



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ



Διπλωματική Εργασία

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΗΝ
ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΚΑΙ ΣΤΟΥΣ ΧΡΟΝΟΥΣ ΑΝΑΝΕΩΣΗΣ ΣΤΗΝ
ΛΙΜΕΝΟΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΙΑ**

Κωνσταντίνος Μερκούρης

Επιβλέπων: Μιχάλης Χονδρός, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ
ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΚΑΙ
ΣΤΟΥΣ ΧΡΟΝΟΥΣ ΑΝΑΝΕΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΛΙΜΕΝΟΛΕΚΑΝΗ
ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΙΑ**

Κωνσταντίνος Μερκούρης

Επιβλέπων: Μιχάλης Χονδρός, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2023

Το περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν της δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Μιχάλη Χονδρό όχι μόνο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντας μου τη συγκεκριμένη διπλωματική αλλά κυρίως για την καθοδήγηση και γνώση που μου προσέφερε σε καθημερινή βάση πάντα με προθυμία. Επίσης να τον ευχαριστήσω για την παροχή προσωπικού γραφείου και εξοπλισμού καθιστώντας τη διαδικασία της μελέτης μου άνετη και ευχάριστη σε ένα εξαιρετικά φιλικό περιβάλλον.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Βασιλική Τσουκαλά για τη συμπαράσταση της όλο αυτό το διάστημα, κάνοντας με να νιώθω μέλος της ομάδας του εργαστηρίου.

Τέλος, να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τα αδέρφια μου για την υπομονή τους όλα αυτά τα χρόνια της φοίτησης μου στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Χωρίς τη δική τους υποστήριξη και τα εφόδια - υλικά και πνευματικά- που μου παρείχαν, η ολοκλήρωση των σπουδών μου σε μία τόσο απαιτητική σχολή θα ήταν αδύνατη.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των προπτυχιακών σπουδών της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2022 – 2023. Εκπονήθηκε από τον φοιτητή Μερκούρη Κωνσταντίνο υπό την επίβλεψη του κ. Μιχάλη Χονδρού, Επίκουρου Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής αποτελεί η διερεύνηση της ανανέωσης των υδάτων στο επιβατικό λιμάνι του Πειραιά και ειδικότερα η επίδραση της κλιματικής αλλαγής και της αλλαγής του ανεμολογικού κλίματος στην υδροδυναμική κυκλοφορία εντός της λιμενολεκάνης και στον χρόνο ανανέωσης των υδάτων. Επίσης διερευνάται και η ανανέωση που προσφέρει η μεταβολή της θαλάσσιας στάθμης λόγω παλίρροιας.

Στόχος της ερευνητικής εργασίας αποτελεί η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το αν η κλιματική αλλαγή θα έχει ευεργετική ή αρνητική επίδραση στους χρόνους ανανέωσης υδάτων του λιμένα του Πειραιά ώστε να αποτελέσει οδηγό για περαιτέρω έρευνες σχετικές με το αντικείμενο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vi
ABSTRACT	viii
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	ix
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	xi
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Αντικείμενο	1
1.2 Σημεία Καινοτομίας	1
1.3 Διάρθρωση.....	1
2. ΑΝΑΝΕΩΣΗ ΥΔΑΤΩΝ ΛΙΜΕΝΟΛΕΚΑΝΗΣ	2
2.1 Πηγές ρύπανση υδάτων λιμένα.....	2
2.2 Σημασία ανανέωσης υδάτων λιμένα.....	2
2.3 Συναφείς έρευνες για την ανανέωση υδάτων σε λιμενολεκάνες	3
2.4 Κλιματική αλλαγή και ανανέωση υδάτων	7
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ, ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	10
3.1 Μεθοδολογία.....	10
3.2 Περιοχή μελέτης – Ο λιμένας του Πειραιά.....	10
3.2.1 <i>Σύντομη ιστορική αναδρομή</i>	10
3.2.2 <i>Πλεονεκτήματα και πολιτική περιβάλλοντος</i>	12
3.3 Αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης	13
3.3.1 <i>Γενικά</i>	13
3.3.2 <i>Μαθηματικό υπόβαθρο Maris HYD</i>	15
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	16
4.1 Εφαρμογή μεθοδολογίας	16
4.1.1 <i>Κατασκευή βαθυμετρικού καννάβου</i>	16
4.1.2 <i>Κύκλος προκαταρκτικών προσομοιώσεων</i>	17
4.1.3 <i>Δεδομένα εξόδου</i>	19
4.1.4 <i>Προσδιορισμός περιοχών ελέγχου – Συνολική λιμενολεκάνη και υπολιμενολεκάνες</i> ...	19
4.2 Δεδομένα ανεμολογικά και θαλάσσιας στάθμης.....	21
4.2.1 <i>Ανεμολογικά δεδομένα</i>	21
4.2.2 <i>Παλιρροιακά δεδομένα</i>	24
4.3 Αποτελέσματα	25
4.3.1 <i>Επεξεργασία αποτελεσμάτων</i>	25
4.3.2 <i>Σχολιασμός αποτελεσμάτων ανεμογενούς κυκλοφορίας</i>	35
4.3.3 <i>Σχολιασμός αποτελεσμάτων παλιρροιογενούς κυκλοφορίας</i>	55
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	57
5.1 Συμπεράσματα για την ανανέωση των υδάτων του λιμένα του Πειραιά.....	57
5.2 Συμπεράσματα για την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην ανανέωση των υδάτων του λιμένα του Πειραιά.....	58

5.3	Περαιτέρω έρευνα.....	59
6.	ΑΝΑΦΟΡΕΣ	60
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	63
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΧΑΡΤΕΣ ΤΡΕΧΟΥΣΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ (CURRENT SPEEDS) ΜΕ ΤΙΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΤΟΥΣ ΑΝΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ ΑΝΑ ΒF	63

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο λιμένας του Πειραιά αποτελεί ένα εκ των πιο σημαντικών λιμένων στον κόσμο. Είναι το μεγαλύτερο στην Ελλάδα και γενικότερα στη Μεσόγειο εξυπηρετώντας όχι μόνο επιβατικά αλλά και εμπορικά δρομολόγια. Ωστόσο ένα λιμάνι με υψηλή επιβατική κίνηση και συχνές αφίξεις σκαφών όπως αυτό του Πειραιά οφείλει να τηρεί εκτός των άλλων, ορισμένες προδιαγραφές ποιότητας υδάτων. Η διαδικασία ανανέωσης των υδάτων επιτυγχάνεται κυρίως με φυσικούς μηχανισμούς μεταξύ των οποίων η δράση των ανέμων και η μεταβολή της στάθμης της θάλασσας.

Η ανανέωση των υδάτων του λιμένα του Πειραιά χάρη στους δύο αυτούς παράγοντες αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα η έρευνα εστιάζει στην επίδραση που θα επιφέρει η κλιματική αλλαγή στο φαινόμενο της ανανέωσης των υδάτων, παράμετρος που δεν έχει διερευνηθεί έως σήμερα. Σε αυτό το πλαίσιο, αντλήθηκαν δεδομένα ανεμολογικά (συχνότητες εμφάνισης ανέμων) για δύο σενάρια παγκόσμιας εξέλιξης συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου (Representative Concentration Pathway, στο εξής RCP) σύμφωνα με το Intergovernmental Panel on Climate Change, το μετριοπαθές (RCP) 4.5 και το απαισιόδοξο RCP 8.5 όπως και για την ιστορική περίοδο 1970 -2005. Σκοπός είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο σεναρίων και της ιστορικής περιόδου για να προκύψει ένα συμπέρασμα σχετικά με μία πιθανή βελτίωση ή επιδείνωση του φαινομένου της ανανέωσης των υδάτων του Πειραιά. Η επίδραση της παλίρροιας εξετάζεται μεμονωμένα, ανεξάρτητα των κλιματικών σεναρίων.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία επικεντρώνεται στη δημιουργία της περιοχής μελέτης και στους υπολογισμούς των χρόνων ανανέωσης με την χρήση ενός αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης. Επιλέχθηκε το λογισμικό της Scientia Maris, και ειδικότερα το Maris BTG (Scientia Maris, 2022) για την κατασκευή του βαθυμετρικού καννάβου και το Maris HYD (Scientia Maris, 2022) για την προσομοίωση της υδροδυναμικής κυκλοφορίας, δηλαδή την ταχύτητα C (m/s) και τη διεύθυνση των ρευμάτων D ($^\circ$ σε σχέση με το Βορρά), που αναπτύσσονται εντός της λιμενολεκάνης. Με βάση αυτές υπολογίζονται οι παροχές εξόδου Q_{out} (m^3/s) και στη συνέχεια οι χρόνοι ανανέωσης των υδάτων T (days). Επειδή η γεωμετρία του λιμένα του Πειραιά είναι πολύπλοκη και παρατηρείται πληθώρα λιμενολεκάνων, θεωρήθηκε σκόπιμο να εξεταστούν, πέραν της συνολικής, και κάποιες από αυτές που ενδεχομένως να παρουσιάζουν τοπικά πρόβλημα με την ανανέωση των υδάτων τους. Συγκεκριμένα το μοντέλο προσομοίωσης δίνει τη δυνατότητα να οριστούν διατομές πάνω στην περιοχή μελέτης για να μελετηθούν ξεχωριστά. Έτσι εκτός της βασικής διατομής που είναι η είσοδος του λιμένα (Line 1) ορίστηκαν: α) μία οριζόντια διατομή ως η είσοδος του λιμένα των Αλών (Line 2), β) μία κάθετη διατομή ως νοητή είσοδος στον κεντρικό λιμένα (Line 4) και τέλος γ) άλλη μία οριζόντια διατομή ως είσοδος της μικρής λιμενολεκάνης που βρίσκεται δυτικά της ακτής Μιαούλη. Οι άνεμοι χωρίστηκαν σε διευθύνσεις πνοής ανά 30° και λήφθηκαν υπόψιν μόνο οι εντάσεις μεγαλύτερες των 4 Bf. Για τις μικρότερες εντάσεις παρατηρήθηκε ότι οι ταχύτητες που αναπτύσσονται είναι εξαιρετικά μικρές έως και μηδενικές, και συνεπώς δεν συμμετέχουν στην ανανέωση των υδάτων και γι' αυτό αγνοήθηκαν.

Τα αποτελέσματα δείχνουν σχετικά υψηλούς χρόνους ανανέωσης για τον λιμένα αν συνυπολογίσει κανείς ότι οι συχνότητες των μικρότερων Bf δε λήφθηκαν υπόψιν. Για κάθε περιοχή μελέτης παρατηρήθηκαν δύο με τρεις δυσμενείς διευθύνσεις ανέμων με σχεδόν διπλάσιους χρόνους. Για τη διατομή 1, δηλαδή, συνολικά τον λιμένα, αυτοί ήταν οι άνεμοι των 0° , 30° και 210° . Όσον αφορά τους χρόνους ο σταθμισμένος μέσος όρος υπολογίστηκε στις 15,6 ημέρες περίπου για τα 7 Bf και στις 48,5 ημέρες για τα 4 Bf. Σχετικά με την παλίρροια, προέκυψε ότι η επιρροή της στο φαινόμενο της ανανέωσης των υδάτων είναι πολύ μικρή και βοηθάει μόνο στο δυτικό τμήμα του λιμένα. Τέλος σχετικά με την κλιματική αλλαγή, το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από τη σύγκριση των

κλιματικών σεναρίων είναι ότι η κλιματική αλλαγή όσον αφορά τις ανεμολογικές συνθήκες δεν πρόκειται να έχει σημαντική αλλαγή στην ανανέωση των υδάτων καθώς, υπολογίστηκαν σχεδόν οι ίδιοι χρόνοι με αυτούς από τα ιστορικά δεδομένα με πολύ μικρές αυξομειώσεις.

ABSTRACT

STUDY AREA

The port of Piraeus is one of the most important ports in the world. It is the largest in Greece and in the Mediterranean Sea serving not only passengers but also commercial routes. However, a port with high passenger traffic and frequent ship calls like that of Piraeus must meet some water quality standards. The process of water renewal is achieved mainly by natural mechanisms, among which are the action of the winds and the change in the sea level due to tides.

THESIS SUBJECT

The renewal of the waters of the port of Piraeus thanks to these two factors is the subject of this thesis. More specifically, the research focuses on the effect that climate change will have on the phenomenon of water renewal, a parameter that has not been included in the international literature. Wind data (wind frequencies) were extracted for two scenarios, the moderate RCP4.5 and the pessimistic RCP8.5 as well as for the history hindcast (1970 -2005). The main goal is to compare the results between the two scenarios and the history hindcast to reach a conclusion about a possible improvement or deterioration of the renewal of the waters of the port of Piraeus in the coming decades. The tidal effect is considered individually, independent of climate scenarios.

PROPOSED METHODOLOGY

The proposed methodology focuses on the creation of the study area and the calculations of renewal times using a numerical simulation model. Scientia Maris software suite was chosen for that purpose. In particular, the numerical tool, Maris BTG (Scientia Maris, 2022) was implemented to construct the bathymetric grid while Maris HYD (Scientia Maris, 2022) was implemented to simulate the hydrodynamic circulation in the basin and to provide the current speed C (m/s) and direction D ($^{\circ}$, in relation to the true North). Subsequently, the outflow discharge Q_{out} (m³/s) and then the water renewal times T (days) were calculated. Due to the complex geometry of the port, it was considered appropriate to further examine some port sub-basins in addition to the entire basin. The simulation model allows for cross-sections to be defined over the study area to calculate the desired magnitudes. Hence, apart from the main cross-section which represents the port entrance (Line 1), a horizontal cross-section was determined as the port entrance of the port of Alon (Line 2), a vertical cross-section as the imaginary entrance to the central port (Line 4) and finally another horizontal cross-section as the entrance to the small port basin located west of the Miaoulis coast. Winds were broken down in 30° bins and wind intensity of equal or greater than 4 Bf was considered. For lower intensities, it was found that zero or extremely current speeds are developed in the port basin and therefore they were ignored.

RESULTS AND CONCLUSIONS

The results show relatively high renewal times for the port. For each study area, two to three wind directions were observed with extremely high renewal times. For instance, for cross-section 1, i.e., the overall port basin the wind directions of 0° , 30° , and 210° produce low circulation and hence high renewal times. In terms of times, the weighted average was calculated indicatively at approximately 15.6 days for 7 Bf and 48.5 days for 4 Bf. Regarding the tide, it was found that its influence on the phenomenon of water renewal remains low, participating only in the western part of the port basin. Finally, regarding climate change, the main conclusion we reached from the comparison of the results for the climate scenarios is that climate change will not have an impact on water renewal, given that almost the same renewal times were observed with those of historical data, with insignificant variations.

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1. Ακτινοβολία των Αντιπροσωπευτικών Διαδρομών Συγκέντρωσης. Van Vuuren et al – 2011 (sedac.ciesin.columbia.edu)	8
Εικόνα 3.1. Πανοραμική λήψη Λιμένα Πειραιά (olp.gr)	11
Εικόνα 3.2. Χάρτης Λιμένα Πειραιά (hartis.org)	12
Εικόνα 4.1. Χάρτης Λιμένα Πειραιά με ισοβαθείς	16
Εικόνα 4.2. Maris BTG – Εισαγωγή κελιών, Επιλογή Μεθόδου	17
Εικόνα 4.3. Maris BTG – Περιοχή μελέτης – Βαθυμετρικός κάρναβος	17
Εικόνα 4.4. Maris HYD – Χρόνος προσομοίωσης, Χρονικό βήμα για ανέμους	18
Εικόνα 4.5. Βόρειος άνεμος 0°, 3 Bf – Χάρτης ταχυτήτων και διευθύνσεων ρεύματος εντός της λιμενολεκάνης	18
Εικόνα 4.6. Maris HYD – Μεταβλητές εξόδου	19
Εικόνα 4.7. Διατομές εξόδου υδάτων υποπεριοχών μελέτης	20
Εικόνα 4.8. Σημείο εξαγωγής ανεμολογικών δεδομένων από Copernicus Climate Data Store	21
Εικόνα 4.9. Maris HYD – Ένταση και κατεύθυνση ανέμου – Βόρειος άνεμος 4 Bf	24
Εικόνα 4.10. Maris HYD - Χρόνος προσομοίωσης, Χρονικό βήμα για παλίρροια	25
Εικόνα 4.11. Στατιστικά στοιχεία στάθμης θάλασσας Πειραιά (Υδρογραφική Υπηρεσία Πολεμικού Ναυτικού)	25
Εικόνα 4.12. Βόρειος άνεμος 0°, 7 Bf – Χάρτης ταχυτήτων και διευθύνσεων ρεύματος εντός της λιμενολεκάνης	26
Εικόνα 4.13. Βόρειος άνεμος 0°, 7 Bf – Χάρτης ταχυτήτων και διευθύνσεων ρεύματος εντός της λιμενολεκάνης	26
Εικόνα 4.14. Διάγραμμα παροχών – Βόρειος άνεμος (0°), 4 Bf – Διατομή (Line) 1	27
Εικόνα 4.15. Διάγραμμα παροχών – Βόρειος άνεμος (0°), 4 Bf – Διατομή (Line) 2	28
Εικόνα 4.16. Διάγραμμα παροχών – Βόρειος άνεμος (0°), 4 Bf – Διατομή (Line) 3	28
Εικόνα 4.17. Διάγραμμα παροχών – Βόρειος άνεμος (0°), 4 Bf – Διατομή (Line) 4	29
Εικόνα 4.18. Διάγραμμα παροχής ανανέωσης ανά Bf για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 1	35
Εικόνα 4.19. Διάγραμμα χρόνου ανανέωσης ανά Bf για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 1	36
Εικόνα 4.20. Διάγραμμα παροχής ανανέωσης ανά διεύθυνση για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 1	37
Εικόνα 4.21. Διάγραμμα χρόνου ανανέωσης ανά διεύθυνση για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 1	38
Εικόνα 4.22. Διάγραμμα ποσοστού απόκλισης χρόνου ανανέωσης κλιματικών σεναρίων από τα ιστορικά δεδομένα ανά διεύθυνση – Line 1	39
Εικόνα 4.23. Διάγραμμα παροχής ανανέωσης ανά Bf για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 2	40
Εικόνα 4.24. Διάγραμμα χρόνου ανανέωσης ανά Bf για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 2	41
Εικόνα 4.25. Διάγραμμα παροχής ανανέωσης ανά διεύθυνση για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 2	42
Εικόνα 4.26. Διάγραμμα χρόνου ανανέωσης ανά διεύθυνση για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 2	43
Εικόνα 4.27. Διάγραμμα ποσοστού απόκλισης χρόνου ανανέωσης κλιματικών σεναρίων από τα ιστορικά δεδομένα ανά διεύθυνση – Line 2	44
Εικόνα 4.28. Διάγραμμα παροχής ανανέωσης ανά Bf για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 3	45
Εικόνα 4.29. Διάγραμμα χρόνου ανανέωσης ανά Bf για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 3	46
Εικόνα 4.30. Διάγραμμα παροχής ανανέωσης ανά διεύθυνση για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 3	47
Εικόνα 4.31. Διάγραμμα χρόνου ανανέωσης ανά διεύθυνση για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 3	48

Εικόνα 4.32. Διάγραμμα ποσοστού απόκλισης χρόνου ανανέωσης κλιματικών σεναρίων από τα ιστορικά δεδομένα ανά διεύθυνση – Line 3.....	49
Εικόνα 4.33. Διάγραμμα παροχής ανανέωσης ανά Bf για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 4.....	50
Εικόνα 4.34. Διάγραμμα χρόνου ανανέωσης ανά Bf για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 4.....	51
Εικόνα 4.35. Διάγραμμα παροχής ανανέωσης ανά διεύθυνση για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 4.	52
Εικόνα 4.36. Διάγραμμα χρόνου ανανέωσης ανά διεύθυνση για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 4...	53
Εικόνα 4.37. Διάγραμμα ποσοστού απόκλισης χρόνου ανανέωσης κλιματικών σεναρίων από τα ιστορικά δεδομένα ανά διεύθυνση – Line 4.....	54

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1. Αριθμός πρώτου και τελευταίου κελιού στις 2 διευθύνσεις – Διατομές 1-4.....	20
Πίνακας 4.2. Ανεμολογικά δεδομένα RCP4.5_2041-2070	22
Πίνακας 4.3. Ανεμολογικά δεδομένα RCP4.5_2071-2100	22
Πίνακας 4.4. Ανεμολογικά δεδομένα RCP8.5_2041-2070	22
Πίνακας 4.5. Ανεμολογικά δεδομένα RCP8.5_2071-2100	23
Πίνακας 4.6. Ανεμολογικά δεδομένα_1976-2005	23
Πίνακας 4.7. Αντιστοίχιση Bf με άλλες μονάδες.....	24
Πίνακας 4.8. Όγκοι περιοχών μελέτης.....	29
Πίνακας 4.9. Παροχές εξόδου Qout (m ³ /s) ανά διεύθυνση ανέμου ανά Bf – Line 1	29
Πίνακας 4.10. Παροχές εξόδου Qout (m ³ /s) ανά διεύθυνση ανέμου ανά Bf – Line 2.....	30
Πίνακας 4.11. Παροχές εξόδου Qout (m ³ /s) ανά διεύθυνση ανέμου ανά Bf – Line 3.....	30
Πίνακας 4.12. Παροχές εξόδου Qout (m ³ /s) ανά διεύθυνση ανέμου ανά Bf – Line 4	30
Πίνακας 4.13. Σταθμισμένοι μ.ο. παροχών και χρόνων ανανέωσης υδάτων ανά Bf– Line 1	31
Πίνακας 4.14. Σταθμισμένοι μ.ο. παροχών και χρόνων ανανέωσης υδάτων ανά Bf– Line 2	32
Πίνακας 4.15. Σταθμισμένοι μ.ο. παροχών και χρόνων ανανέωσης υδάτων ανά Bf– Line 3	32
Πίνακας 4.16. Σταθμισμένοι μ.ο. παροχών και χρόνων ανανέωσης υδάτων ανά Bf– Line 4	33
Πίνακας 4.17. Σταθμισμένοι μ.ο. παροχών και χρόνων ανανέωσης υδάτων ανά κατεύθυνση ανέμου– Line 1	33
Πίνακας 4.18. Σταθμισμένοι μ.ο. παροχών και χρόνων ανανέωσης υδάτων ανά κατεύθυνση ανέμου– Line 2	33
Πίνακας 4.19. Σταθμισμένοι μ.ο. παροχών και χρόνων ανανέωσης υδάτων ανά κατεύθυνση ανέμου– Line 3	34
Πίνακας 4.20. Σταθμισμένοι μ.ο. παροχών και χρόνων ανανέωσης υδάτων ανά κατεύθυνση ανέμου– Line 4	34
Πίνακας 4.21. Παλίρροια - Στιγμιότυπα τρεχουσών ταχυτήτων με τις διευθύνσεις τους σε περίοδο T=12 ώρες.....	56

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της ανανέωσης των υδάτων του λιμένα του Πειραιά, μέσω μαθηματικής προσομοίωσης, και η διερεύνηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής σε αυτήν. Αρχικά μελετάται η επίδραση της αλλαγής του ανεμολογικού κλίματος στους χρόνους ανανέωσης και σε δεύτερη φάση η επίδραση της μεταβολής της θαλάσσιας στάθμης.

1.2 Σημεία Καινοτομίας

Σχετικά με τη διερεύνηση της ανανέωσης των υδάτων σε λιμενολεκάνες έχουν εκπονηθεί πολλές έρευνες. Έχουν μελετηθεί αρκετά λιμάνια και η επίδραση διαφόρων παραγόντων στον χρόνο ανανέωσης των υδάτων τους. Η γεωμετρία και η διάταξη τους, οι κυματικές και ανεμολογικές συνθήκες αλλά και το φαινόμενο της παλίρροιας αποτελούν μερικά από αυτά. Το ερώτημα που θέτει η παρούσα διπλωματική και προσπαθεί να απαντήσει, αποτελεί μια καινοτομία στις έως τώρα έρευνες, καθώς η διερεύνηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην ανανέωση, είναι ένα θέμα που μέχρι σήμερα δεν έχει διερευνηθεί.

1.3 Διάρθρωση

Η διάρθρωση της παρούσας Διπλωματική έχει ως εξής. Στο Κεφάλαιο 2 συνοψίζονται οι πηγές ρύπανσης των υδάτων λιμενολεκάνης και ως εκ τούτου εξηγείται η σημασία ανανέωσης τους. Ακολουθεί ανασκόπηση ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί σχετικές με το αντικείμενο και στη συνέχεια περιγράφονται τα κλιματικά σενάρια που θα μας απασχολήσουν.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε. Μετά από σύντομη ανασκόπηση της, περιγράφεται η περιοχή μελέτης δηλαδή ο λιμένας του Πειραιά. Τέλος γίνεται σύντομη παρουσίαση του επιστημονικού υπόβαθρου του λογισμικού προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η διαδικασία εφαρμογής της μεθοδολογίας και παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου, τόσο τα ανεμολογικά όσο και της θαλάσσιας στάθμης. Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα συνοδεία σχολιασμού τους.

Στο Κεφάλαιο 5 καταλήγουμε στα τελικά συμπεράσματα. Αρχικά για την ανανέωση υδάτων του λιμένα σύμφωνα με τα ιστορικά δεδομένα και ύστερα σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίδραση της κλιματικής αλλαγής. Η εργασία κλείνει με προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται οι βιβλιογραφίες και οι διαδικτυακές πηγές, στις οποίες βασίστηκε η παρούσα διπλωματική εργασία.

2. ΑΝΑΝΕΩΣΗ ΥΔΑΤΩΝ ΛΙΜΕΝΟΛΕΚΑΝΗΣ

2.1 Πηγές ρύπανση υδάτων λιμένα

Οι λιμένες αποτελούν κρίσιμες υποδομές για την παγκόσμια οικονομία και το διεθνές εμπόριο, καθώς εξυπηρετούν τον κύριο τρόπο μεταφοράς εμπορευμάτων, δηλαδή μέσω θαλάσσης, μεταξύ διαφορετικών χωρών. Οι λιμένες επιτρέπουν μέσω των υποδομών τους στα πλοία να φορτώσουν και να εκφορτώσουν εμπορεύματα, καθιστώντας κατά αυτόν τον τρόπο δυνατές τις εισαγωγές και εξαγωγές προϊόντων. Επιπλέον, προσφέρουν θέσεις εργασίας στους ντόπιους, στους ναυτικούς αλλά και σε άλλους εργαζόμενους στον τομέα της ναυτιλίας ενώ παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαχείριση των αποβλήτων και την προστασία του περιβάλλοντος, καθώς πολλά από αυτά παρέχουν υπηρεσίες ανακύκλωσης και επεξεργασίας αποβλήτων.

Όπως είναι φυσικό λόγω της αυξημένης δραστηριότητας που παρατηρείται στους λιμένες, η ρύπανση των υδάτων τους είναι αναπόφευκτη. Τα νερά σε ένα λιμένα μπορούν να ρυπανθούν από διάφορες πηγές (EPA.gov):

- Πολλά σκάφη και πλοία εκπέμπουν απόβλητα, λάδια, αργίλια και άλλα ρυπογόνα υλικά στα νερά του λιμένα.
- Βιομηχανίες και εργοστάσια που βρίσκονται κοντά σε λιμένες εκπέμπουν βλαβερά υλικά, όπως χημικά και άλλες επικίνδυνες ουσίες στα νερά.
- Τα νερά βροχής από τους δρόμους μπορούν να μεταφέρουν ρυπογόνα υλικά στα νερά του λιμένα.
- Τα απόβλητα και τα λύματα από τις πόλεις μπορούν να μεταφερθούν στα ύδατα του λιμένα μέσω των ποταμών και των αποχετεύσεων.

Στις παραπάνω ανθρωπογενείς δραστηριότητες μπορεί να συντελέσει αρνητικά και η επίδραση της γεωμετρίας του λιμένα καθώς μία πολύπλοκη γεωμετρία δυσχεραίνει την κίνηση του νερού και αυξάνει τον χρόνο ανανέωσης των υδάτων.

Η ρύπανση των υδάτων σε ένα λιμάνι μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες στο περιβάλλον και τη θαλάσσια ζωή. Η παρουσία τοξικών ουσιών, όπως πετρελαϊκά προϊόντα μπορεί να προκαλέσει το θάνατο θαλάσσιων οργανισμών, ενώ η υπερβολική παρουσία θρεπτικών ουσιών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των φυκιών και άλλων φυτών στην επιφάνεια, ικανή να επηρεάσει το θαλάσσιο οικοσύστημα. Επιπλέον, η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών στα νερά των λιμανιών μπορεί να προκαλέσει ασθένειες σε ανθρώπους και ζώα που έρχονται σε επαφή με αυτά. Άλλα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν είναι η έντονη κακοσμία ενώ ακόμα και σε αισθητικό επίπεδο η αλλοίωση του φυσικού τοπίου μόνο αρνητικές εντυπώσεις δημιουργεί στους χρήστες.

2.2 Σημασία ανανέωσης υδάτων λιμένα

Η ανανέωση υδάτων ενός λιμένα αναφέρεται στη διαδικασία καθαρισμού και αναζωογόνησης των υδάτων του λιμένα, προκειμένου να διατηρηθεί η ποιότητα του νερού και να προστατευτεί το θαλάσσιο περιβάλλον. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, αφαιρούνται τα ρυπογόνα στοιχεία και τα απόβλητα που μπορεί να εισέλθουν στο νερό λόγω της λειτουργίας του λιμένα, όπως καύσιμα, λάδια, απορρίμματα και άλλες ουσίες.

Η σημασία της ανανέωσης των υδάτων συνοψίζεται στους παρακάτω λόγους (boisewatershed.org):

1. Προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Τα ρυπογόνα στοιχεία μπορεί να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στη θαλάσσια βιοποικιλότητα, συμπεριλαμβανομένων των ειδών ψαριών και των πτηνών.
2. Καθαρά και υγιή ύδατα συμβάλλουν στη βελτίωση της εικόνας και της αξίας ενός λιμένα, κάτι που μπορεί να έχει θετικές επιπτώσεις στην τουριστική βιομηχανία, τις θαλάσσιες μεταφορές και τις σχετικές επιχειρήσεις. Ένας καθαρός λιμένας προσελκύει επισκέπτες, επενδυτές και επιχειρήσεις, βοηθώντας έτσι στην οικονομική ανάπτυξη της περιοχής.
3. Πολλές χώρες έχουν εισαγάγει νόμους και κανονισμούς για την προστασία των υδάτων και τη διατήρηση της περιβαλλοντικής ποιότητας. Η ανανέωση των υδάτων ενός λιμένα μπορεί να είναι ένα από τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για την τήρηση αυτών των κανονισμών.
4. Η ανανέωση των υδάτων μπορεί να βοηθήσει στη μείωση των οσμών που προκύπτουν από τα απόβλητα, τις ρυπογόνες ουσίες και την αποσύνθεση των οργανικών υλικών. Η δυσσομία μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την εμπειρία των ανθρώπων που επισκέπτονται ή εργάζονται στους λιμένες, καθώς και των κατοίκων της περιοχής. Καθαρά ύδατα και ελεγχόμενες οσμές βελτιώνουν την αισθητική και τη ζωή του λιμένα και των γύρω περιοχών.

Συνοψίζοντας, η ανανέωση υδάτων ενός λιμένα είναι μια ζωτική διαδικασία που στοχεύει στη διατήρηση της ποιότητας του νερού, την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος και τη βελτίωση της αισθητικής του λιμένα. Αυτή η διαδικασία εξασφαλίζει την υγιή λειτουργία των λιμένων, την αειφορία των θαλάσσιων οικοσυστημάτων και την οικονομική ευημερία των περιοχών που εξυπηρετούν. Η διαδικασία μπορεί να επιτευχθεί είτε με φυσικούς τρόπους μέσω κυμάτων, ανέμων και παλίρροιας είτε με τεχνητούς μέσω της άντλησης. Οι πρώτοι είναι αυτοί που θα μελετηθούν στη συγκεκριμένη εργασία και πιο συγκεκριμένα η επίδραση των ανέμων και της παλίρροιας.

2.3 Συναφείς έρευνες για την ανανέωση υδάτων σε λιμενολεκάνες

Στην ενότητα αυτή παρατίθεται μία επισκόπηση και σύντομη περιγραφή ενδεικτικών, συναφών με το φαινόμενο της ανανέωσης των υδάτων μίας λιμενολεκάνης, ερευνών και διπλωματικών εργασιών που έχουν πραγματοποιηθεί έως σήμερα σχετικά.

Το Εργαστήριο Λιμενικών Έργων της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ έχει διεξάγει πολυάριθμες και σημαντικές έρευνες για την ανανέωση των υδάτων σε λιμενολεκάνες με ιδιαίτερη έμφαση στους αγωγούς ανανέωσης, τόσο με φυσικές προσομοιώσεις όσο και με μαθηματικές. Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά κάποιες από αυτές.

