



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**Σύγκριση δύο μαθηματικών μοντέλων  
διασποράς πετρελαιοκηλίδας στο  
Θερμαϊκό Κόλπο**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Χρηστάκης Ι. Γεώργιος**

**Επιβλέπων:** Α. Ι. Στάμου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**Συνεπιβλέπουσα:** Β. Κ. Τσουκαλά, Επ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2014



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**Σύγκριση δύο μαθηματικών μοντέλων διασποράς  
πετρελαιοκηλίδας στο Θερμαϊκό Κόλπο**

**Λέξεις Κλειδιά:** πετρελαιοκηλίδα, θαλάσσια ρύπανση, ναυτικό ατύχημα, τροχιά και διεργασίες πετρελαιοκηλίδας, MEDSLIK, FLOW-3DL, OSM, Θερμαϊκός Κόλπος

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Χρηστάκης Ι. Γεώργιος**

**Επιβλέπων:** Α. Ι. Στάμου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**Συνεπιβλέπουσα:** Β.Κ. Τσουκαλά, Επ. Καθηγήτρια, Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2014



## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Α. Στάμου, Καθηγητή ΕΜΠ, για την πολύτιμη βοήθειά του και για την παροχή του επιστημονικού υπόβαθρου, χωρίς το οποίο δεν θα ήταν δυνατή η επιλογή και η εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κ. Β. Τσουκαλά, Επίκουρο Καθηγήτρια ΕΜΠ, για τη συνεχή βοήθεια και συμπαράσταση, τις συμβουλές της και τις διορθώσεις που οδήγησαν στην τελική μορφή της παρούσας εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Υ.Δ. κ. Γεωργία Παπαδονικολάκη για την πολύτιμη βοήθειά της, χωρίς την οποία θα ήταν πολύ δύσκολο να ξεπεραστούν όσα προβλήματα προέκυψαν, αλλά και για τη συνεχή καθοδήγησή της.

Ευχαριστώ, ακόμα, τους συναδέλφους μου Κραγιοπούλου Ελευθερία και Ποτουρίδη Στέφανο, οι οποίοι με την εμπειρία τους σε ανάλογα θέματα διπλωματικής εργασίας, μου παρείχαν συμβουλές, αλλά και ό,τι άλλο χρειάστηκε για την επιτυχημένη προσέγγιση του θέματος.

Αθήνα 2014, Χρηστάκης Γεώργιος



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Παράρτημα.....	v
Περίληψη .....	xi
Abstract.....	xiii
1. Εισαγωγή .....	1
1.1 Αντικείμενο της εργασίας .....	1
1.2 Διάρθρωση της εργασίας.....	2
2. Θαλάσσιες μεταφορές και πετρελαϊκή ρύπανση .....	4
2.1 Ρύπανση της θάλασσας από πετρέλαιο .....	4
2.2 Αίτια δημιουργίας πετρελαιοκηλίδων.....	7
2.2.1 Ρύπανση λόγω ναυτικών ατυχημάτων .....	7
2.2.2 Ρύπανση λόγω λειτουργικών διαδικασιών.....	8
2.2.3 Στατιστικά παγκόσμιου ιστορικού ατυχημάτων .....	9
2.3 Ιστορικό παλαιών ατυχημάτων .....	10
2.3.1 Τα μεγαλύτερα ατυχήματα στον κόσμο από πετρελαιοκηλίδα.....	10
2.3.2 Τα μεγαλύτερα ατυχήματα στην Ελλάδα από πετρελαιοκηλίδα .....	12
2.4 Σύσταση και φυσικοχημικές διεργασίες του πετρελαίου.....	13
2.4.1 Σύσταση του πετρελαίου.....	13
2.4.2 Φυσικοχημικές διεργασίες του πετρελαίου.....	14
2.5 Επιπτώσεις των πετρελαιοκηλίδων .....	15
2.5.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των πετρελαιοκηλίδων .....	15
2.5.2 Κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις των πετρελαιοκηλίδων .....	18
2.5.3 Κόστος καθαρισμού μιας πετρελαιοκηλίδας .....	19
2.6 Τρόποι αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων .....	20
2.6.1 Καθαρισμός της θάλασσας .....	20
2.6.2 Καθαρισμός των ακτών.....	22
2.7 Νομοθετικό πλαίσιο προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος.....	23
2.7.1 Διεθνής Σύμβαση MARPOL (1973/1978).....	24
3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	25
3.1 Εισαγωγή.....	25
3.2 «Εκτίμηση επικινδυνότητας ατυχημάτων πετρελαιοκηλίδας, μέρη 1 & 2» .....	26
3.2.1 Υδροδυναμικοί υπολογισμοί.....	26
3.2.2 Μοντέλο συχνότητας ατυχημάτων.....	27
3.2.3 Υπολογισμοί μοντέλου πετρελαιοκηλίδας.....	30
3.2.4 Ανάλυση επίπτωσης και μοντέλο εκτίμησης της επικινδυνότητας .....	30
3.2.5 Συμπεράσματα έρευνας.....	32
3.3 «Σύγκριση των προγραμμάτων GNOME, MEDSLIK και FLOW-3DL για τον υπολογισμό τροχιάς πετρελαιοκηλίδας».....	32
3.3.1 Συμπεράσματα διπλωματικής εργασίας.....	34

3.4 «Εκτίμηση επικινδυνότητας ατυχημάτων πετρελαιοκηλίδας – Εφαρμογή δύο μεθοδολογιών στο Σαρωνικό Κόλπο» .....	34
3.4.1 Παρουσίαση της 2 <sup>ης</sup> Μεθοδολογίας.....	35
3.4.2 Συμπεράσματα διπλωματικής εργασίας.....	37
4. Υφιστάμενα μοντέλα πετρελαιοκηλίδας.....	39
4.1 Εισαγωγή.....	39
4.2 Τύποι μοντέλων.....	40
4.2.1 Μοντέλα Oil Weathering .....	40
4.2.2 Ντετερμινιστικά μοντέλα.....	40
4.2.3 Στοχαστικά μοντέλα.....	40
4.2.4 Μοντέλα Hind-Cast.....	41
4.2.5 Μοντέλα τριών διαστάσεων (3D) .....	41
4.3 Μοντέλα πετρελαιοκηλίδας .....	41
4.3.1 GNOME (General NOAA Oil Modeling Environment).....	41
4.3.2 SIMAP .....	42
4.3.3 ADIOS (Automated Data Inquiry for Oil Spills).....	42
4.3.4 SIMPAR.....	43
4.3.5 OILMAP .....	44
4.3.6 OSERIT .....	45
4.3.7 OSIS .....	45
4.3.8 MOHID .....	46
4.3.9 OSCAR .....	47
4.4 Δεδομένα εισόδου .....	47
4.4.1 Γενικά.....	47
4.4.2 Υδροδυναμικά δεδομένα.....	48
4.4.3 Ανεμολογικά δεδομένα .....	48
4.4.4 Τύπος πετρελαίου.....	49
4.5 Σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης.....	49
4.6 Επιχειρησιακά μοντέλα .....	49
4.7 Προσομοίωση στρατηγικών αντιμετώπισης .....	50
4.8 Χρήση των αποτελεσμάτων των μοντέλων .....	50
4.9 Συμπεράσματα .....	51
5. Το μοντέλο MEDSLIK .....	53
5.1 Εισαγωγή.....	53
5.2 Πεδίο εισαγωγής δεδομένων πετρελαιοκηλίδας .....	56
5.3 Το μαθηματικό μοντέλο .....	59
5.3.1 Μεταφορά-Διάχυση-Προσαιγιάλωση .....	59
5.3.2 Φυσικές διεργασίες .....	62
5.3.3 Εξάτμιση .....	63
5.3.4 Γαλακτωματοποίηση.....	65
5.3.5 Διασπορά.....	66
5.3.6 Εξάπλωση.....	68



5.4 Αποτελέσματα – Γραφικά .....	69
6. Τα μοντέλα FLOW-3DL/OSM .....	72
6.1 Το υδροδυναμικό μοντέλο FLOW-3DL .....	72
6.1.1 Εισαγωγή.....	72
6.1.2 Διαφορικές εξισώσεις πεδίου ροής .....	72
6.1.3 Οριακές συνθήκες .....	73
6.1.3.1 Ελεύθερη επιφάνεια.....	74
6.1.3.2 Πυθμένας .....	74
6.1.3.3 Διεπιφάνειες μεταξύ στρωμάτων.....	74
6.1.3.4 Στερεά όρια.....	75
6.1.3.5 Όρια ανοικτής θάλασσας.....	75
6.1.4 Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής και της συμπεριφοράς ποιοτικών παραμέτρων .....	75
6.1.4.1 Γενικά .....	75
6.1.4.2 Διακριτοποίηση του πεδίου ροής .....	76
6.2 Το μοντέλο πετρελαιοκηλίδας OSM (Oil Spill Model) .....	77
6.2.1 Εισαγωγή.....	77
6.2.2 Φυσικές διεργασίες .....	77
6.2.3 Εξάτμιση .....	78
6.2.4 Γαλακτωματοποίηση.....	79
6.2.5 Διασπορά.....	79
6.2.6 Εξάπλωση.....	80
6.2.7 Υπολογιστική διαδικασία.....	80
6.3 Αποτελέσματα – Γραφικά .....	82
7. Εφαρμογή των μαθηματικών μοντέλων .....	83
7.1 Χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης.....	83
7.1.1 Περιοχή μελέτης .....	83
7.1.2 Βαθυμετρία .....	84
7.1.3 Μετεωρολογικά δεδομένα.....	84
7.1.4 Στοιχεία παλίρροιας .....	85
7.1.5 Λιμενικές εγκαταστάσεις .....	86
7.1.6 Περιοχές περιβαλλοντικής σημασίας.....	87
7.2 Δεδομένα εισόδου και θέσεις ατυχημάτων .....	89
7.2.1 Επιλογή τιμών παραμέτρων πετρελαίου .....	89
7.2.2 Ανεμολογικά σενάρια .....	89
7.2.3 Επιλογή θέσεων ατυχημάτων.....	90
7.2.4 Επιλογή σεναρίων ατυχημάτων πετρελαιοκηλίδας .....	92
7.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων .....	94
7.3.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων MEDSLIK .....	94
7.3.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων OSM.....	99
8. Σύγκριση των δύο μοντέλων.....	102

8.1 Εισαγωγή.....	102
8.2 Ως προς την υπολογιστική διαδικασία .....	102
8.2.1 Εισαγωγή.....	102
8.2.2 Περιοχή εφαρμογής.....	102
8.2.3 Περιβάλλον εργασίας.....	103
8.2.4 Εποπτεία υπολογισμών .....	104
8.2.5 Χρονική διάρκεια υπολογισμών .....	104
8.3 Ως προς τα αποτελέσματα .....	105
8.3.1 Εισαγωγή.....	105
8.3.2 Εξέλιξη τροχιάς πετρελαιοκηλίδας στα αντίστοιχα σενάρια .....	106
8.3.3 Σενάρια με εφαρμογή αντίστοιχων θαλάσσιων ρευμάτων .....	109
8.3.4 Σενάρια με μηδενικά θαλάσσια ρεύματα .....	110
8.3.5 Εξάπλωση πετρελαιοκηλίδας.....	112
8.3.6 Πληροφορίες που παρέχονται στο πέρας των προσομοιώσεων .....	112
8.3.7 Διαβάθμιση πετρελαιοκηλίδας.....	112
9. Συμπεράσματα – Προτάσεις .....	115
9.1 Συμπεράσματα .....	115
9.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	116
Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	117

# Παράρτημα

Πίνακας Π1: Παράρτημα Πινάκων

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΙΝΑΚΩΝ		
A/A	Περιγραφή	Πηγή
1	Πίνακας 2.1: Αριθμός περιστατικών ανά αιτία διαρροής κατά την περίοδο 1970 - 2013	Oil Tanker Spill Statistics 2013, ΙΤΟΡΡ
2	Πίνακας 2.2: Τα 20 μεγαλύτερα ατυχήματα που έχουν συμβεί παγκοσμίως	Oil Tanker Spill Statistics 2013, ΙΤΟΡΡ
3	Πίνακας 2.3: Οι μεγαλύτερες πετρελαιοκηλίδες στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο	Οι σημαντικότερες πετρελαιοκηλίδες στην Ελλάδα (Greenpeace.org)
4	Πίνακας 3.1: Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη συχνότητα των ατυχημάτων, συσχετισμένοι με τα υδρογραφικά στοιχεία και τα χαρακτηριστικά πλοήγησης της περιοχής	Otay et al., 2013, (επεξεργασία: Κραγιπούλου Ελ., 2014)
5	Πίνακας 4.1: Κατηγοριοποίηση διαδεδομένων μοντέλων πετρελαιοκηλίδας	-
6	Πίνακας 4.2: Πίνακας που περιγράφει πού μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάθε κατηγορία μοντέλου	iTac (2008), Technical Paper "Use of Models in Oil Spill Response"
7	Πίνακας 7.1: Ετήσια συχνότητα (%) εμφάνισης διεύθυνσης του ανέμου και αντίστοιχης έντασης (κλίμακα Bf)	ΕΜΥ, Σταθμός Μίκρας, περίοδος 1959-1997
8	Πίνακας 7.2: Κύρια χαρακτηριστικά της παλίρροιας στην περιοχή μελέτης (1967-2012)	Ρούμπα, 2012
9	Πίνακας 7.3: Συνολικά σενάρια και χρόνοι υπολογισμού στο ΟSM	-
10	Πίνακας 7.4: Δυσμενέστερα σενάρια για κάθε θέση πιθανού ατυχήματος	-
11	Πίνακας 7.5: Πιθανή διάρκεια σεναρίων και ενδιάμεσα στιγμιότυπα στο ΜΕΔΣΛΙΚ	-
12	Πίνακας 7.6: Συνολικά σενάρια και χρόνοι υπολογισμού στο ΜΕΔΣΛΙΚ	-
13	Πίνακας 8.1: Ποσοστά πετρελαιοκηλίδας στην ακτή για ανάλογο χρόνο προσομοίωσης	-
14	Πίνακας 8.2: Σύγκριση σεναρίων χρησιμοποιώντας αντίστοιχα θαλάσσια ρεύματα	-
15	Πίνακας 8.3: Σύγκριση σεναρίων χωρίς την επιρροή θαλάσσιων ρευμάτων	-

**Πίνακας Π2: Παράρτημα Σχημάτων**

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b>		
<b>A/A</b>	<b>Περιγραφή</b>	<b>Πηγή</b>
1	Σχήμα 2.1: Παγκόσμια ετήσια διακίνηση και μέσες καθαρές απώλειες αργού πετρελαίου κατά την περίοδο 1993-2012	Paul Harrison, 2013, Marine crude oil transport- global voyage losses steady in 2012
2	Σχήμα 3.1: Σχηματική παρουσίαση της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε	Stamou et al., 2013 (επεξεργασία: Κραγιοπούλου, 2014)
3	Σχήμα 3.2: Σχετική Συχνότητα Ατυχημάτων σε κλίμακα από 1 έως 6 στο Σαρωνικό Κόλπο	Otay et al., 2013
4	Σχήμα 3.3: Σχετική Συχνότητα Ατυχημάτων σε κλίμακα από 1 έως 6 στον Κόλπο της Σμύρνης	Otay et al., 2013
5	Σχήμα 3.4: Τροχιά και εξέλιξη πετρελαιοκηλίδας για τις 4 θέσεις ατυχήματος- Βόρειος άνεμος- 4 bf	Παπαδονικολάκη, 2013
6	Σχήμα 3.5: Επίπτωση ατυχημάτων πετρελαιοκηλίδας στο Σαρωνικό Κόλπο	Otay et al., 2013
7	Σχήμα 3.6: Επίπτωση ατυχημάτων πετρελαιοκηλίδας στον Κόλπο της Σμύρνης	Otay et al., 2013
8	Σχήμα 3.7: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο GNOME	Ποτουρίδης, 2013
9	Σχήμα 3.8: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο MEDSLIK	Ποτουρίδης, 2013
10	Σχήμα 3.9: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο OSM	Ποτουρίδης, 2013
11	Σχήμα 4.1: Παράδειγμα εξάπλωσης πετρελαιοκηλίδας στο GNOME, με άνεμο 1bf, NE, μετά από πολύ χρόνο	Ποτουρίδης, 2013
12	Σχήμα 4.2: Το παράθυρο εργασίας του ADIOS. Αριστερά τα δεδομένα του σεναρίου της κηλίδας και στα δεξιά διάγραμμα με την εξέλιξη του πετρελαίου μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα	Oil Spill Modeling, <a href="http://oceanecology.ca/oil.htm">oceanecology.ca/oil.htm</a>
13	Σχήμα 4.3: Το παράθυρο εργασίας του OILMAP για την προσομοίωση της τροχιάς πετρελαιοκηλίδας στη Νότια Καλιφόρνια	OILMAP: Oil Spill Model and Response System Overview
14	Σχήμα 4.4: Το παράθυρο εργασίας του OSERIT για την προσομοίωση της τροχιάς πετρελαιοκηλίδας	V.Duliere et al.
15	Σχήμα 4.5: Το παράθυρο εργασίας του OSIS	Oil Spill Information System - OSIS v4.5

16	Σχήμα 4.6: Το παράθυρο εργασίας του MOHID	www.mohid.com
17	Σχήμα 4.7: Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο ντετερμινιστικό και το στοχαστικό μέρος του OSCAR αντίστοιχα	Oil Spill Modelling with OSCAR, Xodus Group
18	Σχήμα 5.1: Μεταφορά όγκων πετρελαίου από την παχιά και τη λεπτή κηλίδα	R.W.Lardner B.A., Ph.D, Sc.D., 2004; 2011, MEDSLIK User Manual
19	Σχήμα 5.2: Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου διασποράς	R.W.Lardner B.A., Ph.D, Sc.D., 2004; 2011, MEDSLIK User Manual
20	Σχήμα 5.3: Γραφική απεικόνιση του πετρελαίου μετά από ατύχημα στο Θερμαϊκό Κόλπο	-
21	Σχήμα 5.4: Διαγράμματα εξέλιξης των διεργασιών της πετρελαιοκηλίδας συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης	-
22	Σχήμα 6.1: Σκαρίφημα αριθμητικού πλέγματος για τη διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων	Ρούμπα, 2012
23	Σχήμα 6.2: Αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου για Νοτιοανατολικό άνεμο-6 bf	-
24	Σχήμα 6.3: Αποτελέσματα του μοντέλου πετρελαιοκηλίδας για Ανατολικό άνεμο - 3 bf στη θέση ατυχήματος 2	-
25	Σχήμα 7.1: Επιφανειακά ρεύματα για τις περιπτώσεις ανέμου (α) ΒΔ-2 bf (β) Α-2 bf	-
26	Σχήμα 7.2: Η διαβάθμιση της συγκέντρωσης πετρελαίου στο MEDSLIK	-
27	Σχήμα 7.3: Ποσοστά που περιγράφουν την εξέλιξη της πετρελαιοκηλίδας στο θαλάσσιο περιβάλλον στο MEDSLIK	-
28	Σχήμα 7.4: Θέση Διαρροής 2, Άνεμος Δ-6 bf, η πετρελαιοκηλίδα φαίνεται να έχει προσαιγιαλωθεί	-
29	Σχήμα 7.5: Αριθμητικό πλέγμα υπολογισμών της περιοχής μελέτης	Ρούμπα, 2012
30	Σχήμα 7.6: Επιφανειακά ρεύματα για την περίπτωση ανέμου ΒΑ - 4 bf	-
31	Σχήμα 7.7: Θέση διαρροής 3, Βορειοδυτικός άνεμος - 3 και 4 bf. Αποτελέσματα στο OSM	-
32	Σχήμα 8.1: Θέση Διαρροής 1, Άνεμος Β-5 bf Σύγκριση αποτελεσμάτων στο MEDSLIK και το OSM	-

33	Σχήμα 8.2: Θέση Διαρροής 3, Άνεμος Δ-6. Στο OSM έχει φτάσει το 10% της πετρελαιοκηλίδας στην ακτή, ενώ στο MEDSLIK το 40,9%	-
34	Σχήμα 8.3: Θέση Διαρροής 4, Άνεμος Α-2 bf – Σύγκριση αποτελεσμάτων για αντίστοιχες συνθήκες θαλάσσιων ρευμάτων	-
35	Σχήμα 8.4: Θέση Διαρροής 1, Άνεμος Δ-6 bf, χρωματική διαβάθμιση πετρελαιοκηλίδας	-
36	Σχήμα 8.5: Θέση Διαρροής 1, Άνεμος ΒΔ-4 bf, χρωματική διαβάθμιση πετρελαιοκηλίδας	-
37	Σχήμα 8.6: Οι δύο κλίμακες που χρησιμοποιούνται για τα σενάρια εντάσεως (1-3 bf) και (4-6 bf) αντίστοιχα	-

