

---

# Λαγκραντζιανή μελέτη της δυναμικής και των δομών κυκλοφορίας της Μεσογείου με χρήση εικονικών πλωτήρων

---

Αντιβάχης Δημήτριος  
Α.Μ. 2019401

---

Διπλωματική εργασία

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

**Επιβλέπων καθηγητής:**

Σοφιανός Σαράντης

**Τριμελής επιτροπή:**

Σοφιανός Σαράντης

Βερβάτης Βασίλειος

Φλόκα Ελένη

2021

# Περιεχόμενα

0.1	Εισαγωγή . . . . .	1
0.2	Γενικά χαρακτηριστικά και κυκλοφορία της Μεσογείου . . . . .	2
0.2.1	Επιφανειακή κυκλοφορία της Μεσογείου . . . . .	3
0.3	Χαρακτηριστικά Μοντέλου και λογισμικού Parcels . . . . .	5
0.3.1	Χαρακτηριστικά Μοντέλου και σχετικές παραμετροποιήσεις . . . . .	5
0.3.2	Προπαρασκευαστικό Στάδιο Μοντέλου και Επιλογή Δεδομένων . . . . .	5
0.3.3	Λογισμικό Parcels . . . . .	5
0.4	Λαγκραντζιανές δομές της κυκλοφορίας και οριζοντια ανάμειξη . . . . .	7
0.4.1	Στοιχεία Θεωρίας Δυναμικών Συστημάτων και σχέση με Ρευστομηχανική . . . . .	7
0.4.2	Μεθοδολογία και Παράμετροι Πειράματος . . . . .	9
0.4.3	Αποτελέσματα και Συζήτηση . . . . .	13
0.5	Λαγκραντζιανή Στατιστική και σχέση με τη Δυναμική . . . . .	29
0.5.1	Σχετική διασπορά και σχέση με το ενεργειακό φάσμα . . . . .	29
0.5.2	Μεθοδολογία και Παράμετροι Πειράματος . . . . .	32
0.5.3	Αποτελέσματα και Συζήτηση . . . . .	34
0.6	Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα . . . . .	56
	Βιβλιογραφία . . . . .	59
<b>Appendices</b>		<b>60</b>
.1	Finite Strain Maps . . . . .	61
.1.1	Αδριατική . . . . .	61
.1.2	Αιγαίο . . . . .	67
.1.3	Δυτική Μεσόγειος . . . . .	73
.1.4	Ιόνιο . . . . .	79
.1.5	Λεβαντίνη . . . . .	85
.2	Χάρτες Ανάμειξης . . . . .	91
.2.1	Αδριατική . . . . .	91
.2.2	Αιγαίο . . . . .	97
.2.3	Δυτική Μεσόγειος . . . . .	103
.2.4	Ιόνιο . . . . .	109
.2.5	Λεβαντίνη . . . . .	115

# Κατάλογος σχημάτων

0.4.1	Απλό σαγματικό σημείο σε δισδιάστατο φασικό χώρο. Η ασταθής πολλαπλότητα εκτείνεται στο πρώτο και το τρίτο τεταρτημόριο και η ευσταθής στο δεύτερο και το τέταρτο. Επιπλέον φαίνονται τέσσερις τροχιές, μια στην κάθε περιοχή του φασικού χώρου μεταξύ των πολλαπλοτήτων. . . . .	8
0.4.2	Διαγράμματα finite strain για κάθε μέρα στο Ιόνιο το μήνα Μάρτιο. Την πρώτη μέρα οι τιμές είναι παντού μηδέν. Καθώς περνούν οι μέρες το διάγραμμα γίνεται όλο και πιο ξεκάθαρο, με τις περιοχές στις οποίες υπάρχουν υπερβολικές δομές να παίρνουν όλο και μεγαλύτερες τιμές του finite strain.	11
0.4.3	Κατανομή finite strain στην Αδριατική κατά το μήνα Αύγουστο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες. . . . .	15
0.4.4	Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στην Αδριατική κατά το μήνα Αύγουστο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη. . . . .	15
0.4.5	Κατανομή finite strain στο Αιγαίο κατά το μήνα Ιούλιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.	16
0.4.6	Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Αιγαίο κατά το μήνα Ιούλιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη. . . . .	16
0.4.7	Κατανομή finite strain στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Μάρτιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες. . . . .	17
0.4.8	Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Μάρτιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη. . . . .	17
0.4.9	Κατανομή finite strain στο Ιόνιο κατά το μήνα Φεβρουάριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.	18
0.4.10	Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Ιόνιο κατά το μήνα Φεβρουάριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη. . . . .	18
0.4.11	Κατανομή finite strain στη λεβαντίνη κατά το μήνα Απρίλιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.	19
0.4.12	Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Απρίλιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη. . . . .	19
0.4.13	Εποχική μεταβλητότητα του ποσοστού των συνολικών επιφανειών ισχυρής και ασθενούς ανάμειξης της Αδριατικής. Το ποσοστό της επιφάνειας ισχυρής ανάμειξης απεικονίζεται με κόκκινες τελείες, ενώ το ποσοστό της επιφάνειας ασθενούς ανάμειξης απεικονίζεται με μπλε x. . . . .	24
0.4.14	Εποχική μεταβλητότητα του ποσοστού των συνολικών επιφανειών ισχυρής και ασθενούς ανάμειξης του Αιγαίου. Το ποσοστό της επιφάνειας ισχυρής ανάμειξης απεικονίζεται με κόκκινες τελείες, ενώ το ποσοστό της επιφάνειας ασθενούς ανάμειξης απεικονίζεται με μπλε x. . . . .	24
0.4.15	Εποχική μεταβλητότητα του ποσοστού των συνολικών επιφανειών ισχυρής και ασθενούς ανάμειξης της δυτικής Μεσογείου. Το ποσοστό της επιφάνειας ισχυρής ανάμειξης απεικονίζεται με κόκκινες τελείες, ενώ το ποσοστό της επιφάνειας ασθενούς ανάμειξης απεικονίζεται με μπλε x. . . . .	25

0.4.1	Εποχική μεταβλητότητα του ποσοστού των συνολικών επιφανειών ισχυρής και ασθενούς ανάμειξης του Ιονίου. Το ποσοστό της επιφάνειας ισχυρής ανάμειξης απεικονίζεται με κόκκινες τελείες, ενώ το ποσοστό της επιφάνειας ασθενούς ανάμειξης απεικονίζεται με μπλε x. . . . .	25
0.4.1	Εποχική μεταβλητότητα του ποσοστού των συνολικών επιφανειών ισχυρής και ασθενούς ανάμειξης της Λεβαντίνης. Το ποσοστό της επιφάνειας ισχυρής ανάμειξης απεικονίζεται με κόκκινες τελείες, ενώ το ποσοστό της επιφάνειας ασθενούς ανάμειξης απεικονίζεται με μπλε x. . . . .	26
0.5.1	Μορφή ενεργειακού φάσματος για ροή με τύρβη που συμπεριφέρεται δισδιάστατα . . . . .	30
0.5.2	Κατανομή θέσεων στις οποίες ποντίζουμε drifters σε όλη τη Μεσόγειο. . . . .	32
0.5.3	Διαγράμματα σχετικής διασποράς της Αδριατικής, με τις αντίστοιχες προσαρμογές: εκθετικές και νόμους δύναμης. Η σχετική διασπορά απεικονίζεται με μαύρο και οι προσαρμογές με κόκκινο. α) Χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) πάνω αριστερά. β) Άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) πάνω δεξιά. γ) Καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) κάτω αριστερά. δ) Φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) κάτω δεξιά. Σχέση σχετικής διασποράς που αυξάνει ως νόμος δύναμης και FSLE: $y^2 \sim t^a \iff \lambda \sim y^{-k}, a = -2/k$ . . . . .	35
0.5.4	Διαγράμματα FSLE της Αδριατικής, με τις αντίστοιχες προσαρμογές νόμων δύναμης. Στις κατά προσέγγιση οριζόντιες περιοχές των γραφημάτων που υποδεικνύουν εκθετική αύξηση της σχετικής απόστασης των ζευγαριών drifters δεν αναφέρουμε την κλίση του γραφήματος. Η σχετική διασπορά απεικονίζεται με μαύρο και οι προσαρμογές με κόκκινο. α) Χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) πάνω αριστερά. β) Άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) πάνω δεξιά. γ) Καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) κάτω αριστερά. δ) Φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) κάτω δεξιά. Σχέση σχετικής διασποράς που αυξάνει ως νόμος δύναμης και FSLE: $y^2 \sim t^a \iff \lambda \sim y^{-k}, a = -2/k$ . . . . .	36
0.5.5	Διαγράμματα σχετικής διασποράς του Αιγαίου, με τις αντίστοιχες προσαρμογές: εκθετικές και νόμους δύναμης. Η σχετική διασπορά απεικονίζεται με μαύρο και οι προσαρμογές με κόκκινο. α) Χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) πάνω αριστερά. β) Άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) πάνω δεξιά. γ) Καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) κάτω αριστερά. δ) Φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) κάτω δεξιά. Σχέση σχετικής διασποράς που αυξάνει ως νόμος δύναμης και FSLE: $y^2 \sim t^a \iff \lambda \sim y^{-k}, a = -2/k$ . . . . .	38
0.5.6	Διαγράμματα FSLE του Αιγαίου, με τις αντίστοιχες προσαρμογές νόμων δύναμης. Στις κατά προσέγγιση οριζόντιες περιοχές των γραφημάτων που υποδεικνύουν εκθετική αύξηση της σχετικής απόστασης των ζευγαριών drifters δεν αναφέρουμε την κλίση του γραφήματος. Η σχετική διασπορά απεικονίζεται με μαύρο και οι προσαρμογές με κόκκινο. α) Χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) πάνω αριστερά. β) Άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) πάνω δεξιά. γ) Καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) κάτω αριστερά. δ) Φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) κάτω δεξιά. Σχέση σχετικής διασποράς που αυξάνει ως νόμος δύναμης και FSLE: $y^2 \sim t^a \iff \lambda \sim y^{-k}, a = -2/k$ . . . . .	39
0.5.7	Διαγράμματα σχετικής διασποράς της δυτικής Μεσογείου, με τις αντίστοιχες προσαρμογές: εκθετικές και νόμους δύναμης. Η σχετική διασπορά απεικονίζεται με μαύρο και οι προσαρμογές με κόκκινο. α) Χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) πάνω αριστερά. β) Άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) πάνω δεξιά. γ) Καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) κάτω αριστερά. δ) Φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) κάτω δεξιά. Σχέση σχετικής διασποράς που αυξάνει ως νόμος δύναμης και FSLE: $y^2 \sim t^a \iff \lambda \sim y^{-k}, a = -2/k$ . . . . .	41
0.5.8	Διαγράμματα FSLE της δυτικής Μεσογείου, με τις αντίστοιχες προσαρμογές νόμων δύναμης. Στις κατά προσέγγιση οριζόντιες περιοχές των γραφημάτων που υποδεικνύουν εκθετική αύξηση της σχετικής απόστασης των ζευγαριών drifters δεν αναφέρουμε την κλίση του γραφήματος. Η σχετική διασπορά απεικονίζεται με μαύρο και οι προσαρμογές με κόκκινο. α) Χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) πάνω αριστερά. β) Άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) πάνω δεξιά. γ) Καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) κάτω αριστερά. δ) Φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) κάτω δεξιά. Σχέση σχετικής διασποράς που αυξάνει ως νόμος δύναμης και FSLE: $y^2 \sim t^a \iff \lambda \sim y^{-k}, a = -2/k$ . . . . .	42
0.5.9	Διαγράμματα σχετικής διασποράς του Ιονίου, με τις αντίστοιχες προσαρμογές: εκθετικές και νόμους δύναμης. Η σχετική διασπορά απεικονίζεται με μαύρο και οι προσαρμογές με κόκκινο. α) Χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) πάνω αριστερά. β) Άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) πάνω δεξιά. γ) Καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) κάτω αριστερά. δ) Φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) κάτω δεξιά. Σχέση σχετικής διασποράς που αυξάνει ως νόμος δύναμης και FSLE: $y^2 \sim t^a \iff \lambda \sim y^{-k}, a = -2/k$ . . . . .	44

- 0.5.10 Διαγράμματα FSLE του Ιονίου, με τις αντίστοιχες προσαρμογές νόμων δύναμης. Στις κατά προσέγγιση οριζόντιες περιοχές των γραφημάτων που υποδεικνύουν εκθετική αύξηση της σχετικής απόστασης των ζευγαριών drifters δεν αναφέρουμε την κλίση του γραφήματος. Η σχετική διασπορά απεικονίζεται με μαύρο και οι προσαρμογές με κόκκινο. α) Χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) πάνω αριστερά. β) Άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) πάνω δεξιά. γ) Καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) κάτω αριστερά. δ) Φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) κάτω δεξιά. Σχέση σχετικής διασποράς που αυξάνει ως νόμος δύναμης και FSLE:  $y^2 \sim t^a \iff \lambda \sim y^{-k}, a = -2/k$ . . . . . 45
- 0.5.11 Διαγράμματα σχετικής διασποράς της Λεβαντίνης, με τις αντίστοιχες προσαρμογές: εκθετικές και νόμους δύναμης. Η σχετική διασπορά απεικονίζεται με μαύρο και οι προσαρμογές με κόκκινο. α) Χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) πάνω αριστερά. β) Άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) πάνω δεξιά. γ) Καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) κάτω αριστερά. δ) Φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) κάτω δεξιά. Σχέση σχετικής διασποράς που αυξάνει ως νόμος δύναμης και FSLE:  $y^2 \sim t^a \iff \lambda \sim y^{-k}, a = -2/k$ . . . . . 47
- 0.5.12 Διαγράμματα FSLE της Λεβαντίνης, με τις αντίστοιχες προσαρμογές νόμων δύναμης. Στις κατά προσέγγιση οριζόντιες περιοχές των γραφημάτων που υποδεικνύουν εκθετική αύξηση της σχετικής απόστασης των ζευγαριών drifters δεν αναφέρουμε την κλίση του γραφήματος. Η σχετική διασπορά απεικονίζεται με μαύρο και οι προσαρμογές με κόκκινο. α) Χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) πάνω αριστερά. β) Άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) πάνω δεξιά. γ) Καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) κάτω αριστερά. δ) Φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) κάτω δεξιά. Σχέση σχετικής διασποράς που αυξάνει ως νόμος δύναμης και FSLE:  $y^2 \sim t^a \iff \lambda \sim y^{-k}, a = -2/k$ . . . . . 48
- 0.5.13 Έποχικά διαγράμματα σχετικής διασποράς της Αδριατικής. Ο χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) απεικονίζεται με μπλε, η άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) με πράσινο, το καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) με κόκκινο και το φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) με μωβ. . . . . 51
- 0.5.14 Έποχικά διαγράμματα FSLE της Αδριατικής. Ο χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) απεικονίζεται με μπλε τελείες, η άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) με πράσινα x, το καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) με κόκκινους σταυρούς και το φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) με μωβ αστέρια. . . . . 51
- 0.5.15 Έποχικά διαγράμματα σχετικής διασποράς του Αιγαίου. Ο χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) απεικονίζεται με μπλε, η άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) με πράσινο, το καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) με κόκκινο και το φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) με μωβ. 52
- 0.5.16 Έποχικά διαγράμματα FSLE του Αιγαίου. Ο χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) απεικονίζεται με μπλε τελείες, η άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) με πράσινα x, το καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) με κόκκινους σταυρούς και το φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) με μωβ αστέρια. . . . . 52
- 0.5.17 Έποχικά διαγράμματα σχετικής διασποράς της δυτικής Μεσογείου. Ο χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) απεικονίζεται με μπλε, η άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) με πράσινο, το καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) με κόκκινο και το φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) με μωβ. 53
- 0.5.18 Έποχικά διαγράμματα FSLE της δυτικής Μεσογείου. Ο χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) απεικονίζεται με μπλε τελείες, η άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) με πράσινα x, το καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) με κόκκινους σταυρούς και το φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) με μωβ αστέρια. . . . . 53
- 0.5.19 Έποχικά διαγράμματα σχετικής διασποράς του Ιονίου. Ο χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) απεικονίζεται με μπλε, η άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) με πράσινο, το καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) με κόκκινο και το φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) με μωβ. . . . . 54
- 0.5.20 Έποχικά διαγράμματα FSLE του Ιονίου. Ο χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) απεικονίζεται με μπλε τελείες, η άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) με πράσινα x, το καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) με κόκκινους σταυρούς και το φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) με μωβ αστέρια. . . . . 54
- 0.5.21 Έποχικά διαγράμματα σχετικής διασποράς της Λεβαντίνης. Ο χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) απεικονίζεται με μπλε, η άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) με πράσινο, το καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) με κόκκινο και το φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) με μωβ. 55















- .2.57 Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Σεπτέμβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη. 119
- .2.58 Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Οκτώβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη. . . 119
- .2.59 Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Νοέμβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη. 120
- .2.60 Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Δεκέμβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη. 120

## Περίληψη

Μελετάμε τη δυναμική της επιφανειακής κυκλοφορίας της Μεσογείου στις διάφορες υπολεκάνες της και την εποχική μεταβλητότητα που αυτή παρουσιάζει από μια λαγκραντζιανή σκοπιά. Τα δεδομένα μας προέχονται από τρισδιάστατο μοντέλο πρωταρχικών εξισώσεων υψηλής ανάλυσης τύπου NEMO. Χρησιμοποιούμε τα επιφανειακά πεδία ταχυτήτων, όπως προκύπτουν από το μοντέλο για να προσομοιώσουμε μια σειρά πειραμάτων με εικονικούς πλωτήρες μέσω του λογισμικού Parcels. Χρησιμοποιούμε μια σειρά από μετρικές (metrics) που βασίζονται στη σχετική απόσταση ζευγαριών πλωτήρων. Υπολογίζουμε την πεπερασμένη τάση, τα μέγιστα της χωρικής κατανομής της οποίας οριοθετούν τις λαγκραντζιανές δομές της ροής. Αυτές οι δομές καθορίζουν τις διαδικασίες ανάμειξης και μεταφοράς, έλκοντας και απωθώντας τις γειτονικές υδάτινες μάζες ενώ ταυτόχρονα δρουν ως εμπόδια στη ανάμειξη. Βάσει των παρατηρούμενων δομών χαρτογραφούμε τις περιοχές ισχυρής ανάμειξης την εποχική διακύμανσή τους σε κάθε υπολεκάνη. Επιπλέον υπολογίζουμε τη σχετική διασπορά και τον εκθέτη Lyapunov πεπερασμένης κλίμακας, που συνδέουν τη διασπορά των πλωτήρων με την μορφή του ενεργειακού φάσματος της ροής. Η μορφή του ενεργειακού φάσματος καθορίζει την κατανομή της ενέργειας και συνεπώς τη δυναμική και τις δομές της κυκλοφορίας που μπορούν να αναπτυχθούν στις διαφορετικές χωρικές κλίμακες. Με τις παραπάνω μετρικές βρίσκουμε τις δυναμικές κλίμακες της ροής στη Μεσόγειο και τις συνδέουμε με τα φυσικά τους αίτια.

## 0.1 Εισαγωγή

Η κυκλοφορία των γεωφυσικών ρευστών είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα που εξαρτάται από ένα μεγάλο πλήθος φυσικών παραμέτρων και διαδικασιών. Η αλληλεπίδραση αυτών των παραγόντων δημιουργεί μια πληθώρα φαινομένων, τα οποία λαμβάνουν χώρα σε μεγάλο εύρος χωρικών κλιμάκων: Από φαινόμενα μικροτύρβης με μέγεθος μερικών μέτρων έως και ανεμογενείς δίνες με ακτίνες της τάξης των χιλιάδων χιλιομέτρων. Το ίδιο ισχύει και για τις χρονικές κλίμακες, με το χρόνο ζωής διαφόρων φαινομένων να διαφέρει από μερικές ώρες για τις παλίρροιες έως και αιώνες στη διαδικασία της θερμοαλατικής κυκλοφορίας. Αυτές οι διαφορετικές κλίμακες της κυκλοφορίας δεν είναι ανεξάρτητες, αλλά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, οδηγώντας στην ανάδυση της πολύπλοκης δυναμικής η οποία καθορίζει την εξέλιξη της ροής. Υπό αυτή τη δυναμική, οι τροχιές που μπορεί να διαγράψουν στο χώρο οι υδάτινες μάζες ενδέχεται να χαρακτηρίζονται από μεγάλη πολυπλοκότητα. Ακόμα και αν οι αρχικές θέσεις δύο τέτοιων μαζών ήταν πολύ κοντά μεταξύ τους, οι μεγάλη ευαισθησία που παρουσιάζει το σύστημα στις αρχικές συνθήκες μπορεί να τις αναγκάσει να ακολουθήσουν πολύ διαφορετικές πορείες η μια από την άλλη. [1]

Με βάση την παραπάνω εικόνα μπορεί κανείς να περίμενε η συμπεριφορά των γεωφυσικών ροών να μην παρουσιάζει καμία κανονικότητα, με την κάθε ροή να μην έχει κανένα κοινό στοιχείο με τις υπόλοιπες και τις κινήσεις των υδάτινων μαζών να είναι ουσιαστικά τυχαίες. Αντίθετα, οι γεωφυσικές ροές χαρακτηρίζονται από την παρουσία συναφών δομών της κυκλοφορίας, όπως οι δίνες και τα jets, οι οποίες παρατηρούνται στην πλειοψηφία των γεωφυσικών ροών. Παρότι δεν υπάρχει κάποιος γενικά αποδεκτός ορισμός, αυτές οι δομές αυνήθως αναφέρονται ως λαγκραντζιανές συνεκτικές δομές (Lagrangian Coherent Structures). Λαγκραντζιανές εδώ σημαίνει ότι οι δομές αυτές δεν είναι στατικές, αλλά εξελίσσονται χωρικά και χρονικά μαζί με τη ροή. Αντίστοιχα, το συνεκτικές αναφέρεται στο ότι οι δομές αυτές δεν είναι φαινόμενα που εμφανίζονται και εξαφανίζονται στιγμιαία, αλλά διατηρούν τη δομή και τα χαρακτηριστικά τους για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

[2,6,7] Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους προσεγγίζουμε τη μελέτη της δυναμικής των γεωφυσικών ρευστών: ο εϋλεριανός και ο λαγκραντζιανός. Στον εϋλεριανό τρόπο ο παρατηρητής παραμένει σταθερός στο χώρο και καταγράφει την τοπική μεταβολή του πεδίου ταχυτήτων. Στο λαγκραντζιανό τρόπο ο παρατηρητής κινείται μαζί με ένα στοιχειώδη όγκο του ρευστού και καταγράφει τη μεταβολή του πεδίου ταχυτήτων καθώς ο στοιχειώδης όγκος κινείται στο χώρο και στο χρόνο. Η κάθε προσέγγιση έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η σταθερή θέση του εϋλεριανού παρατηρητή επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων από σημεία ενδιαφέροντος για μεγάλα χρονικά διαστήματα και με υψηλή συχνότητα. Από την άλλη συλλογή δεδομένων για μια εκτεταμένη χωρική περιοχή απαιτεί έναν αντίστοιχα μεγάλο αριθμό οργάνων, καθιστώντας τη κοστοβόρα και δύσκολη στη διεξαγωγή. Η λαγκραντζιανή προσέγγιση αντίθετα επιτρέπει τη δειγματοληψία από μεγάλες περιοχές και για μεγάλα χρονικά διαστήματα με σχετικά μικρό κόστος, αλλά δεν μπορούμε να ελέγξουμε άμεσα ούτε το χώρο ούτε το χρόνο στους οποίους θα ληφθούν οι μετρήσεις.

Τόσο σε θεωρητικές μελέτες όσο και σε αυτές που πραγματοποιούνται με τη χρήση αριθμητικών μοντέλων, ο εϋλεριανός τρόπος είναι ο πιο δημοφιλής γιατί είναι πιο εύχρηστος μαθηματικά και υπολογιστικά. Ωστόσο ο λαγκραντζιανός τρόπος μας παρέχει μια άμεση εποπτεία της κίνησης των υδάτινων μαζών στο χώρο, η οποία τον καθιστά προτιμότερο στη μελέτη ορισμένων προβλημάτων. Οι διαδικασίες μεταφοράς και ανάμειξης αποτελούν μια τέτοια περίπτωση. Είτε το αντικείμενο ενδιαφέροντος είναι η μεταφορά της θερμοκρασίας ή των θρεπτικών συστατικών είτε η διασπορά μιας πετρελαιοκηλίδας, η λαγκραντζιανή προσέγγιση μας επιτρέπει να μελετήσουμε άμεσα τις τροχιές που θα ακολουθήσουν τα σωματίδια ή η ποσότητες που μας ενδιαφέρουν, σε σχέση με τη εϋλεριανή προσέγγιση που μελετά τροχιές έμμεσα μέσω της τοπικής χωρικής και χρονικής μεταβολής του πεδίου ταχυτήτων. Η μελέτη των συνεκτικών δομών της κυκλοφορίας είναι κι αυτή μια από τις περιπτώσεις που η λαγκραντζιανή προσέγγιση είναι προτιμητέα, καθώς οι συνεκτικές δομές συμπεριφέρονται λαγκραντζιανά. Όταν λέμε ότι οι δομές συμπεριφέρονται λαγκραντζιανά εννοούμε ότι η θέση και η μορφή των δομών αυτών εξελίσσεται στο χρόνο μαζί με τη ροή. [2,3]

Ο στόχος αυτής της μελέτης είναι να ερευνήσουμε τη δυναμική της Μεσογείου από μια λαγκραντζιανή οπτική, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο υψηλής ευκρίνειας που μπορεί να προσομοιώσει χωρίς εκτεταμένες παραμετροποιήσεις μικρά χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας. Συγκεκριμένα στην πρώτη σειρά πειραμάτων, θέλουμε να δούμε τι λαγκραντζιανές δομές αναπτύσσονται στις διαφορετικές υπολεκάνες της Μεσογείου και τις διαφορές που επιφέρουν σε αυτές τις δομές οι διαφορετική τοπογραφία της κάθε υπολεκάνης. Έχοντας αυτή την εικόνα της εποχικής μεταβλητότητας των λαγκραντζιανών δομών και το γεγονός ότι η παρουσία τους μπορεί να δράσει και για την ενίσχυση και την εξασθένηση της ανάμειξης στην περιοχή όπου βρίσκονται, χρησιμοποιούμε την αλληλεπίδραση αυτών των δομών μεταξύ τους για να πάρουμε μια ποσοτική εκτίμηση της εποχικής μεταβλητότητας της οριζόντιας ανάμειξης στις διαφορετικές υπολεκάνες της Μεσογείου. Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων θέλουμε να πάρουμε μια εικόνα της δυναμικής που επικρατεί στις διάφορες χωρικές κλίμακες της Μεσογείου και την επίδραση που έχει η τοπογραφία των διαφορετικών υπολεκάνων στο εύρος χωρικών κλιμάκων στις οποίες επικρατεί

διαφορετική δυναμική. Επιπλέον θέλουμε να δούμε την επίδραση που θα έχει, τόσο στις δυναμικές που εμφανίζονται στις διαφορετικές υπολεκάνες όσο και στο εύρος των κλιμάκων στις οποίες κυριαρχούν αυτές, η εποχική μεταβλητότητα της Μεσογείου. Έχοντας αυτά τα αποτελέσματα, τα συγκρίνουμε με τις προβλέψεις της θεωρίας. [4, 5]

Στο κεφάλαιο 2 δίνουμε μια γενική περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών της Μεσογείου: την τοπογραφία και τις διαφορετικές υπολεκάνες της, το ισοζύγιο νερού της, την πορεία των νερών της αφού εξέλθουν από τη λεκάνη και το ρόλο που παίζουν στην παγκόσμια κυκλοφορία. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην επιφανειακή κυκλοφορία που αποτελεί μέρος αυτής της μελέτης. Στο κεφάλαιο 3 περιγράφουμε τα χαρακτηριστικά και τις παραμετροποιήσεις του μοντέλου από το οποίο αντλούμε τα δεδομένα της κυκλοφορίας που θα χρησιμοποιήσουμε σε αυτή τη μελέτη. Επίσης περιγράφουμε τις αρχές λειτουργίας και τις δυνατότητες του λογισμικού OceanParcels, το οποίο χρησιμοποιούμε για να προσομοιώσουμε τα πειράματα με τους εικονικούς πλωτήρες. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζουμε το θεωρητικό υπόβαθρο και αριθμητικό στήσιμο της πρώτης σειράς πειραμάτων που αφορά την εποχική διακύμανση της ανάμειξης στις διάφορες υπολεκάνες της Μεσογείου και των λαγκραντζιανών δομών της κυκλοφορίας και συζητάμε τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζουμε το θεωρητικό υπόβαθρο και αριθμητικό στήσιμο της δεύτερης σειράς πειραμάτων που αφορά τη δυναμική που επικρατεί στις διαφορετικές κλίμακες της κυκλοφορίας της Μεσογείου και την εποχική μεταβλητότητα που τις χαρακτηρίζει και συζητάμε τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Στο κεφάλαιο 6 συνοψίζουμε τα αποτελέσματα της μελέτης και παραθέτουμε μερικές προτάσεις για πιθανές επακόλουθες μελέτες.

## 0.2 Γενικά χαρακτηριστικά και κυκλοφορία της Μεσογείου

Η Μεσόγειος Θάλασσα είναι μια ημικλειστή λεκάνη που εκτείνεται από τις 5.5 μοίρες δυτικά έως τις 37 μοίρες ανατολικά στη ζωνική διεύθυνση και από 30 μοίρες βόρεια έως 46 μοίρες βόρεια στη μεσημβρινή διεύθυνση. Οριοθετείται στο βόρειο άκρο της από τις νότιες ακτές της ευρωπαϊκής ηπείρου και στο νότιο άκρο της από τις βόρειες ακτές της αφρικανικής ηπείρου, ενώ το ανατολικό της άκρο οριοθετείται από τις ακτές της Μικράς Ασίας και τις δυτικές ακτές της Μέσης Ανατολής. Επικοινωνεί με τον Ατλαντικό Ωκεανό στο δυτικό της άκρο μέσω των στενών του Γιβραλτάρ, με τη Μαύρη Θάλασσα μέσω του στενού των Δαρδανελλίων και με την Ερυθρά Θάλασσα μέσω του καναλιού του Σουέζ. [8, 9]

Η Μεσόγειος χαρακτηρίζεται από αρνητικό ισοζύγιο εξάτμισης-βροχοπτώσης. Αυτό συμβαίνει λόγω των κλιματικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή, με ήπιους χειμώνες και ξηρά καλοκαίρια και ισχυρή εξάτμιση και περιορισμένες βροχοπτώσεις που οφείλονται στη γεωγραφική θέση της Μεσογείου. Η απώλεια νερού που προκαλείται από την εξάτμιση εξισορροπείται από μια εισροή νερών από τον Ατλαντικό Ωκεανό από το Στενό του Γιβραλτάρ. Αυτή η μεγάλης κλίμακας είσοδος νερού αποτελεί, μαζί με την επίδραση της ατμόσφαιρας, τους κύριους παράγοντες διαμόρφωσης της δυναμικής και της κυκλοφορίας στη Μεσόγειο. Ταυτόχρονα, η ισχυρή εξάτμιση οδηγεί στη δημιουργία πυκνών υδάτινων μαζών, οι οποίες βυθίζονται στο ουδέτερο επίπεδο πυκνότητάς τους και μέσω της γενικής κυκλοφορίας εξέρχονται από το Στενό του Γιβραλτάρ στον Ατλαντικό Ωκεανό και κατέρχονται σε ενδιάμεσα βάθη σύμφωνα με την πυκνότητά τους. Έτσι από τη μία ο Ατλαντικός τροφοδοτεί τη Μεσόγειο με αραιό επιφανειακό νερό, ενώ η Μεσόγειος τροφοδοτεί τον Ατλαντικό με αλμυρό νερό ενδιάμεσης πυκνότητας, το οποίο με τη σειρά του παίζει ρόλο στη διαμόρφωση της τοπικής κυκλοφορίας του Ατλαντικού και, μεταφερόμενο από αυτήν προς τους πόλους, συμβάλει στη δημιουργία βαθιών νερών που λαμβάνει χώρα εκεί. [8, 9]

Η Ιταλική χερσόνησος και η Σικελία χωρίζουν τη Μεσόγειο σε ανατολική και δυτική, λόγω της μεγάλης διαφοροποίησης στη βαθυμετρία του περάσματος μεταξύ Σικελίας και Τυνησίας, γνωστό ως το Στενό της Σικελίας. Το μικρό βάθος και πλάτος του στενού αποτρέπει τη μεγάλης κλίμακας ανταλλαγή υδάτινων μαζών μεταξύ της ανατολικής και της δυτικής Μεσογείου και απομονώνει δυναμικά τη μία από την άλλη. Οι δύο κύριες υπολεκάνες παρουσιάζουν επίσης διαφοροποίηση στη βαθυμετρία, με τη δυτική Μεσόγειο να είναι σχετικά ομοιόμορφη, ενώ η δυτική Μεσόγειος παρουσιάζει μεγάλες διαφορές στο βάθος της. Η ανατολική Μεσόγειος χωρίζεται περαιτέρω σε τέσσερις υπολεκάνες: το Ιόνιο, τη Λεβαντίνη, το Αιγαίο και την Αδριατική. Η Λεβαντίνη και το Ιόνιο, όπως και η δυτική Μεσόγειος, είναι ανοιχτές υπολεκάνες, ενώ το Αιγαίο και η Αδριατική είναι ημικλειστές υπολεκάνες. [8, 9]

Αυτός ο διαχωρισμός σε ανατολικό και δυτικό τμήμα οδηγεί στη δημιουργία δύο διαφορετικών κυττάρων θερμοαλατικής κυκλοφορίας στη Μεσόγειο, ένα σε κάθε κύρια υπολεκάνη. Στη δυτική Μεσόγειο ο σχηματισμός βαθιών νερών λαμβάνει χώρα στο βόρειο τμήμα της υπολεκάνης, κοντά στον Κόλπο του Λέοντος. Στην ανατολική Μεσόγειο ο σχηματισμός βαθιών νερών συμβαίνει στις δύο ημικλειστές υπολεκάνες, με την Αδριατική να παρουσιάζει τυπικά μεγαλύτερη παραγωγικότητα από το Αιγαίο λόγω του ψυχρότερου κλίματος που επικρατεί στην περιοχή, το οποίο διαμορφώνεται από την παρουσία της οροσειράς των Άλπεων. Αυτή η εικόνα είχε προσωρινά αντιστραφεί κατά τη δεκαετία του 1980 και του 1990, με το Αιγαίο να παράγει τις μεγαλύτερες ποσότητες βαθιών νερών

εκείνη την περίοδο και την Αδριατική να ξαναγίνεται ο κύριος παραγωγός βαθιών νερών στη δυτική Μεσόγειο από το τέλος αυτής της περιόδου έως και σήμερα. Αυτή η περίοδος ονομάστηκε Eastern Mediterranean Transient και, επι του παρόντος, δεν γνωρίζουμε αν αποτελεί μέρος ενός κύκλου υπερετήσιας μεταβλητότητας. [8, 9]

Ανεξαρτήτως της προέλευσης τους, τα βαθιά νερά που σχηματίζονται κινούνται προς τα βαθύτερα σημεία στην ανατολική Μεσόγειο, όπου και παγιδεύονται για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Τα βαθιά νερά που παράγονται στην ανατολική και δυτική Μεσόγειο παγιδεύονται κατ' αντίστοιχο τρόπο στα βαθύτερα σημεία των υπολεκάνων. [8, 9]

Πυκνές υδάτινες μάζες δημιουργούνται επίσης και στην περιοχή της Λεβαντίνης. Εκεί ο συνδυασμός της έντονης εξάτμισης λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και της μικρής βροχόπτωσης που επικρατούν στην περιοχή και της παγίδευσης υδάτινων μαζών στις κυκλωνικές και αντικυκλωνικές δομές της κυκλοφορίας της περιοχής οδηγεί στο σχηματισμό θερμών υδάτινων μαζών με υψηλή αλατότητα. Αυτές οι μάζες ονομάζονται λεβαντινά ενδιάμεσα νερά. Βυθίζονται μέχρι να φτάσουν σε επίπεδα αντίστοιχης πυκνότητας και μετά ακολουθούν μια κυκλωνική γενικά πορεία γύρω από την ανατολική Μεσόγειο, έως ότου διασχίσουν το Στενό της Σικελίας και να εισέλθουν στη δυτική Μεσόγειο. Από εκεί κινούνται και πάλι κυκλωνικά γύρω από την δυτική Μεσόγειο μέχρι να φτάσουν το Στενό του Γιβραλτάρ, απ' όπου εξέρχονται στον Ατλαντικό. Τα τμήματα των λεβαντινών ενδιάμεσων νερών που δεν διέρχονται από το Στενό της Σικελίας ή το Στενό του Γιβραλτάρ συνεχίζουν την κυκλωνική κυκλοφορία τους γύρω από την ανατολική και τη δυτική Μεσόγειο αντίστοιχα. [8, 9]

Η παρακάτω μελέτη αφορά τη δυναμική και τις διεργασίες ανάμειξης που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια της Μεσογείου. Συνεπώς θα ασχοληθούμε μόνο με το δισδιάστατο κομμάτι της ροής στην επιφάνεια. Φυσικά η κυκλοφορία στην πραγματικότητα είναι τρισδιάστατη, αλλά αυτός ο χαρακτήρας της απεικονίζεται και στη δυναμική μιάς δισδιάστατης επιφάνειας της ροής. Η επιφανειακή κυκλοφορία μελετάται πειραματικά με χρήση επιφανειακών πλωτήρων, γνωστών ως drifters (όπως και θα αναφέρονται παρακάτω). Θέλουμε να υπάρχει αντιστοιχία μεταξύ των συνθηκών και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης που θα κάνουμε με εικονικούς drifters, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου των αποτελεσμάτων με ένα αντίστοιχο πείραμα με πραγματικούς drifters. Υπάρχουν και πλωτήρες βάθους, οι οποίοι ονομάζονται floaters, αλλά επιλέγουμε να περιορίσουμε τη μελέτη στη επιφανειακή ροή της Μεσογείου για τους εξής λόγους:

Η επιλογή οφείλεται εν μέρει σε υπολογιστικούς περιορισμούς. Η προσομοίωση για την παραγωγή των δεδομένων και επακόλουθη η ανάλυσή τους είναι υπολογιστικά κοστοβόρα σε τρεις διαστάσεις. Από την άλλη η επιφάνεια της θάλασσας αποτελεί το τμήμα στο οποίο λαμβάνει χώρα η αλληλεπίδραση ατμόσφαιρας-θάλασσας αλλά και η αλληλεπίδραση με τις ανθρώπινες δραστηριότητες από επιχειρησιακή απόψη. Επίσης είναι σημαντική και για τις βιολογικές διεργασίες, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής και διακίνησης των θρεπτικών συστατικών αλλά και η λήψη οξυγόνου από την ατμόσφαιρα συμβαίνει στη επιφάνεια. Ταυτόχρονα, η δυναμική κυκλοφορία της Μεσογείου επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την είσοδο νερού από τον Ατλαντικό μέσω του Στενού του Γιβραλτάρ. Λόγω της διαφοράς πυκνότητας μεταξύ των νερών της Μεσογείου σε σχέση με αυτών του Ατλαντικού, η ροή των ατλαντικών νερών είναι κυρίως επιφανειακή. Συνεπώς τα δυναμικά χαρακτηριστικά και οι δομές που θα ανπτυχθούν, παρότι θα εκτείνονται και κατα βάθος, θα αποτυπώνονται έντονα στην επιφανειακή κυκλοφορία την οποία μελετάμε. Κατ' αντίστοιχο τρόπο, η οριζόντια ανάμειξη θα λαμβάνει χώρα κυρίως στην επιφάνεια. Η εικόνα είναι ανόλογη και στο άλλο ανοιχτό σύνορο της Μεσογείου: Το Στενό των Δαρδανελλίων, όπου νερό από τη Μαύρη Θάλασσα εισέρχεται στο Αιγαίο. Ο συνδυασμός των μεγάλων ποτάμιων εκροών που δέχεται η Μαύρη Θάλασσα με το γεγονός ότι δεν επικοινωνεί με κάποια άλλη ανοιχτή θάλασσα καθιστά τα νερά της αραιά, με πολύ χαμηλή αλατότητα και συνεπώς κινούνται στην επιφάνεια, πάνω από τα πυκνότερα μεσογειακά νερά αφού εισέλθουν στο Αιγαίο. Επιπλέον, η επίδραση της ατμόσφαιρας στην κυκλοφορία λαμβάνει χώρα κυρίως μέσω της αλληλεπίδρασής της με την επιφάνεια της θάλασσας και κατ' επέκταση η επίδρασή της αυτή θα οδηγήσει στην ανάπτυξη δομών κυκλοφορίας κυρίως στην επιφάνεια. Όπως και με τα ατλαντικά νερά, η επίδραση της ατμόσφαιρας θα εκτείνεται και σε μεγαλύτερα βάθη, αλλά το μεγαλύτερο μέρος της θα αποτυπώνεται στη επιφανειακή κυκλοφορία. Συνεπώς η επιφάνεια της θάλασσας αποτελεί περιοχή ενδιαφέροντος για ερευνητικούς και επιχειρησιακούς λόγους για πολλές διαφορετικές επιστήμες. [3, 8, 9]

### 0.2.1 Επιφανειακή κυκλοφορία της Μεσογείου

Η μεγάλης κλίμακας είσοδος των συγκριτικά αριών, γλυκών νερών από τον Ατλαντικό Ωκεανό από το Στενό του Γιβραλτάρ, που εξισορροπεί την απώλεια μεσογειακών νερών λόγω της έντονης εξάτμισης που λαμβάνει χώρα, αποτελεί έναν από τους κυρίαρχους παράγοντες διαμόρφωσης της κυκλοφορίας στη Μεσόγειο, μαζί με την επίδραση της ατμόσφαιρας. Η επίδρασή τους είναι ιδιαίτερα εμφανής στην επιφανειακή κυκλοφορία, η μορφή της



οποίας αντικατοπτρίζει σε μεγάλο βαθμό τη διαδρομή των ατλαντικών νερών στη Μεσόγειο. [8, 9] Η είσοδος των ατλαντικών νερών από το Στενό του Γιβραλτάρ παίρνει τη μορφή του ατλαντικού jet (atlantic jet) στη λεκάνη του Αλμποράν. Οι μεανδρισμοί του jet δημιουργούν τις δύο βασικές δομές της κυκλοφορίας στη λεκάνη: τον δυτικό και τον ανατολικό αντικυκλώνα του Αλμποράν. Η πορεία των νερών συνεχίζει ανατολικά ως το ρεύμα της Αλγερίας (Algerian Current). Όπως και το ατλαντικό jet, το ρεύμα της αλγερίας παρουσιάζει έντονους μεανδρισμούς, οι οποίοι αποτελούν πηγή δινών. Οι δίνες αυτές, σε αντίθεση με αυτές του Αλμποράν δεν παρουσιάζουν μόνιμο ή ημιμόνιμο χαρακτήρα. Το ρεύμα της Αλγερίας εκτείνεται μέχρι το Στενό της Σικελίας, όπου διαχωρίζεται. Ένα μέρος του κινείται βόρεια, παράλληλα στις δυτικές ακτές της Ιταλίας και στη συνέχεια δυτικά, παράλληλα στις νότιες ακτές της Γαλλίας, σχηματίζοντας επίσης μια μικρή ανακυκλοφορία (recirculation) στο Τυρρηνικό πέλαγος. Η πορεία των νερών συνεχίζει νοτιοδυτικά και χωρίζει ξανά στην περιοχή των Βαlearίδων νήσων. Ένα μέρος πηγαίνει ανατολικά και βόρεια μόλις συναντήσει τη Σαρδηνία, κλείνοντας το βόρειο κύτταρο επιφανειακής κυκλοφορίας στη Δυτική Μεσόγειο. Το άλλο μέρος συνεχίζει νοτιοδυτικά μέσα από το κανάλι της Ίμπιζας (Ibiza channel), ολοκληρώνοντας την εικόνα της γενικής επιφανειακής κυκλοφορίας στη Δυτική Μεσόγειο.

[8,9] Τα επιφανειακά ατλαντικά νερά που περνούν το Στενό της Σικελίας χωρίζονται σε δύο διαδρομές: Το ένα μέρος κινείται νότια και ανατολικά, παράλληλα στις νότιες ακτές της Μεσογείου, ως το Αιγυπτιακό-Λιβυκό ρεύμα, διασχίζοντας τη νότια πλευρά του Ιονίου και εισέρχεται την Λεβαντίνη. Αυτό το ρεύμα είναι μέρος της γενικής κυκλοφορίας όλης της λεκάνης και παρότι είναι σταθερό χαρακτηριστικό της, είναι δυναμικά ασταθές και δημιουργεί δίνες μέσης κλίμακας. Η ροή του συνεχίζει ανατολικά μέχρι τις ακτές της Μέσης Ανατολής. Εκεί ακολουθεί βόρεια πορεία και μετα δυτικά, γύρω από την Κύπρο, ως το ρεύμα Μικράς Ασίας έως όπου φτάσει στη Ρόδο. Εκεί η ροή χωρίζεται σε δύο τμήματα, με το ένα να εισέρχεται στη λεκάνη του Αιγαίου και το άλλο να κινείται δυτικά, νότια της Κρήτης.

[8,9] Το άλλο τμήμα των ατλαντικών νερών που εισέρχονται στην ανατολική Μεσόγειο, γνωστό ως ατλαντικό-ιόνιο ρεύμα (atlantic ionian stream), κινείται βορειοανατολικά, παράλληλα στις ακτές της Ιταλίας και στη συνέχεια νοτιοανατολικά παράλληλα στη βαλκανική χερσόνησο μέχρι να φτάσει νοτιοδυτικά της Κρήτης. Αυτή η αντικυκλωνική κυκλοφορία στο βόρειο Ιόνιο παρουσιάζει υπερετήσια μεταβλητότητα, με την κυκλοφορία να αλλάζει από αντικυκλωνική σε κυκλωνική. Αφού εισέλθουν στη λεκάνη της Λεβαντίνης, τα επιφανειακά ατλαντικά νερά κινούνται ανατολικά σχηματίζοντας το μέσο μεσογειακό jet (mid mediterranean jet).

Η Λεβαντίνη χαρακτηρίζεται από έναν αριθμό μόνιμων και ημιμόνιμων δομών: τον κυκλώνα της Ρόδου ανατολικά της Ρόδου, τον αντικυκλώνα της Ιεράπετρας νότια της Κρήτης, τη δίνη του Mersa-Matruh βόρεια της Αιγύπτου, τη δίνη του Shikmona δυτικά του Ισραήλ. Οι δομές αυτές προκύπτουν από την αλληλεπίδραση μεταξύ της γενικής κυκλωνικής κυκλοφορίας γύρω από τη λεκάνη, της τοπικής ανακυκλοφορίας και του μέσου μεσογειακού jet.

[8-10] Τα επιφανειακά ατλαντικά νερά που εισέρχονται στο Αιγαίο από το ρεύμα Μικράς Ασίας μεταξύ Κρήτης και Ρόδου κινούνται γενικά κυκλωνικά γύρω από τη λεκάνη. Αρχικά κινούνται βόρεια, όπου συναντούν τα επιφανειακά νερά που εισέρχονται στη Μεσόγειο από το Στενό των Δαρδανελλίων και εκτρέπονται δυτικά. Οι δύο διαφορετικές υδάτινες μάζες στη συνέχεια κινούνται νότια και τελικά εξέρχονται από τη Λεκάνη του Αιγαίου περνώντας μεταξύ της Κρήτης και της Πελοποννήσου. Η κυκλοφορία στο Αιγαίο παρουσιάζει έντονο εποχικό χαρακτήρα, τόσο λόγω της εποχικής μεταβλητότητας της εκροής των νερών από τη Μαύρη Θάλασσα, όσο και της αντίστοιχη εποχική μεταβλητότητα της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, που απεικονίζεται στη δυναμική των Ετησίων.

[8, 9] Τα επιφανειακά νερά που εξέρχονται από τη λεκάνη του Αιγαίου κινούνται βορειοδυτικά παράλληλα στις ακτές της Βαλκανικής Χερσονήσου μέχρι το στενό του Otranto. Εκεί διαχωρίζονται, με το ένα μέρος τους να εισέρχεται στην Αδριατική και το άλλο να ακολουθεί νοτιοδυτική πορεία, κλείνοντας την γενική κυκλωνική κυκλοφορία της ανατολικής Μεσογείου. Αυτή η πορεία των επιφανειακών νερών που εξέρχονται από το Αιγαίο στο βόρειο Ιόνιο μεταβάλλεται ανάλογα με την υπερετήσια μεταβλητότητα της κυκλοφορείας του βορείου Ιονίου, αντιστοιχεί με τα επιφανειακά ατλαντικά νερά που εισέρχονται στο Ιόνιο από το Στενό της Σικελίας.

[8, 9] Τα επιφανειακά νερά που εισέρχονται στη λεκάνη της Αδριατικής, είτε προέρχονται από το Αιγαίο είτε από το Στενό της Σικελίας, ακολουθούν κυκλωνική πορεία μέσα στη λεκάνη. Αρχικά κινούνται βόρεια παράλληλα στη Βαλκανική Χερσόνησο ως το ανατολικό αδριατικό ρεύμα και στη συνέχεια νότια παράλληλα στις ακτές της Ιταλίας ως το δυτικό αδριατικό ρεύμα, έως όπου εξέλθουν από τη λεκάνη από το Στενό το Otranto, απ' όπου και μπήκαν. Αυτή η γενική κυκλωνική κυκλοφορία δημιουργεί τρεις δομές: τον νότιο, τον κεντρικό και τον βόρειο αδριατικό κυκλώνα αντίστοιχα.

[?, 9]

## 0.3 Χαρακτηριστικά Μοντέλου και λογισμικού Parcels

### 0.3.1 Χαρακτηριστικά Μοντέλου και σχετικές παραμετροποιήσεις

Τα δεδομένα που θα χρησιμοποιήσουμε στις παρακάτω μελέτες προέρχονται από προσομοίωση της κυκλοφορίας της Μεσογείου με χρήση της έκδοσης 3.6 του μοντέλου NEMO(Nucleus for European Modeling of the Ocean), που διαθέτει δυνατότητα σύζευξης με τις άλλες συνιστώσες του κλιματικού συστήματος. Το πεδίο του μοντέλου εκτείνεται από 30.3 έως 47.2 μοίρες στη μεσημβρινή διεύθυνση και από -9.5 έως 36.2 μοίρες στη ζωική διεύθυνση, καλύπτοντας όλη την επιφάνεια της Μεσογείου και μέρος του Ατλαντικού δυτικά του Στενού του Γιβραλτάρ.

[11] Το πεδίο καλύπτεται από ένα καμπυλόγραμμο(Curvilinear) πλέγμα τύπου Arakawa C, πάνω στο οποίο ορίζονται οι τιμές των πεδίων. Στην οριζόντια διεύθυνση, η απόσταση μεταξύ των κόμβων του πλέγματος είναι 1/36 της μοίρας, που αντιστοιχεί σε 2.2 έως 2.6 χιλιόμετρα, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος. Στην κατακόρυφη διεύθυνση το πεδίο καλύπτεται από 75 επίπεδα. Η απόσταση μεταξύ των επιπέδων μεταβάλλεται με το βάθος, από 1 μέτρο στην επιφάνεια έως 205 μέτρα στο βυθό, με τα πρώτα 25 επίπεδα να βρίσκονται στα πρώτα 100 μέτρα βάθους. Η βαθυμετρία του πεδίου είναι βασισμένη στο σετ δεδομένων ETOPO1, με τα δώδεκα μέτρα να έχουν ληφθεί ως ελάχιστο βάθος. Το μοντέλο λύνει τις πρωταρχικές εξισώσεις πάνω σε αυτό το πλέγμα με βάση την υδροστατική προσέγγιση και την προσεγγιση Boussinesq.

[12] Το πεδίο έχει δύο ανοιχτά σύνορα, ένα στον ατλαντικό και ένα στο Στενό των Δαρδανελίων, βασισμένο στο αρχικό σύστημα PSY4V3R1 (<https://marine.copernicus.eu>), από το οποίο λαμβάνονται και οι αρχικές συνθήκες του μοντέλου. Η επίδραση της ατμόσφαιρας στην κυκλοφορία(forcing) επεισέρχεται στο μοντέλο μέσω παραμετροποίησης CORE BULK. Τα κλιματολογικά ατμοσφαιρικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της έχουν ληφθεί από το σετ δεδομένων DRAKKAR 5.2 (<https://www.drakkar-ocean.eu/>). Το σετ δεδομένων αυτό έχει φτιαχτεί για αυτή τη χρήση, βασισμένο στην ανάλυση δεδομένων ERA-Interim της περιόδου 1979 έως 2015. Τα κλιματολογικά δεδομένα είναι διαθέσιμα ανά μέρα σε πλέγμα με απόσταση μεταξύ κόμβων 0.7 μοίρες. Στο μοντέλο συμπεριλαμβάνονται επίσης οι εκροές των ποταμών Ebro, Po, Rhone, Νείλου, Έβρου και Αζιού. [?, 13–15]

### 0.3.2 Προπαρασκευαστικό Στάδιο Μοντέλου και Επιλογή Δεδομένων

Το μοντέλο πρώτα έτρεξε για μια προπαρασκευαστική περίοδο εβδομήντα ετών, ώστε η κυκλοφορία να φτάσει σε μια στάσιμη κατάσταση που προσεγγίζει τα τυπικά χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας της Μεσογείου. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου εφρμόζονται στα ανοιχτά σύνορα του μοντέλου οι μηνιαίες τιμές των πεδίων με περιοδικότητα ενός έτους, οι οποίες λαμβάνονται από το αρχικό σύστημα PSY4V3R1. Οι αρχικές συνθήκες για την αλατότητα και τη θερμοκρασία έχουν ληφθεί από την κλιματολογία WOA13, και έχουν μηνιαίες τιμές. Αντίστοιχα, η επίδραση της ατμόσφαιρας έχει επίσης ετήσια περιοδικότητα αλλά ημερήσιες τιμές. [?, 17]

Ο λόγος που χρησιμοποιούμε κλιματολογικά δεδομένα και όχι τα δεδομένα κάποιου συγκεκριμένου έτους είναι ότι θέλουμε να μελετήσουμε την τυπική συμπεριφορά της κυκλοφορίας της Μεσογείου, χωρίς τα αποτελέσματά μας να επηρεάζονται από την τυχόν παρουσία ακραίων φαινομένων ή τιμών των πεδίων που ενδεχομένως να επικρατούν σε κάποιο από τα ετήσια σετ δεδομένων του μοντέλου. Επίσης τα κλιματολογικά δεδομένα έχουν μεγαλύτερη χρονική ανάλυση, καθώς καταγράφονται για κάθε μέρα.

### 0.3.3 Λογισμικό Parcels

Η παρακάτω μελέτη βασίζεται σε μια σειρά πειραμάτων με εικονικούς drifters. Για την πραγματοποίηση αυτών των πειραμάτων χρησιμοποιούμε το λογισμικό Parcels (Probably A Really Computationally Efficient Lagrangian Simulator). Το Parcels είναι ένα λογισμικό πακέτο γραμμένο στη γλώσσα Python, φτιαγμένο για προσομοιώσεις κίνησης εικονικών σωματιδίων σε πεδία ταχυτήτων που παρήχθησαν από μοντέλα ωκεάνιας κυκλοφορίας. Είναι συμβατό με μεγάλο αριθμό μοντέλων ωκεάνιας κυκλοφορίας, συμπεριλαμβανομένου και του NEMO, από το οποίο παίρνουμε τα δεδομένα μας.

Το Parcels προσομοιώνει τη μεταφορά σωματιδίων ολοκληρώνοντας τις εξισώσεις κίνησης κάθε σωματιδίου για κάποιο χρονικό βήμα  $\tau$ :

$$x(t + \tau) = x(t) + \int_t^{t+\tau} v(x(t), t) dt$$

Όπου το πεδίο ταχυτήτων παρέχεται από κάποιο μοντέλο και η κατανομή των αρχικών θέσεων των σωματιδίων καθορίζεται από τον χρήστη. Μέσω διαδοχικών ολοκληρώσεων παίρνουμε μια αλληλουχία θέσεων που συνθέτει

την τροχιά που διαγράφει το σωματίδιο σε ένα χρονικό διάστημα  $t$ . Στην περίπτωση που οι θέσεις των σωματιδίων δεν συμπίπτουν με τα σημεία του πλέγματος πάνω στο οποίο είναι διαθέσιμο το πεδίο ταχυτήτων, το Parcels χρησιμοποιεί μεθόδους παρεμβολής για να παράξει την τιμή της ταχύτητας σε εκείνα τα σημεία. Το Parcels υποστηρίζει διάφορες μεθόδους παρεμβολής. Σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιούμε απλή γραμμική παρεμβολή για να ελαχιστοποιήσουμε την επίδραση της παρεμβολής στα αποτελέσματα. Υπολογιστικά, η ολοκλήρωση της εξίσωσης κίνησης επιτυγχάνεται με τη μέθοδο Runge Kutta τέταρτης τάξης. Οι εξισώσεις κίνησης μπορούν επίσης να ολοκληρωθούν και αντίστροφα στο χρόνο. Αυτό επιτυγχάνεται παίρνοντας το χρονικό βήμα  $\tau < 0$ . Έτσι μπορούμε να κατασκευάσουμε την τροχιά που ακολούθησε ένα σωματίδιο σε προηγούμενο χρόνο για να καταλήξει τελικά σε κάποιο σημείο  $x_0$ .

[18, 19] Το Parcels μας δίνει επίσης τη δυνατότητα να ορίσουμε τις ιδιότητες των σωματιδίων την κίνηση των οποίων προσομοιώνει, ανάλογα με τον τύπο των σωματιδίων που θέλουμε να μελετήσουμε. Μπορούμε να προσδώσουμε στα εικονικά σωματίδια μάζα, και κατα συνέπεια αδράνεια, κίνηση ανεξάρτητη από το πεδίο ταχυτήτων στο οποίο βρίσκονται ή αλληλεπίδραση με άλλα σωματίδια. Σε αυτή τη μελέτη τα "σωματίδια" που προμοιώνουμε είναι στοιχειώδεις όγκοι νερού. Γι' αυτό δεν τους προσδίδουμε καμιά από τις παραπάνω ιδιότητες, επειδή θέλουμε η ταχύτητά τους να είναι πάντα ίδια με αυτή της ροής στη θέση στην οποία βρίσκονται.

## 0.4 Λαγκραντζιανές δομές της κυκλοφορίας και οριζοντια ανάμειξη

### 0.4.1 Στοιχεία Θεωρίας Δυναμικών Συστημάτων και σχέση με Ρευστομηχανική

Ως δυναμικό σύστημα χαρακτηρίζεται ένα σύστημα που εξαρτάται από  $x_n$  μεταβλητές, η χρονική εξέλιξη του οποίου καθορίζεται από το σύστημα εξισώσεων:

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

⋮

⋮

⋮

$$\dot{x}_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Ο αριθμός  $n$  των ανεξάρτητων μεταβλητών, και συνεπώς ο αριθμός των εξισώσεων που χρειάζονται για να περιγραφεί πλήρως το σύστημα ονομάζεται τάξη του συστήματος.

Η χρονική εξέλιξη του συστήματος μπορεί να παρασταθεί γραφικά στο φασικό χώρο. Ο φασικός χώρος ενός δυναμικού συστήματος είναι ο διανυσματικός χώρος διάστασης  $n$  ίση με τη τάξη του συστήματος, συντεταγμένες του οποίου είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές του συστήματος. Για απλά μηχανικά συστήματα όπως το απλό εκκρεμές, οι διαστάσεις του φασικού χώρου είναι η θέση  $x$  και η ταχύτητα  $\dot{x}$  του εκκρεμούς. Κάθε σημείο  $a(x, \dot{x})$  του φασικού χώρου αντιπροσωπεύει την κατάσταση του συστήματος με την αντίστοιχη θέση και ταχύτητα. Καθώς το σύστημα εξελίσσεται χρονικά μεταβαίνει από μια κατάσταση σε άλλη, διαγράφοντας μια τροχιά στο φασικό χώρο.

[20] Ο φασικός χώρος παρουσιάζει γεωμετρικές δομές οι οποίες περιορίζουν τις πιθανές τροχιές του συστήματος στο φασικό χώρο ή ισοδύναμα τις πιθανές μελλοντικές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί το σύστημα. Η μορφή αυτών των γεωμετρικών δομών και η επίδρασή τους στις τροχιές εξαρτάται από τη μορφή του υπο μελέτη συστήματος. Εάν το σύστημα δεν παρουσιάζει άμεση χρονοεξάρτηση, τότε λέγεται αυτόνομο και η δομή του φασικού χώρου παραμένει ίδια καθώς το σύστημα εξελίσσεται χρονικά. Το ίδιο θα ισχύει και για χρονοεξαρτούμενα, αλλά περιοδικά συστήματα. Ο φασικός χώρος των μη αυτόνομων συστημάτων, και οι δομές που τον χαρακτηρίζουν, αλλάζει καθώς το σύστημα εξελίσσεται χρονικά. Το ίδιο συμβαίνει και με τα συστήματα που εξαρτώνται από κάποια ελεύθερη παράμετρο η οποία μεταβάλλεται.

[20] Εάν θεωρήσουμε ένα στοιχειώδη όγκο ρευστού (fluid parcel) που κινείται σε ένα πεδίο ταχυτήτων, τότε η χρονική εξέλιξη της θέσης του περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\dot{\vec{x}} = v(\vec{x}) \iff \frac{d\vec{x}}{dt} = v(\vec{x})$$

Ή για επιφανειακή ροή σε δύο διαστάσεις:

$$\dot{x} = u(x, y, t)$$

$$\dot{y} = v(x, y, t)$$

Εάν η ροή είναι ασυμπιεστή, τότε μπορούμε να ορίσουμε μια ρευματοσυνάρτηση  $\psi$ , ώστε οι οριζόντιες ταχύτητες  $u, v$  να προκύπτουν ως οι μερικές παράγωγοι της ρευματοσυνάρτησης:

$$\dot{x} = u = \frac{\partial \psi}{\partial y}(x, y, t)$$

$$\dot{y} = v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}(x, y, t)$$

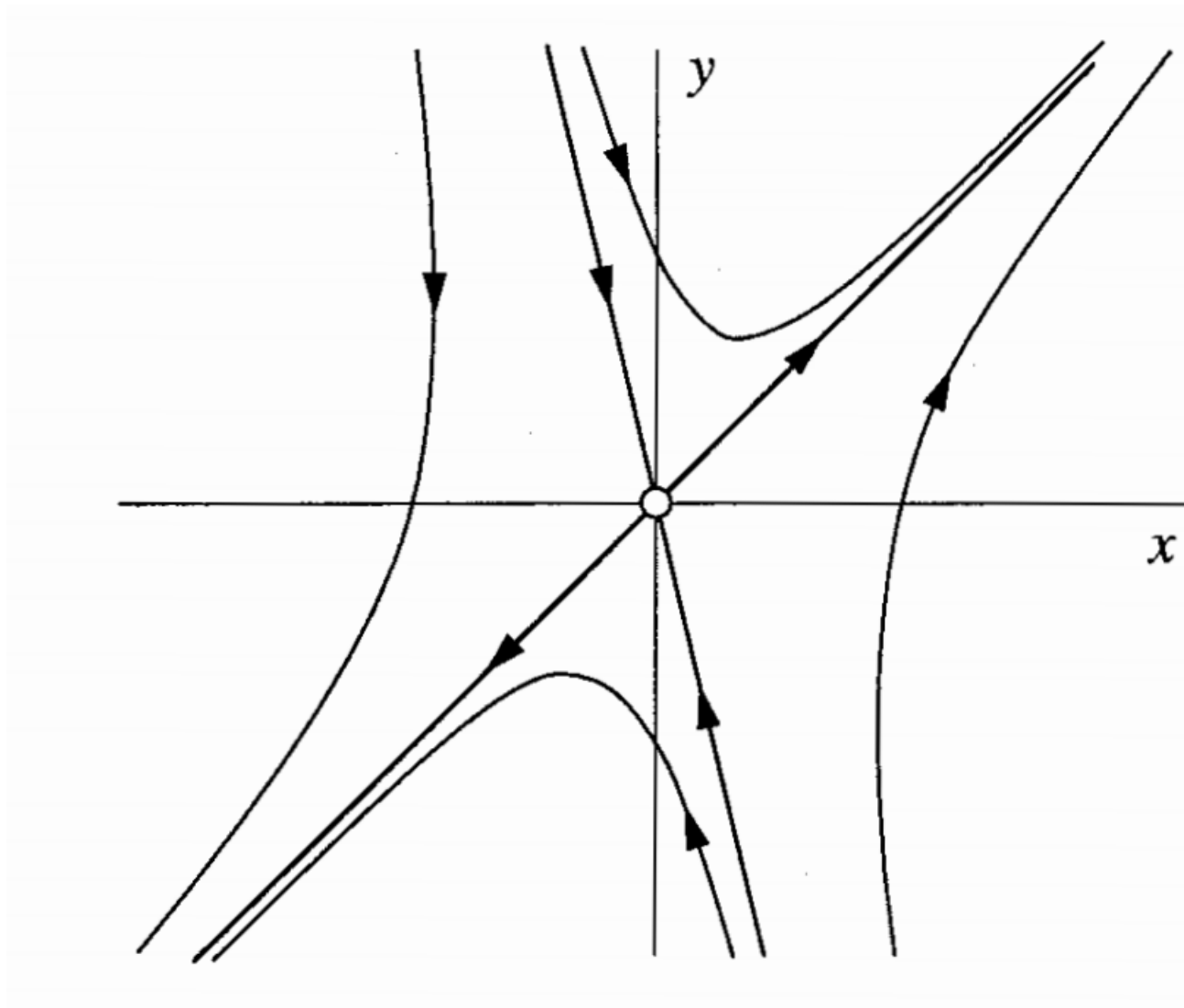
Οι παραπάνω εξισώσεις ορίζουν ένα χαμιλτονιανό σύστημα, στο οποίο χαμιλτονιανή είναι η ρευματοσυνάρτηση  $\psi$ . Ο φασικός χώρος του συστήματος είναι το επίπεδο  $x - y$  και η δομή του μεταβάλλεται με το χρόνο  $t$ . Το γεγονός ότι για τις διδιάστατες ροές ο φασικός χώρος ταυτίζεται με τον πραγματικό σημαίνει ότι η τροχιά των διαδοχικών καταστάσεων στο φασικό χώρο που αντιπροσωπεύει τη χρονική εξέλιξη του συστήματος ταυτίζεται με την τροχιά που διαγράφει ο στοιχειώδης όγκος ρευστού στον πραγματικό χώρο. Αυτό μας επιτρέπει να έχουμε άμεση οπτική εποπτεία των δομών του φασικού χώρου που διαχωρίζουν τις διαφορετικές περιοχές της ροής στις οποίες επικρατεί διαφορετική δυναμική (dynamical flow regimes). [21]

Αυτές οι δομές ονομάζονται Lagrangian Coherent Structures (που μπορεί να μεταφραστεί ως λαγκραντζιανές συνεκτικές δομές) παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της ροής, των τροχιών σωματιδίων που μεταφέρονται από το ρευστό και στις διαδικασίες μεταφοράς και ανάμειξης. Τέτοιες δομές είναι οι δίνες, στις οποίες η ροή κυριαρχείται από ισχυρή τοπική περιστροφή και τα jets, όπου η ροή κυριαρχείται από μεγάλες γραμμικές ταχύτητες με μικρή διάτμηση στο κέντρο και μεγάλη στα σύνορα. Και στις δυο παραπάνω περιπτώσεις, οι δομές απομονώνουν τμήματα του ρευστού από τις γειτονικές περιοχές, τα οποία διατηρούν τα χαρακτηριστικά τους για μεγάλα χρονικά διαστήματα εφόσον οι δομές εξακολουθούν να υπάρχουν.