Οι Stamou et al. (2004) εφάρμοσαν ένα μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό της κυκλοφορίας του νερού στη μαρίνα Λατσίου στην Κύπρο. Σύμφωνα με αυτή την έρευνα το πεδίο ροής στη μαρίνα δείχνει τη γενική συμπεριφορά των παράκτιων, αιολικών ροών, επηρεαζόμενη έντονα από τα χαρακτηριστικά της εισόδου της μαρίνας. Η μικρή διάσταση και η θέση της εισόδου δεν επιτρέπουν την εισροή ή εκροή σημαντικών ρυθμών ροής, με αποτέλεσμα μεγάλους χρόνους ανανέωσης. Η χρήση δύο ανοιγμάτων διερευνήθηκε στην εν λόγω έρευνα. Οι υπολογισμοί έδειξαν ότι το πρώτο άνοιγμα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο, ενώ το αποτέλεσμα του δεύτερου ανοίγματος είναι μόνο τοπικής και δευτερεύουσας σημασίας. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στον προσανατολισμό και τη θέση αυτών των ανοιγμάτων ως προς την είσοδο. Η χρήση του πρώτου ανοίγματος οδηγεί σε σημαντική αύξηση του ρυθμού ροής που διέρχεται από το εσωτερικό τμήμα της μαρίνας, γεγονός που αυξάνει το μέγεθος των ταχυτήτων και μειώνει τους χρόνους ανανέωσης.

Οι Tsoukala and Moutzouris (2004) στην έρευνα τους με τίτλο «Μετρήσεις Συγκέντρωσης Διαλυμένου Οξυγόνου στον Κεντρικό Λιμένα Πειραιά» παρουσίασαν τη χωρική και χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου (Δ.Ο.), της θερμοκρασίας και της αλατότητας του νερού και διερεύνησαν τη μεταβολή της συγκέντρωσης του Δ.Ο. ως συνάρτηση της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου στον Κεντρικό Λιμένα του Πειραιά. Γενικά παρατηρήθηκε αύξηση της συγκέντρωσης του Δ.Ο. με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Στην ίδια έρευνα πρότειναν μια εμπειρική εξίσωση, με βάση τις μετρηθείσες τιμές η οποία περιγράφει τη διαφορά της συγκέντρωσης του Δ.Ο. εντός και εκτός λιμενολεκάνης ως συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου. Παρατηρήθηκε επίσης μείωση της συγκέντρωσης του Δ.Ο. με την εισροή ομβρίων υδάτων εντός της λιμενολεκάνης.

Σύμφωνα με τους Tsoukala and Moutzouris (2008, 2009), μια σημαντική πτυχή που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό και την κατασκευή ενός λιμένα είναι η ποιότητα των υδάτων εντός της λεκάνης, η οποία εξαρτάται από την ανταλλαγή νερού μεταξύ του λιμένα και του περιβάλλοντος υδατικού συστήματος. Οι πιο διακεκριμένες διεθνώς μέθοδοι για την αντιμετώπιση της ανεπαρκούς ανανέωσης που εμφανίζεται υπήνεμα των παράκτιων κατασκευών περιλαμβάνουν μηχανικούς δονητές, υπερχειλίσεις, αντλίες, διαπερατούς κυματοθραύστες και αγωγούς ανανέωσης. Μεταξύ αυτών των μεθόδων, η κατασκευή αγωγών ανανέωσης είναι πιο ευνοϊκή λόγω του χαμηλού κόστους κατασκευής και λειτουργίας. Στην παρούσα εργασία, η μετάδοση κυμάτων μέσω των αγωγών ανανέωσης διερευνήθηκε πειραματικά σε δύο φυσικά μοντέλα. Τα ύψη προσπίπτοντος κύματος και μεταδιδόμενων κυμάτων προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας κυματομετρητές για διάφορους συνδυασμούς χαρακτηριστικών κυμάτων και γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αγωγών ανανέωσης. Ο μετασχηματισμός ύψους κύματος μέσω του αγωγού ανανέωσης αναλύθηκε για όλες τις πειραματικές συνθήκες. Η ευαισθησία του συντελεστή μετάδοσης κυμάτων σε σχέση με άλλες παραμέτρους διερευνήθηκε διεξοδικά προκειμένου να καθοριστεί ποιες παράμετροι θα μπορούσαν να προβλέψουν πιο αποτελεσματικά τον συντελεστή μετάδοσης κύματος. Παρατηρήθηκε ότι ο συντελεστής μετάδοσης κύματος αυξήθηκε όταν η περίοδος προσπίπτοντος κύματος, το πλάτος και το ύψος του αγωγού ανανέωσης αυξήθηκαν, το προσπίπτον κύμα έγινε πιο απότομο, το μήκος του αγωγού ανανέωσης μειώθηκε και η γωνία προσπίπτοντος κύματος πλησίασε τις 90ο. Στην ίδια έρευνα πρότειναν μια εμπειρική εξίσωση που συσχετίζει τον συντελεστή μετάδοσης κύματος με τα κυματικά χαρακτηριστικά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού ανανέωσης η οποία προέκυψε μέσω μη γραμμικής παλινδρόμησης.

Στην εργασία των Tsoukala et al., (2010), παρουσιάζονται και αναλύονται αποτελέσματα πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν σε διδιάστατη πειραματική εγκατάσταση προκειμένου να διερευνηθεί η μετάδοση κυμάτων και διαλυμένου οξυγόνου στις λιμενολεκάνες μέσω αγωγών ανανέωσης. Τα ύψη προσπίπτοντος κύματος και μεταδιδόμενων κυμάτων προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας κυματομετρητές για διάφορους συνδυασμούς χαρακτηριστικών κυμάτων και γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αγωγών ανανέωσης. Προέκυψε μια εμπειρική εξίσωση χρησιμοποιώντας ανάλυση παλινδρόμησης, η οποία συσχετίζει τον συντελεστή μετάδοσης κύματος με τα χαρακτηριστικά των κυμάτων και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού. Περαιτέρω, ο συντελεστής μετάδοσης οξυγόνου μέσω των αγωγών ανανέωσης, εκφράστηκε ως συνάρτηση των χαρακτηριστικών των κυμάτων και των διαστάσεων του αγωγού. Η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων και των πειραματικών μετρήσεων αποδείχθηκε πολύ ενθαρρυντική. Ωστόσο, όπως αναφέρουν απαιτείται η επαλήθευση της προτεινόμενης εξίσωσης με ακόμη περισσότερα πειραματικά δεδομένα και μετρήσεις πεδίου προκειμένου να χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία σχεδιασμού.

Πιο πρόσφατα, στην έρευνα των Tsoukala et al. (2014) παρουσιάστηκε μια σειρά από 63 πειράματα, τα οποία διεξήχθησαν σε ένα φυσικό μοντέλο ενός κυματοθραύστη σε ένα κανάλι, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της επίδρασης των κυματικών χαρακτηριστικών καθώς και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αγωγού ανανέωσης στο προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας, στη γένεση αρμονικών καθώς και στο συντελεστή μετάδοσης. Αποδείχθηκε ότι (i) η γένεση αρμονικών

κατάντη της κατασκευής είναι πιο έντονη όταν αυξάνεται η μη γραμμικότητα των κυμάτων, (ii) η γένεση αρμονικών και ο συντελεστής μετάδοσης επηρεάζονται κυρίως από τις διαστάσεις του αγωγού, ιδιαίτερα από το πλάτος του, καθώς σχετίζεται με την ενέργεια που μεταδίδεται στην υπήνεμη μεριά της κατασκευής και με την περίθλαση. Επιπλέον εφαρμόστηκε ένα διδιάστατο μαθηματικό μοντέλο συζευγμένου συστήματος λειτουργίας (CMS) για την αριθμητική προσομοίωση κυμάτων που διαδίδονται μέσω των αγωγών. Στην εν λόγω έρευνα παρουσιάστηκαν συγκρίσεις με τα πειραματικά δεδομένα με καλά αποτελέσματα για γραμμικά και ελαφρώς μη γραμμικά κύματα, αποδεικνύοντας τη χρησιμότητα του μοντέλου στον υπολογισμό της αποδοτικότητας ενός αγωγού ανανέωσης σε μια καθημερινή βάση λειτουργίας του λιμένα.

Στην έρευνα των Stamou et al. (2007) διερευνάται ο χρόνος ανανέωσης των υδάτων σε ημι-κλειστές παράκτιες περιοχές με τεχνητές χερσονήσους ή νησιά περίπλοκης γεωμετρίας. Ειδικότερα μελετάται η περιοχή ανάπτυξης στο νότιο τμήμα της χερσονήσου Qurayyah στο Durrat Alkhubar της Σαουδικής Αραβίας. Το πρώτο βήμα ήταν ο διαχωρισμός της περιοχής σε εσωτερική και εξωτερική. Η εσωτερική επιπροσθέτως χωρίστηκε σε 21 διαμερίσματα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με φανταστικά εσωτερικά όρια. Αντίστοιχα, η σύνδεση μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής περιοχής για την πλειοψηφία των διαμερισμάτων επιτυγχάνεται έμμεσα μέσω δύο ανοιγμάτων, ενώ μόλις τρία διαμερίσματα συνδέονται απ' ευθείας με αυτήν. Στη συνέχεια, με την χρήση του υδροδυναμικού μοντέλου προσδιορίζονται οι ταχύτητες ροής και οι ανταλλαγές ροής νερού στα εσωτερικά όρια μεταξύ των διαμερισμάτων, εκ των οποίων προκύπτουν και οι χρόνοι ανανέωσης των υδάτων. Το μοντέλο εκτελέστηκε για έξι σειρές υπολογισμών. Η πρώτη για τον προσδιορισμό της επίδρασης της παλιρροιακής ροής στους χρόνους ανανέωσης, ενώ οι υπόλοιπες πέντε για τον προσδιορισμό της επίδρασης του ανέμου. Συγκεκριμένα, έγινε μελέτη για πέντε διαφορετικές διευθύνσεις του. Οι αρθρογράφοι αναλύουν τα αποτελέσματα των υπολογισμών, κάνοντας προφανές ότι οι χρόνοι ανανέωσης για τα ύδατα των διαμερισμάτων που συνδέονται άμεσα με την εξωτερική περιοχή είναι εμφανώς μικρότεροι, της τάξεως των λίγων ημερών. Αντιθέτως, σε απομακρυσμένα διαμερίσματα κυρίως στο νότιο τμήμα παρατηρούνται αυξημένοι χρόνοι που ενδεχομένως να φτάσουν έως και αρκετούς μήνες. Αξιοσημείωτη η ευεργετική δράση των νότιων ανέμων, οι οποίοι μειώνουν τους χρόνους αισθητά. Την ακριβώς αντίθετη επίδραση παρουσιάζουν οι ανατολικοί άνεμοι, οι οποίοι δυσχεραίνουν την ανανέωση των υδάτων σε τουλάχιστον 10 διαμερίσματα. Συμπερασματικά, το άρθρο καταλήγει στη σημασία της εισαγωγής της έννοιας των διαμερισμάτων για τον ευκολότερο εντοπισμό των προβληματικών περιοχών ασθενούς κυκλοφορίας του νερού.

Στη διπλωματική της εργασία, η κα. Χριστοπούλου Μ.Ε. (2010) υπολογίζει τον χρόνο ανανέωσης των υδάτων στο αλιευτικό καταφύγιο «DILA» στη Λιβύη και ερευνά την πιθανή μείωση του χρόνου αυτού, τόσο με την χρήση αντλιών όσο και με τη διάνοιξη οπών ανανέωσης. Εισαγωγικά, επισημαίνεται η σημασία των παράκτιων κατασκευών για την προστασία των σκαφών, μέσα απαραίτητα για την τουριστική άνθιση. Ωστόσο, τονίζεται η υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων λόγω της δυσλειτουργίας και της ελλιπούς συντήρησής των μαρινών. Κρίνεται απαραίτητος επομένως, ο σωστός σχεδιασμός αλλά και η διαρκής παρακολούθησή τους. Ειδικότερα, όσον αφορά την ανανέωση των νερών τους είναι απαραίτητη η εξασφάλιση των φυσικών μηχανισμών με κυριότερες την παλίρροια και τον άνεμο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διαθέσιμες πρακτικές εκτίμησης της ποιότητας των υδάτων. Αρχικά, ένα πρόγραμμα παρακολούθησης των υδάτων σε όλη τη διάρκεια ζωής του έργου, τεχνική όμως ιδιαίτερα δαπανηρή. Εναλλακτικά, προτείνεται η χρήση και εφαρμογή εργαστηριακών μοντέλων, η οποία επίσης αποφεύγεται τόσο λόγω κόστους όσο και λόγω υψηλών απαιτήσεων σε χρόνο και χώρο. Τέλος, η πλέον ενδεδειγμένη τεχνική, αυτή των αριθμητικών μοντέλων, η οποία αν και απαιτεί υψηλό επίπεδο εξειδικευμένου δυναμικού υπερτερεί των δύο προηγούμενων στους προαναφερθείς τομείς, παρέχοντας μεγάλη ευελιξία. Στο κύριο μέρος της εργασίας περιγράφεται το κυκλοφορικό μοντέλο WINDCIR, με το οποίο θα υπολογιστούν οι χρόνοι ανανέωσης των υδάτων του αλιευτικού καταφυγίου DILA. Με την χρήση του ψευδοτριδιάστατου μοντέλου κυκλοφορίας προκύπτουν οι χρόνοι λόγω παλίρροιας και λόγω ανέμων. Από το συνδυασμό των δύο προκύπτει ο σύνθετος χρόνος ανανέωσης ίσος με 5.48 μέρες, ο οποίος κρίνεται μη ικανοποιητικός. Διερευνάται, ως εκ τούτου μια εξαναγκασμένη ανανέωση με την χρήση αντλιών και εναλλακτικά με διάνοιξη δύο

νέων εισόδων. Στην πρώτη περίπτωση, ο αντίστοιχος χρόνος ανανέωσης μειώθηκε στις 1.8 μέρες, που συνιστά σημαντική βελτίωση ειδικά την καλοκαιρινή περίοδο. Σημαντική διευκρίνιση ότι για τους υπολογισμούς έγινε χρήση του διδιάστατου οριζόντιου μοντέλου κυκλοφορίας για μέσο βάθος, μιας και οι οριζόντιες διαστάσεις είναι πολύ μεγαλύτερες από τις κατακόρυφες. Στην εναλλακτική περίπτωση διάνοιξης οπών, η μείωση είναι μικρότερη αλλά εξίσου σημαντική και συγκεκριμένα στις 4.1 μέρες, αποτέλεσμα της αύξησης του ρυθμού ροής που περνάει στο εσωτερικό της μαρίνας. Εν κατακλείδι, επαναλαμβάνεται η χρησιμότητα των μαθηματικών μοντέλων τόσο για τον υπολογισμό των χρόνων όσο και για την εύρεση της ιδανικής λύσης για τη βελτίωση της ανανέωσης των υδάτων, απαραίτητη προϋπόθεση για την αποφυγή δυσμενών επιπτώσεων στο υδάτινο οικοσύστημα.

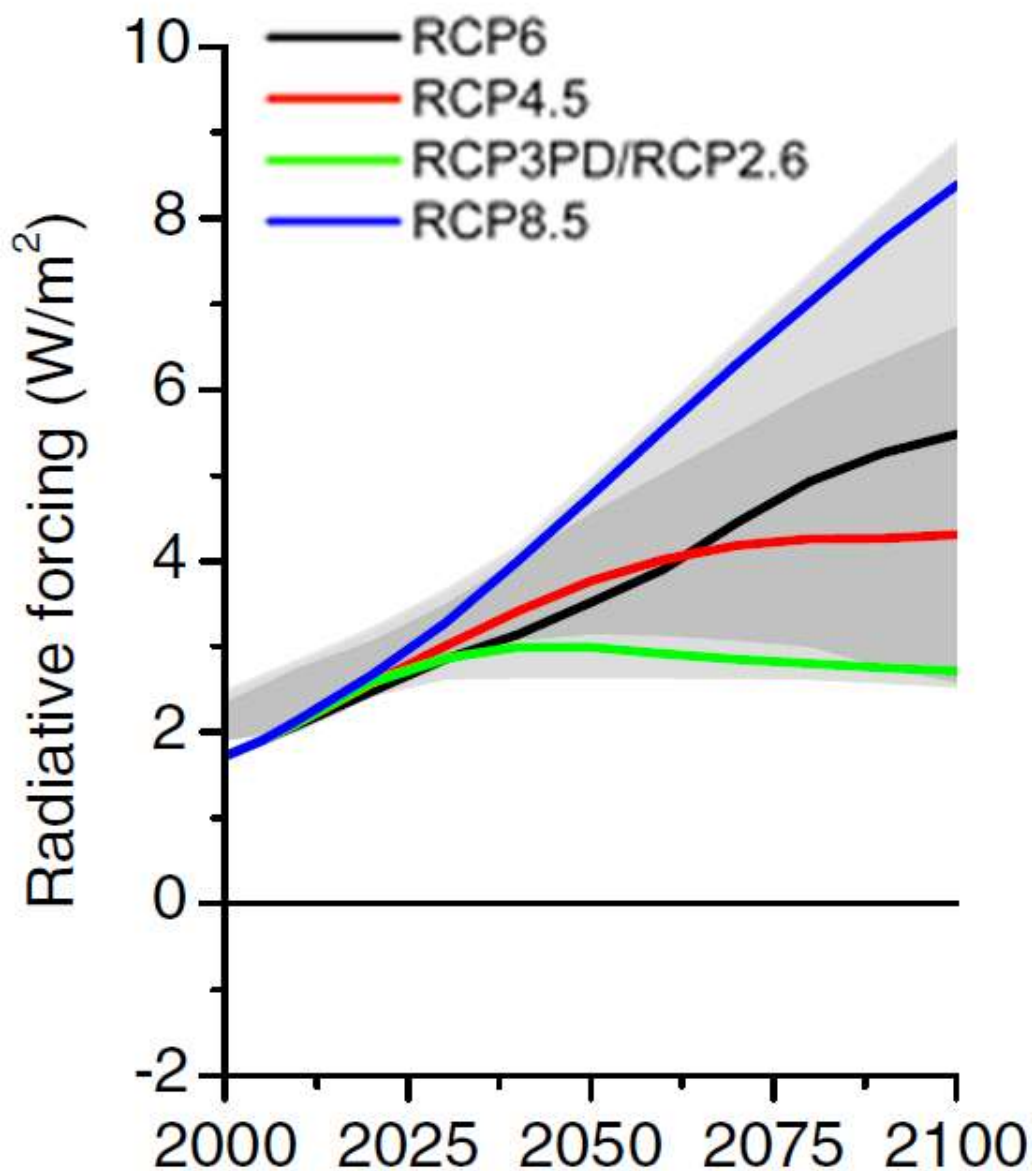
Στη διπλωματική εργασία του κ. Στεφανίδη Θ. (2015) διερευνάται η επίδραση της αύξησης των βασικών διαστάσεων δύο τυπικών τουριστικών λιμένων στην ανανέωση των υδάτων τους. Επιπλέον μελετάται και η σημειακή διαφυγή ενός συντηρητικού ρύπου από τη λιμενολεκάνη υπό τη διενέργεια ανεμογενών ρευμάτων. Οι δύο τυπικές διατάξεις, των οποίων η γεωμετρία διατηρεί απλή μορφή, μελετήθηκαν για τρία διαφορετικά χαρακτηριστικά πλάτη ανοίγματος της εισόδου της λιμενολεκάνης τους και ειδικότερα για πλάτη 20, 30 και 40 μέτρων. Η είσοδος βρίσκεται στο βόρειο μόλο. Η ακτογραμμή θεωρείται ευθύγραμμη, εκτείνεται κατά μήκος του άξονα Βορρά-Νότου και βρίσκεται στην ανατολική πλευρά των διατάξεων. Το βάθος της λιμενολεκάνης επιλέγεται σταθερό στα 5 μέτρα ενώ εσωτερικά υπάρχει μία προβλήτα πρόσδεσης των σκαφών. Η διαφορά των δύο διατάξεων έγκειται στον κυματοθραύστη. Στην πρώτη περίπτωση, επιλέγεται ενιαίος, κάθετος κυματοθραύστης στο νότιο μόλο σε αντίθεση με τη δεύτερη που ένα τμήμα του επιλέγεται κάθετο στο νότιο μόλο και ένα δεύτερο τμήμα, τους ενώνει υπό γωνία 45 μοιρών. Εξετάζονται τρία ανεμολογικά επεισόδια (ΝΔ, Δ, ΒΔ) σταθερής έντασης 3 ή 5 BF, τα οποία είτε επενεργούν μόνα τους ή ταυτόχρονα με παλιρροιακά ρεύματα, ημι-ημερήσιας παλίρροιας πλάτους 0,075 (1^ο σενάριο) ή 0,15 μέτρων (2^ο σενάριο). Το υδροδυναμικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του χρόνου ανανέωσης των υδάτων ήταν το MIKE 21 HD FLOW MODEL FM ενώ για τη διαφυγή του ρύπου, το MIKE 21 FM PT. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι η αύξηση του πλάτους ανοίγματος της εισόδου μικραίνει ως επί το πλείστον τους χρόνους ανανέωσης των υδάτων με ορισμένες εξαιρέσεις ωστόσο που δεν επέτρεψαν να προκύψει κάποια συσχέτιση μεταξύ χρόνων και διαστάσεων. Σχετικά με την επίδραση της παλίρροιας, έγινε σαφή η θετική επίδραση της στο φαινόμενο μειώνοντας δραματικά τους χρόνους. Όσον αφορά τη διαφυγή του ρύπου, καθοριστικός παράγοντας προέκυψε η αρχική θέση του μέσα στη λιμενολεκάνη σε συνδυασμό φυσικά με τη γεωμετρία της αλλά και τις υδροδυναμικές συνθήκες που επικρατούν σε αυτήν. Ο κ. Στεφανίδης (2015) καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η ανανέωση των υδάτων προκύπτει ως αλληλεπίδραση πολλών συνιστωσών (γεωμετρία λεκάνης, διάταξη τεχνικών έργων, κυματικά, ανεμολογικά και παλιρροιακά δεδομένα), γεγονός που καθιστά απαραίτητη την χρήση αριθμητικών εργαλείων για τον υπολογισμό της κατά το σχεδιασμό λιμενικών έργων.

Στην διπλωματική εργασία της κα. Λευκής Βικτωρίας Λοβέρδου (2011), στόχος ήταν ο καθορισμός της επίδρασης διαφόρων παραγόντων στον χρόνο ανανέωσης των υδάτων του Αμβρακικού κόλπου. Ο Αμβρακικός κόλπος, αν και υψηλής περιβαλλοντικής αξίας (πανίδα, χλωρίδα, αλιεία, τουρισμός) δέχεται μεγάλη ρυπαντική επιβάρυνση τόσο από την εντατική καλλιέργεια και από τις βιομηχανικές δραστηριότητες της περιοχής όσο και από τα έντονα φαινόμενα ευτροφισμού. Ειδικότερα διερευνάται ως προς το ζητούμενο, ο άνεμος, η παλίρροια, οι εισροές των ποταμών Αράχθου και Λούρου όπως και η μεταβολή του συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας. Ο άνεμος μελέτης επιλέγεται ο ΒΑ ταχύτητας 3 BF ως αυτός με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης. Επιλέγονται επίσης τρία χαρακτηριστικά εύρη για ελάχιστη, μέση και μέγιστη παλίρροια. Η επίλυση υλοποιήθηκε με χρήση του μαθηματικού μοντέλου FLOW-3DL, το οποίο δημιουργήθηκε από το Υπολογιστικό Κέντρο του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ με επιστημονική ευθύνη του καθηγητή Α.Ι. Στάμου. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για δύο αριθμητικά πλέγματα, ένα αραιό και ένα πυκνό. Από τα αποτελέσματα παρατηρούνται περίπου διπλάσιες παροχές για το αραιό πλέγμα συγκριτικά με το πυκνό άρα και μικρότεροι χρόνοι ανανέωσης. Ωστόσο πιο ακριβή αποτελέσματα θεωρούνται αυτά του πυκνού πλέγματος καθώς προσεγγίζουν

καλύτερα την αλληλεπίδραση με τα στερεά όρια και δίνουν πιο επαρκή πληροφορία για τον υποχώρο τους. Καθοριστικής σημασίας για τη μείωση των χρόνων ανανέωσης είναι η παλίρροια καθώς η μέγιστη, τους ελαχιστοποιεί σε όλα τα πιθανά σενάρια. Εξίσου σημαντική η επίδραση της παροχής των εξεταζόμενων ποταμών υπό την προϋπόθεση το εύρος της παλίρροιας να είναι μικρό. Αντιθέτως αμελητέα προκύπτει η επίδραση του ανέμου στο φαινόμενο. Από την ανάλυση ευαισθησίας γίνεται αντιληπτό ότι αύξηση των συντελεστών τυρβώδους συνεκτικότητας δυσχεραίνει την ανανέωση των υδάτων. Προτείνεται ωστόσο μια πιο ολοκληρωμένη έρευνα που θα συμπεριλαμβάνει τις διαφορές θερμοκρασίας, πυκνότητας και αλατότητας μέσα στον κόλπο για πιο ακριβή συμπεράσματα.

2.4 Κλιματική αλλαγή και ανανέωση υδάτων

Βασική παράμετρο για τον καθορισμό των σεναρίων παγκόσμιας εξέλιξης συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου RCPs (Representative Concentration Pathways) αποτελεί η μεταβολή της έντασης της ακτινοβολίας από την οποία προκύπτει η εκπομπή του όγκου αερίων θερμοκηπίου τα επόμενα χρόνια. Η μονάδα μέτρησης της ακτινοβολίας είναι τα Watt/m^2 . Τα σενάρια αυτά έχουν καταρτιστεί από το Intergovernmental Panel on Climate Change ή IPCC στο εξής. Τα αρχικά και επικρατέστερα σενάρια είναι τέσσερα και συγκεκριμένα τα RCP2.6, RCP4.5, RCP6 και RCP8.5 (Εικόνα 2.1). Στη συνέχεια, μετά από νέες μετρήσεις προστέθηκαν στα ήδη υπάρχοντα τα σενάρια RCP1.9, RCP3.4 και RCP7. Ο αριθμός κάθε σεναρίου προσδιορίζει την επιβαλλόμενη ακτινοβολία στο έτος 2100 που αυτό εκτιμά. Είναι εμφανές ότι όσο μεγαλύτερο είναι τόσο οι προβλέψεις του είναι πιο δυσσίωνες για τον πλανήτη μας. Συγκεκριμένα, το RCP2.6 πρόκειται για ένα αισιόδοξο σενάριο με χαμηλή ατμοσφαιρική ρύπανση και χαμηλές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Τα RCP4.5 και RCP6 αποτελούν μετριοπαθή σενάρια και πιο πιθανά να συμβούν, όπου η ατμοσφαιρική ρύπανση χαρακτηρίζεται μέτρια. Τέλος το πλέον απαισιόδοξο σενάριο είναι το RCP8.5 με την αύξηση των εκπομπών να κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα, το οποίο ωστόσο θεωρείται πολύ απίθανο να συμβεί. Στην παρούσα διπλωματική, τα δύο σενάρια που θα μελετηθούν είναι το RCP4.5 και το RCP8.5.



Εικόνα 2.1. Ακτινοβολία των Αντιπροσωπευτικών Διαδρομών Συγκέντρωσης. Van Vuuren et al – 2011 (sedac.ciesin.columbia.edu)

RCP 4.5

- Πιο πιθανό σενάριο
- Μετριοπαθές σενάριο με σταθεροποίηση ακτινοβολίας στα 4,5 W/m² μέχρι το 2100
- Λαμβάνει υπόψιν την εξάντληση των μη ανανεώσιμων καυσίμων
- Οι εκπομπές αερίων φτάνουν σε κορύφωση το έτος 2040 και ακολουθούν σταδιακή μείωση
- Μέτρια ατμοσφαιρική ρύπανση

RCP 8.5

- Λιγότερο πιθανό σενάριο
- Το πιο απαισιόδοξο με αύξηση της ακτινοβολίας στα 8,5 W/m² μέχρι το 2100
- Υπερεκτιμά τις προβλεπόμενες εκπομπές άνθρακα
- Υψηλή ατμοσφαιρική ρύπανση

Τα κλιματικά αυτά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ποικίλους σκοπούς κυρίως όμως για την πρόβλεψη του κλίματος. Ειδικότερα, είναι εφικτή η εκτίμηση διαφόρων περιβαλλοντικών μεταβλητών όπως είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, οι άνεμοι κ.α. και στη συνέχεια η σύγκριση τους με τα τωρινά δεδομένα. Η μεταβλητή αυτή για την οποία αντλεί δεδομένα η παρούσα διπλωματική εργασία είναι αυτή των ανέμων όχι μόνο για τα κλιματικά σενάρια RCP4.5, RCP8.5 αλλά και για την ιστορική αναδρομή μιας και στόχος αποτελεί η σύγκριση τους. Θα παρουσιαστούν πιο αναλυτικά στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ, ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

3.1 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση της διερεύνησης για την ανανέωση των υδάτων του λιμένα του Πειραιά βασίζεται στα εξής διακριτά βήματα.

1. Αρχικά συλλέχθηκαν τα ανεμολογικά δεδομένα τόσο για την ιστορική περίοδο αναφοράς όσο και για τις επόμενες δεκαετίες μέχρι το 2100 για τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5.
2. Έπειτα, δημιουργήθηκε ο βαθυμετρικός κάρναβος του επιβατικού λιμένα, με δεδομένα από τη βάση Navionics (www.navionics.com) και τη χρήση του σχεδιαστικού εργαλείου Autocad και του αριθμητικού εργαλείου Maris BTG. Στον βαθυμετρικό κάρναβο που δημιουργήθηκε ορίστηκαν 4 διατομές που καθορίζουν και τις υποπεριοχές-υπολιμενολεκάνες του λιμένα που μελετήθηκαν. Αυτές είναι η είσοδος του Λιμένα, ο εσωτερικός Λιμένας (λιμένας των Αλών), ο κεντρικός λιμένας και τέλος μία μικρή λιμενολεκάνη στα δυτικά της ακτής Μιαούλη.
3. Ακολούθησε η διαδικασία της προσομοίωσης με την χρήση του αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης Maris HYD. Αρχικά έγιναν κάποια τρεξίματα για να προσδιοριστεί από ποια ένταση ανέμου και πάνω αναπτύσσεται υδροδυναμική κυκλοφορία εντός της λιμενολεκάνης. Η προκαταρκτική προσομοίωση επεκτάθηκε και στην αναζήτηση του χρόνου που έπρεπε να τρέχει το μοντέλο ούτως ώστε να φτάσουμε σε συνθήκες μονιμοποίησης. Κατόπιν, έγιναν προσομοιώσεις για όλες τις εντάσεις και από όλες τις διευθύνσεις του ανέμου και υπολογίστηκαν οι ταχύτητες και οι διευθύνσεις ρεύματος.
4. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι παροχές και οι όγκοι κάθε υπολιμενολεκάνης. Αυτό επιτεύχθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος λογιστικών φύλλων Excel της Microsoft. Η παροχή υπολογίστηκε ως το γινόμενο της τρέχουσας ταχύτητας, επί το βάθος επί το μήκος κελιού (2,5 m). Για να διευκρινιστεί εάν η εκάστοτε παροχή πρόκειται για παροχή εισόδου ή εξόδου, μιας και οι δεύτερες είναι αυτές που μας αφορούν, χρησιμοποιήθηκε η μεταβλητή διεύθυνσης, η οποία μας πληροφορεί για την κατεύθυνση προς την οποία κινούνται τα ρεύματα. Σχετικά με τον υπολογισμό των όγκων κάθε λιμενολεκάνης, η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η μεταφορά των βαθών του Maris HYD στο Excel οπότε και δημιουργείται το σχέδιο του λιμανιού αφού τυπικά το βάθος της ξηράς ορίζεται ως 11 και ξεχωρίζει από το θαλάσσιο τμήμα. Έτσι είναι εύκολο να επιλεχθούν τα βάθη που μας ενδιαφέρουν και ως εκ τούτου να υπολογιστεί ο όγκος. Πλέον με απλή εφαρμογή του τύπου $Q=V/T$ προέκυψαν οι χρόνοι ανανέωσης για κάθε διεύθυνση ανέμου και για κάθε Bf ($T=V/Q$).
5. Τέλος έγινε συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων για να εξαχθούν τα συμπεράσματα.