**Πίνακας Π3:** Παράρτημα Χαρτών

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΡΤΩΝ		
A/A	Περιγραφή	Πηγή
1	Χάρτης 2.1: Δίκτυο θαλάσσιας μεταφοράς πετρελαίου και πετρελαιοκηλίδων στη Μεσόγειο θάλασσα από το 1974 έως σήμερα	The International Tanker Owners Pollution Federation, ITOPF
2	Χάρτης 3.1: Τελικός χάρτης διακινδύνευσης/επικινδυνότητας ατυχήματος πετρελαιοκηλίδας στο Σαρωνικό Κόλπο (risk map)	Κραγιοπούλου, 2014
3	Χάρτης 7.1: Περιοχή μελέτης - Θερμαϊκός Κόλπος	<a href="http://www.google.com/earth">www.google.com/earth</a>
4	Χάρτης 7.2: Κύριες διαδρομές πλοίων στο Θερμαϊκό Κόλπο	<a href="http://www.marinetraffic.com/gr/">www.marinetraffic.com/gr/</a>
5	Χάρτης 7.3: Περιοχές Natura	<a href="http://filotis.itia.ntua.gr">filotis.itia.ntua.gr</a>
6	Χάρτης 7.4: Βιότοποι Corine	<a href="http://filotis.itia.ntua.gr">filotis.itia.ntua.gr</a>
7	Χάρτης 7.5: Τοπία Ιδιαίτερου Φυσικού Κάλλους	<a href="http://filotis.itia.ntua.gr">filotis.itia.ntua.gr</a>
8	Χάρτης 7.6: Θέσεις πιθανών ατυχημάτων στο Θερμαϊκό Κόλπο	-

**Πίνακας Π4: Παράρτημα Εικόνων**

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ</b>		
<b>A/A</b>	<b>Περιγραφή</b>	<b>Πηγή</b>
1	Εικόνα 2.1: Οι μεγαλύτερες πετρελαιοκηλίδες στον κόσμο	ITOPF
2	Εικόνα 2.2: Κύριες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε μια πετρελαιοκηλίδα	medess4ms.eu/marine-pollution
3	Εικόνα 2.3: Αφρικανικοί πιγκουίνοι καλυμμένοι με πετρέλαιο	arkive.org
4	Εικόνα 2.4: Πετρέλαιο σε αμμώδη ακτή στο Λίβανο	Lebanon Oil Beach, Wikimedia Commons
5	Εικόνα 2.5: Χειρωνακτικός καθαρισμός ακτής στην Ταϊλάνδη	smashinglive.com
6	Εικόνα 5.1: Αρχικό παράθυρο εργασίας MEDSLIK	www.medess4ms.eu
7	Εικόνα 5.2: Πεδίο εισαγωγής δεδομένων πετρελαιοκηλίδας	-
8	Εικόνα 5.3: Πεδίο εισαγωγής διεύθυνσης, έντασης και διάρκειας ανέμου	-
9	Εικόνα 5.4: Μοντέλο μεταφοράς και διάχυσης του MEDSLIK	-
10	Εικόνα 5.5: Μοντέλο προσκόλλησης πετρελαίου στην ακτή	-
11	Εικόνα 5.6: Μοντέλο εξάτμισης του MEDSLIK	-
12	Εικόνα 5.7: Μοντέλο γαλακτωματοποίησης του MEDSLIK	-
13	Εικόνα 5.8: Μοντέλο διασποράς του MEDSLIK	-
14	Εικόνα 5.9: Μοντέλο εξάπλωσης του MEDSLIK	-





## Περίληψη

Οι πετρελαιοκηλίδες αποτελούν ένα μείζον περιβαλλοντικό ζήτημα για κάθε θαλάσσιο και παράκτιο οικοσύστημα. Η διαρροή πετρελαίου στη θάλασσα ακολουθείται από εκτεταμένες δυσμενείς επιπτώσεις τόσο σε περιβαλλοντικό, όσο και σε κοινωνικό και οικονομικό επίπεδο. Τα μεγάλα ατυχήματα διαρροής πετρελαίου που έχουν συμβεί τις τελευταίες δεκαετίες έχουν προκαλέσει τις αντιδράσεις της κοινής γνώμης και γίνονται συνεχώς ενέργειες στην κατεύθυνση της εξέλιξης των μέτρων πρόληψης και ενίσχυσης της ασφάλειας στις θαλάσσιες μεταφορές μέσω νομοθεσιών και κυρώσεων σε παγκόσμιο επίπεδο.

Σημαντικό ρόλο στο μέγεθος των επιπτώσεων που προκαλούνται από ένα πετρελαϊκό ρυπαντικό περιστατικό διαδραματίζουν η ταχύτητα και η αποτελεσματικότητα των ενεργειών αντιμετώπισής του. Η αποδοτικότητα των επιλεγόμενων μέτρων αντιμετώπισης καθορίζεται από τα αντανακλαστικά και την κατάρτιση των αρμόδιων φορέων, από την ποιότητα των αποτελεσμάτων που εξάγονται από τα προγράμματα υπολογισμού της τροχιάς και των ιδιοτήτων μιας πετρελαιοκηλίδας και από την προσαρμογή των παραμέτρων στην περιοχή της διαρροής.

Για το σκοπό αυτό, στην παρούσα εργασία εφαρμόζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα δύο μοντέλων υπολογισμού της εξέλιξης της τροχιάς και των διεργασιών μιας πετρελαιοκηλίδας. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ένα εμπορικό μοντέλο και ένα μοντέλο που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Υδραυλικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε ο Θερμαϊκός Κόλπος στον οποίο βρίσκεται το δεύτερο μεγαλύτερο λιμάνι της χώρας, αυτό της Θεσσαλονίκης, το οποίο παρουσιάζει έντονη ναυτιλιακή κίνηση, ενώ περιλαμβάνει και αρκετές περιοχές μεγάλης περιβαλλοντικής και τουριστικής αξίας. Πριν την εφαρμογή των δύο μοντέλων έγινε περιγραφή των γενικών χαρακτηριστικών και των κατηγοριών στις οποίες χωρίζονται τα υφιστάμενα μοντέλα πετρελαιοκηλίδας.

Για την προσομοίωση της διαρροής πετρελαίου επιλέχθηκαν τέσσερις θέσεις πιθανών ατυχημάτων. Η επιλογή τους βασίστηκε στις κύριες διαδρομές πλοίων εντός του Θερμαϊκού Κόλπου και στις περιοχές που παρουσιάζουν υψηλή κοινωνική και περιβαλλοντική αξία. Σε κάθε θέση πιθανού ατυχήματος εξετάστηκε ένας μεγάλος αριθμός υποθετικών σεναρίων, για τις οχτώ κύριες διευθύνσεις του ανέμου, με ένταση από 1 έως 6 bf. Συνολικά εξετάστηκαν 352 σενάρια διαρροής πετρελαίου, από τα οποία προέκυψαν 1.389 οπτικοποιημένα αποτελέσματα. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι ανάλογοι και στα δύο μοντέλα και το πετρέλαιο που διαρρέει είναι ίδιας ποσότητας και χαρακτηριστικών.

Στη συνέχεια συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν στα αντίστοιχα σενάρια και υπολογιστικούς χρόνους και οι διαφορές που παρουσιάζει η υπολογιστική διαδικασία σε κάθε πρόγραμμα. Τα δύο μοντέλα κρίνεται ότι ικανοποιούν το σκοπό για τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν, δηλαδή για την ποιοτική προσομοίωση της τροχιάς της πετρελαιοκηλίδας, παρά τις διαφορές που εντοπίζονται σε αυτά.



## **Abstract**

Oil spills are a major environmental issue for all marine and coastal environments. An oil spill in the sea is followed by extensive adverse impacts, environmentally, socially and financially. Large oil spill following accidents at sea that have occurred in recent decades have caused public reaction and appropriate measures are taken at the direction of preventing that kind of accidents and increasing the safety of shipping routes worldwide through legislation and sanctions.

The speed and effectiveness of the measures taken in order to deal with an oil spill determine the impacts that an oil accident will have on the environment. The effectiveness of the necessary countermeasures is determined by the response time and experience of the authorities. It also depends on the quality of the results obtained from the programs that describe the fate and transport of oil spills and the adjustment of the parameters for the vicinity of the spill.

For this purpose, in the present study the results of two models, which are used to calculate the fate and transport of an oil spill, are applied and compared. The choice was to use a widely known model and a model developed at the Hydraulics Laboratory, of the School of Civil Engineering of NTUA. Thermaikos Gulf was chosen as the study area because it includes the second largest and busiest port in Greece, the port of Thessaloniki and several areas of significant environmental and tourist value. The general characteristics and categories of the existing oil spill models are described before the implementation of the two models.

Four locations were selected for the simulation of possible accidents. Their selection was based on the main shipping routes and on the areas of high civilian and environmental value in the vicinity of the Thermaikos Gulf. In every possible location a large number of hypothetical scenarios were examined, for the eight main wind directions, with intensity from 1 to 6 bf. A total 352 scenarios were examined and resulted to 1,389 visualized measurements. The chosen parameters are similar in both models and the oil spill has the exact same quantity and characteristics.

At the conclusion the results from both models in the respective scenarios and timing and the computational procedure to each model were compared. Both models have met the expectations, ie the qualitative simulation of the trajectory of an oil spill, despite the differences that were identified in them.



# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Οι θαλάσσιες μεταφορές και μετακινήσεις κυριαρχούν παγκοσμίως και αποτελούν ένα χώρο στον οποίο δραστηριοποιείται ένας πολύ μεγάλος αριθμός εργαζομένων. Η μεταφορά μέσω θαλάσσης αποτελεί τον πιο σημαντικό και συνηθισμένο τρόπο μεταφοράς του πετρελαίου και των παραγώγων του. Μόνο το 2012 πραγματοποιήθηκαν περίπου 9.600 διαδρομές δεξαμενόπλοιων παγκοσμίως, ενώ η ετήσια παραγωγή αργού πετρελαίου ανέρχεται στους 3 δισεκατομμύρια τόνους. Οι επιπτώσεις από τη δημιουργία πετρελαιοκηλίδων είναι άμεσες και μακροπρόθεσμες και οδηγούν στην επιβάρυνση του θαλάσσιου και παράκτιου οικοσυστήματος περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά.

Η Μεσόγειος Θάλασσα αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς διαύλους μεταφοράς επιβατών και εμπορευμάτων. Έχει εξελιχθεί σε μια από τις πλέον υπερφορτωμένες θαλάσσιες διαδρομές καθώς μέσω αυτής πραγματοποιείται η επικοινωνία των λιμένων της Νότιας Ευρώπης, της Νοτιοανατολικής Ασίας και της Βόρειας Αφρικής μεταξύ τους και με τον υπόλοιπο κόσμο. Πολύ μεγάλο ποσοστό, επομένως, της κοινωνικής και οικονομικής ευημερίας της Ελλάδας στηρίζεται στην ισορροπία και διατήρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών που επικρατούν στη Μεσόγειο.

Η γεωγραφική θέση της Ελλάδας και η δυσκολία που παρουσιάζουν οι διαδρομές διαμέσου των ελληνικών νησιών και κόλπων καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη και συνεχή ενημέρωση ενός σχεδίου πρόληψης και αντιμετώπισης ατυχημάτων για την προστασία των ακτών και των υδάτων. Επιπλέον, λόγω της ιδιαιτερότητας και του υψηλού κινδύνου που παρουσιάζουν κάποιες περιοχές είναι σημαντική η δημιουργία χαρτών με ζώνες επικινδυνότητας. Για την πραγματοποίηση των παραπάνω είναι αναγκαία η γνώση της συμπεριφοράς του πετρελαίου εντός των υδάτων με μεγάλη ακρίβεια. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορα μαθηματικά μοντέλα προκειμένου να περιγράψουν τη συμπεριφορά και να προβλέψουν την τροχιά μιας πετρελαιοκηλίδας σε περίπτωση ατυχήματος. Οι προβλέψεις προκύπτουν από μεθόδους που έχουν δομηθεί μέσω μιας σειράς εκτεταμένων πειραμάτων και προσομοιώσεων, ιδιαίτερα πάνω σε παλαιότερα ατυχήματα όπου υπάρχει άμεση και αντικειμενική σύγκριση με τα αποτελέσματα που προκάλεσαν.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή και η σύγκριση δύο προγραμμάτων πρόβλεψης της συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδας και συγκεκριμένα του MEDSLIK (Lardner, 2004; 2011) και του FLOW-3DL/OSM (Stamou et al., 1999; 2007a; 2007b; 2013), (Παπαδονικολάκη, 2013). Αποτελεί ερευνητική συνέχεια των δύο διπλωματικών εργασιών που εκπονήθηκαν στον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ με τίτλο «Σύγκριση των προγραμμάτων GNOME, MEDSLIK και FLOW-3DL για τον υπολογισμό τροχιάς πετρελαιοκηλίδας» (Ποτουρίδης, 2013) και «Εκτίμηση επικινδυνότητας ατυχημάτων πετρελαιοκηλίδας - Εφαρμογή δύο μεθοδολογιών στο Σαρωνικό Κόλπο» (Κραγιοπούλου, 2014) με πεδίο εφαρμογής και για τις δύο εργασίες το Σαρωνικό Κόλπο. Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε ο Θερμαϊκός Κόλπος, καθώς περιλαμβάνει το δεύτερο μεγαλύτερο λιμάνι της χώρας, αυτό της Θεσσαλονίκης και παρουσιάζει

μεγάλη ναυτιλιακή κίνηση. Επίσης, έχει μεγάλη περιβαλλοντική και τουριστική αξία για τους κατοίκους της Βόρειας Ελλάδας, αλλά και των υπόλοιπων Βαλκανικών χωρών αφού αποτελεί το σύνδεσμο τους με το Αιγαίο Πέλαγος και κατ' επέκταση με τη Μεσόγειο Θάλασσα. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα να παρουσιαστεί η ποιοτική ανταπόκριση των δύο προγραμμάτων στις διαφορετικές συνθήκες και απαιτήσεις του θαλάσσιου συστήματος του Θερμαϊκού Κόλπου, χρησιμοποιώντας παραμέτρους ανάλογες με τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή μελέτης.

## 1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει με την παρούσα εισαγωγή (Κεφάλαιο 1) 9 κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 2 εισάγεται η έννοια της θαλάσσιας ρύπανσης από πετρέλαιο και γίνεται αναφορά στα αίτια που προκαλούν τη δημιουργία πετρελαιοκηλίδων και τις επιπτώσεις που αυτές έχουν τόσο σε περιβαλλοντικό, όσο και σε κοινωνικό και οικονομικό επίπεδο. Γίνεται συνοπτική αναφορά στα μεγαλύτερα ατυχήματα διαρροής πετρελαίου σε παγκόσμιο και εγχώριο επίπεδο, στις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα με τη δημιουργία πετρελαιοκηλίδων, καθώς και στους τρόπους αντιμετώπισης των περιστατικών. Τέλος, αναφέρονται οι σημαντικότερες νομοθεσίες και συμβάσεις που έχει θεσπίσει και επικυρώσει η Ελλάδα για την προστασία του περιβάλλοντος από ατυχήματα διαρροής πετρελαίου.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται βιβλιογραφική αναφορά στο ερευνητικό πλαίσιο του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, συνέχεια του οποίου αποτελεί η παρούσα διπλωματική εργασία. Γίνεται περιγραφή της ερευνητικής διαδικασίας και των διπλωματικών εργασιών που έχουν εκπονηθεί και στα αποτελέσματα που έχουν εξαχθεί μέχρι στιγμής από αυτές.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύεται η έννοια της μοντελοποίησης των πετρελαιοκηλίδων και παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες μοντέλων με τα χαρακτηριστικά τους. Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή των πιο διαδεδομένων μοντέλων που χρησιμοποιούνται, και κατηγοριοποίησή τους, ανάλογα με τις δυνατότητες που προσφέρουν στον ερευνητή για την πρόληψη και αντιμετώπιση πετρελαιοκηλίδων.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται το μοντέλο MEDSLIK (Lardner, 2004; 2011) και παρατίθενται οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την υπολογιστική διαδικασία, οι βασικές αρχές λειτουργίας και ο τρόπος με τον οποίο εξάγονται τα αποτελέσματα.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα μοντέλα FLOW-3DL (Stamou et al., 1999; 2007a; 2007b; 2013) και OSM (Παπαδονικολάκη, 2013). Δίνονται οι μαθηματικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται κατά την υπολογιστική διαδικασία, για την οποία τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου αποτελούν δεδομένα εισόδου. Περιγράφονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των μοντέλων και ο τρόπος με τον οποίο εξάγονται τα αποτελέσματα.

Στο Κεφάλαιο 7 γίνεται περιγραφή της περιοχής μελέτης, όπου αναλύονται τα χαρακτηριστικά και οι ιδιαιτερότητές της και επιλέγονται οι θέσεις πιθανών ατυχημάτων, τα χαρακτηριστικά της πετρελαιοκηλίδας και των σεναρίων για τα οποία προσομοιώνεται η εξέλιξη των διεργασιών της πετρελαιοκηλίδας μέσα στο Θερμαϊκό Κόλπο. Στη συνέχεια αναλύονται τα οπτικοποιημένα αποτελέσματα που

έχουν εξαχθεί από τα δύο μοντέλα και περιγράφονται οι επιλογές που έγιναν σε κάθε μοντέλο ώστε να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί.

Στο Κεφάλαιο 8 γίνεται σύγκριση των δύο μοντέλων, η οποία προκύπτει τόσο από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, όσο και από την υπολογιστική διαδικασία μέσα από την οποία προέκυψαν σε κάθε πρόγραμμα.

Στο Κεφάλαιο 9 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

## 2. Θαλάσσιες μεταφορές και πετρελαϊκή ρύπανση

### 2.1 Ρύπανση της θάλασσας από πετρέλαιο

Η ρύπανση των θαλασσών και η υποβάθμιση των παράκτιων περιοχών αποτελεί ένα από τα κύρια περιβαλλοντικά ζητήματα του πλανήτη και τις τελευταίες δεκαετίες πραγματοποιούνται συντονισμένες ενέργειες μέσω ενημερώσεων, νομοθεσιών και ελέγχων για την αντιμετώπισή της. Το Σύνταγμα της Ελλάδας ορίζει ότι η προστασία του φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος αποτελεί υποχρέωση του κράτους. Σύμφωνα με το νόμο 1650/1986 για την προστασία του περιβάλλοντος, μεταξύ άλλων περιβαλλοντικών προσβολών, δίνεται ο ορισμός της ρύπανσης:

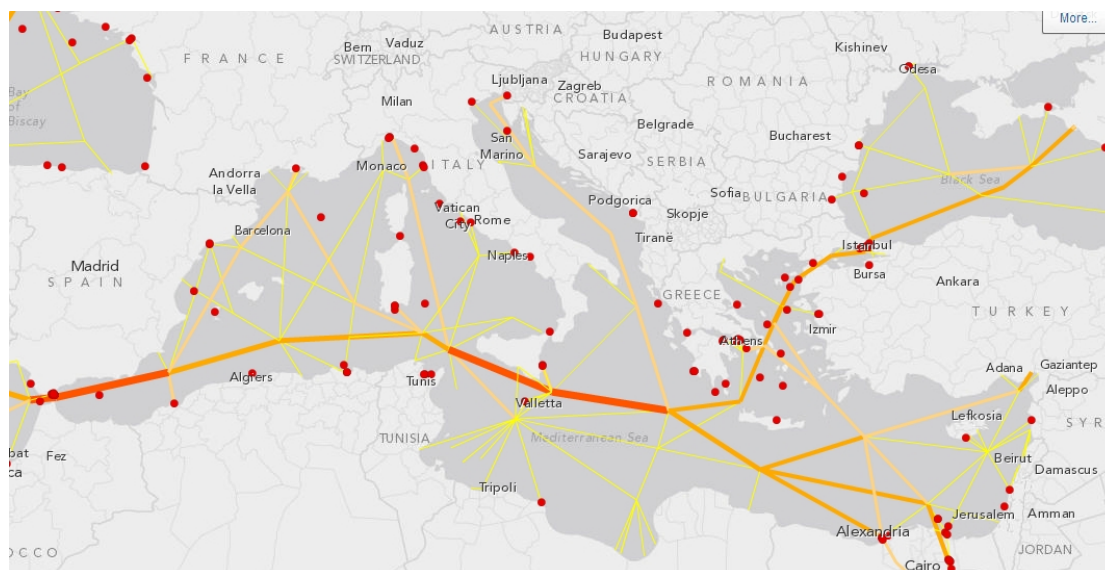
«Ρύπανση είναι η παρουσία στο περιβάλλον ρύπων, δηλαδή κάθε είδους ουσιών, θορύβου, ακτινοβολίας ή άλλων μορφών ενέργειας σε ποσότητα, συγκέντρωση ή διάρκεια που μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία, στους ζωντανούς οργανισμούς και στα οικοσυστήματα ή υλικές ζημιές και γενικά να καταστήσουν το περιβάλλον ακατάλληλο για τις επιθυμητές χρήσεις του.»

