



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ
ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ
ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ-ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΥ ΜΑΚΑΤΟΥΝΗ
Πτυχιούχου Γεωγράφου
Μ. Sc. Διαχείριση Ενέργειας & Προστασία
Περιβάλλοντος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:
Α.Ι. ΣΤΑΜΟΥ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΞΟΥΡΕΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ-ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ ΜΑΚΑΤΟΥΝΗΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Α. Ι. ΣΤΑΜΟΥ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π. (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

Β. ΤΣΟΥΚΑΛΑ, ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.

Ν. ΒΕΝΤΙΚΟΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΕΓΚΡΙΘΗΚΕ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΤΑΜΕΛΗ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΗΝ 29/8/2023

Α. Ι. ΣΤΑΜΟΥ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Β. ΤΣΟΥΚΑΛΑ
ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.

Ν. ΒΕΝΤΙΚΟΣ
ΑΝΑΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Ε. ΧΑΤΖΗΓΕΩΡΓΙΟΥ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Α. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ
ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ Α' ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.

Α. ΔΗΜΑΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Π. ΠΑΤΡΩΝ

Μ. ΧΟΝΔΡΟΣ
ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, 2023

Στους γονείς μου, Κορίνα και Ζαχαρία

Πρόλογος - Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στα Εργαστήρια Υδραυλικής και Λιμενικών Έργων του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και στον ερευνητικό οργανισμό SINTEF της Νορβηγίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά μου, Αναστάσιο Στάμου, Καθηγητή Ε.Μ.Π., ο οποίος με τίμησε με την εμπιστοσύνη του κατά το ξεκίνημά μου και μου έδινε πολύτιμες συμβουλές σε όλη τη διάρκεια των διδακτορικών μου σπουδών.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά μου στον ερευνητικό οργανισμό SINTEF, Per Johan Brandvik, Καθηγητή NTNU, για την υποστήριξή του κατά τη διάρκεια της παραμονής μου στον ερευνητικό οργανισμό SINTEF.

Ευχαριστώ θερμά τα δύο μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, την κ. Β. Τσουκαλά, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. και τον κ. Ν. Βεντίκο, Αναπ. Καθηγητή Ε.Μ.Π.

Ευχαριστώ θερμά τον κ. Α. Παπαδόπουλο, Ερευνητή Α' ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., και τον κ. Μ. Χονδρό, Επ. Καθηγητή ΕΜΠ, για τα εποικοδομητικά τους σχόλια που βελτίωσαν το κείμενο της διατριβής, καθώς και για τη συμμετοχή τους στην επταμελή επιτροπή της εξέτασης της παρούσας διατριβής.

Ευχαριστώ ακόμα, τον κ. Ι. Χατζηγεωργίου, Καθηγητή Ε.Μ.Π. και τον κ. Α. Δήμα, Καθηγητή Παν/μίου Πατρών, για την προθυμία τους να συμμετάσχουν στην επταμελή επιτροπή της εξέτασης της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστώ, τον μεταδιδάκτορα Jørgen Skancke για την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την παραμετροποίηση των σεναρίων του μοντέλου OSCAR, καθώς και τη συμβολή του ως προς την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Ευχαριστώ, τον μεταδιδάκτορα και φίλο Ηλία Γάτο για τη βοήθεια του στην αναθεώρηση του κειμένου της δημοσίευσης για την προσομοίωση με τη χρήση του μοντέλου GNOME.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω το επιστημονικό και τεχνικό προσωπικό του οργανισμού SINTEF και κυρίως τον Daniel Franklin Krause και τον Frode Leirvik για την υποστήριξη κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω την ομάδα του Παν/μίου Αθηνών, τον αείμνηστο Καθηγητή κ. Κάλλο και τους συνεργάτες του και ιδιαίτερα την κ. Καλογερή και τον κ. Σπύρου για τη χορήγηση των δεδομένων από το ατμοσφαιρικό μοντέλο SKIRON, καθώς και την κ. Νάντσου, Επικεφαλής περιβαλλοντικής πολιτικής του WWF, για τη χορήγηση των δεδομένων από τις δορυφορικές εικόνες για το ατύχημα του τάνκερ «Αγία Ζώνη II».

Επιπλέον, ευχαριστώ το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ) για τη χρηματοδότηση τμήματος της διδακτορικής μου διατριβής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Κορίνα και Ζαχαρία, τον αδερφό μου Αντώνη καθώς και την Αριάδνη μου για την υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των διδακτορικών μου σπουδών, αλλά και συνολικά για την αμέριστη συμπαράστασή τους.



.....

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ-ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ ΜΑΚΑΤΟΥΝΗΣ

Copyright © Παναγιώτης-Ελευθέριος Ζ. Μακατούνης, 2023.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Μέρος της διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκε στη Νορβηγία και υλοποιήθηκε μέσω του Έργου «Υποτροφίες ΙΚΥ στην Ολοκληρωμένη Διαχείριση Θαλάσσιων και Εσωτερικών Υδάτων» και συγχρηματοδοτήθηκε κατά 85% από πόρους του ΧΜ ΕΟΧ περιόδου 2009-2014 και κατά 15% από το Πρόγραμμα Δημοσίων Επενδύσεων.



Περίληψη

Η περιβαλλοντική διαχείριση πετρελαιοκηλίδων είναι ένα σύνθετο, διεπιστημονικό πεδίο έρευνας που έχει σαν στόχο την πρόληψη της διαρροής πετρελαίου στη θάλασσα και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όταν αυτή προκύψει εξαιτίας ατυχήματος. Σημαντικά εργαλεία περιβαλλοντικής διαχείρισης αποτελούν τα μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδων.

Η μελλοντική ανάπτυξη δραστηριοτήτων έρευνας και αξιοποίησης υδρογονανθράκων στον ελληνικό χώρο, καθιστά αναγκαία τη χρήση των μοντέλων αυτών:

- A. κατά την επιλογή των θέσεων εξόρυξης, αλλά και
- B. σε περίπτωση ατυχηματικής διαρροής:
 - i. για την πρόγνωση της κίνησης της επιφανειακής πετρελαιοκηλίδας καθώς και του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη, αλλά και
 - ii. για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου αντιμετώπισης.

Από τη βιβλιογραφική διερεύνηση, σχετικά με τις εφαρμογές των μοντέλων προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδας αλλά και των απαιτούμενων δεδομένων εισόδου των μοντέλων αυτών, διαπιστώθηκαν τα ακόλουθα:

- Η μέθοδος υπολογισμού των παράκτιων ρευμάτων ως δεδομένα εισόδου σε μοντέλο προσομοίωσης για τον υπολογισμό της τροχιάς της πετρελαιοκηλίδας σε ένα περιστατικό επιφανειακής διαρροής, ποικίλλουν από περιοχή σε περιοχή και ότι κάθε περίπτωση εξετάζεται ξεχωριστά. Συμπληρωματικά, στην Ελλάδα δεν έχουν διερευνηθεί πλήρως τα δεδομένα που επηρεάζουν την τροχιά της πετρελαιοκηλίδας, οπότε, είναι σημαντικό να εξεταστούν, χρησιμοποιώντας μια ποικιλία δεδομένων ανέμων και ρευμάτων για τις προσομοιώσεις αναπαραγωγής ενός πραγματικού περιστατικού.
- Η επίδραση των διαφορετικών καιρικών συνθηκών ανά εποχή στην πιθανότητα ρύπανσης περιβαλλοντικά ευαίσθητων περιοχών από πετρέλαιο, σε περιπτώσεις ατυχημάτων κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων εξόρυξης πετρελαίου σε μικρά/ενδιάμεσα βάθη νερού, δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς. Επίσης, η επίδραση της χρήσης επιφανειακών μέτρων αντιμετώπισης και καθαρισμού στο μέγεθος των επιπτώσεων από τη ρύπανση αποτελεί ένα πεδίο που δεν έχει ερευνηθεί. Τέλος, παρατηρήθηκε απουσία προηγούμενων ερευνών σχετικά με την προσομοίωση πιθανών ατυχημάτων διαρροής πετρελαίου από εξορυκτικές ή/και ναυτιλιακές δραστηριότητες στην περιοχή του Ιονίου Πελάγους.
- Η επίδραση της χρήσης της μεθόδου υποθαλάσσιας έγχυσης χημικών διασποράς (SSDI, subsea dispersant injection) κατά τη διαρροή διαφόρων τύπων πετρελαίου από μεγάλα βάθη στη συμπεριφορά της πετρελαιοκηλίδας δεν έχει διερευνηθεί ακόμα. Επιπλέον, κρίνεται απαραίτητη περαιτέρω έρευνα στην ευρύτερη Μεσόγειο Θάλασσα, όπου δεν έχει γίνει εκτενής έρευνα μέχρι σήμερα.

Από τη βιβλιογραφική διερεύνηση, αναφορικά με τα πειράματα που έχουν διεξαχθεί για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου SSDI στη μείωση του μεγέθους των σταγονιδίων του πετρελαίου, σε περίπτωση διαρροής σε βάθος:

- Διαπιστώθηκε ότι, παρά την εκτεταμένη έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί, η επίδραση της θερμοκρασίας του πετρελαίου στην αποτελεσματικότητα της SSDI δεν έχει διερευνηθεί. Η θερμοκρασία πετρελαίου θεωρείται σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη, καθώς μπορεί να επηρεάσει διάφορους παράγοντες όπως το ιξώδες και η πυκνότητα του πετρελαίου, που μπορεί να έχουν επίδραση στην απόδοση της SSDI. Επιπλέον, τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δοκιμών χημικών διασποράς, όπως τα IFP (French Institute of Petroleum test) & MNS (Mackay Nadeau Steelman test), προσανατολίζονται στην εφαρμογή των χημικών διασποράς στην επιφάνεια, οπότε

κρίνεται απαραίτητη η ανάπτυξη ενός ενημερωμένου πρωτοκόλλου που να προσομοιώνει τις συνθήκες έγχυσης σε υποθαλάσσιες διαρροές πετρελαίου.

Το κύριο αποτέλεσμα της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι ότι διερευνήθηκαν κρίσιμες παράμετροι που σχετίζονται με τη συνολική περιβαλλοντική διαχείριση περιστατικών πετρελαιοκηλίδων και αναμένεται να αποτελέσουν τη βάση της μεθοδολογίας για την αντιμετώπιση τυχόν περιστατικών κατά τις επικείμενες διαδικασίες εξόρυξης που αναμένονται στις ελληνικές θάλασσες.

Για την απάντηση των ερωτημάτων στα οποία χρησιμοποιήθηκαν υπολογιστικά μοντέλα η διερεύνηση των παραμέτρων πραγματοποιήθηκε σε διάφορες θαλάσσιες περιοχές της Ελλάδας, και συγκεκριμένα στον Σαρωνικό, στον Πατραϊκό και στον Κυπαρισσιακό Κόλπο.

Τα ακόλουθα συμπεράσματα εξήχθησαν, τα οποία ουσιαστικά αποτελούν τις απαντήσεις στα 4 ερευνητικά ερωτήματα:

1. Τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης, στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν τόσο δεδομένα ανέμου όσο και ρευμάτων για τον υπολογισμό των παράκτιων ρευμάτων ήταν σε καλύτερη συμφωνία με τα δορυφορικά δεδομένα και τα δεδομένα πεδίου, υποδεικνύοντας ότι και οι δύο δυνάμεις έπαιξαν σημαντικό ρόλο στη μετατόπιση της πετρελαιοκηλίδας της Αγίας Ζώνης ΙΙ προς την ακτή. Τα ευρήματα δείχνουν ότι τα θαλάσσια ρεύματα έπαιξαν σημαντικότερο ρόλο στην εξάπλωση της πετρελαιοκηλίδας κατά τη διάρκεια αυτού του περιστατικού. Ωστόσο, χωρίς τη συμπερίληψη των δεδομένων ανέμου, δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί η πρόγνωση της πλήρους έκτασης του πετρελαίου που κατέληξε στην ακτογραμμή.
2. Με βάση την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:
 - A. Οι στοχαστικοί υπολογισμοί έδειξαν ότι υπάρχει σημαντική πιθανότητα πετρελαϊκής ρύπανσης στον Πατραϊκό Κόλπο, που μπορεί να φτάσει το 30% στις λιμνοθάλασσες Μεσολογγίου – Αιτωλικού. Επίσης παρατηρείται σημαντική μεταβολή στα αποτελέσματα των στοχαστικών προσομοιώσεων λόγω των διαφορετικών καιρικών συνθηκών που επικρατούν στις διάφορες εποχές που εξετάστηκαν.
 - B. Οι ντετερμινιστικοί υπολογισμοί έδειξαν ότι το 78-90% του πληθυσμού των πτηνών και το 2-4% του πληθυσμού των ιχθύων αναμένεται να μολυνθούν σε περίπτωση πετρελαιοκηλίδας χωρίς καμία παρέμβαση. Για τα υφιστάμενα συστήματα αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων στην Ελλάδα, η χρήση χημικών μείωσε την ποσότητα του πετρελαίου που κατέληξε στις ακτές κατά περίπου 16-21% και τον πληθυσμό των μολυσμένων πτηνών στις λιμνοθάλασσες σε περίπου 70%. Ωστόσο, ο πληθυσμός των ιχθύων που επηρεάστηκαν αυξήθηκε σε 6-8,5% λόγω της υψηλότερης συγκέντρωσης πετρελαίου στην υδάτινη στήλη. Η μηχανική ανάκτηση αφαίρεσε σχεδόν το 10% της ποσότητας πετρελαίου που διέρρευσε, αλλά δεν είχε καμία αξιοσημείωτη επίδραση στο πετρέλαιο που κατέληξε στις ακτές και στους πληγέντες πληθυσμούς πτηνών και ιχθύων.
3. Οι ντετερμινιστικοί υπολογισμοί στον Κυπαρισσιακό Κόλπο έδειξαν ότι η εφαρμογή της μεθόδου SSDI οδήγησε στη μείωση της ποσότητας του πετρελαίου στην επιφάνεια κατά περίπου 25-74% και την περιοχή επίδρασης πάνω από το καθορισμένο όριο (πάχος $\geq 0,1\text{mm}$) κατά περίπου 37-62%. Ωστόσο, ταυτόχρονα οδήγησε σε αύξηση της μάζας του πετρελαίου που παρέμεινε βυθισμένη κατά 161 έως 274%, και σε αύξηση του όγκου που επηρεάστηκε (συγκέντρωση $\geq 10\text{ppm}$) κατά 199-398%. Αυτά τα αποτελέσματα οφείλονται στη μείωση των μεγεθών των σταγονιδίων πετρελαίου, η οποία οδήγησε σε μείωση των ταχυτήτων ανάδυσσης.

Μεταξύ των 4 τύπων πετρελαίου που εξετάστηκαν, το παραφινικό πετρέλαιο παρουσίασε τη μεγαλύτερη μείωση στην επιφάνεια επίδρασης και την ποσότητα του πετρελαίου στην επιφάνεια, ενώ το κηρώδες πετρέλαιο έδειξε τη χαμηλότερη μείωση.

Μπορεί να επισημανθεί ότι κρίσιμοι παράγοντες για τη χρήση SSDI προκειμένου να μειωθεί η καθαρή περιβαλλοντική επίδραση, είναι ο τύπος πετρελαίου που απελευθερώνεται, οι εποχικές αλλαγές και η παρουσία φυσικών πόρων, όπως η ωοτοκία των ιχθύων ή η μετανάστευση πτηνών.

4. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου SSDI στη μείωση του μεγέθους των σταγονιδίων πετρελαίου (d_{50}) έχει εξεταστεί για ένα ευρύ φάσμα τύπων πετρελαίου με ποικίλες ιδιότητες. Η επίδραση της θερμοκρασίας πετρελαίου στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου SSDI έχει ως εξής: στο εξεταζόμενο παραφινικό πετρέλαιο μειώνεται ενώ στην περίπτωση των εξεταζόμενων πετρελαίων ασφαλτενικού και ναφθενικού τύπου αυξάνεται. Στην περίπτωση του κηρώδους πετρελαίου δεν παρατηρήθηκε επίδραση της αποτελεσματικότητας σχετιζόμενη με τη μεταβολή της θερμοκρασίας πετρελαίου.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή σε συνδυασμό με προηγούμενες έρευνες που χρησιμοποίησαν τέσσερις διαφορετικούς τύπους χημικών καθώς και διάφορες δοσολογίες, οδήγησαν στην ανάπτυξη ενός νέου πρωτοκόλλου δοκιμής χημικών διασποράς (Dispersant Injection Efficiency test, DIET).

Ιδιαίτερη σημασία έχει η παρατήρηση ότι η κατάταξη των χημικών που επιτυγχάνεται με τη νέα μέθοδο δοκιμής είναι ουσιαστικά διαφορετική από τα αποτελέσματα που παράγονται με τη χρήση συμβατικών μεθόδων για την επιφανειακή εφαρμογή χημικών διασποράς (IFP). Αυτή η διαφορά συνεπάγεται ότι οι υπάρχουσες τυπικές μέθοδοι για τη δοκιμή αποτελεσματικότητας των χημικών είναι λιγότερο εφαρμόσιμες για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της SSDI.

Το νέο πρωτόκολλο δοκιμής περιλαμβάνει πολλά βασικά στοιχεία που συμβάλλουν στην αποτελεσματικότητά του:

- ο Χρησιμοποιεί ένα καθεστώς αναταράξεων που αναπαριστά τις συνθήκες των υποθαλάσσιων εκλύσεων πετρελαίου, και συγκεκριμένα ενός τυρβώδους τζετ.
- ο Μετρά την αποτελεσματικότητα των χημικών διασποράς ποσοτικά μέσω της μείωσης του μεγέθους των σταγονιδίων πετρελαίου σε σύγκριση με το μη επεξεργασμένο πετρέλαιο.
- ο Χρησιμοποιεί ένα σύστημα ροής θαλασσινού νερού που επιτρέπει τη δοκιμή ενός ευρέος φάσματος συγκεντρώσεων και μεγεθών σταγονιδίων.
- ο Η έγχυση του χημικού πραγματοποιείται απευθείας στο πετρέλαιο με ρεαλιστικό και λειτουργικό τρόπο.
- ο Λαμβάνει υπόψη μια αυξημένη θερμοκρασία πετρελαίου 50°C που σχετίζεται με τις πραγματικές συνθήκες.
- ο Προσαρμόζεται εύκολα σε ένα ευρύ φάσμα δόσεων χημικών διασποράς.
- ο Επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση κατά τη διαρροή πετρελαίου, με την οποία επιτυγχάνεται η συλλογή στατιστικά σημαντικών δεδομένων.
- ο Μπορεί να είναι εξαιρετικά αυτοματοποιημένο, γρήγορο και οικονομικά αποδοτικό.

Abstract

Environmental management of oil spills is a complex, interdisciplinary field of research aimed at preventing oil spills at sea and minimizing the environmental impact when they occur as a result of an accident. Mathematical models for oil spill simulation are important environmental management tools.

The future development of hydrocarbon exploration and production activities in Greece makes it necessary to use these models:

- A. in the selection of extraction sites, but also
- B. in case of accidental spills:
 - i. to predict the movement of the surface oil spill as well as the oil in the water column, and
 - ii. to select the appropriate response method.

From the literature survey, regarding the applications of oil spill simulation models and the required input data of these models, the following were found:

- The method for calculating coastal currents as input data for a simulation model to determine the trajectory of an oil spill in a surface spill incident varies from one region to another. As a result, each case is treated individually. Furthermore, in Greece, the factors influencing the oil spill trajectory have not been thoroughly investigated. Therefore, it is essential to take into account a diverse range of wind and current data for simulations in order to accurately reproduce a real incident.
- The impact of various weather conditions during different seasons on the probability of oil pollution in environmentally sensitive areas resulting from accidents during oil extraction activities in shallow/intermediate water depths has not been sufficiently investigated. Additionally, the effects of employing surface response and clean-up measures on the extent of pollution consequences remain unexplored. Lastly, there is a lack of previous research concerning the simulation of potential oil spill accidents arising from mining and/or shipping activities in the Ionian Sea region.
- The impact of employing subsea chemical dispersant injection (SSDI) in response to spills of different types of oil from deep water depths on the spill's behavior remains unexplored. Moreover, there is a need for additional research in the broader Mediterranean Sea, as no extensive investigations have been conducted in this region until today.

From the literature survey, regarding the experiments that have been conducted to evaluate the effectiveness of the SSDI method in reducing the size of oil droplets in the event of a deep oil spill was found that:

- Although extensive research has been carried out, there has been no investigation into the effect of oil temperature on the effectiveness of SSDI. Oil temperature is a crucial parameter to consider as it can influence various factors, including oil viscosity and density, which, in turn, can impact SSDI performance. Additionally, current chemical dispersion testing protocols, like the IFP (French Institute of Petroleum test) and MNS (Mackay Nadeau Steelman test), focus on surface dispersion chemical applications. Thus, there is a need to develop an updated protocol that accurately simulates injection conditions during subsea oil spills.

The main result of this PhD thesis is that critical parameters related to the overall environmental management of oil spill incidents have been investigated and are expected to form the basis of the methodology for the response to any incidents during the upcoming drilling operations expected in the Greek seas.

In order to answer the questions for which computational models were used, the investigation of the parameters was carried out in various marine areas of Greece, namely in the Saronic Gulf, Gulf of Patras and Gulf of Kyparissia.

The following conclusions were drawn, which essentially constitute the answers to the four research questions:

1. The results obtained from the simulation model, which incorporated both wind and current data to calculate coastal currents, exhibited stronger agreement with the real incident's satellite and field data. This alignment indicates that both wind and current forces were significant contributors to the movement of the Holy Zone II oil slick toward the coast. The findings suggest that currents had a more pronounced impact on the spread of the oil spill during this event. Nonetheless, the absence of wind data hindered our ability to fully predict the extent to which the shoreline would be affected by the oil spill.
2. Based on the analysis of the results, the following conclusions were drawn:
 - A. The stochastic calculations showed that there is a significant probability of oil pollution in the Patraikos Gulf, which can reach 30% in the lagoons of Messolonghi - Aitoliko. In addition, a significant variation is observed in the results of stochastic simulations due to the different weather conditions prevailing during the various seasons that were examined.
 - B. Deterministic calculations showed that 78-90% of the bird population and 2-4% of the fish population are expected to be contaminated in the event of an oil spill without any intervention. For the existing oil spill response systems in Greece, the use of chemicals reduced the amount of oil reaching the coast by about 16-21% and the population of contaminated birds in lagoons by about 70%. However, the population of affected fish increased to 6-8.5% due to the higher concentration of oil in the water column. Mechanical recovery removed nearly 10% of the oil spilled, but had no appreciable effect on the oil that ended up on the shores and on the affected bird and fish populations.
3. Deterministic calculations conducted in the Gulf of Kyparissia demonstrated that implementing the SSDI method resulted in a surface oil reduction of around 25-74% and an approximately 37-62% decrease in the affected area above the defined threshold (thickness \geq 0.1 mm). Nevertheless, it also led to a significant increase in the mass of submerged oil by 161 to 274%, and an increase in the volume affected (concentration \geq 10 ppm) by 199-398%. These outcomes were attributed to a decrease in oil droplet sizes, which subsequently caused a reduction in the ascent rates.

Among the 4 types of oil tested, paraffinic oil showed the greatest reduction in affected surface area and amount of oil on the surface, while waxy oil showed the lowest reduction. It can be pointed out that critical factors for using SSDI to reduce the net environmental impact are the type of oil released, seasonal changes, and the presence of natural resources such as fish spawning or bird migration.

4. The effectiveness of the SSDI method in reducing oil droplet size (d_{50}) has been tested for a wide range of oil types with varying properties. The effect of oil temperature on the effectiveness of the SSDI method is as follows: in the case of the paraffinic oil tested, it decreases while in the case of the asphaltene and naphthenic type oils tested, it increases. In the case of the waxy oil, no effect of efficiency related to the change in oil temperature was observed.

The results of the experiments conducted in this thesis, combined with previous research using four different types of chemicals and various dosages, led to the development of a new protocol for the Dispersant Injection Efficiency Test (DIET).

Of particular importance is the observation that the chemical ranking achieved by the new test method is substantially different from the results produced using conventional methods for the surface application of dispersant chemicals (IFP). This difference implies that existing standard methods for chemical efficiency testing are less applicable for evaluating the effectiveness of SSDI.

The new test protocol includes several key elements that contribute to its effectiveness:

- It uses a turbulence regime that represents the conditions of subsea oil spills, specifically a turbulent jet.
- Measures the effectiveness of chemical dispersants quantitatively through the reduction in oil droplet size compared to untreated oil.
- Uses a seawater flow system that allows testing of a wide range of droplet concentrations and sizes.
- Injection of the chemical directly into the oil in a realistic and functional manner.
- It takes into account an elevated oil temperature of 50°C associated with real world conditions.
- Easily adapts to a wide range of chemical dispersion doses.
- Allows for continuous monitoring during oil spill, which enables the collection of statistically significant data.
- Can be highly automated, fast and cost-effective.

Περιεχόμενα

Πρόλογος - Ευχαριστίες	<i>i</i>
Περίληψη	<i>v</i>
Abstract	<i>ix</i>
Περιεχόμενα	<i>xiii</i>
Κατάλογος σχημάτων	<i>xvi</i>
Κατάλογος πινάκων	<i>xix</i>
Συντομογραφίες	<i>xx</i>
1 Εισαγωγή	1
1.1 Περιβαλλοντική διαχείριση πετρελαιοκηλίδων	1
1.2 Φυσικοχημικές ιδιότητες πετρελαίου	2
1.2.1 Γενικά	2
1.2.2 Πυκνότητα - Βαρύτητα API (API gravity)	2
1.2.3 Ιξώδες	3
1.2.4 Σημείο ροής (pour point)	3
1.2.5 Σημείο ανάφλεξης (flash point)	3
1.2.6 Διεπιφανειακή τάση	3
1.3 Μέθοδοι εξόρυξης πετρελαίου	3
1.3.1 Γενικά	3
1.3.2 Χερσαία γεώτρηση	4
1.3.3 Υπεράκτια εξόρυξη	4
1.4 Ατυχήματα διαρροών υδρογονανθράκων	4
1.4.1 Κατηγορίες διαρροών πετρελαίου	4
1.4.2 Διεργασίες υποθαλάσσιας διαρροής	5
1.4.3 Διεργασίες επιφανειακής διαρροής - Πετρελαιοκηλίδες	9
1.5 Σημαντικά ατυχήματα διαρροών πετρελαίου	13
1.5.1 Γενικά	13
1.5.2 Ατυχήματα υποθαλάσσιας διαρροής	13
1.5.3 Ατυχήματα επιφανειακής διαρροής - Πετρελαιοκηλίδες	15
1.6 Μέθοδοι αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων	15
1.6.1 Γενικά	15
1.6.2 Φράγματα	16
1.6.3 Μηχανήματα επιφανειακής ανάκτησης	17
1.6.4 Χημικά διασποράς	17
1.6.5 Επιτόπια καύση	18
1.6.6 Απορροφητικά και νανο-υλικά	18
1.6.7 Επεξεργασία με βακτήρια	19
1.6.8 Χωρίς επεξεργασία - Φυσική διασπορά	19
1.6.9 Σύγκριση μεθόδων - Η μέθοδος SSDI	19
1.7 Μελλοντική εξερεύνηση υδρογονανθράκων στην Ελλάδα	19
1.8 Μαθηματικά μοντέλα συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδων	25
1.8.1 Εισαγωγή	25
1.8.2 Δεδομένα εισόδου	27
1.8.3 Κύρια μοντέλα συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδων	27
1.8.4 Παράμετροι που επηρεάζουν την προσομοίωση της συμπεριφοράς των πετρελαιοκηλίδων	29
1.9 Σκοπός της διδακτορικής διατριβής	30
1.10 Ερευνητικά ερωτήματα	30
1.11 Πρωτότυπα σημεία της διατριβής - Δημοσιεύσεις	31
1.11.1 Πρωτότυπα σημεία της διατριβής	31
1.11.2 Δημοσιεύσεις - Ανακοινώσεις	31

1.12	Δομή της διατριβής	32
2	Βιβλιογραφική διερεύνηση	33
2.1	Υπολογιστικές εργασίες	33
2.2	Πειραματικές εργασίες	35
3	Διερεύνηση της επίδρασης της μεθόδου προσδιορισμού των παράκτιων ρευμάτων στην υπολογιζόμενη τροχιά μιας πετρελαιοκηλίδας	39
3.1	Ερευνητικό ερώτημα	39
3.2	Εισαγωγή - Βιβλιογραφική διερεύνηση	39
3.3	Μεθοδολογία	40
3.3.1	Περιγραφή του ατυχήματος «Αγία Ζώνη ΙΙ»	40
3.3.2	Περιοχή υπολογισμών	40
3.3.3	Διαθέσιμες μετρήσεις/παρατηρήσεις πεδίου	41
3.3.4	Δεδομένα ανέμου	42
3.3.5	Δεδομένα επιφανειακών ρευμάτων	45
3.3.6	Μοντέλο GNOME	45
3.4	Σύγκριση υπολογισμών μοντέλου με δεδομένα πεδίου	51
3.4.1	Περίπτωση 1. Σύγκριση υπολογισμών τροχιάς πετρελαιοκηλίδας για διαφορετικά σύνολα δεδομένων ανέμου	51
3.4.2	Περίπτωση 2. Σύγκριση υπολογισμών τροχιάς πετρελαιοκηλίδας για συνδυασμό δεδομένων ανέμων & ρευμάτων	54
3.4.3	Περίπτωση 3. Σύγκριση υπολογισμών τροχιάς πετρελαιοκηλίδας για δεδομένα ρευμάτων	55
3.4.4	Ανάλυση ισοζυγίου μάζας πετρελαίου	56
3.5	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	58
3.6	Συμπέρασμα - Απάντηση σε ερευνητικό ερώτημα	59
4	Διερεύνηση της επίδρασης της επιλογής μεθόδου επιφανειακής αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδας στη ρύπανση περιβαλλοντικά ευαίσθητων περιοχών	61
4.1	Ερευνητικό ερώτημα	61
4.2	Εισαγωγή - Βιβλιογραφική διερεύνηση	61
4.3	Μεθοδολογία	62
4.3.1	Περιοχή υπολογισμών	62
4.3.2	Μεθοδολογία υπολογισμών	63
4.4	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	72
4.4.1	Στοχαστικοί υπολογισμοί και ανάλυση πιθανότητας ρύπανσης πετρελαιοκηλίδων	72
4.4.2	Ντετερμινιστικοί υπολογισμοί - Συμπεριφορά πετρελαιοκηλίδας και αποτελεσματικότητα συστημάτων απόκρισης πετρελαίου	73
4.4.3	Επιπτώσεις της πετρελαιοκηλίδας στις λιμνοθάλασσες Μεσολογίου - Αιτωλικού	78
4.5	Συμπέρασμα - Απάντηση σε ερευνητικό ερώτημα	81
5	Διερεύνηση της επίδρασης του τύπου πετρελαίου στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου SSDI	83
5.1	Ερευνητικό ερώτημα	83
5.2	Εισαγωγή - Βιβλιογραφική διερεύνηση	83
5.3	Μεθοδολογία	83
5.3.1	Περιοχή υπολογισμών	83
5.3.2	Παρουσίαση μεθοδολογίας	84

5.4	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	87
5.4.1	Ντετερμινιστικοί υπολογισμοί - Ισοζύγιο μάζας πετρελαίου	87
5.4.2	Ντετερμινιστικοί υπολογισμοί - Επηρεαζόμενη επιφάνεια & όγκος	89
5.5	Συμπέρασμα - Απάντηση σε ερευνητικό ερώτημα	92
6	Διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας πετρελαίου στην αποτελεσματικότητα της SSDI	93
6.1	Ερευνητικό ερώτημα	93
6.2	Εισαγωγή - Βιβλιογραφική διερεύνηση	93
6.3	Υλικά και μέθοδοι	96
6.3.1	Πειραματική διάταξη	96
6.3.2	Επιλεγμένοι τύποι χημικών και πετρελαίων	98
6.4	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	100
6.4.1	Αποτελεσματικότητα της μεθόδου SSDI στο μέγεθος σταγονιδίων πετρελαίου σε διάφορες θερμοκρασίες διαρροής	100
6.4.2	Πειράματα δοσολογίας χημικών διασποράς	105
6.4.3	Σύγκριση των αποτελεσμάτων διαλογής διασποράς	108
6.5	Συμπέρασμα - Απάντηση σε ερευνητικό ερώτημα	109
7	Συμπεράσματα & προτεινόμενη μελλοντική έρευνα	111
7.1	Συμπεράσματα	111
7.2	Προτεινόμενη μελλοντική έρευνα	113
7.2.1	Υπολογιστική	113
7.2.2	Πειραματική	113
8	Βιβλιογραφία	115

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1 Διάφορες θέσεις πιθανής διαρροής κατά την εξόρυξη πετρελαίου	5
Σχήμα 1.2 Διαρροή πετρελαίου/αερίου εξαιτίας ατυχήματος σε βαθιά νερά	6
Σχήμα 1.3 Σχηματική απεικόνιση διαρροών σε μικρά/ενδιάμεσα (αριστερά) και μεγάλα βάθη (δεξιά) (Πηγή: Daling et al., 2003)	6
Σχήμα 1.4 Σχηματικό διάγραμμα βασικών διεργασιών σε διαρροή μεγάλων βαθών νερού	8
Σχήμα 1.5 Σχηματική απεικόνιση διεργασιών γήρανσης και κίνησης του πετρελαίου.....	10
Σχήμα 1.6 Σημαντικότητα των διεργασιών γήρανσης και χρόνος που συντελούνται	11
Σχήμα 1.7 Ixtoc I	14
Σχήμα 1.8 Έκταση πετρελαιοκηλίδας από το ατύχημα Deepwater Horizon στις 17/5/2010 (Πηγή: https://appliedsciences.nasa.gov/our-impact/news/nasa-images-show-oils-invasion-along-louisiana-coast)	14
Σχήμα 1.9 Μέθοδοι αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδας	16
Σχήμα 1.10 Περιοχές αδειών «Block 1» και «Block 2».....	22
Σχήμα 1.11 Περιοχή άδειας «Ιόνιο»	22
Σχήμα 1.12 Περιοχή άδειας «Block 10»	23
Σχήμα 1.13 Περιοχή άδειας «Πατραϊκός»	23
Σχήμα 1.14 Περιοχή άδειας «Δυτικά της Κρήτης».....	24
Σχήμα 1.15 Περιοχή άδειας «Νοτιοδυτικά της Κρήτης»	24
Σχήμα 1.16 Σχηματικό διάγραμμα απαιτούμενων δεδομένων και τρόπου χρήσης ενός μοντέλου προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδας (OSM).....	26
Σχήμα 3.1 Περιοχή υπολογισμών, θέσεις μετεωρολογικών σταθμών και πλέγματα μοντέλων BOLAM και HYCOM με γκρι και κίτρινο χρώμα, αντίστοιχα	41
Σχήμα 3.2 Χρονική μεταβολή της ρύπανσης όπως παρατηρήθηκε στο πεδίο και από δορυφορικές εικόνες. Με γκριζα τρίγωνα οι πρόσφατα ρυπασμένες περιοχές, με σκούρα πράσινα τρίγωνα οι περιοχές που ρυπάνθηκαν τις προηγούμενες ημέρες, με γκρι πολύγωνα δεδομένα από δορυφόρο και με μαύρο αστέρι η θέση του ναυαγίου	42
Σχήμα 3.3 Ροδογράμματα ανέμου για τα δεδομένα ανέμου της περιόδου υπολογισμών (168 h) από BOLAM (a), ST1 (b), ST2 (c) και ST3 (d) (Πηγή: Makatounis et al., 2023)	43
Σχήμα 3.4 Ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου για την περίοδο προσομοίωσης, BOLAM.....	44
Σχήμα 3.5 Ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου για την περίοδο προσομοίωσης, ST1	44
Σχήμα 3.6 Ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου για την περίοδο προσομοίωσης, ST2	45
Σχήμα 3.7 Ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου για την περίοδο προσομοίωσης, ST3	45
Σχήμα 3.8 Σύγκριση υπολογισμών ανάλυσης ευαισθησίας (κόκκινες κουκκίδες BGS, πορτοκαλί κουκκίδες MRS) την 3 ^η ημέρα - 12/09/2017 (a) και 6 ^η ημέρα - 15/09/2017 (b) για τις τιμές παράγοντα ανέμου 1-4% (1), 3-4% (2), και 1-6% (3), με δορυφορικά και δεδομένα ρύπανσης (4)	47
Σχήμα 3.9 Σύγκριση υπολογισμών ανάλυσης ευαισθησίας (κόκκινες κουκκίδες BGS, πορτοκαλί κουκκίδες MRS) την 3 ^η ημέρα - 12/09/2017 (a) και 6 ^η ημέρα - 15/09/2017 (b) για τις τιμές συντελεστή διάχυσης 10^3 (1), 10^5 (2), και 10^6 cm ² /s (3), με δορυφορικά και δεδομένα ρύπανσης (4)	48
Σχήμα 3.10 Σύγκριση υπολογισμών ανάλυσης ευαισθησίας (κόκκινες κουκκίδες BGS, πορτοκαλί κουκκίδες MRS) την 3 ^η ημέρα - 12/09/2017 (a) και 6 ^η ημέρα - 15/09/2017 (b) για τις τιμές χρόνου επανεπίπλευσης 1 h (1), 6 h (2), και 24 h (3), με δορυφορικά και δεδομένα ρύπανσης (4)	49
Σχήμα 3.11 Σύγκριση υπολογισμών (κόκκινες κουκκίδες BGS, πορτοκαλί κουκκίδες MRS) την 3 ^η ημέρα - 12/09/2017 (a) και 6 ^η ημέρα - 15/09/2017 (b) για τα W1 (1), W2 (2), W3 (3) και W4 (4), με δορυφορικά και δεδομένα ρύπανσης (5)	53
Σχήμα 3.12 Σύγκριση υπολογισμών (κόκκινες κουκκίδες BGS, πορτοκαλί κουκκίδες MRS) την 3 ^η ημέρα - 12/9/2017 (a) και 6 ^η ημέρα - 15/9/2017 (b) για τα CW1 (1), CW2 (2) και CW3 (3), με δορυφορικά και δεδομένα ρύπανσης (4)	54
Σχήμα 3.13 Σύγκριση υπολογισμών (κόκκινες κουκκίδες BGS, πορτοκαλί κουκκίδες MRS) την 3 ^η ημέρα - 12/9/2017 (a) και 6 ^η ημέρα - 15/9/2017 (b) για τα CW2 (1) και CW4 (2), με δορυφορικά και δεδομένα ρύπανσης (3)	56
Σχήμα 3.14 Ισοζύγιο μάζας πετρελαίου κατά τις 7 ημέρες της προσομοίωσης (Πηγή: Makatounis et al., 2023).....	57
Σχήμα 3.15 Ισοζύγιο μάζας πετρελαίου στο τέλος των προσομοιώσεων (Πηγή: Makatounis	

et al., 2023)	57
Σχήμα 4.1 Περιοχή υπολογισμών	62
Σχήμα 4.2 Χάρτες πιθανότητας ρύπανσης για τα 9 σύνολα στοχαστικών υπολογισμών. Η πιθανότητα σε κάθε κελί του πλέγματος υπολογίζεται ως ο αριθμός των προσομοιώσεων για τις οποίες το πετρέλαιο έφτασε σε αυτό το κελί, διαιρεμένο με τον συνολικό αριθμό προσομοιώσεων (Πηγή: Makatounis et al., 2017).....	68
Σχήμα 4.3 Χρόνοι άφιξης πετρελαιοκηλίδας για τα 9 σύνολα στοχαστικών υπολογισμών (Πηγή: Makatounis et al., 2017).....	69
Σχήμα 4.4 Τροχιά πετρελαιοκηλίδας για τα σενάρια (i) AN, (ii) AM και (iii) AD στο χρονικό βήμα $t=5$ d, 6,4 d, 7,0 d και 10,0 d	70
Σχήμα 4.5 Τροχιά πετρελαιοκηλίδας για τα σενάρια (i) BN, (ii) BM και (iii) BD στο χρονικό βήμα $t=3,5$ d, 5,0 d, 7,3 d και 10,0 d.....	71
Σχήμα 4.6 Τροχιά πετρελαιοκηλίδας για τα σενάρια (i) CN, (ii) CM και (iii) CD στο χρονικό βήμα $t=1$ d, 3,7 d, 5,0 d και 10,0 d	71
Σχήμα 4.7 Χρονική μεταβολή των αποτελεσμάτων του ισοζυγίου μάζας πετρελαίου για τα σενάρια AN, AM και AD (Πηγή: Makatounis et al., 2017).....	74
Σχήμα 4.8 Χρονική μεταβολή των αποτελεσμάτων του ισοζυγίου μάζας πετρελαίου για τα σενάρια BN, BM και BD (Πηγή: Makatounis et al., 2017).....	75
Σχήμα 4.9 Χρονική μεταβολή των αποτελεσμάτων του ισοζυγίου μάζας πετρελαίου για τα σενάρια CN, CM και CD (Πηγή: Makatounis et al., 2017).....	76
Σχήμα 4.10 Χρονική μεταβολή των αποτελεσμάτων της επηρεαζόμενης επιφάνειας και όγκου των λιμνοθαλασσών Μεσολογίου – Αιτωλικού (Πηγή: Makatounis et al., 2017) ..	79
Σχήμα 4.11 Επηρεασμένος όγκος λιμνοθάλασσας έναντι συγκέντρωσης πετρελαίου, για τα χειρότερα σενάρια της τοποθεσίας A (a), της τοποθεσίας B (b) και της τοποθεσίας C (c). Καμία επέμβαση (μωβ γραμμή), με μηχανική ανάκτηση (πράσινη γραμμή) και με χρήση χημικών (κόκκινη γραμμή).....	80
Σχήμα 5.1 Περιοχή υπολογισμών	84
Σχήμα 5.2 Διατομή πλούμιου πετρελαίου μετά την 1 ^η ημέρα, για όλα τα σενάρια	88
Σχήμα 5.3 Τελικά αποτελέσματα ισοζυγίου μάζας πετρελαίου (σε % της συνολικής ποσότητας)	89
Σχήμα 5.4 Συνολική αθροιστική επηρεασμένη περιοχή και όγκος με την πάροδο του χρόνου, με SSDI και χωρίς (NO) για a. Grane, b. Norne, c. Oseberg Blend, και d. Troll B.....	90
Σχήμα 5.5 Συνολική επηρεασμένη επιφάνεια στο τέλος των προσομοιώσεων για όλα τα σενάρια	91
Σχήμα 6.1 Αποτελεσματικότητα διασποράς, (a) MNS (υψηλός στροβιλισμός) και (b) IFP (χαμηλός στροβιλισμός) δειγμάτων πετρελαίου MC252 που έχουν δοκιμαστεί σε εργαστήριο, πειράματα δεξαμενής Flume και δείγματα πεδίου από τον Κόλπο του Μεξικού (2010) σε γραφική παράσταση έναντι του ιξώδους για τα δείγματα (Πηγή: Daling et al., 2014)	95
Σχήμα 6.2 Διάγραμμα της νέας δοκιμής αποτελεσματικότητας υποθαλάσσιας διασποράς (DIET), που απεικονίζει το σύστημα ροής του φυσικού θαλασσινού νερού, το σύστημα έγχυσης των χημικών διασποράς, το σύστημα διαρροής πετρελαίου και το σύστημα σκέδασης LISST χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση μεγεθών σταγονιδίων (Πηγή: Brandvik et al., 2019 και επεξεργασία)	96
Σχήμα 6.3 Πλούμιο από μη επεξεργασμένο πετρέλαιο Oseberg Blend (a) και από επεξεργασμένο με 1% χημικά πετρέλαιο Oseberg Blend (b) (Πηγή: Brandvik et al., 2019)	97
Σχήμα 6.4 Αποτελεσματικότητα SSDI με μείγμα Oseberg (παραφινικό) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ($\approx 20-80^{\circ}\text{C}$) που εκφράζεται ως μείωση των μεγεθών σταγονιδίων (d_{50}) μετά την έγχυση των χημικών διασποράς. Μέγεθος ακροφυσίου: 0,5 mm, ταχύτητα ροής πετρελαίου: 0,1 L/min και δόση διασποράς 1%.....	101
Σχήμα 6.5 Κατανομές μεγεθών σταγονιδίων (% όγκου) για πετρέλαιο με και χωρίς χημικά ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ($\approx 20^{\circ}\text{C}$ & 80°C) για το πείραμα στις 04/02/2016, Oseberg Blend (παραφινικό).....	102
Σχήμα 6.6 Αποτελεσματικότητα SSDI με Troll B (ναφθενικό) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ($\approx 20-80^{\circ}\text{C}$) που εκφράζεται ως μείωση των μεγεθών σταγονιδίων (d_{50}) μετά την έγχυση χημικών διασποράς. Μέγεθος ακροφυσίου: 0,5 mm, ταχύτητα ροής πετρελαίου: 0,1 L/min και δόση διασποράς 1%	102
Σχήμα 6.7 Κατανομές μεγεθών σταγονιδίων (% όγκου) για πετρέλαιο με και χωρίς χημικά ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ($\approx 20^{\circ}\text{C}$ & 80°C) για το πείραμα στις 23/09/2015, Troll B	

(ναφθενικό)	103
Σχήμα 6.8 Αποτελεσματικότητα SSDI με Norne (κηρώδες) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ($\approx 20-80^{\circ}\text{C}$) που εκφράζεται ως μείωση των μεγεθών σταγονιδίων (d_{50}) μετά την έγχυση των χημικών διασποράς. Μέγεθος ακροφυσίου: 0,5 mm, ταχύτητα ροής πετρελαίου: 0,1 L/min και δόση διασποράς 1%	103
Σχήμα 6.9 Κατανομές μεγέθους σταγονιδίων (% όγκου) για πετρέλαιο με και χωρίς χημικά ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ($\approx 20^{\circ}\text{C}$ & 80°C) για το πείραμα στις 28/10/2015, Norne (κηρώδες)	104
Σχήμα 6.10 Αποτελεσματικότητα SSDI με Grane (ασφαλτενικό) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ($\approx 20-80^{\circ}\text{C}$) που εκφράζεται ως μείωση των μεγεθών σταγονιδίων (d_{50}) μετά την έγχυση χημικών διασποράς. Μέγεθος ακροφυσίου: 0,5 mm, ταχύτητα ροής πετρελαίου: 0,1 L/min και δόση διασποράς 1%	104
Σχήμα 6.11 Κατανομές μεγέθους σταγονιδίων (% όγκου) για πετρέλαιο με και χωρίς χημικά ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ($\approx 20^{\circ}\text{C}$ & 80°C) για το πείραμα στις 10/12/2015, Grane (ασφαλτενικό).....	105
Σχήμα 6.12 Κατανομή μεγέθους σταγόνας για 4 τύπους χημικών διασποράς (Corexit 9500, Superdispersant 25, Finasol OSR-52 and Dasic NS) στο πετρέλαιο Maria (paraffinic). Δοσολογία χημικών 1% με μέθοδο SIT (Πηγή: Brandvik et al., 2019).....	106
Σχήμα 6.13 Κατανομή μεγέθους σταγόνας (όγκος %) για πετρέλαιο με και χωρίς χρήση χημικών διασποράς (Corexit 9500) σε σχέση με τη δοσολογία (0,1% - 2%) για (a): Maria (Paraffinic), (b): Skrugard (Napthenic), (c): Skarfjell (Waxy) and (d): Brynhild (Asphaltenic) (Πηγή: Brandvik et al., 2019).....	107
Σχήμα 6.14 Σύγκριση των χημικών ανάλογα με τη μέθοδο δοκιμής (a) SSDI (DIET, φρέσκο πετρέλαιο, μέθοδος SIT), και (b) Μέθοδοι για επιφανειακή εφαρμογή χημικών (IFP, 50% γαλάκτωμα, 900 cP, εφαρμογή ψεκασμού) για το πετρέλαιο Maria (paraffinic). Οι μπάρες λάθους είναι ενδεικτικές ± 1 std για τη μέθοδο (5%) (Πηγή: Brandvik et al., 2019)	108
Σχήμα 6.15 Σύγκριση των χημικών ανάλογα με τη μέθοδο δοκιμής (a) SSDI (DIET, φρέσκο πετρέλαιο, μέθοδος SIT), και (b) Μέθοδοι για επιφανειακή εφαρμογή χημικών (IFP, 50% γαλάκτωμα, 1.830 cP, εφαρμογή ψεκασμού) για το πετρέλαιο Brynhild (asphaltenic) Οι μπάρες λάθους είναι ενδεικτικές ± 1 std για τη μέθοδο (5%) (Πηγή: Brandvik et al., 2019)	109

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1.1 Σημεία πιθανής διαρροής κατά την εξόρυξη (Πηγή: Smith, 2011)	4
Πίνακας 1.2 Ορισμός μικρών, ενδιάμεσων και μεγάλων βαθών νερού.....	6
Πίνακας 1.3 Χρονοδιάγραμμα διαδικασιών για τις άδειες στις περιοχές Ιονίου & Κρήτης ..	20
Πίνακας 1.4 Χρονοδιάγραμμα διαδικασιών για τις άδειες στην περιοχή του Πατραϊκού Κόλπου	21
Πίνακας 1.5 Χαρακτηριστικά ενδεικτικών μοντέλων	28
Πίνακας 2.1 Ενδεικτικά επιφανειακά πειράματα στο πεδίο που αφορούσαν στην εξέταση των διεργασιών γήρανσης και της συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδας	36
Πίνακας 2.2 Ενδεικτικά επιφανειακά πειράματα στο πεδίο που αφορούσαν στην εξέταση των μεθόδων της επί τόπου καύσης (ISB), της μηχανικής ανάκτησης (MR) και της εφαρμογής χημικών διασποράς	36
Πίνακας 2.3 Ενδεικτικά υποθαλάσσια πειράματα στο πεδίο που αφορούσαν στην εξέταση της συμπεριφοράς της διαρροής του πετρελαίου	36
Πίνακας 2.4 Ενδεικτικά εργαστηριακά πειράματα που εξετάζουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου SSDI	37
Πίνακας 3.1 Επικρατούσες διευθύνσεις ανέμου	44
Πίνακας 3.2 Παράμετροι & τιμές ανάλυσης ευαισθησίας.....	46
Πίνακας 3.3 Σενάρια μοντέλων GNOME	50
Πίνακας 3.4 Παράμετροι και τιμές σε προηγούμενες μελέτες με χρήση του GNOME (1/2)	50
Πίνακας 3.5 Παράμετροι και τιμές σε προηγούμενες μελέτες με χρήση του GNOME (2/2)	51
Πίνακας 3.6 Επιλεγμένες τιμές από την ευαισθησία των παραμέτρων για τους υπολογισμούς	51
Πίνακας 4.1 Πιθανότητα κατάληξης στην ακτογραμμή των λιμνοθαλασσών Μεσολογίου – Αιτωλικού ανάλογα με την ποσοστιαία ποσότητα μάζας πετρελαίου	67
Πίνακας 4.2 Τελικά αποτελέσματα ισοζυγίου μάζας πετρελαίου για όλα τα σενάρια (t)	72
Πίνακας 4.3 Ποσοστά της συνολικής πληγείσας έκτασης και όγκου λιμνοθαλασσών Μεσολογίου – Αιτωλικού	72
Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά επιλεγμένων πετρελαίων για προσομοιώσεις.....	85
Πίνακας 5.2 Παράμετροι και τιμές προσομοίωσης	85
Πίνακας 5.3 Μεγέθη σταγονιδίων με και χωρίς SSDI.....	87
Πίνακας 5.4 Επηρεαζόμενη επιφάνεια & όγκος της περιοχής διερεύνησης	92
Πίνακας 6.1 Παράμετροι και τιμές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών	96
Πίνακας 6.2 Χαρακτηριστικά πετρελαίων σε πειραματικές δοκιμές θερμοκρασίας.....	98
Πίνακας 6.3 Χαρακτηριστικά πετρελαίων για τη δημιουργία πρωτοκόλλου δοκιμών	98
Πίνακας 6.4 Δεδομένα πειραμάτων.....	99
Πίνακας 6.5 Σύγκριση των πιο σχετικών ιδιοτήτων για: 1) τις δύο δοκιμές αποτελεσματικότητας χημικών διασποράς που χρησιμοποιούνται για επιφανειακή εφαρμογή (IFP & MNS) και 2) για υποθαλάσσια έγχυση χημικών διασποράς (DIET) (Πηγή: Brandvik et al., 2019)	109

Συντομογραφίες

Συντομογραφία	Ερμηνεία
API	American petroleum institute
BGS	Best guess solution
BOLAM	Bologna limited area model
BOP	Blowout preventer
CDOG	Comprehensive deepwater oil and gas
DBDB1	U.S. navy digital bathymetric data base
DIET	Dispersant injection efficiency test
DOR	Dispersant-to-oil ratio
EMSA	European maritime safety agency
EXDET	Exxon dispersant effectiveness test
GFS	Global forecasting system
GNOME	General NOAA operational modelling environment
GOR	Gas-to-oil ratio
HCMR	Hellenic center of marine research
HYCOM	Hybrid coordinate ocean model
IFP	French institute of petroleum
IFT	Interfacial tension
ITOPF	International tanker owners' pollution federation
LEs	Langrangian elements
LISST	Laser insitu scattering transmissometry
Med-MFC	Mediterranean monitoring and forecasting centre
MEMW	Marine environmental modelling workbench
MMbbls	Million barrels of oil
MNS	Mackay Nadeau Steelman
MRS	Minimum regret solution
MVD	Median volume diameter
NCEP	National centers for environmental prediction
NOAA	National ocean atmospheric administration
OPenDAP	Open-source project for a network data access protocol
OSCAR	Oil spill contingency and response
OSM	Oil spill model
PEC	Predicted effective concentration
POM	Princeton ocean model
ppm	Parts per million
ROV	Remoted operate vehicle
SIMAP	Spill impact mapping
SIT	Simulated insertion tool
SSDI	Subsea dispersant injection
WSL	Warren Spring laboratory

1 Εισαγωγή

1.1 Περιβαλλοντική διαχείριση πετρελαιοκηλίδων

Η περιβαλλοντική διαχείριση πετρελαιοκηλίδων είναι ένα σύνθετο, διεπιστημονικό πεδίο έρευνας που έχει σαν στόχο την πρόληψη της διαρροής πετρελαίου στη θάλασσα και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όταν αυτή προκύψει εξαιτίας ατυχήματος. Είναι σημαντικό να υπάρχει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο περιβαλλοντικής διαχείρισης που να περιλαμβάνει μέτρα για τη μείωση της πιθανότητας διαρροών και την ενίσχυση των δυνατοτήτων απόκρισης. Η περιβαλλοντική διαχείριση απαιτεί μια διεπιστημονική προσέγγιση που περιλαμβάνει τον συντονισμό πολλών παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων των κυβερνητικών φορέων, των περιβαλλοντικών οργανώσεων, των βιομηχανιών και των τοπικών κοινοτήτων (Baldwin, 2006).

Μία από τις βασικές στρατηγικές για την περιβαλλοντική διαχείριση μιας πετρελαιοκηλίδας είναι η πρόληψη του ατυχήματος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω βελτιωμένων μέτρων ασφαλείας στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, όπως καλύτερος εξοπλισμός και προγράμματα εκπαίδευσης για τους εργαζομένους και ενισχυμένους κανονισμούς για τις υπεράκτιες εργασίες γεώτρησης¹. Άλλα προληπτικά μέτρα περιλαμβάνουν την ανάπτυξη σχεδίων αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων, τα οποία περιγράφουν τα βήματα που πρέπει να ληφθούν σε περίπτωση διαρροής (National Research Council, 1996).

Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για την πρόληψη και τη διαχείριση των πετρελαιοκηλίδων είναι επίσης μια κρίσιμη πτυχή της περιβαλλοντικής διαχείρισης των πετρελαιοκηλίδων. Για να είναι αποτελεσματική η διαχείριση των πετρελαιοκηλίδων, απαιτείται πλήρης κατανόηση (i) των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του πετρελαίου και (ii) των αναμενόμενων διεργασιών γήρανσης πετρελαίου (oil weathering processes) προκειμένου να εκτιμηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Επιπλέον, είναι σημαντικό να υπάρχει πλήρης γνώση των διαθέσιμων εργαλείων και τεχνολογιών για την ελαχιστοποίηση και τον περιορισμό αυτών των επιπτώσεων. Η αποτελεσματικότητα των μέσων αντιμετώπισης βασίζεται σε διάφορους παράγοντες, όπως η τοποθεσία και οι καιρικές συνθήκες, η έκταση της διαρροής και η διαθεσιμότητα του εξοπλισμού (National Ocean & Atmospheric Administration (NOAA), 2001). Υπάρχουν πολλές βασικές στρατηγικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση των επιπτώσεων των πετρελαιοκηλίδων, όπως οι μέθοδοι φυσικής συγκράτησης και καθαρισμού, καθώς και η χημική ή/και η βιολογική επεξεργασία (βλ. Ενότητα 1.6).

Μια άλλη σημαντική πτυχή της περιβαλλοντικής διαχείρισης των πετρελαιοκηλίδων είναι η αποκατάσταση των επηρεαζόμενων οικοτόπων και ειδών (Ramírez-León, 2012). Οι σχετικές δραστηριότητες περιλαμβάνουν την απομάκρυνση των μολυσμένων ιζημάτων, τη φύτευση βλάστησης και την επανεισαγωγή της άγριας ζωής στην περιοχή². Είναι επίσης επωφελές να καθιερωθούν προγράμματα μακροπρόθεσμης παρακολούθησης για την αξιολόγηση της προόδου της αποκατάστασης των πληγισίων περιοχών και ειδών και για τον εντοπισμό τυχόν εναπομεινάντων κινδύνων (Hooper et al., 2016).

Ένα βασικό εργαλείο για την περιβαλλοντική διαχείριση των πετρελαιοκηλίδων, είναι η χρήση υπολογιστικών μοντέλων προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδων, καθώς αυτά παρέχουν πληροφορίες για την πιθανή έκταση και τις επιπτώσεις των πετρελαιοκηλίδων (Morell Villalonga et al., 2020). Η παρούσα διατριβή εστιάζει στη χρήση υπολογιστικών μοντέλων προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδων ως μέρος της συνολικής περιβαλλοντικής διαχείρισης για διάφορες μελέτες περιπτώσεων, όπως πραγματικά ατυχήματα ή υποθετικές περιπτώσεις.

Στις επόμενες ενότητες γίνεται μια λεπτομερής εισαγωγή σε βασικά χαρακτηριστικά και παρουσιάζεται το αντικείμενο και η δομή της παρούσας διδακτορικής εργασίας.

¹ <https://www.api.org/-/media/files/policy/exploration/key-improvements-to-offshore-safety.pdf>

² <https://www.fisheries.noaa.gov/national/habitat-conservation/restoring-habitat-after-oil-spills-and-other-environmental-disasters>

Πιο συγκεκριμένα οι επόμενες ενότητες είναι:

- Ενότητα 1.2. Φυσικοχημικές ιδιότητες πετρελαίου.
- Ενότητα 1.3. Μέθοδοι εξόρυξης πετρελαίου.
- Ενότητα 1.4. Ατυχήματα διαρροών υδρογονανθράκων.
- Ενότητα 1.5. Σημαντικά ατυχήματα διαρροών πετρελαίου.
- Ενότητα 1.6. Μέθοδοι αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων.
- Ενότητα 1.7. Μελλοντική εξερεύνηση υδρογονανθράκων στην Ελλάδα.
- Ενότητα 1.8. Μαθηματικά μοντέλα συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδων.
- Ενότητα 1.9. Σκοπός της διδακτορικής διατριβής
- Ενότητα 1.10. Ερευνητικά ερωτήματα.
- Ενότητα 1.11. Πρωτότυπα σημεία της διατριβής – Δημοσιεύσεις.
- Ενότητα 1.12. Δομή της διατριβής.

1.2 Φυσικοχημικές ιδιότητες πετρελαίου

1.2.1 Γενικά

Οι κύριες κατηγορίες του πετρελαίου είναι οι ακόλουθες:

- a) το αργό πετρέλαιο (crude oil), το οποίο είναι μείγμα υδρογονανθράκων που υπάρχει σε υγρή φάση σε φυσικούς υπόγειους ταμιευτήρες και παραμένει υγρό στην ατμοσφαιρική πίεση αφού περάσει από εγκαταστάσεις διαχωρισμού επιφανειών, και
- b) τα διυλισμένα πετρελαϊκά προϊόντα προέρχονται από αργό πετρέλαιο μέσω διαφόρων διεργασιών (Lin and Tjeerdema, 2008).

Τα αργά πετρέλαια μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις κατηγορίες (Ganeeva et al., 2016; Yin et al., 2019) και συγκεκριμένα σε:

- a. ασφαλτενικά (asphaltenic),
- b. ναφθενικά (naphthenic),
- c. παραφινικά (paraffinic), και
- d. κηρώδη (waxy).

Η συμπεριφορά (behavior) του αργού πετρελαίου και άλλων προϊόντων με βάση τους υδρογονάνθρακες στο θαλασσινό νερό είναι στενά συνδεδεμένη με τις αρχικές φυσικές τους ιδιότητες, όπως η πυκνότητα, το ιξώδες, το ειδικό βάρος, το σημείο ροής, το σημείο ανάφλεξης και η διεπιφανειακή τάση (interfacial tension, IFT). Η γνώση αυτών των ιδιοτήτων είναι απαραίτητη για τις ομάδες αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων, καθώς οι φυσικές ιδιότητες του αργού πετρελαίου μπορούν να αλλάξουν γρήγορα εξαιτίας των διεργασιών γήρανσης.

1.2.2 Πυκνότητα - Βαρύτητα API (API gravity)

Η άνωση του πετρελαίου στο νερό καθορίζεται από την πυκνότητά του, που είναι η μάζα του ανά μονάδα όγκου (Hollebone, 2014). Η πυκνότητα του αργού πετρελαίου κυμαίνεται τυπικά από 0,7 g/cm³ έως 0,99 g/cm³, ενώ το γλυκό νερό έχει πυκνότητα 1 g/cm³ σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και το θαλασσινό νερό έχει πυκνότητα 1,03 g/cm³. Επομένως, το πετρέλαιο, ανεξάρτητα από το μοριακό του βάρος, συνήθως επιπλέει στο νερό (Fingas, 2012).

Η γήρανση του αργού πετρελαίου προκαλεί την εξάτμιση των πτητικών υδρογονανθράκων, με αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας του εναπομείναντος πετρελαίου (Hollebone, 2014). Αυτό μπορεί να προκαλέσει βύθιση του πετρελαίου εάν η πυκνότητά του υπερβαίνει αυτή του γλυκού νερού, καθιστώντας δύσκολο τον περιορισμό του με μεθόδους αντιμετώπισης όπως η επιτόπια καύση και η μηχανική συγκράτηση (booms) και ανάκτηση (skimmers). Αυτό μπορεί να αυξήσει σημαντικά το κόστος αποκατάστασης της διαρροής. Η πυκνότητα των υδρογονανθράκων εκφράζεται συνήθως ως προς το ειδικό βάρος ή τη σχετική πυκνότητα (Hollebone, 2014).

Η βαρύτητα API χρησιμοποιείται για τη σύγκριση των πυκνοτήτων των πετρελαίων και εκφράζεται αντίστροφα σε σχέση με την πυκνότητα του πετρελαίου. Όσο μεγαλύτερη είναι η βαρύτητα του API, τόσο μικρότερη είναι η πυκνότητα του πετρελαίου. Επομένως τα ελαφρά πετρέλαια έχουν υψηλή βαρύτητα API. Ένα αργό πετρέλαιο έχει τυπικά API μεταξύ 15° και 45°, αλλά το συνολικό εύρος είναι από 0° έως 90°.

1.2.3 Ιξώδες

Το ιξώδες είναι η αντίσταση στη ροή του πετρελαίου που προκαλείται από την εσωτερική τριβή (Chinenyeze and Ekene, 2017). Εκφράζεται σε μονάδες mPa επί second ή centipoise (cP). Υψηλότερο ιξώδες σημαίνει λιγότερη ροή και αντίστροφα (Fingas, 2012). Το ιξώδες του αργού πετρελαίου εξαρτάται από την ποσότητα των μεγάλων, πολικών μορίων (polar molecules) στη σύνθεσή του (National Academies of Sciences and Medicine, 2016). Η παρουσία κορεσμένων και αρωματικών υδρογονανθράκων, ρητινών (resins) και ασφαλτενίων (asphaltenes) επηρεάζει το ιξώδες, με αποτέλεσμα τα κορεσμένα σε μεγάλο βαθμό, καθώς και οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες να εμφανίζουν χαμηλότερο ιξώδες (Hollebone, 2014).

Καθώς προχωρούν οι διεργασίες γήρανσης, τα πτητικά συστατικά του πετρελαίου εξατμίζονται, προκαλώντας αύξηση του ιξώδους. Το ιξώδες επηρεάζεται επίσης έντονα από τη θερμοκρασία, καθώς οι υψηλότερες θερμοκρασίες έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερο ιξώδες (Fingas, 2012).

Είναι σημαντικό να είναι γνωστό το ιξώδες καθώς τα παχύρρευστα πετρέλαια εξαπλώνονται πιο αργά, σχηματίζουν πιο σταθερά γαλακτώματα και είναι δύσκολο να διασκορπιστούν τόσο φυσικά όσο και χημικά. Έχουν επίσης αρνητική ανταπόκριση στη χρήση μηχανικών μέσων ανάκτησης (Fingas, 2012).

1.2.4 Σημείο ροής (pour point)

Το σημείο ροής ορίζεται ως η χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία το πετρέλαιο γίνεται στερεό και χάνει τα χαρακτηριστικά ροής του (Wang, 2013). Αυτή είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία το πετρέλαιο ρέει υπό την επίδραση της βαρύτητας. Το σημείο ροής ενός υγρού εξαρτάται από τη μοριακή του δομή και την παρουσία κηρωδών συστατικών στο υγρό (Wang, 2013).

1.2.5 Σημείο ανάφλεξης (flash point)

Το σημείο ανάφλεξης είναι ένα χαρακτηριστικό που σχετίζεται με την ασφάλεια και ορίζεται ως η χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία ένας διαλύτης μπορεί να σχηματίσει ένα εύφλεκτο μείγμα στον αέρα κοντά στην επιφάνεια του πετρελαίου. Είναι ευκολότερο να αναφλεγεί ο διαλύτης πετρελαίου όσο χαμηλότερο είναι το σημείο ανάφλεξής του (Durkee, 2006).

1.2.6 Διεπιφανειακή τάση

Η διεπιφανειακή τάση είναι ένα μέτρο των δυνάμεων μεταξύ των φάσεων πετρελαίου - νερού και του πετρελαίου - αέρα. Υποδεικνύει την ταχύτητα εξάπλωσης του πετρελαίου στο νερό, η οποία αυξάνεται καθώς μειώνεται η τάση. Η διεπιφανειακή τάση επηρεάζεται από τις διεργασίες γήρανσης και επιδρά στο σχηματισμό και τη σταθερότητα του γαλακτώματος (Hollebone, 2014).

1.3 Μέθοδοι εξόρυξης πετρελαίου

1.3.1 Γενικά

Η εξόρυξη πετρελαίου είναι μια σύνθετη διαδικασία που περιλαμβάνει την άντληση αργού πετρελαίου βαθιά κάτω από την επιφάνεια της Γης. Ξεκινά με τον εντοπισμό πιθανών

αποθεμάτων πετρελαίου χρησιμοποιώντας γεωφυσικές τεχνικές, όπως σεισμικές έρευνες, οι οποίες παρέχουν λεπτομερείς εικόνες του υπεδάφους. Μόλις εντοπιστεί μια πολλά υποσχόμενη τοποθεσία, εισάγεται ένα γεωτρύπανο για να ανοίξει ένα πηγάδι στο έδαφος ή στον πυθμένα της θάλασσας.

Οι δραστηριότητες εξόρυξης του πετρελαίου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- (i) χερσαίες, και
- (ii) υπεράκτιες.

1.3.2 Χερσαία γεώτρηση

Η χερσαία γεώτρηση πετρελαίου αναφέρεται στη διαδικασία γεώτρησης για κοιτάσματα αργού πετρελαίου που βρίσκονται στην ξηρά και συνήθως περιλαμβάνει τη γεώτρηση ενός φρέατος κατακόρυφα στο έδαφος μέχρι να φτάσει στον σχηματισμό βράχου της δεξαμενής στόχου που περιέχει πετρέλαιο ή φυσικό αέριο (Levitt, 2016).

1.3.3 Υπεράκτια εξόρυξη

Η υπεράκτια εξόρυξη πετρελαίου είναι η διαδικασία άντλησης πετρελαίου και φυσικού αερίου από κάτω από τον βυθό της θάλασσας, συνήθως σε βάθη μεγαλύτερα από 200 m, σε υπεράκτιες περιοχές.

Η διαδικασία εξόρυξης περιλαμβάνει τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού, που συνήθως εγκαθίσταται σε πλατφόρμες ή πλοία σχεδιασμένα για χρήση ανοικτής θαλάσσης. Η υπεράκτια εξόρυξη πετρελαίου μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, συμπεριλαμβανομένων σταθερών πλατφορμών, πλωτών συστημάτων παραγωγής, υποθαλάσσιων συστημάτων και γεωτρήσεων βαθέων υδάτων (Zulqarnain and Fike, 2017). Το εξορυσσόμενο πετρέλαιο και φυσικό αέριο μεταφέρονται μέσω αγωγών σε χερσαίες εγκαταστάσεις για επεξεργασία και διανομή.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή διερευνώνται εφαρμογές που αφορούν ατυχήματα υπεράκτιων εξορύξεων πετρελαίου.

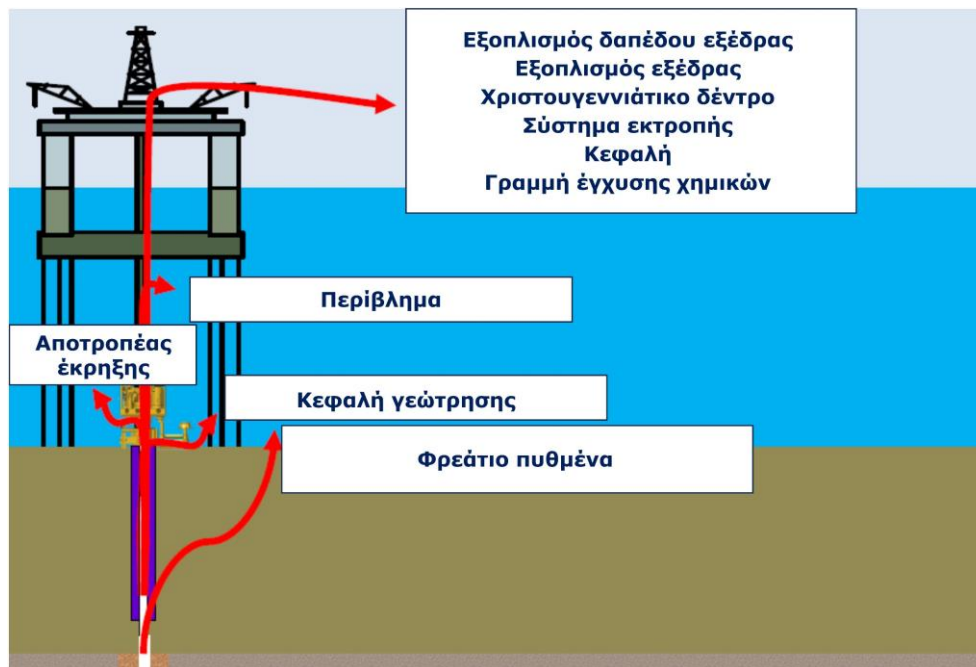
1.4 Ατυχήματα διαρροών υδρογονανθράκων

1.4.1 Κατηγορίες διαρροών πετρελαίου

Ατυχήματα κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων γεώτρησης πετρελαίου μπορούν να συμβούν σε διάφορες φάσεις της διαδικασίας εξόρυξης, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.1 και στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1 Σημεία πιθανής διαρροής κατά την εξόρυξη (Πηγή: Smith, 2011)

Σημείο διαρροής	Θέση
Φρέατο πυθμένα	Πυθμένας
Κεφαλή γεώτρησης	Υποθαλάσσια
Περίβλημα	Υποθαλάσσια
Αποτροπέας έκρηξης (Blowout preventer, BOP)	Υποθαλάσσια
Εξοπλισμός δαπέδου εξέδρας	Επιφάνεια
Εξοπλισμός εξέδρας (εκτός δαπέδου εξέδρας)	Επιφάνεια
Χριστουγεννιάτικο δέντρο	Επιφάνεια
Σύστημα εκτροπής	Επιφάνεια
Κεφαλή	Επιφάνεια
Γραμμή έγχυσης χημικών	Επιφάνεια



Σχήμα 1.1 Διάφορες θέσεις πιθανής διαρροής κατά την εξόρυξη πετρελαίου (Πηγή: Smith, 2011)

1.4.2 Διεργασίες υποθαλάσσιας διαρροής

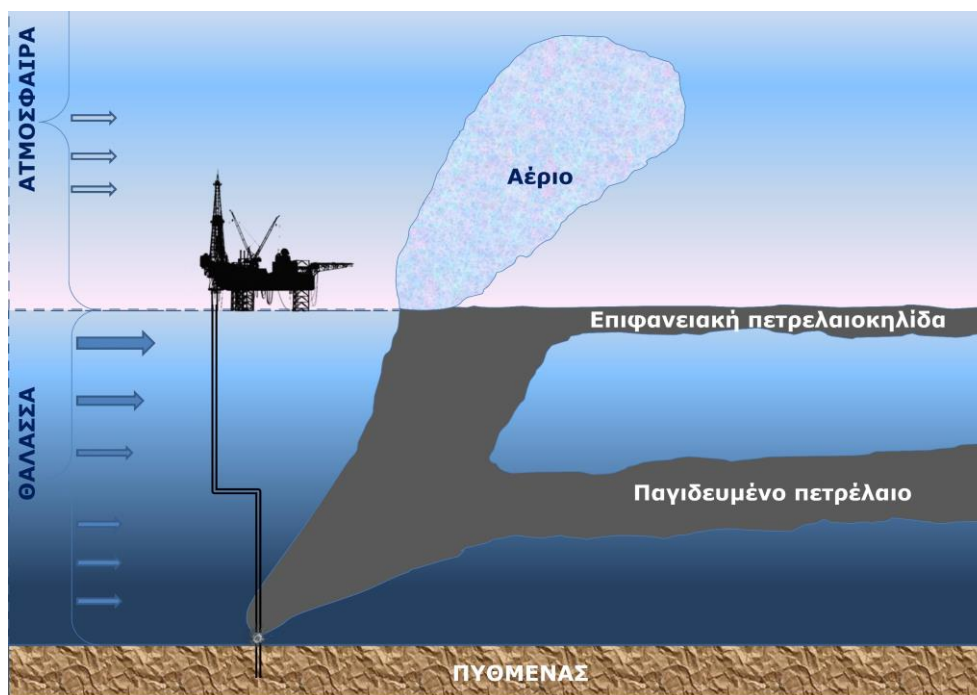
Οι υποθαλάσσιες διαρροές είναι γνωστές ως εκρήξεις πετρελαίου/αερίου (oil/gas blowouts) και αναφέρονται σε ανεξέλεγκτες εκλύσεις υδρογονανθράκων από γραμμές παραγωγής πετρελαίου/αερίου, οι οποίες περιλαμβάνουν το κοίτασμα, την κεφαλή γεώτρησης και τον εξοπλισμό ελέγχου παραγωγής.

Σε υποθαλάσσιες συνθήκες, μία έκρηξη πετρελαίου μπορεί να οδηγήσει στα εξής: Αρχικά, αν πρόκειται για ατύχημα σε μικρό βάθος, το πετρέλαιο και το αέριο διαρρέουν από το σημείο του ατυχήματος και κατευθύνονται προς την επιφάνεια της θάλασσας, σχηματίζοντας επακόλουθα μια πετρελαιοκηλίδα. Ταυτόχρονα, απελευθερώνεται αέριο στην ατμόσφαιρα.

Ωστόσο, σε βαθιά νερά, τέτοιες εκλύσεις μπορούν να δημιουργήσουν πλούμια πετρελαίου που παγιδεύονται στην υδάτινη στήλη (trapped plumes), με αποτέλεσμα να παρατηρείται το φαινόμενο του βυθισμένου πετρελαίου. Το αέριο αναδύεται στην επιφάνεια και κατόπιν εκλύεται στην ατμόσφαιρα, με την εξαίρεση στις περιπτώσεις αποσύνθεσης αερίου και δημιουργίας υδριτών, όπου η απελευθέρωση αερίου στην ατμόσφαιρα δεν πραγματοποιείται λόγω του μετασχηματισμού/αποσύνθεσης αερίου εξαιτίας των επικρατούσων συνθηκών (πίεση & θερμοκρασία) στο σημείο διαρροής.