3.2 Περιοχή μελέτης – Ο λιμένας του Πειραιά

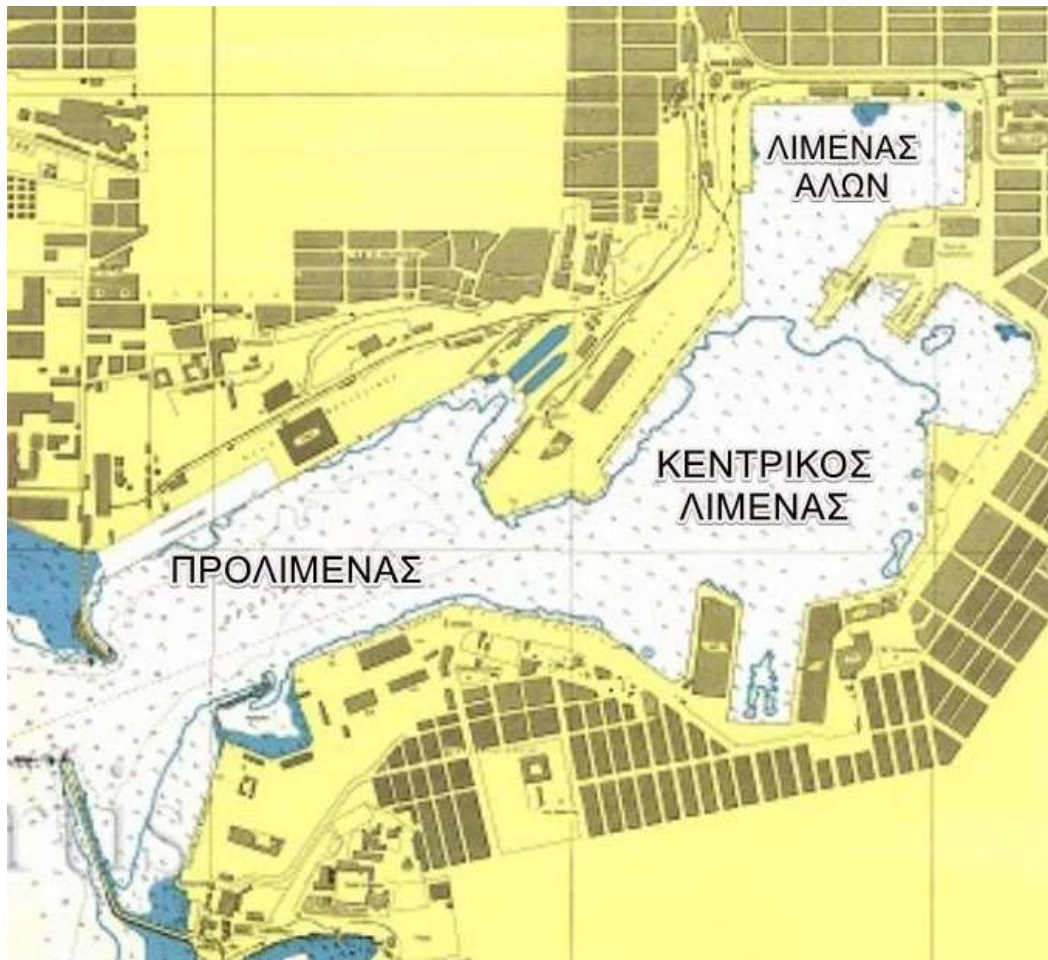
3.2.1 Σύνοψη ιστορική αναδρομή

Από τα αρχαία χρόνια ο λιμένας του Πειραιά (Εικόνα 3.1) θεωρούνταν ως ένα σπουδαίο εμπορικό αλλά και πολεμικό λιμάνι. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 479 π.Χ. με το πέρας της ναυμαχίας της Σαλαμίνας και ολοκληρώθηκε το 471 π.Χ. από το Θεμιστοκλή, αποτελώντας τη βάση του Αθηναϊκού στόλου. Στο πέρας των χρόνων ο λιμένας του Πειραιά υπέστη καταστροφές και φθορές από τους διαρκείς πολέμους, περνώντας υπό την κατοχή τόσο της Ρωμαϊκής αυτοκρατορίας (146 π.Χ. - 86 π.Χ.) όσο και της Οθωμανικής (1456 μ.Χ. - 1824 μ.Χ.). Ενδιάμεσα, κατά τη βυζαντινή περίοδο χρησιμοποιήθηκε ως ορμητήριο και πολεμικός ναύσταθμος από το Μεγάλο Αλέξανδρο και το στόλο του. Η ελληνική επανάσταση του 1821 οδήγησε στην απελευθέρωση του Πειραιά από τον Καραϊσκάκη το 1824, οπότε ο λιμένας πέρασε και πάλι σε ελληνικά χέρια. Το 1833, ο Πειραιάς αποτέλεσε ανεξάρτητο δήμο ενώ μόλις έναν χρόνο αργότερα η Αθήνα ανακηρύσσεται νέα πρωτεύουσα της χώρας, αποτελώντας μία νέα εποχή για τη σημασία και την κίνηση του λιμένα του Πειραιά. Την ίδια χρονιά ιδρύθηκαν το Τελωνείο και Υπολιμεναρχείο του Πειραιά και ξεκίνησαν οι εργασίες επέκτασης του λιμένα.

Χαρακτηριστικά αναφέρεται η κατασκευή του κρηπιδώματος του λιμένα των Αλών το 1868, όπου μετά από αναγκαίες εκβαθύνσεις, ξεκίνησε η λειτουργία του το 1886. Η εξέλιξη του λιμένα ήταν διαρκής. Για αυτό το λόγο ιδρύθηκε το 1930 ο «Οργανισμός Λιμένος Πειραιώς» (Ο.Λ.Π.) για την αυτόνομη διοίκηση του λιμένα. Η έναρξη του Β' παγκοσμίου πολέμου ωστόσο το 1939 όχι μόνο επηρέασε τη λειτουργία του λιμένα αλλά είχε ως αποτέλεσμα να καταστραφούν πολλά κρηπιδώματα και εγκαταστάσεις του. Με το πέρας του πολέμου και την αποχώρηση των Γερμανών ξεκίνησαν οι εργασίες ανακατασκευής, με το λιμένα να παίρνει σταδιακά τη μορφή που έχει σήμερα (Εικόνα 3.2). Χαρακτηριστικά αναφέρεται η επισκευή του κρηπιδώματος Ι-Κ του λιμένα Αλών όπως και η επισκευή της προβλήτας του όρμου Δραπετσώνας το 1953. Τα εγκαίνια των νέων προβλητών Καραισκάκη και Βασιλέως Κωνσταντίνου όπως και των κρηπιδωμάτων Βασιλειάδη, Β. Περιπτέρου και Νηοδόχης Δημαρχείου πραγματοποιήθηκαν το 1957, όπου και παραδόθηκαν προς εκμετάλλευση.



Εικόνα 3.1. Πανοραμική λήψη Λιμένα Πειραιά (olp.gr)



Εικόνα 3.2. Χάρτης Λιμένα Πειραιά (hartis.org)

3.2.2 Πλεονεκτήματα και πολιτική περιβάλλοντος

Εκτός από το μεγαλύτερο λιμάνι της Ελλάδας, ο Πειραιάς θεωρείται ένα από τα πλέον σημαντικά στη Μεσόγειο. Σε αυτό συμβάλλει η γεωγραφική του θέση καθώς συνδέει τρεις Ηπείρους, την Ασία με την Αφρική και την Ευρώπη. Ακολουθούν βασικά πλεονεκτήματα του λιμένα τόσο για την εθνική οικονομία όσο και για το διεθνές εμπόριο (olp.gr):

- Βρίσκεται μόλις 10 χιλιόμετρα απόσταση από το κέντρο της Αθήνας και αυτός είναι ο βασικότερος λόγος που αποτελεί την κύρια πύλη εισαγωγών και εξαγωγών της χώρας μας.
- Ευνοεί την ακτοπλοϊκή σύνδεση της ηπειρωτικής Ελλάδας με τα νησιά
- Συνιστά κέντρο διαμετακομιστικού εμπορίου (transit) για ολόκληρη τη Μεσόγειο χάρη στη δυνατότητα εξυπηρέτησης πλοίων κάθε τύπου και μεγέθους αλλά και της πλεονεκτικής γεωγραφικής του θέσης
- Λειτουργούν όλο το 24ωρο οι σταθμοί εμπορευματοκιβωτίων και αυτοκινήτων
- Πληθώρα τροφοδοτικών γραμμών (feeder services) συνδέει τον Πειραιά με την πλειοψηφία των κύριων λιμανιών της Μεσογείου
- Τηρεί όλους τους διεθνείς κανονισμούς ασφαλείας, ακολουθώντας ένα ολοκληρωμένο πληροφοριακό σύστημα που κατευθύνει τις λειτουργίες του

Εκ των παραπάνω γίνεται σαφές ότι ο λιμένας του Πειραιά διαθέτει ηγετικό ρόλο στην εμπορική δραστηριότητα της Μεσογείου. Απαραίτητη προϋπόθεση ωστόσο αποτελεί η εφαρμογή μιας περιβαλλοντικής πολιτικής, που θα εστιάζει στην προστασία του περιβάλλοντος και στην αειφόρο

ανάπτυξη. Σε αυτό έχει συμβάλει ο Οργανισμός Λιμένα Πειραιά, ο οποίος έχει αναπτύξει ένα μηχανισμό για την περιβαλλοντική αξιολόγηση των δραστηριοτήτων του, τηρώντας τόσο την ευρωπαϊκή και εθνική περιβαλλοντική νομοθεσία όσο και τους διεθνείς κανονισμούς. Εξάλλου το όραμα του οργανισμού είναι ένα ακόμα πιο εξελιγμένο σχέδιο οργάνωσης που θα στηρίζεται στις ακόλουθες δράσεις (olp.gr):

- Σύστημα παρακολούθησης ποιότητας περιβάλλοντος
- Σύστημα διαχείρισης περιβάλλοντος
- Διαχείριση αποβλήτων των πλοίων
- Αποτροπή θαλάσσιας ρύπανσης

Όπως είναι κατανοητό, η θαλάσσια ρύπανση είναι δυνατό να περιοριστεί αλλά όχι να εξαλειφθεί. Καθοριστικό ρόλο σε αυτό διαδραματίζει η ανανέωση των υδάτων που αποτελεί το βασικό αντικείμενο αυτής της Διπλωματικής Εργασίας και θα συζητηθεί αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

3.3 Αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης

3.3.1 Γενικά

Τα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης αποτελούν πολύτιμα εργαλεία για την προσομοίωση και την ανάλυση της συμπεριφοράς πολύπλοκων συστημάτων. Τα συστήματα αυτά αναφέρονται σε όλων των ειδών φαινόμενα, τόσο φυσικά και βιολογικά όσο και κοινωνικού ή οικονομικού περιεχομένου. Η προσομοίωση βασίζεται στην επίλυση μαθηματικών εξισώσεων, τα οποία περιγράφουν τη συμπεριφορά των συστημάτων και επιτυγχάνεται συνήθως με την χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η χρησιμότητα των αριθμητικών μοντέλων στηρίζεται στην ικανότητα τους να κατανοούν και να προβλέπουν τη συμπεριφορά του εκάστοτε συστήματος που μελετάνε. Εφαρμογή βρίσκουν σε πολλές επιστήμες μεταξύ των οποίων η ιατρική, η βιολογία, η μετεωρολογία, η υδρολογία και πολλές άλλες. Ορισμένες δυνατότητες που έχουν είναι η πρόβλεψη καιρικών φαινομένων και κλιματικών αλλαγών, ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση αεροσκαφών και αυτοκινήτων, η ανάλυση μολυσματικών ασθενειών και η ανάπτυξη του αντίστοιχου φαρμάκου ενώ ακόμα και σε επίπεδο οικονομίας μιας χώρας μπορούν να αναπτύξουν πολιτικές για την επίτευξη οικονομικής σταθερότητας.

Συνοψίζοντας, τα αριθμητικά μοντέλα αποτελούν ισχυρά εργαλεία στα χέρια αναλυτών, μηχανικών και ερευνητών, οι οποίοι με την αξιοποίηση τους μπορούν να κατανοήσουν καλύτερα τη συμπεριφορά των συστημάτων σε πολλούς τομείς. Κατανοώντας λοιπόν το πρόβλημα, προβαίνουν στην ανάπτυξη της βέλτιστης λύσης. Αυτό με τη σειρά του συμβάλλει στη βελτίωση της ποιότητας της ζωής των ανθρώπων μέσω της ανακάλυψης ή αναβάθμισης προϊόντων και υπηρεσιών.

Όσον αφορά οι λιμένες, που αποτελεί αντικείμενο της εργασίας αυτής, τα αριθμητικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση προκλήσεων σχετικές με την ανάπτυξη και λειτουργία των λιμενικών έργων. Ορισμένες από τις πτυχές που καλύπτουν επισημαίνονται παρακάτω:

- Υπολογίζουν τις κυματικές δυνάμεις, τα ρεύματα, την παλίρροια και την αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων στοιχείων του λιμένα. Αυτό επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της διάταξης και της λειτουργίας των λιμενικών εγκαταστάσεων, καθώς και της ασφάλειας των πλοίων και των επιβατών
- Προσομοιώνουν τη μεταφορά και τη διάχυση ρύπων όπως και την εναπόθεση - εκροή υλικών (άμμος, ιζήματα)
- Βοηθούν στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη λιμενικών εγκαταστάσεων, όπως κατασκευή αποβάθρας, προστατευτικών έργων, κυματοθραύστη και άλλων υποδομών. Τα μοντέλα αυτά

λαμβάνουν υπόψη τις δυναμικές συνθήκες, τις αλλαγές στη θάλασσα και τη γεωμορφολογία της περιοχής

- Έχουν εφαρμογή στη διαχείριση των λιμανιών, προβλέποντας τη ζήτηση, την κυκλοφορία των πλοίων και τη διαχείριση των εμπορευματοκιβωτίων
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης για την ανάπτυξη σχεδίων αντίδρασης σε έκτακτες καταστάσεις όπως σε πλημμύρες, τσουνάμι, ακραία καιρικά φαινόμενα, πετρελαιοκηλίδες. Επιτρέπουν επομένως στις λιμενικές αρχές να αξιολογήσουν τις πιθανές επιπτώσεις αυτών των καταστάσεων, αναπτύσσοντας στρατηγικές αντιμετώπισης
- Προσφέρουν επίσης τη δυνατότητα αξιολόγησης της οικονομικής απόδοσης των λιμανιών και βελτιστοποίηση της διαχείρισης των πόρων

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα αριθμητικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στους λιμένες πρέπει να ενημερώνονται και να προσαρμόζονται συνεχώς για να ανταποκριθούν στις μεταβαλλόμενες συνθήκες και την πρόοδο της επιστήμης. Η εξατομίκευση τους για κάθε λιμάνι είναι κρίσιμη, καθώς κάθε λιμάνι έχει τις δικές του μοναδικές συνθήκες και ιδιαιτερότητες. Η συλλογή των κατάλληλων δεδομένων αλλά και η αξιολόγηση των καταστάσεων είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία της εφαρμογής των αριθμητικών μοντέλων. Μόνο έτσι οι λιμένες θα επωφεληθούν από τις βέλτιστες πρακτικές και θα ανταποκριθούν αποτελεσματικά στις εξελισσόμενες απαιτήσεις της παγκόσμιας ναυτιλίας, ενώ ταυτόχρονα θα είναι σε θέση να υποστηρίξουν την προστασία του περιβάλλοντος και της βιώσιμης ανάπτυξης. Ακολουθεί σύντομη επισκόπηση του λογισμικού της Scientia Maris, χάρη στο οποίο κατέστη δυνατή η υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής.

Η σουίτα λογισμικών της Scientia Maris (Chondros et al. 2022), είναι μια πλατφόρμα προσομοίωσης που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό παράκτιων και λιμενικών έργων.

Η πλατφόρμα απαρτίζεται από τρία αριθμητικά εργαλεία, απαραίτητα για τη λειτουργία των αριθμητικών μοντέλων, τα οποία είναι τέσσερα και συνοψίζονται στη συνέχεια:

- **MARIS BTG:** Με δεδομένα σημεία νερού και ξηράς επιτρέπει τη δημιουργία ορθογώνιων πλεγμάτων βαθυμετρίας
- **MARIS SRF:** Με δεδομένο το πλέγμα βαθυμετρίας, επιτρέπει τη δημιουργία χαρτών δίνης και τριβής
- **MARIS EVI:** Ενσωματώνει τα αποτελέσματα μεταφοράς ιζημάτων που αντιστοιχούν σε διάφορα γεγονότα καταιγίδων
- **MARIS PMS:** Εφαρμόζεται σε μελέτες επιπτώσεων σε ακτές μέσω της προσομοίωσης των κυματικών φαινομένων όπως η διάθλαση και η θραύση
- **MARIS HMS:** Αποτελεί μία πιο προηγμένη έκδοση του MARIS PMS καθώς προσομοιώνει εκτός των άλλων φαινόμενα όπως η ανάκλαση και η περίθλαση ενώ μπορεί να εφαρμοστεί και για μελέτες διαταραχής κυμάτων σε λιμάνια και παράκτιες περιοχές
- **MARIS HYD:** Με δεδομένα κυματικά ή/και ανεμολογικά δεδομένα, προσομοιώνει την κυκλοφορία του νερού σε παράκτιες περιοχές και εφαρμόζεται κυρίως σε μελέτες ανανέωσης υδάτων
- **MARIS SDT:** Εφαρμόζεται σε μελέτες επιπτώσεων σε ακτές. Με δεδομένη τη δράση ρευμάτων και κυμάτων, υπολογίζει τους ρυθμούς μεταβολής ιζημάτων.

Εκ των αναφερθέντων, δύο χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Ένα αριθμητικό εργαλείο, το MARIS BTG και ένα αριθμητικό υδροδυναμικό μοντέλο, το MARIS HYD μιας και το αντικείμενο μελέτης είναι η ανανέωση των υδάτων του λιμένα του Πειραιά.

3.3.2 Μαθηματικό υπόβαθρο Maris HYD

Το υδροδυναμικό μοντέλο Maris HYD (Scientia Maris, 2022) προσομοιώνει την κίνηση του νερού σε παράκτιες περιοχές σε συνάρτηση με διάφορους παράγοντες φόρτισης, βασίζεται στις εξισώσεις κίνησης Navier-Stokes για ασυμπίεστη ροή μετασχηματισμένων κατά Reynolds, γνωστών και ως εξισώσεις Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS).

Οι εξισώσεις που διέπουν τις υπολογιστικές διεργασίες του μοντέλου, αποτελούνται από τις εξισώσεις συνέχειας και ορμής οι οποίες δίνονται παρακάτω:

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} + \frac{\partial(Vh)}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} = -\frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial y}{\partial x} \left(v_h h \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h h \frac{\partial U}{\partial y} \right) \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial y}{\partial x} \left(v_h h \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h h \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (3.3)$$

Όπου:

- $\bar{\eta}(m)$, η μέση ανύψωση της επιφάνειας της θάλασσας,
- U (m/s) και V (m/s), οι μέσες κατά βάθος (depth-averaged) ταχύτητες των ρευμάτων στον άξονα x και y , αντίστοιχα
- ρ (kg/m³) είναι η πυκνότητα του θαλασσινού νερού
- h (m), το συνολικό βάθος του νερού στην εξεταζόμενη θέση
- g (m/s²), η επιτάχυνση της βαρύτητας
- v_h είναι ο συντελεστής ιξώδους των οριζόντιων τυρβωδών δονήσεων
- S_{xx} , S_{xy} , S_{yy} είναι οι συνιστώσες των τάσεων ακτινοβολίας

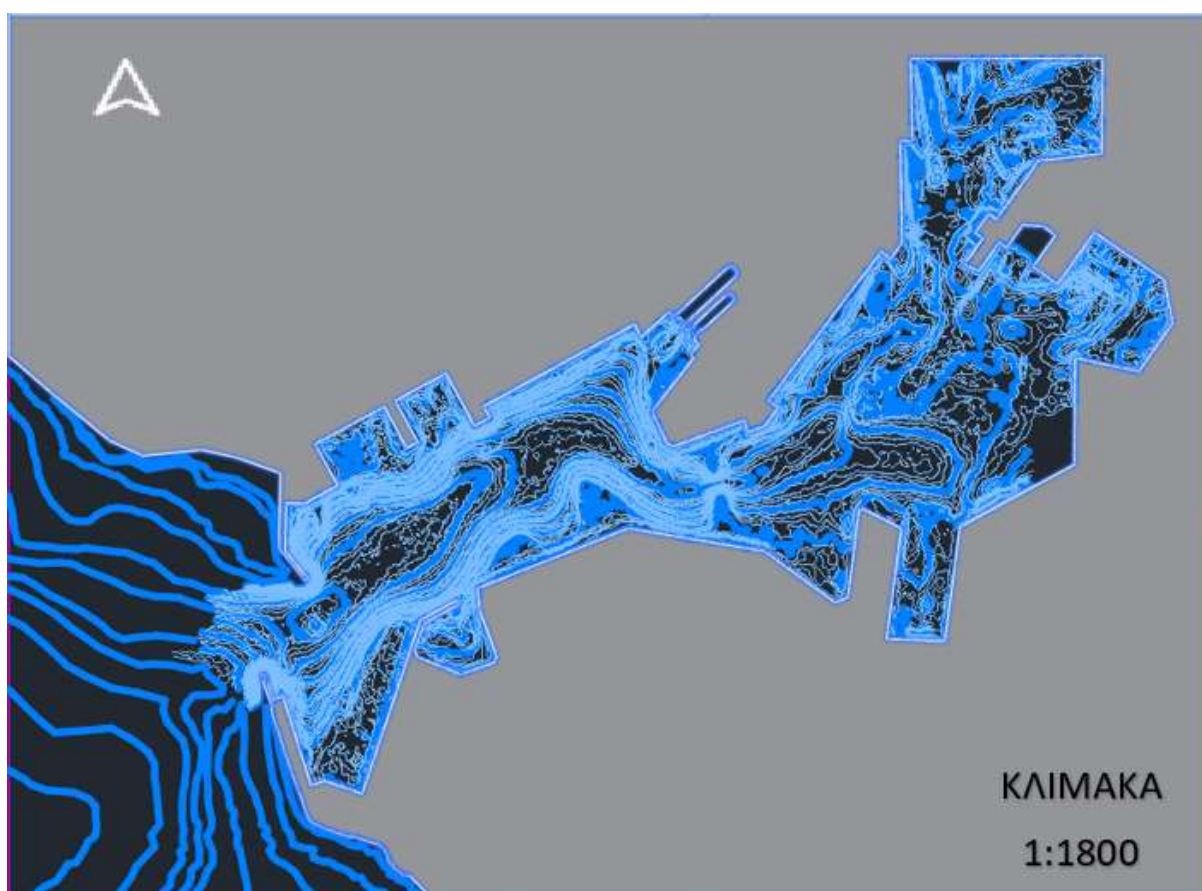
Οι αριθμητικοί υπολογισμοί πραγματοποιούνται σε εναλλασσόμενο αριθμητικό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων στο οποίο οι συνιστώσες της ταχύτητας υπολογίζονται μεταξύ γειτονικών σημείων στο επίπεδο της θάλασσας. Η επίλυση των εξισώσεων στο χρονικό πεδίο πραγματοποιείται μέσω ενός ρητού σχήματος Euler (Chondros et al., 2022).

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Εφαρμογή μεθοδολογίας

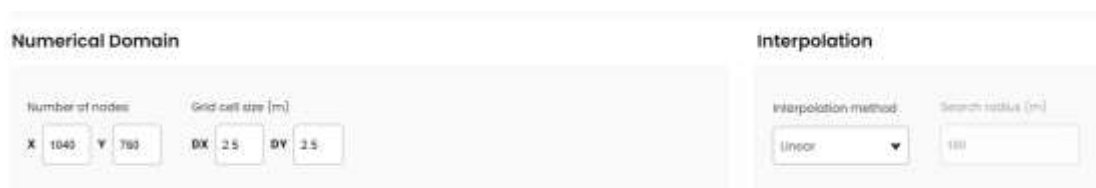
4.1.1 Κατασκευή βαθυμετρικού καννάβου

Προτεραιότητα αποτέλεσε η δημιουργία του καννάβου με την περιοχή μελέτης πάνω στην οποία θα γίνουν οι αναλύσεις μας. Ως γνωστόν, πρόκειται για το λιμένα του Πειραιά. Η επίτευξη αυτού πραγματοποιήθηκε μέσω του Maris BTG, το οποίο όμως απαιτούσε ως αρχεία εισόδου τις συντεταγμένες τόσο της ξηράς όσο και της θαλάσσιας περιοχής, συμπεριλαμβανομένου και του βάθους. Τα δεδομένα λήφθηκαν μέσω της πλατφόρμας Navionics ενώ με τη βοήθεια του Autocad δημιουργήθηκαν τα απαιτούμενα αρχεία συντεταγμένων (x,y,z).



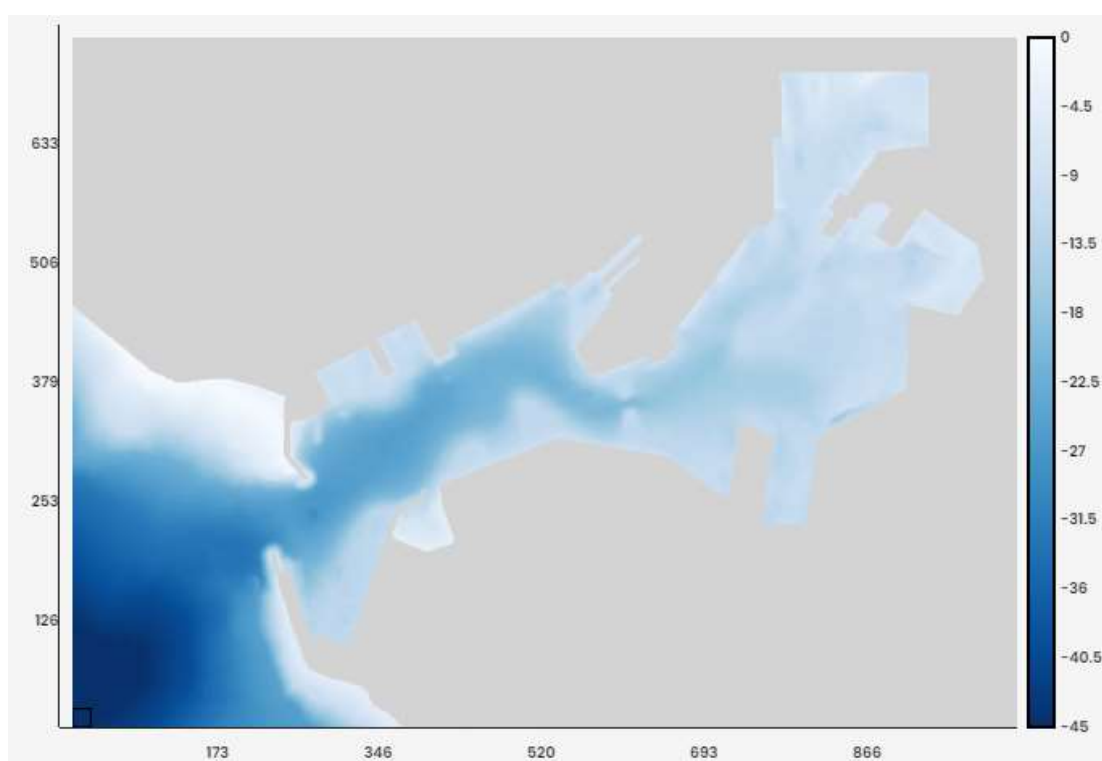
Εικόνα 4.1. Χάρτης Λιμένα Πειραιά με ισοβαθείς

Όσον αφορά το αριθμητικό εργαλείο Maris BTG, ορίστηκαν τα κελιά του καννάβου μήκους 2,5 m ανά διεύθυνση, τα οποία υπολογίστηκαν 1040 στη διεύθυνση x και 760 στη διεύθυνση y. Αυτό προκύπτει από τη διαίρεση του μήκους τους (2,5 m) από το συνολικό μήκος κάθε πλευράς της ορθογωνικής περιοχής μελέτης (βλ. παραπάνω σχήμα), όπως μετρήθηκε από το Autocad. Συγκεκριμένα 2600 μέτρα μετρήθηκε η οριζόντια πλευρά x και 1900 η κατακόρυφη πλευρά y. Επιλέχθηκε μέθοδος γραμμικής παρεμβολής.



Εικόνα 4.2. Maris BTG – Εισαγωγή κελιών, Επιλογή Μεθόδου

Πλέον το αριθμητικό εργαλείο Maris BTG, έχοντας επεξεργαστεί όλα τα δεδομένα εισόδου δημιουργεί αρχείο με την περιοχή μελέτης, η οποία θα αποτελέσει με τη σειρά της αρχείο εισόδου για το αριθμητικό μοντέλο Maris HYD. Ακολουθεί σχήμα με την περιοχή μελέτης όπως αυτή εκτυπώθηκε από το λογισμικό (Εικόνα 4.3). Αριστερά και κάτω αριθμούνται τα κελιά ενώ στην χρωματική κλίμακα στα δεξιά αναφέρονται τα βάθη ώστε να είναι διακριτή η διαφορά για κάθε περιοχή του λιμένα. Με γκρι χρωματίζεται η ξηρά.



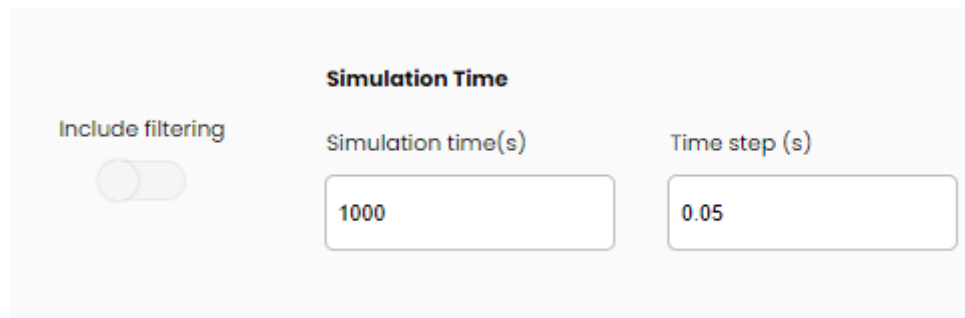
Εικόνα 4.3. Maris BTG – Περιοχή μελέτης – Βαθυμετρικός κάρναβος

Έχοντας προσδιορίσει την παράκτια περιοχή ενδιαφέροντος είναι δυνατή η εκτέλεση της προσομοίωσης με το Maris HYD. Για την επίτευξη αυτού είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των συνθηκών κυμάτων, ανέμου και παλίρροιας. Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν ασχολείται με τις κυματικές συνθήκες καθώς στόχος είναι να καθοριστεί η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην ανανέωση των υδάτων που οι κυματισμοί δεν συμμετέχουν και συνεπώς αγνοούνται. Εκτός των ανεμολογικών συνθηκών θα εξεταστεί ανεξάρτητα σε δεύτερη φάση και η επίδραση της παλίρροιας.

4.1.2 Κύκλος προκαταρκτικών προσομοιώσεων

Ο χρόνος προσομοίωσης που επιλέχθηκε είναι 1000 δευτερόλεπτα (s). Είχαν προηγηθεί δοκιμές με 600 και 800 δευτερόλεπτα αλλά τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τιμές δεν είχαν σταθεροποιηθεί σε

αυτούς τους χρόνους σε αντίθεση με τα 1000 δευτερόλεπτα όπου η σταθεροποίηση είχε επέλθει. Το χρονικό βήμα ορίστηκε στα 0.05 δευτερόλεπτα (s).



Εικόνα 4.4. Maris HYD – Χρόνος προσομοίωσης, Χρονικό βήμα για ανέμους

Στο πλαίσιο προκαταρκτικής μελέτης ήταν απαραίτητο να καθοριστεί ποια Beaufort θα χρησιμοποιηθούν στα τρεξίματα μιας και όπως είναι λογικό τα μικρότερα Beaufort θα προκαλούν μικρότερες ταχύτητες, οι οποίες είναι θεμιτό να αγνοηθούν αν παρουσιάζουν σημαντική διαφορά συγκριτικά με τα υπόλοιπα μεγαλύτερα Beaufort. Έτσι λοιπόν προέκυψε ότι για τα 3 πρώτα Beaufort, οι τρέχουσες ταχύτητες τείνουν στο μηδέν οπότε και αγνοούνται. Ενδεικτικά παρατίθεται ο χάρτης ταχυτήτων και διευθύνσεων για τα 3 Beaufort του βόρειου ανέμου (0°).



Εικόνα 4.5. Βόρειος άνεμος 0° , 3 Bf – Χάρτης ταχυτήτων και διευθύνσεων ρεύματος εντός της λιμενολεκάνης

Το ιζώδες δινών παρέχει απόσβεση των ταλαντώσεων μικρού μήκους κύματος και αντιπροσωπεύει φαινόμενα κλίμακας υποδικτύου. Χρησιμοποιείται για την εξάλειψη αριθμητικών αστάθειας ή τη

μείωση των ταχυτήτων ρεύματος στον τομέα. Οι τυπικές τιμές αυτού του συντελεστή, για εφαρμογές μηχανικής, κυμαίνονται από 0 έως 15. Στην περίπτωση μας επιλέχθηκε συντελεστής ιξώδους 0,1.

Αντίστοιχα, η κάτω τριβή καθορίζεται ως παράμετρος τραχύτητας Manning είτε χωρικά σταθερή για ολόκληρο τον τομέα είτε χωρικά μεταβαλλόμενη εισάγοντας ένα πλέγμα ίδιων διαστάσεων και απόστασης με το πλέγμα βαθυμετρίας, που περιέχει πολλές παραμέτρους τραχύτητας Manning. Μια αύξηση της παραμέτρου της τριβής του πυθμένα σε ρηχά βάθη νερού συνήθως οδηγεί σε αυξημένη απώλεια ενέργειας και συνεπώς σε μειωμένες ταχύτητες ρεύματος. Για αυτόν το λόγο ο συντελεστής τριβής επιλέχθηκε χαμηλός και συγκεκριμένα 0,2.