[2, 6] Ιδιαίτερη σημασία για τα χαμιλτονιανά συστήματα έχουν οι υπερβολικές λαγκραντζιανές συνεκτικές δομές, γιατί παίζουν σημαντικό ρόλο στις διαδικασίες μεταφοράς και ανάμειξης σε αυτά τα συστήματα. Η παρου-

σία τους απωθεί ή έλκει τις γειτονικές τροχιές, δημιουργώντας ή καταστρέφοντας εμπόδια στην ανάμειξη (mixing barriers). [23]

Εξετάζουμε αρχικά την περίπτωση ενός υπερβολικού σημείου σε μια δισδιάστατη, χρονοανεξάρτητη ροή ως ένα απλό παράδειγμα της επίδρασης των υπερβολικών λαγκραντζιανών συνεκτικών δομών στις γειτονικές τροχιές. Στο δισδιάστατο φασικό χώρο, ένα υπερβολικό σημείο είναι ένα σημείο ασταθούς ισορροπίας  $(x^*, y^*)$  (unstable fixed point) το οποίο παρουσιάζει σαγματική συμπεριφορά, δηλαδή έλκει τις γειτονικές τροχιές σε μία διεύθυνση, ενώ τις απωθεί σε μια άλλη διεύθυνση. Σε μια στάσιμη, δισδιάστατη ροή τα υπερβολικά σημεία ταυτίζονται με τα stagnation points της ροής.



**Σχήμα 0.4.1:** Απλό σαγματικό σημείο σε δισδιάστατο φασικό χώρο. Η ασταθής πολλαπλότητα εκτείνεται στο πρώτο και το τρίτο τεταρτημόριο και η ευσταθής στο δεύτερο και το τέταρτο. Επιπλέον φαίνονται τέσσερις τροχιές, μια στην κάθε περιοχή του φασικού χώρου μεταξύ των πολλαπλοτήτων.

Ο άξονας  $y$  είναι η ευσταθής πολλαπλότητα (stable manifold) του υπερβολικού σημείου  $(x^*, y^*)$ . Ως ευσταθή πολλαπλότητα του υπερβολικού σημείου ορίζεται το σύνολο των αρχικών συνθηκών  $(x, y)$  για τις οποίες οι τροχιές  $x(t)$  που ξεκινούν από εκεί θα τείνουν ασυμπτωτικά στο υπερβολικό σημείο  $(x^*, y^*)$  σε χρόνο  $t \rightarrow +\infty$ . Αντίστοιχα, ο άξονας  $x$  είναι η ασταθής πολλαπλότητα του υπερβολικού σημείου  $(x^*, y^*)$  και ορίζεται ως το σύνολο των αρχικών συνθηκών  $(x', y')$  για τις οποίες οι τροχιές που ξεκινούν από αυτές θα τείνουν ασυμπτωτικά στο υπερβολικό σημείο  $(x^*, y^*)$  σε χρόνο  $t \rightarrow -\infty$ .

Μια τυχαία τροχιά που δεν ξεκινά από καμιά από τις δύο πολλαπλότητες θα πλησιάζει ασυμπτωτικά την

ασταθή πολλαπλότητα καθώς το σύστημα εξελίσσεται χρονικά, ενώ ταυτόχρονα θα και απομακρύνεται από την ευσταθή πολλαπλότητα. Κατ' αυτό τον τρόπο η επιρροή του υπερβολικού σημείου εκτείνεται στις γειτονικές τροχιές μέσω των πολλαπλοτήτων του, με την ασταθή πολλαπλότητα να δρα ως ελκυστής (attractor) και την ευσταθή να δρα ως repeller. Ταυτόχρονα, οι πολλαπλότητες αποτελούν εμπόδια στην ανάμειξη, καθώς οι τροχιές δεν μπορούν να τις διαπεράσουν, χωρίζοντας τη ροή σε περιοχές με διαφορετική δυναμική συμπεριφορά.

Η παραπάνω εικόνα μπορεί να γενικευθεί για πραγματικές, απεριοδικές ροές, όπως αυτές στον ωκεανό και την ατμόσφαιρα. Τα ανάλογα υπερβολικά σημεία, εάν υπάρχουν, δεν θα είναι πλέον σταθερά σημεία ισορροπίας, αλλά εξελίσσονται χρονικά μαζί με τη ροή, διαγράφοντας υπερβολικές τροχιές στον εκτεταμένο φασικό χώρο με συντεταγμένες  $x, y, t$ . Υπερβολικές τροχιές εδώ σημαίνει ότι θα υπάρχει μια ευσταθής και μια ασταθής πολλαπλότητα, οι οποίες θα εξελίσσονται χρονικά μαζί με την υπερβολική τροχιά, και όλες οι τροχιές με αρχικές συνθήκες  $x^*, y^*, t^*$  θα τείνουν ασυμπτωτικά στην υπερβολική τροχιά για  $t \rightarrow +\infty$  και  $t \rightarrow -\infty$  αντίστοιχα και όχι ότι η τροχιά του στο χώρο θα είναι υπερβολή. [?, ?]

Αντίθετα με το απλό παράδειγμα παραπάνω, σε χρονοεξαρτούμενες ροές οι ευσταθείς και οι ασταθείς πολλαπλότητες ενός ή και περισσότερων υπερβολικών τροχιών μπορούν να διασταυρώνονται, δημιουργώντας στις διασταυρώσεις τους stagnation points με σαγματική συμπεριφορά για όσο χρόνο υπάρχει η διασταύρωση. Τα σημεία αυτά αποτελούν περιοχές έντονης ανάμειξης, καθώς όγκοι ρευστού πάνω στην ευσταθή πολλαπλότητα κινούνται προς αυτά, ενώ όγκοι ρευστού πάνω στην ασταθή πολλαπλότητα απομακρύνονται. Αντίστοιχα, ενδέχεται οι πολλαπλότητες να μην τέμνονται, οριοθετώντας περιοχές ασθενούς ανάμειξης που χωρίζονται από mixing barriers. [?, 2, 21]

Πριν αναλύσουμε τη μεθοδολογία του πειράματος αναφέρουμε ένα σημαντικό περιορισμό που ενέχει η χρήση εννοιών και εργαλείων από την κλασική θεωρία δυναμικών συστημάτων σε πραγματικές ροές στον ωκεανό και την ατμόσφαιρα:

Στις πραγματικές ροές το πεδίο των ταχυτήτων είναι γνωστό, είτε από άμεση παρατήρηση και μέτρηση είτε ως το αποτέλεσμα κάποιας προσομοίωσης μέσω μοντέλου, για πεπερασμένο χρονικό διάστημα. Επίσης είναι γνωστό ως διακριτή χρονοσειρά και όχι ως συνεχής συνάρτηση. Η κλασική θεωρία δυναμικών συστημάτων απαιτεί συνεχή πεδία γνωστά για χρόνο  $t \in (-\infty, \infty)$ . Η θεωρία μπορεί να επεκταθεί για πεδία γνωστά μόνο σε πεπερασμένα χρονικά διαστήματα, όμως τα αποτελέσματα που προκύπτουν για ένα χρονικό παράθυρο  $t \in (-\tau, \tau)$  δεν μπορούν να επεκταθούν για χρόνους εκτός αυτού του παραθύρου: Εάν παρατηρούμε ορισμένες δομές σε αυτό το χρονικό διάστημα, δεν μπορούμε να πούμε τίποτα για την ύπαρξη ή μη τους ή για χρόνους  $t > \tau$ . Επίσης εάν το πεδίο ταχυτήτων είναι διαθέσιμο για δύο διαφορετικά χρονικά διαστήματα  $t \in (\tau_1, \tau_2)$  και  $t \in (\tau_3, \tau_4)$ , ακόμα και αν υπάρχει αλληλοεπικάλυψη μεταξύ των δύο χρονικών παραθύρων, οι παρατηρούμενες δομές στο ένα διάστημα δεν αποτελούν κατ' ανάγκη τη χρονική εξέλιξη των παρατηρούμενων δομών του άλλου χρονικού παραθύρου. [?, ?, ?]

## 0.4.2 Μεθοδολογία και Παράμετροι Πειράματος

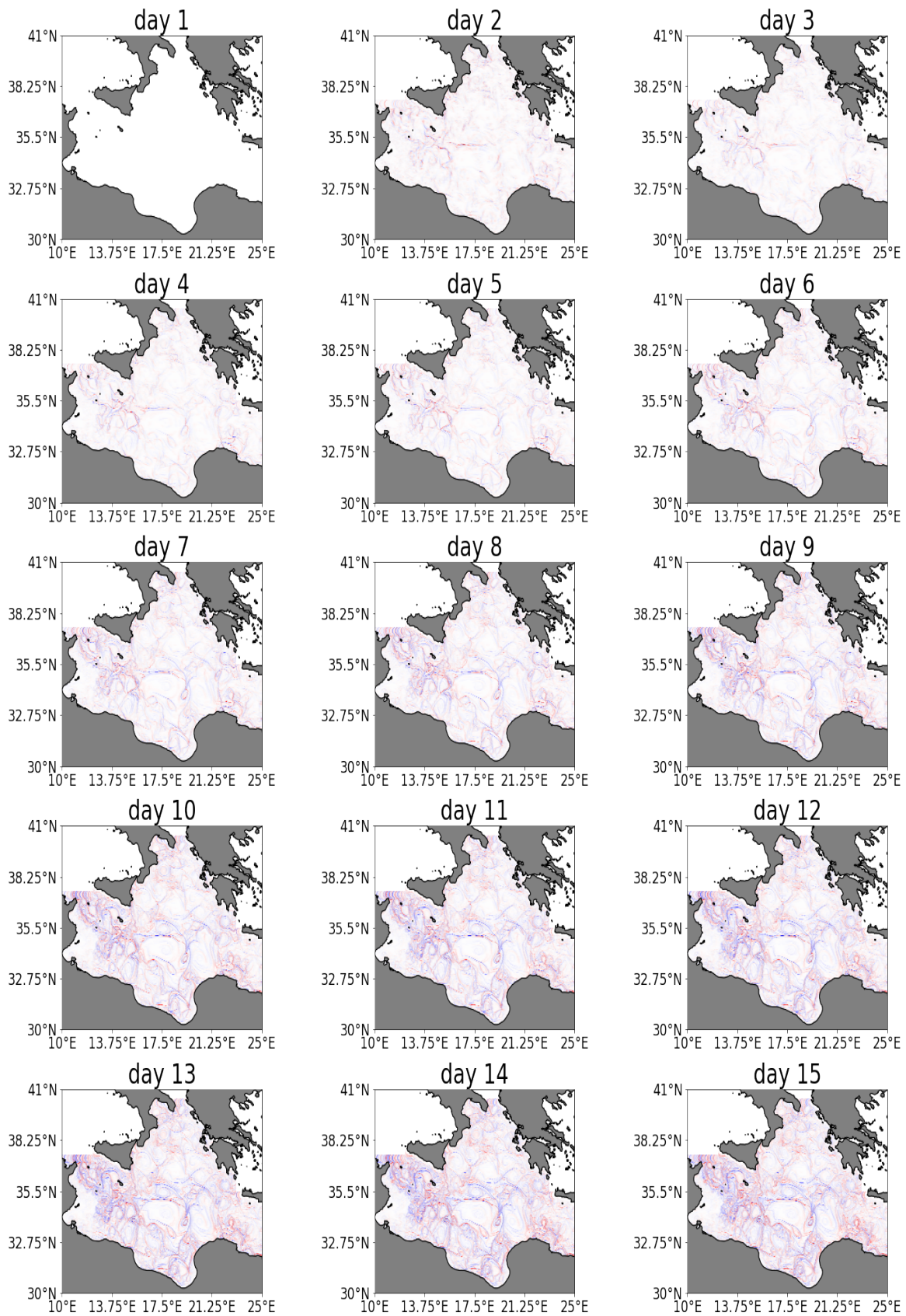
Θέλουμε να εξετάσουμε τις λαγκραντζιανές δομές της κυκλοφορίας της Μεσογείου, την εποχική μεταβλητότητα που παρουσιάζουν αυτές οι δομές και την επίδραση αυτής της μεταβλητότητας στις διαδικασίες ανάμειξης που λαμβάνουν χώρα στις διαφορετικές υπολεκάνες της Μεσογείου. Προσεγγίζουμε το πρόβλημα μέσω μιας σειράς πειραμάτων με εικονικούς drifters. Σε αυτή τη μελέτη περιοριζόμαστε στην επιφανειακή κυκλοφορία, που αντιστοιχεί στο πρώτο από τα κατακόρυφα επίπεδα του μοντέλου μας.

Η ροή είναι ασυμπίεστη και κατ' επέκταση η απόκλιση του πεδίου ταχυτήτων είναι μηδέν. Το μοντέλο από το οποίο λαμβάνουμε το πεδίο ταχυτήτων είναι τρισδιάστατο και η οριζόντια σύγκλιση και απόκλιση εξισορροπείται και από οριζόντιες και από κατακόρυφες κινήσεις. Ωστόσο, όλα τα πειράματα λαμβάνουν χώρα σε ένα χρονικό εύρος δεκατεσσάρων ημερών, πολύ μικρό σε σχέση με την μέση χρονική κλίμακα των κατακόρυφων κινήσεων. Συνεπώς στο υπο μελέτη χρονικό διάστημα η οριζόντια απόκλιση σε μια περιοχή θα εξισορροπείται κυρίως από ορζόντια σύγκλιση στην ίδια περιοχή από διαφορετική διεύθυνση.

Η αμελητέα απόκλιση κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έχει και μια δεύτερη επίπτωση: στον πραγματικό ωκεανό, οι drifters τείνουν να συγκεντρώνονται σε περιοχές όπου η ροή συγκλίνει. Καθώς στο πείραμά μας οι drifters δεν έχουν τη δυνατότητα να κινηθούν κατακόρυφα, όπως θα έκανε ένας όγκος νερού σε αυτή την περίπτωση, θα παγιδεύονταν σε αυτές τις περιοχές χωρίς δυνατότητα διαφυγής και αυτό θα αλλοίωνε τα στατιστικά αποτελέσματά μας. Όμως λόγω της μικρής χρονικής διάρκειας των πειραμάτων σε σχέση με την χρονική κλίμακα των κατακόρυφων κινήσεων η διαφορά των τροχιών των drifters από τις τροχιές των όγκων νερού που αντιπροσωπεύουν είναι αμελητέα και απεικονίζουν σωστά τη λαγκραντζιανή κίνηση των επιφανειακών νερών της Μεσογείου.

Η μέθοδος εντοπισμού και χαρακτηρισμού των λαγκραντζιανών δομών και χαρακτηριστικών της κυκλοφορίας της Μεσογείου βασίζεται στον υπολογισμό της σχετικής απόστασης ζευγαριών drifters. Το μέγεθος που θα χρησιμοποιήσουμε λέγεται finite strain (ή πεπερασμένη τάση) και ορίζεται ως ο λόγος της σχετικής απόστασης ενός ζεύγους drifters κάποια χρονική στιγμή  $t$  προς την αρχική τους απόσταση τη χρονική στιγμή  $t_0$  που ποντίστηκαν. Θεωρούμε ένα ζεύγος από drifters που διαγράφουν μια πορεία στο χώρο σε ένα χρονικό διάστημα  $t$ . Εάν οι αρχικές θέσεις και των δύο βρίσκονται στην ίδια, δυναμικά, περιοχή κυκλοφορίας, όπως για παράδειγμα στο εσωτερικό μιας δίνης ή στο κέντρο ενός ισχυρού ρεύματος, τότε η σχετική τους απόσταση θα παραμείνει σχετικά μικρή καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, καθώς η κίνηση και των δύο θα κυριαρχείται από την ίδια δυναμική δομή. Αντίθετα, εάν οι αρχικές θέσεις των drifters βρίσκονται σε περιοχές με διαφορετική δυναμική συμπεριφορά η εικόνα θα είναι διαφορετική. Για παράδειγμα εάν οι αρχικές θέσεις των drifters βρίσκονται εκατέρωθεν της ευσταθούς πολλαπλότητας μιας υπερβολικής τροχιάς, τότε όσο το ζευγάρι πλησιάζει την υπερβολική τροχιά, η σχετική τους απόσταση θα παραμείνει μικρή. Αφού όμως πλησιάσουν την υπερβολική τροχιά η σχετική τους απόσταση θα αυξάνεται καθώς θα μεταφέρονται από τη ασταθή πολλαπλότητα της τροχιάς σε διαφορετικές κατευθύνσεις, παίρνοντας τελικώς μεγάλες τιμές.

[26] Έτσι η χωρική κατανομή του finite strain των ζευγαριών drifters μας επιτρέπει να διακρίνουμε τις ευσταθείς και τις ασταθείς πολλαπλότητες των υπερβολικών τροχιών, που καθορίζουν τη λαγκραντζιανή δομή της κυκλοφορίας: Η απουσία πολλαπλοτήτων υποδηλώνει δυναμικά απομονωμένες περιοχές που δεν ανταλλάσσουν σημαντική ποσότητα υδάτινων μαζών με το περιβάλλον τους και τα χαρακτηριστικά τους θα παρουσιάζουν ομοιογένεια. Αντίθετα, στις περιοχές όπου οι πολλαπλότητες διασταυτώνονται λαμβάνει χώρα η εντονότερη ανάμιξη, καθώς υδάτινες μάζες φτάνουν εκεί από διαφορετικές περιοχές και μεταφέρονται σε άλλες. Εκτεταμένες περιοχές με μεγάλη χωρική πυκνότητα τέτοιων σημείων θα είναι ανομοιογενείς, με ευρύ φάσμα χαρακτηριστικών. Οι ίδιες οι πολλαπλότητες είναι αδιαπέραστες για τις υδάτινες μάζες, πλην των σημείων τομής τους, και τα τμήματα στα οποία είναι παράλληλες αποτελούν εμπόδια στην ανάμιξη.



**Σχήμα 0.4.2:** Διαγράμματα *finite strain* για κάθε μέρα στο Ιόνιο το μήνα Μάρτιο. Την πρώτη μέρα οι τιμές είναι παντού μηδέν. Καθώς περνούν οι μέρες το διάγραμμα γίνεται όλο και πιο ξεκάθαρο, με τις περιοχές στις οποίες υπάρχουν υπερβολικές δομές να παίρνουν όλο και μεγαλύτερες τιμές του *finite strain*.



Ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι τα μέγιστα της σχετικής απομάκρυνσης ενδέχεται να οφείλονται όχι μόνο στην παρουσία υπερβολικών δομών, αλλά και σε ισχυρή τοπική διάτμηση του πεδίου ταχυτήτων. Όσον αφορά την ανάμειξη αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα. Η παρουσία ισχυρής διάτμησης της ροής σε μια περιοχή θα οδηγήσει σε έντονη ανάμειξη κάθετα στη διεύθυνση της διάτμησης, παράλληλα στη ροή. Όμως η ερμηνεία των αποτελεσμάτων για τις λαγκραντζιανές δομές της κυκλοφορίας σε περιοχές με ισχυρή διάτμηση, όπως το νοτιότερο τμήμα της λεκάνης της Μεσογείου, απαιτεί προσοχή. Ταυτόχρονα, η γνώση της παρουσίας χαρακτηριστικών της κυκλοφορίας που θα οδηγούσαν σε ισχυρή τοπική διάτμηση, όπως ισχυρά ρεύματα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Για να χαρτογραφήσουμε τις λαγκραντζιανές υπερβολικές δομές στη Μεσόγειο ποντίζουμε drifters σε όλη της την επιφάνεια. Θέλουμε η αρχική κατανομή των drifters να είναι ομοιόμορφη, ώστε να αποφύγουμε τυχόν σφάλματα που οφείλονται σε μονομερή δειγματοληψία διαφόρων περιοχών. Επίσης θέλουμε να είναι επαρκώς πυκνή, τόσο για λόγους ομοιόμορφης δειγματοληψίας, όσο και για να μια εικόνα όσο το δυνατόν υψηλότερης ανάλυσης των δομών της κυκλοφορίας. Όμως, η χωρική διακριτική ικανότητα του μοντέλου μας θέτει ένα κάτω όριο στην πυκνότητα της αρχικής κατανομής, με άμεσο και με έμμεσο τρόπο. Οι φυσικές διαδικασίες που καθορίζουν το πεδίο ταχυτήτων σε κλίμακες μικρότερες από την απόσταση μεταξύ των κόμβων του πλέγματος του μοντέλου επηρεάζονται στο μοντέλο μέσω παραμετροποίησης. Συνεπώς, η εικόνα που παίρνουμε από το finite strain σε αυτές τις κλίμακες δεν είναι αντιπροσωπευτική της δυναμικής της ροής. Επιπλέον, η διακριτική ικανότητα του μοντέλου δεν ταυτίζεται με την απόσταση μεταξύ των κόμβων του πλέγματός του. Για να αποτυπώνεται καλά ένα χαρακτηριστικό της κυκλοφορίας από το μοντέλο θα πρέπει το μέγεθός του να είναι τουλάχιστον τέσσερις φορές μεγαλύτερο από την απόσταση μεταξύ των κόμβων του πλέγματος. Συνεπώς, αυξάνοντας την πυκνότητα της αρχικής κατανομής των drifters πέραν ενός ορίου δεν απεικονίζει δομές μικρότερης κλίμακας, αλλά μόνο αυξάνει την ευκρίνεια αυτών που είναι ήδη ορατές. Με βάση τα παραπάνω, φτιάχνουμε ένα ορθογώνιο πλέγμα με διαστάσεις  $0.01deg \times 0.009deg$ , προσαρμόζοντας το ανάλογα στις περιοχές κοντά στη στεριά. Η απόσταση μεταξύ των κόμβων του πλέγματος πόντισης είναι περίπου τρεις φορές μικρότερη από αυτή μεταξύ των κόμβων του πλέγματος του μοντέλου.

Πάνω σε αυτό το πλέγμα ποντίζουμε πέντε drifters σε κάθε κόμβο του: έναν ακριβώς πάνω στον κόμβο και άλλους τέσσερις μετατοπισμένους κατά  $0.0045 \text{ deg}$  δυτικά και ανατολικά στη ζωνική διεύθυνση και βόρεια και νότια στη μεσημβρινή διεύθυνση αντίστοιχα, ώστε οι αρχικές θέσεις τους να σχηματίζουν σταυρό. Αυτό μας δίνει τέσσερα ζευγάρια drifters ανα κόμβο, με το καθένα από αυτά να αντιστοιχεί σε μια από τις τέσσερις δυνατές διευθύνσεις της ταχύτητας της ροής σε αυτό το σημείο. Κατ' αυτό τον τρόπο η τροχιά που κάνει κάθε περιφερειακός drifter αποτελεί μια διαταραχή της τροχιάς του κεντρικού, με μεγάλες τιμές του finite strain να αντιστοιχούν σε πολύ διαφορετικές τροχιές παρά τη μικρή διαφορά στην αρχική θέση των drifters. Ποντίζουμε αυτά τα τέσσερα ζευγάρια γιατί θέλουμε να ελέγξουμε την αύξηση της σχετικής απόστασης του ζεύγους σε όλες τις δυνατές διευθύνσεις του χώρου, ώστε εάν τυχαίνει η σχετική απόσταση ενός ζεύγους να μην παίρνει μεγάλες τιμές ενώ σε κάποια άλλη να παίρνει να μην κατηγοριοποιήσουμε λανθασμένα το σημείο με βάση την μικρή τιμή. Για τον υπολογισμό των παραπάνω μεγεθών χρησιμοποιούμε τη μέγιστη από τις τιμές των τεσσάρων ζευγαριών. [?, 23]

Εφόσον μας ενδιαφέρει η εποχική μεταβλητότητα της λαγκραντζικλής δυναμικής της Μεσογείου πραγματοποιούμε δώδεκα πειράματα βασισμένα στο παραπάνω πλέγμα από εικονικούς drifters, ένα για κάθε μήνα του χρόνου. Επιλέγουμε ως αντιπροσωπευτική ημέρα για κάθε μήνα τη δέκατη πέμπτη ημέρα του, εκτός από τον Φεβρουάριο, για τον οποίο επιλέγουμε τη δεκατητέταρτη. Αυτή η επιλογή γίνεται για να είναι γνωστό για ένα χρονικό διάστημα  $t$  πριν και μετά την ημέρα που θέλουμε να μελετήσουμε. Επιπλέον θέλουμε να υπάρχει όσο το δυνατόν λιγότερη επικάλυψη στα χρονικά διαστήματα μέσα στα οποία λαμβάνουν χώρα τα πειράματα των διαφορετικών μηνών, ώστε τα αποτελέσματα να οφείλονται εξ ολοκλήρου στη δυναμική που αναπτύσσεται στον εκάστοτε μήνα. Εξετάσσοντας κάθε φορά το μέσο κάθε μήνα ικανοποιεί και τις δύο αυτές απαιτήσεις.

Οι drifters απελευθερώνονται την επιλεγμένη ημέρα και οι θέσεις τους εξελίσσονται χρονικά για ένα διάστημα δεκατεσσάρων ημερών. Η μεταφορά (advection) των drifters από τη ροή πραγματοποιείται ολοκληρώνοντας τις εξισώσεις κίνησης των drifters με τη χρήση του λογισμικού Parcels, με τις προδιαγραφές που έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο 3. Καταγράφουμε τη θέση του κάθε drifter μετά από μεταφορά μίας μέρας. Κατόπιν επαναλαμβάνουμε το πείραμα αλλά με τη ροή του χρόνου αντίστροφη, από το μέσο του μήνα έως την αρχή του, καταγράφοντας τις θέσεις των drifters με την ίδια συχνότητα. Έτσι παίρνουμε δύο χρονοσειρές με τις θέσεις κάθε ζεύγους drifters δεκατεσσάρων ημερών εμπρός και πίσω στο χρόνο με τις ίδιες αρχικές συνθήκες. Επαναλαμβάνουμε το πείραμα για κάθε μήνα του κλιματολογικού έτους.

Πέραν του finite strain, από το παραπάνω πείραμα μπορούμε να εξάγουμε και μια δεύτερη μετρική: τον εκθέτη Lyapunov πεπερασμένου μεγέθους (Finite size Lyapunov exponent) ή FSLE. Ο FSLE είναι παραπλήσια μετρική ορίζεται ως εξής: Θέτουμε μια οριακή απόσταση  $d$ . Κρατάμε μόνο όσα ζευγάρια drifters κατάφεραν μέσα στη χρονική διάρκεια του πειράματος να φτάσουν ή να ξεπεράσουν αυτή την οριακή απόσταση και απορρίπτουμε τα

υπόλοιπα. Ο FSLE τότε υπολογίζεται για κάθε πλεγματοειδές σημείο εάν σε αυτό αντιστοιχεί ένα από τα ζευγάρια που κρατήθηκαν ως εξής:

$$\lambda = \frac{\log(d/d_0)}{t}$$

Όπου  $d_0$  η αρχική απόσταση μεταξύ των drifters κάθε ζεύγους και  $d$  η οριακή απόσταση, εδώ ίση με μια μοίρα.

[23] Η χωρική κατανομή του FSLE περιέχει την ίδια πληροφορία σχετικά με τις λαγκραντζιανές δομές της ροής με αυτή του finite strain, ο FLSE όμως αποτελεί αυστηρότερη και συνεπώς πιο αξιόπιστη μετρική. Ταυτόχρονα όμως ο FSLE δίνει μια εικόνα μόνο των ολικών μεγίστων, απορρίπτοντας τα τοπικά μέγιστα. Όσον αφορά την ανάμειξη, θέλουμε να έχουμε και μια εικόνα των τοπικών μεγίστων και γι' αυτά χρησιμοποιούμε το finite strain για την παραπάνω ανάλυση, ενώ τα αποτελέσματα του FSLE (που δεν παρουσιάζονται εδώ) χρησιμοποιήθηκαν για την επιβεβαίωση της ορθότητας των αποτελεσμάτων του finite strain, καθώς τα μέγιστα των δύο καταμονών συμπίπτουν.

### 0.4.3 Αποτελέσματα και Συζήτηση

Για να αναλύσουμε τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων σχεδιάζουμε την χωρική κατανομή του finite strain για κάθε έναν από τους δώδεκα μήνες του κλιματολογικού έτους. Χωρίζουμε τα αποτελέσματα ανα υπολεκάνη για να αναδείξουμε τις εποχικές μεταβολές που λαμβάνουν χώρα σε κάθε υπολεκάνη και συζητάμε κάθε μια από αυτές παρακάτω.

Σημειώμεται ότι ο χωρισμός σε υπολεκάνες γίνεται καθαρά για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και την ευκρίνεια των αντίστοιχων εικόνων. Το πεδίο των ταχυτήτων, με βάση το οποίο γίνεται η μεταφορά των drifters εκτείνεται σε όλη τη Μεσόγειο και δεν χωρίζεται ανα υπολεκάνη. Αντίστοιχα, οι drifters είναι ελεύθεροι να κινηθούν σε όλη την επιφάνεια της Μεσογείου, η κίνησή τους δεν περιορίζεται σε καμία από τις υπολεκάνες. Το finite strain υπολογίζεται σε κάθε κόμβο του πλέγματος πόντισης ανεξαρτήτως της τελικής τοποθεσίας του κάθε drifter. Ο χωρισμός σε υπολεκάνες γίνεται απομονώνοντας του κόμβους του πλέγματος που βρίσκονται μέσα στα όρια της περιοχής της αντίστοιχης υπολεκάνης.

Θέλουμε επίσης να εκτιμήσουμε τις μεταβολές που επιφέρει η εποχική μεταβλητότητα των λαγκραντζιανών δομών κατά τη διάρκεια του κλιματολογικού έτους στην οριζόντια ανάμειξη που λαμβάνει χώρα σε κάθε υπολεκάνη. Καθώς αναμένουμε ότι η εντονότερη ανάμειξη θα λαμβάνει χώρα στις περιοχές που διασταυρώνονται οι ευσταθείς και οι ασταθείς πολλαπλότητες των υπερβολικών τροχιών, θέλουμε να απομονώσουμε αυτές τις περιοχές. Για να το κάνουμε αυτό εργαζόμαστε ως εξής:

Θεωρούμε δύο οριακές τιμές του finite strain, μια μικρή και μια μεγάλη, οι οποίες χωρίζουν το φάσμα τιμών του finite strain σε τρεις περιοχές. Περιοχές με τιμές του finite strain μεγαλύτερες από το άνω όριο θεωρούνται καλά αναμειγμένες, ενώ περιοχές με τιμές μικρότερες του κάτω ορίου θεωρούνται ασθενώς αναμειγμένες. Για να θεωρηθεί μια περιοχή καλώς ή ασθενώς αναμειγμένη θα πρέπει να η τιμή του finite strain στον αντίστοιχο κόμβο να υπερβαίνει το άνω όριο ή να είναι μικρότερη του κάτω ορίου, αντίστοιχα και στα πειράματα που οι drifters μεταφέρονται μπροστά στο χρόνο και στα πειράματα που οι drifters μεταφέρονται πίσω στο χρόνο, ώστε να εξασφαλίσουμε ότι οι περιοχές αυτές αντιστοιχούν στα σημεία διασάυρωσης των ασταθών και των ευσταθών πολλαπλοτήτων.

Το κάτω όριο του finite strain που επιλέγουμε για την οριοθέτηση των ασθενώς αναμειγμένων περιοχών είναι 25. Εφόσον το finite strain ορίζεται ως ο λόγος της τελικής απόστασης ενός ζεύγους drifters προς την αρχική και η αρχική απόσταση μεταξύ των drifters που ποντίζουμε είναι περίπου  $0.5\text{ km}$ , το επιλεγμένο όριο αντιστοιχεί σε μέγιστη απόσταση ζευγαριών σε κάθε κόμβο του πλέγματος μικρότερη από  $12.5\text{ km}$  για τις ασθενώς αναμειγμένες περιοχές. Αυτή η απόσταση είναι συγκρίσιμη με τη ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου. Η τιμή του finite strain που αντιστοιχεί στο άνω όριο είναι 175 και αντιστοιχεί σε ελάχιστη σχετική απόσταση ζεύγους drifters σε κάθε κόμβο ίση με  $87.5\text{ km}$ .

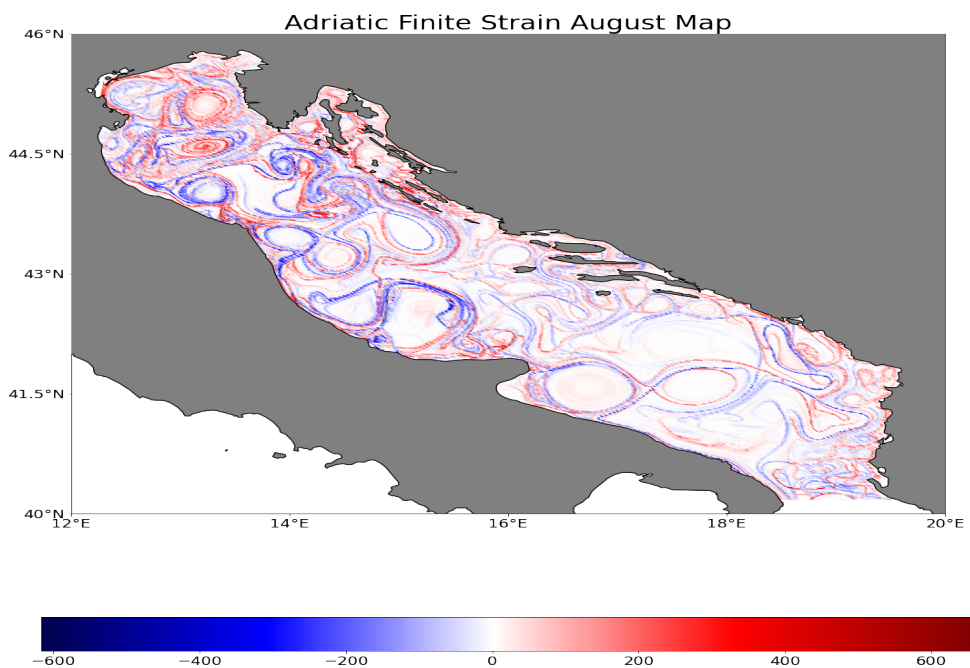
[28] Από την άλλη, οι περιοχές στις οποίες η τιμή του finite strain είναι κάτω από το επιλεγμένο όριο και στα πειράματα όπου οι drifters μεταφέρονται μπροστά στο χρόνο και σε αυτά που μεταφέρονται πίσω στο χρόνο θεωρούνται ως περιοχές ασθενούς ανάμειξης. Οι χαμηλές τιμές του finite strain σε αυτές τις περιοχές υποδηλώνουν ότι υδάτινες μάζες δεν καταφτάνουν εκεί από διαφορετικές περιοχές με μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, ούτε θα μεταφερθούν σε περιοχές με μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. Συνεπώς η επιφανειακή κυκλοφορία σε αυτές τις περιοχές ή θα είναι ασθενής ή οι υδάτινες μάζες θα είναι παγιδευμένες σε αυτές τις περιοχές από κάποιες δομές της κυκλοφορίας.

Για να απεικονίσουμε γραφικά τις περιοχές ισχυρής και ασθενούς επιφανειακής ανάμειξης, αντιστοιχούμε σε κάθε κόμβο μία από τις τρεις τιμές: 1, 0 και  $-1$ . Η τιμή 1 αντιπροσωπεύει ισχυρή οριζόντια ανάμειξη στην περιοχή του κόμβου, ενώ η τιμή  $-1$  ασθενή, αντίστοιχα. Οι περιοχές με τιμή 0 έχουν δύο διαφορετικές ερμηνείες: Είτε πρό-

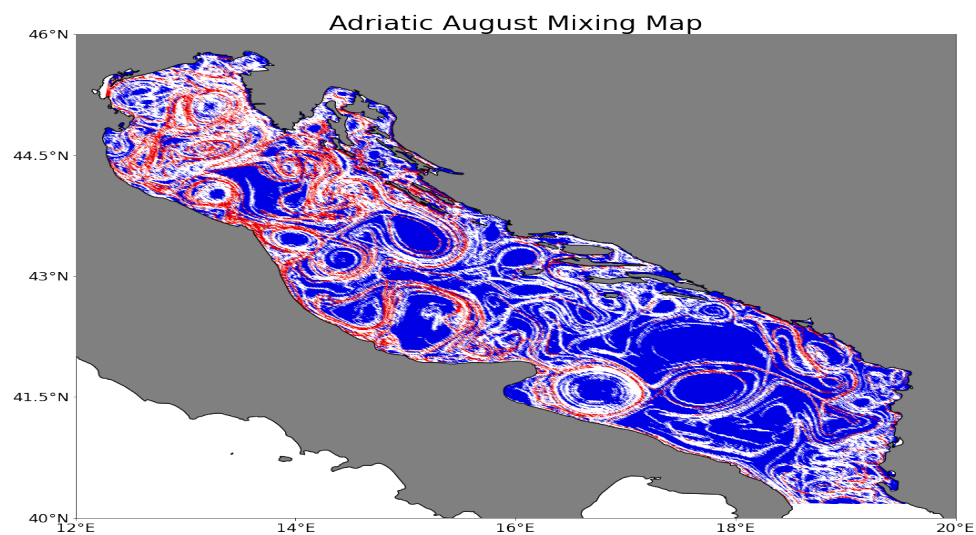
κειται για περιοχές αδιάφορης ανάμειξης, είτε για τις περιοχές απ' όπου διέρχονται οι ευσταθείς και οι ασταθείς πολλαπλότητες των υπερβολικών τροχιών και συνεπώς αποτελούν εμπόδια στην ανάμειξη μεταξύ περιοχών που διαχωρίζουν.

Σχεδιάζουμε τις αντίστοιχες χωρικές καταμονές, τόσο του finite strain, όσο και της ανάμειξης για κάθε υπο-λεκάνη και για κάθε μήνα του κλιματολογικού έτους. Παραθέτουμε εδώ ενδεικτικά ένα διάγραμμα ανάμειξης για κάθε μια από τις υπολεκάνες της Μεσογείου, μαζί με τη αντίστοιχη κατανομή finite strain. Στα finite strain maps παρακάτω σχεδιάζουμε τη διαφορά των finite strains από τα πειράματα μπροστά και πίσω στο χρόνο. Έτσι περιοχές με μικρές τιμές του finite strain και στα δύο πειράματα εμφανίζονται λευκές, περιοχές με μεγάλες τιμές στα πειράματα μπροστά στο χρόνο και μικρές στα πειράματα πίσω στο χρόνο εμφανίζονται κόκκινες και περιοχές με μικρές τιμές μπροστά στο χρόνο και μεγάλες τιμές πίσω στο χρόνο εμφανίζονται μπλε. Κατ' αυτό τον τρόπο οι κόκκινες περιοχές αντιστοιχούν στις ευσταθείς πολλαπλότητες των υπερβολικών τροχιών και οι μπλε περιοχές στις ασταθείς πολλαπλότητες. Στα διαγράμματα ανάμειξης οι περιοχές με ισχυρή ανάμειξη απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές με ασθενή ανάμειξη με μπλε.

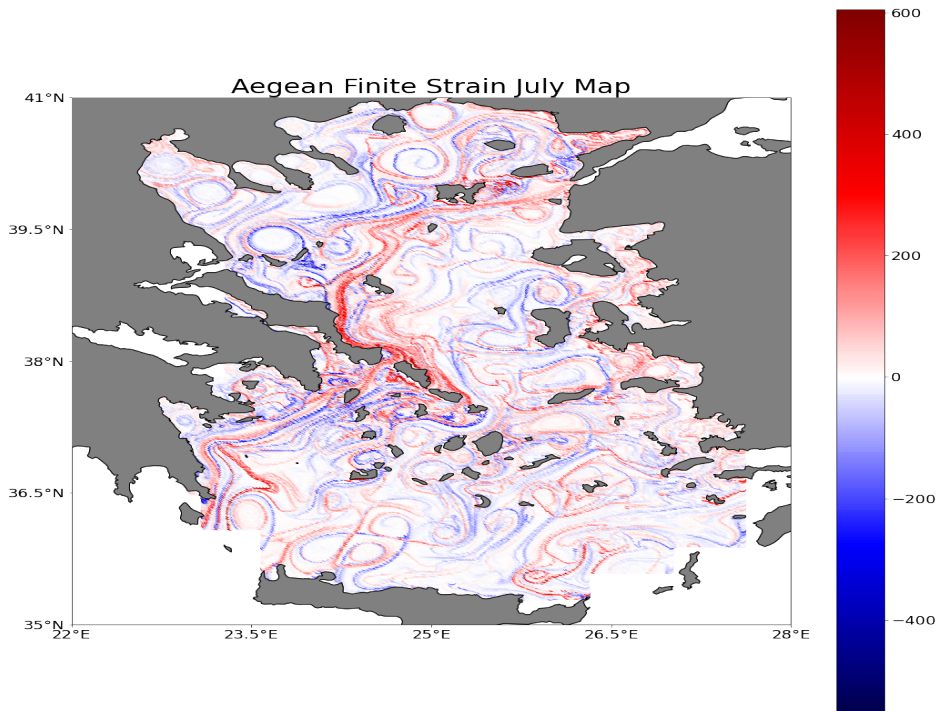
Όλα τα διαγράμματα στα οποία αναφερόμαστε στην παρακάτω συζήτηση βρίσκονται στα παραρτήματα 1 και 2 για finite strain maps και χαρτες ανάμειξης αντίστοιχα.



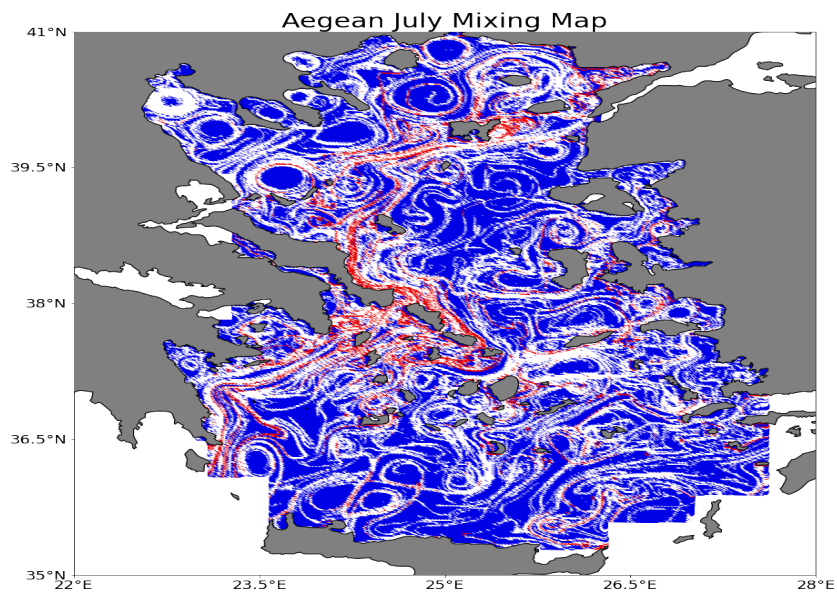
**Σχήμα 0.4.3:** Κατανομή *finite strain* στην Αδριατική κατά το μήνα Αύγουστο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



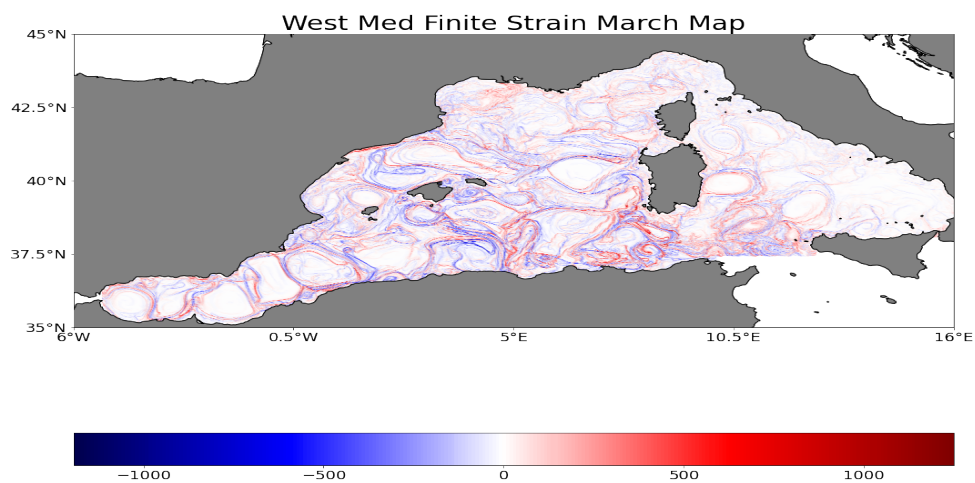
**Σχήμα 0.4.4:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στην Αδριατική κατά το μήνα Αύγουστο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



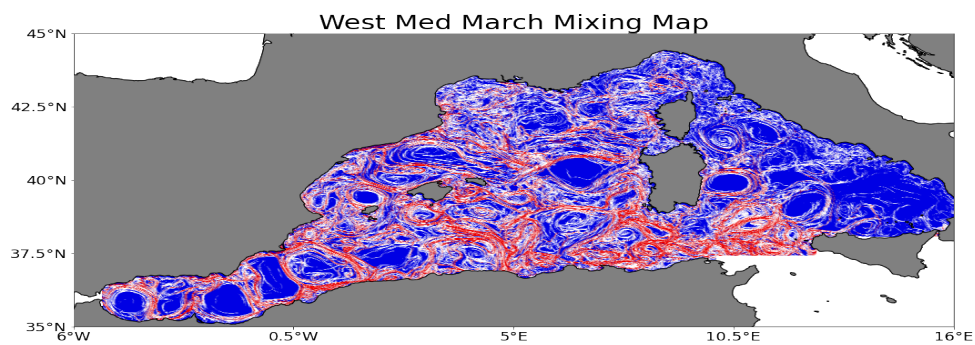
**Σχήμα 0.4.5:** Κατανομή *finite strain* στο Αιγαίο κατά το μήνα Ιούλιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



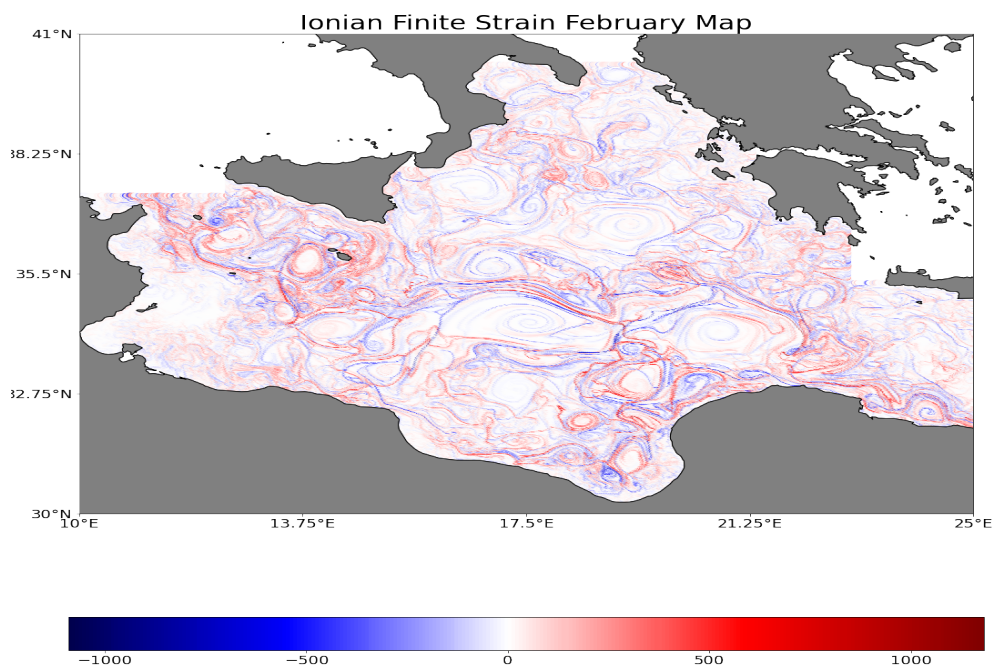
**Σχήμα 0.4.6:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Αιγαίο κατά το μήνα Ιούλιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



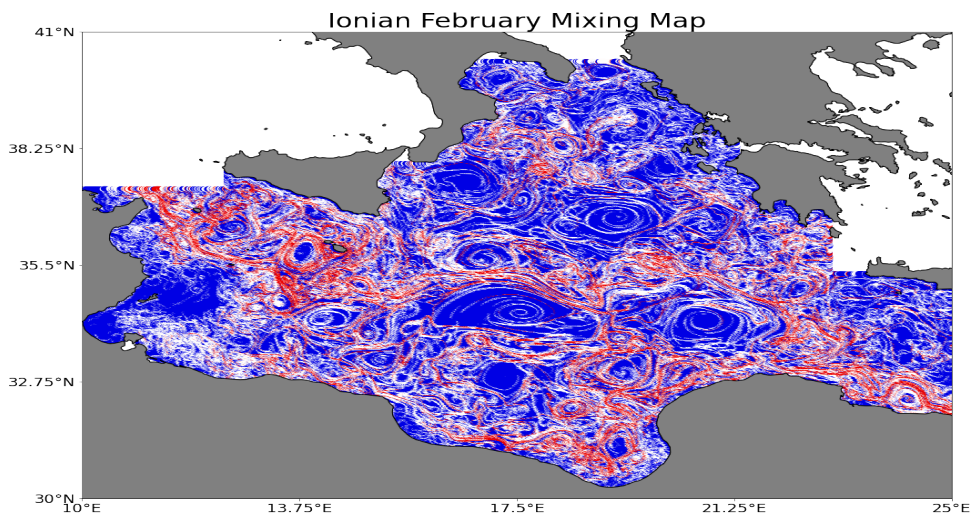
**Σχήμα 0.4.7:** Κατανομή *finite strain* στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Μάρτιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



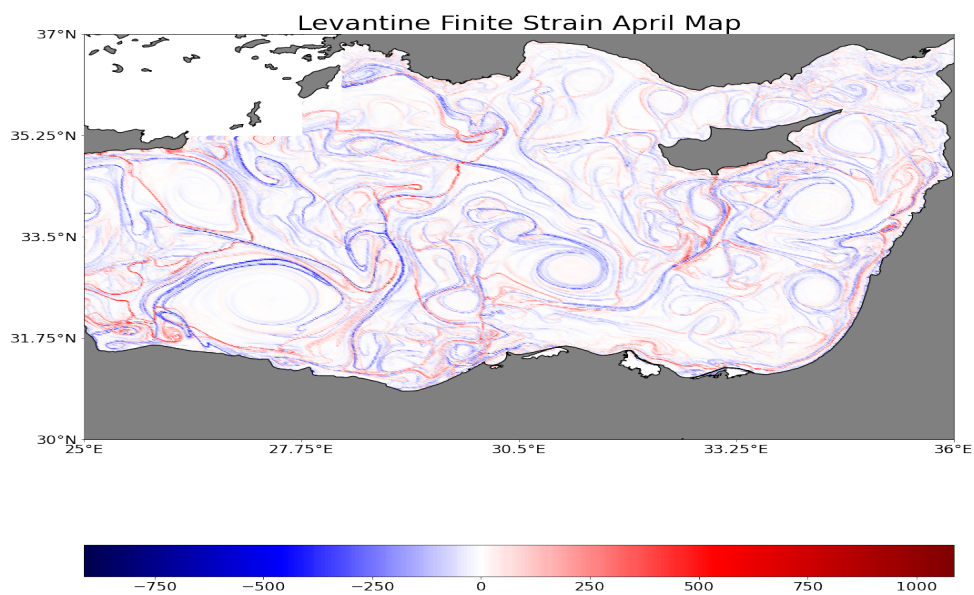
**Σχήμα 0.4.8:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Μάρτιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



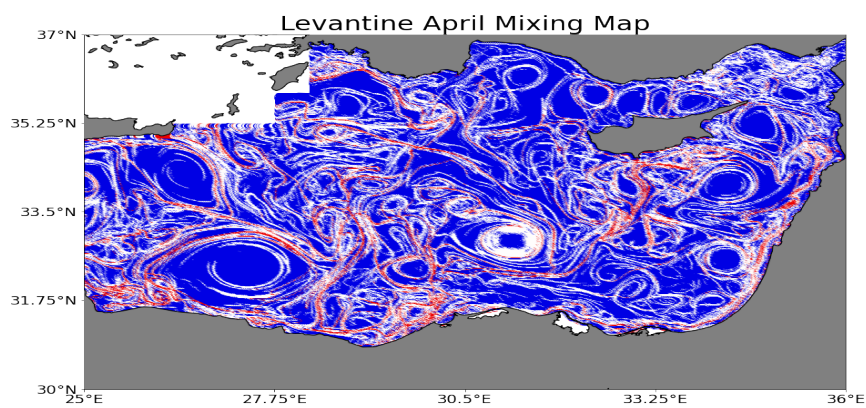
**Σχήμα 0.4.9:** Κατανομή *finite strain* στο Ιόνιο κατά το μήνα Φεβρουάριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



**Σχήμα 0.4.10:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Ιόνιο κατά το μήνα Φεβρουάριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



**Σχήμα 0.4.11:** Κατανομή finite strain στη λεβαντίνη κατά το μήνα Απρίλιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



**Σχήμα 0.4.12:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Απρίλιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

Παρατηρώντας τις κατανομές finite strain για κάθε υπολεκάνη της Μεσογείου και για κάθε μήνα του κλιμα-



τολογικού έτους διακρίνουμε τρεις διαφορετικές δομές που σχηματίζονται από τις ευσταθείς και τις ασταθείς πολλαπλότητες και επαναλαμβάνονται χωρικά και χρονικά:

Περιοχές με πολλές πολλαπλότητες, οι οποίες διασταυρώνονται σε πολλά σημεία δημιουργώντας πολύπλοκες δομές γνωστές ως συμπλέγματα (tangles)(π.χ. σχήμα 4.9). Σε αυτές τις περιοχές λαμβάνει χώρα η ισχυρότερη ανάμειξη, καθώς τα νερά που έλκονται εκεί κατά μήκος των ευσταθών πολλαπλοτήτων. Στη συνέχεια συναντούν άλλες πολλαπλότητες στην περιοχή και καταλήγουν να ακολουθούν πολύπλοκες τροχιές. Τελικά, είτε παραμένουν σε αυτή την περιοχή ανταλλάζοντας ιδιότητες όπως θερμότητα και αλατότητα με τις γειτονικές υδάτινες μάζες, είτε εκτρέπονται από τις ασταθείς πολλαπλότητες σε μεγάλες αποστάσεις, φτάνοντας τελικά σε περιοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Έπειτα παρατηρούμε περιοχές με χαμηλό finite strain όπου το κέντρο τους είναι λευκό, ενώ αντίθετα η περιφέρειά τους οριοθετείται από καμπύλες με υψηλές τιμές του finite strain είτε μπροστά στο χρόνο (κόκκινο) είτε πίσω στο χρόνο (μπλε). Η χαμηλές τιμές finite strain εδώ υποδηλώνουν ότι αυτές οι περιοχές έχουν περιορισμένη ανταλλαγή υδάτινων μαζών με το περιβάλλον τους και οι πολλαπλότητες που τις οριοθετούν διαχωρίζουν τη ροή μέσα και έξω από την περιοχή. Σε πολλές περιπτώσεις η περιφέρεια της περιοχής οριοθετείται και από ευσταθείς και από ασταθείς πολλαπλότητες. Τα σημεία της περιφέρειας στα οποία οι ευσταθείς και οι ασταθείς πολλαπλότητες διασταυρώνονται είναι τα σημεία μέσω των οποίων η περιοχή μπορεί να ανταλλάξει υδάτινες μάζες με το περιβάλλον του. Η παρουσία ασταθών και ευσταθών πολλαπλοτήτων που οριοθετούν κατά προσέγγιση κυκλικές περιοχές είναι ενδεικτικό στοιχείο ότι στην περιοχή υπάρχει δίνη. Η εικόνα είναι παρόμοια είτε πρόκειται για ημιμόνιμους σχηματισμούς (gyres) όπως ο αντικυκλώνας της Ιεράπετρας (βλέπε σχήμα 4.11) είτε για προσωρινά φαινόμενα. Μόνο με βάση αυτή την εικόνα δεν μπορούμε να πούμε εάν η δίνη περιστρέφεται κυκλωνακά ή αντικυκλωνακά.

Η τελευταία περίπτωση που παρατηρείται είναι στις περιοχές όπου οι πολλαπλότητες σχηματίζουν μεγάλες συνεχείς καμπύλες, κατά προσέγγιση παράλληλες μεταξύ τους, χωρίς πολλές διασταυρώσεις. Αυτές οι δομές υποδηλώνουν περιοχές στις οποίες το πεδίο ταχυτήτων χαρακτηρίζεται από ισχυρή διάτμηση, όπου τα νερά κινούνται παράλληλα στις αντίστοιχες πολλαπλότητες. Τέτοιες δομές προκύπτουν από ισχυρά ρεύματα(π.χ. βλέπε σχήμα 4.5). Όπως και οι περιφέρειες των δινών, και αυτές οι δομές θα αποτελούν εμπόδια στην οριζόντια ανάμειξη των υδάτινων μαζών μεταξύ των περιοχών εκατέρωθέν τους.

Μια ακόμα δομή που παρατηρείται είναι δύο πολλαπλότητες, μια ευσταθής και μια ασταθής που σχηματίζουν ένα οχτάρι (π.χ. βλέπε σχήμα 4.3, 4.5). Τέτοιες δομές έχουν παρατηρηθεί και σε άλλες αντίστοιχες μελέτες όπως από τους Rypina et al 2010. Μια πιθανή ερμηνεία είναι ότι αυτή η δομή αποτελεί ένα ζεύγος δινών που έχουν αντίθετη φορά περιστροφής.

[29]

Οι παραπάνω δομές δεν παραμένουν στάσιμες κατά τη διάρκεια του κλιματολογικού έτους. Ορισμένες δομές όμως παρατηρούνται στα διαγράμματα finite strain κάθε μήνα. Αυτές είναι οι μόνιμες και ημιμόνιμες δομές της γενικής κυκλοφορίας της Μεσογείου. Στη Θάλασσα του Αλμποράν βλέπουμε δύο δίνες που αντιστοιχούν στον ανατολικό και στο δυτικό αντικυκλώνα του Αλμποράν (π.χ. βλέπε σχήμα 4.7). Ένα άλλο μόνιμο χαρακτηριστικό που παρατηρούμε είναι η παρουσία ενός συμπλέγματος υπερβολικών δομών στο στενό της Σικελίας. Αυτό υποδεικνύει την ύπαρξη έντονης ανάμειξης στο πέρασμα από τη δυτική Μεσόγειο στο Ιόνιο καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Το αίτιο αυτής της ανάμειξης είναι η γεωμορφολογία του στενού. Τα ατλαντικά νερά αναγκάζονται να περάσουν από ένα στενό και ρηχό κανάλι και στη έξοδό τους δημιουργούν τις δομές ανάμειξης που παρατηρούμε. Μια άλλη δομή που εμφανίζεται όλους τους μήνες η δίνη Mersa-Matruh στη νοτιοδυτική Λεβαντίνη (π.χ. βλέπε σχήμα 4.11).

Όσον αφορά την χρονική διακύμανση των λαγκραντζιανών δομών, παρατηρούνται δύο μοτίβα εποχικής μεταβλητότητας:

Στις ανοιχτές υπολεκάνες της Μεσογείου οι χειμωνιάτικοι και οι ανοιξιάτικοι μήνες χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο πλήθος λαγκραντζιανών δομών με πυκνά συμπλέγματα ανάμειξης και μεγαλύτερο αριθμό δινών, οι οποίες εμφανίζονται σε μεγάλο εύρος χωρικών κλιμάκων με τις μικρές δομές να είναι ευδιάκριτες (π.χ. σχήματα 4.7 και 4.9). Αντίθετα τους θερινούς και φθινοπωρινούς μήνες η παρουσία συμπλεγμάτων ανάμειξης είναι πολύ περιορισμένη. Μόνο ημιμόνιμες δομές όπως το σύμπλεγμα του στενού της Σικελίας παραμένουν ευδιάκριτα και αυτούς τους μήνες. Οι κυκλωνικές και αντικυκλωνικές δομές αυτή την περίοδο επεκτείνονται σε μέγεθος, εις βάρος των συμπλεγμάτων ανάμειξης. Επίσης μεγαλώνουν και οι περιοχές, οι οποίες δεν παρουσιάζουν καθόλου υπερβολικές δομές (π.χ. παραρτημα 1 σχήματα 1.43, 1.55).

Οι ημικλειστές υπολεκάνες αντίθετα παρουσιάζουν πολύ μικρότερη διακύμανση από τις ανοιχτές όσον αφορά το πλήθος και το μέγεθος των λαγκραντζιανών δομών κατά τη διάρκεια του κλιματολογικού έτους. Η διακύμανση αυτή είναι πιο έντονη στην Αδριατική, όπου παρατηρούνται λιγότερες δομές κατά τους μήνες της άνοιξης (παραρτημα 1 σχήματα 1.3 - 1.5). Στο Αιγαίο παρατηρούμε μεγάλο πλήθος δομών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ωστόσο, αντίστοιχα με την Αδριατική, οι επιφάνειες με μικρές τιμές του finite strain είναι μεγαλύτερες κατά τους

μήνες της άνοιξης. Αυτή η διαφορά στο εύρος διακύμανσης στο πλήθος και το μέγεθος των λαγκραντζιανών δομών πιθανόν οφείλεται στο μέγεθος της Αδριατικής και του Αιγαίου σε σχέση με τις ανοιχτές υπολεκάνες. Ιδιαίτερα για το Αιγαίο η περίπλοκη τοπογραφία του σε συνδυασμό με τη διαρκή τροφοδοσία του με νερά από τη Μαύρη Θάλασσα ενδέχεται να συμβάλει στη δημιουργία δομών ανεξαρτήτως της εποχής του έτους.

Επιπλέον κάθε υπολεκάνη παρουσιάζει τα δικά της ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όσον αφορά τις λαγκραντζιανές δομές:

Η Αδριατική παρουσιάζει μια ασυμμετρία ως προς τη χωρική κατανομή των λαγκραντζιανών δομών, με τις περισσότερες να εμφανίζονται στο βορειοδυτικό κομμάτι της και κυρίως κατά μήκος των ακτών της Ιταλίας. Η διαφορά αυτή είναι ιδιαίτερα εμφανής την άνοιξη, ενώ το καλοκαίρι η κατανομή των δομών τείνει να καλύπτει όλη την υπολεκάνη, με τη μεγαλύτερη πυκνότητα δομών να παρατηρείται στο βόρειο άκρο της (βλέπε σχήμα 4.3). Βάσει αυτού φαίνεται ότι το δυτικό αδριατικό ρεύμα (western adriatic current) παίζει σημαντικό ρόλο στην δημιουργία λαγκραντζιανών δομών στην υπολεκάνη. Επίσης από το Δεκέμβριο έως τον Απρίλιο παρατηρούμε μια καμπύλη που παρουσιάζει μεγάλες τιμές finite strain που ξεκινά από το βορειοδυτικό άκρο της Αδριατικής και συνεχίζει παράλληλα στα ιταλικά παράλια. Το βόρειο άκρο αυτής της δομής συμπίπτει με τις εκβολές του ποταμού Ρο και, σε συνδυασμό με την εποχή κατά την οποία εμφανίζεται και το γεγονός ότι αποτελεί ευσταθή πολλαπλότητα (θετικές τιμές του finite strain), απεικονίζει την πορεία της απορροής του Ρο στην Αδριατική κατά τη διάρκεια αυτών των μηνών.

Αντίστοιχα με την πορεία των απορροών του Ρο στην Αδριατική, στο Αιγαίο απότυπώνεται η πορεία των νερών της Μαύρης Θάλασσας. Η πορεία τους είναι εμφανής καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, όρατη ως μια καμπύλη με μεγάλες θετικές τιμές του finite strain (π.χ. βλέπε σχήμα 4.5). Η καμπύλη διαχωρίζει την κυκλοφορία στην υπολεκάνη σε βόρειο και νότιο τμήμα, λειτουργώντας ως εμπόδιο στη μεταφορά νερών που εισέρχονται στο Αιγαίο από τη Λεβαντίνη προς το βόρειο Αιγαίο. Η εποχική διακύμανση αυτής της δομής αντικατοπτρίζει την εποχική μεταβολή στην πορεία των νερών της Μαύρης Θάλασσας: Το φθινόπωρο μετακινούνται βόρεια και κινούνται δυτικά, παράλληλα στις νότιες ακτές της Θράκης και της Μακεδονίας και συναντούν την Ηπειρωτική Ελλάδα στο ύψος της Θεσσαλίας. την άνοιξη και το καλοκαίρι μετακινούνται νότια της Λήμνου και ακολουθούν νοτιοδυτική πορεία μέχρι την Εύβοια. Επίσης παρατηρείται ένα σύμπλεγμα ανάμειξης μεταξύ των Κυκλάδων και της Πελοποννήσου κατά τους μήνες Ιούλιο (π.χ. βλέπε σχήμα 4.5) με Αύγουστο, που οφείλεται στο πέρασμα των νερών της Μαύρης Θάλασσας από τη νότια Εύβοια και το δυτικό τμήμα του πλατού των Κυκλάδων προτού εξέλθουν από το Αιγαίο μεταξύ Πελοποννήσου και Κρήτης.

Στη δυτική Μεσόγειο, η Θάλασσα του Αλμποράν χαρακτηρίζεται από την παρουσία δινών όλο το έτος. Αντίθετα το Τυρρηνικό Πέλαγος παρουσιάζει λίγες λαγκραντζιανές δομές, πέραν αυτών που αναπτύσσονται στην είσοδο του Στενού της Σικελίας. Το χειμώνα, και το νότιο και το βόρειο τμήμα της υπολεκάνης εμφανίζει μεγάλο πλήθος συμπλεγμάτων ανάμειξης. Στο νότιο τμήμα παράλληλα στις ακτές της Αλγερίας, μαζί με τα συμπλέγματα ανάμειξης εμφανίζονται και δίνες κατά τη διάρκεια του χειμώνα και της άνοιξης. Δίνες επίσης παρατηρούνται και βόρεια των Βαlearίδων νήσων καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Στην περιοχή πριν το Στενό της Σικελίας παρατηρείται όπως αναφέρθηκε και παραπάνω μεγάλο πλήθος συμπλεγμάτων ανάμειξης ανεξαρτήτως της εποχής. Η εικόνα είναι ίδια και στην περιοχή μετά το Στενό που βρίσκεται στο Ιόνιο.