Σχηματικά τα ανωτέρω παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.2. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι υποθαλάσσιες διαρροές σε βαθιά νερά διακρίνονται από εκείνες σε ρηχά νερά λόγω διαφόρων φυσικών και χημικών πολυπλοκοτήτων που εμφανίζονται σε μεγαλύτερα βάθη.

Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται οι ορισμοί των ρηχών, μέτριων και βαθέων υδάτων σύμφωνα με ορισμένους ερευνητές. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζουν και διαρροές που μπορούν να προκληθούν από ατυχήματα σε υποθαλάσσιους αγωγούς (Ranjbar et al., 2014; Reed et al., 2006).

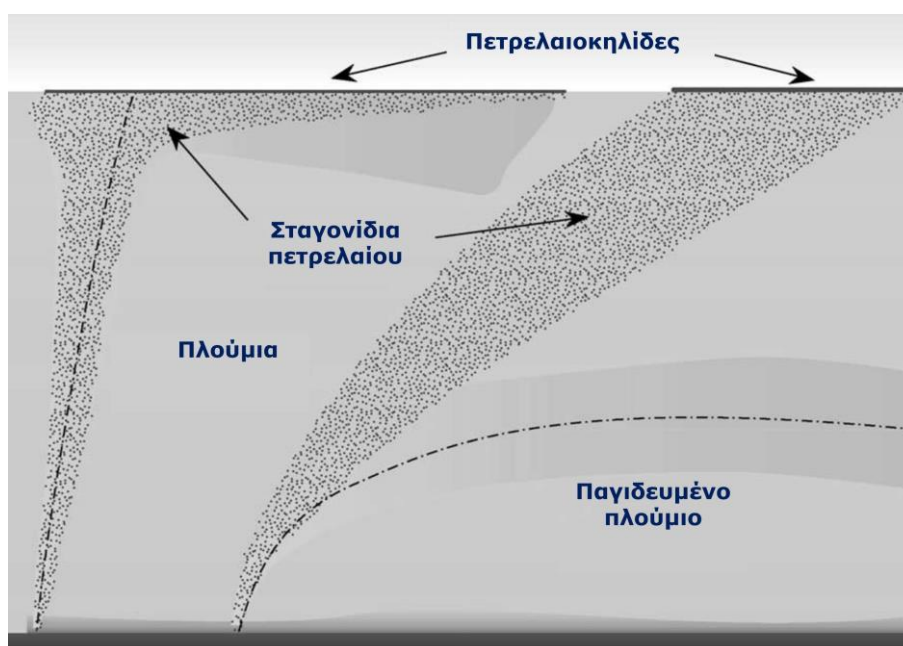


Σχήμα 1.2 Διαρροή πετρελαίου/αερίου εξαιτίας ατυχήματος σε βαθιά νερά

Πίνακας 1.2 Ορισμός μικρών, ενδιάμεσων και μεγάλων βαθών νερού

Ερευνητής	Μικρό βάθος νερού	Ενδιάμεσο βάθος νερού	Μεγάλο βάθος νερού
Zheng et al., 2003	-	-	>1.000 m
Johansen, 2000	<250 m	250-700	>700 m
Daling et al., 2003	<300 m	300-500	>500 m
NRC, 2003	<200 m	-	>200 m

Η σχηματική αναπαράσταση της διαφοράς της ανάδυσσης του πετρελαίου στις διαφορετικές περιπτώσεις διαρροής σε μικρά/ενδιάμεσα και μεγάλα βάθη νερού φαίνεται στο [Σχήμα 1.3](#).



Σχήμα 1.3 Σχηματική απεικόνιση διαρροών σε μικρά/ενδιάμεσα (αριστερά) και μεγάλα βάθη (δεξιά) (Πηγή: Daling et al., 2003)

Οι ακόλουθες ενότητες παρέχουν αναλυτικούς ορισμούς των υποθαλάσσιων διαρροών σε μικρά/ενδιάμεσα και μεγάλα βάθη νερού.

1.4.2.1 Υποθαλάσσια διαρροή σε μικρά έως ενδιάμεσα βάθη νερού

Οι βασικές φυσικές διεργασίες μιας διαρροής μικρού/ενδιάμεσου βάθους υδάτων είναι οι εξής:

- Εάν το πετρέλαιο ή το αέριο εκλυθεί από την πηγή με υψηλή πίεση, όπως σε μια έκρηξη ενός εξερευνητικού φρεατίου, σχηματίζεται μια φάση πίδακα (jet phase) που αποτελείται από ρευστό ή αέριο υψηλής ταχύτητας που περιορίζεται σε έναν στενό αλλά διαστελλόμενο κώνο. Εντός περίπου 1 m από το σημείο διαρροής, η αρχική ορμή στη φάση εκτόξευσης διαχέεται γρήγορα, με αποτέλεσμα το σχηματισμό διακριτών σταγονιδίων (και φυσαλίδων αερίου εάν υπάρχουν) με μεγέθη που εξαρτώνται από τις λεπτομέρειες της διαρροής. Οι υδρογονάνθρακες στη συνέχεια αναδύονται ως πλούμιο.

Τα πλούμια αναδύονται με διαφορετικό ρυθμό από τις μεμονωμένες φυσαλίδες ή σταγονίδια λόγω της λεγόμενης ταχύτητας ολίσθησης, η οποία είναι η διαφορά μεταξύ της ταχύτητας ανόδου των μέσων φυσαλίδων ή σταγονιδίων και του νέφους. Εάν υπάρχει αέριο, το νέφος πετρελαίου-αερίου θα φτάσει στην επιφάνεια μέσα σε λίγα λεπτά λόγω της μεγάλης άνωσης των φυσαλίδων αερίου. Η προκύπτουσα επιφανειακή πετρελαιοκηλίδα θα εξαπλωθεί σε ένα λεπτό φιλμ, με τυπικό πάχος περίπου 50-100 μm, λόγω της ακτινικής εκροής του παρασυρόμενου νερού κοντά στην επιφάνεια. Αρχικά, οι πετρελαιοκηλίδες πετρελαίων μεγάλης πυκνότητας, μπορεί να έχουν πάχος έως 1 mm ή περισσότερο (Milgram and Burgess, 1984).

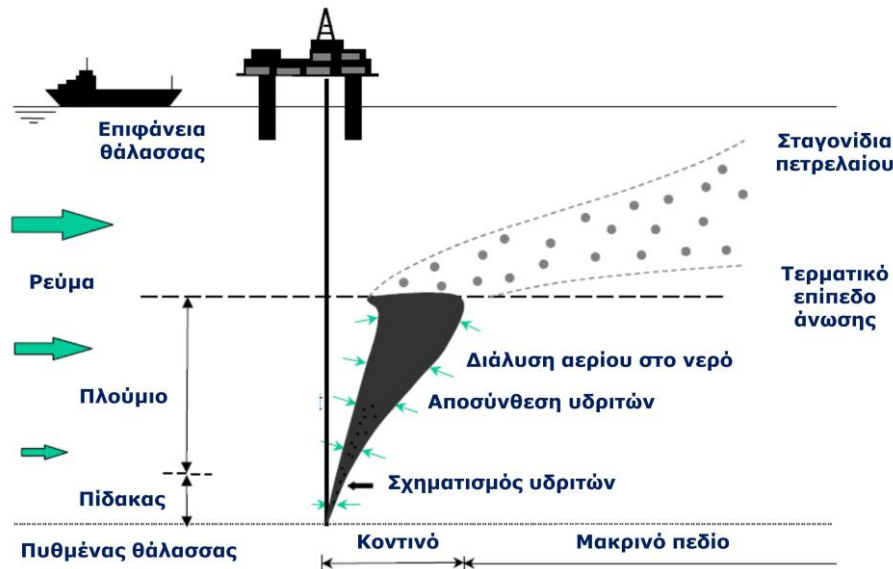
- Εάν η διαρροή αποτελείται μόνο από πετρέλαιο, ο χρόνος ανάδυσης θα είναι μεγαλύτερος. Όταν μια σημαντική ποσότητα πετρελαίου φτάσει στην επιφάνεια, θα προκύψει εξάπλωση λόγω των δυνάμεων της βαρύτητας και θα περιοριστεί από την επιφανειακή τάση και τις δυνάμεις ιξώδους, όπως μια επιφανειακή κηλίδα. Εάν δεν υπάρχει επαρκής ολοκληρωμένη άνωση για τη ρύθμιση της δυναμικής του πλουμίου που περιγράφεται παραπάνω, τα σταγονίδια ή οι φυσαλίδες θα ανέβουν ξεχωριστά με την ταχύτητα ανόδου που υπαγορεύονται από τη διάμετρο και το σχήμα τους (Milgram and Burgess, 1984).

1.4.2.2 Υποθαλάσσια διαρροή σε μεγάλα βάθη νερού

Η τρέχουσα κατανόηση των διαρροών σε ύδατα μεγάλων βαθών δείχνει ότι είναι σημαντικά πιο περίπλοκες από αυτές που συμβαίνουν σε μικρά/ενδιάμεσα νερά. Μια σχηματική απεικόνιση των κρίσιμων διεργασιών παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.4. Στις επόμενες παραγράφους εξετάζονται αυτές οι κρίσιμες διεργασίες καθώς και η δημιουργία υδριτών και η συμπεριφορά των υδρογονανθράκων. Σημειωτέον ότι όλες οι διεργασίες που εξετάζονται στις ακόλουθες ενότητες ισχύουν για βάθη νερού μεγαλύτερα ή ίσα από 500 m, εκτός από το σχηματισμό υδριτών.

Υδρίτες αερίου (gas hydrates) - Αποσύνθεση αερίου (gas decomposition)

Στις υποθαλάσσιες διαρροές υδρογονανθράκων που περιέχουν φυσικό αέριο σε βάθη μεγαλύτερα από 300 m υπάρχει πιθανότητα σχηματισμού υδριτών αερίου, με βάση τους υπολογισμούς της θερμοδυναμικής ισορροπίας. Ωστόσο, πρόσφατες εργαστηριακές και πειραματικές μελέτες εκτιμούν ότι αυτοί οι υπολογισμοί μπορεί να είναι λανθασμένοι και ο σχηματισμός υδριτών να συμβαίνει τελικά σε πολύ μεγαλύτερα βάθη. Για παράδειγμα, σε ένα πείραμα πεδίου που διεξήχθη σε βάθος διαρροής 840 m δεν παρατηρήθηκε σχηματισμός υδριτών παρά το γεγονός ότι ο υπολογισμός της θερμοδυναμικής ισορροπίας έδειχνε ότι θα έπρεπε να είχε συμβεί κάτω από 450 m (Johansen et al., 2001).



Σχήμα 1.4 Σχηματικό διάγραμμα βασικών διεργασιών σε διαρροή μεγάλων βαθών νερού (Πηγή: Zheng et al., 2003)

Εργαστηριακά πειράματα έχουν δείξει ότι ο σχηματισμός υδρίτη απαιτεί τον κορεσμό του νερού με αέριο (Boufadel et al., 2020). Ο σχηματισμός υδριτών αερίου έχει σημαντική επίδραση στο ρυθμό με τον οποίο το πετρέλαιο ανέρχεται στην επιφάνεια. Οι ένυδρες ενώσεις έχουν ειδικό βάρος περίπου $0,9 \text{ g/cm}^3$, το οποίο μειώνει την άνωση του πλουμίου, αυξάνοντας έτσι τον χρόνο που απαιτείται για να φτάσουν οι υδρογονάνθρακες στην επιφάνεια. Οι ένυδρες ενώσεις είναι πιο πιθανό να σχηματιστούν σε μεγάλα βάθη ή υψηλούς όγκους έκλυσης αερίων. Καθώς οι ένυδρες ενώσεις ανεβαίνουν πάνω από το κρίσιμο βάθος, αρχίζουν να αποσυντίθενται. Εάν η ένυδρη ένωση έχει τη μορφή νιφάδας, θα αποσυντεθεί σε μικρές φυσαλίδες που θα διαλυθούν στο νερό πριν φτάσουν στην επιφάνεια. Εάν ο υδρίτης αποτελείται από ένα λεπτό δέγμα, το δέγμα θα αποσυντεθεί και η φυσαλίδα θα διαλυθεί (National Research Council (US), 2003).

Φάση τζετ (Jet phase)

Στα βαθιά νερά, η κατάσταση είναι παρόμοια με αυτή στα ρηχά νερά, εκτός από το ότι υπάρχει πιθανότητα σχηματισμού υδριτών αερίου καθώς και αποσύνθεση του (βλ. παραπάνω παράγραφο).

Φάση πλουμίου (Plume phase)

Στις περισσότερες διαρροές υδρογονανθράκων, σχηματίζεται ένα ανερχόμενο πλούμιο λίγο μετά τη διαρροή, παρόμοιο με το νέφος που εμφανίζεται κατά τη διαρροή σε ρηχά νερά. Ωστόσο, στα βαθιά νερά, το πλούμιο ενσωματώνει τελικά μια σημαντική ποσότητα πυκνού νερού, οδηγώντας σε ένα μείγμα πετρελαίου-αερίου-υδριτών-θαλασσινού νερού με πυκνότητα που το καθιστά μη αναδύομενο. Σε αυτό το σημείο, το πλούμιο απορρίπτει μερικά από τα βαρύτερα συστατικά του και μπορεί να σταματήσει να αναδύεται, σχηματίζοντας τελικά ένα σχήμα μανιταριού. Αυτή η διεργασία, γνωστή ως reeling, μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές. Το εάν ένα πλούμιο φθάνει σε ένα τερματικό επίπεδο εξαρτάται από παράγοντες όπως το βάθος διαρροής, η άνωση του νέφους και η αντοχή της στρωματοποίησης του περιβάλλοντος νερού. Συνήθως, διαρροές σημαντικών ποσοτήτων φτάνουν σε ένα τελικό βάθος εντός περίπου 100 m από το στόμιο διαρροής, αν και αυτό μπορεί να είναι πολύ υψηλότερο εάν η διαστρωμάτωση είναι ασθενής. Όπως και με τις διαρροές στα μικρά βάθη νερού, τα εγκάρσια θαλάσσια ρεύματα μπορούν να προκαλέσουν κάμψη, αν και τα αποτελέσματα είναι πιο έντονα σε διαρροές σε μεγάλα βάθη. Επιπλέον, απαιτείται επαρκής άνωση για το σχηματισμό πλουμίου. Ανεπαρκής όγκος ή μικρές φυσαλίδες ή σταγονίδια οδηγούν σε μη δημιουργία πλουμίου, με αποτέλεσμα την κίνηση παρόμοια με τη μετα-τελική φάση που περιγράφηκε προηγουμένως (National Research Council (US), 2003).

Μετα-τερματική φάση (Post-terminal phase)

Αφού το πλούμιο φτάσει στο απόλυτο τερματικό επίπεδο, η ανοδική μεταφορά υδριτών πετρελαίου-αερίου καθορίζεται αποκλειστικά από την ισορροπία μεταξύ της άνωσης μεμονωμένων σταγονιδίων, φυσαλίδων και νιφάδων ένυδρου και της σχετικής υδροδυναμικής τους αντίστασης ([National Research Council \(US\), 2003](#)).

Ροή αερίου

Η απελευθέρωση αερίου σε υποθαλάσσιες συνθήκες οδηγεί στην εμφάνιση ενός ανερχόμενου ρεύματος φυσαλίδων, επίσης γνωστού ως πλουμίου φυσαλίδων. Μόλις οι φυσαλίδες αυτές σπάσουν την επιφάνεια του νερού, το φαινόμενο γίνεται μη αξιοσημείωτο.

Ωστόσο, οι υποβρύχιες εκλύσεις τοξικών ή εύφλεκτων αερίων μπορεί να αποτελέσουν σημαντικό κίνδυνο στην περιοχή πάνω και κάτω από τη ζώνη ανάδυσης των φυσαλίδων. Τέτοιες εκλύσεις δεν είναι σπάνιες στη βιομηχανία πετρελαίου και είναι συχνά αποτέλεσμα ατυχημάτων, όπως διαρροές, σπασίματα αγωγών ή ανυψωτήρων κ.λπ.

Σε εκλύσεις που λαμβάνουν χώρα σε ενδιάμεσα βάθη, η επιφανειακή συγκέντρωση μπορεί να ξεπεράσει το κατώτερο όριο ανάφλεξης στον αέρα, γεγονός που μπορεί να είναι επωφελές σε ορισμένες περιπτώσεις, καθώς μπορεί να αναφλεγεί σκόπιμα για να δημιουργήσει μια φλόγα παρόμοια με αυτή μιας φωτιάς πισίνας ([Billeter and Fanneløp, 1989](#)).

Σύνοψη της συμπεριφοράς διαρροής υδρογονανθράκων σε βαθιά ύδατα

Με βάση τα παραπάνω, έχουν εντοπιστεί αρκετοί σημαντικοί παράγοντες που σχετίζονται με τα αποτελέσματα των διαρροών πετρελαίου και αερίου βαθύων υδάτων:

- Στην πλειονότητα των περιπτώσεων διαρροής, το πετρέλαιο θα ανέβει στην επιφάνεια, αν και μπορεί να χρειαστούν αρκετές ώρες για να γίνει αυτό.
- Η πετρελαιοκηλίδα που δημιουργείται μόλις φτάσει στην επιφάνεια θα είναι πιο λεπτή από αυτές που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια ρηχών νερών ή επιφανειακών πετρελαιοκηλίδων. Αυτό οφείλεται στη διάσπαση των σταγονιδίων πετρελαίου και στη διάχυση ή διασπορά του πετρελαίου καθώς αυτό ανεβαίνει στην επιφάνεια ([Yapa et al., 2012](#)).
- Η πλειονότητα, αν όχι το σύνολο, του φυσικού αερίου (85% μεθάνιο ή περισσότερο) είναι πιθανό να διαλυθεί στη στήλη του νερού, ανεξάρτητα από το σχηματισμό ή όχι υδριτών αερίου. Αυτό οφείλεται στην υψηλή διαλυτότητα του μεθανίου στο θαλασσινό νερό σε υψηλές πιέσεις και χαμηλές θερμοκρασίες που βρίσκονται σε βαθύτερα νερά ([Yapa et al., 2012](#)).
- Παρά την προσοχή που συγκεντρώνουν οι επιφανειακές κηλίδες, ένα σημαντικό ποσοστό ατυχημάτων διαρροής συμβαίνουν κάτω από την επιφάνεια, και συχνά κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας. Παραδείγματα περιλαμβάνουν ρήξεις αγωγών, εκρήξεις εξερευνητικών πηγαδιών και ναυάγια. Οι υπόγειες πετρελαιοκηλίδες προκαλούν πολυάριθμες επιπλοκές που δεν παρατηρούνται σε αντίστοιχες επιφανειακές διαρροές ([Yapa et al., 2012](#)).

1.4.3 Διεργασίες επιφανειακής διαρροής - Πετρελαιοκηλίδες

1.4.3.1 Γενικά

Η συμπεριφορά του πετρελαίου στο περιβάλλον αφορά στους μετασχηματισμούς που υπόκειται όταν διαρρεύσει σε υδάτινο περιβάλλον ([Fingas, 2012](#)). Αυτοί οι μετασχηματισμοί καθορίζουν τις βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της διαρροής και επηρεάζουν την καταλληλότητα της μεθόδου αντιμετώπισης ([Lee et al., 2016](#)). Υπάρχουν δύο βασικές διεργασίες: η γήρανση και η κίνηση πετρελαίου. Οι διεργασίες γήρανσης και η κίνηση του πετρελαίου εξαρτώνται από τον τύπο του πετρελαίου, τις καιρικές συνθήκες και άλλες συνθήκες κατά τη διάρκεια και μετά τη διαρροή. Η γήρανση επηρεάζει την κίνηση του πετρελαίου ([Afenyo et al., 2016](#); [Liu et al., 2012](#)).

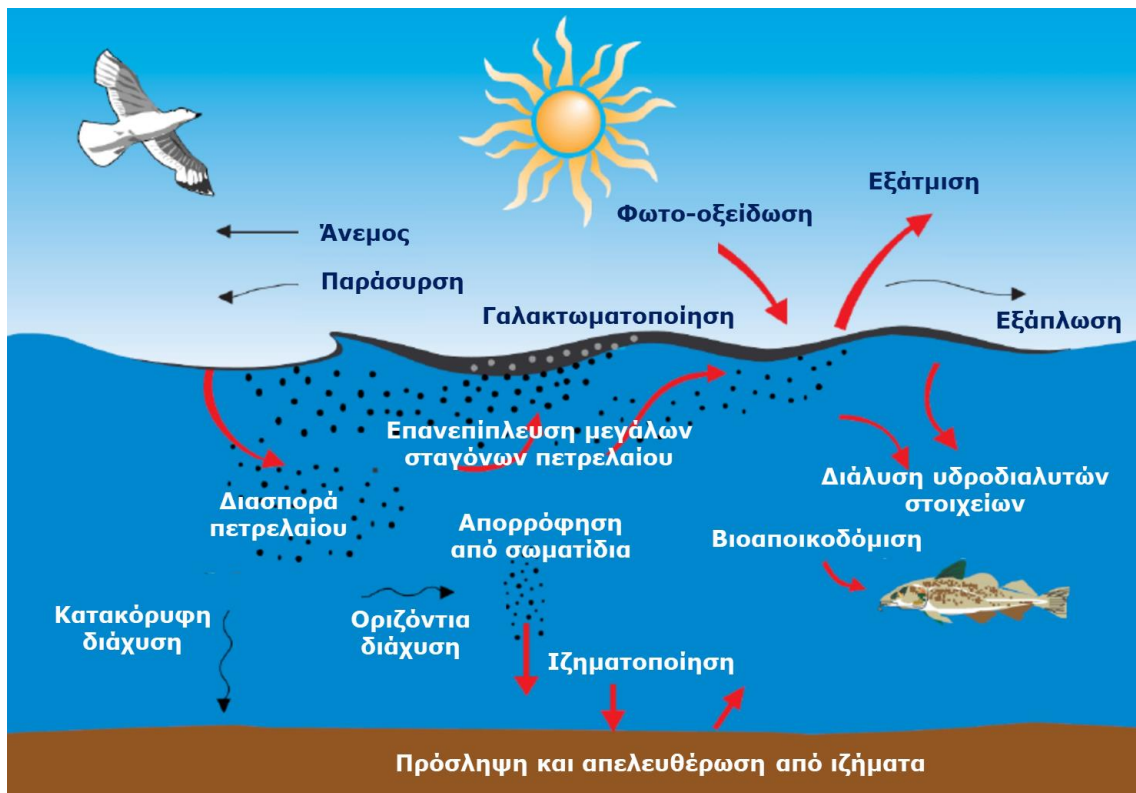
Οι επιφανειακές εκλύσεις που προκύπτουν από ατυχήματα δεξαμενόπλοιων ή πλοίων παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτές που παρατηρούνται σε εργασίες εξόρυξης πετρελαίου που συμβαίνουν κοντά στην επιφάνεια. Πολλές περιπτώσεις ατυχημάτων έκλυσης πετρελαίου στην επιφάνεια της θάλασσας έχουν καταγραφεί, συμπεριλαμβανομένης της πετρελαιοκηλίδας του «Exxon Valdez», το 1989, στην Αλάσκα, του «Prestige», το 2002, στην Ισπανία και του «Αγία Ζώνη II», το 2017, στην Ελλάδα (3.3.2).

1.4.3.2 Διεργασίες γήρανσης και κίνησης

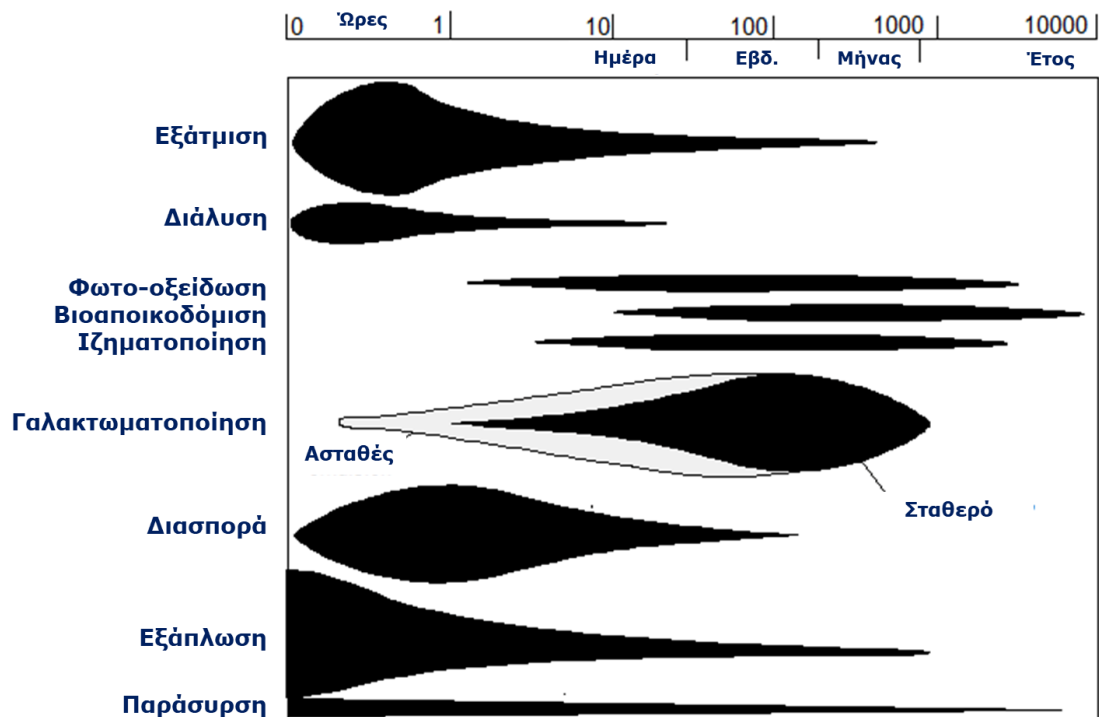
Οι διεργασίες γήρανσης είναι βιολογικές, χημικές και φυσικές διεργασίες που αλλάζουν τις ιδιότητες του πετρελαίου. Σε θαλάσσια περιβάλλοντα, οι διεργασίες αυτές ξεκινούν αμέσως μετά τη διαρροή και ποικίλλουν καθ' όλη τη διάρκεια τους (Daling et al., 1990; Zhang et al., 2019).

Οι κύριες διεργασίες γήρανσης και κίνησης της πετρελαιοκηλίδας, παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.5, και είναι οι ακόλουθες:

1. Εξάπλωση (spreading).
2. Εξάτμιση (evaporation).
3. Διασπορά (dispersion).
4. Διάλυση (dissolution).
5. Γαλακτωματοποίηση (emulsification).
6. Φωτο-οξειδωση (photo-oxidation).
7. Καθίζηση και βύθιση (sedimentation and sinking).
8. Βιοαποικοδόμηση (biodegradation).



Σχήμα 1.5 Σχηματική απεικόνιση διεργασιών γήρανσης και κίνησης του πετρελαίου (Πηγή: Daling et al., 1990)



Σχήμα 1.6 Σημαντικότητα των διεργασιών γήρανσης και χρόνος που συντελούνται (Πηγή: Daling et al., 1990)

Οι πρώτες πέντε διεργασίες, δηλ. η εξάπλωση, η εξάτμιση, η διασπορά, η γαλακτωματοποίηση και η διάλυση, είναι οι πιο σημαντικές στα αρχικά στάδια μιας διαρροής (Lehr, 2001), λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια των πρώτων ημερών έως εβδομάδων μιας διαρροής και μπορούν να αλλάξουν δραματικά τη φύση του πετρελαίου (εκτός από τη διάλυση). Οι υπόλοιπες τρεις διεργασίες, δηλ. η οξείδωση, η καθίζηση και η βιοαποικοδόμηση, είναι πιο μακροπρόθεσμες διεργασίες που είναι πιο σημαντικές στα μεταγενέστερα στάδια της γήρανσης και συνήθως καθορίζουν την τελική μοίρα του διαρρέοντος πετρελαίου. Στο Σχήμα 1.6 παρουσιάζονται η σημαντικότητα της κάθε διεργασίας (πάχος γραμμής) καθώς και η χρονική διάρκεια στην οποία συντελείται (από ώρες έως χρόνια).

1.4.3.3 Εξάτμιση

Η εξάτμιση είναι ο πρωταρχικός μηχανισμός για την απώλεια ελαφρών στοιχείων (συστατικά χαμηλού μοριακού βάρους και προϊόντα ελαφρού πετρελαίου). Οι υδρογονάνθρακες που εξατμίζονται στον αέρα διασπώνται γρήγορα από το ηλιακό φως σε μικρότερες ενώσεις μέσω της διεργασίας φωτοοξείδωσης, της οποίας ο ρυθμός αυξάνεται με το μοριακό βάρος.

1.4.3.4 Διάλυση

Τα περισσότερα από τα συστατικά του αργού πετρελαίου δεν είναι γενικά διαλυτά στο νερό, εκτός από μερικά από τα αρωματικά συστατικά χαμηλότερου μοριακού βάρους που είναι υδατοδιαλυτά σε περιορισμένο βαθμό και διαλύονται έξω από το πετρέλαιο στη στήλη νερού.

Η διάλυση επηρεάζει ορισμένα από τα ίδια κλάσματα υδρογονανθράκων με την εξάτμιση. Ωστόσο, αντιπροσωπεύει πολύ λιγότερη απώλεια πετρελαίου από την εξάτμιση και είναι γενικά δύο ή περισσότερες τάξεις μεγέθους μικρότερη. Αν και η διάλυση δεν είναι μια σημαντική διεργασία γήρανσης, η περιβαλλοντική της επίδραση μπορεί να είναι σημαντική, επειδή οι συγκεντρώσεις των συστατικών του πετρελαίου (που θα αραιωθούν γρήγορα στο νερό) μπορούν να ασκήσουν τοξική επίδραση στους θαλάσσιους οργανισμούς, ειδικά σε κλειστές ή ημίκλειστες παράκτιες περιοχές (Mishra and Kumar, 2015).

1.4.3.5 Φωτο-οξειδωση

Η φωτο-οξειδωση είναι ένα φαινόμενο κατά το οποίο η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για την οξειδωση του πετρελαίου, οδηγώντας στην παραγωγή οξυγονωμένων ενώσεων που διαθέτουν πολικότητα και διαλυτότητα στο νερό.

Τα αργά πετρέλαια, που χαρακτηρίζονται από το σκούρο χρώμα τους, έχουν την ικανότητα να απορροφούν την υπεριώδη (UV) ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ήλιο. Υπό έντονη έκθεση στον ήλιο, ορισμένα πετρέλαια μπορεί να υποστούν σημαντικές μεταβολές στη χημική τους σύνθεση, επηρεάζοντας κατά συνέπεια τη διεργασία της γαλακτωματοποίησης (Burwood and Speers, 1974).

1.4.3.6 Βιοαποικοδόμηση

Η βιοαποικοδόμηση είναι η διεργασία όπου τα βακτήρια και οι μύκητες καταναλώνουν υδρογονάνθρακες για να τους χρησιμοποιήσουν ως πηγή τροφής. Το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό απεκκρίνονται ως απόβλητα. Αυτή η διεργασία οξειδωσης συμβαίνει στην επιφάνεια του νερού, στη στήλη του νερού, στα ιζήματα και στην ακτή. Μικρόβια (βακτήρια και μύκητες) που μπορούν να χρησιμοποιήσουν υδρογονάνθρακες βρίσκονται φυσικά στους θαλάσσιους οικοτόπους. Ωστόσο, αυξάνονται και πολλαπλασιάζονται μετά από μια πετρελαιοκηλίδα επειδή γίνονται διαθέσιμες πρόσθετες πηγές τροφής (άνθρακας) μετά από μια διαρροή (Misha and Kumar, 2015).

1.4.3.7 Καθίζηση και βύθιση

Η καθίζηση είναι η απορρόφηση πετρελαίου σε αιωρούμενα ιζήματα που τελικά καθιζάνουν από τη στήλη του νερού και συσσωρεύονται στον πυθμένα της θάλασσας.

Η καθίζηση μπορεί επίσης να συμβεί, όταν το πετρέλαιο απομονώνεται στην ακτή και στη συνέχεια ενσωματώνεται με ιζήματα και μεταφέρεται σε υποαλιρροϊκά περιβάλλοντα.

Το πολύ βαρύ ή γηρασμένο πετρέλαιο μπορεί να βυθιστεί απευθείας στον πυθμένα χωρίς να προσκολληθεί πρώτα στα ιζήματα. Αυτή η διεργασία ενισχύεται καθώς η πυκνότητα του νερού μειώνεται από την ενδεχόμενη ανάμιξη με γλυκό νερό στις παράκτιες περιοχές (Payne et al., 2003).

Η βύθιση είναι ο μηχανισμός με τον οποίο η μάζα πετρελαίου που είναι πιο πυκνή από το περιβάλλον νερό, βυθίζεται στον πυθμένα. Το ίδιο το πετρέλαιο μπορεί να είναι πιο πυκνό από το νερό ή μπορεί να έχει ενσωματώσει αρκετό ιζημα και να έχει γίνει πιο πυκνό από το νερό.

Υπάρχει σημαντική διαφορά στη σχετική ποσότητα πετρελαίου που ενσωματώνεται από τις δύο διεργασίες καθώς στην καθίζηση το βυθιζόμενο πετρέλαιο μπορεί να περιέχει κάποιο ποσοστό ιζήματος, ενώ κατά τη βύθιση τα ρυπασμένα ιζήματα που συσσωρεύονται στον πυθμένα της θάλασσας θα περιέχουν το πολύ κάποιο ποσοστό πετρελαίου (Jacketti et al., 2020).

1.4.3.8 Διασπορά

Η διασπορά είναι μια φυσική διεργασία, η οποία προκαλείται από τις αναταράξεις στην επιφάνεια του νερού λόγω ανέμων και κυμάτων, που έχει ως αποτέλεσμα τη διάσπαση των πετρελαιοκηλίδων σε θραύσματα και σταγονίδια διαφόρων μεγεθών και αναμειγνύονται με το νερό.

Τα μικρότερα σταγονίδια τείνουν να αναμειγνύονται με το θαλασσινό νερό, ενώ τα μεγαλύτερα τείνουν να επιστρέφουν στην επιφάνεια της θάλασσας και πιθανώς να συνενώνονται με άλλα σταγονίδια για να αναμορφώσουν μια κηλίδα. Τα σταγονίδια που παραμένουν αιωρούμενα στο θαλάσσιο σώμα υπόκεινται πιο εύκολα σε άλλες διεργασίες όπως διάλυση, βιοαποικοδόμηση και καθίζηση. Ο ρυθμός διασποράς εξαρτάται από τον στροβιλισμό της επιφάνειας.

Εκτός από τις συνθήκες μεγάλων ταχυτήτων ανέμου και ύψους κυμάτων, το χαμηλό ιξώδες

πετρελαίου επιταχύνει επίσης τη διασπορά³.

1.4.3.9 Γαλακτωματοποίηση

Γαλακτωματοποίηση είναι η προσρόφηση νερού (διάλυση σταγονιδίων νερού) στο πετρέλαιο, δηλ. είναι το αντίθετο της διασποράς. μικρές σταγόνες νερού περιβάλλονται από πετρέλαιο (ο μηχανισμός με τον οποίο οι σταγόνες νερού διεισδύουν στη διαρροή είναι ακόμη απροσδιόριστος). Εξαιτίας της γαλακτωματοποίησης το πετρέλαιο παραμένει στην επιφάνεια της θάλασσας.

Το νερό στην αλληλεπίδραση με το πετρέλαιο μετατρέπεται σε ένα παχύρρευστο κολλώδες μείγμα, αυξημένου ιξώδους και όγκου, το οποίο συχνά αναφέρεται ως «μους σοκολάτας (chocolate mousse)» λόγω της εμφάνισής του.

Τα γαλακτώματα μπορούν να διαχωριστούν ξανά σε πετρέλαιο και νερό εάν θερμανθούν από το φως του ήλιου υπό ήρεμες συνθήκες ή όταν κολλήσουν στις ακτές³.

1.4.3.10 Εξάπλωση και παράσυρση

Όταν το πετρέλαιο διαρρέυσει, αρχίζει να απλώνεται στην επιφάνεια της θάλασσας, με την αρχική εξάπλωση να είναι σπανίως ομοιόμορφη. Η δημιουργηθείσα πετρελαιοκηλίδα, μετά από λίγες ώρες, τυπικά αρχίζει να διασπάται λόγω της δράσης των ανέμων, των κυμάτων και των αναταράξεων του νερού, και συχνά σχηματίζει στενές ζώνες παράλληλα με την κατεύθυνση του ανέμου, με το πάχος της παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις (Elliott et al., 1986).

Παράλληλα, καθώς η πετρελαιοκηλίδα υπόκειται σε ανέμους και θαλάσσια ρεύματα, μετατοπίζεται προς την κατεύθυνση της κίνησης αυτών (Singsaas et al., 2020).

1.5 Σημαντικά ατυχήματα διαρροών πετρελαίου

1.5.1 Γενικά

Οι διαρροές πετρελαίου, μπορούν να λάβουν χώρα εξαιτίας ατυχημάτων σε υπεράκτια και παράκτια ύδατα.

Αυτά τα ατυχήματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ατυχήματα πλοίων, εκρήξεις πετρελαιοπηγών, ατυχήματα σε εγκαταστάσεις διυλιστηρίων πετρελαίου και ατυχήματα πετρελαιοαγωγών.

1.5.2 Ατυχήματα υποθαλάσσιας διαρροής

Το πρώτο καταγεγραμμένο μεγάλο ατύχημα κατά τη διαδικασία εξόρυξης αφορά το Ixtoc I, και συνέβη όπως περιγράφεται παρακάτω.

Στις 10 Δεκεμβρίου 1978 ξεκίνησε η διάνοιξη του ερευνητικού φρέατος Ixtoc I στον Κόλπο του Μεξικού. Το βάθος νερού ήταν περίπου 50 m και οι δραστηριότητες γεώτρησης διήρκεσαν ένα εξάμηνο, φτάνοντας σε βάθος 3600 m μέχρι τα τέλη Μαΐου. Σε βάθος 3615 m, το πηγάδι άρχισε να χάνει τη λάσπη γεώτρησης και η κυκλοφορία χάθηκε εντελώς κατά περίπου 3625 m παρά τις αρκετές προσπάθειες αποκατάστασής του, οι οποίες απεβησαν άκαρπες. Η αστάθεια του φρεατίου οδήγησε στην απόφαση να σφραγιστεί με την απόσυρση του σωλήνα γεώτρησης και την τοποθέτηση μίας τάπας σφράγισης στον κενό χώρο (Waldichuk, 1980). Κατά τη διάρκεια των προσπαθειών σφράγισης του φρέατος στις 3 Ιουνίου, η πίεση ανέβηκε σε εξαιρετικά υψηλά επίπεδα, με αποτέλεσμα η λάσπη να ρέει επάνω στον σωλήνα του γεωτρώπανου και στην πλατφόρμα. Στη συνέχεια το πηγάδι εξερράγη και πήρε φωτιά με συνέπεια τη βύθιση της πλατφόρμας και την έναρξη της διαρροής.

³ <http://www.itopf.com/marine-spills/fate/weathering-process/>

Συνολικά 476.000 t διέρρευσαν στη θάλασσα στο χρονικό διάστημα των 9 περίπου μηνών (3/6/1979 – 14/3/1980) που χρειάστηκε για να σταματήσει η διαρροή (Waldichuk, 1980).



Σχήμα 1.7 Ixtoc I

(Πηγή: <https://response.restoration.noaa.gov/index.php>)

Ένα άλλο ατύχημα σε δραστηριότητες εξόρυξης αφορά την έκρηξη της εξέδρας πετρελαίου Deepwater Horizon που σημειώθηκε στις 20 Απριλίου 2010, η οποία είχε ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση πετρελαίου από τον βυθό του Κόλπου του Μεξικού, που βρίσκεται σε βάθος 1.500 m. Η απελευθέρωση πετρελαίου διήρκεσε 87 ημέρες έως ότου οριστικά κλείστηκε. Το πετρέλαιο που διέρρευσε από το Mississippi Canyon (MC) 252 ήταν ένα σύνθετο μείγμα υδρογονανθράκων και άλλων στοιχείων. Η μέση πυκνότητα αυτού του μείγματος ήταν περίπου $0,85 \text{ g/cm}^3$, η οποία είναι ελαφρύτερη από την πυκνότητα του περιβάλλοντος θαλασσινού νερού περίπου $1,03 \text{ g/cm}^3$ (Mariano et al., 2011).



Σχήμα 1.8 Έκταση πετρελαιοκηλίδας από το ατύχημα Deepwater Horizon στις 17/5/2010

(Πηγή: <https://appliedsciences.nasa.gov/our-impact/news/nasa-images-show-oils-invasion-along-louisiana-coast>)

Ο ρυθμός διαρροής πετρελαίου, όπως ανακοινώθηκε στις 2 Αυγούστου 2010, μειώθηκε από τα 62.000 βαρέλια (αρχική εκτίμηση) σε 53.000 βαρέλια την ημέρα, με αποτέλεσμα τη συνολική διαρροή 4,9 εκατομμυρίων βαρελιών (περίπου 670.000 t) πετρελαίου (McNutt et al., 2012). Κατά το τέλος της πετρελαιοκηλίδας, τα πλοία επιφανείας ανακτούσαν έως και 25.000 βαρέλια την ημέρα, ενώ ο μέγιστος ρυθμός διαρροής ήταν περίπου 10^4 m^3 την ημέρα. Η επιφανειακή πετρελαιοκηλίδα παρατηρήθηκε για πρώτη φορά στις 22 Απριλίου 2010 και εξαπλώθηκε γρήγορα καλύπτοντας μια περιοχή περίπου 17.725 km² έως τις 17 Μαΐου 2010 (Σχήμα 1.8), όπως προσδιορίστηκε από τους Mariano et al. (2011).

1.5.3 Ατυχήματα επιφανειακής διαρροής - Πετρελαιοκηλίδες

Ένα παράδειγμα διαρροής πετρελαίου στην επιφάνεια είναι η πετρελαιοκηλίδα του δεξαμενόπλοιου Exxon Valdez. Η πετρελαιοκηλίδα Exxon Valdez του 1989 στο Prince William Sound, στην Αλάσκα, παραμένει μία από τις μεγαλύτερες στην ιστορία των Ηνωμένων Πολιτειών. Τουλάχιστον 14.500 t αργού πετρελαίου κινήθηκαν νοτιοδυτικά, με σημαντικές ποσότητες να διαφεύγουν και να ρυπαίνουν τις χερσονήσους Kenai και την Αλάσκα και το Αρχιπέλαγος Kodiak. Συνολικά 2.100 km ακτογραμμής επηρεάστηκαν από τη διαρροή. Μια διαρροή αυτού του μεγέθους απαιτούσε μια τεράστια προσπάθεια έρευνας της ακτογραμμής για να προσδιοριστεί η έκταση και ο βαθμός ρύπανσης και να συντονιστούν οι δραστηριότητες καθαρισμού (Lindeberg et al., 2018).

1.6 Μέθοδοι αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων

1.6.1 Γενικά

Μόλις το πετρέλαιο διαρρεύσει στη θάλασσα, θα εξαπλωθεί φυσικά, θα κατακερματιστεί και θα διασκορπιστεί υπό την επίδραση του ανέμου, των κυμάτων και των ρευμάτων. Για διαρροές στα παράκτια ύδατα, το πετρέλαιο συχνά παρασύρεται προς την ακτή, στην οποία και αποτίθεται, λόγω της δράσης των κυμάτων και της παλίρροιας. Προκειμένου να συγκρατηθεί το πετρέλαιο στο σημείο της διαρροής, να ανακτηθεί η ποσότητα του που επιπλέει στη θάλασσα και να καθαριστεί το μέρος του που μπορεί να έχει κολλήσει στην ακτή, υπάρχουν διάφορες τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Οι επικρατούσες καιρικές και θαλάσσιες συνθήκες, τα χαρακτηριστικά της ακτογραμμής που έχει ρυπανθεί από πετρέλαιο και η φύση του πετρελαίου αποτελούν ένα συνδυασμό παραγόντων που δύναται να δημιουργήσουν προκλήσεις σε οποιαδήποτε επιχείρηση καθαρισμού.

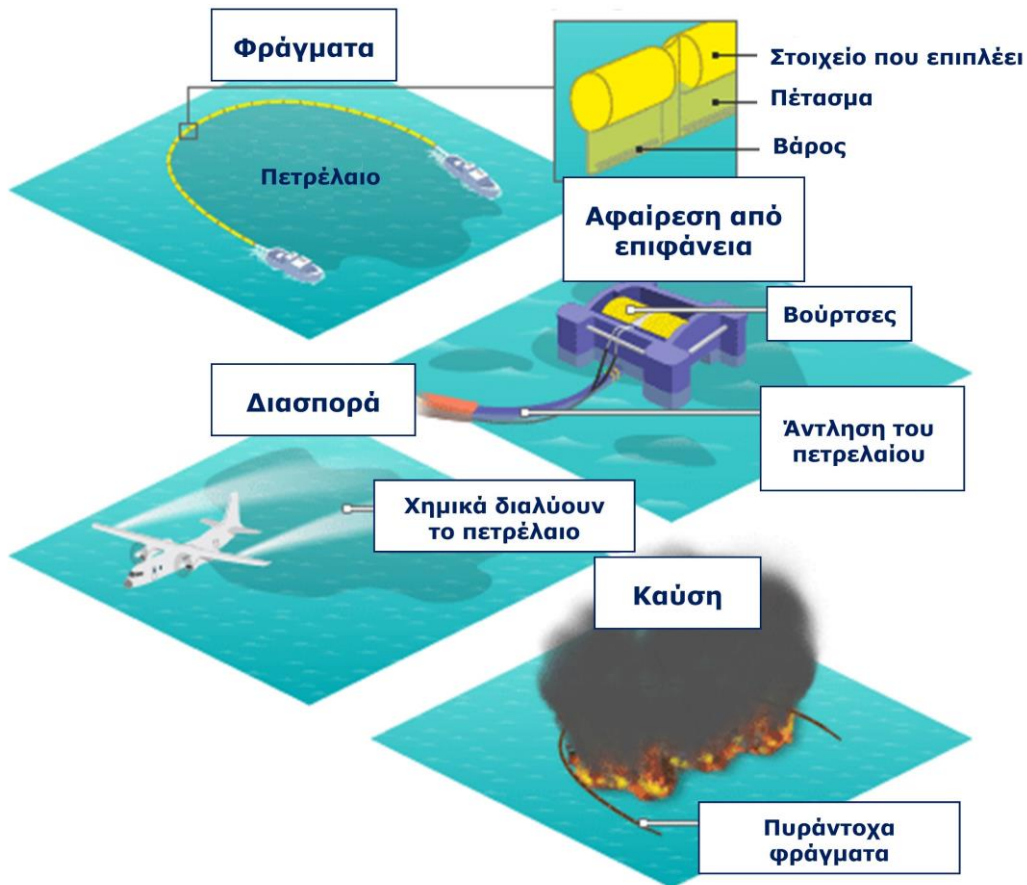
Οι κύριες μέθοδοι αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων είναι οι ακόλουθες:

1. Φράγματα (booms).
2. Μηχανήματα επιφανειακού καθαρισμού (skimmers).
3. Χημικά διασποράς (chemical dispersants).
4. Καύση επιτόπου (ISB, in situ burning).
5. Απορροφητικά υλικά και nano-υλικά (sorbents and nanomaterials).
6. Επεξεργασία με βακτήρια (bacterial treatment).
7. Χωρίς επεξεργασία - Φυσική διασπορά (no treatment - natural dispersion).

Τα τρία πρώτα μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια πετρελαιοκηλίδας σε παράκτια ύδατα, όπως λιμάνια, ενώ τα δύο τελευταία μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο κατά τη διάρκεια μιας υπεράκτιας πετρελαιοκηλίδας.

Οι μέθοδοι αντιμετώπισης μιας πετρελαιοκηλίδας μπορούν να πραγματοποιηθούν:

- (1) στη θάλασσα, και
- (2) στον καθαρισμό της χερσαίας ακτογραμμής.



Σχήμα 1.9 Μέθοδοι αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδας
(Πηγή: Ramírez-León, 2012)

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην αντιμετώπιση στη θάλασσα.

1.6.2 Φράγματα

Τα φράγματα είναι επιπλέοντα, εμπόδια, κατασκευασμένα από πλαστικό, μέταλλο ή άλλα υλικά, τα οποία επιβραδύνουν την εξάπλωση του πετρελαίου και το κρατούν περιορισμένο. Οι εξειδικευμένες ομάδες χρησιμοποιούν συστήματα πρόσδεσης, όπως άγκυρες, για να τοποθετήσουν φράγματα στις ακόλουθες τοποθεσίες:

1. Σε μια στενή είσοδο στον ωκεανό, όπως μια έξοδο ρέματος ή μια μικρή είσοδος, για να φραχθεί αυτή η είσοδος έτσι ώστε το πετρέλαιο να μην μπορεί να περάσει μέσα σε ελώδεις περιοχές ή σε άλλο ευαίσθητο βιότοπο.
2. Σε μέρη όπου το φράγμα μπορεί να εκτρέψει το πετρέλαιο μακριά από ευαίσθητες τοποθεσίες, όπως περιοχές οστρακοειδών.
3. Γύρω από ένα ευαίσθητο σημείο, για να μην φτάσει πετρέλαιο σε αυτό.

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι φραγμάτων:

- (a) τα σκληρά (hard),
- (b) τα απορροφητικά (sorbent), και
- (c) τα πυράντοχα (fire retardant).

Τα σκληρά φράγματα είναι σαν αιωρούμενα κομμάτια πλαστικού που έχουν κυλινδρικό πλωτήρα στο πάνω μέρος και βαρίδιο στο κάτω μέρος, ώστε να έχουν ένα πέτασμα κάτω από το νερό.

Τα απορροφητικά φράγματα είναι μακριές κυλινδρικές δομές κατασκευασμένες από υλικό που απορροφά πετρέλαιο, δεν έχουν το πέτασμα που έχουν τα σκληρά φράγματα, επομένως δεν μπορούν να συγκρατήσουν το πετρέλαιο για μεγάλο χρονικό διάστημα (Asadpour et al., 2013).

Τα πυράντοχα φράγματα αποτελούνται από αιωρούμενους μεταλλικούς κυλίνδρους στην κορυφή και λεπτές μεταλλικές πλάκες που χρησιμεύουν ως πέτασμα συγκράτησης ώστε να περιέχουν ικανό πάχος πετρελαίου για να μπορεί να αναφλεγεί και να καεί (Wadsworth, 1995). Αυτός ο τύπος φράγματος δεν χρησιμοποιείται πολύ συχνά, καθώς συνδυάζεται με την μέθοδο επιτόπιας καύσης (βλ. Ενότητα 1.6.5).

1.6.3 Μηχανήματα επιφανειακής ανάκτησης

Τα skimmers είναι σκάφη και άλλα μηχανήματα που μπορούν να αφαιρέσουν το πετρέλαιο από την επιφάνεια της θάλασσας πριν φτάσει σε ευαίσθητες περιοχές. Συνήθως, δύο σκάφη ρυμουλκούν ένα φράγμα συλλογής, επιτρέποντας στο πετρέλαιο να συγκεντρωθεί εντός αυτού, όπου στη συνέχεια παραλαμβάνεται από ένα μηχάνημα επιφανειακής ανάκτησης⁴. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι χρήσης, με χρήση φράγματος, με προσκόλληση και με αναρρόφηση.

1.6.4 Χημικά διασποράς

Τα χημικά διασποράς είναι χημικοί παράγοντες (όπως τα σαπούνια και τα απορρυπαντικά) που ενισχύουν τη διάσπαση μιας πετρελαιοκηλίδας σε πολύ μικρά σταγονίδια, ώστε αυτά να αιωρούνται στην υδάτινη στήλη και να απομακρύνονται από την επιφάνεια της θάλασσας. Αν και αυτή η μέθοδος δεν αφαιρεί την ποσότητα του πετρελαίου, τα μικρότερα σωματίδια πετρελαίου βιοδιασπώνται ευκολότερα και παρέχει ένα μέτρο προστασίας για ευαίσθητους οικοτόπους που απειλούνται από μια επιφανειακή πετρελαιοκηλίδα. Τα χημικά διασποράς ψεκάζονται σε διαρροές με ειδικά εξοπλισμένα σκάφη, αεροπλάνα ή ελικόπτερα⁵. Μια νέα αναπτυσσόμενη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της πετρελαιοκηλίδας του Deepwater Horizon το 2010 είναι η χρήση χημικών διασποράς μέσω της έγχυσης στο σημείο διαρροής (SSDI) (Brandvik et al., 2019).

1.6.4.1 Εφαρμογή με χρήση πλευστών μέσων

Σκάφη διαφορετικών μεγεθών χρησιμοποιούνται για εφαρμογή των χημικών διασποράς και είναι εξοπλισμένα με τέσσερα εξαρτήματα: δεξαμενές αποθήκευσης, αντλίες, ογκομετρική συσκευή μέτρησης και σύστημα ψεκασμού (Radpour, 2015). Τα συστήματα ψεκασμού έχουν σχεδιαστεί για να απελευθερώνουν συγκεκριμένα μεγέθη σταγονιδίων με συγκεκριμένο ρυθμό, με αποτέλεσμα τη βελτιωμένη επαφή των χημικών με το πετρέλαιο για ταχύτερη αποτελεσματικότητα (Fingas, 2012). Η εφαρμογή σκαφών χρησιμοποιείται για τη μείωση της συγκέντρωσης των πτητικών οργανικών ενώσεων και την προστασία των ομάδων αντιμετώπισης σε περιοχές όπου τα αεροσκάφη δεν μπορούν να δραστηριοποιηθούν (Curd, 2011), καθώς και για εργασίες καθαρισμού μικρής κλίμακας κοντά στις ακτές.

1.6.4.2 Εφαρμογή με χρήση εναέριων μέσων

Η εναέρια εφαρμογή των χημικών διασποράς περιλαμβάνει τη χρήση αεροσκαφών εξοπλισμένων με ειδικά σχεδιασμένα συστήματα ψεκασμού και δεξαμενές για την αποθήκευση των χημικών (Radpour, 2015). Αυτά περιλαμβάνουν αεροσκάφη διαφορετικού μεγέθους, συμπεριλαμβανομένων μικρών, μεσαίων, μεγάλων και ελικοπτέρων (Radpour, 2015). Ένα δημοφιλές σύστημα εναέριου ψεκασμού που χρησιμοποιείται για εφαρμογή χημικών είναι το Aerial Dispersant Deployment System, όπως τα συστήματα Rapid Installation and Deployment Spray, τα οποία μπορούν να εγκατασταθούν σε αεροσκάφη C-130 Hercules ειδικά σχεδιασμένα για αυτόν τον σκοπό⁵.

⁴ <https://itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/response-techniques/containment/>

⁵ <http://www.oilspillprevention.org/-/media/Oil-Spill-Prevention/spillprevention/r-and-d/dispersants/sp-sheet7-aerialvessel-1.pdf>

1.6.4.3 Εφαρμογή υποθαλάσσια (SSDI)

Η υποθαλάσσια εφαρμογή χημικών διασποράς, που χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στο περιστατικό *Deerwater Horizon* το 2010, μειώνει την ποσότητα πετρελαίου που αναδύεται στην επιφάνεια και προστατεύει τις ομάδες αντιμετώπισης διαρροών από πτητικές οργανικές ενώσεις (*National Research Council, 2005*). Απαιτείται λιγότερο διασκορπιστικό για την υποθαλάσσια έγχυση σε σύγκριση με την επιφανειακή διασπορά και οι ατμοσφαιρικές και καιρικές συνθήκες δεν επηρεάζουν τη διαδικασία (*Pang et al., 2015*).

Η υποθαλάσσια εφαρμογή μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω ενός τηλεχειριζόμενου οχήματος (*remote operate vehicle, ROV*) ή ενός σκληρού σωλήνα και μπορεί να προσφέρει 100% ρυθμό επαφής χημικού με πετρέλαιο. Η άμεση εφαρμογή στην πηγή μιας διαρροής, γνωστή ως εφαρμογή σημειακής πηγής, μειώνει την ανάγκη για χρήση μηχανημάτων και εξοπλισμού ανάκτησης πετρελαίου στην επιφάνεια και αποτρέπει την απόθεση του πετρελαίου στις ακτές (*Curd, 2011*). Ωστόσο, έχουν διεξαχθεί μελέτες που έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι οι χημικές ουσίες που διαλύονται σε βαθιά νερά θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρνητικά τους τοπικούς οργανισμούς και τα οικοσυστήματα (*Clayton et al., 2020*).

1.6.5 Επιτόπια καύση

Η επιτόπια καύση περιλαμβάνει την ελεγχόμενη καύση του πετρελαίου που έχει χυθεί από ένα σκάφος ή μια εγκατάσταση, στη θέση της διαρροής. Όταν διεξάγεται σωστά, η επί τόπου καύση μειώνει σημαντικά την ποσότητα πετρελαίου στο νερό και ελαχιστοποιεί τις δυσμενείς επιπτώσεις του πετρελαίου στο περιβάλλον (*Fingas, 2011*). Όμως παρουσιάζει και μία σειρά μειονεκτημάτων όπως:

- Προκαλεί ατμοσφαιρική ρύπανση μέσω της διαρροής αιθάλης και τοξικών αερίων που επηρεάζουν κοντινές και μακρινές περιοχές, παρουσιάζοντας πιθανές απειλές για την υγεία των ανθρώπων, των ομάδων αντίδρασης και των οργανισμών και των οικοτόπων.
- Δεν αφαιρεί εντελώς το πετρέλαιο από το περιβάλλον, αλλά το μετατρέπει σε επιβλαβή προϊόντα (*Fingas, 2018*).
- Παράγει εκπομπές στον αέρα και υπολείμματα καύσης στη θάλασσα, προκαλώντας ανησυχία στο κοινό για περιβαλλοντικά ζητήματα και την ανθρώπινη υγεία (*Faksness et al., 2022*).
- Έχει σχεδιαστεί ειδικά για χρήση σε απομακρυσμένες περιοχές του πλανήτη, όπως ο Αρκτικός Ωκεανός, και δεν θα πρέπει να θεωρείται ως στρατηγική πρώτης αντίδρασης για κατοικημένες περιοχές.
- Χρησιμοποιείται ως τελική λύση για να αποτρέψει το πετρέλαιο να φτάσει σε οικολογικά ευαίσθητα ενδιαιτήματα σε παράκτιες περιοχές (*Ekperusi et al., 2019*).

1.6.6 Απορροφητικά και νανο-υλικά

Τα απορροφητικά είναι υλικά χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση του πετρελαίου. Περιλαμβάνουν τύρφη, φυλλώδη και άργιλο. Οι συνθετικές ποικιλίες - συνήθως πλαστικοί αφροί ή ίνες - διατίθενται σε φύλλα, ρολά ή φράγματα. Επειδή τα ποτισμένα με πετρέλαιο υλικά πρέπει να συλλέγονται και να υποβάλλονται σε επεξεργασία, χρησιμοποιούνται συχνότερα σε μικρές διαρροές. Τα νανο-υλικά χρησιμοποιούν την ίδια μέθοδο για να απορροφήσουν το πετρέλαιο από την επιφάνεια της θάλασσας (*Idris et al., 2014*).

Η χρήση απορροφητικών υλικών και νανο-υλικών για την αποκατάσταση μεγάλων πετρελαιοκηλίδων δεν είναι πρακτική. Στην ανοιχτή θάλασσα, δεν είναι εφικτή η χρήση τους σε απομακρυσμένες τοποθεσίες. Οι συνθήκες υψηλής ενέργειας στη θάλασσα μπορούν να μεταφέρουν τα υλικά μακριά από το σημείο της διαρροής, προκαλώντας περαιτέρω ρύπανση και πρόσθετο κόστος απορρύπανσης (*Asadpour et al., 2013*).

1.6.7 Επεξεργασία με βακτήρια

Η επεξεργασία με βακτήρια είναι μια μέθοδος αντιμετώπισης που χρησιμοποιεί μικροοργανισμούς για να διασπάσει και να καταναλώσει το πετρέλαιο, μετατρέποντάς το τελικά σε αβλαβή υποπροϊόντα. Αυτή η μέθοδος μπορεί να είναι αποτελεσματική στο μετριασμό των επιπτώσεων των πετρελαιοκηλίδων και έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε διάφορα περιβάλλοντα (Perdigão et al., 2021).

Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει την προσθήκη άλλων υλικών σε θέσεις πετρελαιοκηλίδας για την ενίσχυση της μικροβιακής βιοαποικοδόμησης (Garrett et al., 2003). Για να μεγιστοποιηθεί η διεργασία αποδόμησης, η θέση διαρροής θα πρέπει να είναι πλούσια σε θρεπτικά συστατικά, όπως φώσφορο και άζωτο, που ενισχύουν τη μικροβιακή δραστηριότητα (Al-Sayegh et al., 2016).

Η χρήση υλικών πλούσιων σε φώσφορο και άζωτο ως καταλύτες αποδείχθηκε στην πράξη κατά τον καθαρισμό της πετρελαιοκηλίδας του Exxon Valdez το 1989 στην Αλάσκα (Garrett et al., 2003).

1.6.8 Χωρίς επεξεργασία – Φυσική διασπορά

Όταν η πετρελαιοκηλίδα δεν αντιμετωπίζεται με καμία από τις προαναφερθείσες μεθόδους απόκρισης, τότε υποβάλλεται μόνο σε φυσική διασπορά (Delvigne and Sweeney, 1988).

Κατά τη διάρκεια ενός σχεδίου έκτακτης ανάγκης πετρελαιοκηλίδας λαμβάνεται υπόψη και αυτή η πρακτική.

1.6.9 Σύγκριση μεθόδων – Η μέθοδος SSDI

Σύμφωνα με την EMSA στις ελληνικές θάλασσες προτεραιότητα έχει η χρήση μηχανικών μέσων ανάκτησης και σε δεύτερο βαθμό γίνεται χρήση χημικών. Η χρήση της μεθόδου καύσης επιτόπου δεν εξετάζεται παρά μόνο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, σε απομακρυσμένες μη κατοικημένες περιοχές.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μέθοδος SSDI, καθώς είναι η μοναδική που αναπτύχθηκε για χρήση στο σημείο της διαρροής, υποθαλάσσια, με σκοπό τη μείωση της ποσότητας και του πάχους του πετρελαίου που θα βρεθεί τελικά στην επιφάνεια της θάλασσας. Η αποτελεσματικότητα αυτής της μεθόδου δεν έχει διερευνηθεί πλήρως καθώς εφαρμόστηκε για πρώτη φορά σχετικά πρόσφατα, στο ατύχημα του Deepwater Horizon το 2010.

1.7 Μελλοντική εξερεύνηση υδρογονανθράκων στην Ελλάδα

Έχουν χορηγηθεί άδειες έρευνας και αξιοποίησης υδρογονανθράκων στις ακόλουθες θαλάσσιες περιοχές και αναμένεται σε σύντομο χρονικό διάστημα να εκκινήσουν οι ερευνητικές γεωτρήσεις.

1. Block 1 & 2 (Σχήμα 1.10)
2. Ιόνιο (Σχήμα 1.11)
3. Block 10 (Σχήμα 1.12)
4. Πατραϊκός (Σχήμα 1.13)
5. Δυτικά της Κρήτης (Σχήμα 1.14)
6. Νοτιοδυτικά της Κρήτης (Σχήμα 1.15)

Το μέχρι στιγμής χρονοδιάγραμμα των διαδικασιών φαίνεται στους Πίνακες 1.3 & 1.4.

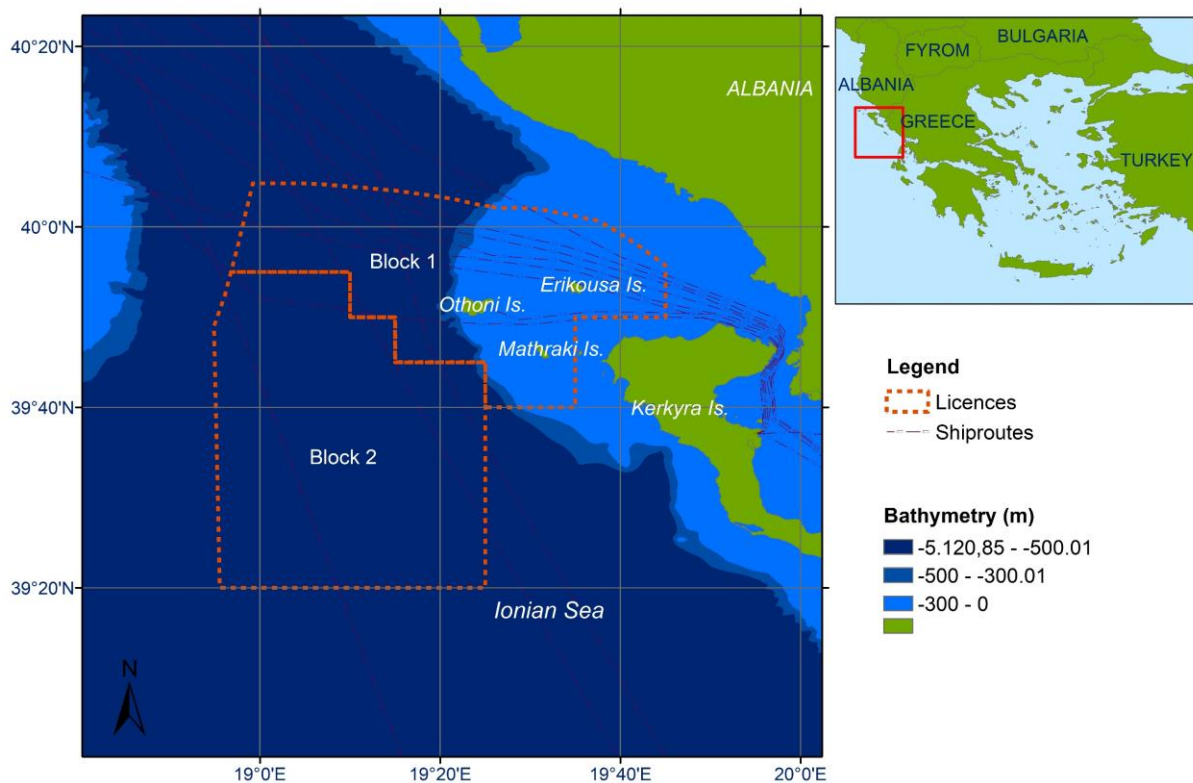
Πίνακας 1.3 Χρονοδιάγραμμα διαδικασιών για τις άδειες στις περιοχές Ιονίου & Κρήτης
Θαλάσσιες περιοχές Ιονίου & Κρήτης

	Αρ. Απόφασης/Νόμου	Αρ. ΦΕΚ	Έτος
Προκήρυξη Διεθνούς Διαγωνισμού για παραχώρηση δικαιώματος έρευνας και εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων σε είκοσι (20) θαλάσσιες περιοχές στη Δυτική Ελλάδα (Ιόνιο) και νοτίως της Κρήτης.	Δ1/A/12892	B' 2186/8.8.2014	2014
Προκήρυξη Διεθνούς Διαγωνισμού για παραχώρηση δικαιώματος έρευνας και εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων σε θαλάσσια περιοχή στη Δυτική Ελλάδα (Ιόνιο).	ΥΠΕΝ/ΥΠΡΓ/14322/4347	B' 2849/11.8.2017	2017
Προκήρυξη Διεθνούς Διαγωνισμού για παραχώρηση δικαιώματος έρευνας και εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων στις θαλάσσιες περιοχές « Δυτικά Κρήτης » και « Νοτιοδυτικά Κρήτης ».	ΥΠΕΝ/ΥΠΡΓ/14325/4348	B' 2848/11.8.2017	2017
Επιλογή είδους σύμβασης και γεωγραφικός προσδιορισμός θαλάσσιας περιοχής στη Δυτική Ελλάδα (Ιόνιο) για παραχώρηση του δικαιώματος έρευνας και εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων.	ΥΠΕΝ/ΥΠΡΓ/13967/4241	B' 2885/21.8.2017	2017
Επιλογή είδους σύμβασης και γεωγραφικός προσδιορισμός θαλάσσιων περιοχών νοτιοδυτικά και δυτικά της Κρήτης για παραχώρηση του δικαιώματος έρευνας και εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων.	ΥΠΕΝ/ΥΠΡΓ/13967/4241	B' 2885/21.8.2017	2017
Κύρωση της Σύμβασης Μίσθωσης μεταξύ της Ελληνικής Δημοκρατίας και των εταιρειών Total E&P Greece B.V., Edison International S.p.A. και Ελληνικά Πετρέλαια Α.Ε. για την παραχώρηση του δικαιώματος έρευνας και εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων στην περιοχή « Block 2 », Ιόνιο Πέλαγος.	N. 4525	A' 47/15.3.2018	2018
Ορισμός Επιλεγέντος Αιτούντος στο πλαίσιο του Διεθνούς Διαγωνισμού για παραχώρηση δικαιώματος έρευνας και εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων σε θαλάσσια περιοχή στη Δυτική Ελλάδα « Ιόνιο » (ΥΠΕΝ/ΥΠΡΓ/14322/4347, ΦΕΚ Β' 2849/11.08.2017).	ΥΠΕΝ/ΥΠΡΓ/53033/7627	B' 3521/21.8.2018	2018
Κύρωση της Σύμβασης Μίσθωσης μεταξύ της Ελληνικής Δημοκρατίας και των εταιρειών Total E&P Greece B.V. (40%), ExxonMobil Exploration and Production Greece (Crete) B.V. (40%) και Ελληνικά Πετρέλαια Α.Ε. (20% για την παραχώρηση του δικαιώματος έρευνας και εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων στη θαλάσσια Περιοχή « Νοτιοδυτικά Κρήτης », Ελλάδα.	N. 4628	A' 153/10.10.2019	2019
Κύρωση της Σύμβασης Μίσθωσης μεταξύ της Ελληνικής Δημοκρατίας και των εταιρειών Repsol Exploracion S.A. και Ελληνικά Πετρέλαια Α.Ε. για την παραχώρηση του δικαιώματος έρευνας και εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων στη θαλάσσια περιοχή « Ιόνιο », Δυτική Ελλάδα.	N. 4629	A' 154/10.10.2019	2019

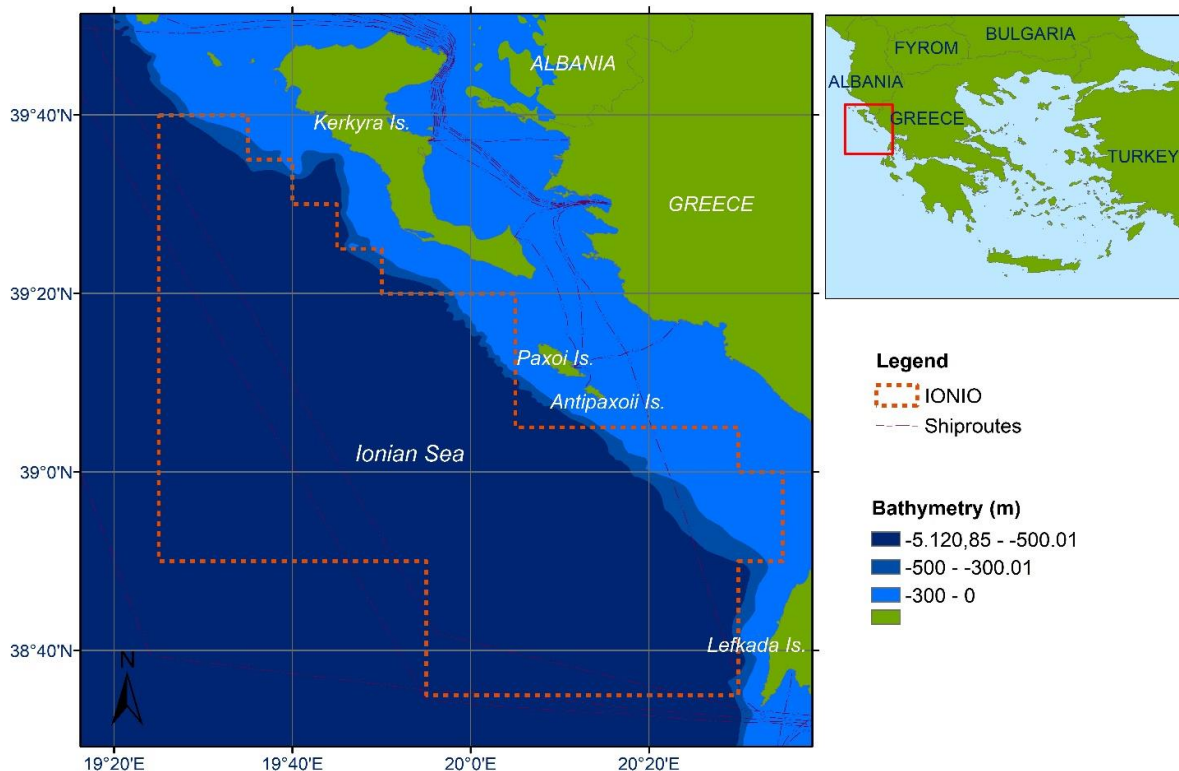
	Αρ. Απόφασης/Νόμου	Αρ. ΦΕΚ	Έτος
Κύρωση της Σύμβασης Μίσθωσης μεταξύ της Ελληνικής Δημοκρατίας και της εταιρείας Ελληνικά Πετρέλαια Α.Ε. για την παραχώρηση του δικαιώματος έρευνας και εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων στην περιοχή « Block 10 », Ιόνιο Πέλαγος, Ελλάδα.	N. 4630	A' 155/10.10.2019	2019
Κύρωση της Σύμβασης Μίσθωσης μεταξύ της Ελληνικής Δημοκρατίας και των εταιρειών Total E&P Greece B.V. (40%), ExxonMobil Exploration and Production Greece (Crete) B.V. (40%) και Ελληνικά Πετρέλαια Α.Ε., (20%) για την παραχώρηση του δικαιώματος έρευνας και εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων στη θαλάσσια Περιοχή « Δυτικά Κρήτης », Ελλάδα.	N. 4631	A' 156/10.10.2019	2019
Εξαγορά του μεριδίου 50% της TOTAL από την ENERGEAN για την περιοχή « Block 2 » στο Ιόνιο.	-	-	2020
Εξαγορά της EDISON από την ENERGEAN, οπότε η ENERGEAN κατέχει το 75% και τα Ελληνικά Πετρέλαια Α.Ε. το 25% στη θαλάσσια Περιοχή 2 του Ιονίου.	-	-	2021
Αποχωρεί η REPSOL από την περιοχή « Ιόνιο », οπότε τα ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΑ κατέχουν πλέον το 100%.	-	-	2021
Block 2: Κατάθεση προσφοράς από Ελληνικά Πετρέλαια Α.Ε.			
2 περιοχές ΚΡΗΤΗ: Μετάθεση για 2024			
Block 2: Μετάθεση για 2024			
«Ιόνιο»: Σκέψεις για επιστροφή παραχ/σης			

Πίνακας 1.4 Χρονοδιάγραμμα διαδικασιών για τις άδειες στην περιοχή του Πατραϊκού Κόλπου