4.1.3 Δεδομένα εξόδου

Το Maris HYD περιλαμβάνει ένα πλήθος διαθέσιμων μεταβλητών εξόδου για τις οποίες μπορείς να εξαγάγεις αποτελέσματα. Από αυτές, χρήσιμες για το αντικείμενο μελέτης μας είναι η τρέχουσα ταχύτητα C, η κατεύθυνση D και το συνολικό βάθος T για τον υπολογισμό των παροχών και εκ των υστέρων, του χρόνου ανανέωσης των υδάτων.

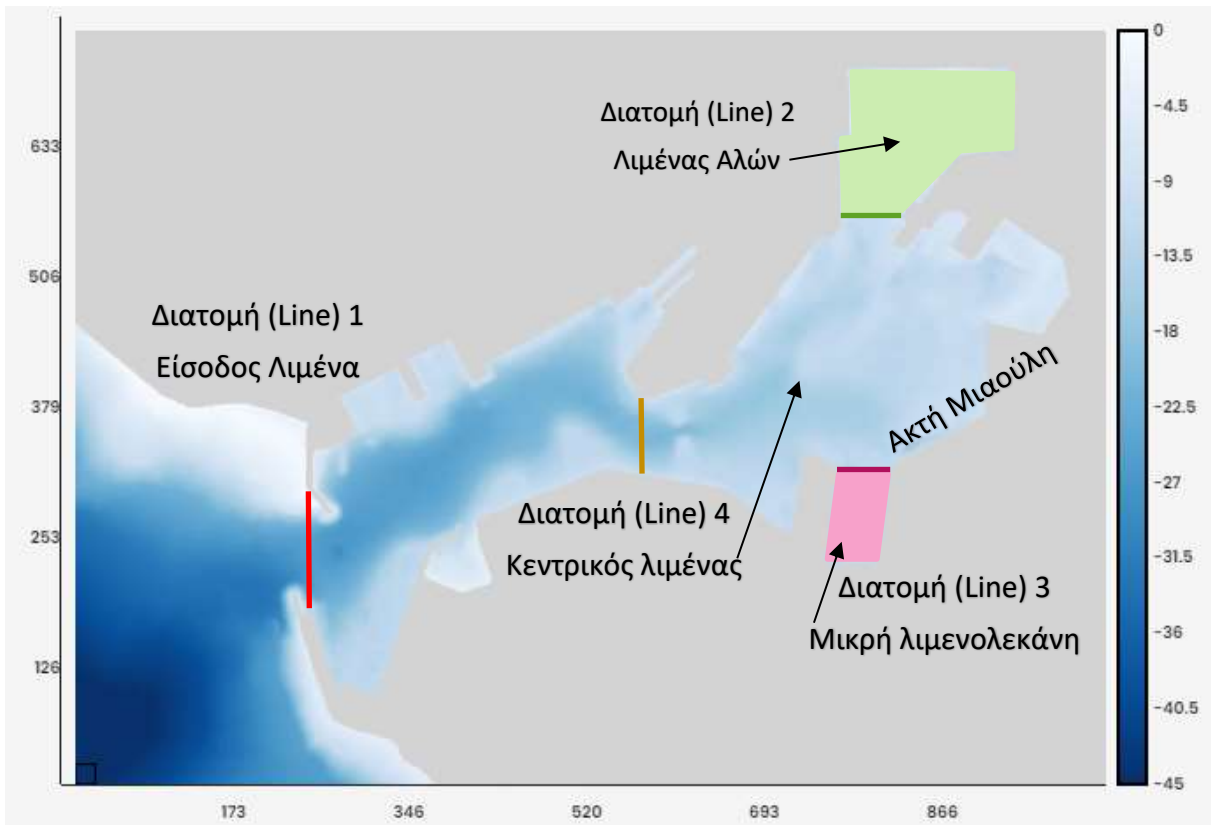
The image shows a screenshot of the Maris HYD software interface. It displays three output variables, each with a checked checkbox and a text input field:

- Current Speed:** The checkbox is checked, and the text input field contains "C_0_4".
- Current Direction:** The checkbox is checked, and the text input field contains "D_0_4".
- Total Depth:** The checkbox is checked, and the text input field contains "T_0_4".

Εικόνα 4.6. Maris HYD – Μεταβλητές εξόδου

4.1.4 Προσδιορισμός περιοχών ελέγχου – Συνολική λιμενολεκάνη και υπολιμενολεκάνες

Όπως φαντάζει λογικό, το σημείο εξόδου των υδάτων του λιμένα είναι η είσοδος του λιμένα καθορίζοντας την ανανέωση των υδάτων για τη συνολική λιμενολεκάνη. Εκεί επικεντρώνεται η μελέτη μας, λαμβάνοντας υπόψιν το συνολικό όγκο ώστε να υπολογιστούν οι χρόνοι ανανέωσης. Το μοντέλο ωστόσο μας δίνει τη δυνατότητα να ορίσουμε υποπεριοχές μέσα στο λιμένα για να αντλήσουμε πληροφορίες και για επιμέρους - πιο δυσμενείς - λιμενολεκάνες, όπου δεν παρατηρούνται υψηλές ταχύτητες και ενδεχομένως να παρουσιάσουν πρόβλημα στην ανανέωση των υδάτων τους. Τη δυνατότητα αυτή εκμεταλλεύτηκε η παρούσα εργασία καθώς παρατηρήθηκαν σημεία με ελάχιστη έως μηδενική κίνηση του νερού. Εκτός αυτού κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστούν χωριστά και κάποιες χαρακτηριστικές περιοχές του λιμένα με δική τους ονομασία. Έτσι, εκτός της βασικής διατομής εισόδου λιμένα (Line 1) καθορίστηκαν άλλες 3 διατομές, αυτή του λιμένα Αλών (Line 2), αυτής του κεντρικού λιμένα (Line 4) και τέλος μίας μικρής λιμενολεκάνης στο νοτιοανατολικό κομμάτι του λιμένα δυτικά της ακτής Μιαούλη (Line 3). Δίνεται το σχήμα της περιοχής μελέτης (Εικόνα 4.7) όπως αυτό προέκυψε από το Maris BTG, σημειωμένων των διατομών που μελετήθηκαν όπως και τα κελιά του καννάβου που τις ορίζουν (Πίνακας 4.1).



Εικόνα 4.7. Διατομές εξόδου υδάτων υποπεριοχών μελέτης

Πίνακας 4.1. Αριθμός πρώτου και τελευταίου κελιού στις 2 διευθύνσεις – Διατομές 1-4

<p>Plot Lines</p> <p>Plot Line 1 Plot Line 2 Plot Line 3 Plot Line 4</p> <p>Bounding Points & Grid Cell Node Numbers</p> <p>First point: X 235 Y 173 Last point: X 235 Y 299</p>	<p>Plot Lines</p> <p>Plot Line 1 Plot Line 2 Plot Line 3 Plot Line 4</p> <p>Bounding Points & Grid Cell Node Numbers</p> <p>First point: X 763 Y 551 Last point: X 828 Y 551</p>
<p>Plot Lines</p> <p>Plot Line 1 Plot Line 2 Plot Line 3 Plot Line 4</p> <p>Bounding Points & Grid Cell Node Numbers</p> <p>First point: X 772 Y 318 Last point: X 820 Y 318</p>	<p>Plot Lines</p> <p>Plot Line 1 Plot Line 2 Plot Line 3 Plot Line 4</p> <p>Bounding Points & Grid Cell Node Numbers</p> <p>First point: X 575 Y 312 Last point: X 575 Y 388</p>

4.2 Δεδομένα ανεμολογικά και θαλάσσιας στάθμης

4.2.1 Ανεμολογικά δεδομένα

Τα ανεμολογικά δεδομένα αποκτήθηκαν από την Ευρωπαϊκή βάση δεδομένων Copernicus Climate Data Store, και συγκεκριμένα από το προϊόν CORDEX regional climate model data on single levels (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cordex-domains-single-levels?tab=form>). Το προϊόν παρέχει μέσες ημερήσιες τιμές ταχύτητας ανέμου για τρεις χρονικές περιόδους, μια ιστορική που καλύπτει τη χρονική περίοδο 1976-2005, το μετριοπαθές σενάριο RCP4.5 και το δυσμενές RCP 8.5. Τα δύο σενάρια RCP καλύπτουν συνολικά την περίοδο 2041-2100. Για τα ιστορικά δεδομένα οι οριακές συνθήκες προέρχονται από τις προσομοιώσεις του κλιματικού μοντέλου ERA-5 Interim του ινστιτούτου ECMWF, ενώ για τα σενάρια RCP οι οριακές συνθήκες προέρχονται από προβλέψεις παγκόσμιων κλιματικών μοντέλων για την μελλοντική εξέλιξη μιας σειράς κλιματικών και σοσιοοικονομικών δεικτών. Τα δεδομένα ταχύτητας ανέμου για την περιοχή της Μεσογείου παρέχονται σε ορθογωνικό κάρναβο με διακριτοποίηση $0.11^\circ \times 0.11^\circ$ στις δύο χωρικές διευθύνσεις. Το σημείο εξαγωγής των ανεμολογικών δεδομένων από τη βάση Copernicus Climate Data Store έχει συντεταγμένες $37^\circ 55' 0.29''\text{B}$, $23^\circ 36' 4.74''\text{A}$ και απεικονίζεται στην (Εικόνα 4.8) σε σχέση με τη θέση του Λιμένα.



Εικόνα 4.8. Σημείο εξαγωγής ανεμολογικών δεδομένων από Copernicus Climate Data Store

Οι άνεμοι που θα μελετηθούν είναι 12 και χωρίζονται ανά 30 μοίρες. Ο άνεμος των 0° (ή των 360°) είναι ο βόρειος άνεμος και οι υπόλοιποι αριθμούνται δεξιόστροφα. Στην ουσία οι μοίρες μας δείχνουν την κατεύθυνση από την οποία έρχεται ο άνεμος (π.χ. ανατολικός - 90° , νότιος - 180° , δυτικός - 270° κ.ο.κ.). Τέλος παρουσιάζεται και ένας $5^{\text{ος}}$ πίνακας, ο οποίος προσφέρει τις συχνότητες εμφάνισης των ανέμων που παρατηρήθηκαν την ιστορική περίοδο αναφοράς 1976 – 2005 (Πίνακας 4.6). Να επισημανθεί ότι οι συχνότητες αυτές των ανέμων δεν χρησιμοποιήθηκαν στο λογισμικό αλλά η χρήση τους υφίσταται στη σύγκριση των αποτελεσμάτων που θα παρουσιαστεί στην επόμενη ενότητα.

Πίνακας 4.2. Ανεμολογικά δεδομένα RCP4.5_2041-2070

Wind Speed (Bf)													
Bf	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°	210.0°	240.0°	270.0°	300.0°	330.0°	Percentage
0	0.064%	0.079%	0.051%	0.049%	0.064%	0.060%	0.038%	0.082%	0.077%	0.064%	0.071%	0.079%	0.777%
1	2.837%	3.548%	1.996%	1.300%	1.166%	1.172%	1.197%	1.024%	1.084%	1.051%	1.320%	1.817%	19.514%
2	6.257%	3.738%	1.804%	1.142%	1.647%	2.389%	3.054%	2.356%	2.080%	2.725%	2.513%	4.661%	34.364%
3	9.554%	2.078%	0.620%	0.342%	0.563%	1.764%	3.259%	2.011%	1.610%	3.555%	2.062%	3.272%	30.690%
4	4.714%	0.711%	0.146%	0.079%	0.159%	0.938%	1.459%	0.594%	0.424%	2.232%	0.587%	0.835%	12.879%
5	0.380%	0.042%	0.009%	0.011%	0.040%	0.249%	0.353%	0.064%	0.020%	0.336%	0.033%	0.071%	1.607%
6	0.011%	0.002%	-	-	0.007%	0.040%	0.082%	0.002%	-	0.004%	0.004%	0.002%	0.155%
7	-	-	-	-	0.002%	0.002%	0.009%	-	-	-	-	-	0.013%
	23.817%	10.198%	4.626%	2.923%	3.648%	6.615%	9.450%	6.134%	5.295%	9.967%	6.591%	10.737%	100.000%

Πίνακας 4.3. Ανεμολογικά δεδομένα RCP4.5_2071-2100

Wind Speed (Bf)													
Bf	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°	210.0°	240.0°	270.0°	300.0°	330.0°	Percentage
0	0.078%	0.098%	0.071%	0.068%	0.068%	0.073%	0.087%	0.071%	0.073%	0.066%	0.068%	0.078%	0.899%
1	2.836%	3.580%	2.051%	1.275%	1.143%	1.173%	1.063%	1.084%	1.027%	1.070%	1.344%	1.718%	19.364%
2	6.217%	3.728%	1.567%	1.200%	1.611%	2.343%	3.114%	2.393%	1.996%	2.752%	2.544%	4.513%	33.980%
3	9.510%	1.996%	0.602%	0.342%	0.637%	1.948%	3.299%	1.969%	1.739%	3.701%	2.174%	3.089%	31.007%
4	4.748%	0.698%	0.116%	0.082%	0.167%	0.961%	1.506%	0.616%	0.424%	2.165%	0.714%	0.769%	12.966%
5	0.303%	0.062%	0.023%	0.016%	0.043%	0.246%	0.324%	0.073%	0.027%	0.347%	0.080%	0.080%	1.624%
6	0.011%	0.005%	-	-	0.002%	0.057%	0.057%	0.005%	-	0.009%	0.005%	0.002%	0.153%
7	-	-	-	-	-	-	0.007%	-	-	-	-	-	0.007%
	23.703%	10.167%	4.431%	2.984%	3.671%	6.801%	9.457%	6.210%	5.286%	10.110%	6.929%	10.249%	100.000%

Πίνακας 4.4. Ανεμολογικά δεδομένα RCP8.5_2041-2070

Wind Speed (Bf)													
Bf	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°	210.0°	240.0°	270.0°	300.0°	330.0°	Percentage
0	0.077%	0.091%	0.086%	0.086%	0.075%	0.073%	0.064%	0.095%	0.091%	0.066%	0.060%	0.064%	0.927%
1	2.950%	3.641%	2.098%	1.305%	1.157%	1.183%	1.086%	1.051%	1.093%	1.175%	1.296%	1.844%	19.878%
2	6.260%	3.096%	1.643%	1.148%	1.627%	2.528%	3.144%	2.316%	2.000%	2.853%	2.614%	4.431%	34.261%
3	9.223%	1.930%	0.627%	0.296%	0.559%	1.859%	3.383%	2.128%	1.819%	3.636%	2.232%	3.100%	30.792%
4	4.219%	0.682%	0.079%	0.086%	0.130%	0.859%	1.497%	0.530%	0.470%	2.281%	0.715%	0.850%	12.400%
5	0.340%	0.040%	0.002%	0.007%	0.035%	0.263%	0.316%	0.064%	0.024%	0.351%	0.057%	0.071%	1.570%
6	0.007%	-	-	-	0.007%	0.049%	0.086%	-	0.002%	0.009%	-	0.002%	0.161%
7	-	-	-	-	-	0.004%	0.007%	-	-	-	-	-	0.011%
	23.075%	10.079%	4.535%	2.928%	3.590%	6.818%	9.582%	6.184%	5.500%	10.371%	6.975%	10.362%	100.000%

Πίνακας 4.5. Ανεμολογικά δεδομένα RCP8.5_2071-2100

Bf	Wind Speed (Bf)												Percentage
	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°	210.0°	240.0°	270.0°	300.0°	330.0°	
0	0.094%	0.087%	0.103%	0.089%	0.096%	0.082%	0.084%	0.075%	0.062%	0.089%	0.080%	0.075%	1.015%
1	3.023%	3.669%	2.241%	1.266%	1.259%	1.289%	1.289%	1.118%	1.168%	1.180%	1.389%	1.828%	20.726%
2	6.544%	3.673%	1.631%	1.113%	1.579%	2.284%	3.135%	2.352%	2.040%	2.647%	2.428%	4.575%	34.000%
3	9.380%	2.017%	0.595%	0.324%	0.529%	1.823%	3.390%	2.113%	1.759%	3.377%	2.079%	3.078%	30.464%
4	4.365%	0.646%	0.107%	0.064%	0.135%	0.808%	1.520%	0.561%	0.459%	2.197%	0.625%	0.794%	12.280%
5	0.335%	0.057%	0.009%	0.009%	0.023%	0.192%	0.281%	0.039%	0.027%	0.285%	0.037%	0.075%	1.369%
6	0.011%	0.002%	-	-	0.007%	0.046%	0.052%	-	-	0.011%	0.005%	0.002%	0.137%
7	-	-	-	-	-	0.007%	0.002%	-	-	-	-	-	0.009%
	23.751%	10.151%	4.686%	2.866%	3.628%	6.530%	9.754%	6.258%	5.515%	9.793%	6.642%	10.427%	100.000%

Πίνακας 4.6. Ανεμολογικά δεδομένα_1976-2005

Bf	Wind Speed (Bf)												Percentage
	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°	210.0°	240.0°	270.0°	300.0°	330.0°	
0	0.096%	0.096%	0.091%	0.071%	0.071%	0.075%	0.062%	0.071%	0.068%	0.068%	0.089%	0.082%	0.940%
1	2.804%	3.815%	2.247%	1.341%	1.136%	1.161%	1.282%	1.015%	1.136%	1.095%	1.294%	1.770%	20.097%
2	6.283%	3.609%	1.745%	1.307%	1.638%	2.464%	3.192%	2.398%	1.928%	2.815%	2.482%	4.570%	34.431%
3	9.281%	2.049%	0.579%	0.379%	0.602%	1.866%	3.319%	2.051%	1.837%	3.552%	2.046%	3.201%	30.763%
4	4.198%	0.700%	0.107%	0.080%	0.114%	0.922%	1.417%	0.513%	0.408%	2.186%	0.623%	0.878%	12.146%
5	0.358%	0.057%	-	0.007%	0.048%	0.230%	0.322%	0.057%	0.030%	0.262%	0.025%	0.071%	1.467%
6	0.016%	-	-	-	0.009%	0.034%	0.066%	0.002%	-	0.007%	-	0.002%	0.137%
7	0.002%	-	-	-	-	0.002%	0.014%	-	-	-	-	-	0.018%
	23.038%	10.326%	4.770%	3.185%	3.618%	6.755%	9.673%	6.107%	5.407%	9.986%	6.559%	10.574%	100.000%

Σχετικά με το Maris HYD, τα ανεμολογικά δεδομένα εισόδου που απαιτεί είναι η κατεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου. Η ταχύτητα πρέπει να είναι σε μονάδες m/s και όχι Bf οπότε χρησιμοποιήθηκε η αντίστοιχη μετατροπή (Πίνακας 4.7).

Πίνακας 4.7. Αντιστοίχιση Bf με άλλες μονάδες

Beaufort	Knots	m/s	km/h	mph	Label
0	1	0-0.2	1	1	Calm
1	1-3	0.3-1.5	1-5	1-3	Light Air
2	4-6	1.6-3.3	6-11	4-7	Light Breeze
3	7-10	3.4-5.4	12-19	8-12	Gentle Breeze
4	11-15	5.5-7.9	20-28	13-17	Moderate Breeze
5	16-21	8.0-10.7	29-38	18-24	Fresh Breeze
6	22-27	10.8-13.8	39-49	25-30	strong Breeze
7	28-33	13.9-17.1	50-61	31-38	Near Gale
8	34-40	17.2-20.7	62-74	39-46	Gale
9	41-47	20.8-24.4	75-88	47-54	Severe Gale
10	48-55	24.5-28.4	89-102	55-63	Strong storm
11	56-63	28.5-32.6	103-117	64-73	Violent Storm
12	64-71	>32.7	>118	>74	Hurricane

Μιας και για κάθε Bf αντιστοιχεί ένα εύρος τιμών m/s, επιλέγεται συντηρητικά η μέγιστη τιμή (4 Bf – 7.9 m/s, 5 Bf – 10.7 m/s, 6 Bf – 13.8 m/s, 7 Bf – 17.1 m/s). Σε αυτό το σημείο, πρέπει να σημειωθεί ότι τα μόνα Bf για τα οποία πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις ήταν τα προαναφερθέντα, δηλαδή τα 4,5,6 και 7 Bf. Αυτό συνέβη για 2 λόγους. Ο προφανής, για τον οποίο το άνω όριο είναι τα 7 Bf προκύπτει από τους πίνακες συχνότητας και φαίνεται ότι δεν παρατηρούνται άνεμοι μεγαλύτεροι των 7 Bf για οποιαδήποτε κατεύθυνση ανέμου (Πίνακας 4.2 - Πίνακας 4.6). Αντιθέτως, τα Bf 1, 2 και 3 παρατηρούνται και μάλιστα καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό συχνότητας. Παρόλα αυτά μετά από δοκιμές για αυτά τα Bf, οι ταχύτητες των ρευμάτων που παρατηρήθηκαν ήταν πολύ μικρές και έτσι η επίδραση τους στο φαινόμενο της ανανέωσης των υδάτων κρίθηκε αμελητέα οπότε και αγνοήθηκαν.



Εικόνα 4.9. Maris HYD – Ένταση και κατεύθυνση ανέμου – Βόρειος άνεμος 4 Bf

4.2.2 Παλίρροιακά δεδομένα

Ο δεύτερος φυσικός μηχανισμός που δημιουργεί υδροδυναμική κυκλοφορία εντός λιμενολεκανών και κλειστών κόλπων είναι η παλίρροια. Η παλίρροια είναι ένα φυσικό φαινόμενο που σχετίζεται με την περιοδική άνοδο και πτώση της θαλάσσιας στάθμης. Η παλίρροια είναι σημαντική για το περιβάλλον, καθώς επηρεάζει την κυκλοφορία του νερού, τη διακίνηση των θρεπτικών ουσιών και τη ζωή των οργανισμών που ζουν στις παράκτιες περιοχές. Έχει επίσης σημαντικές επιπτώσεις για την ανθρώπινη δραστηριότητα. Η κατανόηση των παλίρροϊκών κύκλων είναι σημαντική για τη ναυτιλία, την αλιεία, την ακτοπλοΐα και την κατασκευή παράκτιων υποδομών. Επιπλέον, η ενέργεια της παλίρροιας μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της χρήσης των παλίρροϊκών φραγμάτων και άλλων τεχνολογιών παλίρροιας. Η παλίρροια διακρίνεται στην αστρονομική, η οποία συντελείται λόγω της έλξης σελήνης και γης, και στην μετεωρολογική, η οποία

συντελείται λόγω της δράσης του ανέμου και της ατμοσφαιρικής πίεσης. Στην παρούσα διπλωματική εξετάζεται η πρώτη, δηλαδή η αστρονομική παλίρροια, η οποία συντελείται καθημερινά με ημήμερησια περίοδο, δηλαδή σε μία περίοδο περίπου 12 ωρών εμφανίζεται μια πλήμμη και μια ρηχία. Όπως είναι γνωστό η αστρονομική παλίρροια στην Ελλάδα δεν έχει μεγάλα εύρη. Συγκεκριμένα για τον σταθμηγράφο στο Λιμένα του Πειραιά σύμφωνα με τα στοιχεία της Υδρογραφικής Υπηρεσίας, προκύπτει ότι το μέσο εύρος είναι κοντά στα 10 cm (Εικόνα 4.11). Συνεπώς, με παραδοχή περιόδου παλίρροιας $T_{tide} = 12$ hrs και εύρος $A_{tide} = 10$ cm εκπονείται προσομοίωση της παλιρροιογενούς υδροδυναμικής κυκλοφορίας που αναπτύσσεται εντός της λιμενολεκάνης. Επομένως τίθεται χρόνος ίσος με 86400 δευτερόλεπτα ενώ το χρονικό βήμα παραμένει στα 0.05 δευτερόλεπτα.

Simulation Time

Simulation time(s) Time step (s)

86400 0.05

Εικόνα 4.10. Maris HYD - Χρόνος προσομοίωσης, Χρονικό βήμα για παλίρροια

Στατιστικά στοιχεία Λιμένα Πειραιά.

Μη εξαρτώμενα από σημείο αναφοράς	
Μέγιστο εύρος: 0.29 μ.	Μέσο εύρος: 0.09 μ.
Ελάχιστο εύρος: 0.01μ.	Επάλλαξη: 1.15 μ.

Εικόνα 4.11. Στατιστικά στοιχεία στάθμης θάλασσας Πειραιά (Υδρογραφική Υπηρεσία Πολεμικού Ναυτικού)

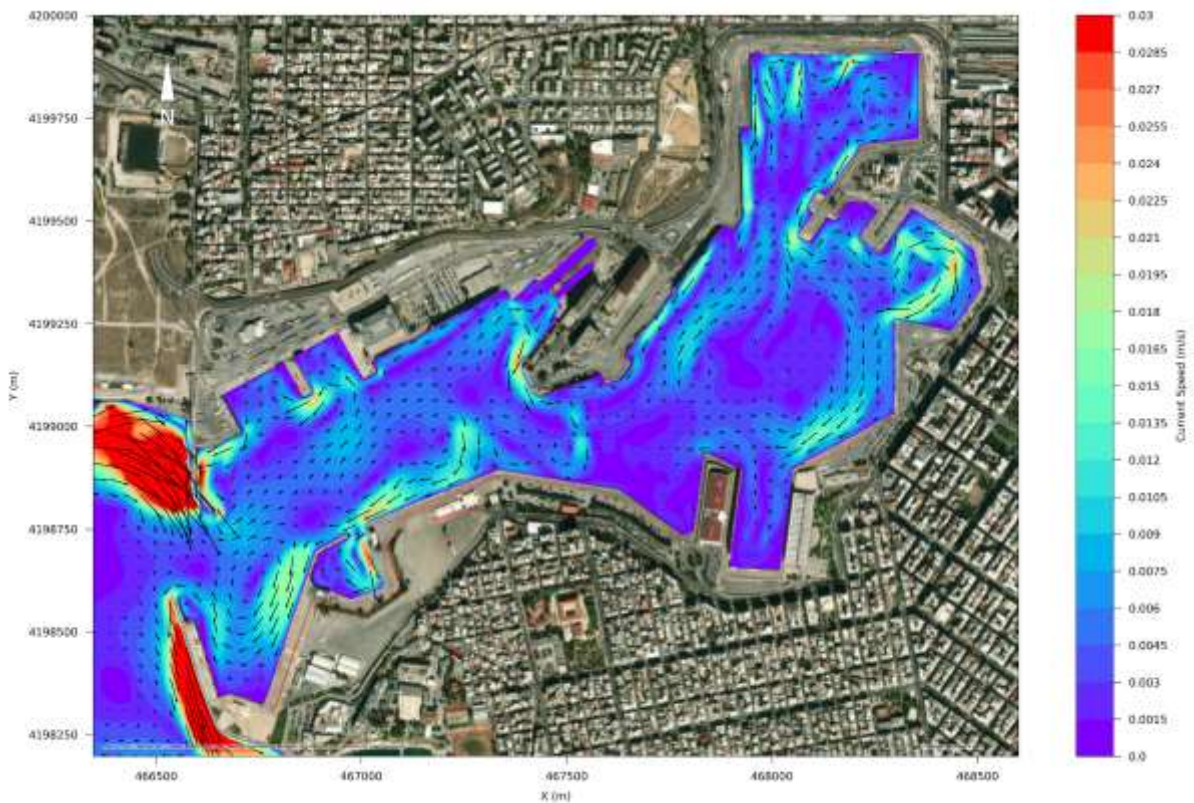
4.3 Αποτελέσματα

4.3.1 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Όπως τονίστηκε στην προηγούμενη ενότητα το αριθμητικό μοντέλο Maris HYD παρέχει στην περίπτωση μας 2 μεταβλητές εξόδου, την ταχύτητα ρεύματος C (m/s), την διεύθυνση D ($^{\circ}$). Ως μέγιστη τιμή στην χρωματική παλέτα απεικόνισης των αποτελεσμάτων επιλέχθηκαν τα 0,03 m/s, τιμή που προέκυψε μετά από το τρέξιμο για όλες τις διευθύνσεις ανέμου και όλα τα Bf. Είναι απαραίτητο η χρωματική κλίμακα να παραμένει σταθερή για δίκαιη σύγκριση όλων των αποτελεσμάτων. Οι μέγιστες ταχύτητες κοντά στα 0,03 m/s έχουν κόκκινο χρώμα ενώ αυτές που τείνουν να μηδενιστούν, έχουν μωβ. Όσον αφορά τις κατευθύνσεις των ρευμάτων αυτές απεικονίζονται ως διανύσματα. Έτσι από τις συγκεκριμένες εικόνες μπορούμε να αντλήσουμε ποιοτικές και ποσοτικές πληροφορίες ως προς τη ανανέωση των υδάτων. Ενδεικτικά γίνεται παράθεση της περίπτωσης του βόρειου ανέμου 0° για τα 4 Bf (Εικόνα 4.12) και τα 7 Bf (Εικόνα 4.13) ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση ανάλογα την ένταση του ανέμου. Στο παράρτημα στο τέλος της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται αναλυτικά όλοι οι χάρτες των ταχυτήτων ρεύματος με τις διευθύνσεις τους.