Το κεντρικό Ιόνιο παρουσιάζει μεγάλες δομές δινών σε κάθε μήνα του έτους. Το πλήθος και μέγεθός τους μικραίνει το χειμώνα και τις αρχές της άνοιξης, αλλά εξακολουθούν να αποτελούν μεγάλο τμήμα της υπολεκάνης και αυτούς τους μήνες. Το καλοκαίρι και το φθινόπωρο εκτείνονται από το νότιο έως το βόρειο τμήμα της υπολεκάνης, το χειμώνα διακρίνεται ένα σύνολο από συμπλέγματα ανάμειξης που διασχίζουν το κεντρικό και βόρειο Ιόνιο, διαχωρίζοντας αυτές τις κεντρικές δίνες (βλέπε σχήμα 4.9). Αυτά τα συμπλέγματα ανάμειξης ενδέχεται να σχετίζονται με την πορεία του ατλαντικού-ιονίου ρεύματος στο βόρειο τμήμα της υπολεκάνης. Το νότιο τμήμα του Ιονίου χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερο πλήθος λαγκραντζιανών δομών, τόσο το χειμώνα που αποτελεί την περίοδο έντονης δραστηριότητας, όσο και το υπόλοιπο έτος, σε σχέση με το βόρειο τμήμα της υπολεκάνης. Το χειμώνα συνυπάρχουν στην περιοχή και δίνες και συμπλέγματα ανάμειξης. Όπως και με τις δομές στο βόρειο τμήμα του Ιονίου, οι λαγκραντζιανές δομές ακολουθούν χωρικά την πορεία της γενικής κυκλωνικής κυκλοφορίας στο νότιο τμήμα της υπολεκάνης και συγκεκριμένα την πορεία του τμήματος του αιγυπτιακού-λυβικού ρεύματος που βρίσκεται εντός του Ιονίου.

Όπως και οι άλλες ανοιχτές υπολεκάνες, η Λεβαντίνη παρουσιάζει μεγαλύτερο πλήθος και πυκνότητα λαγκραντζιανών δομών κατά την περίοδο Ιανουαρίου-Μαρτίου. Οι δομές είναι αυτές και δίνες και συμπλέγματα ανάμειξης και το χειμώνα εκτείνονται σε όλη την επιφάνεια της υπολεκάνης. Κατά το υπόλοιπο έτος εμφανίζονται κυρίως δίνες και γραμμές διάτμησης στην περιφέρεια της Λεβαντίνης, με τη κεντρική περιοχή να παρουσιάζει σχετική έλλειψη τέτοιων δομών. Οι τοποθεσίες εμφάνισης των δομών στην περιφέρεια συμπίπτουν με την επιφανειακή ροή της γενικής κυκλοφορίας στη Λεβαντίνη. Από τις ημιμόνιμες δομές της περιοχής, η δίνη Mersah-Matruh

οριοθετείται καθαρά από τις υπερβολικές δομές καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Το μέγεθός της παρουσιάζει δαικυμάνσεις, με το μέγιστο να παρατηρείται την άνοιξη. Ο αντικυκλώνας της Ιεράπετρας επίσης εμφανίζεται από τα τέλη του χειμώνα έως τις αρχές του καλοκαιριού (π.χ βλέπε σχήμα 4.11), ενώ η δίνη της Κύπρου διαγράφεται καθαρά κυρίως το καλοκαίρι και δευτερευόντως το φθινόπωρο. Αντίθετα, ο κυκλώνας της Ρόδου δεν απεικονίζεται σε κανένα μήνα του έτους.

Με τους χάρτες ανάμειξης παρατηρούμε τις ίδιες δομές και φαινόμενα από μια διαφορετική οπτική. Συγκρίνοντας τους χάρτες ανάμειξης των διαφόρων υπολεκανών βλέπουμε ότι τα σημεία ισχυρής ανάμειξης, που απεικονίζονται με χρώμα κόκκινο στους χάρτες, τείνουν να σχηματίζουν περιοχές με νηματοειδές σχήμα. Ακόμα και σε περιοχές που η πυκνότητα των σημείων είναι μεγάλη (βλέπε σχήμα 4.10), όπως στο Στενό της Σικελίας, διατηρούν αυτή τη διακριτή δομή τους. Όσον αφορά τη χωρική κατανομή τους, οι θέσεις τους συμπίπτουν με τις τοποθεσίες ισχυρών ρευμάτων και τις περιφέρειες δινών. Αυτή η εικόνα είναι ιδιαίτερα έντονη κατά τους μήνες του έτους όπου η γενική κυκλοφορία είναι ασθενέστερη. Στις ανοιχτές υπολεκάνες, και κατά τον χειμώνα που η κυκλοφορία είναι εντονότερη, οι περιοχές ισχυρής ανάμειξης τείνουν να επεκτείνονται, καλύπτοντας μεγαλύτερη επιφάνεια των υπολεκανών, εκτός από τα κέντρα των μεγάλων δινών και τις περιοχές όπου η ροή είναι ασθενής. Αντίθετα, στις ημικλειστές υπολεκάνες οι περιοχές ισχυρής ανάμειξης συμπίπτουν με της περιοχές ισχυρών ρευμάτων και τις περιφέρειες δινών σε όλη τη διάρκεια του έτους.

Τα σημεία στα οποία επικρατεί ασθενής ανάμειξη, που απεικονίζονται στους χάρτες ανάμειξης με μπλε, αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικές δυναμικές καταστάσεις της ροής σε αυτή την περιοχή. Σε περιοχές όπως το ανατολικό άκρο του Τυρρηνικού πελάγους και το δυτικό άκρο του Ιονίου πελάγους στις ακτές της Τυνησίας, η ασθενής ανάμειξη οφείλεται στην γενικότερη ελλειψη έντονης κυκλοφορίας σε αυτές τις περιοχές, λόγω της τοποθεσίας τους. Γι' αυτό και η ανάμειξη σε αυτά τα σημεία παραμένει ασθενής καθ' όλη τη διάρκεια του κλιματολογικού έτους και οι λαγκραντζιανές δομές που εμφανίζονται σε αυτές τις περιοχές είναι ελάχιστες. Τα άλλα σημεία που παρουσιάζουν σταθερά ασθενή ανάμειξη είναι αυτά που βρίσκονται στις κεντρικές περιοχές των δινών.

Οι περιοχές που εμφανίζονται με λευκό χρώμα σύμφωνα με τον ορισμό που δώσαμε παραπάνω αντιστοιχούν σε σημεία με υψηλές τιμές του finite strain είτε μόνο στα μπροστά στο χρόνο πειράματα είτε μόνο στα πίσω στο χρόνο πειράματα. Συνεπώς αντιπροσωπεύουν τις τοποθεσίες των ευσταθών και των ασταθών πολλαπλοτήτων, οι οποίες αποτελούν εμπόδια στην ανάμειξη καθώς οι drifters, και συνεπώς οι υδάτινες μάζες που αντιπροσωπεύουν, δεν μπορούν να τις διαπεράσουν. Εξετάζοντας τους χάρτες ανάμειξης, βλέπουμε ότι τα περισσότερα λευκά σημεία αντιστοιχούν στην περιφέρεια δινών. Ορισμένα λευκά σημεία εμφανίζονται στο εσωτερικό των δινών. Αυτά αποτελούν τοπικά μεγάλες τιμές του finite strain, που είναι όμως μικρότερες από αυτές στην περιφέρεια της δίνης. Επίσης η πορεία των νερών της Μαύρης Θάλασσας απεικονίζεται ως λευκή (βλέπε σχήμα 4.6), καθώς διαχωρίζει το νοτιοανατολικό Αιγαίο στο οποίο εισέρχονται λεβαντινά νερα από το βόρειο.

Τα ατλαντικά νερά που εισέρχονται στη Δυτική Μεσόγειο από το Στενό του Γιβραλτάρ δεν παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά. Αυτό οφείλεται στο ότι τα ατλαντικά νερά εισέρχονται με μεγάλη ορμή σε μία στενή θάλασσα, η οποία δεν τροφοδοτείται με νερά από κάποια άλλη πηγή όπως το Αιγαίο. Έτσι τα ατλαντικά νερά συνεχίζουν την πορεία του στη Θάλασσα του Αλμποράν ως ένα ισχυρό ρεύμα, οι μεανδρισμοί του οποίου δημιουργούν τον ανατολικό και το δυτικό αντικυκλώνα του Αλμποράν, στην περιφέρεια των οποίων παρατηρούμε ισχυρή ανάμειξη (βλέπε σχήμα 4.8). Αντίθετα, τα νερά της Μαύρης Θάλασσας περνώντας το Στενό των Δαρδανελλίων εισέρχονται σε μια πιο ανοιχτή περιοχή, στην οποία όπως εισέρχονται και λεβαντινά νερά. Η αλληλεπίδραση αυτών των δύο υδάτινων μαζών με διαφορετικές ιδιότητες δημιουργεί τον καθαρό διαχωρισμό που παρατηρούμε στους χάρτες ανάμειξης του Αιγαίου.

Η απεικόνιση των δινών στους χάρτες ανάμειξης απαιτεί περαιτέρω συζήτηση. Όσον αφορά το finite strain, ένα ζεύγος από drifters που ποντίζεται στο εσωτερικό μιας δίνης θα παραμείνουν στο εσωτερικό της για όλη τη διάρκεια της ζωής της, που είναι τυπικά πολύ μεγαλύτερη από τις δύο εβδομάδες που είναι η χρονική διάρκεια των πειραμάτων μας. Συνεπώς οι τιμές του finite strain που μπορεί να πάρει κάθε τέτοιο ζεύγος είναι της τάξης της διαμέτρου της δίνης. Ταυτόχρονα, ζεύγη από drifters που ποντίζονται στην περιφέρεια μιας δίνης είναι ελεύθερα να πάρουν πολύ μεγαλύτερες τιμές του finite strain, ειδικά στην περίπτωση που ο ένας drifter εισέλθει στο εσωτερικό της δίνης ενώ ο άλλος όχι. Φυσικά υπάρχει το ενδεχόμενο ο ένας drifter από ένα ζεύγος που ποντίζεται στο εσωτερικό μιας δίνης να βγει έξω από τα όριά της, ενώ ο άλλος να παραμείνει παγιδευμένος μέσα. Αυτή η περίπτωση επίσης θα οδηγούσε σε μεγάλες τιμές του finite strain για το ζεύγος, όμως είναι στατιστικά απίθανο αυτό να συμβεί για την πλειοψηφία των drifters που ποντίστηκαν στο εσωτερικό της δίνης. Κατ' αυτόν τον τρόπο, εφόσον το πλέγμα πόντησης είναι αρκετά πυκνό, η πλειοψηφία των drifters που ποντίζονται στο εσωτερικό μιας δίνης θα παραμείνουν παγιδευμένοι, οδηγώντας σε χαμηλές τιμές του finite strain στο εσωτερικό της δίνης. Ο συνδυασμός των παραπάνω οδηγεί στην εικόνα των δινών που παίρνουμε στους χάρτες ανάμειξης: Κυκλικές μπλε περιοχές (ασθενής ανάμειξη) που περιβάλλονται από λευκά δαχτυλίσια (εμπόδια στην ανάμειξη - ασταθείς κι

ευσταθείς πολλαπλότητες). Σε σχέση με τους χάρτες finite strain, οι δίνες παρατηρούνται πιο εύκολα στους χάρτες ανάμειξης. Αυτό ισχύει τόσο για τις μεγάλες, ημιμόνιμες κυκλωνικές και αντικυκλωνικές δομές, όσο και για μικρές προσωρινές δομές που προκύπτουν από την αστάθεια ρευμάτων, όπως το ρεύμα της Αλγερίας. Φυσικά η διακριτική ικανότητα του μοντέλου από το οποίο παίρνουμε τα δεδομένα αποτελεί ένα κάτω όριο στο μέγεθος των δινών που μπορούμε να παρατηρήσουμε. [8]

Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης που παρατηρούνται στην περιφέρεια των δινών τότε αντιστοιχούν εν μέρει στα σημεία τομής των ευσταθών και ασταθών πολλαπλοτήτων, στα οποία υδάτινες μάζες μπορούν να εισέλθουν ή να εξέλθουν από τη δίνη, και εν μέρει στην επίδραση που προκαλεί η παρουσία της δίνης στη γύρω περιοχή. Αυτή δεν είναι η μόνη συνεισφορά των δινών στην ανάμειξη. Όταν μια δίνη φτάσει στο τέλος του χρόνου ζωής της θα διαλυθεί και οι υδάτινες μάζες που ήταν παγιδευμένες στο εσωτερικό της από το σχηματισμό της θα απελευθερωθούν στο περιβάλλον, όπου και θα αναμειχθούν. Αυτού του τύπου η ανάμειξη συμβαίνει για παράδειγμα κατά την διάλυση των δινών του τύπου cold core rings στο Gulf Stream. Εφόσον η εικόνα που παίρνουμε στους χάρτες ανάμειξης είναι ένα στιγμιότυπο για μια χρονική στιγμή, δεν μπορούμε να ανιχνεύσουμε αυτή του είδους την ανάμειξη. Συνεπώς τα σημεία ισχυρής ανάμειξης που απεικονίζονται στους χάρτες ανάμειξης αντιστοιχούν στην "στιγμιαία" ανάμειξη που οφείλεται στη παρουσία των λαγκραντζιανών δομών της κυκλοφορίας. [30, 31]

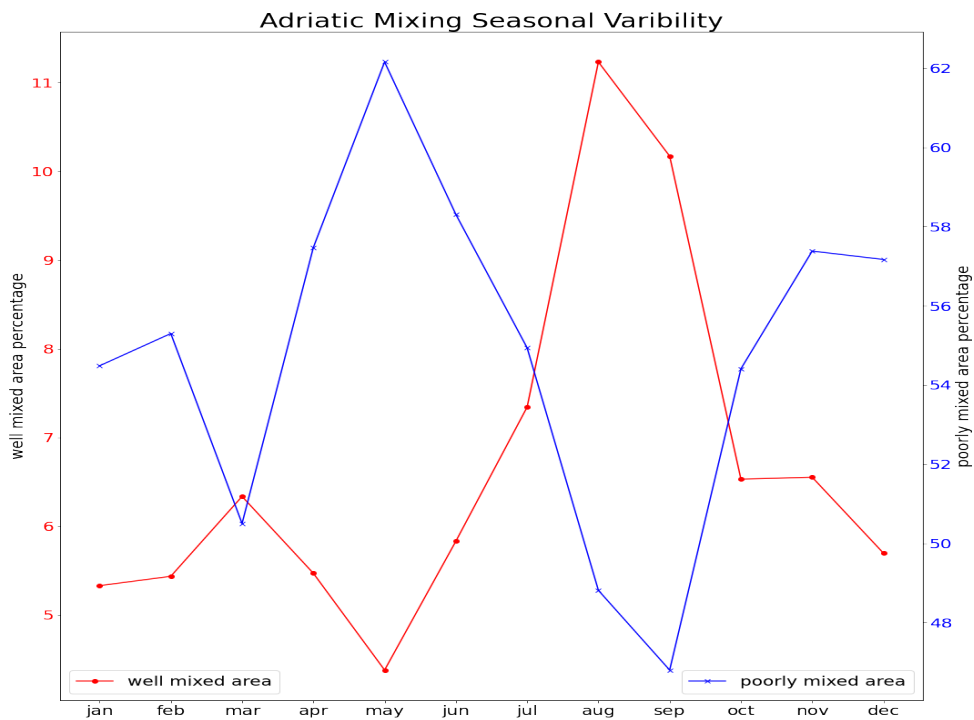
Δεδομένου ότι το finite strain ως μετρική αποτελεί ένα δείκτη της παραμόρφωσης που υφίσταται ένας όγκος νερού, μπορούμε να συνδέσουμε τη δυναμική που επικρατεί στις διαφορετικές περιοχές της Μεσογείου με τα διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς το finite strain κάθε περιοχής. Δυναμικά τότε οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης, ή ισοδύναμα περιοχές με χαμηλές τιμές του finite strain μπροστά και πίσω στο χρόνο, αντιστοιχούν είτε σε περιοχές που η κυκλοφορία είναι γενικά ασθενής είτε σε περιοχές όπου η δυναμική της κυκλοφορίας κυριαρχείται από το στροβιλισμό. Οι περιοχές ισχυρής ανάμειξης, ή ισοδύναμα περιοχές με υψηλές τιμές του finite strain και μπροστά και πίσω στο χρόνο, από την άλλη αντιστοιχούν δυναμικά στις περιοχές όπου η κυκλοφορία κυριαρχείται από την τάση γραμμικής παραμόρφωσης (strain). [2, 22]

Για να εκτιμήσουμε τη μεταβλητότητα στην οποία υπόκειται αυτή η "στιγμιαία" ανάμειξη κατά τη διάρκεια του κλιματολογικού έτους πρέπει να ποσοτικοποιήσουμε την επιφάνεια στην οποία αντιστοιούν οι περιοχές ισχυρής και ασθενής ανάμειξης. Δεδομένου ότι οι τιμές του finite strain βρίσκονται πάνω σε ένα κατα προσέγγιση ορθοκανονικό πλέγμα με αποστάσεις μεταξύ κόμβων:  $dx = 0.011 \text{ deg}$  και  $dy = 0.009 \text{ deg}$ , ο κάθε κόμβος αντιστοιχεί σε μια περιοχή επιφάνειας:

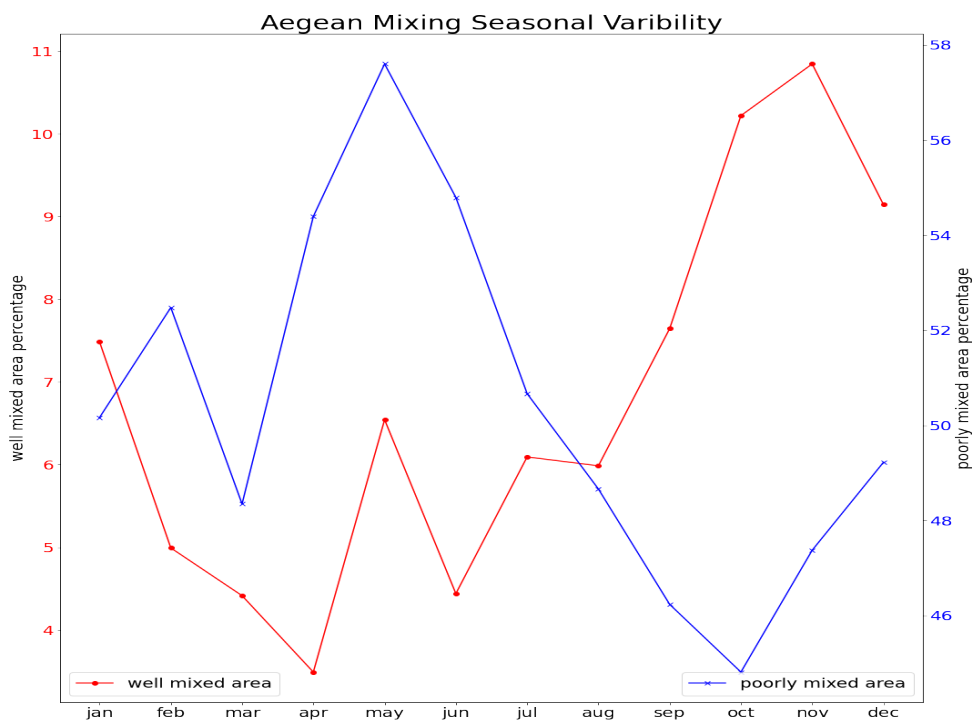
$$A = dx \times dy = 0.011 \text{ deg} \times 0.009 \text{ deg} = 1.221 \text{ km} \times 0.999 \text{ km} \approx 1.22 \text{ km}^2$$

Οπότε ο συνολικός αριθμός των κόμβων στους οποίους λαμβάνει χώρα καλή ανάμειξη ορίζει κατ' αυτόν τον τρόπο την συνολική επιφάνεια στην οποία συμβαίνει ισχυρή ανάμειξη. Υπολογίζουμε αυτήν την επιφάνεια για κάθε υπολεκάνη της Μεσογείου και για κάθε μήνα του κλιματολογικού έτους. Κατ' αντίστοιχο τρόπο μπορούμε να βρούμε την επιφάνεια των περιοχών κάθε υπολεκάνης που λαμβάνει χώρα ασθενής ανάμειξη.

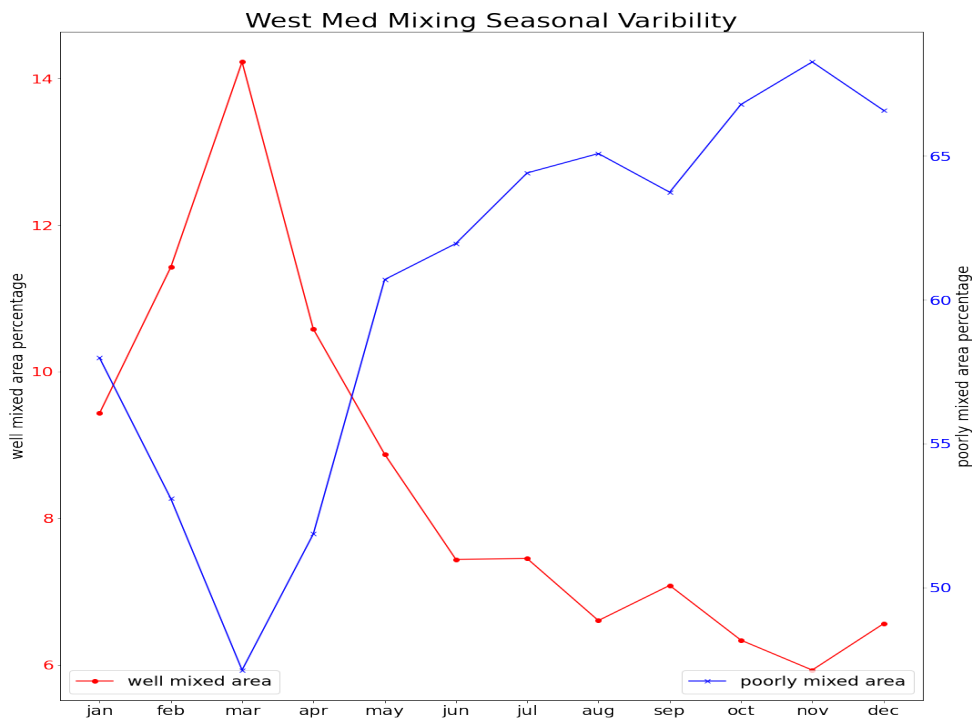
Παρακάτω παραθέτουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα με την ενδοετήσια μεταβολή των επιφανειών ισχυρούς και ασθενούς ανάμειξης, ως ποσοστό της συνολικής επιφάνειας της αντίστοιχης υπολεκάνης της Μεσογείου:



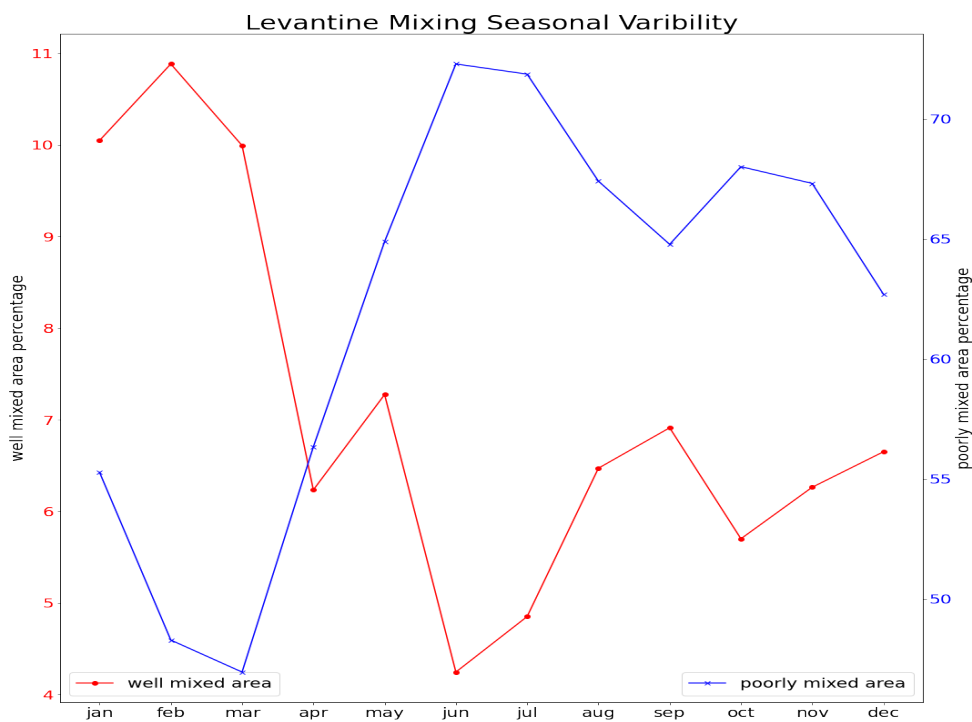
**Σχήμα 0.4.13:** Εποχική μεταβλητότητα του ποσοστού των συνολικών επιφανειών ισχυρής και ασθενούς ανάμειξης της Αδριατικής. Το ποσοστό της επιφάνειας ισχυρής ανάμειξης απεικονίζεται με κόκκινες τελείες, ενώ το ποσοστό της επιφάνειας ασθενούς ανάμειξης απεικονίζεται με μπλε x.



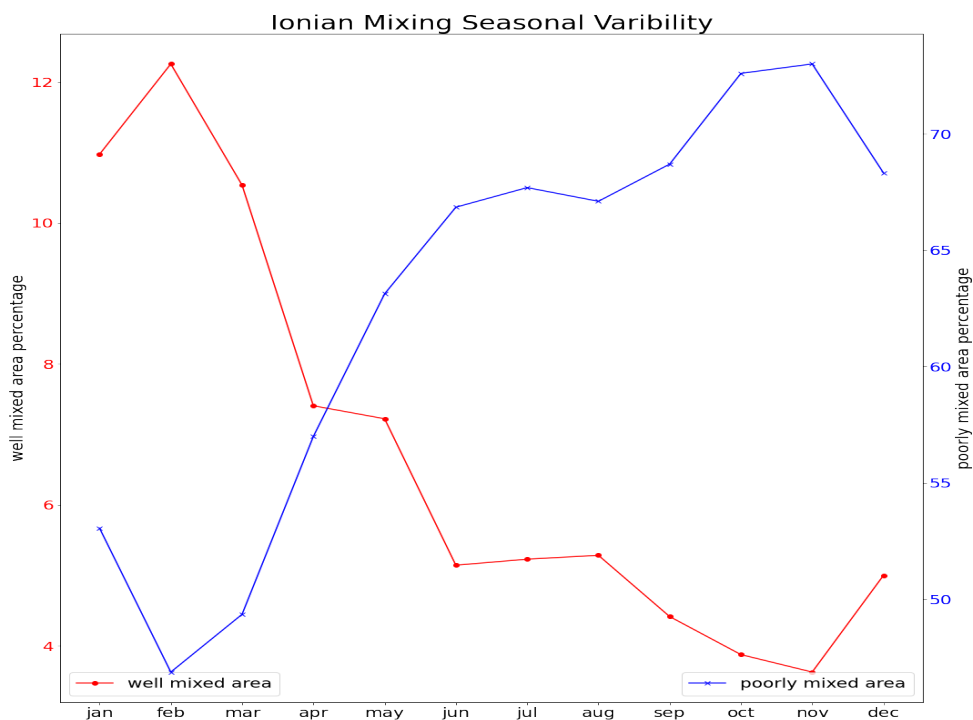
**Σχήμα 0.4.14:** Εποχική μεταβλητότητα του ποσοστού των συνολικών επιφανειών ισχυρής και ασθενούς ανάμειξης του Αιγαίου. Το ποσοστό της επιφάνειας ισχυρής ανάμειξης απεικονίζεται με κόκκινες τελείες, ενώ το ποσοστό της επιφάνειας ασθενούς ανάμειξης απεικονίζεται με μπλε x.



**Σχήμα 0.4.15:** Εποχική μεταβλητότητα του ποσοστού των συνολικών επιφανειών ισχυρής και ασθενούς ανάμειξης της δυτικής Μεσογείου. Το ποσοστό της επιφάνειας ισχυρής ανάμειξης απεικονίζεται με κόκκινες τελείες, ενώ το ποσοστό της επιφάνειας ασθενούς ανάμειξης απεικονίζεται με μπλε x.



**Σχήμα 0.4.16:** Εποχική μεταβλητότητα του ποσοστού των συνολικών επιφανειών ισχυρής και ασθενούς ανάμειξης του Ιονίου. Το ποσοστό της επιφάνειας ισχυρής ανάμειξης απεικονίζεται με κόκκινες τελείες, ενώ το ποσοστό της επιφάνειας ασθενούς ανάμειξης απεικονίζεται με μπλε x.



**Σχήμα 0.4.17:** Εποχική μεταβλητότητα του ποσοστού των συνολικών επιφανειών ισχυρής και ασθενούς ανάμειξης της Λεβαντίνης. Το ποσοστό της επιφάνειας ισχυρής ανάμειξης απεικονίζεται με κόκκινες τελείες, ενώ το ποσοστό της επιφάνειας ασθενούς ανάμειξης απεικονίζεται με μπλε x.

Συγκρίνοντας τα παραπάνω γραφήματα βλέπουμε ότι τα ποσοστά ισχυρής και ασθενούς ανάμειξης σε κάθε μια από τις κύριες υπολεκάνες είναι συγκρίσιμα, με την επιφάνεια ισχυρής ανάμειξης να κυμαίνεται από 4 έως 14 τοις εκατό και την επιφάνεια ασθενούς ανάμειξης να κυμαίνεται από 45 έως 70 τοις εκατό. Η ισχυρότερη ανάμειξη παρατηρείται στη Δυτική Μεσόγειο, όπως αναμένεται λόγω της εισόδου νερών από τον Ατλαντικό Ωκεανό από το δυτικό της άκρο, και συμβαίνει το Μάρτιο. Τα μέγιστα σε Αιγαίο, Αδριατική και Λεβαντίνη είναι όλα περίπου 11 τοις εκατό, με το μέγιστο του Ιονίου να βρίσκεται μεταξύ αυτών και του μεγίστου της δυτικής Μεσογείου, στο 12 τοις εκατό. Τα ελάχιστα της ισχυρής ανάμειξης παίρνουν τιμές από 4 έως 6 τοις εκατό, με τη μέγιστη τιμή να παρουσιάζεται πάλι στη δυτική Μεσόγειο. Η Λεβαντίνη, το Αιγαίο και το Ιόνιο έχουν ελάχιστο στο 4 τοις εκατό. Το ελάχιστο της μέγιστης ανάμειξης στην Αδριατική παίρνει την ενδιάμεση τιμή του 5 τοις εκατό.

Η μεταβλητότητα των περιοχών ασθενούς ανάμειξης είναι πολύ μεγαλύτερη και κυμαίνεται από 40 έως και 75 τοις εκατό. Τα μεγαλύτερα και τα ελάχιστα ποσοστά περιοχών με ασθενή ανάμειξη λαμβάνουν χώρα στο Ιόνιο και στη Λεβαντίνη. Αντίθετα, η μεταβλητότητα στις ημι-κλειστές υπολεκάνες παρουσιάζει μικρότερο εύρος, με τα μικρότερα μέγιστα περιοχών ασθενούς ανάμειξης, της τάξης του 60 τοις εκατό και τα μικρότερα.

Χρονικά, οι ημι-κλειστές υπολεκάνες παρουσιάζουν πολύ διαφορετική συμπεριφορά από τις ανοιχτές. Στη δυτική Μεσόγειο, το Ιόνιο και τη Λεβαντίνη η εποχή μέγιστης ανάμειξης είναι ο χειμώνας, με μέγιστα να λαμβάνουν χώρα τους μήνες Μάρτιο, Φεβρουάριο και Φεβρουάριο αντίστοιχα για κάθε μια από τις παραπάνω υπολεκάνες. Στη συνέχεια ακολουθεί μια απότομη μείωση της επιφάνειας ισχυρής ανάμειξης και στις τρεις υπολεκάνες. Αυτή η μείωση στην ισχυρή ανάμειξη συνεχίζεται σχεδόν μονότονα στη δυτική Μεσόγειο και το Ιόνιο μέχρι να φτάσει το ελάχιστο το Νοέμβριο. Στη Λεβαντίνη σταματά τον Ιούνιο, όπου παίρνει την ελάχιστη τιμή της, και από τον Αύγουστο έως και το Δεκέμβριο παρουσιάζει σχετικά μικρές διακυμάνσεις γύρω από το 6 τοις εκατό.

Στο Αιγαίο και την Αδριατική αντίθετα, τα μέγιστα της επιφάνειας ισχυρής ανάμειξης παρατηρούνται το Νοέμβριο και τον Αύγουστο αντίστοιχα και όχι τους χειμερινούς μήνες. Το Αιγαίο μάλιστα παρουσιάζει σταθερή τάση μείωσης της επιφάνειας ισχυρής ανάμειξης κατά τους χειμερινούς μήνες. Μετά από το ελάχιστο του Απριλίου, η επιφάνεια ισχυρής ανάμειξης στο Αιγαίο παρουσιάζει έντονη μεταβλητότητα μέχρι και τον Ιούλιο, ενώ από τον Αύγουστο ξεκινά να αυξάνεται έως το μέγιστο του Νοεμβρίου. Η Αδριατική έχει παρόμοια συμπεριφορά, με την περίοδο έντονης μεταβλητότητας να εκτείνεται από το Φεβρουάριο μέχρι τον Ιούνιο. Έπειτα ακολουθεί η περίοδος αύξησης της επιφάνειας ισχυρής ανάμειξης μέχρι τον Αύγουστο και μετά μια μείωση για το υπόλοιπο του κλιματολογικού έτους.

Οι μεταβολές της επιφάνειας ασθενούς ανάμειξης παρουσιάζουν σχεδόν ακριβώς το αντίστροφο μοτίβο από αυτές της ισχυρής ανάμειξης. Ιδιαίτερα στο Ιόνιο και στη δυτική Μεσόγειο οι καμπύλες μεταβολής της επιφάνειας ασθενούς ανάμειξης έχουν κλίση αντίθετου προσίμου με αυτές της ισχυρής ανάμειξης για όλο το κλιματολογικό έτος, εκτός από την περίοδο Ιουνίου-Ιουλίου στο Ιόνιο. Επίσης τα μέγιστα της ισχυρής ανάμειξης παρατηρούνται τους ίδιους μήνες με τα ελάχιστα της ασθενούς ανάμειξης και το αντίστροφο.

Η Αδριατική και η Λεβαντίνη παρουσιάζουν αντίστοιχη συμπεριφορά, με τις επιφάνειες ισχυρής και ασθενής ανάμειξης να έχουν αντίθετες τάσεις αύξησης και μείωσης για όλους τους μήνες εκτός από δύο για κάθε υπολεκάνη: τον Ιανουάριο και το Δεκέμβριο για την Αδριατική και τον Μάρτιο και τον Μάιο για τη Λεβαντίνη. Επιπλέον, το μέγιστο της επιφάνειας ασθενούς ανάμειξης και το ελάχιστο της ισχυρής ανάμειξης συμβαίνουν και τα δύο το Μάιο για την Αδριατική και τον Ιούνιο για τη Λεβαντίνη. Ταυτόχρονα, το ελάχιστο και το μέγιστο της επιφάνειας ασθενούς και ισχυρής ανάμειξης αντίστοιχα απέχουν μεταξύ τους κατά ένα μήνα και για τις δύο υπολεκάνες, λαμβάνοντας χώρα τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο αντίστοιχα για την Αδριατική και Μάρτιο και Φεβρουάριο για τη Λεβαντίνη.

Το Αιγαίο αποκλίνει σχετικά από αυτή την αντισυμμετρική συμπεριφορά. Η γενική εικόνα είναι η ίδια, με το μέγιστο της επιφάνειας ασθενούς ανάμειξης να παρατηρείται την άνοιξη και το ελάχιστο το φθινόπωρο, ενώ η επιφάνεια ισχυρής ανάμειξης παρουσιάζει ελάχιστο και μέγιστο στις αντίστοιχες εποχές. Τις περιόδους Φεβρουαρίου-Μαρτίου και Απριλίου-Ιουνίου, οι ρυθμοί μεταβολής των επιφανείων ισχυρής και ασθενούς ανάμειξης έχουν ίδιο πρόσημο. Αυτή η τάση οφείλεται στην απότομη αύξηση της επιφάνειας ισχυρής ανάμειξης που λαμβάνει χώρα το Μάιο και την αντίστοιχη μείωση της επιφάνειας ασθενούς ανάμειξης το Μάρτιο.

Βάσει των παραπάνω γραφημάτων, υπάρχουν δύο βασικές εποχικές διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά της οριζόντιας ανάμειξης στη Μεσόγειο: Η διαφορετική συμπεριφορά που χαρακτηρίζει τα μέγιστα και τα ελάχιστα της ανάμειξης στις ανοιχτές υπολεκάνες από αυτή των ημι-κλειστών λεκανών και η απόκλιση από την αντισυμμετρική συμπεριφορά που παρουσιάζεται κυρίως στο ανατολικό τμήμα της Μεσογείου και την Αδριατική σε σχέση με το τη δυτική Μεσόγειο και το Ιόνιο. Αυτές οι διαφορές στη συμπεριφορά οφείλονται στους διαφορετικούς μηχανισμούς που καθορίζουν την ανάμειξη στις εκάστοτε υπολεκάνες.

Η γεωγραφία των τριών υπολεκανών παίζει και αυτή ένα ρόλο στην διαμόρφωση της παραπάνω εποχικής μεταβλητότητας. Η δυτική Μεσόγειος, το Ιόνιο και η Λεβαντίνη είναι όλες μεγάλες υπολεκάνες, χωρίς νησιωτικά συμπλέγματα ή περίπλοκη τοπογραφία που θα έθεταν περιορισμούς στη γενική κυκλοφορία σε αυτές τις λεκάνες. Αυτό επιτρέπει στο ανεμολογικό πεδίο να επιδράσει ανεμπόδιστα πάνω σε μεγάλες εκτάσεις της επιφάνειας της θάλασσας και να αναπτύξει δομές της κυκλοφορίας που με τη σειρά τους θα επιρρεάσουν την αριζόντια ανάμειξη. Η παρουσία της Σαρδηνίας και των Βαλεαρίδων Νήσων στη δυτική Μεσόγειο και της Κύπρου στη Λεβαντίνη αντίστοιχα επιδρούν φυσικά στην κυκλοφορία, αλλά η επίδρασή τους αυτή εκτείνεται μόνο τοπικά και όχι σε όλη την έκταση των αντίστοιχων υπολεκανών. Η παρουσία της Σαρδηνίας λειτουργεί για να απομονώσει το Τυρρηνικό πέλαγος από τη γενική κυκλοφορία σε μεγάλο βαθμό όπως είδαμε παραπάνω, η υπόλοιπη δυτική Μεσόγειος εμφανίζει λαγκραντζιανές δομές σε όλη της την έκταση. Η Κύπρος από τη άλλη επειδή βρίσκεται κοντά στα παράλια της Μικράς Ασίας και της Μέσης Ανατολής δεν απομονώνει κάποια περιοχή, αλλά σε συνδυασμό με την γενική κυκλοφορία της Λεβαντίνης συμβάλει στη δημιουργία δομών μεγάλης κλίμακας, όπως ο κυκλώνας της Ρόδου, η δίνη της Κύπρου και η δίνη Shikmona. Αυτές οι δομές με τη σειρά τους επιρρεάζουν τις διαδικασίες ανάμειξης στη Λεβαντίνη, όμως η ένταση της επίδρασής τους εξαρτάται κυρίως από την γενική κυκλοφορία, η οποία καθορίζεται κυρίως από την επίδραση της ατμόσφαιρας και την εισροή ατλαντικών νερών. Συνεπώς η εποχική διακύμανση της οριζόντιας ανάμειξης απεικονίζει αυτή την μεταβλητότητα των δομών της κυκλοφορίας.

Η Αδριατική και το Αιγαίο από την άλλη παρουσιάζουν τα μέγιστα της οριζόντιας ανάμειξης το φθινόπωρο, ενώ τα ελάχιστα εμφανίζονται την άνοιξη. Αυτή η διαφορά από τις ανοιχτές υπολεκάνες υποδηλώνει ότι η ανάμειξη στο Αιγαίο και την Αδριατική δεν καθορίζεται ούτε από την εισροή ατλαντικών νερών ούτε από την επίδραση της ατμόσφαιρας. Αυτό οφείλεται εν μέρει στη μερική απομόνωση αυτών των υπολεκανών από τη γενική κυκλωνική κυκλοφορία της Μεσογείου. Παρότι τμήματα της γενικής κυκλοφορίας εισέρχονται τόσο στο Αιγαίο όσο και στην Αδριατική, αυτά τα τμήματα είναι μικρά και ο κύριος όγκος των ατλαντικών νερών παραμένει στη Λεβαντίνη και το Ιόνιο.

Αντίθετα, η κινητήρια δύναμη πίσω από την οριζόντια επιφανειακή ανάμειξη στην Αδριατική και το Αιγαίο είναι η εισροή γλυκών νερών σε αυτές τις υπολεκάνες μέσω της απορροής ποταμών και, στην περίπτωση του Αιγαίου, τη εισροή νερών από τη Μαύρη Θάλασσα από το Στενό των Δαρδανελλίων. Τα νερά των ποταμών είναι φυσικά γλυκά και συνεπώς η κίνησή τους θα περιορίζεται στην επιφάνεια της Μεσογείου. Τα νερά της Μαύρης Θάλασσας είναι επίσης γλυκά, καθώς η Μαύρη Θάλασσα είναι μια κλειστή λεκάνη που δεν επικοινωνεί με κανένα ωκεανό. Επιπλέον δεν παρουσιάζει τόσο έντονη εξάτμιση όσο η Μεσόγειος και τροφοδοτείται από περισσότερα και μεγαλύτερα ποτάμια σε σχέση με τη Μεσόγειο, οπότε τα νερά της είναι μικρότερης πυκνότητας από αυτά της



Μεσογείου και η κυκλοφορία τους στη Μεσόγειο αφού εισέλθουν θα είναι επιφανειακή.

Η ποσότητα των ατλαντικών νερών που εισέρχονται στη Μεσόγειο μέσω του Στενού του Γιβραλτάρ είναι πολύ μεγαλύτερη από την συνολική ποσότητα γλυκού νερού από τις απορροές των ποταμών και των νερών της Μαύρης Θάλασσας, αλλά τα ατλαντικά νερά ακολουθούν τη γενική κυκλωνική ροή της λεκάνης προτού εισέλθουν στις ημι-κλειστές λεκάνες. Κατα συνέπεια όταν τελικά φτάσουν στο Αιγαίο ή την Αδριατική έχουν χάσει μεγάλο μέρος των αρχικών χαρακτηριστικών τους που δημιουργεί τις λαγκρανζιανές δομές και τα φαινόμενα ανάμειξης στις ανοιχτές υπολεκάνες και δεν έχουν την ίδια επίδραση όπως σε αυτές. Η απορροή των ποταμών απ' την άλλη εισέρχεται κατευθείαν στην εκάστοτε υπολεκάνη, και λόγω της διαφορετικής στρωμάτωσης εναποτίθεται στην επιφάνεια και συνεισφέρει στην ανάμειξη.

Η εποχικότητα που παρατηρούμε στην επιφάνεια ισχυρής ανάμειξης στις ημι-κλειστές υπολεκάνες ταιριάζει με την εποχικότητα στην ένταση της απορροής των ποταμών: Η τάση αύξησης ξεκινά στα τέλη της άνοιξης με αρχές καλοκαιριού, αφού έχουν λιώσει τα χειμερινά χιόνια και έχουν εμπλουτίσει τα ποτάμια. Όμοια, η τάση πτώσης της επιφάνειας ισχυρής ανάμειξης ξεκινά τέλη καλοκαιριού για την Αδριατική, που συμπίπτει με την περίοδο που η ένταση της απορροή των ποταμών αρχίζει να μειώνεται. Στο Αιγαίο η μείωση καθυστερεί σε σχέση με τη Αδριατική, ξεκινά μέσα τέλη φθινοπώρου. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην εισροή νερών από τη Μαύρη Θάλασσα στο Αιγαίο, η οποία παρουσιάζει πιο αργό εποχικό κύκλο καθώς τα νερά πρέπει να διασχίσουν τη Μαύρη Θάλασσα και το στενό των Δαρδανελίων προτού φτάσουν στο Αιγαίο. Σε αυτή την καθυστέρηση οφείλεται ο ένας μήνας διαφορά στην τάση αύξησης της επιφάνειας ισχυρής ανάμειξης μεταξύ των δυο ημι-κλειστών υπολεκανών. Το ίδιο ισχύει και για τους τρεις μήνες διαφορά των μεγίστων της επιφάνειας ισχυρής ανάμειξης: Ενώ η ανάμειξη στην Αδριατική κυριαρχείται από τις απορροές ποταμών, στο Αιγαίο παίζει τον κύριο ρόλο η εισροή νερών της Μαύρης Θάλασσας. Ένας επιπλέον σύνδεσμος μεταξύ της ανάμειξης και των νερών της Μαύρης Θάλασσας στο Αιγαίο είναι ότι η έναρξη της περιόδου τάσης αύξησης της επιφάνειας ισχυρής ανάμειξης συμπίπτει με την περίοδο μέγιστης εισροής νερών από τα Δαρδανέλλια σύμφωνα με την παραμετροποίηση των οριακών συνθηκών του μοντέλου.

## 0.5 Λαγκραντζιανή Στατιστική και σχέση με τη Δυναμική

Πέραν της εποχικής μεταβλητότητας που παρουσιάζει η ανάμειξη στη Μεσόγειο και το πώς οι λαγκραντζιανές δομές της ροής την επιρραάζουν, θέλουμε να μελετήσουμε και τη δυναμική δημιουργεί αυτές τις δομές και ενισχύει ή αποδυναμώνει την ανάμειξη, καθώς και τη μεταβλητότητα που παρουσιάζει στην ίδια ετήσια βάση. Γι' αυτό πραγματοποιούμε μια δεύτερη σειρά πειραμάτων με εικονικούς drifters. Αυτή τη φορά όμως αντί να εστιάζουμε την συμπεριφορά ξεχωριστών ζευγαριών drifters, κοιτάμε την συνολική, στατιστική συμπεριφορά του συνόλου των ποντισμένων drifters σε κάθε υπολεκάνη της Μεσογείου.

### 0.5.1 Σχετική διασπορά και σχέση με το ενεργειακό φάσμα

Στις γεωφυσικές ροές, τόσο στον ωκεανό όσο και στην ατμόσφαιρα, η παρουσία της περιστροφής, της στρωμάτωσης και της τύρβης παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της γενικής κυκλοφορίας. Στις μεγάλες κλίμακες, ο συνδυασμός της δράσης της περιστροφής και της στρωμάτωσης περιορίζουν σημαντικά τις κατακόρυφες κινήσεις, με αποτέλεσμα η ροή να παίρνει δισδιάστατο χαρακτήρα, με κάθε κατακόρυφο επίπεδο να συμπεριφέρεται ανεξάρτητα από τα άλλα. Αντίθετα στις μικρές κλίμακες η ροή τείνει να συμπεριφέρεται περισσότερο τρισδιάστατα. Η επίδραση της τύρβης εξαρτάται από αυτόν το διαστατικό χαρακτήρα της ροής, με εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στη δισδιάστατη ροή απ' ό,τι στην τρισδιάστατη.

Στις τρισδιάστατες ροές, η παρουσία τύρβης αφαιρεί ενέργεια από τις μεγάλες κλίμακες και τη μεταφέρει στις μικρότερες, έως ότου οι κλίμακες γίνουν αρκετά μικρές ώστε η επίδραση της μοριακής τριβής να γίνει συγκρίσιμη με αυτή της τύρβης και μέσω αυτού του μηχανισμού ενέργεια βγαίνει απ' το σύστημα. Αυτή η αποδόμηση ενέργειας αποτυπώνεται στη μορφή του ενεργειακού φάσματος της ροής, η κλίση του οποίου περιγράφεται από τη σχέση: [32, 33]

$$E(k) \sim k^{-5/3}$$

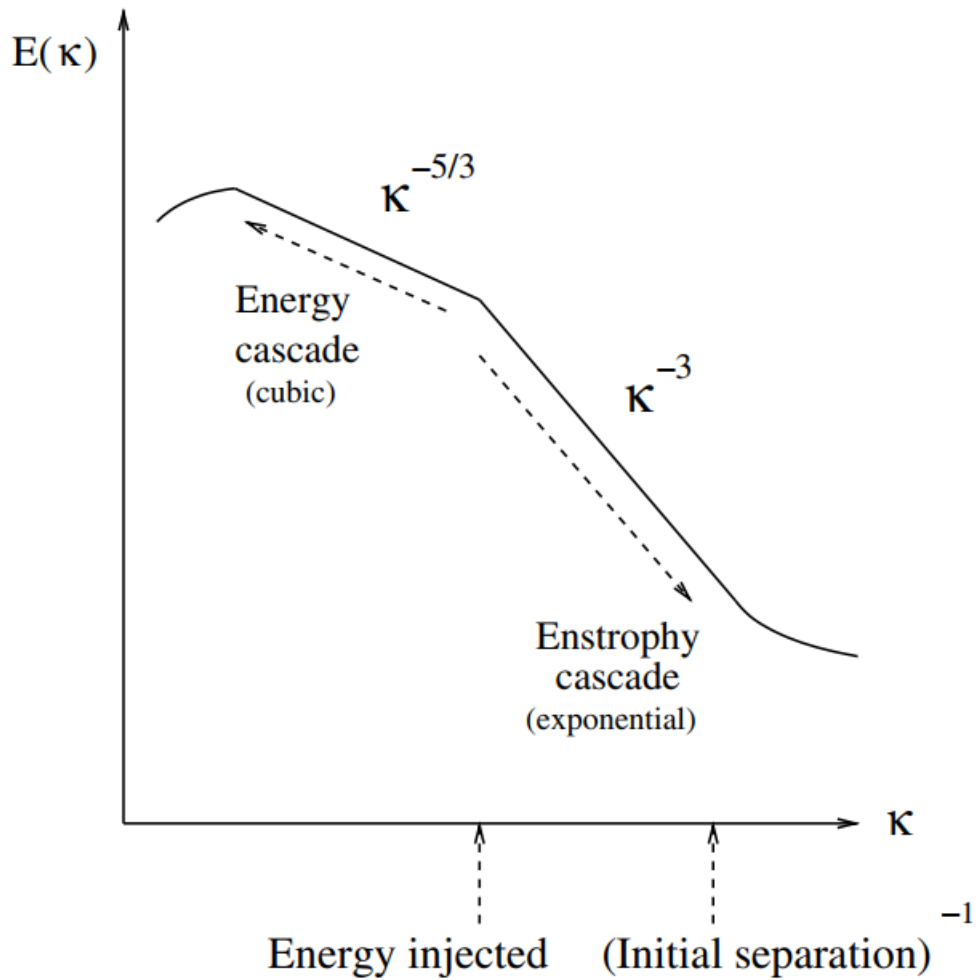
Έτσι η ενέργεια που εισέρχεται στο σύστημα σε μια κλίμακα  $L_0$  που αντιστοιχεί σε ένα κυματαριθμό  $K_0$  μεταφέρεται συνεχώς σε μεγαλύτερους κυματαριθμούς  $K_i$  ή ισοδύναμα σε μικρότερες κλίμακες  $L_i$ .

Στις δισδιάστατες ροές η διατήρηση του στροβιλισμού επιβάλλει, εκτός από την κινητική ενέργεια, να διατηρείται και ο μέσος τετραγωνικός στροβιλισμός που συνήθως αναφέρεται ως ενστροφία (enstrophy). Αυτό καθιστά αδύνατη τη μονομερή μεταφορά ενέργειας από τις μεγάλες κλίμακες στις μικρές. Αντίθετα, η ενέργεια μεταφέρεται προς στις μεγαλύτερες κλίμακες, ενώ η ενστροφία μεταφέρεται προς τις μικρότερες. Αντίστοιχα, η μορφή του ενεργειακού φάσματος παρουσιάζει δύο διαφορετικές περιοχές με χαρακτηριστική κλίση η κάθε μία: [?, 34, 35]

$$E_1(k) \sim k^{-5/3}$$

$$E_2(k) \sim k^{-3}$$

Όπου  $E_1(k)$  η περιοχή των μικρών κυματαριθμών, προς τους οποίους μεταφέρεται η ενέργεια και  $E_2(k)$  η περιοχή των μεγάλων κυματαριθμών, προς τους οποίους μεταφέρεται η ενστροφία. Η χαρακτηριστική κλίμακα που διαχωρίζει τις δύο διαφορετικές περιοχές του φάσματος είναι η χωρική κλίμακα στην οποία λαμβάνει χώρα, κατά κύριο λόγο, η είσοδος ενέργειας στο σύστημα.



Σχήμα 0.5.1: Μορφή ενεργειακού φάσματος για ροή με τύρβη που συμπεριφέρεται δισδιάστατα

Η μορφή του ενεργειακού φάσματος παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της δυναμικής της ροής και κατ' επέκταση στις διαδικασίες μεταφοράς και ανάμειξης που θα λάβουν χώρα λόγω της κυκλοφορίας. Οι διαφορετικές δυναμικές που θα αναπτυχθούν σε κάθε μια από τις χωρικές κλίμακες στις οποίες αντιστοιχούν οι διαφορετικές περιοχές του ενεργειακού φάσματος θα έχουν διαφορετική επίδραση στην κίνηση και εξάπλωση σωματιδίων (tracers) από τη ροή. Συνεπώς μπορούμε να ελέγξουμε το κατά πόσο η παραπάνω εικόνα για το ενεργειακό φάσμα ανταποκρίνεται στις διαδικασίες διασποράς και ανάμειξης στον πραγματικό, τυρβώδη ωκεανό.

Δεδομένου ότι αυτή η μελέτη γίνεται με χρήση εικονικών drifters που είναι περιορισμένοι στο επιφανειακό πεδίο ταχυτήτων του μοντέλου μας, εστιάζουμε στην περίπτωση της δυδιάστατης τυρβώδους ροής. Αυτή η επιλογή δεν είναι αποτέλεσμα του περιορισμού της ροής σε δύο διαστάσεις, καθώς η απόσταση μεταξύ δύο drifters που μεταφέρονται από τη ροή θα φτάσει τις κλίμακες στις οποίες επικρατεί η δισδιάστατη τυρβώδη ροή για τυπικούς χρόνους διεξαγωγής ενός τέτοιου πειράματος, πέραν εξαιρετικών περιπτώσεων.

Έστω ότι ποντίζουμε ένα ζεύγος drifters σε κάποιο σημείο στον ωκεανό. Τότε για μια δισδιάστατη τυρβώδη ροή διαφορετικοί μηχανισμοί θα ευθύνονται για τη διασπορά του ζεύγους σε διαφορετικές χωρικές κλίμακες, ανάλογα με τη μορφή του ενεργειακού φάσματος. Διακρίνονται τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις για το πώς μεταβάλλεται η μέση τετραγωνική απόσταση ζευγαριών drifters, αναφερόμενη παρακάτω ως σχετική διασπορά, συναρτήσει του χρόνου:

[37] Όταν η σχετική απόσταση των δύο drifters είναι πολύ μικρή, τότε η διαφορά των ταχυτήτων τους είναι κατά προσέγγιση σταθερή και η διασπορά του ζεύγους των drifters αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο. Δυναμικά, αυτή η κατάσταση αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα όπου η κίνηση των drifters γίνεται σε τόσο μικρή κλίμακα που δεν

έχουν "αισθανθεί" ακόμα την επίδραση της γενικής κυκλοφορίας, η οποία θα διαφοροποιήσει την κίνηση τους.

Όταν η σχετική απόσταση των δύο drifters είναι πολύ μεγάλη, τότε και πάλι η διασπορά αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο. Δυναμικά ωστόσο, αυτή η περίπτωση είναι πολύ διαφορετική από την παραπάνω. Όταν η σχετική απόσταση μεταξύ του ζεύγους των drifters γίνει μεγαλύτερη από την χωρική κλίμακα των μεγαλύτερων δομών που δημιουργεί η γενική κυκλοφορία, τότε οι ταχύτητες των δύο drifters είναι πλέον ασυσχέτιστες και η κίνησή τους είναι ουσιαστικά τυχαία. Ο μηχανισμός που καθορίζει την κίνησή των drifters σε αυτές τις κλίμακες είναι η διάχυση.

Στις ενδιάμεσες κλίμακες η συμπεριφορά της διασποράς εξαρτάται από τη μορφή του ενεργειακού φάσματος. Θεωρώντας ότι η εξάρτηση της ενέργειας από τον κυματαριθμό είναι νόμος δύναμης της μορφής:

$$E(k) \sim k^{-a}$$

Τότε για τιμές του εκθέτη  $a$  στο διάστημα  $(1, 3)$ , η διασπορά των δύο drifters αυξάνεται με το χρόνο ως νόμος δύναμης σύμφωνα με τη σχέση:

$$\overline{y^2} \sim t^3$$

Αυτού του τύπου η συμπεριφορά ονομάζεται τοπική διασπορά (local dispersion) και παρατηρήθηκε πειραματικά για πρώτη φορά από τον Richardson. Δυναμικά, η τοπική διασπορά σημαίνει ότι η σχετική κίνηση των δύο drifters κυριαρχείται από δομές της κυκλοφορίας, η κλίμακα των οποίων είναι συγκρίσιμη με την σχετική απόσταση των δύο drifters. Αυτού του τύπου η εξάρτηση προβλέπεται ότι προκύπτει από το ενεργειακό φάσμα δισδιάστατης τυρβώδους ροής για χωρικές κλίμακες μεγαλύτερες της κλίμακας εισαγωγής ενέργειας στο σύστημα (φάσμα  $E_1$  παραπάνω). Σε ένα εύρος χωρικών κλιμάκων όπου παρατηρείται τοπική διασπορά η κλίση του ενεργειακού φάσματος είναι σχετικά μικρή και, κατα συνέπεια, η ενέργεια που εισέρχεται στο σύστημα κατανέμεται επαρκώς (αλλά όχι ομοιόμορφα) σε όλο το φάσμα των κυματαριθμών που αντιστοιχούν στις εν λόγω χωρικές κλίμακες όπου λαμβάνει χώρα τοπική διασπορά. Έτσι υπάρχει αρκετή ενέργεια σε κάθε χωρική κλίμακα της κυκλοφορίας ώστε να δημιουργηθούν δομές. Αυτή είναι η εικόνα για το τμήμα των μεγάλων κλιμάκων στη δισδιάστατη τυρβώδη ροή: Ενέργεια εισέρχεται στο σύστημα σε κάποια κλίμακα  $L_0$  και μεταφέρεται στις μεγαλύτερες κλίμακες, όπου και συγκεντρώνεται έως ότου βγει από το σύστημα μέσω κάποιου άλλου μηχανισμού. [35, 38]

Αντίθετα, εάν ο εκθέτης  $a$  παίρνει τιμές μεγαλύτερες του τρία, τότε η διασπορά των δύο drifters αυξάνεται με το χρόνο εκθετικά, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\overline{y^2} \sim e^t$$

Αυτού του τύπου η συμπεριφορά ονομάζεται μη τοπική διασπορά (non-local dispersion). Μη τοπική εδώ σημαίνει ότι δυναμικά η σχετική κίνηση των δύο drifters κυριαρχείται από δομές της κυκλοφορίας μεγαλύτερης χωρικής κλίμακας από τη απόσταση μεταξύ των drifters. Αυτή η συμπεριφορά παρατηρείται στις δυσδιάστατες τυρβώδεις ροές, στις χωρικές κλίμακες μικρότερες από την κλίμακα εισαγωγής ενέργειας στο σύστημα (φάσμα  $E_2$  παραπάνω). Σε αυτή την περίπτωση, το ενεργειακό φάσμα παρουσιάζει μεγάλη κλίση, με αποτέλεσμα η ενέργεια να είναι συσσωρευμένη στους μικρότερους κυματαριθμούς, με πολύ λίγη συγκριτικά ενέργεια κατανεμημένη στους μεγαλύτερους, με αποτέλεσμα η κυκλοφορία να κυριαρχείται από τις δομές με τη μεγαλύτερη χωρική έκταση. Αντίστοιχα με την τοπική διασπορά, στην δισδιάστατη τυρβώδη ροή ενέργεια εισέρχεται στο σύστημα σε μια κλίμακα  $L_0$  και μεταφέρεται στις μικρότερες κλίμακες (η ενστροφία έχει μονάδες  $m^2/s^2$ , άρα η ποσότητα μάζα επί ενστροφία έχει μονάδες ενέργειας), όπου και αποδομείται από τη μοριακή τριβή. Αλλά το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας παραμένει στους κυματαριθμούς κοντά στην κλίμακα εισόδου ενέργειας στο σύστημα και αυτοί θα καθορίζουν τη δυναμική στη ροή στις μικρότερες κλίμακες. [34, 35, 39]

Η εκθετική αύξηση της σχετικής απόστασης των drifters υποδηλώνει τη ύπαρξη δυναμικού χάους στο σύστημα. Δεν υπάρχει γενικά αποδεκτός ορισμός του δυναμικού χάους, ωστόσο τα συστήματα που περιγράφονται ως χαοτικά έχουν ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά. Ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η ευαίσθητη εξάρτηση της χρονικής εξέλιξης του συστήματος από τις αρχικές του συνθήκες. Αυτή ακριβώς η ευαισθησία αποτυπώνεται στον εκθετικό ρυθμό απομάκρυνσης των drifters που βρίσκονταν αρχικά σε κοντινή απόσταση. Αυτή την εκθετική απομάκρυνση των drifters με γειτονικές αρχικές θέσεις παρατηρούμε και στο πρώτο μέρος αυτής της μελέτης στις περιοχές μέγιστου finite strain. [20, 40]

Έτσι ένα ζευγάρι από drifters που αρχικά βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους σε μια δισδιάστατη τυρβώδη ροή θα περάσουν σταδιακά από όλες τις παραπάνω δυναμικές καταστάσεις καθώς οι θέσεις τους εξελίσσονται χρονικά: Από γραμμική αρχικά χρονοεξάρτηση, σε εκθετική, σε νόμο δύναμης και τελικά πάλι σε γραμμική. Συνεπώς η χρονική εξέλιξη της διασποράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως διαγνωστικό μέγεθος για τη δυναμική της ροής και των κλιμάκων της κυκλοφορίας, εφόσον η ροή είναι κατα προσέγγιση δυδιάστατη και τυρβώδης. Ωστόσο η διασπορά ως διαγνωστικό μέγεθος έχει δύο μειονεκτήματα:

Παρότι με βάση τα παραπάνω μπορούμε να συνδέσουμε τη χρονική εξέλιξη της διασποράς ζευγαριών drifters με τη γενική μορφή του ενεργειακού φάσματος της κυκλοφορίας, δεν μπορούμε να ταυτοποιήσουμε την ακριβή μορφή του συγκεκριμένου φάσματος που αντιστοιχεί σε αυτή την κυκλοφορία. Αυτή η αδυναμία οφείλεται στο

γεγονός ότι διαφορετικές τιμές του εκθέτη  $a$  που περιγράφει την κλίση του ενεργειακού φάσματος οδηγούν στην ίδια συμπεριφορά της διασποράς των ζευγαριών drifters.

Επίσης, η παραπάνω εικόνα που προκύπτει από τη θεωρία των δισδιάστατων ροών παρουσία τύρβης περιπλέκεται από την παρουσία ισχυρής διάτμησης στη ροή. Σε μια απλή ροή, η οποία παρουσιάζει μόνο σταθερή διάτμηση, η χρονική εξάρτηση της διασποράς ενός ζεύγους drifters είναι νόμος δύναμης της μορφής:

$$\overline{y^2} \sim t^2$$

Αυτού του τύπου η διασπορά ονομάζεται βαλλιστική διασπορά. Εάν σε μια απλή ροή, όπου η μεταφορά των drifters καθορίζεται από τη διάχυση, προσθέσουμε επιπλέον και διάτμηση, τότε η διασπορά ενός ζεύγους θα αυξάνει χρονικά ως:

$$\overline{y^2} \sim t^3$$

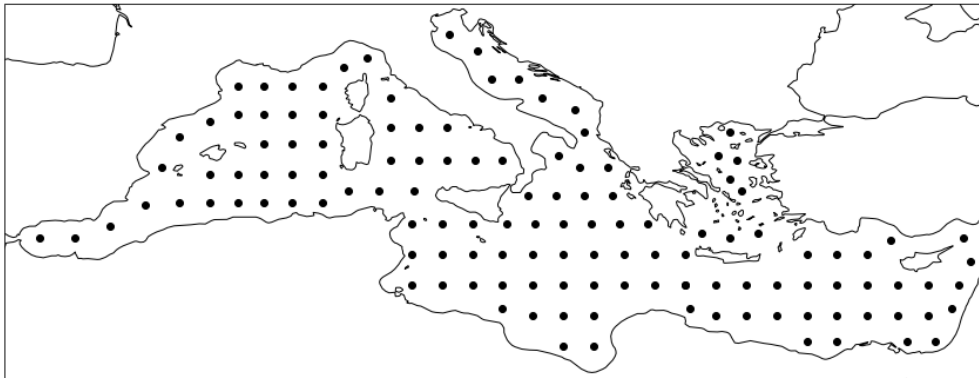
Που είναι η ίδια παρατηρούμενη συμπεριφορά με την τοπική διασπορά. Αντίστοιχα, η ύπαρξη ισχυρής διάτμησης σε μια τυρβώδη δυδιάστατη ροή ενδέχεται να αλλοιώσει την παραπάνω εικόνα. Συνεπώς, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της διασποράς απαιτεί προσοχή, ειδικά σε περιοχές που η υπο μελέτη ροή παρουσιάζει ισχυρή διάτμηση.

[41]

## 0.5.2 Μεθοδολογία και Παράμετροι Πειράματος

Για να μελετήσουμε τη δυναμική της γενικής κυκλοφορίας της Μεσογείου στις διάφορες χωρικές κλίμακες, την εποχική μεταβλητότητα που παρουσιάζει αυτή η δυναμική και την συμπεριφορά της στις διαφορετικές υπολεκάνες της Μεσογείου, πραγματοποιούμε μια δεύτερη σειρά πειραμάτων με εικονικούς drifters.