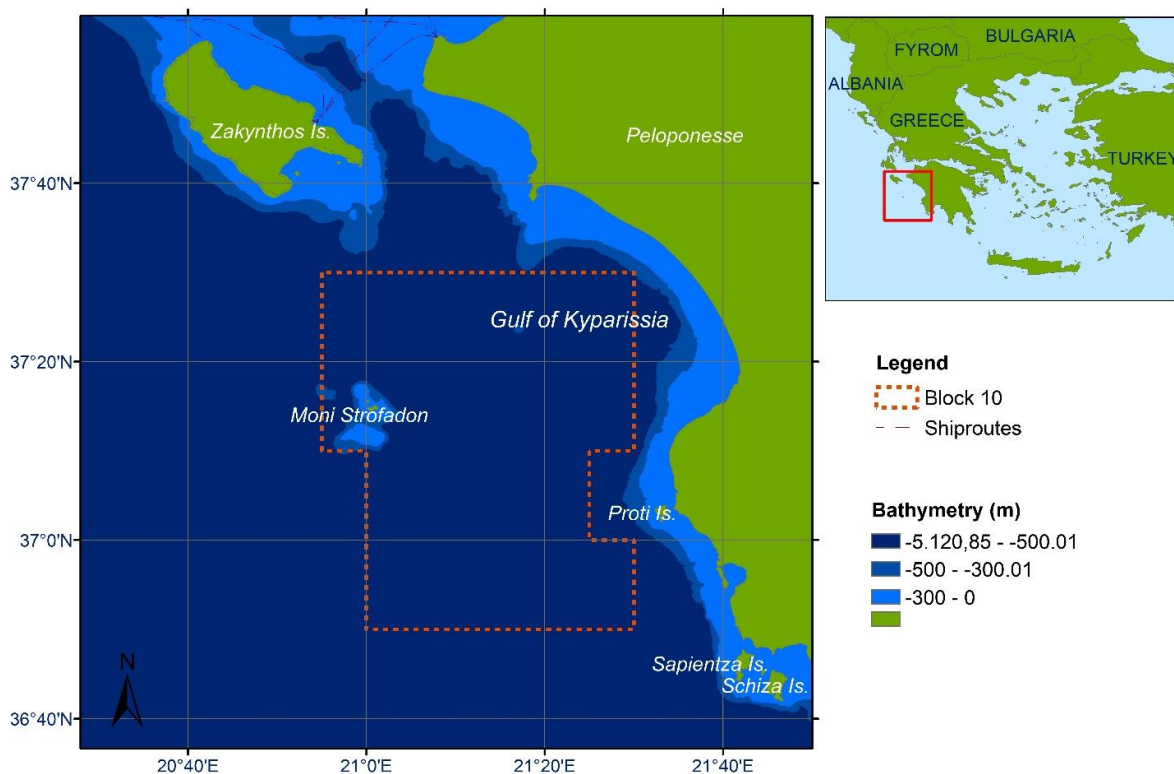
Θαλάσσια περιοχή «Πατραϊκός»			
	Αρ. Απόφασης/Νόμου	Αρ. ΦΕΚ	Έτος
Διεθνής Δημόσια Ανοικτή Πρόσκληση εκδήλωσης ενδιαφέροντος για παραχώρηση δικαιώματος έρευνας και εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων στη θαλάσσια περιοχή « Πατραϊκός ».	Δ1/A/33	B' 76/27.1.2012	2012
Κύρωση της Σύμβασης Μίσθωσης μεταξύ της Ελληνικής Δημοκρατίας και των εταιριών Ελληνικά Πετρέλαια Α.Ε., Edison International S.p.A. και Petroceltic Resources plc για την παραχώρηση του δικαιώματος έρευνας και εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων στη θαλάσσια περιοχή « Πατραϊκός ».	N. 4299	B' 221/3.10.2014	2014
Μεταβίβαση του 33% στις Ελληνικά Πετρέλαια Α.Ε. και EDISON από την PETROCELTIC για τη θαλάσσια περιοχή « Πατραϊκός ». Κατοχή πλέον του 50% έκαστος.	-	-	2016
Εξαγορά της EDISON από την ENERGEAN, οπότε η ENERGEAN κατέχει το 50% και τα Ελληνικά Πετρέλαια Α.Ε. το 50% στην περιοχή « Πατραϊκός ».	-	-	2021
Αναμένονται διαδικασίες ερευν. γεώτρησης εντός του τρέχοντος έτους (2023)			



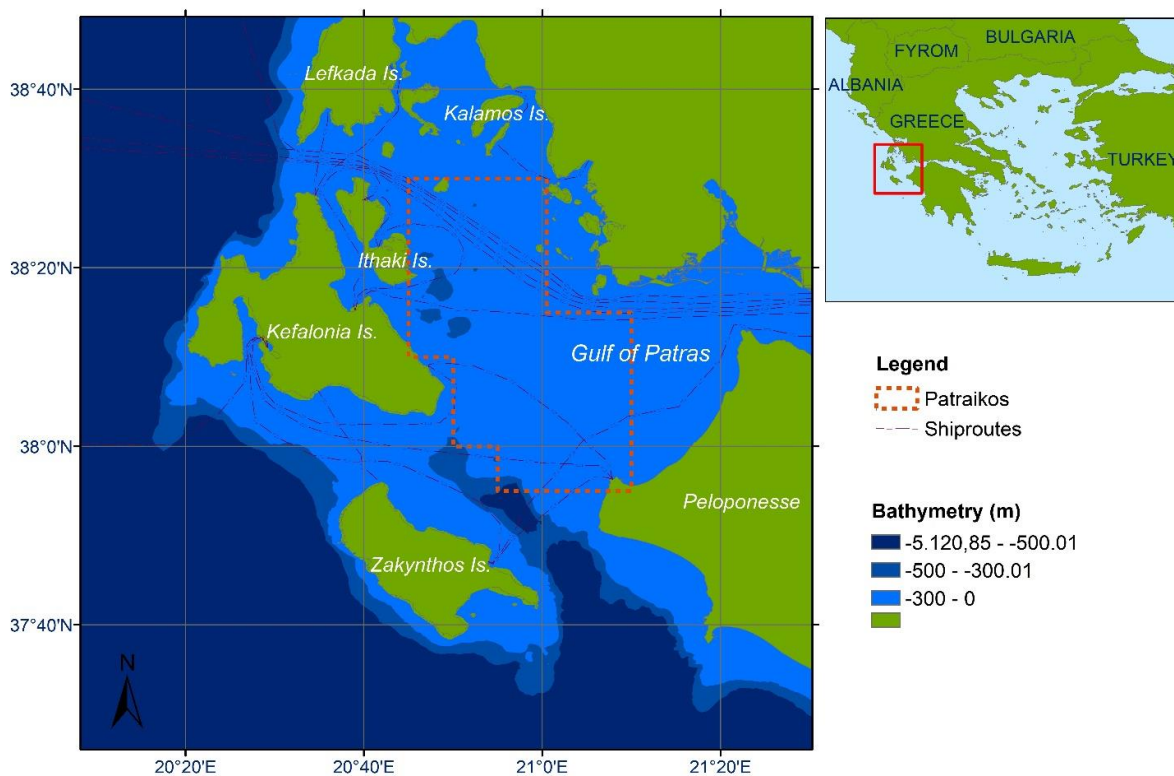
Σχήμα 1.10 Περιοχές αδειών «Block 1» και «Block 2»



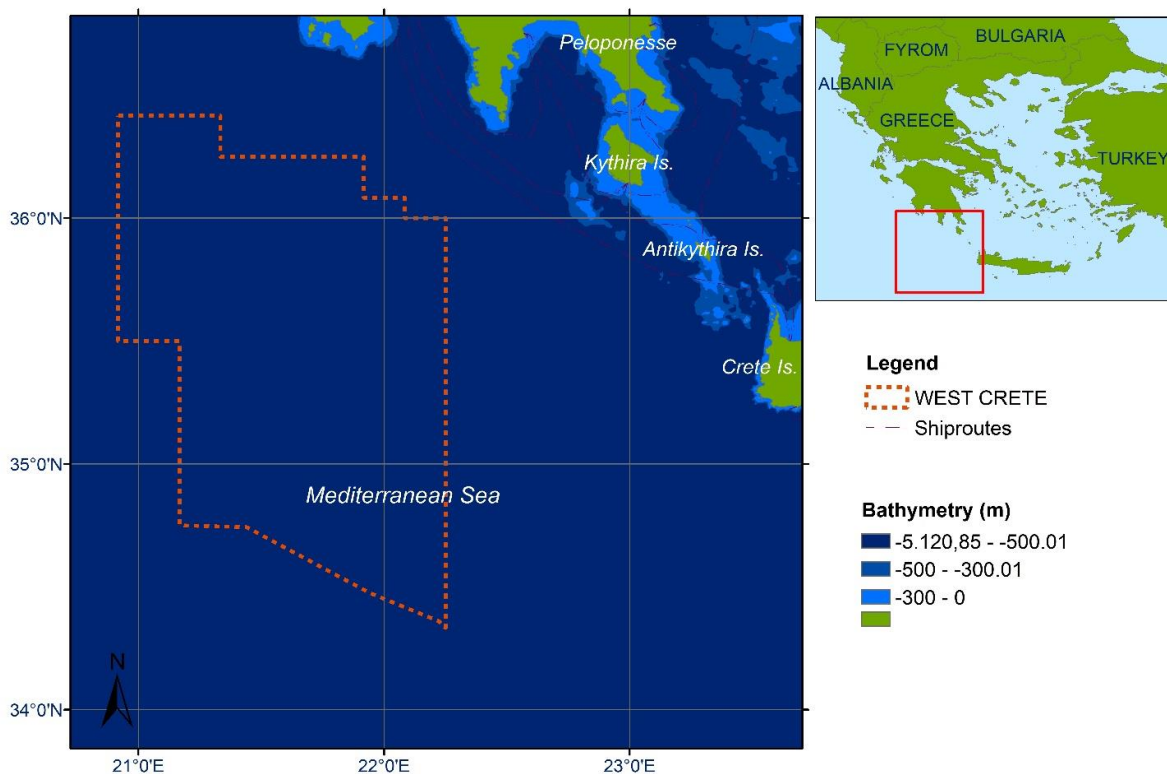
Σχήμα 1.11 Περιοχή άδειας «Ιόνιο»



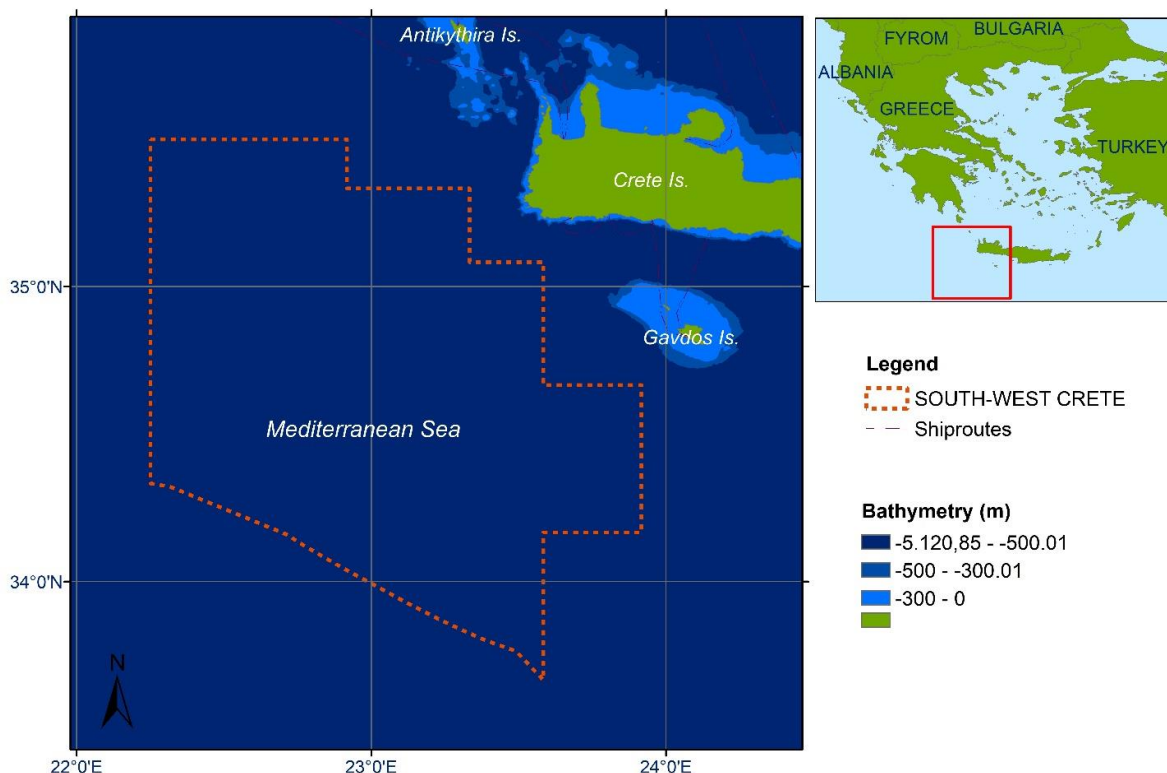
Σχήμα 1.12 Περιοχή άδειας «Block 10»



Σχήμα 1.13 Περιοχή άδειας «Πατραϊκός»



Σχήμα 1.14 Περιοχή άδειας «Δυτικά της Κρήτης»



Σχήμα 1.15 Περιοχή άδειας «Νοτιοδυτικά της Κρήτης»

1.8 Μαθηματικά μοντέλα συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδων

1.8.1 Εισαγωγή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι πετρελαιοκηλίδες εξαπλώνονται και κινούνται στην επιφάνεια της θάλασσας υφίστανται μια σειρά από χημικές, φυσικές και βιολογικές αλλαγές λόγω διεργασιών που ονομάζονται διεργασίες γήρανσης. Αυτές περιλαμβάνουν την εξάπλωση, την εξάτμιση, τη διάσπορά, τη γαλακτωματοποίηση, τη διάλυση, την οξειδωση, την καθίζηση/βύθιση και τη βιοαποικοδόμηση (Daling et al., 1990; Ventikos et al., 2004). Η εμπειρία από ατυχήματα πετρελαιοκηλίδων έχει δείξει ότι οι περιβαλλοντικές και οικολογικές επιπτώσεις σε μεμονωμένους οργανισμούς και οικοσυστήματα είναι υψηλής σημασίας. Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί μαθηματικά μοντέλα, κυρίως για επιχειρησιακούς σκοπούς, δηλ. να υπολογιστεί η συμπεριφορά πετρελαιοκηλίδας συμπεριλαμβανομένης της τροχιάς πετρελαιοκηλίδας. Η μοντελοποίηση πετρελαιοκηλίδων αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην περιβαλλοντική διαχείριση των πετρελαιοκηλίδων σε υδάτινα περιβάλλοντα.

Τα μοντέλα πετρελαιοκηλίδων χρησιμοποιούνται για την πρόγνωση της συμπεριφοράς των πετρελαιοκηλίδων στο θαλάσσιο περιβάλλον και για να βοηθήσουν τις προσπάθειες αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης (Liubartseva et al., 2020), καθώς προσομοιώνουν την εξάπλωση των πετρελαιοκηλίδων μετά από μια διαρροή. Δεδομένου ότι οι πετρελαιοκηλίδες είναι ευαίσθητες στο χρόνο, αυτά τα μοντέλα είναι χρήσιμα για τον προγραμματισμό έκτακτης ανάγκης, παρέχοντας στους λήπτες αποφάσεων πληροφορίες σχετικά με κατάλληλα αντίμετρα, στρατηγικές τοποθεσίες και προετοιμασίες εφοδιασμού (ITOPF, 2011).

Τα μοντέλα πετρελαιοκηλίδων έχουν χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση των διεργασιών γήρανσης και την πρόγνωση της συμπεριφοράς των πετρελαιοκηλίδων (Zafirakou, 2018). Υπάρχουν διάφοροι τύποι μοντέλων, ταξινομημένοι σε δύο ομάδες:

- (A) Μοντέλα διεργασιών γήρανσης πετρελαίου και
 - (B) μοντέλα μεταφοράς, συμπεριφοράς και μετασχηματισμού πετρελαίου (Zafirakou, 2018).
- A. Τα μοντέλα γήρανσης του πετρελαίου παρέχουν προγνώσεις σχετικά με τις αλλαγές των ιδιοτήτων του πετρελαίου με την πάροδο του χρόνου, αλλά δεν δίνουν πληροφορίες σχετικά με την κίνηση της πετρελαιοκηλίδας στην επιφάνεια του νερού (Misha and Kumar, 2015). Αυτές οι προγνώσεις βασίζονται σε βάσεις δεδομένων των χημικών και φυσικών χαρακτηριστικών διαφορετικών πετρελαίων και σε παρατηρήσεις της συμπεριφοράς του πετρελαίου (ITOPF, 2011).
- B. Τα μοντέλα μεταφοράς και μετασχηματισμού περιλαμβάνουν ντετερμινιστικά μοντέλα ή μοντέλα τροχιάς, στοχαστικά μοντέλα ή μοντέλα πιθανοτήτων, μοντέλα αντίστροφης προσομοίωσης, δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα. Αυτά τα μοντέλα υπολογίζουν τον πιθανό προορισμό του πετρελαίου στη θάλασσα και τον αναμενόμενο χρόνο για να φτάσει σε μία περιοχή. Επίσης, προσομοιώνουν αποτελεσματικά την εξέλιξη της πετρελαιοκηλίδας με την πάροδο του χρόνου και τις διεργασίες γήρανσης (Zafirakou, 2018).

Υπάρχουν διάφορα μοντέλα προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδας (OSM) στη βιβλιογραφία, βλ. Spaulding (2017) για μια ανασκόπηση της υφιστάμενης κατάστασης στα OSM από το 2000 έως σήμερα, που περιγράφουν τη συμπεριφορά μιας πετρελαιοκηλίδας που μπορεί να προκληθεί από υποθαλάσσιες εκρήξεις (Socolofsky et al., 2015) ή επιφανειακά ατυχήματα (Papadonikolaki et al., 2014; El-Fadel et al., 2012).

Γενικά, η συχνότητα των υποθαλάσσιων διαρροών είναι χαμηλότερη από αυτή των επιφανειακών διαρροών, ωστόσο, ο συνολικός περιβαλλοντικός κίνδυνος από εκρήξεις (blowouts) είναι υψηλότερος λόγω:

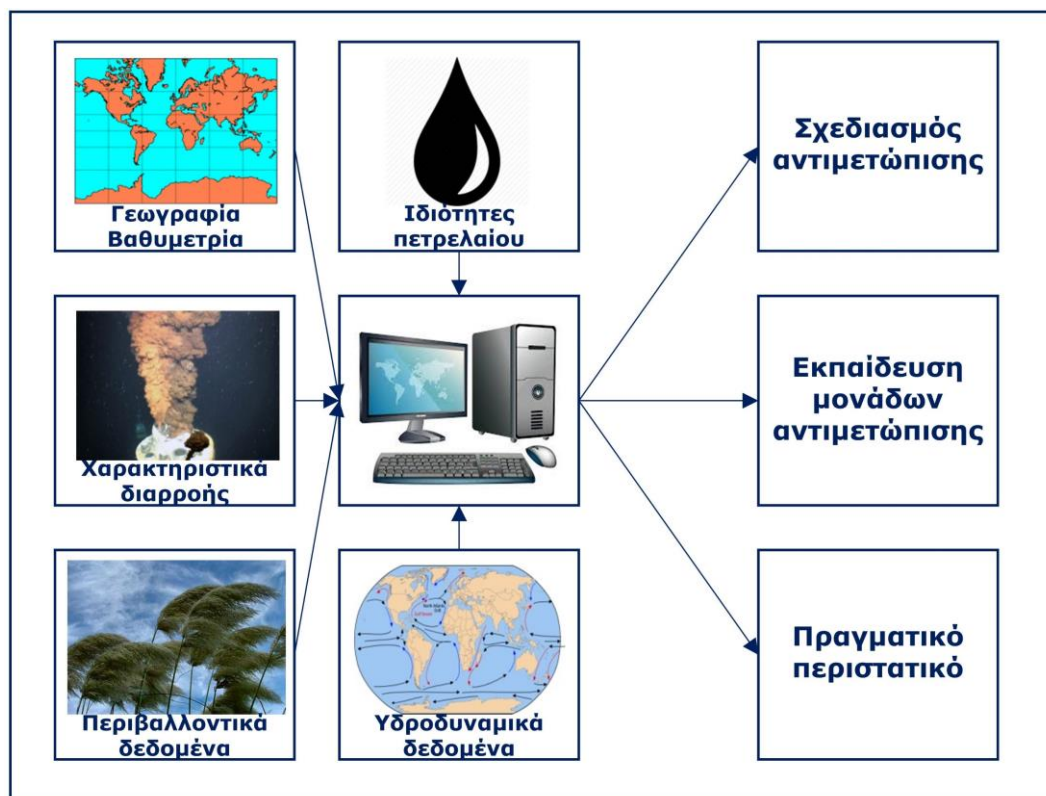
- (i) των μεγαλύτερων ποσοτήτων απελευθερωμένου πετρελαίου (Eckle et al., 2012), και

- (ii) των υψηλότερων πιέσεων που εμπλέκονται που καθιστούν πολύ δύσκολο τον έλεγχό τους (Lamine and Xiong, 2013).

Δεδομένου ότι η συμπεριφορά της πετρελαιοκηλίδας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις τοπικές καιρικές συνθήκες και τις συνθήκες ωκεάνιας κυκλοφορίας, συνήθως λαμβάνονται τα απαιτούμενα δεδομένα (που θα χρησιμοποιηθούν στο OSM) από ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο (Kallos et al., 1997) και ένα μοντέλο ωκεάνιας κυκλοφορίας (Blumberg and Mellor, 1987) στην περιοχή διερεύνησης.

Για να παραχθούν ρεαλιστικά αποτελέσματα, ορίζονται τα χαρακτηριστικά σεναρίου πετρελαιοκηλίδας, και συγκεκριμένα:

- (i) η θέση διαρροής,
- (ii) η διάρκεια διαρροής,
- (iii) ο ρυθμός ροής και
- (iv) ο τύπος πετρελαίου.



Σχήμα 1.16 Σχηματικό διάγραμμα απαιτούμενων δεδομένων και τρόπου χρήσης ενός μοντέλου προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδας (OSM)

Ως προς τη χρήση τους τα μοντέλα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 3 γενικές κατηγορίες:

1. Ενημέρωση σχεδίων έκτακτης ανάγκης διευκολύνοντας την επιλογή των βέλτιστων θέσεων γεώτρησης, προστατεύοντας τις κοντινές ευαίσθητες περιοχές και αξιολογώντας κατάλληλες στρατηγικές απόκρισης.
2. Υποστήριξη δοκιμών και ασκήσεων για την εκπαίδευση των μονάδων αντιμετώπισης.
3. Πρόγνωση, η οποία περιλαμβάνει την αναπαραγωγή ενός πραγματικού γεγονότος πετρελαιοκηλίδας για την άμεση αντιμετώπιση και τη μείωση των επιπτώσεων της πετρελαϊκής ρύπανσης.

Τα μοντέλα πετρελαιοκηλίδων απαιτούν μία σειρά από δεδομένα που επηρεάζουν την κίνηση και τη μετατροπή των πετρελαιοκηλίδων στην επιφάνεια της θάλασσας. Αυτοί περιλαμβάνουν τις μετεωρολογικές συνθήκες όπως η ταχύτητα του ανέμου, η κατεύθυνση του ανέμου, τις συνθήκες της θάλασσας όπως είναι τα θαλάσσια ρεύματα, τα κύματα, η θερμοκρασία και η αλατότητα της υδάτινης στήλης, τα χαρακτηριστικά του πετρελαίου, τα χαρακτηριστικά της διαρροής καθώς και η βαθυμετρία (Reed et al., 1999). Ορισμένα εξελιγμένα μοντέλα που ενσωματώνουν μεθόδους αντιμετώπισης απαιτούν δεδομένα σχετικά με τις παραμέτρους αυτών των μεθόδων (Reed et al., 2004). Αναλυτικά τα δεδομένα εισόδου των μοντέλων παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

1.8.2 Δεδομένα εισόδου

1.8.2.1 Χαρακτηριστικά πετρελαίου

Αφορούν τα δεδομένα των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του πετρελαίου, όπως αναλύονται στην Ενότητα 1.2, παίζουν σημαντικό ρόλο στη μοντελοποίηση πετρελαιοκηλίδας. Οι ακριβείς τιμές αυτών των παραμέτρων είναι απαραίτητες για να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

1.8.2.2 Χαρακτηριστικά διαρροής

Αφορούν τα δεδομένα της διαρροής, δηλ. αν είναι διαρροή πετρελαίου ή πετρελαίου και αερίου, την αναλογία αερίου προς πετρέλαιο, αν είναι στιγμιαία ή συνεχής, το ρυθμό διαρροής κ.λπ.

1.8.2.3 Μετεωρολογικές και θαλάσσιες συνθήκες

Οι καιρικές συνθήκες όπως ο άνεμος, τα κύματα και τα θαλάσσια ρεύματα επιδρούν καταλυτικά στην κίνηση και την εξάπλωση των πετρελαιοκηλίδων. Ωκεανογραφικές παράμετροι όπως η θερμοκρασία του νερού και η αλατότητα μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στη μοντελοποίηση πετρελαιοκηλίδων. Η θερμοκρασία του νερού επηρεάζει τον ρυθμό εξάτμισης του πετρελαίου, ενώ η αλατότητα μπορεί να επηρεάσει την άνωση και τη διασπορά του πετρελαίου. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να μετρηθούν μέσω επιτόπιων παρατηρήσεων ή να ληφθούν από αριθμητικά μοντέλα.

1.8.2.4 Βαθυμετρία

Η βαθυμετρία, δηλ. η τοπογραφία του πυθμένα της θάλασσας, είναι μια κρίσιμη παράμετρος στη μοντελοποίηση πετρελαιοκηλίδων. Το βάθος και το σχήμα του βυθού μπορεί να επηρεάσει τη συμπεριφορά των πετρελαιοκηλίδων, ιδιαίτερα κοντά στην ακτογραμμή, όπου τα ρηχά νερά και η πολύπλοκη τοπογραφία μπορούν να προκαλέσουν τη συσσώρευση του πετρελαίου σε ορισμένες περιοχές. Ακριβή βαθυμετρικά δεδομένα μπορούν να ληφθούν μέσω ερευνών, δορυφορικών παρατηρήσεων ή αριθμητικών μοντέλων.

1.8.2.5 Χαρακτηριστικά μέσων αντιμετώπισης

Τα μέτρα αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων, όπως αναφέρονται στην Ενότητα 1.6, χρησιμοποιούνται συχνά για τον περιορισμό και τον καθαρισμό πετρελαιοκηλίδων. Η αποτελεσματικότητα αυτών των μέτρων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος και το πάχος της πετρελαιοκηλίδας, οι καιρικές συνθήκες και ο χρόνος απόκρισης. Τα μοντέλα πετρελαιοκηλίδων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση της ανάπτυξης αυτών των μέτρων απόκρισης έχοντας ως στόχο την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων των πετρελαιοκηλίδων.

1.8.3 Κύρια μοντέλα συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδων

Οι προγνώσεις των μοντέλων τυπικά επικυρώνονται συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με παρατηρήσεις και δεδομένα σε πραγματικό χρόνο (Liubartseva et al., 2020). Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι δορυφορικές εικόνες χρησιμοποιούνται επίσης για την επικύρωση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης ή ως εργαλείο διαχείρισης κατά τη διάρκεια συμβάντων πετρελαιοκηλίδας (Gurumoorthi et al., 2021; Keramitsoglou et al., 2003; Naz et al., 2021; Xu et al., 2013).

Μερικά μοντέλα πετρελαιοκηλίδας που χρησιμοποιούνται τόσο για λειτουργικούς όσο και για ακαδημαϊκούς σκοπούς είναι το SIMAP, το OILMAP, το MEDSLIK, το MEDSLIK II, το GNOME και το OSCAR. Τα παραπάνω μοντέλα παρουσιάζονται στις ακόλουθες παραγράφους ενώ στον Πίνακα 1.5 παρουσιάζονται συνοπτικά τα γενικά χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας 1.5 Χαρακτηριστικά ενδεικτικών μοντέλων

ΜΟΝΤΕΛΑ	Κατηγορίες					
	Γήρανση πετρελαίου	Ντετερμινιστική	Στοχαστική	Βιολογικές επιπτώσεις	2D	3D
GNOME	X	X			X	
OSCAR	X	X	X	X	X	X
OILMAP	X	X	X		X	X
SIMAP	X	X	X	X	X	X
MEDSLIK	X	X			X	X
MEDSLIK II	X	X	X		X	X

1.8.3.1 Μοντέλο SIMAP

Το μοντέλο Spill Impact MAPPING (SIMAP), των RPS Group και ASA, προσομοιώνει τη συμπεριφορά και τις βιολογικές επιδράσεις των πετρελαίων στον τρισδιάστατο χώρο, επιτρέπει την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μεθόδων αντιμετώπισης διαρροών και την αξιολόγηση των πιθανοτήτων των τροχιών και των συνεπαγόμενων επιπτώσεων (French-McCay, 2003, 2004). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσομοίωση διαρροής σε πραγματικό χρόνο, σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης και εκτιμήσεις οικολογικού κινδύνου.

Το SIMAP ποσοτικοποιεί τις συγκεντρώσεις των συστατικών του υποθαλάσσιου πετρελαίου (διαλυμένου και σε μορφή σωματιδίων) καθώς και τη μεταφορά του επιπλέοντος πετρελαίου. Οι αλγόριθμοι μοντέλων στο SIMAP έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες τρεις δεκαετίες για την προσομοίωση της συμπεριφοράς και των επιπτώσεων των πετρελαιοκηλίδων κάτω από ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες (French-McCay, 2003, 2004). Το μοντέλο έχει επικυρωθεί με δεδομένα από περισσότερες από 20 μεγάλες διαρροές, συμπεριλαμβανομένου του Exxon Valdez (French-McCay, 2003, 2004; French-McCay et al., 2013).

1.8.3.2 Μοντέλο OILMAP

Το OILMAP αναπτύχθηκε επίσης από τους RPS Group και ASA και είναι εμπορικό λογισμικό. Το OILMAP είναι μια απλοποιημένη έκδοση του SIMAP, καθώς έχει σχεδιαστεί για λειτουργική χρήση (French McCay et al., 2018b) και δεν περιλαμβάνει μοντέλο βιολογικής έκθεσης και επιπτώσεων.

Το OILMAP μπορεί να υπολογίσει γρήγορα την κίνηση του διαρρέοντος πετρελαίου και να προσφέρει προγνώσεις για την τροχιά, την οπισθοτροχιά, τη γήρανση του πετρελαίου και είναι τρισδιάστατο (Lee, 2012).

Το τρισδιάστατο μοντέλο μπορεί να παρακολουθεί συστατικά υδρογονανθράκων στον αέρα, την επιφάνεια του νερού και τη στήλη νερού. Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά του OILMAP όπως περιγράφονται από τους Spaulding et al. (1994), είναι οι αλγόριθμοι για τη διασπορά, την εξάτμιση, τη γαλακτωματοποίηση, την παράσυρση και την απόθεση πετρελαίου στην ακτογραμμή. Η αποτελεσματικότητα του OILMAP έχει αποδειχθεί με την προσομοίωση της πετρελαιοκηλίδας Braer (Spaulding et al., 1994).

Στο OILMAP είναι ενσωματωμένο ένα ειδικό μοντέλο, το OILMAP Deep, για απρόσκοπτες προσομοιώσεις τόσο κοντινού όσο και μακρινού πεδίου (Crowley et al., 2014). Είναι ένα εργαλείο για τον σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης κατά τη διάρκεια μίας υποθαλάσσιας έκρηξης πετρελαίου (Spaulding et al., 2017).

1.8.3.3 Μοντέλο MEDSLIK

Το MEDSLIK είναι ένα τρισδιάστατο μοντέλο τροχιάς πετρελαιοκηλίδας που υπολογίζει τη

μεταφορά, τη συμπεριφορά και τις διεργασίες γήρανσης των πετρελαιοκηλίδων, καθώς και την κίνηση των πλωτών αντικειμένων (Lardner et al., 1999).

Μπορεί να παράγει τροχιές πρόγνωσης πετρελαιοκηλίδας (Alves et al., 2015). Παράγει προγνώσεις για την πετρελαιοκηλίδα στην επιφάνεια της θάλασσας, στην υδάτινη στήλη, καθώς υπολογίζει και τις διεργασίες της εξάτμισης και της γαλακτωματοποίησης. Επίσης, εκτιμά το ιξώδες, την πυκνότητα αλλά και την ποσότητα πετρελαίου στην ακτογραμμή. Το MEDSLIK έχει επαληθευτεί κατά τη διάρκεια της πετρελαιοκηλίδας του Λιβάνου το 2006 (Coppini et al., 2011).

1.8.3.4 Μοντέλο MEDSLIK II

Το MEDSLIK-II είναι μια ενημερωμένη έκδοση του μοντέλου MEDSLIK και είναι ένα ελεύθερα διαθέσιμο μοντέλο μεταφοράς και μετασχηματισμού πετρελαίου (De Dominicis et al., 2013b, 2013a).

Το MEDSLIK-II προσομοιώνει τις διεργασίες μεταφοράς και γήρανσης του πετρελαίου χρησιμοποιώντας έναν φορμαλισμό του μοντέλου Lagrangian σε συνδυασμό με ένα μοντέλο κυκλοφορίας Eulerian (Samaras et al., 2014).

Έχει τη δυνατότητα να γίνει μέρος ενός λειτουργικού συστήματος πρόγνωσης και χρησιμοποιείται για την πρόγνωση του φυσικού και χημικού μετασχηματισμού του πετρελαίου στην επιφάνεια του νερού (De Dominicis et al., 2013b; Liubartseva et al., 2015, 2021).

1.8.3.5 Μοντέλο GNOME

Το μοντέλο GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment) είναι το εργαλείο μοντελοποίησης για την πρόγνωση της πιθανής διαδρομής ή τροχιάς που μπορεί να ακολουθήσει ένας ρύπος μέσα ή πάνω σε ένα υδάτινο σώμα, όπως σε μια πετρελαιοκηλίδα. Λεπτομερής περιγραφή του NOAA/GNOME παρουσιάζεται στην ενότητα 3.3.6.

1.8.3.6 Μοντέλο OSCAR

Το OSCAR είναι ένα σύγχρονο μοντέλο και εργαλείο προσομοίωσης για την πρόγνωση της συμπεριφοράς και των επιπτώσεων του πετρελαίου κατά τη διάρκεια μιας τυχαίας διαρροής πετρελαίου, είτε από μια πλατφόρμα είτε από ένα πλοίο. Το OSCAR παρέχει πληροφορίες για τη συμπεριφορά του πετρελαίου κατά τη διάρκεια ενός ατυχήματος και αποτυπώνει τις επιπτώσεις της έκτακτης ανάγκης και της αντίδρασης, επιτρέποντας την ανάλυση και τον σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης, καθώς και τον εκ των υστέρων υπολογισμό της πηγής και την πρόγνωση. Λεπτομερής περιγραφή του SINTEF/OSCAR παρουσιάζεται στην ενότητα 4.3.2.

1.8.4 Παράμετροι που επηρεάζουν την προσομοίωση της συμπεριφοράς των πετρελαιοκηλίδων

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα υποκεφάλαια, οι παράμετροι που επηρεάζουν τα μοντέλα προσομοίωσης της συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδας, είναι:

- Χαρακτηριστικά δεδομένων επιφανειακής ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας (άνεμος, θερμοκρασία)
 - Πηγή προέλευσης δεδομένων (επιτόπιες μετρήσεις, δορυφορικές παρατηρήσεις, αποτελέσματα αριθμητικού μοντέλου)
 - Χωρική ανάλυση δεδομένων
 - Χρονική ανάλυση δεδομένων
- Χαρακτηριστικά δεδομένων θαλάσσιας κυκλοφορίας (θαλάσσια ρεύματα, κύματα, αλατότητα, θερμοκρασία)
 - Πηγή προέλευσης δεδομένων (πλωτήρας μέτρησης, δορυφορικές παρατηρήσεις, αποτελέσματα αριθμητικού μοντέλου)
 - Χωρική ανάλυση δεδομένων
 - Χρονική ανάλυση δεδομένων

- Χαρακτηριστικά διαρροής
 - ο Τύπος διαρροής (στιγμαία, συνεχής)
 - ο Είδος διαρροής (πετρελαίου, πετρελαίου-αερίου)
 - ο Ρυθμός διαρροής
 - ο Αναλογία αερίου - πετρελαίου (Gas-to-oil Ratio, GOR)
 - ο Βάθος διαρροής (μεγάλο, μικρό, επιφανειακά)
 - ο Διατομή επιφάνειας διαρροής (αφορά μόνο υποθαλάσσια)
- Χαρακτηριστικά μέσων αντιμετώπισης
 - ο Χρήση μηχανικών μέσων ανάκτησης
 - Ρυθμός ανάκτησης
 - Αποτελεσματικότητα
 - ο Εφαρμογή χημικών διασποράς
 - Μέθοδος εφαρμογής (επιφανειακά, SSDI)
 - Τύπος χημικού
 - Τύπος πετρελαίου διαρροής
 - Αναλογία χημικών - πετρελαίου (Dispersant-to-Oil Ratio, DOR)
 - ο Καύση επί τόπου (ISB)
 - Μέθοδος

1.9 Σκοπός της διδακτορικής διατριβής

Σκοπός της παρούσας διδακτορικής εργασίας είναι η διεξαγωγή υπολογιστικής και πειραματικής διερεύνησης μερικών κρίσιμων παραμέτρων που μπορούν να βοηθήσουν στην αποτελεσματική περιβαλλοντική διαχείριση μιας πιθανής πετρελαιοκηλίδας λόγω ατυχήματος κατά τη διαδικασία εξόρυξης πετρελαίου στις ελληνικές θάλασσες. Τα στοιχεία που διερευνώνται είναι τα ακόλουθα:

1. Επίδραση της επιλογής της μεθόδου υπολογισμού των παράκτιων ρευμάτων στην τροχιά της πετρελαιοκηλίδας.
2. Επίδραση της επιλογής μεθόδου επιφανειακής αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδας στη ρύπανση περιβαλλοντικά ευαίσθητων περιοχών.
3. Επίδραση των τύπων πετρελαίου στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου SSDI.
4. Διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας πετρελαίου στην αποτελεσματικότητα της SSDI.

Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας μπορούν να λειτουργήσουν ως κατευθυντήρια γραμμή για προτεινόμενη μεθοδολογία με τους εξής τρόπους:

- a) Για τον προσδιορισμό των κατάλληλων δεδομένων εισόδου για υπολογισμούς κατά τη διάρκεια ενός πραγματικού ατυχήματος πετρελαιοκηλίδας.
- b) Για τον προσδιορισμό των βέλτιστων, από περιβαλλοντική άποψη, θέσεων εξόρυξης.
- c) Για την επιλογή της αποτελεσματικότερης μεθόδου αντιμετώπισης για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων.
- d) Για την επιλογή κατάλληλων χημικών διασποράς που μπορούν να μεγιστοποιήσουν την αποτελεσματικότητά τους.

1.10 Ερευνητικά ερωτήματα

Μετά από τη διερεύνηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας (Ενότητες 2.1 & 2.2), διατυπώνονται τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα, τα οποία θα αποτελέσουν τον πυρήνα

της έρευνας για την παρούσα διατριβή.

1. Πώς επηρεάζει η μέθοδος προσδιορισμού των παράκτιων ρευμάτων την υπολογιζόμενη τροχιά της πετρελαιοκηλίδας σε περίπτωση επιφανειακής διαρροής σε παράκτια περιοχή της Ελλάδας;
2. Ποια είναι η επίδραση των διαφορετικών εποχικών συνθηκών στο στοχαστικό αποτέλεσμα της ρύπανσης περιβαλλοντικά προστατευόμενων περιοχών κατά τη διάρκεια μιας τυχαίας διαρροής πετρελαίου σε μικρό/ενδιάμεσο βάθος και πώς η χρήση μεθόδων επιφανειακής αντιμετώπισης και συγκεκριμένα της μηχανικής ανάκτησης και της επιφανειακής εφαρμογής χημικών διασποράς επηρεάζει το μέγεθος των επιπτώσεων στα πτηνά και στους ιχθύες;
3. Ποια είναι η επίδραση της χρήσης της μεθόδου SSDI στο πάχος και τη συγκέντρωση της επιφάνειας του πετρελαίου κατά τη διάρκεια μιας υποθαλάσσιας έκρηξης σε βαθιά νερά και πώς επηρεάζουν διαφορετικοί τύποι πετρελαίου την αποτελεσματικότητα της μεθόδου SSDI;
4. Πώς επηρεάζει η θερμοκρασία του πετρελαίου την αποτελεσματικότητα των χημικών διασποράς όταν χρησιμοποιούνται μέσω της μεθόδου SSDI και ποια είναι η προκύπτουσα μείωση στο μέγεθος των σταγονιδίων πετρελαίου;

1.11 Πρωτότυπα σημεία της διατριβής - Δημοσιεύσεις

1.11.1 Πρωτότυπα σημεία της διατριβής

Το κύριο αποτέλεσμα της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι ότι διερευνήθηκαν κρίσιμες παράμετροι που σχετίζονται με τη συνολική περιβαλλοντική διαχείριση περιστατικών πετρελαιοκηλίδων και αναμένεται να αποτελέσουν τη βάση της μεθοδολογίας για την αντιμετώπιση τυχόν περιστατικών κατά τις επικείμενες διαδικασίες εξόρυξης που αναμένονται στις ελληνικές θάλασσες.

Συγκεκριμένα διερευνήθηκαν:

- Η επίδραση της μεθόδου υπολογισμού παράκτιων ρευμάτων στην τροχιά πραγματικού περιστατικού επιφανειακής πετρελαιοκηλίδας.
- Η επίδραση των διαφορετικών καιρικών συνθηκών στο στοχαστικό αποτέλεσμα της ρύπανσης διαφορετικών περιοχών καθώς και η επίδραση της επιλογής μεθόδου αντιμετώπισης στη μείωση των επιπτώσεων από ένα περιστατικό διαρροής σε μικρά/ενδιάμεσα βάθη νερού.
- Η επίδραση της χρήσης συγκεκριμένης μεθόδου υποθαλάσσιας αντιμετώπισης στη συμπεριφορά της επακόλουθης πετρελαιοκηλίδας από ένα περιστατικό σε μεγάλα βάθη νερού.
- Η επίδραση της θερμοκρασίας του πετρελαίου στην αποτελεσματικότητα των χημικών διασποράς με τη μέθοδο SSDI.

1.11.2 Δημοσιεύσεις - Ανακοινώσεις

1.11.2.1 Δημοσιεύσεις σε περιοδικά με κριτές

1. Makatounis P.E., Skancke J., Florou E., Stamou A. and Brandvik P.J., 2017. Management of oil spill contamination in the Gulf of Patras caused by an accidental subsea blowout. Environ. Pollut. 231, Part 1, 578-588.

2. Brandvik, P., Daling, P., Dunnebier, D., Makatounis, P., Leirvik, F. and Krause, D., 2019. A Proposed New Laboratory Protocol for Dispersant Effectiveness Testing Adapted for Subsea Dispersant Injection, J. Environ. Prot. 10, 694-709.
3. Makatounis P.E.Z., Stamou A.I. and Ventikos N.P., 2023. Modeling the Agia Zoni II tanker oil spill in Saronic Gulf, Greece. Mar. Pollut. Bull. 194, 115275.

1.11.2.2 Δημοσιεύσεις σε διεθνή συνέδρια με κριτές

1. Makatounis P.E., Tsiatsiou L. and Stamou A., 2019. Modeling the "Agia Zoni II" Oil Spill Released in 2017 in the Gulf of Saronikos. Proceedings of 1st International Scientific Conference on Design and Management of Harbor, Coastal and Offshore Works, Vol. I, 323-327.
2. Makatounis P.E., Brandvik P.J., Gatos I. and Stamou A.I., 2022. Investigation of the effect of oil type and subsea dispersant injection on oil spill behavior; the case of a hypothetical subsea blowout in the Gulf of Kyparissia. Proceedings of 10th International Conference on Environmental Management Engineering, Planning and Economics and Secotox Conference, 336-344.

1.12 Δομή της διατριβής

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελείται από 8 κεφάλαια.

Στο 1^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα κύρια χαρακτηριστικά των στοιχείων που συνιστούν την περιβαλλοντική διαχείριση των πετρελαιοκηλίδων. Επίσης παρατίθενται τα ερευνητικά ερωτήματα που προέκυψαν από την ανάλυση της βιβλιογραφίας και αποτελούν τον πυρήνα της έρευνας στα επόμενα κεφάλαια 3-6.

Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διενεργηθείσα βιβλιογραφική διερεύνηση των κρίσιμων παραμέτρων που εξετάζονται σε όλη τη διατριβή.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η υπολογιστική διερεύνηση της επίδρασης της επιλογής της μεθόδου υπολογισμού των παράκτιων ρευμάτων στην αναπαραγωγή και την πρόγνωση της τροχιάς της πετρελαιοκηλίδας σε περίπτωση ενός πραγματικού ατυχήματος στην επιφάνεια.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία για τη διαχείριση της ρύπανσης από πετρελαιοκηλίδες σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές κατά τη διάρκεια υποθαλάσσιας διαρροής πετρελαίου σε μικρά/ενδιάμεσα βάθη νερού. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει την επιλογή των θέσεων εξόρυξης, την εξέταση της εποχικότητας στα στοχαστικά αποτελέσματα και τη σύγκριση διακριτών μεθόδων αντιμετώπισης της πετρελαιοκηλίδας.

Στο 5^ο κεφάλαιο διερευνάται υπολογιστικά η επίδραση του τύπου πετρελαίου στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου SSDI σε περιστατικό διαρροής σε μεγάλα βάθη νερού.

Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διερεύνησης της επίδρασης της θερμοκρασίας πετρελαίου στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου SSDI. Επίσης, παρουσιάζεται και ένα νέο πρωτόκολλο δοκιμής χημικών που αναπτύχθηκε με βάση τα πειράματα επίδρασης θερμοκρασίας και άλλων που είχαν προηγηθεί.

Στο 7^ο κεφάλαιο γίνεται σύγκριση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων των υπολογισμών, εξάγονται τα κύρια συμπεράσματα, απαντώνται τα ερευνητικά ερωτήματα και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Στο 8^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βιβλιογραφικές αναφορές.

2 Βιβλιογραφική διερεύνηση

2.1 Υπολογιστικές εργασίες

Όπως αναφέρεται στην [Ενότητα 1.8](#), τα μοντέλα για την προσομοίωση πετρελαιοκηλίδων είναι πολύπλοκα εργαλεία που απαιτούν διάφορα δεδομένα εισόδου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες κατηγορίες εφαρμογών.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή επικεντρώνεται στη διερεύνηση ζητημάτων που έχουν κρίσιμη σημασία, περιλαμβάνοντας την προσομοίωση πραγματικών ατυχημάτων καθώς και την εφαρμογή μοντέλων σε υποθετικά περιστατικά διαρροής. Τα χαρακτηριστικά και τα δεδομένα που έχουν επιλεγεί για περαιτέρω διερεύνηση είναι τα εξής:

- a. Η επίδραση της επιλογής μεθόδου προσδιορισμού των παράκτιων ρευμάτων (περιβαλλοντικά δεδομένα εισόδου) στα αποτελέσματα της τροχιάς μίας πετρελαιοκηλίδας.
 - b. Η επίδραση:
 - i) των διαφορετικών καιρικών συνθηκών (διαφορετικές εποχές) στα στοχαστικά αποτελέσματα και
 - ii) των διαφορετικών μεθόδων επιφανειακής αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδας στο αποτέλεσμα ρύπανσης, από πετρέλαιο, μιας περιβαλλοντικά ευαίσθητης περιοχής.
 - c. Η επίδραση της μεθόδου SSDI σε διάφορους τύπους πετρελαίου στα αποτελέσματα της προσομοίωσης συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδας.
- a. Επίδραση της επιλογής μεθόδου προσδιορισμού των παράκτιων ρευμάτων στην τροχιά μίας πετρελαιοκηλίδας**

Αρκετές μελέτες κατά το παρελθόν έχουν πραγματοποιηθεί για την προσομοίωση της συμπεριφοράς πραγματικών περιστατικών πετρελαιοκηλίδων σε διάφορες περιοχές του κόσμου. Κρίσιμα δεδομένα εισόδου, όπως ήδη αναφέρθηκε, για την προσομοίωση της τροχιάς ενός πραγματικού ατυχήματος είναι οι κινητήριες δυνάμεις και συγκεκριμένα οι άνεμοι και τα θαλάσσια ρεύματα.

Σε αντίθεση με τα υποθαλάσσια ατυχήματα, όπως το DeepWater Horizon, για την προσομοίωση του οποίου χρησιμοποιήθηκαν άνεμοι και θαλάσσια ρεύματα, στις επιφανειακές διαρροές δεν είναι πλήρως ξεκάθαρο ποια δεδομένα παίζουν καθοριστικό ρόλο στην τροχιά της πετρελαιοκηλίδας. Στην περίπτωση της πετρελαιοκηλίδας από το τάνκερ Sanchi το 2018, στη Θάλασσα της Ανατολικής Κίνας, οι [Pan et al. \(2020\)](#), προκειμένου να αναπαραγάγουν την τροχιά της πετρελαιοκηλίδας χρησιμοποίησαν συνδυασμό υδροδυναμικών και δεδομένων ανέμου. Οι [Liubartseva et al. \(2020\)](#) χρησιμοποίησαν επίσης και τους δύο τύπους δεδομένων για να προσομοιώσουν την πετρελαιοκηλίδα που προκλήθηκε από τη σύγκρουση των πλοίων Ulysse και Virginia το 2018, στη Θάλασσα της Λιγουρίας. Από την άλλη, οι [Gurumoorthi et al. \(2021\)](#) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η χρήση μόνο των δεδομένων ανέμου είχαν ως αποτέλεσμα την καλύτερη αναπαραγωγή της πετρελαιοκηλίδας από το τάνκερ MV Wakashio στα παράλια του Αγίου Μαυρίκιου, το 2020.

Από τα παραπάνω είναι σαφές ότι οι μέθοδοι υπολογισμού των παράκτιων ρευμάτων ως δεδομένα εισόδου σε μοντέλο προσομοίωσης, ποικίλλουν από περιοχή σε περιοχή και ότι κάθε περίπτωση πρέπει να εξετάζεται με ξεχωριστό τρόπο. Δεδομένου ότι στην Ελλάδα δεν έχει διερευνηθεί πλήρως η επίδραση της μεθόδου προσδιορισμού των παράκτιων ρευμάτων, με χρήση διαφόρων δεδομένων εισόδου, στην τροχιά της πετρελαιοκηλίδας, είναι σημαντικό να εξεταστεί, χρησιμοποιώντας μια ποικιλία δεδομένων ανέμων και ρευμάτων για τις προσομοιώσεις αναπαραγωγής ενός πραγματικού περιστατικού.

b. Επίδραση της επιλογής μεθόδου αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων στο αποτέλεσμα της ρύπανσης περιβαλλοντικά ευαίσθητων περιοχών

Γενικά, υπάρχουν δύο τρόποι εφαρμογής των μοντέλων προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδας στον σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης, ο στοχαστικός και ο ντετερμινιστικός.

Η στοχαστική λειτουργία περιλαμβάνει τη δημιουργία χαρτών πιθανότητας ρύπανσης σε περιοχές ενδιαφέροντος που θα μπορούσαν να επηρεαστούν από μια πετρελαιοκηλίδα. Για την παραγωγή χαρτών ακριβείας, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η στοχαστική φύση της συμπεριφοράς της πετρελαιοκηλίδας ορίζοντας πολλαπλές περιόδους ή εποχές μελέτης ανά έτος και πραγματοποιώντας «στοχαστικές» προσομοιώσεις για επαρκή χρονική διάρκεια. Προηγούμενες μελέτες, όπως αυτές που διεξήγαγαν οι [Alves et al. \(2015\)](#) και [Goldman et al. \(2015\)](#), επικεντρώθηκαν σε υποθετικές πετρελαιοκηλίδες που προκύπτουν από υπεράκτιες δραστηριότητες στην Ανατολική Μεσόγειο και τη Θάλασσα της Λεβαντίνης, αντίστοιχα, ενώ οι [Liubartseva et al. \(2015\)](#) και [Melaku Canu et al. \(2015\)](#) μελέτησαν υποθετικές πετρελαιοκηλίδες από δραστηριότητες ναυσιπλοΐας, στην Αδριατική και στο Τυρρηνικό Πέλαγος, αντίστοιχα. Αυτές οι μελέτες εκτός του ότι δεν εξέτασαν συγκεκριμένα περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές, αφορούσαν υποθετικά ατυχήματα στην επιφάνεια της θάλασσας.

Ο ντετερμινιστικός τρόπος περιλαμβάνει τη μελέτη των λεπτομερών χαρακτηριστικών συμπεριφοράς μιας συγκεκριμένης πετρελαιοκηλίδας ή/και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των διαθέσιμων μεθόδων αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων, όπως στην εργασία των [Alves et al. \(2016\)](#), ή για τους σκοπούς της σύγκρισης μεταξύ μοντέλων, όπως στη μελέτη των [Socolofsky et al. \(2015\)](#). Οι ντετερμινιστικοί υπολογισμοί πραγματοποιούνται για μια μεμονωμένη πετρελαιοκηλίδα υπό συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες και συνθήκες ρευμάτων. Οι [Alves et al. \(2016\)](#), εξέτασαν ένα μεμονωμένο υποθετικό σενάριο πετρελαιοκηλίδας συνεπεία ατυχήματος κατά τη ναυτιλιακή δραστηριότητα και αξιολόγησαν τη χρήση των φραγμάτων καθώς και τη χρήση ενός συνδυασμού φραγμάτων και χημικών διασποράς στην επιφάνεια. Μέχρι σήμερα, δεν έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες για να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση των επιφανειακών μεθόδων αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων στο βαθμό ρύπανσης από πετρέλαιο ευαίσθητων περιβαλλοντικά περιοχών, όπως π.χ. μία λιμνοθάλασσα.

Η βιβλιογραφική έρευνα αποκάλυψε την έλλειψη προηγούμενων ερευνών σχετικά με την εκτίμηση των επιπτώσεων πιθανών ατυχημάτων διαρροής πετρελαίου από εξορυκτικές ή/και ναυτιλιακές δραστηριότητες στην περιοχή του Ιονίου Πελάγους. Επίσης δεν έχει διερευνηθεί η επίδραση των διαφορετικών καιρικών συνθηκών ανά εποχή στα στοχαστικά αποτελέσματα της πετρελαϊκής ρύπανσης περιβαλλοντικά ευαίσθητων περιοχών, σε περιπτώσεις ατυχημάτων κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων εξόρυξης πετρελαίου σε μικρά/ενδιάμεσα βάθη νερού.

c. Επίδραση του τύπου του πετρελαίου στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου αντιμετώπισης SSDI

Μετά την πρώτη εφαρμογή της υποθαλάσσιας έγχυσης χημικών διασποράς κατά την αντιμετώπιση του ατυχήματος *Deerwater Horizon*, το 2010, πλέον αυτή αποτελεί μία από τις μεθόδους απόκρισης που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε περίπτωση τέτοιων ατυχημάτων.

Τα μοντέλα πετρελαιοκηλίδας έχουν βελτιωθεί μετά από αυτό το ατύχημα, για να συμπεριλάβουν τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου, αλλά δεν έχει πραγματοποιηθεί εκτενής έρευνα ώστε να εξεταστεί η επίδραση, μιας σειράς παραμέτρων και τιμών, στη συμπεριφορά πετρελαιοκηλίδας. Οι [Daae et al. \(2018\)](#) μελέτησαν την επίδραση της μεθόδου SSDI στη μείωση του επιφανειακού πάχους του πετρελαίου χρησιμοποιώντας διαφορετικές σταθερές ταχύτητες ανέμου κατά τη διάρκεια ενός υποθετικού σεναρίου υποθαλάσσιας διαρροής πετρελαίου σε βάθος 700 m στη θάλασσα του Beaufort και για έναν συγκεκριμένο τύπο πετρελαίου. Οι [French-McCay et al. \(2018a\)](#) αξιολόγησαν την επίδραση της μεθόδου

SSDI και των πιθανών εναλλακτικών λύσεων τροποποιώντας και συγκρίνοντας ένα μοντέλο συμπεριφοράς πετρελαίου κάτω από διαφορετικές στρατηγικές SSDI στον Κόλπο του Μεξικού, χρησιμοποιώντας έναν συγκεκριμένο τύπο πετρελαίου. Στην εργασία των [Socolofsky et al. \(2022\)](#) αναλύθηκαν τα αποτελέσματα υποθετικών σεναρίων υποθαλάσσιας διαρροής πετρελαίου στον Καναδά, χρησιμοποιώντας ένα είδος αργού πετρελαίου και βενζόλιο.

Οι [Daae et al. \(2018\)](#) πρότειναν τη διεξαγωγή περαιτέρω προσομοιώσεων για την εξέταση της επίδρασης διαφορετικών τύπων πετρελαίου, διαφορετικών βαθμών διαρροής καθώς και άλλων γεωγραφικών τοποθεσιών στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου SSDI. Επιπλέον, μετά τη βιβλιογραφική διερεύνηση κρίνεται απαραίτητη περαιτέρω έρευνα στη Μεσόγειο Θάλασσα, όπου δεν έχουν διεξαχθεί μελέτες μέχρι σήμερα.

2.2 Πειραματικές εργασίες

Στο παρελθόν έχουν διεξαχθεί διάφορα πειράματα με σκοπό:

- Τη διερεύνηση του φαινομένου των επιφανειακών πετρελαιοκηλίδων και την κατανόηση των σχετικών μηχανισμών γήρανσης, συμπεριλαμβανομένης της γαλακτωματοποίησης, της εξάτμισης και της διασποράς. Ομοίως, παρόμοια πειράματα διεξήχθησαν ώστε να αποκτηθούν γνώσεις σχετικά με τις διεργασίες που εμπλέκονται στις υποθαλάσσιες διαρροές, όπως η ανάδυση του πετρελαίου, και για την κατανόηση των φυσικών μηχανισμών που σχετίζονται με τις υποθαλάσσιες εκλύσεις αερίου και πετρελαίου.
- Τη μελέτη της επίδρασης των μεθόδων αντιμετώπισης (χημικά διασποράς κ.λπ.).
- Τη βελτίωση των υφιστάμενων μοντέλων προσομοίωσης χρησιμοποιώντας τα δεδομένα πεδίου που συλλέγονται κατά τη διάρκεια αυτών των υποθαλάσσιων διαρροών.
- Επικύρωση και βαθμονόμηση των μοντέλων πετρελαιοκηλίδας καθώς και των υπομοντέλων τους, όπως VDROP, VDROPJ ([Zhao et al., 2016](#)), OWM (oil weathering model) κ.ά.
- Επαλήθευση εργαστηριακών μελετών και προγνώσεων μοντέλων σχετικά με τη γήρανση του πετρελαίου (εξάτμιση, φυσική διασπορά και γαλακτωματοποίηση).
- Καθιέρωση πρωτοκόλλων δοκιμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια ενός πραγματικού περιστατικού.

Τα πειράματα, ανάλογα με τον τόπο εφαρμογής τους, μπορούν γενικά να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες:

- a. πειράματα πεδίου και
- b. εργαστηριακά πειράματα.

a. Πειράματα στο πεδίο

Για την επίτευξη των προαναφερθέντων στόχων, έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν μια σειρά από πειράματα πεδίου. Στους [Πίνακες 2.1](#) έως [2.3](#) φαίνονται μερικά παραδείγματα αυτών των πειραμάτων.

Σημειώνεται ότι η διεξαγωγή ενός πειράματος μεγάλης κλίμακας σε ανοιχτό πεδίο με χρήση πετρελαίου είναι πολύ περίπλοκη υπόθεση, επομένως είναι προτιμότερο να διεξάγεται εάν είναι δυνατόν σε ασφαλές περιβάλλον όπως τα εργαστήρια (βλ. b).

Πίνακας 2.1 Ενδεικτικά επιφανειακά πειράματα στο πεδίο που αφορούσαν στην εξέταση των διεργασιών γήρανσης και της συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδας

	Τοποθεσία	Τύπος διαρροής	Τύπος πετρελαίου	Ποσότητα διαρροής (m ³)
Sørstrøm et al., 1978	Tromsøflaket	Πετρέλαιο	Ekofisk Crude	25
Daling et al., 1989	Haltenbanken	Πετρέλαιο	Oseberg Crude	30

Πίνακας 2.2 Ενδεικτικά επιφανειακά πειράματα στο πεδίο που αφορούσαν στην εξέταση των μεθόδων της επί τόπου καύσης (ISB), της μηχανικής ανάκτησης (MR) και της εφαρμογής χημικών διασποράς

	Τοποθεσία	Είδος διαρροής	Τύπος πετρελαίου	Μέθοδος αντιμετώπισης	Ποσότητα διαρροής (m ³)
Daling et al., 2003	Frigg Field	Πετρέλαιο	Troll Crude	Χημικά	40
Brandvik et al., 2010	Barents Sea	Πετρέλαιο	Troll B Crude	ISB, MR & χημικά	20

Πίνακας 2.3 Ενδεικτικά υποθαλάσσια πειράματα στο πεδίο που αφορούσαν στην εξέταση της συμπεριφοράς της διαρροής του πετρελαίου

	Τοποθεσία	Βάθος διαρροής (m)	Είδος διαρροής	Τύπος		Ποσότητα διαρροής	
				Αέριο	Πετρέλαιο	Αέριο (Sm ³)	Πετρέλαιο (m ³)
Daling et al., 2003	Frigg Field	106	Πετρέλαιο	-	Troll Crude	-	25
Johansen, 2000	Helland Hansen	844	Πετρέλαιο/ Αέριο	Φ.Α.	Crude	10 ⁴	120
			Πετρέλαιο/ Αέριο	Φ.Α.	Marine		

b. Πειράματα σε εργαστήρια

Εκτός από τα προαναφερθέντα πειράματα πεδίου, μια μεγαλύτερη σειρά πειραμάτων έχει διεξαχθεί σε εργαστήρια. Ένας από τους στόχους ήταν η διερεύνηση των επιπτώσεων διαφόρων μεθόδων αντιμετώπισης, όπως η καύση επιτόπου (Bullock et al., 2019) και η μηχανική ανάκτηση (Farooq et al., 2018). Ωστόσο, το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας έχει επικεντρωθεί στην εξέταση της χρήσης των χημικών διασποράς ως μεθόδου αντίδρασης.

Προηγούμενα πειράματα εξέτασαν κυρίως την εφαρμογή χημικών στην επιφάνεια, ενώ πιο πρόσφατα πειράματα διερεύνησαν τη χρήση τους μέσω της μεθόδου SSDI σε ελεγχόμενες ρυθμίσεις χρησιμοποιώντας εργαστηριακές εγκαταστάσεις όπως είναι τα Tower Basin και Mini Tower στο SINTEF στη Νορβηγία και το Hyperbaric Chamber στο SwRI (Southwest Research Institute) στις ΗΠΑ, μεταξύ άλλων. Αυτά τα πειράματα μελέτησαν διάφορες παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένων διαφορετικών τύπων χημικών διασποράς (Brandvik et al., 2019a), πίεση περιβάλλοντος (Brandvik et al., 2019c), δοσολογία χημικών (Brandvik et al., 2019a), τύπος πετρελαίου (Brandvik et al., 2019a), συνδυασμό διαρροής πετρελαίου και αερίου (Brandvik et al., 2019b) και τύπο έγχυσης (Brandvik et al., 2018), μεταξύ άλλων.

Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζεται μια επισκόπηση των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν και των παραμέτρων που εξετάστηκαν.

Πίνακας 2.4 Ενδεικτικά εργαστηριακά πειράματα που εξετάζουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου SSDI

	Εργαστήριο	Τύπος πετρελαίου	Τύπος χημικού	Εξετασθείσα παράμετρος
Brandvik et al., 2018	SINTEF	2 πετρέλαια	Corexit 9500	Διαφορετικές τεχνικές έγχυσης χημικών
Brandvik et al., 2019a	SINTEF	4 πετρέλαια	3 είδη	Διεπιφανειακή τάση, διαφορετικό DOR, διαφορετικά χημικά
Brandvik et al., 2019b	SwRI	Oseberg blend	Corexit 9500	Συνδυασμός διαρροής πετρελαίου και φυσικού αερίου
Brandvik et al., 2019c	SwRI	2 πετρέλαια	Corexit 9500	Χρήση διαφορετικών DOR σε συνθήκες πίεσης βαθέων υδάτων

Παρά την εκτεταμένη έρευνα που έχει διεξαχθεί για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου SSDI, η επίδραση της θερμοκρασίας του πετρελαίου στην αποτελεσματικότητα της SSDI δεν έχει διερευνηθεί. Αυτή είναι μια σημαντική πτυχή που πρέπει να ληφθεί υπόψη, καθώς η θερμοκρασία πετρελαίου μπορεί να επηρεάσει διάφορους παράγοντες όπως το ιξώδες, την πυκνότητα και την πτητότητα του πετρελαίου, που μπορούν με τη σειρά τους να επηρεάσουν την απόδοση του SSDI. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να διεξαχθεί περαιτέρω έρευνα για να προσδιοριστεί πώς η θερμοκρασία του πετρελαίου επηρεάζει την αποτελεσματικότητα του SSDI για την ενίσχυση της αντιμετώπισης της πετρελαιοκηλίδας. Επιπλέον, τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δοκιμών χημικών, όπως τα IFP & MNS, προσανατολίζονται στην εφαρμογή των χημικών διασποράς στην επιφάνεια και απαιτείται η δημιουργία ενημερωμένου πρωτοκόλλου που να προσομοιώνει τις συνθήκες έγχυσης σε υποθαλάσσιες διαρροές πετρελαίου.

3 Διερεύνηση της επίδρασης της μεθόδου προσδιορισμού των παράκτιων ρευμάτων στην υπολογιζόμενη τροχιά μιας πετρελαιοκηλίδας

3.1 Ερευνητικό ερώτημα

Πώς επηρεάζει η μέθοδος προσδιορισμού των παράκτιων ρευμάτων την υπολογιζόμενη τροχιά της πετρελαιοκηλίδας σε περίπτωση επιφανειακής διαρροής σε παράκτια περιοχή της Ελλάδας;

3.2 Εισαγωγή - Βιβλιογραφική διερεύνηση

Προς το παρόν, δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία σχετικά με επιφανειακές πετρελαιοκηλίδες που να σχετίζονται με τις δραστηριότητες εξόρυξης πετρελαίου στη Βόρεια Ελλάδα. Προκειμένου να αναλυθούν κρίσιμες παράμετροι για την επιλογή περιβαλλοντικών και υδροδυναμικών δεδομένων για την πρόγνωση ή την αναπαραγωγή της τροχιάς της πετρελαιοκηλίδας από ένα πραγματικό περιστατικό, ερευνήθηκαν παρόμοια ατυχήματα πετρελαιοκηλίδων που έχουν συμβεί συνεπεία των δραστηριοτήτων ναυσιπλοΐας.

Σύμφωνα με την Διεθνή Ομοσπονδία Ρύπανσης Ιδιοκτητών Δεξαμενόπλοιων (International Tanker Owners Pollution Federation, ITOPF), αρκετές πετρελαιοκηλίδες έχουν καταγραφεί στις ελληνικές θάλασσες τα τελευταία χρόνια⁶.

Το πιο πρόσφατο περιστατικό πετρελαιοκηλίδας αφορά αυτή που προκλήθηκε από τη βύθιση του τάνκερ «Αγία Ζώνη II» στις 10 Σεπτεμβρίου 2017, ενώ ήταν αγκυροβολημένο δυτικά του λιμανιού του Πειραιά (Hellenic Bureau for Marine Casualties Investigation (HBMCI) 2018).

Συνεπώς, για τη διερεύνηση της επίδρασης της επιλογής μεθόδου προσδιορισμού των παράκτιων ρευμάτων στην τροχιά της πετρελαιοκηλίδας κατά τη διάρκεια ενός πραγματικού περιστατικού διαρροής, επιλέχθηκε να αναπαραχθεί η συμπεριφορά της πετρελαιοκηλίδας που προκλήθηκε από τη βύθιση του δεξαμενόπλοιου «Αγία Ζώνη II». Το μοντέλο που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για τους υπολογισμούς είναι το GNOME (Zelenke et al., 2012b).

Αρκετές μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει το GNOME για την αναπαραγωγή πραγματικών συμβάντων πετρελαιοκηλίδας (Cheng et al., 2011; Duran et al., 2018) ή για την αξιολόγηση του κινδύνου από πιθανή πετρελαιοκηλίδα (Abdallah and Chantsev, 2022; Pradhan et al., 2021), στην ανοιχτή θάλασσα/ωκεανό (Bucelli et al., 2018), σε ωκεάνιες παράκτιες περιοχές (Marta-Almeida et al., 2013), σε μεγάλους κόλπους (Amir-Heidari και Raie, 2019; Cheng et al., 2011; Xu et al., 2013) και σε περιορισμένες ή κλειστές/ημικλειστές θαλάσσιες περιοχές (Başar et al., 2006; Duran et al., 2018; Feng and Hodges, 2020).

Μολονότι η πλειοψηφία αυτών των μελετών χρησιμοποίησε συνδυασμό δεδομένων ανέμου και ρευμάτων για τους υπολογισμούς, κάποιες μελέτες χρησιμοποίησαν μόνο δεδομένα ανέμου για να προσομοιώσουν ένα συμβάν πετρελαιοκηλίδας σε μια περιορισμένη περιοχή (Farzinger et al. 2011; Gurumoorthi et al., 2021) ή μόνο υδροδυναμικά δεδομένα (Feng and Hodges 2020). Τα δεδομένα μπορούν να ληφθούν είτε από σταθμούς και πλωτήρες (Cheng et al., 2011) ή/και από ατμοσφαιρικά και υδροδυναμικά μοντέλα (Bucelli et al., 2018).

Σε αυτό το κεφάλαιο, στόχος είναι η διερεύνηση της επίδρασης διαφορετικών δεδομένων ανέμου (που λαμβάνονται από σταθμούς και ατμοσφαιρικά μοντέλα) και ρευμάτων σε σχέση με την αναπαραγωγή ενός πραγματικού περιστατικού πετρελαιοκηλίδας.

⁶ <https://itopf.org/knowledge-resources/countries-territories-regions/greece/>

Συγκεκριμένα, σκοπός είναι ο προσδιορισμός της επίδρασης στους υπολογισμούς από τη χρήση:

- (i) μόνο των δεδομένων ανέμου που λαμβάνονται από μετεωρολογικούς σταθμούς και από το ατμοσφαιρικό μοντέλο BOLAM (Bologna limited area model)⁷,
- (ii) και των δύο ειδών δεδομένων, των ανέμων και των ρευμάτων που υπολογίζονται με τη χρήση του HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) (Chassignet et al, 2007), και
- (iii) μόνο τα δεδομένα ρευμάτων.

Για το σκοπό αυτό προσομοιώνεται η συμπεριφορά της πετρελαιοκηλίδας που προκλήθηκε από τη βύθιση του δεξαμενόπλοιου «Αγία Ζώνη II» στις 10 Σεπτεμβρίου 2017 στον Σαρωνικό κόλπο. Το περιστατικό αυτό διερευνήθηκε επίσης από τους Coppini et al. (2018), οι οποίοι, όμως, προσομοίωσαν την πρόγνωση τροχιάς της πετρελαιοκηλίδας, ενώ στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται η «εκ των υστέρων» (hindcast) προσομοίωση.

3.3 Μεθοδολογία

3.3.1 Περιγραφή του ατυχήματος «Αγία Ζώνη II»

9 Σεπτεμβρίου 2017. Το δεξαμενόπλοιο «Αγία Ζώνη II» αναχώρησε από τα διυλιστήρια Ασπροπύργου έμφορτο με 2.194 t μαζούτ, 370 t πετρελαίου ναυτιλίας, 15 t άνθρακα από μαζούτ, 300 λίτρα λιπαντικών και 200-300 λίτρα χημικών (WWF, 2017).

10 Σεπτεμβρίου 2017. Το πλοίο βυθίστηκε, τις πρώτες πρωινές ώρες, νοτιοδυτικά της νήσου Αταλάντης, κοντά στο νησί της Σαλαμίνας, προκαλώντας διαρροή πετρελαίου και επακόλουθη εκτεταμένη ρύπανση του θαλάσσιου και παράκτιου περιβάλλοντος.

11 Σεπτεμβρίου 2017. Ξεκίνησαν οι επιχειρήσεις καθαρισμού. Η απομάκρυνση του πετρελαίου ολοκληρώθηκε τον Δεκέμβριο 2017/Ιανουάριο 2018 και οι πρόσθετες εργασίες αντικατάστασης υλικού παραλίας συνεχίστηκαν έως τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο του 2018 (IOPC, 2019).

12 Σεπτεμβρίου 2017. Το πλοίο σφραγίστηκε και η διαρροή πετρελαίου τερματίστηκε⁸.

13 Σεπτεμβρίου 2017. Οι ελληνικές Αρχές ζήτησαν την κινητοποίηση του Aktea OSRV, ενός σκάφους αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων που έχει συμβληθεί από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Ναυτιλιακής Ασφάλειας (EMSA) από την ελληνική εταιρεία Environmental Protection Engineering (EPE), για την ανάκτηση του πετρελαίου που διέρρευσε από το ναυάγιο⁹.

29 Νοεμβρίου 2017. Το ναυάγιο ανελκύστηκε από τον πυθμένα της θάλασσας (Parinos et al., 2019).

Η ποσότητα του πετρελαίου που διέρρευσε υπολογίστηκε σε 500 t, ενώ το ανακτηθέν πετρέλαιο εκτιμήθηκε σε 2.077 m³ (IOPC, 2019; Parinos et al., 2019).

3.3.2 Περιοχή υπολογισμών

Η περιοχή της διερεύνησης, ο Σαρωνικός κόλπος, βρίσκεται στο δυτικό-κεντρικό Αιγαίο Πέλαγος, με όρια τη χερσόνησο της Αττικής στα βόρεια και ανατολικά και την Πελοπόννησο στα νοτιοδυτικά. Συνδέεται με το Αιγαίο Πέλαγος στα νότια και νοτιοανατολικά και χαρακτηρίζεται από την παρουσία πολλών νησιών και νησίδων, με σημαντικότερα τη

⁷ https://meteo.gr/meteomaps/about_bolam.cfm

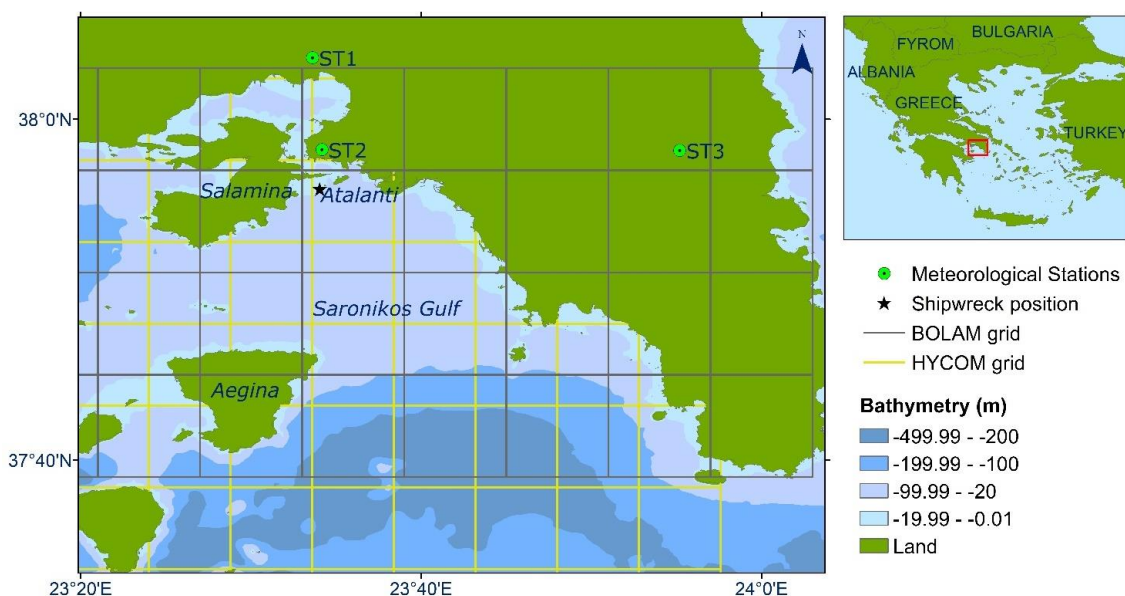
⁸ <https://spanopoulos-group.com/news-press-releases/item/622-news-2017>

⁹ <https://emsa.europa.eu/newsroom/latest-news/item/3100-emsa-contracted-vessel-aktea-osrv-mobilised-to-assist-with-oil-recovery.html>

Σαλαμίνα και την Αίγινα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1.

Η ακτογραμμή εκτείνεται περίπου 270 km, η επιφάνεια της θάλασσας καλύπτει έκταση περίπου 2.890 km² και το μέσο βάθος νερού είναι περίπου 100 m (Parinos et al., 2019).

Η βύθιση του τάνκερ «Αγία Ζώνη II» σημειώθηκε στο βόρειο τμήμα του Σαρωνικού, μια περιοχή που είναι η πιο ενεργή ναυτιλιακή ζώνη στην Ελλάδα, με το λιμάνι του Πειραιά, το μεγαλύτερο λιμάνι της ανατολικής Μεσογείου, να βρίσκεται εντός των ορίων του.



Σχήμα 3.1 Περιοχή υπολογισμών, θέσεις μετεωρολογικών σταθμών και πλέγματα μοντέλων BOLAM και HYCOM με γκρι και κίτρινο χρώμα, αντίστοιχα

3.3.3 Διαθέσιμες μετρήσεις/παρατηρήσεις πεδίου

Λήφθηκαν δεδομένα από την ανάλυση δορυφορικών εικόνων που πραγματοποιήθηκε από τη WWF Ελλάδας (WWF, 2017). Η ανάλυση τους βασίστηκε σε εικόνες τόσο από τον εμπορικό δορυφόρο PLANET (10/09/2017, 12/09/2017 και 15/09/2017) όσο και από τον δορυφόρο Sentinel 2A (13/09/2017 και 16/09/2017). Αξιοποιήθηκαν επίσης δεδομένα σχετικά με την παρατηρούμενη ρύπανση στην ακτογραμμή από τη μελέτη των Gogou et al. (2017). Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή της έκτασης της ρύπανσης στον Σαρωνικό Κόλπο, όπως αναλύθηκε από τα δορυφορικά και τα δεδομένα ρύπανσης στο πεδίο. Η χρονική μεταβολή της κίνησης της πετρελαιοκηλίδας, που προκύπτει από τον συνδυασμό των δεδομένων από WWF (2017) και Gogou et al. (2017), χρησιμοποιείται για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων των υπολογισμών με τη χρήση του GNOME για τα διάφορα σενάρια.