Η έννοια της θαλάσσιας ρύπανσης καθιερώθηκε για πρώτη φορά από τη Διακήρυξη της Στοκχόλμης το 1972. Ορίστηκε ως η εισαγωγή από τον άνθρωπο, άμεσα ή έμμεσα, επιβλαβών ουσιών ή ενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον, περιλαμβάνοντας και τις εκβολές των ποταμών, που έχει ως αποτέλεσμα τη διαταραχή του θαλάσσιου οικοσυστήματος, κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία, παρεμπόδιση των θαλάσσιων δραστηριοτήτων καθώς και ελάττωση των ανέσεων. Η ρύπανση από πετρέλαιο και άλλα υποπροϊόντα του είναι ίσως η πιο διαδεδομένη περίπτωση ρύπανσης των θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Σύμφωνα με τον Αλεξόπουλο (2005) υπάρχουν έξι κύριες πηγές ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος:

- Ρύπανση από απορρίψεις
- Ρύπανση από χερσαίες πηγές
- Ρύπανση από την εξόρυξη και εκμετάλλευση της υφαλοκρηπίδας και του βυθού των θαλασσών
- Ρύπανση από την ατμόσφαιρα
- Ρύπανση από την εξόρυξη και εκμετάλλευση του διεθνούς βυθού
- Ρύπανση από τα εμπορικά πλοία

Η εντατική εκμετάλλευση του πετρελαίου ξεκίνησε πριν από περίπου 100 χρόνια και κορυφώθηκε τα τελευταία 40 χρόνια όταν αντικατέστησε τον άνθρακα ως κύρια πηγή ενέργειας. Τη σημερινή εποχή αποτελεί από μόνο του ρυθμιστικό παράγοντα για την διαμόρφωση της παγκόσμιας πολιτικής και οικονομικής σκηνής. Ο κυρίαρχος τρόπος μεταφοράς του πετρελαίου είναι μέσω των θαλάσσιων μεταφορών, ο οποίος υπερέχει σημαντικά της μεταφοράς του μέσω του δικτύου αγωγών και μέσω του οδικού και σιδηροδρομικού δικτύου. Οι θαλάσσιες μεταφορές δεν αποτελούν ένα απλό δίκτυο, αλλά ολόκληρο σύστημα (Εικόνα 2.1) στο οποίο απασχολείται ένας πολύ μεγάλος αριθμός εργαζομένων.





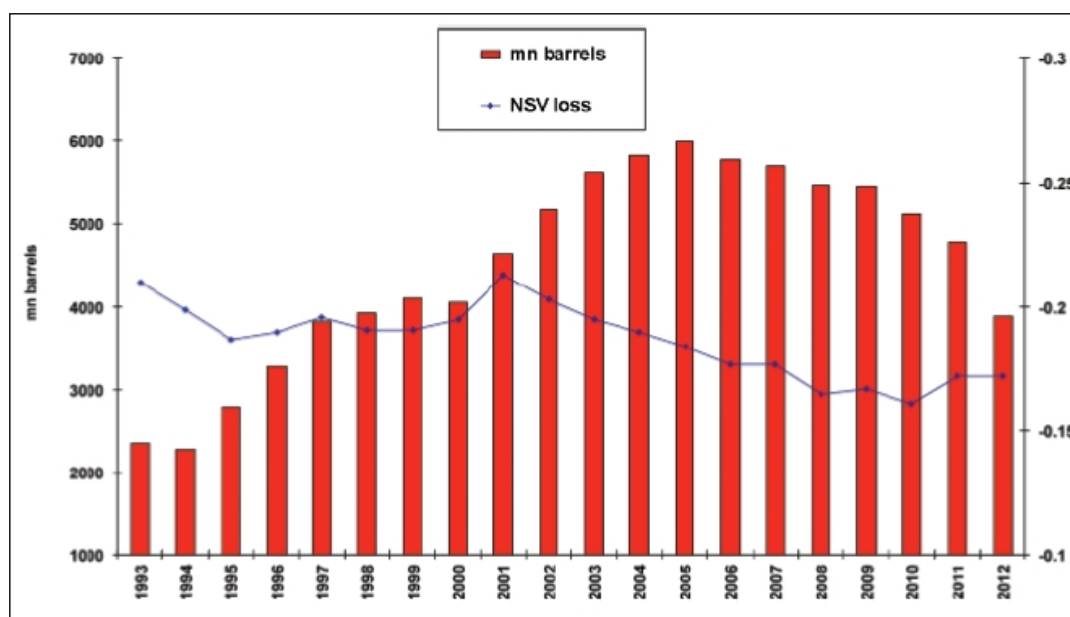
**Χάρτης 2.1:** Δίκτυο θαλάσσιας μεταφοράς πετρελαίου και πετρελαιοκηλίδων στη Μεσόγειο θάλασσα από το 1974 έως σήμερα (πηγή: The International Tanker Owners Pollution Federation)

Η Ευρώπη αποτελεί τη μεγαλύτερη αγορά εισαγωγής αργού πετρελαίου, αντιπροσωπεύοντας το 1/3 του συνόλου της παγκόσμιας αγοράς. Το 90% του πετρελαίου και των παραγώγων του μεταφέρεται από και προς την Ευρώπη, μέσω θαλάσσιων διαδρομών. Η Μεσόγειος Θάλασσα συγκεντρώνει τις βασικές διαδρομές για τη μεταφορά αργού πετρελαίου από τις πετρελαιοπηγές της Μέσης Ανατολής και της Βόρειας Αφρικής, αλλά και τα λιμάνια της Μαύρης Θάλασσας προς τα κέντρα κατανάλωσης στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική. Μόνο διαμέσου των ελληνικών θαλασσών διακινούνται ετησίως πάνω από 100 εκατομμύρια τόνοι πετρελαιοειδών. Η ελληνική ναυτιλία συγκεκριμένα, διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο και βρίσκεται στο επίκεντρο των παγκόσμιων εξελίξεων στις θαλάσσιες μεταφορές. Η υπό ελληνική σημαία ναυτιλία παραμένει επί σειρά δεκαετιών στις κορυφαίες θέσεις των μεγαλύτερων ναυτιλιακών δυνάμεων του κόσμου, διατηρώντας το 5% της παγκόσμιας χωρητικότητας και κατατάσσεται στην 4<sup>η</sup> θέση παγκοσμίως και 1<sup>η</sup> μεταξύ των κρατών-μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όπου κατέχει το 40% περίπου της συνολικής χωρητικότητας του εμπορικού στόλου της Ένωσης σύμφωνα με τον Σταυρίδη (2007).

Το γεγονός ότι ο κύριος όγκος μεταφοράς πετρελαίου στην Ευρώπη έχει συγκεντρωθεί στη Μεσόγειο Θάλασσα αυξάνει κατακόρυφα τις πιθανότητες πρόκλησης ατυχημάτων που θα έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πετρελαιοκηλίδας. Ως πετρελαιοκηλίδα ή αλλιώς πετρελαϊκό ρυπαντικό περιστατικό θεωρείται ένα συμβάν ή μια ακολουθία συμβάντων, που έχουν την ίδια αρχή, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε εκροή πετρελαίου στην επιφάνεια της θάλασσας και μπορούν να αποτελέσουν απειλή για το θαλάσσιο και παράκτιο περιβάλλον (Τριανταφύλλου, 2004). Σύμφωνα με στοιχεία του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (ΕΕΑ) καταγράφονται απώλειες της τάξης των 250.000 τόνων πετρελαίου ετησίως λόγω λειτουργικών διαδικασιών των πλοίων. Επιπλέον, τα περιστατικά στους τερματικούς σταθμούς πετρελαίου, όπως είναι τα διυλιστήρια, σε συνδυασμό με τις συνήθεις απορρίψεις από χερσαίες εγκαταστάσεις εκτιμώνται σε

120.000 τόνους ανά έτος, με αποτέλεσμα την αυξημένη συγκέντρωση πετρελαίου στις περιοχές τους.

Οι συνέπειες που προκύπτουν από τη θαλάσσια ρύπανση που προκαλείται από τη διαρροή πετρελαίου στη θάλασσα από τις θαλάσσιες μεταφορές είναι τεράστιες και καθοριστικές για την ισορροπία του οικοσυστήματος της Μεσογείου. Η γεωγραφική θέση της Ελλάδας στο κέντρο των εξελίξεων της Ανατολικής Μεσογείου είναι πολύ κρίσιμη, διότι διαθέτει μερικά από τα πιο σπάνια και ενδιαφέροντα θαλάσσια και παράκτια οικοσυστήματα της Ευρώπης. Φιλοξενεί μερικά από τα πλέον απειλούμενα θαλάσσια είδη στον πλανήτη, όπως τη θαλάσσια χελώνα Καρέτα Καρέτα και τη μεσογειακή φώκια Μονάχους Μονάχους. Η μεσογειακή χλωρίδα και πανίδα έχει εξελιχθεί με την πάροδο εκατομμυρίων ετών σε ένα μοναδικό μείγμα από εύκρατα και υποτροπικά στοιχεία, με ένα μεγάλο ποσοστό (28%) ενδημικών ειδών (Fredj et al., 1992). Η σημερινή ποικιλία των κλιματικών και υδρολογικών καταστάσεων και των ειδικών Μεσογειακών βιοτόπων ευθύνονται για την μεγάλη ποικιλία ειδών που προκύπτουν εν μέρει από τη γεωλογική ιστορία της περιοχής. Η συνολική βιοποικιλότητά της Μεσογείου αντιπροσωπεύει το 8-9% της παγκόσμιας θαλάσσιας βιοποικιλότητας, ενώ νέα είδη συνεχίζουν να καταγράφονται ιδιαίτερα σε μεγαλύτερα βάθη.



**Σχήμα 2.1:** Παγκόσμια ετήσια διακίνηση και μέσες καθαρές απώλειες αργού πετρελαίου κατά την περίοδο 1993-2012 (πηγή: Paul Harrison, 2013, Marine crude oil transport-global voyage losses steady in 2012)

## 2.2 Αίτια δημιουργίας πετρελαιοκηλίδων

Η πετρελαϊκή ρύπανση οφείλεται κυρίως στα ναυτικά ατυχήματα και στις λειτουργικές διαδικασίες. Το μεγαλύτερο ποσοστό των πετρελαιοκηλίδων από πλοία οφείλεται στις λειτουργικές διαδικασίες και όχι στα ναυτικά ατυχήματα, τα οποία τυγχάνουν μεγαλύτερης προβολής από τα ΜΜΕ. Παρότι σπάνια προκαλείται ένα μεγάλο ναυτικό ατύχημα, η ταυτόχρονη εκροή μεγάλης ποσότητας πετρελαιοειδούς στο θαλάσσιο περιβάλλον κινεί το ενδιαφέρον και την αντίδραση της κοινής γνώμης, λόγω της προβολής που τυγχάνει το γεγονός.

### 2.2.1 Ρύπανση λόγω ναυτικών ατυχημάτων

Τα ατυχήματα των πλοίων μπορούν να οφείλονται σε παράγοντες του θαλάσσιου περιβάλλοντος, της κατάστασης του πλοίου και στον ανθρώπινο παράγοντα. Ως παράγοντες του θαλάσσιου περιβάλλοντος θεωρούνται οι έντονες καιρικές συνθήκες και η κίνηση των κυμάτων, τα παλιρροϊκά ρεύματα και οι ύφαλοι, ιδιαίτερα κοντά σε ακτές. Η κατάσταση του πλοίου περιλαμβάνει τη συντήρησή του, την ηλικία του και το κατά πόσο πληροί τους κανονισμούς ασφαλείας που επιβάλλει το κράτος του οποίου φέρει τη σημαία. Ο ανθρώπινος παράγοντας περιλαμβάνει τις λανθασμένες ενέργειες και χειρισμούς κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, καθώς και την ελλιπή εκπαίδευση και ομοιογένεια του πληρώματος. Οι βασικότερες κατηγορίες ναυτικών ατυχημάτων που συνήθως οδηγούν στην ρύπανση του θαλάσσιου περιβάλλοντος μπορούν να συνοψιστούν στις εξής (Τριανταφύλλου, 2004):

- Δυναμική προσάραξη πλοίου (Power Grounding), ή όταν το πλοίο εξοκείλει (Drift Grounding), συνήθως σε παράκτιες περιοχές με πυκνή κυκλοφορία εξαιτίας μηχανικής βλάβης, κακοκαιρίας, λανθασμένης πλοήγησης. Τα μεγάλα πλοία συχνά πέφτουν θύματα προσάραξης όταν βρίσκονται κοντά σε διεθνή στενά, κανάλια, κλπ., επειδή υπάρχει ελάχιστος χώρος για ελιγμούς.
- Σύγκρουση ή επαφή πλοίου (Collision/Ramming). Σύγκρουση πλοίου με άλλο πλοίο ή με άλλα κυρίως σε θαλάσσιες περιοχές με συχνή κυκλοφορία (εσωτερικά ύδατα, αιγιαλίτιδες ζώνες, διεθνή στενά) ως αποτέλεσμα κυρίως ανθρώπινου λάθους. Επαφή πλοίου με μια μόνιμη εγκατάσταση, όπως προβλήτες λιμένων, πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου.
- Βύθιση πλοίου (Foundering or Sinking) κυρίως στην ανοιχτή θάλασσα λόγω δυσμενών κλιματολογικών συνθηκών ή μετατόπισης φορτίου.
- Πυρκαγιά ή Έκρηξη (Fire or Explosion) στις περιπτώσεις εκείνες που μεταφέρονται επικίνδυνα φορτία και το πλοίο δεν έχει άμεση βοήθεια από την πλησιέστερη ακτή.
- Ζημιές στη δομή του πλοίου (Structural Failure), ιδιαίτερα στο εξωτερικό περίβλημα ή στα τοιχώματα των δεξαμενών λόγω κλιματολογικών συνθηκών, μετατόπισης φορτίου, κακής συντήρησης με προφανή συνέπεια τη μη αντοχή των υλικών.
- Απώλειες λόγω πολεμικών εχθροπραξιών (War Loss) ιδιαίτερα όταν τα εμπορικά πλοία έχουν επιταχθεί από την κυβέρνηση ενός κράτους για πολεμικούς σκοπούς και εμπλέκονται σε τέτοιου είδους γεγονότα.

- Διάφορα ατυχήματα (Miscellaneous) τα οποία περιλαμβάνουν: α) μικτές μορφές των παραπάνω, όπως πυρκαγιά και βύθιση, πρόσκρουση και βύθιση β) εσκεμμένη βύθιση πλοίου με τη μέθοδο του ανοίγματος οπών στα ύφαλα του πλοίου πιθανότατα για να μην περιέλθει το πλοίο στον έλεγχο του εχθρού ή την εξοικονόμηση χρημάτων, πχ από την ασφάλειά του γ) εξαφάνιση του πλοίου χωρίς αιτιολόγηση και δ) εγκατάλειψη του πλοίου.

Είναι ευνόητο ότι όσο μεγαλύτερες είναι οι ποσότητες του φορτίου που μεταφέρονται, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η προκαλούμενη ζημία στο θαλάσσιο περιβάλλον με όλες τις σχετικές συνέπειες. Ωστόσο δεν είναι μόνο τα ατυχήματα δεξαμενόπλοιων που προκαλούν θαλάσσια ρύπανση. Πολλά αλλά είδη πλοίων, όπως πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containers), πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου (bulk carriers) είναι πιθανό να μεταφέρουν μεγαλύτερες ποσότητες πετρελαίου στις αποθήκες καυσίμου σε σχέση με μικρά δεξαμενόπλοια που το μεταφέρουν ως φορτίο. Παρόλο που ατυχήματα και εκλύσεις πετρελαίου (bunker spills) από τέτοιου είδους πλοία είναι σχετικά μικρότερου μεγέθους, τελικά προκαλούν μεγαλύτερα προβλήματα, (συμπεριλαμβάνοντας τις μεγαλύτερες διεκδικήσεις αποζημιώσεων) σε σχέση με ανάλογου μεγέθους πετρελαιοκηλίδων από δεξαμενόπλοια (tankers).

Ο κυριότερος παράγοντας, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την πρόκληση των ατυχημάτων στη θάλασσα είναι ο ανθρώπινος παράγοντας. Και αυτό διότι ένα πλοίο που πληροί τις κατάλληλες προϋποθέσεις (τακτικές/έκτακτες συντηρήσεις, επιθεωρήσεις) και διαθέτει σωστά εκπαιδευμένο πλήρωμα, μπορεί να λειτουργήσει εξίσου σαν μια νέα κατασκευή. Βέβαια έχουν παρατηρηθεί και φαινόμενα για ορισμένα πλοία, ιδίως υπό το καθεστώς χρονοναύλωσης, με προφανή σκοπό την εξοικονόμηση χρηματικών ωφελειών, να επιμηκύνεται ο μέγιστος χρόνος ζωής τους, ενώ θα έπρεπε να είχαν ήδη αποσυρθεί, με άμεση συνέπεια τη ρύπανση του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Πέρα από τις παραπάνω αιτίες σημαντικό ρόλο στην πρόκληση ατυχημάτων παίζει και η περιοχή στην οποία πλέουν τα πλοία. Για παράδειγμα, στη Μεσόγειο υπάρχουν κάποιες κρίσιμες περιοχές κινδύνου, όπως είναι τα στενά των Δαρδανελίων, το στενό της Μεσίνα ανάμεσα στη Σικελία και την ηπειρωτική Ιταλία και το στενό του Γιβραλτάρ, όπου οι πιθανότητες σύγκρουσης είναι ιδιαίτερα αυξημένες.

### 2.2.2 Ρύπανση λόγω λειτουργικών διαδικασιών

Ως λειτουργική ρύπανση θα ορίσουμε την οποιαδήποτε, μη ατυχηματικής μορφής ρύπανση, που προξενεί στο θαλάσσιο περιβάλλον η συνήθης λειτουργία ενός εμπορικού πλοίου. Η λειτουργική ρύπανση, είναι δυνατό να αναζητηθεί σε κάθε φάση του κύκλου ζωής ενός πλοίου, δηλαδή στην αρχή (κατασκευή του πλοίου), στην κανονική οικονομική ζωή του (συντηρήσεις και επισκευές, φορτοεκφορτώσεις, μεταγίσεις καυσίμων, ερματισμός) και στο τέλος, κατά τη διάλυση του πλοίου. Η ρύπανση λόγω λειτουργικών διαδικασιών περιλαμβάνει:

- τη ρύπανση στους χώρους της ναυπηγοεπισκευαστικής βιομηχανίας, όπου αναφέρονται διαδικασίες όπως η ναυπήγηση του πλοίου, η τακτική και έκτακτη συντήρηση και η διάλυση των πλοίων.
- τη ρύπανση από λειτουργικές απορρίψεις, όπου αναφέρονται διαδικασίες ερματισμού/αφερματισμού, φορτοεκφόρτωσης, εκούσιες απορρίψεις από τα πλοία (πετρελαιοειδή κατάλοιπα που παράγονται στους χώρους του μηχανοστασίου, κατάλοιπα φορτίου, λύματα και απορρίμματα του πλοίου, απορρίψεις φορτίου στη θάλασσα και χημικές ουσίες) και διαδικασίες πλύσης των δεξαμενών φορτίου.

### 2.2.3 Στατιστικά παγκόσμιου ιστορικού ατυχημάτων

Τα περισσότερα περιστατικά οφείλονται σε μια αλληλουχία αιτιών και συγκυριών που όλες μαζί συντελούν στο τελικό αποτέλεσμα που είναι η διαρροή πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η βάση δεδομένων που παρέχει, με ετήσια ανανέωση, η ΙΤΟΡΡ (The International Tanker Owners Pollution Federation) εμπεριέχει πληροφορίες για πετρελαιοκηλίδες που προξενήθηκαν από ναυτικά ατυχήματα, κυρίως δεξαμενόπλοιων, από το 1970 έως και σήμερα, με εξαίρεση αυτά που προήλθαν από πολεμικές εχθροπραξίες. Το σύνολο των δεδομένων περιλαμβάνει τον τύπο του πετρελαιοειδούς, την ποσότητά του, τα αίτια και την τοποθεσία του ατυχήματος. Για καλύτερη παρουσίαση και για ιστορικούς λόγους οι πετρελαιοκηλίδες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τις μικρές όπου η διαρροή είναι μικρότερη των 7 τόνων (<7 tonnes), τις μεσαίες της τάξης των 7-700 τόνων (7-700 tonnes) και τις μεγάλες όπου η διαρροή είναι μεγαλύτερη των 700 τόνων (>700 tonnes). Στη βάση δεδομένων έχουν συμπεριληφθεί περίπου 10.000 περιστατικά εκ των οποίων η πλειοψηφία (81%) ανήκει στην κατηγορία των μικρών κηλίδων. Το 2013 συγκεκριμένα συνέβησαν τρία περιστατικά που ανήκουν στη μεγάλη κατηγορία με σπουδαιότερο το ατύχημα του δεξαμενόπλοιου Yong Win 3, το οποίο στις 15 Οκτωβρίου ανατράπηκε και βυθίστηκε κοντά στις ακτές της Ταϊβάν ενώ μετέφερε πάνω από 5.000 τόνους πετρελαίου τύπου Diesel, χωρίς ωστόσο να προκαλέσει σημαντική ρύπανση (Hancock, 2013).

Η ανάλυση που ακολουθεί (Πίνακας 2.1) συγκεντρώνει τα περιστατικά ανάλογα με το μέγεθος της κηλίδας που προκύπτει και με βάση το πρωταρχικό αίτιο που προκάλεσε τη διαρροή. Οι αιτίες ομαδοποιούνται στις δύο μεγάλες κατηγορίες, αυτές των Ατυχημάτων και στις Λειτουργικές. Οι διαρροές για τις οποίες δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία χαρακτηρίζονται ως Άλλες/Άγνωστες.