Αντίθετα με την προηγούμενη σειρά πειραμάτων, δεν ποντίζουμε drifters σε όλη την επιφάνεια της Μεσογείου με την ίδια πυκνότητα. Παρότι έχουμε αυτή τη δυνατότητα βάσει των διαθέσιμων υπολογιστικών πόρων, επιλέγουμε μία πιο αραιή κατανομή ώστε να προσεγγίζει την κατανομή που θα είχαμε αν ποντίζαμε πραγματικούς drifters. Όπως και στην προηγούμενη σειρά πειραμάτων, μελετάμε κάθε μια από τις κύριες υπολεκάνες της Μεσογείου ξεχωριστά. Οι drifters αφήνονται να κινηθούν ελεύθερα σε όλη τη Μεσόγειο, αλλά για τα στατιστική μελέτη κάθε υπολεκάνης χρησιμοποιούμε μόνο τα αποτελέσματα των drifters που ποντίστηκαν στην αντίστοιχη υπολεκάνη.



Σχήμα 0.5.2: Κατανομή θέσεων στις οποίες ποντίζουμε drifters σε όλη τη Μεσόγειο.

Στο Αιγαίο και στην Αδριατική η κατανομή είναι ικανοποιητικά κοντά σε μια αντίστοιχη πειραματική. Η Λεβαντίνη, το Ιόνιο και η δυτική Μεσόγειος έχουν πολύ μεγάλη έκταση για να έχουμε ικανοποιητική ομοιότητα μεταξύ των κατανομών, εκτός από περιοχές όπως το Τυρινικό πέλαγος και τη θάλασσα του Αλμπόραν. Αντ' αυτού στις εκτεταμένες ανοιχτές περιοχές αυτών των λεκανών επιλέγουμε μια ομοιόμορφη κατανομή με απόσταση μεταξύ σημείων πόντισης περίπου 1.3 μίρες.

Η ομοιομορφία της κατανομής των σημείων πόντισης σε αυτή την περίπτωση επιλέχθηκε ώστε να έχουμε αμερόληπτη δειγματοληψία της ροής σε κάθε λεκάνη. Ανισοτροπική κατανομή των drifters οδηγεί σε μια "τεχνητή" μεταφορά drifters από περιοχές με μεγάλη πυκνότητα σε περιοχές με μικρή, το οποίο αλλοιώνει τη στατιστική. Στις μικρές υπολεκάνες η "πειραματική" κατανομή προσφέρει επαρκή και ομοιόμορφη κάλυψη της επιφάνειας, αλλά στις μεγάλες η χρήση της ομοιόμορφης κατανομής είναι απαραίτητη για να μας εξασφαλίσει αμερόληπτη στατιστική. [42]

Ταυτόχρονα, για να έχουμε καλή στατιστική χρειαζόμαστε ένα μεγάλο αριθμό ζευγαριών drifters, μεγαλύτερο από αυτόν που θα ποντίζονταν σε ένα πραγματικό πείραμα. Για να συμβιβάσουμε την προσεγγιστικά "πειραματική" κατανομή των σημείων πόντισης με επαρκή αριθμό ζευγαριών drifters ποντίζουμε σαρανταπέντε drifters ανα σημείο. Η διάταξη πόντισης είναι όμοια με αυτή της προηγούμενης σειράς πειραμάτων: ένας drifter στο κέντρο και τέσσερις μετατοπισμένοι κατά 0.0045 μίρες στις τέσσερις ορθοκανονικές διευθύνσεις, με εννιά τέτοιες διατάξεις ανα σημείο πόντισης. Αυτό μας δίνει συνολικά τριαντάξι ζευγάρια drifters ανα σημείο πόντισης. Αυτή η διάταξη έχει χρησιμοποιηθεί και σε άλλα αντίστοιχα πειράματα με εικονικούς drifters (π.χ. από τους Haza et al 2008).

[43] Τα ζευγάρια των drifters χρειάζεται να εξελιχθούν χρονικά για αρκετό χρόνο, ώστε η σχετική τους απόσταση να πάρει αρκετά μεγάλες τιμές για να έχουμε δειγματοληψία όλων των διαφορετικών χωρικών κλιμάκων της ροής. Γι' αυτό αφήνουμε τους drifters να μεταφερθούν από τη ροή για τρεις μήνες. Δεδομένου ότι θέλουμε να δούμε την επίδραση της εποχικής μεταβλητότητας στις διάφορες δυναμικές κλίμακες της ροής πραγματοποιούμε τέσσερα τέτοια πειράματα. Χωρίζοντας το κλιματολογικό έτος σε τέσσερα τρίμηνα, με το καθένα από αυτά να αντιστοιχεί σε μια από τις εποχές του έτους:

*Χειμώνας:* Ιανουάριος - Φεβρουάριος - Μάρτιος

*Άνοιξη:* Απρίλιος - Μάιος - Ιούνιος

*Καλοκαίρι:* Ιούλιος - Αύγουστος - Σεπτέμβριος

*Φθινόπωρο:* Οκτώβριος - Νοέμβριος - Δεκέμβριος

Επιπλέον θέλουμε η σχετική απόσταση των ζευγαριών να παίρνει τιμές σε όλο το φάσμα των χωρικών κλιμάκων της ροής, ώστε να απεικονίζονται στη στατιστική μας όλες οι διαφορετικές δυναμικές της ροής που διαμορφώνουν την κυκλοφορία στις διαφορετικές κλίμακες. Σε αυτό συμβάλουν τόσο η χρονική διάρκεια των πειραμάτων, όσο και η μικρή αρχική απόσταση των ζευγαριών.

Όπως και με την προηγούμενη σειρά πειραμάτων, χρησιμοποιούμε το λογισμικό πακέτο Parcels για να ολοκληρώσουμε τις εξισώσεις κίνησης των drifters και να κατασκευάσουμε τις τροχιές τους για τους τρεις μήνες που μεταφέρονται από τη ροή. Οι εξισώσεις ολοκληρώνονται με χρονικό βήμα δέκα λεπτών, ώστε να πάρουμε μια ακριβή εικόνα της τροχιάς. Οι θέσεις των drifters καταγράφονται κάθε ώρα.

Ως στατιστικό μέγεθος για τη χαρτογράφηση της δυναμικής της ροής στις διαφορετικές χωρικές κλίμακες χρησιμοποιούμε τη σχετική διασπορά των ζευγαριών drifters όπως αναφέρθηκε παραπάνω:

$$\bar{D}^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2$$

Όπου  $x$  και  $y$  τα γεωγραφικά μήκη και πλάτη των drifters 1 και 2 αντίστοιχα. Η σχετική διασπορά του κάθε ζεύγους υπολογίζεται σε ωριαία βάση, για κάθε καταγραφή της θέσης των drifters. Ο μέσος όρος λαμβάνεται πάνω στο σύνολο των ζευγαριών των drifters που ποντίστηκαν σε κάθε μια από τις πέντε υπολεκάνες της Μεσογείου. Παίρνουμε το μέσο όρο γιατί οι παραπάνω συμπεριφορές παρατηρούνται στατιστικά από μια συλλογή (ensemble) ζευγαριών σωματιδίων κι όχι απαραίτητα από κάθε ένα ζεύγος.

Αυτή όμως η λήψη μέσου όρου πολλών ζευγαριών μπορεί να δημιουργήσει και προβλήματα. Επειδή στον υπολογισμό της σχετικής διασποράς παίρνουμε το μέσο όρο όλων των τετραγώνων των αποστάσεων κάθε ζεύγους σε μια χρονική στιγμή  $t$  μέσα σε μια περιοχή, αναγκαστικά συμπεριλαμβάνονται ζεύγη drifters τα οποία μπορεί να έχουν πολύ διαφορετικές αποστάσεις και αυτό ενδέχεται να επιρρεάζει το μέσο όρο, δίνοντας παραπλανητικά αποτελέσματα. Αυτό το πρόβλημα είναι πιο έντονο όταν η ροή κυριαρχείται από τοπική διασπορά. Ένα δεύτερο πρόβλημα που μπορεί να επιρρεάσει τη σχετική διασπορά ως στατιστικό μέγεθος-δείκτη της δυναμικής είναι η χωρική ευκρίνεια στην οποία είναι διαθέσιμο το πεδίο ταχυτήτων. Σε αυτή τη μελέτη, η μεγάλη χωρική διακριτική ικανότητα του μοντέλου από το οποίο λαμβανουμε το πεδίο ταχυτήτων ( $1/36$  της μίρας) λειτουργεί για να μετριάσει πιθανά τέτοια σφάλματα. [42]

Για να αντιμετωπίσουμε τις παραπάνω δυσκολίες και να πάρουμε μια πιο αντιπροσωπευτική εικόνα της δυναμικής της κυκλοφορίας σε κάθε υπολεκάνη της Μεσογείου χρησιμοποιούμε και ένα δεύτερο στατιστικό μέγεθος: Τον εκθέτη Lyapunov πεπερασμένης κλίμακας (Finite Scale Lyapunov Exponent), ο οποίος αναφέρεται παρακάτω με τα αρχικά του: FSLE. Ο FSLE είναι ένα στατιστικό μέτρο παρόμοιο με τη σχετική διασπορά, αλλά με αντιστροφή της εξαρτημένης και της ανεξάρτητης μεταβλητής: Στη σχετική διασπορά το ρόλο της ανεξάρτητης μεταβλητής τον παίζει ο χρόνος και της εξαρτημένης το τετράγωνο της σχετικής απόστασης, ενώ με τον FSLE ο χώρος είναι η ανε-

ξάρτητη μεταβλητή και ο χρόνος η εξαρτημένη. Ο FSLE που αναφέρουμε εδώ σχετίζεται με αυτόν που αναφέραμε στην πρώτη σειρά πειραμάτων. Και οι δύο αντιπροσωπεύουν ένα ρυθμό απομάκρυνσης των drifters ενός ζεύγους. Ο ορισμός που χρησιμοποιούμε εδώ είναι διαφορετικός από αυτόν της πρώτης σειράς πειραμάτων και εισήχθηκε πρώτα από τους Artale et al και Aurell et al:

[47, 48] Παίρνουμε μια αρχική απόσταση  $d_0$ , η οποία αυξάνεται γεωμετρικά κατά ένα παράγοντα  $a$ .

$$d_n = d_{n-1} * a = d_{n-2} * a^2 = \dots = d_0 * a^n$$

Αυτό μας δίνει μια αλληλουχία από χωρικά διαστήματα  $(d_0, d_1), (d_1, d_2), \dots, (d_{n-1}, d_n)$ . Για κάθε ζεύγος drifters, μετράμε τον χρόνο  $t_n$  που χρειάζεται για να μεταβεί από το ένα εύρος σχετικών αποστάσεων στο επόμενο. Ο FSLE τότε ορίζεται ως:

$$\lambda_n = \frac{\ln\left(\frac{d_n}{d_{n-1}}\right)}{t_n} = \frac{\ln(a)}{t_n}$$

Στη συνέχεια παίρνουμε το μέσο όρο του δεξιού σκέλους πάνω στο σύνολο όλων των ζευγαριών drifters σε μια περιοχή:

$$\lambda_n = \left\langle \frac{\ln(a)}{t_n} \right\rangle$$

Αυτός ο υπολογισμός επαναλαμβάνεται για κάθε χωρικό εύρος  $(d_0, d_1), (d_1, d_2), \dots, (d_{n-1}, d_n)$ . Κατ' αυτόν τον τρόπο ο FSLE, που έχει μονάδες αντίστροφου χρόνου, περιγράφει το μέσο ρυθμό αύξησης της σχετικής απόστασης μεταξύ ζευγαριών drifters. Έπειτα παίρνουμε το μέσο όρο όλων των εκθετών για κάθε χωρικό εύρος  $(d_{n-1}, d_n)$  για να πάρουμε τον FSLE γι' αυτό το εύρος.

Όπως και η χρονική εξέλιξη της σχετικής διασποράς, η μεταβολή του FSLE με την απόσταση συνδέεται με τις διαφορετικές δυναμικές περιοχές της κυκλοφορίας. Σταθερή τιμή του FSLE με την απόσταση υποδηλώνει εκθετική αύξηση της απόστασης των ζευγαριών drifters και, συνεπώς μη-τοπική διασπορά. Αντίστοιχα, μεταβολή του FSLE ως νόμος δύναμης:

$$\lambda_n \sim d^{-k}$$

Και η σχετική διασπορά μεταβάλλεται με το χρόνο ως νόμος δύναμης:

$$d^2 \sim t^a$$

Τότε μπορούμε να συνδέσουμε τους δύο εκθέτες με την παρακάτω σχέση:

$$[42] \quad k = 2/a$$

Σε αντίθεση με τη σχετική διασπορά, ο FSLE δεν επηρεάζεται από τις πιθανές μεγάλες διαφορές των σχετικών αποστάσεων των ζευγαριών drifters, αλλά επηρεάζεται από τη χρονική ευκρίνεια με την οποία είναι διαθέσιμες οι θέσεις των drifters κατά τη διάρκεια του πειράματος. Εάν μεσολαβεί μεγάλο χρονικό διάστημα μεταξύ των καταγραφών των θέσεων, ενδέχεται η απόσταση ενός ζεύγους να αυξηθεί περισσότερο από ένα χωρικό εύρος  $(d_{n-1}, d_n)$ , με αποτέλεσμα να αποτυπώνεται λανθασμένα ο ρυθμός αύξησης της απόστασης του ζεύγους. Αυτή ευαισθησία στη χρονική ευκρίνεια των δεδομένων επηρεάζει κυρίως τις μικρές χωρικές κλίμακες, όπου τα διαφορετικά χωρικά εύρη  $(d_{n-1}, d_n)$  είναι μικρά. Στις μεγάλες κλίμακες, όπου το εύρος των χωρίων είναι μεγάλο λόγω της γεωμετρικής αύξησης, ο FSLE δεν επηρεάζεται από τη χρονική ευκρίνεια των δεδομένων. [42, 49]

Η σχετική διασπορά από την άλλη, επειδή υπολογίζεται για κάθε χρονική στιγμή στην οποία είναι διαθέσιμες οι θέσεις των drifters, δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη χρονική ευκρίνεια των δεδομένων ακόμα και στους αρχικούς χρόνους της εξέλιξης της θέσης των drifters. Συνδυάζοντας λοιπόν τις εικόνες που προκύπτουν από τα δύο αυτά στατιστικά μεγέθη μπορούμε να πάρουμε μια καλή απεικόνιση της δυναμικής της κυκλοφορίας σε όλες τις εξεταζόμενες χωρικές και χρονικές κλίμακες. [42]

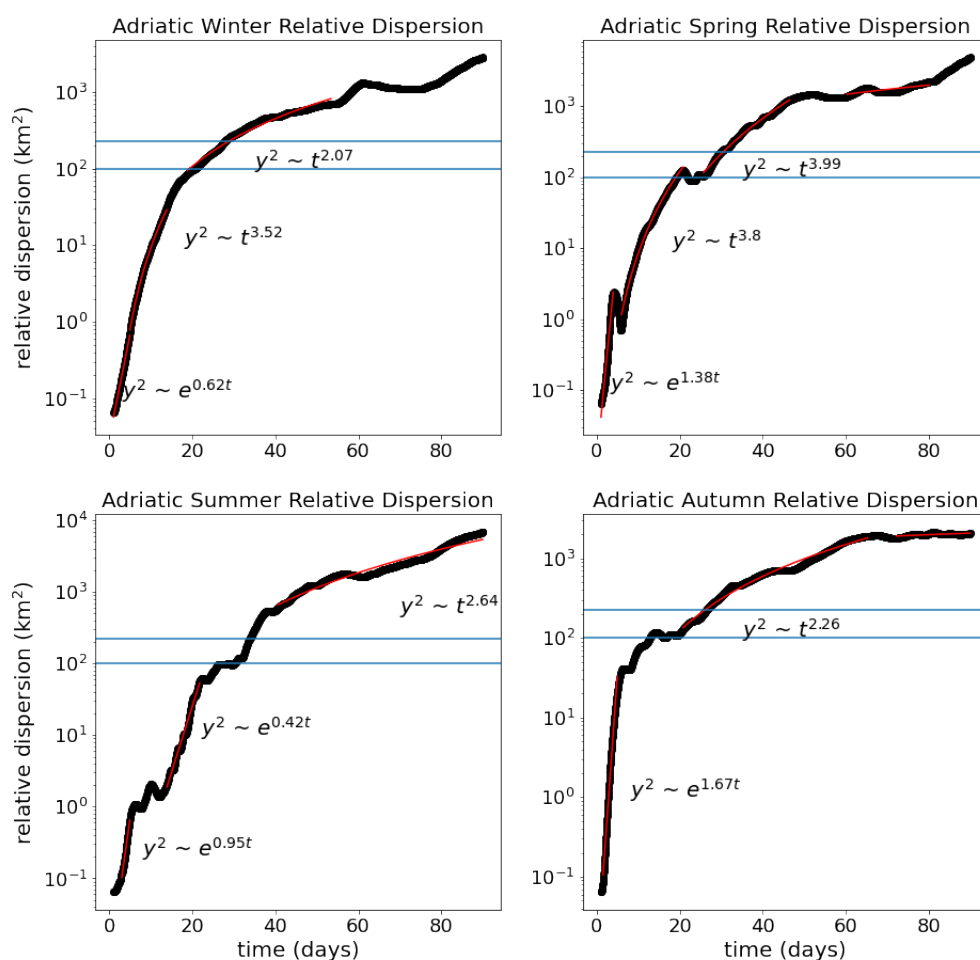
Ο FSLE εξαρτάται από την τιμή της παραμέτρου  $a$ , η οποία καθορίζει το πόσα χωρικά εύρη  $(d_{n-1}, d_n)$  παίρνουμε και συνεπώς τον αριθμό των διαθέσιμων τιμών του FSLE ανά διάγραμμα. Θέλουμε όσο το δυνατόν περισσότερες τιμές του FSLE ανά διάγραμμα για να πάρουμε μια καλύτερη εικόνα της δυναμικής, όμως η χρονική ευκρίνεια στην οποία είναι διαθέσιμες οι θέσεις των drifters και η σχετική ταχύτητα των ζευγαριών drifters λειτούργουν για θέσουν ένα κάτω όριο στην τιμή της παραμέτρου  $a$ . Για τιμές μικρότερες αυτού του ορίου οι drifters του ζεύγους θα απομακρύνονται ταχύτερα απ' ό,τι αυξάνει η απόσταση  $d_n$ , με αποτέλεσμα η τιμή του FSLE να παραμένει σταθερή για μικρές κλίμακες, δίνοντας έτσι ψευδές σήμα εκθετικής αύξησης της σχετικής απόστασης. Με βάση τις τιμές του πεδίου ταχυτήτων και τη χρονική ευκρίνεια των δεδομένων μας, επιλέγουμε την τιμή της παραμέτρου  $a = 1.3$  για αυτή τη σειρά πειραμάτων. [42, 43]

### 0.5.3 Αποτελέσματα και Συζήτηση

Για να συνδέσουμε τη σχετική διασπορά και τον FSLE με τις διαφορετικές δυναμικές περιοχές της κυκλοφορίας και τη μορφή του ενεργειακού φάσματος εργαζόμαστε ως εξής: Σχεδιάζουμε τις γραφικές παραστάσεις της σχε-

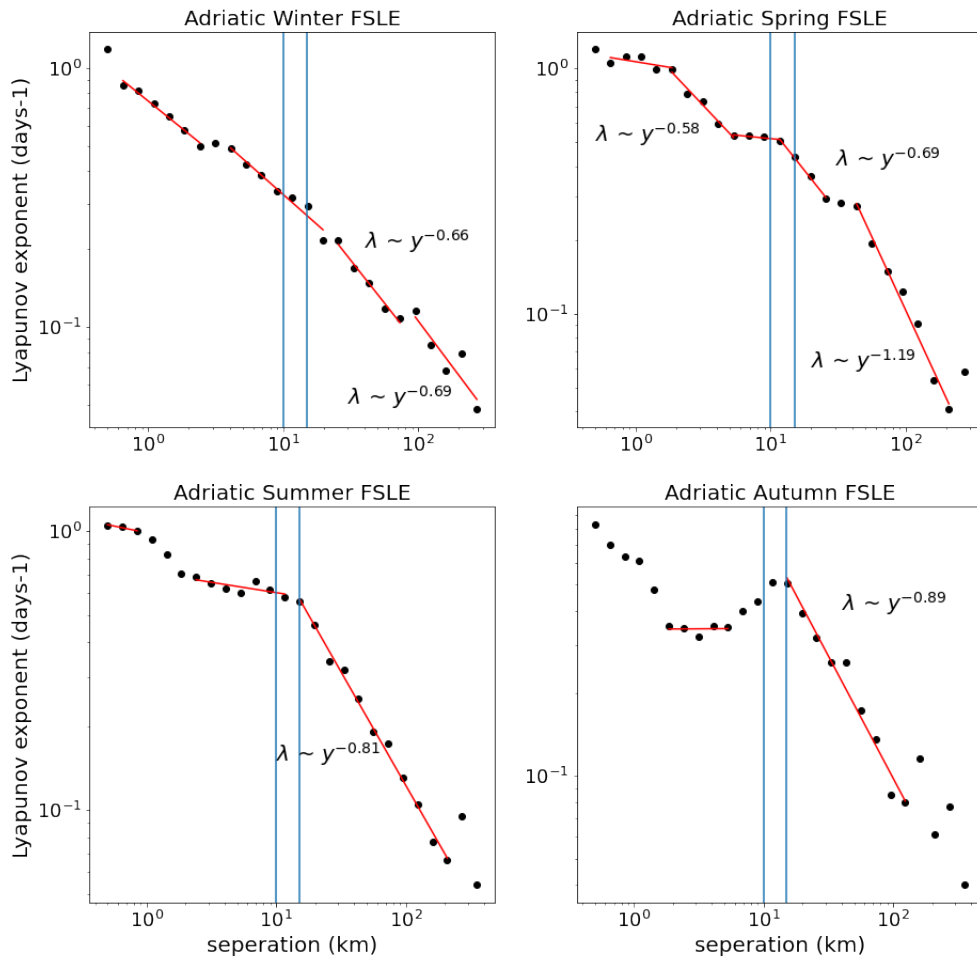
τικής διασποράς των ζευγαριών drifters με το χρόνο και του FSLE με τη σχετική απόσταση. Δεδομένου ότι αναμένουμε εκθετικές μεταβολές και μεταβολές ως νόμους δύναμης χρησιμοποιούμε λογαριθμικές και ημιλογαριθμικές κλίμακες.

Αφού σχεδιάσουμε τις γραφικές παραστάσεις στις κατάλληλες κλίμακες, βρίσκουμε τα τμήματα των γραφικών παραστάσεων που είναι κατά προσέγγιση γραμμικά και προσαρμόζουμε σε αυτά ευθείες. Από την κλίση αυτών των ευθειών παίρνουμε τους αντίστοιχους εκθέτες σε κάθε περίπτωση. Παρακάτω παραθέτουμε τις γραφικές παραστάσεις της σχετικής διασποράς και του FSLE σε κάθε μια από τις υπολεκάνες της Μεσογείου, αφού έχουμε προσαρμόσει σε κάθε μια από αυτές τις αντίστοιχες εκθετικές καμπύλες και τους αντίστοιχους νόμους δύναμης. Για λόγους συνέπειας και ευκολίας σύγκρισης, όλες οι γραφικές παραστάσεις της σχετικής διασποράς είναι σε ημιλογαριθμική κλίμακα και όλες οι γραφικές παραστάσεις του FSLE σε λογαριθμική κλίμακα. Επίσης σχεδιάζουμε σε όλα τα γραφήματα το χωρικό εύρος μέσα στο οποίο κυμαίνεται η πρώτη βαροκλιτική ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby στη Μεσόγειο. [28]



**Σχήμα 0.5.3:** Διαγράμματα σχετικής διασποράς της Αδριατικής, με τις αντίστοιχες προσαρμογές: εκθετικές και νόμους δύναμης. Η σχετική διασπορά απεικονίζεται με μαύρο και οι προσαρμογές με κόκκινο. α) Χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) πάνω αριστερά. β) Άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) πάνω δεξιά. γ) Καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) κάτω αριστερά. δ) Φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) κάτω δεξιά. Σχέση σχετικής διασποράς που αυξάνει ως νόμος δύναμης και FSLE:  $y^2 \sim t^a \iff \lambda \sim y^{-k}, a = -2/k$ .





**Σχήμα 0.5.4:** Διαγράμματα FSLE της Αδριατικής, με τις αντίστοιχες προσαρμογές νόμων δύναμης. Στις κατά προσέγγιση οριζόντιες περιοχές των γραφημάτων που υποδεικνύουν εκθετική αύξηση της σχετικής απόστασης των ζευγαριών drifters δεν αναφέρουμε την κλίση του γραφήματος. Η σχετική διασπορά απεικονίζεται με μαύρο και οι προσαρμογές με κόκκινο. α) Χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) πάνω αριστερά. β) Άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) πάνω δεξιά. γ) Καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) κάτω αριστερά. δ) Φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) κάτω δεξιά. Σχέση σχετικής διασποράς που αυξάνει ως νόμος δύναμης και FSLE:  $y^2 \sim t^a \iff \lambda \sim y^{-k}$ ,  $a = -2/k$ .

Στην Αδριατική στις μικρές κλίμακες η σχετική διασπορά αυξάνεται εκθετικά, γεγονός που υποδεικνύει την ύπαρξη μη-τοπικής δυναμικής σε αυτές τις χωρικές κλίμακες. Παρότι δεν υπάρχει συμφωνία μεταξύ των εκθετών για καμία εποχή του έτους, φαίνεται να υπάρχει μια εποχικότητα στη διακύμανση της κλίμακας, στην οποία έχουμε εκθετική αύξηση της σχετικής διασποράς. Κατά το πρώτο εξάμηνο του έτους οι κλίμακες μικρότερες του 1 χιλιομέτρου παρουσιάζουν μη-τοπική δυναμική, ενώ κατά το δεύτερο εξάμηνο οι κλίμακες επικτείνονται έως τα 6 περίπου χιλιόμετρα (σημειώνεται ότι η σχετική διασπορά έχει μονάδες  $km^2$ , οπότε για να εκτιμήσουμε την κλίμακα παίρνουμε την τετραγωνική ρίζα της μέγιστης και της ελάχιστης σχετικής διασποράς σε κάθε δυναμικά ομογενές εύρος). Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις η εκθετική αύξηση λαμβάνει χώρα σε κλίμακες μικρότερες της ακτίνας αποδιαμόρφωσης Rossby. Για το καλοκαίρι και το φθινόπωρο η εκθετική αύξηση συνεχίζεται έως περίπου το κάτω όριο της ακτίνας αποδιαμόρφωσης Rossby. Το χειμώνα και την άνοιξη αντίθετα, η σχετική διασπορά αυξάνεται ως νόμος δύναμης μέχρι αυτή την κλίμακα με εκθέτη  $t > 3$  που δεν προβλέπεται από τη θεωρία.

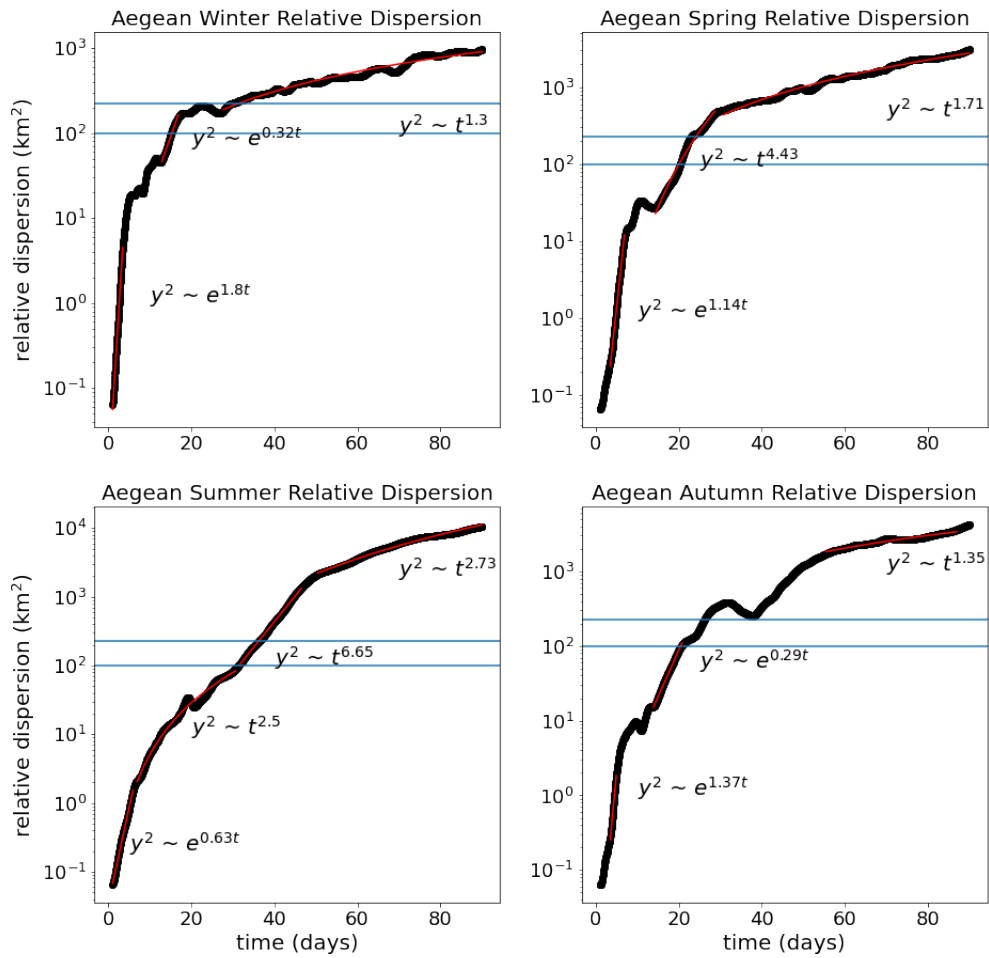
Η μετάβαση της σχετικής διασποράς σε νόμο δύναμης γίνεται για όλες τις εποχές στο εύρος κλιμάκων της ακτίνας αποδιαμόρφωσης Rossby εκτός του καλοκαιριού, όπου η μετάβαση συμβαίνει σε κλίμακες της τάξης 30

χιλιομέτρων. Υπάρχει καλή συμφωνία μεταξύ φθινοπώρου και χειμώνα, τόσο στο εύρος χωρικών κλιμάκων, όσο και στην τιμή των εκθετών που παίρνουν τιμές 2.26 και 2.07 αντίστοιχα. Αυτοί οι εκθέτες υποδεικνύουν ότι η σχετική διασπορά στην Αδριατική εκείνες τις εποχές κυριαρχείται από τη διάτμηση του πεδίου ταχυτήτων. Αυτή η ερμηνεία συνάδει με την παρουσία ισχυρής διάτμησης στην υπολεκάνη, κυρίως λόγω του δυτικού αδριατικού ρεύματος αλλά και της γενικής κυκλωνικής κυκλοφορίας στην υπόλεκάνη. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν βρει και οι Haza et al σε αυτές τις χωρικές κλίμακες, με εκθέτες 2.2 και 2.4. Η σχετική διασπορά αυξάνει ως νόμος δύναμης και το καλοκαίρι, αλλά με εκθέτη 2.64 που είναι πιό κοντά στην δυναμική τοπικής διασποράς για χωρικές κλίμακες μεγαλύτερες των 30 χιλιομέτρων. Την άνοιξη παρατηρείται επίσης αύξηση της σχετικής διασποράς ως νόμος δύναμης, αλλά με εκθέτη  $t > 3$  που δεν προβλέπεται από τη θεωρία.

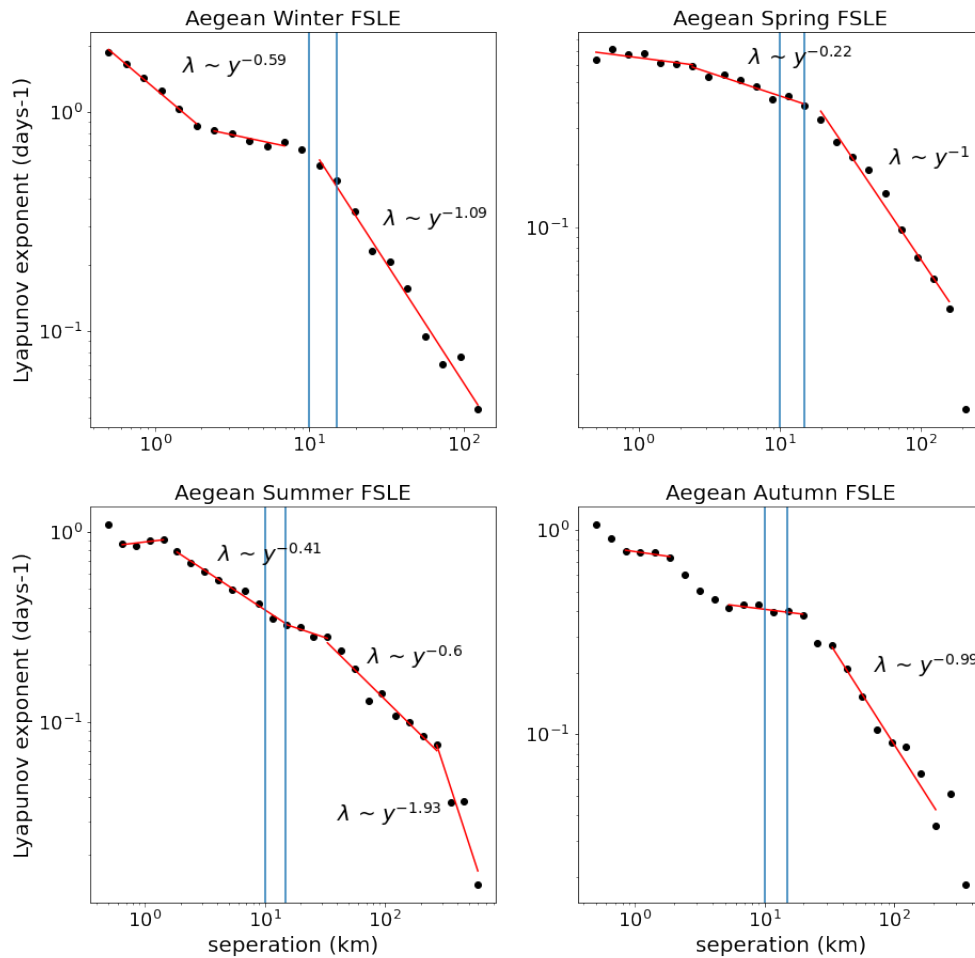
[43] Η καλύτερη συμφωνία των διαγραμμάτων σχετικής διασποράς με τα διαγράμματα του FSLE είναι το καλοκαίρι και το φθινόπωρο. Το διάγραμμα του καλοκαιριού έχει δύο χωρικές κλίμακες στις οποίες ο FSLE είναι κατα προσέγγιση σταθερός, που αντιστοιχεί σε εκθετική απομάκρυνση των drifters του ζεύγους και συνεπώς σε μη-τοπική δυναμική. Και οι δύο αυτές κλίμακες είναι μικρότερες της ακτίνας αποδιαμόρφωσης Rossby και συμπίπτουν με αυτές του διαγράμματος της σχετικής διασποράς. Για μεγαλύτερες κλίμακες, η κλίση του FSLE είναι  $-0.81$ , που αντιστοιχεί σε αύξηση της σχετικής διασποράς ως νόμο δύναμης με εκθέτη  $a = 2.47$ , οπότε και οι δύο μετρικές δίνουν κοντινά αποτελέσματα. Το διάγραμμα του FSLE το φθινόπωρο, για κλίμακες μεγαλύτερες της ακτίνας αποδιαμόρφωσης Rossby υποδεικνύει νόμο δύναμης με εκθέτη  $a = 2.24$ , που σχεδόν ταυτίζεται με αυτόν της σχετικής διασποράς. Για μικρότερες κλίμακες το διάγραμμα του FSLE δεν δείχνει κάποια γνωστή συμπεριφορά αντίθετα με αυτό της σχετικής διασποράς, παρότι υπάρχει ένα εύρος κλιμάκων με περίπου σταθερή τιμή που αντιστοιχεί σε εκθετική σχετική διασπορά.

Οι γραφικές παραστάσεις του FSLE την άνοιξη και το χειμώνα δεν συμφωνούν με αυτές της σχετικής διασποράς. Το διάγραμμα της άνοιξης έχει δύο περιοχές με σταθερό εκθέτη Igarunon και δύο άλλες όπου ο εκθέτης Igarunon μειώνεται ως νόμος δύναμης, με τιμές  $\lambda = -0.58$  και  $\lambda = -0.69$ . Από αυτούς ο δεύτερος προσεγγίζει καλά τη διασπορά τύπου Richardson ( $\bar{y}^2 \sim t^{2.89}$ ), ενώ ο πρώτος σε  $\bar{y}^2 \sim t^a$ ,  $a > 3$ . Για τις μεγαλύτερες κλίμακες ο FSLE μειώνεται πάλι ως νόμος δύναμης που αντιστοιχεί σε ρυθμό αύξησης της σχετικής διασποράς ( $\bar{y}^2 \sim t^{1.68}$ ). Η αντίστοιχη περιοχή στο διάγραμμα της σχετικής διασποράς δεν έχει κάποια διακριτή συμπεριφορά. Το διάγραμμα του FSLE το χειμώνα παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά για όλες τις χωρικές κλίμακες, που υποδεικνύει διασπορά τύπου Richardson ή τοπική διασπορά. Αυτή η εικόνα δεν ταυτίζεται με αυτή του διαγράμματος της σχετικής διασποράς σε καμία χωρική κλίμακα.

Συνολικά από όλα τα διαγράμματα φαίνεται ότι η διάτμηση της ταχύτητας της ροής παίζει σημαντικό ρόλο στη δυναμική. Η εποχή όπου η δυναμική προσεγγίζει περισσότερο την τοπική διασπορά στις μεγάλες κλίμακες, στην οποία η κίνηση των drifters κυριαρχείται από δίνες κλίμακας συγκρίσιμης με τη σχετική τους απόσταση είναι το καλοκαίρι. Αυτό συνάδει με τα αποτελέσματα της πρώτης σειράς πειραμάτων, στην οποία η ισχυρότερη ανάμειξη του κλιματολογικού έτους στην Αδριατική παρατηρείται το καλοκαίρι και χαρακτηρίζεται από την παρουσία πολλών δινών στο βόρειο τμήμα της.



**Σχήμα 0.5.5:** Διαγράμματα σχετικής διασποράς του Αιγαίου, με τις αντίστοιχες προσαρμογές: εκθετικές και νόμους δύναμης. Η σχετική διασπορά απεικονίζεται με μαύρο και οι προσαρμογές με κόκκινο. α) Χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) πάνω αριστερά. β) Άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) πάνω δεξιά. γ) Καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) κάτω αριστερά. δ) Φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) κάτω δεξιά. Σχέση σχετικής διασποράς που αυξάνει ως νόμος δύναμης και FSLE:  $y^2 \sim t^a \iff \lambda \sim y^{-k}, a = -2/k$ .



**Σχήμα 0.5.6:** Διαγράμματα FSLE του Αιγαίου, με τις αντίστοιχες προσαρμογές νόμων δύναμης. Στις κατά προσέγγιση οριζόντιες περιοχές των γραφημάτων που υποδεικνύουν εκθετική αύξηση της σχετικής απόστασης των ζευγαριών drifters δεν αναφέρουμε την κλίση του γραφήματος. Η σχετική διασπορά απεικονίζεται με μαύρο και οι προσαρμογές με κόκκινο. α) Χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) πάνω αριστερά. β) Άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) πάνω δεξιά. γ) Καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) κάτω αριστερά. δ) Φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) κάτω δεξιά. Σχέση σχετικής διασποράς που αυξάνει ως νόμος δύναμης και FSLE:  $y^2 \sim t^a \iff \lambda \sim y^{-k}$ ,  $a = -2/k$ .

Στο Αιγαίο οι γραφικές παραστάσεις της σχετικής διασποράς για κάθε εποχή πλην του καλοκαιριού παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά στις μεγαλύτερες κλίμακες. Σε όλες τις εποχές η σχετική διασπορά καταλήγει να αυξάνεται ως νόμος δύναμης με εκθέτες  $a_1 = 1.3$ ,  $a_2 = 1.71$  και  $a_3 = 1.35$  για χειμώνα, άνοιξη και φθινόπωρο αντίστοιχα. Για το χειμώνα και το φθινόπωρο οι εκθέτες προσεγγίζουν περισσότερο τη δυναμική διάχυσης, η οποία προβλέπει γραμμική αύξηση της σχετικής διασποράς. Η άνοιξη από την άλλη προσεγγίζει περισσότερο τη δυναμική της βαλλιστικής διασποράς, όπου η σχετική διασπορά αυξάνεται ως το τετράγωνο του χρόνου. Οι παραπάνω εκθέτες δεν παρατηρούνται στις ίδιες χωρικές κλίμακες, όλες όμως παρατηρούνται σε χωρικές κλίμακες μεγαλύτερες της ακτίνας αποδιαμόρφωσης Rossby. Η συμπεριφορά των μεγάλων κλιμάκων το καλοκαίρι είναι διαφορετική από τις άλλες εποχές, με τη σχετική διασπορά να αυξάνεται ως νόμος δύναμης με εκθέτη  $a = 2.73$ . Αυτός ο εκθέτης προσεγγίζει την τιμή  $a = 3$  που περιμένουμε όταν η δυναμική είναι τοπική.

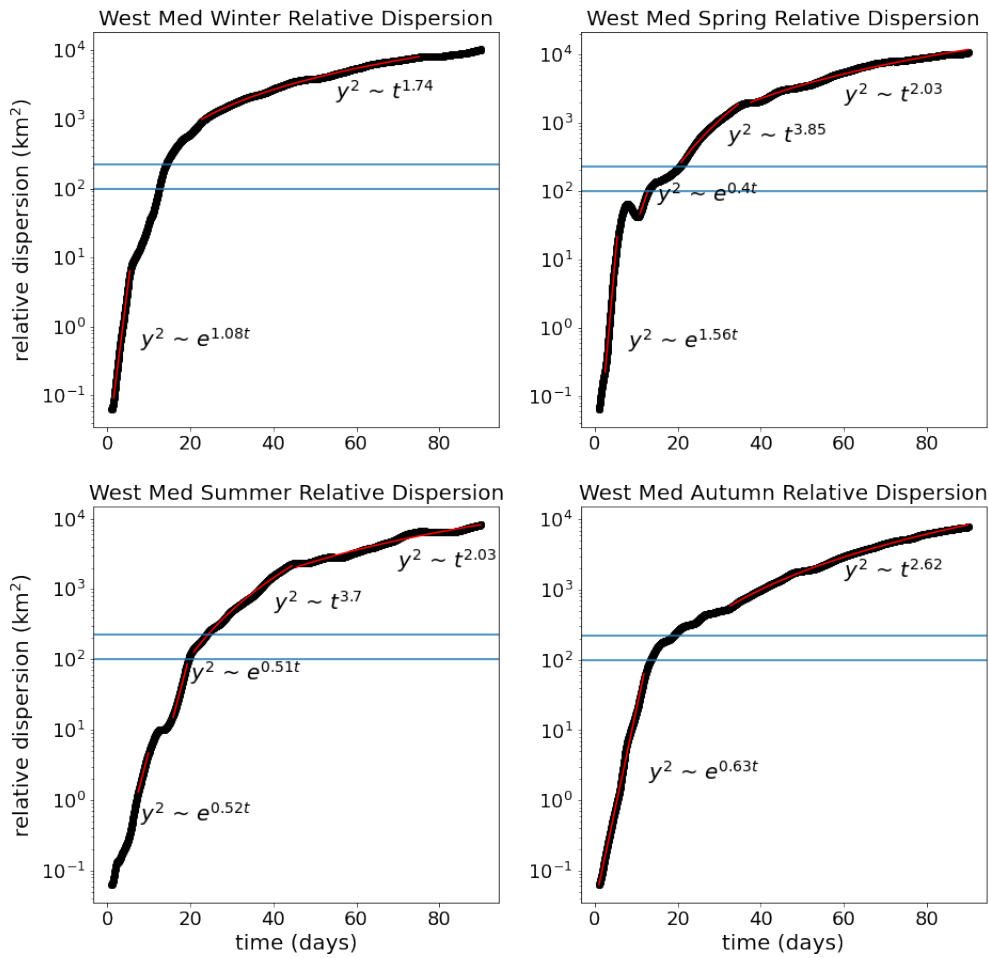
Οι μικρές κλίμακες παρουσιάζουν αντίστοιχη συμφωνία μεταξύ των εποχών. Για το χειμώνα, την άνοιξη και το φθινόπωρο η σχετική διασπορά αυξάνεται εκθετικά με το χρόνο για κλίμακες της τάξης των τριών χιλιομέτρων. Στο φθινόπωρο παρατηρείται και μια δεύτερη περίοδος εκθετικής αύξησης της σχετικής διασποράς, στις κλίμακες

3 έως 10 χιλιόμετρα περίπου. Το καλοκαίρι παρουσιάζει κι αυτό εκθετική αύξηση της σχετικής διασποράς, αλλά περιορίζεται σε κλίμακες μικρότερες του ενός χιλιομέτρου. Αντίθετα με το φθινόπωρο, αντί για δεύτερη περίοδο εκθετικής αύξησης έως την ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby έχουμε αύξηση ως νόμο δύναμης με εκθέτη  $a = 2.5$ .

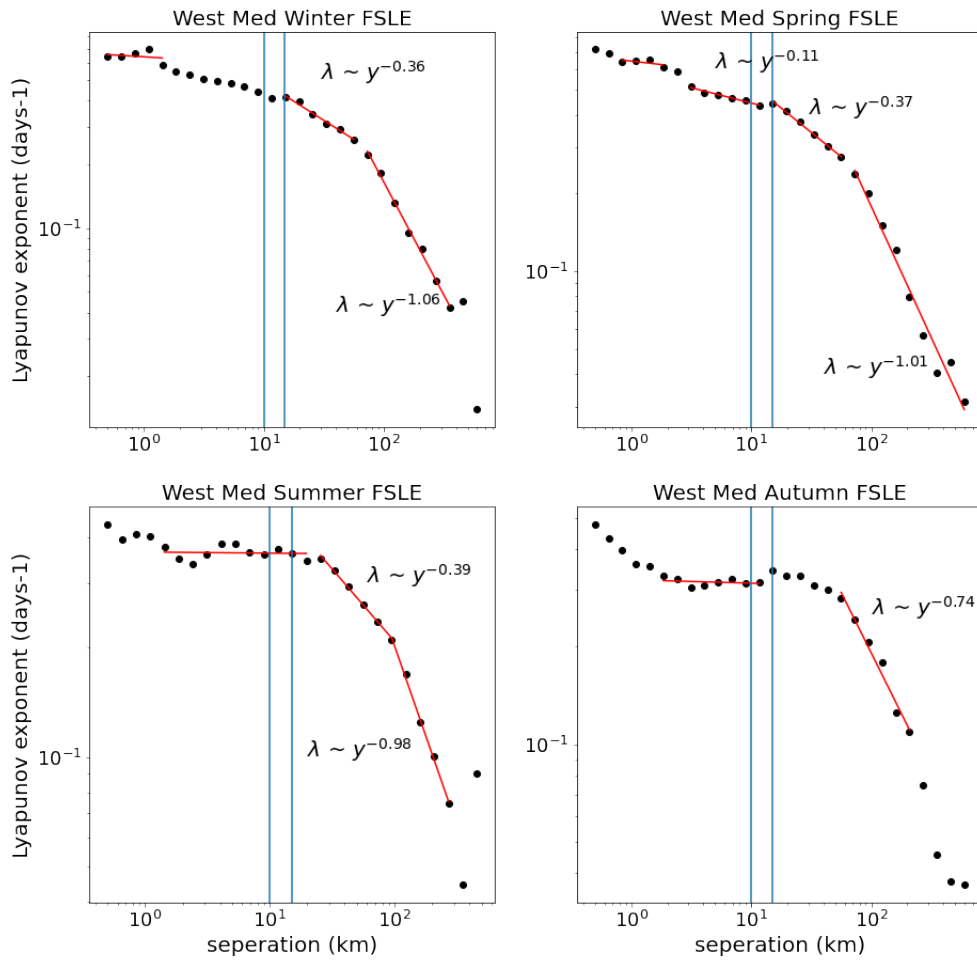
Στις ενδιάμεσες κλίμακες το Αιγαίο δεν παρουσιάζει κάποια κανονική συμπεριφορά στη σχετική διασπορά για καμία από τις τέσσερις εποχές. Φαίνεται να υπάρχει ένα εύρος κλιμάκων την άνοιξη και το καλοκαίρι, της τάξης της ακτίνας αποδιαμόρφωσης Rossby, όπου η σχετική διασπορά αυξάνεται ως νόμος δύναμης, ωστόσο οι αντίστοιχοι εκθέτες υπερβαίνουν σημαντικά τις επιτρεπόμενες από τη θεωρία τιμές.

Τα διαγράμματα του FSLE δίνουν μια διαφορετική εικόνα. Για το χειμώνα, την άνοιξη και το φθινόπωρο η κλίση του FSLE στις μεγάλες κλίμακες είναι πολύ κοντά στη μονάδα, που υποδεικνύει ότι η ροή σε κλίμακες μεγαλύτερες της ακτίνας αποδιαμόρφωσης Rossby κυριαρχείται από τη διάτμηση της ροής. Συγκριτικά, τα αποτελέσματα της σχετικής διασποράς τείνουν να συμφωνήσουν την άνοιξη, ενώ τις άλλες δύο εποχές είναι πιο κοντά στη δυναμική της διάχυσης. Δεδομένης της καλής συμφωνίας των αποτελεσμάτων του FSLE και λαμβάνοντας υπ' όψην την παρουσία ισχυρής διάτμησης στο Αιγαίο λόγω της εισροής των νερών της Μαύρης Θάλασσας, η δυναμική διάτμησης φαίνεται πιο πιθανή. Στις μικρές κλίμακες, ο FSLE παίρνει προσεγγιστικά σταθερές τιμές για όλες τις εποχές εκτός του χειμώνα, όπου μειώνεται ως νόμος δύναμης με εκθέτη  $\lambda \sim -0.59$  που είναι πολύ κοντά στην διασπορά τύπου Richardson.

Όπως και με τη σχετική διασπορά, ο FSLE δεν παρουσιάζει καμία ομοιότητα μεταξύ των εποχών, ούτε περιγράφει κάποια γνωστή δυναμική. Αυτή η μερική ασυμφωνία μεταξύ μετρικών και θεωρίας, αλλά και μεταξύ των δύο μετρικών, που παρατηρούμε οφείλεται εν μέρει στην πολύπλοκη τοπογραφία του Αιγαίου.



**Σχήμα 0.5.7:** Διαγράμματα σχετικής διασποράς της δυτικής Μεσογείου, με τις αντίστοιχες προσαρμογές: εκθετικές και νόμους δύναμης. Η σχετική διασπορά απεικονίζεται με μαύρο και οι προσαρμογές με κόκκινο. α) Χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) πάνω αριστερά. β) Άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) πάνω δεξιά. γ) Καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) κάτω αριστερά. δ) Φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) κάτω δεξιά. Σχέση σχετικής διασποράς που αυξάνει ως νόμος δύναμης και FSLE:  $y^2 \sim t^a \iff \lambda \sim y^{-k}, a = -2/k$ .



**Σχήμα 0.5.8:** Διαγράμματα FSLE της δυτικής Μεσογείου, με τις αντίστοιχες προσαρμογές νόμων δύναμης. Στις κατά προσέγγιση οριζόντιες περιοχές των γραφημάτων που υποδεικνύουν εκθετική αύξηση της σχετικής απόστασης των ζευγαριών drifters δεν αναφέρουμε την κλίση του γραφήματος. Η σχετική διασπορά απεικονίζεται με μαύρο και οι προσαρμογές με κόκκινο. α) Χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) πάνω αριστερά. β) Άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) πάνω δεξιά. γ) Καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) κάτω αριστερά. δ) Φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) κάτω δεξιά. Σχέση σχετικής διασποράς που αυξάνει ως νόμος δύναμης και FSLE:  $y^2 \sim t^a \iff \lambda \sim y^{-k}$ ,  $a = -2/k$ .

Στη δυτική Μεσόγειο όλες οι γραφικές παραστάσεις της σχετικής διασποράς δείχνουν εκθετική αύξηση για κλίμακες μικρότερες της ακτίνας αποδιαμόρφωσης Rossby. Το χειμώνα και την άνοιξη αυτή η εκθετική αύξηση λαμβάνει χώρα σε κλίμακες μικρότερες του ενός περίπου χιλιομέτρου, ενώ το καλοκαίρι και το φθινόπωρο η εκθετική αύξηση εκτείνεται μέχρι και τα 10 χιλιόμετρα περίπου. Επίσης υπάρχει και ποσοτική συμφωνία εκτός από ποιοτική για το δεύτερο εξάμηνο του έτους, με τους εκθέτες να παίρνουν τιμές  $a = 0.51$  και  $a = 0.63$  αντίστοιχα.

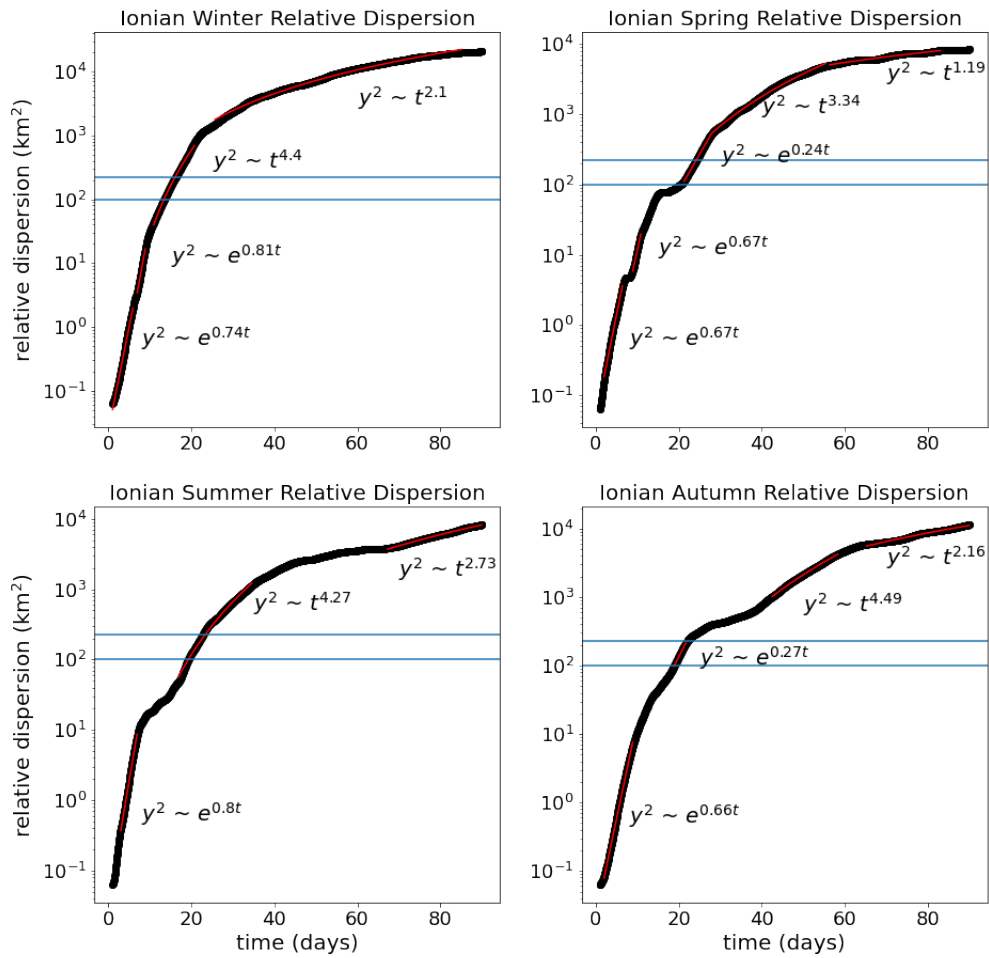
Η συμπεριφορά της σχετικής διασποράς μεταξύ των εποχών είναι παρόμοια και στις μεγάλες κλίμακες. Την άνοιξη και το καλοκαίρι η σχετική διασπορά αυξάνεται ανάλογα με το τετράγωνο του χρόνου. Τα αποτελέσματα του χειμώνα δείχνουν συμπεριφορά νόμου δύναμης με εκθέτη  $a = 1.74$ , που είναι σχετικά κοντά στην διασπορά διάτμησης. Μόνο η συμπεριφορά της σχετικής διασποράς κατά το φθινόπωρο αποκλίνει από αυτή την εικόνα, παρουσιάζοντας και πάλι αύξηση ως νόμο δύναμης, αλλά με εκθέτη  $a = 2.62$  που είναι πιά κοντα στη διασπορά τύπου Richardson. Κατά την άνοιξη και το καλοκαίρι παρατηρείται επίσης μια περιοχή στην οποία η σχετική διασπορά αυξάνεται ως νόμος δύναμης σε κλίμακες συγκρίσιμες και λίγο μεγαλύτερες από την ακτίνα αποδιαμόρ-

φωσης Rossby. Αυτή θα μπορούσε να αποτελεί μια μετάβαση από την μη-τοπική, εκθετική δυναμική στις μικρές κλίμακες στη βαλλιστική διασπορά στις μεγάλες. Ωστόσο και οι δύο περιοχές παρουσιάζουν εκθέτη  $a > 3$ .

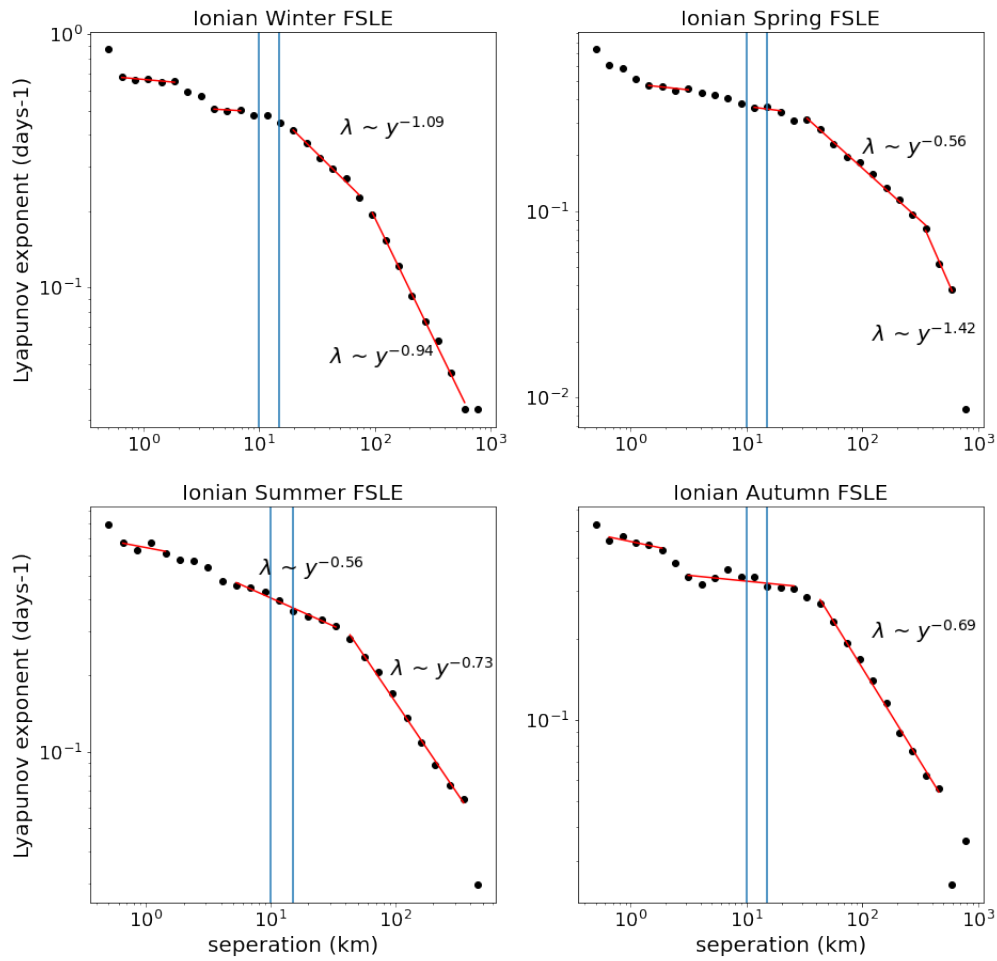
Τα αποτελέσματα του FSLE συμφωνούν με αυτά της σχετικής διασποράς για όλο το έτος όσον αφορά τη συμπεριφορά στις μεγάλες κλίμακες. Αυτή η συμφωνία είναι και ποιοτική και ποσοτική, με τους αντίστοιχους εκθέτες να παίρνουν σχεδόν ίδιες τιμές. Στις μικρές κλίμακες η συμφωνία είναι επίσης καλή. Οι εκθέτες Lyapunov παραμένουν σχετικά σταθεροί έως και τα 10 χιλιόμετρα για το φθινόπωρο και το καλοκαίρι, υποδηλώνοντας εκθετική απομάκρυνση όπως και η σχετική διασπορά. Αντίστοιχη εκθετική αύξηση παρατηρούμε και κατά το χειμώνα και την άνοιξη για κλίμακες της τάξης του ενός χιλιομέτρου, και πάλι σε συμφωνία με τη σχετική διασπορά. Οι ενδιάμεσες κλίμακες, όπως και στη σχετική διασπορά δεν παρουσιάζουν κάποια κοινή συμπεριφορά που να παραπέμπει σε συγκεκριμένη δυναμική.

Όπως και στο Αιγαίο με τα νερά της Μαύρης Θάλασσας, έτσι και εδώ η εισροή των ατλαντικών νερών επιρρεάζει σημαντικά τη διασπορά των drifters και δημιουργεί το ισχυρό σήμα διασποράς διάτμησης που παρατηρούμε. Η τάση προς την τοπική δυναμική λαμβάνει χώρα το φθινόπωρο, που σύμφωνα με την πρώτη σειρά πειραμάτων είναι η εποχή με την ασθενέστερη κυκλοφορία. Αυτό το φαινομενικά όξυμορο αποτέλεσμα θα συζητηθεί περαιτέρω παρακάτω.





**Σχήμα 0.5.9:** Διαγράμματα σχετικής διασποράς του Ιονίου, με τις αντίστοιχες προσαρμογές: εκθετικές και νόμους δύναμης. Η σχετική διασπορά απεικονίζεται με μαύρο και οι προσαρμογές με κόκκινο. α) Χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) πάνω αριστερά. β) Άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) πάνω δεξιά. γ) Καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) κάτω αριστερά. δ) Φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) κάτω δεξιά. Σχέση σχετικής διασποράς που αυξάνει ως νόμος δύναμης και FSLE:  $y^2 \sim t^a \iff \lambda \sim y^{-k}, a = -2/k$ .



**Σχήμα 0.5.10:** Διαγράμματα FSLE του Ιονίου, με τις αντίστοιχες προσαρμογές νόμων δύναμης. Στις κατά προσέγγιση οριζόντιες περιοχές των γραφημάτων που υποδεικνύουν εκθετική αύξηση της σχετικής απόστασης των ζευγαριών drifters δεν αναφέρουμε την κλίση του γραφήματος. Η σχετική διασπορά απεικονίζεται με μαύρο και οι προσαρμογές με κόκκινο. α) Χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) πάνω αριστερά. β) Άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) πάνω δεξιά. γ) Καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) κάτω αριστερά. δ) Φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) κάτω δεξιά. Σχέση σχετικής διασποράς που αυξάνει ως νόμος δύναμης και FSLE:  $y^2 \sim t^a \iff \lambda \sim y^{-k}$ ,  $a = -2/k$ .

Η παρατηρούμενη συμπεριφορά της σχετικής διασποράς του Ιονίου είναι αντίστοιχη με αυτή της δυτικής Μεσογείου. Εκθετική αύξηση της σχετικής διασποράς λαμβάνει χώρα στις μικρές κλίμακες έως και τα 3 με 4 περίπου χιλιόμετρα σε όλες τις εποχές του χρόνου. Αντίθετα με τη δυτική Μεσόγειο στο Ιόνιο η συμφωνία των αποτελεσμάτων είναι και ποσοτική, με τους εκθέτες να παίρνουν τιμές  $a \in (0.66, 0.81)$ . Κατά την άνοιξη και το φθινόπωρο παρατηρείται μια δεύτερη περίοδος εκθετικής αύξησης της σχετικής διασποράς, η οποία λαμβάνει χώρα σε κλίμακες της τάξης της ακτίνας αποδιαμόρφωσης Rossby για το φθινόπωρο και λίγο μεγαλύτερες, έως τα 30 περίπου χιλιόμετρα για την άνοιξη.