Αναλυτικά, την πρώτη μέρα μετά τη βύθιση (10/9/2017) εντοπίστηκε πετρελαϊκή ρύπανση στην περιοχή νοτιοανατολικά της Σαλαμίνας και τα πρώτα σημάδια πετρελαϊκής ρύπανσης παρατηρήθηκαν και αναφέρθηκαν στην ανατολική ακτογραμμή της Σαλαμίνας.

Δύο ημέρες αργότερα, στις 12 Σεπτεμβρίου, η πετρελαιοκηλίδα είχε εξαπλωθεί με κατεύθυνση δυτικά-νοτιοδυτικά προς το λιμάνι του Πειραιά, σύμφωνα με την ανάλυση της WWF (2017) και η ακτογραμμή του Πειραιά είχε ρυπανθεί, όπως παρατηρήθηκε και περιγράφεται στην αναφορά των Gogou et al. (2017).

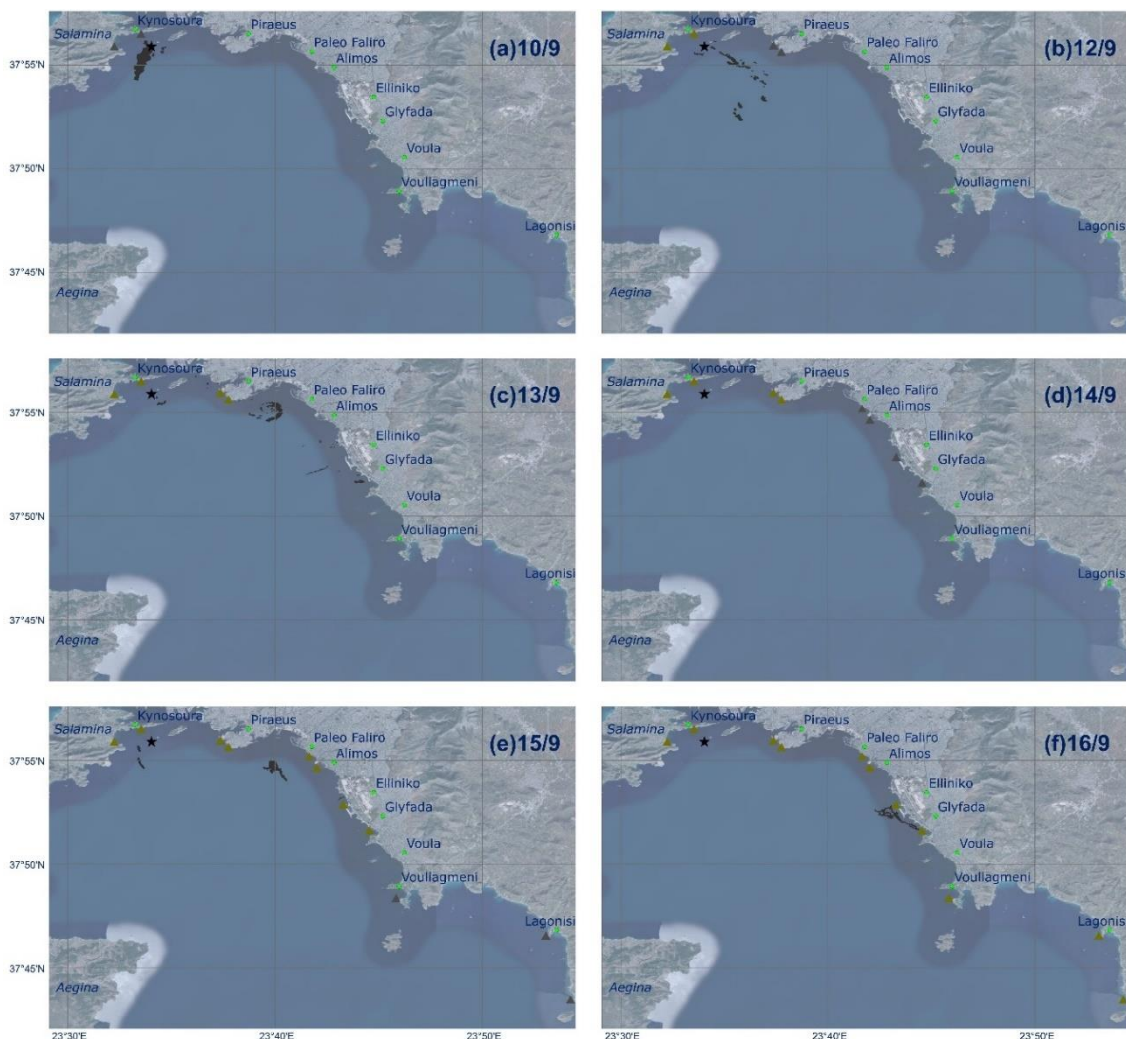
Την επόμενη μέρα (13/9/2017), η κηλίδα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2, εξαπλώθηκε γρήγορα με νότια-νοτιοανατολική κατεύθυνση και δεν επλήγησαν νέες περιοχές.

Αν και δεν υπάρχουν δορυφορικά δεδομένα για την 14^η Σεπτεμβρίου, οι Gogou et al. (2017)

ανέφεραν σημάδια ρύπανσης από πετρέλαιο στις παράκτιες περιοχές του δυτικού μετώπου της Αττικής χερσονήσου και συγκεκριμένα στο Παλιό Φάληρο, τον Άλιμο, το Ελληνικό και τη Γλυφάδα.

Στις 15 Σεπτεμβρίου, τα δορυφορικά δεδομένα απεικονίζουν ότι μέρος της πετρελαιοκηλίδας βρισκόταν ακόμα στην περιοχή νότια του λιμανιού του Πειραιά και νότια της Σαλαμίνας, ενώ σημάδια ρύπανσης αναφέρθηκαν στις ακτές της Βουλιαγμένης, στο Λαγονήσι και στη νότια περιοχή του Λαγονησιού.

Τέλος, την τελευταία ημέρα των διαθέσιμων δεδομένων (16 Σεπτεμβρίου), η ανάλυση των δορυφορικών εικόνων (WWF, 2017) έδειξε ότι μέρος της πετρελαιοκηλίδας (που είχε παρατηρηθεί παλαιότερα νότια του Πειραιά) κατευθύνθηκε προς την παράκτια ζώνη των περιοχών του Ελληνικού και της Γλυφάδας και δεν αναφέρθηκε νέα πετρελαϊκή ρύπανση στην ακτογραμμή την ίδια ημέρα.



Σχήμα 3.2 Χρονική μεταβολή της ρύπανσης όπως παρατηρήθηκε στο πεδίο και από δορυφορικές εικόνες. Με γκριζα τρίγωνα οι πρόσφατα ρυπασμένες περιοχές, με σκούρα πράσινα τρίγωνα οι περιοχές που ρυπάνθηκαν τις προηγούμενες ημέρες, με γκρι πολύγωνα δεδομένα από δορυφόρο και με μαύρο αστέρι η θέση του ναυαγίου

3.3.4 Δεδομένα ανέμου

Λήφθηκαν δεδομένα ανέμου από δύο πηγές:

- A. Από το ατμοσφαιρικό μοντέλο BOLAM, και

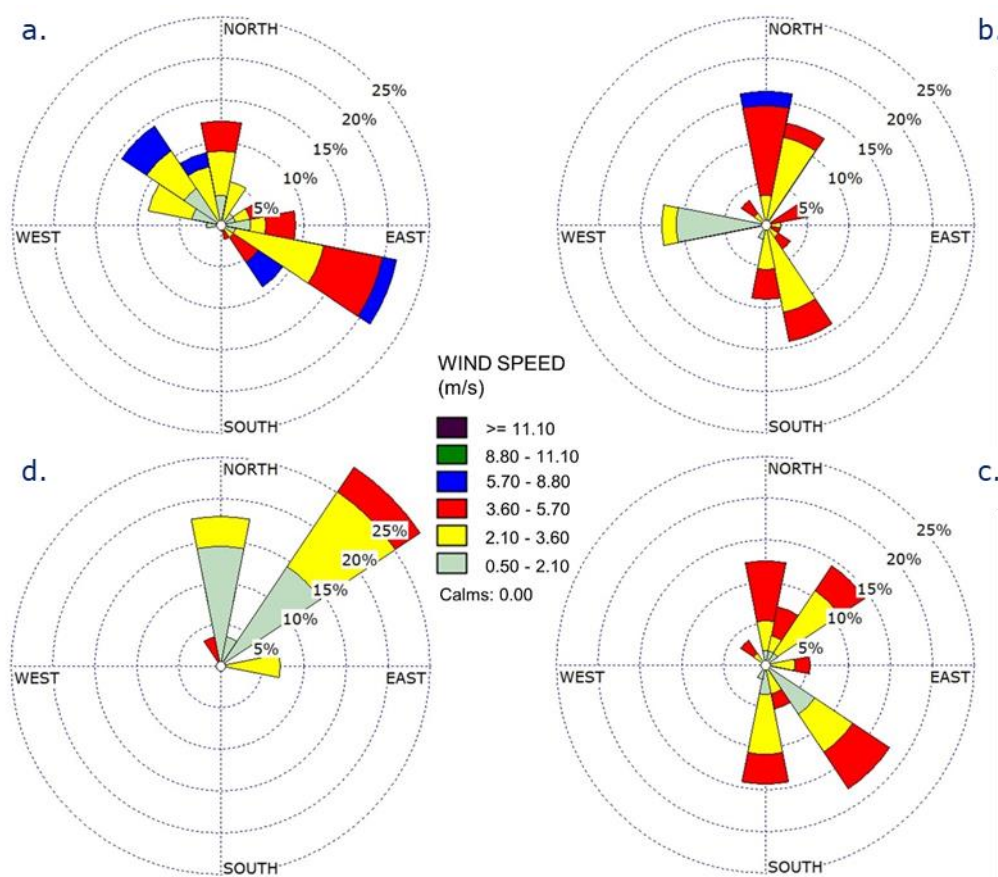
B. Από τους μετεωρολογικούς σταθμούς της Ελευσίνας (ST1), του Περάματος (ST2) και του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών (ST3), από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY) και τις ιστοσελίδες www.timeanddate.de και www.wunderground.com, αντίστοιχα.

Το πλέγμα δεδομένων για την περιοχή που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζεται με γκρι χρώμα στο Σχήμα 3.1. Στο Σχήμα 3.1 φαίνονται επίσης οι θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών.

Για την εκτέλεση του μοντέλου BOLAM (με οριζόντια ανάλυση 6,5 km), χρησιμοποιούνται δεδομένα αρχικών και οριακών συνθηκών από το μοντέλο US-Global Forecasting System (US-GFS) (Lagouvardos et al., 2003). Η χρονική ανάλυση των ληφθέντων δεδομένων ήταν 3 ώρες, εκτός από το σταθμό ST3, ο οποίος καταγράφει μετρήσεις κάθε 6 ώρες.

Μετά την επεξεργασία των δεδομένων, παρατηρήθηκαν μεγάλες διαφορές στα δεδομένα ανέμου ως προς την κατεύθυνση και την ταχύτητα. Οι συχνότητες παρουσιάζονται ως ροδογράμματα ανέμου στο Σχήμα 3.3. Η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου για κάθε ένα από τα σύνολα των δεδομένων, παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.4 έως 3.7.

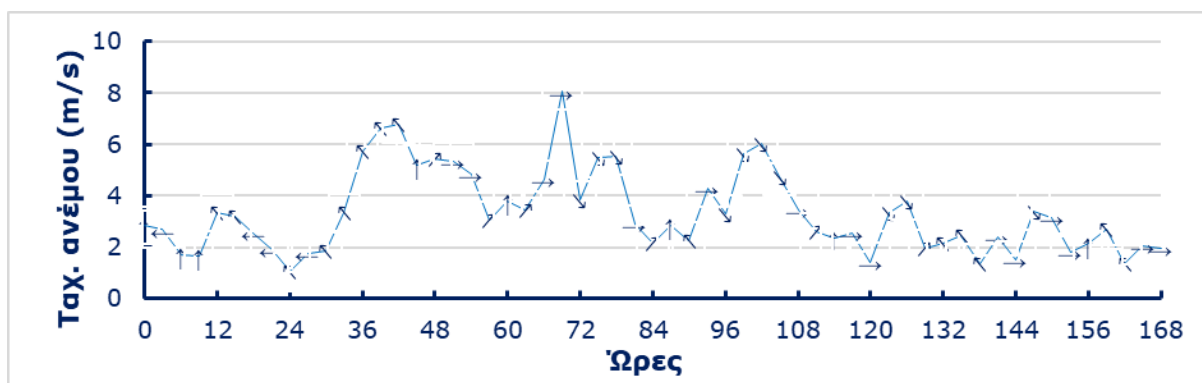
Στον Πίνακα 3.1 φαίνονται οι επικρατούσες διευθύνσεις των ανέμων, όπως αυτές ταξινομήθηκαν ανά 12 ώρες. Όσον αφορά τα δεδομένα του μοντέλου BOLAM, υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των σημείων πλέγματος που περιλαμβάνονται στην περιοχή ολοκλήρωσης που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1 για κάθε χρονικό βήμα. Τα δεδομένα ανέμου BOLAM έδειξαν μεγάλη μεταβλητότητα διεύθυνσης, με τη βορειοδυτική να είναι η πιο κυρίαρχη. Τα δεδομένα ST2 έδειξαν ισχυρότερη ταχύτητα ανέμου και πιο μεταβλητές διευθύνσεις ανέμου, ενώ τα δεδομένα ST1 είχαν υψηλότερες ταχύτητες γενικά, με εμφάνιση ανέμου προς τα ανατολικά. Ο άνεμος S των δεδομένων του σταθμού ST1 είχε την υψηλότερη τιμή από όλα (σταθμούς μέτρησης και BOLAM).



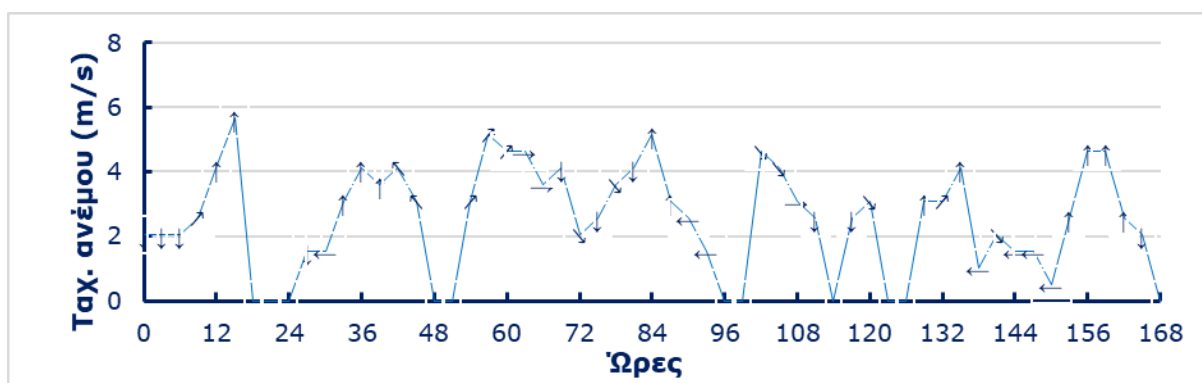
Σχήμα 3.3 Ροδογράμματα ανέμου για τα δεδομένα ανέμου της περιόδου υπολογισμών (168 h) από BOLAM (a), ST1 (b), ST2 (c) και ST3 (d) (Πηγή: Makatounis et al., 2023)

Πίνακας 3.1 Επικρατούσες διευθύνσεις ανέμου

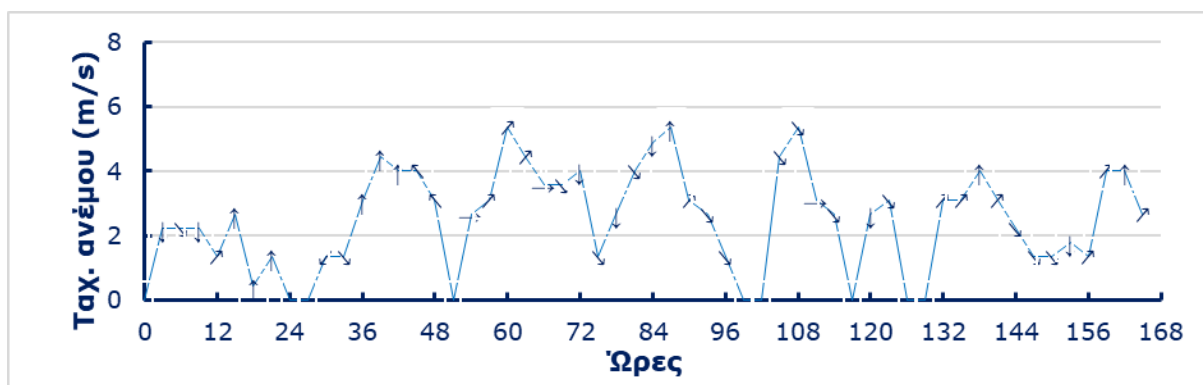
Ημέρα	Χρονική περίοδος	BOLAM (μέσες τιμές)	ST1	ST2	ST3
1 (10/9)	00:00-12:00	S	N	N	S
	12:00-24:00	SE	S	S	S
2	00:00-12:00	SE	N	N	S
	12:00-24:00	SE	SE	S	S
3	00:00-12:00	W	SW	W	SW
	12:00-24:00	W	W	SW	SW
4	00:00-12:00	NW	NW	NW	N
	12:00-24:00	W	S	S	SW
5	00:00-12:00	NW	NW	NW	W
	12:00-24:00	W	N	NW	W
6	00:00-12:00	NW	NW	N	SW
	12:00-24:00	SE	S	SW	SW
7	00:00-12:00	W	E	NW	SW
	12:00-24:00	SE	S	SW	SW



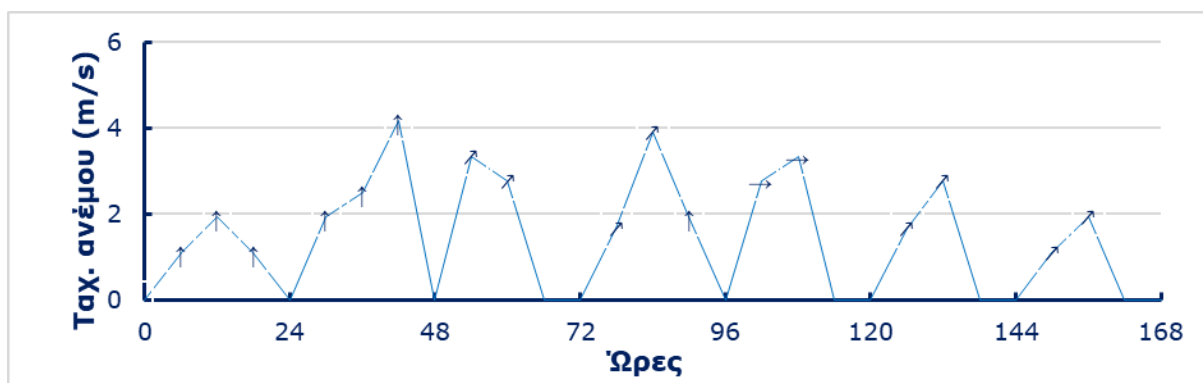
Σχήμα 3.4 Ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου για την περίοδο προσομοίωσης, BOLAM



Σχήμα 3.5 Ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου για την περίοδο προσομοίωσης, ST1



Σχήμα 3.6 Ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου για την περίοδο προσομοίωσης, ST2



Σχήμα 3.7 Ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου για την περίοδο προσομοίωσης, ST3

3.3.5 Δεδομένα επιφανειακών ρευμάτων

Κατά τη διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης στην περιοχή της διερεύνησης, δεν υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις ρευμάτων στο πεδίο. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιήθηκαν ταχύτητες επιφανειακού ρεύματος από το υδροδυναμικό μοντέλο HYCOM που αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο του Μαϊάμι, το Ναυτικό Εργαστήριο Ερευνών (National research laboratory, NRL) και το Εθνικό Εργαστήριο του Λος Άλαμος (Los Alamos national laboratory, LANL), ως μέρος της κοινοπραξίας HYCOM για Data-Assimilative Ocean Modeling (Chassignet et al., 2007). Το HYCOM είναι ένα υβριδικό ωκεάνιο μοντέλο που χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδων (Periáñez, 2020; Zacharias et al., 2021).

Για την περιοχή της διερεύνησης, λήφθηκαν δεδομένα ρευμάτων GLBy0.08 από το σύνολο δεδομένων μοντέλου HYCOM με χρονικό διάστημα 3 ωρών και οριζόντια ανάλυση $0,08^\circ$, από το πείραμα `expt_57.0`¹⁰.

3.3.6 Μοντέλο GNOME

Το μοντέλο GNOME αναπτύχθηκε από το Ινστιτούτο Εθνικής Διοίκησης Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (National ocean atmospheric administration, NOAA) για να προσομοιώσει τις διεργασίες γήρανσης των πετρελαιοκηλίδων σε πεδία συνεχούς ροής. Το GNOME είναι ένα δισδιάστατο (2D) μοντέλο Eulerian/Lagrangian στο διάστημα που απαιτεί εισαγωγή θαλάσσιων ρευμάτων, που προέρχονται από υδροδυναμικά μοντέλα, και χαρακτηριστικά ανέμου, που υπολογίζονται συνήθως από ατμοσφαιρικά μοντέλα ή σταθερά δεδομένα.

Για να χρησιμοποιηθεί το GNOME, πρέπει να οριστεί μια σειρά παραμέτρων, όπως, μεταξύ άλλων, ο συντελεστής ανέμου, ο συντελεστής διάχυσης, ο χρόνος ημιζωής επανεπίπλευσης,

¹⁰ <https://hycom.org/data/qlbv0pt08/expt-57pt7>

ο τύπος και η ακριβής μάζα του πετρελαίου. Τα αποτελέσματα υπολογισμού απεικονίζονται ως ένας χάρτης σημείων ή στοιχείων Lagrange (Langrangian elements, LEs), τα οποία μπορούν να παραχθούν με δύο τρόπους: την καλύτερη επιλογή χωρίς την προσθήκη αβεβαιότητας (Best guess solution, BGS) και τη λύση με την προσθήκη της αβεβαιότητας (Minimum regret solution, MRS) (Beegle-Krause, 2001, 1999).

Η τροχιά πρόγνωσης BGS δημιουργείται υποθέτοντας ότι δεν υπάρχουν σφάλματα στα δεδομένα ανέμου και θαλάσσιων ρευμάτων (Zelenke et al., 2012a), ενώ η τροχιά MRS είναι μια συλλογή στατιστικών τροχιών που επιχειρεί να ενσωματώσει την αβεβαιότητα των ανέμων και των θαλάσσιων ρευμάτων στην τροχιά πρόγνωσης (Beegle-Krause, 1999).

Για αυτή τη διερεύνηση, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο GNOME με χρήση:

- (i) μόνο δεδομένων ανέμου, χρησιμοποιώντας διάφορα σύνολα δεδομένων,
- (ii) συνδυασμό δεδομένων ανέμου και θαλάσσιων ρευμάτων και
- (iii) δεδομένων θαλάσσιων ρευμάτων μόνο.

Για να εξεταστεί η επίδραση, στα αποτελέσματα του GNOME, παραμέτρων όπως η ημιζωή επανεπίπλευσης (refloat half-life), ο συντελεστής διάχυσης (diffusion coefficient) και ο παράγοντας ανέμου (windage factor), πραγματοποιήθηκαν 208 σενάρια ευαισθησίας με διαφορετικές τιμές για αυτές τις παραμέτρους, όπως περιγράφεται λεπτομερώς στις ακόλουθες παραγράφους. Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που εξετάστηκαν κατά την ανάλυση ευαισθησίας, που πραγματοποιήθηκε.

Αναπτύχθηκαν και πραγματοποιήθηκαν 8 βασικά σενάρια υπολογισμών (βλ. Πίνακα 3.3) ακολουθώντας τη ντετερμινιστική μεθοδολογία υπολογισμού, που εφαρμόστηκε στη μελέτη των Makatounis et al. (2017) στον Πατράϊκό Κόλπο.

Πίνακας 3.2 Παράμετροι & τιμές ανάλυσης ευαισθησίας

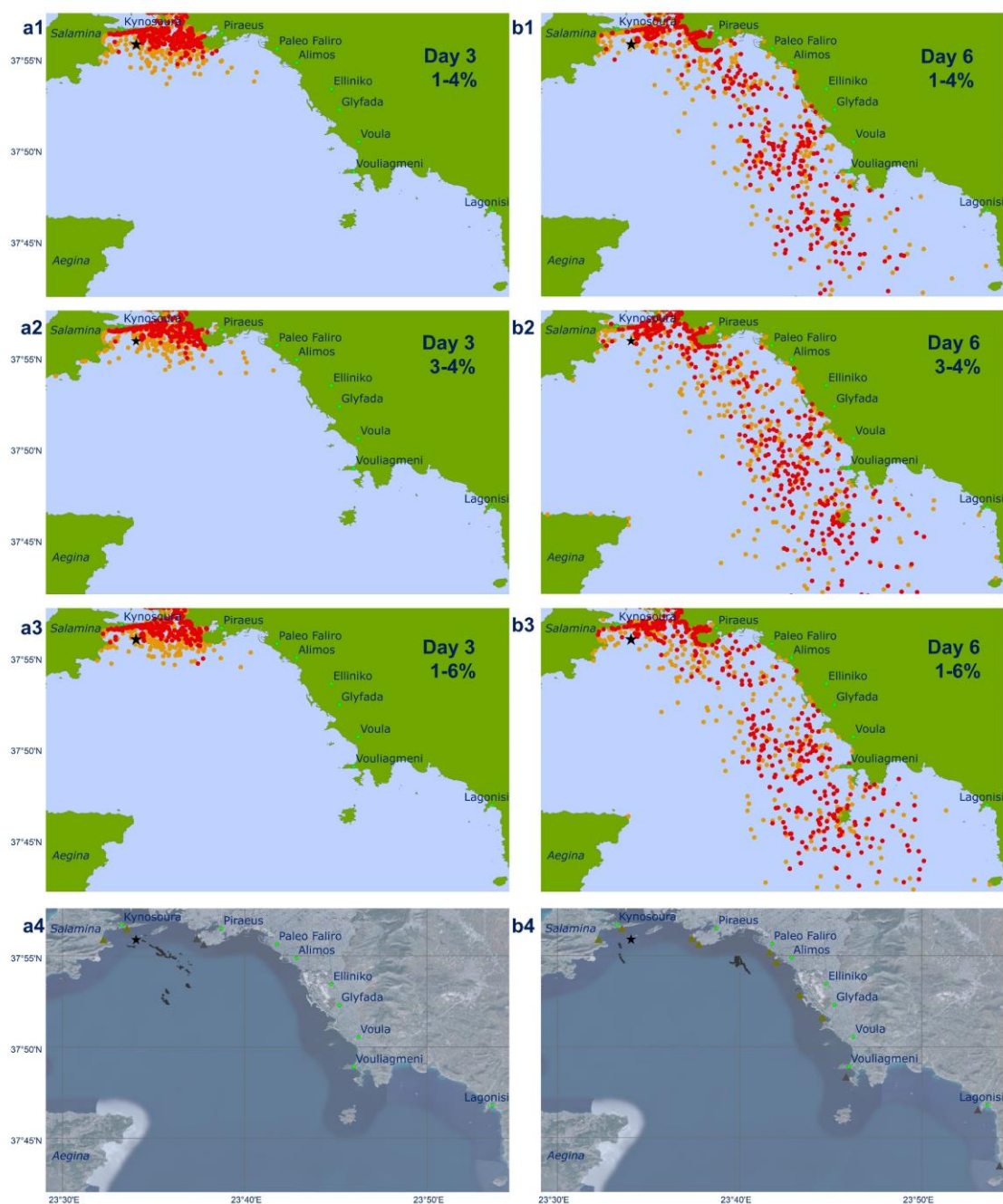
Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Ημιζωή επανεπίπλευσης	1; 6; 24	h
Συντελεστής διάχυσης	10^3 ; 10^5 ; 10^6	cm^2s^{-1}
Παράγοντας ανέμου	1-6; 3-4; 1-4	%

Ο παράγοντας ανέμου, αντιπροσωπεύει την κίνηση του πετρελαίου που προκαλείται από τον άνεμο, και είναι συνήθως περίπου το 3% της ταχύτητας του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας (Duran et al., 2018; Stolzenbach et al., 1977). Το μοντέλο GNOME συνιστά τη χρήση προεπιλεγμένου συντελεστή ανέμου από 1% έως 4% (Zelenke et al., 2012a).

Οι Gurumoorthi et al. (2021) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ένας συντελεστής ανέμου 0% οδήγησε σε πολύ χαμηλή απόθεση πετρελαίου στις ακτές, ενώ ένας συντελεστής ανέμου 6% οδήγησε σε πολύ υψηλή απόθεση.

Για τον υπολογισμό της επίδρασης του παράγοντα ανέμου στην κίνηση της πετρελαιοκηλίδας, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοιώσεων με χρήση διαφορετικών τιμών, και συγκεκριμένα για τα εύρη, 1%-6%, 3%-4% και 1%-4% (ενδεικτικά βλ. Σχήμα 3.8).

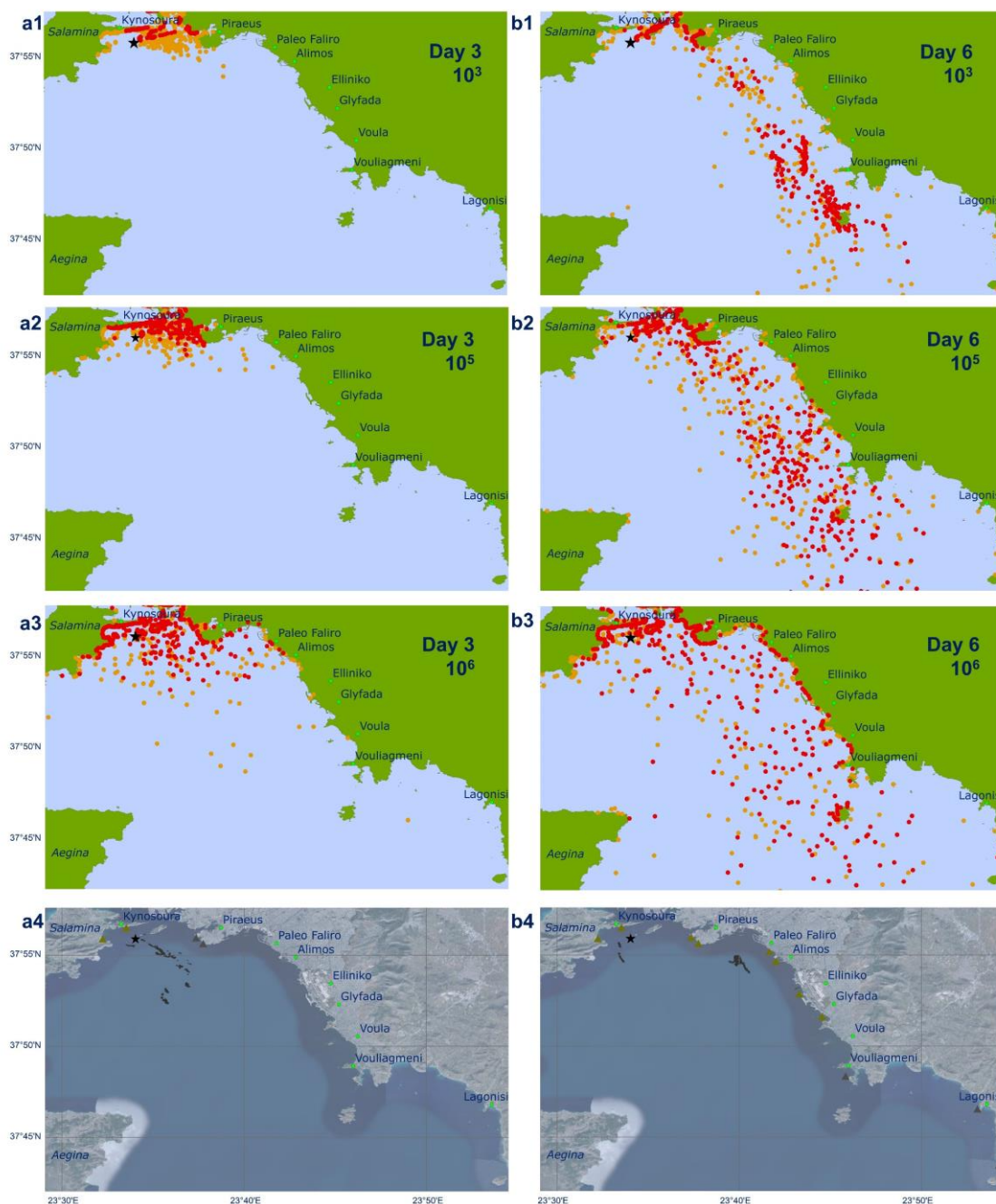
Αυτή η ανάλυση έδειξε ότι παράγοντας ανέμου με εύρος 3%-4%, μπορεί να είναι ο βέλτιστος για τις περαιτέρω προσομοιώσεις.



Σχήμα 3.8 Σύγκριση υπολογισμών ανάλυσης ευαισθησίας (κόκκινες κουκκίδες BGS, πορτοκαλί κουκκίδες MRS) την 3^η ημέρα - 12/09/2017 (a) και 6^η ημέρα - 15/09/2017 (b) για τις τιμές παράγοντα ανέμου 1-4% (1), 3-4% (2), και 1-6% (3), με δορυφορικά και δεδομένα ρύπανσης (4)

Η διάχυση (diffusion), η οποία αναπαριστά την τυχαία εξάπλωση της πετρελαιοκηλίδας, περιλαμβάνεται επίσης σε αυτό το μοντέλο. Η προεπιλεγμένη τιμή της οριζόντιας διάχυσης είναι $100.000 \text{ cm}^2/\text{s}$, αλλά μπορεί να κυμαίνεται από 10^3 (χαμηλή) έως $10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ (υψηλή) (Zelenke et al., 2012b).

Για να υπολογιστεί η επίδραση της τυχαίας εξάπλωσης της πετρελαιοκηλίδας, στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τιμές διάχυσης και συγκεκριμένα οι τιμές, 1.000 , 100.000 και $1.000.000 \text{ cm}^2/\text{s}$ (ενδεικτικά βλ. Σχήμα 3.9). Μετά από την ανάλυση της σύγκρισης των αποτελεσμάτων εκτιμάται ότι μια τιμή διάχυσης $100.000 \text{ cm}^2/\text{s}$ μπορεί να είναι βέλτιστη για τους υπολογισμούς.

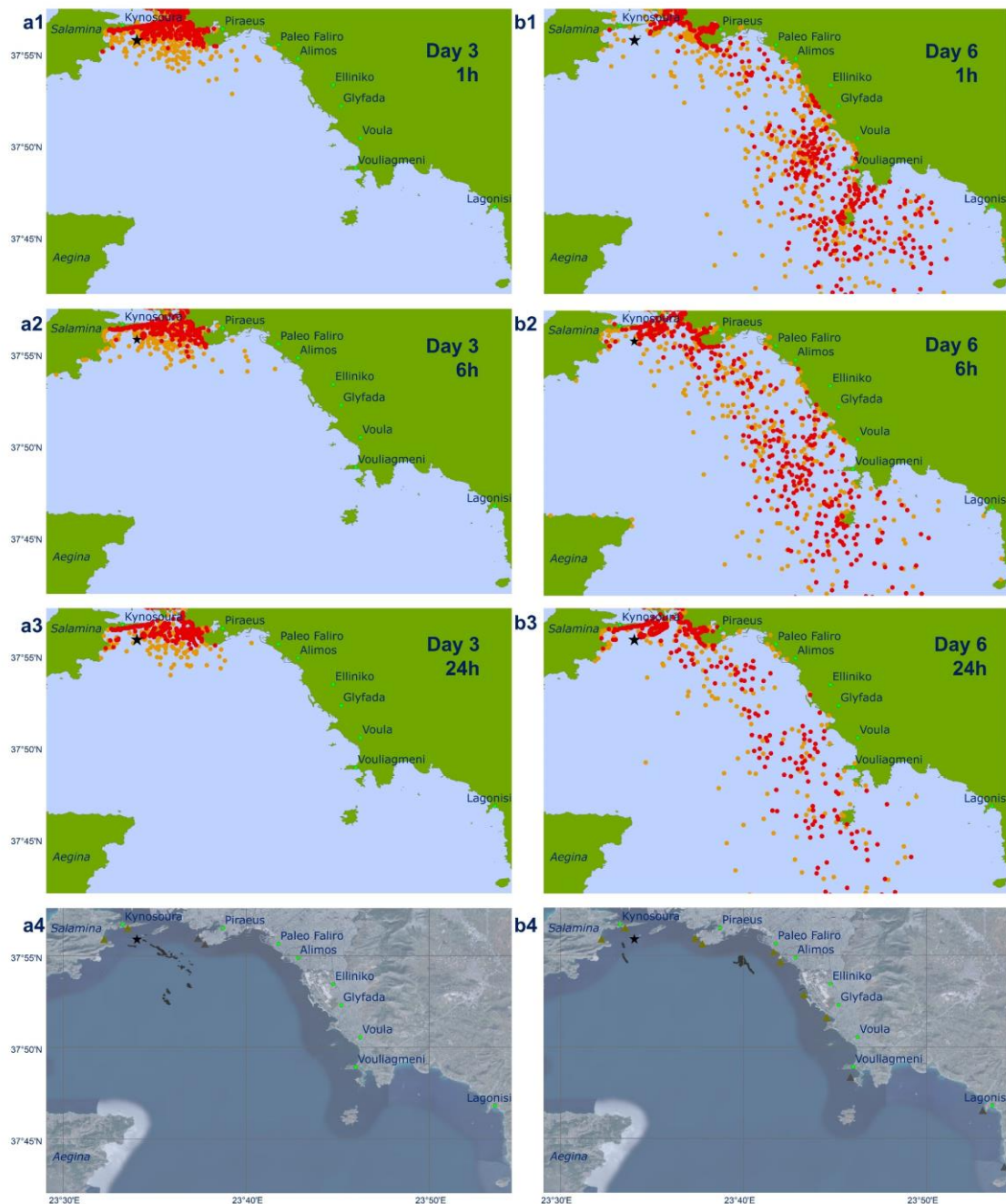


Σχήμα 3.9 Σύγκριση υπολογισμών ανάλυσης ευαισθησίας (κόκκινες κουκκίδες BGS, πορτοκαλί κουκκίδες MRS) την 3^η ημέρα - 12/09/2017 (a) και 6^η ημέρα - 15/09/2017 (b) για τις τιμές συντελεστή διάχυσης 10^3 (1), 10^5 (2), και 10^6 cm^2/s (3), με δορυφορικά και δεδομένα ρύπανσης (4)

Δεδομένου ότι δεν υπάρχει διαθέσιμη προ-εγκατεστημένη βάση δεδομένων για τα είδη των ακτογραμμών στην περιοχή διερεύνησης, το GNOME περιλαμβάνει μια επιλογή για επανεπίπλευση πετρελαίου με βάση το χρόνο ημιζωής επανεπίπλευσης. Αυτή η παράμετρος περιγράφει εμπειρικά την αλληλεπίδραση του πετρελαίου με τις ακτές και είναι ο αριθμός των ωρών κατά τις οποίες το μισό πετρέλαιο σε μια δεδομένη ακτογραμμή αναμένεται να αφαιρεθεί εάν:

- (1) υπάρχει υπεράκτιος άνεμος ή διάχυτη μεταφορά, και
- (2) το επίπεδο της θάλασσας είναι στο ίδιο επίπεδο ή υψηλότερο από το επίπεδο του πετρελαίου όταν βρισκόταν στην παραλία (Zelenke et al., 2012a).

Η προεπιλεγμένη τιμή για το χρόνο ημιζωής είναι 1 h (Zelenke et al., 2012a). Οι Amir-Heidari & Raie (2019) και Feng & Hodges (2020) χρησιμοποίησαν μία τιμή ίση με 6 h. Η ανάλυση σύγκρισης των αποτελεσμάτων με χρήση διαφορετικών τιμών και συγκεκριμένα για 1 h, 6 h και 24 h (ενδεικτικά βλ. Σχήμα 3.10), δείχνει ότι η τιμή των 6 h είναι η βέλτιστη.



Σχήμα 3.10 Σύγκριση υπολογισμών ανάλυσης ευαισθησίας (κόκκινες κουκκίδες BGS, πορτοκαλί κουκκίδες MRS) την 3^η ημέρα - 12/09/2017 (a) και 6^η ημέρα - 15/09/2017 (b) για τις τιμές χρόνου επανεπίπλευσης 1 h (1), 6 h (2), και 24 h (3), με δορυφορικά και δεδομένα ρύπανσης (4)

Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζεται η ποικιλία των σεναρίων που δημιουργήθηκαν και προσομοιώθηκαν. Η διάρκεια διαρροής ορίστηκε ίση με τη διάρκεια μέχρι τη σφράγιση του ναυαγίου υποθέτοντας συνεχή ρυθμό ροής. Το χρονικό βήμα ορίστηκε στα 15 min (0,25 h) αφού το χαμηλότερο χρονικό βήμα έδωσε αμελητέες διαφορές στα αποτελέσματα. Έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες χρησιμοποιώντας προεπιλεγμένες τιμές παραμέτρων, κυρίως για τη διάχυση (Amir-Heidari et al., 2019; Amir-Heidari & Raie, 2019; Bucelli et al., 2018;

Cheng et al., 2011) και την αβεβαιότητα του ανέμου (Marta-Almeida et al., 2013).

Προεπιλεγμένες τιμές για τα σωματίδια πετρελαίου χρησιμοποιήθηκαν σε μερικές εργασίες (Marta-Almeida et al., 2013; Amir-Heidari & Raie 2019). Οι Xu et al. (2013) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το ισοζύγιο μάζας είναι σταθερό όταν ο αριθμός σωματιδίων πετρελαίου είναι μεγαλύτερος από 500. Για τις προσομοιώσεις στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης, χρησιμοποιήθηκαν προεπιλεγμένες τιμές για τα σωματίδια πετρελαίου, τις αβεβαιότητες ανέμου και διάχυσης και την επιμονή πνοής του ανέμου (Zelenke et al., 2012a).

Πίνακας 3.3 Σενάρια μοντέλων GNOME

Σενάριο	Δεδομένα ανέμου	Θαλάσσια ρεύματα	Σενάριο	Δεδομένα ανέμου	Θαλάσσια ρεύματα
W1	BOLAM	-	CW1	BOLAM	HYCOM
W2	ST1	-	CW2	ST1	HYCOM
W3	ST2	-	CW3	ST2	HYCOM
W4	ST3	-	CW4	-	HYCOM

Τέλος, για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε ως ρύπος, πετρέλαιο τύπου #6 από τη βάση δεδομένων GNOME, το οποίο είναι παρόμοιο με αυτό που διέρρευσε κατά το ατύχημα του δεξαμενόπλοιου «Αγία Ζώνη II».

Οι Πίνακες 3.4 και 3.5 συνοψίζουν τις παραμέτρους και τις επιλεγμένες τιμές για καθεμία από τις προηγούμενες ερευνητικές μελέτες χρησιμοποιώντας το GNOME λεπτομερώς.

Πίνακας 3.4 Παράμετροι και τιμές σε προηγούμενες μελέτες με χρήση του GNOME (1/2)

A/A	Έρευνα	Περιοχή	Υποθετ. (H) / Πραγματ. (RI)	Στιγμ. (I) / Συνεχ. (CO)	Διάρκεια υπολ. (Hours)	Τύπος πετρελαίου	Ημιζωή (Hours)
1	Başar et al., 2006	Istanbul, Turkey	H	I	N/A	Medium Crude	N/A
2	Farzinger et al., 2011	Bandar Abbas, Iran	H	I	Various	Diesel / Gasoline	N/A
3	Cheng et al., 2011	GoM, USA	RI	I	60	Crude	N/A
4	Marta-Almeida et al., 2013	Galician Brazilian GoM, USA	RI H H	I CO I	N/A	Non weath.	N/A
5	Xu et al., 2013	Bohai Sea, China	RI	I	N/A	Medium crude	N/A
6	Bucelli et al., 2018	Barents Sea, Norway	H	CO	108	Medium Crude	N/A
7	Zacharias et al., 2021	Brazilian Atlantic Ocean	H	I	240	Medium Crude	N/A
8	Duran et al., 2018	San Juan Is., Canada	RI	I	30	Heavy Marine Fuel #6	24
9	Amir-Heidari and Raie, 2019	Persian Gulf	H	CO	7200	Medium crude	ESI
10	Amir-Heidari et al., 2019	Baltic Sea	H	CO	3600	Heavy Fuel	6
11	Feng and Hodges, 2020	Galveston Bay, USA	H	I	2400	N/A	6

Πίνακας 3.5 Παράμετροι και τιμές σε προηγούμενες μελέτες με χρήση του GNOME (2/2)

A/A	MRS / BGS	Συν/στής διάχυσης	Άνεμος	Παράγοντας ανέμου	Αβεβαιότητα υδροδυναμικών		Υδροδυν. Δεδομένα
					Παρ/Λο ρεύμα	Κάθετο ρεύμα	
1	N/A	N/A	Σταθερός	N/A	N/A	N/A	N/A/Κάνναβος
2	BOTH	N/A	1h/Κάνναβος	N/A	X	X	X
3	BOTH	100.000	1h/Σταθμός 1d/Κάνναβος	0-1%	1%	1%	3h/Κάνναβος 1d/Κάνναβος
4	BOTH	N/A	1d/Κάνναβος 4h/Κάνναβος	N/A	10%	10%	1d/Κάνναβος 4h/Κάνναβος
5	BOTH	N/A	1d/Κάνναβος	N/A	N/A	N/A	3h/Κάνναβος
6	BOTH	100.000	3h / Grid	1-4%	30%	30%	3h/Κάνναβος
7	BGS	N/A	Σταθερός	N/A	N/A	N/A	Σταθερά
8	N/A	X	2h/Σταθμός	N/A	N/A	N/A	N/A/Κάνναβος
9	N/A	100.000	3h/Κάνναβος	N/A	N/A	N/A	1h/Κάνναβος
10	N/A	100.000	1h/Κάνναβος	N/A	N/A	N/A	1h/Κάνναβος
11	N/A	N/A	X	0%	N/A	N/A	1h/Κάνναβος

Στον Πίνακα 3.6 παρουσιάζονται τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά υπολογισμού με βάση την προαναφερθείσα ανάλυση ευαισθησίας.

Πίνακας 3.6 Επιλεγμένες τιμές από την ευαισθησία των παραμέτρων για τους υπολογισμούς

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα	Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Χρόνος υπολογισμών	168	h	Ημιζωή επανεπίπλευσης	6	h
Χρονικό βήμα	15	min	Ποσότητα διαρροής	500	t
Διάρκεια διαρροής	55	h	Αριθμός σωματιδίων	1.000	-
Συντ. διάχυσης	100.000	cm ² s ⁻¹	Αβεβαιότητα διάχυσης	2	-
Παράγοντας ανέμου	3-4	%	Επιμονή ανέμου	15	min.
Αβεβαιότητα ταχ. ανέμου	2	m s ⁻¹	Αβεβαιότητα γωνίας ανέμου	23	degrees

3.4 Σύγκριση υπολογισμών μοντέλου με δεδομένα πεδίου

3.4.1 Περίπτωση 1. Σύγκριση υπολογισμών τροχιάς πετρελαιοκηλίδας για διαφορετικά σύνολα δεδομένων ανέμου

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.11 παρέχουν μια ολοκληρωμένη σύγκριση μεταξύ των προσομοιώσεων που χρησιμοποιούν μόνο ανέμους και τα δεδομένα πεδίου της παράκτιας ρύπανσης (Gogou et al., 2017) και των δεδομένων δορυφορικής ρύπανσης (WWF, 2017) για την 3^η ημέρα (12/09/2017) και την 6^η μέρα (15/09/2017) μετά την έναρξη της πετρελαιοκηλίδας από το ναυάγιο. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τέσσερα διαφορετικά σύνολα δεδομένων ανέμου, με ονομασία W1, W2, W3 και W4.

Στο Σχήμα 3.11 (στήλη a) παρουσιάζεται η σύγκριση των προσομοιώσεων με τις αναφορές ρύπανσης πεδίου και τα δορυφορικά δεδομένα για την 3^η ημέρα μετά την έναρξη της διαρροής πετρελαίου. Εκτός από το σενάριο W1 (BOLAM), όλα τα άλλα σενάρια, W2, W3 και W4, δείχνουν ότι η πετρελαιοκηλίδα κατευθύνθηκε προς τη δυτική ακτή της χερσονήσου της Αττικής, επηρεάζοντας την περιοχή βόρεια του Πειραιά.

Τα αποτελέσματα από αυτά τα τρία σενάρια έδειξαν αμελητέες διαφορές στην τροχιά της πετρελαιοκηλίδας και ήταν γενικά σε συμφωνία με τον δορυφόρο και τα δεδομένα που παρατηρήθηκαν. Από την άλλη πλευρά, το σενάριο W1 έδειξε μεγαλύτερη επέκταση της

διαρροής προς τα νότια και κανένα πετρέλαιο προσάραξης στην ακτογραμμή του Πειραιά.

Στο Σχήμα 3.11 (στήλη b) φαίνεται η σύγκριση των προσομοιώσεων με δεδομένα πεδίου και δορυφόρου για την 6^η ημέρα μετά την έναρξη της διαρροής πετρελαίου. Σε αυτή τη σύγκριση, υπάρχουν αρκετές ομοιότητες στα αποτελέσματα υπολογισμού για τα σενάρια εκτός από το σενάριο W4. Στο σενάριο W1, υπήρχε μεγαλύτερη έκταση της πετρελαιοκηλίδας στην κατεύθυνση Βορράς - Νότος σε σύγκριση με τα σενάρια W2 και W3, στα οποία υπήρχε μεγαλύτερη διασπορά στον χώρο.

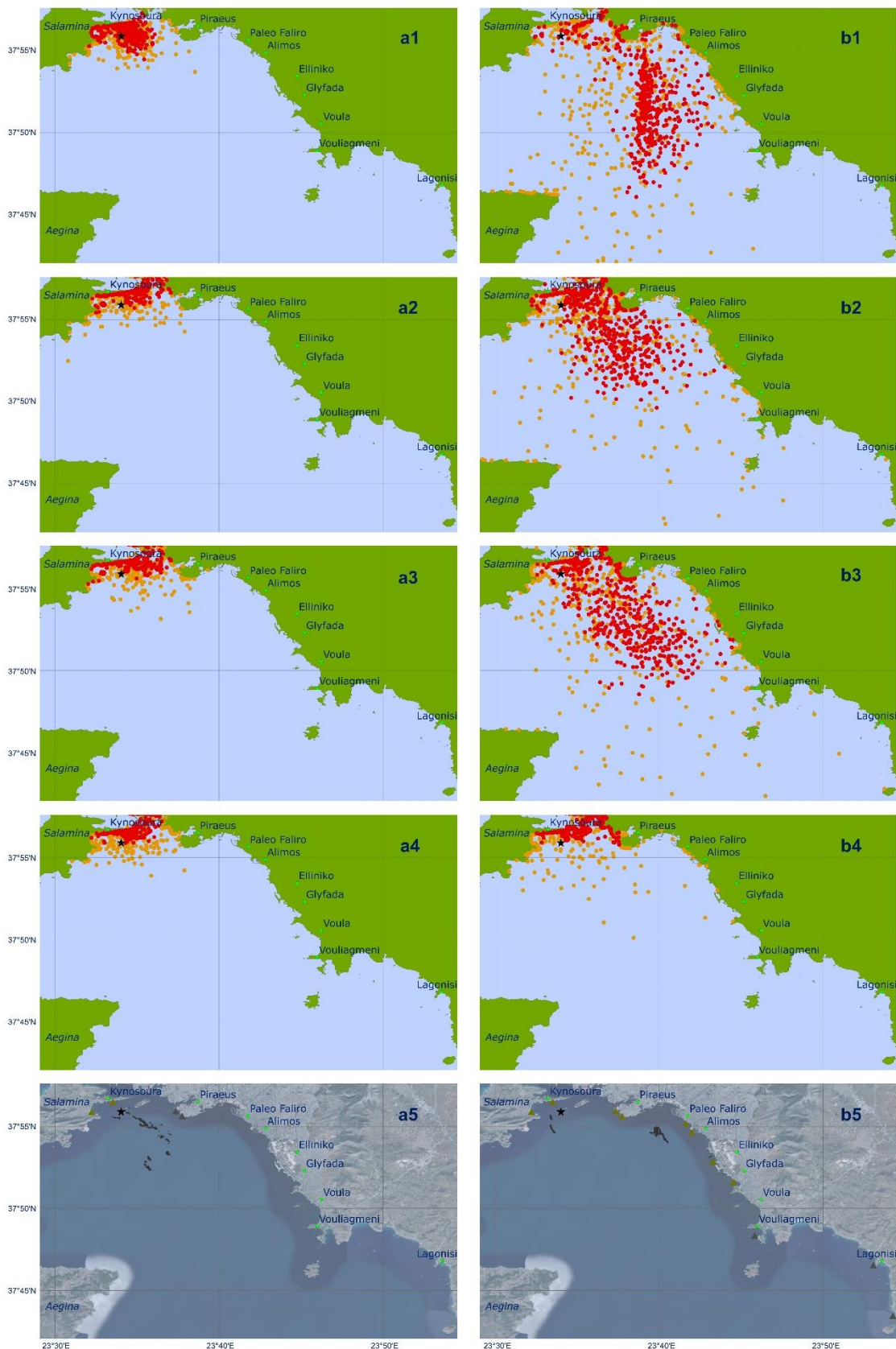
Ωστόσο, και τα τρία σενάρια (W1, W2, W3) έδειξαν παρόμοια αποτελέσματα όσον αφορά τις περιοχές της ακτογραμμής όπου το πετρέλαιο κατέληξε τελικά σε λειτουργία BGS, οι οποίες ήταν μεταξύ Πειραιά και Βουλιαγμένης.

Στη λειτουργία MRS, η πετρελαιοκηλίδα επεκτάθηκε νότια κοντά στο νησί της Αίγινας και στα τρία σενάρια, κάτι που δεν παρατηρήθηκε στα πραγματικά στοιχεία του περιστατικού. Το σενάριο W2 έδειξε τη μεγαλύτερη έκταση της πετρελαιοκηλίδας, κατευθυνόμενη προς την περιοχή της Βουλιαγμένης, αλλά δεν προσέγγισε τις περιοχές όπως απεικονίζεται στην πραγματική εικόνα από τα δορυφορικά δεδομένα και τις παρατηρήσεις στο πεδίο, που αποτύπωσαν το πλήρες μέγεθος των ρυπασμένων περιοχών. Σύμφωνα με τα στοιχεία της 6^{ης} ημέρας, η πραγματική πετρελαιοκηλίδα έφτασε στην περιοχή του Λαγονησίου.

Από τη σύγκριση αυτών των τεσσάρων σεναρίων χρησιμοποιώντας μόνο δεδομένα ανέμου (W1, W2, W3 και W4), μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το σενάριο W2, που χρησιμοποιεί τα δεδομένα ανέμου από το σταθμό ST2, έδωσε ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με τα πραγματικά δεδομένα, όσον αφορά την έκταση της ρύπανσης στην επιφάνεια της θάλασσας και το λανθάνον πετρέλαιο κατά τις πρώτες ημέρες.

Ωστόσο, όλα τα σενάρια που χρησιμοποιούν μόνο δεδομένα ανέμου δεν έδωσαν αποτελέσματα που θα μπορούσαν να συγκριθούν με τα δεδομένα από το πραγματικό περιστατικό.

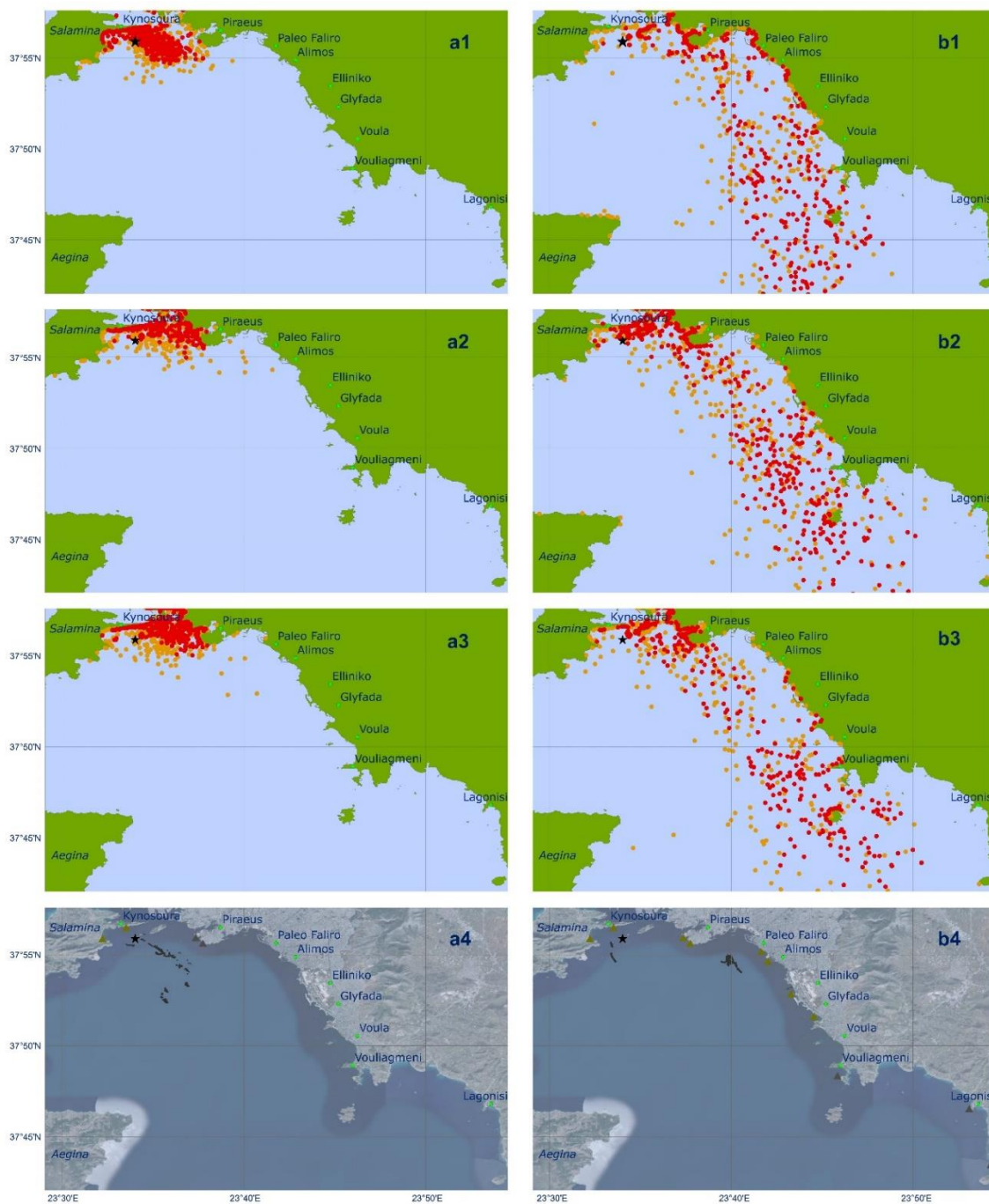
Συγκεκριμένα, το σενάριο W4 ήταν το λιγότερο αντιπροσωπευτικό και αποκλείστηκε από περαιτέρω ανάλυση. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι ο σταθμός μέτρησης από τον οποίο ελήφθησαν τα δεδομένα βρισκόταν σε μεγάλη απόσταση από τη θαλάσσια περιοχή του ατυχήματος, που βρίσκεται στην άλλη πλευρά της χερσονήσου της Αττικής, και είχε χρονική ανάλυση 6 h.



Σχήμα 3.11 Σύγκριση υπολογισμών (κόκκινες κουκκίδες BGS, πορτοκαλί κουκκίδες MRS) την 3^η ημέρα - 12/09/2017 (a) και 6^η ημέρα - 15/09/2017 (b) για τα W1 (1), W2 (2), W3 (3) και W4 (4), με δορυφορικά και δεδομένα ρύπανσης (5)

3.4.2 Περίπτωση 2. Σύγκριση υπολογισμών τροχιάς πετρελαιοκηλίδας για συνδυασμό δεδομένων ανέμων & ρευμάτων

Στο Σχήμα 3.12 παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη σύγκριση μεταξύ των προσομοιώσεων που χρησιμοποιούν ανέμους και θαλάσσια ρεύματα και των δεδομένων της παράκτιας ρύπανσης από τις παρατηρήσεις (Gogou et al., 2017) και τις δορυφορικές εικόνες (WWF, 2017) για την 3^η ημέρα (12/09/2017) και την 6^η ημέρα (15/09/2017) μετά την έναρξη της διαρροής πετρελαίου από το ναυάγιο. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά σύνολα δεδομένων ανέμου σε συνδυασμό με δεδομένα θαλάσσιων ρευμάτων από το HYCOM, που αναφέρονται ως σενάρια CW1, CW2 και CW3.



Σχήμα 3.12 Σύγκριση υπολογισμών (κόκκινες κουκκίδες BGS, πορτοκαλί κουκκίδες MRS) την 3^η ημέρα - 12/9/2017 (a) και 6^η ημέρα - 15/9/2017 (b) για τα CW1 (1), CW2 (2) και CW3 (3), με δορυφορικά και δεδομένα ρύπανσης (4)

Στο Σχήμα 3.12 (στήλη α), παρουσιάζεται η σύγκριση των προσομοιώσεων με τα δεδομένα ρύπανσης πεδίου και τα δορυφορικά δεδομένα για την 3^η ημέρα μετά την έναρξη της διαρροής. Όλα τα σενάρια εκτός από αυτό που χρησιμοποιεί το σύνολο δεδομένων από το μοντέλο BOLAM (Σχήμα 3.12) έδειξαν ότι η πετρελαιοκηλίδα κατευθύνθηκε και αποτέθηκε στη δυτική ακτογραμμή της Αττικής, επηρεάζοντας την περιοχή βορείως του Πειραιά. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συμφωνούν γενικά με τα δεδομένα ρύπανσης από το πραγματικό περιστατικό (Σχήμα 3.12a4).

Στο Σχήμα 3.12 (στήλη β) παρουσιάζεται η σύγκριση των προσομοιώσεων με τα δεδομένα ρύπανσης πεδίου και τα δορυφορικά δεδομένα για την 6^η ημέρα μετά την έναρξη της διαρροής. Στο Σχήμα 3.12, παρατηρούνται αρκετές ομοιότητες στα αποτελέσματα υπολογισμού για τα σενάρια αλλά και ορισμένες βασικές διαφορές. Ειδικότερα, στο Σχήμα 3.12b1 φαίνεται ότι οι περιοχές της Σαλαμίνας είναι λιγότερο ρυπασμένες σε σύγκριση με τα άλλα δύο σενάρια, ενώ οι περιοχές μεταξύ Πειραιά και Βουλιαγμένης παρουσιάζουν σοβαρή ρύπανση, η οποία δεν παρατηρείται στα άλλα δύο σενάρια. Επιπλέον, η έκταση της πετρελαιοκηλίδας ήταν μικρότερη και δεν έφτασε στις περιοχές του Λαγονησίου. Όπως αναμενόταν από την προηγούμενη ενότητα, τα σενάρια CW2 και CW3 παρουσίασαν μεγάλες ομοιότητες και είχαν σχεδόν πανομοιότυπα αποτελέσματα. Στο σενάριο CW2 τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζουν μεγαλύτερη έκταση της πετρελαιοκηλίδας, η οποία, σε λειτουργία MRS, έφτασε μέχρι την ακτογραμμή του Λαγονησίου. Ωστόσο, στη λειτουργία BGS, τα στοιχεία LEs απείχαν ακόμη 5 km από την ίδια περιοχή. Από το Σχήμα 3.12b3 προκύπτει ότι η πετρελαιοκηλίδα στο σενάριο CW3 έχει σχεδόν την ίδια έκταση με τα αποτελέσματα του σεναρίου CW2, αλλά το πετρέλαιο δεν έφτασε στην ακτογραμμή του Λαγονησίου ούτε σε λειτουργία BGS ούτε σε MRS.

Η σύγκριση μεταξύ των τριών σεναρίων CW1, CW2 και CW3 οδήγησε στο συμπέρασμα ότι το πιο αντιπροσωπευτικό ήταν το σενάριο CW2, καθώς τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι η πετρελαιοκηλίδα είχε μεγαλύτερη έκταση και το πετρέλαιο έφτασε τελικά στις ίδιες ακτογραμμές στη νοτιοδυτική Αττική όπως και στο πραγματικό περιστατικό, την 6^η μέρα.

Το συμπέρασμα αυτό υπογραμμίζει τη σημασία της εξέτασης διαφόρων συνόλων δεδομένων ανέμου και τρεχόντων δεδομένων για την αξιολόγηση των επιπτώσεων των πετρελαιοκηλίδων στο θαλάσσιο περιβάλλον και στις παράκτιες περιοχές του Σαρωνικού.

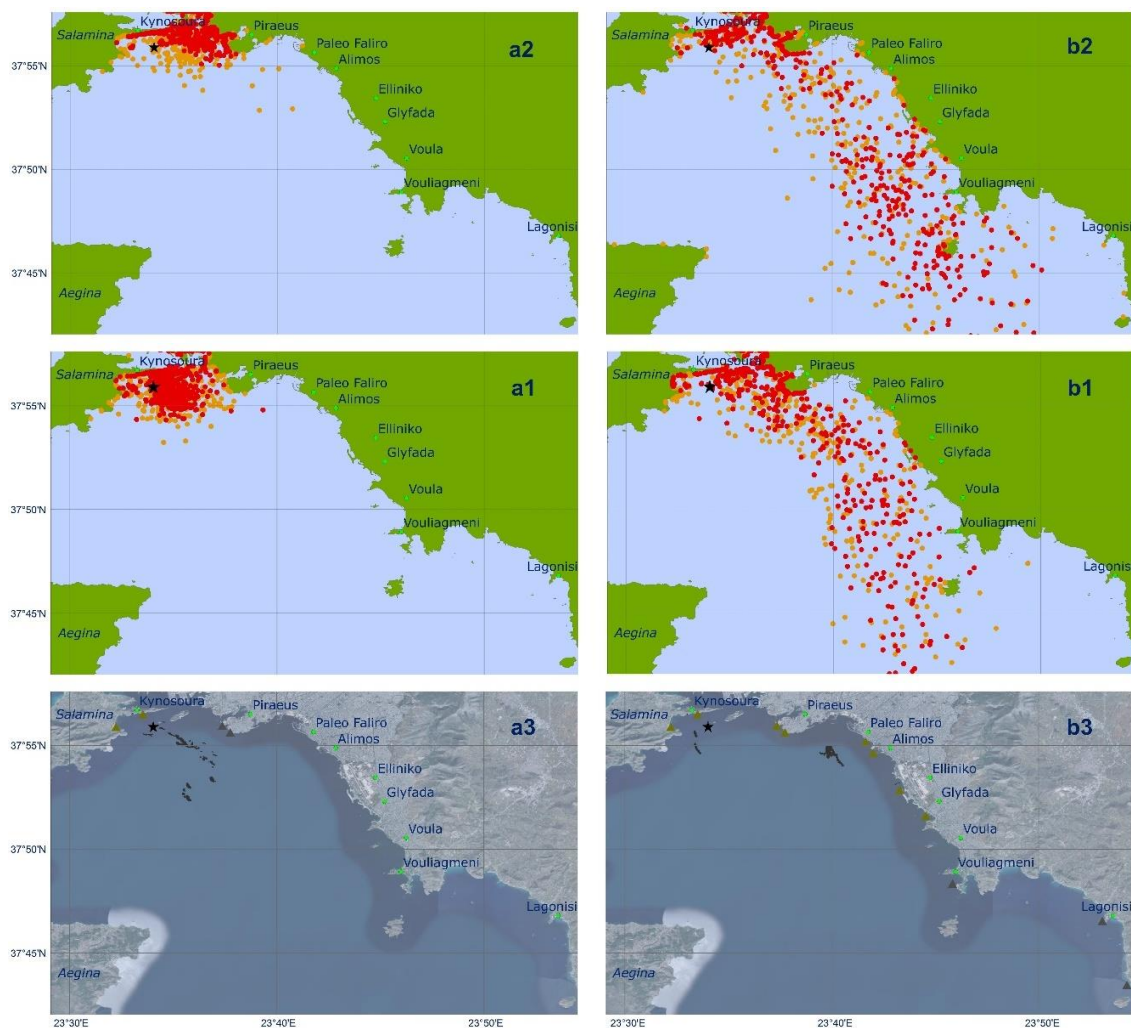
3.4.3 Περίπτωση 3. Σύγκριση υπολογισμών τροχιάς πετρελαιοκηλίδας για δεδομένα ρευμάτων

Στο Σχήμα 3.13 φαίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα σενάρια CW4 και CW2, τα οποία διεξήχθησαν για την πρόγνωση της εξέλιξης της πετρελαιοκηλίδας μετά τη βύθιση του δεξαμενόπλοιου Αγία Ζώνη II. Οι συγκρίσεις των προσομοιώσεων με τις παρατηρήσεις ρύπανσης στο πεδίο (Gogou et al., 2017) και τα δορυφορικά δεδομένα (WWF, 2017) έγιναν για την 3^η μέρα και την 6^η ημέρα μετά την έναρξη της διαρροής πετρελαίου από το ναυάγιο.

Στο Σχήμα 3.13 (στήλη α), απεικονίζεται η σύγκριση μεταξύ των προσομοιώσεων και των δεδομένων πεδίου και δορυφόρου για την 3^η ημέρα μετά την έναρξη της διαρροής πετρελαίου, είναι προφανές ότι το σενάριο CW2, στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν τόσο δεδομένα ρευμάτων όσο και δεδομένα ανέμου από το σταθμό ST2, οδήγησαν σε ευρύτερη πετρελαιοκηλίδα κατά μήκος της ακτογραμμής του Πειραιά σε σύγκριση με το σενάριο CW4, το οποίο έλαβε υπόψη μόνο τα τρέχοντα δεδομένα (Σχήμα 3.13a2). Αυτό το εύρημα είναι συνεπές με το πραγματικό περιστατικό όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.13a3.

Στο Σχήμα 3.13 (στήλη β), παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την 6^η ημέρα μετά τη βύθιση του πλοίου. Γίνεται αντιληπτό ότι οι υπολογισμοί που βασίζονται στα δεδομένα των ρευμάτων και του ανέμου από το σταθμό ST1 (Σχήμα 3.13b1) παρείχαν μια πιο ακριβή αναπαράσταση της εξέλιξης της πετρελαιοκηλίδας ως αναφορά τα πραγματικά δεδομένα δορυφόρου και πεδίου. Στο σενάριο CW2, η πετρελαιοκηλίδα κινήθηκε με κατεύθυνση νότια-νοτιοανατολικά προς τη νοτιοδυτική ακτογραμμή της

χερσονήσου της Αττικής. Εν τω μεταξύ, στο σενάριο CW4, η πετρελαιοκηλίδα κινήθηκε προς τα νότια στην κατεύθυνση Βορράς - Νότος, χωρίς να υπάρχουν ενδείξεις ότι κατευθύνεται προς την ακτογραμμή.

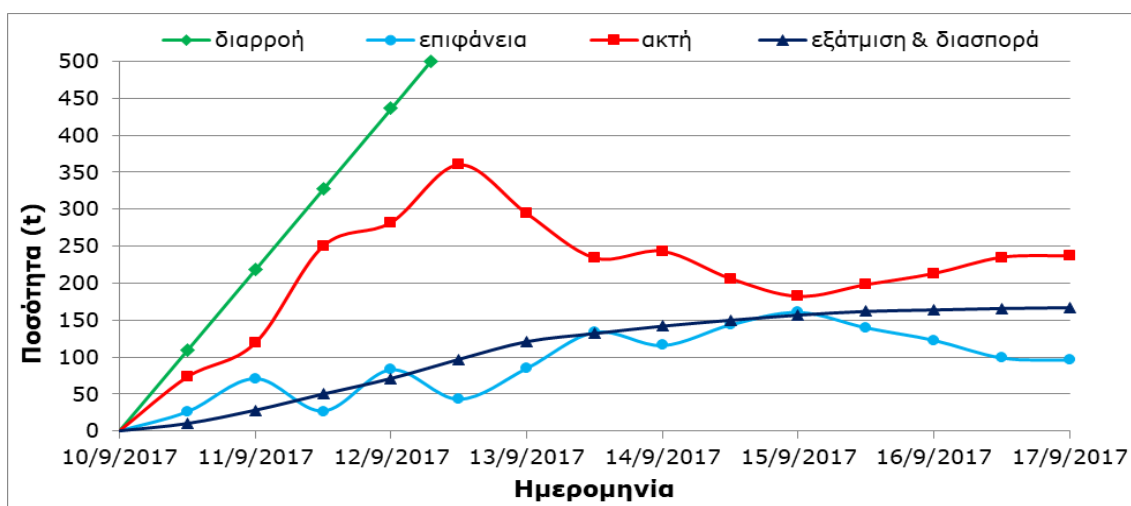


Σχήμα 3.13 Σύγκριση υπολογισμών (κόκκινες κουκκίδες BGS, πορτοκαλί κουκκίδες MRS) την 3^η ημέρα - 12/9/2017 (a) και 6^η ημέρα - 15/9/2017 (b) για τα CW2 (1) και CW4 (2), με δορυφορικά και δεδομένα ρύπανσης (3)

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, όπως παρουσιάζονται στο [Σχήμα 3.13](#), καταδεικνύουν τη σημασία και των δύο τύπων δεδομένων τόσο του ρεύματος όσο και του ανέμου για την πρόγνωση της εξέλιξης της πετρελαιοκηλίδας. Το σενάριο CW2, το οποίο έλαβε υπόψη τόσο τα δεδομένα ρεύματος όσο και τα δεδομένα ανέμου (δεδομένα ST1), είχε ως αποτέλεσμα μια πιο ακριβή αναπαράσταση της εξέλιξης της πετρελαιοκηλίδας σε σύγκριση με το σενάριο CW4, το οποίο έλαβε υπόψη μόνο τα δεδομένα των ρευμάτων. Συμπερασματικά, μπορεί να ειπωθεί ότι το CW2 ήταν το πιο αντιπροσωπευτικό σενάριο.

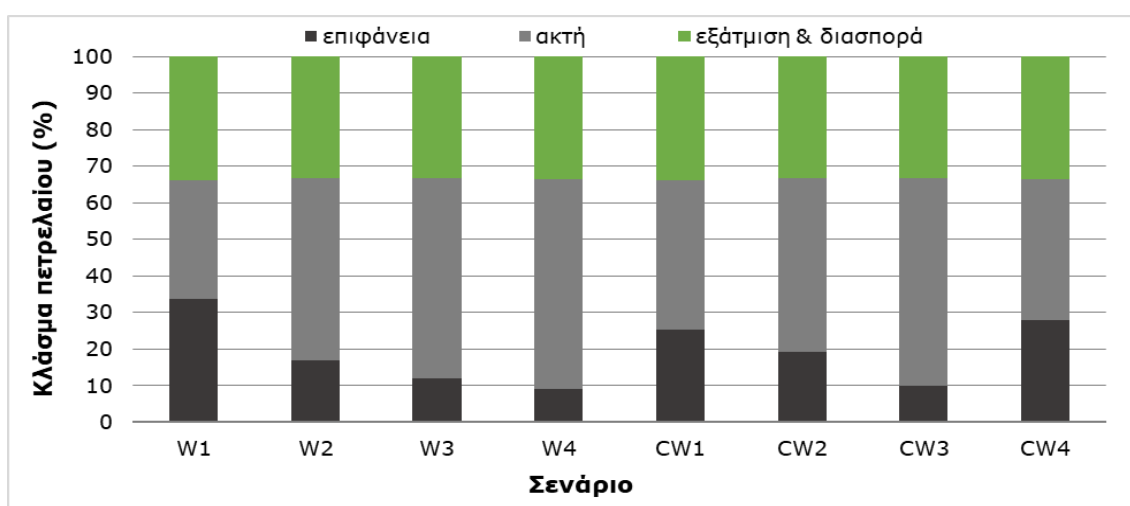
3.4.4 Ανάλυση ισοζυγίου μάζας πετρελαίου

Το μοντέλο GNOME μπορεί να εκτιμήσει το ισοζύγιο μάζας του διαρρέοντος πετρελαίου κατά την έκθεσή του στην επιφάνεια του νερού. Για να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις του πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον, υπολογίστηκαν κατά προσέγγιση οι ποσότητες του πετρελαίου που βρέθηκαν στην επιφάνεια, στις ακτές αλλά και των ποσοτήτων που εξατμίστηκαν ή/και διεσπάρησαν. Στο [Σχήμα 3.14](#) παρουσιάζεται το ισοζύγιο μάζας πετρελαίου όπως υπολογίστηκε κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, η οποία ήταν 7 ημέρες μετά την έναρξη της διαρροής, για το επιλεγμένο σενάριο CW2.