**Πίνακας 2.1:** Αριθμός περιστατικών ανά αιτία διαρροής κατά την περίοδο 1970-2013 (πηγή: Oil Tanker Spill Statistics 2013, ITOPF)

ΕΡΓΑΣΙΕΣ	ΜΕΓΕΘΟΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ			
	< 7 Τόνοι	7-700 Τόνοι	> 700 Τόνοι	ΣΥΝΟΛΟ
Φορτο-εκφόρτωση	3158	391	42	<b>3591</b>
Ανεφοδιασμός	565	32	1	<b>598</b>
Λοιπές Εργασίες	1282	169	333	<b>1784</b>
Άλλη/Άγνωστη	2842	759	83	<b>3684</b>
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>7847</b>	<b>1351</b>	<b>459</b>	<b>9567</b>
<b>ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ</b>				
Σύγκρουση	185	354	136	<b>675</b>
Προσάραξη	240	271	150	<b>661</b>
Αστοχία Πλοίου	576	100	60	<b>736</b>
Αστοχία Εξοπλισμού	1682	203	18	<b>1903</b>
Πυρκαγιά/Εκρηξη	173	46	52	<b>271</b>
Άλλη/Άγνωστη	4991	377	43	<b>5411</b>
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>7847</b>	<b>1351</b>	<b>459</b>	<b>9567</b>

## 2.3 Ιστορικό παλαιών ατυχημάτων

### 2.3.1 Τα μεγαλύτερα ατυχήματα στον κόσμο από πετρελαιοκηλίδα

Μεγάλα ατυχήματα δεξαμενόπλοιων συμβαίνουν σπάνια, ωστόσο οι καταστροφές που προκαλούν στο οικοσύστημα της περιοχής είναι εκτεταμένης μορφής. Στον Πίνακα 2.2 αναφέρονται τα 20 μεγαλύτερα ατυχήματα πετρελαιοκηλίδας στον κόσμο με βάση την ποσότητα του πετρελαίου που διέρρευσε:

**Πίνακας 2.2:** Τα 20 μεγαλύτερα ατυχήματα που έχουν συμβεί παγκοσμίως (πηγή: Oil Tanker Spill Statistics 2013, ITOPF)

A/A	Πετρελαιοκηλίδα	Τοποθεσία	Ποσότητα (tonnes)	Χρονολογία Ατυχήματος
1	Gulf War	Κουβέιτ	270.000-820.000	1991
2	Deerwater Horizon	Κόλπος του Μεξικού	492.000-627.000	2010
3	Ixtoc I	Κόλπος Καμπέτσε	480.000	1979
4	Atlantic Empress	Τρινιάντ-Τομπάγκο	287.000	1979
5	Fergana Valley	Ουζμπεκιστάν	285.000	1992
6	Nowruz Oil Field	Περσικός Κόλπος	260.000	1983
7	ABT Summer	Αγκόλα	260.000	1991
8	Castillo de Bellver	Νότια Αφρική	252.000	1983
9	Amoco Cadiz	Βρετάνη, Γαλλία	227.000	1978
10	MT Haven	Ιταλία	144.000	1991
11	Odyssey	Καναδάς	132.000	1988
12	Torrey Canyon	Μεγάλη Βρετανία	119.000	1967

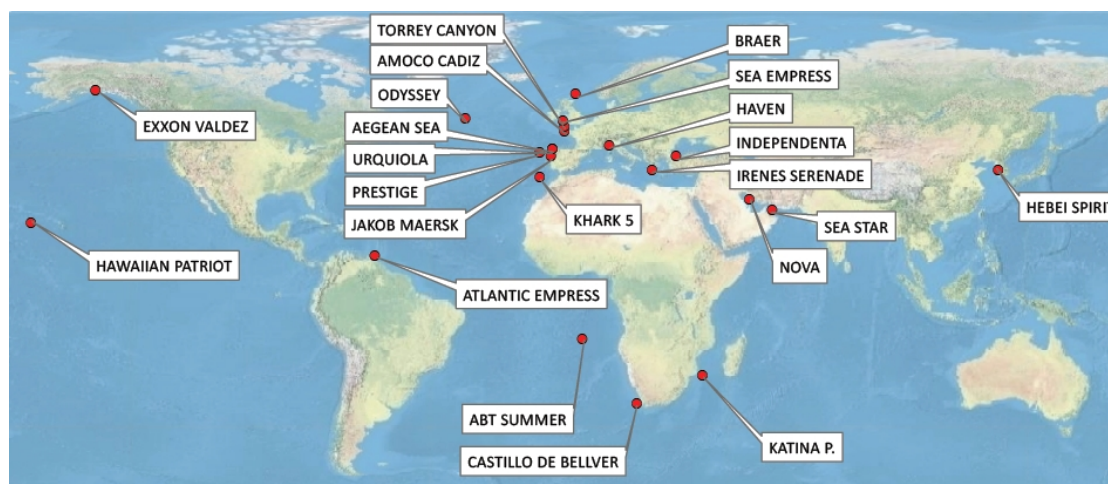
13	Sea Star	Κόλπος του Ομάν	115.000	1972
14	Urquiola	Λα Κορούνια	100.000	1976
15	Hawaiian Patriot	Χονολουλού	95.000	1977
16	MT Independenta	Βόσπορος	95.000	1979
17	Jakob Maersk	Πόρτο	88.000	1975
18	MV Braer	Νησιά Σέτλαντ	85.000	1993
19	Aegean Sea	Λα Κορούνια	74.000	1992
20	Sea Empress	Μεγάλη Βρετανία	72.000	1996

Το πρώτο μεγάλο ατύχημα που ευαισθητοποίησε την κοινή γνώμη και προκάλεσε μαζικές αντιδράσεις λόγω της προβολής που έτυχε ήταν του TORREY CANYON το 1967. Το πλοίο που ταξίδευε υπό λιβεριανή σημαία προσάραξε σε βράχια στην περιοχή της Μάγχης, με αποτέλεσμα να διαρρεύσουν περίπου 80.000 με 119.000 τόνοι πετρελαίου και να καταστρέψουν τις ακτές της Κορνουάλλης. Υπήρξε το μεγαλύτερο ατύχημα που είχε συμβεί μέχρι εκείνη την εποχή και αποτέλεσε την αφορμή για να ξεκινήσουν οι διαδικασίες κατάρτισης νομικών πλαισίων και συμβάσεων για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Στη λίστα δεν συμπεριλαμβάνεται το EXXON VALDEZ το οποίο βρίσκεται πιο χαμηλά στην κατάταξη. Το πλοίο προσέκρουσε σε ύφαλο στην Αλάσκα το 1989 και ήταν το μεγαλύτερο ατύχημα που είχαν αντιμετωπίσει οι Η.Π.Α. μέχρι εκείνη την εποχή. Πέρα από τη ρύπανση του νερού και των ακτών, χιλιάδες ζώα και πτηνά έχασαν τη ζωή τους και αποτέλεσε πλήγμα για τις τοπικές οικονομίες που στηρίζονταν στην αλιεία, λόγω της εκτεταμένης περιβαλλοντικής καταστροφής που προκάλεσε, αποτελέσματα της οποίας συναντώνται και σήμερα. Η καταστροφή που προκάλεσε ήταν πρωτόγνωρη για τις αρχές των Η.Π.Α. και οδήγησε στο ιδιαίτερα σκληρό νομοθετικό πλαίσιο Oil Pollution Act (O.P.A.), το οποίο υπογράφηκε το 1990 κατόπιν πιέσεων των πολιτών και περιβαλλοντικών οργανώσεων.

Στον ευρωπαϊκό χώρο μεγάλη πρόσφατη καταστροφή προκάλεσε η βύθιση του PRESTIGE, πλοίου ελληνικών συμφερόντων, ενώ μετέφερε 77.000 τόνους πετρελαίου από τη Λιθουανία στη Σιγκαπούρη. Το ατύχημα συνέβη το 2002 στα ανοιχτά των ακτών της Βορειοδυτικής Ισπανίας. Η έκταση της κηλίδας που δημιουργήθηκε ήταν διπλάσια του EXXON VALDEZ και προκάλεσε ανεπανόρθωτες ζημιές στις ακτές της Γαλικίας, της Πορτογαλίας και της Γαλλίας και αποτελεί τη μεγαλύτερη οικολογική καταστροφή στην ιστορία Ισπανίας και Πορτογαλίας.

Το πιο πρόσφατο μεγάλο ατύχημα που συνέβη ήταν στον κόλπο του Μεξικού το 2010 στην πλατφόρμα εξόρυξης πετρελαίου DEEPWATER HORIZON, που λειτουργούσε η εταιρία BP. Στοίχησε τη ζωή σε 11 εργαζόμενους και προκάλεσε διαρροή διάρκειας 3 μηνών, ενώ είχε συνέπειες και σε οικονομικό επίπεδο με τις απώλειες από την αλιεία και τον τουρισμό να ανέρχονται σε δεκάδες δισεκατομμύρια δολάρια.



**Εικόνα 2.1:** Οι μεγαλύτερες πετρελαιοκηλίδες στον κόσμο  
(πηγή: Oil Tanker Spill Statistics 2013, ITOPF)

### 2.3.2 Τα μεγαλύτερα ατυχήματα στην Ελλάδα από πετρελαιοκηλίδα

Παρατίθεται πίνακας με τις μεγαλύτερες πετρελαιοκηλίδες στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο.

**Πίνακας 2.3:** Οι μεγαλύτερες πετρελαιοκηλίδες στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο  
(πηγή: Οι σημαντικότερες πετρελαιοκηλίδες στην Ελλάδα, greenpeace.org)

A/A	Όνομα Πλοίου	Τοποθεσία	Ποσότητα (tonnes)	Χρονολογία Ατυχήματος
1	Trader	Βόρειο Αιγαίο	36.500	1972
2	Μεσσηνιακή Φροντίς	Καλοί Λιμένες	12.000	1979
3	Irenes Serenade	Πύλος	40.000	1980
4	Rabigh Bay III	Ασπρόπυργος	500-1.000	1987
5	Jupiter και Adige	Πειραιάς	500-1.000	1988
6	Geori Chernomorva	Κεντρικό Αιγαίο	1.700	1992
7	Iliad	Πύλος	800	1993
8	La Guardia	Ασπρόπυργος	400-800	1994
9	Kriti Sea	Άγιοι Θεόδωροι	300-500	1996
10	Eurobulker X	Νότιος Ευβοϊκός	300	2000

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τα σημαντικότερα από τα ατυχήματα που έχουν συμβεί στην Ελλάδα (Greenpeace, 2007):

23/2/80: Ατύχημα στο πετρελαιοφόρο "Irenes Serenade" στην Πύλο λόγω έκρηξης, με αποτέλεσμα 40.000 τόνοι πετρελαίου να καταλήξουν στη θάλασσα.

9/10/93: 800 τόνοι πετρελαίου διαρρέουν στην περιοχή της Πύλου από το πετρελαιοφόρο "Iliad". Τα ρεύματα παρασύρουν το πετρέλαιο έξω από τον προστατευμένο όρμο και μαυρίζει η μαγνητική παραλία της Βοϊδοκοιλιάς. Πετρέλαιο εντοπίζεται και σε άλλες ακτές. Στην προσπάθεια των δυτών να υπολογίσουν τις επιπτώσεις από το πετρέλαιο που διέρρευσε από το "Iliad" ανακαλύπτουν ορατά ακόμα τα σημάδια από το προηγούμενο ατύχημα (13 χρόνια πριν). Το πετρέλαιο του "Irenes Serenade" βρέθηκε να καλύπτει σημεία του πυθμένα. Είναι απορίας άξιο, πώς



ένας τόσο ευαίσθητος αλλά και ιστορικός κλειστός κόλπος χρησιμοποιείται ως αγκυροβόλιο πετρελαιοφόρων.

1/10/94: Ατύχημα στο πετρελαιοφόρο "La Guardia", κατά τη φορτοεκφόρτωση, στις εγκαταστάσεις του Ασπρόπυργου. 400-800 τόνοι πετρελαίου καταλήγουν στον Κόλπο της Ελευσίνας. Δυστυχώς, η πολυετής διαρκής επιβάρυνση του κλειστού Κόλπου από τοξικά απόβλητα έχει μετατρέψει ήδη τον πυθμένα του σε «τοξικό απόβλητο». Όπως έδειξε παλαιότερη έρευνα της Greenpeace και ύστερα από αναλύσεις δειγμάτων πυθμένα από τον Κόλπο της Ελευσίνας, υπάρχει σοβαρότατη ρύπανση από πετρελαιοειδή και τοξικά βαρέα μέταλλα στην περιοχή. Η πετρελαιοκηλίδα απλώς επιβάρυνε την ήδη βεβαρημένη κατάσταση του Κόλπου.

8/8/1996: Ατύχημα στο πετρελαιοφόρο "Kriti Sea" στα διωλιστήρια της Motor Oil στους Άγιους Θεόδωρους κατά τη φορτοεκφόρτωση. Διαρροή 300-500 τόνων στη θάλασσα του Σαρωνικού. Γίνεται σημαντική κινητοποίηση για την αντιμετώπιση της πετρελαιοκηλίδας που εκτός από τους Άγιους Θεόδωρους, φτάνει τις ακτές της Αίγινας και του Αγκιστριού.

1/9/2000: Το δυστύχημα του εμπορικού πλοίου «Eurobulker X», το οποίο κόπηκε στα δύο στο Λευκαντί της Εύβοιας, προκάλεσε μια τεράστια για τα ελληνικά δεδομένα οικολογική καταστροφή στον Νότιο Ευβοϊκό και εγείρει το μείζον θέμα της προστασίας των θαλασσών από τα ναυτικά ατυχήματα και τα βιομηχανικά απόβλητα.

## **2.4 Σύσταση και φυσικοχημικές διεργασίες του πετρελαίου**

### *2.4.1 Σύσταση του πετρελαίου*

Σύμφωνα με τους κανονισμούς της διεθνούς σύμβασης MARPOL (73/78) αργό πετρέλαιο (crude oil), θεωρείται κάθε μίγμα πετρελαϊκών υδρογονανθράκων κατάλληλο για μεταφορά δια θαλάσσης, στο οποίο το ποσοστό του άνθρακα ποικίλει μεταξύ 83 και 87% και το ποσοστό του υδρογόνου μεταξύ 11% και 14%. Οι ποσότητες άλλων στοιχείων είναι πολύ μικρές, όπως το οξυγόνο έως 5% και το άζωτο έως 1%, εκτός από το θείο το οποίο μπορεί να φτάσει σε περιεκτικότητα 8% (πετρέλαιο Ιράκ). Έχει ειδικό βάρος μεταξύ 0,75 και 1,06 g/mL και το μεγαλύτερο ποσοστό του είναι υδρογονάνθρακες (έως 98%), κυριότερες κατηγορίες των οποίων είναι τα αλκάνια (ή παραφίνες), τα κυκλοαλκάνια και αρωματικές ενώσεις. Το ορυκτό πετρέλαιο ή «αργό πετρέλαιο» όπως λέγεται, μπορεί να ποικίλει στην εμφάνιση, τη σύνθεση και την καθαρότητα. Λαμβάνοντας υπόψη τη σύνθεσή τους, τα πετρέλαια κατατάσσονται σε τρεις βασικές κατηγορίες (el.wikipedia.org):

- 1) Παραφινικά πετρέλαια. Αυτά περιέχουν στερεή παραφίνη και κατά την απόσταξη δίνουν σημαντική αναλογία ελαφρών κλασμάτων που αποτελούνται αποκλειστικά από κεκορεσμένους υδρογονάνθρακες της αλειφατικής σειράς. Τα μεν πρώτα της σειράς αυτής (μεθάνιο, αιθάνιο, προπάνιο, βουτάνιο) παρατηρούνται και στα αέρια που συνοδεύουν το πετρέλαιο στην εξόρυξή του.
- 2) Ασφαλτικά πετρέλαια. Αυτά δίνουν περισσότερο βαρέα κλάσματα, όπως μαζούτ και ορυκτέλαια. Τα ελαφρά κλάσματα των πετρελαίων αυτών

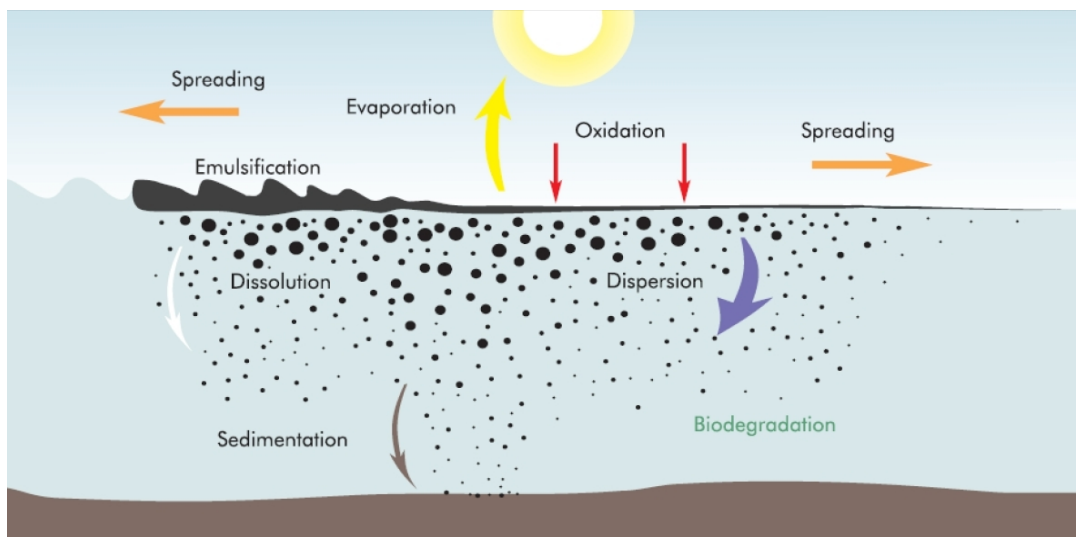
αποτελούνται κυρίως από κεκορεσμένους κυκλικούς υδρογονάνθρακες (ναφθένια) της πολυμεθυλενικής σειράς.

- 3) Ασφαλτοπαραφινικά πετρέλαια. Αυτά αποτελούν μίξη των παραπάνω κατηγοριών όπου η μία δεν υπερτερεί της άλλης.

#### 2.4.2 Φυσικοχημικές διεργασίες του πετρελαίου

Η συμπεριφορά μιας πετρελαιοκηλίδας στο θαλάσσιο περιβάλλον εξαρτάται από ένα σύνολο φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών, οι οποίες καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό, τόσο από τις ιδιότητες του πετρελαίου που έχει διαρρεύσει, όσο και από τις περιβαλλοντικές, μετεωρολογικές και υδροδυναμικές συνθήκες της προσβληθείσας περιοχής. Κατά τη διαρροή του το πετρελαιοειδές τείνει να καλύψει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια. Τα πετρελαιοειδή γενικά χωρίζονται σε εμμέμοντα (persistent) και μη εμμέμοντα (non persistent), ανάλογα με τις διεργασίες που πραγματοποιούνται με την εισαγωγή τους στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η τύχη και η συμπεριφορά του πετρελαίου μπορεί να επηρεαστεί από τις ακόλουθες διεργασίες:

- 1) Εξάπλωση / Μεταφορά (Spreading/Transport)
- 2) Εξάτμιση (Evaporation)
- 3) Διασπορά / Διάχυση (Dispersion/Diffusion)
- 4) Γαλακτωματοποίηση (Emulsification)
- 5) Διάλυση (Dissolution)
- 6) Οξείδωση (Oxidation)
- 7) Καθίζηση (Sedimentation)
- 8) Βιοαποικοδόμηση (Biodegradation)



**Εικόνα 2.2:** Κύριες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε μια πετρελαιοκηλίδα (πηγή: [medess4ms.eu/marine-pollution](http://medess4ms.eu/marine-pollution))

Το σύνολο των διεργασιών αυτών είναι γνωστό ως «παλαιώση» ή «αποχρωματισμός» (weathering) του πετρελαίου και οι περισσότερες από αυτές περιγράφονται από ικανό αριθμό μαθηματικών μοντέλων. Οι διεργασίες της εξάπλωσης, της εξάτμισης, της διασποράς, της διάλυσης και της γαλακτωματοποίησης είναι σημαντικές στα πρώτα στάδια ζωής της πετρελαιοκηλίδας. Αντίθετα η οξείδωση, η βιοαποικοδόμηση και η καθίζηση είναι μακροχρόνιες διαδικασίες. Στη Μεσόγειο η απουσία μεγάλων κυμάτων, έντονων καιρικών φαινομένων, αλλά και η μεγαλύτερη συγκέντρωση αλατότητας δυσχεραίνει τη φυσική διάλυση μιας πετρελαιοκηλίδας. Ο ρυθμός των ποσοτήτων του πετρελαίου που βουλιάζουν ή διαλύονται είναι αργός κατά τη διάρκεια ενός περιστατικού.

## 2.5 Επιπτώσεις των πετρελαιοκηλίδων

Η φύση και η διάρκεια των συνεπειών που μπορούν να προκληθούν από μία πετρελαιοκηλίδα εξαρτώνται από έναν ικανό αριθμό παραγόντων. Σε αυτούς περιλαμβάνονται το είδος του πετρελαιοειδούς, το μέγεθος, η διάρκεια και η ταχύτητα εκροής της κηλίδας, η τοποθεσία που συνέβη και αν πλήττει ακτογραμμές και κατοικημένες περιοχές, οι καιρικές συνθήκες και η εποχή του ατυχήματος. Επιπλέον, καθοριστική είναι η μέθοδος αντιμετώπισης που θα επιλεγεί για τον καθαρισμό και ο χρόνος αντίδρασης μέχρι την έναρξη των εργασιών περιορισμού και περισυλλογής. Οι επιπτώσεις μιας πετρελαιοκηλίδας θα μελετηθούν σε τρεις κατηγορίες, τις περιβαλλοντικές και τις κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις και το κόστος καθαρισμού της κηλίδας.