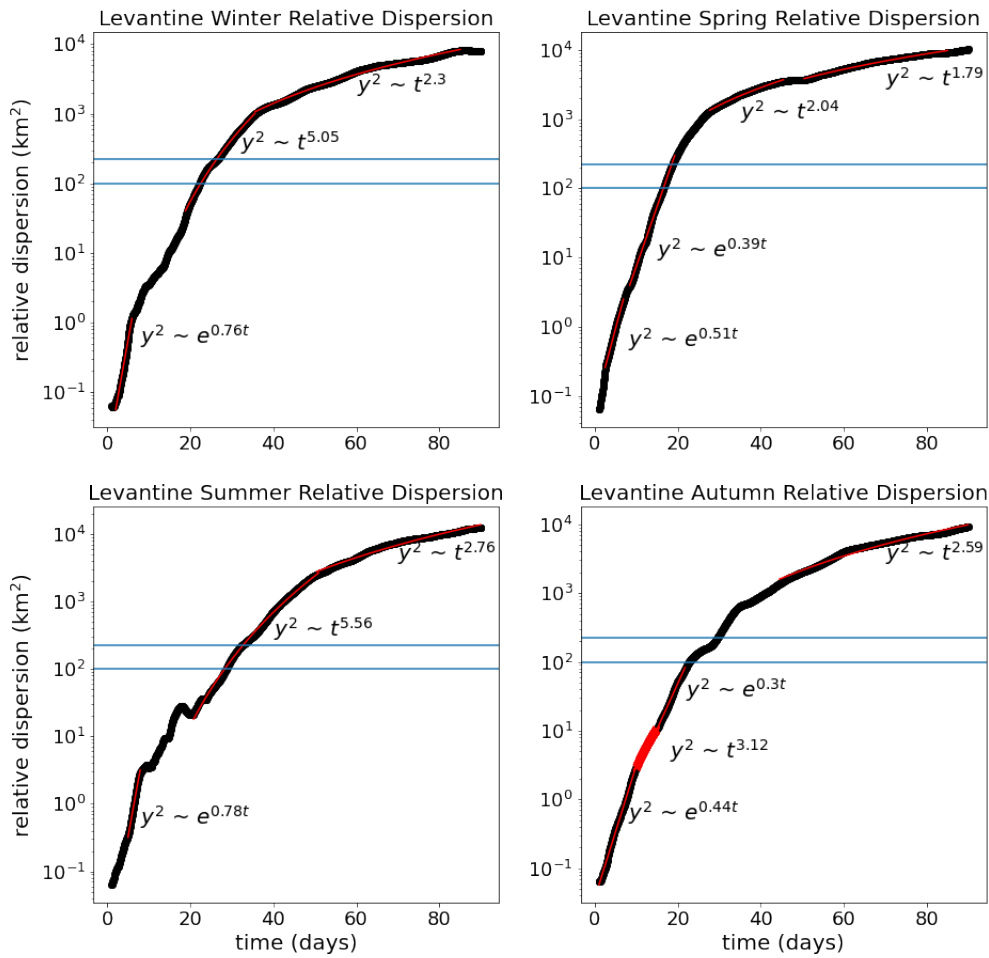
Τα αποτελέσματα στις μεγάλες κλίμακες παρουσιάζουν μεγαλύτερη διαφοροποίηση σε σχέση με αυτά της δυτικής Μεσογείου. Κατα το χειμώνα και το φθινόπωρο παρατηρούμε αύξηση της σχετικής διασποράς ανάλογα με το τετράγωνο του χρόνου όπως και στη δυτική Μεσόγειο, που υποδεικνύει δυναμική διάτμησης. Το καλοκαιρινή σχετική διασπορά αυξάνεται ως νόμος δύναμης με εκθέτη  $a = 2.73$ , που προσεγγίζεται καλύτερα από διασπορά τύπου Richardson. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρήθηκε πριν και στη δυτική Μεσόγειο, αλλά το φθινόπωρο και όχι το καλοκαίρι. Την άνοιξη αντίθετα η σχετική διασπορά αυξάνεται με εκθέτη  $a = 1.19$ , αποτέλεσμα ενδεικτικό

διασποράς διάχυσης σε αυτές τις κλίμακες και στις μικρότερες από αυτές ως νόμος δύναμης με εκθέτη  $a = 3.34$

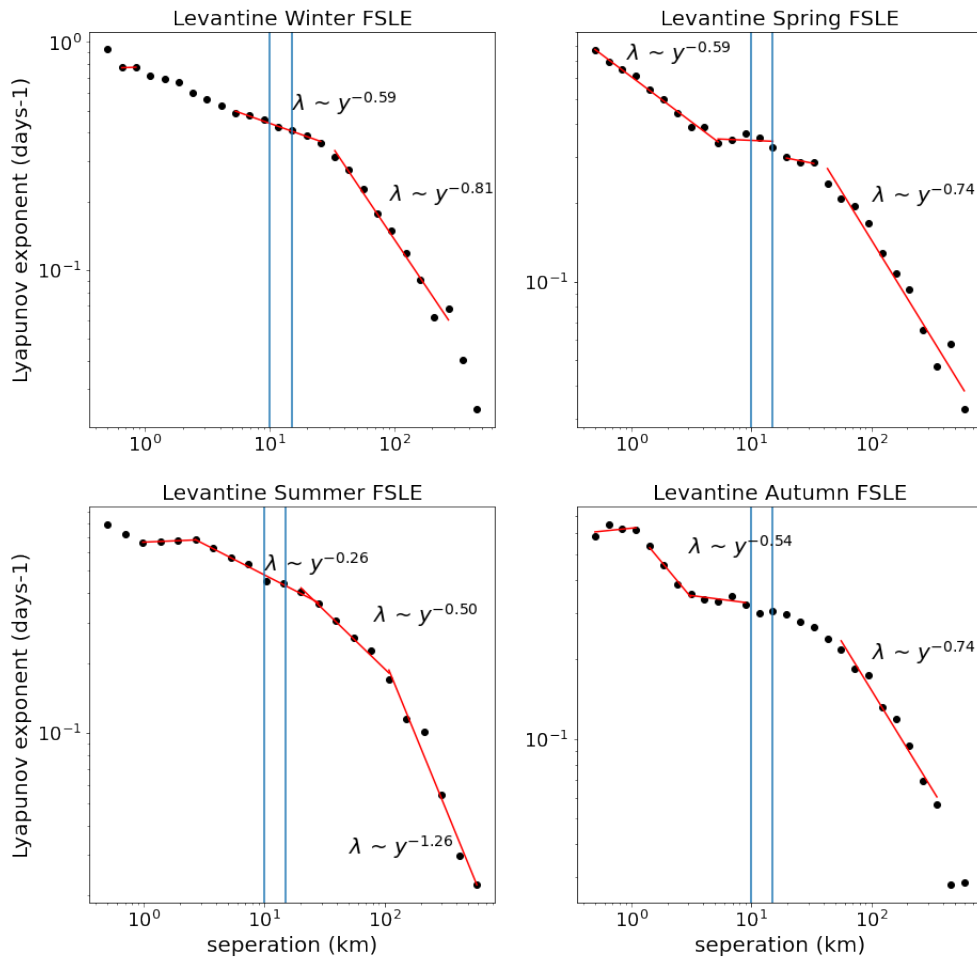
Αντίθετα με τη δυτική Μεσόγειο, τα αποτελέσματα του FSLE δε συμφωνούν σε τόσο μεγάλο βαθμό με αυτά της σχετικής διασποράς. Η καλύτερη συμφωνία παρατηρείται το χειμώνα, με δύο περιοχές εκθετικής αύξησης σε κλίμακες μικρότερες της ακτίνας αποδιαμόρφωσης Rossby και βαλλιστική διασπορά στις μεγάλες κλίμακες, με μικρή διαφοροποίηση στον εκθέτη. Σε πολύ καλή συμφωνία είναι και τα αποτελέσματα του καλοκαιριού για τις μεγάλες κλίμακες, με τους εκθέτες Lyapunov και σχετικής διασποράς να συμπίπτουν. Τα αποτελέσματα των δύο μετρικών συμφωνούν στις μεγάλες κλίμακες και την άνοιξη, με τον εκθέτη Lyapunov εδώ να υποδεικνύει αρχικά διαχωρισμό με νόμο δύναμης με εκθέτη  $a = 3.57$  και στη συνέχεια με  $a = 1.4$  που είναι κόντα σε αυτόν που προκύπτει από τη σχετική διασπορά.

Στις μικρές κλίμακες υπάρχουν ενδείξεις για εκθετικό διαχωρισμό την άνοιξη και το φθινόπωρο, άλλα δεν είναι ξεκάθαρες. Το καλοκαίρι από την άλλη δεν παρατηρείται σταθερότητα του εκθέτη Lyapunov που θα υποδήλωνε εκθετικό διαχωρισμό. Ένα άλλο σημείο ασυμφωνίας είναι οι μεγάλες κλίμακες του φθινοπώρου, όπου ο FSLE δείχνει διασπορά τύπου Richardson, ενώ η σχετική διασπορά είναι βαλλιστική. Αντίθετα τα αποτελέσματα των δύο μετρικών συμφωνούν στις ενδιάμεσες κλίμακες, παρουσιάζοντας εκθετικό διαχωρισμό.

Οι ομοιότητες που παρατηρούμε μεταξύ των αποτελεσμάτων της δυτικής Μεσογείου και του Ιονίου είναι μια ένδειξη ότι οι διαφορετικές κλίμακες της δυναμικής στις δύο υπολεκάνες είναι παραπλήσιες. Αυτό το αποτέλεσμα είναι σε ένα βαθμό αναμενόμενο, λόγω της πορείας των ατλαντικών νερών που λαμβάνει χώρα και στις δύο υπολεκάνες, με ισχυρά και μερικώς ασταθή ρεύματα στο νότιο τμήμα τους. [8]



**Σχήμα 0.5.11:** Διαγράμματα σχετικής διασποράς της Λεβαντίνης, με τις αντίστοιχες προσαρμογές εκθετικές και νόμους δύναμης. Η σχετική διασπορά απεικονίζεται με μαύρο και οι προσαρμογές με κόκκινο. α) Χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) πάνω αριστερά. β) Άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) πάνω δεξιά. γ) Καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) κάτω αριστερά. δ) Φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) κάτω δεξιά. Σχέση σχετικής διασποράς που αυξάνει ως νόμος δύναμης και FSLE:  $y^2 \sim t^a \iff \lambda \sim y^{-k}, a = -2/k$ .



**Σχήμα 0.5.12:** Διαγράμματα FSLE της Λεβαντίνης, με τις αντίστοιχες προσαρμογές νόμων δύναμης. Στις κατά προσέγγιση οριζόντιες περιοχές των γραφημάτων που υποδεικνύουν εκθετική αύξηση της σχετικής απόστασης των ζευγαριών drifters δεν αναφέρουμε την κλίση του γραφήματος. Η σχετική διασπορά απεικονίζεται με μαύρο και οι προσαρμογές με κόκκινο. α) Χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) πάνω αριστερά. β) Άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) πάνω δεξιά. γ) Καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) κάτω αριστερά. δ) Φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) κάτω δεξιά. Σχέση σχετικής διασποράς που αυξάνει ως νόμος δύναμης και FSLE:  $y^2 \sim t^a \iff \lambda \sim y^{-k}$ ,  $a = -2/k$ .

Η συμπεριφορά της σχετικής διασποράς στη Λεβαντίνη στις μικρές κλίμακες χαρακτηρίζεται από εκθετική αύξηση. Αυτό ισχύει και για τις τέσσερις εποχές για κλίμακες έως 1 – 2 χιλιόμετρα, ενώ για την άνοιξη και το φθινόπωρο αυτή η αύξηση συνεχίζει μέχρι και κλίμακες συγκρίσιμες με την ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby, με το φθινόπωρο ειδικά να παρουσιάζει μια μικρή περίοδο όπου διασπορά τύπου Richardson επίσης ταιριάζει στα αποτελέσματα.

Στις μεγάλες κλίμακες τα αποτελέσματα δεν είναι ξεκάθαρα. Σε όλες τις εποχές παρατηρείται αύξηση της διασποράς ως νόμος δύναμης, όμως οι εκθέτες διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους. Το καλοκαίρι και το φθινόπωρο οι εκθέτες παίρνουν μεγαλύτερες τιμές,  $a = 2.76$  και  $a = 2.59$  αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές προσεγγίζονται καλύτερα από διασπορά τύπου Richardson. Το χειμώνα ο εκθέτης παίρνει την τιμή  $a = 2.3$ , που τείνει περισσότερο σε βαλλιστική διασπορά απ' ό,τι σε διασπορά τύπου Richardson. Τέλος, την άνοιξη παρατηρούνται δύο διαφορετικές περιόδους. Η πρώτη δείχνει βαλλιστική διασπορά, ενώ η δεύτερη παρουσιάζει μικρότερο εκθέτη ο οποίος όμως είναι κοντά στη τιμή 2 που αντιστοιχεί σε βαλλιστική διασπορά και συνεπώς σε δυναμική διάτμησης.

Τα αποτελέσματα του FSLE συμφωνούν με αυτά της σχετικής διασποράς κυρίως το φθινόπωρο, με κατα προ-

σέγγιση σταθερές τιμές του εκθέτη Lyapunov στις κλίμακες συγκρίσιμες και λίγο μικρότερες της ακτίνας αποδιαμόρφωσης Rossby, καθώς και στις μικρότερες κλίμακες. Ταυτόχρονα, στις μεγάλες κλίμακες παρατηρείται κλίση του εκθέτη Lyapunov που αντιστοιχεί σε αύξηση της σχετικής διασποράς με εκθέτη  $a = 2.7$ , που προσεγγίζει αρκετά το αποτέλεσμα της σχετικής διασποράς. Αντίθετα το καλοκαίρι παρότι παρατηρούμε σταθερό εκθέτη Lyapunov στις μικρές κλίμακες, στις μεγάλες τα αποτελέσματα του FSLE υποδεικνύουν ότι η σχετική διασπορά αυξάνει σε νόμος δύναμης με εκθέτη  $a = 1.59$  που βρίσκεται μεταξύ της βαλλιστικής διασποράς και της διασποράς διάχυσης, σε αντίθεση με τα αποτελέσματα της σχετικής διασποράς που τείνουν προς την διασπορά τύπου Richardson.

Τα αποτελέσματα του FSLE το χειμώνα συμφωνούν με αυτά της σχετικής διασποράς στις μεγάλες κλίμακες με τις δύο μετρικές να δίνουν παραπλήσια αποτελέσματα με εκθέτες  $a = 2.46$  και  $a = 2.3$  αντίστοιχα. Αντίθετα στις μικρές κλίμακες δεν παρατηρείται η εκθετική απομάκρυνση που βλέπουμε στη σχετική διασπορά. Στα αποτελέσματα της άνοιξης υπάρχει ακόμα λιγότερη συμφωνία. Ούτε εδώ παρατηρούμε την εκθετική αύξηση της σχετικής απόστασης στις μικρές κλίμακες και στις μεγάλες κλίμακες, ενώ η σχετική διασπορά υποδεικνύει βαλλιστική διασπορά, τα αποτελέσματα του FSLE αντίθετα υποδεικνύουν διασπορά τύπου Richardson. Στις ενδιάμεσες κλίμακες κοντά στην ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby ωστόσο παρατηρείται και στις δύο μετρικές η εκθετική απομάκρυνση.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο μετρικών για τις πέντε υπολεκάνες μεταξύ τους παρατηρούμε ορισμένα επαναλαμβανόμενα μοτίβα. Σε όλες τις ανοιχτές υπολεκάνες παρατηρούμε μια ενδιάμεση κατάσταση ανάμεσα σε τοπική δυναμική και σε δυναμική διάτμησης. Αυτά τα αποτελέσματα οφείλονται στην ισχυρή επίδραση που έχουν στην κυκλοφορία τα ατλαντικά νερά. Μετά την είσοδό τους από το Στενό του Γιβραλτάρ, συνεχίζουν την κίνηση τους στο νότιο τμήμα της Μεσογείου με τη μορφή ισχυρών ρευμάτων. Η παρουσία αυτών των ρευμάτων θα οδηγήσει σε ανάλογα ισχυρή διάτμηση του πεδίου ταχυτήτων στο σύνορό τους. Συνεπώς, η σχετική κίνηση ζευγαριών drifters που ποντίζονται κοντά σε αυτό ή που μεταφέρονται κοντά του κατά τη χρονική τους εξέλιξη θα επηρεαστεί από αυτή τη διάτμηση της ροής. Η τάση προς τη βαλλιστική διασπορά που παρατηρούμε στα αποτελέσματά μας συνεπώς είναι η επίδραση των ατλαντικών νερών στη δυναμική της κυκλοφορίας.

Αυτό επίσης εξηγεί την τάση προς τη βαλλιστική διασπορά που παρατηρείται το χειμώνα σε σχέση με την τάση προς την τοπική δυναμική κατά το καλοκαίρι και το φθινόπωρο. Αυτές τις εποχές η γενική κυκλοφορία των ατλαντικών νερών είναι ασθενέστερη, ενώ το χειμώνα φτάνει στο μέγιστό της. Αυτό το μοτίβο εποχικότητας είναι εμφανές και στην πρώτη σειρά πειραμάτων αυτής της μελέτης. Έτσι το σήμα της βαλλιστικής διασποράς είναι ισχυρότερο κατά τις περιόδους όπου η κυκλοφορία των ατλαντικών νερών είναι πιο ισχυρή και αυτή η εποχικότητα αποτυπώνεται στα αποτελέσματά μας.

Αυτό σημαίνει ότι τα ζεύγη drifters απομακρύνονται μεταξύ τους με πιο αργό ρυθμό το χειμώνα που η κυκλοφορία είναι ισχυρότερη σε σχέση με τις εποχές που η κυκλοφορία είναι ασθενέστερη. Αυτό το συμπέρασμα μπορεί να φαίνεται παράδοξο, όμως συμφωνεί με πειραματικές μελέτες με drifters που έχουν γίνει από το Lacasce et al 2003, Ollittraut et al 2005 και Kozalka et al 2009 στον Ατλαντικό. Μελετώντας τις πορείες ζευγαριών drifters στον δυτικό και στον κεντρικό Ατλαντικό, τον κόλπο του Μεξικού και στις ακτές της Νορβηγίας, βρήκαν ότι τα πειραματικά αποτελέσματα ήταν πιο κοντά στις θεωρητικές προβλέψεις για εκθετική απομάκρυνση που αντιστοιχεί σε μη-τοπική δυναμική και απότομο ενεργειακό φάσμα στις μικρές κλίμακες και διασπορά τύπου Richardson που αντιστοιχεί σε τοπική δυναμική και σε μεταφορά ενέργειας σε μεγαλύτερες κλίμακες στη δισδιάστατη τύρβη για τον Ανατολικό Ατλαντικό και στις ακτές της Νορβηγίας, όπου η κυκλοφορία είναι ασθενέστερη απ' ό,τι στο δυτικό Ατλαντικό. Παρότι ορισμένες από αυτές τις μελέτες έχουν γίνει με πλωτήρες βάθους (floaters) κι όχι drifters, τα αποτελέσματά τους είναι εξίσου έγγυρα, καθώς οι δομές που καθορίζουν τη δυναμική της κυκλοφορίας δεν περιορίζονται στην επιφάνεια, αλλά εκτείνονται και κατά βάθος. [?, ?, 42, 49]

Αυτή η συμπεριφορά πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι στις περιοχές όπου η κυκλοφορία είναι πιο ισχυρή και η ροή έχει περισσότερη ενέργεια, η επιπλέον ενέργεια τείνει να κάνει το ενεργειακό φάσμα λιγότερο απότομο. Ως αποτέλεσμα οι μικρές κλίμακες ή ισοδύναμα οι μεγαλύτεροι κυματαριθμοί έχουν περισσότερη ενέργεια με την οποία μπορούν να δημιουργήσουν δομές της κυκλοφορίας και γίνεται πιο δύσκολο να διαχωριστούν οι διαφορετικές δυναμικά χωρικές κλίμακες. Αντίθετα στις περιοχές με ασθενέστερη κυκλοφορία που η συνολική ενέργεια είναι λιγότερη, ο διαχωρισμός μεταξύ των διαφορετικών δυναμικών είναι πιο ξεκάθαρος και συνεπώς πιο εύκολα παρατηρήσιμος.

Ένα άλλο κοινό μοτίβο που παρατηρούμε είναι η παρουσία εκθετικής απομάκρυνσης στις μικρές κλίμακες σε σχεδόν όλες τις υπολεκάνες για κάθε εποχή στα διαγράμματα σχετικής διασποράς, που όμως δεν συνδυάζεται πάντα με αντίστοιχα αποτελέσματα στα διαγράμματα FSLE. Αυτή η ασυμφωνία αποτελεσμάτων οφείλεται πιθανόν στο συνδυασμό χρονικής διακριτικής ικανότητας των πειραμάτων και της επιλεγμένης αρχικής απόστασης των ζευγαριών drifters. Η πρώτη περίοδος εκθετικής απομάκρυνσης παρατηρείται σε αποστάσεις της τάξης του ενός χιλιομέτρου. Η αρχική απόσταση των drifters σε αυτά τα πειράματα είναι μισό χιλιόμετρο. Ταυτόχρονα, η εκθετική

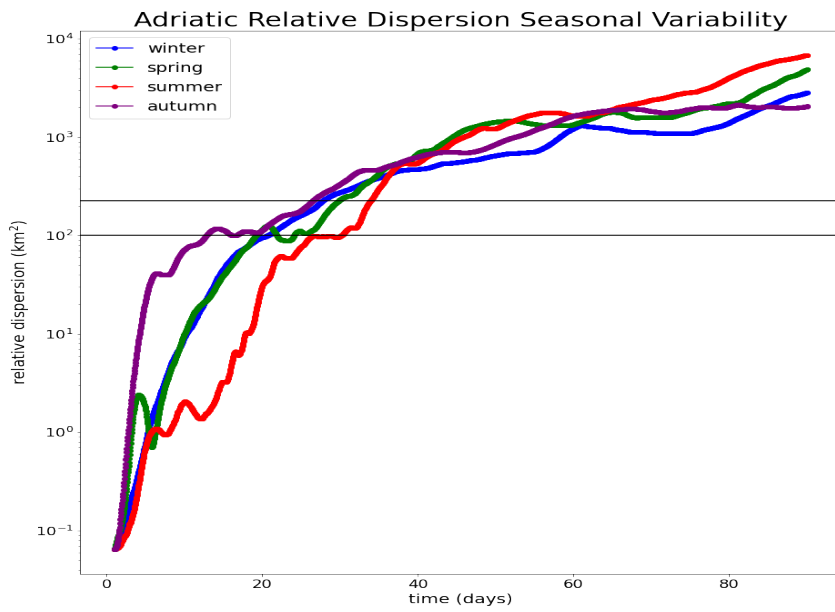
απομάκρυνση λαμβάνει χώρα σε μικρό χρονικό διάστημα. Είναι πιθανό συνεπώς η απεικόνιση της δυναμικής να είναι ανεπαρκής για τις παραμέτρους του πειράματος δεδομένης της πολύ μικρής απόστασης που καλύπτεται σε μικρό χρονικό διάστημα σε συνδυασμό με την ευαισθησία του FSLE ως μετρική στη χρονική διακριτική ικανότητα. Συνολικά ωστόσο τα αποτελέσματα υποδεικνύουν την παρουσία μη-τοπικής δυναμικής σε αυτές τις χωρικές κλίμακες.

Ένα άλλο μοτίβο σχετικά με την εκθετική απομάκρυνση είναι ότι στις ανοιχτές υπολεκάνες αυτή η συμπεριφορά παρατηρείται και σε μεγαλύτερες χωρικές κλίμακες, συγκρίσιμες με την ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby. Αυτή η διαφοροποίηση είναι αποτέλεσμα του συγκριτικά μικρού μεγέθους των ημι-κλειστών υπολεκανών. Η μικρότερη έκταση της Αδριατικής και του Αιγαίου περιορίζει το μέγεθος των δομών της κυκλοφορίας που μπορούν να αναπτυχθούν. Δομές σε μικρότερες κλίμακες σημαίνει και γρηγορότερη μετάβαση από μη-τοπική σε τοπική δυναμική.

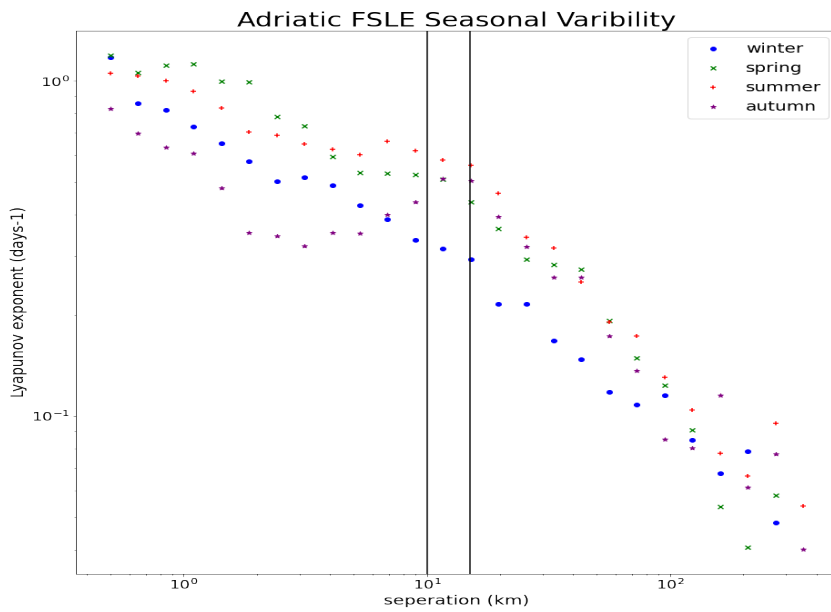
Το μικρό σχετικά μέγεθος της Μεσογείου οδηγεί επίσης σε ένα άλλο φαινομενικά παράδοξο αποτέλεσμα: εκτός από την άνοιξη στο Ιόνιο και το χειμώνα και το φθινόπωρο στο Αιγαίο, δεν υπάρχει ισχυρή ένδειξη για δυναμική διάχυσης στις μεγάλες κλίμακες. Θα περιμέναμε ωστόσο λόγω του ότι η Μεσόγειος είναι μια σχεδόν κλειστή λεκάνη και τη μεγάλη χρονική διάρκεια των πειραμάτων η απόσταση των ζευγαριών να έφτανε σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις ώστε η κίνηση του ζεύγους να μην καθορίζεται από κάποια δομή της κυκλοφορίας και η κίνησή τους να περιγράφεται από τη δυναμική διάχυσης. Ο λόγος που δεν παρατηρούμε τέτοια συμπεριφορά είναι η παρουσία της ισχυρής κυκλωνικής κυκλοφορίας στην περιφέρεια της Μεσογείου εξαναγκάζει τα ζεύγη σε βαλλιστική διασπορά, προσδίδοντάς στη δυναμική τους χαρακτήρα διάτμησης. Ενδέχεται το γεγονός ότι το πεδίο ταχυτήτων μας προέρχεται από κλιματολογικά δεδομένα να συμβάλει σε αυτή την εικόνα, ενισχύοντας την γενική κυκλωνική κυκλοφορία της Μεσογείου.

Όσον αφορά την πρόβλεψη της θεωρίας ότι η κρίσιμη κλίμακα που διαχωρίζει την τοπική δυναμική από την μη-τοπική είναι η ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby, τα αποτελέσματα φαίνεται να την επιβεβαιώνουν. Ιδιαίτερα στις ανοιχτές υπολεκάνες, τα αποτελέσματα τόσο της σχετικής διασποράς όσο και του FSLE παρουσιάζουν μια ποιοτική διαφοροποίηση στην συμπεριφορά τους σε κλίμακες λίγο μεγαλύτερες από τη ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby. Οι περιπτώσεις που οι γραμμικές προσαρμογές σε παραπλήσιες κλίμακες που δεν ταιριάζουν με τις προβλέψεις της θεωρίας (όπως η αύξηση της σχετικής διασποράς ως νόμος δύναμης με εκθέτη  $a > 3$ ) μπορεί να ερμηνευτεί ως μια περεταίρω ένδειξη της μεταβατικότητας της δυναμικής σε αυτές τις κλίμακες.

Για πιο ευκολή σύγκριση μεταξύ των εποχών παραθέτουμε επίσης τη σχετική διασπορά και τον FSLE για κάθε εποχή στα ίδια διαγράμματα για κάθε υπολεκάνη:

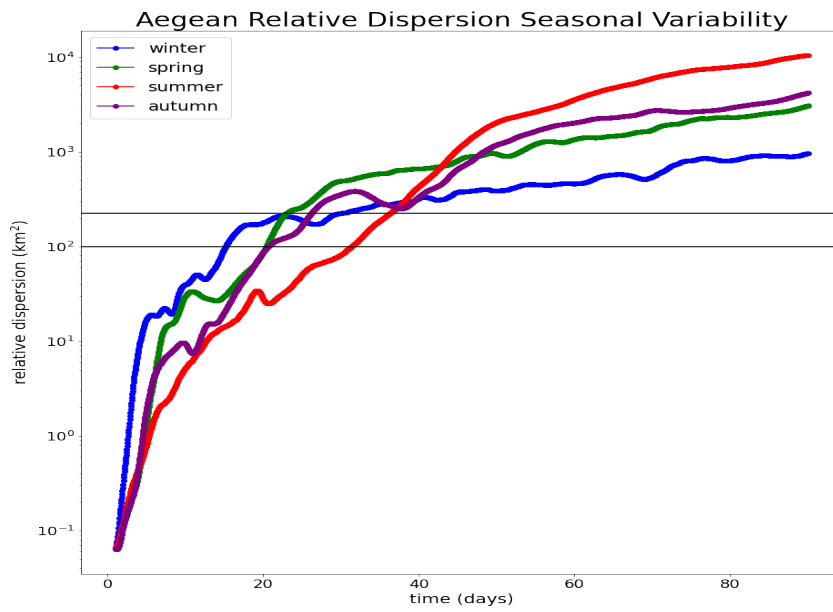


**Σχήμα 0.5.13:** Εποχικά διαγράμματα σχετικής διασποράς της Αδριατικής. Ο χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) απεικονίζεται με μπλε, η άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) με πράσινο, το καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) με κόκκινο και το φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) με μωβ.

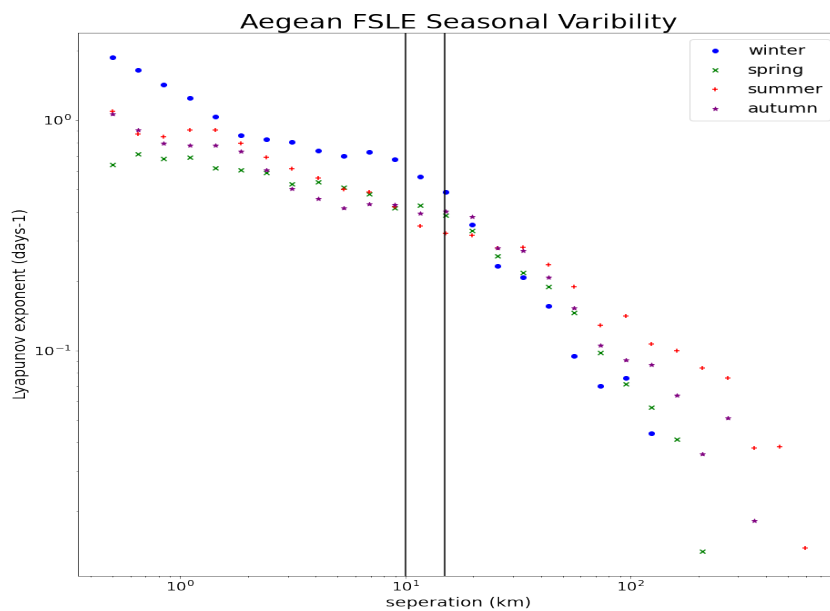


**Σχήμα 0.5.14:** Εποχικά διαγράμματα FSLE της Αδριατικής. Ο χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) απεικονίζεται με μπλε τελείες, η άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) με πράσινα x, το καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) με κόκκινους σταυρούς και το φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) με μωβ αστέρια.

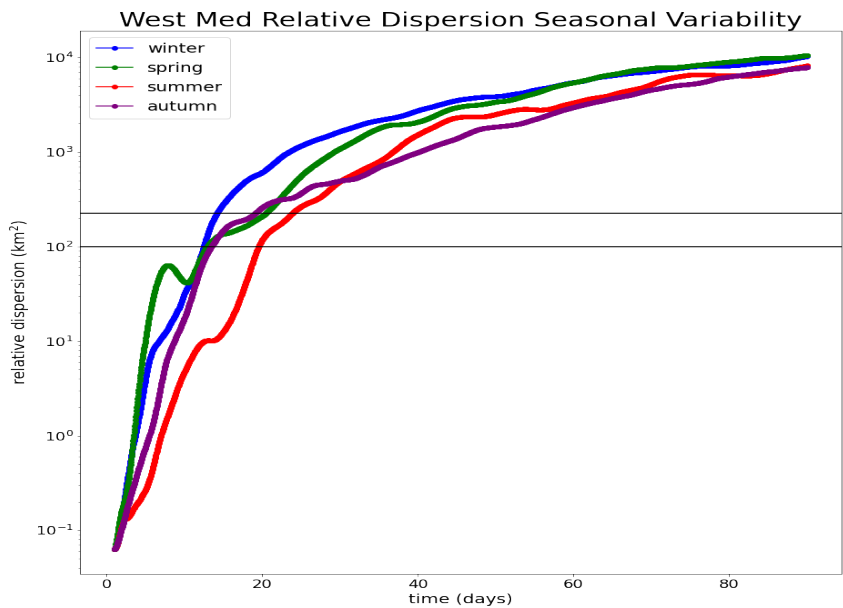




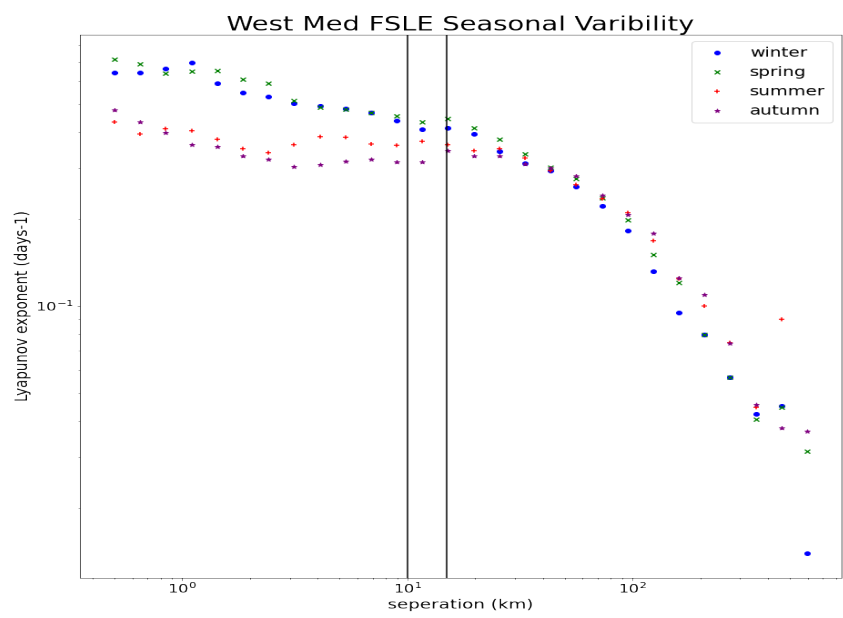
**Σχήμα 0.5.15:** Εποχικά διαγράμματα σχετικής διασποράς του Αιγαίου. Ο χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) απεικονίζεται με μπλε, η άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) με πράσινο, το καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) με κόκκινο και το φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) με μωβ.



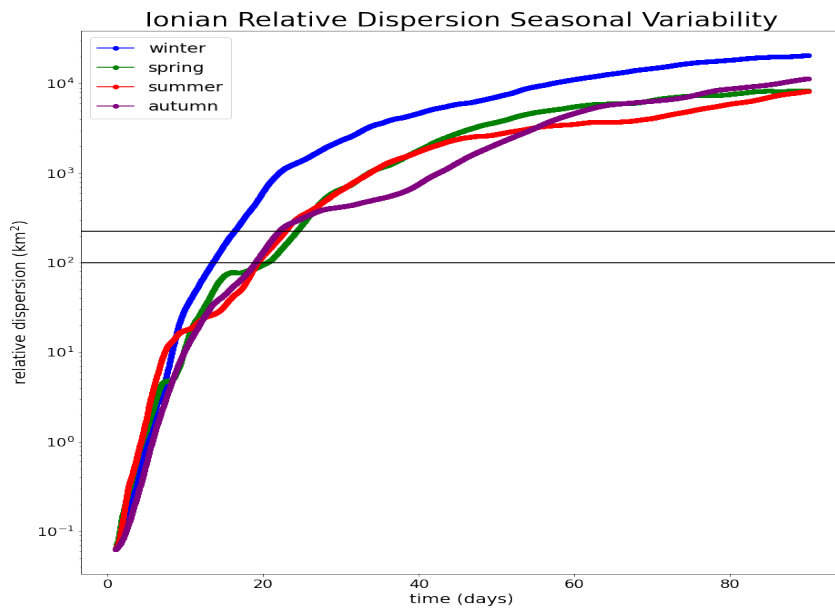
**Σχήμα 0.5.16:** Εποχικά διαγράμματα FSLE του Αιγαίου. Ο χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) απεικονίζεται με μπλε τελείες, η άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) με πράσινα x, το καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) με κόκκινους σταυρούς και το φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) με μωβ αστέρια.



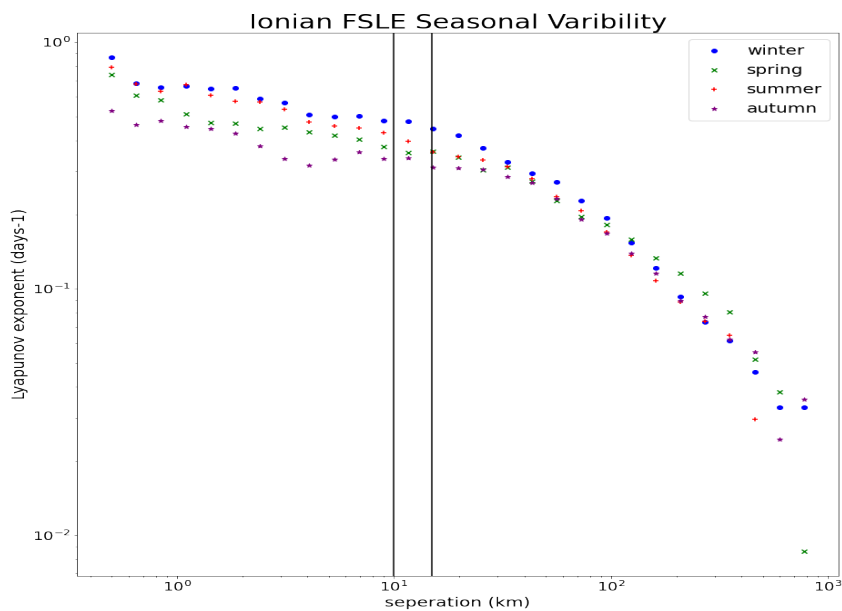
**Σχήμα 0.5.17:** Εποχικά διαγράμματα σχετικής διασποράς της δυτικής Μεσογείου. Ο χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) απεικονίζεται με μπλε, η άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) με πράσινο, το καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) με κόκκινο και το φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) με μωβ.



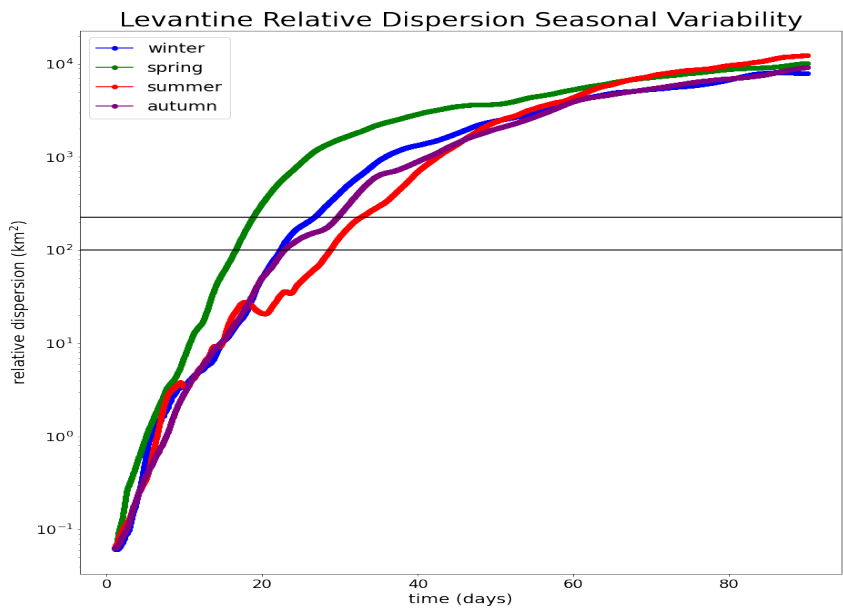
**Σχήμα 0.5.18:** Εποχικά διαγράμματα FSLE της δυτικής Μεσογείου. Ο χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) απεικονίζεται με μπλε τετράγωνα, η άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) με πράσινα x, το καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) με κόκκινους σταυρούς και το φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) με μωβ αστέρια.



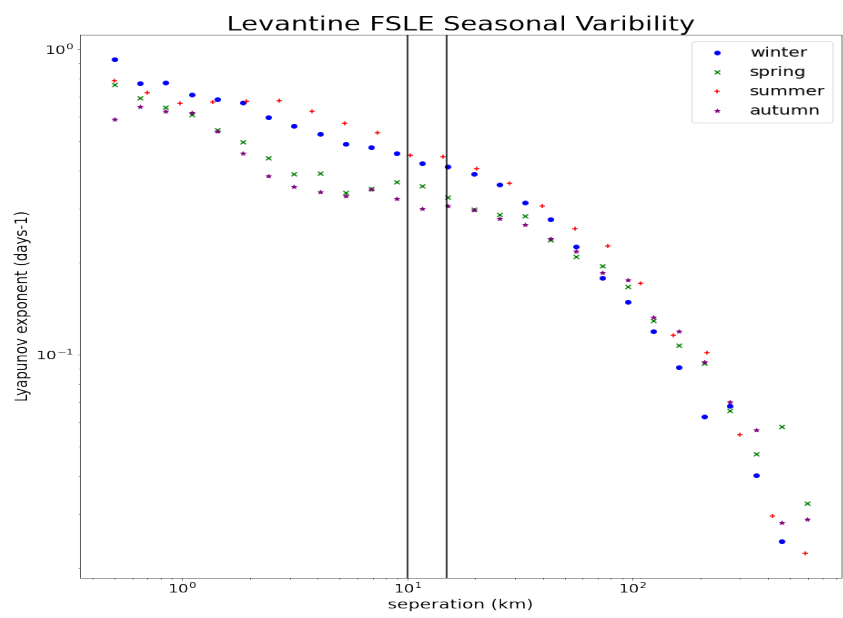
**Σχήμα 0.5.19:** Εποχικά διαγράμματα σχετικής διασποράς του Ιονίου. Ο χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) απεικονίζεται με μπλε, η άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) με πράσινο, το καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) με κόκκινο και το φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) με μωβ.



**Σχήμα 0.5.20:** Εποχικά διαγράμματα FSLE του Ιονίου. Ο χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) απεικονίζεται με μπλε τελείες, η άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) με πράσινα x, το καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) με κόκκινους σταυρούς και το φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) με μωβ αστέρια.



**Σχήμα 0.5.21:** Εποχικά διαγράμματα σχετικής διασποράς της Λεβαντίνης. Ο χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) απεικονίζεται με μπλε, η άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) με πράσινο, το καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) με κόκκινο και το φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) με μωβ.



**Σχήμα 0.5.22:** Εποχικά διαγράμματα FSLE της λεβαντίνης. Ο χειμώνας (Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος) απεικονίζεται με μπλε τελείες, η άνοιξη (Απρίλιος-Μάιος-Ιούνιος) με πράσινα x, το καλοκαίρι (Ιούλιος-Αύγουστος-Σεπτέμβριος) με κόκκινους σταυρούς και το φθινόπωρο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) με μωβ αστέρια.

Αρχικά οι διαφορές μπορεί να φαίνονται αμελητέες για τις περισσότερες υπολεκάνες, αλλά επειδή τα διαγράμματα είναι σε ημιλογαριθμική και λογαριθμική κλίμακα οι διαφορές δεν είναι ασήμαντες. Όλες οι υπολεκάνες, και ιδιαίτερα η ανοιχτές παρουσιάζουν ασυμπτωτικά την ίδια συμπεριφορά για τις πολύ μικρές και τις πολύ μεγάλες κλίμακες. Οι εποχικές διαφορές έγγυται στην ακριβή κλίμακα που λαμβάνει χώρα η κάθε δυναμική την κάθε εποχή και είναι ποσοτική όχι ποιοτική. Αυτές οι διαφοροποιήσεις είναι πιο μεγάλες στο Αιγαίο και στην Αδριατική απ' ό τι στις ανοιχτές υπολεκάνες.

Οι ποιοτικές διαφοροποιήσεις (διαφορετική κλίση) παρατηρούνται κυρίως στις ενδιάμεσες κλίμακες, συγκρίσιμες με την ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby, η οποία μεταβάλλεται εποχικά. Και σε αυτές τις κλίμακες οι ημικλειστές υπολεκάνες παρουσιάζουν μεγαλύτερη διαφοροποίηση, ενώ την ελάχιστη παρουσιάζουν το Ιονιο και η Λεβαντίνη.

Η μεγαλύτερη απόκλιση από την "τυπική" συμπεριφορά των μετρικών συμβαίνει στο Αιγαίο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Εκεί παρατηρούμε μια μετάβαση στη σχετική διασπορά από τις μικρότερες σε σχέση με τις άλλες εποχές κλίμακες στις μεγαλύτερες από κάθε άλλη εποχή στα τέλη του καλοκαιριού. Αυτή η απότομη αλλαγή οφείλεται στην εισροή νερών της Μαύρης Θάλασσας από το Στενό των Δαρδανελλίων, η οποία φτάνει το μέγιστό της κατά την περίοδο Αυγούστου-Σεπτεμβρίου.

## 0.6 Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Σε αυτή τη μελέτη στόχος μας ήταν να εξετάσουμε τη δυναμική της κυκλοφορίας της Μεσογείου από μια λαγκραντζιανή οπτική, καθώς και την εποχική μεταβλητότητα που αυτή η δυναμική παρουσιάζει, με σκοπό να αποκτήσουμε μια βαθύτερη κατανόηση των φυσικών διεργασιών που οδηγούν σε αυτή τη δυναμική και της μεταβολές της. Προσεγγίσαμε το αντικείμενο αυτής της μελέτης μέσω μιας σειράς πειραμάτων με εικονικούς drifters, σε συνδυασμό με τη χρήση δεδομένων από ένα σύγχρονο μοντέλο υψηλής ανάλυσης που μπορεί να απεικονίσει τη δυναμική των δινών χωρίς να τις παραμετροποιεί (eddy-resolving). Χρησιμοποιούμε διάφορες μετρικές που βασίζονται στη χρονική εξέλιξη της σχετικής απόστασης ζευγαριών drifters. Συνδέσαμε αυτές τις μετρικές με τη μορφή του ενεργειακού φάσματος, τις λαγκραντζιανές δομές του πεδίου ταχυτήτων που δρουν για να ενισχύσουν ή να αποδυναμώσουν τις διαδικασίες ανάμειξης και τις χωρικές κλίμακες στις οποίες εμφανίζονται αυτές οι δομές. Τέλος παρατηρήσαμε τις εποχικές μεταβολές αυτών των μετρικών και τις συνδέσαμε με φυσικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στη λεκάνη της Μεσογείου.

Αυτή η μελέτη αποτελεί ένα πρώτο βήμα στη λαγκραντζιανή μελέτη της Μεσογείου. Δείξαμε ότι οι λαγκραντζιανές μετρικές μπορούν να απεικονίσουν τις φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν στη Μεσόγειο. Όσον αφορά τις λαγκραντζιανές δομές της κυκλοφορίας, το επόμενο βήμα είναι να τις συνδέσουμε με πιο άμεσα παρατηρήσιμες φυσικές ποσότητες που λειτουργούν ως παθητικοί ιχνογράφοι (passive tracers) της λαγκραντζιανής κίνησης, όπως η επιφανειακή θερμοκρασία και η συγκέντρωση χλωροφύλλης, ώστε να μπορούμε να παρατηρήσουμε άμεσα την επίδραση αυτών των δομών στις διαδικασίες ανάμειξης. Επίσης, με τη χρήση πιο αυστηρών μετρικών μπορούμε να εξάγουμε το πλήθος, το μέγεθος και τη χρονική εξέλιξη των δινών που σχηματίζει η κυκλοφορία και να ερευνήσουμε την επίδραση που έχει η εποχική μεταβλητότητα σε αυτά τα χαρακτηριστικά τους.

[6] Όσον αφορά τις διαφορετικές δυναμικές κλίμακες της κυκλοφορίας, μια σειρά πειραμάτων με διαφορετική χωρική κατανομή των drifters ώστε να αποφευχθεί η πόντισή τους μέσα ή κοντά στην ισχυρή κυκλωνική κυκλοφορία στην περιφέρεια της Μεσογείου θα μας έδινε μια πιο καθαρή εικόνα για τη ύπαρξη ή όχι τοπικής δυναμικής στις μεγάλες κλίμακες. Μια επιπλέον σειρά πειραμάτων με μικρότερη αρχική απόσταση μεταξύ των drifter των ζευγαριών και με καλύτερη χρονική διακριτική ικανότητα θα παρείχε κατ' αντίστοιχο τρόπο μια πιο καθαρή εικόνα για την ύπαρξη ή όχι μη-τοπικής δυναμικής στις μικρές κλίμακες. Έχοντας αυτή την πιο καθαρή εικόνα της δυναμικής, μπορούμε να προχωρήσουμε σε υπολογισμούς κι άλλων λαγκραντζιανών στατιστικών παραμέτρων, όπως η διαχυτικότητα (diffusivity), και σύγκρισή τους με πειραματικά δεδομένα.

Έχοντας καλύτερη κατανόηση της δυναμικής στις διαφορετικές κλίμακες της κυκλοφορίας και τις δομές που αυτή η δυναμική δημιουργεί, μπορούμε να κάνουμε πιο έγγυρες προγνώσεις για την πορεία στο χώρο και την εξέλιξη στο χρόνο φαινομένων που αφορούν τη διασπορά ουσιών ή αντικειμένων στον ωκεανό όπως ο ευτροφισμός και οι πετρελαιοκηλίδες. Ταυτόχρονα, έχοντας καλύτερη κατανόηση των παραμέτρων που καθορίζουν την τροχιά των λαγκραντζιανών οργάνων μέτρησης όπως τους drifters, θα οδηγήσει σε καλύτερη χρήση των δεδομένων που καταγράφουν από μοντέλα πρόγνωσης, τα οποία χρησιμοποιούν λαγκραντζιανά δεδομένα για να βελτιώσουν τα αποτελέσματά τους.

# Βιβλιογραφία

- [1] Benoit-Cushman-Roisin, Jean-Marie Beckers, Introduction to Geophysical Fluid Dynamics, Second Edition
- [2] Samelson RM. Lagrangian motion, coherent structures, and lines of persistent material strain. *Ann Rev Mar Sci.* 2013;5:137-63. doi: 10.1146/annurev-marine-120710-100819. Epub 2012 Aug 16. PMID: 22809180.
- [3] Harrison, Paul. (2007). Dynamics of Marine Ecosystems: Biological–Physical Interactions in the Oceans. *Fisheries Oceanography.* 1. 111 - 112. 10.1111/j.1365-2419.1992.tb00029.x.
- [4] M.E. McIntyre, On the Antarctic ozone hole, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Volume 51, Issue 1, 1989, Pages 29-43, ISSN 0021-9169, [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(89\)90071-8](https://doi.org/10.1016/0021-9169(89)90071-8).
- [5] TRANSPORT BY COHERENT BAROTROPIC VORTICES *Annual Review of Fluid Mechanics* Vol. 31:55-93 (Volume publication date January 1999) <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.31.1.5>
- [6] Haller, George. (2015). Lagrangian Coherent Structures. *Annual Review of Fluid Mechanics.* 47. 137-162. 10.1146 DOI: 10.1146/annurev-fluid-010313-141322
- [7] Hussain A K M F 1983 Coherent structures reality and myth *Phys. Fluids* 26 2816-50 <https://doi.org/10.1063/1.864048>
- [8] Claude Millot, Isabelle Taupier-Letage. Circulation in the Mediterranean Sea: Updated description and schemas of the circulation of the water masses in the whole Mediterranean Sea.. A. Saliot. *The Mediterranean Sea, The Mediterranean Sea (5-K)*, Springer, pp.29-66, 2005, Handbook of Environmental Chemistry, 9783540314929 • 9783540250180. [ff10.1007/b107143ff](https://doi.org/10.1007/b107143ff). [ffhal-01191856](https://doi.org/10.1007/b107143ff)
- [9] Malanotte-Rizzoli, P., V. Artale, G. L. Borzelli-Eusebi, S. Brenner, A. Crise, M. Gacic, N. Kress, et al. "Physical Forcing and Physical/ biochemical Variability of the Mediterranean Sea: a Review of Unresolved Issues and Directions for Future Research." *Ocean Sci.* 10, no. 3 (May 6, 2014): 281–322
- [10] Poulain P.-M., Menna M. and Mauri E.; 2012: Surface geostrophic circulation of the Mediterranean Sea derived from drifter and satellite altimeter data. *Phys. Oceanogr.*, 42, 973-990.
- [11] "NEMO ocean engine", Gurvan Madec and NEMO System Team, Scientific Notes of Climate Modelling Center (27) – ISSN 1288-1619, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) DOI 10.5281/zenodo.1464816
- [12] Amante, C; Eakins, B W (2009): ETOPO1 Global Relief Model converted to PanMap layer format. NOAA-National Geophysical Data Center, PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.769615>  
bibitemDussin2016 Dussin, R., Barnier, B., Brodeau, L., Molines, J. M. (2016). The making of the Drakkar Forcing Set DFS5. *DRAKKAR/MyOcean Rep.* 01–04,16, Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (LGGE), Grenoble, France.
- [13] Large, W. G., Yeager, S. (2004). Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea-ice models: The data sets and flux climatologies (No. NCAR/TN-460+STR). University Corporation for Atmospheric Research. doi:10.5065/D6KK98Q6
- [14] GRDC (2014): Global Freshwater Fluxes into the World Oceans / Online provided by Global Runoff Data Centre. 2014 ed. Koblenz: Federal Institute of Hydrology (BfG), 2014.
- [15] VERVATIS, V., SKLIRIS, N., SOFIANOS, S. (2014). INTER-annual/decadal variability of the north Aegean Sea hydrodynamics over 1960-2000. *Mediterranean Marine Science*, 15(4), 696-705. doi:<https://doi.org/10.12681/mms.852>

- [16] Locarnini, R. A., A. V. Mishonov, J. I. Antonov, T. P. Boyer, H. E. Garcia, O. K. Baranova, M. M. Zweng, C. R. Paver, J. R. Reagan, D. R. Johnson, M. Hamilton, and D. Seidov, 2013. World Ocean Atlas 2013, Volume 1: Temperature. S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 73, 40 pp.
- [17] Zweng, M.M, J.R. Reagan, J.I. Antonov, R.A. Locarnini, A.V. Mishonov, T.P. Boyer, H.E. Garcia, O.K. Baranova, D.R. Johnson, D.Seidov, M.M. Biddle, 2013. World Ocean Atlas 2013, Volume 2: Salinity. S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 74, 39 pp.
- [18] Parcels v0.9: prototyping a Lagrangian Ocean Analysis framework for the petascale age Lange, M and E van Sebille (2017), *Geoscientific Model Development*, 10, 4175-4186
- [19] The Parcels v2.0 Lagrangian framework: new field interpolation schemes Delandmeter, P and E van Sebille (2019), *Geoscientific Model Development*, 12, 3571–3584
- [20] Steven H. Strogatz (1994). *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology chemistry and engineering*. Addison Wesley. ISBN 978-0-201-54344-5.
- [21] S. Wiggins, “The dynamical systems approach to Langrangian transport in oceanic flows,” *Annu. Rev. Fluid Mech.* 0066-4189 37, 295 (2005).
- [22] J. M. Ottino, *The Kinematics of Mixing: Stretching, Chaos, and Transport* (Cambridge University Press, Cambridge, 1989).
- [23] Joseph B, Legras B. 2002. Relation between kinematic boundaries, stirring, and barriers for the Antarctic polar vortex. *J. Atmos. Sci.* 59:1198–212
- [24] Haller G, Poje A. 1998. Finite time mixing in aperiodic flows. *Physica D* 119:352–80
- [25] Kazuyuki Yagasaki (2008) Invariant manifolds and control of hyperbolic trajectories on infinite- or finite-time intervals, *Dynamical Systems: An International Journal*, 23:3, 309-331, DOI: 10.1080/14689360802263571
- [26] Bowman K. 2000. Manifold geometry and mixing in observed atmospheric flows. Unpublished manuscript, Texas A and M Univ
- [27] d’Ovidio F, Fernandez V, Hernandez-Garcia E, Lopez C. 2004. Mixing structures in the Mediterranean Sea from finite size Lyapunov exponents. *Geophys. Res. Lett.* 31:L17203
- [28] Beuvier, J., and Coauthors, 2012: MED12, oceanic component for the modeling of the regional Mediterranean Earth system. *Mercator Ocean Quarterly Newsletter*, No. 46, Mercator Océan, Toulouse, France, 60–66.
- [29] Rypina I, Pratt L, Pullen J, Levin J, Gordon A. 2010. Chaotic advection in an archipelago. *J. Phys. Oceanogr.* 40:1988–2006
- [30] Early JJ, Samelson RM, Chelton DB. 2011. The evolution and propagation of quasi-geostrophic ocean eddies. *J. Phys. Oceanogr.* 41:1535–55
- [31] The Ring Group. 1981. Gulf Stream cold-core rings: their physics, chemistry and biology. *Science*, Vol. 212;1091-1100.
- [32] Kolmogorov, A.N., 1941. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds number. *Doklady Akademii Nauk SSSR* 30, 9–13
- [33] Batchelor, G.K., 1953. *The Theory of Homogeneous Turbulence*. Cambridge University Press. p. 197
- [34] Charney, J., 1971. Geostrophic turbulence. *Journal of Atmospheric Sciences* 28, 1087–1095
- [35] Kraichnan, R.H., 1967. Inertial ranges of two dimensional turbulence. *Physics of Fluids* 10, 1417–1423.
- [36] Fjørtoft, R.: On the changes in the spectral distribution of kinetic energy for twodimensional, nondivergent flow, *Tellus*, 5, 225–230, 1953.
- [37] Bennett, A.F., 1984. Relative dispersion: local and nonlocal dynamics. *Journal of Atmospheric Sciences* 41, 1881–1886

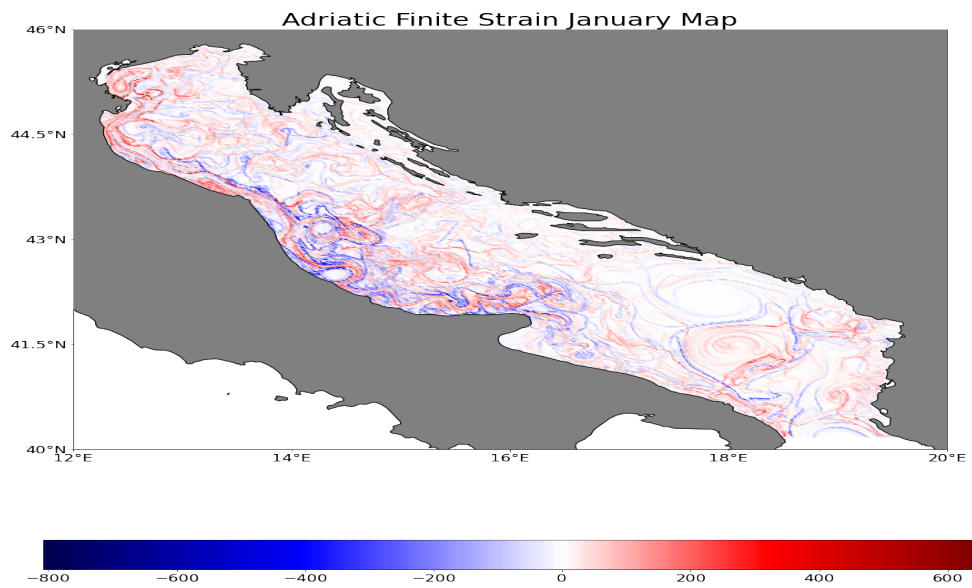
- [38] Richardson, L.F., 1926. Atmospheric diffusion on a distance–neighbour graph. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A* 110, 709–737.
- [39] Lin, J.-T., 1972. Relative dispersion in the enstrophy-cascading inertial range of homogeneous two-dimensional turbulence. *Journal of Atmospheric Sciences* 29, 394–395
- [40] Lichtenberg, A.J., Lieberman, M.A., 1992. *Regular and Chaotic Dynamics*. SpringerVerlag. p. 714.
- [41] Bennett, A.F., 1987. A Lagrangian analysis of turbulent diffusion. *Reviews of Geophysics* 25 (4), 799–822.
- [42] J.H. LaCasce, Statistics from Lagrangian observations, *Progress in Oceanography*, ISSN 0079-6611, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.02.002>.
- [43] Haza, A.C., Poje, A.C., Özgökmen, T.M. and Miller, P. in press. Relative dispersion from a high-resolution coastal model of the Adriatic Sea. *Ocean Modelling*.
- [44] LaCasce, J.H., Bower, A., 2000. Relative dispersion in the subsurface North Atlantic. *Journal of Marine Research* 58, 863–894.
- [45] LaCasce, J.H., Bower, A., 2000. Relative dispersion in the subsurface North Atlantic. *Journal of Marine Research* 58, 863–894
- [46] Ollitrault, M., Gabillet, C., Colin de Verdiere, A., 2005. Open ocean regimes of relative dispersion. *Journal of Fluid Mechanics* 533, 381–407
- [47] Artale, V., Boffetta, G., Celani, A., Cencini, M., Vulpiani, A., 1997. Dispersion of passive tracers in closed basins: beyond the diffusion coefficient. *Physics of Fluids* 9, 3162–3171.
- [48] Aurell, E., Boffetta, G., Crisanti, A., Paladin, G., Vulpiani, A., 1997. Predictability in the large: an extension of the concept of Lyapunov exponent. *Journal Physics A: Mathematical General* 30, 1–26
- [49] LaCasce, J.H., Ohlmann, C., 2003. Relative dispersion at the surface of the Gulf of Mexico. *Journal of Marine Research* 61, 285–312.