Σχήμα 3.14 Ισοζύγιο μάζας πετρελαίου κατά τις 7 ημέρες της προσομοίωσης (Πηγή: Makatounis et al., 2023)

Στο Σχήμα 3.14, είναι αξιοσημείωτη η συσχέτιση μεταξύ των ποσοτήτων του πετρελαίου που βρίσκεται στην επιφάνεια και αυτού που καταλήγει στις ακτές. Καθώς η ποσότητα του πετρελαίου που επιπλέει στο νερό μειώθηκε, η ποσότητα του πετρελαίου που βρέθηκε στις ακτές αυξήθηκε. Αργότερα, λόγω της επανεπιπλευσης του πετρελαίου, παρατηρήθηκε το αντίθετο αποτέλεσμα. Η εκτιμώμενη ποσότητα πετρελαίου που βρέθηκε στην ακτογραμμή στο τέλος της προσομοίωσης ήταν περίπου 237 t από 500 t ενώ η εκτιμώμενη ποσότητα πετρελαίου που παρέμεινε στην επιφάνεια της θάλασσας ήταν περίπου 96 t από 500 t (Σχήμα 3.14). Οι διεργασίες της εξάτμισης και της διασποράς ενεργοποιήθηκαν αμέσως μετά την έναρξη της προσομοίωσης και ο ρυθμός τους αυξανόταν γραμμικά για τις πρώτες 3 ημέρες. Στη συνέχεια ο ρυθμός αύξησής τους επιβραδύνθηκε μέχρι το τέλος της προσομοίωσης (Σχήμα 3.14). Περίπου 28 t από τους 215 t πετρελαίου που διέρρευσαν εξατμίστηκαν ή διασκορπίστηκαν κατά την πρώτη ημέρα της προσομοίωσης (11/09/2017, 01:45 h), ενώ στο τέλος της προσομοίωσης, 167 t (από 500 t) του πετρελαίου εξατμίστηκαν ή διασκορπίστηκαν (Σχήμα 3.14).



Σχήμα 3.15 Ισοζύγιο μάζας πετρελαίου στο τέλος των προσομοιώσεων (Πηγή: Makatounis et al., 2023)

Στο Σχήμα 3.15 απεικονίζονται τα αποτελέσματα του ισοζυγίου μάζας πετρελαίου στο τέλος των προσομοιώσεων για κάθε ένα από τα συγκεκριμένα σενάρια. Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν μια αξιοσημείωτη διαφορά μεταξύ των διαφόρων σεναρίων όσον αφορά την ποσότητα του πετρελαίου που κατέληξε στην ακτογραμμή, με εύρος από 32,4% έως 57,2% για τα σενάρια W1 και W4, αντίστοιχα. Αυτή η σημαντική διακύμανση αντανακλάται επίσης

στην ποσότητα πετρελαίου που παρέμεινε στην επιφάνεια του νερού, με εύρος από 9,2%, για το σενάριο W4, έως 32,8% για το σενάριο W1. Αυτό το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο καθώς υπάρχει μία συσχέτιση στο μοντέλο GNOME, μεταξύ του πετρελαίου που καταλήγει στην ακτή και του πετρελαίου που παραμένει στην επιφάνεια της θάλασσας (Zelenke et al., 2012b). Τέλος, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι υπολογισμένες ποσότητες εξατμισμένου και διασκορπισμένου πετρελαίου σε όλα τα σενάρια είναι σχεδόν ταυτόσημες και κυμαίνονται από 33,4% έως 33,8% (ή 167-169 t) του συνολικού πετρελαίου που διέρρευσε.

3.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Οι προσομοιώσεις και οι ενδεικτικές συγκρίσεις που παρουσιάζονται στις Ενότητες 3.4.1 και 3.4.2 οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι προσομοιώσεις MRS με τη χρήση μόνο δεδομένων ανέμου έδειξαν μια μη ικανοποιητική συμφωνία με τα δεδομένα πεδίου, ανεξάρτητα από την πηγή των δεδομένων, δηλ. αν προέρχονται από μετεωρολογικούς σταθμούς ή από μοντέλο (π.χ., BOLAM). Αυτή η διαφωνία είναι ακόμη χειρότερη όταν χρησιμοποιούνται δεδομένα από σταθμούς που βρίσκονται μακριά από την περιοχή μελέτης.

Το καλύτερο σενάριο, δηλ. το σενάριο που έδειξε την πιο ικανοποιητική συμφωνία με τα δεδομένα πεδίου είναι το CW2. Αυτό το σενάριο χρησιμοποιεί δεδομένα ανέμου από ένα από τους πλησιέστερους σταθμούς (ST1) και δεδομένα ρευμάτων που υπολογίζονται με τη χρήση του μοντέλου HYCOM.

Ωστόσο, σημειώνεται ότι αν και το HYCOM έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορες μελέτες πετρελαιοκηλίδας, ένα υδροδυναμικό μοντέλο με υψηλότερη ανάλυση κοντά στην ακτογραμμή που περιγράφει την τοπική κυκλοφορία με μεγαλύτερη ακρίβεια, όπως το NEMO (Nucleus for European Modeling of the Ocean)¹¹ πιθανότατα θα είχε οδηγήσει σε καλύτερη συμφωνία με τα δεδομένα πεδίου.

Επιπλέον, οι προσομοιώσεις BGS έδειξαν σημαντικά μικρότερη έκταση της πετρελαιοκηλίδας από την πραγματική, πρακτικά για όλα τα σενάρια και η πετρελαιοκηλίδα δεν κατέληξε σε όλη την ακτογραμμή από τον Πειραιά έως Λαγονήσι.

Αντιθέτως, αυτό επιτεύχθηκε σε όλα τα σενάρια MRS με τη χρήση της προεπιλεγμένης τιμής του συντελεστή διάχυσης (που γενικά θεωρείται ως υψηλή), συμπεριλαμβανομένου του καλύτερου σεναρίου.

Γενικά, η έκταση της παρατηρούμενης πετρελαιοκηλίδας μετά τις πρώτες 3-6 ημέρες με βάση δορυφορικά δεδομένα είναι πολύ μικρότερη από την προσομοίωση, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στο ότι την πρώτη μέρα μετά τη βύθιση περίπου 600 m φραγμάτων είχαν εφαρμοστεί για τον περιορισμό της περιοχής της πετρελαιοκηλίδας στην ανοιχτή θάλασσα, σχετικά μακριά από την ακτογραμμή.

Ωστόσο, αυτή η ενέργεια περιορισμού δεν ήταν πλήρως επιτυχής, καθώς τα δεδομένα του πεδίου έδειξαν ότι η πετρελαιοκηλίδα έφτασε τελικώς στην ακτή. Αυτή η ενέργεια καθαρισμού δεν μπορούσε να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς του GNOME. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η έκταση που καλύπτει η προσομοιωμένη πετρελαιοκηλίδα για το καλύτερο σενάριο την 7^η ημέρα είναι πολύ παρόμοια σε αυτό που υπολογίστηκε από τους Coppini et al. (2018), οι οποίοι πραγματοποίησαν πρόγνωση της τροχιάς της πετρελαιοκηλίδας με χρήση POSEIDON OSM (βλ. Zodiatis et al., 2016).

Επιπλέον, η υπολογιζόμενη από το GNOME ποσότητα του πετρελαίου που κατέληξε στις ακτές το πρωί της 7^{ης} ημέρας ήταν ίση με 42,6% της συνολικής ποσότητας που διέρρευσε, ποσοστό που πλησιάζει στην τιμή (40,8%) που υπολογίστηκε από τους Coppini et al. (2018).

¹¹ https://data.marine.copernicus.eu/product/MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004/description

3.6 Συμπέρασμα - Απάντηση σε ερευνητικό ερώτημα

Στο πρώτο ερευνητικό ερώτημα αναφορικά με την επίδραση της μεθόδου προσδιορισμού των παράκτιων ρευμάτων στην υπολογιζόμενη τροχιά της πετρελαιοκηλίδας, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα:

1. Όσον αφορά το ερευνητικό ερώτημα, με βάση την ανάλυση που παρουσιάστηκε ανωτέρω, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η χρήση των ανέμων ως αποκλειστικών δεδομένων προσδιορισμού των παράκτιων ρευμάτων στο μοντέλο πετρελαιοκηλίδας, και συγκεκριμένα στο GNOME, μπορεί να είναι ανεπαρκής για την αναπαραγωγή της τροχιάς πετρελαιοκηλίδας από μια επιφανειακή διαρροή πετρελαίου σε παράκτιες περιοχές της Ελλάδας, όπως ο Σαρωνικός.
2. Επίσης, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τη χρήση μόνο ρευμάτων ως δεδομένα προσδιορισμού των παράκτιων ρευμάτων δεν απέδωσαν το πραγματικό περιστατικό στην πλήρη έκταση του, παρότι είχαν καλύτερη αναπαραγωγή του περιστατικού σε σχέση με τα αποτελέσματα με τη χρήση μόνο των ανέμων.
3. Τέλος, κατά τη διερεύνηση της συγκεκριμένης περίπτωσης, η μέθοδος που απέδωσε με τη μεγαλύτερη ακρίβεια, εν συγκρίσει με τις άλλες δύο, ήταν ο προσδιορισμός των παράκτιων ρευμάτων με χρήση και των ανέμων από σταθμό αλλά και των ρευμάτων από το υδροδυναμικό μοντέλο.

Οπότε για τη διεξαγωγή προσομοιώσεων που αντιπροσωπεύουν με ακρίβεια τη συμπεριφορά της διαρροής, κρίνεται αναγκαία η χρήση και των 2 τύπων δεδομένων, τουλάχιστον σε περιστατικά με αντίστοιχες παραμέτρους και παρόμοια τοπογραφία και βαθυμετρία.

Σημαντικό εύρημα της παρούσας διερεύνησης αποτελούν οι 2 περιορισμοί που ανέκυψαν (βλ. επίσης [Gurumoorthi et al., 2021](#)) και είναι οι ακόλουθοι:

1. Τα θαλάσσια ρεύματα από το HYCOM ενδέχεται να μην είναι ρεαλιστικά στην παράκτια περιοχή λόγω των χαρακτηριστικών του.
2. Οι προσομοιώσεις GNOME δεν λαμβάνουν υπόψη την επίδραση των φραγμάτων περιορισμού.

Συμπερασματικά, ένα μοντέλο πετρελαιοκηλίδας που εξετάζει την επίδραση της χρήσης μέσω αντιστάθμισης, σε συνδυασμό με ένα υδροδυναμικό μοντέλο υψηλότερης ανάλυσης κοντά στην ακτογραμμή που περιγράφει την τοπική κυκλοφορία με μεγαλύτερη ακρίβεια, όπως το NEMO, θα οδηγούσε πιθανώς σε καλύτερη συμφωνία με τα δεδομένα πεδίου.

4 Διερεύνηση της επίδρασης της επιλογής μεθόδου επιφανειακής αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδας στη ρύπανση περιβαλλοντικά ευαίσθητων περιοχών

4.1 Ερευνητικό ερώτημα

Ποια είναι η επίδραση των καιρικών συνθηκών διαφορετικών εποχών στο στοχαστικό αποτέλεσμα της ρύπανσης περιβαλλοντικά προστατευόμενων περιοχών κατά τη διάρκεια μιας διαρροής πετρελαίου εξαιτίας ατυχήματος σε μικρό/ενδιάμεσο βάθος και πώς η χρήση μεθόδων επιφανειακής αντιμετώπισης και συγκεκριμένα της μηχανικής ανάκτησης και της επιφανειακής εφαρμογής χημικών διασποράς επηρεάζει το μέγεθος των επιπτώσεων στα πτηνά και τους ιχθύες;

4.2 Εισαγωγή - Βιβλιογραφική διερεύνηση

Για την διερεύνηση του ερευνητικού ερωτήματος που αναφέρθηκε παραπάνω, επιλέχθηκε ο Πατραϊκός Κόλπος ως τοποθεσία για την προσομοίωση μιας σειράς υποθετικών πετρελαιοκηλίδων με τη χρήση μοντέλου προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδων. Ο Πατραϊκός Κόλπος είναι μέρος του Ιονίου συστήματος, το οποίο είναι ένα από τα τρία μεγάλα πετρελαϊκά συστήματα στη Δυτική Ελλάδα (Karakitsios, 2013). Οι προκαταρκτικές σεισμικές έρευνες στον Πατραϊκό Κόλπο έχουν εντοπίσει ενδιαφέρουσες γεωλογικές δομές επιρρεπείς σε πετρέλαιο με τα ανακτήσιμα αποθέματα να υπολογίζονται περίπου στα 200 MMbbls¹². Η τελική και λεπτομερής σεισμική έρευνα και εκμετάλλευση αναμένεται να περατωθεί σύντομα από τον όμιλο εταιρειών που ανέλαβε τη σχετική σύμβαση (EE, 2015). Δεδομένου ότι οι θέσεις γεώτρησης βρίσκονται κοντά σε παράκτιες περιοχές υψηλής ευαισθησίας και περιβαλλοντικά προστατευμένες, όπως οι λιμνοθάλασσες Μεσολογγίου και Αιτωλικού, μια διαρροή πετρελαίου λόγω πιθανού ατυχήματος μπορεί να προκαλέσει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Beyer et al., 2016; Goovaerts et al., 2016; Hester et al., 2016).

Επομένως, είναι σημαντικό να εκτιμηθούν εκ των προτέρων αυτές οι επιπτώσεις και να καθοριστούν οι κατάλληλες μέθοδοι αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδας για τη διαχείρισή της (αποφυγή ή μείωση). Αυτή η εκτίμηση μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός μοντέλου πετρελαιοκηλίδας (OSM) που μελετά τη συμπεριφορά μιας πετρελαιοκηλίδας, δηλ. την τροχιά και τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις, από τις οποίες μπορούν να εκτιμηθούν η πιθανότητα μόλυνσης και ο χρόνος άφιξης στις περιοχές ενδιαφέροντος (Hellenic Center of Marine Research (HCMR), 2012) και η επίδραση των εφαρμοζόμενων μεθόδων αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων.

Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 1.8.4, γενικά, υπάρχουν δύο κύριοι τύποι εφαρμογών των OSM, οι οποίοι περιγράφονται παρακάτω.

Ο πρώτος τύπος ασχολείται με τον προσδιορισμό των χαρτών πιθανότητας ρύπανσης λόγω πετρελαιοκηλίδας στις περιοχές ενδιαφέροντος. Για να δημιουργηθούν ακριβείς χάρτες, πρέπει να ληφθεί υπόψη η στοχαστική φύση της συμπεριφοράς της πετρελαιοκηλίδας μέσω του ορισμού πολλαπλών περιόδων (ή εποχών) μελέτης ανά έτος και πολλαπλών τοποθεσιών διαρροής για να εκτελεστούν οι λεγόμενες «στοχαστικές» προσομοιώσεις για επαρκή χρονική περίοδο (Alves et al., 2015; De Dominicis et al., 2013a; Goldman et al., 2015; Melaku Canu et al., 2015).

Στον δεύτερο τύπο εφαρμογής, μελετώνται τα λεπτομερή χαρακτηριστικά συμπεριφοράς μιας συγκεκριμένης πετρελαιοκηλίδας ή/και η αποτελεσματικότητα των διαθέσιμων μεθόδων αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων (Alves et al., 2016), αλλά και για σκοπούς σύγκρισης μοντέλων (Socolofsky et al., 2015). Σε τέτοιες περιπτώσεις, εκτελούνται οι λεγόμενοι «ντετερμινιστικοί» υπολογισμοί για μία μόνο πετρελαιοκηλίδα για μια

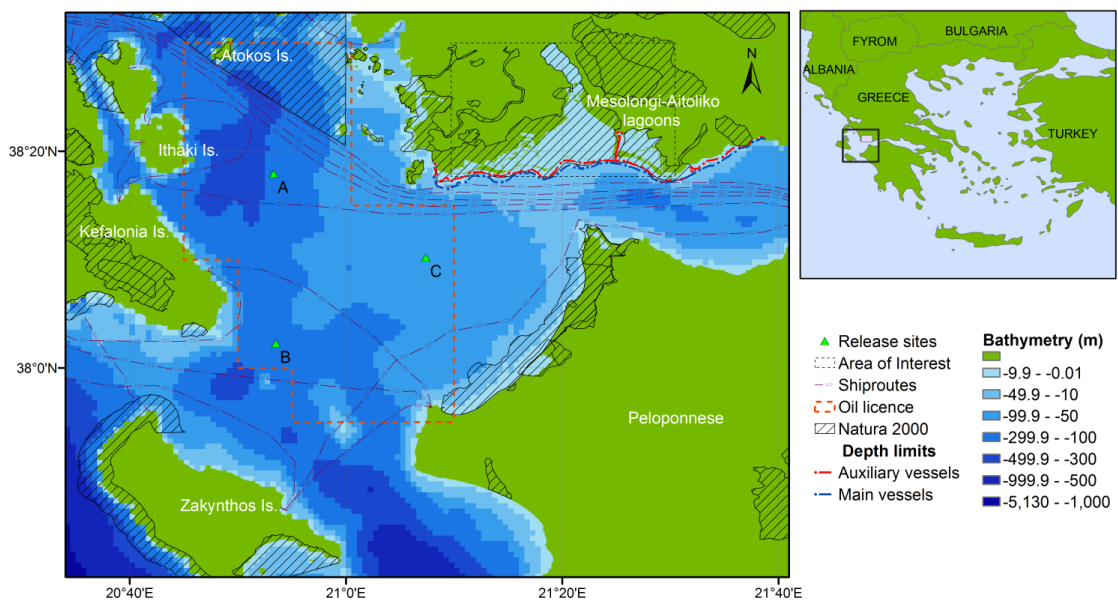
¹² <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=766&locale=en-US&language=el-GR>

συγκεκριμένη περίοδο με συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες και συνθήκες θαλάσσιας κυκλοφορίας.

Σε αυτό το κεφάλαιο, εφαρμόζεται μια μεθοδολογία υπολογισμών με χρήση μοντέλων που συνδυάζει στοχαστικές και ντετερμινιστικές προσομοιώσεις πετρελαιοκηλίδας χρησιμοποιώντας το μοντέλο πετρελαιοκηλίδας OSCAR (Daling et al., 1990; Reed et al., 1995a; Reed et al., 1995b; Reed et al., 2000; Reed and Hetland, 2002), με σκοπό: (i) την εκτίμηση της πιθανότητας ρύπανσης από πετρέλαιο του Πατραϊκού Κόλπου και των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων στις παράκτιες λιμνοθάλασσες Μεσολογίου – Αιτωλικού και (ii) την εξέταση της αποτελεσματικότητας των διαθέσιμων μεθόδων αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων.

4.3 Μεθοδολογία

4.3.1 Περιοχή υπολογισμών



Σχήμα 4.1 Περιοχή υπολογισμών

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις πετρελαιοκηλίδας στην περιοχή διερεύνησης 100 km x 100 km, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Ο Πατραϊκός κόλπος περιβάλλεται από τα νησιά Κεφαλονιά, Ιθάκη, Ζάκυνθο και Λευκάδα (δεν φαίνεται στο Σχήμα 4.1) στη δυτική πλευρά του και την ηπειρωτική Ελλάδα στα ανατολικά. Στην περιοχή διερεύνησης βρίσκονται πολυάριθμες τουριστικές εγκαταστάσεις, ζώνες αλιείας καθώς και περιβαλλοντικά προστατευμένες περιοχές. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι, ο υγρότοπος της Στροφυλιάς (δυτική ακτή της Πελοποννήσου), η παραλία του Λαγανά (νότια ακτή της Ζακύνθου), όπου οι θαλάσσιες χελώνες καρέτα-καρέτα (*Caretta-Caretta*) μεταναστεύουν για να γεννήσουν τα αυγά τους το καλοκαίρι, ο υγρότοπος του Πεταλά (δυτική ακτή της Πελοποννήσου) και οι λιμνοθάλασσες Μεσολογίου - Αιτωλικού (η συνολική έκταση των λιμνοθαλασσών είναι ίση με 170 km² και ο συνολικός όγκος είναι περίπου 0,17 km³), που αποτελούν την περιοχή διερεύνησης.

Αυτό το σύστημα λιμνοθαλασσών αποτελεί μέρος ενός εκτεταμένου υγροτοπικού συγκροτήματος στη βόρεια περιοχή του Πατραϊκού Κόλπου (Σχήμα 4.1) που προστατεύεται βάσει της διεθνούς σύμβασης RAMSAR για τους υγροτόπους¹³.

Η λιμνοθάλασσα του Αιτωλικού, στα βόρεια, έχει μέσο βάθος 12 m και μέγιστο βάθος 33 m (Leftheriotis et al., 2013). Τα κάτω στρώματά της είναι μόνιμα ανοξικά λόγω της

¹³ <http://www.ramsar.org/wetland/greece>

περιορισμένης κυκλοφορίας του νερού, ενώ περιστασιακά, η υδάτινη κυκλοφορία από τα βάθη στην επιφάνεια προκαλεί ολική ανοξία, με αποτέλεσμα τη μαζική θνησιμότητα υδρόβιων οργανισμών (Gianni et al., 2011).

Η λιμνοθάλασσα του Μεσολογγίου έχει μέσο βάθος 0,5 m, ενώ το μέγιστο βάθος της είναι περίπου 2,5 m (Leftheriotis et al., 2013). Η ανθρώπινη παρέμβαση έχει αλλοιώσει σοβαρά τα γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής Μεσολογγίου-Αιτωλικού (Greek Ministry of Environment, 1998), καθώς έχουν προκληθεί επιδράσεις στους βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες του οικοσυστήματος. Ωστόσο, μοναδικά χαρακτηριστικά των εκβολικών οικοσυστημάτων, όπως αμμόλοφοι, αλμυροί βάλτοι, εξακολουθούν να υπάρχουν παρέχοντας καταφύγιο σε διάφορα είδη.

Η λιμνοθάλασσα είναι πολύ σημαντική για τα αποδημητικά πτηνά που διαχειμάζουν όπως επίσης και για την αναπαραγωγή πτηνών, καθώς έχουν παρατηρηθεί στην περιοχή κατά τη διάρκεια του έτους περισσότερα από 280 διαφορετικά είδη (Greek Ministry of Environment, 1998). Η βλάστηση της περιοχής περιλαμβάνει σπάνια και απειλούμενα είδη. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες περιλαμβάνουν την εκτεταμένη αλιεία και την ιχθυοκαλλιέργεια. Οι ιχθύες μπορούν γενικά να χωριστούν σε αυτούς που περνούν ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους στη λιμνοθάλασσα και σε αυτούς που γεννούν στην ανοιχτή θάλασσα και εισέρχονται στη λιμνοθάλασσα για να βρουν τροφή και καταφύγιο (Nikolaidou et al., 2005).

4.3.2 Μεθοδολογία υπολογισμών

Στην παρούσα ενότητα, περιγράφεται και εφαρμόζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία σε μια σειρά 9 βημάτων.

Βήμα 1. Προσδιορισμός του υπολογιστικού τομέα και των κύριων περιοχών ενδιαφέροντος. Το υπολογιστικό πεδίο του OSCAR καλύπτει την περιοχή διερεύνησης όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Χρησιμοποιήθηκαν 11 στρώματα στην κατακόρυφη κατεύθυνση με τα εξής βάθη νερού: 0,0-3,0 m, 3,0-8,0 m, 8,0-13,0 m, 13,0-18,0 m, 18,0-25,0 m, 25,0-40,0 m, 40,0-65,0 m, 65,0-115,0 m, 115,0-125,0 m, 225-475,0 m και 475,0-825,0 m.

Η οριζόντια ανάλυση ίση με 100 m X 100 m, που οδήγησε σε συνολικό αριθμό κελιών επιφάνειας που ισούνται με περίπου 10^6 . Η βαθυμετρία της περιοχής λήφθηκε από την Ψηφιακή Βαθυμετρική Βάση Δεδομένων του Ναυτικού των ΗΠΑ (U.S. Navy Digital Bathymetric Data Base, DBDB1), με ονομαστική ανάλυση $0,017^\circ$, με διγραμμική παρεμβολή μέσω της εφαρμογής του μοντέλου ωκεάνιας κυκλοφορίας που περιγράφεται συνοπτικά στο βήμα 3. Η κύρια περιοχή ενδιαφέροντος αφορά τις περιβαλλοντικά ευαίσθητες παράκτιες λιμνοθάλασσες Μεσολογγίου – Αιτωλικού όπως φαίνονται και στο Σχήμα 4.1.

Βήμα 2. Προσδιορισμός των θέσεων γεώτρησης και των χαρακτηριστικών διαρροής πετρελαίου. Επί του παρόντος, δεν υπάρχει νομικό πλαίσιο στην Ελλάδα για τη χωροθέτηση υπεράκτιων δραστηριοτήτων εξόρυξης πετρελαίου. Επιπλέον, δεν υπάρχουν πληροφορίες για τις πιθανές θέσεις των κοιτασμάτων. Ως εκ τούτου, προσδιορίστηκαν σε προκαταρκτικό επίπεδο, οι θέσεις γεώτρησης A, B και C όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.1, οι οποίες βρίσκονται μακριά από μια ζώνη ασφαλείας 5 km από διαδρομές πλοίων, ακτές και προστατευόμενες περιοχές. Δεδομένου ότι τα αντίστοιχα βάθη θαλασσινού νερού στις τοποθεσίες A, B και C είναι 130 m, 177 m και 70 m, αντίστοιχα, αναμένεται ότι το πλούμιο του πετρελαίου θα αναδυθεί γρήγορα στην επιφάνεια χωρίς να παγιδευτεί στη στήλη του νερού.

Επιπλέον, δεδομένου ότι οι υπεράκτιες γεωτρήσεις δεν έχουν ξεκινήσει ακόμη, δεν υπάρχουν πληροφορίες για την πιθανή διαρροή και τα χαρακτηριστικά του πετρελαίου. Επομένως, στους υπολογισμούς, έγιναν οι υποθέσεις ότι η θερμοκρασία του πετρελαίου είναι ίση με 60°C , η διάμετρος της διαρροής είναι ίση με 0,3 m και ο ρυθμός ροής είναι ίσος με $10.000 \text{ m}^3/\text{d}$. Αυτή η τιμή του ρυθμού ροής αναφέρεται στη μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων από το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών (HCMR, 2012) και είναι πρακτικά ίση με τον ρυθμό ροής της εκρήξεως Deepwater Horizon (μέσος ρυθμός ροής = $8.400 \text{ m}^3/\text{d}$),

αλλά με πολύ μικρότερη διάρκεια διαρροής (McNutt et al., 2012; Zhao et al., 2015). Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν τα χαρακτηριστικά του πετρελαίου Oseberg Blend, που είναι ελαφρύ παραφινικό πετρέλαιο με API ίσο με 37,2°, ειδικό βάρος ίσο με 0,839 g/cm³ και χαμηλό ιξώδες (5 cP στους 40°C).

Οι χαρακτηριστικές διαμέτροι της αρχικής κατανομής μεγέθους σταγονιδίων πετρελαίου υπολογίστηκαν, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο που χρησιμοποιεί την τροποποιημένη κλίμακα Weber (Johansen et al., 2013), ίσες με $D_{95} = 7,8$ mm και $D_{max} \approx 11,2$ mm. Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται μεν στη μελέτη του Hinze (1955) αλλά, περιλαμβάνει επίσης πρόσθετους όρους που λαμβάνουν υπόψη τις ιδιότητες του πετρελαίου (κυρίως το ιξώδες), τις μικτές διαρροές πετρελαίου και αερίου και την αυξημένη ταχύτητα διαρροής λόγω της ύπαρξης αερίου που καθορίζει την κίνηση. Η επαλήθευση του έγινε μέσω εκτεταμένων εργαστηριακών δοκιμών (Brandvik et al., 2013; Brandvik et al., 2017).

Η διάρκεια της διαρροής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η έκταση της ζημιάς και η διαθεσιμότητα προσωπικού και εξοπλισμού για την κάλυψη του φρεατίου (well). Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν τέτοιες πληροφορίες, έγινε η παραδοχή ότι μια διάρκεια 5 ημερών πριν κλείσει το πηγάδι ή γενικά τον έλεγχο της διαρροής, είναι ικανοποιητική. Επομένως, η συνολική ποσότητα της διαρροής ήταν ίση με 50.000 m³ (42.236 t).

Βήμα 3. Επιλογή των περιόδων προσομοίωσης και συλλογή δεδομένων καιρού και θαλασσιών ρευμάτων. Εξετάστηκε μια σειρά μετεωρολογικών δεδομένων 13 ετών, κυρίως των συνθηκών ανέμου (HCMR, 2012), και (i) επιλέχθηκε το έτος 2015 ως το πιο αντιπροσωπευτικό και (ii) ορίστηκαν τρεις τυπικές εποχιακές καιρικές διακυμάνσεις σε αυτήν την περιοχή που είναι: (1) άνοιξη (15/3-14/5), (2) καλοκαίρι (28/6-27/8), και (3) χειμώνας (1/11-31/12). Για αυτές τις περιόδους, λήφθηκαν (i) ωριαία δεδομένα για την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου στα 10 m, από το μοντέλο πρόγνωσης καιρού SKIRON και (ii) δεδομένα ρευμάτων από το μοντέλο κυκλοφορίας Southern Adriatic - Northern Ionian Sea 2 (SANI2) μέσω OPenDAP server (Open-source Project for a Network Data Access Protocol). Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς με το μοντέλο πετρελαιοκηλίδας OSCAR (βλ. βήματα 5-9).

Το SKIRON είναι ένα μοντέλο ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας που καλύπτει την περιοχή της Μεσογείου και μέρος της Κεντρικής Ευρώπης. Αναπτύχθηκε από την Ομάδα Ατμοσφαιρικής Μοντελοποίησης και Πρόγνωσης Καιρού του Πανεπιστημίου Αθηνών στο πλαίσιο των έργων SKIRON και Mediterranean Dust Experiment (Kallos et al., 1997). Το SKIRON παρέχει οριζόντια ανάλυση 0,05° και εφαρμόζεται μέσω του καθορισμού των αρχικών και οριακών συνθηκών με τη χρήση του Παγκόσμιου Συστήματος Πρόγνωσης (Global forecasting system, GFS) από τα Εθνικά Κέντρα Περιβαλλοντικών Προγνώσεων (National centers for environmental prediction, NCEP), το οποίο είναι χαμηλής ανάλυσης (0,5°).

Το SANI2 καλύπτει τη νότια Αδριατική και το Ιόνιο Πέλαγος, δημιουργήθηκε από το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ) στο πλαίσιο του έργου IONIO και επικυρώθηκε με δεδομένα πεδίου για την περίοδο 2008-2012 σε τέσσερις γεωγραφικές περιοχές, τη Νότια Αδριατική, το Στενό του Οτράντο, το Βόρειο και το Νότιο Ιόνιο (Kassis et al., 2017). Το SANI2 έχει οριζόντια ανάλυση 0,02° και 25 επίπεδα σίγμα στον Z άξονα με λογαριθμική κατανομή κοντά στην επιφάνεια και τον πυθμένα και βασίζεται στο μοντέλο Princeton Ocean Model (POM).

Το μοντέλο SANI2 λαμβάνει ως αρχικές συνθήκες, τις ωριαίες επιφανειακές ροές ορμής, θερμότητας, μικρού και μεγάλου κύματος ακτινοβολίας και κατακρημνίσεων που παρέχονται από το μέσης κλίμακας ατμοσφαιρικό μοντέλο Poseidon/Eta υψηλής ανάλυσης (0,05°) (Papadopoulos et al., 2002). Οι πλευρικές οριακές συνθήκες για την ταχύτητα των θαλάσσιων ρευμάτων, τη θερμοκρασία και την αλατότητα καθορίζονται από τα πεδία ανάλυσης που παρέχονται από το Μεσογειακό Κέντρο Παρακολούθησης και Πρόγνωσης (Mediterranean Monitoring and Forecasting Centre, Med-MFC) μέσω της Υπηρεσίας Παρακολούθησης Θαλάσσιου Περιβάλλοντος Copernicus (Copernicus Marine Environment Monitoring Service, CMEMS) (Clementi et al., 2017).

Βήμα 4. Προσδιορισμός των ειδών ενδιαφέροντος και εκτίμηση των χαρακτηριστικών τους. Για να εκτιμηθεί η περιβαλλοντική ζημιά στις λιμνοθάλασσες από πιθανή πετρελαιοκηλίδα, πρέπει να εντοπιστούν τα πιο σημαντικά και ευαίσθητα είδη στις περιοχές ενδιαφέροντος που αναμένεται να επηρεαστούν από την πετρελαιοκηλίδα, καθώς και ο βαθμός ανοχής τους στην τοξικότητα του πετρελαίου. Με βάση τις πολύ περιορισμένες πληροφορίες της σχετικής βιβλιογραφίας, εντοπίστηκαν δύο κύρια είδη στις περιοχές ενδιαφέροντος που είναι η (Ευρασιατική) Φαλαρίδα (*Fulica Atra*) και το Μεσογειακό Λωριδόψαρο (*Aphanius Fasciatus*), το οποίο περιλαμβάνεται στην κόκκινη λίστα για τα απειλούμενα είδη της IUCN (International Union for Conservation of Nature)¹⁴.

Η φαλαρίδα είναι ένα υδρόβιο πτηνό που κατοικεί σε ακίνητα ή ρηχά νερά χαμηλής τύρβης, λίμνες, λιμνοθάλασσες, ανοιχτά έλη και σε δέλτα ποταμών, είναι παμφάγο και φωλιάζει σε εμπόδια που εξέχουν από το νερό. Οι πληθυσμοί που ζουν στη βόρεια Ευρώπη και την Ασία είναι μεταναστευτικοί, ενώ εκείνοι που ζουν σε πιο εύκρατα κλίματα είναι μόνιμοι¹⁵. Στο Μεσολόγγι έχουν καταμετρηθεί περίπου 15500 διαχειμάζοντα άτομα¹⁶ κατά τους χειμερινούς μήνες (Νοέμβριο έως Φεβρουάριο)¹⁷. Για να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις της πετρελαιοκηλίδας, λήφθηκε η παραδοχή ότι μπορεί να προκληθεί ζημιά στο πτηνό, όταν το πάχος του πετρελαίου στην επιφάνεια της θάλασσας είναι μεγαλύτερο από 0,01 mm (French-McCay, 2009). Αυτή η βλάβη προκαλείται λόγω της άμεσης επαφής με το πετρέλαιο που καταστρέφει τις μονωτικές ιδιότητες του φτερώματος τους ή μέσω της κατάποσης πετρελαίου που μπορεί να οδηγήσει σε βλάβες στους πνεύμονες, το ήπαρ και τους νεφρούς, που συχνά οδηγεί σε θάνατο (Fitzpatrick et al., 2000).

Το λωριδόψαρο είναι ένα βενθοπελαγικό είδος ιχθύος που μπορεί να βρεθεί στις ακτές της κεντρικής και ανατολικής Μεσογείου και κατοικεί σε ρηχές και απομονωμένες περιοχές, όπως λιμνοθάλασσες και αλμυρά έλη. Το συγκεκριμένο είδος μπορεί να ανεχθεί υψηλή αλατότητα και περνά ολόκληρο τον κύκλο ζωής του σε ρηχά νερά χωρίς να μεταναστεύει στην ανοιχτή θάλασσα για να γεννήσει (Leonardos and Sinis, 1997).

Για να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις της πετρελαιοκηλίδας στο λωριδόψαρο, έγινε υπόθεση ότι η πετρελαιοκηλίδα είναι τοξική για το λωριδόψαρο, όταν η συγκέντρωση του πετρελαίου είναι μεγαλύτερη από 10 ppm. Η παραδοχή αυτή βασίστηκε στις διαθέσιμες τιμές της Προβλεπόμενης Συγκέντρωσης Επίδρασης (Predicted Effective Concentration, PEC) για βενθοπελαγικά είδη που ζουν σε λιμνοθάλασσες και στη σχετική βιβλιογραφία όπως η μελέτη των Malins and Hodgins (1981).

Λόγω της έλλειψης σχετικών δεδομένων, έγινε η απλουστευμένη παραδοχή ότι οι πληθυσμοί της φαλαρίδας και του λωριδόψαρου βρίσκονται ομοιόμορφα κατανομημένοι στην επιφάνεια και στον όγκο των λιμνοθαλασσών, αντίστοιχα, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Βήμα 5. Διεξαγωγή στοχαστικών υπολογισμών και ανάλυση πιθανότητας ρύπανσης πετρελαίου. Πραγματοποιήθηκαν στοχαστικές προσομοιώσεις πετρελαίου χρησιμοποιώντας το μοντέλο πετρελαιοκηλίδας OSCAR για να προσδιοριστεί η πιθανότητα ρύπανσης διαφορετικών περιοχών από πετρέλαιο. Το μοντέλο OSCAR προσομοιώνει τη συμπεριφορά του πετρελαίου που απελευθερώνεται στη θάλασσα είτε από στιγμιαία είτε από συνεχή πηγή (Daling et al., 1990; Reed et al., 1995a; Reed et al., 1995b; Reed et al., 2000; Reed and Hetland, 2002).

Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις διεργασίες γήρανσης που επηρεάζουν το πετρέλαιο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μιας τυχαίας διαρροής πετρελαίου, καθώς και της αποτελεσματικότητας διαφόρων μεθόδων αντιμετώπισης. Στο OSCAR λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθες διεργασίες γήρανσης: η μετατόπιση, η εξάπλωση, η εξάτμιση, η φωτο-οξειδωση, η γαλακτωματοποίηση, η φυσική

¹⁴ <http://www.iucnredlist.org/details/1847/0>

¹⁵ <http://www.birdlife.org/datazone/species/factsheet/22692913>

¹⁶ http://ornithologiki.gr/page_iba.php?aID=92

¹⁷ <http://www.nagref.gr/journals/ethg/images/31/ethg31p4-7.pdf>

διασπορά, η διάλυση, η βιοαποικοδόμηση, η ιζηματοποίηση και η απόθεση στην ακτή. Οι μεταβαλλόμενες καιρικές και θαλάσσιες συνθήκες κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου μπορούν επομένως να ληφθούν υπόψη προκειμένου να υπολογιστεί η πιθανότητα πετρελαιοκηλίδας σε συγκεκριμένες περιοχές.

Το OSCAR ακολουθεί την προσέγγιση Lagrange, στην οποία χρησιμοποιούνται μεμονωμένα σωματίδια πετρελαίου για να αναπαραστήσουν την κινούμενη πετρελαιοκηλίδα. Αρχικά, τα σωματίδια εκλύονται λόγω της υποθαλάσσιας διαρροής σχηματίζοντας ένα πλούσιο κοντινού πεδίου (Johansen, 2000) το οποίο μεταφέρεται στο μακρινό πεδίο λόγω του πεδίου ροής. Οι τροχιές των σωματιδίων παρακολουθούνται και οι ιδιότητές τους υπολογίζονται ως συνάρτηση του χρόνου. Ο νόμος του Νεύτωνα για την κίνηση και τη διατήρηση της μάζας ισχύει άμεσα για κάθε σωματίδιο. Τα σωματίδια πετρελαίου μεταφέρονται από τις μέσες ταχύτητες ροής (λόγω των παλιρροιακών και ανεμογενών ρευμάτων), ενώ διασπείρονται λόγω της τύρβης της ροής. Στο OSCAR, αυτή η διεργασία τυχαίας διασποράς μοντελοποιείται μέσω ενός αλγόριθμου βασισμένου σε σωματίδια που χρησιμοποιεί τιμές διασποράς (δηλ. διαχυτότητα) που υπολογίζονται σύμφωνα με τη μελέτη των Reed and Hetland (2002). Επομένως, δύο προσομοιώσεις με τα ίδια χαρακτηριστικά εισόδου δεν αναμένεται να παράγουν το ίδιο αποτέλεσμα.

Στην περιγραφή της μεταφοράς των σωματιδίων στην επιφάνεια της θάλασσας λόγω του παράγοντα του ανέμου, ο συντελεστής οπισθέλκουσας ανέμου ορίστηκε ίσος με 3,5% (Lange and Huehnerfuss, 1978). Η περιοχή διερεύνησης είναι αρκετά προστατευμένη, οπότε, αγνοήθηκε η επίδραση των κυμάτων (Stokes drift), καθώς αναμένεται να είναι μικρή. Ωστόσο, σε άλλες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα στη μελέτη των De Dominicis et al. (2013a), η επίδραση της ταχύτητας μετατόπισης Stokes (Stokes drift) μπορεί να είναι σημαντική.

Σημειώνεται ότι σε ορισμένα σημεία των παράκτιων περιοχών του υπολογιστικού τομέα του OSCAR, τα οποία δεν καλύπτονται από το υδροδυναμικό μοντέλο (SANI2) και συνεπώς, δεν υπάρχουν δεδομένα ταχύτητας, η μεταφορά αγνοείται και μόνο τα θαλάσσια ρεύματα που προκαλούνται από τον άνεμο και η τυχαία διασπορά επηρεάζουν τη μεταφορά των σωματιδίων πετρελαίου.

Σε κάθε χρονικό βήμα των υπολογισμών με το OSCAR, τα σωματίδια του πετρελαίου μεταφέρονται μέσω των διεργασιών της μεταφοράς και της διασποράς, ενώ παράλληλα υφίστανται μια σειρά από διεργασίες γήρανσης οι διεργασίες αυτές μεταφέρουν μάζα στα πέντε τμήματα του μοντέλου, τα οποία είναι η ατμόσφαιρα, η επιφάνεια του νερού, η υδάτινη στήλη, ο πυθμένας (ιζήματα) και η ακτογραμμή (Reed et al., 1995b). Σε κάθε χρονικό βήμα εξόδου του μοντέλου, παρακολουθείται το ισοζύγιο μάζας σε τόνους πετρελαίου (t) σε κάθε τμήμα. Λεπτομερής παρουσίαση της προσομοίωσης των διεργασιών από το μοντέλο OSCAR βρίσκεται στις μελέτες των Daling et al. (1990), Reed et al. (1995a), Reed et al. (1995b), Reed et al. (2000), Reed and Hetland (2002), ενώ στις μελέτες των Daling et al. (1997), Daling and Strøm (1999), περιγράφεται η επικύρωση του μοντέλου OSCAR με εκτεταμένα εργαστηριακά δεδομένα.

Διεξήχθησαν 9 σύνολα προσομοιώσεων, δηλ. για 3 τοποθεσίες γεώτρησης (A, B και C) X 3 περιόδους προσομοίωσης (1, 2 και 3), οι οποίες σημειώνονται ως A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2 και C3, με χρήση των δεδομένων ανέμων και ρευμάτων για κάθε περίοδο προσομοίωσης (που ελήφθησαν στο Βήμα 4), για να προσδιοριστούν οι χάρτες πιθανοτήτων και οι χρόνοι άφιξης της πετρελαιοκηλίδας καθώς και να εκτιμηθεί η πιθανότητα κατάληξης ενός ποσοστού της μάζας πετρελαίου στην ακτογραμμή των λιμνοθαλασσών Μεσολογγίου – Αιτωλικού (Πίνακας 4.1).

Οι χάρτες πιθανοτήτων για τα 9 σύνολα στοχαστικών υπολογισμών φαίνονται στο Σχήμα 4.2 και οι αντίστοιχοι χάρτες που παρουσιάζουν τους χρόνους άφιξης της πετρελαιοκηλίδας στο Σχήμα 4.3. Γίνεται αναφορά σε αυτά τα σύνολα ως «στοχαστικές» προσομοιώσεις, σε αντίθεση με τις «ντετερμινιστικές» προσομοιώσεις που εκτελούνται στο βήμα 8, όπου προσομοιώνεται μόνο μια μεμονωμένη πετρελαιοκηλίδα. Κάθε προσομοίωση ξεκινούσε κάθε 3 ώρες και είχε διάρκεια 10 ημερών. Πραγματοποιήθηκαν 401 προσομοιώσεις για κάθε

σύνολο με αποτέλεσμα συνολικά 3609 προσομοιώσεις.

Πίνακας 4.1 Πιθανότητα κατάληξης στην ακτογραμμή των λιμνοθαλασσών Μεσολογίου – Αιτωλικού ανάλογα με την ποσοστιαία ποσότητα μάζας πετρελαίου

Θέση	Σύνολο προσομοιώσεων	Ποσοστό μάζας πετρελαίου (%) Εποχή	>10	8-10	6-8	4-6	2-4	<2	0
A	A1	Άνοιξη	0	8	2	1	1	2	86
	A2	Καλοκαίρι	0	0	0	0	0	31	69
	A3	Χειμώνας	0	0	0	0	0	24	76
B	B1	Άνοιξη	0	2	6	2	2	54	34
	B2	Καλοκαίρι	0	0	0	0	0	41	59
	B3	Χειμώνας	0	0	0	0	10	14	76
C	C1	Άνοιξη	0	13	2	5	3	44	33
	C2	Καλοκαίρι	3	5	1	1	1	42	47
	C3	Χειμώνας	5	5	5	7	1	12	65

Για καθεμία από τις 3609 προσομοιώσεις, υπολογίστηκε το μέσο πάχος και η συγκέντρωση του πετρελαίου στη στήλη του νερού και στην ξηρά, καθώς και τον ελάχιστο χρόνο άφιξης στην ακτή. Επιλέχθηκε ένα διάστημα δειγματοληψίας 3 ωρών για να παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα για την καθορισμένη διάρκεια διαρροής (Nordam et al., 2016), ενώ ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης επιλέχθηκε ίσος με 10 ημέρες για να επιτραπεί η παρακολούθηση πετρελαιοκηλίδων για μια επαρκή περίοδο, βάσει των προκαταρκτικών υπολογισμών που έδειξαν ότι ο μεγαλύτερος χρόνος δεν επηρέαζε αισθητά τα αποτελέσματα.

Βήμα 6. Προσδιορισμός των χειρότερων περιπτώσεων για κάθε θέση διαρροής.

Υποθέτοντας ότι το πετρέλαιο που καταλήγει στις ακτές είναι η πιο κρίσιμη παράμετρος που χαρακτηρίζει μια προσομοίωση και θέτοντας ως τιμή κατωφλίου την τιμή 1 kg/km² (Bejarano and Michel, 2016; Nordam et al., 2016; Owens et al., 2008; Samaras et al., 2014), για κάθε τοποθεσία, υπολογίστηκε η μάζα του πετρελαίου (t) για όλες τις 1203 στοχαστικές προσομοιώσεις και κατατάχθηκαν σε αύξουσα σειρά με βάση αυτήν την τιμή.

Στη συνέχεια, απορρίφθηκαν από περαιτέρω ανάλυση οι προσομοιώσεις για τις οποίες δεν κατέληγε πετρέλαιο στην ακτή. Τελικά επιλέχθηκε το 95^ο εκατοστημόριο (δηλ. εξαλείφθηκε το 5% των χειρότερων τιμών) που είναι οι «χειρότερες περιπτώσεις».

Αυτές είναι:

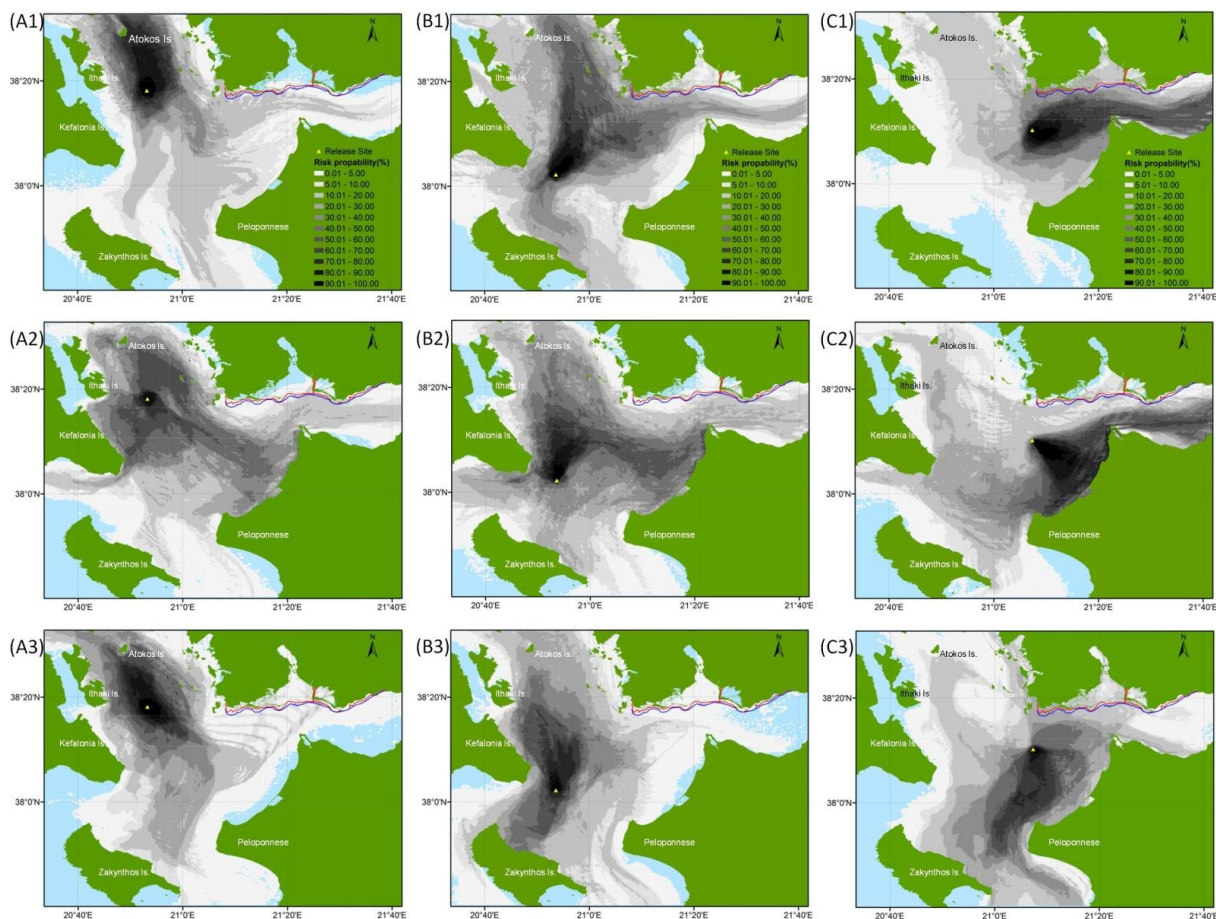
- (A) Για τη θέση A, χειμώνας, ώρα διαρροής: 04:00 UTC (15/11/2015),
- (B) Για τη θέση B, άνοιξη, ώρα διαρροής: 02:00 UTC (29/03/2015), και
- (C) Για τη θέση C, χειμώνας, ώρα διαρροής: 13:00 UTC (20/11/2015).

Βήμα 7. Προσδιορισμός των κύριων χαρακτηριστικών των διαθέσιμων συστημάτων αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων.

Τα περισσότερα συστήματα αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων βασίζονται στη μηχανική ανάκτηση ή/και την εφαρμογή χημικών διασποράς. Στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης, εξετάστηκαν και τα δύο συστήματα, για τα οποία συλλέχθηκαν τα απαιτούμενα δεδομένα από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό για την Ασφάλεια στη Θάλασσα (European Maritime Safety Agency, EMSA) (EMSA 2009, 2014a and 2014b).

Προς το παρόν, η Ελλάδα διαθέτει δύο κύρια πλοία μηχανικής ανάκτησης συνολικής χωρητικότητας 4000 m³ γαλακτωματοποιημένου μίγματος πετρελαίου-νερού που βρίσκονται στον Πειραιά, των οποίων ο χρόνος κινητοποίησης υπολογίζεται ίσος με 20 ώρες. Επίσης, υπάρχουν 6 βοηθητικά σκάφη χωρητικότητας από 6 έως 27 m³ και συνολικής χωρητικότητας 90 m³, των οποίων οι χρόνοι κινητοποίησης κυμαίνονται από 8 έως 24 ώρες.

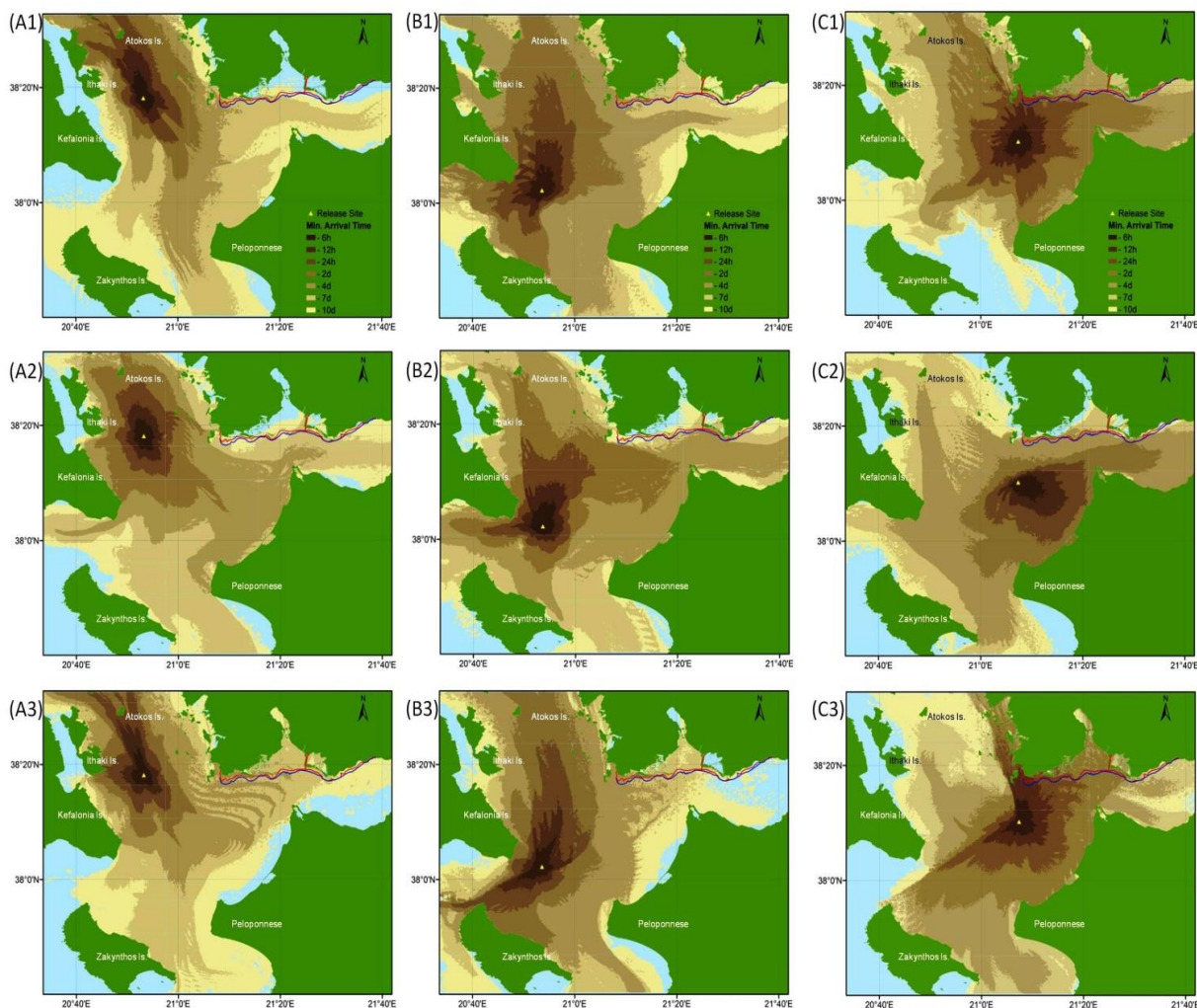
Για την εφαρμογή χημικών διασποράς, υπάρχουν 10 διαθέσιμα πλοία, αλλά όχι αεροσκάφη. Αρκετά αποθέματα χημικών βρίσκονται σε όλη την Ελλάδα, συμπεριλαμβανομένων των λιμανιών στο νότιο Ιόνιο Πέλαγος. Για αυτά τα σκάφη, ο χρόνος έναρξης της εφαρμογής των χημικών διασποράς εκτιμάται ότι κυμαίνεται από 3 έως 24 ώρες. Εφαρμόστηκε η στρατηγική «νεότερο πετρέλαιο», δηλ. τα πλοία αναζητούν το πετρέλαιο που κυκλοφόρησε πιο πρόσφατα. Επίσης χρησιμοποιήθηκε τιμή DOR ίση με 4%. Και στα δύο συστήματα, ο χρόνος επιστροφής στα λιμάνια της Πάτρας ή της Κυλλήνης υπολογίστηκε ίσος με 3-4 ώρες.



Σχήμα 4.2 Χάρτες πιθανότητας ρύπανσης για τα 9 σύνολα στοχαστικών υπολογισμών. Η πιθανότητα σε κάθε κελί του πλέγματος υπολογίζεται ως ο αριθμός των προσομοιώσεων για τις οποίες το πετρέλαιο έφτασε σε αυτό το κελί, διαιρεμένο με τον συνολικό αριθμό προσομοιώσεων (Πηγή: Makatounis et al., 2017)

Η αξιολόγηση της EMSA για τη χρήση χημικών στα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η οποία έχει εγκριθεί από τις ελληνικές αρχές (EMSA, 2014a), ευνοεί σε περιορισμένα θαλάσσια περιβάλλοντα και περιοχές υψηλής ευαισθησίας τη μηχανική ανάκτηση με χρήση φραγμάτων και skimmers έναντι της εφαρμογής χημικών.

Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί στη μηχανική ανάκτηση, όπως μειωμένη αποτελεσματικότητα σε θαλασσοταραχή, μικρότερη καλυπτόμενη περιοχή και περιορισμένη διαθεσιμότητα. Στην περιοχή των λιμνοθαλασσών, πρακτικά και οι δύο μέθοδοι δεν μπορούν να εφαρμοστούν λόγω του πολύ μικρού βάθους του νερού (βλ. Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.3 Χρόνοι άφιξης πετρελαιοκηλίδας για τα 9 σύνολα στοχαστικών υπολογισμών (Πηγή: Makatounis et al., 2017)

Στο OSCAR, το πετρέλαιο ανακτάται μηχανικά κάθε χρονική στιγμή, μόνο όταν το πετρέλαιο έχει πάχος μεγαλύτερο από ένα καθορισμένο όριο που είναι ίσο με 0,1 mm και όταν το ιξώδες του γαλακτώματος είναι μικρότερο από τη μέγιστη τιμή των 10^6 Cr (μέγιστη τιμή λειτουργίας των skimmers). Για την προσομοίωση της χρήσης μηχανικής ανάκτησης ορίστηκαν επίσης και τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: ταχύτητα λειτουργίας ίση με 0,8 κόμβους, ταχύτητα ανάκτησης του skimmer ίση με 40,0 m³/h καθώς και τιμές βυθίσματος των σκαφών με εύρος από 2,0 έως 6,4 m. Η λειτουργία της μηχανικής ανάκτησης πραγματοποιείται κυρίως μέσω ελεγκτών «switch off – switch on».

Επομένως, δεν υπάρχει αφαίρεση πετρελαίου όταν τα κύματα της θάλασσας είναι μεγαλύτερα από 2,0 m και όταν το τοπικό βάθος θαλασσινού νερού είναι μικρότερο από το βύθισμα των σκαφών ανάκτησης. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της νύχτας, η αποτελεσματικότητα μειώνεται στο 65% της τιμής της ημέρας. Επίσης, σημειώνεται ότι το OSCAR δεν λαμβάνει υπόψη ούτε τα κινητά φράγματα περιορισμού (booms), των οποίων η κίνηση είναι πρακτικά αδύνατο να προσομοιωθεί από ένα μοντέλο, ούτε τα σταθερά φράγματα κοντά στην ακτή λόγω του μεγάλου ανοίγματος (περίπου 20 km) της εισόδου των λιμνοθαλασσών.

Η εφαρμογή των χημικών διασποράς υπολογίζεται από το OSCAR ως διεργασία επιφανειακής συμπαράσυρσης, η οποία σε συνθήκες ηρεμίας (χωρίς άνεμο και με μηδενικό ύψος κύματος) δεν ενεργοποιείται. Οι κύριες παράμετροι που ορίστηκαν για την προσομοίωση της χρήσης χημικών ήταν: η αποτελεσματικότητα εφαρμογής, το ανώτερο όριο ιξώδους του γαλακτώματος ίσο με 10^6 Cr, το ελάχιστο όριο πάχους του γαλακτώματος, ίσο με 0,1 mm

και η ελάχιστη αναλογία χημικών διασποράς (DOR) ίση με 4%.

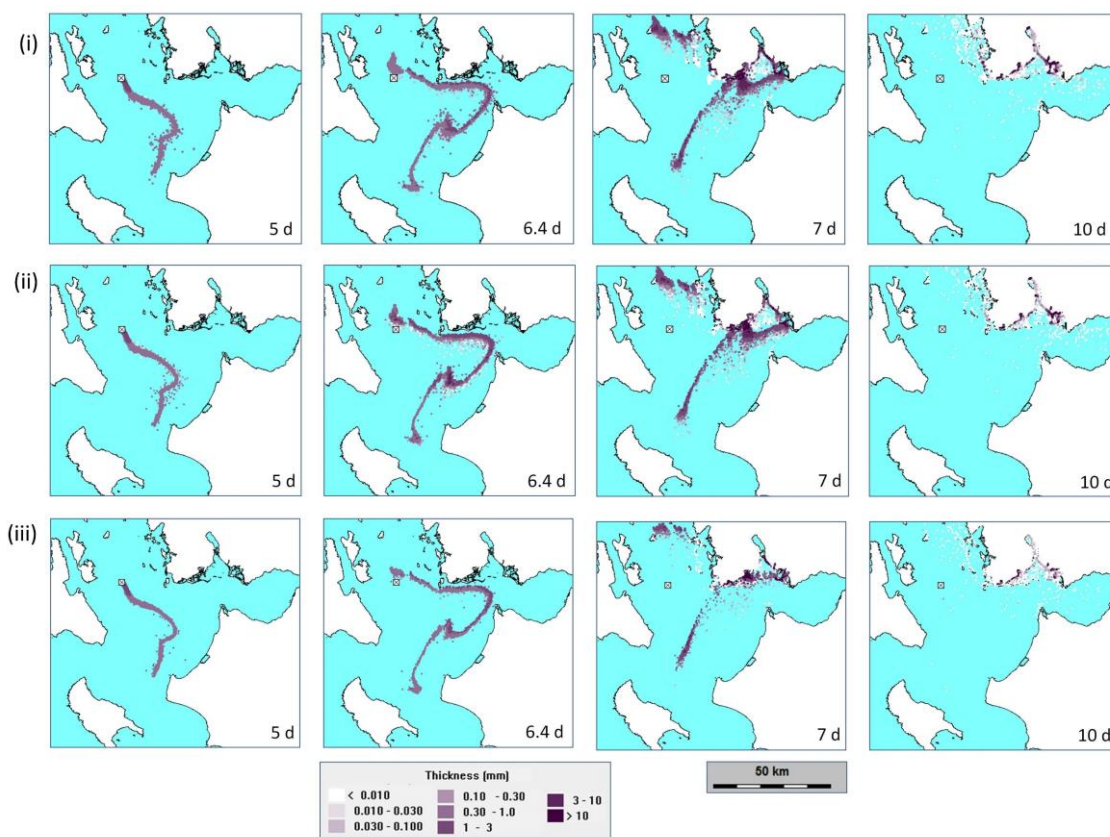
Βήμα 8. Διεξαγωγή ντετερμινιστικών υπολογισμών. Συνδυάστηκαν οι 3 χειρότερες περιπτώσεις A, B και C (βλ. βήμα 6) με τις 3 μεθόδους απόκρισης (βλ. βήμα 7) που είναι: καμία επέμβαση (N), μηχανική ανάκτηση με skimmers (M) και επιφανειακά χημικά διασποράς (D), για να παραχθούν τα 9 σενάρια που σημειώνονται ως εξής: AN, AM, AD, BN, BM, BD, CN, CM και CD, για τα οποία πραγματοποιήθηκαν ντετερμινιστικοί υπολογισμοί με το μοντέλο OSCAR.

Για κάθε σενάριο, υπολογίστηκε η τροχιά της πετρελαιοκηλίδας και η χρονική μεταβολή του ισοζυγίου μάζας πετρελαίου στα διάφορα τμήματα (που χαρακτηρίζονται κυρίως από τις διεργασίες γήρανσης της πετρελαιοκηλίδας), μέχρι να φτάσει στην τελική του κατάσταση στο τέλος των υπολογισμών (10 ημέρες).

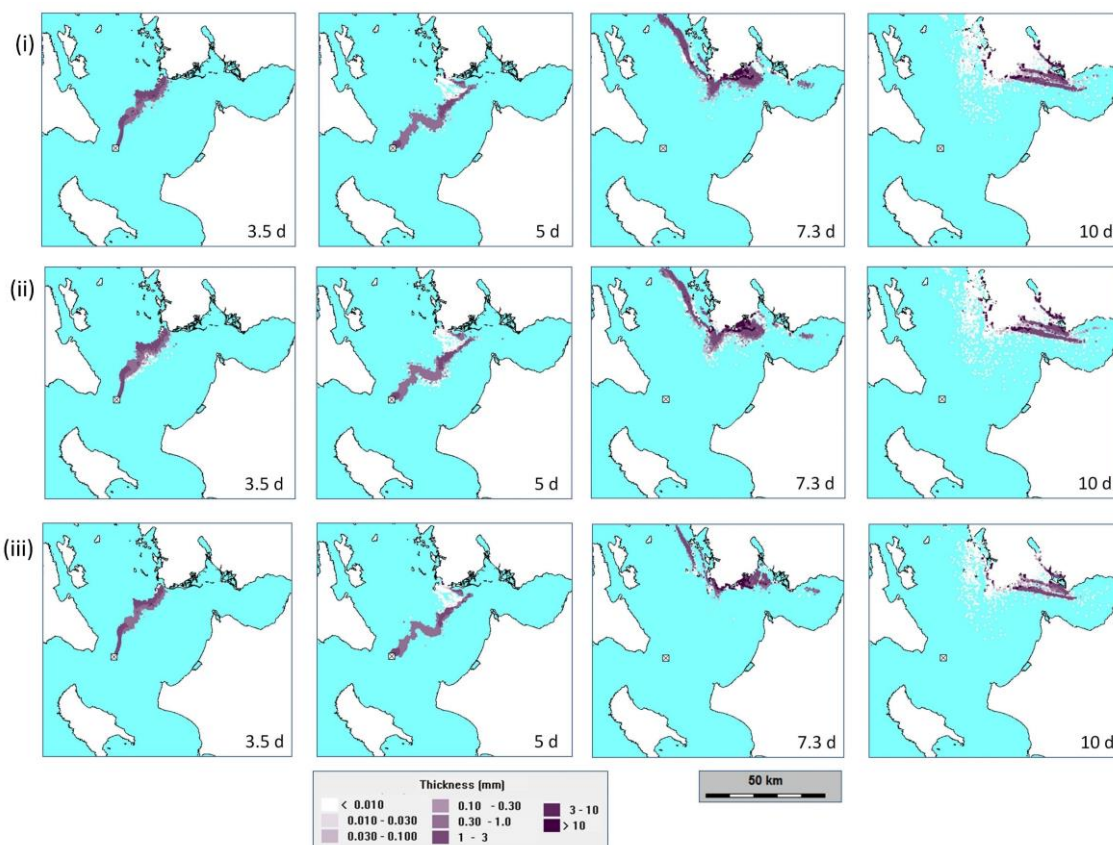
Ενδεικτικά, στο Σχήμα 4.4 φαίνεται η διαδρομή της πετρελαιοκηλίδας για το σενάριο AN. Οι αντίστοιχες τροχιές των υπόλοιπων 8 σεναρίων φαίνονται στο Σχήμα 4.5 και στο Σχήμα 4.6.

Επιπλέον, στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή του ισοζυγίου μάζας πετρελαίου των διαφορετικών τμημάτων για όλα τα σενάρια που αφορούν την περιοχή C. Τα αντίστοιχα σχήματα για τα υπόλοιπα σενάρια για τις θέσεις διαρροής A και B φαίνονται στο Σχήμα 4.7 και στο Σχήμα 4.8, αντίστοιχα.

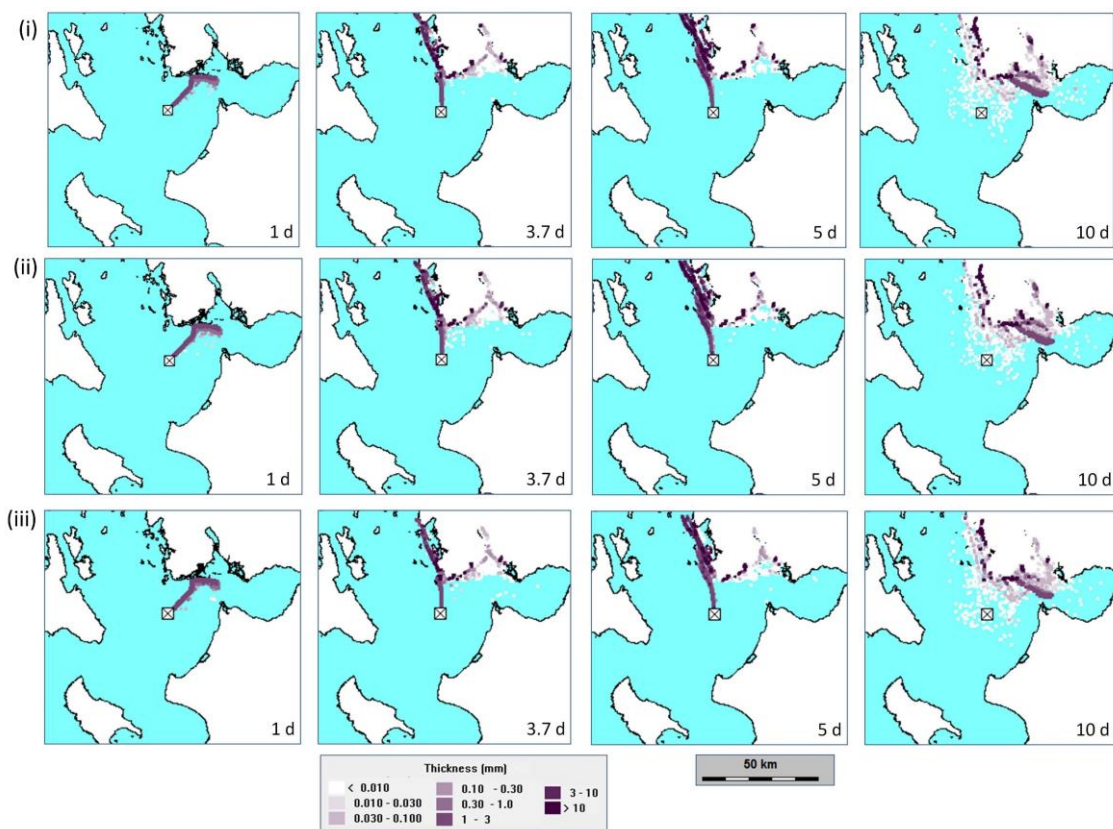
Στον Πίνακα 4.2, φαίνεται η τελική κατάσταση των διαφόρων διαμερισμάτων του ισοζυγίου μάζας πετρελαίου.



Σχήμα 4.4 Τροχιά πετρελαιοκηλίδας για τα σενάρια (i) AN, (ii) AM και (iii) AD στο χρονικό βήμα $t=5$ d, 6,4 d, 7,0 d και 10,0 d



Σχήμα 4.5 Τροχιά πετρελαιοκηλίδας για τα σενάρια (i) BN, (ii) BM και (iii) BD στο χρονικό βήμα $t=3,5$ d, 5,0 d, 7,3 d και 10,0 d



Σχήμα 4.6 Τροχιά πετρελαιοκηλίδας για τα σενάρια (i) CN, (ii) CM και (iii) CD στο χρονικό βήμα $t=1$ d, 3,7 d, 5,0 d και 10,0 d

Πίνακας 4.2 Τελικά αποτελέσματα ισοζυγίου μάζας πετρελαίου για όλα τα σενάρια (t)

	AN	AM	AD	BN	BM	BD	CN	CM	CD
Surface	8959	7717	2342	10631	9246	3205	8328	7453	2314
Evaporated	17344	16213	13994	18012	16796	14444	16033	15125	11587
Droplet	697	714	11812	256	287	9624	90	109	8862
Dissolved	63	57	98	22	21	40	42	39	184
Sedimented	2302	2331	5121	851	718	7093	5204	4262	9144
Cleaned	0	4265	0	0	4185	0	0	3635	0
Stranded	4525	4314	3555	4621	4632	3918	4461	4379	3759
Biodegraded	831	768	2072	669	650	2330	1021	929	3309
Outside	7515	5857	3240	7174	5700	1582	7057	6304	3076

Βήμα 9. Εκτίμηση των επιπτώσεων της πετρελαιοκηλίδας στις περιοχές ενδιαφέροντος. Για να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις της πετρελαιοκηλίδας στις λιμνοθάλασσες Μεσολογίου – Αιτωλικού, υπολογίστηκε η χρονική μεταβολή των ποσοστών της πληγείσας περιοχής και του όγκου των λιμνοθαλασσών (Σχήμα 4.10). Όπως αναφέρθηκε ήδη στο Βήμα 4, η περιοχή και ο όγκος της λιμνοθάλασσας θεωρούνται ως επηρεασμένες, όταν το επιφανειακό πάχος του πετρελαίου και η συγκέντρωση του διασκορπισμένου πετρελαίου υπερβαίνουν τις οριακές τιμές των 0,01 mm και 10 ppm, αντίστοιχα (βλ. βήμα 4).

Στη συνέχεια, τα ποσοστά των πληγέντων πληθυσμών τους μπορούν να προσεγγιστούν με τα ποσοστά της επηρεαζόμενης περιοχής και όγκου, αντίστοιχα, που αναφέρονται στον Πίνακα 4.3, δεδομένης της παραδοχής (βλ. βήμα 4) ότι όλος ο πληθυσμός της φαλαρίδας και του λωριδόψαρου είναι ομοιόμορφα κατανομημένος στην επιφάνεια και τον όγκο των λιμνοθαλασσών, αντίστοιχα.

Πίνακας 4.3 Ποσοστά της συνολικής πληγείσας έκτασης και όγκου λιμνοθαλασσών Μεσολογίου – Αιτωλικού

Θέση	Μέθοδος αντιμετώπισης	Σενάριο	Επηρεαζόμενη επιφάνεια (%)	Επηρεαζόμενος όγκος (%)	Χρόνος άφιξης πετρελαίου (d)
A	-	AN	90,0	4,9	6,4
	Μηχανική	AM	85,4	4,2	6,4
	Χημικά	AD	70,0	6,0	6,4
B	-	BN	87,5	2,0	5,0
	Μηχανική	BM	87,5	2,0	5,0
	Χημικά	BD	77,1	8,0	5,0
C	-	CN	78,0	1,7	1,0
	Μηχανική	CM	78,0	1,7	1,0
	Χημικά	CD	69,3	8,5	1,0

4.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

4.4.1 Στοχαστικοί υπολογισμοί και ανάλυση πιθανότητας ρύπανσης πετρελαιοκηλίδων

Οι χάρτες που φαίνονται στο Σχήμα 4.2, απεικονίζουν τη σημαντική εξάρτηση της πιθανότητας ρύπανσης από την εποχή και την τοποθεσία γεώτρησης.

Την εαρινή περίοδο, για τις θέσεις διαρροής A και B, η πιθανότητα είναι μεγαλύτερη στο βόρειο και ανατολικό τμήμα της περιοχής διερεύνησης, ενώ για τη θέση C, είναι υψηλότερη εντός του Πατραϊκού Κόλπου, στα ανατολικά.

Κατά τη χειμερινή περίοδο, η πιθανότητα είναι μεγάλη για τη θέση Α στο νησί Άτοκος και την ανατολική ακτή της Ιθάκης, για τη θέση Β στις ακτές της Ζακύνθου και της Κεφαλονιάς και για τη θέση C στη δυτική ακτή της Πελοποννήσου και τη βόρεια ακτή της Ζακύνθου.

Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, η δυτική ακτή της Πελοποννήσου στα νοτιοανατολικά παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές πιθανότητας και για τις τρεις θέσεις διαρροής.