### 2.5.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των πετρελαιοκηλίδων

#### α) Θαλάσσια φυτά – Πλαγκτόν

Η διαρροή πετρελαίου στη θάλασσα οδηγεί στην καταστροφή φυκιών και υποθαλάσσιων φυτών. Το πετρέλαιο είναι ελαφρύτερο από το νερό με αποτέλεσμα να επιπλέει στην επιφάνειά του. Καθώς λοιπόν το στρώμα των πετρελαιοειδών έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια της θάλασσας παρεμποδίζει την είσοδο του αέρα και μειώνει τη διαπερατότητα του φωτός, με αποτέλεσμα να μειώνεται η φωτοσυνθετική ικανότητα των υποθαλάσσιων φυτών, αφού μειώνεται στο ελάχιστο η ανανέωση του νερού με το οξυγόνο του αέρα. Τα μαλάκια και τα φυτά είναι ιδιαίτερα ευπαθή σε αυτή τη ρύπανση, γιατί δηλητηριάζονται και πεθαίνουν από ασφυξία. Από το πετρέλαιο που βυθίζεται, λόγω μεγαλύτερου ειδικού βάρους, καταστρέφονται τα φύκια που δίνουν τροφή και κάλυψη σε πολλούς οργανισμούς. Στο Αιγαίο βρίσκονται μεγάλες προστατευόμενες εκτάσεις από θαλάσσια λιβάδια Ποσειδωνίας, από τα οποία προέρχεται η μεγαλύτερη ποσότητα παραγωγής οξυγόνου στη θάλασσα, απαραίτητη για τη διατήρηση της υποθαλάσσιας ζωής, ενώ δεσμεύουν και διοξείδιο του άνθρακα. Τα λιβάδια Ποσειδωνίας συμβάλλουν στην προστασία κατά της διάβρωσης των ακτών, βοηθούν σημαντικά στη βιοποικιλότητα της παράκτιας ζώνης και βελτιώνουν την ποιότητα του νερού, αυξάνουν την παραγωγή εμπορεύσιμων ειδών και φιλοξενούν εποχικά ψάρια για τροφή και αναπαραγωγή (Καλογήρου et al., Ποσειδωνίες, τα Υποθαλάσσια Δάση μας).

Όσον αφορά το πλαγκτόν, η σημασία του στην πρωτογενή παραγωγικότητα των ωκεανών και ως προσωρινό σπίτι για τα αυγά και τις προνύμφες των ψαριών, των οστρακοειδών και οργανισμών του βυθού είναι καθοριστική. Υπάρχουν, όμως, αποδείξεις για εκτεταμένες βλάβες σε αυτές τις λειτουργίες από τις διαρροές πετρελαίου, που οδηγούν σε μακροπρόθεσμη καταστροφή. Εργαστηριακές μελέτες έχουν δείξει ότι το πλαγκτόν που επιβιώνει μεταφέρει μεγάλη ποσότητα τοξικών που καταλήγει στα ψάρια που τρέφονται με αυτό. Στο πετρέλαιο υπάρχουν καρκινογόνες ουσίες που μέσω της διατροφής με μολυσμένα ψάρια μπορούν να καταλήξουν στον άνθρωπο.

### β) Θαλάσσια πτηνά

Τα θαλάσσια πουλιά είναι οι πιο ευαίσθητοι οργανισμοί στην πετρελαϊκή ρύπανση. Ιδιαίτερα τα είδη που βουτάνε στο νερό για τροφή ή κινούνται στο επίπεδο της επιφάνειας της θάλασσας βρίσκονται σε σοβαρό κίνδυνο. Αν και η απλή κατάποση πετρελαίου μπορεί να είναι θανατηφόρα για τα πουλιά, οι συνήθεις αιτίες θανάτου είναι από πνιγμό, από πείνα και από την απώλεια της θερμότητας του σώματος. Αυτά οφείλονται στη φυσική δράση του πετρελαίου. Όταν τα φτερά του πτηνού έρθουν σε επαφή με το πετρέλαιο χάνουν τη μόνωσή τους, επειδή οι ενώσεις στις οποίες οφείλεται η μόνωση διαλύονται στο πετρέλαιο. Εφόσον το πτηνό παραμείνει στη θάλασσα το νερό διαπερνάει τα φτερά και τα πούπουλά του και εκτοπίζει τον αέρα που είναι εγκλωβισμένος ανάμεσα στα πούπουλα και το δέρμα. Η στιβάδα αέρα παρέχει στο πτηνό ελαφρότητα και θερμική μόνωση. Με την απώλειά της τα φτερά διαβρέχονται και τα πουλιά βυθίζονται και πνίγονται (Κλωνάρης, 2009). Γίνεται προσπάθεια για τον καθαρισμό και την αποκατάσταση των πτηνών μετά την αφαίρεση του πετρελαίου, αλλά για πολλά είδη είναι σπάνιο να επιβιώνουν από τον καθαρισμό περισσότερο από ένα μικρό ποσοστό τους, ενώ είναι ακόμα σπανιότερο αυτά που επιβιώνουν να καταφέρουν να αναπαραχθούν με επιτυχία μετά την απελευθέρωσή τους.



**Εικόνα 2.3:** Αφρικανικοί πγκουίνοι καλυμμένοι με πετρέλαιο  
(πηγή: arkive.org)

### γ) Θαλάσσια θηλαστικά

Στο Αιγαίο συναντώνται αρκετά ήδη θαλάσσιων θηλαστικών, όπως τα δελφίνια, οι φάλαινες και ο μεγαλύτερος εναπομείναντας πληθυσμός μεσογειακής φώκιας Μονάχους Μονάχους. Τα συγκεκριμένα θηλαστικά δεν φαίνεται να είναι σε ιδιαίτερο κίνδυνο στην ανοικτή θάλασσα. Όσα αναπαράγονται όμως στις ακτές, όπως οι φώκιες και οι βίδρες, είναι πιο πιθανό να αντιμετωπίσουν προβλήματα. Είδη τα οποία βασίζονται στη γούνα για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας τους είναι πιο ευάλωτα, δεδομένου ότι αν η γούνα τους καλυφθεί με πετρέλαιο μπορούν, ανάλογα με την εποχή, να πεθάνουν από υποθερμία ή υπερθέρμανση.

### δ) Παράκτια ζώνη

Με τους μηχανισμούς μεταφοράς και εξάπλωσής του, το πετρέλαιο συσσωρεύεται στις παράκτιες ζώνες, αλλά και αναμιγνύεται με το νερό λόγω της δράσης των κυμάτων ή από ανάρμοστη χρήση χημικών για το διασκορπισμό του. Σε πολλές περιπτώσεις η ικανότητα αραίωσης είναι επαρκής για να παραμείνουν οι συγκεντρώσεις πετρελαίου στο νερό κάτω από επιβλαβή επίπεδα. Όταν αυτό δεν είναι εφικτό παρατηρούνται εκτεταμένοι θάνατοι στους θαλάσσιους οργανισμούς και τα οστρακοειδή. Τα ζώα και τα φυτά, όμως, που ζουν κοντά στην ακτή είναι πιο ανθεκτικά, διότι πρέπει να αντέχουν σε ακραίες συνθήκες, όπως τα μεγάλα κύματα, τους ξηρούς ανέμους και της υψηλές θερμοκρασίες. Επομένως, οι οργανισμοί αυτοί είναι πιο ικανοί στο να αντέξουν και να ανακάμψουν από την επίδραση του πετρελαίου, με μελέτες να αποκαλύπτουν ότι η ανάκαμψη λαμβάνει χώρα σε ένα σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα και οι επιπτώσεις είναι σπάνια ανιχνεύσιμες μετά το πέρας λίγων ετών.

### ε) Αμμώδεις ακτές

Το πετρέλαιο δεν αποκολλάται εύκολα από τις αμμώδεις ακτές. Οι αμμώδεις ακτές συγκεντρώνουν πλήθος αποδημητικών πουλιών και οστρακοειδών, ενώ αποτελούν τόπο αναπαραγωγής για πολλά είδη. Το πετρέλαιο μπορεί να ενσωματωθεί στα λεπτόκοκκα ιζήματα μέσω πολλών μηχανισμών και όταν μάλιστα βρίσκεται σε υγρή μορφή κατακάθεται στο βυθό και την ακτή. Εκεί λόγω χαμηλότερης διαθεσιμότητας οξυγόνου δεν ευνοείται η αποδόμηση του πετρελαίου, το οποίο διατηρεί τις τοξικές του ιδιότητες και μπορεί να παραμείνει για πολλά χρόνια αυξάνοντας την πιθανότητα μακροχρόνιων επιπτώσεων (Κλωνάρης, 2009).

### ζ) Βραχώδεις ακτές

Λόγω του ότι εκτίθενται στην υψηλή δράση των κυμάτων, οι βραχώδεις ακτές έχουν την ικανότητα του γρήγορου αυτοκαθαρισμού, που βοηθάει στην επαναφορά τους στην αρχική κατάσταση σε σύντομο χρονικό διάστημα. Ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να προκληθούν αλλαγές σε μία βραχώδη ακτή και ένας μεγάλος αριθμός ζώων και τα πιο ευαίσθητα κόκκινα και πράσινα άλγη πεθαίνουν από τη δράση των πετρελαιοκηλίδων. Παρά το γεγονός ότι η λειτουργία, η ποικιλομορφία και η παραγωγικότητα του συστήματος έχουν αποκατασταθεί, οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των ειδών πιθανόν να μην επανέλθουν.



**Εικόνα 2.4:** Πετρέλαιο σε αμμώδη ακτή στο Λίβανο  
(πηγή: Lebanon Oil Beach, Wikimedia Commons)

### 2.5.2 Κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις των πετρελαιοκηλίδων

#### α) Τουρισμός

Οι επιπτώσεις της ρύπανσης είναι σημαντικές στον τουρισμό. Οι περιοχές οι οποίες πλήττονται, λόγω της γεωγραφικής τους θέσης, είναι σύνηθες να παρουσιάζουν τουριστική ανάπτυξη. Ιδιαίτερα στην Ελλάδα, όπου η πλειοψηφία των νησιών και των ακτών του Αιγαίου αποτελούν περιοχές ιδιαίτερου φυσικού κάλλους, η οικονομία τους σε τοπικό, αλλά και εθνικό, επίπεδο βασίζεται στην ευημερία του τουριστικού τομέα. Η δημιουργία μιας πετρελαιοκηλίδας θα είχε ως συνέπεια να υποβαθμιστεί η φυσική ομορφιά των περιοχών και να μειωθεί κατακόρυφα η τουριστική κίνηση. Τα αποτελέσματα θα είναι ορατά στο χώρο των ξενοδοχείων, των καταστημάτων και της εστίασης.

#### β) Αλιεία και ιχθυοκαλλιέργειες

Οι συνέπειες από τη διαρροή πετρελαίου είναι ιδιαίτερα σημαντικές και στην αλιεία και τις ιχθυοκαλλιέργειες. Η αλιεία θα μειωθεί σημαντικά και πιθανόν να διακοπουν όλες οι δραστηριότητες λόγω της παρουσίας του πετρελαίου ή των ενεργειών καθαρισμού του. Ακόμα και μικρές συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων δημιουργούν μία δυσάρεστη γεύση στα ψάρια και σε άλλα αλιεύματα και τα καθιστούν ακατάλληλα για εμπόριο. Βέβαια, είναι σύνηθες να διακόπτονται για προληπτικούς λόγους όλες οι εργασίες για να διατηρείται η εμπιστοσύνη και η προστασία της αγοράς, αλλά και του εξοπλισμού. Ο πλωτός εξοπλισμός, που αποτελείται κυρίως από τα πλοία, τις μηχανές και τα δίχτυα είναι εξαιρετικά πιθανό να μολυνθεί και να φθαρεί λόγω επαφής με τοξικές ουσίες του πετρελαίου. Ο υποβρύχιος εξοπλισμός, όπως δίχτυα και τράτες βυθού, δεν αναμένεται να επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό, παρά μόνο από το πετρέλαιο που βυθίζεται. Όσον αφορά τις ιχθυοκαλλιέργειες, είναι ιδιαίτερα ευάλωτες στη διαρροή πετρελαίου, καθώς πολλές φορές τα ψάρια δεν έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν τους φυσικούς μηχανισμούς αποφυγής τους και η παρουσία του εξοπλισμού της καλλιέργειας παρέχει τη δυνατότητα παρατεταμένης εισόδου στα συστατικά του πετρελαίου. Στο Θερμαϊκό κόλπο γίνεται εκτεταμένη

καλλιέργεια οστρακοειδών, οπότε ένα πιθανό ατύχημα πετρελαιοκηλίδας στο θαλάσσιο αυτό χώρο θα είχε καταστροφικές συνέπειες για τον κλάδο.

### γ) Βιοτικό επίπεδο

Με τη διαρροή του πετρελαίου οι κάτοικοι της περιοχής έχουν και απώλειες ευζωίας, αφού χάνουν πολλές από τις δυνατότητες που είχαν, όπως την κολύμβηση, τις καταδύσεις και το ιδιωτικό ψάρεμα. Σημαντικότερος είναι ο κίνδυνος για τη δημόσια υγεία, λόγω της εισπνοής και της επαφής με τα συστατικά του πετρελαίου, καθώς και από την κατανάλωση ψαριών που έχουν μολυνθεί. Οικονομικές επιπτώσεις υπάρχουν από την πτώση της αξίας των οικοπέδων και των κτισμάτων στην περιοχή, αλλά και από τη μείωση του ενδιαφέροντος ανοικοδόμησης νέων κτιρίων και αποτελούν τροχοπέδη για την ανάπτυξη της περιοχής. Επιπλέον, πολλές βιομηχανίες και εργοστάσια χρειάζονται καθαρό νερό για τη λειτουργία και τον καθαρισμό τους και υπάρχει σημαντικό ρίσκο εφόσον εισχωρήσει πετρέλαιο στα συστήματά τους.

### 2.5.3 Κόστος καθαρισμού μιας πετρελαιοκηλίδας

Η αντιμετώπιση των πετρελαιοκηλίδων, κατά την τελευταία δεκαετία, έχει γίνει ολοένα πιο περίπλοκη, χρονοβόρα και δαπανηρή. Υπάρχει διεθνής συμφωνία ότι 'ο ρυπαίνων πληρώνει' με το να αναλαμβάνει το κόστος της επιχείρησης καθαρισμού, το οποίο είναι αρκετά σύνθετο και εκτείνεται πέρα από τις καθ' αυτές ενέργειες καθαρισμού. Οι παράγοντες που εμπλέκονται είναι πολλοί, αλλά οι περισσότεροι ειδικοί συμφωνούν ότι ο καθοριστικότερος παράγοντας για το κόστος είναι ο τύπος του περιστατικού. Στα περιστατικά στα οποία το πετρέλαιο πλήττει τις ακτές, το 90%-99% του κόστους καθαρισμού και αποκατάστασης σχετίζεται με τον καθαρισμό των ακτών.

Σε πολλές περιπτώσεις η έντονη πίεση που ασκείται από το κοινωνικό σύνολο, τις οργανώσεις και την πολιτεία στους υπεύθυνους, για άμεσες, δραστικές και δαπανηρές μεθόδους καθαρισμού, δεν έχουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα στην προστασία του περιβάλλοντος, ακόμα και αν αυτή η πίεση γίνεται με καλό σκοπό.

Το Ενδεχόμενο Κόστος Πετρελαιοκηλίδας περιλαμβάνει ενδεικτικά τα εξής:

- Κόστος Ατυχήματος
- Κόστος Συμπλήρωσης Αναφοράς Περιστατικού
- Αρχικό Κόστος Καθαρισμού
- Μηχανικά Μέσα Περιορισμού και Κόστος Καθαρισμού
- Κόστος Χρήσης Διασκορπιστικών Ουσιών
- Κόστος Μεθόδου Φυσικής Αποικοδόμησης
- Κόστος Τεχνικής Επιτόπου Καύσης
- Κόστος Μηχανικού Καθαρισμού Ακτών
- Πρόσθετο Κόστος για οποιαδήποτε Μέθοδο
- Κόστος Αποκατάστασης Χλωρίδας και Πανίδας
- Κόστος Αποκατάστασης λόγω Καταστροφής Φυσικών Πόρων
- Κόστος Έρευνας
- Περιουσιακές, Οικονομικές, Περιβαλλοντικές Αποζημιώσεις
- Πρόστιμα και Ποινές

## 2.6 Τρόποι αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων

Η καλύτερη στρατηγική για την αντιμετώπιση της ρύπανσης είναι αυτή της πρόληψης. Εάν όμως το ατύχημα της πετρελαιοκηλίδας τελικά συμβεί, πρέπει να εφαρμοστούν μέθοδοι που θα περιορίσουν τη ρύπανση και θα εμποδίσουν όσο το δυνατόν τις ζημιές στο φυσικό και ανθρώπινο περιβάλλον. Η δυνατότητα αυτοκαθαρισμού της θάλασσας έχει σταματήσει εδώ και δεκαετίες να αποτελεί λύση στο πρόβλημα. Κύριος στόχος, λοιπόν, σε περίπτωση πετρελαιοκηλίδας, είναι αυτή να αντιμετωπιστεί στην πηγή της και να εμποδιστεί η περαιτέρω διαρροή, ενώ το σημαντικότερο είναι να μην φτάσει να πλήξει τις ακτές. Έτσι οι ενέργειες καθαρισμού από το πετρέλαιο μπορούν να διαχωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες - στις ενέργειες απορρύπανσης της θάλασσας και στις ενέργειες απορρύπανσης των ακτών, εφόσον προσβληθούν και αυτές. Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά οι κλασικοί μέθοδοι που υπάρχουν για την αντιμετώπιση της πετρελαικής ρύπανσης στη θάλασσα και στις ακτές (Τριανταφύλλου, 2004).

### 2.6.1 Καθαρισμός της θάλασσας

#### α) Μηχανικός Καθαρισμός

Οι μηχανικές μέθοδοι καθαρισμού στηρίζονται στη συγκέντρωση και την ανάκτηση του πετρελαίου από την επιφάνεια της θάλασσας. Είναι γενικά διαδοσμένες τεχνικές στην πρώτη φάση μιας αντιρρυπαντικής επιχείρησης καθαρισμού και χαρακτηρίζονται από την ανάγκη τεχνικής υποστήριξης, επένδυσης μεγάλου χρηματικού κεφαλαίου και παρουσιάζουν πρόβλημα διάθεσης του συλλεγόμενου υλικού και ρύπου. Εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες και από την σωστή πρόβλεψη της εξέλιξης της κηλίδας. Στον μηχανικό καθαρισμό συνήθως χρησιμοποιούνται:

- Φράγματα (Barriers/Booms): Είναι συσκευές (πλωτά φράγματα) που έχουν ειδικά κατασκευαστεί για τον έλεγχο της κίνησης του πετρελαίου στην επιφάνεια της θάλασσας. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εγκλωβισμό, τη συγκέντρωση και την κατεύθυνση κηλίδων πετρελαίου.
- Πετρελαιοσυλλέκτες (Skimmers): Οι πετρελαιοσυλλέκτες είναι κάθε μηχανική συσκευή που έχει ειδικά κατασκευαστεί για να συλλέγει το πετρέλαιο (ή το μίγμα νερού/πετρελαίου) από την επιφάνεια της θάλασσας, χωρίς να αλλάξουν τα φυσικά ή και τα χημικά χαρακτηριστικά του. Υπάρχουν δύο τύποι, οι μηχανικοί πετρελαιοσυλλέκτες και οι ελαιόφιλοι πετρελαιοσυλλέκτες. Υπάρχουν τέλος και τα φράγματα περισυλλογής που είναι συνδυασμός φράγματος και πετρελαιοσυλλέκτη.
- Σκάφη Περισυλλογής (Skimmer Vessels): Είναι σκάφη ειδικού τύπου που έχουν προσαρμοσμένο, με ειδική σχεδίαση, κάποιο τύπο συσκευής περισυλλογής και χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση του επιφανειακού στρώματος του ρύπου από τη θάλασσα. Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι η χρήση τους στην ανοικτή θάλασσα, αλλά και σε κλειστούς κόλπους με μεγάλο βάθος.



- Απορροφητικά Υλικά (Sorbents): Τα απορροφητικά είναι υλικά που χρησιμοποιούν απορροφητικές ή προσκολλητικές ιδιότητες προκειμένου να περισυλλέξουν ρευστά. Τα απορροφητικά υλικά είναι ειδικά σχεδιασμένα για να περισυλλέγουν πετρέλαιο από την επιφάνεια του νερού.

### β) Χημικός Καθαρισμός

Σε περιπτώσεις που οι καιρικές συνθήκες είναι δύσκολες, τα μηχανικά μέσα είναι πιθανό να μην είναι αποτελεσματικά, επομένως ο συνδυασμός μηχανικών μέσων και χημικών είναι πολύ χρήσιμος, καθώς τα χημικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στις περιπτώσεις εκείνες για να καταστήσουν ευκολότερη την ανάκτηση του ρύπου με μηχανικά μέσα. Ο χημικός καθαρισμός περιλαμβάνει:

- Χημικές Διασκορπιστικές Ουσίες (Dispersants): Είναι μίγματα στα οποία περιλαμβάνονται επιφανειακά ενεργές ουσίες οι οποίες μειώνουν την επιφανειακή τάση μεταξύ νερού και πετρελαίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη διάσπαση της πετρελαιοκηλίδας σε πολύ μικρά σταγονίδια που διασκορπίζονται εν συνεχεία στην υδάτινη στήλη, λόγω της φυσικής κίνησης του νερού. Αποτελούνται από δύο κύρια συστατικά, ένα προσκολλητικό επιφανείας και έναν κατάλληλο διαλύτη.
- Άλλα Χημικά όπως μέσα καταβύθισης, πτητικά μέσα, απογαλακτοποιητές, βιολογικά μέσα κ.α.

