates
disp('New coordinates for rotation of 22.5 degrees:');
disp(new_points_1);

disp('New coordinates for rotation of -22.5 degrees:');
disp(new_points_2);

% Plot the original points
figure;
scatter(points(:, 1), points(:, 2), 'filled');
hold on;

% Plot the new points after rotation of 22.5 degrees
scatter(new_points_1(:, 1), new_points_1(:, 2), 'filled');

% Plot the new points after rotation of -22.5 degrees
scatter(new_points_2(:, 1), new_points_2(:, 2), 'filled');

% Draw lines from the original points to the new points
for i = 1:size(points, 1)
    plot([points(i, 1), new_points_1(i, 1)], [points(i, 2),
new_points_1(i, 2)], '--');
    plot([points(i, 1), new_points_2(i, 1)], [points(i, 2),
new_points_2(i, 2)], '--');
end

% Add a legend
legend('Original Points', 'Points after 22.5 degree
rotation', 'Points after -22.5 degree rotation');

% Add labels
xlabel('X');
ylabel('Y');
grid on
xlim([0, 444*30]);
ylim([0, 444*30]);
title('Rotation of Points');

hold off;
-----

%% 2nd part of the rotation

```

```

clc
clear all

% Define the data
data = 1.0e+03 * [2.8497    9.3590
    3.2457    9.0867
    3.6970    8.7915
    4.1121    8.5655
    4.4599    8.1508
    4.7991    7.7938
    5.3066    7.5295
    5.8121    7.1036
    6.3935    6.8087
    6.9175    6.3752];

% Subtract 155*30 from the second column
data(:, 1) = data(:, 1) - 30*30;
data(:, 2) = data(:, 2) - 30*50;

% Print the new data
disp('New data:');
disp(data);

```