Σε όλες τις περιόδους, για τη θέση C οι πιθανότητες περιορίζονται σε μικρότερη περιοχή προς τις βόρειες παράκτιες περιοχές της Πελοποννήσου, μειώνοντας έτσι σημαντικά τις πιθανότητες στην ευρύτερη περιοχή. Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται ότι στις κύριες περιοχές ενδιαφέροντος, δηλ. στις λιμνοθάλασσες Μεσολογίου – Αιτωλικού, οι υψηλότερες τιμές πιθανότητας ρύπανσης παρατηρούνται για τη θέση C. Για την άνοιξη κυμαίνονται από 10% έως 20% εντός της λιμνοθάλασσας και έως 30% στη δυτική πλευρά και την είσοδο, ενώ το χειμώνα και το καλοκαίρι κυμαίνονται από 10% έως 20% κοντά στην είσοδο και είναι μέχρι 10% εντός της λιμνοθάλασσας. Για τις τοποθεσίες Α και Β, η μέγιστη πιθανότητα φτάνει το 10%.

Στον Πίνακα 4.1 φαίνεται ποια είναι η πιθανότητα ένα ποσοστό της μάζας πετρελαίου να φτάσει στην ακτογραμμή των λιμνοθαλασσών Μεσολογίου – Αιτωλικού. Παρατηρείται ότι η θέση C παρουσιάζει την υψηλότερη πιθανότητα ρύπανσης. Την άνοιξη, το μέγιστο ποσοστό της μάζας πετρελαίου και για τις 9 στοχαστικές προσομοιώσεις, που είναι ίσο με 67%, αναμένεται να φτάσει στην ακτογραμμή (13% εκ των οποίων με πιθανότητα μεγαλύτερη από 8%), ενώ το καλοκαίρι και το χειμώνα οι αντίστοιχες τιμές είναι 53% και 35%, αντίστοιχα, με 8% και 10% να έχουν πιθανότητα μεγαλύτερη από 8%. Για τις θέσεις Α και Β, τα αντίστοιχα ποσοστά μάζας πετρελαίου είναι σημαντικά χαμηλότερα. Η θέση διαρροής Α δείχνει τη χαμηλότερη πιθανότητα ρύπανσης πετρελαιοκηλίδας, μόνο το 12% της μάζας πετρελαίου για τη χειρότερη περίοδο (άνοιξη) μπορεί να φτάσει στην ακτογραμμή με πολύ μικρή πιθανότητα (λιγότερο από 2%).

4.4.2 Ντετερμινιστικοί υπολογισμοί - Συμπεριφορά πετρελαιοκηλίδας και αποτελεσματικότητα συστημάτων απόκρισης πετρελαίου

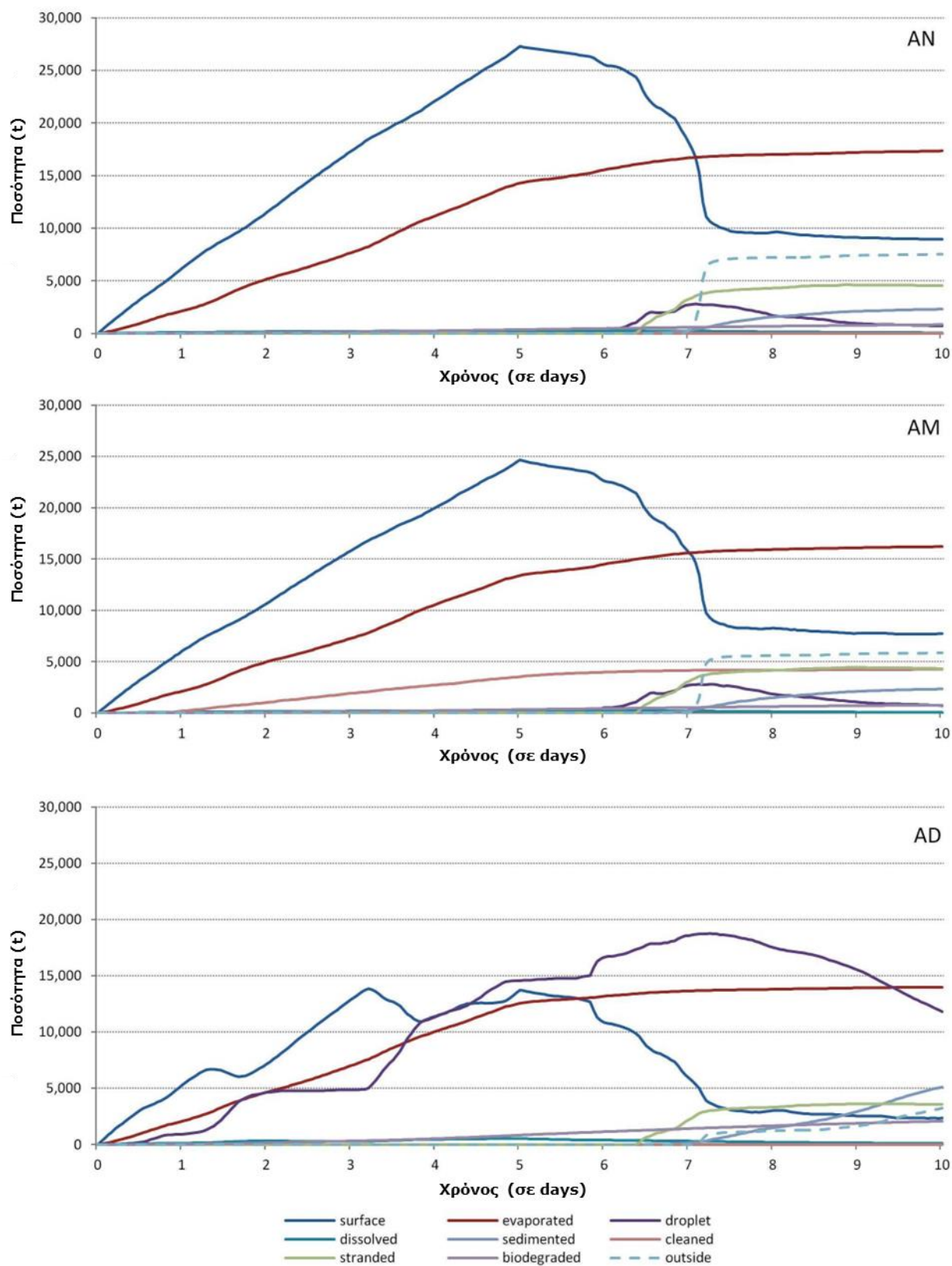
Για το σενάριο CN από το Σχήμα 4.9, φαίνεται ότι η μάζα του πετρελαίου στην επιφάνεια αυξάνεται με τον χρόνο από $t=0$ έως $t=5$ d (τέλος διαρροής), όταν φτάσει στη μέγιστη τιμή του (18645 t). Στη συνέχεια, πέφτει στους 8882 t σε $t\approx 6,6$ d και φτάνει στην τελική του τιμή (8328 t). Σε $t=1,0$ d, στο Σχήμα 4.6 φαίνεται ότι η πετρελαιοκηλίδα φθάνει στις λιμνοθάλασσες Μεσολογίου – Αιτωλικού (βλ. επίσης Πίνακα 4.2) και η ποσότητα του πετρελαίου αρχίζει να αυξάνεται μέχρι να φτάσει στην τελική της τιμή (4461 t).

Επιπλέον, ο ρυθμός αύξησης της ποσότητας του πετρελαίου από $t=1,0$ σε 1,6 d είναι σχετικά υψηλός (3273 t/d), σε αντίθεση με το ρυθμό αύξησης του πετρελαίου που παραμένει στην επιφάνεια, ο οποίος μειώνεται στους 1317 t/d, από 5613 t/d την περίοδο $t=0,0-1,0$ d. Η ποσότητα του πετρελαίου που εξατμίζεται, παρουσιάζει γραμμική αύξηση κατά την περίοδο διαρροής ($t=0,0=5,0$ d) με σχεδόν σταθερό ρυθμό (2890 t/d), ενώ η τελική του τιμή είναι ίση με 16033 t. Στο $t=3,7$ d, στο Σχήμα 4.6 φαίνεται ότι το πετρέλαιο φτάνει στο βόρειο όριο του υπολογιστικού τομέα και αρχίζει να εξέρχεται. Στο τέλος των υπολογισμών ($t=10$ d) η μάζα του πετρελαίου εκτός υπολογιστικού πεδίου («outside») φτάνει στην τελική του τιμή που είναι ίση με 7057 t.

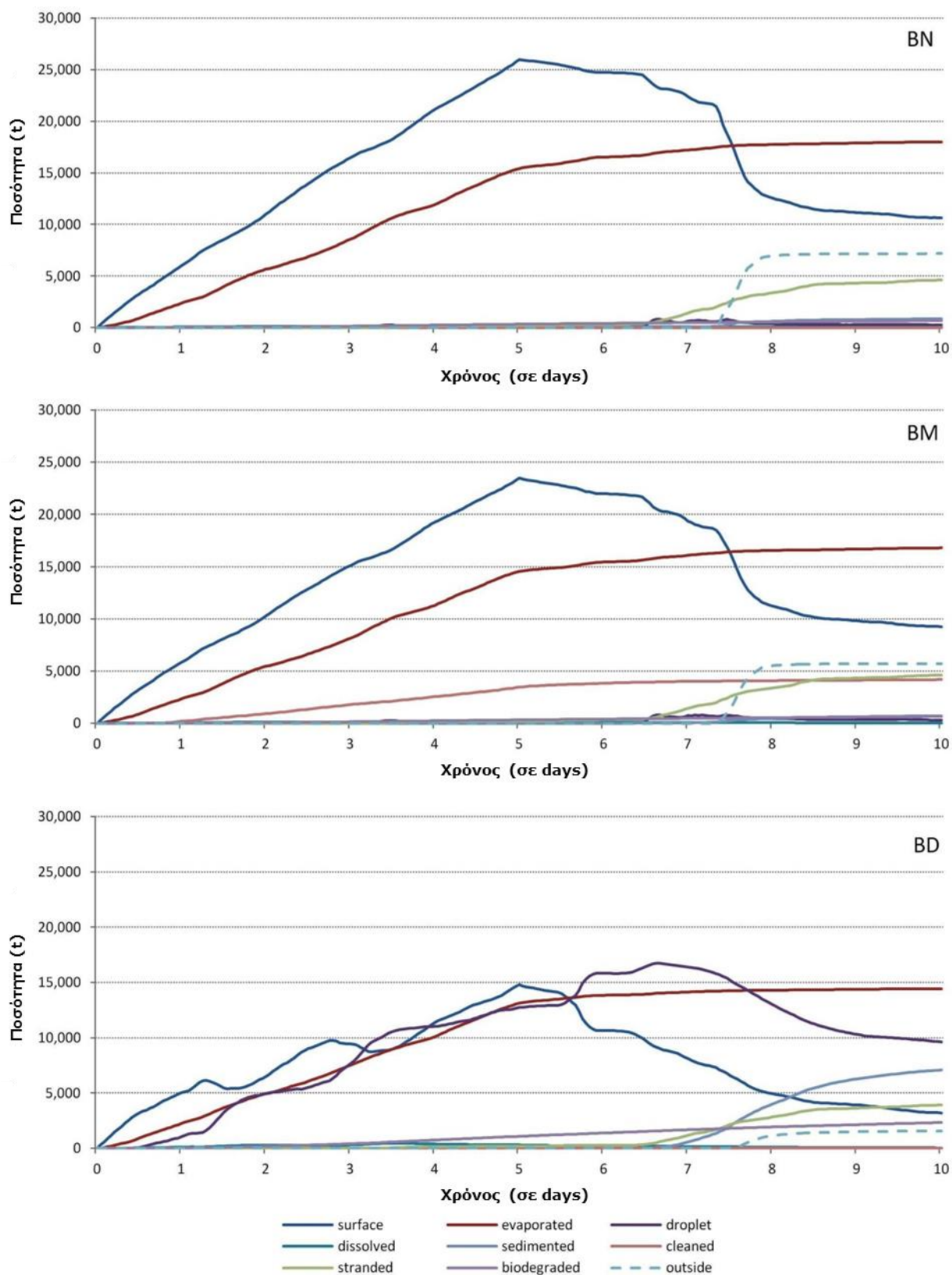
Ο σχηματισμός σταγονιδίων πετρελαίου («oil droplet») είναι γενικά μικρός με μικρό ρυθμό, εκτός από μια σύντομη περίοδο ($t=4,9-5,1$ d), όταν επικρατούν πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου. Η τελική τιμή της ποσότητας του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη (σε μορφή σταγονιδίων) είναι ίση με 90 t. Η τελική ποσότητα πετρελαίου που καθιζάνει («sedimented») είναι 5204 t. Οι ποσότητες του πετρελαίου που διαλύεται («dissolved») και βιοδιασπάται («biodegraded») είναι σχετικά μικρές.

Οι τελικές τους τιμές είναι ίσες με 42 t και 1021 t, αντίστοιχα, και επηρεάζουν σημαντικά το ισοζύγιο μάζας πετρελαίου. Σε $t=10$ d, στο Σχήμα 4.6 φαίνεται ότι υπάρχει σημαντική ποσότητα πετρελαίου με μεγάλο πάχος στην περιοχή διερεύνησης, που παραμένει, κυρίως

στις λιμνοθάλασσες.



Σχήμα 4.7 Χρονική μεταβολή των αποτελεσμάτων του ισοζυγίου μάζας πετρελαίου για τα σενάρια AN, AM και AD (Πηγή: Makatounis et al., 2017)



Σχήμα 4.8 Χρονική μεταβολή των αποτελεσμάτων του ισοζυγίου μάζας πετρελαίου για τα σενάρια BN, BM και BD (Πηγή: Makatounis et al., 2017)

ισοζυγίου ως ποσότητα του πετρελαίου που καθαρίζεται («cleaned»), ξεκινά σε χρόνο $t=0,33$ d και αυξάνεται συνεχώς, αρχικά από $t=0,33$ έως $t=5$ d, με υψηλό ρυθμό (688 t/d) και στη συνέχεια με πολύ αργό ρυθμό 85 t/d, λόγω περιορισμών του μηχανικού καθαρισμού, μέχρι να φτάσει στην τελική του τιμή (3635 t) που αντιστοιχεί στο 8,6% της ποσότητας πετρελαίου που διέρρευσε.

Το καθαρισμένο πετρέλαιο αφαιρείται από το πετρέλαιο στην επιφάνεια («surfaced»), του οποίου η τελική ποσότητα μειώνεται κατά 11% (βλ. Πίνακα 4.2). Στη συνέχεια, οι άλλες μορφές μετασχηματισμένου πετρελαίου (εξατμισμένου, διαλυμένου, ιζηματοποιημένου και βιοαποικοδομημένου) μειώνονται επίσης κατά 6-9%, εκτός από την ποσότητα του πετρελαίου σε μορφή σταγονιδίων στην υδάτινη στήλη («droplet») που αυξάνεται κατά 21%. Σε κάθε περίπτωση, οι ποσότητες του διαλυμένου και βιοαποικοδομημένου πετρελαίου παραμένουν πολύ χαμηλές.

Η χρήση χημικών (βλ. για παράδειγμα Σχήμα 4.9 για το σενάριο CD) δεν επηρεάζει σημαντικά τη διαδρομή της πετρελαιοκηλίδας, αλλά έχει επίδραση στη χρονική μεταβολή και στο τελικό ισοζύγιο της μάζας πετρελαίου (βλ. Σχήμα 4.9 και Πίνακα 4.2). Η τελική ποσότητα του επιφανειακού πετρελαίου μειώνεται δραστικά (72%) και στη συνέχεια μειώνεται το εξατμισμένο πετρέλαιο. Το πετρέλαιο επιφάνειας μετατρέπεται σε σταγονίδια πετρελαίου (από 90 t χωρίς χημικά σε 8862 t) και στη συνέχεια σε διαλυμένο, ιζηματοποιημένο και βιοαποικοδομημένο πετρέλαιο, των οποίων η αύξηση είναι επίσης πολύ έντονη και ίση με 342%, 76% και 224%, αντίστοιχα.

Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η μηχανική ανάκτηση και η χρήση χημικών έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της ποσότητας πετρελαίου που τελικά καταλήγει εκτός του υπολογιστικού πεδίου («outside»), κυρίως λόγω της μείωσης του επιφανειακού πετρελαίου. όταν χρησιμοποιούνται χημικά. Η ποσότητα του πετρελαίου που καταλήγει εκτός («outside») μειώνεται περαιτέρω από τις μεγάλες ποσότητες πετρελαίου σταγονιδίων που υπάρχουν στη στήλη του νερού και κινούνται με χαμηλότερες ταχύτητες ροής.

Τέλος, στον Πίνακα 4.2 παρατηρείται ότι η τελική ποσότητα πετρελαίου που καταλήγει στην ακτογραμμή («stranded») δεν επηρεάζεται πρακτικά από τη μηχανική ανάκτηση (η μείωσή της είναι μόνο 2%), ενώ η χρήση των χημικών φαίνεται να έχει πιο έντονο αποτέλεσμα, αφού η μείωση ανέρχεται στο 16%.

Οι τροχιές των πετρελαιοκηλίδων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του χειρότερου σεναρίου, που είναι κυρίως η θέση διαρροής και η χρονική-εποχιακή διακύμανση των ταχυτήτων του ανέμου, και είναι πολύ διαφορετικές μεταξύ τους (βλ. Σχήμα 4.4, Σχήμα 4.5 και Σχήμα 4.6).

Ωστόσο, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.2, οι αντίστοιχες διαφορές στα περισσότερα από τα αποτελέσματα του ισοζυγίου μάζας πετρελαίου δεν είναι πολύ σημαντικές. Για παράδειγμα, οι μειώσεις της ποσότητας του επιφανειακού πετρελαίου είναι ίσες με 14%, 13% και 11% για τα σενάρια AM, BM και CM, αντίστοιχα, και ίσες με 74%, 70% και 72% για τα σενάρια AD, BD και CD, αντίστοιχα, ενώ οι αντίστοιχες μειώσεις του εξατμισμένου πετρελαίου είναι ίσες με 7%, 7% και 6% για τα σενάρια AM, BM και CM, αντίστοιχα, και ίσες με 19%, 20% και 28% για τα σενάρια AD, BD και CD, αντίστοιχα.

Επίσης, οι διαφορές των ποσοτήτων του πετρελαίου είναι σχετικά χαμηλές και κυμαίνονται από 0% έως 5% με χρήση μηχανικής ανάκτησης και από 16% έως 21% με χρήση χημικών. Αυτές οι υψηλότερες τιμές των ποσοτήτων του πετρελαίου που κατέληξε στην ακτή με χημικά έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση των ποσοτήτων πετρελαίου εκτός υπολογιστικού πεδίου που κυμαίνονται από 56% έως 78%, τα οποία είναι σημαντικά υψηλότερα από το αντίστοιχο εύρος τιμών με μηχανικό καθαρισμό (11-22%).

Το πετρέλαιο που αφαιρείται λόγω της μηχανικής ανάκτησης («cleaned») για τα σενάρια AM και BM είναι ίσο με το 10,1% και το 9,9% της ποσότητας πετρελαίου που απελευθερώνεται, αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές είναι κατά κάποιο τρόπο υψηλότερες από την τιμή για το σενάριο CM (8,6%). Αξίζει να σημειωθεί ότι η μάζα του πετρελαίου σταγονιδίων

είναι γενικά υψηλή για τα σενάρια As, δηλ. AN, AM και AD, λόγω των πολύ υψηλών ταχυτήτων του ανέμου (7-15 m/s) την περίοδο $t=6,4-7,2$ d (βλ. επίσης Σχήμα 4.7) που έχουν ως αποτέλεσμα υψηλές ταχύτητες ρεύματος, οι οποίες ευνοούν το σχηματισμό σταγονιδίων πετρελαίου.

4.4.3 Επιπτώσεις της πετρελαιοκηλίδας στις λιμνοθάλασσες Μεσολογγίου - Αιτωλικού

Στο Σχήμα 4.10 φαίνεται ότι η πετρελαιοκηλίδα φτάνει στις λιμνοθάλασσες σε $t=1,0$ d, 5,0 d και 6,4 d, για τα σενάρια As, Bs και Cs, αντίστοιχα. Ο χρόνος άφιξης της πετρελαιοκηλίδας δεν εξαρτάται από το σύστημα απόκρισης πετρελαίου (βλ. Σχήμα 4.4, Σχήμα 4.5 και Σχήμα 4.6).

Σημειώνεται ότι από τη στιγμή που η πετρελαιοκηλίδα εισέλθει στις λιμνοθάλασσες, δεν πραγματοποιείται μηχανική ανάκτηση λόγω πολύ μικρού βάθους, ενώ τα σχεδόν ακίνητα νερά (μηδενικοί κυματισμοί) στη λιμνοθάλασσα δεν ευνοούν τη φυσική διασπορά του πετρελαίου και πρακτικά εξαλείφουν την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής των χημικών διασποράς.

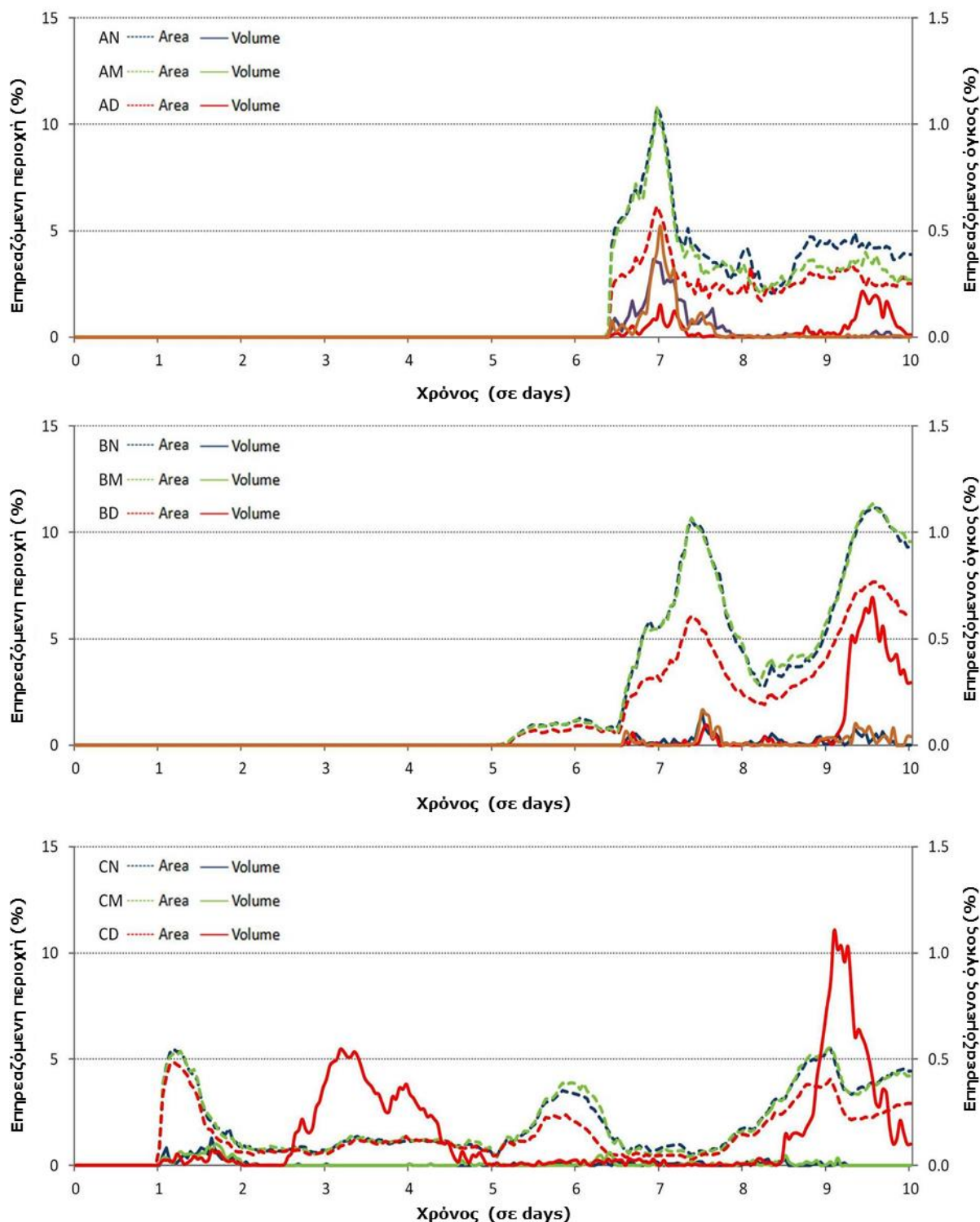
Το Σχήμα 4.10 απεικονίζει την επίδραση της μηχανικής ανάκτησης στην πληγείσα περιοχή, η οποία πρακτικά είναι αμελητέα. Η διακύμανση της έκτασης της πληγείσας περιοχής με τον χρόνο για το σενάριο BN συμπίπτει με το BM, για το CN συμπίπτει με το CM, ενώ οι μεταβατικές τιμές της πληγείσας περιοχής για το σενάριο AM είναι κατά κάποιο τρόπο χαμηλότερες από το σενάριο AN (λόγω του μεγαλύτερου χρόνου άφιξης στις λιμνοθάλασσες για όλα τα σενάρια A).

Αντίστοιχα, οι τελικές τιμές της πληγείσας περιοχής (βλ. Πίνακα 4.3) είναι ίσες με 90,0% και 85,4% για τα σενάρια AN και AM, αντίστοιχα, 87,5% και για τα δύο σενάρια BN και BM και 78,0% και για τα δύο σενάρια CN και CM. Όταν γίνεται χρήση επιφανειακών χημικών διασποράς, π.χ. για σενάρια AD, BD και CD, στο Σχήμα 4.10 φαίνεται ότι οι γραμμές διακύμανσης της πληγείσας περιοχής ακολουθούν παρόμοια μοτίβα με ή χωρίς μηχανική ανάκτηση. Ωστόσο, με πολύ χαμηλότερες τιμές της πληγείσας περιοχής (βλ. Πίνακα 4.3), των οποίων οι τελικές τιμές είναι ίσες με 70,0%, 77,1% και 69,3%, για τα σενάρια AD, BD και CD, αντίστοιχα.

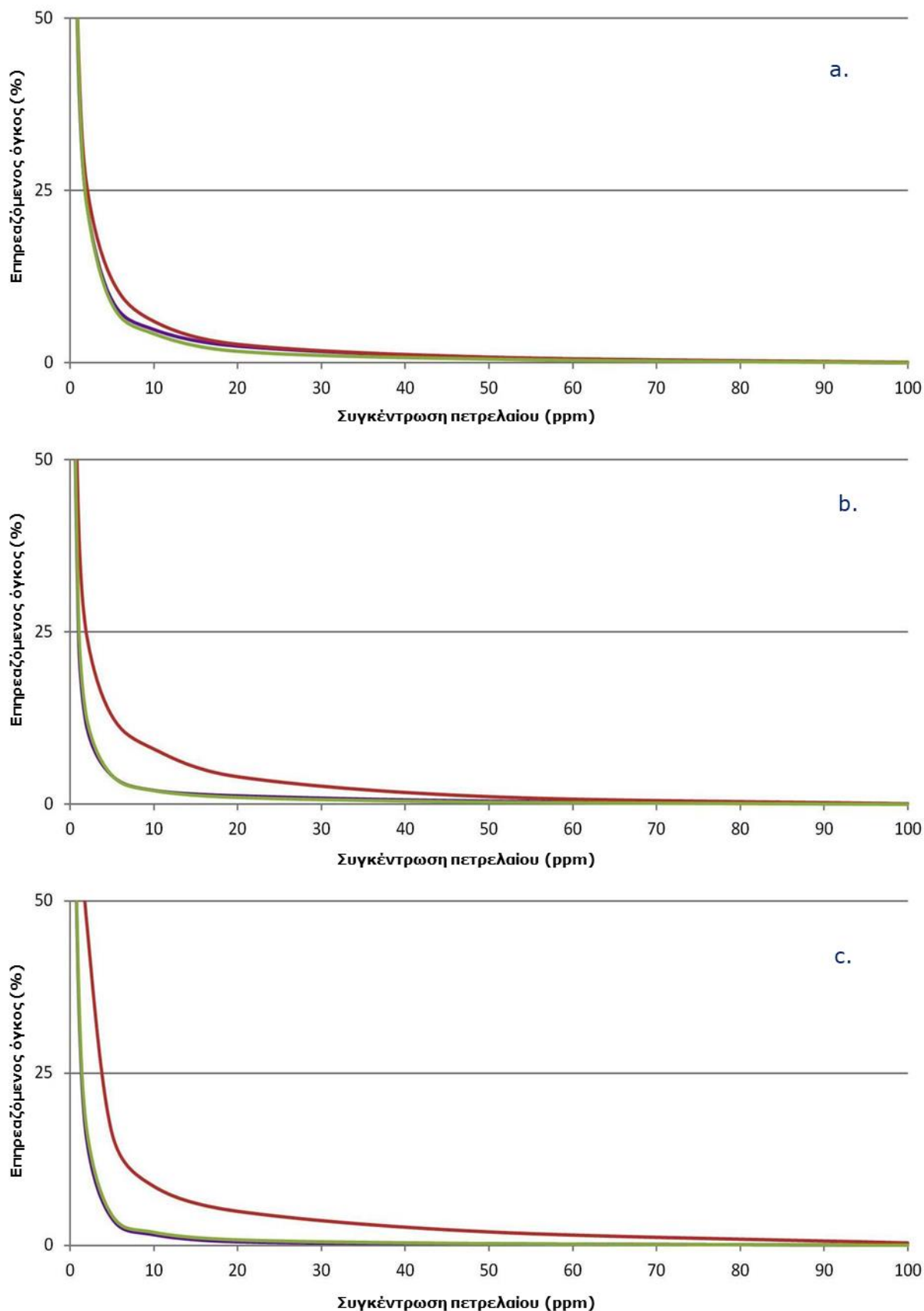
Με άλλα λόγια, η χρήση χημικών είναι πιο αποτελεσματική για τη μείωση των επιπτώσεων της πετρελαιοκηλίδας στην περιοχή των λιμνοθαλασσών Μεσολογγίου – Αιτωλικού. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι αν και για τα σενάρια Cs οι αποστάσεις της θέσης διαρροής C από τις λιμνοθάλασσες και οι χρόνοι άφιξης (1,0 d) είναι μικρότερες από τις Bs και Cs, μακροπρόθεσμα τα σενάρια Bs και As επηρεάζουν μεγαλύτερο ποσοστό της περιοχής των λιμνοθαλασσών.

Τα Σχήματα 4.10 & 4.11 απεικονίζουν ότι η επίδραση της μηχανικής ανάκτησης στον επηρεασμένο όγκο δεν είναι επίσης σημαντική. Ομοίως, οι τελικές τιμές του επηρεαζόμενου όγκου (βλ. Πίνακα 4.3) είναι ίσες με 4,9% και 4,2% για τα σενάρια AN και AM, αντίστοιχα, 2,0% και για τα δύο σενάρια BN και BM και 1,7% και για τα δύο σενάρια CN και CM. Η επίδραση των χημικών στον επηρεασμένο όγκο είναι αρνητική, καθώς οι τελικές τιμές είναι ίσες με 6,0%, 8,0% και 8,5%, για τα σενάρια AD, BD και CD, αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει επειδή το διασκορπισμένο πετρέλαιο παραμένει στη στήλη του νερού με τη μορφή σταγονιδίων σε μεγάλες ποσότητες.

Συνοψίζοντας, ένα μεγάλο μέρος της επιφάνειας των λιμνοθαλασσών αναμένεται να ρυπανθεί σε περίπτωση πετρελαιοκηλίδας. Η μηχανική ανάκτηση δεν επηρέασε αισθητά την πετρελαιοκηλίδα. Η επιφανειακή εφαρμογή χημικών διασποράς είναι ίσως η πιο αποτελεσματική μέθοδος απόκρισης, διότι επιτυγχάνει αξιοσημείωτη μείωση της πληγείσας περιοχής και συνεπώς του πληθυσμού των προσβεβλημένων πτηνών (φαλαρίδα). Στον αντίποδα η τεχνική αυτή έχει ως επακόλουθο την αντίστοιχη αύξηση του επηρεαζόμενου όγκου και συνεπώς του πληθυσμού των προσβεβλημένων ιχθύων (λωριδόψαρο).



Σχήμα 4.10 Χρονική μεταβολή των αποτελεσμάτων της επηρεαζόμενης επιφάνειας και όγκου των λιμνοθαλασσών Μεσολογίου - Αιτωλικού (Πηγή: Makatounis et al., 2017)



Σχήμα 4.11 Επιπηρεασμένος όγκος λιμνοθάλασσας έναντι συγκέντρωσης πετρελαίου, για τα χειρότερα σενάρια της τοποθεσίας A (a), της τοποθεσίας B (b) και της τοποθεσίας C (c). Καμία επέμβαση (μωβ γραμμή), με μηχανική ανάκτηση (πράσινη γραμμή) και με χρήση χημικών (κόκκινη γραμμή)

Αυτό το μάλλον σαφές συμπέρασμα, το οποίο βασίζεται σε μια σειρά υποθέσεων που έγιναν σε όλη την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας, συμπεριλαμβανομένης της απλοποιημένης προσέγγισης σχετικά με τα χαρακτηριστικά των ευαίσθητων ειδών (βλ. Βήμα 2), πρέπει να επαληθευτεί αν ισχύει στον τελικό στάδιο σχεδιασμού, όταν αναμένεται να είναι διαθέσιμες περισσότερες πληροφορίες και δεδομένα.

4.5 Συμπέρασμα - Απάντηση σε ερευνητικό ερώτημα

Τα στοχαστικά αποτελέσματα ρύπανσης από πετρέλαιο επηρεάζονται από τις διαφορετικές καιρικές συνθήκες που επικρατούν στις διάφορες εποχές, καθώς παρατηρείται σημαντική μεταβολή στην πιθανότητα ρύπανσης της περιοχής ενδιαφέροντος από τα αποτελέσματα των στοχαστικών προσομοιώσεων.

Επίσης η χρήση διαφορετικών μεθόδων αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων διαφοροποιούν το αποτέλεσμα στους πληγέντες πληθυσμούς ιχθύων και πτηνών. Τα αποτελέσματα από τις δύο μεθόδους που εξετάστηκαν παρουσιάζουν τα ακριβώς αντίθετα αποτελέσματα σε σχέση με την επίδρασή τους στα διαφορετικά είδη.

Οπότε κρίνεται αναγκαία η επιλογή της μεθόδου αντιμετώπισης σε συνάρτηση με την εποχή κατά την οποία λαμβάνει χώρα το περιστατικό διαρροής.

5 Διερεύνηση της επίδρασης του τύπου πετρελαίου στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου SSDI

5.1 Ερευνητικό ερώτημα

Ποια είναι η επίδραση της χρήσης της μεθόδου SSDI στη συμπεριφορά της πετρελαιοκηλίδας κατά τη διάρκεια μιας υποθαλάσσιας έκρηξης σε βαθιά νερά και πώς επηρεάζουν διαφορετικοί τύποι πετρελαίου την αποτελεσματικότητα της μεθόδου SSDI;

5.2 Εισαγωγή - Βιβλιογραφική διερεύνηση

Τα τελευταία χρόνια, η μέθοδος SSDI έχει αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη στρατηγική απόκρισης, η οποία περιλαμβάνει την έγχυση χημικών διασποράς απευθείας στην υποθαλάσσια πηγή της πετρελαιοκηλίδας (Brandvik et al., 2018). Ο στόχος αυτής της τεχνικής είναι να σπάσει το πετρέλαιο που έχει διαρρεύσει σε μικρότερα σταγονίδια, καθιστώντας ευκολότερη την επιτάχυνση των φυσικών διεργασιών (Brandvik et al., 2013; Johansen et al., 2013). Η πρώτη περίπτωση υποθαλάσσιας έγχυσης χημικών διασποράς εφαρμόστηκε κατά τη διάρκεια του συμβάντος πετρελαιοκηλίδας στο Deerwater Horizon το 2010. Αναλυτικά, σημαντική ποσότητα χημικών διασποράς πετρελαίου, συγκεκριμένα 2,9 εκατομμύρια λίτρα Corexit 9500 και 9527, εφαρμόστηκε στην επιφάνεια καθώς και μέσω της μεθόδου SSDI (Nedwed et al., 2012).

Για να μεγιστοποιηθούν τα αποτελέσματα της μεθόδου SSDI, χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα μοντέλα, γνωστά ως μοντέλα πετρελαιοκηλίδας (OSM). Το OSM χρησιμοποιείται για την πρόγνωση της συμπεριφοράς και τον μετριάσμο των επιπτώσεων από μια πιθανή υπεράκτια πετρελαιοκηλίδα. Αρκετές μελέτες χρησιμοποίησαν OSM για να εξετάσουν την επίδραση της χρήσης SSDI (i) σε πολλές υποθετικές υποθαλάσσιες εκρήξεις για έναν επιλεγμένο τύπο αργού πετρελαίου (French McCay et al., 2018a; Daae et al., 2018) ή (ii) σε πραγματικές περιπτώσεις όπως το ατύχημα του Deerwater Horizon στον Κόλπο του Μεξικού με τον συγκεκριμένο τύπο πετρελαίου (Adcroft et al., 2010; Mariano et al., 2011).

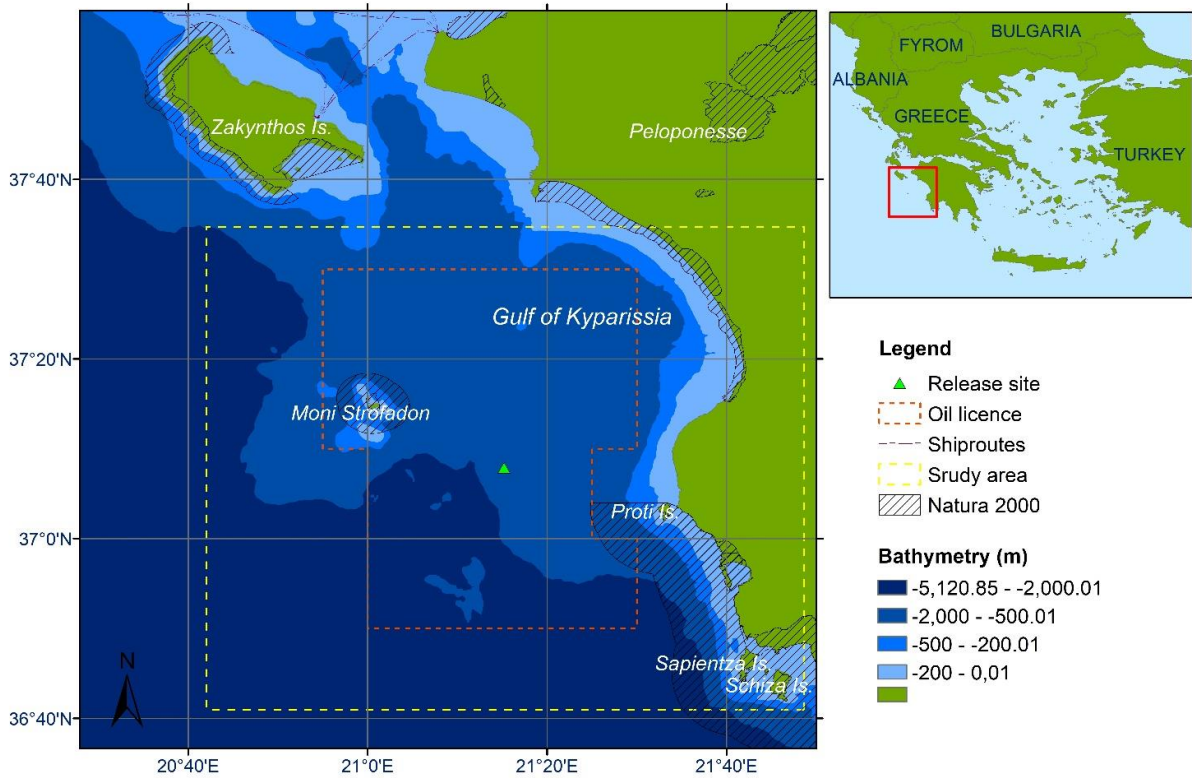
Δεδομένου ότι η επίδραση της μεθόδου SSDI σε διάφορους τύπους πετρελαίων δεν έχει εξεταστεί, η διεξαγωγή περαιτέρω έρευνας έχει μεγάλη σημασία, όπως συμπεραίνεται στη μελέτη των Daae et al. (2018). Σε αυτό το κεφάλαιο η διερεύνηση επεκτείνεται σε διάφορους τύπους πετρελαίου (ασφαλτενικό, ναφθενικό, παραφινικό, κηρώδες) και αξιολογείται η δυνατότητα του SSDI στον μετριάσμο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από πετρελαιοκηλίδες. Επιπλέον, παρέχονται πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την αποτελεσματικότητα του SSDI σε συγκεκριμένα σενάρια με την ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Εφαρμόζεται μια μεθοδολογία μοντελοποίησης που συνεπάγεται ντετερμινιστικές προσομοιώσεις πετρελαιοκηλίδας χρησιμοποιώντας το μοντέλο πετρελαιοκηλίδας OSCAR (Daling et al., 1990; Reed et al., 1995a; Reed et al., 1995b; Reed et al., 2000; Reed and Hetland, 2002).

Επιπλέον, υπολογίζεται και συγκρίνεται η ισορροπία μάζας πετρελαίου και η προκύπτουσα επηρεαζόμενη επιφάνεια και ο όγκος με και χωρίς τη χρήση της μεθόδου SSDI.

5.3 Μεθοδολογία

5.3.1 Περιοχή υπολογισμών

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις πετρελαιοκηλίδας στην περιοχή διερεύνησης 100 km x 100 km, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 5.1, με τη Ζάκυνθο στη βόρεια πλευρά της και την Πελοπόννησο στα ανατολικά. Στην περιοχή διερεύνησης βρίσκονται πολυάριθμες τουριστικές ζώνες και περιβαλλοντικά προστατευμένες περιοχές.



Σχήμα 5.1 Περιοχή υπολογισμών

5.3.2 Παρουσίαση μεθοδολογίας

Στην παρούσα ενότητα, περιγράφεται και εφαρμόζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία σε μια σειρά 7 βημάτων.

Βήμα 1. Προσδιορισμός του υπολογιστικού τομέα και των κύριων περιοχών ενδιαφέροντος. Οι υπολογισμοί με χρήση του μοντέλου OSCAR πραγματοποιούνται για την περιοχή διερεύνησης που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1. Χρησιμοποιήθηκε οριζόντια ανάλυση 100 m x 100 m, με αποτέλεσμα να σχηματιστούν περίπου 10^6 επιφανειακά κελιά. Το κύριο επίκεντρο του ενδιαφέροντος βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή του Κυπαρισσιακού Κόλπου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1.

Βήμα 2. Προσδιορισμός των θέσεων γεώτρησης και των χαρακτηριστικών διαρροής πετρελαίου. Σύμφωνα με τη διαδικασία επιλογής τοποθεσίας που περιγράφεται από τους Makatounis et al., 2017, επιλέχθηκε μια θέση εξόρυξης που βρίσκεται σε βάθος 1.500 m με χαρακτηριστικά παρόμοια με το περιστατικό Deerwater Horizon, στις συντεταγμένες 21°15,02'E και 37°08,22'N. Για να διερευνηθεί η πιθανή επίδραση διαφόρων τύπων πετρελαίων, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικοί τύποι πετρελαίων, όπως περιγράφονται στον Πίνακα 5.1.

Επιπλέον, για τις προσομοιώσεις επιλέχθηκε ρυθμός ροής ίσος με 10.000 m³/d. Αυτός ο ρυθμός ροής προέκυψε από τη μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων που διεξήχθη από το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών (HCMR, 2012) και είναι σχεδόν ισοδύναμος με τον ρυθμό ροής που παρατηρήθηκε κατά την έκρηξη του Deerwater Horizon (μέσος ρυθμός ροής = 8.400 m³/d), αλλά με πολύ μικρότερη διάρκεια διαρροής. Οι προσομοιώσεις αφορούν διάρκεια διαρροής μίας (1) ημέρας, ενώ η διάρκεια προσομοίωσης ορίστηκε σε πέντε (5) ημέρες για παρακολούθηση. Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι τιμές των επιλεγμένων τιμών των παραμέτρων για τις πραγματοποιηθείσες προσομοιώσεις.

Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά επιλεγμένων πετρελαίων για προσομοιώσεις

Τύπος πετρελαίου	Όνομασία	Πυκνότητα (g/mL)	IFT	Σημείο ροής (°C)	Wax. (%)	Asph. (%)	Ιξώδες (mPa·s, 13°C at 10 s ⁻¹)
Ασφαλτενικό	Grane	0,941	11	-24	1,4	3,2	667
Κηρώδες	Norne	0,860	20	12	4,32	0,3	89
Παραφινικό	Oseberg Blend	0,828	17	-6	2,5	0,24	5
Ναφθενικό	Troll B	0,900	20	-36	0,95	0,09	20

Πίνακας 5.2 Παράμετροι και τιμές προσομοίωσης

Παράμετρος	Τιμή
Βάθος διαρροής	1.500 m
Διάρκεια προσομοίωσης	5 days
Τύπος & ιδιότητες πετρελαίου	Βλ. Πίνακας 5.1
Περιοχής διαρροής	Ιόνιο Πέλαγος
Ρυθμός διαρροής	10.000 m ³ /day
Διάρκεια διαρροής	1 day
Θερμοκρασία διαρροής	60°C
Διάμετρος διαρροής	0,3 m
Ρυθμός αερίου-πετρελαίου (GOR)	100 σε standard συνθήκες
Πυκνότητα αερίου	0,8 kg/Sm ³

Βήμα 3. Επιλογή των περιόδων προσομοίωσης και συλλογή δεδομένων καιρού και θαλάσσιου ρεύματος. Λήφθηκαν δεδομένα ανέμου ανά ώρα για το έτος 2020 από το μοντέλο πρόγνωσης καιρού SKIRON (Kallos et al., 1997). Τα δεδομένα περιλάμβαναν την ταχύτητα και την κατεύθυνση ανέμου σε ύψος 10 m, με οριζόντια ανάλυση 0,05°. Στόχος ήταν η επιλογή μιας περιόδου 5 ημερών με τιμές μέσης ταχύτητας ανέμου από τα δεδομένα.

Για την επίτευξη του στόχου, αναλύθηκαν τα δεδομένα και διαπιστώθηκε ότι η μέση ταχύτητα σε διάστημα πέντε ημερών ήταν ίση με 5 m/s. Ως αποτέλεσμα, επιλέχθηκε η περίοδος από την 4^η Απριλίου έως την 8^η Απριλίου ως περίοδος υπολογισμών. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, λήφθηκαν δεδομένα ρευμάτων ανά ώρα με οριζόντια χωρική ανάλυση 0,042° από το MyOcean (Escudier et al., 2020). Τα δεδομένα ανέμου και ρευμάτων χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου για το μοντέλο OSCAR, όπως περιγράφεται στα βήματα 6 & 7.

Βήμα 4. Προσδιορισμός των περιβαλλοντικών ορίων. Για να αξιολογηθεί η επίδραση των χημικών που εφαρμόζονται μέσω SSDI στο πάχος του επιφανειακού πετρελαίου και της συγκέντρωσης πετρελαίου κατά τη διάρκεια μιας πετρελαιοκηλίδας στην περιοχή διερεύνησης μας, καθορίστηκαν δύο όρια.

Το πρώτο όριο, που ορίστηκε στα 0,1 mm, χρησιμοποιήθηκε για τη διαφοροποίηση περιοχών διαφορετικού πάχους επιφάνειας (παχύ ή λεπτό), ώστε να εκτιμηθεί η έκταση του επιφανειακού πετρελαίου και η δυνατότητα για επακόλουθη γαλακτωματοποίηση. Η γαλακτωματοποίηση είναι μια κρίσιμη διεργασία που επηρεάζεται έντονα από το πάχος του στρώματος πετρελαίου. Τα παχύτερα στρώματα είναι πιο πιθανό να γαλακτωματοποιηθούν από τα λεπτότερα φιλμ. Αυτός ο παράγοντας είναι σημαντικός, καθώς η γαλακτωματοποίηση επηρεάζει άμεσα τον όγκο και την ανθεκτικότητα του πετρελαίου, γεγονός που τελικά επηρεάζει τη δυνατότητα για συμβάντα προσάραξης (Daae et al., 2018).

Το δεύτερο όριο ήταν μια ελάχιστη συγκέντρωση 10 ppm, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του όγκου του νερού που είχε επηρεαστεί. Αυτό το όριο επιτρέπει την εκτίμηση των πιθανών συνεπειών για τους πληθυσμούς των ιχθύων (Makatounis et al., 2017).

Βήμα 5. Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της μεθόδου αντιμετώπισης. Πολλά συστήματα αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων εξαρτώνται από τη μηχανική ανάκτηση ή/και την εφαρμογή χημικών διασποράς. Η συγκεκριμένη διερεύνηση εξετάζει τη χρήση χημικών μέσω της μεθόδου υποθαλάσσιας έγχυσης χημικών διασποράς (SSDI). Στο πλαίσιο ενός μοντέλου πετρελαιοκηλίδας, το SSDI χαρακτηρίζεται ως μείωση της διεπιφανειακής τάσης (IFT).

Για αυτή τη διερεύνηση ως λόγος χημικών διασποράς προς πετρέλαιο (DOR) καθορίστηκε η τιμή ίση με 1%, με αποτέλεσμα η μείωση του IFT να προκύπτει ως διαίρεση της αρχικής τιμής με το 100. Τα μεγέθη σταγονιδίων πετρελαίου, με και χωρίς τη χρήση SSDI, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

Βήμα 6. Διεξαγωγή ντετερμινιστικών υπολογισμών. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο πετρελαιοκηλίδας OSCAR για να εκτελεστούν ντετερμινιστικές προσομοιώσεις της συμπεριφοράς του πετρελαίου και να παρακολουθηθούν οι αλλαγές στα διαμερίσματα ισορροπίας μάζας πετρελαίου με την πάροδο του χρόνου. Αυτά τα διαμερίσματα χαρακτηρίζονται κυρίως από τις διεργασίες γήρανσης που υφίσταται η πετρελαιοκηλίδα μέχρι να φτάσει στην τελική της κατάσταση στο τέλος των προσομοιώσεων.

Στο OSCAR, όπως αναφέρεται και στην ενότητα 4.3.2, λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθες διεργασίες γήρανσης: παράσυρση, εξάπλωση, εξάτμιση, φωτο-οξειδωση, γαλακτωματοποίηση, φυσική διασπορά, διάλυση, αποικοδόμηση, αλληλεπιδράσεις ιζημάτων και απόθεση στην ακτή (Daling et al., 1990).

Η προσέγγιση Lagrangian χρησιμοποιείται από το OSCAR, όπου μεμονωμένα σωματίδια πετρελαίου χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν την κινούμενη πετρελαιοκηλίδα. Η αρχική απελευθέρωση σωματιδίων συμβαίνει λόγω μιας υποθαλάσσιας έκρηξης, σχηματίζοντας ένα πλούμιο κοντινού πεδίου που στη συνέχεια μεταφέρεται στο μακρινό πεδίο από το πεδίο ροής. Οι ιδιότητες και οι τροχιές των σωματιδίων παρακολουθούνται με την πάροδο του χρόνου, ακολουθώντας τον νόμο της κίνησης του Νεύτωνα και τη διατήρηση της μάζας που εφαρμόζεται απευθείας σε κάθε σωματίδιο. Οι μέσες ταχύτητες ροής (λόγω παλιρροϊκών και ανεμογεννητικών ρευμάτων) μεταφέρουν τα σωματίδια του πετρελαίου, ενώ οι αναταράξεις στη ροή προκαλούν τη διασπορά τους. Στο τέλος των υπολογισμών κάθε χρονικού βήματος, παρακολουθείται το ισοζύγιο μάζας σε τόνους πετρελαίου.

Για να εξεταστούν τα αποτελέσματα διαφορετικών τύπων πετρελαίων και μεθόδων απόκρισης, συνδυάστηκαν τέσσερα σενάρια πετρελαίου (G, N, O, και T) με δύο μεθόδους απόκρισης (χωρίς παρέμβαση και διασκορπιστικά μέσω SSDI), με αποτέλεσμα τη δημιουργία οκτώ διαφορετικών σεναρίων, που συμβολίζονται ως GN, GD, NN, ND, ON, OD, TN και TD. Τα διαμερίσματα ισορροπίας μάζας πετρελαίου, ως ποσοστό της συνολικής ποσότητας διαρροής, στο τέλος των προσομοιώσεων για όλα τα σενάρια φαίνονται στο Σχήμα 5.3.

Βήμα 7. Εκτίμηση των επιπτώσεων της πετρελαιοκηλίδας στην περιοχή υπολογισμών. Για να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις της πετρελαιοκηλίδας στην περιοχή υπολογισμών, πραγματοποιήθηκε μια ολοκληρωμένη ανάλυση των αλλαγών στη συνολική επηρεασμένη περιοχή και όγκο με την πάροδο του χρόνου, χωρίς να χρησιμοποιηθεί το προκαθορισμένο όριο (βλ. βήμα 4), με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.4.

Για να διερευνηθεί περαιτέρω η επηρεαζόμενη περιοχή και ο αντίστοιχος όγκος, όπως αναφέρεται στο βήμα 4, αξιολογήθηκαν οι περιοχές και ο όγκος με το πάχος του επιφανειακού πετρελαίου και τα επίπεδα συγκέντρωσης διασκορπισμένου πετρελαίου που υπερβαίνουν τις καθορισμένες τιμές ορίου των 0,1 mm και 10 ppm, αντίστοιχα. Η αντίστοιχη πληγείσα περιοχή πάνω από το όριο των 0,1 mm και οι τιμές της συνολικής επηρεασμένης περιοχής παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4. Ο επηρεαζόμενος όγκος άνω των 10 ppm φαίνεται επίσης στον Πίνακα 5.4.

5.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

5.4.1 Ντετερμινιστικοί υπολογισμοί - Ισοζύγιο μάζας πετρελαίου

Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζονται τα διαμερίσματα του ισοζυγίου μάζας πετρελαίου στο τέλος των προσομοιώσεων. Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν μια σημαντική διακύμανση στην ποσότητα του πετρελαίου που εμφανίστηκε στα προσομοιωμένα σενάρια. Το ποσοστό πετρελαίου που βγήκε στην επιφάνεια κυμάνθηκε από 8,7% έως 46,9% του συνολικού όγκου διαρροής σε σενάρια με SSDI και από 34,1% έως 69,7% σε σενάρια χωρίς SSDI.

Για όλους τους προσομοιωμένους τύπους πετρελαίων, η χρήση SSDI μείωσε σημαντικά την ποσότητα πετρελαίου που βγήκε στην επιφάνεια, κυμαινόμενη από 25,2% για το πετρέλαιο Norne έως 74,4% για τα σενάρια πετρελαίου Oseberg Blend. Ωστόσο, η ποσότητα πετρελαίου που απομένει στη στήλη νερού αυξήθηκε σε όλα τα σενάρια που χρησιμοποιούσαν SSDI και φαίνεται στο Σχήμα 5.3 ως «βυθισμένο» (πετρέλαιο στην υδάτινη στήλη σε μορφή σταγονιδίων).

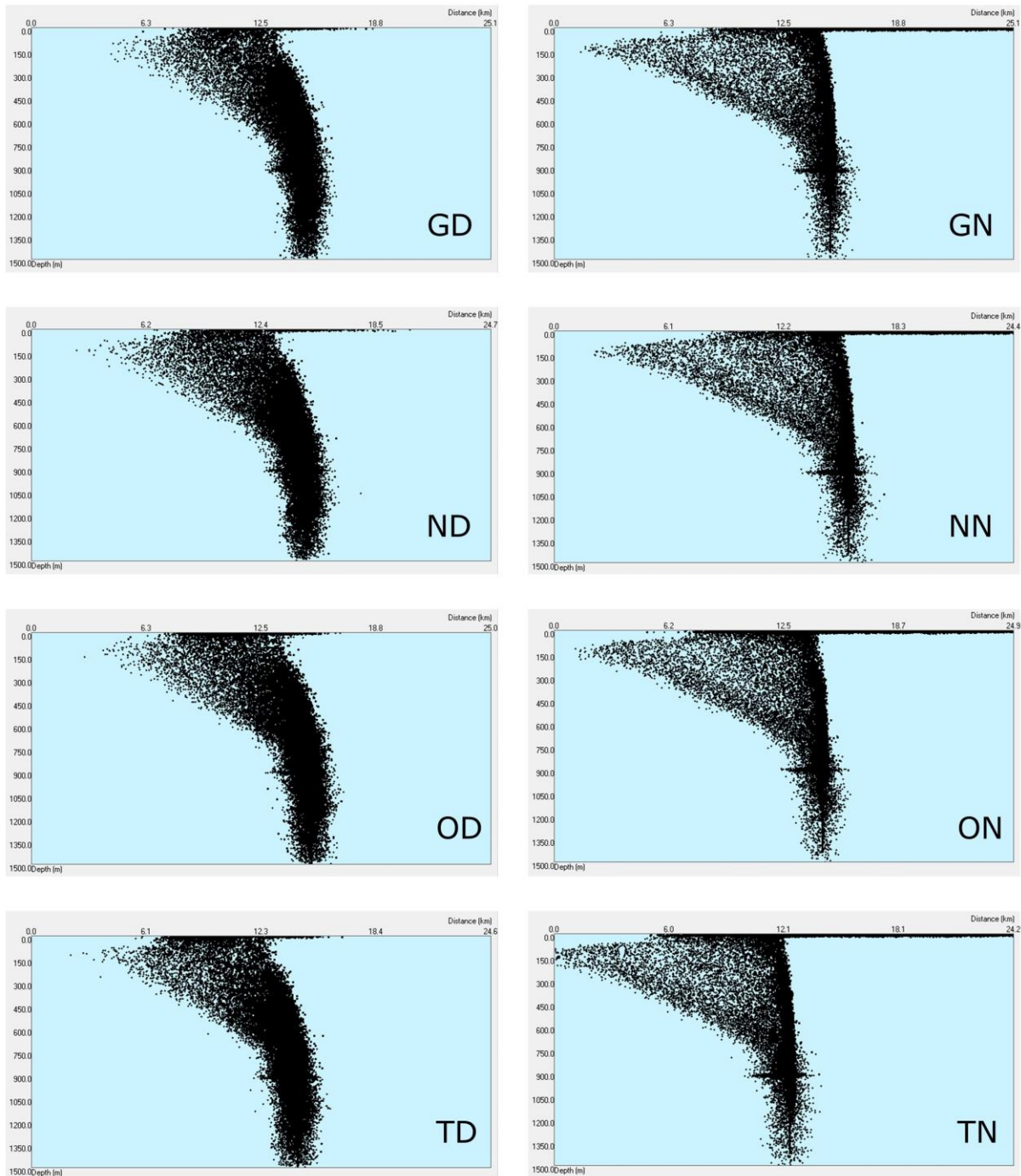
Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να αποδοθεί στη μείωση του μεγέθους των σταγονιδίων πετρελαίου που προκαλείται από SSDI, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.3. Αυτή η μείωση οδηγεί σε μείωση των ταχυτήτων ανάδυσης. Στο Σχήμα 5.2 απεικονίζεται η επίδραση της SSDI επηρεάζει στην κίνηση του πλουμίου, στο πάχος του πετρελαίου στην επιφάνεια και τη συγκέντρωση του πετρελαίου κοντά στο σημείο διαρροής.

Πίνακας 5.3 Μεγέθη σταγονιδίων με και χωρίς SSDI

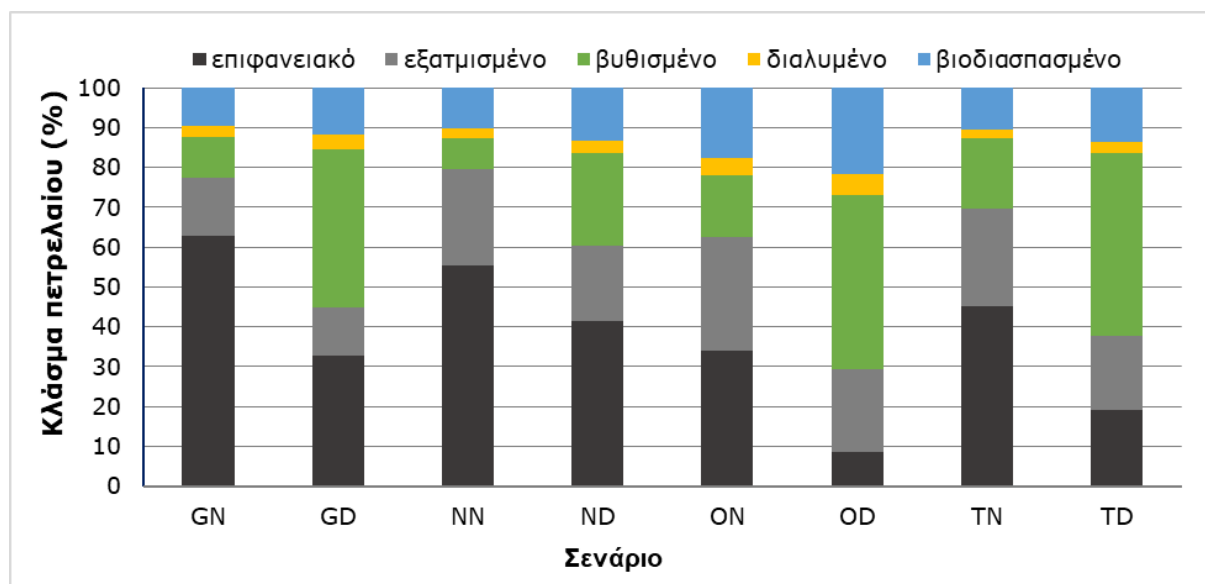
Σενάριο	Μέγεθος σταγονιδίων (mm)	
	d ₅₀	d ₉₅
GN	4,419	9,965
GD	0,616	1,388
NN	4,035	9,099
ND	0,562	1,268
ON	3,729	8,409
OD	0,519	1,171
TN	4,091	9,226
TD	0,570	1,285

Ο μέγιστος ρυθμός αύξησης της ποσότητας του εναπομείναντος πετρελαίου στη στήλη νερού παρατηρήθηκε στα σενάρια με χρήση του πετρελαίου Grane, με ποσοστό 274%. Αντίθετα, ο ελάχιστος ρυθμός αύξησης παρατηρήθηκε στα σενάρια πετρελαίου Troll B, με ποσοστό 161%. Αυτό το αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο, καθώς υπάρχει μια γνωστή συσχέτιση μεταξύ της ποσότητας πετρελαίου που φτάνει στην επιφάνεια και της ποσότητας που παραμένει στη στήλη του νερού.

Επιπλέον, μεταξύ των προσομοιώσεων με τον ίδιο τύπο πετρελαίου, η μείωση στην ποσότητα του εξατμισμένου πετρελαίου κυμαινόταν από 15,4% για τα σενάρια πετρελαίου Grane έως 27,1% για τα σενάρια πετρελαίου Oseberg Blend. Τέλος, σε όλα τα σενάρια που χρησιμοποιούσαν SSDI, η ποσότητα του πετρελαίου που τελικά βιοαποικοδομήθηκε και διαλύθηκε, αυξήθηκε, με ρυθμούς που κυμαίνονται από 22,9% έως 38,5%, για τη βιοαποικοδόμηση και 20,4% έως 33,8%, για τη διάλυση.



Σχήμα 5.2 Διατομή πλουμίου πετρελαίου μετά την 1^η ημέρα, για όλα τα σενάρια



Σχήμα 5.3 Τελικά αποτελέσματα ισοζυγίου μάζας πετρελαίου (σε % της συνολικής ποσότητας)

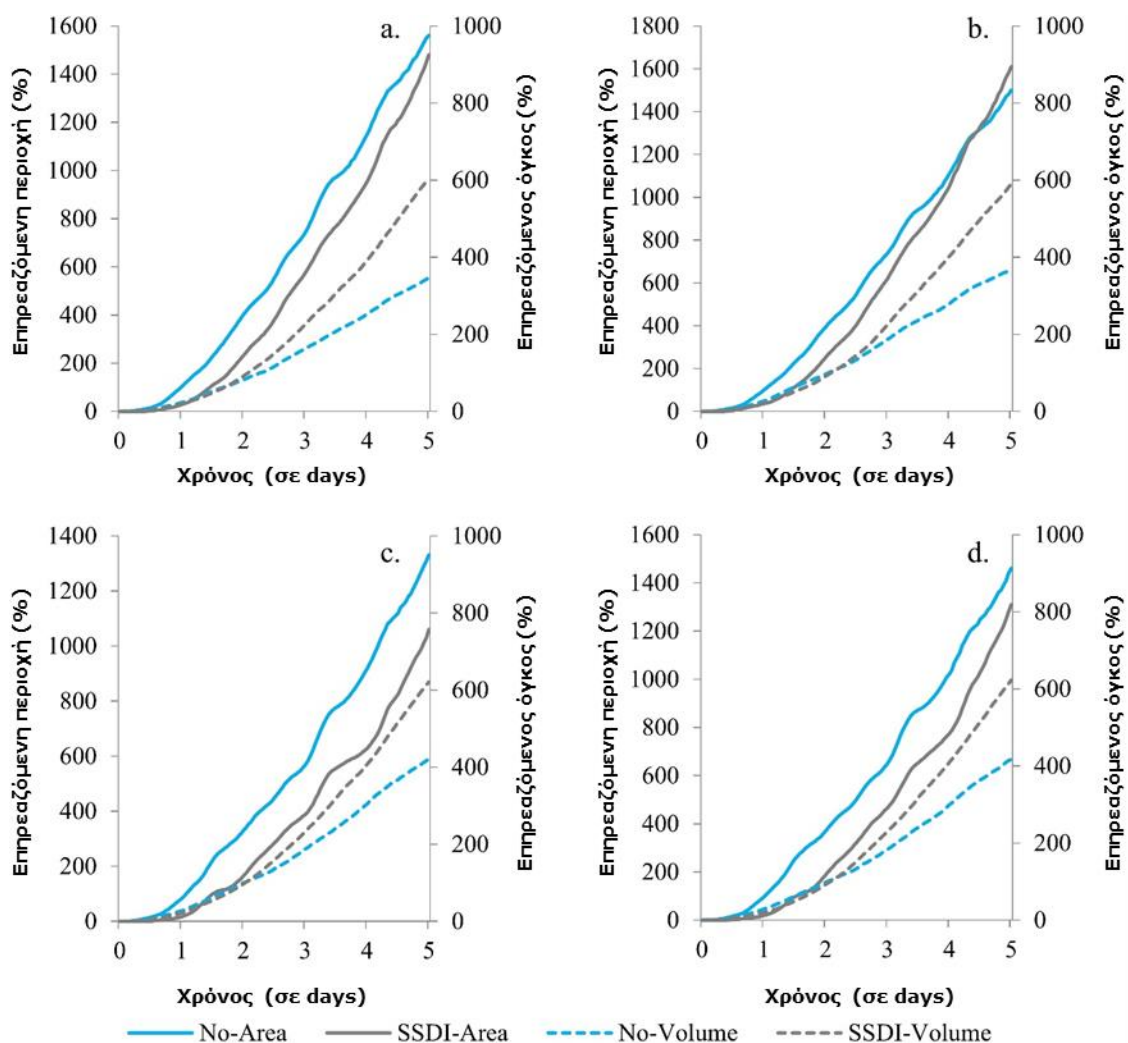
5.4.2 Ντετερμινιστικοί υπολογισμοί - Επηρεαζόμενη επιφάνεια & όγκος

Τα Σχήματα 5.4 και 5.5 απεικονίζουν τη συνολική αθροιστική επιφάνεια και όγκο κατά τη διάρκεια μιας περιόδου προσομοίωσης 5 ημερών, χωρίς τη χρήση ελάχιστων ορίων. Παρατηρείται, ότι γενικά, η εφαρμογή SSDI είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της επηρεαζόμενης περιοχής, εκτός από την περίπτωση του σεναρίου Norne, όπου παρατηρείται αύξηση 7%. Το σενάριο πετρελαίου Oseberg Blend παρουσιάζει τη σημαντικότερη μείωση στην πληγείσα περιοχή, με αποτέλεσμα την αντίστοιχη μείωση της τάξης του 20% (Σχήμα 5.4).

Ταυτόχρονα, η εφαρμογή SSDI οδηγεί σε αύξηση του επηρεαζόμενου όγκου, με εύρος 47%-74%. Με βάση το Σχήμα 5.4, είναι προφανές ότι οι τιμές της επηρεαζόμενης επιφάνειας και όγκου συνεχίζουν να αυξάνονται και δεν έχουν φτάσει στην τελική τους τιμή στο τέλος της περιόδου προσομοίωσης (5d). Η εκτεταμένη περίοδος παρακολούθησης θα μπορούσε να αποκαλύψει περισσότερες πληροφορίες για το επακόλουθο φαινόμενο.

Η επίδραση της μεθόδου SSDI στις τιμές της επηρεαζόμενης περιοχής, πάνω από το όριο του 0,1 mm, είναι εμφανής σε όλα τα σεναρία με τους διάφορους τύπους πετρελαίου. Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζεται η συνολική επηρεαζόμενη επιφάνεια και η περιοχή με πετρέλαιο με πάχος μεγαλύτερο το 0,1 mm, το οποίο μπορεί στη συνέχεια να υποβληθεί σε γαλακτωματοποίηση ευκολότερα. Το σενάριο πετρελαίου Oseberg Blend εμφανίζει τη μεγαλύτερη μείωση στην έκταση της επιφάνειας με παχύ/γαλακτωματοποιημένο πετρέλαιο, με ποσοστό μείωσης περίπου 62%.

Από την άλλη μεριά, τα σεναρία πετρελαίου Norne και Grane εμφανίζουν τη χαμηλότερη μείωση στην παχιά επιφάνεια, με αντίστοιχη μείωση περίπου 37%. Όσον αφορά τον επηρεασμένο όγκο πάνω από το όριο των 10 ppm, η υψηλότερη αύξηση με τη χρήση SSDI παρατηρείται στο σενάριο πετρελαίου Norne, με παρατηρούμενη αύξηση 398%. Αντίθετα, το σενάριο του Oseberg Blend πετρελαίου παρουσιάζει τη χαμηλότερη αύξηση στον επηρεασμένο όγκο, με αύξηση 199% (Πίνακας 5.4).



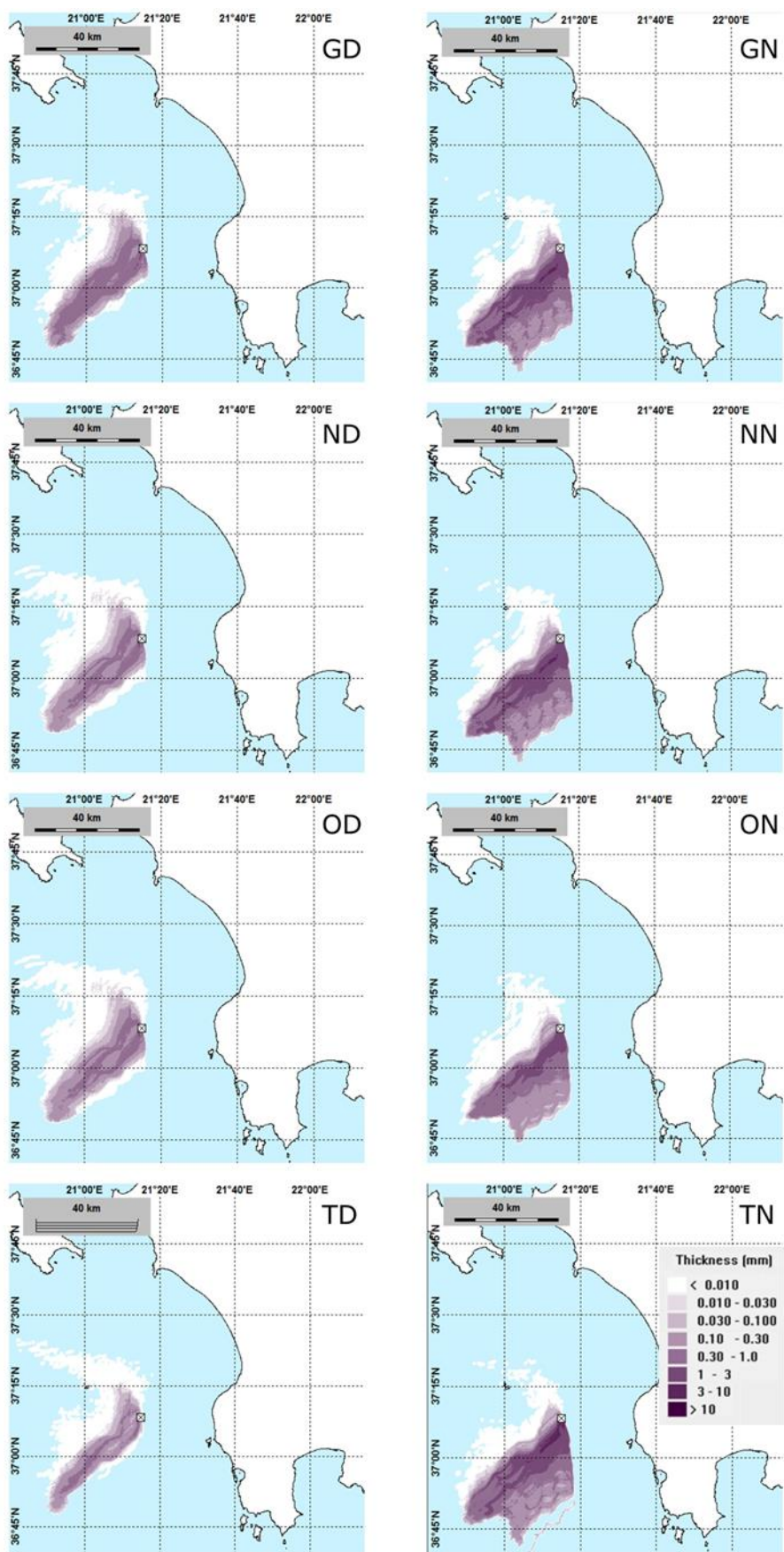
Σχήμα 5.4 Συνολική αθροιστική επηρεασμένη περιοχή και όγκος με την πάροδο του χρόνου, με SSDI και χωρίς (NO) για a. Grane, b. Norne, c. Oseberg Blend, και d. Troll B

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου SSDI σε διαρροές πετρελαίου, συνήθως υπάρχει μια αύξηση στη συνολική επιφάνεια που καλύπτεται από πετρέλαιο λόγω των μικρών σταγονιδίων πετρελαίου που αναδύονται και καλύπτουν μεγαλύτερη επιφάνεια.

Αυτό οφείλεται στο ότι η χαμηλότερη ταχύτητα ανόδου και η μεγαλύτερη εξάπλωση αυτών των σταγονιδίων προκαλούν τη δημιουργία ενός λεπτού φιλμ. Ωστόσο, η διάρκεια ζωής μίας τέτοιου πάχους πετρελαιοκηλίδας είναι περιορισμένη καθώς είναι πολύ λεπτή για να γαλακτωματοποιηθεί και τελικά αναμένεται να διασπαρεί φυσικά.

Οπότε, η περιοχή που καλύπτεται από παχύρρευστο πετρέλαιο αναμένεται να μειωθεί δραστικά όταν εφαρμόζεται SSDI. Αυτό συμβαίνει επειδή τα μεγάλα σταγονίδια που προηγουμένως εμφανίζονταν σε συγκεντρωμένες περιοχές δεν υπάρχουν πλέον.

Επιπλέον, τα μεγέθη των σταγονιδίων μειώνονται και τα μικρά σταγονίδια απλώνονται σε μεγαλύτερη περιοχή. Η μείωση του παχύρρευστου πετρελαίου (όσον αφορά τόσο την επιφάνεια όσο και τον όγκο) έχει ως αποτέλεσμα λιγότερη γαλακτωματοποίηση, μικρότερο όγκο και μικρότερη διάρκεια ζωής. Αυτό είναι το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης SSDI στην απόκριση πετρελαιοκηλίδων.



Σχήμα 5.5 Συνολική επηρεασμένη επιφάνεια στο τέλος των προσομοιώσεων για όλα τα σενάρια

Σημειώνεται ότι στην παρούσα περίπτωση, η κατάσταση της χαμηλής τύρβης της θάλασσας είχε ως αποτέλεσμα σχετικά μικρές αλλά κατά τα άλλα αξιοσημείωτες διαφορές μεταξύ των τύπων πετρελαίων, όσον αφορά τη γαλακτωματοποίηση έναντι της διασποράς. Ωστόσο, εάν υπήρχαν περισσότερα κύματα θραύσης, θα είχαν οδηγήσει σε μεγαλύτερες διαφορές στην επιφάνεια και τον όγκο της προκύπτουσας πετρελαιοκηλίδας, η οποία θα επηρεαζόταν όχι μόνο από την εξάρτηση του d_{50} από το IFT και το ιξώδες αλλά και από τη διακριτή συμπεριφορά του πετρελαίου στην επιφάνεια της θάλασσας σε καθεμία από τις τέσσερις ομάδες πετρελαίων, ιδιαίτερα μεταξύ γαλακτωματοποίησης και φυσικής διασποράς.