### γ) Φυσική Αποικοδόμηση (Natural Degradation/To Do Nothing)

Η τακτική αυτή δεν χρησιμοποιείται συχνά και γενικά δύσκολα δικαιολογείται. Η τεχνική συνίσταται μόνο στην παρακολούθηση της κίνησης της κηλίδας. Συνήθως εφαρμόζεται στις περιπτώσεις εκείνες όπου πετρέλαιο και συνηθέστερα ελαφριά κλάσματά του διαρρέουν στην ανοικτή θάλασσα, μακριά από ακτές και σε καταστάσεις θαλασσοταραχής.

Τα τελευταία χρόνια μελετούνται και προωθούνται και άλλες μέθοδοι ως εναλλακτικές ή συμπληρωματικές παρεμβάσεις στην απορρύπανση. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι η Βιοαποικοδόμηση και η Επί Τόπου Καύση.

Η Βιοαποικοδόμηση περιγράφει το σύνολο των διαδικασιών, που χρησιμοποιούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να αυξήσουν τους ρυθμούς της φυσικής αποικοδόμησης του πετρελαίου. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη ουσιών, συγκεκριμένα φυσικών μικροοργανισμών και ενώ η χρησιμότητα της μεθόδου στη θάλασσα εξακολουθεί να μην είναι καθορισμένη, σε ακτές όπου είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθούν μηχανικά ή χημικά μέσα, όπως σε ένα ευαίσθητο οικοσύστημα, η βιοαποικοδόμηση μπορεί να θεωρηθεί ως ο μοναδικός τρόπος καθαρισμού.

Όσον αφορά την επί τόπου καύση, ο όρος χαρακτηρίζει τη διαδικασία της καύσης κηλίδων πετρελαίου στη θάλασσα και ενώ έχει τη δυνατότητα να απομακρύνει μεγάλες ποσότητες πετρελαίου από την επιφάνεια του νερού, πρακτικά παρουσιάζει προβλήματα όπως η ανάφλεξη, η διατήρηση της καύσης, οι μεγάλες ποσότητες καπνού στην ατμόσφαιρα, η δημιουργία και πιθανή βύθιση παχύρρευστων υπολειμμάτων και λόγοι ασφαλείας.

### 2.6.2 Καθαρισμός των ακτών

Πολλές φορές η επιχείρηση απορρύπανσης στη θάλασσα είναι αδύνατο να εμποδίσει τμήμα της πετρελαιοκηλίδας, μικρό ή μεγάλο, να φθάσει στις ακτές. Η επέμβαση του ανθρώπου, στο ρυπασμένο περιβάλλον, πρέπει να γίνει εφόσον θεωρηθεί απαραίτητη, με μεγάλη προσοχή και σεβασμό στο περιβάλλον. Επιθετικές παρεμβάσεις του ανθρώπου με μη κατάλληλα αντιρρυπαντικά μέσα είναι πολύ πιθανό να προκαλέσουν ακόμα μεγαλύτερη καταστροφή από ότι το ίδιο το πετρέλαιο. Οι επιχειρήσεις απορρύπανσης είναι ιδιαίτερα δαπανηρές, απαιτούν μεγάλο ανθρώπινο δυναμικό, κατάλληλο εξοπλισμό και γενικά είναι χρονοβόρες ενώ η επανάκαμψη του οικοσυστήματος δεν είναι βέβαιη.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται. Μερικές από τις οποίες είναι αποδεκτές από τις οδηγίες του Ευρωπαϊκού οργανισμού REMPEC, είναι η χειρονακτική ή/και η μηχανική περισυλλογή των υλικών που προσβλήθηκαν από πετρέλαιο, η χρήση βυτιοφόρων, μηχανημάτων καθαρισμού ακτών, η αμμοβολή, η πλύση με χαμηλή πίεση για οικολογικά ευαίσθητες περιοχές και με υψηλή για βραχώδεις ακτές, ο καθαρισμός με ατμό, η καύση, η μετατόπιση των υλικών που προσβλήθηκαν από πετρέλαιο στη θάλασσα και η ανάμιξη με το υπόστρωμα. Καθοριστικό παράγοντα για την επιλογή του τρόπου απορρύπανσης αποτελεί ο τύπος των ακτών, δηλαδή αν είναι βραχώδεις ή αμμώδεις και από το αν παρουσιάζουν οικολογικό ή τουριστικό ενδιαφέρον.



**Εικόνα 2.5:** Χειρωνακτικός καθαρισμός ακτής στην Ταϊλάνδη  
(πηγή: smashinglive.com)

## 2.7 Νομοθετικό πλαίσιο προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.3.1, το ατύχημα του Torrey Canyon υπήρξε το πρώτο μεγάλο ατύχημα δεξαμενόπλοιου που προκάλεσε εκτεταμένη καταστροφή και αντιδράσεις, με αποτέλεσμα να κριθεί επιτακτική η ανάγκη θέσπισης συμβάσεων και νομοθεσιών για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Σήμερα υπάρχει ένα πλήθος από διεθνείς και ευρωπαϊκές συμβάσεις και άλλες διατάξεις για την πρόληψη, αποτροπή και αντιμετώπιση της θαλάσσιας ρύπανσης. Σύμφωνα με το Υπουργείο Ναυτιλίας και Αιγαίου οι σημαντικότερες διεθνείς συμβάσεις που έχει επικυρώσει η Ελλάδα είναι (yen.gr):

- Δ.Σ. CLC 1992: Για την αστική ευθύνη του πλοιοκτήτη, συνέπεια ζημιών ρύπανσης από πετρέλαιο.
- Δ.Σ. Βαρκελώνης 1976: Για την προστασία της Μεσογείου από τη ρύπανση.
- Δ.Σ. Λονδίνου 1972: Για την πρόληψη της ρύπανσης της θάλασσας από τα πλοία.
- Δ.Σ. MARPOL 73/78: Για την πρόληψη της ρύπανσης από τα πλοία.
- Δ.Σ. CLC 1992: Για την ίδρυση διεθνούς κεφαλαίου για την αποζημίωση ζημιών ρύπανσης από πετρέλαιο.
- Δ.Σ. OPRC 1990: Για την ετοιμότητα, συνεργασία και αντιμετώπιση της ρύπανσης της θάλασσας από πετρέλαιο.
- Δ.Σ. OPRC-HNS 2000: Για την ετοιμότητα, συνεργασία και αντιμετώπιση περιστατικών ρύπανσης της θάλασσας από επικίνδυνες και επιβλαβείς ουσίες.
- Διμερής Συμφωνία Ελλάδας Ιταλίας 1978: Περί προστασίας του Ιονίου Πελάγους.
- Κανονισμοί και Οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EU) που αναφέρονται στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Τα κυριότερα μέρη της εθνικής νομοθεσίας για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος είναι:

- Ν.Δ. 187/1973: Κώδικας Δημοσίου Ναυτικού Δικαίου.
- Π.Δ. 55/1998: Προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος (κωδικοποίηση του Ν. 743/77).
- Ν. 1650/1986: Για την προστασία του περιβάλλοντος.
- Π.Δ. 11/2002: Εθνικό Σχέδιο Έκτακτης Ανάγκης για την αντιμετώπιση περιστατικών ρύπανσης από πετρέλαιο και άλλες επιβλαβείς ουσίες.
- Ε 1β/221/1965: Υγειονομική Διάταξη.
- Αριθ. Υ.Α. 2411.1/07/03/ΦΕΚ Β' 850/27-06-2003: Οδηγίες/διαδικασίες για την αντιμετώπιση περιστατικών πλοίων που βρίσκονται σε κατάσταση ανάγκης ή κινδύνου σύμφωνα με τις απαιτήσεις του άρθρου 20 της Οδηγίας 2002/59 για τον ορισμό περιοχών καταφυγής.
- Ν. 3497/2006 (ΦΕΚ Α' 219/13.10.2006): Κύρωση του Πρωτοκόλλου περί συνεργασίας για την πρόληψη της ρύπανσης από πλοία και σε περιπτώσεις επείγουσας ανάγκης στην καταπολέμηση της ρύπανσης της Μεσογείου.

### 2.7.1 Διεθνής Σύμβαση MARPOL (1973/1978)

Η συνθήκη MARPOL είναι η κύρια σύμβαση που καλύπτει την πρόληψη και την ελαχιστοποίηση της ατυχηματικής θαλάσσιας ρύπανσης, τόσο από τα σκάφη, όσο και από διαδικασίες και λειτουργίες ρουτίνας. Η αρχική συνθήκη του 1973 περιλάμβανε πέντε τεχνικά παραρτήματα και τη δεκαετία του 1990 προστέθηκε ένα ακόμα. Συγκεκριμένα τα παραρτήματα της MARPOL είναι:

Παράρτημα I: Ρύπανση από πετρελαιοειδή.

Παράρτημα II: Ρύπανση από υγρές επιβλαβείς ουσίες μορφής χύδην.

Παράρτημα III: Ρύπανση από επιβλαβείς ουσίες που μεταφέρονται θαλάσσια συσκευασμένες.

Παράρτημα IV: Ρύπανση από λύματα.

Παράρτημα V: Ρύπανση από απορρίμματα.

Παράρτημα VI: Ρύπανση της ατμόσφαιρας από πλοία.

Σύμφωνα με το Παράρτημα I της MARPOL η Μεσόγειος θάλασσα έχει καταχωρηθεί στις "Ειδικές Περιοχές", οι οποίες για αναγνωρισμένους τεχνικούς λόγους σε σχέση με τις ωκεανογραφικές και οικολογικές συνθήκες της και με τον ιδιαίτερο χαρακτήρα της θαλάσσιας κυκλοφορίας, απαιτείται καθιέρωση ειδικών και υποχρεωτικών μεθόδων πρόληψης της θαλάσσιας ρύπανσης. Η MARPOL έχει κυρωθεί από την Ελλάδα με το Ν.1269/1982 (Παραρτήματα I-V) και το Ν.3104/2003 (Παράρτημα VI).

### 3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

#### 3.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή και η σύγκριση δύο μοντέλων πρόβλεψης της εξέλιξης της τροχιάς και των διεργασιών πετρελαιοκηλίδων και συγκεκριμένα του MEDSLIK (Lardner, 2004; 2011) και των FLOW-3DL/OSM (Stamou et al., 1999; 2007a; 2007b; 2013), (Παπαδονικολάκη, 2013). Το ενδιαφέρον για την εκπόνηση διπλωματικής εργασίας πάνω στη μαθηματική προσομοίωση της συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδων προέκυψε από τη συνεργασία του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, με το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου του Βοσπόρου στην Κωνσταντινούπολη, με επιστημονικούς υπεύθυνους τον Καθηγητή Αναστάσιο Ι. Στάμου και τον Αναπληρωτή Καθηγητή και Διευθυντή Emre Otay, αντίστοιχα.

Η συνεργασία αυτή πραγματοποιήθηκε με σκοπό την κατάστρωση ενός κοινού στοχαστικού μοντέλου για την εκτίμηση της επικινδυνότητας ατυχημάτων πετρελαιοκηλίδων σε τοπικά ύδατα της κάθε χώρας. Στόχος του κοινού ερευνητικού προγράμματος ήταν η δυνατότητα δημιουργίας ενός χάρτη επικινδυνότητας για κάθε θαλάσσια-παράκτια περιοχή σε κάθε χώρα, για την ενίσχυση των ενεργειών πρόληψης και σχεδιασμού αντιμετώπισης ενός ατυχήματος, εφόσον αυτό κριθεί απαραίτητο από τις αρμόδιες υπηρεσίες. Στο πλαίσιο της έρευνας που πραγματοποιήθηκε, δομήθηκε ένα ντετερμινιστικό μοντέλο παρακολούθησης της συμπεριφοράς μιας πετρελαιοκηλίδας (oil spill model, OSM) και στη συνέχεια τα αποτελέσματα των υπολογισμών του μοντέλου, από δύο περιπτώσεις εφαρμογής, αποτέλεσαν στοιχεία εισόδου για το στοχαστικό μοντέλο εκτίμησης της επικινδυνότητας (risk analysis model). Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης επιστημονικής έρευνας δημοσιεύτηκαν σε δύο μέρη:

- Stamou A.I., Otay E.N., Tsoukala V.K., Copty N., Karakoc F.T., Christodoulou G., Papadopoulos A., Papadonikolaki G. and Altan Y.C. (2013), Risk assessment of oil spill accidents, Part 1: Presentation of the methodology, 13th International Conference on Environmental Science and Technology (CEST2013), September 5-7 2013, Athens, Greece
- Otay E.N., Stamou A.I., Altan Y.C., Papadonikolaki G., Copty N., Christodoulou G., Karakoc F.T., Tsoukala V.K., Koutsoyiannis D. and Papadopoulos A. (2013), Risk assessment of oil spill accidents, Part 2: Application to Saronikos Gulf and Izmir Bay, 13th International Conference on Environmental Science and Technology (CEST2013), September 5-7 2013, Athens, Greece

Παράλληλα με τις επιστημονικές δημοσιεύσεις εκπονήθηκε μία μεταπτυχιακή εργασία, στην οποία περιγράφεται η δόμηση του μοντέλου πετρελαιοκηλίδας και η εφαρμογή του στο Σαρωνικό Κόλπο και σαν εξέλιξη του ερευνητικού πλαισίου έχουν εκπονηθεί τρεις διπλωματικές εργασίες, με τελευταία χρονικά την παρούσα, από

προπτυχιακούς φοιτητές της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Συγκεκριμένα:

- Παπαδονικολάκη Γ., 2013, Μαθηματική Προσομοίωση της Συμπεριφοράς Πετρελαιοκηλίδων, Μεταπτυχιακή Εργασία του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ
- Ποτουρίδης Στ., 2013, Σύγκριση των Προγραμμάτων GNOME, MEDSLIK και FLOW-3DL για τον Υπολογισμό Τροχιάς Πετρελαιοκηλίδας, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ
- Κραγιοπούλου Ελ., 2014, Εκτίμηση Επικινδυνότητας Ατυχημάτων Πετρελαιοκηλίδας - Εφαρμογή Δύο Μεθοδολογιών στο Σαρωνικό Κόλπο, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ.

### **3.2 «Εκτίμηση επικινδυνότητας ατυχημάτων πετρελαιοκηλίδας, μέρη 1 & 2»**

Στο πρώτο μέρος της δημοσίευσης, παρουσιάζεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση της επικινδυνότητας από ατυχήματα πετρελαιοκηλίδων και παρατίθενται οι εξισώσεις των μαθηματικών μοντέλων που αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν κατά τη διάρκεια του ερευνητικού προγράμματος. Στο δεύτερο μέρος της δημοσίευσης, γίνεται εφαρμογή της μεθοδολογίας σε δύο περιοχές, το Σαρωνικό Κόλπο στην Ελλάδα και τον Κόλπο της Σμύρνης στην Τουρκία. Τα βασικά κριτήρια για την επιλογή των δύο περιοχών ήταν η πυκνή θαλάσσια κυκλοφορία και το γεγονός ότι οι δύο μεγάλες μητροπολιτικές περιοχές των αντίστοιχων χωρών βρίσκονται σε αυτά τα παράλια.

Η μεθοδολογία εκτίμησης της επικινδυνότητας ατυχημάτων πετρελαιοκηλίδας που αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε στις δύο περιοχές μελέτης αποτελείται από (Σχήμα 3.1):

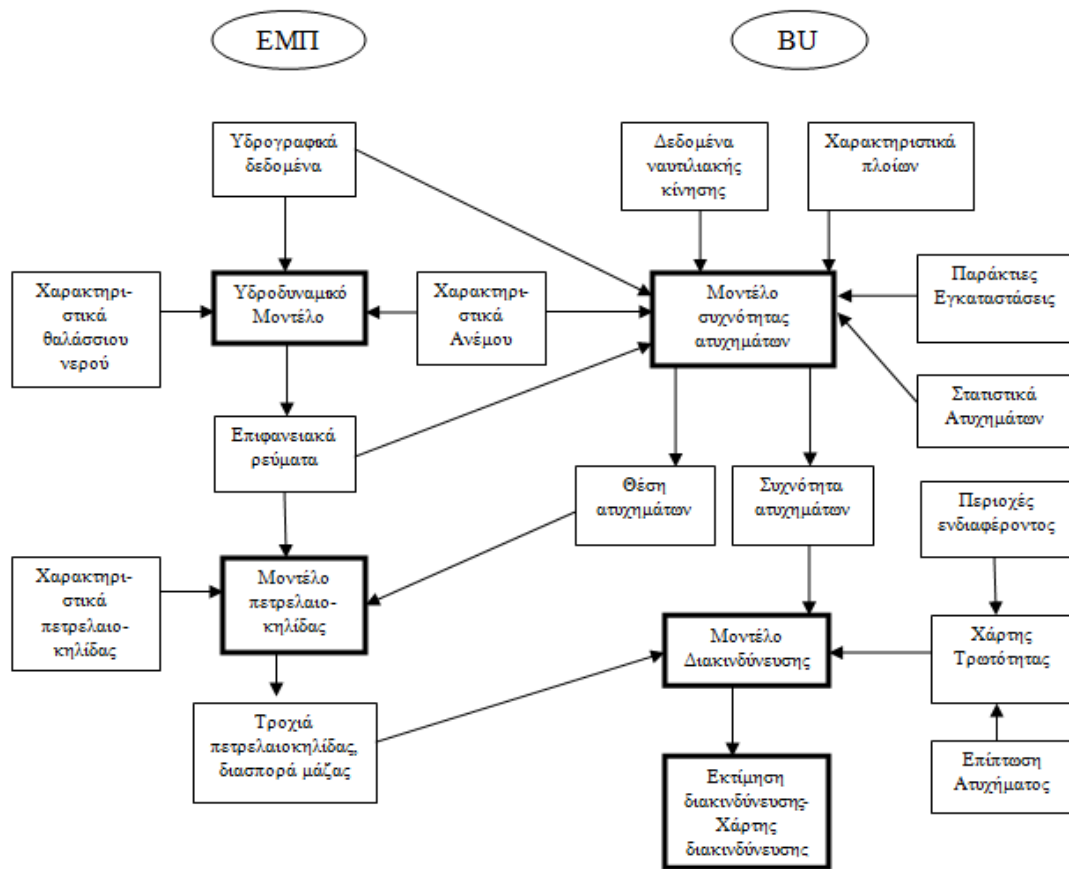
- 1) ένα υδροδυναμικό μοντέλο,
- 2) ένα μοντέλο πετρελαιοκηλίδας,
- 3) ένα μοντέλο ανάλυσης ατυχημάτων που υπολογίζει την πιθανότητα να συμβεί ένα ατύχημα πετρελαιοκηλίδας σε μια συγκεκριμένη θαλάσσια περιοχή και
- 4) ένα μοντέλο διακινδύνευσης που υπολογίζει τη χωρική διασπορά της διακινδύνευσης της πετρελαιοκηλίδας (Otay et al., 2013).

Τα δύο πρώτα μοντέλα αναπτύχθηκαν από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (NTUA), ενώ τα δύο τελευταία από το Bogazici University (BU) της Κωνσταντινούπολης.

#### **3.2.1 Υδροδυναμικοί υπολογισμοί**

Για τους υδροδυναμικούς υπολογισμούς (Stamou et al, 2013), οι οποίοι πραγματοποιήθηκαν με το FLOW-3DL (Stamou et al. 1999; 2007a; 2007b) χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου 49 σενάρια ανέμου, αυτό της νηνεμίας και 48 σενάρια διαφορετικής έντασης και διεύθυνσης ανέμου. Συγκεκριμένα τα 48 σενάρια προέκυψαν από τις οχτώ πιθανές διευθύνσεις ανέμου (B, BA, A, NA, N, ΝΔ,

Δ, ΒΔ) και τις έξι διαφορετικές εντάσεις ανέμου σε Beaufort (bf) (1 έως 6+) για κάθε πιθανή διεύθυνση.



**Σχήμα 3.1:** Σχηματική παρουσίαση της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε (πηγή: Stamou et al., 2013 - επεξεργασία: Κραγιπούλου, 2014)

### 3.2.2 Μοντέλο συχνότητας ατυχημάτων

Το μοντέλο ατυχημάτων που αναπτύχθηκε προβλέπει τη συχνότητα των θαλάσσιων ατυχημάτων λόγω ναυτιλιακών μεταφορών και τη γεωγραφική διασπορά της εκάστοτε τοποθεσίας τους. Η πρόβλεψη αυτή βασίζεται στις εξής παραμέτρους: (α) δεδομένα AIS (Automated Identification System), (β) δεδομένα θαλάσσιων μεταφορών, (γ) χαρακτηριστικά των πλοίων (μέγεθος, τύπος, φορτίο), (δ) παράκτιες εγκαταστάσεις, (ε) στατιστικά παλαιότερων ατυχημάτων, (ζ) υδρογραφικά δεδομένα (γεωμετρία και βαθυμετρία της περιοχής μελέτης), (η) χαρακτηριστικά του ανέμου (ταχύτητα και διεύθυνση) και (θ) τις συνιστώσες της ταχύτητας των επιφανειακών ρευμάτων ( $U_{surf}$  και  $V_{surf}$ ).