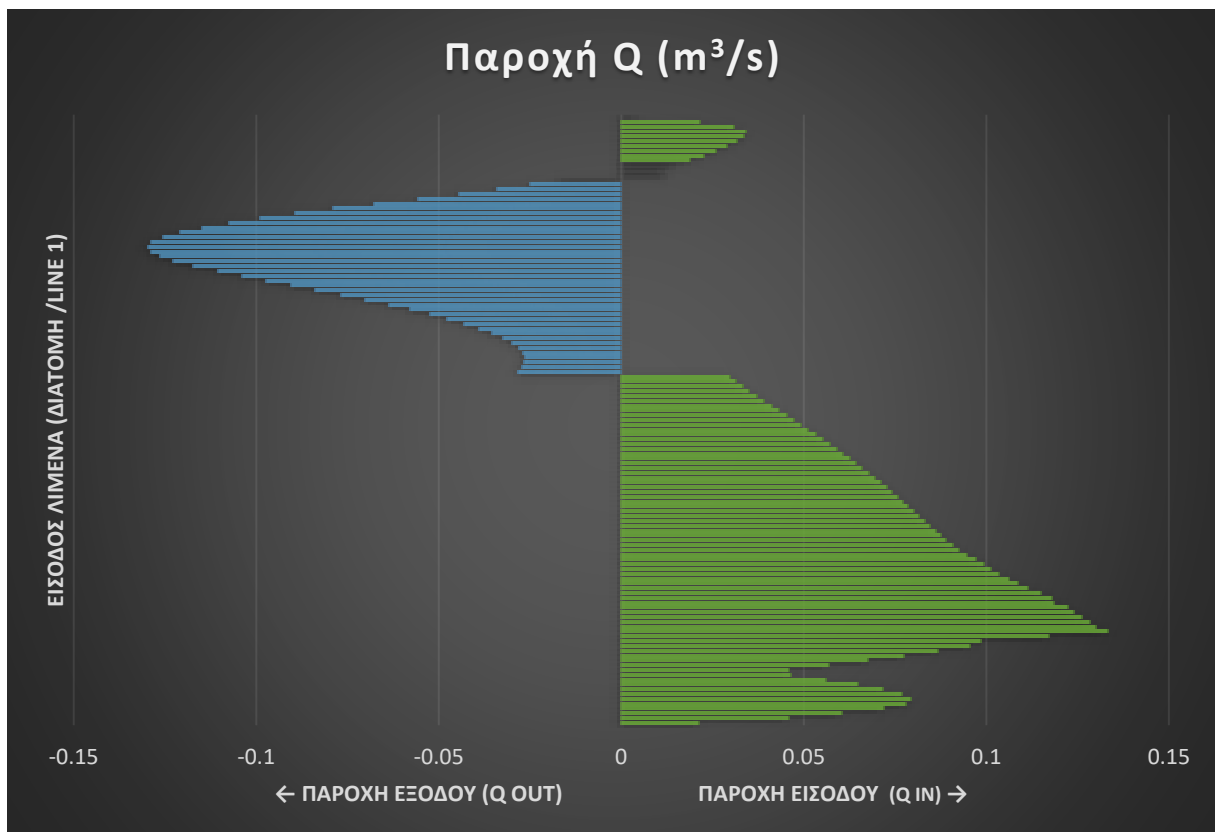


Εικόνα 4.12. Βόρειος άνεμος 0°, 4 Bf – Χάρτης ταχυτήτων και διευθύνσεων ρεύματος εντός της λιμενολεκάνης

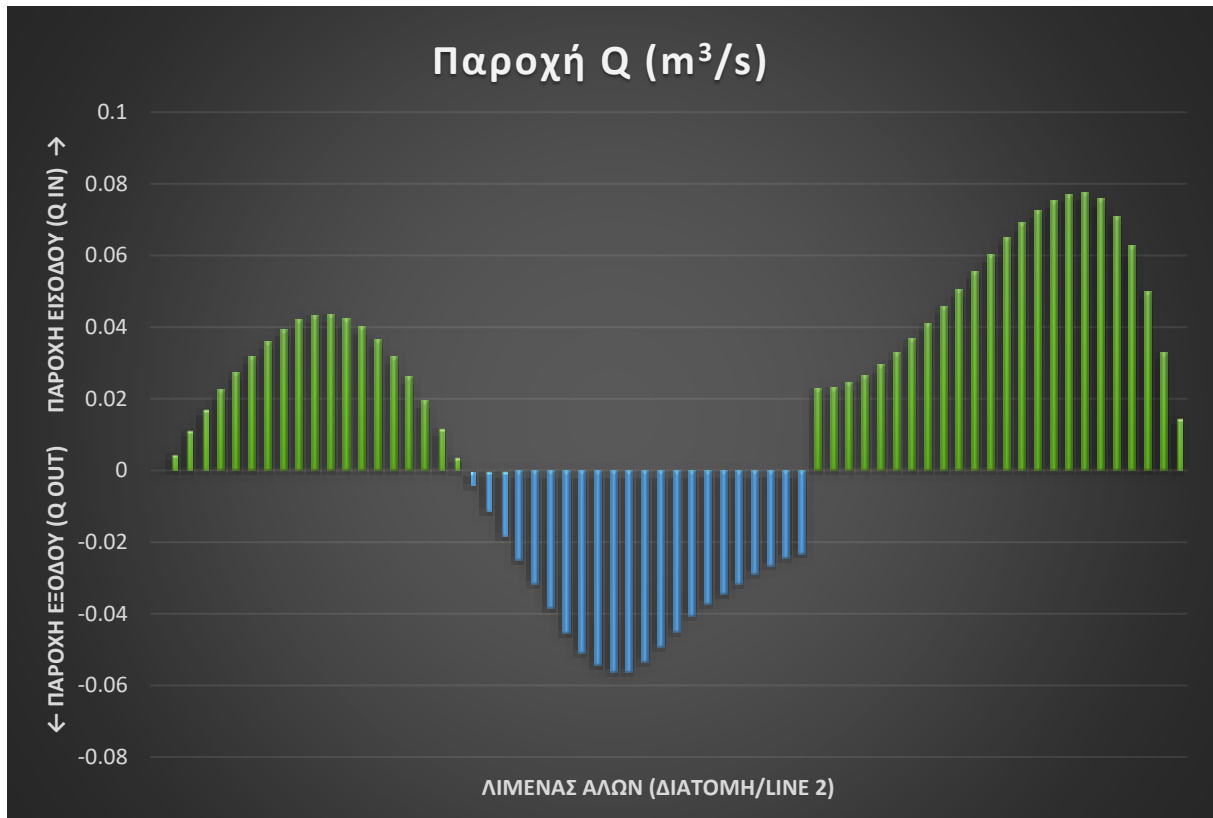


Εικόνα 4.13. Βόρειος άνεμος 0°, 7 Bf – Χάρτης ταχυτήτων και διευθύνσεων ρεύματος εντός της λιμενολεκάνης

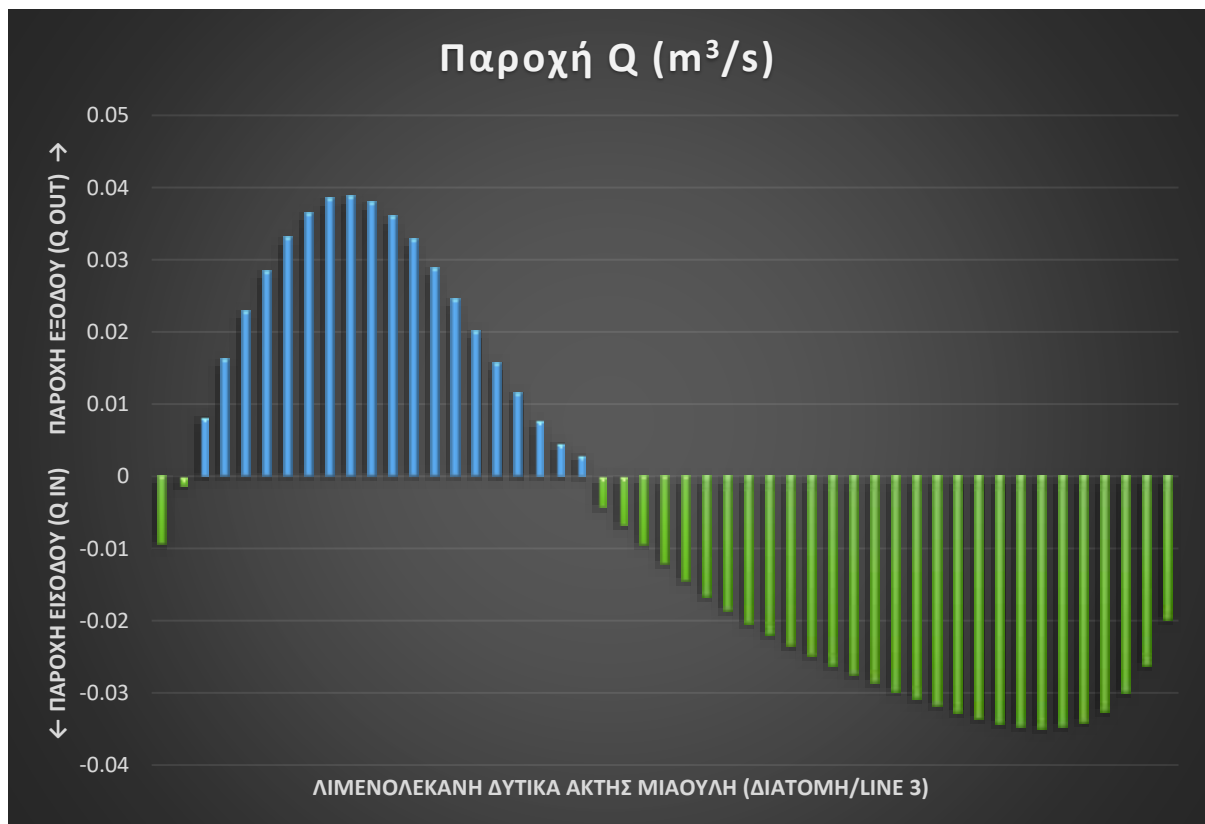
Τα αρχεία .csv με τις τιμές των παραπάνω μεταβλητών επεξεργάστηκαν με σκοπό να προκύψουν οι παροχές και ο όγκος της υπό μελέτη λιμενολεκάνης. Η παροχή κάθε κελιού υπολογίστηκε ως το γινόμενο της ταχύτητας C επί το βάθος του κελιού επί το μήκος του, δηλαδή 2.5 m. Είναι προφανές ότι η παροχή εξόδου για κάθε περίπτωση έχει διαφορετική κατεύθυνση. Εδώ καθοριστικής σημασίας για την κατανόηση της κίνησης αποτελεί η μεταβλητή εξόδου D . Για την είσοδο του λιμένα οι παροχές εξόδου κινούνται προς τα αριστερά, δηλαδή κυμαίνονται από 180 έως 360 μοίρες ενώ οι παροχές εισόδου κινούνται προς τα μέσα δηλαδή προς τα δεξιά (0 – 180 μοίρες). Για το λιμένα των Αλών όπου η διατομή 2 ορίστηκε οριζόντια, παροχές εξόδου είναι αυτές που κινούνται προς τα κάτω (90° - 270°). Για τη μικρή λιμενολεκάνη δυτικά της ακτής Μιαούλη όπου η διατομή 3 ορίστηκε εξίσου οριζόντια, οι παροχές εξόδου κινούνται προς τα πάνω (270° - 90°). Τέλος για τον κεντρικό λιμένα ισχύει ότι και στην είσοδο λιμένα αφού η γραμμή είναι κατακόρυφη και η έξοδος των υδάτων επιτυγχάνεται προς την αριστερή κατεύθυνση (180° - 360°). Σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι η αναφορά στις παροχές εξόδου Q_{out} (m³/s) οφείλεται στο γεγονός ότι μόνο αυτές λήφθηκαν υπόψιν στον υπολογισμό των χρόνων ανανέωσης των υδάτων. Ενδεικτικά ακολουθούν τα διαγράμματα παροχών για τον βόρειο άνεμο των 4 Bf. Για τις διατομές 1 (Εικόνα 4.14) και 4 (Εικόνα 4.17) που ορίστηκαν κατακόρυφες, ο άξονας y ταυτίζεται με την ίδια τη γραμμή ενώ στον άξονα x παρατηρούνται οι παροχές. Αντιθέτως για τις διατομές 2 (Εικόνα 4.15) και 3 (Εικόνα 4.16) οι οποίες ορίστηκαν οριζόντιες ο άξονας x ταυτίζεται με τη γραμμή και ο άξονας y δείχνει τις παροχές. Από αυτά τα διαγράμματα μπορεί κανείς να αντλήσει πληροφορίες για την κίνηση των υδάτων. Με μπλε χρώμα χρωματίζονται οι παροχές εξόδου ενώ με πράσινο οι παροχές εισόδου.



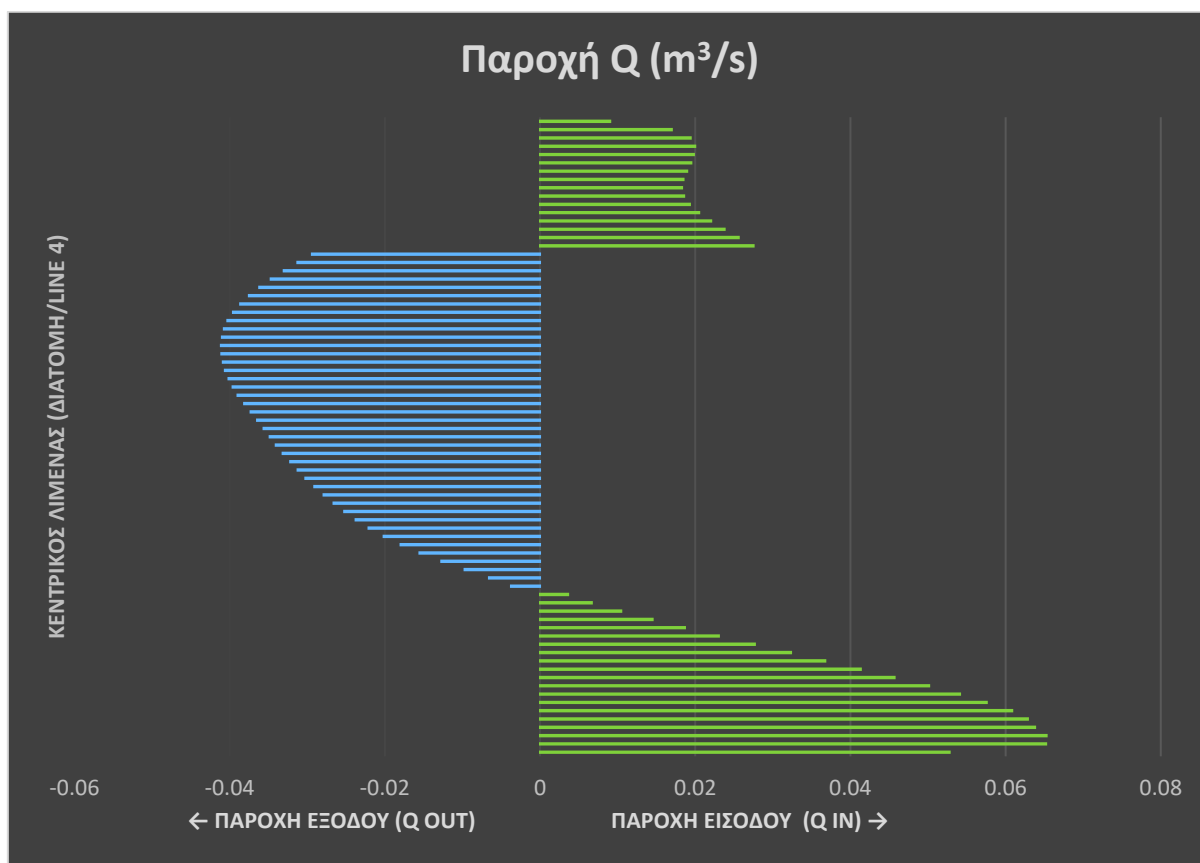
Εικόνα 4.14. Διάγραμμα παροχών – Βόρειος άνεμος (0°), 4 Bf – Διατομή (Line) 1



Εικόνα 4.15. Διάγραμμα παροχών – Βόρειος άνεμος (0°), 4 Vf – Διατομή (Line) 2



Εικόνα 4.16. Διάγραμμα παροχών – Βόρειος άνεμος (0°), 4 Vf – Διατομή (Line) 3



Εικόνα 4.17. Διάγραμμα παροχών – Βόρειος άνεμος (0°), 4 Bf – Διατομή (Line) 4

Η ίδια διαδικασία εκτελέστηκε για κάθε άνεμο για 4 έως 7 Bf για κάθε περιοχή μελέτης. Επομένως έχουν υπολογιστεί οι παροχές εξόδου Qout (m³/s) και υπολείπεται ο υπολογισμός των όγκων. Αυτό επιτυγχάνεται εύκολα με χρήση υπολογιστικού φύλλου (excel) και γνωστά τα βάθη αλλά και το χωρικό βήμα των κελιών. Οπότε οι όγκοι προκύπτουν ως εξής:

Πίνακας 4.8. Όγκοι περιοχών μελέτης

Ολόκληρος Λιμένας Πειραιά:	V = 14.461.703 m ³
Λιμένας Αλών:	V = 1.230.928 m ³
Προβληματική περιοχή κοντά ακτής Μιαούλη:	V = 348.201 m ³
Κεντρικός Λιμένας:	V = 7.098.737 m ³

Πίνακας 4.9. Παροχές εξόδου Qout (m³/s) ανά διεύθυνση ανέμου ανά Bf – Line 1

	ΕΙΣΟΔΟΣ ΛΙΜΕΝΑ - LINE1											
	Qout (m ³ /s)											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
4	1.197034	1.918164	3.856007	4.816858	5.248341	4.998283	3.833061	1.914256	4.928852	6.313358	5.970483	4.050756
5	2.024036	3.334875	6.039944	7.228098	7.92453	7.762296	5.846902	3.361653	8.021282	10.37893	9.65316	6.540917
6	3.125589	5.190184	0	0	10.97836	11.18309	8.241971	5.28765	12.09817	15.46308	14.29895	9.3958
7	4.560581	0	0	0	14.57809	15.36415	10.90201	0	0	0	0	0

Πίνακας 4.10. Παροχές εξόδου Qout (m3/s) ανά διεύθυνση ανέμου ανά Bf – Line 2

	ΛΙΜΕΝΑΣ ΑΛΩΝ - LINE 2											
	Qout (m3/s)											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
4	1.721421	1.564334	1.225253	1.210445	1.17356	0.827182	0.791635	0.676701	0.582692	0.959632	1.359889	1.71489
5	3.126179	2.841719	2.21571	2.183384	2.082447	1.457169	1.442266	1.229211	1.059964	1.738339	2.459528	3.110845
6	5.128253	4.661806	0	0	3.406877	2.403878	2.373445	2.015263	1.74113	2.841673	4.012396	5.095337
7	7.736243	0	0	0	5.118369	3.708858	3.590913	0	0	0	0	0

Πίνακας 4.11. Παροχές εξόδου Qout (m3/s) ανά διεύθυνση ανέμου ανά Bf – Line 3

	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΑΚΤΗΣ ΜΙΑΟΥΛΗ - LINE 3											
	Qout (m3/s)											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
4	0.445816	0.624145	0.686931	0.635496	0.507884	0.509846	0.705362	0.809321	0.703582	0.39986	0.056355	0.228796
5	0.816544	1.147101	1.263835	1.171966	0.980679	0.936373	1.281539	1.466452	1.27501	0.724509	0.102384	0.416731
6	1.352624	1.907025	0	0	1.673325	1.555563	2.105927	2.402275	2.092072	1.189795	0.151107	0.687695
7	2.063219	0	0	0	2.574969	2.379633	3.186245	0	0	0	0	0

Πίνακας 4.12. Παροχές εξόδου Qout (m3/s) ανά διεύθυνση ανέμου ανά Bf – Line 4

	ΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΛΙΜΕΝΑΣ - LINE 4											
	Qout (m3/s)											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
4	1.170242	0.681121	1.290299	1.967539	1.967539	1.650223	1.006259	1.522404	2.290989	2.901792	2.911745	2.217552
5	2.145345	1.24166	2.337946	3.29806	3.556789	2.995357	1.825909	2.752714	4.138456	5.255274	5.297917	4.057188
6	3.57232	2.047216	0	0	5.798054	4.913106	2.993587	4.485462	6.733759	8.579047	8.608176	6.712679
7	5.461711	0	0	0	8.676508	7.413103	4.505232	0	0	0	0	0

Συνοψίζοντας τους υπολογισμούς που έχουν γίνει ως τώρα, έχουμε τις παροχές εξόδου Qout (m3/s) για κάθε διεύθυνση ανέμου και για κάθε Bf όπως και τους όγκους των λιμενολεκάνων. Θεωρητικά με απλή εφαρμογή του τύπου $T(s) = V (m^3) / Qout (m^3/s)$ μπορεί να υπολογιστεί ο χρόνος ανανέωσης των υδάτων για κάθε περίπτωση. Αυτό που δεν έχει συμπεριληφθεί ακόμα καθόλου στους υπολογισμούς παρόλο που αποτελεί το βασικό αντικείμενο της μελέτης μας είναι η επίδραση της κλιματικής αλλαγής, δηλαδή των κλιματικών σεναρίων που έχουν αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Για αυτόν το σκοπό χρησιμοποιήθηκαν οι πίνακες ανεμολογικών δεδομένων με τις συχνότερες εμφάνισης για κάθε κλιματικό σενάριο (Πίνακας 4.2 - Πίνακας 4.6). Συγκεκριμένα υπολογίστηκε ο σταθμισμένος μέσος όρος παροχής και χρόνου ανανέωσης τόσο ανά διεύθυνση όσο και ανά Bf.

Για να γίνει πιο ξεκάθαρη η διαδικασία υπολογισμού περιγράφεται το παράδειγμα της εισόδου του λιμένα (Line 1) με άνεμο βόρειο (0°) για τα ιστορικά δεδομένα (1976-2005). Ο σταθμισμένος μέσος όρος προκύπτει ως εξής (βλ. Πίνακας 4.9, Πίνακας 4.17):

Παροχή εξόδου (m3/s)

$$Qout \text{ weighted average} = (1.197034 * 4.198\% + 2.024036 * 0.358\% + 3.125589 * 0.016\% + 4.560581 * 0.002\%) / (4.198\% + 0.358\% + 0.016\% + 0.002\%) = \mathbf{1.267 \text{ m}^3/s}$$

Χρόνος ανανέωσης υδάτων (ημέρες)

$$T \text{ weighted average} = V(L1) / Qout \text{ weighted average} = 14.461.703 \text{ m}^3 / 1.269979 \text{ m}^3/s = 11.387.356,011399 \text{ s} / 3600 / 24 = \mathbf{131,79 \text{ ημέρες}}$$

Αντίστοιχα, περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού του σταθμισμένου μέσου όρου των 4 Bf όλων των ανέμων στην είσοδο του λιμένα για τα ιστορικά δεδομένα (βλ. Πίνακας 4.9, Πίνακας 4.13):

Παροχή εξόδου (m³/s)

Qout weighted average = $(1.197034 \cdot 4.198\% + 1.918164 \cdot 0.700\% + 3.856007 \cdot 0.107\% + 4.816858 \cdot 0.080\% + 5.248341 \cdot 0.114\% + 4.998283 \cdot 0.922\% + 3.833061 \cdot 1.417\% + 1.914256 \cdot 0.513\% + 4.928852 \cdot 0.408\% + 6.313358 \cdot 2.186\% + 5.970483 \cdot 0.623\% + 4.050756 \cdot 0.878\%) / (4.198\% + 0.700\% + 0.107\% + 0.080\% + 0.114\% + 0.922\% + 1.417\% + 0.513\% + 0.408\% + 2.186\% + 0.623\% + 0.878\%) = \mathbf{3.447}$ m³/s

Χρόνος ανανέωσης υδάτων (ημέρες)

T weighted average = $V(L1) / Q_{out \text{ weighted average}} = 14.461.703 \text{ m}^3 / 3.447566 \text{ m}^3/\text{s} = 4.194.757,4028 \text{ s} / 3600 / 24 = \mathbf{48,55}$ ημέρες

Για να γίνει αντιληπτό το τι αντιπροσωπεύουν οι παραπάνω τιμές, αρκεί να σκεφτούμε ένα ιδεατό σενάριο, όπου ο μόνος άνεμος που φυσούσε θα ήταν ο βόρειος (0°) με όλα τα υπό μελέτη Bf να κάνουν την εμφάνιση τους. Τότε ο χρόνος που θα απαιτούταν για να ανανεωθούν όλα τα ύδατα του λιμένα θα ήταν σχεδόν 132 ημέρες. Ο αριθμός αυτός προφανώς δεν είναι επιθυμητός ωστόσο κρίνεται λογικό αν σκεφτεί κανείς ότι η κατεύθυνση του ανέμου δεν είναι ευνοϊκή για την έξοδο των υδάτων. Μας δίνει όμως έναν αντιπροσωπευτικό αριθμό για να μπορούμε να συγκρίνουμε τις αλλαγές που θα επέλθουν με την κλιματική αλλαγή.

Στο δεύτερο παράδειγμα το ιδεατό σενάριο εστιάζει στα Bf. Συγκεκριμένα δρουν οι άνεμοι όλων των κατευθύνσεων αλλά ο κάθε ένας με ένταση μόνο 4 Bf. Τότε ο χρόνος ανανέωσης του λιμένα θα ήταν σχεδόν 46 ημέρες. Σαφώς και πιο λίγες μέρες από το προηγούμενο παράδειγμα καθώς συνυπολογίστηκαν όλοι οι άνεμοι, συμπεριλαμβανομένων και των ευνοϊκών για την έξοδο των υδάτων. Ακολουθεί η παράθεση των πινάκων με τους σταθμισμένους μέσους όρους παροχής και χρόνου ανανέωσης υδάτων για κάθε υποπεριοχή μελέτης τόσο ανά διεύθυνση ανέμου όσο και ανά Bf. Στην επόμενη ενότητα θα γίνει ο σχολιασμός συνοδεία διαγραμμάτων για την καλύτερη κατανόηση των τιμών των παρακάτω πινάκων.

Πίνακας 4.13. Σταθμισμένοι μ.ο. παροχών και χρόνων ανανέωσης υδάτων ανά Bf– Line 1

ΕΙΣΟΔΟΣ ΛΙΜΕΝΑ (LINE 1)			
BAUFORT	ΠΕΡΙΟΔΟΣ	Σταθμισμένος μ.ο. Qout (m ³ /s)	Σταθμισμένος μ.ο. T (ημέρες)
4	HISTORY	3.448	48.550
	RCP45(2041-2070)	3.360	49.815
	RCP45(2071-2100)	3.365	49.740
	RCP85(2041-2070)	3.487	47.998
	RCP85(2071-2100)	3.413	49.045
5	HISTORY	6.047	27.680
	RCP45(2041-2070)	6.221	26.908
	RCP45(2071-2100)	6.514	25.697
	RCP85(2041-2070)	6.443	25.977
	RCP85(2071-2100)	6.177	27.097
6	HISTORY	8.902	18.803
	RCP45(2041-2070)	9.047	18.502
	RCP45(2071-2100)	9.447	17.718
	RCP85(2041-2070)	9.492	17.634
	RCP85(2071-2100)	9.585	17.463
7	HISTORY	10.693	15.653
	RCP45(2041-2070)	12.154	13.772
	RCP45(2071-2100)	10.902	15.353
	RCP85(2041-2070)	12.525	13.364
	RCP85(2071-2100)	14.373	11.646

Πίνακας 4.14. Σταθμισμένοι μ.ο. παροχών και χρόνων ανανέωσης υδάτων ανά Bf– Line 2

ΛΙΜΕΝΑΣ ΑΛΩΝ (LINE 2)			
BAUFORT	ΠΕΡΙΟΔΟΣ	Σταθμισμένος μ.ο. Qout (m ³ /s)	Σταθμισμένος μ.ο. T (ημέρες)
4	HISTORY	1.285	11.090
	RCP45(2041-2070)	1.292	11.026
	RCP45(2071-2100)	1.290	11.048
	RCP85(2041-2070)	1.277	11.158
	RCP85(2071-2100)	1.281	11.123
5	HISTORY	2.069	6.885
	RCP45(2041-2070)	2.048	6.958
	RCP45(2071-2100)	2.027	7.029
	RCP85(2041-2070)	2.028	7.026
	RCP85(2071-2100)	2.102	6.777
6	HISTORY	2.832	5.030
	RCP45(2041-2070)	2.740	5.199
	RCP45(2071-2100)	2.776	5.132
	RCP85(2041-2070)	2.598	5.483
	RCP85(2071-2100)	2.803	5.083
7	HISTORY	4.065	3.505
	RCP45(2041-2070)	3.844	3.706
	RCP45(2071-2100)	3.591	3.967
	RCP85(2041-2070)	3.634	3.921
	RCP85(2071-2100)	3.683	3.869

Πίνακας 4.15. Σταθμισμένοι μ.ο. παροχών και χρόνων ανανέωσης υδάτων ανά Bf– Line 3

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΑΚΤΗΣ ΜΙΑΟΥΛΗ (LINE 3)			
BAUFORT	ΠΕΡΙΟΔΟΣ	Σταθμισμένος μ.ο. Qout (m ³ /s)	Σταθμισμένος μ.ο. T (ημέρες)
4	HISTORY	0.475	8.480
	RCP45(2041-2070)	0.480	8.399
	RCP45(2071-2100)	0.478	8.428
	RCP85(2041-2070)	0.474	8.495
	RCP85(2071-2100)	0.479	8.405
5	HISTORY	0.944	4.269
	RCP45(2041-2070)	0.935	4.311
	RCP45(2071-2100)	0.917	4.397
	RCP85(2041-2070)	0.913	4.412
	RCP85(2071-2100)	0.918	4.391
6	HISTORY	1.787	2.255
	RCP45(2041-2070)	1.798	2.242
	RCP45(2071-2100)	1.708	2.360
	RCP85(2041-2070)	1.820	2.215
	RCP85(2071-2100)	1.693	2.381
7	HISTORY	2.972	1.356
	RCP45(2041-2070)	2.968	1.358
	RCP45(2071-2100)	3.186	1.265
	RCP85(2041-2070)	2.893	1.393
	RCP85(2071-2100)	2.559	1.575

Πίνακας 4.16. Σταθμισμένοι μ.ο. παροχών και χρόνων ανανέωσης υδάτων ανά Bf– Line 4

ΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΛΙΜΕΝΑΣ (LINE 4)			
BAUFORT	ΠΕΡΙΟΔΟΣ	Σταθμισμένος μ.ο. Qout (m ³ /s)	Σταθμισμένος μ.ο. T (ημέρες)
4	HISTORY	1.702	48.264
	RCP45(2041-2070)	1.676	49.015
	RCP45(2071-2100)	1.677	48.983
	RCP85(2041-2070)	1.720	47.774
	RCP85(2071-2100)	1.694	48.506
5	HISTORY	2.991	27.469
	RCP45(2041-2070)	3.075	26.717
	RCP45(2071-2100)	3.202	25.661
	RCP85(2041-2070)	3.189	25.766
	RCP85(2071-2100)	3.088	26.607
6	HISTORY	4.091	20.082
	RCP45(2041-2070)	4.007	20.503
	RCP45(2071-2100)	4.365	18.821
	RCP85(2041-2070)	4.123	19.929
	RCP85(2071-2100)	4.531	18.132
7	HISTORY	4.935	16.650
	RCP45(2041-2070)	5.594	14.687
	RCP45(2071-2100)	4.505	18.237
	RCP85(2041-2070)	5.563	14.770
	RCP85(2071-2100)	6.767	12.142

Πίνακας 4.17. Σταθμισμένοι μ.ο. παροχών και χρόνων ανανέωσης υδάτων ανά κατεύθυνση ανέμου– Line 1

ΕΙΣΟΔΟΣ ΛΙΜΕΝΑ (LINE 1)													
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ (°)		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Σταθμισμένος μ.ο. Qout (m ³ /s)	HISTORY	1.270	2.025	3.856	5.011	6.301	5.728	4.404	2.070	5.141	6.773	6.113	4.248
	RCP45(2041-2070)	1.263	2.006	3.983	5.112	6.046	5.776	4.430	2.065	5.068	6.859	6.219	4.257
	RCP45(2071-2100)	1.251	2.054	4.217	5.211	5.845	5.815	4.336	2.091	5.114	6.906	6.391	4.297
	RCP85(2041-2070)	1.262	1.997	3.910	4.998	6.026	5.910	4.392	2.070	5.107	6.885	6.242	4.254
	RCP85(2071-2100)	1.260	2.042	4.025	5.114	5.864	5.841	4.269	2.035	5.101	6.819	6.237	4.277
Σταθμισμένος μ.ο. T (ημέρες)	HISTORY	131.798	82.664	43.408	33.404	26.564	29.222	38.007	80.849	32.560	24.712	27.383	39.403
	RCP45(2041-2070)	132.553	83.455	42.026	32.746	27.687	28.976	37.783	81.063	33.026	24.404	26.916	39.317
	RCP45(2071-2100)	133.827	81.476	39.688	32.124	28.636	28.784	38.599	80.056	32.730	24.238	26.189	38.949
	RCP85(2041-2070)	132.676	83.831	42.809	33.487	27.776	28.321	38.112	80.852	32.772	24.311	26.814	39.348
	RCP85(2071-2100)	132.806	81.969	41.581	32.729	28.541	28.654	39.205	82.233	32.816	24.548	26.836	39.131

Πίνακας 4.18. Σταθμισμένοι μ.ο. παροχών και χρόνων ανανέωσης υδάτων ανά κατεύθυνση ανέμου– Line 2

ΛΙΜΕΝΑΣ ΑΛΩΝ (LINE 2)													
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ (°)		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Σταθμισμένος μ.ο. Qout (m ³ /s)	HISTORY	1.846	1.661	1.225	1.289	1.546	0.999	0.986	0.736	0.615	1.048	1.402	1.826
	RCP45(2041-2070)	1.833	1.644	1.283	1.329	1.461	1.011	0.994	0.734	0.604	1.064	1.435	1.831
	RCP45(2071-2100)	1.813	1.688	1.389	1.369	1.379	1.021	0.961	0.744	0.611	1.074	1.487	1.854
	RCP85(2041-2070)	1.831	1.635	1.250	1.284	1.449	1.044	0.981	0.736	0.610	1.070	1.441	1.830
	RCP85(2071-2100)	1.829	1.676	1.302	1.330	1.395	1.030	0.938	0.723	0.609	1.057	1.441	1.843
Σταθμισμένος μ.ο. T (ημέρες)	HISTORY	7.718	8.580	11.628	11.055	9.214	14.259	14.453	19.346	23.151	13.593	10.160	7.801
	RCP45(2041-2070)	7.771	8.668	11.106	10.717	9.749	14.094	14.337	19.401	23.580	13.386	9.928	7.779
	RCP45(2071-2100)	7.859	8.440	10.256	10.405	10.331	13.955	14.827	19.137	23.307	13.271	9.584	7.684
	RCP85(2041-2070)	7.780	8.713	11.400	11.098	9.829	13.650	14.520	19.351	23.338	13.321	9.886	7.787
	RCP85(2071-2100)	7.788	8.498	10.941	10.709	10.213	13.831	15.196	19.695	23.386	13.479	9.888	7.731

Πίνακας 4.19. Σταθμισμένοι μ.ο. παροχών και χρόνων ανανέωσης υδάτων ανά κατεύθυνση ανέμου– Line 3

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΑΚΤΗΣ ΜΙΑΟΥΛΗ (LINE 3)													
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ (°)		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Σταθμισμένος μ.ο. Qout (m3/s)	HISTORY	0.479	0.664	0.687	0.679	0.702	0.625	0.877	0.880	0.743	0.437	0.058	0.244
	RCP45(2041-2070)	0.475	0.657	0.720	0.701	0.658	0.633	0.884	0.878	0.729	0.443	0.059	0.245
	RCP45(2071-2100)	0.470	0.675	0.782	0.723	0.615	0.640	0.855	0.890	0.738	0.447	0.062	0.248
	RCP85(2041-2070)	0.475	0.653	0.701	0.676	0.652	0.655	0.873	0.880	0.737	0.446	0.060	0.244
	RCP85(2071-2100)	0.474	0.670	0.732	0.702	0.623	0.646	0.835	0.865	0.735	0.440	0.060	0.246
Σταθμισμένος μ.ο. T (ημέρες)	HISTORY	8.419	6.074	5.867	5.938	5.741	6.443	4.594	4.578	5.426	9.227	69.328	16.531
	RCP45(2041-2070)	8.478	6.138	5.594	5.749	6.126	6.363	4.557	4.591	5.526	9.087	67.851	16.483
	RCP45(2071-2100)	8.575	5.971	5.151	5.574	6.555	6.297	4.712	4.529	5.462	9.009	65.470	16.280
	RCP85(2041-2070)	8.488	6.171	5.748	5.963	6.186	6.150	4.615	4.579	5.470	9.042	67.445	16.500
	RCP85(2071-2100)	8.497	6.014	5.508	5.744	6.466	6.241	4.829	4.660	5.481	9.150	67.598	16.380

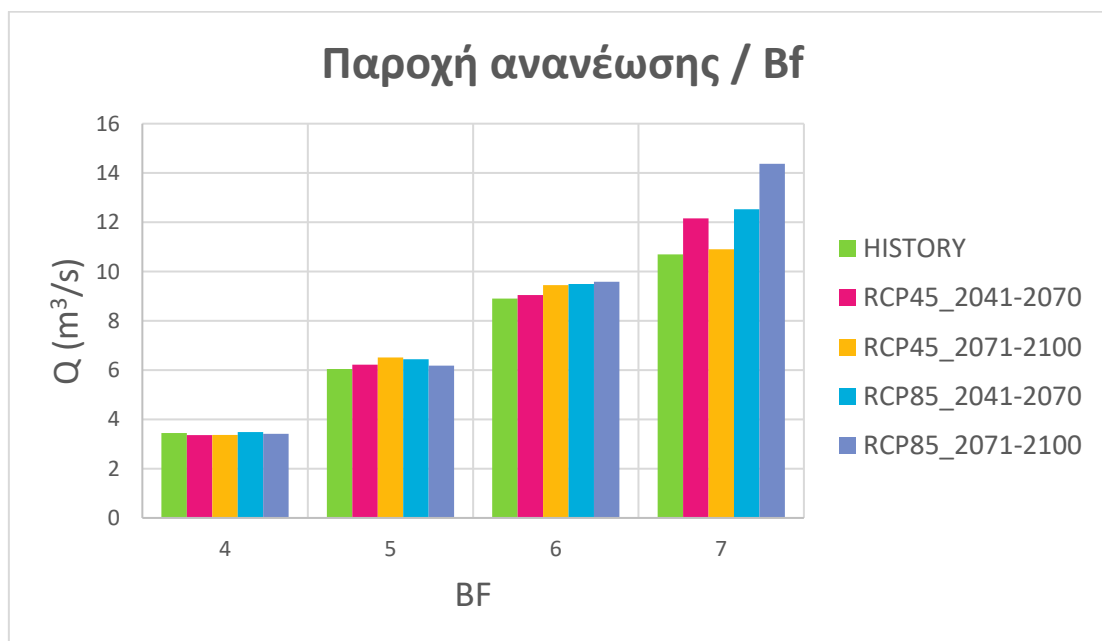
Πίνακας 4.20. Σταθμισμένοι μ.ο. παροχών και χρόνων ανανέωσης υδάτων ανά κατεύθυνση ανέμου– Line 4

ΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΛΙΜΕΝΑΣ (LINE 4)													
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ (°)		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Σταθμισμένος μ.ο. Qout (m3/s)	HISTORY	1.257	0.723	1.290	2.075	2.615	2.014	1.250	1.655	2.418	3.169	3.004	2.364
	RCP45(2041-2070)	1.248	0.716	1.351	2.130	2.467	2.038	1.260	1.651	2.374	3.218	3.074	2.371
	RCP45(2071-2100)	1.234	0.735	1.464	2.185	2.326	2.059	1.219	1.673	2.402	3.246	3.186	2.401
	RCP85(2041-2070)	1.247	0.712	1.316	2.068	2.447	2.107	1.245	1.655	2.398	3.234	3.088	2.369
	RCP85(2071-2100)	1.245	0.730	1.372	2.132	2.352	2.076	1.190	1.626	2.394	3.196	3.087	2.386
Σταθμισμένος μ.ο. T (ημέρες)	HISTORY	65.371	113.588	63.676	39.604	31.416	40.801	65.708	49.633	33.986	25.925	27.352	34.750
	RCP45(2041-2070)	65.834	114.763	60.809	38.571	33.310	40.308	65.182	49.774	34.606	25.531	26.724	34.648
	RCP45(2071-2100)	66.590	111.711	56.135	37.606	35.323	39.901	67.389	49.105	34.211	25.312	25.786	34.219
	RCP85(2041-2070)	65.912	115.367	62.425	39.736	33.579	38.995	66.010	49.645	34.258	25.406	26.607	34.685
	RCP85(2071-2100)	65.983	112.501	59.903	38.545	34.939	39.570	69.049	50.523	34.325	25.708	26.617	34.431

4.3.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων ανεμογενούς κυκλοφορίας

Ακολούθως δίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων ανά περιοχή ελέγχου.