Πίνακας 5.4 Επηρεαζόμενη επιφάνεια & όγκος της περιοχής διερεύνησης

Scenario	Συνολική επηρεαζόμενη επιφάνεια (km ²)	Επηρεαζόμενη επιφάνεια (km ²) $\geq 0.1\text{mm}$	Επηρεαζόμενος όγκος (km ³) $\geq 10\text{ppm}$
GN	1.560	941	0,054
GD	1.480	597	0,247
NN	1.500	682	0,043
ND	1.610	430	0,214
ON	1.330	809	0,080
OD	1.060	307	0,239
TN	1.460	930	0,055
TD	1.310	523	0,212

5.5 Συμπέρασμα - Απάντηση σε ερευνητικό ερώτημα

Υπάρχει μια προφανής επίδραση του τύπου πετρελαίου στην αποτελεσματικότητα της υποθαλάσσιας έγχυσης χημικών διασποράς.

Οπότε κρίνεται απαραίτητη η διερεύνηση της επίδρασης των χημικών διασποράς στον τύπο του πετρελαίου που θα αποτελεί το προϊόν της εξόρυξης, ώστε να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου SSDI σε αυτό.

Επίσης, για την επιλογή της χρήσης ή μη της μεθόδου SSDI πρέπει να συνεκτιμώνται οι διαφορετικές συνθήκες που επικρατούν στο βιοτικό περιβάλλον της περιοχής (διαχείριση πτηνών, ωτοκία ιχθύων κτλ.), όπου συμβαίνει το περιστατικό διαρροής.

6 Διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας πετρελαίου στην αποτελεσματικότητα της SSDI

6.1 Ερευνητικό ερώτημα

Πώς επηρεάζει η θερμοκρασία του πετρελαίου την αποτελεσματικότητα των χημικών διασποράς όταν χρησιμοποιούνται μέσω της μεθόδου SSDI και ποια είναι η προκύπτουσα μείωση στο μέγεθος των σταγονιδίων πετρελαίου;

6.2 Εισαγωγή - Βιβλιογραφική διερεύνηση

Και στα δύο σενάρια, κατά το σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης σε ενδεχόμενο πετρελαιοκηλίδας και στην πραγματική επιχειρησιακή χρήση χημικών διασποράς, η επιλογή του πιο αποτελεσματικού προϊόντος είναι ζωτικής σημασίας. Η αποτελεσματικότητα των διαθέσιμων προϊόντων διασποράς μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τις ιδιότητες του προϊόντος και του πετρελαίου, τη δοσολογία που χρησιμοποιείται, την αλατότητα του νερού, το βαθμό γήρανσης του πετρελαίου και την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής. Επιπλέον, άλλες ιδιότητες όπως η τοξικότητα, η βιοαποικοδομησιμότητα και το ιξώδες μπορεί να επηρεάσουν την επιλογή του προϊόντος. Οι εταιρείες διαχείρισης κοιτασμάτων πετρελαίου ή οι ιδιοκτήτες διυλιστηρίων συνήθως αξιολογούν διαφορετικά προϊόντα διασποράς σε πραγματικούς τύπους πετρελαίου για να τεκμηριώσουν την επιλογή τους. Η επιλογή των προϊόντων προς αποθήκευση μπορεί να περιλαμβάνει την εύρεση ισορροπίας μεταξύ της αποτελεσματικότητας των χημικών διασποράς σε διάφορους τύπους πετρελαίου και περιβαλλοντικών παραγόντων όπως η θερμοκρασία και η αλατότητα.

Η βιβλιογραφική διερεύνηση (Ενότητα 2.2) αποκάλυψε ότι ένας σημαντικός αριθμός πειραμάτων έχουν διεξαχθεί, σε εργαστήρια και στο πεδίο, στο παρελθόν για τη διερεύνηση της επίδρασης των χημικών διασποράς στη μείωση της ποσότητας και του πάχους του επιφανειακού πετρελαίου. Τα πειράματα αυτά περιλαμβάνουν τόσο την επιφανειακή όσο και την υποθαλάσσια εφαρμογή χημικών διασποράς. Επιπλέον, πολλές εργαστηριακές τεχνικές έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες για τη μέτρηση της αποτελεσματικότητας των χημικών, οι οποίες παρέχουν σχετική αποτελεσματικότητα και χρησιμοποιούνται κυρίως για σύγκριση προϊόντων. Οι μέθοδοι δοκιμών συνήθως περιλαμβάνουν ένα δοχείο που περιέχει έναν καθορισμένο όγκο νερού, ένα σύστημα εφαρμογής πετρελαίου και χημικών διασποράς και ένα σύστημα προσομοίωσης της τύρβης στη θάλασσα. Η αποτελεσματικότητα ποσοτικοποιείται συνήθως με τη μέτρηση της ποσότητας πετρελαίου που απομακρύνεται από την επιφάνεια, συχνά με την ανάλυση της περιεκτικότητας σε πετρέλαιο στο νερό του πειραματικού συστήματος. Αρκετές τυπικές μέθοδοι δοκιμών έχουν αναπτυχθεί όλα αυτά τα χρόνια, όπως οι Mackay Nadeau Steelman - MNS (Καναδάς), Warren Spring Laboratory - WSL (Ηνωμένο Βασίλειο), French Institute of Petroleum - IFP (Γαλλία), Exxon Dispersant Effectiveness Test - EXDET (ΗΠΑ) και Swirling/Baffled flask (ΗΠΑ) (Becker et al., 1991; Bocard, 1982; Sorial et al., 2004; Venosa et al., 2002).

Πολλές από αυτές τις μεθόδους ενσωματώνονται σε εθνικά πρωτόκολλα για την έγκριση χημικών διασποράς, χρησιμοποιούνται σε μελέτες διαλογής χημικών (τύποι προϊόντων/πετρελαίου) και χρησιμοποιούνται για την έρευνα και ανάπτυξη αυτών. Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούν διαφορετικούς μηχανισμούς για την προσομοίωση της επιφανειακής τύρβης (π.χ. περιστροφή, ανακίνηση, ρεύμα αέρα ή κινούμενο έμβολο) και αντιπροσωπεύουν ένα ευρύ φάσμα επιπέδων τύρβης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτές οι εργαστηριακές μέθοδοι παρέχουν μόνο σχετική αποτελεσματικότητα και ενδέχεται να μην αντικατοπτρίζουν την αποτελεσματικότητα που επιτυγχάνεται όταν τα προϊόντα χρησιμοποιούνται σε ένα πραγματικό σενάριο υποθαλάσσιας διαρροής.

Αρκετά συστήματα εργαστηριακών δοκιμών έχουν υποβληθεί σε χαρακτηρισμό όσον αφορά το καθεστώς αναταράξεων τους και έχει αποδειχθεί η σχέση τους με τη θαλάσσια αναταραχή ή την κατάσταση της θάλασσας. Για παράδειγμα, χρησιμοποιήθηκε η δοκιμή Swirling/Baffled

flask (Kaku et al., 2006). Μελέτες προσπάθησαν να δημιουργήσουν μια συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από διάφορες εργαστηριακές μεθόδους, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που συγκρίθηκαν με την αποτελεσματικότητα από μετρήσεις σε δεξαμενές (Belore et al., 2009; Holder et al., 2015; Trudel et al., 2005). Ωστόσο, λόγω των διακυμάνσεων στα επίπεδα ενέργειας, των μεθόδων εφαρμογής χημικών διασποράς (προαναμεμιγμένο ή εφαρμοσμένο στο πετρέλαιο) και στον τρόπο δειγματοληψίας (στατικό/δυναμικό), μπορεί να είναι δύσκολο να επιτευχθούν υψηλές συσχετίσεις μεταξύ της αποτελεσματικότητας που μετράται με διαφορετικές εργαστηριακές μεθόδους. Υπάρχουν περιορισμένα διαθέσιμα δεδομένα από δοκιμές πεδίου της αποτελεσματικότητας των χημικών διασποράς, κυρίως από πειράματα στη Νορβηγία (Daling and Lichtenthaler, 1986; Faksness et al., 2016), που μπορούν να συγκριθούν με εργαστηριακές μελέτες.

Όταν οι επιφανειακές πετρελαιοκηλίδες αντιμετωπίζονται με χημικά, η αποτελεσματικότητα των χημικών διασποράς επηρεάζεται από τις αλλαγές στις ιδιότητες του πετρελαίου που συμβαίνουν λόγω των διεργασιών γήρανσης. Οι διεργασίες αυτές προκαλούν αύξηση του ιξώδους του πετρελαίου λόγω της εξάτμισης και της γαλακτωματοποίησης, η οποία τελικά επηρεάζει την απόδοση των χημικών διασποράς.

Αυτό σημαίνει ότι το λειτουργικό χρονικό περιθώριο (παράθυρο) για τη χρήση χημικών ως μεθόδου έκτακτης ανάγκης εξαρτάται από τον τύπο των χημικών διασποράς, τις ιδιότητες του πετρελαίου και τον βαθμό γήρανσης του πετρελαίου. Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται η αποτελεσματικότητα των χημικών διασποράς Corexit 9500 ως συνάρτηση της γήρανσης (ιξώδες πετρελαίου) για το πετρέλαιο MC252 που διέρρησε συνεπεία του ατυχήματος στο DeepWater Horizon.

Το Σχήμα 6.1 δείχνει ότι η αποτελεσματικότητα του μέσου διασποράς μειώνεται ως συνάρτηση των διεργασιών γήρανσης (που αντιπροσωπεύεται από το ιξώδες του γαλακτωματοποιημένου πετρελαίου) για δύο μεθόδους δοκιμής που αντιπροσωπεύουν τόσο υψηλά όσο και χαμηλά επίπεδα τύρβης (MNS & IFP). Τονίζεται η σημασία της θαλάσσιας κατάστασης, καθώς η υψηλή αποτελεσματικότητα απαιτεί αναταράξεις, οι οποίες δημιουργούνται από το σπάσιμο των κυμάτων.

Για να εκτιμηθεί το χρονικό παράθυρο για τη χρήση των χημικών διασποράς σε αυτόν τον τύπο πετρελαίου, μπορούν να διεξαχθούν δοκιμές διαλογής για την επιφανειακή εφαρμογή των χημικών χρησιμοποιώντας τεχνητώς γηρασμένα πετρέλαια και ένα σχετικό επίπεδο τύρβης (Σχήμα 6.1).

Στο πλαίσιο της SSDI, οι συνθήκες ποικίλλουν σημαντικά. Το χημικό χορηγείται απευθείας σε μια ροή φρέσκου, ζεστού πετρελαίου, συνήθως σε τυρβώδεις συνθήκες. Ως αποτέλεσμα, τα πρωτόκολλα δοκιμών για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της κατάταξης χημικών διασποράς στο πλαίσιο του SSDI μπορεί να χρειαστεί να προσαρμοστούν ώστε να αντικατοπτρίζουν με ακρίβεια τις μοναδικές περιβαλλοντικές συνθήκες που σχετίζονται με αυτήν την τεχνική. Για την ανάπτυξη μιας νέας και βελτιωμένης δοκιμής SSDI σε κλίμακα εργαστηρίου, απαιτούνται να εξεταστούν πολλοί κρίσιμοι παράγοντες, όπως:

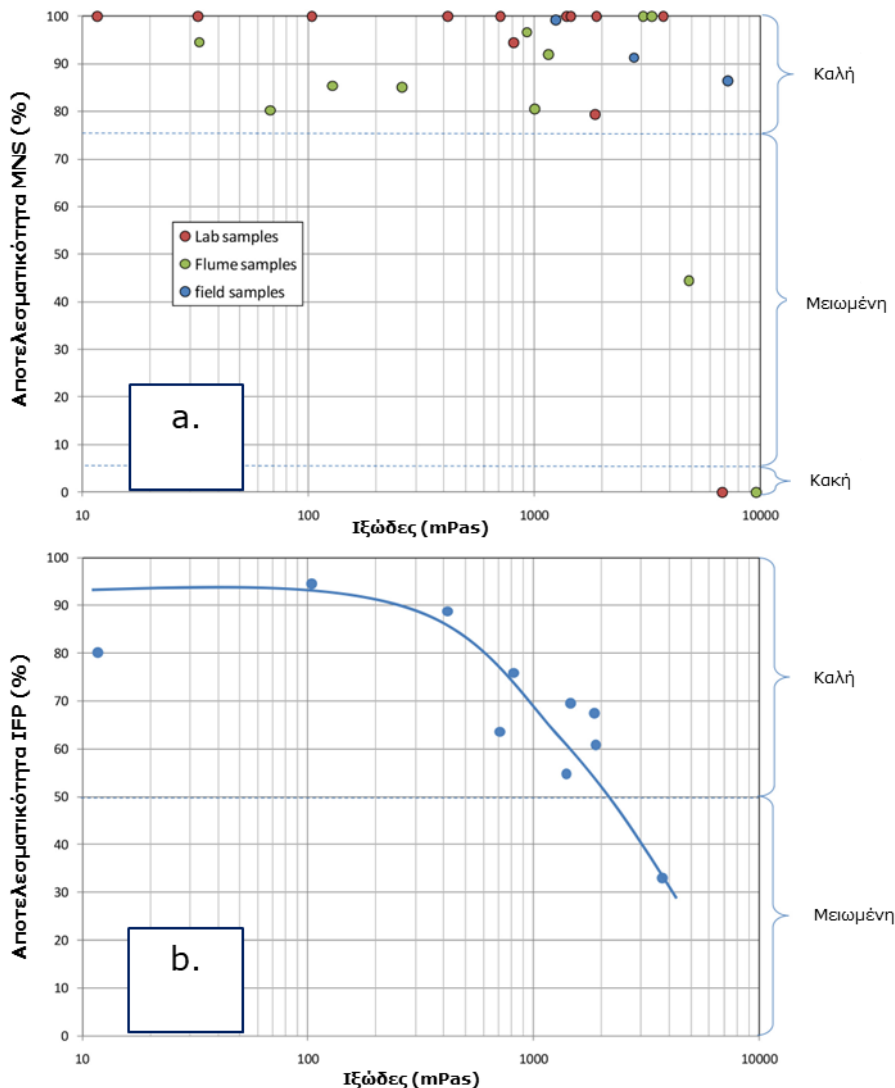
1. Το επίπεδο αναταράξεων εντός της δοκιμής πρέπει να αντιστοιχεί στις πραγματικές συνθήκες μιας υποθαλάσσιας διαρροής και θα πρέπει να μπορεί να μεταβάλλεται.
2. Το χημικό διασποράς πρέπει να εγχυθεί απευθείας στο δείγμα πετρελαίου χρησιμοποιώντας μια αντιπροσωπευτική τεχνική έγχυσης.
3. Η αποτελεσματικότητα των χημικών διασποράς θα πρέπει να αξιολογείται με βάση τη μείωση του μεγέθους των σταγονιδίων πετρελαίου.
4. Θα πρέπει να είναι εφικτό να δημιουργηθεί μια συσχέτιση μεταξύ των συνθηκών διαρροής στη μέθοδο δοκιμής, των δοκιμών δεξαμενής μεγάλης κλίμακας και των πραγματικών συνθηκών πεδίου.

Ένα πρωτόκολλο δοκιμής που είναι αποτελεσματικό θα πρέπει να περιλαμβάνει τη συνεχή

παρακολούθηση των μεγεθών σταγονιδίων πετρελαίου κατά την έγχυση των χημικών διασποράς σε μια σταθερή ροή πετρελαίου. Αυτό επιτρέπει την αποτελεσματική δοκιμή μίας ευρέος φάσματος δοσολογίας χημικών μεταξύ 0,1% και 4%.

Στη Ενότητα 6.4.3 παρουσιάζονται τα συνολικά αποτελέσματα από τη μέθοδο δοκιμής που αναπτύχθηκε βάσει των πειραμάτων θερμοκρασίας αλλά και των άλλων που προηγήθηκαν. Η μέθοδος αυτή, γνωστή ως Δοκιμή Αποτελεσματικότητας Έγχυσης Χημικών Διασποράς (Dispersant Injection Efficiency Test, DIET), λαμβάνει υπόψη τα σχετικά επίπεδα αναταράξεων, τις μεθόδους έγχυσης και την ποσοτικοποίηση της αποτελεσματικότητας για την SSDI.

Η δοκιμή DIET πραγματοποιήθηκε στην εργαστηριακή διάταξη MiniTower. Η διάταξη MiniTower αποτελεί μία, μικρότερης κλίμακας, έκδοση του Tower Basin, που χρησιμοποιείται στον οργανισμό SINTEF για πολλά χρόνια. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν σημαντική διαφορά στην κατάταξη προϊόντων μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων δοκιμής.



Σχήμα 6.1 Αποτελεσματικότητα διασποράς, (a) MNS (υψηλός στροβιλισμός) και (b) IFP (χαμηλός στροβιλισμός) δειγμάτων πετρελαίου MC252 που έχουν δοκιμαστεί σε εργαστήριο, πειράματα δεξαμενής Flume και δείγματα πεδίου από τον Κόλπο του Μεξικού (2010) σε γραφική παράσταση έναντι του ιξώδους για τα δείγματα (Πηγή: Daling et al., 2014)

6.3 Υλικά και μέθοδοι

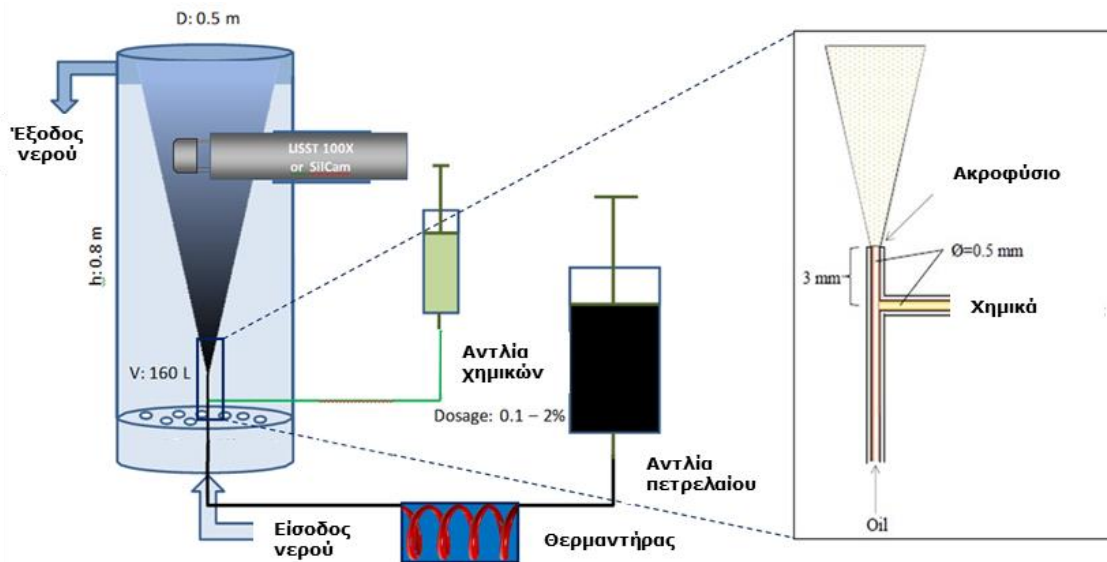
6.3.1 Πειραματική διάταξη

6.3.1.1 Γενικά

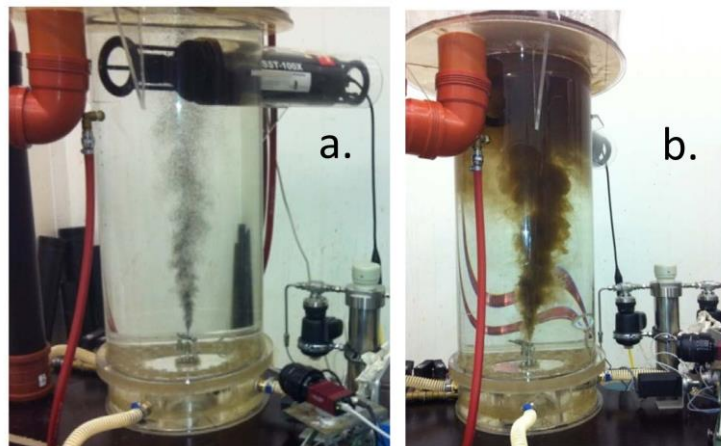
Η προτεινόμενη εργαστηριακή διάταξη που εφαρμόζεται στο πλαίσιο μια νέας μεθοδολογίας δοκιμών που λαμβάνει υπόψη τα επίπεδα τύρβης, την έγχυση χημικού διασποράς και την ποσοτικοποίηση της αποτελεσματικότητας στο πλαίσιο SSDI, απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2. Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει τη δεξαμενή (όγκου 160 L), τις αντλίες πετρελαίου και χημικών, την αντλία θαλασσινού νερού, τη συσκευή θέρμανσης του πετρελαίου (το κουτί στο οποίο τοποθετήθηκε ο θερμαντήρας πετρελαίου, είναι κατασκευασμένο από πολυανθρακικό υλικό, με αντοχή έως 147°C, Σχήμα 6.2) και το όργανο μέτρησης της διαμέτρου των σταγονιδίων πετρελαίου Laser InSitu Scattering and Transmissometry (LISST).

Πίνακας 6.1 Παράμετροι και τιμές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών

Παράμετρος	Τιμή
Διαστάσεις δεξαμενής	0,8 m, 0,5 m και 160 L (ύψος, διάμετρος, όγκος)
Διάμετρος ακροφυσίου έκλυσης	0,5 mm (κυκλικό)
Ρυθμός ροής πετρελαίου	0,1 L/min
Εύρος θερμοκρασίας πετρελαίου	20-80°C
Μέθοδος ένεσης διασποράς	Εργαλείο προσομοίωσης έγχυσης (SIT)
Δοσολογία διασποράς	1%
Ρυθμός ροής νερού	30-100 L/min



Σχήμα 6.2 Διάγραμμα της νέας δοκιμής αποτελεσματικότητας υποθαλάσσιας διασποράς (DIET), που απεικονίζει το σύστημα ροής του φυσικού θαλασσινού νερού, το σύστημα έγχυσης των χημικών διασποράς, το σύστημα διαρροής πετρελαίου και το σύστημα σκέδασης LISST χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση μεγεθών σταγονιδίων (Πηγή: Brandvik et al., 2019 και επεξεργασία)



Σχήμα 6.3 Πλούμιο από μη επεξεργασμένο πετρέλαιο Oseberg Blend (a) και από επεξεργασμένο με 1% χημικά πετρέλαιο Oseberg Blend (b) (Πηγή: [Brandvik et al., 2019](#))

6.3.1.2 LISST

Η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του μέσου διασποράς στην πρωτότυπη συσκευή δοκιμής προσδιορίζεται συγκρίνοντας τα μεγέθη των σταγονιδίων πετρελαίου που έχουν υποστεί επεξεργασία με το χημικό διασποράς με μη επεξεργασμένα σταγονίδια πετρελαίου.

Η κατανομή μεγέθους των σταγονιδίων μετράται χρησιμοποιώντας ένα τυπικό όργανο LISST, και συγκεκριμένα το LISST100X. Για τη διασφάλιση σταθερών και ομοιογενών συνθηκών και για την επίτευξη της απαραίτητης αραιώσης του νέφους πετρελαίου (10-300 rpm), το όργανο λειτουργεί σε απόσταση 50 cm πάνω από το ακροφύσιο. Σφαιρικά σωματίδια μονοδιασποράς με μεγέθη 80 μm και 360 μm εγχέονται στη διαδρομή μέτρησης του οργάνου με σκοπό τη βαθμονόμηση μεγέθους και την τεκμηρίωση.

Η περίθλαση λέιζερ είναι μια τεχνική ανάλυσης μεγέθους σωματιδίων που επηρεάζεται ελάχιστα από τη σύνθεση των σωματιδίων λόγω της σκέδασης του φωτός λέιζερ σε μικρές προς τα εμπρός γωνίες. Αυτό συμβαίνει επειδή η σκέδαση φωτός που παρατηρείται σε αυτές τις γωνίες καθορίζεται σχεδόν εξ ολοκλήρου από το φως που διαθλάται από το σωματίδιο ([Andrews et al., 2010](#)). Επομένως, η μέθοδος είναι ως επί το πλείστον ανεξάρτητη από τη σύνθεση σωματιδίων, εκτός από τα αποτελέσματα σχήματος. Δεδομένου ότι τα σωματίδια που μετρώνται είναι σφαιρικά, οι αβεβαιότητες λόγω σχήματος είναι αμελητέες ([Andrews et al., 2010](#); [Karp-Boss et al., 2007](#)).

Η συγκέντρωση και τα μεγέθη των σταγονιδίων επηρεάζουν την οπτική πυκνότητα, η οποία μπορεί να μειώσει και να κρύψει τη σκέδαση του φωτός. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, χρησιμοποιήθηκε ένας μειωτής οπτικής διαδρομής για την επέκταση του εύρους συγκέντρωσης για το όργανο LISST. Το όργανο λειτουργούσε σε απόσταση 50 cm από το σημείο διαρροής για να διασφαλιστεί η επαρκής αραιώση του πλουμίου πετρελαίου διατηρώντας παράλληλα επαρκή οπτική πυκνότητα για ακριβείς μετρήσεις.

Η μέθοδος περίθλασης λέιζερ παρέχει μια ισοδύναμη κατανομή μεγέθους σφαίρας που είναι κατάλληλη για αυτήν τη διερεύνηση. Το όργανο LISST λαμβάνει 10 μετρήσεις κάθε δευτερόλεπτο, καλύπτοντας 32 λογαριθμικά χωριστά διαστήματα στην περιοχή 5 – 500 μm, και τις αποθηκεύει ως μέση ένδειξη. Για αυτήν τη διερεύνηση, χρησιμοποιήθηκε ένας μέσος όρος σε μια περίοδο 30 s για την ποσοτικοποίηση κάθε κατανομής μεγέθους σταγονιδίων, η οποία μειώνει τις αβεβαιότητες που προκύπτουν από τις διακυμάνσεις στους ρυθμούς ροής του πετρελαίου ή του μέσου διασποράς και την ανομοιογένεια στην άνοδο του πλουμίου πετρελαίου και αερίου. Περισσότερες λεπτομέρειες παρουσιάζονται στη μελέτη των [Davies et al. \(2012\)](#).

Ωστόσο, το όργανο LISST δεν έχει την ικανότητα να διαφοροποιεί τις σταγόνες πετρελαίου και τις φυσαλίδες αερίου. Σε σενάρια όπου απελευθερώνεται τόσο πετρέλαιο όσο και αέριο, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια κάμερα Silhouette για την ακριβή ποσοτικοποίηση των

σωματιδίων και των δύο τύπων (Davies et al., 2017).

6.3.1.3 Τεχνικές έγχυσης χημικών

Στη μελέτη των Brandvik et al. (2018), διαφορετικές μέθοδοι έγχυσης χημικών διασποράς αξιολογήθηκαν ως προς την αποτελεσματικότητά τους. Μία από τις τεχνικές έγχυσης, το Εργαλείο Προσομοιωμένης Εισαγωγής (simulated inserted tool, SIT), επιλέχθηκε για χρήση στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης. Η μέθοδος SIT περιλαμβάνει την έγχυση των χημικών διασποράς στο ρεύμα πετρελαίου σε απόσταση 6 διαμέτρων ακροφυσίου (D) πριν από το άνοιγμα διαρροής.

Αυτή η τεχνική μιμείται ένα σενάριο όπου το χημικό διασποράς εγχέεται σε σωλήνα με διάμετρο 0,5 mm χρησιμοποιώντας μια ράβδο που εισάγεται 3,0 mm (6 D) προς τα κάτω. Η αποτελεσματικότητα των χημικών διασποράς μπορεί να μειωθεί εάν προαναμιχθεί με τασιενεργά (surfactants), με αποτέλεσμα το σχηματισμό συσσωματωμάτων τασιενεργών στο πετρέλαιο με μεγάλο χρόνο αποσάθρωσης (>100 ms) και γρήγορο σχηματισμό σταγονιδίων πετρελαίου (<10 ms). Επομένως, δεν συνιστάται η χρήση προαναμιγμένων χημικών σε εργαστηριακά πειράματα που στοχεύουν στη μελέτη SSDI (Brandvik et al., 2018).

6.3.2 Επιλεγμένοι τύποι χημικών και πετρελαίων

6.3.2.1 Χημικά διασποράς

Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας διαφορετικών χημικών έναντι της θερμοκρασίας πετρελαίου περιελάμβαναν μόνο τη χρήση του Corexit 9500.

Ωστόσο, για την ανάπτυξη του νέου πρωτοκόλλου, και άλλα χημικά όπως τα Finasol OSR-52 και OSR-62, Super dispersant 25, και Dasic Slickgone NS χρησιμοποιήθηκαν επίσης σε προηγούμενα πειράματα. Όλα τα χημικά διασποράς χρησιμοποιήθηκαν όπως παραλήφθηκαν από τους προμηθευτές τους.

6.3.2.2 Πετρέλαια

Οι τέσσερις τύποι πετρελαίων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη διερεύνηση επιλέχθηκαν για να εκτείνονται οι ιδιότητες του πετρελαίου (Πίνακας 6.2).

Πίνακας 6.2 Χαρακτηριστικά πετρελαίων σε πειραματικές δοκιμές θερμοκρασίας

Τύπος πετρελαίου	Ονομασία	Πυκνότητα (g/mL)	IFT	Σημείο ροής (°C)	Wax. (%)	Asph. (%)	Ιξώδες (mPa·s, 13°C at 10s ⁻¹)
Ασφαλτενικό	Grane	0,941	11	-24	1,4	3,2	667
Κηρώδες	Norne	0,860	20	12	4,32	0,3	89
Παραφινικό	Oseberg Blend	0,828	17	-6	2,5	0,24	5
Ναφθενικό	Troll B	0,900	20	-36	0,95	0,09	20

Επίσης παρουσιάζονται και οι τύποι των πετρελαίων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του νέου πρωτοκόλλου (Πίνακας 6.3).

Πίνακας 6.3 Χαρακτηριστικά πετρελαίων για τη δημιουργία πρωτοκόλλου δοκιμών

Τύπος πετρελαίου	Ονομασία	Πυκνότητα (g/mL)	Σημείο ροής (°C)	Wax. (%)	Asph. (%)	Ιξώδες (mPa·s, 13°C at 10s ⁻¹)
Ασφαλτενικό	Brynhild	0,880	-6	4,6	2,6	42
Κηρώδες	Skarfjell	0,824	-12	7,7	0,03	12
Παραφινικό	Maria	0,847	-24	3,7	0,55	17
Ναφθενικό	Skrugard	0,871	-36	1,9	0,05	32

Στο γενικότερο πλαίσιο ανάπτυξης του νέου πρωτοκόλλου διενεργήθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι πειραμάτων: 1) Πειράματα με μεταβαλλόμενη θερμοκρασία πετρελαίου, που αφορούν την πειραματική διερεύνηση, και 2) Πειράματα διαλογής, όπου ο τύπος και η δοσολογία των χημικών διασποράς ποικίλλουν, τα οποία προηγήθηκαν της πραγματοποιηθείσας πειραματικής διερεύνησης. Ο σκοπός των πειραμάτων θερμοκρασίας ήταν να διερευνηθεί η επίδραση της θερμοκρασίας στην αποτελεσματικότητα των χημικών διασποράς και να προσδιοριστεί η κατάλληλη θερμοκρασία πετρελαίου για το πρωτόκολλο δοκιμής.

Τα δεδομένα των πειραμάτων (ημερομηνία & τύπος πετρελαίου) που πραγματοποιήθηκαν κατά την παρούσα διερεύνηση παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4.

Πίνακας 6.4 Δεδομένα πειραμάτων

Κωδ. Πειράματος	Ονομασία πετρελαίου	Ημερομηνία διεξαγωγής	Κωδ. Πειράματος	Ονομασία πετρελαίου	Ημερομηνία διεξαγωγής
G1	Grane	10/12/2015	T1	Troll B	23/09/2015
N1	Norne	28/10/2015	T2	Troll B	28/09/2015
N2	Norne	30/10/2015	T3	Troll B	02/10/2015
O1	Oseberg Blend	01/02/2016	T4	Troll B	19/02/2016
O2	Oseberg Blend	04/02/2016			

Πριν από τη διεξαγωγή οποιασδήποτε από τις μεθόδους δοκιμών, η δεξαμενή του MiniTower υποβάλλεται σε ενδεδειγμένη διαδικασία καθαρισμού, ακολουθούμενη από διαδικασία έκπλυσης 5 min με φιλτραρισμένο φυσικό θαλασσινό νερό (35 ppt) με παροχή 30 L/min. Η έγχυση πετρελαίου (1.000 ml) και χημικών διασποράς (10 ml) πραγματοποιείται με χρήση χωριστών προγραμματιζόμενων εμβολοφόρων αντλιών (Σχήμα 6.2). Η συνεχής ροή του φιλτραρισμένου φυσικού θαλασσινού νερού διατηρείται με τη χρήση της γενικής παροχής θαλάσσιου νερού (6 atm), η οποία είναι η τυπική παροχή νερού για όλα τα θαλάσσια εργαστήρια που λειτουργεί η SINTEF Ocean. Ο ρυθμός ροής μπορεί να ρυθμιστεί εντός της περιοχής 30-100 L/min και η θερμοκρασία μπορεί να διατηρηθεί μεταξύ 9°C και 12°C. Η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού μετρείται πάνω από το MiniTower, στο διαμέρισμα υπερχειλίσης.

Η θερμοκρασία του πετρελαίου μετρείται περίπου 10 cm πριν από το ακροφύσιο, το χημικό διασποράς είναι πάντα σε θερμοκρασία δωματίου. Το πετρέλαιο μπορεί να έλθει σε μια επιλεγμένη θερμοκρασία περνώντας από έναν θερμαντήρα πετρελαίου. Ο θερμαντήρας περιέχεται σε ένα δοχείο υγρού, που αποτελείται από ένα μείγμα συμπυκνωμένου αντιψυκτικού και νερού, σε αναλογία 70:30, ώστε να φτάσει σε υψηλότερες θερμοκρασίες και να μην εξατμιστεί. Για λόγους ασφαλείας, το μέγιστο όριο θερμοκρασίας ήταν 120°C, το οποίο επιτεύχθηκε μετά από 9 min. Καθώς το πετρέλαιο χρειάζεται χρόνο για να ζεσταθεί, η μέγιστη θερμοκρασία που θα μπορούσε να επιτευχθεί για το πετρέλαιο ήταν περίπου 90°C.

6.3.2.3 Πειράματα δοσολογίας

Τα πειράματα που αφορούν τη μελέτη της επίδρασης της δοσολογίας των χημικών, όπως έχει προαναφερθεί προηγήθηκαν της πραγματοποιηθείσας πειραματικής διερεύνησης και διενεργήθηκαν με την ακόλουθη μέθοδο:

1. Το θαλασσινό νερό ρυθμίστηκε να ρέει συνεχώς με ρυθμό 30 L/min.
2. Έγινε εγγραφή στο παρασκήνιο για περίοδο 5 min χρησιμοποιώντας είτε το όργανο LISST 100X είτε το όργανο SilCam.
3. Έγινε έγχυση μη επεξεργασμένου πετρελαίου και τα μεγέθη σταγονιδίων παρακολουθήθηκαν για διάρκεια 60 s.
4. Το μέσο διασποράς στη συνέχεια εγχύθηκε στο πετρέλαιο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο SIT σύμφωνα με τις πληροφορίες που παρέχονται στην Ενότητα 6.3.1.3. Τα μεγέθη των σταγονιδίων παρακολουθήθηκαν για διάρκεια 60 s.

5. Τα μεγέθη σταγονιδίων του πετρελαίου παρακολουθήθηκαν για 60 s για κάθε αύξηση στη δόση των χημικών διασποράς (0,1% - 2%).
6. Τα πειράματα ολοκληρώθηκαν με αντιγραφή της έγχυσης μη επεξεργασμένου πετρελαίου όπως περιγράφεται στο βήμα 3 παραπάνω.

6.3.2.4 Πειράματα θερμοκρασίας πετρελαίου

Η μεθοδολογία που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα χρησιμοποιήθηκε επίσης σε αυτά τα πειράματα, με τη συμπίληψη της θερμοκρασίας πετρελαίου ως πρόσθετη μεταβλητή. Το πετρέλαιο έπεσε από ένα θερμαντήρα ώστε η θερμοκρασία του από τους 20°C (θερμοκρασία περιβάλλοντος) στους 80°C με ρυθμό 6°C/min σε διάστημα 10 min. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρόνου, χορηγήθηκε χημικό διασποράς (SIT) για διαστήματα των 30 s. Αυτή η διαδικασία έδωσε δεδομένα μεγέθους σταγονιδίων για ολόκληρο το εύρος θερμοκρασίας σε αυξήσεις περίπου 10°C τόσο για το μη επεξεργασμένο πετρέλαιο όσο και για το πετρέλαιο που έχει υποστεί επεξεργασία με χημικά.

Συνοπτικά, το πετρέλαιο θερμαινόταν συνεχώς από περίπου 16°C έως 90°C σε 10 min. Οι δύο μέθοδοι εναλλάσσονταν: χωρίς έγχυση και με χρήση χημικών διασποράς. Τα αποτελέσματα των δύο συγκρίθηκαν μεταξύ τους και η αποτελεσματικότητα μπορούσε να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$\text{Αποτελεσματικότητα} = \frac{d_{50.non-treaded} - d_{50.treaded}}{d_{50.non-treaded}} * 100\%$$

Προκειμένου να διασφαλιστεί η συνέπεια μεταξύ των πειραμάτων, επιλέχθηκε μια τυπική θερμοκρασία 50°C για δοκιμή. Αυτή η θερμοκρασία θεωρείται πιο αντιπροσωπευτική των υποθαλάσσιων εκλύσεων και επίσης μειώνει τις δυσκολίες που σχετίζονται με τα πολύ παχύρρευστα πετρέλαια. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως για τα πειράματα θερμοκρασίας, επιλέχθηκε η χρήση του χημικού Corexit 9500, με τιμή DOR ίση με 1%.

6.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Τρεις διαφορετικοί τύποι πειραμάτων συζητούνται σε αυτήν την ενότητα, τα δύο εξ αυτών πραγματοποιήθηκαν σε προηγούμενες μελέτες, αλλά στο σύνολό τους αποτελούν τη βάση για τη δημιουργία του νέου πρωτοκόλλου. Είναι οι ακόλουθοι:

1. Πειράματα θερμοκρασίας πετρελαίου,
2. Πειράματα δοσολογίας χημικών διασποράς, και
3. Σύγκριση διαλογής αποτελεσματικότητας χημικών διασποράς για εφαρμογή SSDI (DIET) και επιφανειακής διασποράς (IFP).

6.4.1 Αποτελεσματικότητα της μεθόδου SSDI στο μέγεθος σταγονιδίων πετρελαίου σε διάφορες θερμοκρασίες διαρροής

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αυτή η εργασία αφορά στη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας και πιο συγκεκριμένα στην εξάρτηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου SSDI από τη θερμοκρασία του πετρελαίου. Επίσης δευτερεύων σκοπός είναι ο προσδιορισμός της κατάλληλης θερμοκρασίας πετρελαίου για τυποποιημένες δοκιμές.

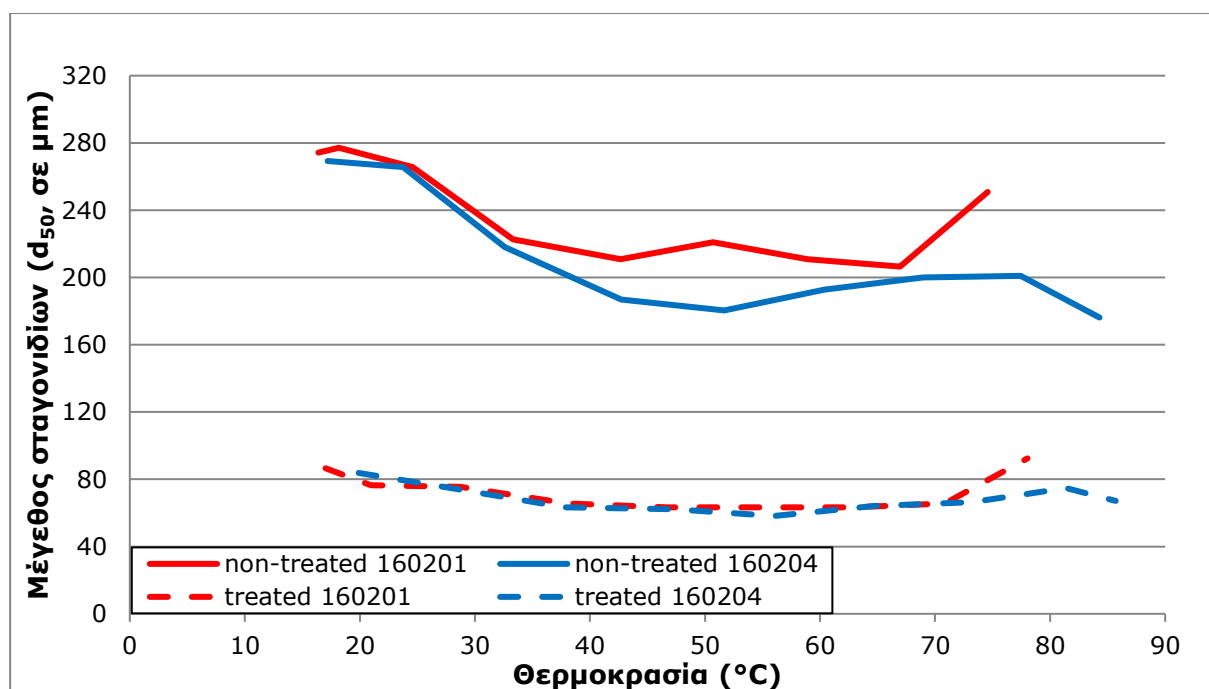
Η αποτελεσματικότητα της SSDI, εκφρασμένη ως μείωση της μέσης διαμέτρου σταγονιδίων πετρελαίου d_{50} (με 1% δόση χημικών διασποράς), αξιολογήθηκε ως συνάρτηση της θερμοκρασίας (που κυμαίνεται από 20°C έως 80°C) για τέσσερα διαφορετικά πετρέλαια από τους 4 γενικούς τύπους, και συγκεκριμένα τα Troll B, Oseberg Blend, Norne και Grane, αντίστοιχα, όπως φαίνεται στα Σχήμα 6.4 έως Σχήμα 6.11.

Τα ευρήματα αποκάλυψαν ότι, γενικά, η μείωση του ιξώδους πετρελαίου λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας είχε ως αποτέλεσμα να παρατηρηθεί μία αμυδρή μείωση της μέσης διαμέτρου των σταγονιδίων πετρελαίου για τους τρεις τύπους πετρελαίου χωρίς τη χρήση

SSDI (Σχήμα 6.4, Σχήμα 6.6 και Σχήμα 6.10). Στην περίπτωση του Norne η αύξηση της θερμοκρασίας δεν μετέβαλλε τη μέση διάμετρο των σταγονιδίων του μη επεξεργασμένου πετρελαίου (Σχήμα 6.8).

Με τη χρήση των χημικών διασποράς παρατηρήθηκε μία σημαντική μείωση της διαμέτρου με την ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας για τα πετρέλαια Oseberg Blend και Grane (Σχήμα 6.6 και Σχήμα 6.10, αντίστοιχα). Η ενισχυμένη αποτελεσματικότητα του SSDI με υψηλότερη θερμοκρασία πετρελαίου, με αποτέλεσμα μικρότερα σταγονίδια, μπορεί να αποδοθεί στη μείωση του ιξώδους πετρελαίου και της διεπιφανειακής τάσης πετρελαίου-νερού (IFT). Επιπλέον, οι ρυθμοί διάχυσης των εγχυόμενων τασιενεργών στη διεπιφάνεια πετρελαίου-νερού θα μπορούσαν επίσης να είναι υψηλότεροι σε χαμηλότερα ιξώδη. Αντιθέτως δεν παρατηρήθηκε επίδραση της θερμοκρασίας στην περίπτωση των πετρελαίων Troll B και Norne (Σχήμα 6.4 και Σχήμα 6.8, αντίστοιχα).

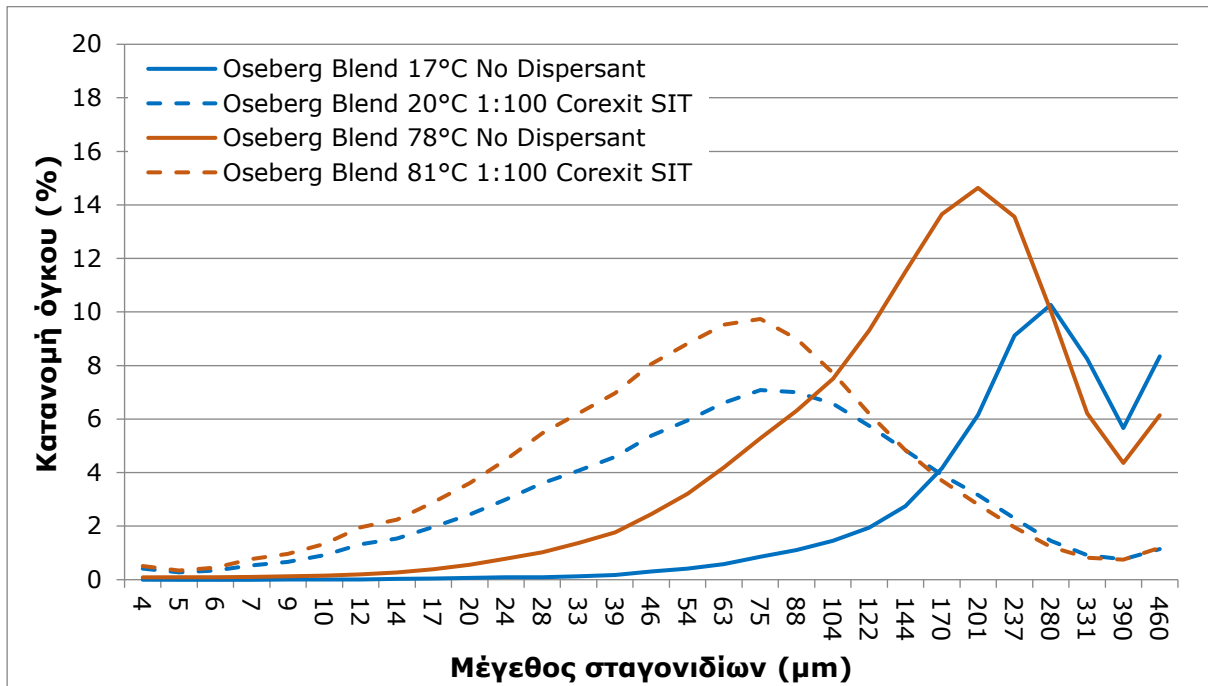
Αναλυτικά, στο Σχήμα 6.4 παρατηρείται ότι στα παραφινικά πετρέλαια και συγκεκριμένα στο Oseberg Blend, η αποτελεσματικότητα των χημικών διασποράς μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και έως τη θερμοκρασία $\approx 35^{\circ}\text{C}$. Μετά τη θερμοκρασία αυτή η αποτελεσματικότητα παραμένει σταθερή.



Σχήμα 6.4 Αποτελεσματικότητα SSDI με μίγμα Oseberg (παραφινικό) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ($\approx 20-80^{\circ}\text{C}$) που εκφράζεται ως μείωση των μεγεθών σταγονιδίων (d_{50}) μετά την έγχυση των χημικών διασποράς. Μέγεθος ακροφυσίου: 0,5 mm, ταχύτητα ροής πετρελαίου: 0,1 L/min και δόση διασποράς 1%

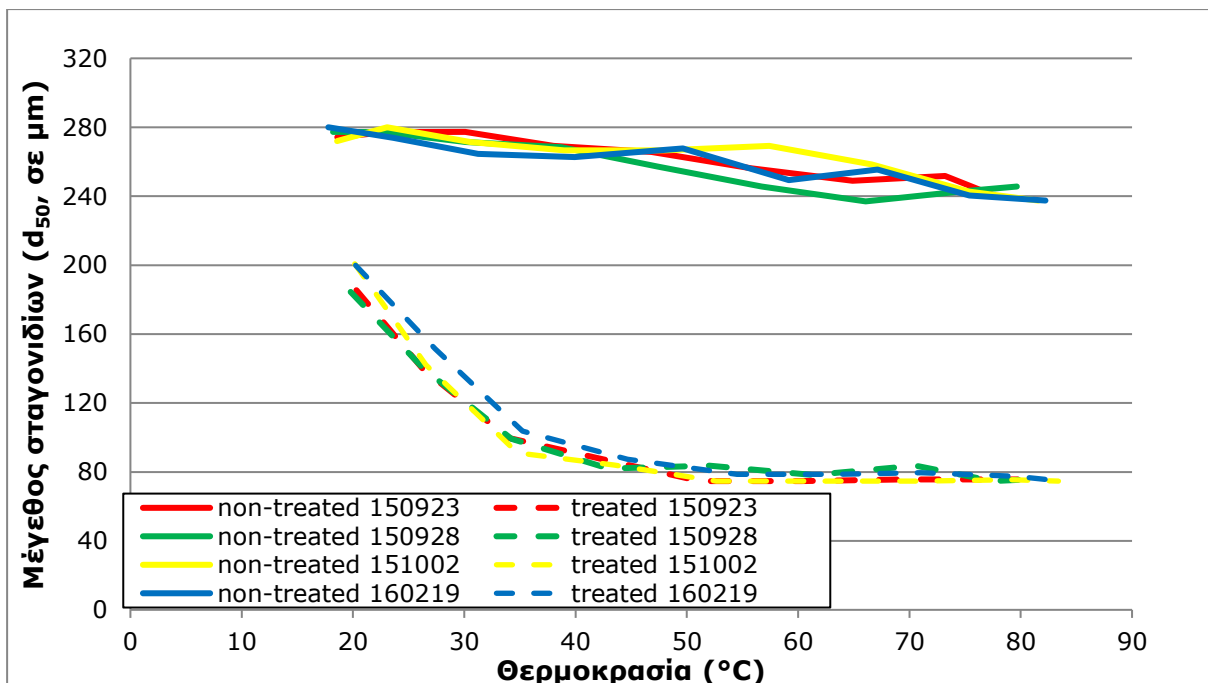
Στο Σχήμα 6.5 παρατηρείται ότι μεγαλύτερη μετατόπιση στην κατανομή του όγκου και αύξηση του ποσοστού παρουσιάζεται για την περίπτωση του μη επεξεργασμένου πετρελαίου με την αύξηση της θερμοκρασίας (από 280 σε 201 μm και από 10 σε 14,5%, αντίστοιχα) από 20 σε 80°C .

Αντιστοίχως για την περίπτωση με τη χρήση χημικών παρατηρείται αμελητέα μετατόπιση του κέντρου της κατανομής του όγκου και του αντίστοιχου ποσοστού του επεξεργασμένου πετρελαίου με την αύξηση της θερμοκρασίας (από 75 σε 63 μm και από 7 σε 10%, αντίστοιχα) από 20 σε 80°C .



Σχήμα 6.5 Κατανομές μεγέθους σταγονιδίων (% όγκου) για πετρέλαιο με και χωρίς χημικά ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ($\approx 20^{\circ}\text{C}$ & 80°C) για το πείραμα στις 04/02/2016, Oseberg Blend (παραφινικό)

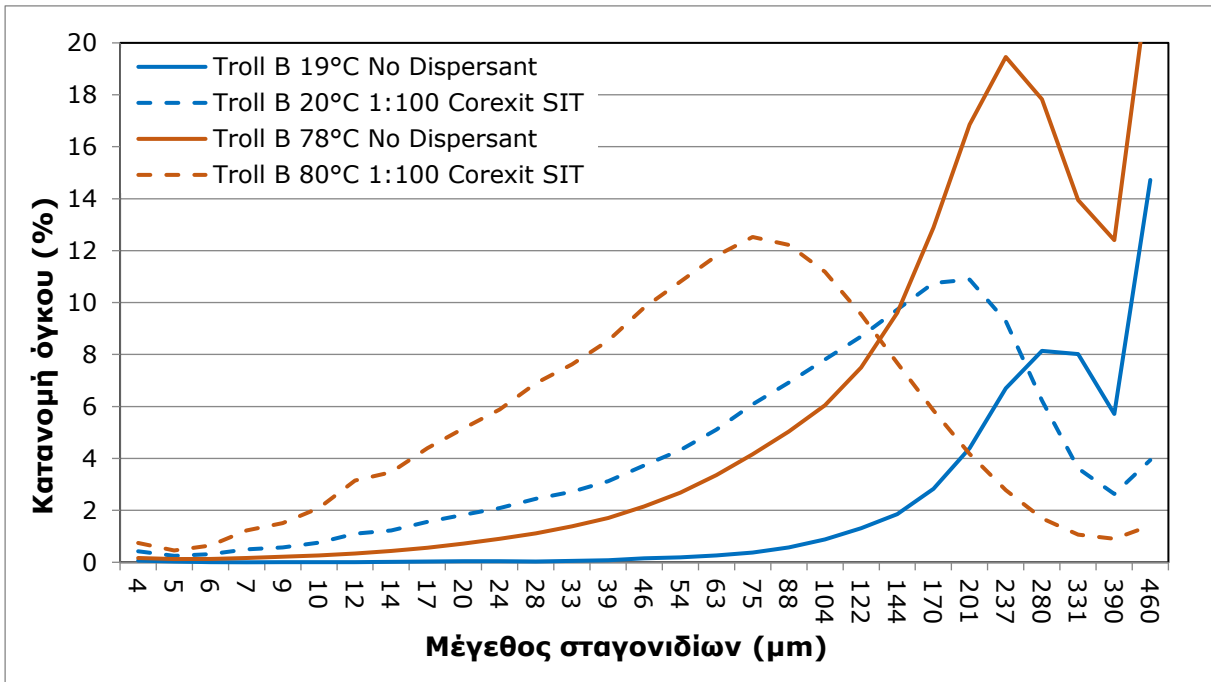
Στο Σχήμα 6.6 παρατηρείται ότι στα ναφθενικά πετρέλαια και συγκεκριμένα στο Troll B, η αποτελεσματικότητα των χημικών διασποράς αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και έως τη θερμοκρασία $\approx 40^{\circ}\text{C}$. Μετά τη θερμοκρασία αυτή η αποτελεσματικότητα μειώνεται σταθερά αλλά σε μικρό βαθμό.



Σχήμα 6.6 Αποτελεσματικότητα SSDI με Troll B (ναφθενικό) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ($\approx 20-80^{\circ}\text{C}$) που εκφράζεται ως μείωση των μεγεθών σταγονιδίων (d_{50}) μετά την έγχυση χημικών διασποράς. Μέγεθος ακροφυσίου: 0,5 mm, ταχύτητα ροής πετρελαίου: 0,1 L/min και δόση διασποράς 1%

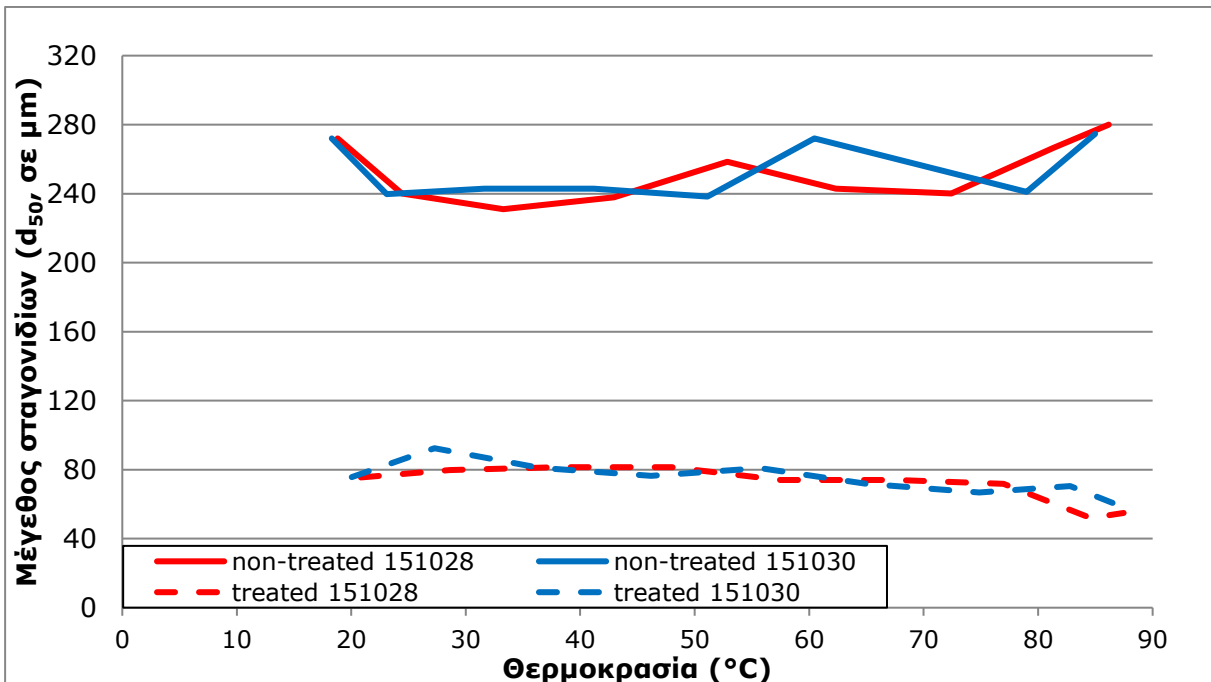
Στο Σχήμα 6.7 παρατηρείται ότι μεγαλύτερη μετατόπιση στην κατανομή του όγκου και

αύξηση του ποσοστού παρουσιάζεται για την περίπτωση του επεξεργασμένου πετρελαίου με την αύξηση της θερμοκρασίας (από 201 σε 73 μm) από 20 σε 80°C.

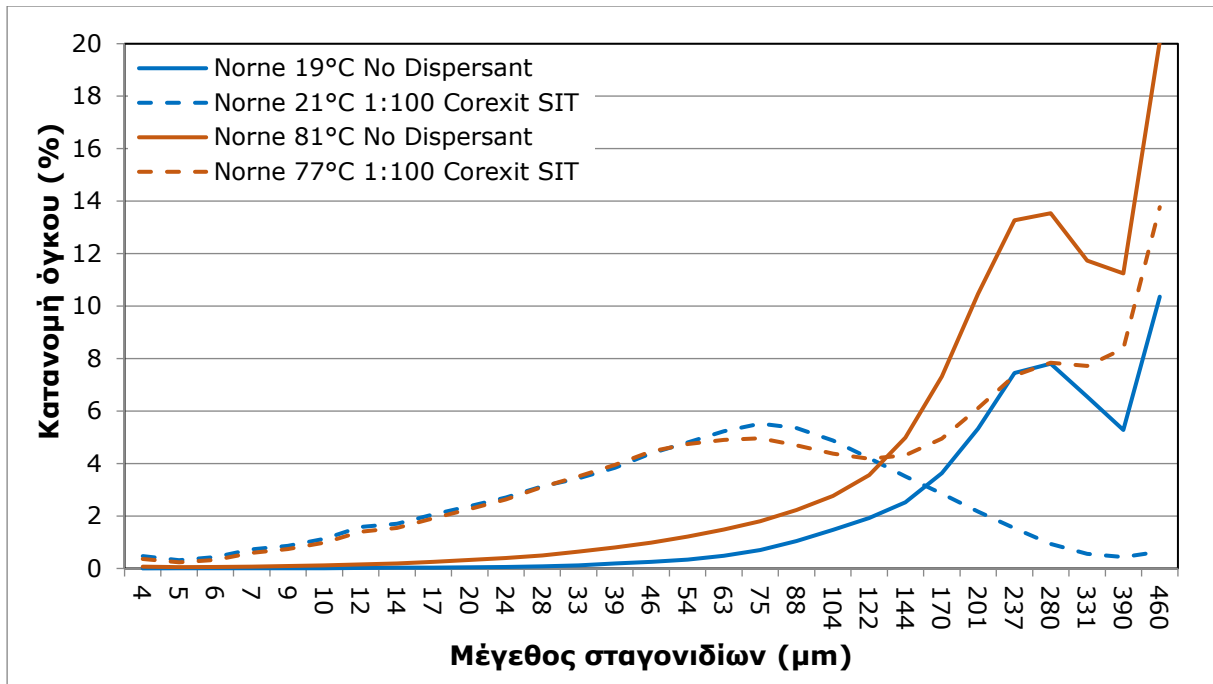


Σχήμα 6.7 Κατανομές μεγέθους σταγονιδίων (% όγκου) για πετρέλαιο με και χωρίς χημικά ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ($\approx 20^\circ\text{C}$ & 80°C) για το πείραμα στις 23/09/2015, Troll B (ναφθενικό)

Στο Σχήμα 6.8 παρατηρείται ότι στα κηρώδη πετρέλαια και συγκεκριμένα στο Norne, η αποτελεσματικότητα των χημικών διασποράς είναι ανεξάρτητη από την αύξηση της θερμοκρασίας.

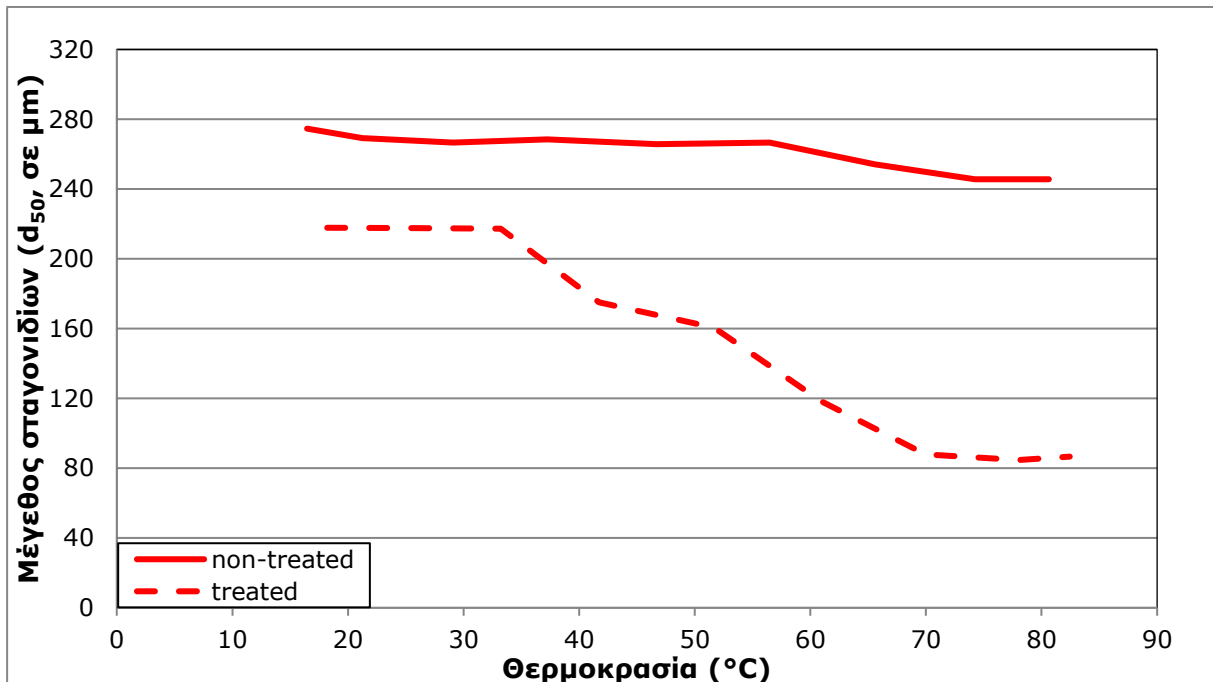


Σχήμα 6.8 Αποτελεσματικότητα SSDI με Norne (κηρώδες) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ($\approx 20-80^\circ\text{C}$) που εκφράζεται ως μείωση των μεγεθών σταγονιδίων (d_{50}) μετά την έγχυση των χημικών διασποράς. Μέγεθος ακροφυσίου: 0,5 mm, ταχύτητα ροής πετρελαίου: 0,1 L/min και δόση διασποράς 1%



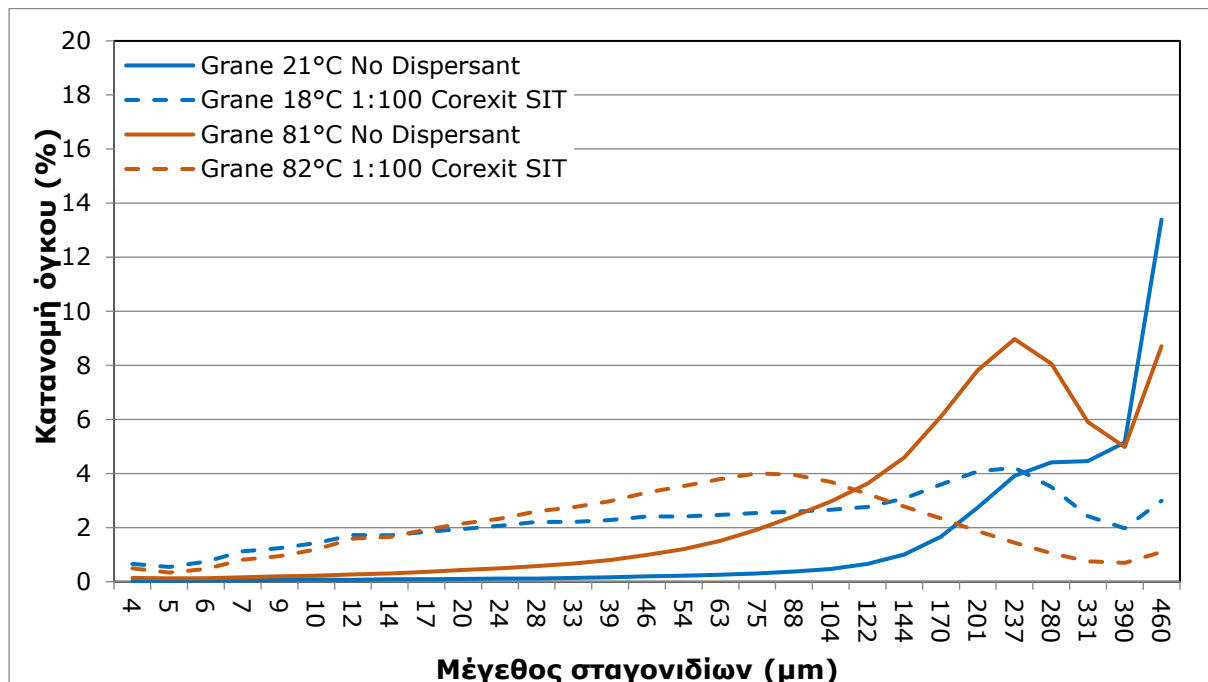
Σχήμα 6.9 Κατανομές μεγέθους σταγονιδίων (% όγκου) για πετρέλαιο με και χωρίς χημικά ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ($\approx 20^{\circ}\text{C}$ & 80°C) για το πείραμα στις 28/10/2015, Norne (κηρώδες)

Στο Σχήμα 6.10 παρατηρείται ότι στα ασφαλτενικά πετρέλαια και συγκεκριμένα στο Grane, η αποτελεσματικότητα των χημικών διασποράς, δεν μεταβάλλεται για θερμοκρασίες έως 30°C , αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασία για θερμοκρασιακό εύρος 30 έως 70°C κα τέλος παραμένει σταθερή για θερμοκρασίες άνω των 70°C .



Σχήμα 6.10 Αποτελεσματικότητα SSDI με Grane (ασφαλτενικό) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ($\approx 20-80^{\circ}\text{C}$) που εκφράζεται ως μείωση των μεγεθών σταγονιδίων (d_{50}) μετά την έγχυση χημικών διασποράς. Μέγεθος ακροφυσίου: 0,5 mm, ταχύτητα ροής πετρελαίου: 0,1 L/min και δόση διασποράς 1%

Στο Σχήμα 6.11 παρατηρείται ότι μεγαλύτερη μετατόπιση στην κατανομή του όγκου παρουσιάζεται για την περίπτωση του επεξεργασμένου πετρελαίου με την αύξηση της θερμοκρασίας (από 237 σε 75 μm) από 20 σε 80°C. Μεγαλύτερη αύξηση του ποσοστού παρουσιάζεται για την περίπτωση του μη επεξεργασμένου πετρελαίου με την αύξηση της θερμοκρασίας (από 4 σε 9%) από 20 σε 80°C.



Σχήμα 6.11 Κατανομές μεγέθους σταγονιδίων (% όγκου) για πετρέλαιο με και χωρίς χημικά ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ($\approx 20^\circ\text{C}$ & 80°C) για το πείραμα στις 10/12/2015, Grane (ασφαλτηνικό)

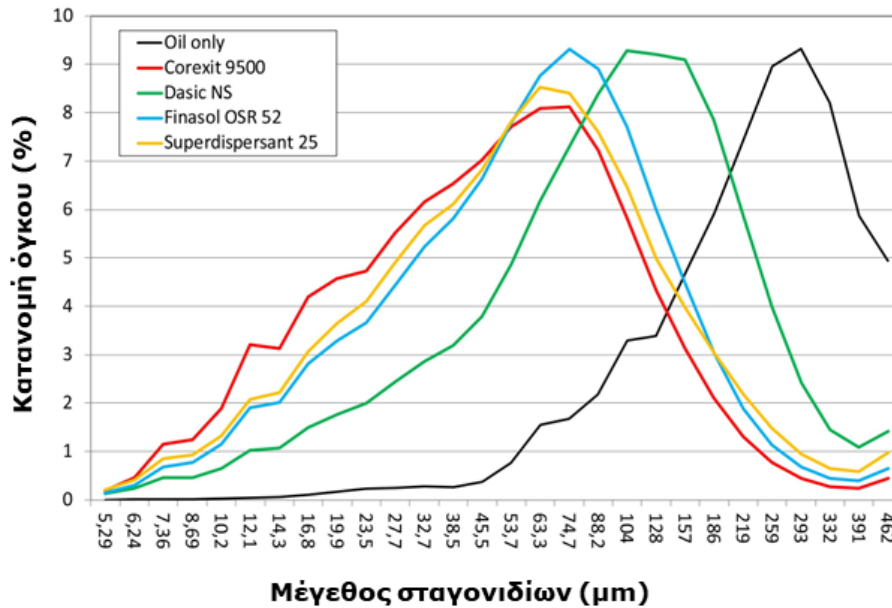
Επιπλέον, σε πειράματα που προηγήθηκαν, παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στην αποτελεσματικότητα μεταξύ των τεσσάρων χημικών που δοκιμάστηκαν ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του πετρελαίου στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο SINTEF MiniTower.

Σχετικά με την αποτελεσματικότητα SSDI, σε σχέση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας, παρατηρήθηκε ότι τρία από τα χημικά (Finasol OSR-52, Corexit 9500 και Superdispersant 25) παρουσίασαν παρόμοια αποτελέσματα, ενώ το τέταρτο χημικό (Dasic NS) είχε ως αποτέλεσμα σημαντικά μεγαλύτερα σταγονίδια (Brandvik et al., 2019).

6.4.2 Πειράματα δοσολογίας χημικών διασποράς

Τα πειράματα δοσολογίας αφορούν προηγούμενη μελέτη αλλά παρουσιάζονται καθώς συνετέλεσαν στη δημιουργία του νέου πρωτοκόλλου. Στο Σχήμα 6.12 παρέχεται μια σύγκριση των ποσοτικοποιημένων κατανομών σταγονιδίων πετρελαίου για τέσσερα μέσα διασποράς (έγχρωμες γραμμές) για έναν τύπο πετρελαίου (Maria) και μία δόση (1%), με το μη επεξεργασμένο πετρέλαιο που δίνεται ως αναφορά (μαύρη γραμμή).

Για το ελαφρύ παραφινικό αργό, τρία από τα χημικά (Corexit 9500, Finasol 52 και Superdispersant 25) επέδειξαν παρόμοια αποτελεσματικότητα (d_{50} : 63- 75 μm). Από την άλλη πλευρά, το Dasic NS ήταν λιγότερο αποτελεσματικό και παρήγαγε σημαντικά μεγαλύτερα σταγονίδια πετρελαίου (d_{50} : 128 μm) στην ίδια δόση.



Σχήμα 6.12 Κατανομή μεγέθους σταγόνας για 4 τύπους χημικών διασποράς (Corexit 9500, Superdispersant 25, Finasol OSR-52 and Dasic NS) στο πετρέλαιο Maria (paraffinic). Δοσολογία χημικών 1% με μέθοδο SIT (Πηγή: Brandvik et al., 2019)

Στο Σχήμα 6.13 παρουσιάζεται η κατανομή των σταγονιδίων πετρελαίου ως συνάρτηση της δοσολογίας των χημικών διασποράς (Corexit 9500), για τέσσερις διαφορετικούς τύπους πετρελαίου.

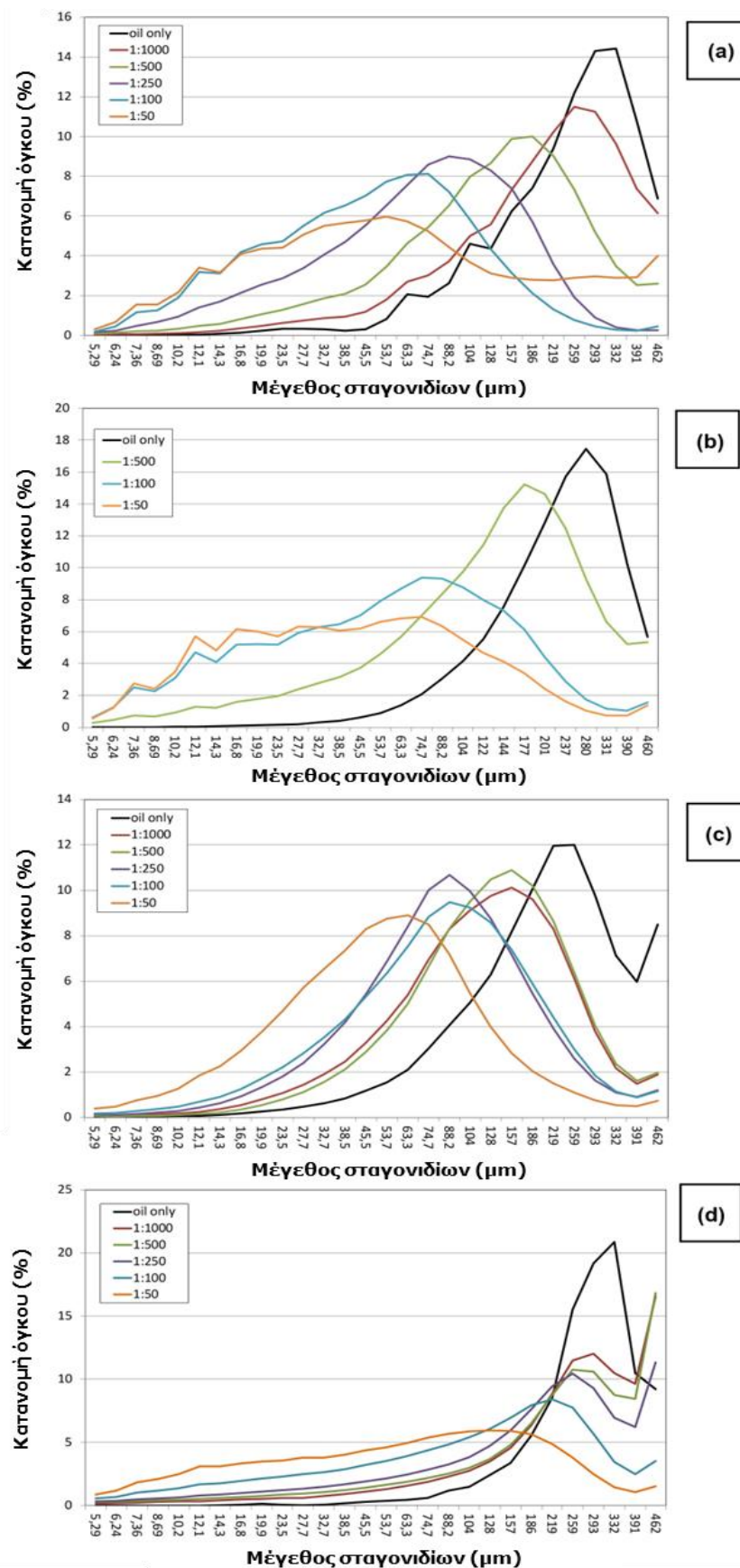
Στο Σχήμα 6.13 παρουσιάζεται η κατανομή μεγέθους των σταγονιδίων για το μη επεξεργασμένο πετρέλαιο σε μαύρες γραμμές σε σύγκριση με αυτές της αυξανόμενης δόσης χημικών διασποράς (που κυμαίνεται από 0,1% έως 2%) σε έγχρωμες γραμμές.

Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου SSDI αξιολογείται αναλύοντας τη μετατόπιση της κατανομής μεγέθους σταγονιδίων προς μικρότερα σταγονίδια, με αποτέλεσμα τη μείωση του d_{50} , σε σύγκριση με το μη επεξεργασμένο πετρέλαιο.

Για το παραφινικό Maria, το ναφθενικό Skrugard και το κηρώδες Skarfjell, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.13(a)-(c), οι κατανομές μεγέθους σταγονιδίων των μη επεξεργασμένων πετρελαίων με τιμές d_{50} που κυμαίνονται από 318 έως 250 μm μετατοπίζονται σταδιακά προς μικρότερα σταγονίδια, αποδίδοντας κατανομές με εύρος d_{50} από 48 έως 62 μm για τις υψηλότερες δόσεις (2%).

Μια αύξηση στη δόση του χημικού είχε ως αποτέλεσμα μια συστηματική μετατόπιση στο d_{50} , η οποία παρατηρήθηκε για το ασφαλτενικό Brynhild (Σχήμα 6.13(d)). Ωστόσο, οι κατανομές των σταγονιδίων πετρελαίου έγιναν ευρύτερες με την αύξηση των δόσεων των χημικών.

Αυτές οι κατανομές εμφάνισαν σημαντική απόκλιση από μια λογαριθμική κανονική κατανομή σε σύγκριση με τα άλλα πετρέλαια. Η διεύρυνση των κατανομών θα μπορούσε να αποδοθεί στην αλληλεπίδραση μεταξύ των επιφανειοδραστικών στο χημικό και των φυσικών επιφανειοδραστικών συστατικών που υπάρχουν στο ασφαλτενικό Brynhild.



Σχήμα 6.13 Κατανομή μεγέθους σταγόνας (όγκος %) για πετρέλαιο με και χωρίς χρήση χημικών διασποράς (Corexit 9500) σε σχέση με τη δοσολογία (0,1% - 2%) για (a): Maria (Paraffinic), (b): Skrugard (Naphthenic), (c): Skarfjell (Waxy) and (d): Brynhild (Asphaltenic) (Πηγή: Brandvik et al., 2019)

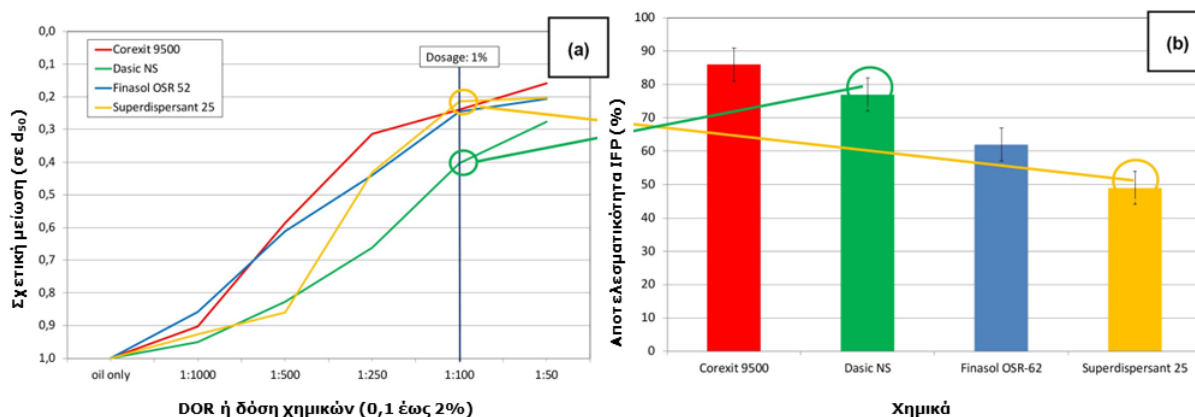
6.4.3 Σύγκριση των αποτελεσμάτων διαλογής διασποράς

Τελικό στάδιο μετά τη διεξαγωγή των πειραμάτων αποτελεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο υφιστάμενων μεθόδων για εφαρμογή επιφανειακής διασποράς (IFP) και της νέας μεθόδου DIET, για την εφαρμογή SSDI, σε δύο διαφορετικούς τύπους πετρελαίου, συγκεκριμένα το παραφινικό Maria και το ασφαλτενικό Brynhild.

Η αποτελεσματικότητα και των δύο μεθόδων για κάθε τύπο πετρελαίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.14 και στο Σχήμα 6.15. Για το Σχήμα 6.14(a) και το Σχήμα 6.14(b), τα αποτελέσματα με τη χρήση των χημικών OSR-52 και OSR-62 συνδυάστηκαν για να αποφευχθεί οποιαδήποτε σημαντική αβεβαιότητα, καθώς αυτά τα δύο προϊόντα παρουσίασαν παρόμοια αποτελεσματικότητα για αυτόν τον τύπο πετρελαίου.

Η αποτελεσματικότητα των δύο μεθόδων εφαρμογής χημικών διασποράς παρουσιάστηκε με δύο διαφορετικούς τρόπους, ως εξής:

1. DIET: Η σχετική μείωση του μεγέθους των σταγονιδίων (d_{50}) ως συνάρτηση του τύπου χημικών διασποράς (χρώμα γραμμής) και της δοσολογίας (άξονας x, 0,2% - 2%). Για παράδειγμα, μια τιμή 0,3 δείχνει ότι το μέγεθος σταγονιδίων (d_{50}) μειώθηκε στο 30% του μη επεξεργασμένου πετρελαίου.
2. IFP: Η σχετική απομάκρυνση του πετρελαίου από την επιφάνεια (0% - 100%) στη μέθοδο δοκιμής IFP ως συνάρτηση του τύπου χημικών διασποράς (χρωματιστές ράβδοι). Αυτή η μέθοδος για την παρουσίαση της αποτελεσματικότητας SSDI προσφέρει σημαντική βελτίωση σε σχέση με την άμεση σύγκριση των κατανομών σταγονιδίων πετρελαίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.14 και στο Σχήμα 6.15. Το Σχήμα 6.14 δείχνει ότι το Dasic NS (πράσινη γραμμή) σε δόση 1% μειώνει μόνο το d_{50} σε 40%, ενώ τα άλλα χημικά μειώνουν τα μεγέθη των σταγονιδίων στο 25% περίπου των μη επεξεργασμένων σταγονιδίων πετρελαίου. Επιπλέον, μπορεί να παρατηρηθεί από το ίδιο σχήμα ότι το Dasic NS γενικά εμφανίζει χαμηλότερη απόδοση για αυτόν τον τύπο πετρελαίου και το Superdispersant 25 χρειάζεται δόση πάνω από 0,25% για να είναι συγκρίσιμη με το Corexit 9500 και το Finasol OSR-52.

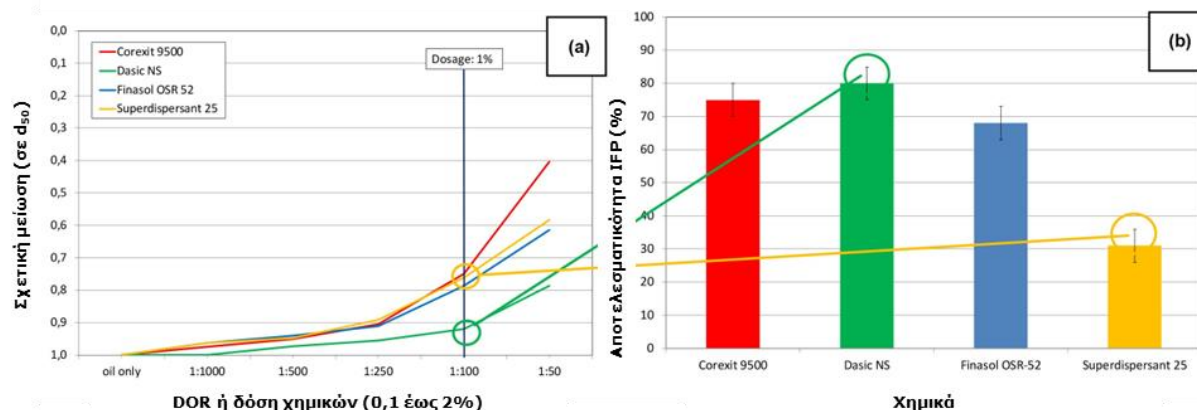


Σχήμα 6.14 Σύγκριση των χημικών ανάλογα με τη μέθοδο δοκιμής (a) SSDI (DIET, φρέσκο πετρέλαιο, μέθοδος SIT), και (b) Μέθοδοι για επιφανειακή εφαρμογή χημικών (IFP, 50% γαλάκτωμα, 900 cP, εφαρμογή ψεκασμού) για το πετρέλαιο Maria (paraffinic). Οι μπάρες λάθους είναι ενδεικτικές ± 1 std για τη μέθοδο (5%) (Πηγή: Brandvik et al., 2019)

Από το Σχήμα 6.15, είναι προφανές ότι η μέθοδος DIET παρουσιάζει μειωμένη αποτελεσματικότητα στη διασπορά του ασφαλτενικού Brynhild σε σύγκριση με το παραφινικό Maria, ακόμη και με αυξημένη δόση (2%). Η μείωση στα μεγέθη των σταγονιδίων είναι σημαντικά μικρότερη και κυμαίνεται μόνο από 40 - 60% του μη

επεξεργασμένου πετρελαίου. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών χημικών διασποράς IFP και DIET, παρατηρούμε σημαντική διαφορά στην κατάταξη των χημικών. Το Dasic-NS κατατάσσεται γενικά ψηλά και το Superdispersant 25 κατατάσσεται χαμηλά για όλους τους τύπους πετρελαίων στις δοκιμές IFP, ενώ στο DIET, το Superdispersant 25 κατατάσσεται γενικά πολύ ψηλά και το Dasic NS χαμηλά.

Στον Πίνακα 6.5 συνοψίζονται οι κύριες διαφορές και οι ομοιότητες μεταξύ των δοκιμών αποτελεσματικότητας χημικών διασποράς που σχετίζονται με την επιφανειακή εφαρμογή και την υποθαλάσσια έγχυση χημικών διασποράς. Οι αναταράξεις στο σύστημα DIET καθορίζονται κυρίως από την ταχύτητα εξόδου του ακροφυσίου του διαρρέοντος πετρελαίου και αερίου και μπορεί να κλιμακωθεί μέχρι τις συνθήκες πεδίου χρησιμοποιώντας τις αρχές της κλιμάκωσης αριθμών Weber.



Σχήμα 6.15 Σύγκριση των χημικών ανάλογα με τη μέθοδο δοκιμής (a) SSDI (DIET, φρέσκο πετρέλαιο, μέθοδος SIT), και (b) Μέθοδοι για επιφανειακή εφαρμογή χημικών (IFP, 50% γαλάκτωμα, 1.830 cP, εφαρμογή ψεκασμού) για το πετρέλαιο Brynhild (asphaltenic) Οι μπάρες λάθους είναι ενδεικτικές ± 1 std για τη μέθοδο (5%) (Πηγή: Brandvik et al., 2019)

Πίνακας 6.5 Σύγκριση των πιο σχετικών ιδιοτήτων για: 1) τις δύο δοκιμές αποτελεσματικότητας χημικών διασποράς που χρησιμοποιούνται για επιφανειακή εφαρμογή (IFP & MNS) και 2) για υποθαλάσσια έγχυση χημικών διασποράς (DIET) (Πηγή: Brandvik et al., 2019)

Είδος παραμέτρου	1: Επιφανειακή εφαρμογή (IFP & MNS)	2: Υποθαλάσσια έγχυση χημικών (DIET)
Εφαρμογή χημικών	Ψεκάζεται σε γηρασμένο / γαλακτωματοποιημένο επιφανειακό πετρέλαιο	Εγχέεται σε ρεύμα φρέσκου/θερμού πετρελαίου
Αρχή τύρβης	Προσομοιωμένα επιφανειακά κύματα	Τυρβώδες τζετ (πετρελαίου & αερίου)
Ποσοτικός προσδιορισμός της αποτελεσματικότητας	Ποσοστό πετρελαίου που αφαιρείται από την επιφάνεια	Μείωση του μεγέθους σταγονιδίων πετρελαίου (d ₅₀)

6.5 Συμπέρασμα - Απάντηση σε ερευνητικό ερώτημα

Υπάρχει μια γενική τάση ότι η αποτελεσματικότητα αυξάνεται με τη θερμοκρασία (μικρότερο σταγονίδιο). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από:

1. Μείωση του ιξώδους του πετρελαίου.
2. Μείωση της διεπιφανειακής τάσης πετρελαίου-νερού (IFT).

Η επίδραση της μείωσης του ιξώδους μπορεί να φανεί καθαρά με τα πιο παχύρρευστα ασφαλτενικά πετρέλαια (όπως π.χ. Grane).

Στα παραφινικά πετρέλαια (μίγμα Oseberg) μπορεί να παρατηρηθεί μείωση της αποτελεσματικότητας (μεγαλύτερα σταγονίδια) για τις υψηλότερες θερμοκρασίες, γεγονός που επαληθεύεται και από προηγούμενες δοκιμές που, ομοίως, έδειξαν μια ξεκάθαρη αρνητική επίδραση θερμοκρασίας στην αποτελεσματικότητα SSDI ([Brandvik et al., 2014](#)).

Το γεγονός ότι η μειωμένη αποτελεσματικότητα φαίνεται μόνο για τις υψηλότερες θερμοκρασίες και ότι η θερμοκρασία του πετρελαίου κατά τον σχηματισμό σταγονιδίων είναι σημαντικά χαμηλότερη σε εκλύσεις μεγάλης κλίμακας από ό,τι σε εργαστηριακές δοκιμές, δείχνει έντονα ότι αυτή η επίδραση θερμοκρασίας έχει μικρή λειτουργική σημασία.

7 Συμπεράσματα & προτεινόμενη μελλοντική έρευνα

7.1 Συμπεράσματα

Από τη βιβλιογραφική διερεύνηση βρέθηκαν τα ακόλουθα:

1. Τα περιβαλλοντικά και υδροδυναμικά δεδομένα εισόδου που σχετίζονται με την προσομοίωση πραγματικών περιστατικών πετρελαιοκηλίδας ποικίλλουν και δεν είναι πάντα σαφές εάν πρέπει να χρησιμοποιούνται και οι δύο τύποι δεδομένων. Ως εκ τούτου, συνιστάται η διεξοδική διερεύνηση της αναγκαιότητας χρήσης και των δύο τύπων δεδομένων για περιστατικά επιφανειακών διαρροών στις ελληνικές θάλασσες.
2. Οι επιπτώσεις των διαφορετικών καιρικών συνθηκών ανά εποχή στο στοχαστικό αποτέλεσμα της ρύπανσης, καθώς και των διαφορετικών μεθόδων επιφανειακής αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων στις επιπτώσεις του πετρελαίου σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές δεν έχουν διερευνηθεί επαρκώς.
3. Η επίδραση της μεθόδου SSDI στη συμπεριφορά πετρελαιοκηλίδας, καθώς και οι επιπτώσεις σε διαφορετικούς τύπους πετρελαίου, δεν έχουν ακόμη διερευνηθεί.
4. Υπάρχει έλλειψη γνώσης σχετικά με την αποτελεσματικότητα των χημικών διασποράς πετρελαιοκηλίδων μέσω SSDI σε διαφορετικές θερμοκρασίες πετρελαίου για διάφορους τύπους πετρελαίων. Επίσης δεν υπάρχει πρωτόκολλο δοκιμής χημικών διασποράς που να προσομοιώνει τις συνθήκες υποθαλάσσιας εφαρμογής.

Το κύριο αποτέλεσμα της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι ότι διερευνήθηκαν κρίσιμες παράμετροι που σχετίζονται με τη συνολική περιβαλλοντική διαχείριση περιστατικών πετρελαιοκηλίδων και αναμένεται να αποτελέσουν τη βάση της μεθοδολογίας για την αντιμετώπιση τυχόν περιστατικών κατά τις επικείμενες διαδικασίες εξόρυξης που αναμένονται στις ελληνικές θάλασσες.

Συγκεκριμένα εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα, τα οποία ουσιαστικά αποτελούν τις απαντήσεις στα 4 ερευνητικά ερωτήματα (βλ. [Ενότητα 1.10](#)):

1. Τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης που ενσωμάτωσαν τόσο τον άνεμο όσο και τα θαλάσσια ρεύματα ήταν σε συμφωνία με τα δορυφορικά δεδομένα και τα δεδομένα πεδίου, υποδεικνύοντας ότι και οι δύο δυνάμεις έπαιξαν σημαντικό ρόλο στη μετατόπιση της πετρελαιοκηλίδας του «Αγία Ζώνη II» προς την ακτή. Τα ευρήματά μας δείχνουν ότι τα θαλάσσια ρεύματα έπαιξαν σημαντικότερο ρόλο στην εξάπλωση της πετρελαιοκηλίδας κατά τη διάρκεια αυτού του περιστατικού. Ωστόσο, χωρίς τη συμπερίληψη των δεδομένων ανέμου, δεν θα είχε επιτευχθεί η εκτίμηση της πλήρους έκτασης της ρύπανσης από πετρέλαιο. Επίσης κρίνεται απαραίτητη η χρήση ενός υδροδυναμικού μοντέλου υψηλότερης ανάλυσης κοντά στην ακτογραμμή που περιγράφει την τοπική κυκλοφορία με μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς η χρήση του θα οδηγούσε πιθανώς σε καλύτερη συμφωνία με τα δεδομένα πεδίου
2. Με βάση την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:
 - A. Οι στοχαστικοί υπολογισμοί έδειξαν ότι υπάρχει σημαντική πιθανότητα πετρελαϊκής ρύπανσης στον Πατραϊκό Κόλπο που μπορεί να φτάσει το 30% στις λιμνοθάλασσες Μεσολογγίου – Αιτωλικού. Επίσης παρατηρείται σημαντική μεταβολή στα αποτελέσματα των στοχαστικών προσομοιώσεων λόγω των διαφορετικών καιρικών συνθηκών που επικρατούν στις διάφορες εποχές που εξετάστηκαν.
 - B. Οι ντετερμινιστικοί υπολογισμοί έδειξαν ότι το 78-90% του πληθυσμού των πτηνών και το 2-4% του πληθυσμού των ιχθύων αναμένεται να μολυνθούν σε

περίπτωση πετρελαιοκηλίδας χωρίς καμία παρέμβαση. Για τα τρέχοντα συστήματα αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων στην Ελλάδα, η χρήση χημικών μείωσε την ποσότητα του πετρελαίου που κατέληξε στις ακτές κατά περίπου 16-21% και τον πληθυσμό των μολυσμένων πτηνών στις λιμνοθάλασσες σε περίπου 70%. Ωστόσο, ο πληθυσμός των ιχθύων που επηρεάστηκαν αυξήθηκε σε 6-8,5% λόγω της υψηλότερης συγκέντρωσης πετρελαίου στη στήλη του νερού. Η μηχανική ανάκτηση με skimmers «καθάρισε» σχεδόν το 10% της ποσότητας πετρελαίου που διέρρευσε, αλλά δεν είχε καμία αξιοσημείωτη επίδραση στο πετρέλαιο που αποτέθηκε στις ακτές και στους πληγέντες πληθυσμούς πτηνών και ιχθύων.

3. Οι ντετερμινιστικοί υπολογισμοί έδειξαν ότι, χωρίς καμία παρέμβαση, μια πετρελαιοκηλίδα, συνεπεία διαρροής σε μεγάλο βάθος, αναμένεται να πλήξει μια περιοχή που κυμαίνεται από 682 έως 941 km² με πάχος πετρελαίου άνω του 0,1 mm. Επιπλέον, αναμένεται να επηρεάσει όγκο νερού της τάξης των 0,054-0,080 km³, με συγκέντρωση πετρελαίου άνω των 10 ppm.

Η χρήση χημικών διασποράς μέσω της μεθόδου SSDI παρατηρήθηκε ότι μειώνει την ποσότητα του πετρελαίου στην επιφάνεια κατά περίπου 25-74% και την περιοχή επίδρασης πάνω από το καθορισμένο όριο κατά περίπου 37-62%. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος οδήγησε σε αύξηση της μάζας του πετρελαίου που παρέμεινε βυθισμένη κατά 161 έως 274%, και σε αύξηση του όγκου που επηρεάστηκε κατά 199-398%.

Αυτά τα αποτελέσματα αποδόθηκαν στη μείωση των μεγεθών των σταγονιδίων πετρελαίου, η οποία οδήγησε σε μείωση των ταχυτήτων ανάδυσσης. Μεταξύ των 4 τύπων πετρελαίου, το παραφινικό πετρέλαιο παρουσίασε τη μεγαλύτερη μείωση στην επιφάνεια επίδρασης και την ποσότητα του πετρελαίου στην επιφάνεια, ενώ το κηρώδες πετρέλαιο έδειξε τη χαμηλότερη μείωση. Μπορεί να επισημανθεί ότι κρίσιμοι παράγοντες για τη χρήση SSDI προκειμένου να μειωθεί η καθαρή περιβαλλοντική επίδραση, είναι ο τύπος πετρελαίου που απελευθερώνεται, οι εποχικές αλλαγές και η παρουσία φυσικών πόρων, όπως η ωτοκία ιχθύων ή η μετανάστευση πτηνών.

4. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου SSDI στη μείωση του μεγέθους των σταγονιδίων πετρελαίου (d₅₀) έχει εξεταστεί για ένα ευρύ φάσμα τύπων πετρελαίου με ποικίλες ιδιότητες, χρησιμοποιώντας τέσσερεις διαφορετικούς τύπους χημικών καθώς και διάφορες δοσολογίες. Αυτή η διερεύνηση, σε συνδυασμό με προηγούμενες έρευνες, οδήγησε στη δημιουργία ενός νέου πρωτοκόλλου δοκιμής που παρέχει μια κατάταξη των χημικών διασποράς και ποικίλλει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των τύπων πετρελαίων που δοκιμάστηκαν.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η παρατήρηση ότι η κατάταξη των χημικών που επιτυγχάνεται με τη νέα μέθοδο δοκιμής (DIET) είναι ουσιαστικά διαφορετική από τα αποτελέσματα διαλογής που παράγονται με τη χρήση συμβατικών μεθόδων για την επιφανειακή εφαρμογή χημικών διασποράς (IFP). Αυτή η διαφορά συνεπάγεται ότι οι υπάρχουσες τυπικές μέθοδοι για τη δοκιμή αποτελεσματικότητας των χημικών είναι λιγότερο εφαρμόσιμες για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του SSDI.

Το νέο πρωτόκολλο δοκιμής περιλαμβάνει πολλά βασικά στοιχεία που συμβάλλουν στην αποτελεσματικότητά του:

- Χρησιμοποιεί ένα σχετικό καθεστώς αναταράξεων που μιμείται τις συνθήκες των υποθαλάσσιων εκλύσεων πετρελαίου, και συγκεκριμένα ενός τυρβώδους πίδακα.
- Μετρά την αποτελεσματικότητα των χημικών διασποράς μετρώντας ποσοτικά τη μείωση του μεγέθους των σταγονιδίων πετρελαίου σε σύγκριση με το μη επεξεργασμένο πετρέλαιο.
- Ένα σύστημα ροής θαλασσινού νερού επιτρέπει τη δοκιμή ενός ευρέος φάσματος συγκεντρώσεων και μεγεθών σταγονιδίων.

- Η έγχυση του χημικού απευθείας στο πετρέλαιο πραγματοποιείται με ρεαλιστικό και λειτουργικό τρόπο.
- Το πρωτόκολλο λαμβάνει υπόψη μια αυξημένη θερμοκρασία πετρελαίου 50°C που σχετίζεται με τις πραγματικές συνθήκες.
- Προσαρμόζεται εύκολα σε ένα ευρύ φάσμα δόσεων χημικών διασποράς.
- Το πρωτόκολλο επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση κατά τη διαρροή πετρελαίου, η οποία επιτρέπει τη συλλογή στατιστικά σημαντικών δεδομένων.
- Μπορεί να είναι εξαιρετικά αυτοματοποιημένο, γρήγορο και οικονομικά αποδοτικό.

7.2 Προτεινόμενη μελλοντική έρευνα

7.2.1 Υπολογιστική

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια πρώτη προσπάθεια για τη διαμόρφωση ενός λεπτομερούς σχεδίου διαχείρισης για τον περιορισμό της ρύπανσης από πετρελαιοκηλίδες στους κόλπους της Πάτρας και της Κυπαρισσίας, ως συνέπεια υποθετικών σεναρίων υποθαλάσσιας διαρροής. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα προκαταρκτικό στάδιο σχεδιασμού (α) για την επιλογή του καταλληλότερου τόπου γεώτρησης από τις πιθανές εναλλακτικές που θα καθοριστούν με βάση τις τρέχουσες σεισμικές έρευνες και (β) για την επιλογή της πιο αποτελεσματικής μεθόδου αντιμετώπισης για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της ρύπανσης από πετρέλαιο. Επισημαίνεται, πως, οποιαδήποτε γενίκευση των αποτελεσμάτων σε χώρο και χρόνο θα πρέπει να εξετάζεται με προσοχή.

Επιπρόσθετα, προκειμένου να βελτιωθούν τα στατιστικά αποτελέσματα των υπολογισμών στο τελικό στάδιο του σχεδιασμού, προτείνεται η εφαρμογή της παρούσας μεθοδολογίας μετά την εκτέλεση «ενημερωμένων» υπολογισμών με χρήση μεγαλύτερου αριθμού χρονικών περιόδων, πολυετών δεδομένων και μεγαλύτερου εύρους χαρακτηριστικών διαρροής. Στους υπολογισμούς αυτούς, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη τα «ενημερωμένα» μέσα αντιμετώπισης. Καθώς αναμένεται ότι η ανάπτυξη των πρώτων υπεράκτιων δραστηριοτήτων εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων στις δυτικές θάλασσες της Ελλάδας θα συνοδεύεται από την προμήθεια επαρκών εργαλείων αντίδρασης (σκάφη και εξοπλισμός για την υποστήριξη των υφιστάμενων) που θα βρίσκονται κοντά στα σημεία εξόρυξης. Αυτό θα επιτρέψει ταχύτερη επέμβαση για την επιβράδυνση της επέκτασης της πετρελαιοκηλίδας.

Τέλος, πρέπει να διεξαχθούν αρκετές μελέτες για τη διερεύνηση της επίδρασης της μεθόδου SSDI σε ένα ευρύ φάσμα υποθαλάσσιων υποθετικών διαρροών πετρελαίου σε διαφορετικά βάθη, που κυμαίνονται από 500-3.000 m στη Μεσόγειο Θάλασσα.

7.2.2 Πειραματική

Απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να εξεταστεί μια ευρύτερη ποικιλία τύπων πετρελαίου, προκειμένου να ληφθούν περισσότερα δεδομένα για την επικύρωση μοντέλων και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των χημικών διασποράς σε τέτοια πετρέλαια. Επιπλέον, τα πετρέλαια που αναμένεται να εξαχθούν κατά τη διάρκεια των ερευνητικών γεωτρήσεων πρέπει να υποβληθούν σε μια σειρά πειραμάτων για να ελεγχθεί η γήρανσή τους και η αποτελεσματικότητα των χημικών διασποράς σε αυτά.

8 Βιβλιογραφία

1. Abdallah, I.M., Chantsev, V.Y., 2022. Simulating oil spill movement and behavior: a case study from the Gulf of Suez, Egypt. *Model. Earth Syst. Environ.* 8, 4553–4562. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01449-9>
2. Adcroft, A., Hallberg, R., Dunne, J.P., Samuels, B.L., Galt, J.A., Barker, C.H., Payton, D., 2010. Simulations of underwater plumes of dissolved oil in the Gulf of Mexico. *Geophys. Res. Lett.* 37, 1–5. <https://doi.org/10.1029/2010GL044689>
3. Afenyo, M., Veitch, B., Khan, F., 2016. A state-of-the-art review of fate and transport of oil spills in open and ice-covered water. *Ocean Eng.* 119, 233–248. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.10.014>
4. Al-Sayegh, A., Al-Wahaibi, Y., Joshi, S., Al-Bahry, S., Elshafie, A., Al-Bemani, A., 2016. Bioremediation of heavy crude oil contamination. *Open Biotechnol. J.* 10.
5. Alves, T.M., Kokinou, E., Zodiatis, G., Lardner, R., 2016. Hindcast, GIS and susceptibility modelling to assist oil spill clean-up and mitigation on the southern coast of Cyprus (Eastern Mediterranean) *Deep-Sea Res. II* 133, 159-175.
6. Alves, T.M., Kokinou, E., Zodiatis, G., Lardner, R., Panagiotakis, C., Radhakrishnan, H., 2015. Modelling of oil spills in confined maritime basins: The case for early response in the Eastern Mediterranean Sea. *Environ. Pollut.* 206, 390-399. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.07.042>
7. Amir-Heidari, P., Arneborg, L., Lindgren, J.F., Lindhe, A., Rosén, L., Raie, M., Axell, L., Hassellöv, I.-M., 2019. A state-of-the-art model for spatial and stochastic oil spill risk assessment: A case study of oil spill from a shipwreck. *Environ. Int.* 126, 309–320. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.037>
8. Amir-Heidari, P., Raie, M., 2019. A new stochastic oil spill risk assessment model for Persian Gulf: Development, application and evaluation. *Mar. Pollut. Bull.* 145, 357–369. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.05.022>
9. Andrews, S., Nover, D., Schladow, S.G., 2010. Using laser diffraction data to obtain accurate particle size distributions: the role of particle composition. *Limnol. Oceanogr. Methods* 8, 507–526. <https://doi.org/10.4319/lom.2010.8.507>
10. Asadpour, R., Sapari, N. Bin, Tuan, Z.Z., Jusoh, H., Riahi, A., Uka, O.K., 2013. Application of Sorbent materials in Oil Spill management: A review. *Casp. J. Appl. Sci. Res.* 2.
11. Baldwin, A., 2006. Handbook of Global Environmental Politics Edited by Peter Dauvergne. *Rev. Eur. Community Int. Environ. Law* 15, 118–120. https://doi.org/10.1111/j.1467-9388.2006.507_3.x
12. Başar, E., Köse, E., Güneroglu, A., 2006. Finding risky areas for oil spillage after tanker accidents at Istanbul strait. *Int. J. Environ. Pollut.* 27, 388–400. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2006.010580>
13. Becker, K.W., Coker, L.G., Walsh, M.A., 1991. A method For Evaluating Oil Spill Dispersants Exxon Dispersant Effectiveness Test (exdet), in: *OCEANS 91 Proceedings*. pp. 1486–1490. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1991.606514>
14. Beegle-Krause, C.J., 1999. GNOME: NOAA's Next-Generation Spill Trajectory Model, in: *Oceans '99 MTS/IEEE Proceeding*. pp. 1262–1266.
15. Beegle-Krause, C.J., 2001. General NOAA Oil Modeling Environment (GNOME): A New Spill Trajectory Model, in: *IOSC 2001 Proceedings*. pp. 865–871.
16. Bejarano, A.C., Michel, J., 2016. Oil spills and their impacts on sand beach invertebrate communities: A literature review. *Environ. Pollut.* 218, 709-722. [doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.065](http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.065)
17. Belore, R.C., Trudel, K., Mullin, J. V, Guarino, A., 2009. Large-scale cold water dispersant effectiveness experiments with Alaskan crude oils and Corexit 9500 and 9527 dispersants. *Mar. Pollut. Bull.* 58, 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.08.013>

18. Beyer, J., Trannum, H.C., Bakke, T., Hodson, P. V, Collier, T.K., 2016. Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: A review. *Mar. Pollut. Bull.* 110, 28-51. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.027>
19. Billeter, L., Fanneløp, T.K., 1989. Gas concentration over an underwater gas release. *Atmos. Environ.* 23, 1683–1694. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(89\)90053-X](https://doi.org/10.1016/0004-6981(89)90053-X)
20. Blumberg, A.F., Mellor, G.L., 1987. A description of a three - dimensional coastal ocean circulation model. *Three-Dimensional Coast. Ocean Model.* 1-16.
21. Bocard, C., 1982. Chemical oil dispersion in trials at sea and in laboratory tests: The key role of the dilution process. In: *Oil spill chemical dispersants: Research Experience and recommendations, ASTM STP 840.*
22. Boufadel, M., Socolofsky, S., Katz, J., Yang, D., Daskiran, C., Dewar, W., 2020. A Review on Multiphase Underwater Jets and Plumes: Droplets, Hydrodynamics, and Chemistry. *Rev. Geophys.* 58. <https://doi.org/10.1029/2020RG000703>
23. Brandvik, P.J. et al., 2017. Subsea Dispersant Injection (SSDI) - Summary Findings from a Multi-Year Research and Development Industry Initiative., in: *International Oil Spill Conference. Long Beach, USA.*
24. Brandvik, P.J., Daling, P., Dunnebie, D., Makatounis, P.E., Leirvik, F., Krause, D., 2019. A Proposed New Laboratory Protocol for Dispersant Effectiveness Testing Adapted for Subsea Dispersant Injection. *J. Environ. Prot. (Irvine, Calif).* 10, 694–709. <https://doi.org/10.4236/jep.2019.105041>
25. Brandvik, P.J., Daling, P.S., Faksness, L.G., Rasmussen, J.F., Daae, R.L., Leirvik, F., 2010. Experimental oil release in broken ice- a large-scale field verification of results from laboratory studies of oil weathering and ignitability of weathered oil spills. P1 fate and behaviour of oil in ice and P2 in situ burning of oil in ice. Report. SINTEF Materials and Chemistry.
26. Brandvik, P.J., Daling, P.S., Leirvik, F., Krause, D.F., 2019a. Interfacial tension between oil and seawater as a function of dispersant dosage. *Mar. Pollut. Bull.* 143, 109. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.019>
27. Brandvik, P.J., Johansen, Ø., Farooq, U., Angell, G., Leirvik, F., 2014. Subsurface oil releases - experimental study of droplet distributions and different dispersant injection techniques - version 2. SINTEF Materials and Chemistry. Environmental Technology. Trondheim, Norway.
28. Brandvik, P.J., Johansen, Ø., Leirvik, F., Farooq, U., Daling, P.S., 2013. Droplet breakup in subsurface oil releases - Part 1: Experimental study of droplet breakup and effectiveness of dispersant injection. *Mar. Pollut. Bull.* 73, 319-326. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.05.020>
29. Brandvik, P.J., Johansen, Ø., Leirvik, F., Krause, D.F., Daling, P.S., 2018. Subsea dispersants injection (SSDI), effectiveness of different dispersant injection techniques – An experimental approach. *Mar. Pollut. Bull.* 136, 385–393. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.09.021>
30. Brandvik, P.J., Storey, C., Davies, E.J., Johansen, Ø., 2019b. Combined releases of oil and gas under pressure; the influence of live oil and natural gas on initial oil droplet formation. *Mar. Pollut. Bull.* 140, 485–492. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.01.036>
31. Brandvik, P.J., Storey, C., Davies, E.J., Leirvik, F., 2019c. Quantification of oil droplets under high pressure laboratory experiments simulating deep water oil releases and subsea dispersants injection (SSDI). *Mar. Pollut. Bull.* 138, 520–525. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.020>
32. Bucelli, M., Paltrinieri, N., Landucci, G., 2018. Integrated risk assessment for oil and gas installations in sensitive areas. *Ocean Eng.* 150, 377–390. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.12.035>
33. Bullock, R.J., Perkins, R.A., Aggarwal, S., 2019. In-situ burning with chemical herders for Arctic oil spill response: Meta-analysis and review. *Sci. Total Environ.* 675, 705–716. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.127>

34. Burwood, R., Speers, G.C., 1974. Photo-oxidation as a factor in the environmental dispersal of crude oil. *Estuar. Coast. Mar. Sci.* 2, 117–135.
[https://doi.org/10.1016/0302-3524\(74\)90034-6](https://doi.org/10.1016/0302-3524(74)90034-6)
35. Chassignet, E.P., Hurlburt, H.E., Smedstad, O.M., Halliwell, G.R., Hogan, P.J., Wallcraft, A.J., Baraille, R., Bleck, R., 2007. The HYCOM (hybrid coordinate ocean model) data assimilative system. *J. Mar. Syst.* 65, 60–83.
36. Cheng, Y., Li, X., Xu, Q., Garcia-Pineda, O., Andersen, O.B., Pichel, W.G., 2011. SAR observation and model tracking of an oil spill event in coastal waters. *Mar. Pollut. Bull.* 62, 350–363.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.10.005>
37. Chinenyeze, M.A.J., Ekene, U.R., 2017. Physical and chemical properties of crude oils and their geologic significances. *Int. J. Sci. Res.* 6, 1514–1521.
38. Clayton, J.R., Payne, J.R., Farlow, J.S., Sarwar, C., 2020. Oil spill dispersants: mechanisms of action and laboratory tests. CRC Press.
39. Clementi, E., Pistoia, J., Fratianni, C., Delrosso, D., Grandi, A., Drudi, M., Coppini, G., Lecci, R., Pinardi, N. 2017. Mediterranean Sea Analysis and Forecast (CMEMS MED-Currents 2013–2017). [Data set]. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS).
 doi: https://doi.org/10.25423/MEDSEA_ANALYSIS_FORECAST_PHYS_006_001
40. Coppini, G., De Dominicis, M., Zodiatis, G., Lardner, R., Pinardi, N., Santoleri, R., Colella, S., Bignami, F., Hayes, D.R., Soloviev, D., 2011. Hindcast of oil-spill pollution during the Lebanon crisis in the Eastern Mediterranean, July–August 2006. *Mar. Pollut. Bull.* 62, 140–153.
41. Coppini, G., Gonzalez, G., Perivoliotis, L., Smaoui, M., Lyubartseva, S., Bourma, P., Lecci, R., Creti, S., 2018. MONGOOS-REMPEC Operational Experience During Agia Zoni II Oil Spill (September 2017).
42. Crowley, D., Mendelsohn, D., Mulanaphy, N.W., Li, Z., Spaulding, M., 2014. Modeling subsurface dispersant applications for response planning and preparation, in: *International Oil Spill Conference Proceedings*. American Petroleum Institute, pp. 933–948.
43. Curd, H., 2011. The use of dispersant for the control of volatile organic compounds, in: *International Oil Spill Conference Proceedings (IOSC)*. American Petroleum Institute, p. 359.
44. Daae, R.L., Skancke, J., Brandvik, P.J., Faksness, L.-G., 2018. The sensitivity of the surface oil signature to subsurface dispersant injection and weather conditions. *Mar. Pollut. Bull.* 127, 175–181.
45. Daling, P.S., Brandvik, P.J., Almås, I.K., 1989. Weathering of surface oil-experimental oil spill at Haltenbanken, 1989. Data report IKU report no 22.1934.00/03/89. Trondheim, Norway.
46. Daling, P.S., Brandvik, P.J., Mackay, D., Johansen, O., 1990. Characterization of crude oils for environmental purposes. *Oil Chem. Pollut.* 7, 199–224.
 doi:10.1016/S0269-8579(05)80027-9
47. Daling, P.S., Leirvik, F., Almås, I.K., Brandvik, P.J., Hansen, B.H., Lewis, A., Reed, M., 2014. Surface weathering and dispersibility of MC252 crude oil. *Mar. Pollut. Bull.* 87, 300–310. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.07.005>
48. Daling, P.S., Lichtenthaler, R.G., 1986. Chemical dispersion of oil. Comparison of the effectiveness results obtained in laboratory and small-scale field tests. *Oil Chem. Pollut.* 3, 19–35.
[https://doi.org/10.1016/S0269-8579\(86\)80011-9](https://doi.org/10.1016/S0269-8579(86)80011-9)
49. Daling, P.S., Moldestad, M.Ø., Johansen, Ø., Lewis, A., Rødal, J., 2003. Norwegian testing of emulsion properties at sea--the importance of oil type and release conditions. *Spill Sci. Technol. Bull.* 8, 123–136.
[https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(03\)00016-1](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(03)00016-1)
50. Daling, P.S., Morten, O.M., Lewis, A., Strøm-kristiansen, T., 1997. Sintef/iku oil-weathering model: predicting oils' properties at sea, in: *International Oil Spill Conference*. pp. 297–308.
51. Daling, P.S., Strøm, T., 1999. Weathering of oils at sea: Model/field data comparisons. *Spill Sci. Technol. Bull.* 5, 63–74.
 doi:10.1016/S1353-2561(98)00051-6

52. Davies, E., Nimmo-Smith, W., Agrawal, Y.C., Souza, A., 2012. LISST-100 response to large particles. *Mar. Geol.* 307–310, 117–122.
<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2012.03.006>
53. Davies, E.J., Brandvik, P.J., Leirvik, F., Nepstad, R., 2017. The use of wide-band transmittance imaging to size and classify suspended particulate matter in seawater. *Mar. Pollut. Bull.* 115, 105–114.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.063>
54. De Dominicis, M., Pinardi, N., Zodiatis, G., Archetti, R., 2013a. MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting – Part 2: Numerical simulations and validations. *Geosci. Model Dev.* 6, 1871–1888.
<https://doi.org/10.5194/gmd-6-1871-2013>
55. De Dominicis, M., Pinardi, N., Zodiatis, G., Lardner, R., 2013b. MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting–Part 1: Theory. *Geosci. Model Dev.* 6, 1851–1869.
56. Delvigne, G.A.L., Sweeney, C., 1988. Natural dispersion of oil. *Oil Chem. Pollut.* 4, 281–310.
57. Duran, R., Romeo, L., Whiting, J., Vielma, J., Rose, K., Bunn, A., Bauer, J., 2018. Simulation of the 2003 foss barge-point wells oil spill: A comparison between BLOSOM and GNOME oil spill models. *J. Mar. Sci. Eng.* 6, 104.
58. Durkee, J., 2006. 3- Health and safety hazards associated with cleaning agents, in: Durkee, J.B.T.-M. of I.C.T. and P. (Ed.), . Elsevier Science, Oxford, pp. 99–189.
<https://doi.org/10.1016/B978-008044888-6/50017-X>
59. Eckle, P., Burgherr, P., Michaux, E., 2012. Risk of large oil spills: A statistical analysis in the aftermath of deepwater horizon. *Environ. Sci. Technol.* 46, 13002–13008.
[doi:10.1021/es3029523](https://doi.org/10.1021/es3029523)
60. Ekperusi, A.O., Onyena, A.P., Akpudo, M.Y., Peter, C.C., Akpoduado, C.O., Ekperusi, O.H., 2019. In-Situ Burning as an Oil Spill Control Measure and its Effect on the Environment, in: SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. p. D023S025R005. <https://doi.org/10.2118/198777-MS>
61. El-Fadel, M., Abdallah, R., Rachid, G., 2012. A modeling approach toward oil spill management along the Eastern Mediterranean. *J. Environ. Manage.* 113, 93–102.
[doi:10.1016/j.jenvman.2012.07.035](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.07.035)
62. Elliott, A.J., Hurford, N., Penn, C.J., 1986. Shear diffusion and the spreading of oil slicks. *Mar. Pollut. Bull.* 17, 308–313.
[https://doi.org/10.1016/0025-326X\(86\)90216-X](https://doi.org/10.1016/0025-326X(86)90216-X)
63. Escudier, R., Clementi, E., Omar, M., Cipollone, A., Pistoia, J., Aydogdu, A., Drudi, M., Grandi, A., Lyubartsev, V., Lecci, R., Cretí, S., Masina, S., Coppini, G., Pinardi, N., 2020. Mediterranean Sea Physical Reanalysis (CMEMS MED-Currents) (Version 1) Data set. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS).
64. EU, 2015. L 182. Commission Implementing Decision (EU) 2015/1120 of 8 July 2015 exempting exploration for oil and gas in Greece from the application of Directive 2004/17/EC of the European Parliament and of the Council coordinating the procurement procedures of entities operating in the water, energy, transport and postal services sectors (notified under document C(2015) 4512) (1). *Off. J. Eur. Union* 58, 88–91.
65. European Maritime Safety Agency, 2009. Inventory of EU Member States Oil pollution response vessels. 80 pp.
66. European Maritime Safety Agency, 2014a. Inventory of national policies regarding the use of Oil Spill Dispersants in the EU Member States. 136 pp.
67. European Maritime Safety Agency, 2014b. Network of stand-by oil spill response vessels and equipment. 86 pp.
68. Faksness, L.-G., Brandvik, P.J., Daling, P.S., Singsaas, I., Sørstrøm, S.E., 2016. The value of offshore field experiments in oil spill technology development for Norwegian waters. *Mar. Pollut. Bull.* 111, 402–410.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.07.035>
69. Faksness, L.-G., Leirvik, F., Taban, I.C., Engen, F., Jensen, H. V, Holbu, J.W., Dolva, H., Bråtveit, M., 2022. Offshore field experiments with in-situ burning of oil: Emissions and burn efficiency. *Environ. Res.* 205, 112419.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112419>

70. Farooq, U., Taban, I.C., Daling, P.S., 2018. Study of the oil interaction towards oil spill recovery skimmer material: Effect of the oil weathering and emulsification properties. *Mar. Pollut. Bull.* 135, 119–128.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.017>
71. Farzinger, M., Ibrahim, Z., Yasemi, M., 2011. Oil spill modeling of diesel and gasoline with GNOME around Rajaei Port of Bandar Abbas, Iran. *Iran. J. Fish. Sci.* 10, 35–46.
72. Feng, D., Hodges, B.R., 2020. The oil spill transport across the shelf-estuary interface. *Mar. Pollut. Bull.* 153, 110958.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110958>
73. Fingas, M., 2011. An overview of in-situ burning. *Oil spill Sci. Technol.* 737–903.
74. Fingas, M., 2012. *The basics of oil spill cleanup*. CRC press.
75. Fingas, M., 2018. In-situ burning an update, in: *In-Situ Burning for Oil Spill Countermeasures*. CRC Press, pp. 1–171.
76. Fitzpatrick, M., Warren, R., Ekrol, N., 2000. South Arne Field Development: An Environmental Impact Assessment of Oil Spills. *Spill Sci. Technol. Bull.* 6, 133-143.
[http://dx.doi.org/10.1016/S1353-2561\(00\)00045-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1353-2561(00)00045-1)
77. French-McCay, D., 2003. Development and application of damage assessment modeling: Example assessment for the North Cape oil spill. *Mar. Pollut. Bull.* 47, 341–359.
[https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(03\)00208-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(03)00208-X)
78. French-McCay, D.P., 2004. Oil spill impact modeling: Development and validation. *Environ. Toxicol. Chem.* 23, 2441–2456.
<https://doi.org/10.1897/03-382>
79. French-McCay, D., 2009. State of the art and research needs for oil spill impact assessment modelling, in: *Proceedings of the 32nd AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, Emergencies Science Division, Ottawa, ON, Canada*. 601-653.
80. French-McCay, D., Crowley, D., Rowe, J.J., Bock, M., Robinson, H., Wenning, R., Walker, A.H., Joeckel, J., Nedwed, T.J., Parkerton, T.F., 2018a. Comparative Risk Assessment of spill response options for a deepwater oil well blowout: Part 1. Oil spill modeling. *Mar. Pollut. Bull.* 133, 1001–1015.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.042>
81. French McCay, D., Jayko, K., Li, Z., Horn, M., Isaji, T., Spaulding, M., 2018b. Volume II: appendix II–oil transport and fates model technical manual. *Simul. Model. Ocean Circ. Oil Spills Gulf Mex.* eds CW Galagan, D. French McCay, J. Rowe, L. McStay, (New Orleans, LA US Dep. Inter. 422.
82. French-McCay, D., Rowe, J., Whittier, N., Santos, C., 2013. Modeling the M/T Prestige oil spill and alternative scenarios if towed to a port of refuge. *Proc. 36th AMOP Tech. Semin. Environ. Contam. Response* 279–314.
83. Ganeeva, Y.M., Yusupova, T.N., Romanov, G. V, 2016. Waxes in asphaltenes of crude oils and wax deposits. *Pet. Sci.* 13, 737–745.
<https://doi.org/10.1007/s12182-016-0111-8>
84. Garrett, R.M., Rothenburger, S.J., Prince, R.C., 2003. Biodegradation of fuel oil under laboratory and arctic marine conditions. *Spill Sci. Technol. Bull.* 8, 297–302.
85. Gianni, A., Kehayias, G., Zacharias, I., 2011. Geomorphology modification and its impact to anoxic lagoons. *Ecol. Eng.* 37, 1869-1877.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.06.006>
86. Gogou, M., Antoniadou, C., Andreadakis, E., Chalvanti, E., Lekkas, E., Perrou, T., Pargharidis, I., 2017. Agia Zoni II Shipwreck, Saronic Gulf, 10 September 2017.
87. Goldman, R., Biton, E., Brokovich, E., Kark, S., Levin, N., 2015. Oil spill contamination probability in the southeastern Levantine basin. *Mar. Pollut. Bull.* 91, 347-356.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.10.050>
88. Goovaerts, P., Wobus, C., Jones, R., Rissing, M., 2016. Geospatial estimation of the impact of Deepwater Horizon oil spill on plant oiling along the Louisiana shorelines. *J. Environ. Manage.* 180, 264-271.
<http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.041>

89. Greek Ministry of Environment, 1998. Ramsar information sheet. Messolongi lagoons. 1-10.
90. Gurumoorthi, K., Suneel, V., Trinadha Rao, V., Thomas, A.P., Alex, M.J., 2021. Fate of MV Wakashio oil spill off Mauritius coast through modelling and remote sensing observations. *Mar. Pollut. Bull.* 172, 112892.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112892>
91. HBMCI, 2018. Agia Zoni II-Interim report.
92. Hellenic Center of Marine Research (HCMR), 2012. Strategical environmental assessment study for research and exploitation of hydrocarbons. Part A: Western Gulf of Patras. 490 pp.
93. Hester, M.W., Willis, J.M., Rouhani, S., Steinhoff, M.A., Baker, M.C., 2016. Impacts of the Deepwater Horizon oil spill on the salt marsh vegetation of Louisiana. *Environ. Pollut.* 216, 361-370.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.065>
94. Hinze, J., 1955. Fundamentals of the Hydrodynamic Mechanism of Splitting in Dispersion Processes. *AIChE J.* 1, 289-295.
95. Holder, E., Conmy, R., Venosa, A., 2015. Comparative Laboratory-Scale Testing of Dispersant Effectiveness of 23 Crude Oils Using Four Different Testing Protocols*. *J. Environ. Prot.* 06, 628-639.
<https://doi.org/10.4236/jep.2015.66057>
96. Hollebhone, B.P., 2014. Oil Physical Properties, in: *Handbook of Oil Spill Science and Technology.* pp. 37-50.
<https://doi.org/10.1002/9781118989982.ch2>
97. Hooper, M.J., Glomb, S.J., Harper, D.D., Hoelzle, T.B., McIntosh, L.M., Mulligan, D.R., 2016. Integrated risk and recovery monitoring of ecosystem restorations on contaminated sites. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 12, 284-295.
<https://doi.org/10.1002/ieam.1731>
98. Idris, J., Eyu, G.D., Mansor, A.M., Ahmad, Z., Chukwuekezie, C.S., 2014. A preliminary study of biodegradable waste as sorbent material for oil-spill cleanup. *Sci. World J.* 2014.
99. IOPC, 2019. Incidents involving IOPC Funds — 1992 Fund -Agia Zoni II.
100. ITOPF, 2011. Fate of Marine Oil Spills. Tech. Inf. Pap. 2, London:ITOPF.
101. Jacketti, M., Beegle-Krause, C.J., Englehardt, J.D., 2020. A review on the sinking mechanisms for oil and successful response technologies. *Mar. Pollut. Bull.* 160, 111626.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111626>
102. Johansen, Ø., 2000. DeepBlow – a Lagrangian Plume Model for Deep Water Blowouts. *Spill Sci. Technol. Bull.* 6, 103-111.
[https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(00\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(00)00042-6)
103. Johansen, Ø., Brandvik, P.J., Farooq, U., 2013. Droplet breakup in subsea oil releases - Part 2: Predictions of droplet size distributions with and without injection of chemical dispersants. *Mar. Pollut. Bull.* 73, 327-335.
[doi:10.1016/j.marpolbul.2013.04.012](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.04.012)
104. Johansen, Ø., Rye, H., Melbye, A., 2001. Deep spill JIP—Experimental discharges of gas and oil at Helland Hansen—June 2000. SINTEF Rep. 5TF66 F01082 1-159.
105. Kaku, V., Boufadel, M., Asce, M., Venosa, A., 2006. Evaluation of Mixing Energy in Laboratory Flasks Used for Dispersant Effectiveness Testing. *J. Environ. Eng.* 132.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2006\)132:1\(93\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2006)132:1(93))
106. Kallos, G., Nickovic, S., Papadopoulos, A., Jovic, D., Kakaliagou, O., Misirlis, N., Boukas, L., Mimikou, N., Sakellaris, G., Papageorgiou, J., Anadranistakis, E., Manousakis, M., 1997. The Regional weather forecasting system SKIRON, in: *Proceedings of Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments.* 9 pp.
107. Karakitsios, V., 2013. Western Greece and Ionian Sea petroleum systems. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 9, 1567-1595.
[doi:10.1306/02221312113](https://doi.org/10.1306/02221312113)
108. Karp-Boss, L., Azevedo, L., Boss, E., 2007. LISST-100 measurements of phytoplankton size distribution: Evaluation of the effects of cell shape. *Limnol. Oceanogr. methods* 5.

- <https://doi.org/10.4319/lom.2007.5.396>
109. Kassis, D., Korres, G., Konstantinidou, A., Perivoliotis, L., 2017. Comparison of high resolution hydrodynamic model outputs with in-situ Argo profiles in the Ionian Sea. *Mediterr. Mar. Sci.* 18, 22-37.
 110. Keramitsoglou, I., Cartalis, C., Kassomenos, P., 2003. Decision Support System for Managing Oil Spill Events. *Environ. Manage.* 32, 290–298.
<https://doi.org/10.1007/s00267-003-2969-7>
 111. Lagouvardos, K., Kotroni, V., Koussis, A., Feidas, H., Buzzi, A., Malguzzi, P., 2003. The Meteorological Model BOLAM at the National Observatory of Athens: Assessment of Two-Year Operational Use. *J. Appl. Meteorol.* 42, 1667–1678.
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042<1667:TMMBAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<1667:TMMBAT>2.0.CO;2)
 112. Lamine, S., Xiong, D., 2013. Guinean environmental impact potential risks assessment of oil spills simulation. *Ocean Eng.* 66, 44-57.
[doi:10.1016/j.oceaneng.2013.04.003](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.04.003)
 113. Lange, P., Huehnerfuss, H., 1978. Drift response of monomolecular slicks to wave and wind action. *J. Phys. Oceanogr.* 8, 142-150.
 114. Lardner, R.W., Zodiatis, G., Loizides, L., Demetropoulos, A., 1999. An operational oil spill model for the Levantine Basin (Eastern Mediterranean Sea).
 115. Lee, C., 2012. Water-based oil spill modeling software: benefits, requirements & recommendations.
 116. Lee, K., Chen, B., Boufadel, M., Swanson, S.M., Hodson, P.V., Foght, J., Venosa, A.D., 2016. Behaviour and environmental impacts of crude oil released into aqueous environments.
 117. Leftheriotis, G.A., Horsch, G.M., Fourniotis, N.T., 2013. A Numerical Study of the Hydrodynamic Circulation of the Messolonghi-Aetoliko Lagoonal System, in: *Proceedings on Coastal Dynamics 2013, 7th International Conference on Coastal Dynamics*, 1061-1070.
 118. Lehr, W.J., 2001. Review of modeling procedures for oil spill weathering behavior. *Adv. Ecol. Sci.* 9, 51–90.
 119. Leonardos, I., Sinis, A., 1997. Fish mass mortality in the Etolikon Lagoon, Greece: The role of local geology. *Cybiurn* 21(2), 201-206.
 120. Levitt, C.J., 2016. Information spillovers in onshore oil and gas exploration. *Resour. Energy Econ.* 45, 80–98.
<https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2016.05.003>
 121. Lin, C.Y., Tjeerdema, R.S., 2008. Crude Oil, Oil, Gasoline and Petrol, in: Jørgensen, S.E., Fath, B.D.B.T.-E. of E. (Eds.). *Academic Press, Oxford*, pp. 797–805.
<https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00382-7>
 122. Lindeberg, M.R., Maselko, J., Heintz, R.A., Fugate, C.J., Holland, L., 2018. Conditions of persistent oil on beaches in Prince William Sound 26 years after the Exxon Valdez spill. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 147, 9–19.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.07.011>
 123. Liu, Z., Liu, J., Zhu, Q., Wu, W., 2012. The weathering of oil after the Deepwater Horizon oil spill: insights from the chemical composition of the oil from the sea surface, salt marshes and sediments. *Environ. Res. Lett.* 7, 035302.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/3/035302>
 124. Liubartseva, S., De Dominicis, M., Oddo, P., Coppini, G., Pinardi, N., Greggio, N., 2015. Oil spill hazard from dispersal of oil along shipping lanes in the Southern Adriatic and Northern Ionian Seas. *Mar. Pollut. Bull.* 91, 259–272.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.10.039>
 125. Liubartseva, S., Federico, I., Coppini, G., Lecci, R., 2021. Stochastic oil spill modeling for environmental protection at the Port of Taranto (southern Italy). *Mar. Pollut. Bull.* 171, 112744.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112744>
 126. Liubartseva, S., Smaoui, M., Coppini, G., Gonzalez, G., Lecci, R., Cretì, S., Federico, I., 2020. Model-based reconstruction of the Ulysse-Virginia oil spill, October–November 2018. *Mar. Pollut. Bull.* 154, 111002.
 127. Makatounis, P.E., Skancke, J., Florou, E., Stamou, A., Brandvik, P.J., 2017. Management of oil spill contamination in the Gulf of Patras caused by an accidental subsea blowout. *Environ. Pollut.* 231, 578–588.

- <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2017.08.076>
128. Makatounis P.E.Z., Stamou A.I. and Ventikos N.P., 2023. Modeling the Agia Zoni II tanker oil spill in Saronic Gulf, Greece. *Mar. Pollut. Bull.* 194, 115275. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115275>
 129. Malins, D., Hodgins, H., 1981. Petroleum and marine fishes: a review of uptake, disposition, and effects. *Environ. Sci. Technol.* 15, 1272-1280.
 130. Mariano, A.J., Kourafalou, V.H., Srinivasan, A., Kang, H., Halliwell, G.R., Ryan, E.H., Roffer, M., 2011. On the modeling of the 2010 Gulf of Mexico Oil Spill. *Dyn. Atmos. Ocean.* 52, 322-340. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2011.06.001>
 131. Marta-Almeida, M., Ruiz-Villarreal, M., Pereira, J., Otero, P., Cirano, M., Zhang, X., Hetland, R.D., 2013. Efficient tools for marine operational forecast and oil spill tracking. *Mar. Pollut. Bull.* 71, 139-151. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.03.022>
 132. McNutt, M.K., Camilli, R., Crone, T.J., Guthrie, G.D., Hsieh, P.A., Ryerson, T.B., Savas, O., Shaffer, F., 2012. Review of flow rate estimates of the Deepwater Horizon oil spill. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109, 20260-20267. <https://doi.org/10.1073/pnas.1112139108>
 133. Melaku Canu, D., Solidoro, C., Bandelj, V., Quattrocchi, G., Sorgente, R., Olita, A., Fazioli, L., Cucco, A., 2015. Assessment of oil slick hazard and risk at vulnerable coastal sites. *Mar. Pollut. Bull.* 94, 84-95. [doi:10.1016/j.marpolbul.2015.03.006](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.03.006)
 134. Milgram, J.H., Burgess, J.J., 1984. Measurements of the surface flow above round bubble plumes. *Appl. Ocean Res.* 6, 40-44. [https://doi.org/10.1016/0141-1187\(84\)90027-0](https://doi.org/10.1016/0141-1187(84)90027-0)
 135. Mishra, A.K., Kumar, G.S., 2015. Weathering of oil spill: modeling and analysis. *Aquat. Procedia* 4, 435-442.
 136. Morell Villalonga, M., Espino Infantes, M., Grifoll Colls, M., Mestres Ridge, M., 2020. Environmental Management System for the Analysis of Oil Spill Risk Using Probabilistic Simulations. Application at Tarragona Monobuoy. *J. Mar. Sci. Eng.* <https://doi.org/10.3390/jmse8040277>
 137. National Academies of Sciences and Medicine, E., 2016. Spills of diluted bitumen from pipelines: a comparative study of environmental fate, effects, and response. National Academies Press.
 138. National Ocean & Atmospheric Administration (NOAA), 2001. Characteristics of Response Strategies: A Guide for Spill Response Planning in Marine Environments, Characteristics of Response Strategies: A Guide for Spill Response Planning in Marine Environments. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Survey.
 139. National Research Council (US), 2003. Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects. Natl. Acad. Press. <https://doi.org/doi:10.17226/10388>
 140. National Research Council, 1996. Effects of Double-Hull Requirements on Oil Spill Prevention: Interim Report.
 141. National Research Council, 2005. Oil spill dispersants: efficacy and effects.
 142. Naz, S., Iqbal, M.F., Mahmood, I., Allam, M., 2021. Marine oil spill detection using Synthetic Aperture Radar over Indian Ocean. *Mar. Pollut. Bull.* 162, 111921. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111921>
 143. Nedwed, T., Coolbaugh, T., Tidwell, A., 2012. Subsea dispersant use during the deepwater horizon incident. *Proc. 35th AMOP Tech. Semin. Environ. Contam. Response* 506-518.
 144. Nikolaidou, A., Reisopoulou, S., Koutsoubas, D., Orfanidis, S., Kevrekidis, T., 2005. Lagoons. *Hell. Cent. Mar. Res.* 211-219.
 145. Nordam, T., Brønner, U., Daae, R.L., 2016. Convergence of ensemble simulations for environmental risk assessment, in: *Proceeding of the 39th AMOP Technical Seminar of Environmental Contamination and Response*. Halifax, Canada.
 146. Owens, E.H., Taylor, E., Humphrey, B., 2008. The persistence and character of stranded oil on coarse-sediment beaches. *Mar. Pollut. Bull.* 56, 14-26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.08.020>

147. Pan, Q., Yu, Han, Daling, P.S., Zhang, Y., Reed, M., Wang, Z., Li, Y., Wang, X., Wu, L., Zhang, Z., Yu, Haipeng, Zou, Y., 2020. Fate and behavior of Sanchi oil spill transported by the Kuroshio during January–February 2018. *Mar. Pollut. Bull.* 152, 110917.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110917>
148. Pang, J., Du, S., Chang, R., Pei, Q., Cui, D., 2015. Interfacial rheology of mixed surfactants at the oil/water interface. *J. Surfactants Deterg.* 18, 747–753.
149. Papadonikolaki, G., Altan, Y., Stamou, A., Otay, E., Christodoulou, G., Copty, N., Tsoukala, V., Telli-Karakoc, F., Papadopoulos, A., 2014. Risk assessment of oil spill accidents. *Glob. NEST J.* 16, 743–752.
150. Papadopoulos, A., Katsafados, P., Kallos, G., Nickovic, S., 2002. The Weather Forecasting System for Poseidon - an Overview. *J. Atmos. Ocean Sci.* 8, 219–237.
[doi:10.1080/1023673029000003543](https://doi.org/10.1080/1023673029000003543)
151. Parinos, C., Hatzianestis, I., Chourdaki, S., Plakidi, E., Gogou, A., 2019. Imprint and short-term fate of the Agia Zoni II tanker oil spill on the marine ecosystem of Saronikos Gulf. *Sci. Total Environ.* 693, 133568.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.374>
152. Payne, J.R., Clayton, J.R., Kirstein, B.E., 2003. Oil/suspended particulate material interactions and sedimentation. *Spill Sci. Technol. Bull.* 8, 201–221.
[https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(03\)00048-3](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(03)00048-3)
153. Perdigão, R., Almeida, C.M.R., Magalhães, C., Ramos, S., Carolas, A.L., Ferreira, B.S., Carvalho, M.F., Mucha, A.P., 2021. Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons in Seawater: Prospects of Using Lyophilized Native Hydrocarbon-Degrading Bacteria. *Microorganisms.*
<https://doi.org/10.3390/microorganisms9112285>
154. Perriáñez, R., 2020. A Lagrangian oil spill transport model for the Red Sea. *Ocean Eng.* 217, 107953.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107953>
155. Pradhan, B., Das, M., Pradhan, C., 2021. Forecasting oil spill movement through trajectory modeling: a case study from Bay of Bengal, India. *Model. Earth Syst. Environ.* 7, 1107–1119.
<https://doi.org/10.1007/s40808-020-00933-4>
156. Radpour, A. V., 2015. Surface and Subsurface Application of Chemical Dispersants and Associated Ecosystem Impacts.
157. Ramírez-León, H., 2012. The Oil Spill in the Gulf of Mexico BT - Experimental and Theoretical Advances in Fluid Dynamics, in: Klapp, J., Cros, A., Velasco Fuentes, O., Stern, C., Rodriguez Meza, M.A. (Eds.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 103–134.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-17958-7_8
158. Ranjbar, P., Shafieefar, M., Rezvandoust, J., 2014. Modeling of oil spill and response in support of decreasing environmental oil effects case study: Blowout from Khark subsea pipelines (Persian Gulf). *Int. J. Environ. Res.* 8, 289–296.
159. Reed, M., Aamo, O.M., Daling, P.S., 1995a. Quantitative Analysis of Alternate Oil Spill Response Strategies using OSCAR. *Spill Sci. Technol. Bull.* 2, 67–74.
[doi:10.1016/1353-2561\(95\)00020-5](https://doi.org/10.1016/1353-2561(95)00020-5)
160. Reed, M., Daling, P., Lewis, A., Ditlevsen, M.K., Brørs, B., Clark, J., Aurand, D., 2004. Modelling of dispersant application to oil spills in shallow coastal waters. *Environ. Model. Softw.* 19, 681–690. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.08.014>
161. Reed, M., Daling, P.S., Brakstad, O.G., Singaas, I., Faksness, L.-G., Hetland, B., Ekrol, N., 2000. OSCAR2000: a multi-component 3-dimensional Oil Spill Contingency and Response model, in: Arctic and Marine Oilspill Program Technical Seminar. pp. 663–680.
162. Reed, M., Ekrol, N., Rye, H., Turner, L., 1999. Oil Spill Contingency and Response (OSCAR) analysis in support of environmental impact assessment offshore Namibia. *Spill Sci. Technol. Bull.* 5, 29–38. [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(98\)00050-4](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(98)00050-4)
163. Reed, M., Emilsen, M.H., Hetland, B., Johansen, Ø., Buffington, S., Høverstad, B., 2006. Numerical model for estimation of pipeline oil spill volumes. *Environ. Model. Softw.* 21, 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.04.019>

164. Reed, M., French, D., Rines, H., Rye, H., 1995b. A three-dimensional oil and chemical spill model for environmental impact assessment, in: Proceedings of the International Oil Spill Conference.
165. Reed, M., Hetland, B., 2002. DREAM: a Dose-related exposure assessment model technical description physical-chemical fates components. Soc. Pet. Eng. 1-24.
166. Samaras, A.G., De Dominicis, M., Archetti, R., Lamberti, A., Pinardi, N., 2014. Towards improving the representation of beaching in oil spill models: A case study. Mar. Pollut. Bull. 88, 91-101.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.09.019>
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.09.019>
167. Singaas, I., Leirvik, F., Daling, P.S., Guénette, C., Sørheim, K.R., 2020. Fate and behaviour of weathered oil drifting into sea ice, using a novel wave and current flume. Mar. Pollut. Bull. 159, 111485.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111485>
168. Smith, D., 2011. Subsea production.
169. Socolofsky, S.A., Adams, E.E., Boufadel, M.C., Aman, Z.M., Johansen, Ø., Konkell, W.J., Lindo, D., Madsen, M.N., North, E.W., Paris, C.B., Rasmussen, D., Reed, M., Rønningen, P., Sim, L.H., Uhrenholdt, T., Anderson, K.G., Cooper, C., Nedwed, T.J., 2015. Intercomparison of oil spill prediction models for accidental blowout scenarios with and without subsea chemical dispersant injection 96, 110–126.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.05.039>
170. Socolofsky, S.A., Jun, I., Boufadel, M.C., Liu, R., Lu, Y., Arey, J.S., McFarlin, K.M., 2022. Development of an offshore response guidance tool for determining the impact of SSDI on released gas and benzene from artificial subsea oil well blowout simulations. Mar. Pollut. Bull. 184, 114114.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114114>
171. Sorial, G., Venosa, A., Koran, K., Holder, E., King, D., 2004. Oil Spill Dispersant Effectiveness Protocol. I: Impact of Operational Variables. J. Environ. Eng. - J Env. ENG-ASCE 130.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2004\)130:10\(1073\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2004)130:10(1073))
172. Sørstrøm, S.E., Rossmyr, L.I and Hægh, T. 1978. Experimental oil release on Tromsøflaket September 1978. SINTEF IKU P146/P195 – 1/5. 39 p. Trondheim, Norway (In Norwegian).
173. Spaulding, M., Li, Z., Mendelsohn, D., Crowley, D., French-McCay, D., Bird, A., 2017. Application of an Integrated Blowout Model System, OILMAP DEEP, to the Deepwater Horizon (DWH) Spill. Mar. Pollut. Bull. 120, 37–50.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.04.043>
174. Spaulding, M.L., 2017. State of the art review and future directions in oil spill modeling. Mar. Pollut. Bull. 115, 7–19.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.001>
175. Spaulding, M.L., Kolluru, V.S., Anderson, E., Howlett, E., 1994. Application of three-dimensional oil spill model (WOSM/OILMAP) to Hindcast the Braer spill. Spill Sci. Technol. Bull. 1, 23–35.
[https://doi.org/10.1016/1353-2561\(94\)90005-1](https://doi.org/10.1016/1353-2561(94)90005-1)
176. Stolzenbach, K.D., Madsen, O.S., Adams, E.E., Pollack, A.M., Cooper, C., 1977. A review and evaluation of basic techniques for predicting the behavior of surface oil slicks. Report (Massachusetts Institute of Technology. Sea Grant Program) no. MITSG 77-8.
177. Trudel, K., Belore, R., Guarino, A., Lewis, A., Mullin, J., 2005. Determining the Viscosity Limits for Effective Chemical Dispersion: Relating Ohmsett Results to those from Tests At-Sea. Int. Oil Spill Conf. Proc. 2005.
<https://doi.org/10.7901/2169-3358-2005-1-71>
178. Venosa, A., King, D., Sorial, G., 2002. The Baffled Flask Test for Dispersant Effectiveness: A Round Robin Evaluation of Reproducibility and Repeatability. Spill Sci. Technol. Bull. 7, 299–308.
[https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(02\)00072-5](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(02)00072-5)
179. Ventikos, N.P., Vergetis, E., Psaraftis, H.N., Triantafyllou, G., 2004. A high-level synthesis of oil spill response equipment and countermeasures. J. Hazard. Mater. 107, 51–58.

- <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2003.11.009>
180. Wadsworth, T., 1995. Containment & recovery of oil spills at sea: methods and limitations. *J. Waste Manag. Environ.* 1.
 181. Waldichuk, M., 1980. Retrospect of the Ixtoc I blowout. *Mar. Pollut. Bull.* 11, 184–186.
 182. Wang, J.-L., 2013. Pour Point BT - Encyclopedia of Tribology, in: Wang, Q.J., Chung, Y.-W. (Eds.), Springer US, Boston, MA, pp. 2673–2678.
https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_958
 183. WWF, 2017. Oil pollution in Saronikos Gulf.
 184. Xu, Q., Li, X., Wei, Y., Tang, Z., Cheng, Y., Pichel, W.G., 2013. Satellite observations and modeling of oil spill trajectories in the Bohai Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 71, 107–116.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.03.028>
 185. Yapa, P.D., Wimalaratne, M.R., Dissanayake, A.L., DeGraff, J.A., 2012. How does oil and gas behave when released in deepwater? *J. Hydro-Environment Res.* 6, 275–285.
<https://doi.org/10.1016/j.jher.2012.05.002>
 186. Yin, Z., Yuan, P., Lian, X., Zheng, Y., Zheng, H., 2019. Components of Paraffin-Base and Naphthenic-Base Crude Oil and Their Effects on Interfacial Performance. *Open J. Yangtze Oil Gas* 04, 270–285.
<https://doi.org/10.4236/ojogas.2019.44022>
 187. Zacharias, D.C., Gama, C.M., Harari, J., da Rocha, R.P., Fornaro, A., 2021. Mysterious oil spill on the Brazilian coast – Part 2: A probabilistic approach to fill gaps of uncertainties. *Mar. Pollut. Bull.* 173, 113085.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113085>
 188. Zafirakou, A., 2018. Oil spill dispersion forecasting models, in: *Monitoring of Marine Pollution*. IntechOpen London, UK.
 189. Zelenke, B., O'Connor, C., Barker, C.H., Beegle-Krause, C.J., 2012a. General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) technical documentation, data formats.
 190. Zelenke, B., O'Connor, C., Barker, C.H., Beegle-Krause, C.J., Eclipse, L., 2012b. General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) technical documentation. NOAA technical memorandum NOS-OR&R 40.
 191. Zhang, B., Matchinski, E.J., Chen, B., Ye, X., Jing, L., Lee, K., 2019. Marine oil spills—Oil pollution, sources and effects, in: *World Seas: An Environmental Evaluation*. Elsevier, pp. 391–406.
 192. Zhao, L., Boufadel, M.C., Adams, E., Socolofsky, S.A., King, T., Lee, K., Nedwed, T., 2015. Simulation of scenarios of oil droplet formation from the Deepwater Horizon blowout. *Mar. Pollut. Bull.* 101, 304–319.
[doi:10.1016/j.marpolbul.2015.10.068](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.10.068)
 193. Zhao, L., Shaffer, F., Robinson, B., King, T., D'Ambrose, C., Pan, Z., Gao, F., Miller, R.S., Conmy, R.N., Boufadel, M.C., 2016. Underwater oil jet: Hydrodynamics and droplet size distribution. *Chem. Eng. J.* 299, 292–303.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.061>
 194. Zheng, L., Yapa, P.D., Chen, F., 2003. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts - Part I: Theory and model formulation. *J. Hydraul. Res.* 41, 339–351.
<https://doi.org/10.1080/00221680309499980>
 195. Zodiatis, G., De Dominicis, M., Perivoliotis, L., Radhakrishnan, H., Georgoudis, E., Sotillo, M., Lardner, R.W., Krokos, G., Bruciaferri, D., Clementi, E., Guarnieri, A., Ribotti, A., Drago, A., Bourma, E., Padorno, E., Daniel, P., Gonzalez, G., Chazot, C., Gouriou, V., Kremer, X., Sofianos, S., Tintore, J., Garreau, P., Pinardi, N., Coppini, G., Lecci, R., Pisano, A., Sorgente, R., Fazioli, L., Soloviev, D., Stylianou, S., Nikolaidis, A., Panayidou, X., Karaolia, A., Gauci, A., Marcati, A., Caiazzo, L., Mancini, M., 2016. The Mediterranean decision support system for marine safety dedicated to oil slicks predictions. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 133, 4–20.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.07.014>
 196. Zulqarnain, M., Fike, R., 2017. Overview of Offshore Drilling Technologies, in: *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*. pp. 1–12.
<https://doi.org/10.1002/9781118476406.emoe415>
 197. http://ornithologiki.gr/page_iba.php?aID=92
 198. <http://www.birdlife.org/datazone/species/factsheet/22692913>

199. <http://www.itopf.com/marine-spills/fate/weathering-process/>
200. <http://www.iucnredlist.org/details/1847/0>
201. <http://www.nagref.gr/journals/ethg/images/31/ethg31p4-7.pdf>
202. <http://www.oilspillprevention.org/-/media/Oil-Spill-Prevention/spillprevention/r-and-d/dispersants/sp-sheet7-aerialvessel-1.pdf>
203. <http://www.ramsar.org/wetland/greece>
204. <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=766&locale=en-US&language=el-GR>
205. <https://appliedsciences.nasa.gov/our-impact/news/nasa-images-show-oils-invasion-along-louisiana-coast>
206. https://data.marine.copernicus.eu/product/MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004/description
207. <https://emsa.europa.eu/newsroom/latest-news/item/3100-emsa-contracted-vessel-aktea-osrv-mobilised-to-assist-with-oil-recovery.html>
208. <https://hycom.org/data/glbv0pt08/expt-57pt7>
209. <https://itopf.org/knowledge-resources/countries-territories-regions/greece/>
210. <https://itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/response-techniques/containment/>
211. https://meteo.gr/meteomaps/about_bolam.cfm
212. <https://response.restoration.noaa.gov/index.php>
213. <https://spanopoulos-group.com/news-press-releases/item/622-news-2017>
214. <https://www.api.org/-/media/files/policy/exploration/key-improvements-to-offshore-safety.pdf>
215. <https://www.fisheries.noaa.gov/national/habitat-conservation/restoring-habitat-after-oil-spills-and-other-environmental-disasters>