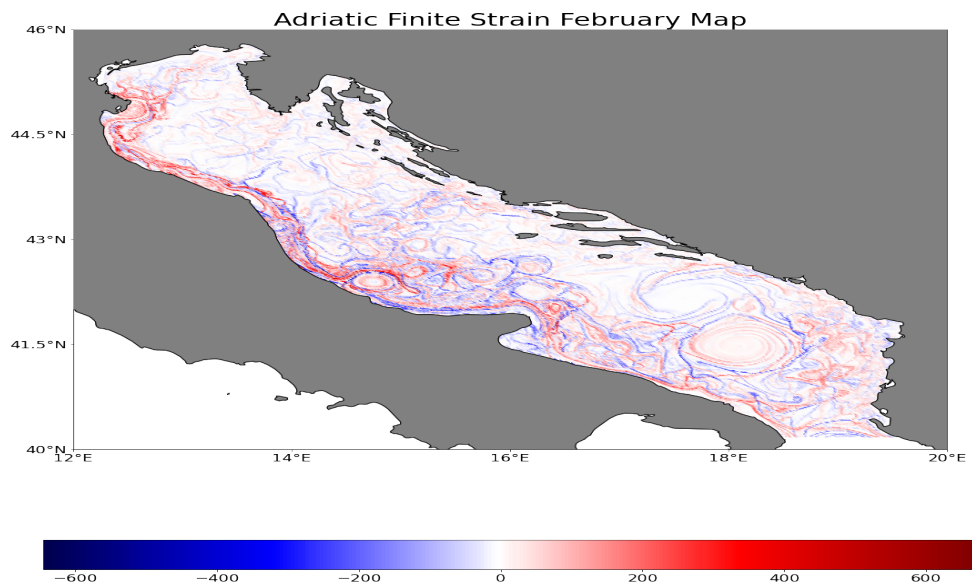
# Appendices

## .1 Finite Strain Maps

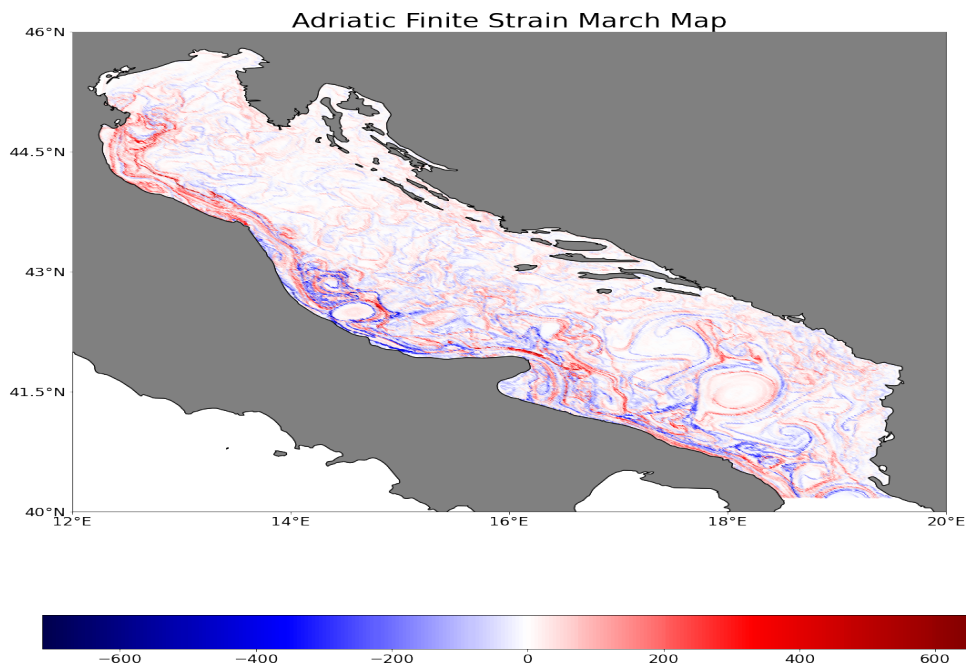
### .1.1 Αδριατική



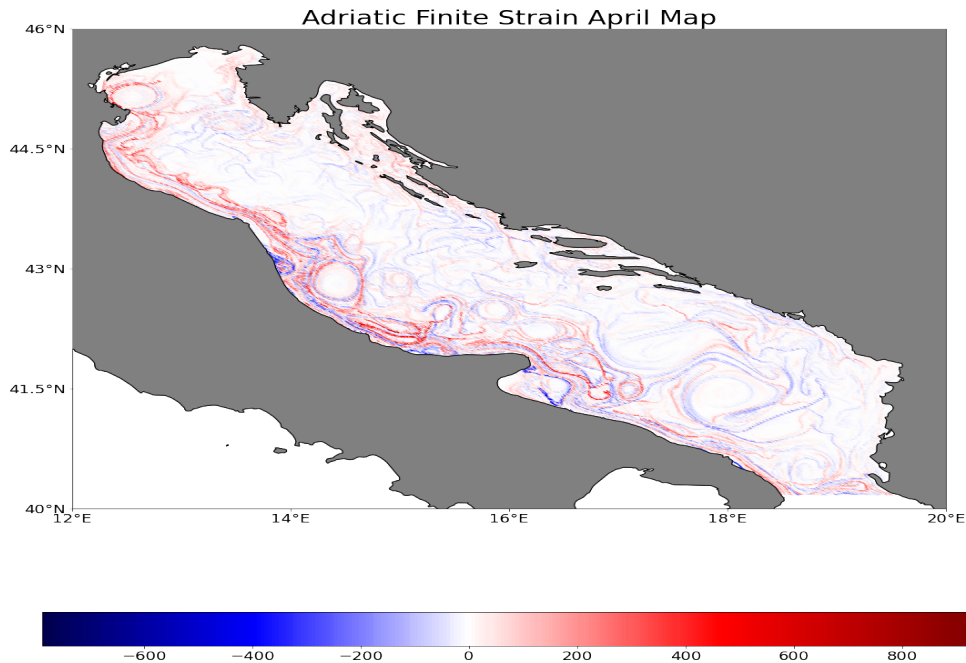
**Σχήμα .1.1:** Κατανομή *finite strain* στην Αδριατική κατά το μήνα Ιανουάριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



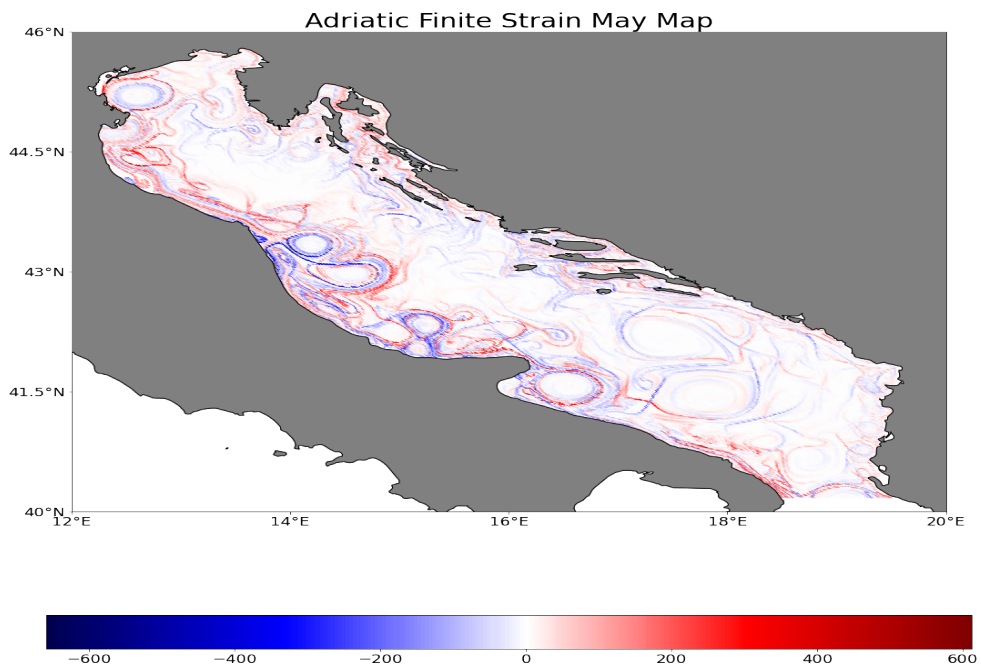
**Σχήμα .1.2:** Κατανομή *finite strain* στην Αδριατική κατά το μήνα Φεβρουάριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



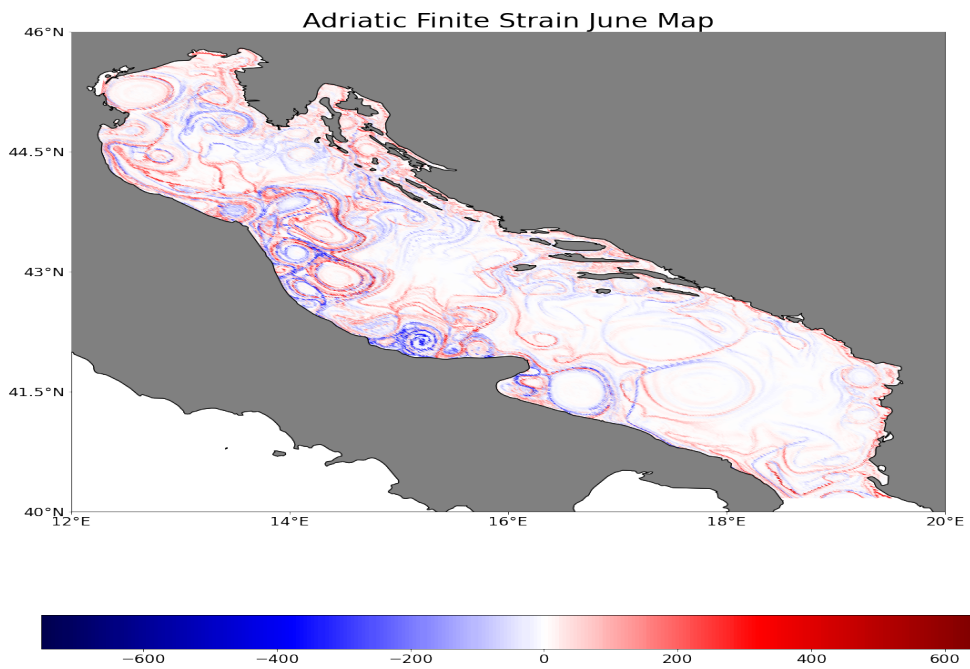
**Σχήμα .1.3:** Κατανομή *finite strain* στην Αδριατική κατά το μήνα Μάρτιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



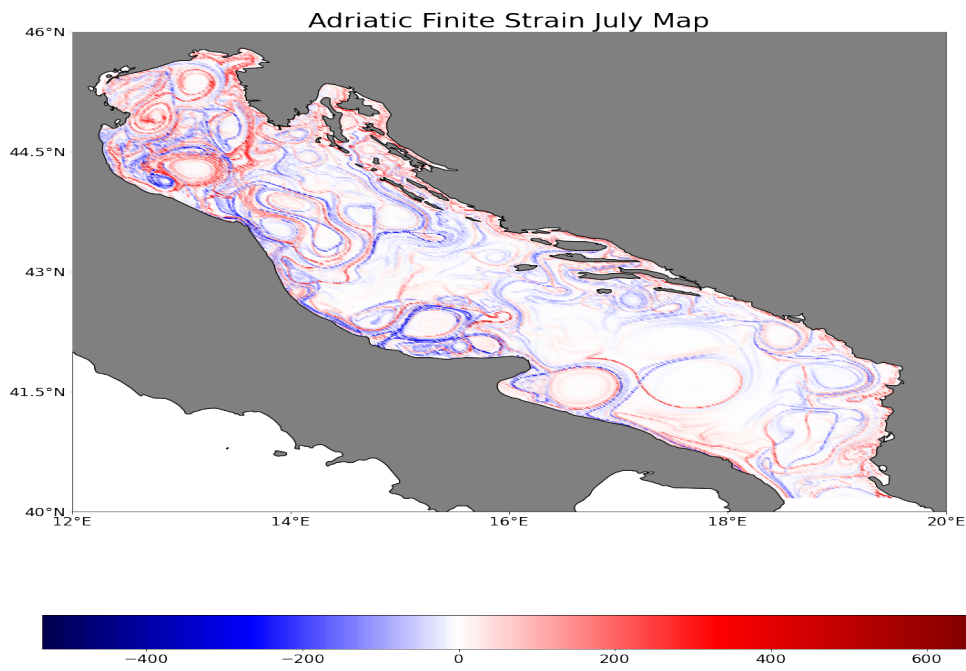
**Σχήμα .1.4:** Κατανομή *finite strain* στην Αδριατική κατά το μήνα Απρίλιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



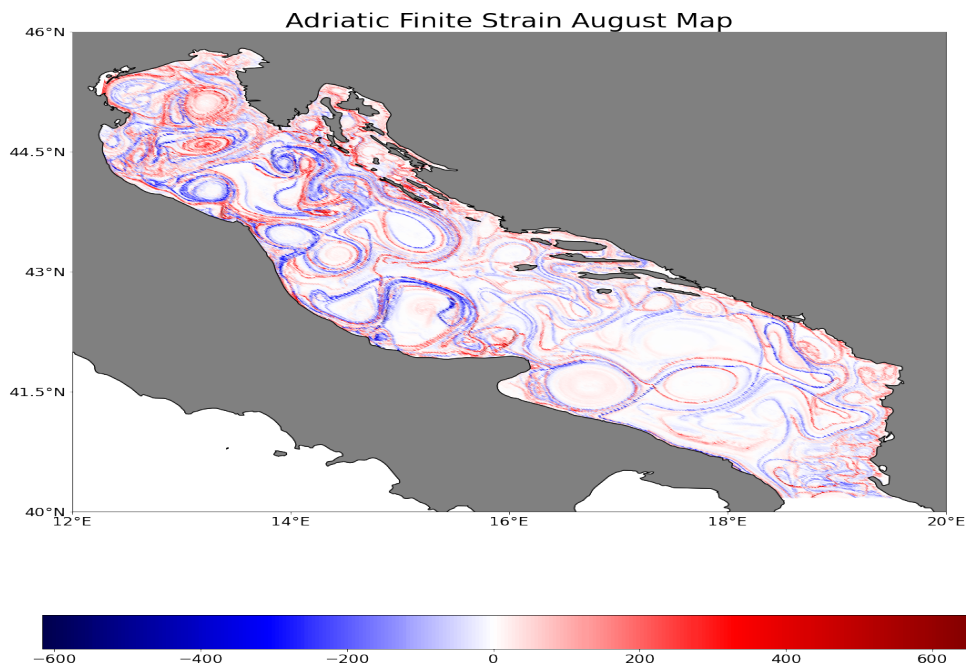
**Σχήμα .1.5:** Κατανομή *finite strain* στην Αδριατική κατά το μήνα Μάιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



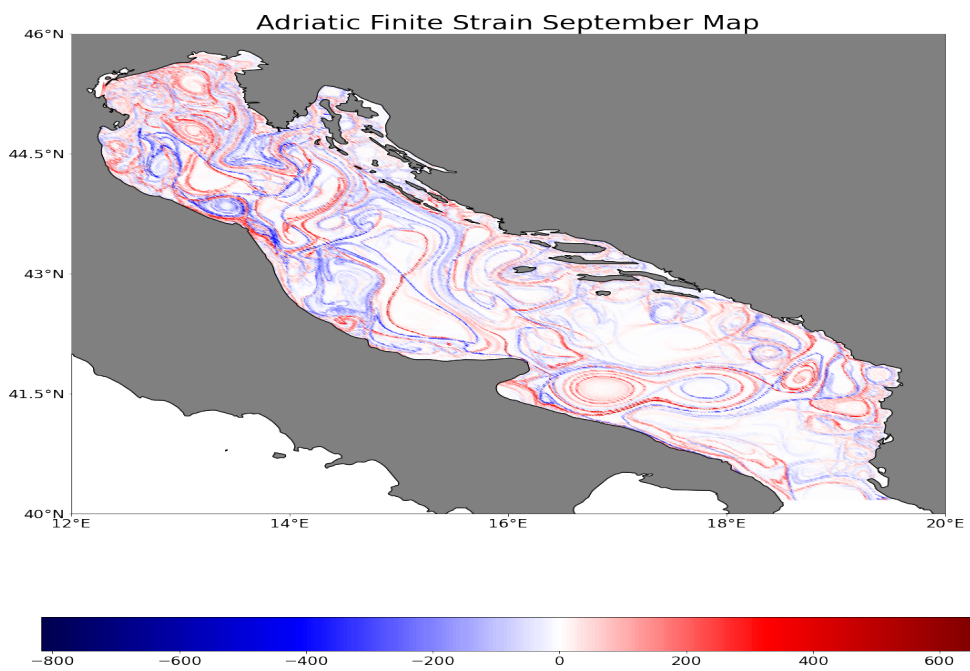
**Σχήμα .1.6:** Κατανομή *finite strain* στην Αδριατική κατά το μήνα Ιούνιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



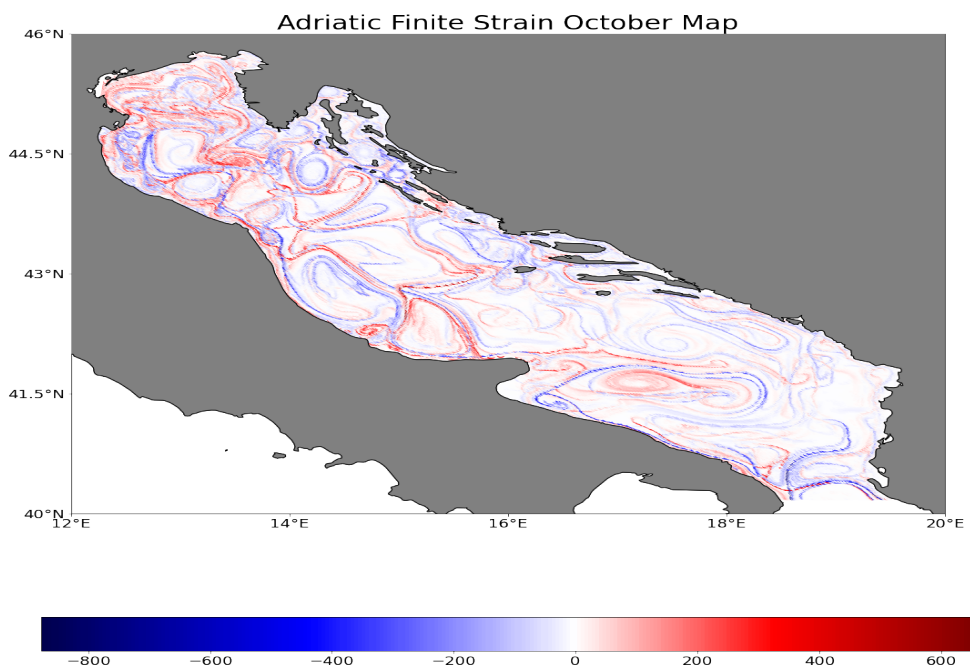
**Σχήμα .1.7:** Κατανομή *finite strain* στην Αδριατική κατά το μήνα Ιούλιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



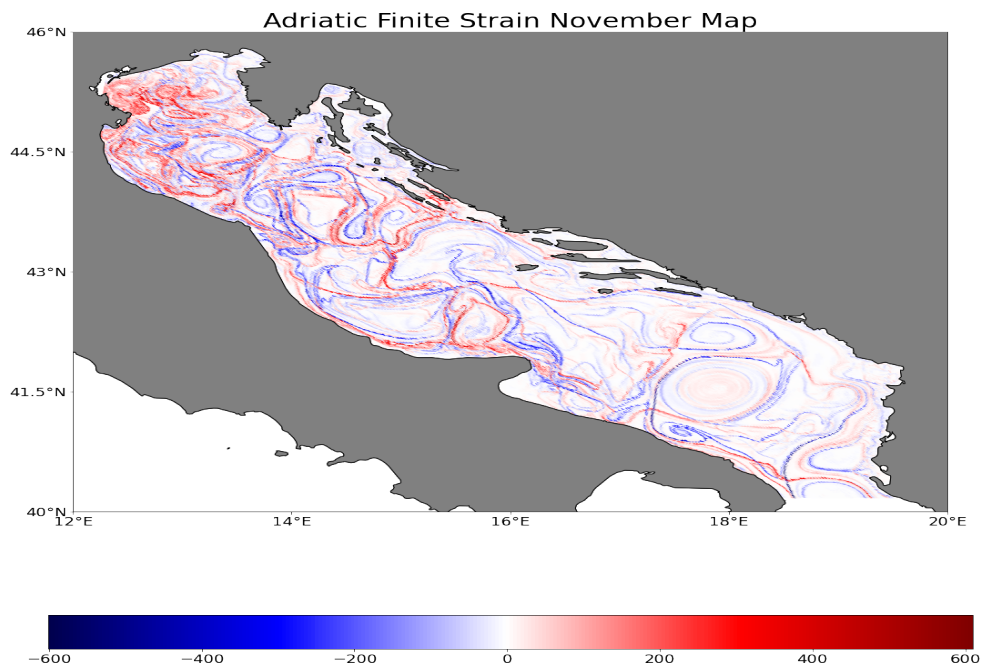
**Σχήμα .1.8:** Κατανομή *finite strain* στην Αδριατική κατά το μήνα Αύγουστο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



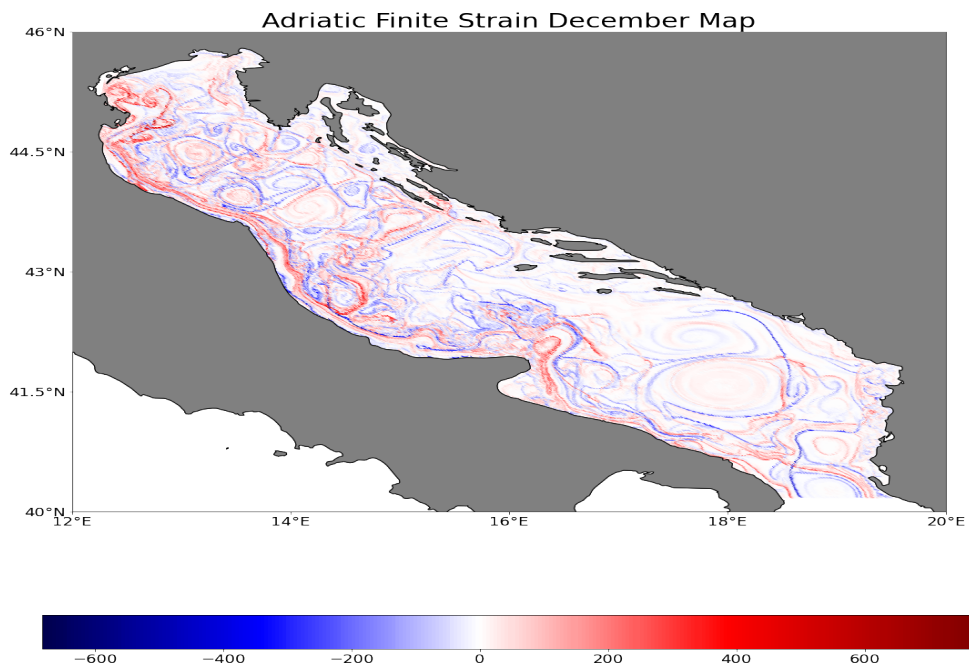
**Σχήμα .1.9:** Κατανομή *finite strain* στην Αδριατική κατά το μήνα Σεπτέμβριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



**Σχήμα .1.10:** Κατανομή *finite strain* στην Αδριατική κατά το μήνα Οκτώβριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.

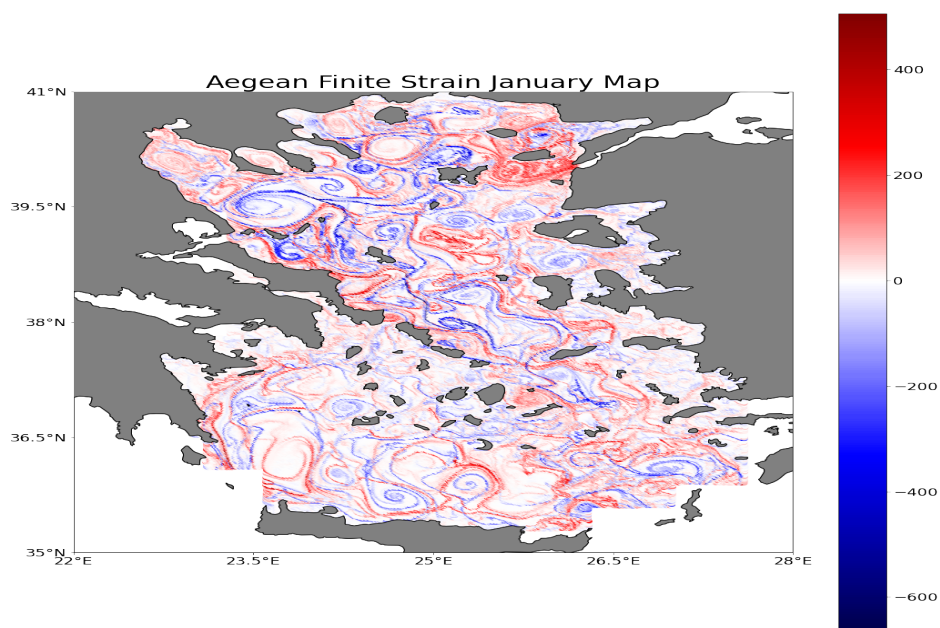


**Σχήμα .1.11:** Κατανομή *finite strain* στην Αδριατική κατά το μήνα Νοέμβριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.

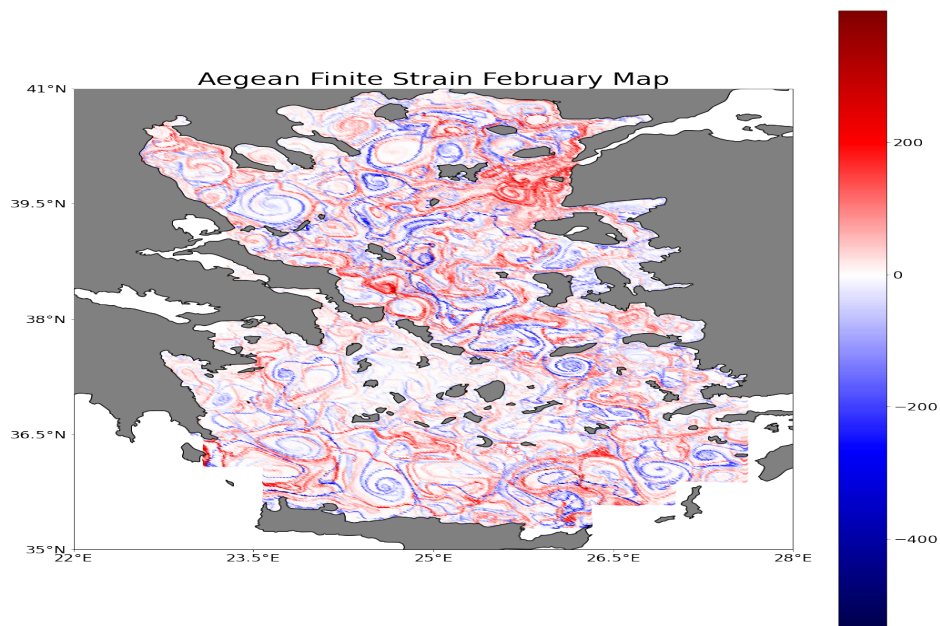


**Σχήμα .1.12:** Κατανομή *finite strain* στην Αδριατική κατά το μήνα Δεκέμβριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.

## .1.2 Αιγαίο

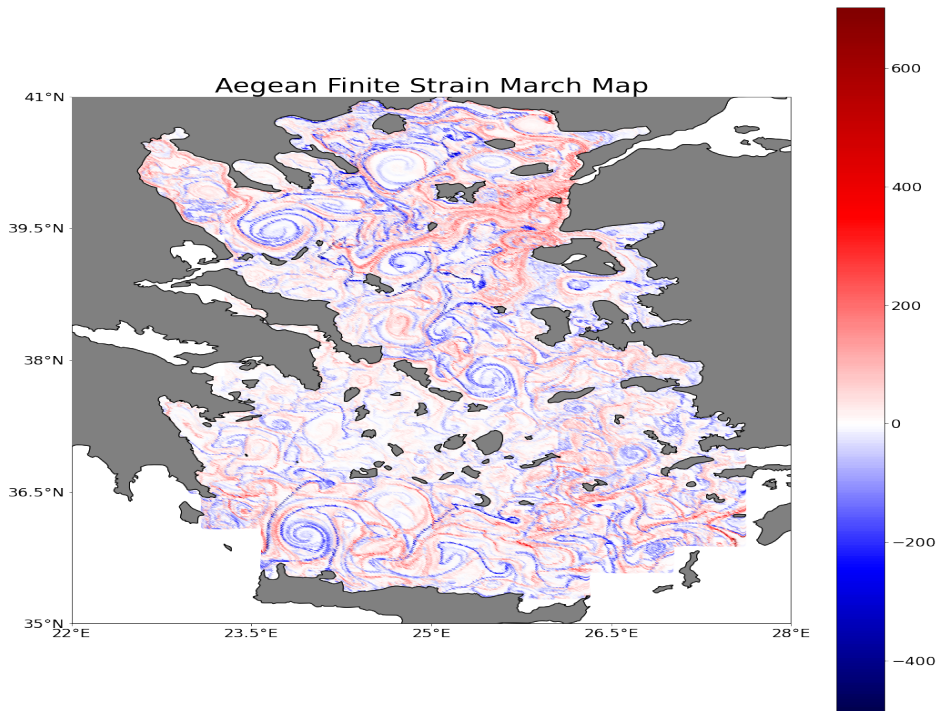


**Σχήμα .1.13:** Κατανομή *finite strain* στο Αιγαίο κατά το μήνα Ιανουάριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.

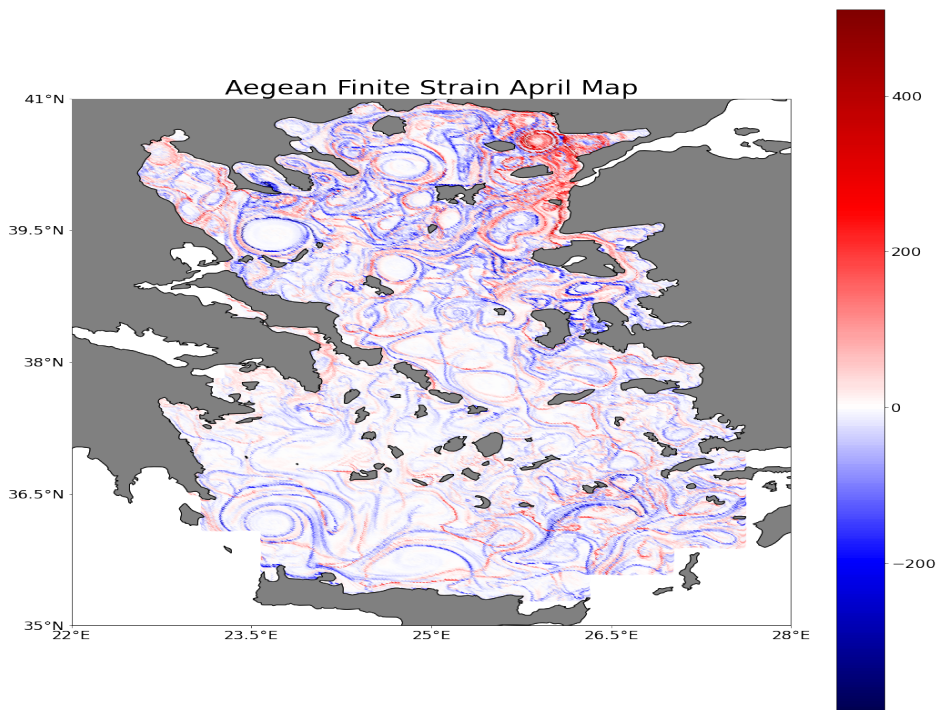


**Σχήμα .1.14:** Κατανομή *finite strain* στο Αιγαίο κατά το μήνα Φεβρουάριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.

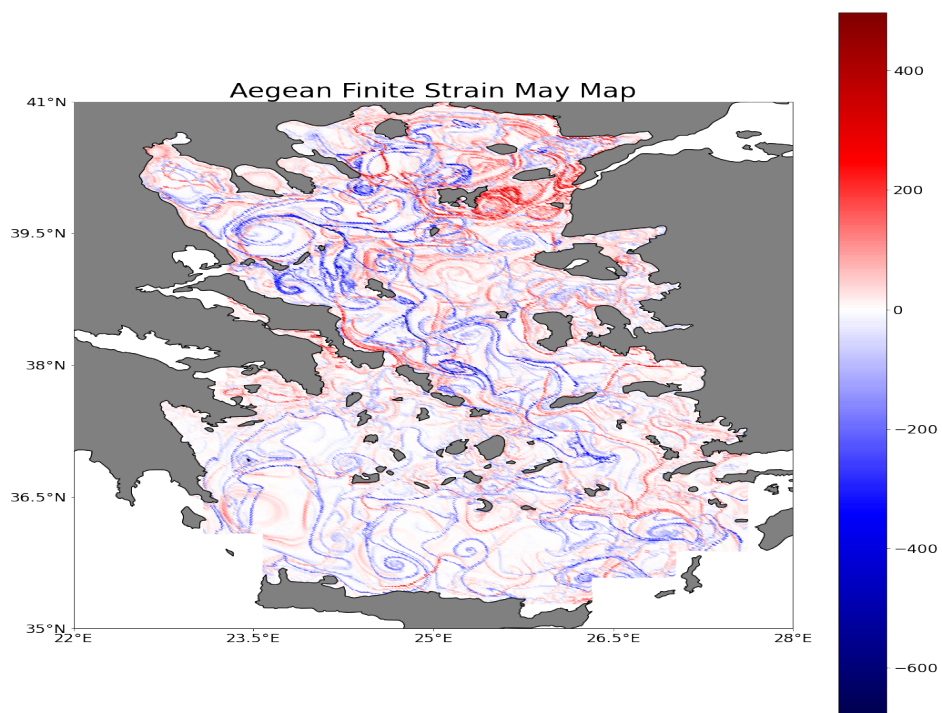




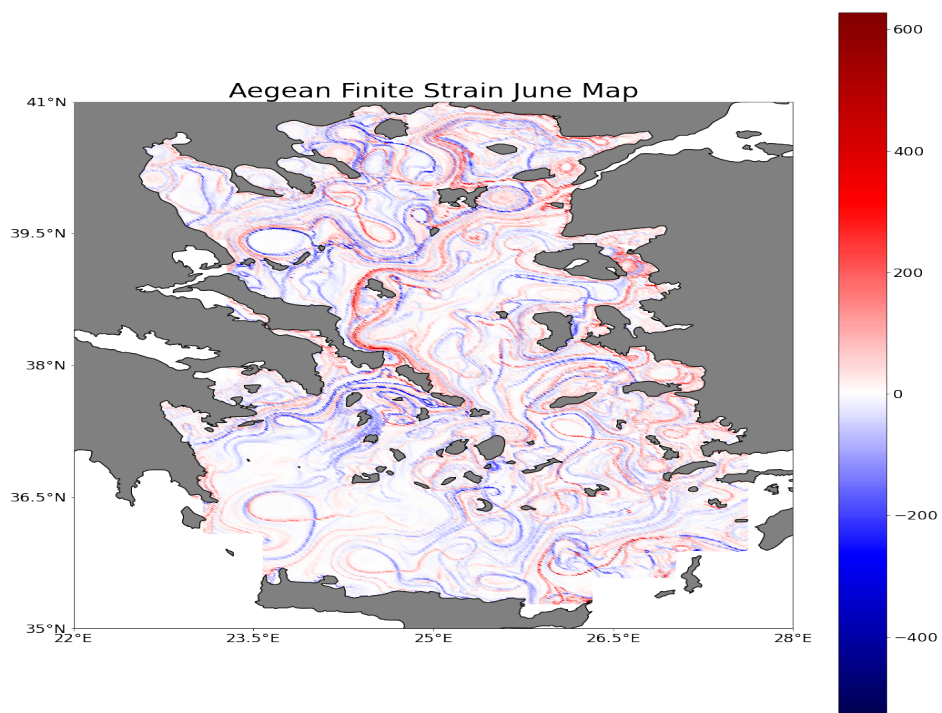
**Σχήμα .1.15:** Κατανομή *finite strain* στο Αιγαίο κατά το μήνα Μάρτιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



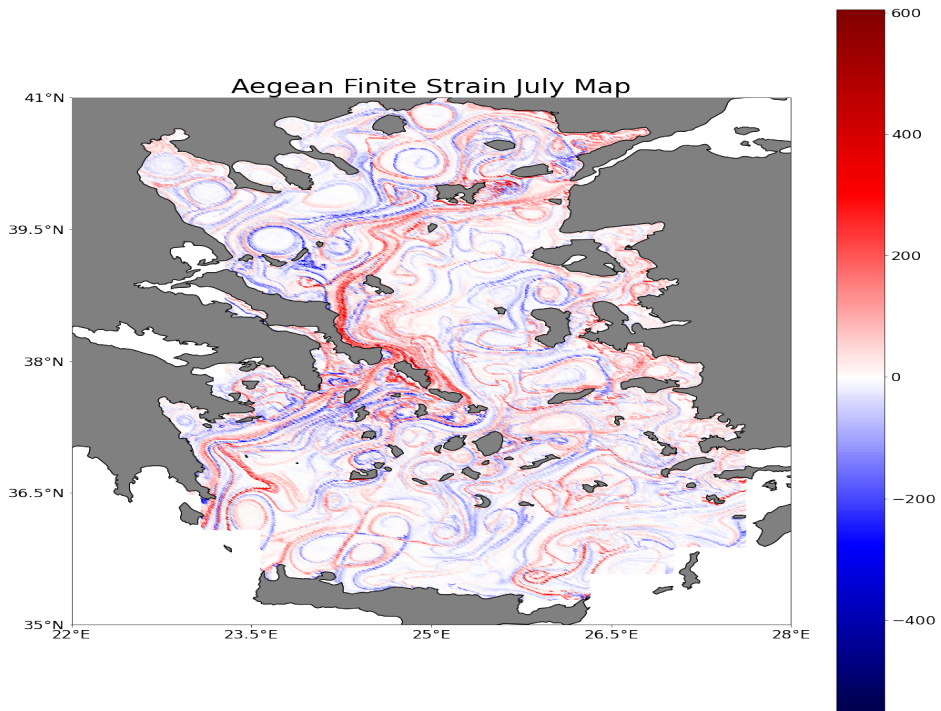
**Σχήμα .1.16:** Κατανομή *finite strain* στο Αιγαίο κατά το μήνα Απρίλιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



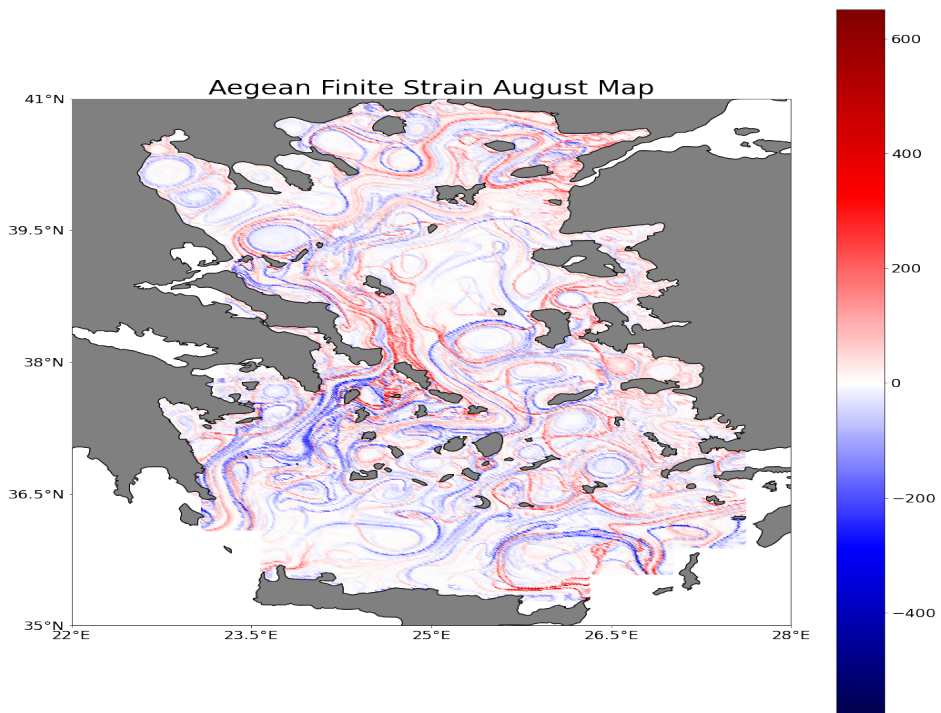
**Σχήμα .1.17:** Κατανομή *finite strain* στο Αιγαίο κατά το μήνα Μάιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



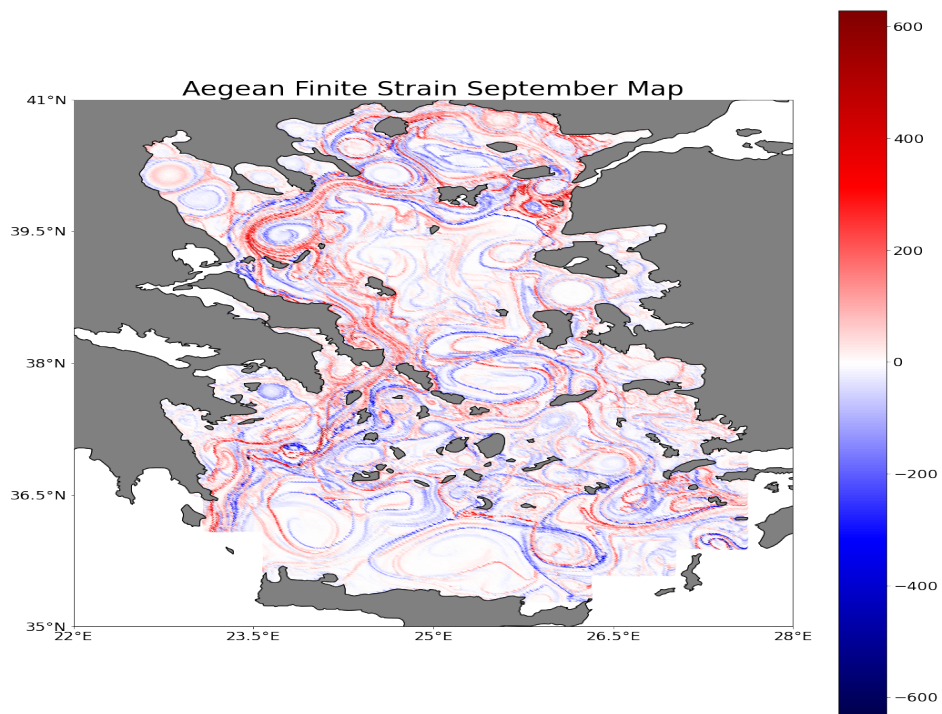
**Σχήμα .1.18:** Κατανομή *finite strain* στο Αιγαίο κατά το μήνα Ιούνιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



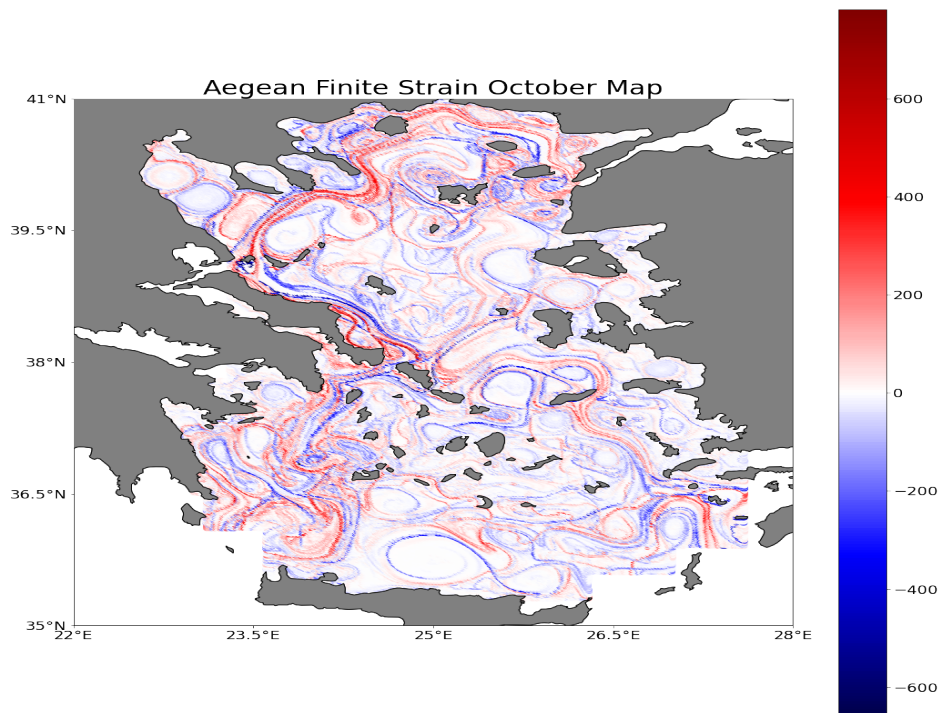
**Σχήμα .1.19:** Κατανομή *finite strain* στο Αιγαίο κατά το μήνα Ιούλιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



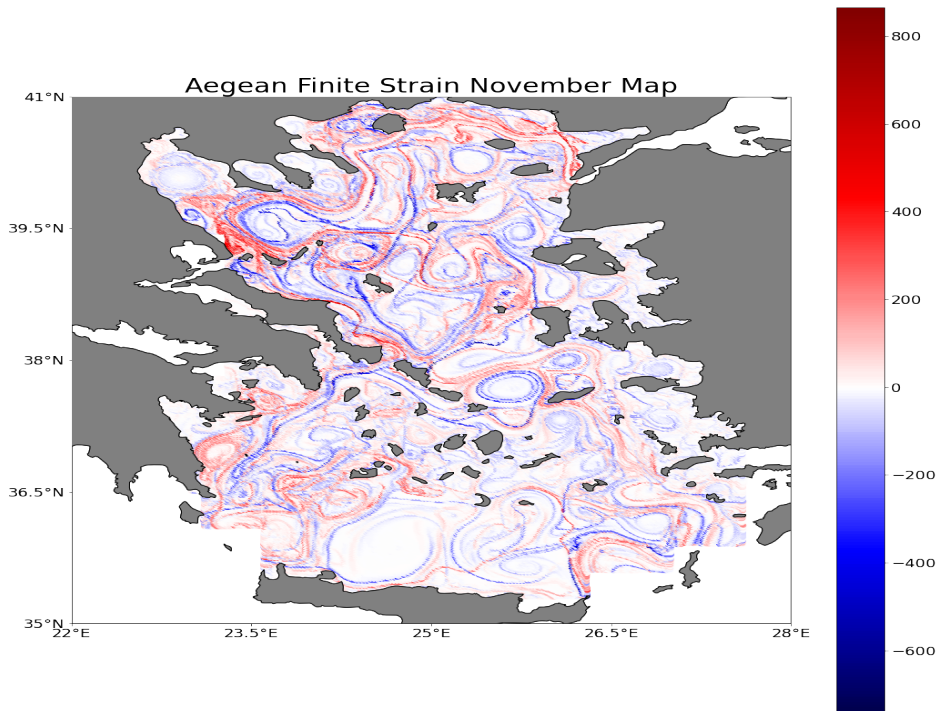
**Σχήμα .1.20:** Κατανομή *finite strain* στο Αιγαίο κατά το μήνα Αύγουστο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



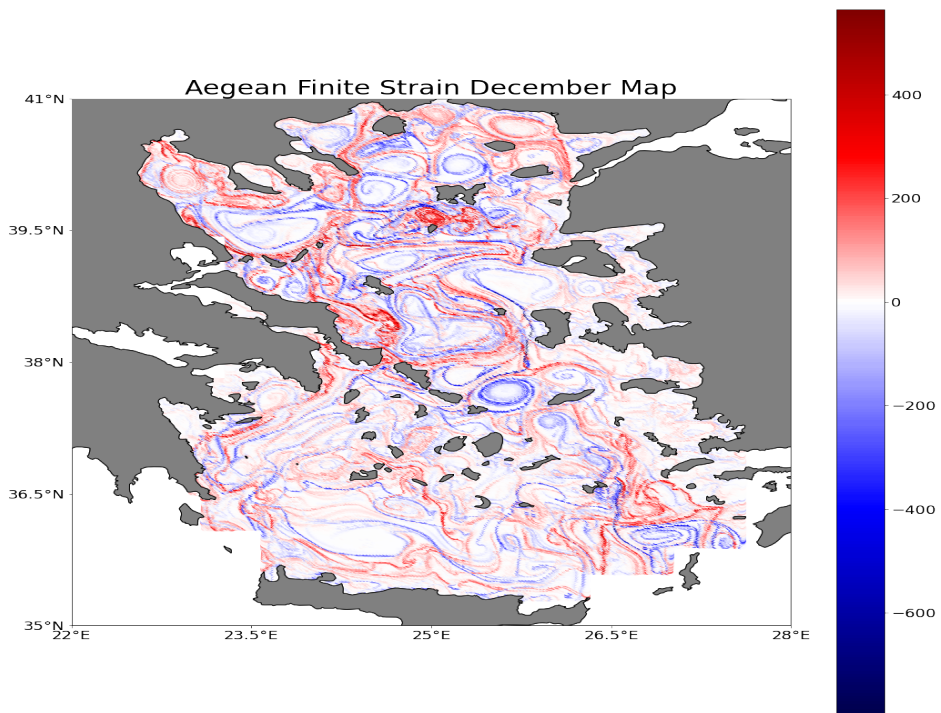
**Σχήμα .1.21:** Κατανομή *finite strain* στο Αιγαίο κατά το μήνα Σεπτέμβριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



**Σχήμα .1.22:** Κατανομή *finite strain* στο Αιγαίο κατά το μήνα Οκτώβριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.

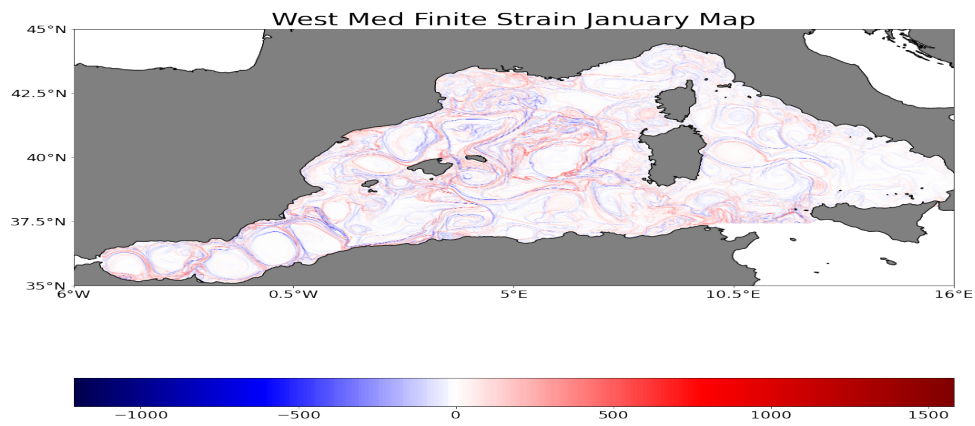


**Σχήμα .1.23:** Κατανομή *finite strain* στο Αιγαίο κατά το μήνα Νοέμβριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.

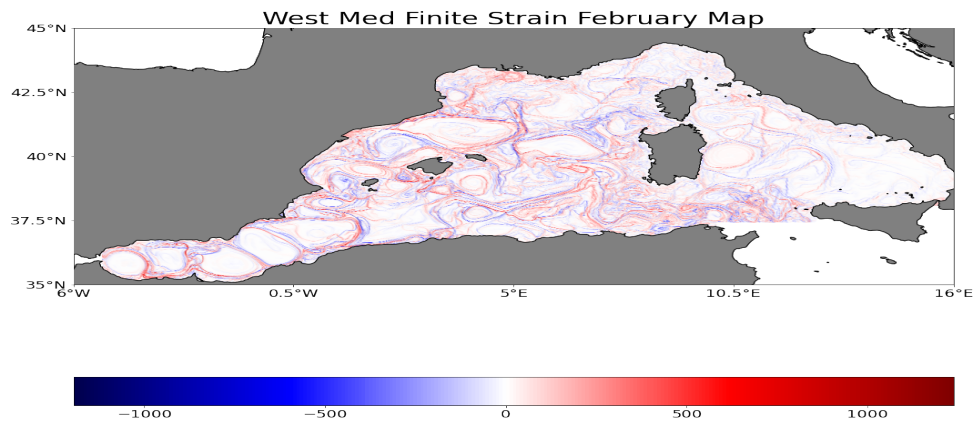


**Σχήμα .1.24:** Κατανομή *finite strain* στο Αιγαίο κατά το μήνα Δεκέμβριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.

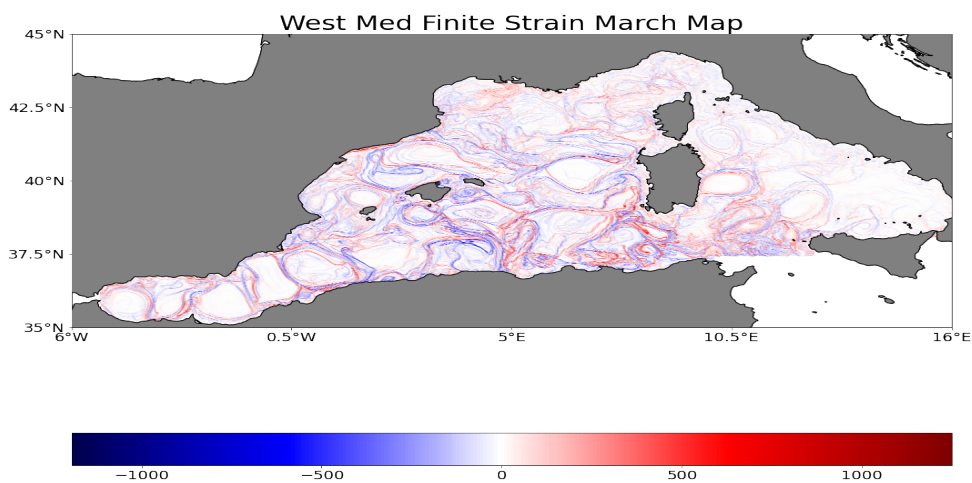
### .1.3 Δυτική Μεσόγειος



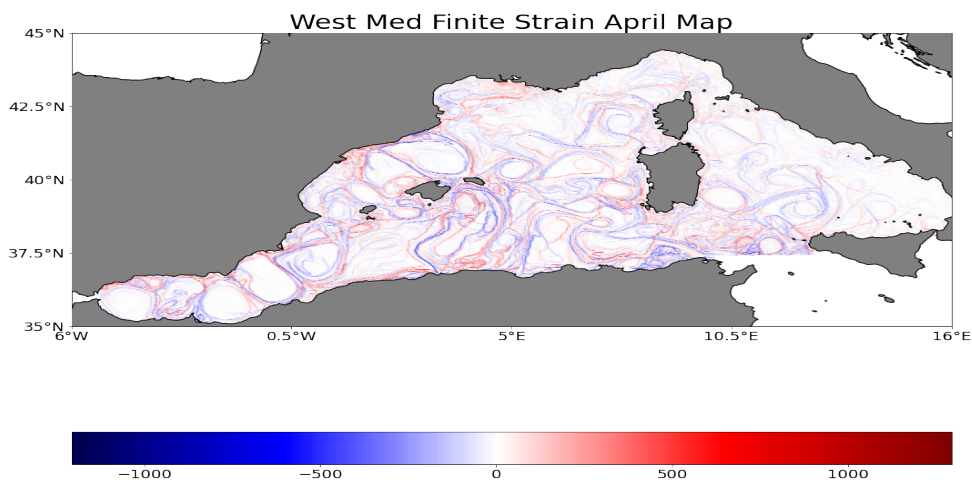
**Σχήμα .1.25:** Κατανομή *finite strain* στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Ιανουάριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



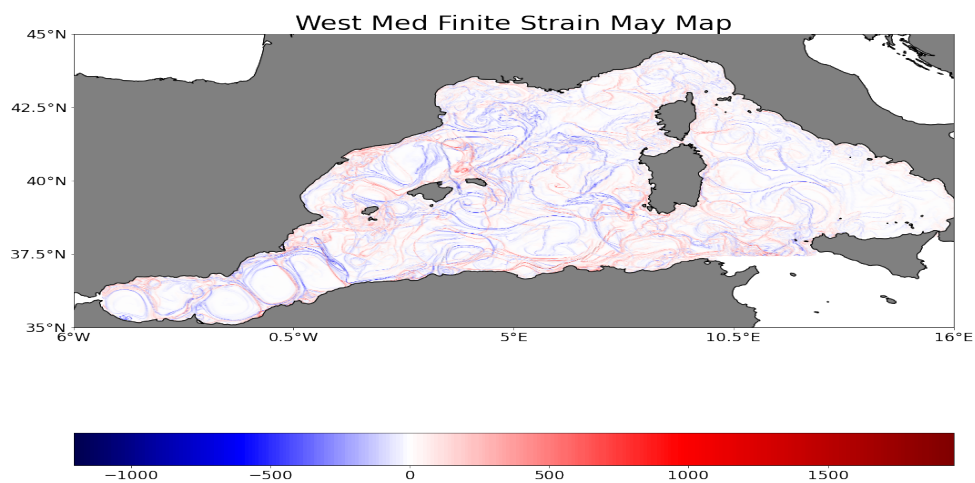
**Σχήμα .1.26:** Κατανομή *finite strain* στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Φεβρουάριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



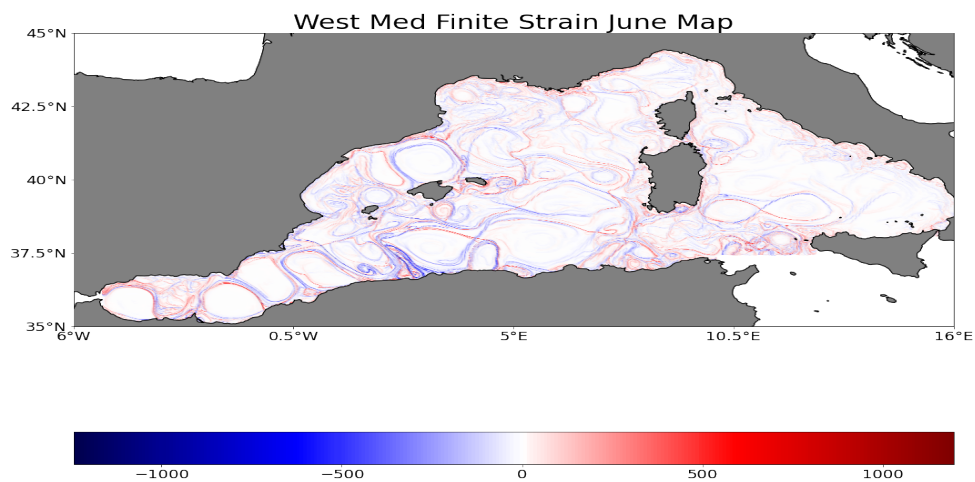
**Σχήμα .1.27:** Κατανομή *finite strain* στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Μάρτιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



**Σχήμα .1.28:** Κατανομή *finite strain* στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Απρίλιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.

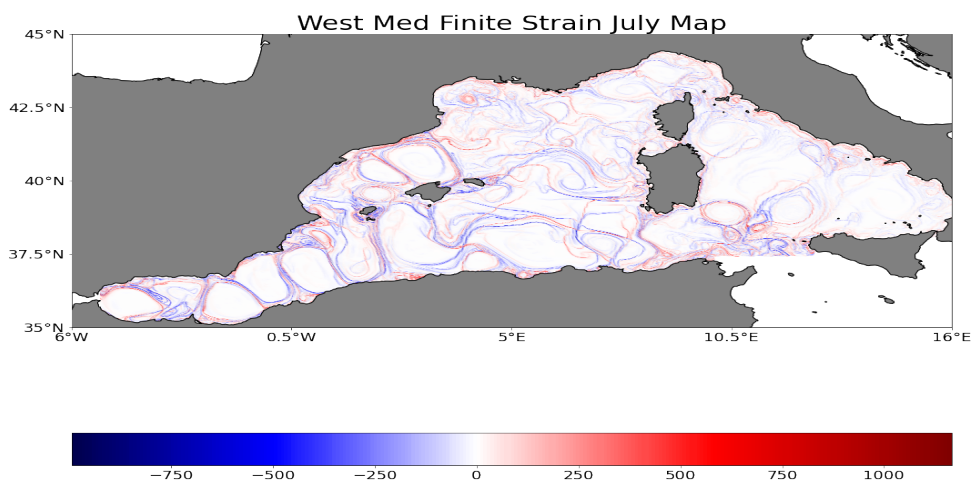


**Σχήμα .1.29:** Κατανομή *finite strain* στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Μάιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.

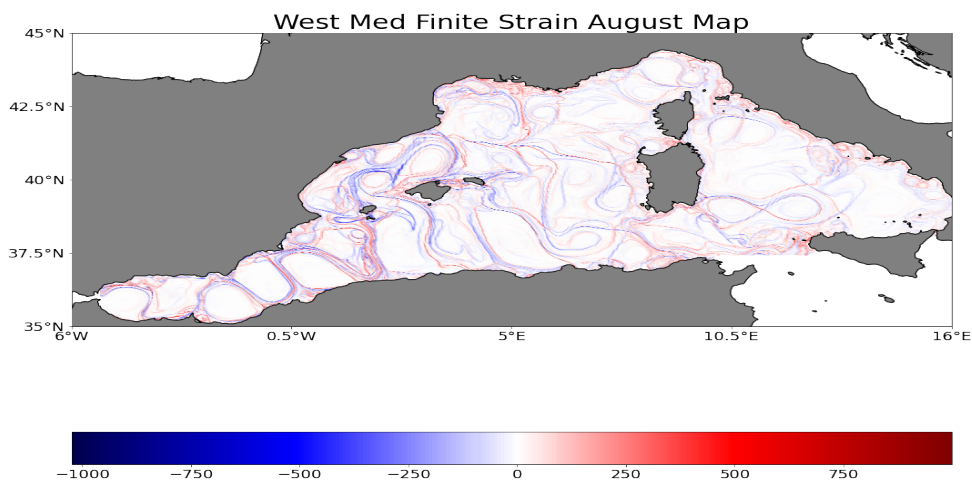


**Σχήμα .1.30:** Κατανομή *finite strain* στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Ιούνιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.

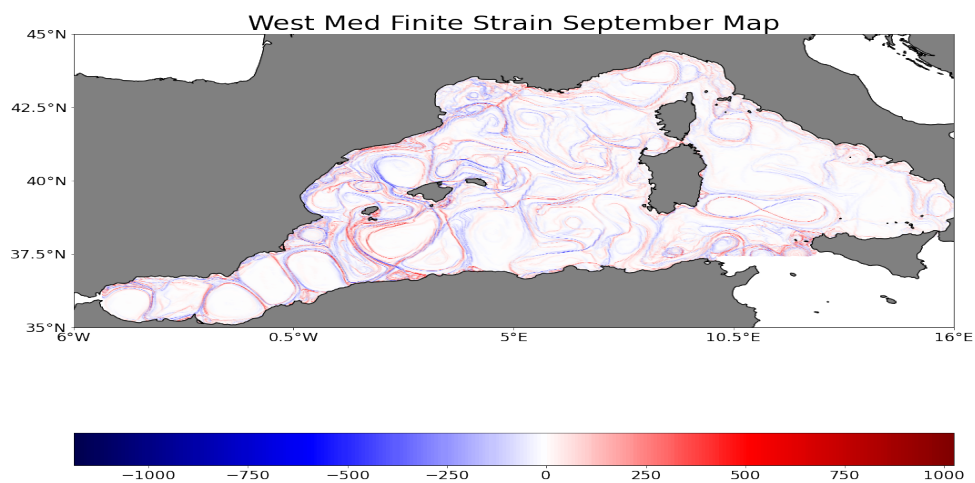




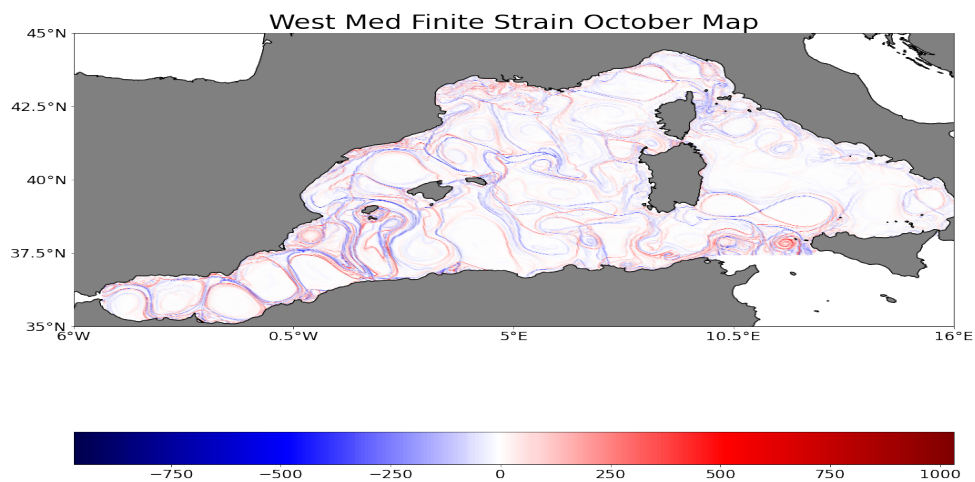
**Σχήμα .1.31:** Κατανομή *finite strain* στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Ιούλιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



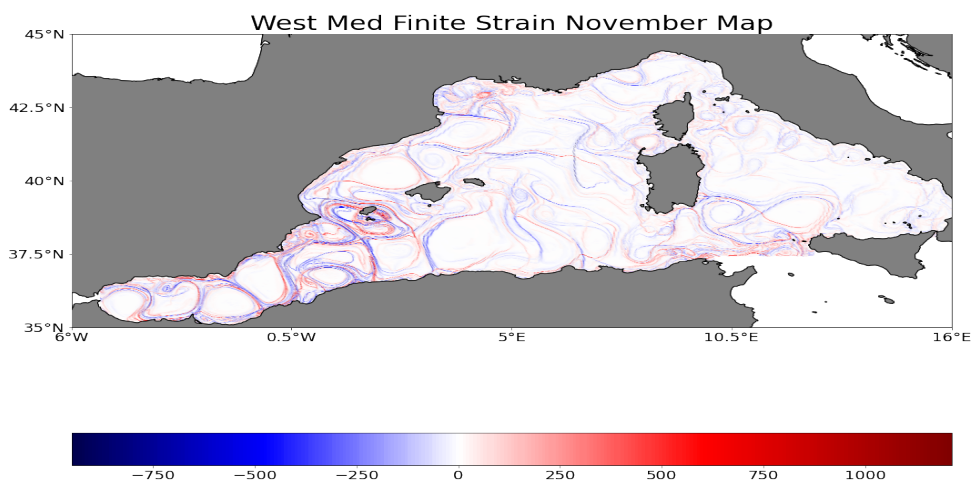
**Σχήμα .1.32:** Κατανομή *finite strain* στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Αύγουστο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



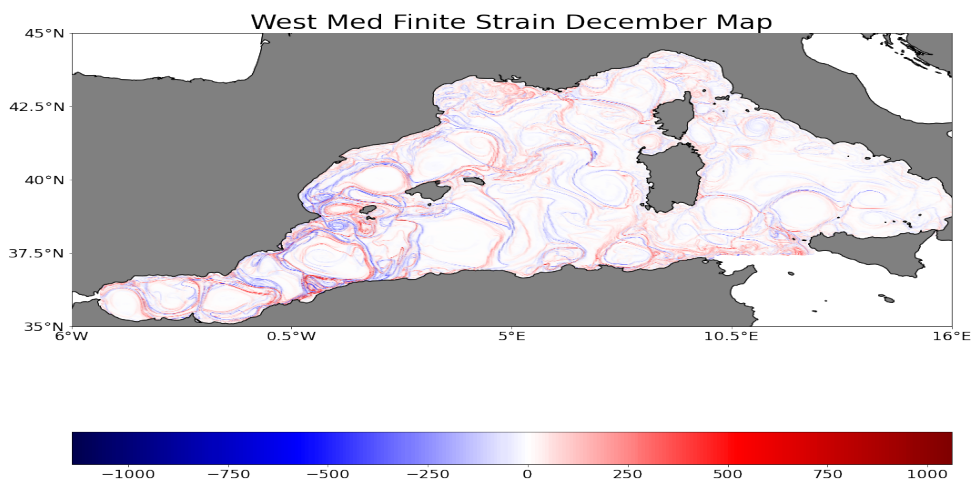
**Σχήμα .1.33:** Κατανομή *finite strain* στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Σεπτέμβριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



**Σχήμα .1.34:** Κατανομή *finite strain* στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Οκτώβριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.

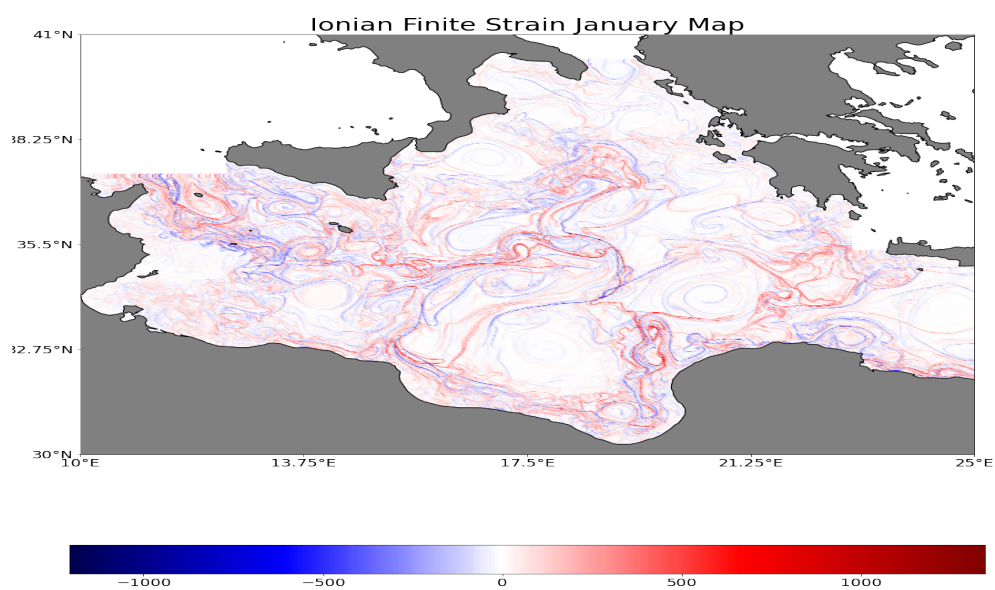


**Σχήμα .1.35:** Κατανομή *finite strain* στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Νοέμβριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.

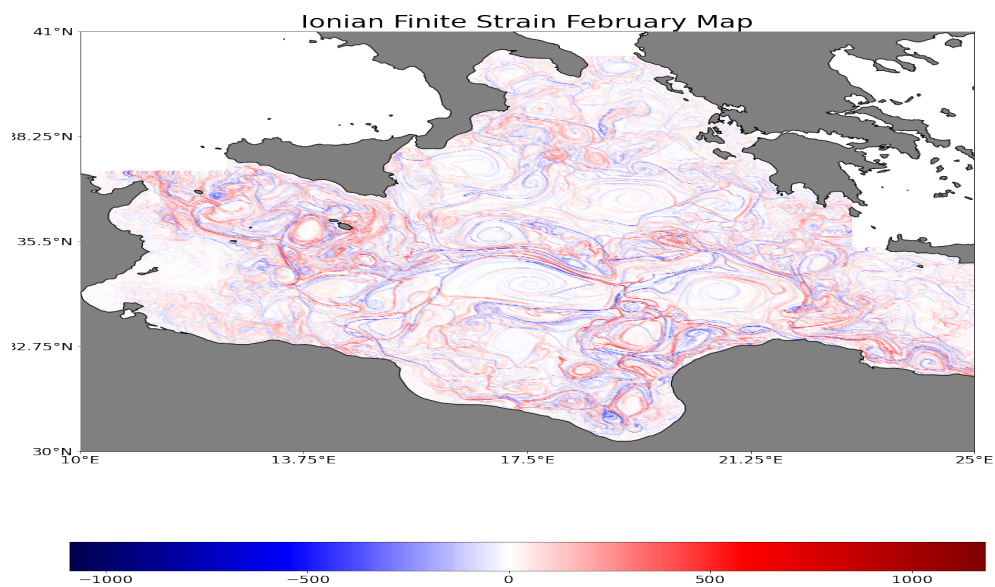


**Σχήμα .1.36:** Κατανομή *finite strain* στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Δεκέμβριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.