4.3.2.1 ΕΙΣΟΔΟΣ ΛΙΜΕΝΑ – LINE 1



Εικόνα 4.18. Διάγραμμα παροχής ανανέωσης ανά Bf για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 1

4 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 3,36 (RCP45_2041-2070) και 3,487 (RCP85_2041-2070) m³/s

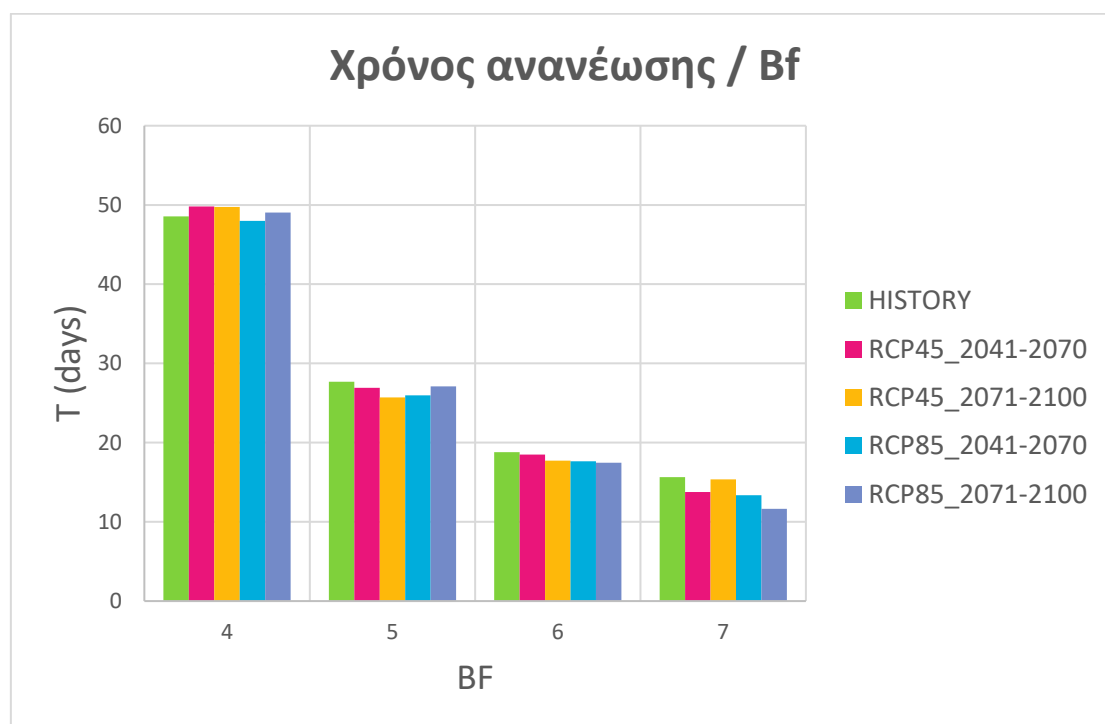
5 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 6,047 (HISTORY) και 6,514 (RCP45_2071-2100) m³/s

6 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 8,902 (HISTORY) και 9,585 (RCP85_2071-2100) m³/s

7 BF: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 10,693 (HISTORY) και 14,373 (RCP85_2071-2100) m³/s

Οι γενικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν ως εξής:

- Δεν αναμένεται σημαντική επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα μικρότερα Bf (4, 5 και 6) καθώς οι παροχές ανανέωσης αυξάνονται αμελητέα σε όλα τα σενάρια.
- Αντίθετα παρατηρείται αύξηση της παροχής ανανέωσης για τα σενάρια RCPs συγκριτικά με τα ιστορικά δεδομένα για τα 7 Bf. Το απαισιόδοξο σενάριο RCP85_2071-2100 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αύξηση της τάξεως του 34%. Εξαιρέση αποτελεί το RCP45_2071-2100 του οποίου η παροχή ανανέωσης (10,902 m³/s) παραμένει σχεδόν ίδια με τα ιστορικά δεδομένα.



Εικόνα 4.19. Διάγραμμα χρόνου ανανέωσης ανά Bf για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 1

4 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 47,998 (RCP85_2041-2070) και 49,74 (RCP45_2041-2070) ημέρες

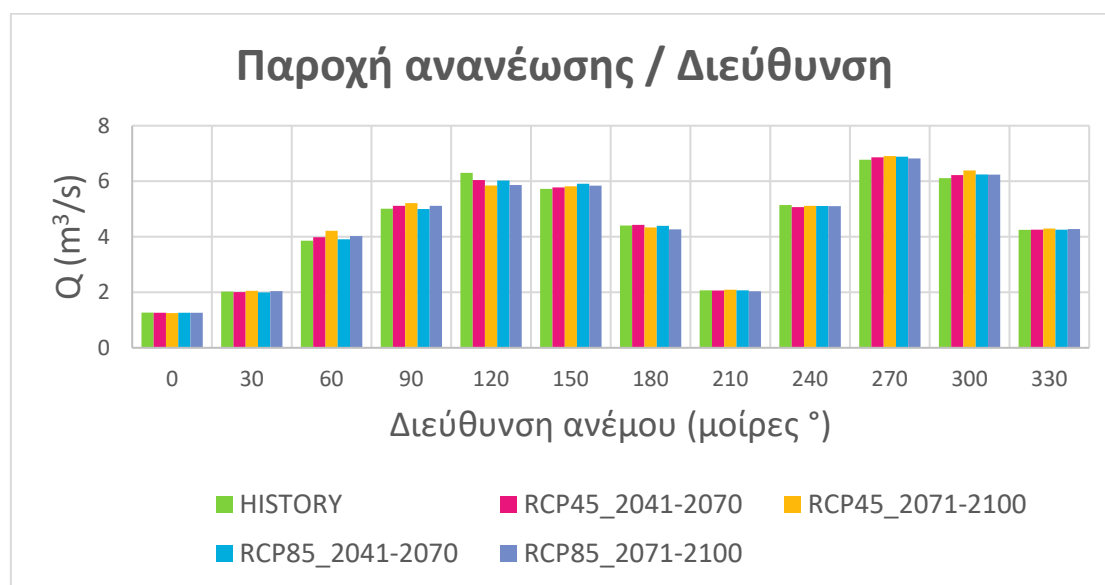
5 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 25,697 (RCP45_2071-2100) και 27,68 (HISTORY) ημέρες

6 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 17,463 (RCP85_2071-2100) και 18,803 (HISTORY) ημέρες

7 BF: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 11,646 (RCP85_2071-2100) και 15,653 (HISTORY) ημέρες

Οι παρατηρήσεις που προκύπτουν από τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν ως εξής:

- Δεν αναμένεται σημαντική επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα μικρότερα Bf (4, 5 και 6) καθώς οι χρόνοι ανανέωσης υδάτων μειώνονται αμελητέα σε όλα τα σενάρια.
- Αντίθετα παρατηρείται μείωση του χρόνου ανανέωσης υδάτων για τα σενάρια RCPs συγκριτικά με τα ιστορικά δεδομένα για τα 7 Bf. Το απαισιόδοξο σενάριο RCP85_2071-2100 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μείωση της τάξεως του 34%. Εξαιρέση αποτελεί το RCP45_2071-2100 του οποίου ο χρόνος ανανέωσης υδάτων (15,353 ημέρες) παραμένει σχεδόν ίδια με τα ιστορικά δεδομένα.



Εικόνα 4.20. Διάγραμμα παροχής ανανέωσης ανά διεύθυνση για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 1

0°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 1,251 (RCP45_2071-2100) και 1,270 (HISTORY) m³/s

30°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 1,997 (RCP85_2041-2070) και 2,054 (RCP45_2071-2100) m³/s

60°: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 3,856 (HISTORY) και 4,217 (RCP45_2071-2100) m³/s

90°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 4,998 (RCP45_2041-2070) και 5,211 (RCP45_2071-2100) m³/s

120°: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 5,845 (RCP45_2071-2100) και 6,301 (HISTORY) m³/s

150°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 5,728 (HISTORY) και 5,91 (RCP85_2041-2070) m³/s

180°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 4,269 (RCP85_2071-2100) και 4,43 (RCP45_2041-2070) m³/s

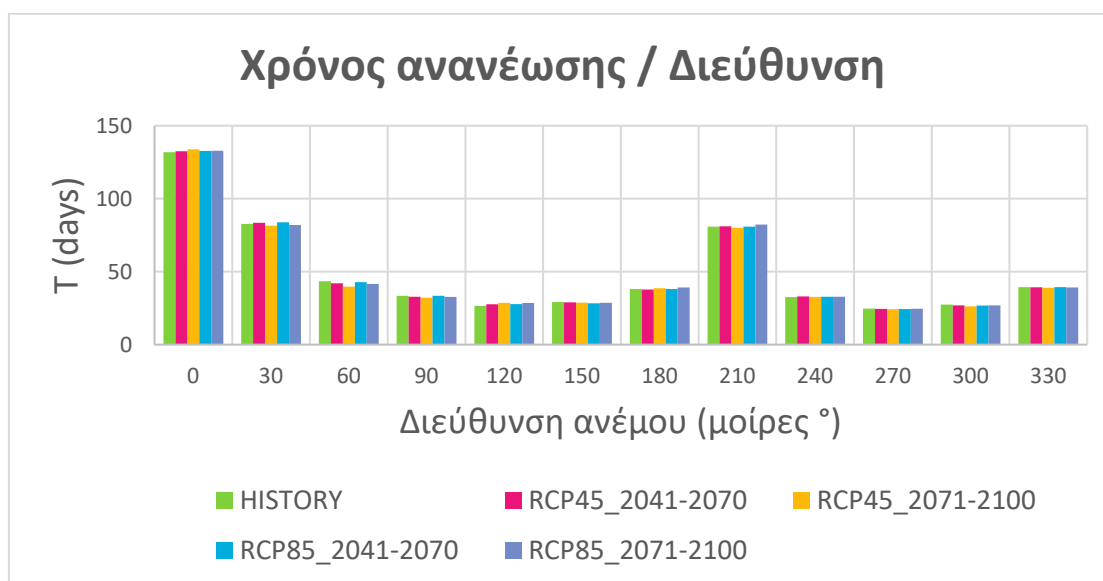
210°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 2,035 (RCP85_2071-2100) και 3,487 (RCP85_2041-2070) m³/s

240°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 5,068 (RCP45_2041-2070) και 5,141 (HISTORY) m³/s

270°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 6,773 (HISTORY) και 6,906 (RCP45_2071-2100) m³/s

300°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 6,113 (HISTORY) και 6,391 (RCP45_2071-2100) m³/s

330°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 4,248 (HISTORY) και 4,297 (RCP45_2071-2100) m³/s



Εικόνα 4.21. Διάγραμμα χρόνου ανανέωσης ανά διεύθυνση για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 1

0°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 131,798 (HISTORY) και 133,827 (RCP45_2071-2100) ημέρες

30°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 81,476 (RCP45_2071-2100) και 83,831 (RCP85_2041-2070) ημέρες

60°: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 39,688 (RCP45_2071-2100) και 43,408 (HISTORY) ημέρες

90°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 32,124 (RCP45_2071-2100) και 33,746 (RCP45_2041-2070) ημέρες

120°: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 26,564 (HISTORY) και 28,636 (RCP45_2071-2100) ημέρες

150°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 28,321 (RCP85_2041-2070) και 29,222 (HISTORY) ημέρες

180°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 37,783 (RCP45_2041-2070) και 39,205 (RCP85_2071-2100) ημέρες

210°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 80,056 (RCP85_2041-2070) και 82,233 (RCP85_2071-2100) ημέρες

240°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 32,56 (HISTORY) και 33,026 (RCP45_2041-2070) ημέρες

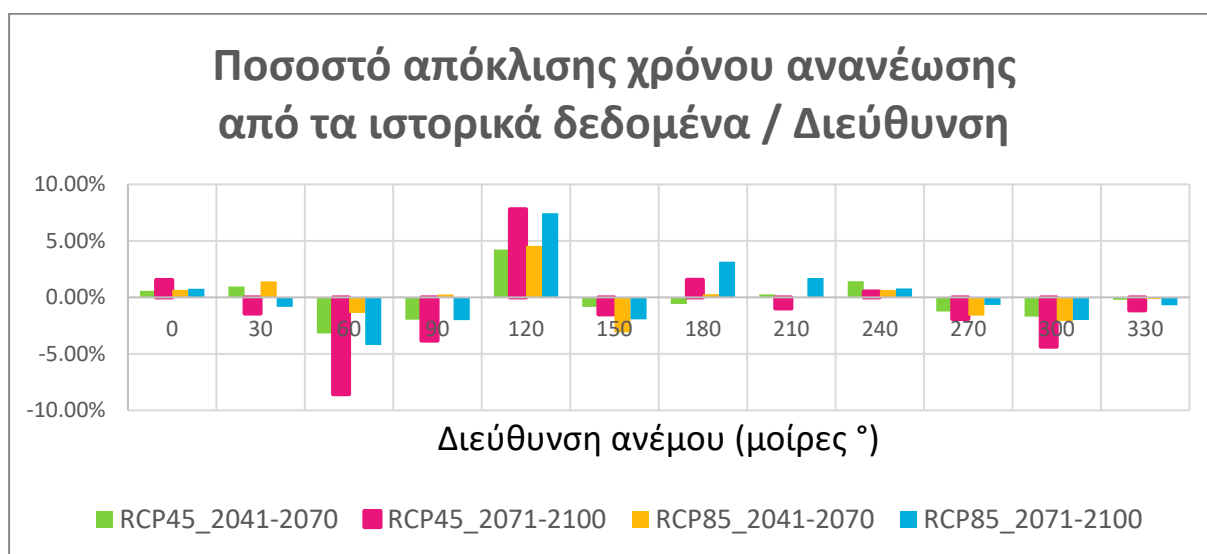
270°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 24,238 (RCP45_2071-2100) και 24,712 (HISTORY) ημέρες

300°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 26,189 (RCP45_2071-2100) και 27,383 (HISTORY) ημέρες

330°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 38,949 (RCP45_2071-2100) και 39,403 (HISTORY) ημέρες

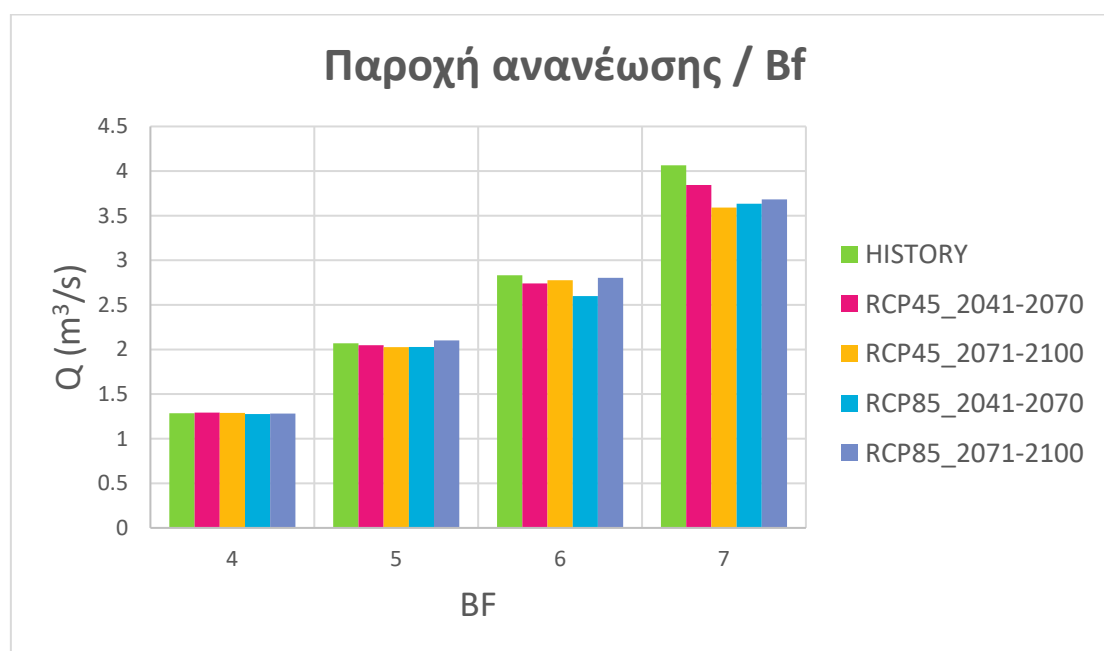
Οι γενικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν ως εξής:

- Δεν αναμένεται σημαντική επίδραση της κλιματικής αλλαγής για τους ανέμους διεύθυνσης 0°, 30°, 90°, 150°, 180°, 210°, 240°, 270°, 300°, 330° καθώς οι χρόνοι ανανέωσης των υδάτων αυξομειώνονται αμελητέα για όλα τα σενάρια.
- Αντίθετα, για τους ανέμους διεύθυνσης 60° και 120° οι αλλαγές είναι πιο έντονες. Συγκεκριμένα για τον άνεμο 60° αναμένεται πτώση του χρόνου ανανέωσης των υδάτων με το μετριοπαθές σενάριο RCP45_2071-2100 να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη της τάξεως του 9,4%. Αντίστοιχα για τον άνεμο 120° αναμένεται αύξηση του χρόνου ανανέωσης υδάτων με το μετριοπαθές σενάριο RCP45_2071-2100 να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη της τάξεως του 7,8% (Εικόνα 4.22).



Εικόνα 4.22. Διάγραμμα ποσοστού απόκλισης χρόνου ανανέωσης κλιματικών σεναρίων από τα ιστορικά δεδομένα ανά διεύθυνση – Line 1

4.3.2.2 ΛΙΜΕΝΑΣ ΑΛΩΝ – LINE 2



Εικόνα 4.23. Διάγραμμα παροχής ανανέωσης ανά Bf για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 2

4 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 1,277 (RCP85_2041-2070) και 1,292 (RCP45_2041-2070) m³/s

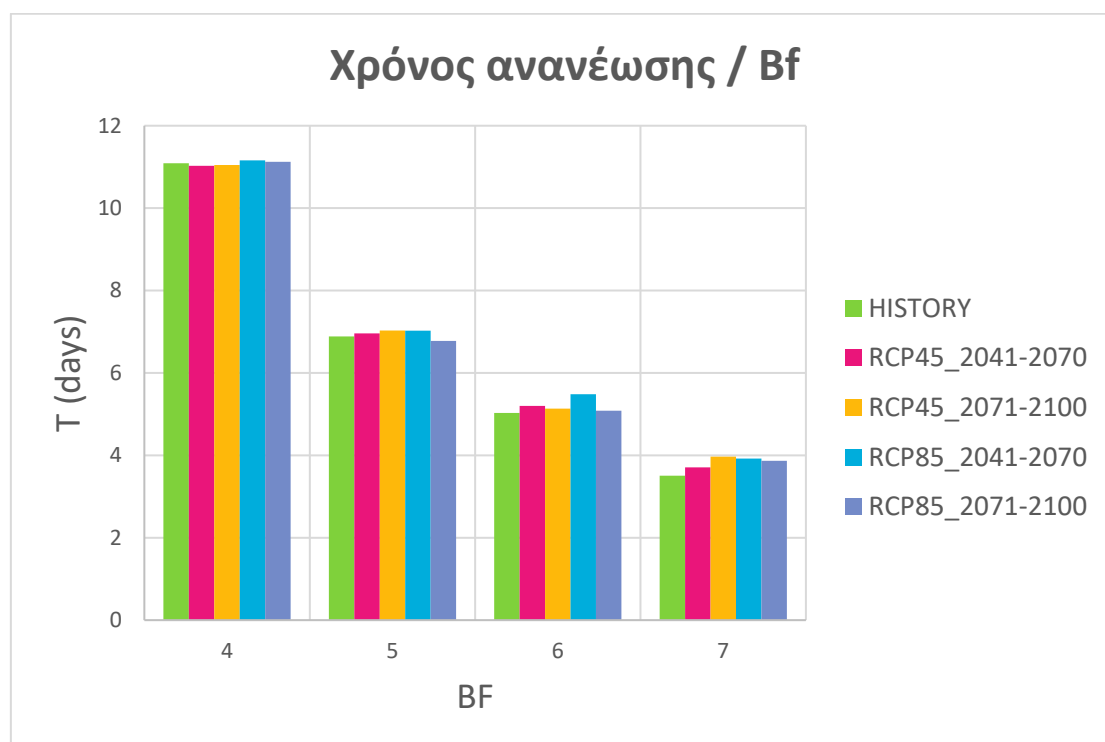
5 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 2,027 (RCP45_2071-2100) και 2,102 (RCP85_2071-2100) m³/s

6 BF: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 2,598 (RCP85_2041-2070) και 2,832 (HISTORY) m³/s

7 BF: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 3,591 (RCP45_2071-2100) και 4,065 (HISTORY) m³/s

Οι γενικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν ως εξής:

- Δεν αναμένεται σημαντική επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα μικρότερα Bf (4 και 5) καθώς οι παροχές ανανέωσης αυξομειώνονται αμελητέα σε όλα τα σενάρια.
- Αντίθετα παρατηρείται μείωση της παροχής ανανέωσης για τα κλιματικά μοντέλα συγκριτικά με τα ιστορικά δεδομένα για τα 6 και 7 Bf. Ειδικά για τα 7 Bf, το μετριοπαθές σενάριο RCP45_2071-2100 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μείωση της τάξεως του 13%.



Εικόνα 4.24. Διάγραμμα χρόνου ανανέωσης ανά Bf για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 2

4 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 11,026 (RCP45_2041-2070) και 11,158 (RCP85_2041-2070) ημέρες

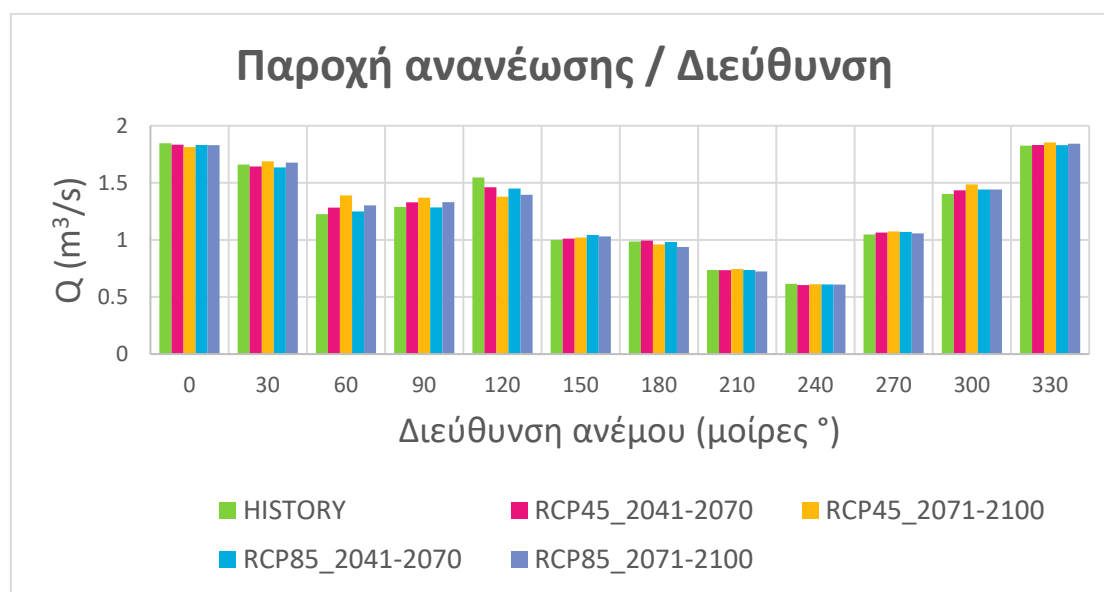
5 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 6,777 (RCP85_2071-2100) και 7,029 (RCP45_2071-2100) ημέρες

6 BF: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 5,03 (HISTORY) και 5,483 (RCP85_2041-2070) ημέρες

7 BF: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 3,505 (HISTORY) και 3,967 (RCP45_2071-2100) ημέρες

Οι γενικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν ως εξής:

- Δεν αναμένεται σημαντική επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα μικρότερα Bf (4 και 5) καθώς οι χρόνοι ανανέωσης υδάτων αυξομειώνονται αμελητέα σε όλα τα σεναρία.
- Αντίθετα παρατηρείται μείωση του χρόνου ανανέωσης υδάτων για τα κλιματικά μοντέλα συγκριτικά με τα ιστορικά δεδομένα για τα 6 και 7 Bf. Ειδικά για τα 7 Bf, το μετριοπαθές σενάριο RCP45_2071-2100 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αύξηση της τάξεως του 13%.