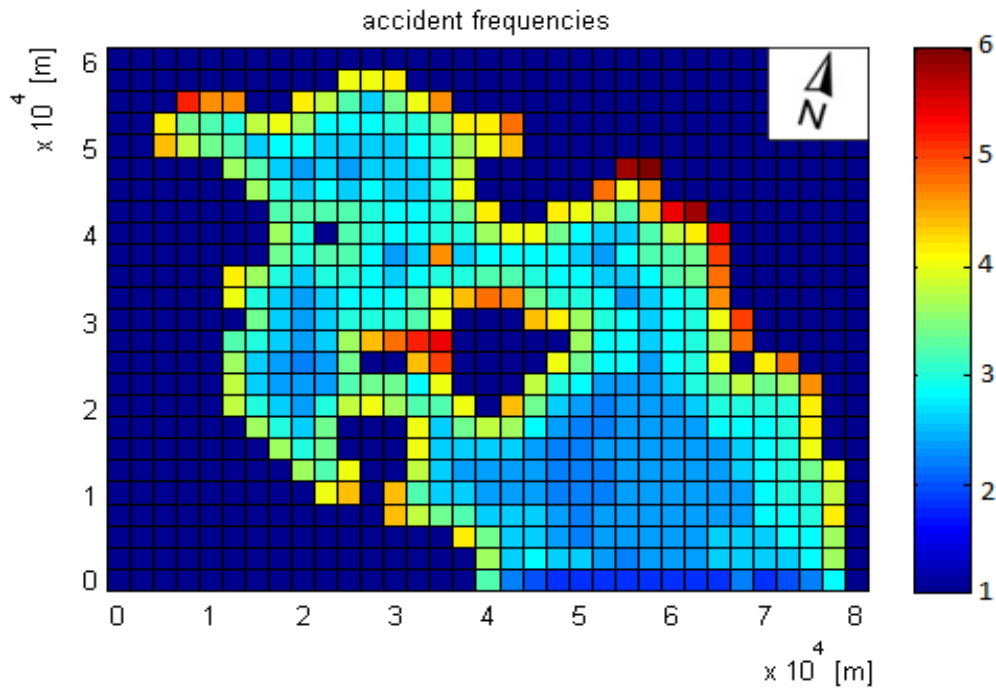
Η προκύπτουσα χωρική κατανομή των επιφανειακών ρευμάτων από τα 49 σενάρια σε συνδυασμό με τους υδρογραφικούς παράγοντες και τους παράγοντες πλοήγησης (Πίνακας 3.1) χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο συχνότητας ατυχημάτων, καθώς θεωρήθηκε ότι αποτελούν τους παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο τις συχνότητες των ατυχημάτων.

**Πίνακας 3.1:** Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη συχνότητα των ατυχημάτων, συσχετισμένοι με τα υδρογραφικά στοιχεία και τα χαρακτηριστικά πλοήγησης της περιοχής (πηγή: Otay et al., 2013 - επεξεργασία: Κραγιπούλου, 2014)

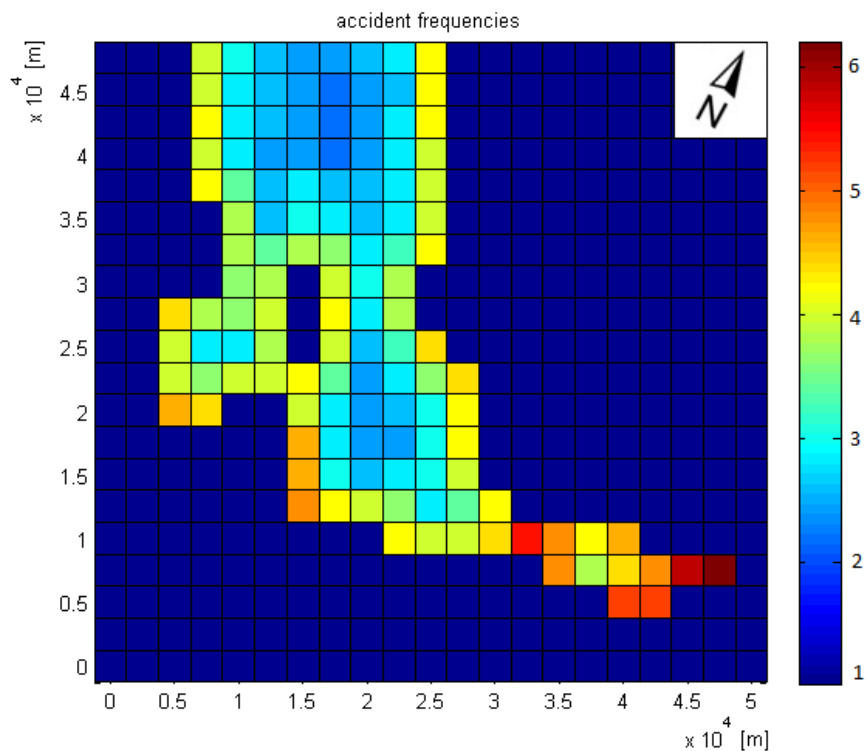
		Δείκτης Σχετικότητας							
Χαρακτηριστικό κελιού		1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Μέγεθος του ρεύματος</b>	<b>Πιθανότητα (Vmax &gt; Vcr)</b>	0.00–0.06	0.06–0.19	0.19–0.31	0.31–0.44	0.44–0.50	0.50–0.69	0.69–0.81	0.81–1.00
<b>Αναλογία αβαθών υδάτων (βάθος &lt; 5m)</b>	<b>Πιθανότητα (A<sub>5m</sub> &lt; A<sub>tot</sub>)</b>	0	0.00–0.15	0.15–0.30	0.30–0.45	0.45–0.60	0.60–0.75	0.75–0.90	0.90–1.00
<b>Απόσταση από την ακτή</b>	<b>Km</b>	>20	15-20	10-15	5-10	0-5			
<b>Δείκτης περιορισμού ελιγμών</b>	<b>Αριθμός παρακείμενων κελιών ξηράς</b>	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Πυκνότητα κυκλοφορίας πλοίων</b>	<b>Αριθμός πλοίων</b>	0	1-2	3-5	6-10	11-20	21-30	31-40	>40

Τα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 3.2 και 3.3) παρουσιάζουν τη σχετική συχνότητα ατυχημάτων που είναι πιθανό να συμβούν στο Σαρωνικό Κόλπο και στον κόλπο της Σμύρνης, βασισμένα στους παράγοντες του Πίνακα 3.1 και τη σχετική τους πιθανότητα να συμβούν. Όπως ήταν αναμενόμενο, η συχνότητα των ατυχημάτων βρέθηκε υψηλότερη κοντά στις παράκτιες περιοχές, όπου το βάθος του νερού είναι μικρότερο και η κίνηση των πλοίων μεγαλύτερη. Σύμφωνα με τα Σχήματα 3.2 και 3.3, προέκυψαν οι τέσσερις περιοχές που ξεχωρίζουν ως οι πιο πιθανές θέσεις για την εμφάνιση ατυχήματος σε κάθε κόλπο και αυτές οι ίδιες είναι που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο πετρελαιοκηλίδας.





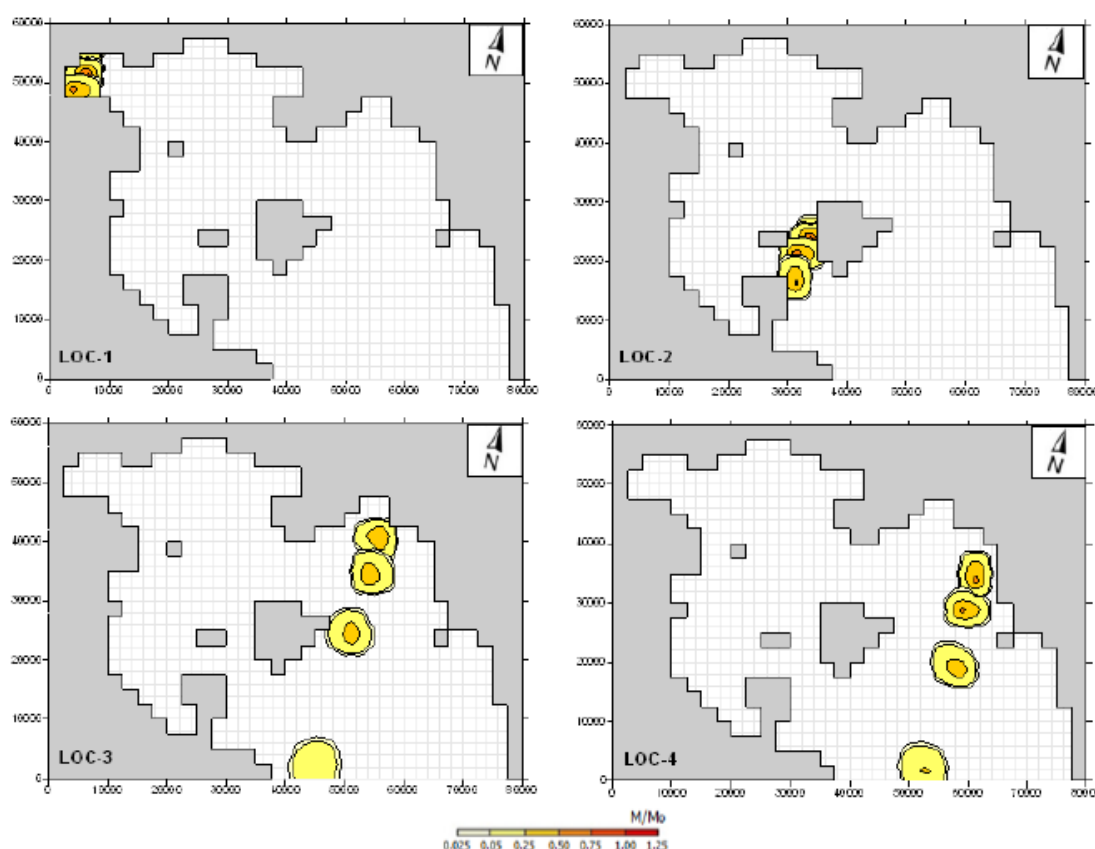
**Σχήμα 3.2:** Σχετική Συχνότητα Ατυχημάτων σε κλίμακα από 1 έως 6 στο Σαρωνικό Κόλπο (πηγή: Otay et al., 2013)



**Σχήμα 3.3:** Σχετική Συχνότητα Ατυχημάτων σε κλίμακα από 1 έως 6 στον Κόλπο της Σμύρνης (πηγή: Otay et al., 2013)

### 3.2.3 Υπολογισμοί μοντέλου πετρελαιοκηλίδας

Λαμβάνοντας υπόψη τα 49 σενάρια ανέμου και τις 4 πιο πιθανές θέσεις ατυχήματος για κάθε κόλπο αντίστοιχα, το μοντέλο πετρελαιοκηλίδας εφαρμόστηκε και έδωσε αποτελέσματα για  $49 \times 4 = 196$  σενάρια. Σε κάθε σενάριο η αρχική ποσότητα πετρελαίου ορίστηκε σε 1500 βαρέλια, που ισοδυναμούν με 197 τόνους. Για το Σαρωνικό Κόλπο οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της μεταπτυχιακής εργασίας (Παπαδονικολάκη, 2013). Αναλυτική περιγραφή του μοντέλου πετρελαιοκηλίδας OSM, αλλά και του υδροδυναμικού μοντέλου FLOW-3DL γίνεται στο Κεφάλαιο 6.



**Σχήμα 3.4:** Τροχιά και εξέλιξη πετρελαιοκηλίδας για τις 4 θέσεις ατυχήματος - Βόρειος άνεμος - 4 bf (Πηγή: Παπαδονικολάκη, 2013)

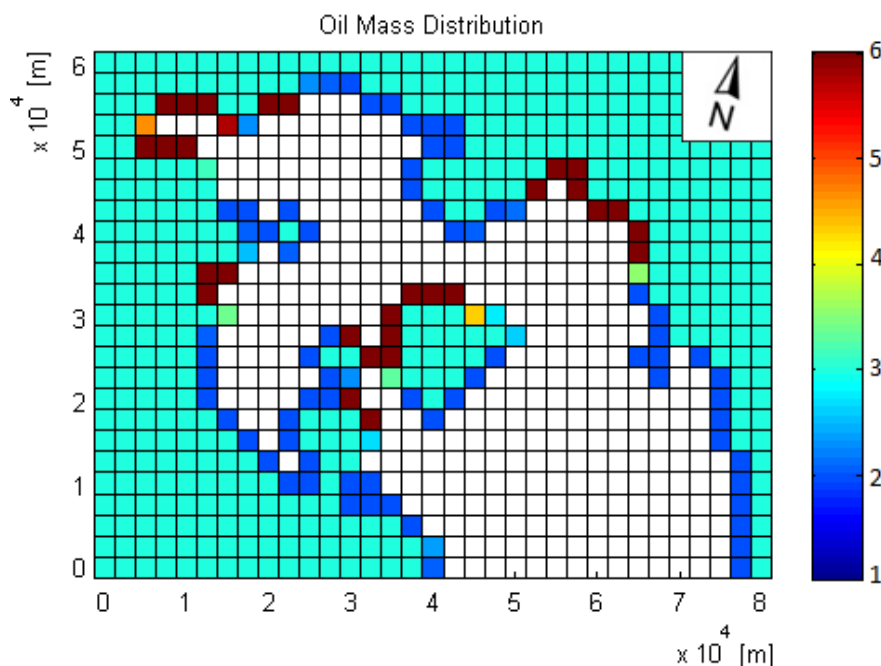
### 3.2.4 Ανάλυση επίπτωσης και μοντέλο εκτίμησης της επικινδυνότητας

Η επίπτωση των ατυχημάτων προσδιορίστηκε από την ανάλυση των παραμέτρων ευαισθησίας που περιλαμβάνουν: (α) Ειδικές Βιομηχανικές Περιοχές (θαλάσσιες περιοχές αλιείας, κλειστές περιοχές αλιείας, λιμένες ψαράδων και αλιευτικά καταφύγια, τουριστικές και ψυχαγωγικές εγκαταστάσεις, διυλιστήρια, εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, υποβρύχια καλώδια ρεύματος, εργοστάσια, ναυπηγεία, λιμάνια εμπορευματοκιβωτίων, φορτίων και επιβατών, μαρίνες και νεωκεία), και (β) Ειδικές Φυσικές Περιοχές (παράκτιοι φυσικοί κήποι, προστατευόμενες περιοχές, πολιτιστικές περιοχές, σημαντικές περιοχές ενδιαίτημάτων, θαλάσσια λιβάδια, περιοχές σημαντικών θαλάσσιων θηλαστικών και ορνιθοπανίδας).

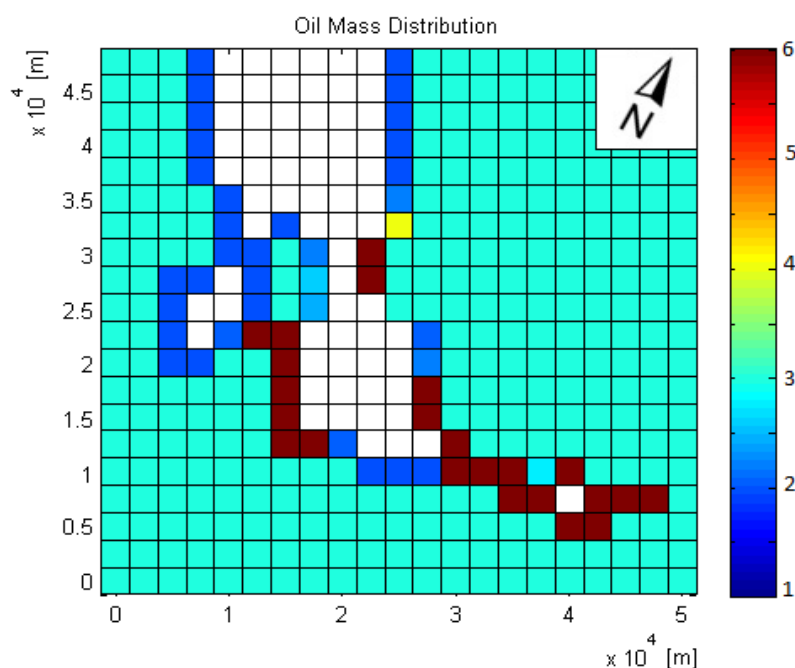
Η ευαισθησία της ακτής απέναντι στη μόλυνση από το πετρέλαιο εκφράζεται με την ύπαρξη ειδικών οικονομικών και οικολογικών περιοχών. Οι λεγόμενοι συντελεστές ευαισθησίας δίνονται ως συντελεστές βαρύτητας μετά από ειδικές μελέτες για κάθε κατηγορία ειδικής περιοχής (MRC, 2010). Στη συνέχεια πολλαπλασιάζονται με τους παράγοντες της επίπτωσης του πετρελαίου και συμβάλλουν στον τελικό υπολογισμό του δείκτη επικινδυνότητας (IMO 1997).

Η επικινδυνότητα των ατυχημάτων στο μοντέλο διακινδύνευσης περιγράφεται μέσω ενός Bayesian network model, όπως παρουσιάστηκε από τους Ulusu et al (2009), το οποίο υπολόγισε τη σχετική επικινδυνότητα σε ένα γεωγραφικό τμήμα. Πρόκειται δηλαδή για ένα πιθανολογικό γραφικό μοντέλο (ένα είδος στατιστικού μοντέλου) που αντιπροσωπεύει ένα σύνολο τυχαίων μεταβλητών και τις εξαρτήσεις τους μέσω ενός κατευθυνόμενου άκυκλου γραφήματος (DAG-directed acyclic graph). Συγκεκριμένα, κάθε κόμβος στο γράφημα αναπαριστά μια τυχαία μεταβλητή και κάθε βέλος ανάμεσα στους κόμβους τις πιθανολογικές εξαρτήσεις ανάμεσα στις αντίστοιχες τυχαίες μεταβλητές. Αυτές οι εξαρτήσεις στο γράφημα συχνά εκτιμώνται χρησιμοποιώντας γνωστές υπολογιστικές και στατιστικές μεθόδους. Έτσι, ένα Μπεϋζιανό δίκτυο συνδυάζει αρχές από τη θεωρία γραφημάτων, τη θεωρία πιθανοτήτων, την επιστήμη των υπολογιστών και της στατιστικής.

Τα Σχήματα 3.5, 3.6 παρουσιάζουν τα πιθανά επίπεδα έκθεσης των ακτών του Σαρωνικού Κόλπου και της Σμύρνης σε κίνδυνο μόλυνσης από πετρέλαιο, εκφρασμένα με βάση την επίπτωση από τα ατυχήματα πετρελαιοκηλίδων που είναι πιθανό να συμβούν. Αυτοί οι χάρτες επικινδυνότητας λαμβάνουν υπόψη τις επιπτώσεις των διάφορων συνιστωσών του μοντέλου, δηλαδή την πιθανολογική κατανομή του ανέμου και τα προκύπτοντα τρέχοντα συνήθη σενάρια του, την ανάλυση της συχνότητας των ατυχημάτων, την πρόβλεψη για την τύχη και τη συμπεριφορά της πετρελαιοκηλίδας και την ευαισθησία των παράκτιων περιοχών.



**Σχήμα 3.5:** Επίπτωση ατυχημάτων πετρελαιοκηλίδας στο Σαρωνικό Κόλπο (πηγή: Otay et al., 2013)



**Σχήμα 3.6:** Επίπτωση ατυχημάτων πετρελαιοκηλίδας στον Κόλπο της Σμύρνης (πηγή: Otay et al., 2013)

### 3.2.5 Συμπεράσματα έρευνας

Παρόλο που η άμεση επαλήθευση των αποτελεσμάτων δεν κατέστη δυνατή λόγω της έλλειψης μακροπρόθεσμων στατιστικών και χωρικής ανάλυσης των αρχείων των ατυχημάτων, προσδιορίστηκαν οι περιοχές υψηλού κινδύνου και στις δύο τοποθεσίες, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι τα πολυσύχναστα λιμάνια με πυκνή κυκλοφορία πλοίων και γνωστές περιοχές με περιορισμούς πλοήγησης εκτίθενται σε υψηλότερο κίνδυνο. Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη κατάλληλων σχεδίων έκτακτης ανάγκης σε περίπτωση πετρελαϊκού ρυπαντικού περιστατικού στο Αιγαίο Πέλαγος, ωστόσο απαιτείται περαιτέρω εργασία για την επέκταση της μεθοδολογίας. Επιπλέον, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του προτεινόμενου πλαισίου είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα και σε άλλες περιφερειακές θάλασσες με την προσαρμογή των επιμέρους συστατικών της μεθοδολογίας σε συγκεκριμένες τοπικές εισροές και προϋποθέσεις.

### 3.3 «Σύγκριση των προγραμμάτων GNOME, MEDSLIK και FLOW-3DL για τον υπολογισμό τροχιάς πετρελαιοκηλίδας»

Στόχος της διπλωματικής εργασίας του Ποτουρίδη (2013), είναι η αξιολόγηση και σύγκριση δύο εμπορικών προγραμμάτων υπολογισμού της εξέλιξης της τροχιάς πετρελαιοκηλίδας, με τα αποτελέσματα του προγράμματος FLOW-3DL/OSM που αναπτύχθηκε από τον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ (Stamou et al., 2013) και (Otay et al., 2013). Συγκεκριμένα, τα δύο εμπορικά προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι το MEDSLIK και το GNOME. Λεπτομερής περιγραφή των χαρακτηριστικών του MEDSLIK γίνεται στο Κεφάλαιο 5, ενώ σύντομη περιγραφή του GNOME, καθώς και άλλων εμπορικών προγραμμάτων γίνεται στο Κεφάλαιο 4.