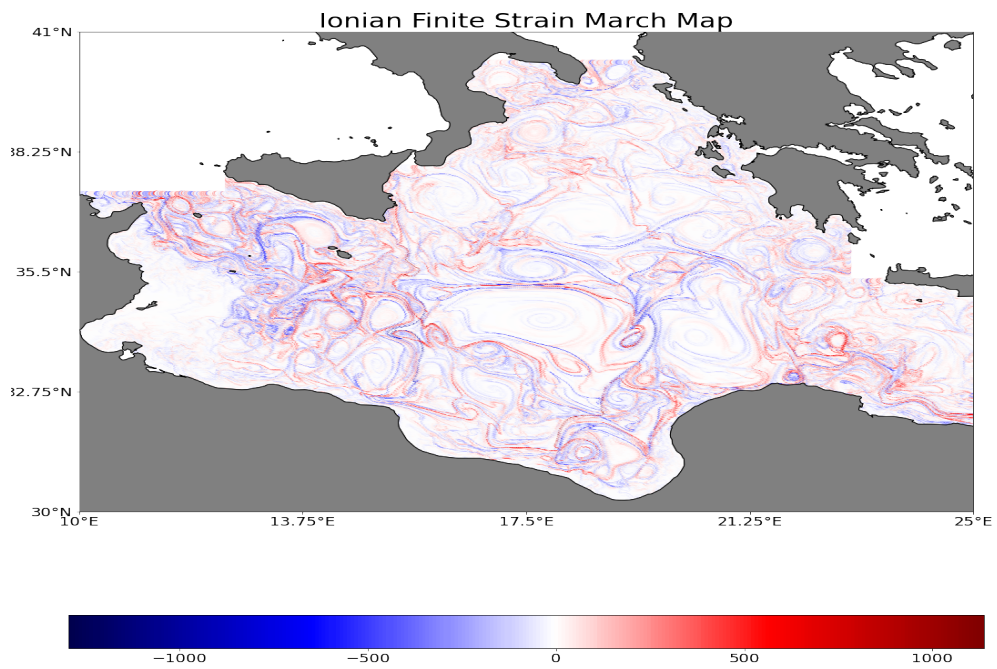
## .1.4 Ιόνιο



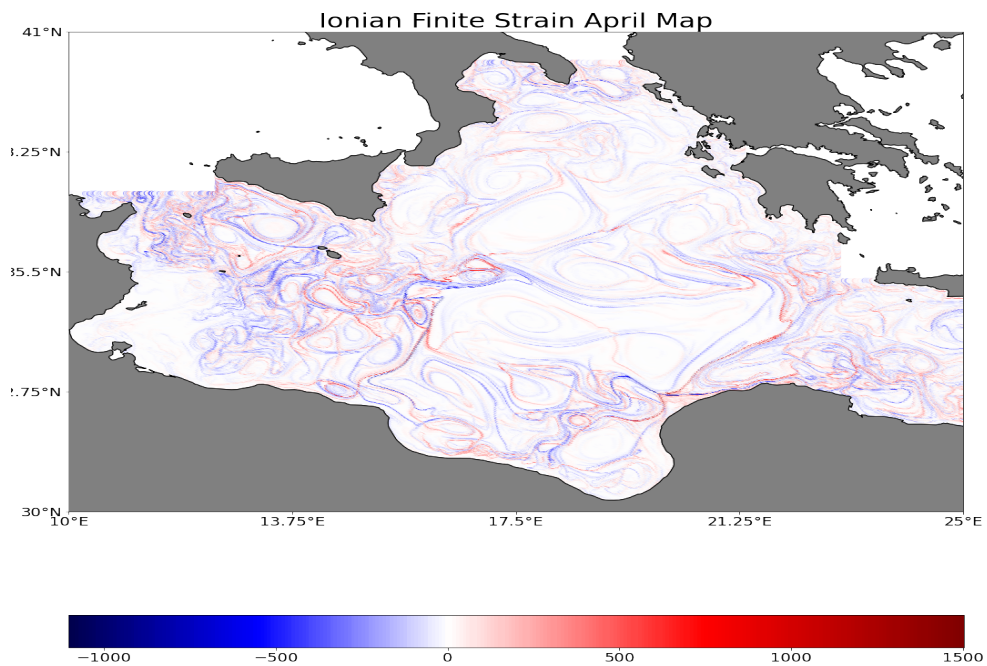
**Σχήμα .1.37:** Κατανομή *finite strain* στο Ιόνιο κατά το μήνα Ιανουάριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



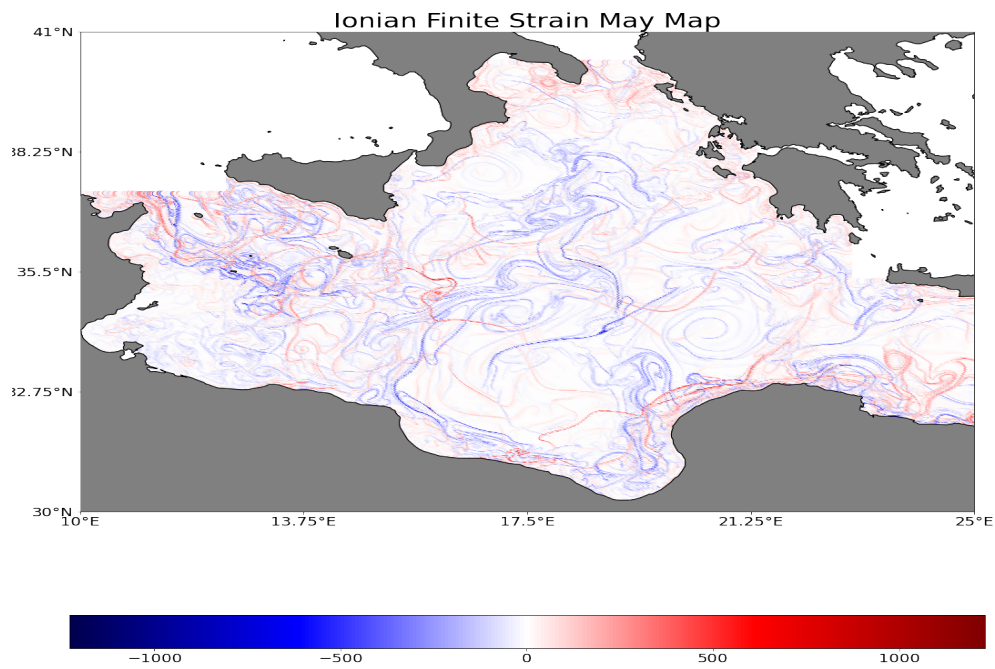
**Σχήμα .1.38:** Κατανομή *finite strain* στο Ιόνιο κατά το μήνα Φεβρουάριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



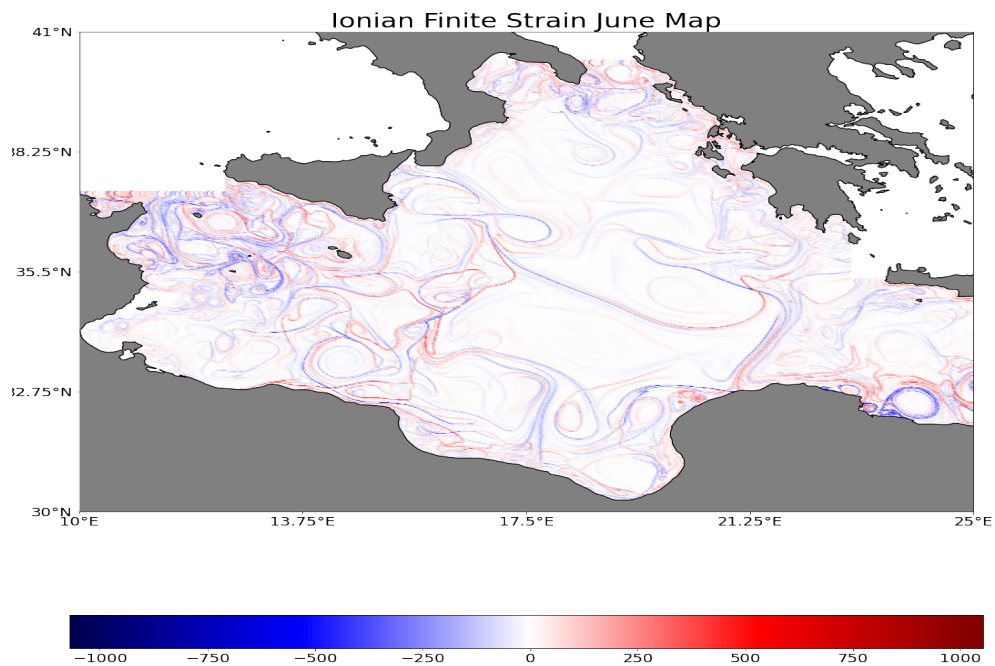
**Σχήμα .1.39:** Κατανομή *finite strain* στο Ιόνιο κατά το μήνα Μάρτιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



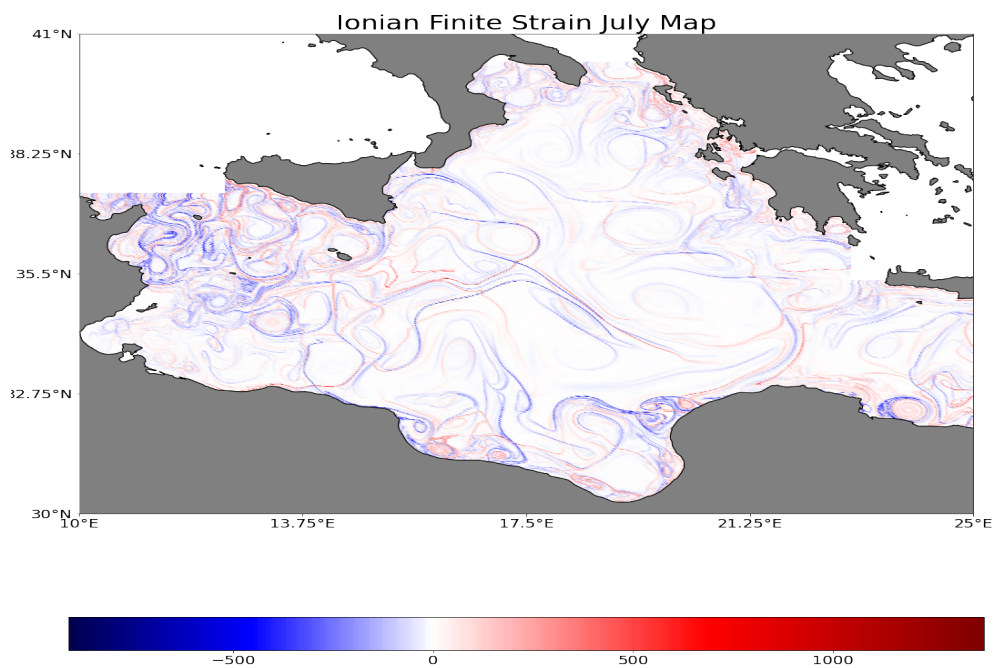
**Σχήμα .1.40:** Κατανομή *finite strain* στο Ιόνιο κατά το μήνα Απρίλιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



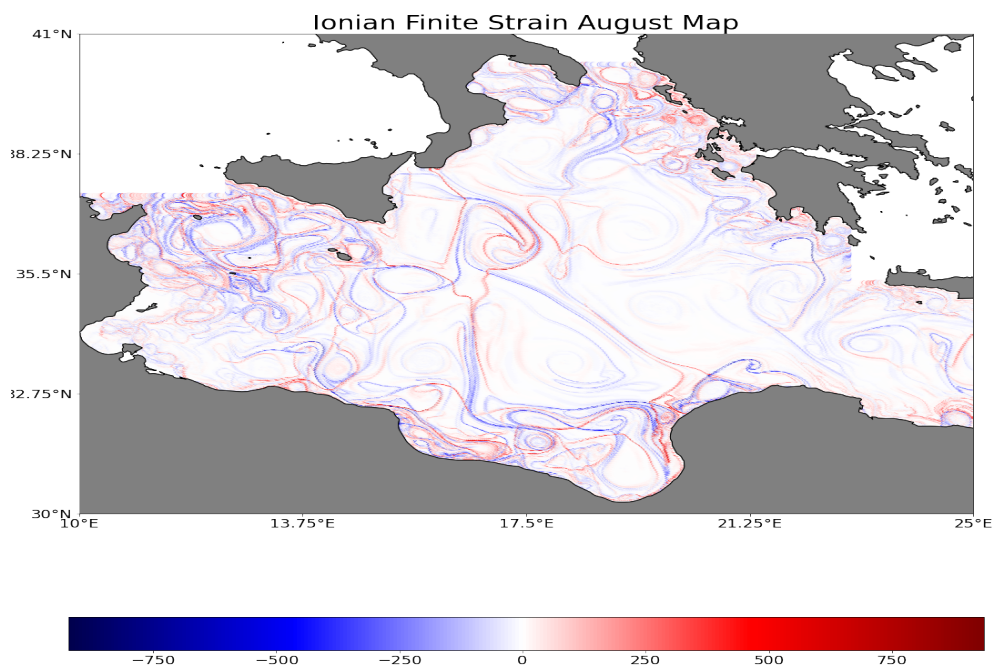
**Σχήμα .1.41:** Κατανομή *finite strain* στο Ιόνιο κατά το μήνα Μάιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



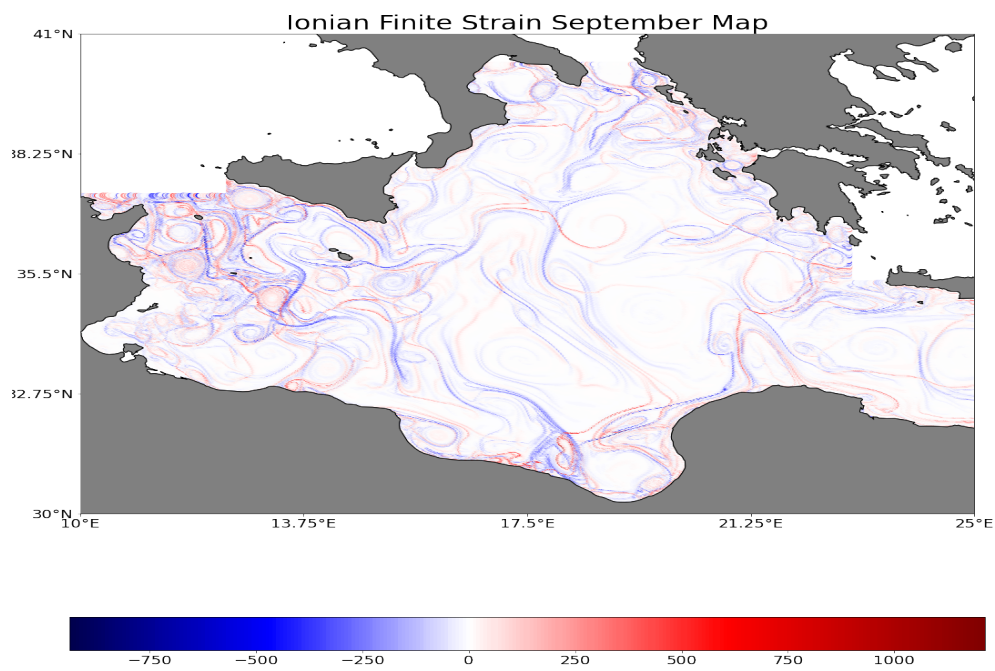
**Σχήμα .1.42:** Κατανομή *finite strain* στο Ιόνιο κατά το μήνα Ιούνιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



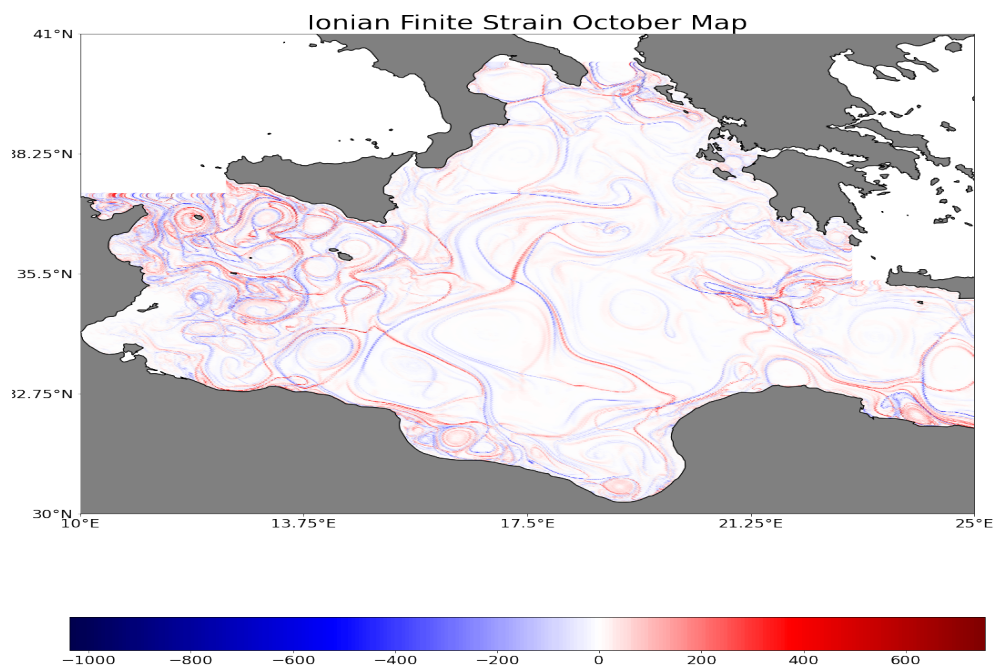
**Σχήμα .1.43:** Κατανομή *finite strain* στο Ιόνιο κατά το μήνα Ιούλιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



**Σχήμα .1.44:** Κατανομή *finite strain* στο Ιόνιο κατά το μήνα Αύγουστο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.

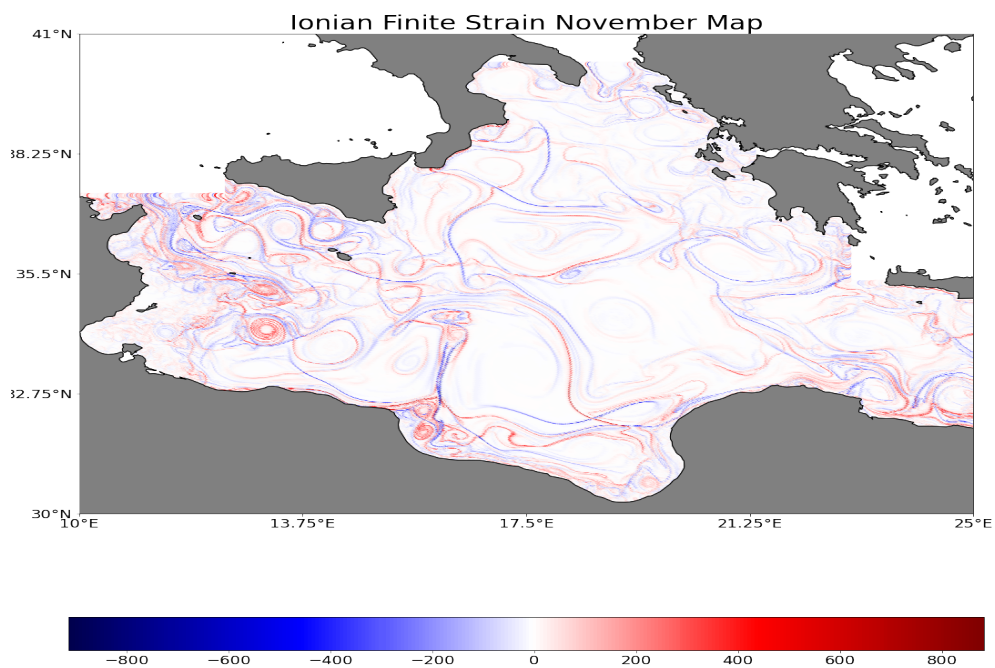


**Σχήμα .1.45:** Κατανομή *finite strain* στο Ιόνιο κατά το μήνα Σεπτέμβριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.

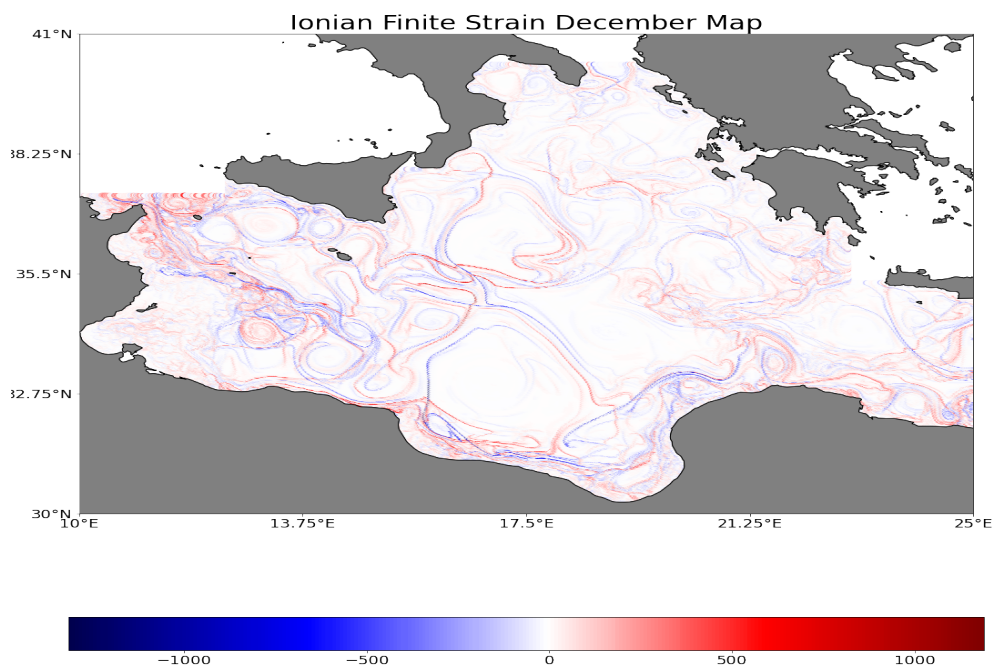


**Σχήμα .1.46:** Κατανομή *finite strain* στο Ιόνιο κατά το μήνα Οκτώβριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



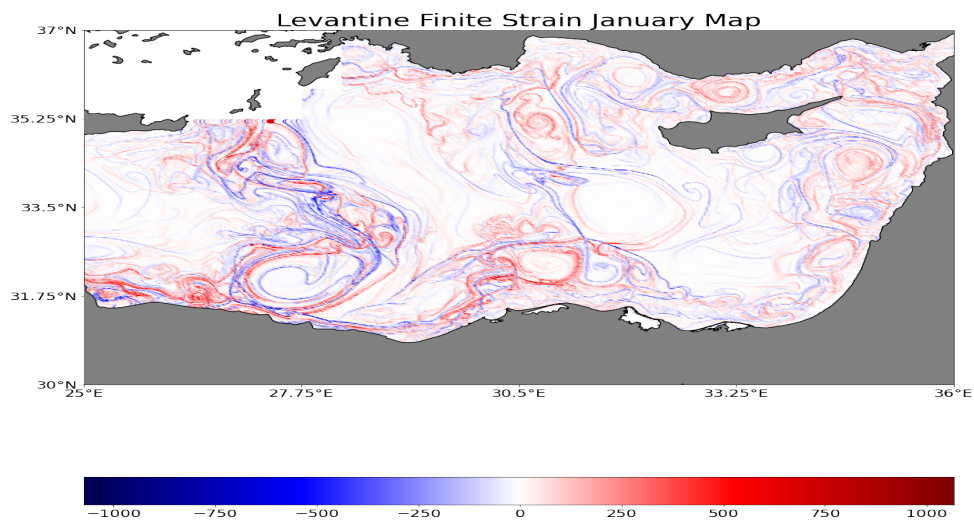


**Σχήμα .1.47:** Κατανομή *finite strain* στο Ιόνιο κατά το μήνα Νοέμβριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.

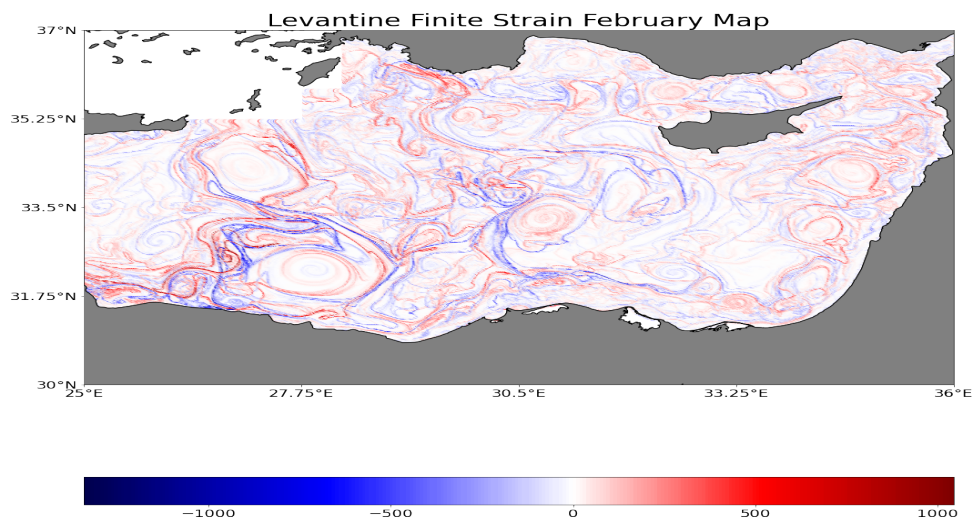


**Σχήμα .1.48:** Κατανομή *finite strain* στο Ιόνιο κατά το μήνα Δεκέμβριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.

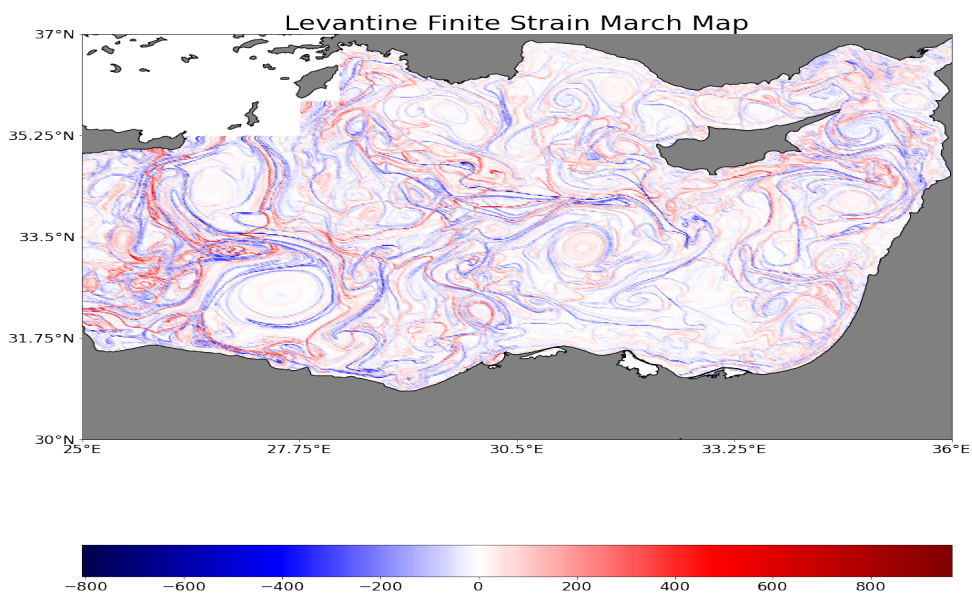
## .1.5 Λεβαντίνη



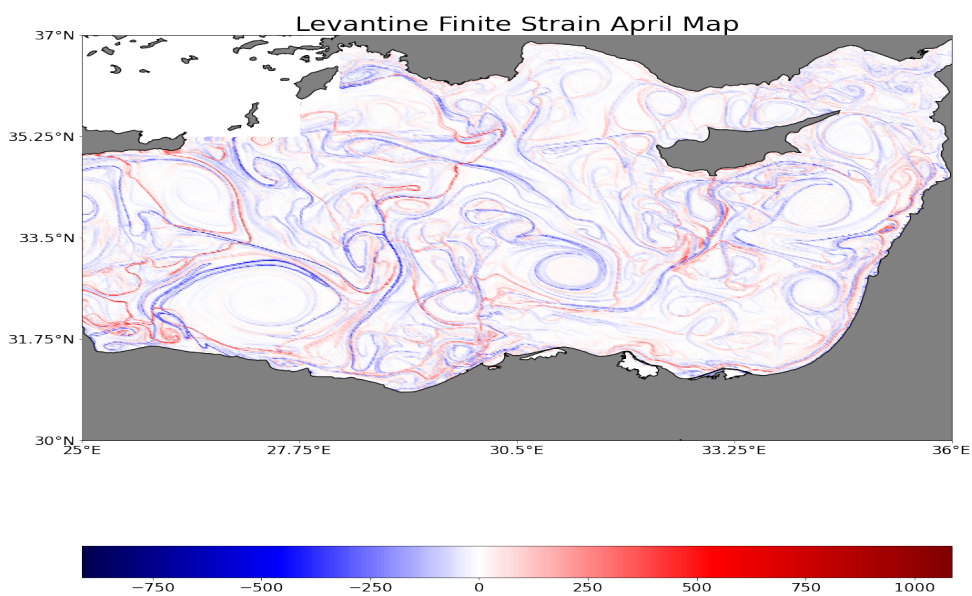
**Σχήμα .1.49:** Κατανομή *finite strain* στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Ιανουάριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



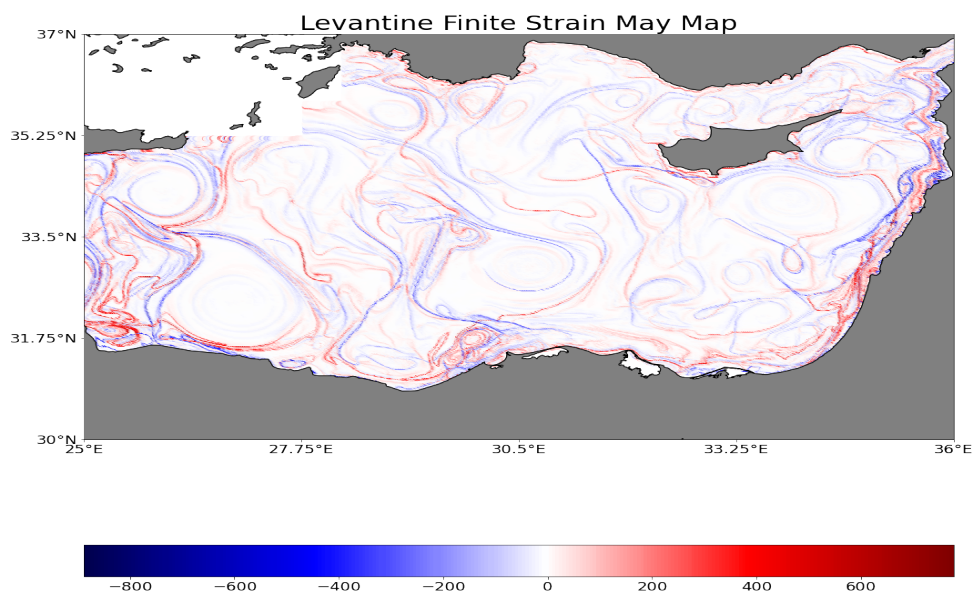
**Σχήμα .1.50:** Κατανομή *finite strain* στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Φεβρουάριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



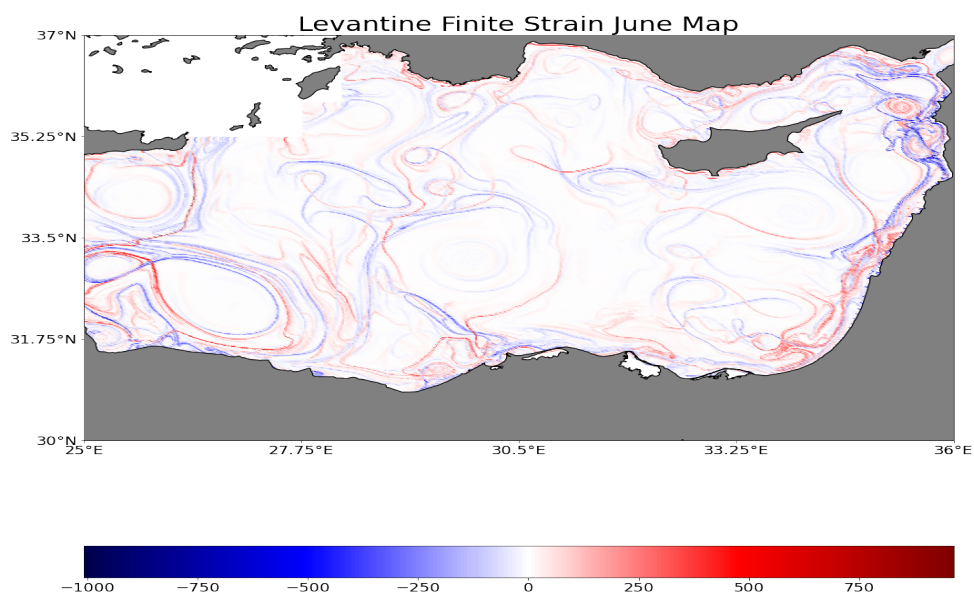
**Σχήμα .1.51:** Κατανομή *finite strain* στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Μάρτιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



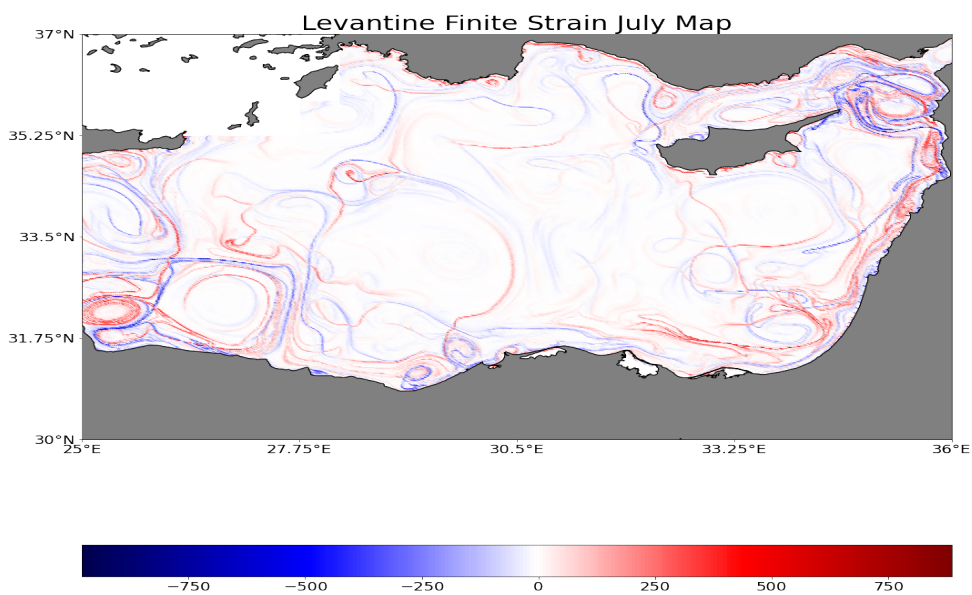
**Σχήμα .1.52:** Κατανομή *finite strain* στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Απρίλιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



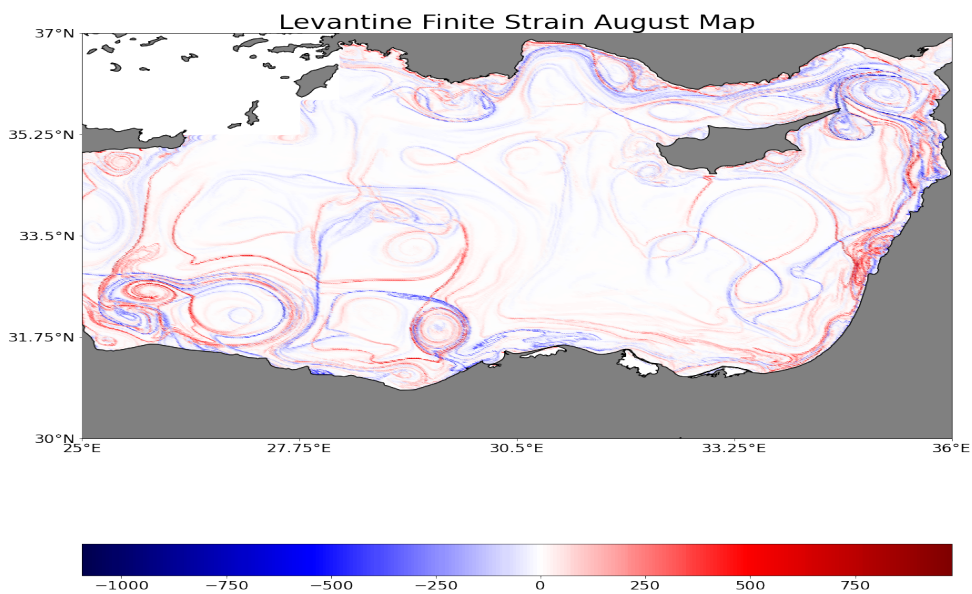
**Σχήμα .1.53:** Κατανομή *finite strain* στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Μάιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



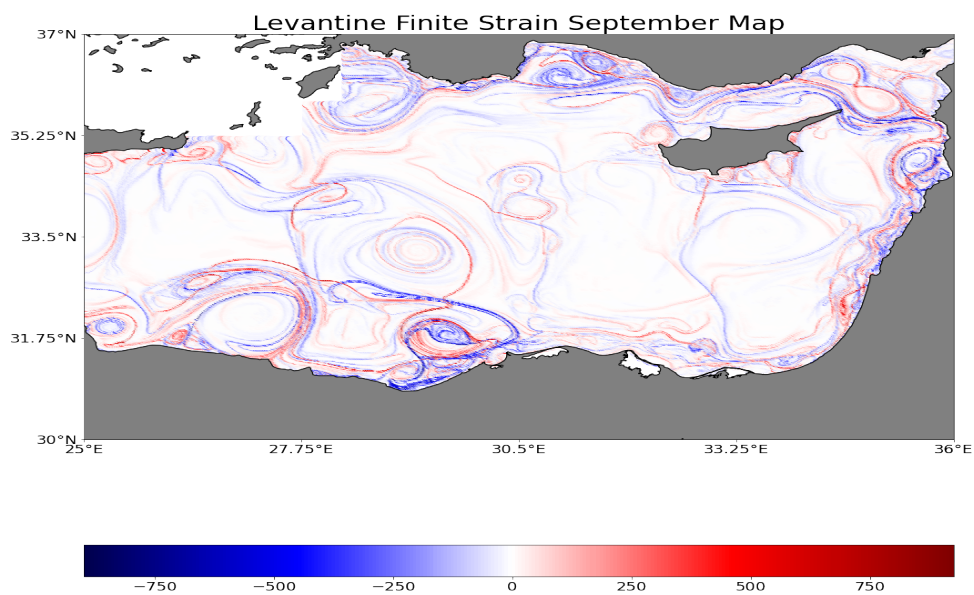
**Σχήμα .1.54:** Κατανομή *finite strain* στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Ιούνιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



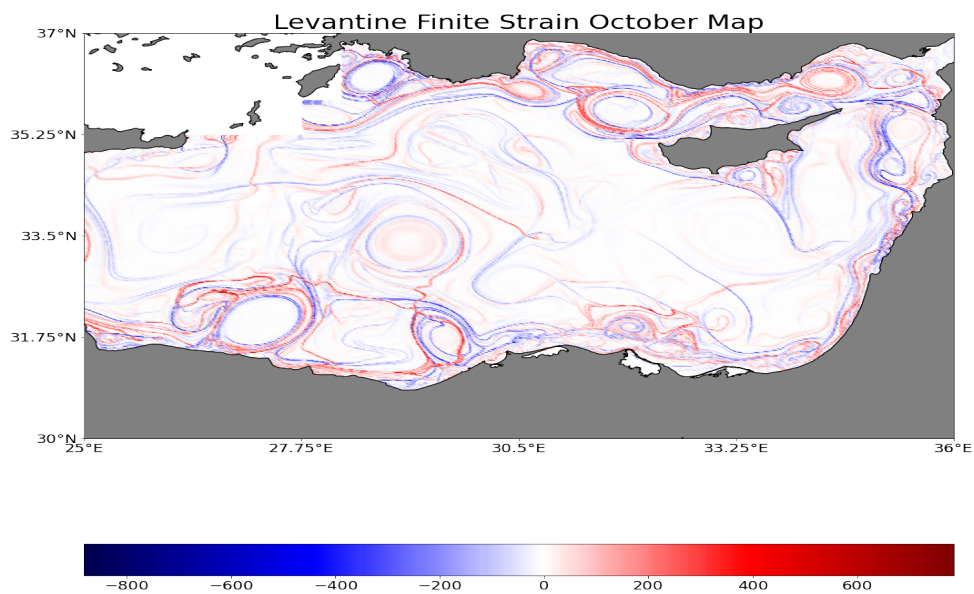
**Σχήμα .155:** Κατανομή *finite strain* στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Ιούλιο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



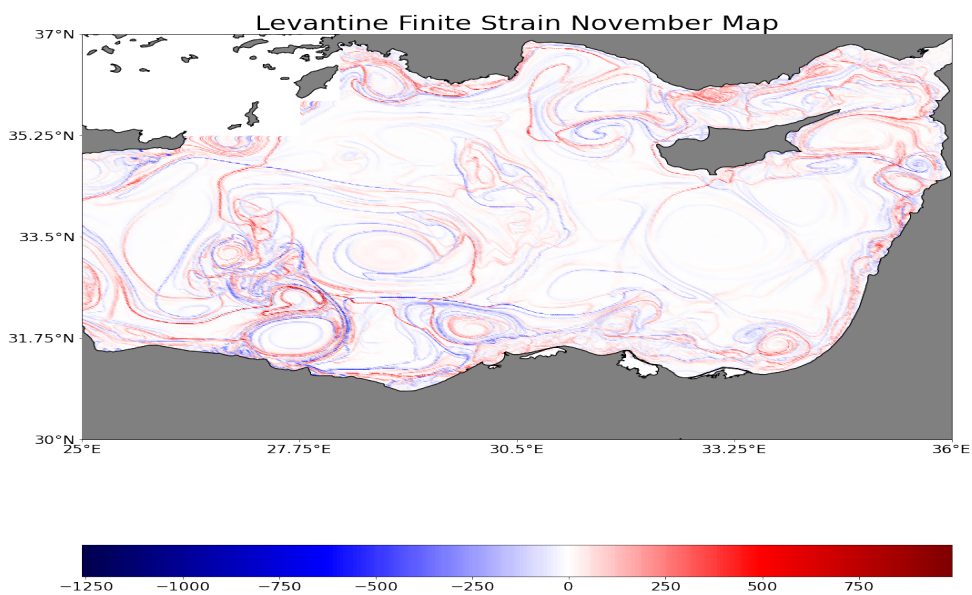
**Σχήμα .156:** Κατανομή *finite strain* στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Αύγουστο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



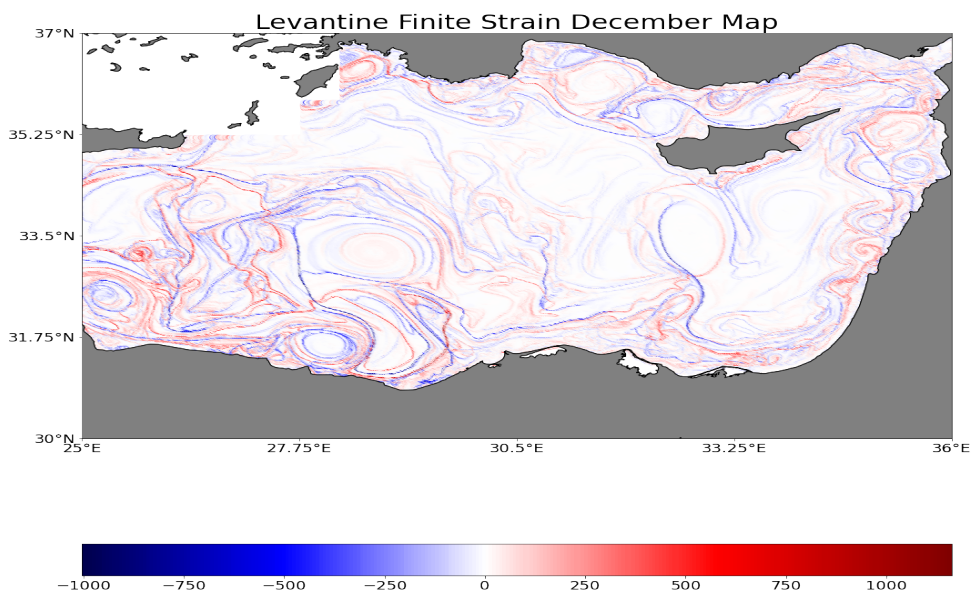
**Σχήμα .1.57:** Κατανομή *finite strain* στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Σεπτέμβριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



**Σχήμα .1.58:** Κατανομή *finite strain* στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Οκτώβριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



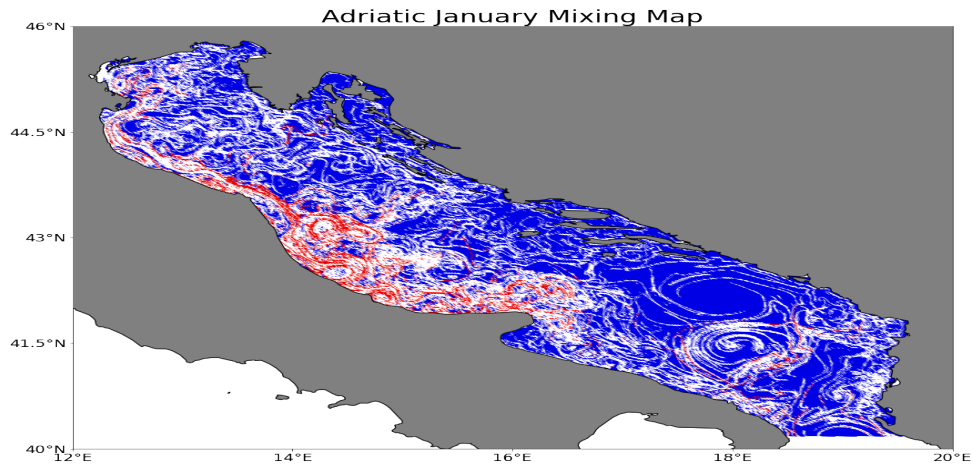
**Σχήμα .1.59:** Κατανομή *finite strain* στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Νοέμβριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.



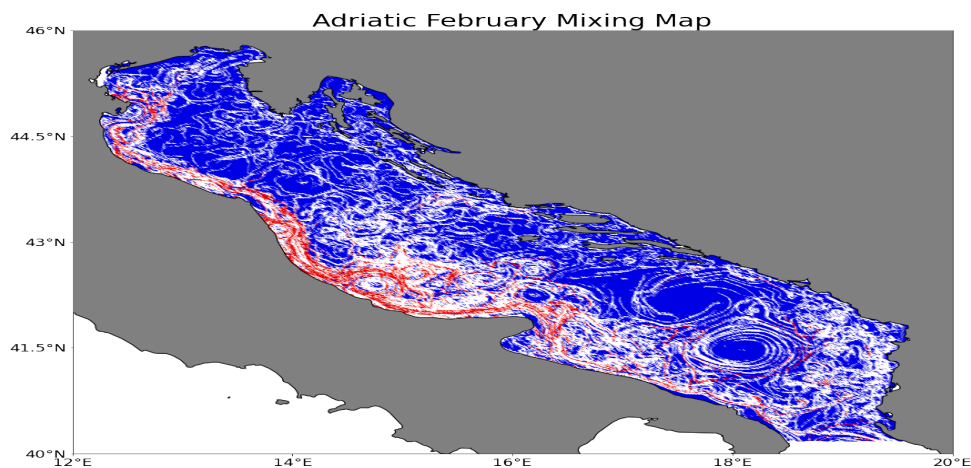
**Σχήμα .1.60:** Κατανομή *finite strain* στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Δεκέμβριο. Τα κόκκινα σημεία υποδεικνύουν τις ευσταθείς (απωθητικές) πολλαπλότητες, ενώ τα μπλε σημεία τις ασταθείς (ελκτικές) πολλαπλότητες.

## .2 Χάρτες Ανάμειξης

### .2.1 Αδριατική

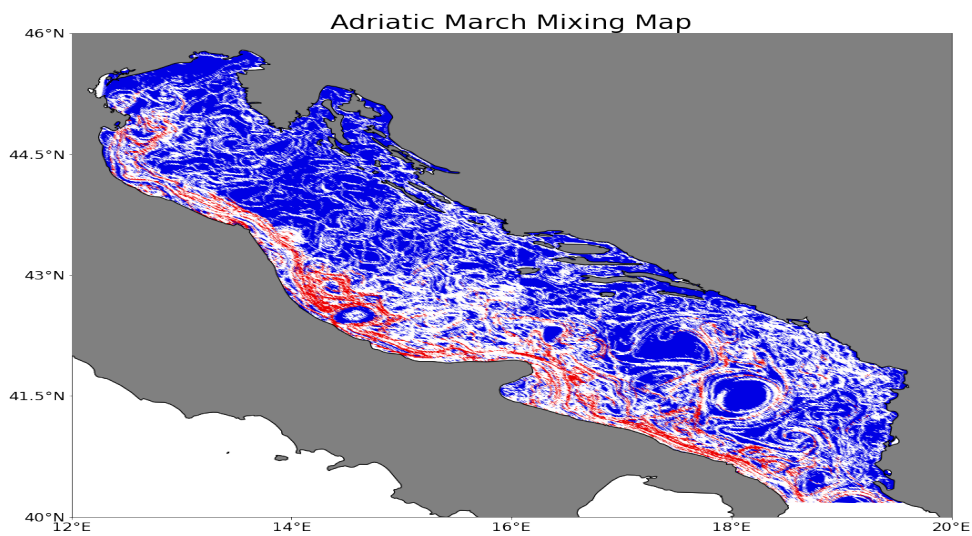


**Σχήμα .2.1:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στην Αδριατική κατά το μήνα Ιανουάριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

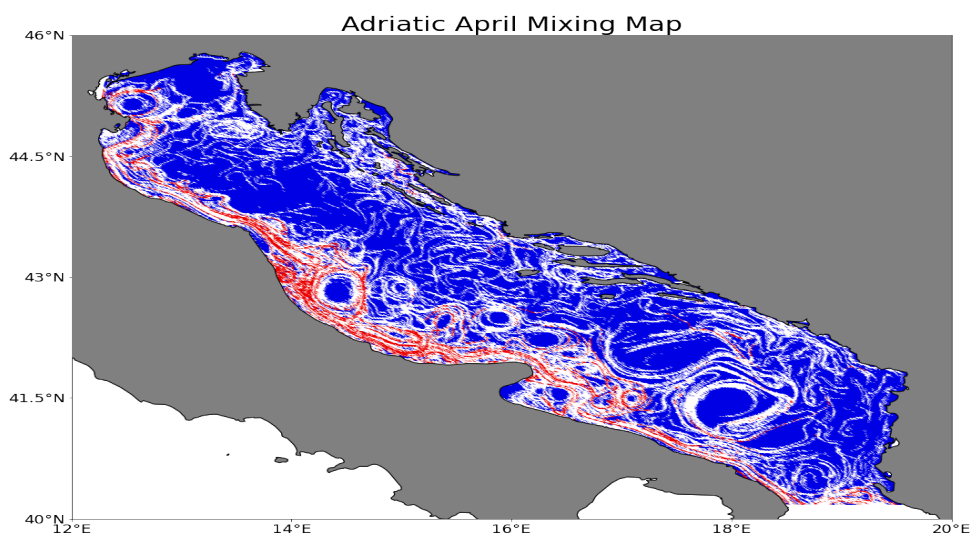


**Σχήμα .2.2:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στην Αδριατική κατά το μήνα Φεβρουάριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

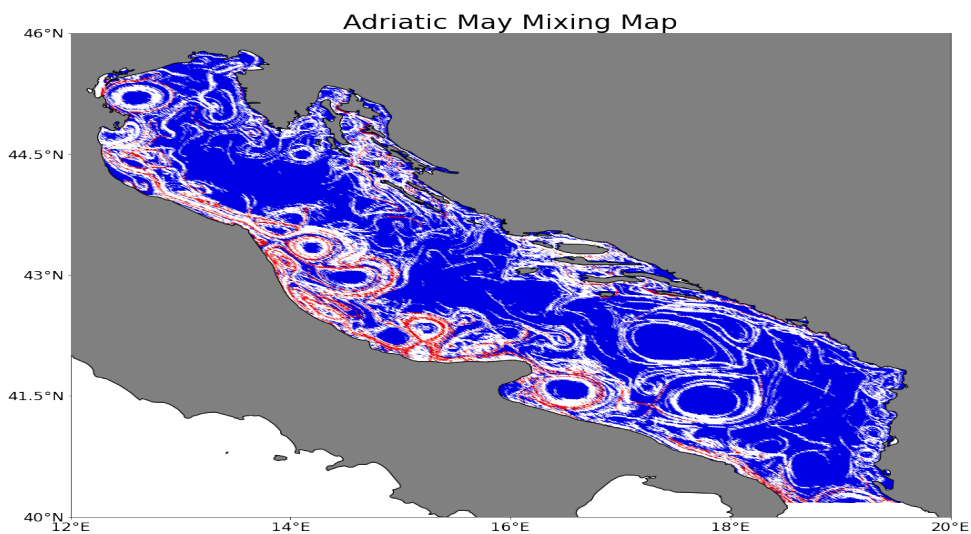




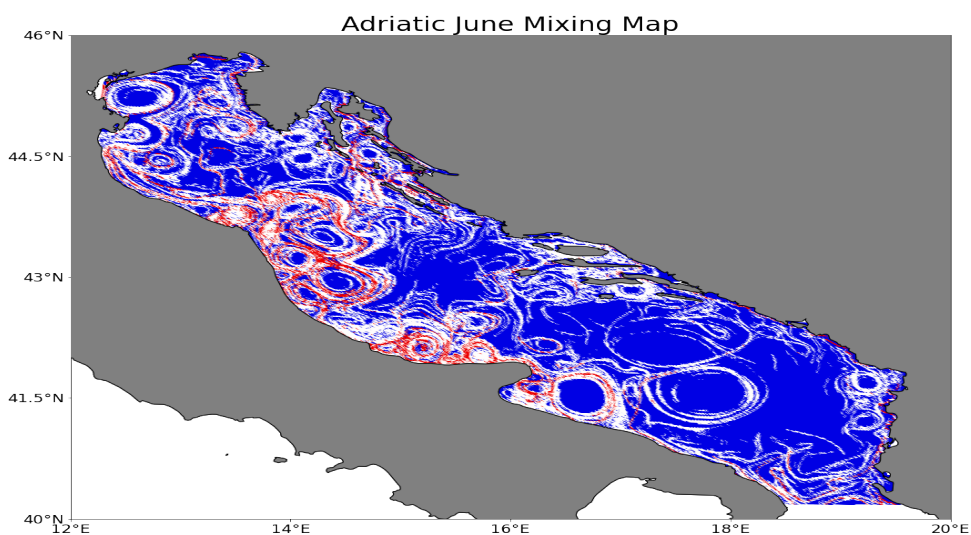
**Σχήμα .2.3:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στην Αδριατική κατά το μήνα Μάρτιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



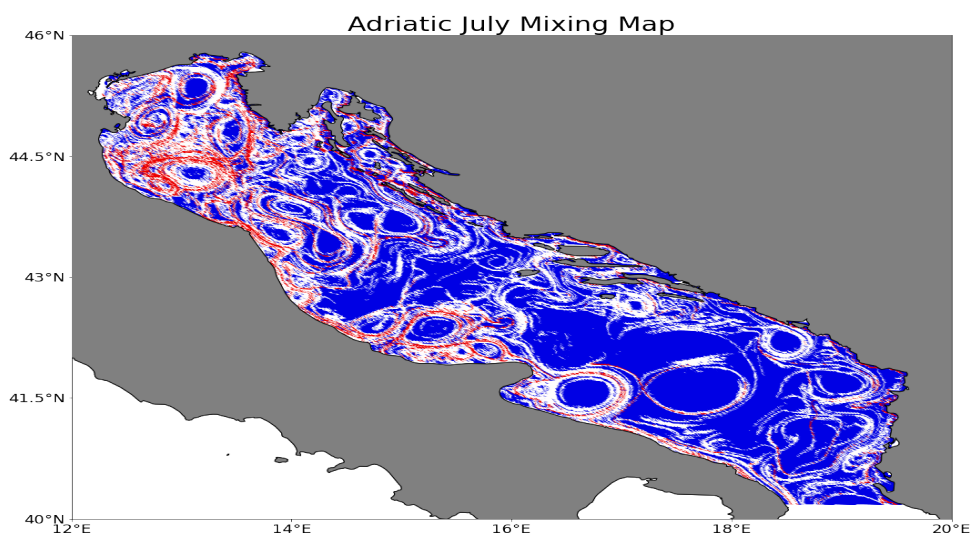
**Σχήμα .2.4:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στην Αδριατική κατά το μήνα Απρίλιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



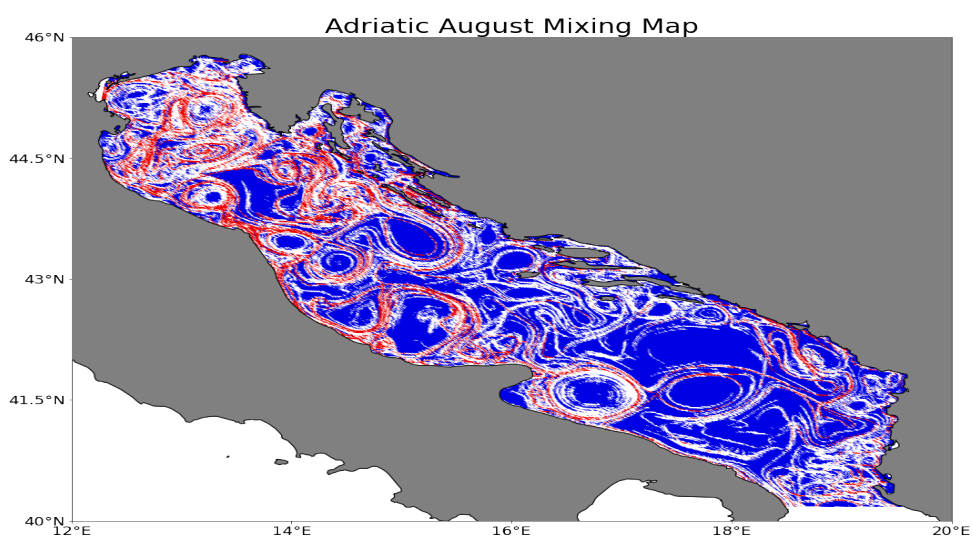
**Σχήμα .2.5:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στην Αδριατική κατά το μήνα Μάιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



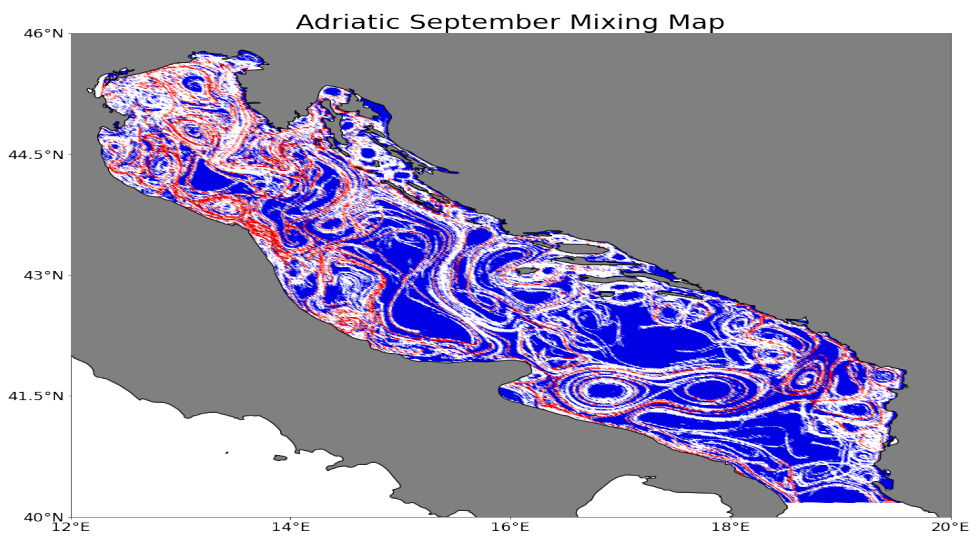
**Σχήμα .2.6:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στην Αδριατική κατά το μήνα Ιούνιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



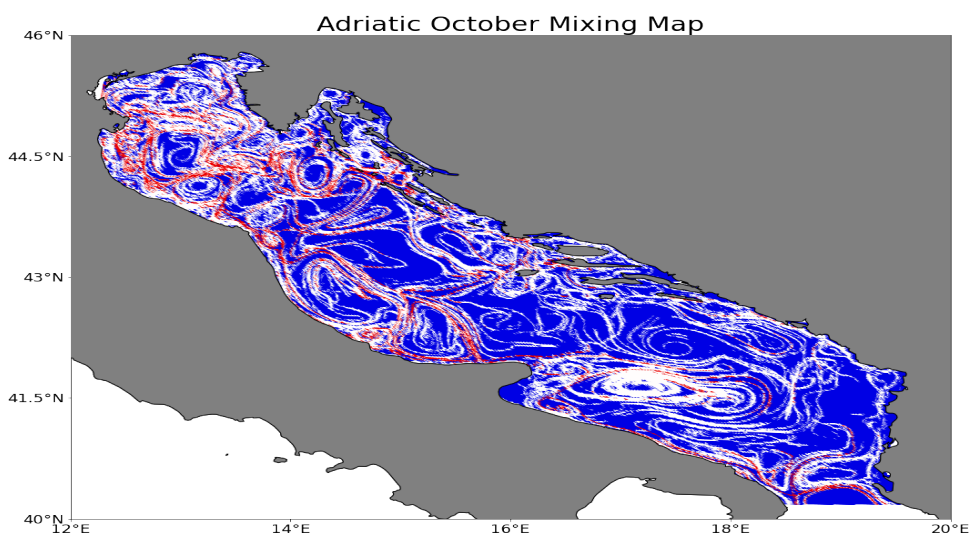
**Σχήμα .2.7:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στην Αδριατική κατά το μήνα Ιούλιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



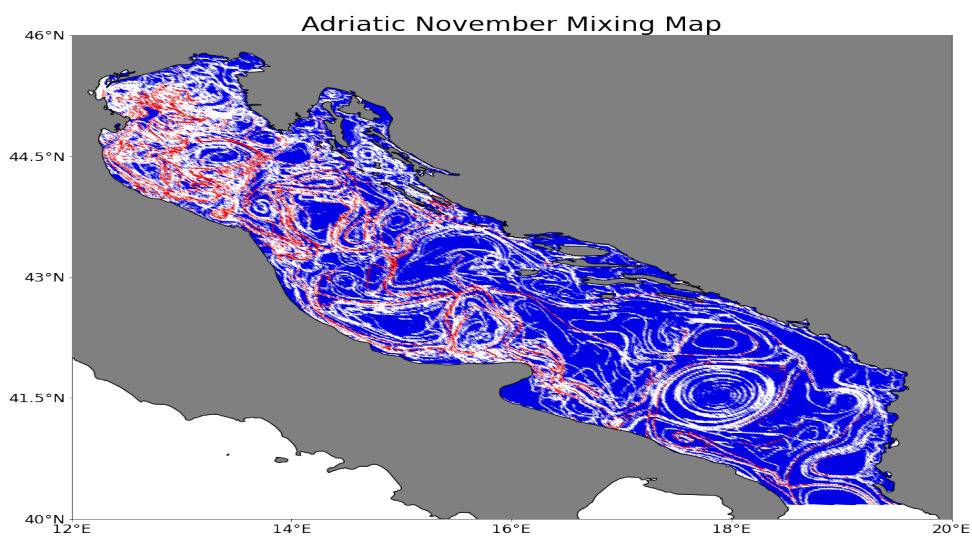
**Σχήμα .2.8:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στην Αδριατική κατά το μήνα Αύγουστο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



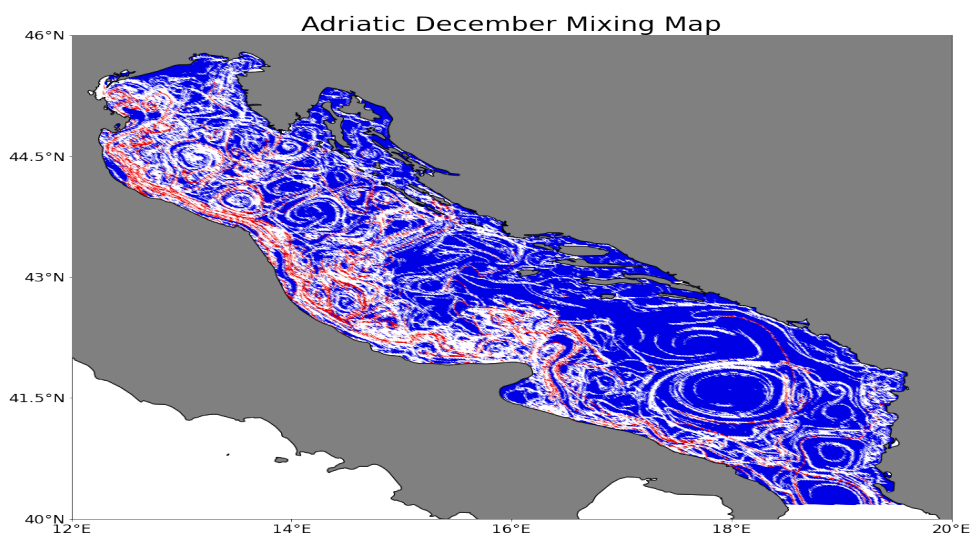
**Σχήμα .2.9:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στην Αδριατική κατά το μήνα Σεπτέμβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



**Σχήμα .2.10:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στην Αδριατική κατά το μήνα Οκτώβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

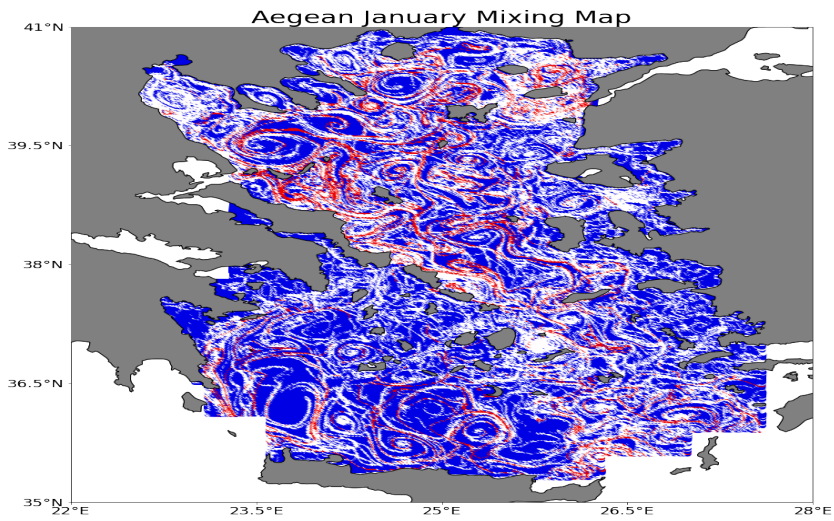


**Σχήμα .2.11:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στην Αδριατική κατά το μήνα Νοέμβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