Εικόνα 4.25. Διάγραμμα παροχής ανανέωσης ανά διεύθυνση για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 2

0°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 1,813 (RCP45_2071-2100) και 1,846 (HISTORY) m³/s

30°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 1,635 (RCP85_2041-2070) και 1,688 (RCP45_2071-2100) m³/s

60°: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 1,225 (HISTORY) και 1,389 (RCP45_2071-2100) m³/s

90°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 1,284 (RCP85_2041-2070) και 1,369 (RCP45_2071-2100) m³/s

120°: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 1,379 (RCP45_2071-2100) και 1,546 (HISTORY) m³/s

150°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 0,999 (HISTORY) και 1,044 (RCP85_2041-2070) m³/s

180°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 0,938 (RCP85_2071-2100) και 0,994 (RCP45_2041-2070) m³/s

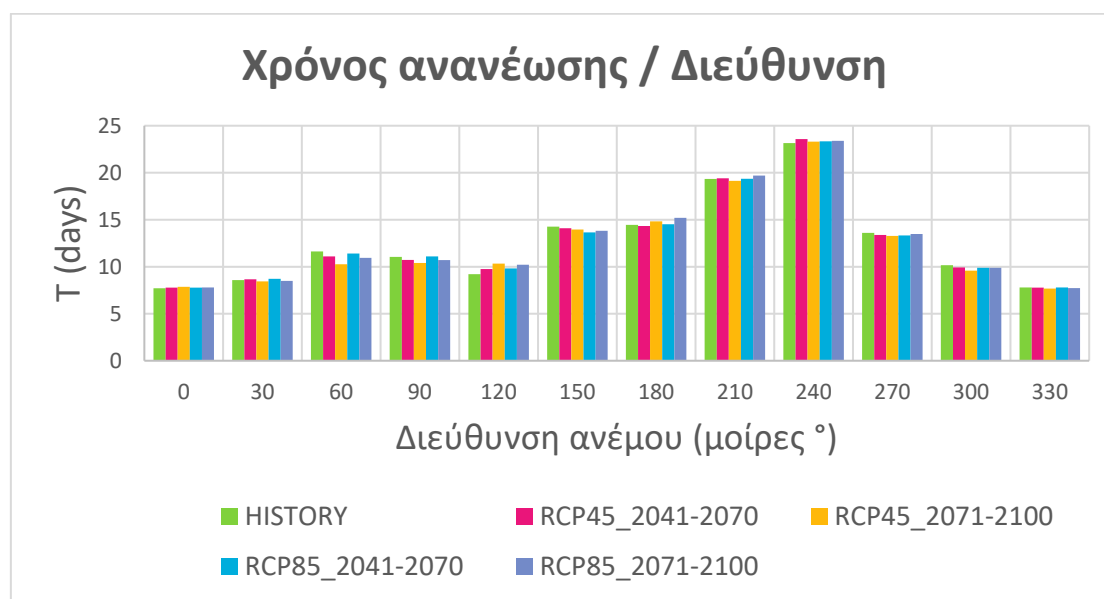
210°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 0,723 (RCP85_2071-2100) και 0,744 (RCP45_2071-2100) m³/s

240°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 0,604 (RCP45_2041-2070) και 0,615 (HISTORY) m³/s

270°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 1,048 (HISTORY) και 1,074 (RCP45_2071-2100) m³/s

300°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 1,402 (HISTORY) και 1,487 (RCP45_2071-2100) m³/s

330°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 1,826 (HISTORY) και 1,854 (RCP45_2071-2100) m³/s



Εικόνα 4.26. Διάγραμμα χρόνου ανανέωσης ανά διεύθυνση για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 2

0°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 7,718 (HISTORY) και 7,859 (RCP45_2071-2100) ημέρες

30°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 8,44 (RCP45_2071-2100) και 8,713 (RCP85_2041-2070) ημέρες

60°: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 10,256 (RCP45_2071-2100) και 11,628 (HISTORY) ημέρες

90°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 10,405 (RCP45_2071-2100) και 11,098 (RCP85_2041-2070) ημέρες

120°: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 9,214 (HISTORY) και 10,331 (RCP45_2071-2100) ημέρες

150°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 13,65 (RCP85_2041-2070) και 14,259 (HISTORY) ημέρες

180°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 14,337 (RCP45_2041-2070) και 15,196 (RCP85_2071-2100) ημέρες

210°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 19,137 (RCP45_2071-2100) και 19,695 (RCP85_2071-2100) ημέρες

240°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 23,151 (HISTORY) και 23,58 (RCP45_2041-2070) ημέρες

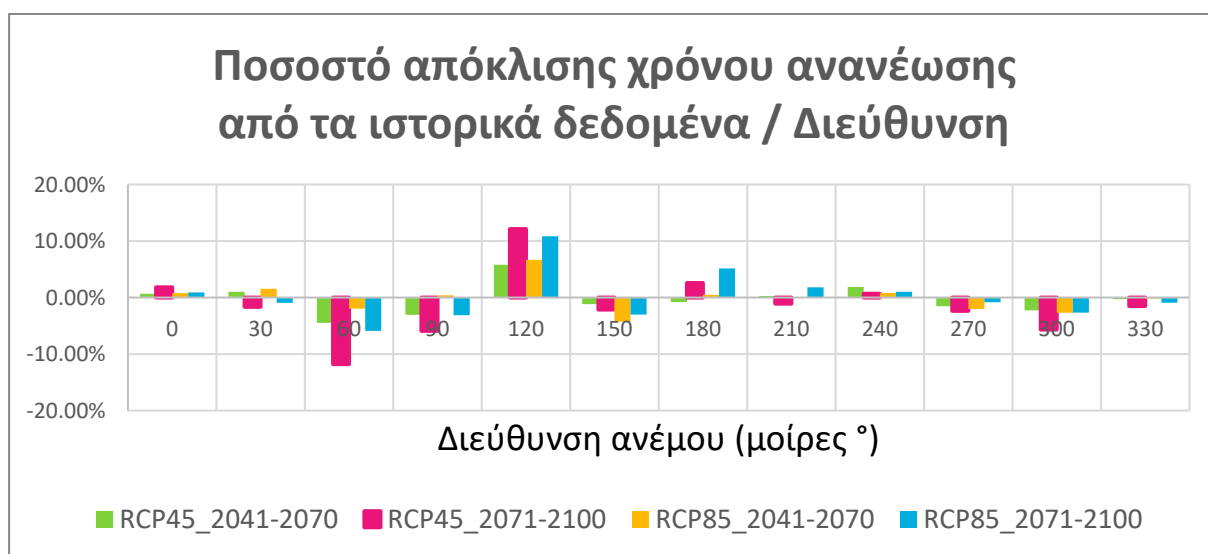
270°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 13,271 (RCP45_2071-2100) και 13,593 (HISTORY) ημέρες

300°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 9,584 (RCP45_2071-2100) και 10,16 (HISTORY) ημέρες

330°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 7,684 (RCP45_2071-2100) και 7,801 (HISTORY) ημέρες

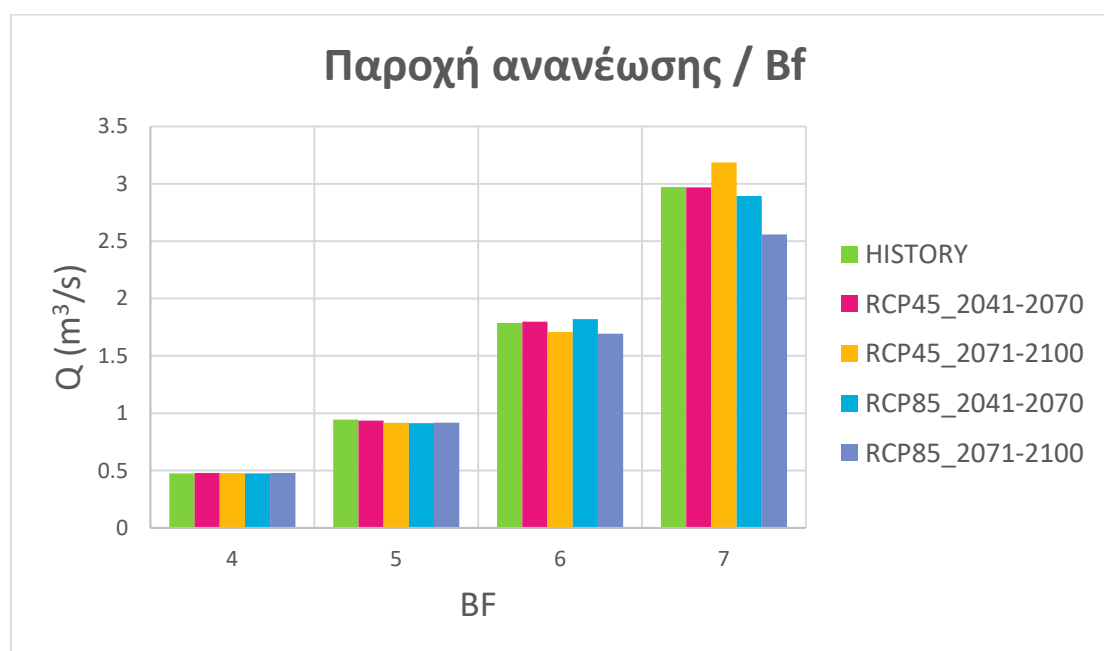
Οι γενικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν ως εξής:

- Δεν αναμένεται σημαντική επίδραση της κλιματικής αλλαγής για τους ανέμους διεύθυνσης 0°, 30°, 90°, 150°, 180°, 210°, 240°, 270°, 300°, 330° καθώς οι χρόνοι ανανέωσης των υδάτων αυξομειώνονται αμελητέα για όλα τα σενάρια.
- Αντίθετα, για τους ανέμους διεύθυνσης 60° και 120° οι αλλαγές είναι πιο έντονες. Συγκεκριμένα για τον άνεμο 60° αναμένεται πτώση του χρόνου ανανέωσης των υδάτων με το μετριοπαθές σενάριο RCP45_2071-2100 να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη της τάξεως του 13,4%. Αντίστοιχα για τον άνεμο 120° αναμένεται αύξηση του χρόνου ανανέωσης υδάτων με το μετριοπαθές σενάριο RCP45_2071-2100 να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη της τάξεως του 12,1% (Εικόνα 4.27).



Εικόνα 4.27. Διάγραμμα ποσοστού απόκλισης χρόνου ανανέωσης κλιματικών σεναρίων από τα ιστορικά δεδομένα ανά διεύθυνση – Line 2

4.3.2.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΑΚΤΗΣ ΜΙΑΟΥΛΗ – LINE 3



Εικόνα 4.28. Διάγραμμα παροχής ανανέωσης ανά Bf για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 3

4 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 0,474 (RCP85_2041-2070) και 0,48 (RCP45_2041-2070) m³/s

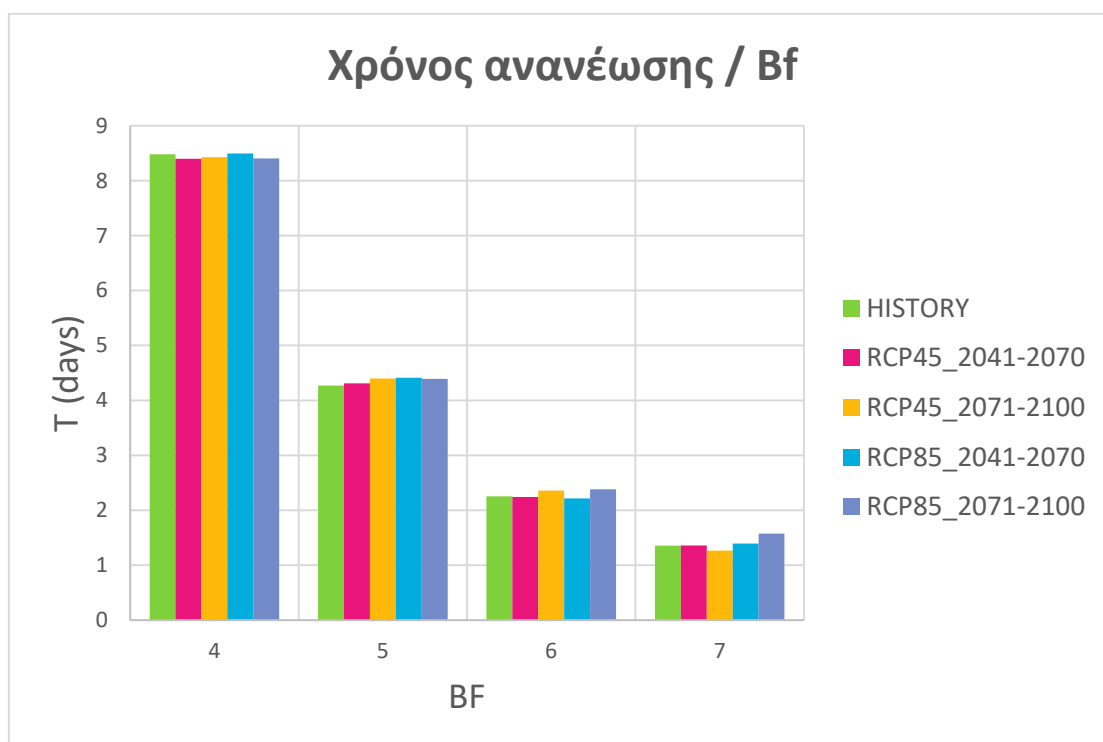
5 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 0,913 (RCP45_2071-2100) και 0,944 (HISTORY) m³/s

6 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 1,693 (RCP85_2071-2100) και 1,820 (RCP85_2041-2070) m³/s

7 BF: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 2,559 (RCP85_2071-2100) και 3,186 (RCP45_2071-2100) m³/s

Οι γενικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν ως εξής:

- Δεν αναμένεται σημαντική επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα μικρότερα Bf (4, 5 και 6) καθώς οι παροχές ανανέωσης αυξομειώνονται αμελητέα σε όλα τα σενάκια.
- Αντίθετα παρατηρείται μείωση της παροχής ανανέωσης για τα κλιματικά μοντέλα συγκριτικά με τα ιστορικά δεδομένα για τα 7 Bf. Το απαισιόδοξο σενάριο RCP85_2071-2100 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μείωση της τάξεως του 16%. Εξαιρεση αποτελεί το RCP45_2071-2100 του οποίου η παροχή ανανέωσης (3,186 m³/s) παρουσιάζει αύξηση σε σχέση με τα ιστορικά δεδομένα της τάξεως του 7,2%.



Εικόνα 4.29. Διάγραμμα χρόνου ανανέωσης ανά Bf για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 3

4 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 8,399 (RCP45_2041-2070) και 8,495 (RCP85_2041-2070) ημέρες

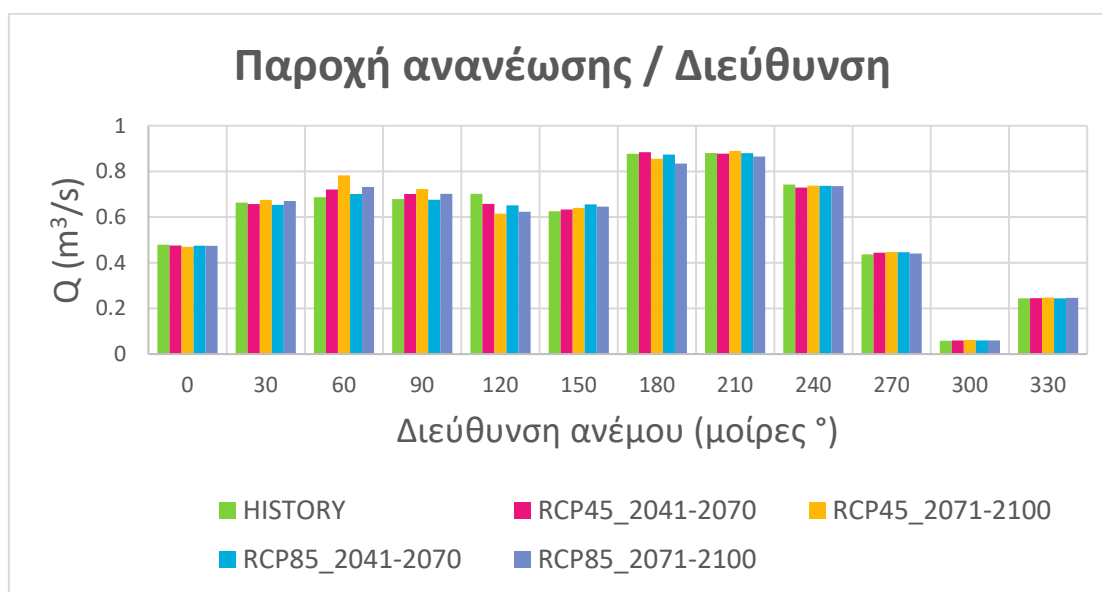
5 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 4,269 (HISTORY) και 4,412 (RCP45_2071-2100) ημέρες

6 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 2,215 (RCP85_2041-2070) και 2,381 (RCP85_2071-2100) ημέρες

7 BF: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 1,265 (RCP85_2071-2100) και 1,575 (RCP45_2071-2100) ημέρες

Οι γενικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν ως εξής:

- Δεν αναμένεται σημαντική επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα μικρότερα Bf (4, 5 και 6) καθώς οι χρόνοι ανανέωσης υδάτων αυξομειώνονται αμελητέα σε όλα τα σενάρια.
- Αντίθετα παρατηρείται αύξηση του χρόνου ανανέωσης υδάτων για τα κλιματικά μοντέλα συγκριτικά με τα ιστορικά δεδομένα για τα 7 Bf. Το απαισιόδοξο σενάριο RCP85_2071-2100 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αύξηση της τάξεως του 16%. Εξάιρεση αποτελεί το RCP45_2071-2100 του οποίου ο χρόνος ανανέωσης υδάτων (1,265 ημέρες) παρουσιάζει μείωση σε σχέση με τα ιστορικά δεδομένα της τάξεως του 7,2%.



Εικόνα 4.30. Διάγραμμα παροχής ανανέωσης ανά διεύθυνση για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 3

0°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 0,47 (RCP45_2071-2100) και 0,479 (HISTORY) m³/s

30°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 0,653 (RCP85_2041-2070) και 0,675 (RCP45_2071-2100) m³/s

60°: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 0,687 (HISTORY) και 0,782 (RCP45_2071-2100) m³/s

90°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 0,676 (RCP85_2041-2070) και 0,723 (RCP45_2071-2100) m³/s

120°: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 0,615 (RCP45_2071-2100) και 0,702 (HISTORY) m³/s

150°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 0,625 (HISTORY) και 0,655 (RCP85_2041-2070) m³/s

180°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 0,835 (RCP85_2071-2100) και 0,884 (RCP45_2041-2070) m³/s

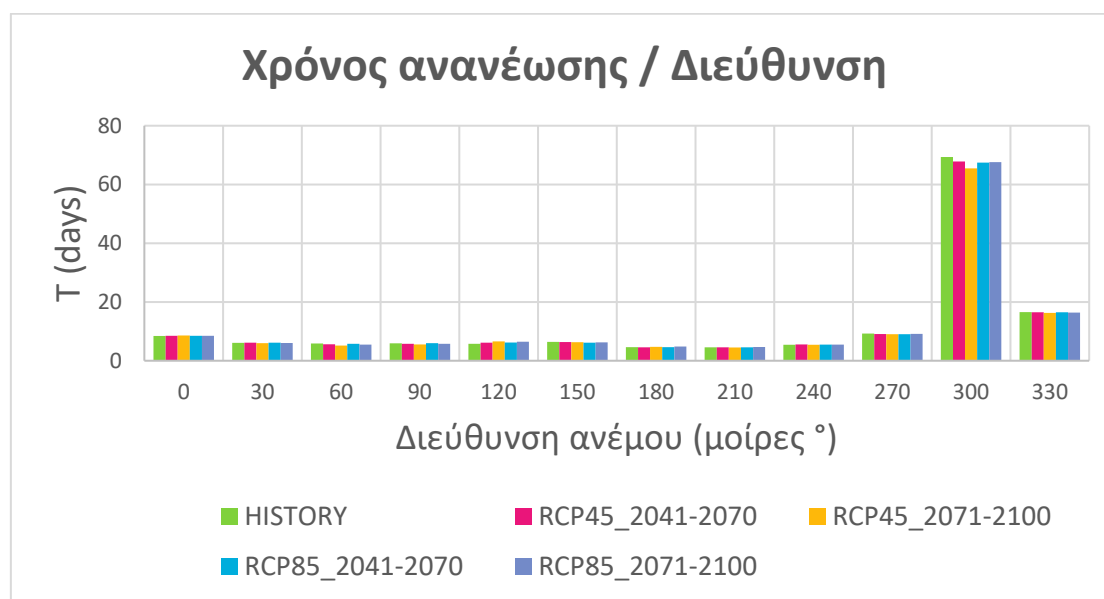
210°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 0,865 (RCP85_2071-2100) και 0,89 (RCP45_2071-2100) m³/s

240°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 0,729 (RCP45_2041-2070) και 0,743 (HISTORY) m³/s

270°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 0,437 (HISTORY) και 0,447 (RCP45_2071-2100) m³/s

300°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 0,058 (HISTORY) και 0,062 (RCP45_2071-2100) m³/s

330°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 0,244 (HISTORY) και 0,248 (RCP45_2071-2100) m³/s



Εικόνα 4.31. Διάγραμμα χρόνου ανανέωσης ανά διεύθυνση για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 3

0°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 8,419 (HISTORY) και 8,575 (RCP45_2071-2100) ημέρες

30°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 5,971 (RCP45_2071-2100) και 6,171 (RCP85_2041-2070) ημέρες

60°: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 5,151 (RCP45_2071-2100) και 5,867 (HISTORY) ημέρες

90°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 5,574 (RCP45_2071-2100) και 5,963 (RCP85_2041-2070) ημέρες

120°: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 5,741 (HISTORY) και 6,555 (RCP45_2071-2100) ημέρες

150°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 6,15 (RCP85_2041-2070) και 6,443 (HISTORY) ημέρες

180°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 4,557 (RCP45_2041-2070) και 4,829 (RCP85_2071-2100) ημέρες

210°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 4,529 (RCP45_2071-2100) και 4,66 (RCP85_2071-2100) ημέρες

240°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 5,426 (HISTORY) και 5,526 (RCP45_2041-2070) ημέρες

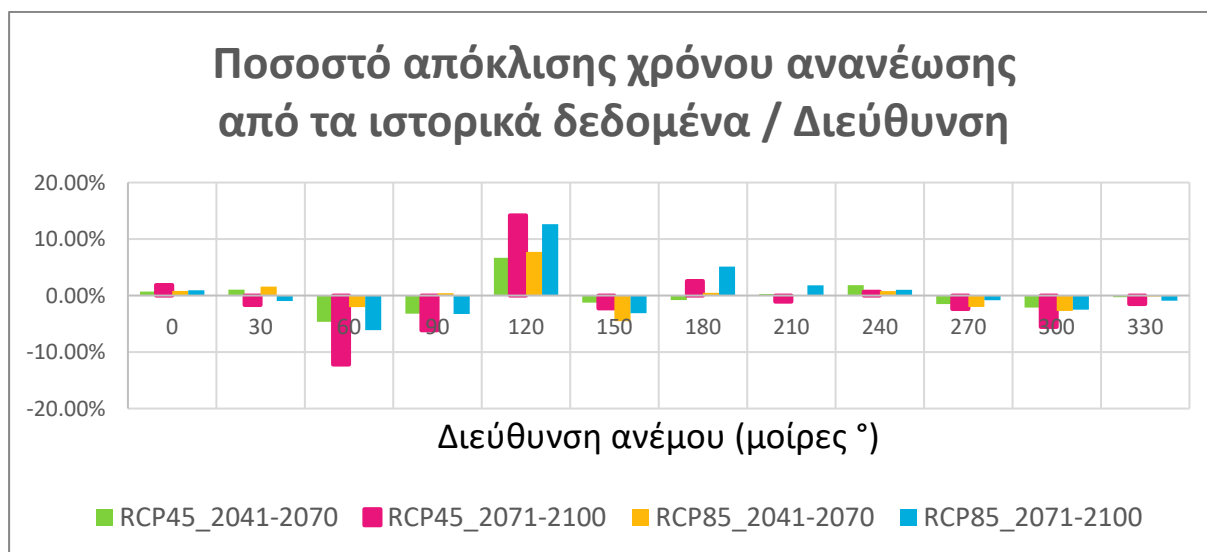
270°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 9,009 (RCP45_2071-2100) και 9,227 (HISTORY) ημέρες

300°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 65,47 (RCP45_2071-2100) και 69,328 (HISTORY) ημέρες

330°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 16,28 (RCP45_2071-2100) και 16,531 (HISTORY) ημέρες

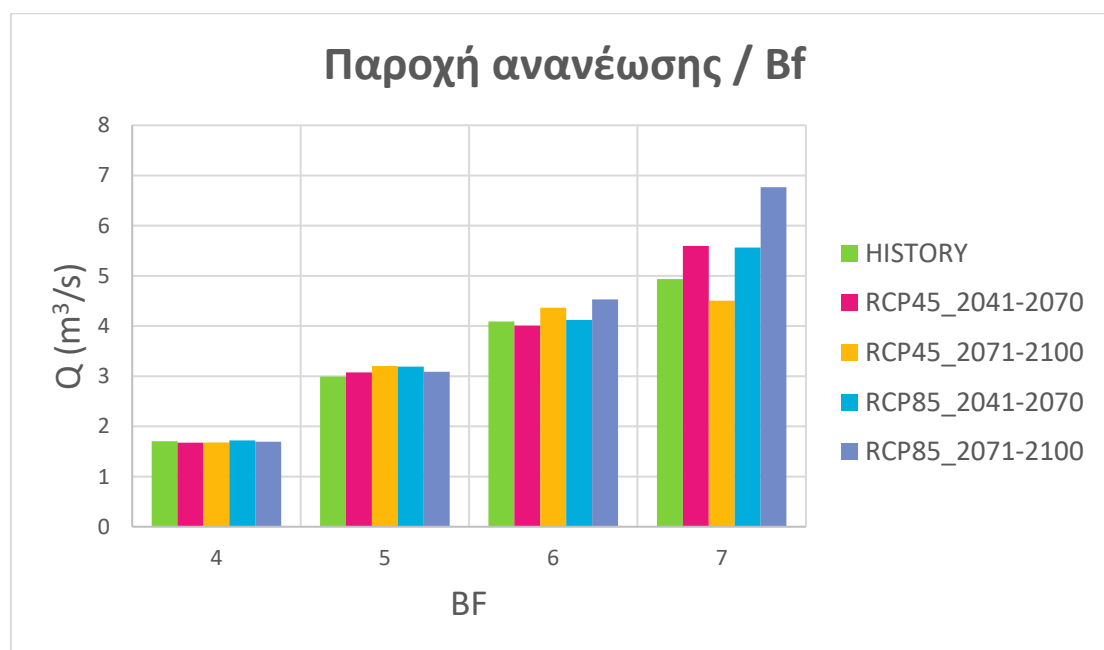
Οι γενικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν ως εξής:

- Δεν αναμένεται σημαντική επίδραση της κλιματικής αλλαγής για τους ανέμους διεύθυνσης 0°, 30°, 90°, 150°, 180°, 210°, 240°, 270°, 300°, 330° καθώς οι χρόνοι ανανέωσης των υδάτων αυξομειώνονται αμελητέα για όλα τα σενάρια.
- Αντίθετα, για τους ανέμους διεύθυνσης 60° και 120° οι αλλαγές είναι πιο έντονες. Συγκεκριμένα για τον άνεμο 60° αναμένεται πτώση του χρόνου ανανέωσης των υδάτων με το μετριοπαθές σενάριο RCP45_2071-2100 να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη της τάξεως του 13,9%. Αντίστοιχα για τον άνεμο 120° αναμένεται αύξηση του χρόνου ανανέωσης υδάτων με το μετριοπαθές σενάριο RCP45_2071-2100 να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη της τάξεως του 14,2% (Εικόνα 4.32).



Εικόνα 4.32. Διάγραμμα ποσοστού απόκλισης χρόνου ανανέωσης κλιματικών σεναρίων από τα ιστορικά δεδομένα ανά διεύθυνση – Line 3

4.3.2.4 ΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΛΙΜΕΝΑΣ – LINE 4



Εικόνα 4.33. Διάγραμμα παροχής ανανέωσης ανά Bf για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 4

4 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 1,676 (RCP45_2041-2070) και 1,72 (RCP85_2041-2070) m³/s

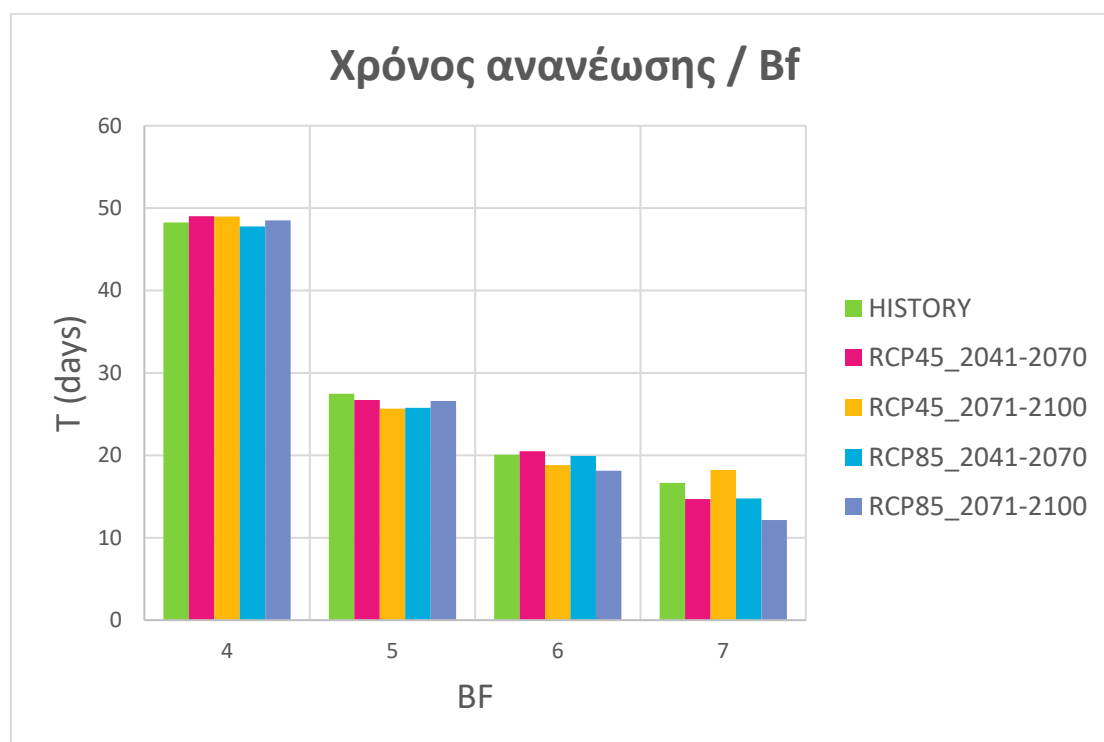
5 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 2,991 (HISTORY) και 3,202 (RCP45_2071-2100) m³/s

6 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 4,007 (RCP45_2041-2070) και 4,531 (RCP85_2071-2100) m³/s

7 BF: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 4,505 (RCP45_2071-2100) και 6,767 (RCP85_2071-2100) m³/s

Οι γενικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν ως εξής:

- Δεν αναμένεται σημαντική επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα μικρότερα Bf (4, 5 και 6) καθώς οι παροχές ανανέωσης αυξομειώνονται αμελητέα σε όλα τα σεναρία.
- Αντίθετα παρατηρείται αύξηση της παροχής ανανέωσης για τα κλιματικά μοντέλα συγκριτικά με τα ιστορικά δεδομένα για τα 7 Bf. Το απαισιόδοξο σενάριο RCP85_2071-2100 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αύξηση της τάξεως του 37%. Εξαιρεση αποτελεί το RCP45_2071-2100 του οποίου η παροχή ανανέωσης (4,505 m³/s) παρουσιάζει μείωση σε σχέση με τα ιστορικά δεδομένα της τάξεως του 9,5%.



Εικόνα 4.34. Διάγραμμα χρόνου ανανέωσης ανά Bf για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 4

4 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 47,774 (RCP85_2041-2070) και 49,015 (RCP45_2041-2070) ημέρες

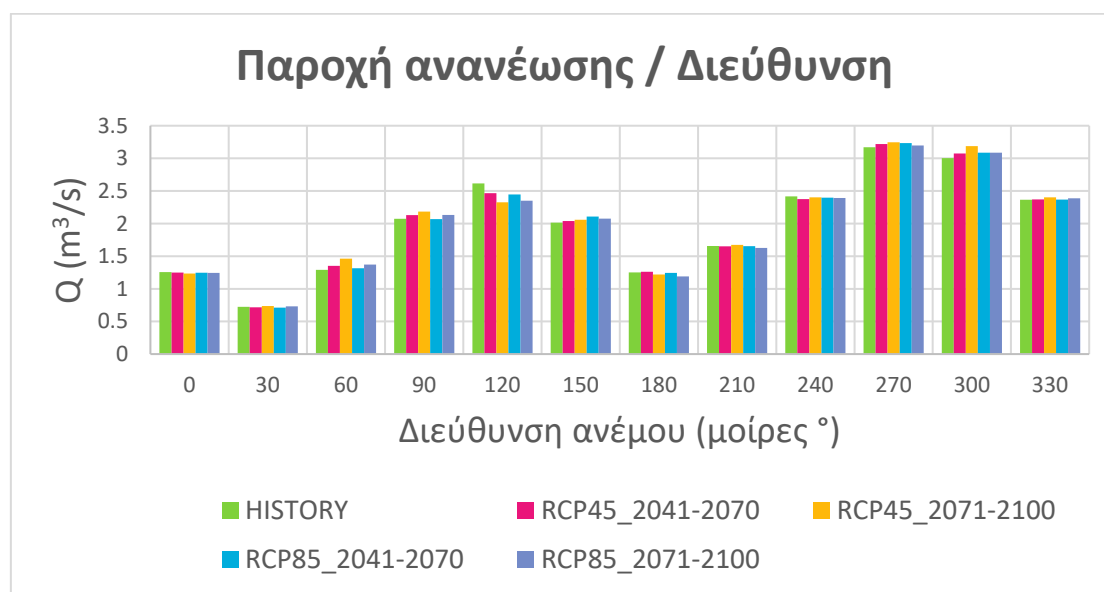
5 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 25,661 (RCP45_2071-2100) και 27,469 (HISTORY) ημέρες

6 BF: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 18,132 (RCP85_2071-2100) και 20,503 (RCP45_2041-2070) ημέρες

7 BF: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 12,142 (RCP85_2071-2100) και 18,237 (RCP45_2071-2100) ημέρες

Οι γενικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν ως εξής:

- Δεν αναμένεται σημαντική επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα μικρότερα Bf (4, 5 και 6) καθώς οι χρόνοι ανανέωσης υδάτων αυξομειώνονται αμελητέα σε όλα τα σεναρία.
- Αντίθετα παρατηρείται μείωση του χρόνου ανανέωσης υδάτων για τα κλιματικά μοντέλα συγκριτικά με τα ιστορικά δεδομένα για τα 7 Bf. Το απαισιόδοξο σενάριο RCP85_2071-2100 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μείωση της τάξεως του 37%. Εξάιρεση αποτελεί το RCP45_2071-2100 του οποίου ο χρόνος ανανέωσης υδάτων (18,237 ημέρες) παρουσιάζει αύξηση σε σχέση με τα ιστορικά δεδομένα της τάξεως του 9,5%.