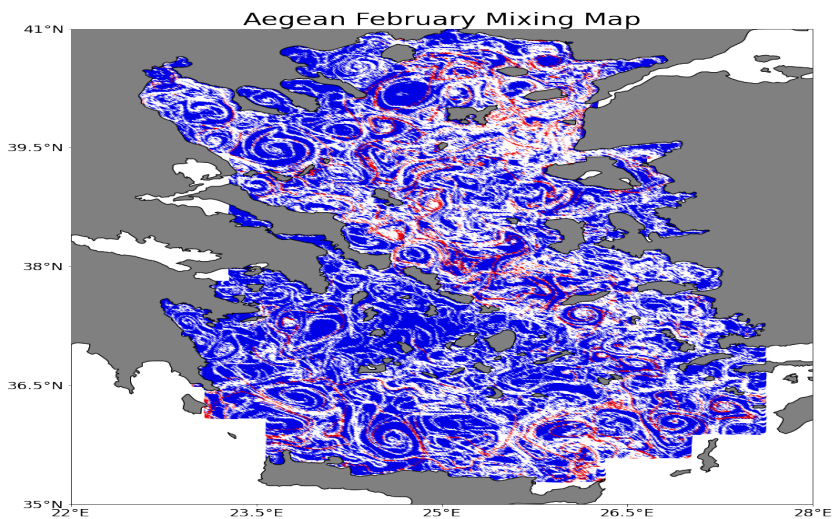


**Σχήμα .2.12:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στην Αδριατική κατά το μήνα Δεκέμβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

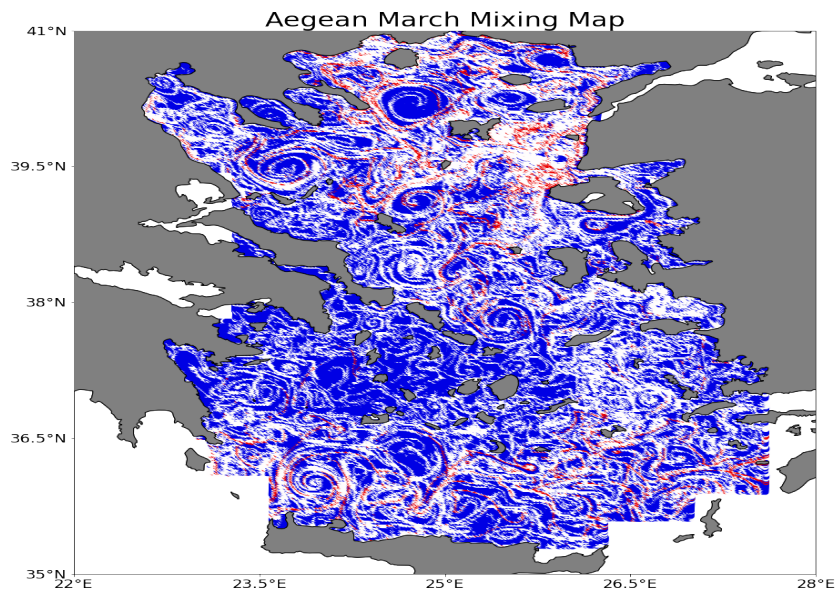
## .2.2 Αιγαίο



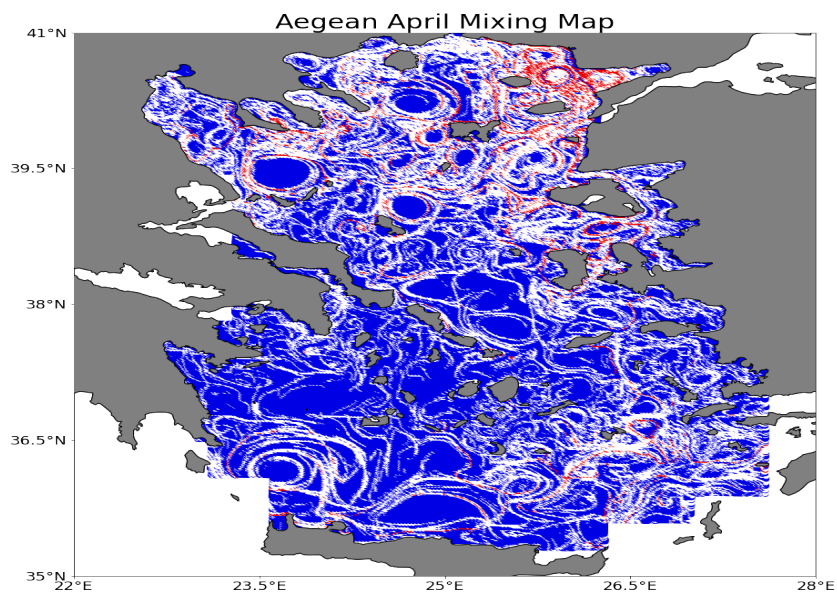
**Σχήμα .2.13:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Αιγαίο κατά το μήνα Ιανουάριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



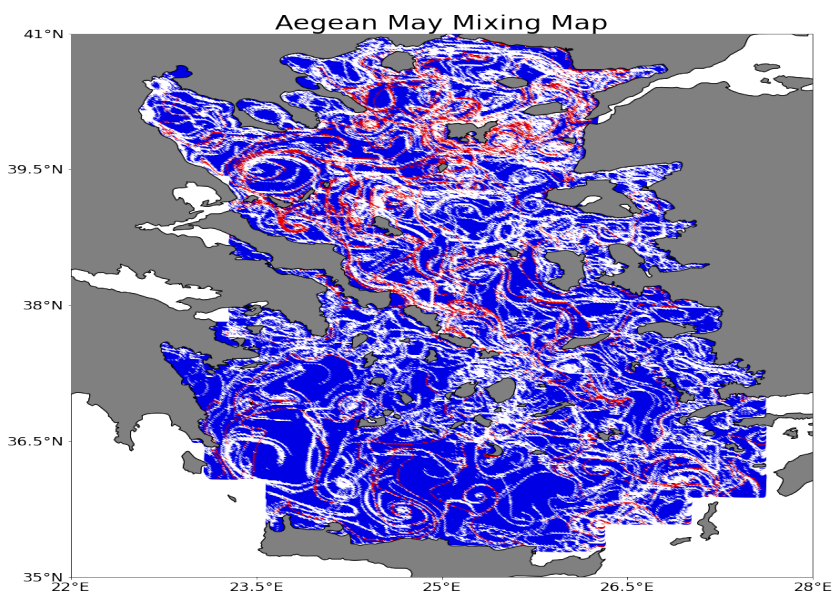
**Σχήμα .2.14:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Αιγαίο κατά το μήνα Φεβρουάριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



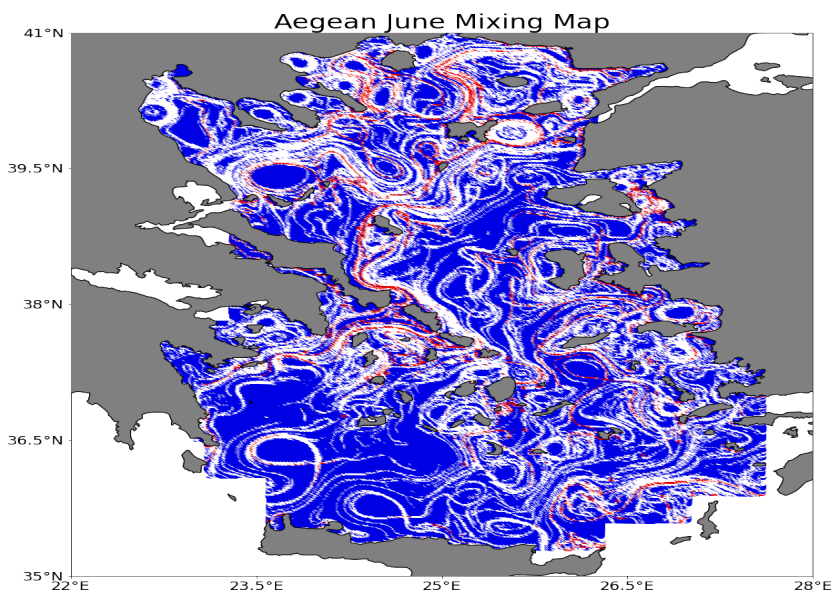
**Σχήμα .2.15:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Αιγαίο κατά το μήνα Μάρτιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



**Σχήμα .2.16:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Αιγαίο κατά το μήνα Απρίλιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

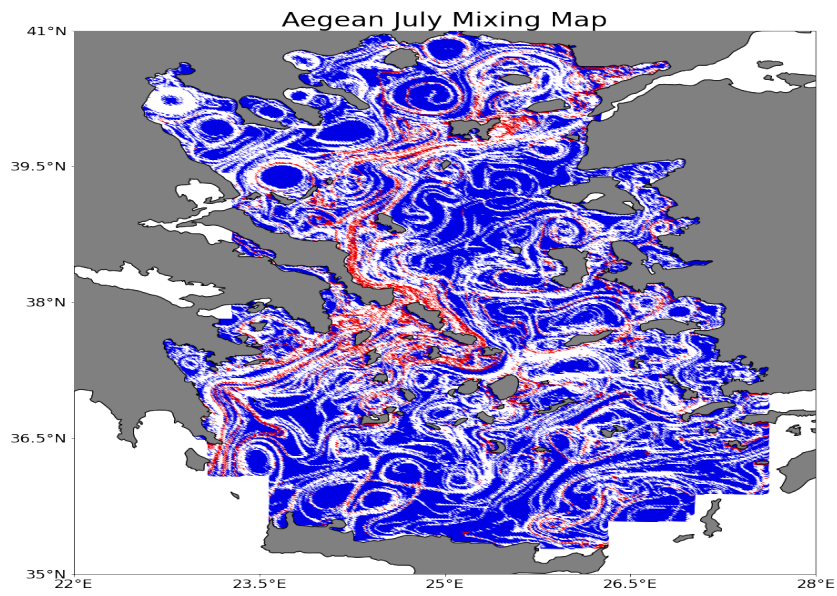


**Σχήμα .2.17:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Αιγαίο κατά το μήνα Μάιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

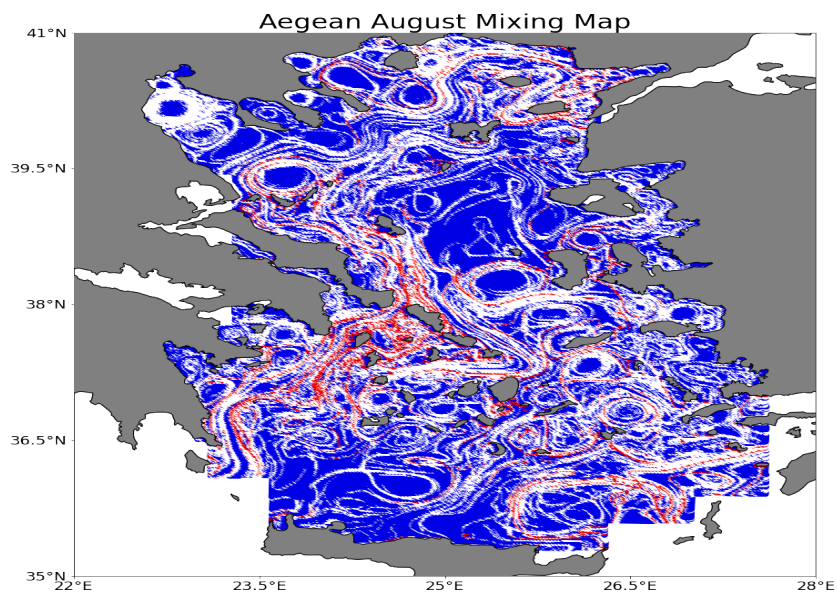


**Σχήμα .2.18:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Αιγαίο κατά το μήνα Ιούνιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

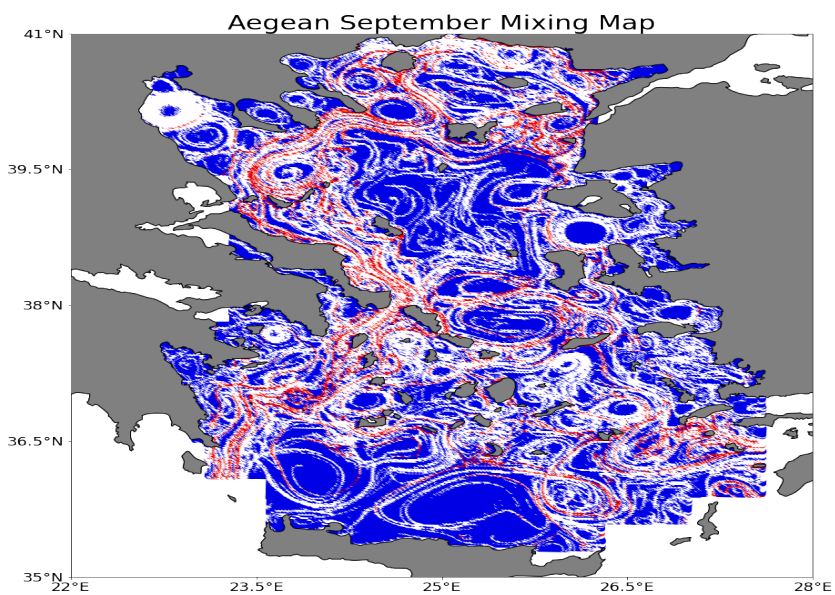




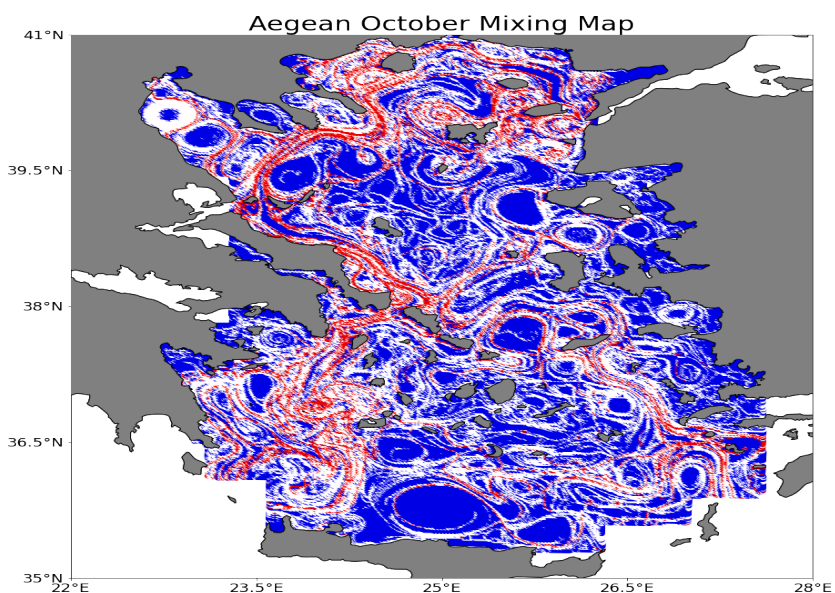
**Σχήμα .2.19:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Αιγαίο κατά το μήνα Ιούλιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



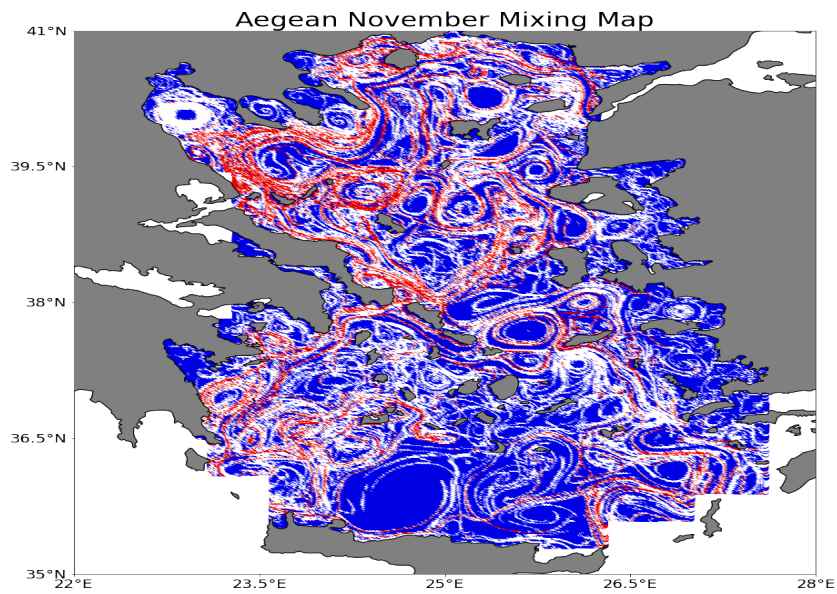
**Σχήμα .2.20:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Αιγαίο κατά το μήνα Αύγουστο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



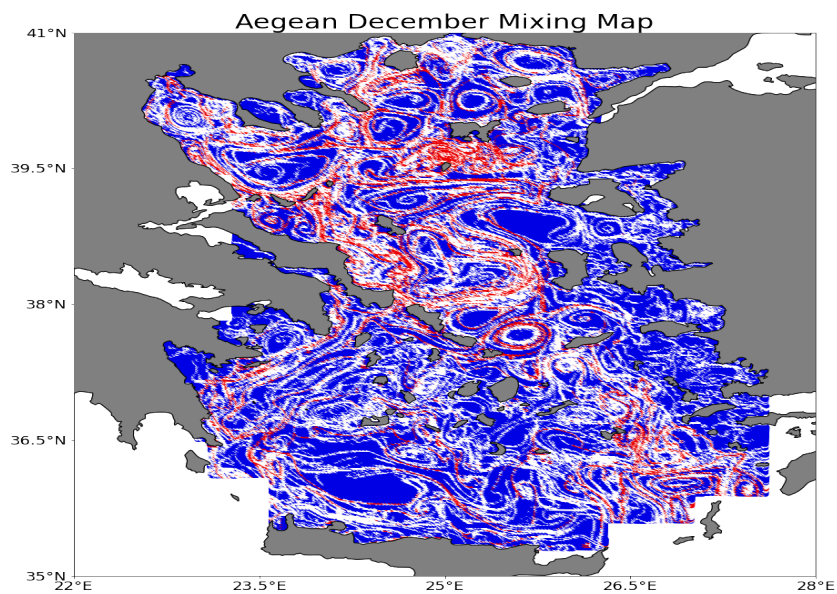
**Σχήμα .2.21:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Αιγαίο κατά το μήνα Σεπτέμβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



**Σχήμα .2.22:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Αιγαίο κατά το μήνα Οκτώβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

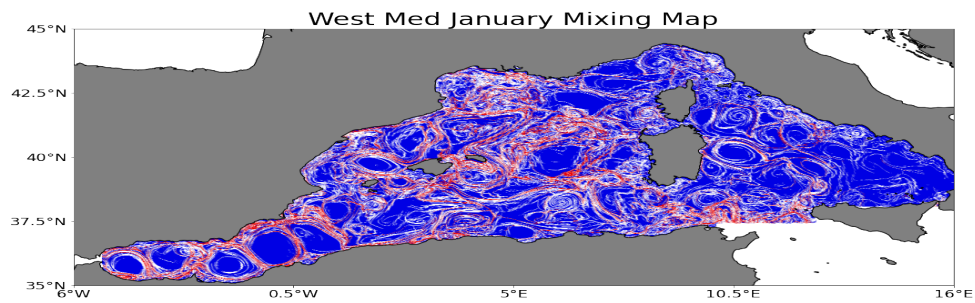


**Σχήμα .2.23:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Αιγαίο κατά το μήνα Νοέμβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

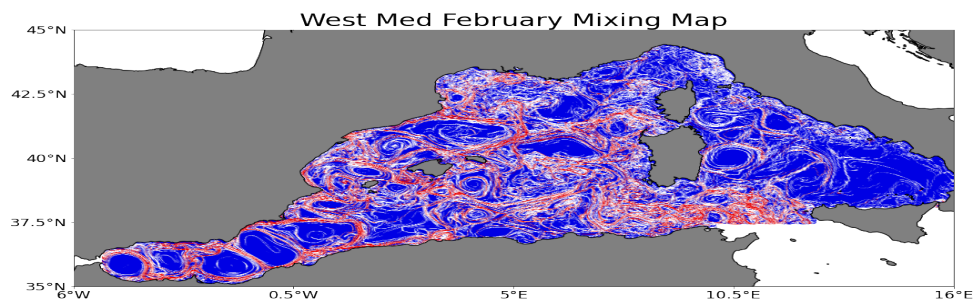


**Σχήμα .2.24:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Αιγαίο κατά το μήνα Δεκέμβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

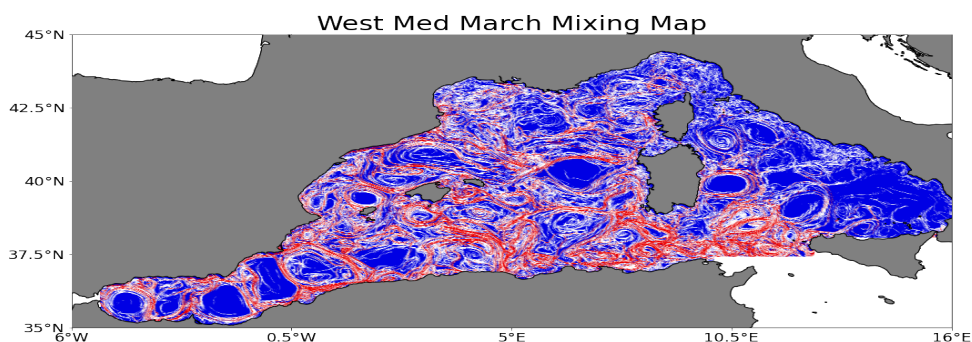
### .2.3 Δυτική Μεσόγειος



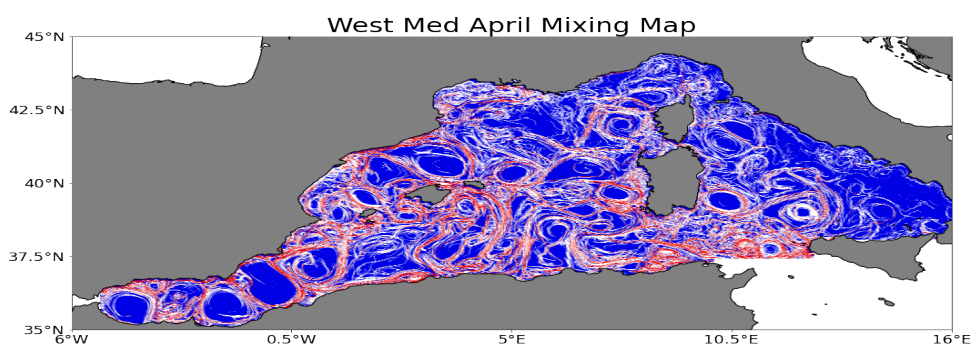
**Σχήμα .2.25:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Ιανουάριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



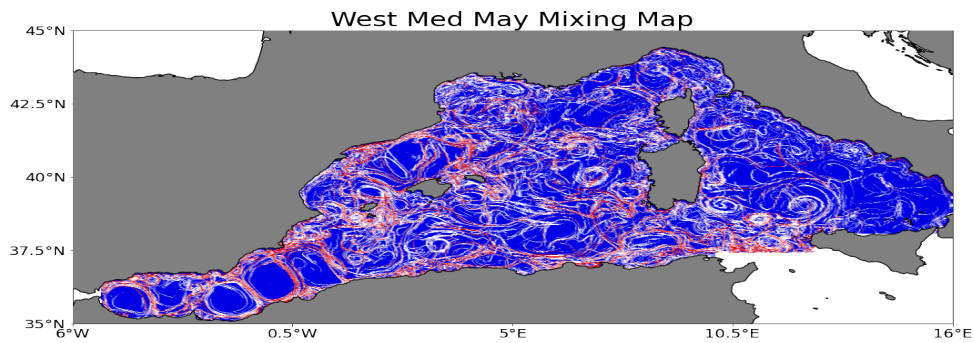
**Σχήμα .2.26:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Φεβρουάριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



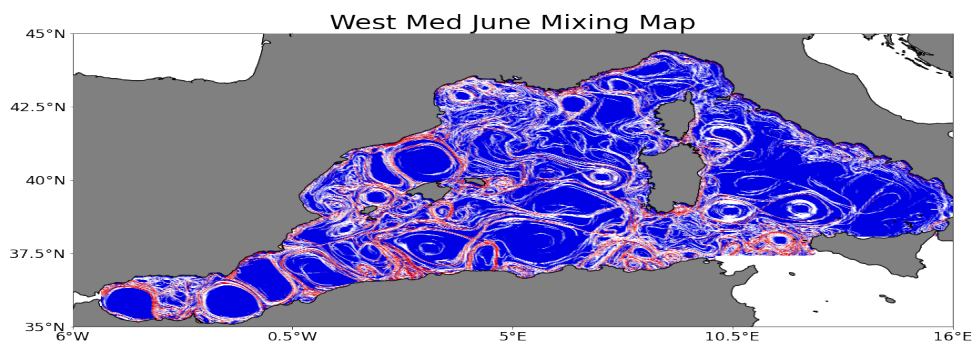
**Σχήμα .2.27:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Μάρτιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



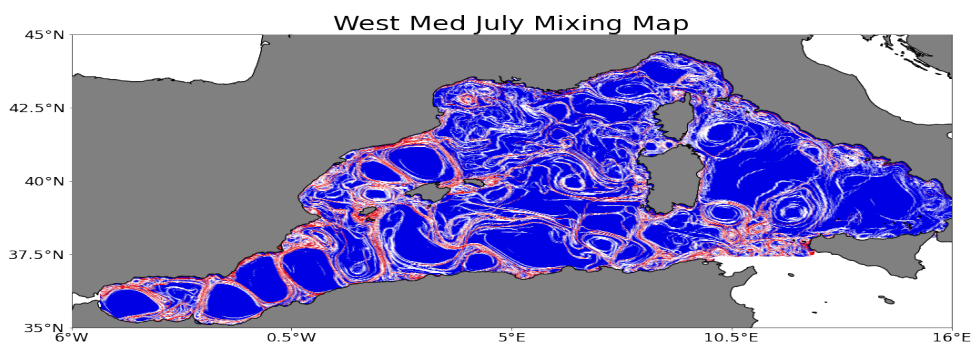
**Σχήμα .2.28:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Απρίλιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



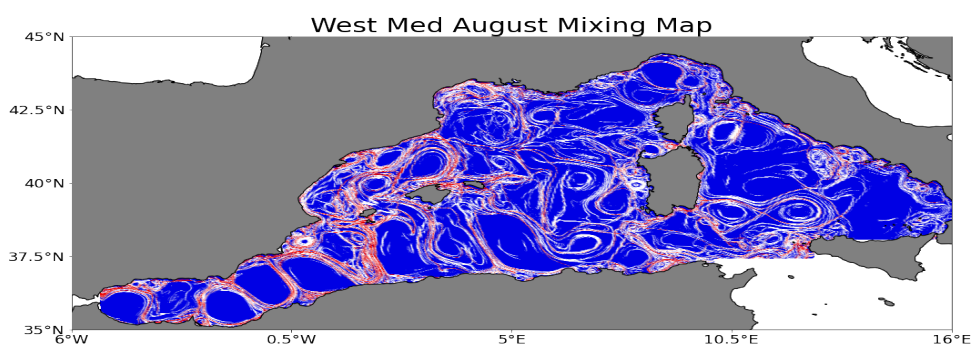
**Σχήμα .2.29:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Μάιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



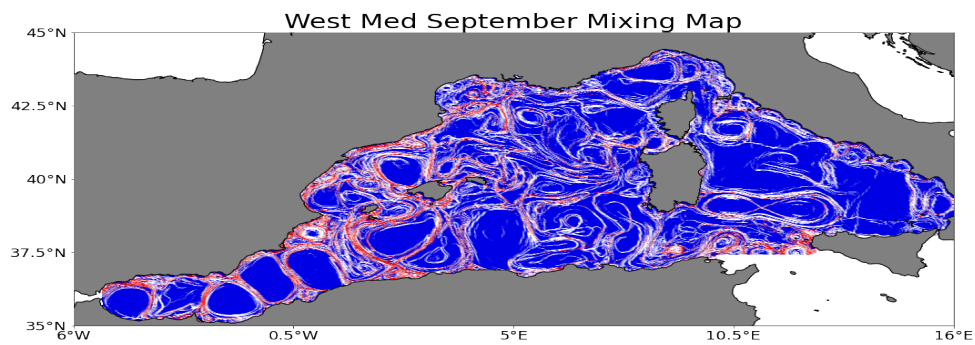
**Σχήμα .2.30:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Ιούνιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



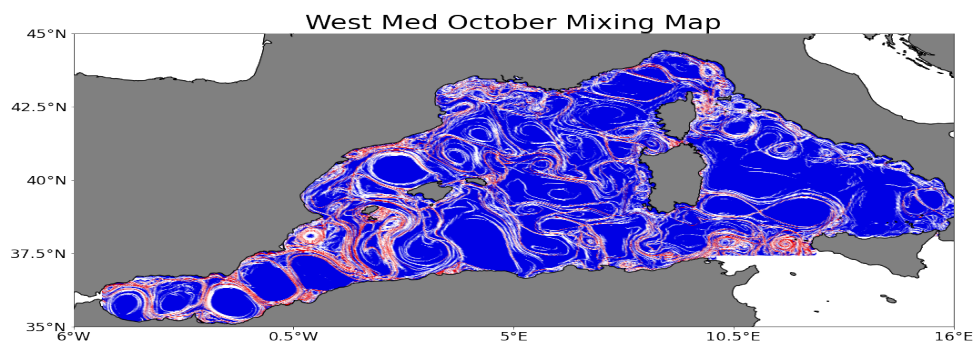
**Σχήμα .2.31:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Ιούλιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



**Σχήμα .2.32:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Αύγουστο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

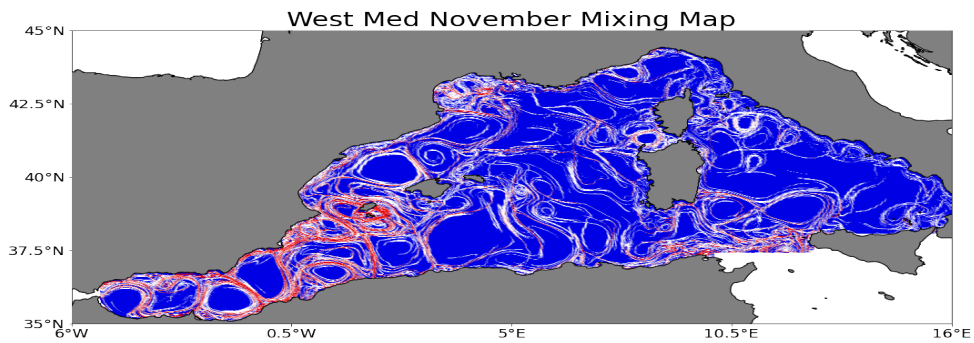


**Σχήμα .2.33:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Σεπτέμβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

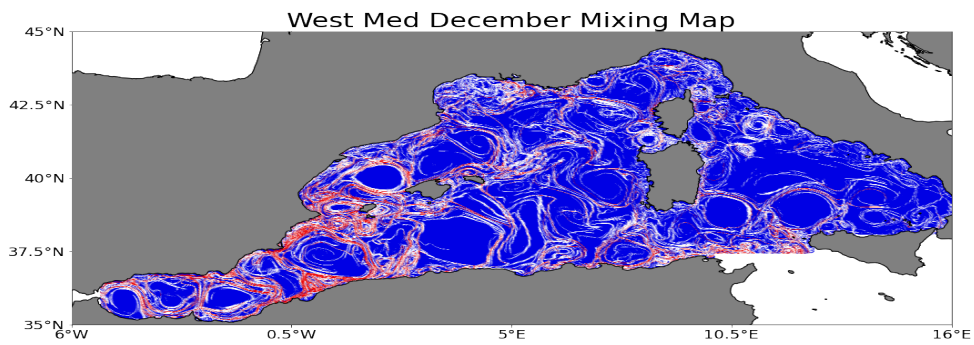


**Σχήμα .2.34:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Οκτώβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



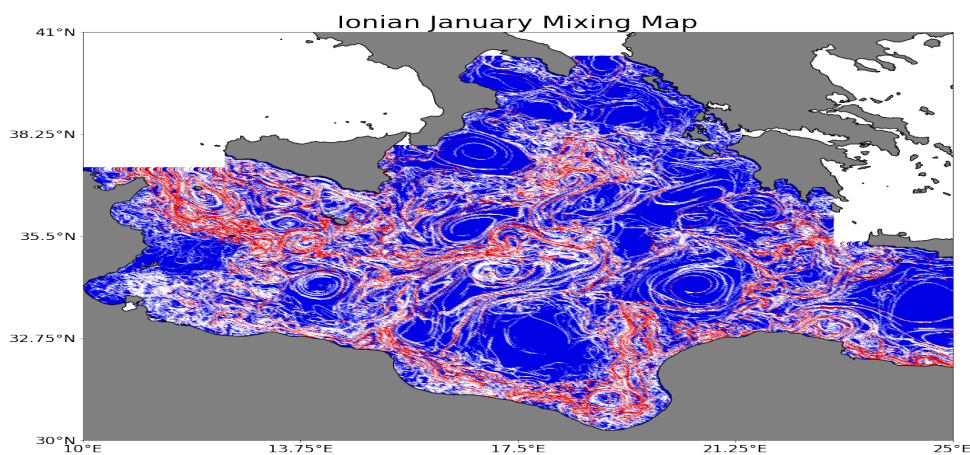


**Σχήμα .2.35:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Νοέμβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

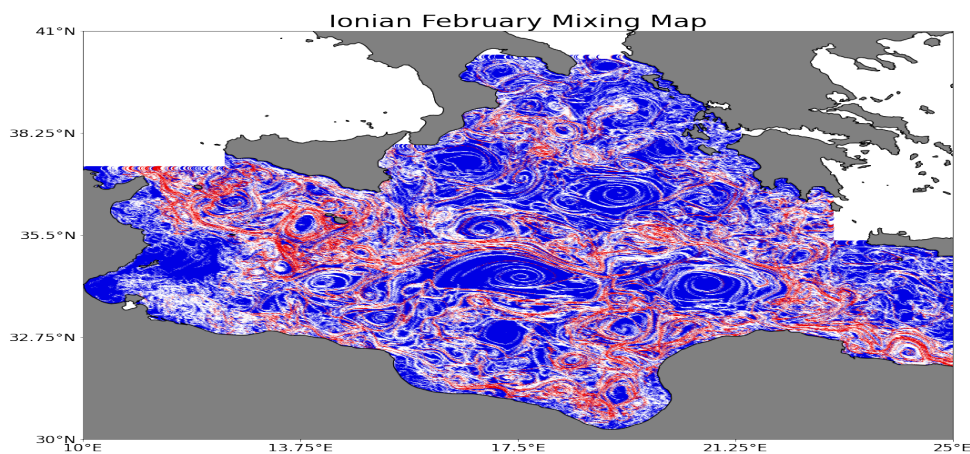


**Σχήμα .2.36:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη δυτική Μεσόγειο κατά το μήνα Δεκέμβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

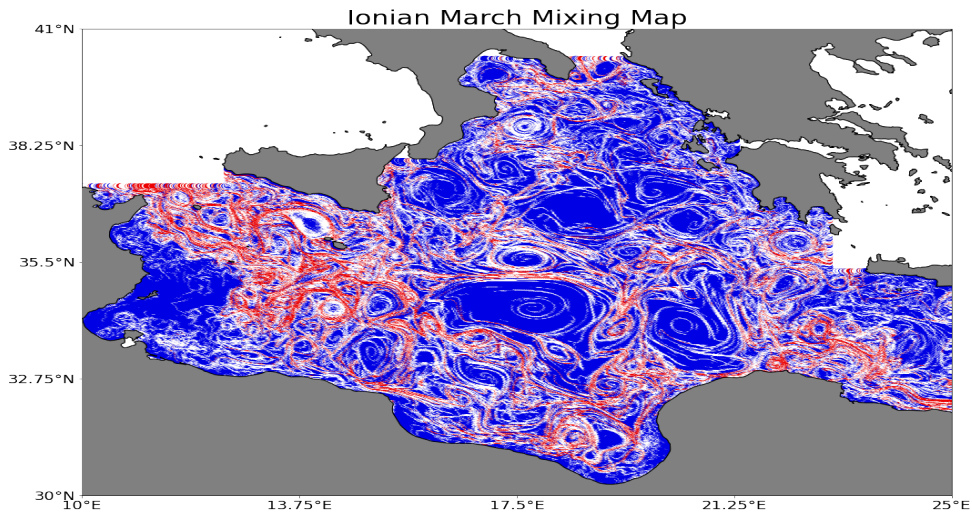
## .2.4 Ιόνιο



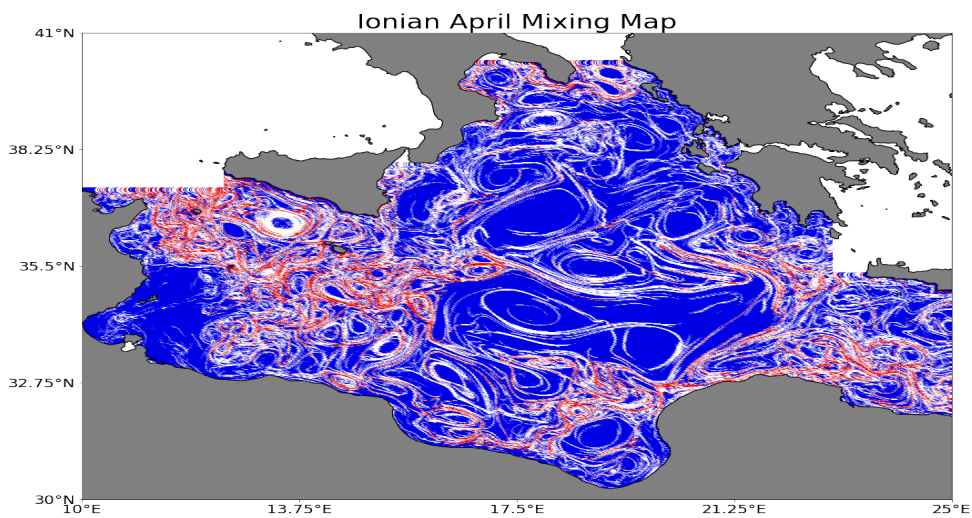
**Σχήμα .2.37:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Ιόνιο κατά το μήνα Ιανουάριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



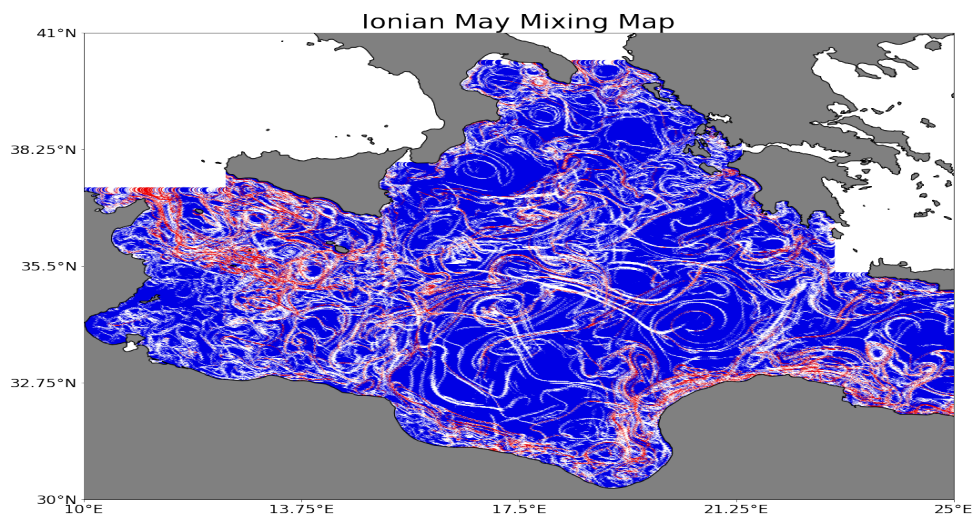
**Σχήμα .2.38:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Ιόνιο κατά το μήνα Φεβρουάριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



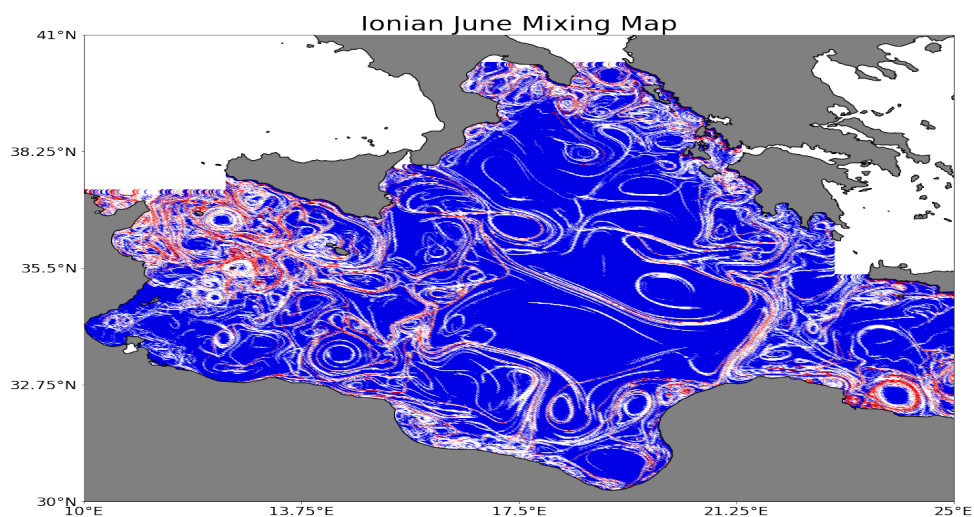
**Σχήμα .2.39:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Ιόνιο κατά το μήνα Μάρτιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



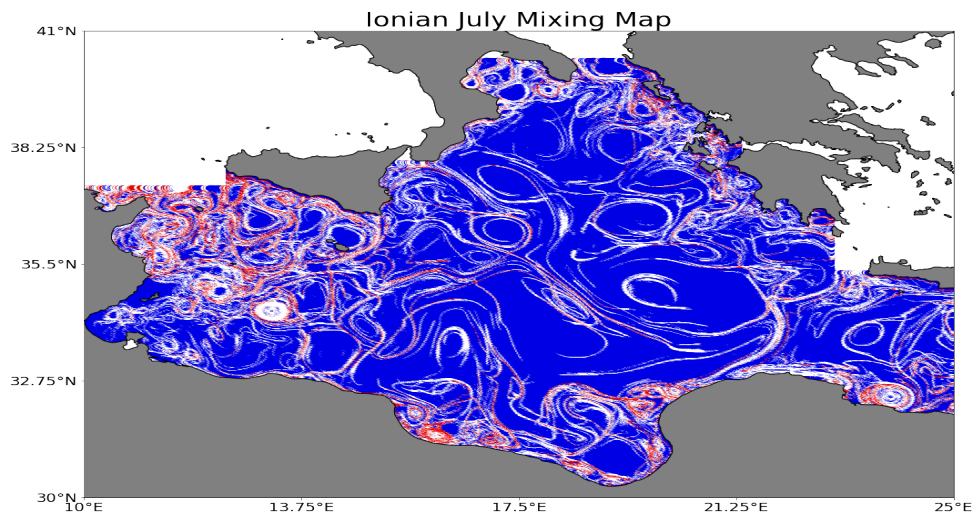
**Σχήμα .2.40:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Ιόνιο κατά το μήνα Απρίλιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



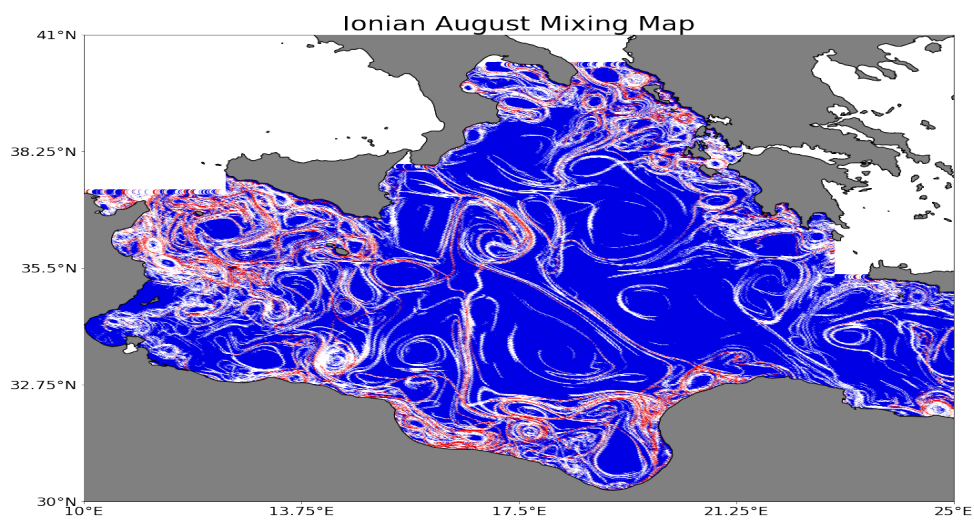
**Σχήμα .2.41:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Ιόνιο κατά το μήνα Μάιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



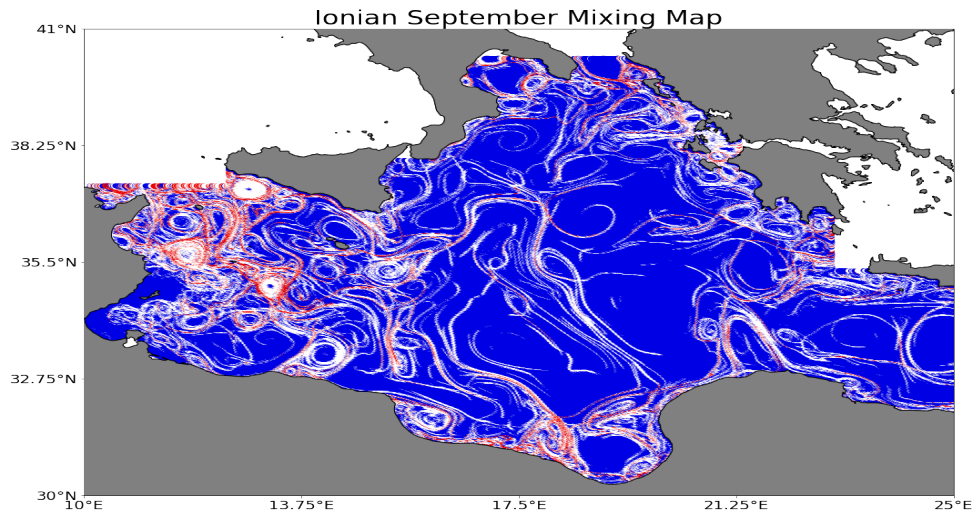
**Σχήμα .2.42:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Ιόνιο κατά το μήνα Ιούνιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



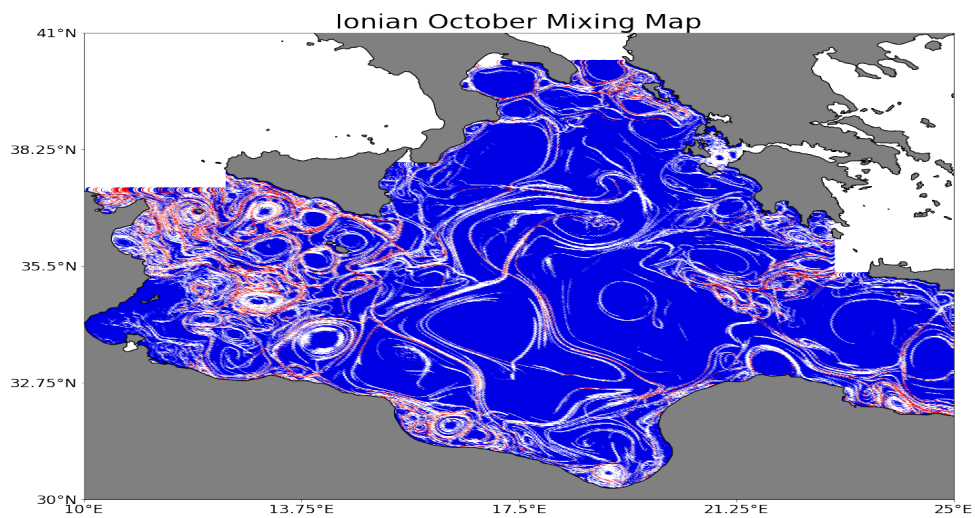
**Σχήμα .2.43:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Ιόνιο κατά το μήνα Ιούλιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



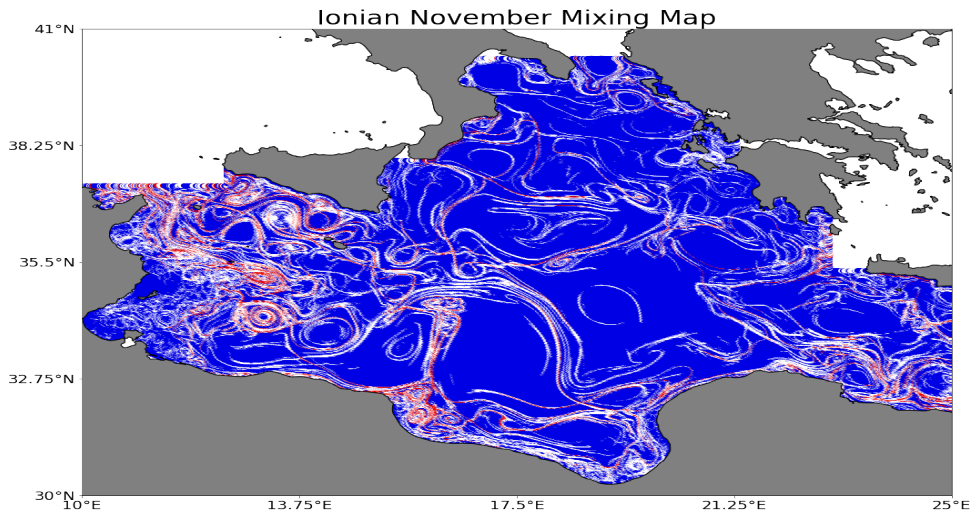
**Σχήμα .2.44:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Ιόνιο κατά το μήνα Αύγουστο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



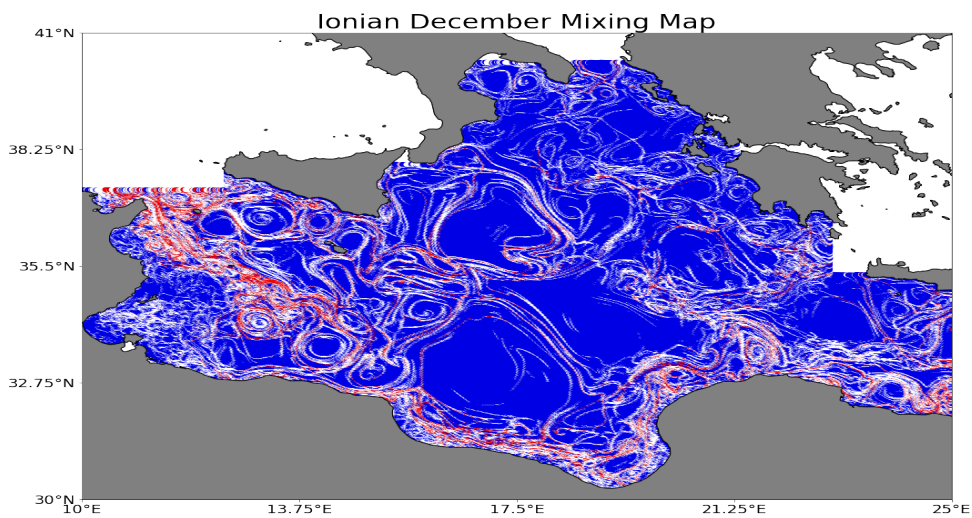
**Σχήμα .2.45:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Ιόνιο κατά το μήνα Σεπτέμβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



**Σχήμα .2.46:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Ιόνιο κατά το μήνα Οκτώβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

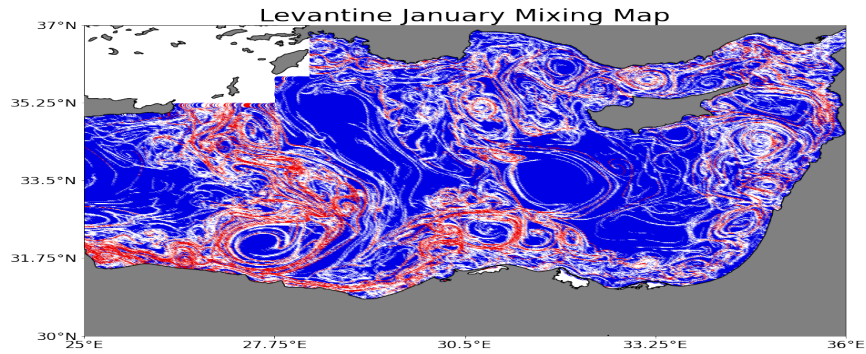


**Σχήμα .2.47:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Ιόνιο κατά το μήνα Νοέμβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

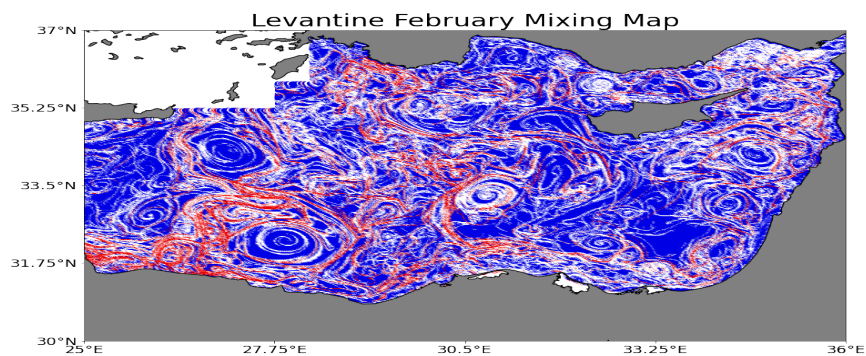


**Σχήμα .2.48:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στο Ιόνιο κατά το μήνα Δεκέμβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

## .2.5 Λεβαντίνη

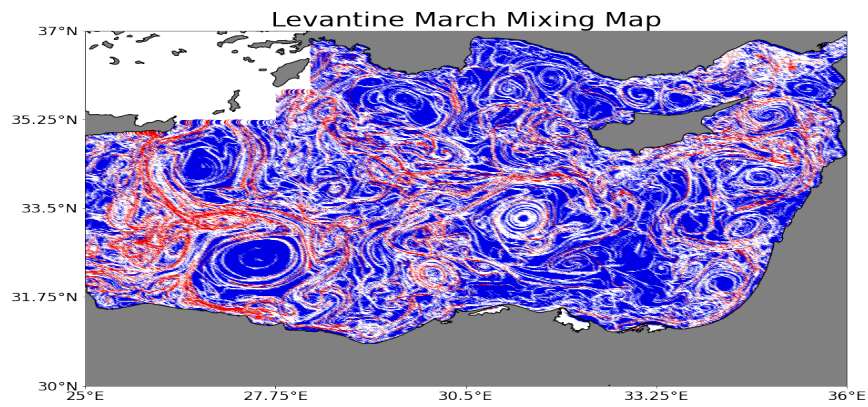


**Σχήμα .2.49:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Ιανουάριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

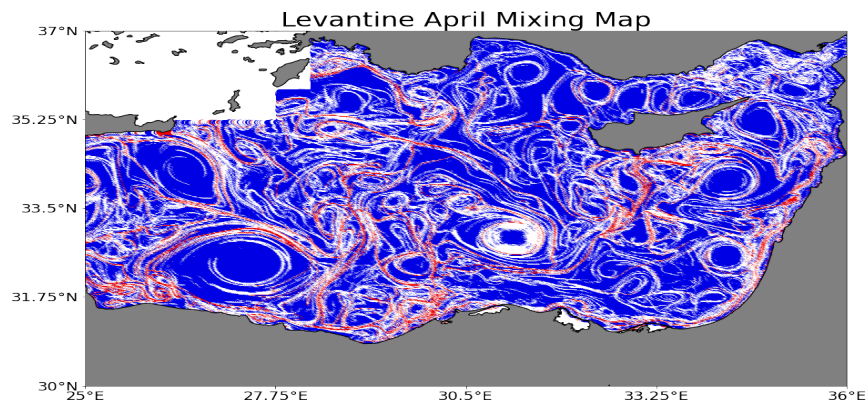


**Σχήμα .2.50:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Φεβρουάριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.

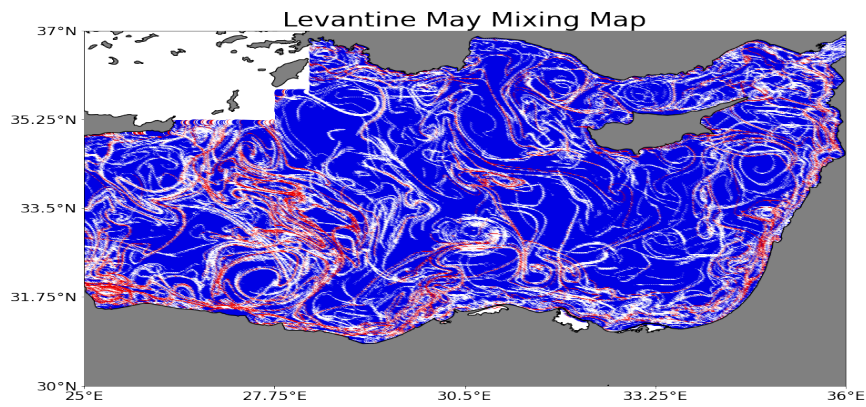




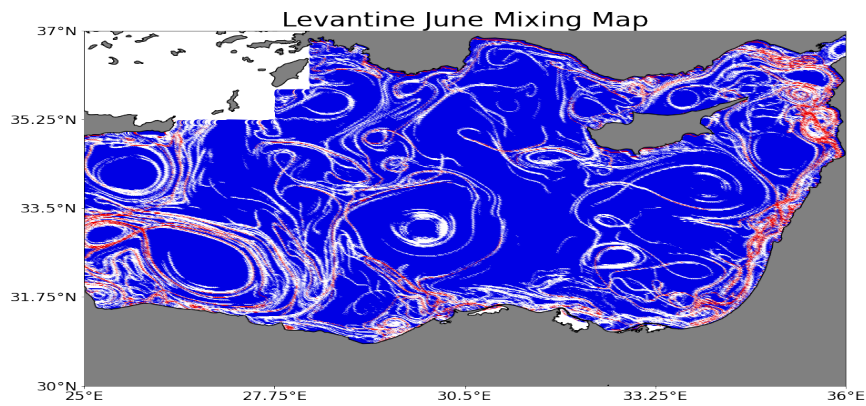
**Σχήμα .2.51:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Μάρτιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



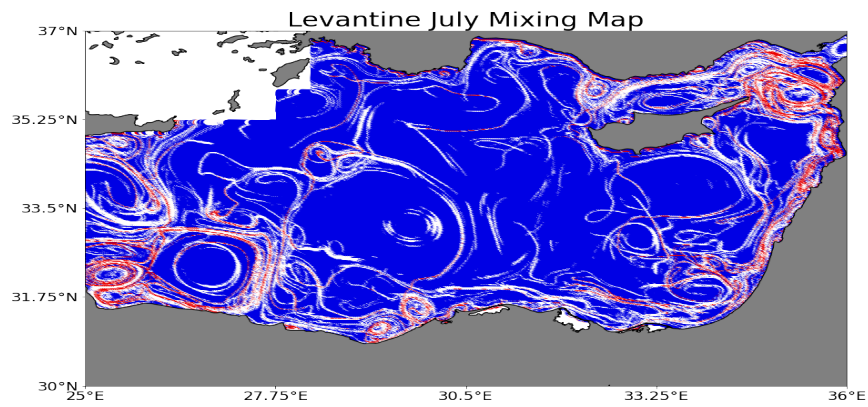
**Σχήμα .2.52:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Απρίλιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



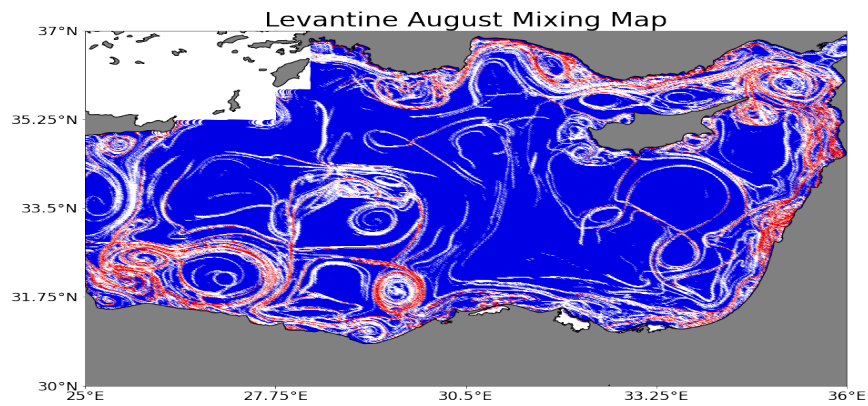
**Σχήμα .2.53:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Μάιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



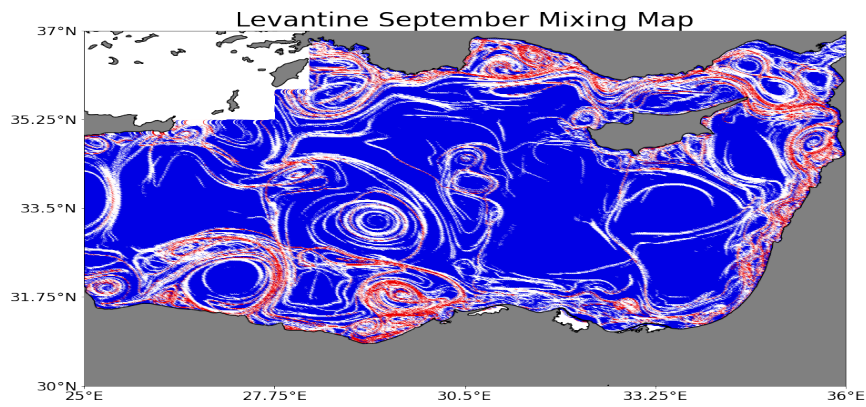
**Σχήμα .2.54:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Ιούνιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



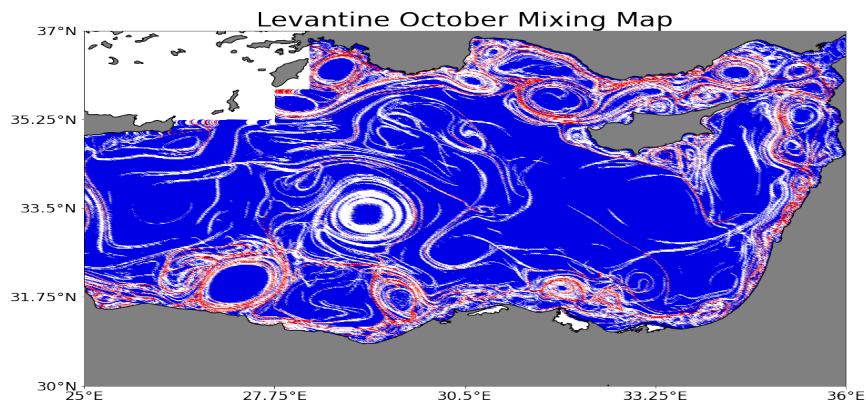
**Σχήμα .2.55:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Ιούλιο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



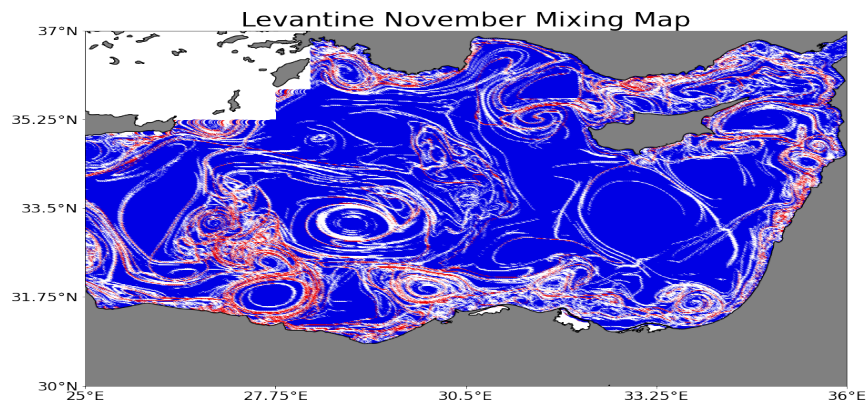
**Σχήμα .2.56:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Αύγουστο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



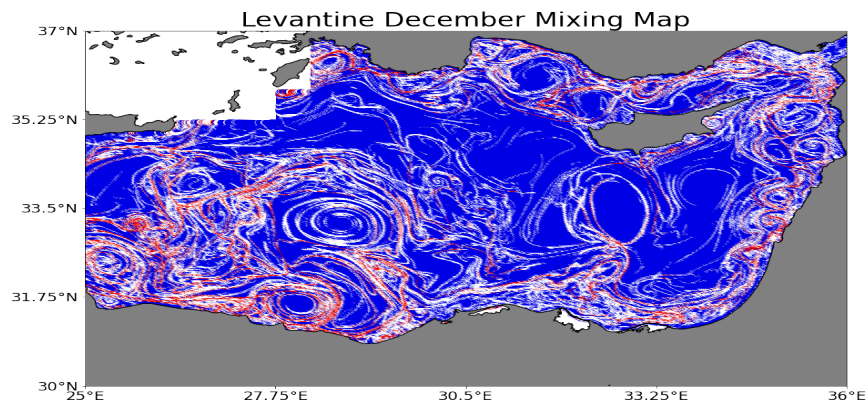
**Σχήμα .2.57:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Σεπτέμβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



**Σχήμα .2.58:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Οκτώβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



**Σχήμα .2.59:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Νοέμβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.



**Σχήμα .2.60:** Κατανομή σημείων ισχυρής και ασθενούς οριζόντιας ανάμειξης στη Λεβαντίνη κατά το μήνα Δεκέμβριο. Τα σημεία ισχυρής ανάμειξης απεικονίζονται με κόκκινο, ενώ οι περιοχές ασθενούς ανάμειξης απεικονίζονται με μπλε. Τα άσπρα σημεία υποδεικνύουν περιοχές εμπόδια στην ανάμειξη.