Εικόνα 4.35. Διάγραμμα παροχής ανανέωσης ανά διεύθυνση για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 4

0°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 1,237 (RCP45_2071-2100) και 1,257 (HISTORY) m³/s

30°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 0,712 (RCP85_2041-2070) και 0,735 (RCP45_2071-2100) m³/s

60°: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 1,29 (HISTORY) και 1,464 (RCP45_2071-2100) m³/s

90°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 2,068 (RCP85_2041-2070) και 2,185 (RCP45_2071-2100) m³/s

120°: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 2,326 (RCP45_2071-2100) και 2,615 (HISTORY) m³/s

150°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 2,014 (HISTORY) και 2,107 (RCP85_2041-2070) m³/s

180°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 1,19 (RCP85_2071-2100) και 1,26 (RCP45_2041-2070) m³/s

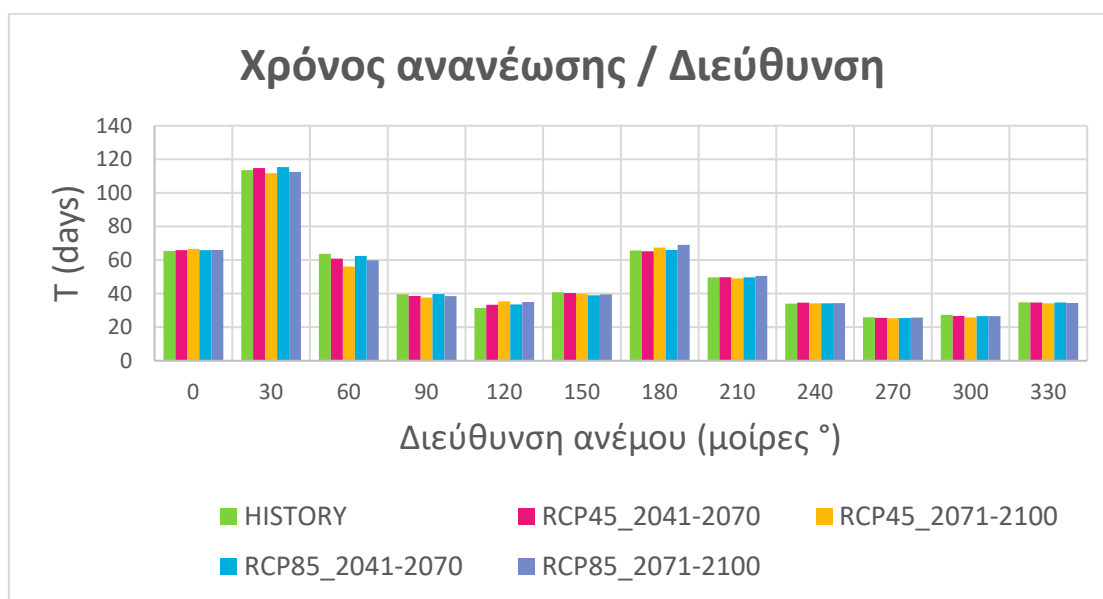
210°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 1,626 (RCP85_2071-2100) και 1,673 (RCP45_2071-2100) m³/s

240°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 2,374 (RCP45_2041-2070) και 2,418 (HISTORY) m³/s

270°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 3,169 (HISTORY) και 3,246 (RCP45_2071-2100) m³/s

300°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 3,004 (HISTORY) και 3,186 (RCP45_2071-2100) m³/s

330°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, η παροχή ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 2,364 (HISTORY) και 2,401 (RCP45_2071-2100) m³/s



Εικόνα 4.36. Διάγραμμα χρόνου ανανέωσης ανά διεύθυνση για κάθε κλιματικό σενάριο – Line 4

0°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 65,371 (HISTORY) και 66,59 (RCP45_2071-2100) ημέρες

30°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 111,711 (RCP45_2071-2100) και 115,367 (RCP85_2041-2070) ημέρες

60°: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 56,135 (RCP45_2071-2100) και 63,676 (HISTORY) ημέρες

90°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 37,606 (RCP45_2071-2100) και 39,736 (RCP85_2041-2070) ημέρες

120°: Σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 31,416 (HISTORY) και 35,323 (RCP45_2071-2100) ημέρες

150°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 38,995 (RCP85_2041-2070) και 40,801 (HISTORY) ημέρες

180°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 65,182 (RCP45_2041-2070) και 69,049 (RCP85_2071-2100) ημέρες

210°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 49,105 (RCP45_2071-2100) και 50,523 (RCP85_2071-2100) ημέρες

240°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 33,986 (HISTORY) και 34,606 (RCP45_2041-2070) ημέρες

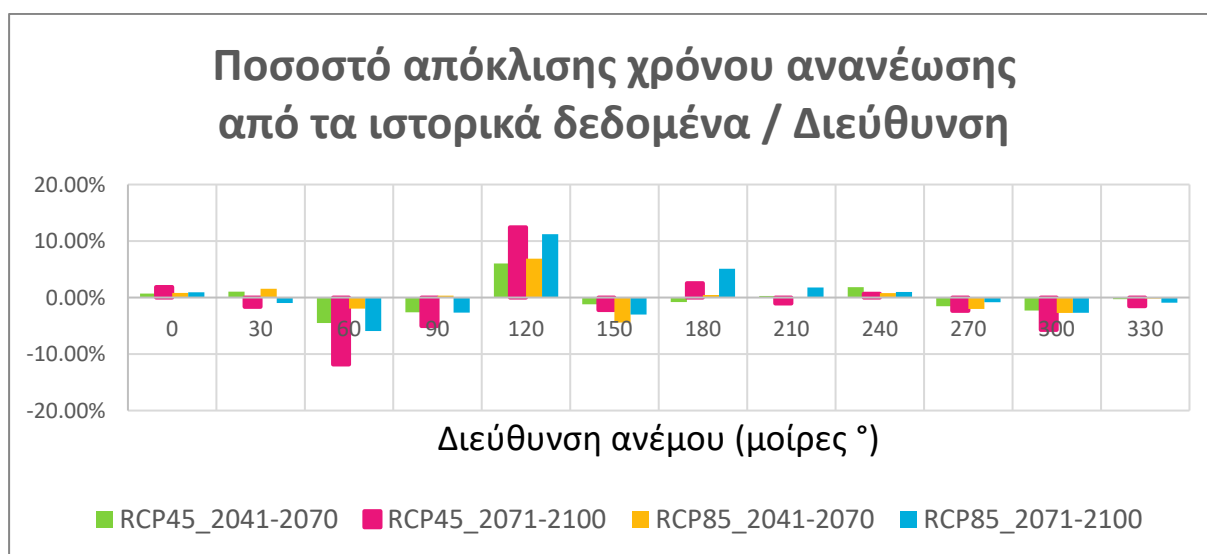
270°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 25,312 (RCP45_2071-2100) και 25,925 (HISTORY) ημέρες

300°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 25,786 (RCP45_2071-2100) και 27,352 (HISTORY) ημέρες

330°: Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των σεναρίων, ο χρόνος ανανέωσης κυμαίνεται μεταξύ 34,219 (RCP45_2071-2100) και 34,75 (HISTORY) ημέρες

Οι γενικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν ως εξής:

- Δεν αναμένεται σημαντική επίδραση της κλιματικής αλλαγής για τους ανέμους διεύθυνσης 0°, 30°, 90°, 150°, 180°, 210°, 240°, 270°, 300°, 330° καθώς οι χρόνοι ανανέωσης των υδάτων αυξομειώνονται αμελητέα για όλα τα σενάρια.
- Αντίθετα, για τους ανέμους διεύθυνσης 60° και 120° οι αλλαγές είναι πιο έντονες. Συγκεκριμένα για τον άνεμο 60° αναμένεται πτώση του χρόνου ανανέωσης των υδάτων με το μετριοπαθές σενάριο RCP45_2071-2100 να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη της τάξεως του 13,4%. Αντίστοιχα για τον άνεμο 120° αναμένεται αύξηση του χρόνου ανανέωσης υδάτων με το μετριοπαθές σενάριο RCP45_2071-2100 να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη της τάξεως του 12,4% (Εικόνα 4.37).



Εικόνα 4.37. Διάγραμμα ποσοστού απόκλισης χρόνου ανανέωσης κλιματικών σεναρίων από τα ιστορικά δεδομένα ανά διεύθυνση – Line 4

4.3.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων παλιρροιογενούς κυκλοφορίας

Ο τρόπος που επηρεάζει η μεταβολή της στάθμης της θάλασσας την ανανέωση των υδάτων του λιμένα του Πειραιά γίνεται αντιληπτός από την απεικόνιση των αποτελεσμάτων με χρονικό βήμα 1.5 hrs στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.21). Η περίοδος των 12 ωρών που παρατηρήθηκε το φαινόμενο της παλίρροιας διαιρέθηκε σε 8 υποπεριόδους και στο τέλος της καθεμίας απεικονίστηκε το στιγμιότυπο με τις τρέχουσες ταχύτητες και τις κατευθύνσεις τους. Παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια της πλήμμης υπάρχει εισροή στην λιμενολεκάνη ενώ κατά τη διάρκεια της ρηχίας υπάρχει εκροή. Χαρακτηριστικά σημεία, για να γίνει κατανοητό το πως μεταβάλλεται η στάθμη της θάλασσας είναι το 3ωρο όπου η θάλασσα φτάνει στη μέγιστη στάθμη (πλημμυρίδα), το 6ωρο όπου η θάλασσα επανήλθε στην αρχική της στάθμη, το 9ωρο όπου η θάλασσα πέφτει στην χαμηλότερη της στάθμη (άμπωτη) και το τέλος του 12ωρου όπου η στάθμη ξανά επιστρέφει στα αρχικά της επίπεδα ολοκληρώνοντας μία περίοδο. Αξιοσημείωτο ότι οι ταχύτητες που αναπτύσσονται στις διατομές ελέγχου παραμένουν μικρές και μικρότερες των σεναρίων ανεμογενούς κυκλοφορίας που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική. Το μέγιστο της χρωματικής κλίμακας έχει πλέον οριστεί στα 0,003 m/s. Συμπερασματικά η συνιστώσα της παλίρροιας συντελεί με μικρότερη ένταση στην ανανέωση των υδάτων. Ακολουθούν οι παρατηρήσεις για κάθε στιγμιότυπο.

1.5 ΩΡΕΣ (άνοδος στάθμης προς την πλημμυρίδα): Είσοδος υδάτων προς το εσωτερικό του λιμένα με ταχύτητες της τάξεως του 0,01 m/s. Η κίνηση παρατηρείται κυρίως στο κομμάτι του προλιμένα και του κεντρικού λιμένα ενώ οι ταχύτητες μειώνονται όσο πλησιάζουμε στην ανατολική πλευρά. Μικρή κίνηση παρουσιάζει ο λιμένας Αλών.

3 ΩΡΕΣ (πλημμυρίδα): Παρατηρείται κατεύθυνση υδάτων προς το εξωτερικό του λιμένα με τη διαφορά ότι οι ταχύτητες έχουν μειωθεί στα 0,0005 m/s περίπου. Σχεδόν μηδενική κίνηση παρουσιάζει και ο λιμένας των Αλών ενώ τείνει στο μηδέν στη λιμενολεκάνη δυτικά της ακτής Μιαούλη.

4.5 ΩΡΕΣ (πτώση στάθμης προτού φτάσει στην αρχική της): Σε αυτή την φάση συνεχίζεται η έξοδος των υδάτων από το λιμένα. Οι ταχύτητες κυμαίνονται σε επίπεδα μεταξύ 1,5ώρου και 3ωρου ξεπερνώντας τα 0,003 m/s. Και σε αυτήν την περίπτωση η κίνηση παρατηρείται κυρίως στον προλιμένα ενώ στο λιμένα Αλών παρουσιάζεται έξοδος με μικρότερες ταχύτητες μόνο στα ύδατα κοντά στη διατομή.

6 ΩΡΕΣ (επιστροφή στην αρχική στάθμη): Σε αυτό το στιγμιότυπο παρατηρείται έντονη κίνηση. Τα ύδατα εξακολουθούν να έχουν κατεύθυνση εξόδου από το λιμένα, ευνοϊκή για την ανανέωση τους ενώ οι ταχύτητες τους τα 0,002 m/s σε κάποιες περιοχές. Παρατηρείται ανανέωση και στην ανατολική πλευρά του λιμένα ενώ σε μικρό βαθμό ανανεώνεται και η λιμενολεκάνη δυτικά της ακτής Μιαούλη.

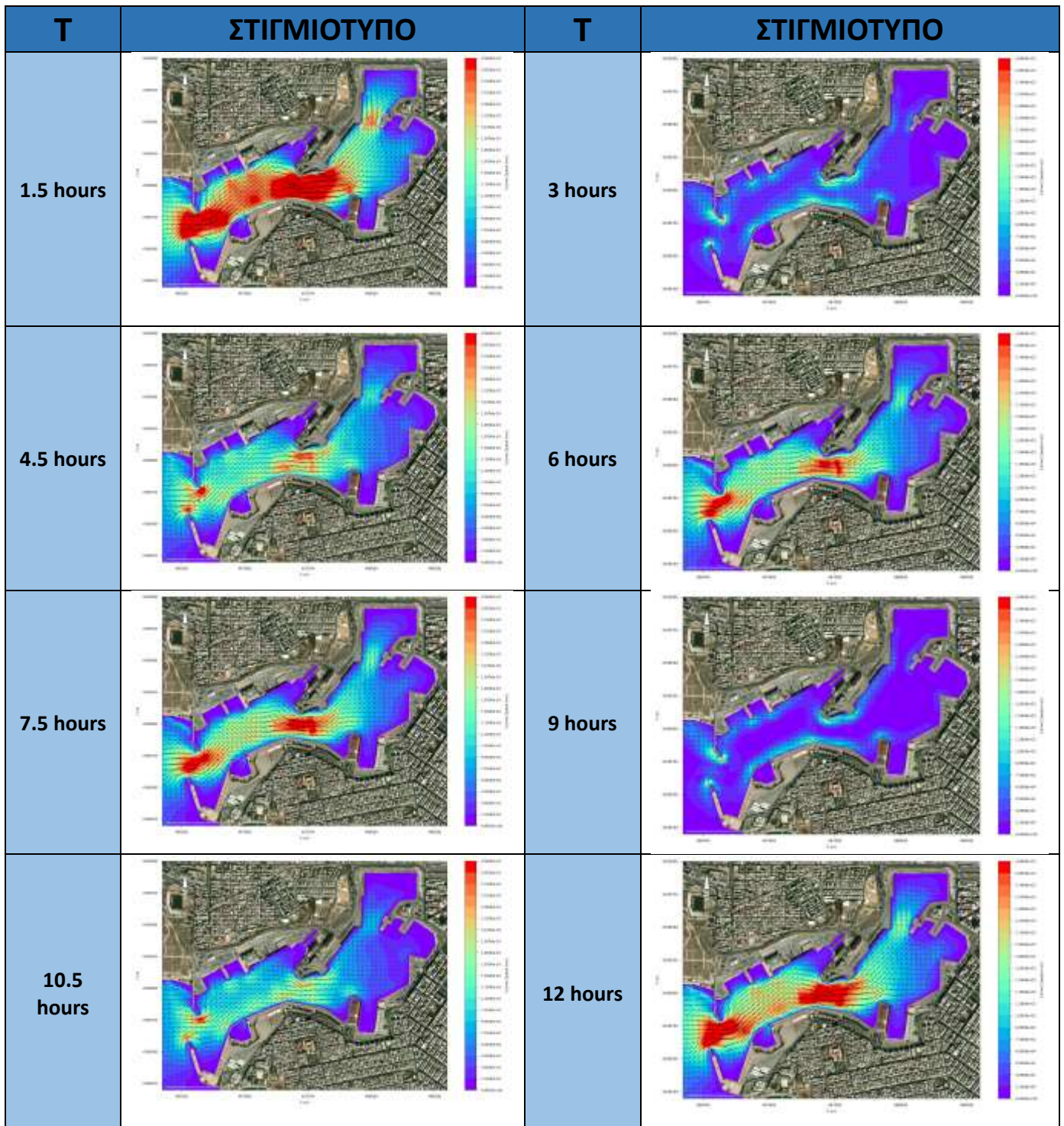
7.5 ΩΡΕΣ (πτώση στάθμης προτού φτάσει στην άμπωτη): Η διαρκής πτώση της θαλάσσιας στάθμης ευνοεί την ανανέωση των υδάτων. Και σε αυτό το στιγμιότυπο παρατηρούνται παρόμοιες ταχύτητες με το προηγούμενο με εμφανή την έντονη κίνηση που συμβαίνει στο εσωτερικό του λιμένα των Αλών.

9 ΩΡΕΣ (άμπωτη): Έχοντας φτάσει στο χαμηλότερο σημείο της στάθμης διακρίνεται ότι η κίνηση τείνει να μηδενιστεί σε όλο το λιμένα. Πολύ μικρές ταχύτητες της τάξεως των 0,001 m/s παρατηρούνται μόνο στον προλιμένα με κατευθύνσεις τόσο εισόδου όσο και εξόδου.

10.5 ΩΡΕΣ (άνοδος στάθμης προς την αρχική): Όπως και στο στιγμιότυπο του 1,5ωρου, τα ύδατα εισέρχονται προς το εσωτερικό του λιμένα με αυξημένη κίνηση στον προλιμένα της τάξεως των 0,002 m/s. Μικρότερες ταχύτητες παρατηρούνται στον κεντρικό λιμένα και των Αλών με μόνη εξαίρεση να αποτελεί τη λιμενολεκάνη δυτικά της ακτής Μιαούλη που δεν παρουσιάζει κίνηση.

12 ΩΡΕΣ (επιστροφή στην αρχική στάθμη): Τελευταίο στιγμιότυπο αυτό των 12 ωρών με την ολοκλήρωση της περιόδου. Εδώ παρατηρούνται οι μεγαλύτερες ταχύτητες έως τώρα μετά το 1,5ωρο για το φαινόμενο που ξεπερνούν τα 0,003 m/s. Οι κατευθύνσεις είναι προς το εσωτερικό ενώ κίνηση διακρίνεται σε όλες τις λιμενολεκάνες του λιμένα.

Πίνακας 4.21. Παλίρροια - Στιγμιότυπα τρεχουσών ταχυτήτων με τις διευθύνσεις τους σε περίοδο T=12 ώρες



5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Συμπεράσματα για την ανανέωση των υδάτων του λιμένα του Πειραιά

ΔΙΑΤΟΜΗ (LINE) 1 -ΕΙΣΟΔΟΣ ΛΙΜΕΝΑ

Στην πρώτη περίπτωση, που μελετήθηκε όλο ο λιμένας του Πειραιά με έξοδο υδάτων την είσοδο του λιμένα παρατηρούνται 3 δυσμενείς διευθύνσεις ανέμων με αρκετά υψηλούς χρόνους ανανέωσης υδάτων. Αυτοί είναι οι άνεμοι των 0°, 30° και 210°. Για τους υπόλοιπους 9 ανέμους, οι χρόνοι ανανέωσης κυμαίνονται σε ικανοποιητικά χαμηλά επίπεδα (Πίνακας 4.17). Όσον αφορά τον διαχωρισμό ανά Bf, όπου συμπεριλαμβάνονται όλοι οι άνεμοι παρατηρείται ότι ο σταθμισμένος μέσος όρος του χρόνου ανανέωσης υδάτων κυμαίνεται από 15,656 ημέρες για τα 7 Bf έως και 48,55 ημέρες για τα 4 Bf (Πίνακας 4.13). Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να υπενθυμιστεί ότι έχουν αγνοηθεί στους υπολογισμούς τα Bf 1, 2 και 3 για τα οποία παρατηρούνται οι μεγαλύτερες συχνότητες εμφάνισης. Επομένως είναι προφανές ότι οι χρόνοι ανανέωσης είναι πολύ μεγαλύτεροι από τους προαναφερθέντες. Σχετικά με την επίδραση της παλίρροιας στην ανανέωση των υδάτων παρατηρούνται ταχύτητες πολύ μικρότερες από αυτές που αναπτύσσονται λόγω ανέμων. Ωστόσο τα στιγμιότυπα μέσα στις 12 ώρες δείχνουν διαρκή εναλλαγή της κατεύθυνσης των υδάτων, ειδικά μέσα στον προλιμένα, γεγονός που επιδρά θετικά στην ανανέωση τους. Αυτή συμβαίνει τμηματικά καθώς στο ανατολικό τμήμα του λιμένα δεν παρατηρείται κίνηση των υδάτων.

ΔΙΑΤΟΜΗ (LINE) 2 – ΛΙΜΕΝΑΣ ΑΛΩΝ

Στη δεύτερη περίπτωση μελετήθηκε ο λιμένας των Αλών, εσωτερικός λιμένας που βρίσκεται στη βορειοανατολική πλευρά του λιμένα. Παρατηρούνται 2 δυσμενείς διευθύνσεις ανέμων με υψηλούς χρόνους ανανέωσης υδάτων. Αυτοί είναι οι άνεμοι των 210° και 240°. Για τους υπόλοιπους 10 ανέμους, οι χρόνοι ανανέωσης κυμαίνονται σε ικανοποιητικά χαμηλά επίπεδα (Πίνακας 4.18). Ωστόσο δεν παρατηρείται μεγάλη διασπορά όσο στην 1^η περίπτωση, σίγουρα ρόλο σε αυτό διαδραματίζει ο μικρότερος όγκος και η απλούστερη γεωμετρία του. Όσον αφορά τον διαχωρισμό ανά Bf, όπου συμπεριλαμβάνονται όλοι οι άνεμοι παρατηρείται ότι ο σταθμισμένος μέσος όρος του χρόνου ανανέωσης υδάτων κυμαίνεται από 3,505 ημέρες για τα 7 Bf έως και 11,09 ημέρες για τα 4 Bf (Πίνακας 4.14). Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να υπενθυμιστεί ότι έχουν αγνοηθεί στους υπολογισμούς τα Bf 1, 2 και 3 για τα οποία παρατηρούνται οι μεγαλύτερες συχνότητες εμφάνισης. Επομένως είναι προφανές ότι οι χρόνοι ανανέωσης είναι πολύ μεγαλύτεροι από τους προαναφερθέντες. Σχετικά με την επίδραση της παλίρροιας στην ανανέωση των υδάτων παρατηρούνται ταχύτητες πολύ μικρότερες από αυτές που αναπτύσσονται λόγω ανέμων. Επίσης σε αρκετά στιγμιότυπα παρατηρείται ότι ο λιμένας των Αλών δεν επηρεάζεται από την αλλαγή της στάθμης της θάλασσας αφού οι ταχύτητες τείνουν να γίνουν μηδενικές (Πίνακας 4.21). Επομένως συμπεραίνουμε ότι η παλίρροια δε βοηθά την ανανέωση των υδάτων του λιμένα των Αλών.

ΔΙΑΤΟΜΗ (LINE) 3 – ΛΙΜΕΝΟΛΕΚΑΝΗ ΔΥΤΙΚΑ ΑΚΤΗΣ ΜΙΑΟΥΛΗ

Στην τρίτη περίπτωση μελετήθηκε η λιμενολεκάνη δυτικά της ακτής Μιαούλη που βρίσκεται στη νοτιοανατολική πλευρά του λιμένα. Παρατηρείται μόλις 1 δυσμενή διεύθυνση ανέμου με υπερβολικά υψηλούς χρόνους ανανέωσης υδάτων σχετικά με τους υπόλοιπους. Αυτός είναι ο άνεμος των 300°. Ο λόγος που παρουσιάζει τόσο μεγάλη απόκλιση θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μίας νέας μελέτης. Για τους υπόλοιπους 11 ανέμους, οι χρόνοι ανανέωσης κυμαίνονται σε ικανοποιητικά χαμηλά επίπεδα (Πίνακας 4.19). Όσον αφορά τον διαχωρισμό ανά Bf, όπου συμπεριλαμβάνονται όλοι οι άνεμοι παρατηρείται ότι ο σταθμισμένος μέσος όρος του χρόνου ανανέωσης υδάτων κυμαίνεται από 1,356 ημέρες για τα 7 Bf έως και 8,48 ημέρες για τα 4 Bf (Πίνακας 4.15). Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να υπενθυμιστεί ότι έχουν αγνοηθεί στους υπολογισμούς τα Bf 1, 2 και 3 για τα οποία παρατηρούνται οι μεγαλύτερες συχνότητες εμφάνισης. Επομένως είναι προφανές ότι οι χρόνοι

ανανέωσης είναι πολύ μεγαλύτεροι από τους προαναφερθέντες. Σχετικά με την επίδραση της παλίρροιας στην ανανέωση των υδάτων παρατηρούνται ταχύτητες πολύ μικρότερες από αυτές που αναπτύσσονται λόγω ανέμων. Επίσης σχεδόν σε όλα τα στιγμιότυπα παρατηρείται ότι η λιμενολεκάνη δυτικά της ακτής Μιαούλη δεν επηρεάζεται από την αλλαγή της στάθμης της θάλασσας αφού οι ταχύτητες τείνουν να γίνουν μηδενικές. Ακόμα και σε αυτά που παρατηρούνται μικρές ταχύτητες, η κίνηση περιορίζεται λίγα μέτρα από τη διατομή εξόδου οπότε τα ύδατα στο εσωτερικό κομμάτι δεν ανανεώνονται (Πίνακας 4.21). Επομένως συμπεραίνουμε ότι η παλίρροια δε βοηθά την ανανέωση των υδάτων στη λιμενολεκάνη δυτικά της ακτής Μιαούλη.

ΔΙΑΤΟΜΗ (LINE) 4 – ΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΛΙΜΕΝΑΣ

Στην τέταρτη και τελευταία περίπτωση μελετήθηκε ο κεντρικός λιμένας. Παρατηρούνται 4 δυσμενείς διευθύνσεις ανέμων με υψηλούς χρόνους ανανέωσης υδάτων. Αυτοί είναι οι άνεμοι των 0°, 30°, 60° και 180°. Για τους υπόλοιπους 8 ανέμους, οι χρόνοι ανανέωσης κυμαίνονται σε ικανοποιητικά χαμηλά επίπεδα (Πίνακας 4.20). Με εξαίρεση τον άνεμο των 30° όπου ο χρόνος ανανέωσης κρίνεται υπερβολικά υψηλός, δεν παρατηρείται μεγάλη διασπορά μεταξύ των υπολοίπων. Όσον αφορά τον διαχωρισμό ανά Bf, όπου συμπεριλαμβάνονται όλοι οι άνεμοι παρατηρείται ότι ο σταθμισμένος μέσος όρος του χρόνου ανανέωσης υδάτων κυμαίνεται από 16,65 ημέρες για τα 7 Bf έως και 48,264 ημέρες για τα 4 Bf (Πίνακας 4.16). Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να υπενθυμιστεί ότι έχουν αγνοηθεί στους υπολογισμούς τα Bf 1, 2 και 3 για τα οποία παρατηρούνται οι μεγαλύτερες συχνότητες εμφάνισης. Επομένως είναι προφανές ότι οι χρόνοι ανανέωσης είναι πολύ μεγαλύτεροι από τους προαναφερθέντες. Σχετικά με την επίδραση της παλίρροιας στην ανανέωση των υδάτων παρατηρούνται ταχύτητες πολύ μικρότερες από αυτές που αναπτύσσονται λόγω ανέμων. Εξάλλου στην πλειοψηφία των στιγμιότυπων διακρίνεται μηδενική κίνηση στο ανατολικό τμήμα του λιμένα (Πίνακας 4.21). Επομένως ο κεντρικός λιμένας ανανεώνεται τοπικά με το μεγαλύτερο τμήμα του να μην ευνοείται από το φαινόμενο της αλλαγής της στάθμης της θάλασσας.

5.2 Συμπεράσματα για την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην ανανέωση των υδάτων του λιμένα του Πειραιά

ΔΙΑΤΟΜΗ (LINE) 1 -ΕΙΣΟΔΟΣ ΛΙΜΕΝΑ

Σχετικά με την επίδραση της κλιματικής αλλαγής είναι φανερό ότι τόσο για το μετριοπαθές RCP45, όσο και για το απαισιόδοξο RCP85 σενάριο δεν παρατηρούνται σημαντικές αυξομειώσεις στον χρόνο ανανέωσης των υδάτων. Συγκεκριμένα για το RCP45 αναμένεται μικρή μείωση του χρόνου ενώ για το RCP85 ελάχιστη αύξηση του. Σα γενική παρατήρηση καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η κλιματική αλλαγή όσον αφορά τις ανεμολογικές συνθήκες δεν αναμένεται να επηρεάσει την ανανέωση των υδάτων του Πειραιά.

ΔΙΑΤΟΜΗ (LINE) 2 – ΛΙΜΕΝΑΣ ΑΛΩΝ

Σχετικά με την επίδραση της κλιματικής αλλαγής είναι φανερό ότι τόσο για το μετριοπαθές RCP45, όσο και για το απαισιόδοξο RCP85 σενάριο δεν παρατηρούνται σημαντικές αυξομειώσεις στον χρόνο ανανέωσης των υδάτων. Συγκεκριμένα για το RCP45 αναμένεται ελάχιστη μείωση του χρόνου ενώ για το RCP85 ελάχιστη αύξηση του. Σα γενική παρατήρηση καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η κλιματική αλλαγή όσον αφορά τις ανεμολογικές συνθήκες δεν αναμένεται να επηρεάσει την ανανέωση των υδάτων του Λιμένα των Αλών.

ΔΙΑΤΟΜΗ (LINE) 3 – ΛΙΜΕΝΟΛΕΚΑΝΗ ΔΥΤΙΚΑ ΑΚΤΗΣ ΜΙΑΟΥΛΗ

Σχετικά με την επίδραση της κλιματικής αλλαγής είναι φανερό ότι τόσο για το μετριοπαθές RCP45, όσο και για το απαισιόδοξο RCP85 σενάριο δεν παρατηρούνται σημαντικές αυξομειώσεις στον χρόνο ανανέωσης των υδάτων. Συγκεκριμένα για το RCP45 αναμένεται μικρή μείωση του χρόνου ενώ για το RCP85 ελάχιστη μείωση του. Σα γενική παρατήρηση καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η κλιματική αλλαγή όσον αφορά τις ανεμολογικές συνθήκες δεν αναμένεται να επηρεάσει την ανανέωση των υδάτων της λιμενολεκάνης δυτικά της ακτής Μιαούλη.

ΔΙΑΤΟΜΗ (LINE) 4 – ΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΛΙΜΕΝΑΣ

Σχετικά με την επίδραση της κλιματικής αλλαγής είναι φανερό ότι τόσο για το μετριοπαθές RCP45, όσο και για το απαισιόδοξο RCP85 σενάριο δεν παρατηρούνται σημαντικές αυξομειώσεις στον χρόνο ανανέωσης των υδάτων. Συγκεκριμένα για το RCP45 αναμένεται μικρή μείωση του χρόνου ενώ για το RCP85 ελάχιστη αύξηση του. Σα γενική παρατήρηση καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η κλιματική αλλαγή όσον αφορά τις ανεμολογικές συνθήκες δεν αναμένεται να επηρεάσει την ανανέωση των υδάτων του κεντρικού λιμένα.

5.3 Περαιτέρω έρευνα

Από τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη του λιμένα του Πειραιά τίθενται ορισμένα ερωτήματα, τα οποία μπορούν να απαντηθούν πιθανά με νέες ερευνητικές προσπάθειες στα εξής θέματα:

- Συνδυασμός ανέμου, κυμάτων και παλίρροιας στο φαινόμενο και όχι μόνο ανεξάρτητη μελέτη για το καθένα.
- Μελέτη συγκεκριμένων κατευθύνσεων ανέμων για τους οποίους παρατηρήθηκαν εξαιρετικά υψηλοί χρόνοι ανανέωσης των υδάτων χωρίς να αναμένεται.

6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Χριστοπούλου Μ.Ε. (2010). «Υπολογισμός χρόνου ανανέωσης υδάτων σε αλιευτικό καταφύγιο με χρήση μαθηματικών μοντέλων». Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Αιγαίου Σχολή Περιβάλλοντος, Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας, Μυτιλήνη.
2. Στεφανίδης Θ. (2014/2015). «Ανανέωση υδάτων της λιμενολεκάνης τουριστικών λιμένων μέσω αριθμητικής προσομοίωσης παλιρροιακών και ανεμογενών ρευμάτων». Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.
3. Λοβέρδου Λ.Β. (Ιούλιος 2012). «Μαθηματική προσομοίωση ανανέωσης υδάτων στον Αμβρακικό κόλπο». Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.
4. Μέμος Κ. (2013). «ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΛΙΜΕΝΙΚΑ ΕΡΓΑ». Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Chondros, M., Metallinos, A., Papadimitriou, A., & Tsoukala, V. (2022). Sediment Transport Equivalent Waves for Estimating Annually Averaged Sedimentation and Erosion Trends in Sandy Coastal Areas. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11), 1726.
2. Scientia Maris (2022). Maris BTG, PMS, HYD, SDT, Platform Introduction, User Guide – Manuals v.2022.01, Scientia Maris.
3. Stamou A.I, Memos C., Spanoudaki K. (December 2007). «Estimating water renewal time in semi-enclosed coastal areas of complicated geometry using a hydrodynamic model». Article in *Journal of Coastal Research*, Australia.
4. Stamou, Katsiris I., Moutzouris C. and Tsoukala (2004). Improvement of marina design technology using hydrodynamic models. *Global Nest: the Int. J.* Vol 6, No 1, pp 63-72.
5. Tsoukala V. and Moutzouris C. (2004). Field measurements of dissolved oxygen in the Piraeus Harbour basin. PROTECTION AND RESTORATION OF THE ENVIRONMENT VII – MYKONOS.
6. Tsoukala V. and Moutzouris C. (2008). A 3-D experimental study on the beneficial role of flushing culverts in sea water quality. Conference: 31st International Conference on Coastal Engineering, ICCE 2008At: Hamburg; GermanyVolume: pages 4414-4422.
7. Tsoukala V. and Moutzouris C. (2009). Wave transmission in harbors through flushing culverts. *Ocean Engineering* 36 (6-7), 434-445.
8. Tsoukala V., Gaitanis C., Stamou A., Moutzouris C. (2010). Wave and Dissolved Oxygen transmission analysis in harbors using flushing culverts: An experimental approach. *Global NEST Journal*, Vol 12, No 2, pp 152-160.
9. Tsoukala, V Katsardi, V, Belibassakis K. (2014). Wave transformation through flushing culverts operating at seawater level in coastal structures. *Ocean engineering* 89, 211-229.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

1. <https://www.olp.gr/el/>
2. <https://earth.google.com/web/>

3. <https://travel.viva.gr/ferries/piraeus-port-map>
4. <https://www.safecrete.gr/climate-models>
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Representative_Concentration_Pathway
6. <https://education.nationalgeographic.org/resource/harbor/>
7. <https://scientiamaris.com/software/>
8. <https://webapp.navionics.com/>
9. <https://en.wikipedia.org/wiki/Tide>
10. <https://www.epa.gov/community-port-collaboration/ports-primer-71-environmental-impacts>
11. https://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html
12. <https://www.boisewatershed.org/media/1123/water-renewal-process-handout.pdf>
13. <https://hartis.org/el>
14. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cordex-domains-single-levels?tab=form>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΧΑΡΤΕΣ ΤΡΕΧΟΥΣΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ (CURRENT SPEEDS) ΜΕ ΤΙΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΤΟΥΣ ΑΝΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ ΑΝΑ ΒΦ