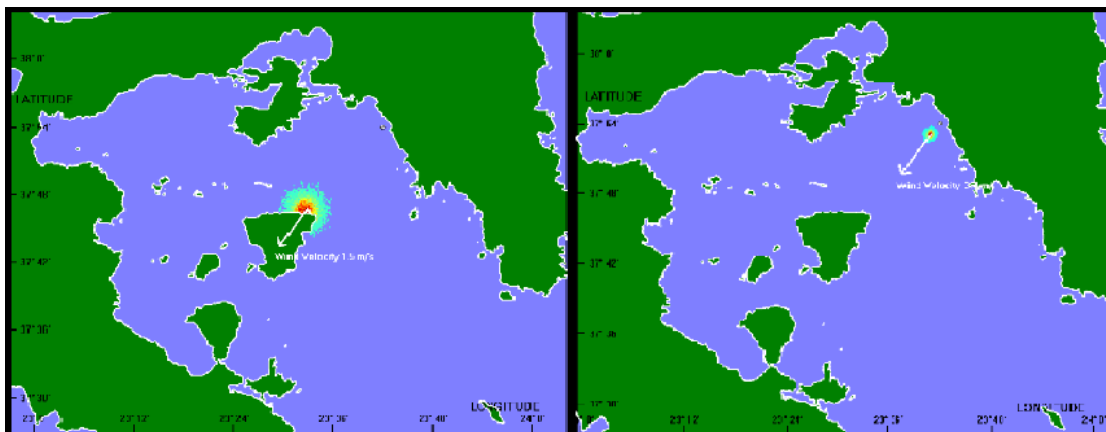
Ως περιοχή μελέτης για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε ο Σαρωνικός Κόλπος, λόγω της αυξημένης πιθανότητας θαλάσσιου ατυχήματος πετρελαιοκηλίδας, εξαιτίας της υψηλής ναυτιλιακής κίνησης που παρουσιάζει. Επίσης, στο Σαρωνικό Κόλπο είχε προηγηθεί η επιτυχής εφαρμογή του OSM (Παπαδονικολάκη, 2013) και κρίθηκε σημαντικό να φανεί η ανταπόκριση που έχουν τα άλλα δύο εμπορικά προγράμματα στις αντίστοιχες συνθήκες που επικρατούν στον κόλπο. Οι τέσσερις θέσεις πιθανών ατυχημάτων που επιλέχθηκαν είναι οι ίδιες που προέκυψαν από το μοντέλο εκτίμησης επικινδυνότητας που αναπτύχθηκε κατά την ερευνητική διαδικασία.

Για την επιλογή του πετρελαιοειδούς που διαρρέει, επιλέχθηκαν οι μέσες τιμές της βάσης δεδομένων κινήσεων πετρελαιοφόρων εντός του Σαρωνικού Κόλπου. Δηλαδή, επιλέχθηκε το μέσο εμπορικό πετρέλαιο πυκνότητας  $827 \text{ kg/m}^3$  και η ποσότητα διαρροής θεωρήθηκε ίση με 1500 barrels (=197 tons).

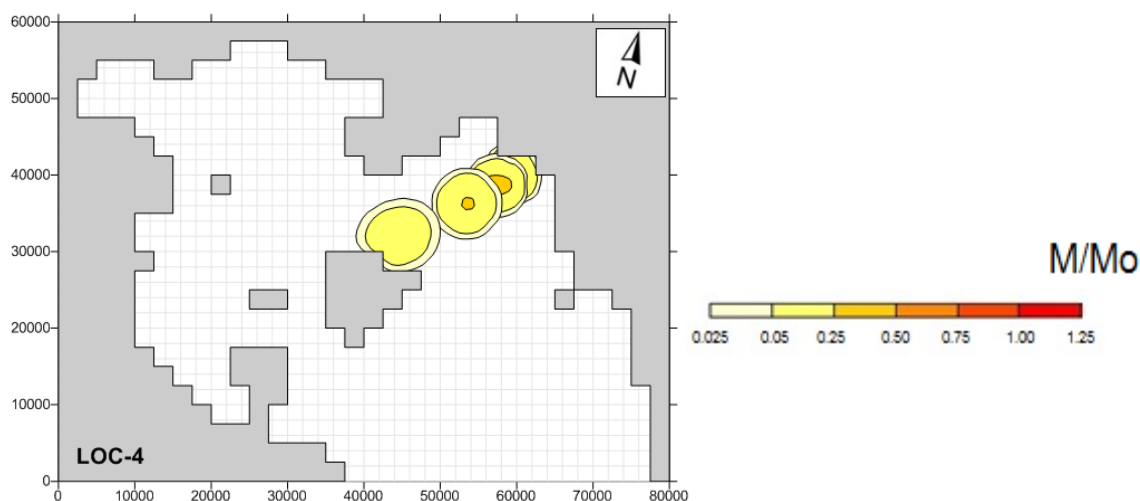
Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για τα ίδια σενάρια που εξετάστηκαν στο ερευνητικό πλαίσιο της διμερούς συνεργασίας Ελλάδας-Τουρκίας. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν 48 σενάρια ανέμου, έντασης που κυμαινόταν από 1-6 Beaufort. Οι 6 διαφορετικές αυτές εντάσεις εξετάστηκαν για τις 8 πιθανές διευθύνσεις ανέμου (B, BA, A, NA, N, NΔ, Δ, ΒΔ), για κάθε μία από τις 4 θέσεις πιθανών ατυχημάτων πετρελαιοκηλίδας. Συνολικά προέκυψαν 192 σενάρια διαρροής πετρελαίου σε κάθε πρόγραμμα. Παρατίθενται αποτελέσματα που προέκυψαν για το ίδιο σενάριο από την υπολογιστική διαδικασία:



Σχήμα 3.7: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο GNOME (πηγή: Ποτουρίδης, 2013)



Σχήμα 3.8: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο MEDSLIK (πηγή: Ποτουρίδης, 2013)



Σχήμα 3.9: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο OSM (πηγή: Ποτουρίδης, 2013)

### 3.3.1 Συμπεράσματα διπλωματικής εργασίας

Μέσα από τη σύγκριση των τριών προγραμμάτων έγινε εμφανές ότι καθοριστικό ρόλο παίζουν οι επιλεγόμενες παράμετροι. Με αλλαγή των παραμέτρων αλλάζουν αυτόματα και τα αποτελέσματα ακόμα και μέσα στο ίδιο πρόγραμμα. Σημαντικό ρόλο στην επιλογή του προγράμματος που θα χρησιμοποιήσει ένας ερευνητής διαδραματίζει το αντικείμενο που θέλει να εξετάσει. Ανάλογα με την ποιότητα, την ταχύτητα και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που επιθυμεί να εξάγει θα πρέπει να κάνει και την αντίστοιχη επιλογή. Οι διαφορές που προέκυψαν ανάμεσα στα τρία προγράμματα αφορούν τη μορφή που παίρνει στο πέρας του χρόνου προσομοίωσης η πετρελαιοκηλίδα, στην εξάπλωση του ρυπαντή πετρελαίου μέσα στο θαλάσσιο περιβάλλον και στην απόσταση που έχει διανύσει κατά μέσο όρο κάθε σωματίδιο της πετρελαιοκηλίδας για δεδομένο χρονικό διάστημα. Επιπλέον, προτείνεται η ανάπτυξη ενός χάρτη ακριβείας, με μικρά χωρικά βήματα (όπως αυτός που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική για το Θερμαϊκό Κόλπο), για χρήση στο OSM και εν συνεχεία σύγκριση ξανά των προγραμμάτων, όπως επίσης θα ήταν σημαντική η επαλήθευση ενός πραγματικού σεναρίου διαρροής και από τα τρία προγράμματα.

## 3.4 «Εκτίμηση επικινδυνότητας ατυχημάτων πετρελαιοκηλίδας – Εφαρμογή δύο μεθοδολογιών στο Σαρωνικό Κόλπο»

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας της Κραγιοπούλου (2014) είναι η εφαρμογή και η σύγκριση δύο μεθοδολογιών πάνω στην εκτίμηση επικινδυνότητας ατυχημάτων στο Σαρωνικό Κόλπο, δίνοντας ως αποτέλεσμα τις περιοχές που είναι περισσότερο επιρρεπείς ή ευαίσθητες στη δημιουργία πετρελαιοκηλίδας λόγω ναυτικών ατυχημάτων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα ενός υδροδυναμικού μοντέλου και ενός μοντέλου πετρελαιοκηλίδας καθώς και πολλά άλλα στοιχεία που απαιτούσε η κάθε μεθοδολογία. Ο Σαρωνικός Κόλπος επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης καθώς συγκεντρώνει τρία σημαντικά στοιχεία: μεγάλη εμπορική κίνηση, περιβαλλοντική αξία και τουριστικό ενδιαφέρον.

Η εκτίμηση της επικινδυνότητας, που μελετάται σε αυτήν την εργασία, αποτελεί μαζί με τη διαχείριση της επικινδυνότητας την ευρύτερη έννοια της ανάλυσης της επικινδυνότητας. Η εκτίμηση της επικινδυνότητας/διακινδύνευσης (risk assessment) αναφέρεται στις ενέργειες εκείνες που προλαμβάνουν ένα πιθανό ατύχημα και περιλαμβάνει την αναγνώριση του κινδύνου (hazard identification) και την αξιολόγησή του ως προς τις επιπτώσεις που θα επιφέρει στο φυσικό και ανθρώπινο περιβάλλον (vulnerability analysis). Η διαχείριση της επικινδυνότητας με τη σειρά της αναφέρεται στις ενέργειες εκείνες που έπονται ενός πραγματικού ατυχήματος. Συγκεκριμένα, συμβάλλει ενεργά στη λήψη απόφασης για την εφαρμογή των κατάλληλων μέτρων με σκοπό την έγκαιρη και σωστή αντιμετώπιση του ατυχήματος, τον μετριασμό των επιπτώσεών του και μακροπρόθεσμα την επαναφορά του περιβάλλοντος στην αρχική ή και σε βελτιωμένη κατάσταση (response and recovery actions).

Στις μεθοδολογίες που εφαρμόστηκαν, η διακινδύνευση υπολογίστηκε ως το γινόμενο του ενδεχόμενου κινδύνου ατυχήματος και της τρωτότητας της περιοχής έναντι του ατυχήματος αυτού:

$$\text{Επικινδυνότητα/Διακινδύνευση} = \text{Κίνδυνος} \times \text{Τρωτότητα}$$

$$(\text{Risk} = \text{Hazard} \times \text{Vulnerability}) \quad (3.1)$$

Διευκρινίζεται ότι ως «κίνδυνος» ορίζεται η «απειλή» (εδώ η πετρελαιοκηλίδα) ενώ ως «διακινδύνευση» ορίζεται ο συνδυασμός της πιθανότητας να συμβεί η απειλή και των επιπτώσεων αυτής.

Μέσα από μία μελέτη εκτίμησης της επικινδυνότητας προκύπτει η δημιουργία ενός χάρτη επικινδυνότητας/διακινδύνευσης, που υποδεικνύει τις πιο πιθανές και τις πιο ευαίσθητες περιοχές έναντι ατυχήματος πετρελαιοκηλίδας.

Ως πρώτη μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 3.2 (Stamou et al., 2013) και (Otay et al., 2013), τα αποτελέσματα της οποίας συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της δεύτερης μεθοδολογίας που περιγράφεται στην παράγραφο 3.4.1, ώστε να προκύψει ένας τελικός χάρτης επικινδυνότητας για το Σαρωνικό Κόλπο.

#### 3.4.1 Παρουσίαση της 2<sup>ης</sup> Μεθοδολογίας

Η 2<sup>η</sup> μεθοδολογία βασίζεται στη χρήση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, γνωστά ως GIS (Geographic Information Systems). Η χαρακτηριστική δυνατότητα που παρέχουν τα GIS είναι αυτή της σύνδεσης της χωρικής με την περιγραφική πληροφορία. Πρόκειται δηλαδή για ένα σύστημα διαχείρισης χωρικών δεδομένων (spatial data) και συσχετισμένων ιδιοτήτων. Στην πιο αυστηρή μορφή του είναι ένα ψηφιακό σύστημα, ικανό να ενσωματώσει, αποθηκεύσει, προσαρμόσει, αναλύσει, επεξεργαστεί και παρουσιάσει γεωγραφικά συσχετισμένες (geographically-referenced) πληροφορίες. Σε πιο γενική μορφή, ένα ΣΓΠ είναι ένα εργαλείο "έξυπνου χάρτη", το οποίο επιτρέπει στους χρήστες του να αποτυπώσουν μια περίληψη του πραγματικού κόσμου, να δημιουργήσουν διαδραστικά ερωτήσεις χωρικού ή περιγραφικού χαρακτήρα (αναζητήσεις δημιουργούμενες από τον χρήστη), να αναλύσουν τα χωρικά δεδομένα (spatial data), να τα προσαρμόσουν και να τα

αποδώσουν σε αναλογικά μέσα (εκτυπώσεις χαρτών και διαγραμμάτων) ή σε ψηφιακά μέσα (αρχεία χωρικών δεδομένων, διαδραστικοί χάρτες). Τα συστήματα GIS, όπως και τα συστήματα CAD, αποτυπώνουν χωρικά δεδομένα σε γεωγραφικό, χαρτογραφικό ή καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

Ακολουθώντας την εξίσωση της (3.1), ο κίνδυνος υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη τα εξής στοιχεία του Σαρωνικού κόλπου:

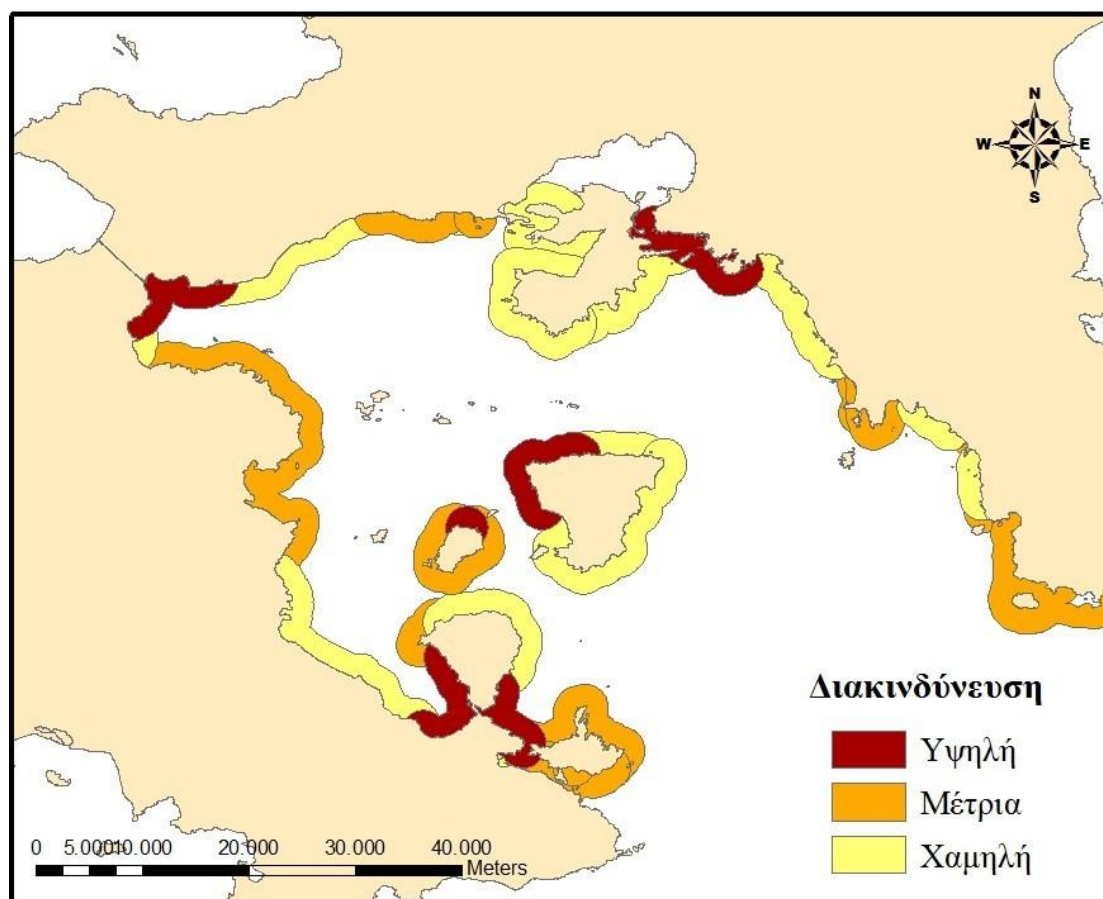
- 1) τη βαθυμετρία,
- 2) τα λιμάνια (ταξινομημένα ως προς την ναυτιλιακή κίνηση που παρουσιάζουν, τις χρήσεις τους αλλά και το μέγεθος των πλοίων που εξυπηρετούν),
- 3) τα ατυχήματα πετρελαιοκηλίδας που συνέβησαν κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας (2003-2012),
- 4) τις βαριές παράκτιες βιομηχανικές μονάδες,
- 5) τις οδούς κυκλοφορίας των πλοίων και
- 6) τα αποτελέσματα (επιφανειακά θαλάσσια ρεύματα για 49 διαφορετικά σενάρια ανέμου) του υδροδυναμικού μοντέλου FLOW-3DL.

Η τρωτότητα αντίστοιχα υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη τα εξής (σύμφωνα με τη βάση «Φιλότης» και τα «Δημόσια, Ανοικτά Δεδομένα»):

- 1) τις χρήσεις γης γύρω από την περιοχή του Σαρωνικού κόλπου,
- 2) τις παραλίες που έχουν χαρακτηριστεί με γαλάζια σημαία,
- 3) τις περιοχές αλιείας,
- 4) τις περιοχές που ανήκουν στο πρόγραμμα Natura,
- 5) τους βιότοπους Corine και
- 6) τα Τοπία Ιδιαίτερου Φυσικού Κάλλους.

Συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω δεδομένα με τη χρήση εργαλείων του GIS (spatial analyst, buffer wizard), προέκυψε ο παρακάτω χάρτης διακινδύνευσης, στον οποίο παρουσιάζονται οι περιοχές που κινδυνεύουν περισσότερο από ατύχημα πετρελαιοκηλίδας. Οι περιοχές αυτές, σύμφωνα με την παραπάνω μεθοδολογία, είναι η περιοχή γύρω από το λιμάνι του Πειραιά, οι βορειοδυτικές ακτές της Αίγινας, η περιοχή κοντά στα Ίσθμια καθώς και η νότια περιοχή της χερσονήσου των Μεθάνων (Χάρτης 3.1).





**Χάρτης 3.1** Τελικός χάρτης διακινδύνευσης/επικινδυνότητας ατυχήματος πετρελαιοκηλίδας στο Σαρωνικό Κόλπο (risk map) (πηγή: Κραγιοπούλου, 2014)

### 3.4.2 Συμπεράσματα διπλωματικής εργασίας

Από την εφαρμογή των δύο συγκρινόμενων μεθοδολογιών προκύπτει πως έχουν το σημαντικό χαρακτηριστικό το πλαίσιό τους να μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα και σε άλλες περιοχές προσαρμόζοντας όσα στοιχεία της μεθοδολογίας πρέπει στις συνθήκες και τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε προς μελέτη περιοχής. Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, σε σύγκριση με τη χρήση ενός Μπεϋζιανού δικτύου, αποδεικνύονται ιδανικά για την διαχείριση όλων των φάσεων μιας κατάστασης έκτακτης ανάγκης, όπως είναι ένα ατύχημα πετρελαιοκηλίδας, ενώ ο συνδυασμός τους με τις δυνατότητες της τηλεπισκόπησης θα έδινε εξαιρετικά πολύτιμα αποτελέσματα. Επίσης, υπερέχει στο γεγονός ότι μπορεί να προσφέρει μια πιο ολοκληρωμένη μελέτη ενός ατυχήματος πετρελαιοκηλίδας, καθώς με την προσθήκη των κατάλληλων δεδομένων θα μπορούσε να συνεισφέρει και στο στάδιο αντιμετώπισης ενός πραγματικού ατυχήματος. Τέλος, το GIS υπερέχει στο γεγονός ότι καταφέρνει την ένωση όλων των διαθέσιμων δεδομένων σε ένα σύστημα (data incompatibility) ακόμα κι αν προέρχονται από διαφορετικούς φορείς και είναι διαφορετικές μορφές αρχείων ή αρχεία σε διαφορετικές συντεταγμένες. Αυτό είναι ένα στοιχείο που πέρα από την ευκολία που προσφέρει, μπορεί να εξοικονομήσει πολύτιμο χρόνο στους ειδικούς, ιδιαίτερα αν πρόκειται για περιστατικό πραγματικού ατυχήματος όπου η άμεση ανταπόκριση είναι κρίσιμη σε τέτοιες καταστάσεις. Από την άλλη πλευρά ένα μοντέλο βασισμένο στην Μπεϋζιανή θεωρία είναι πιο

αναλυτικό και τα αποτελέσματά του πιο λεπτομερή και συγκεκριμένα. Καθώς ένα δίκτυο Bayesian αναπαριστά τις σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών του συστήματος με συνδετικά τόξα είναι εύκολο να αναγνωριστεί η εξάρτηση ή η ανεξαρτησία μεταξύ των διαφόρων κόμβων και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη γνώση αιτιωδών σχέσεων και μπορεί κανείς με αυτόν τον τρόπο να κατανοήσει ένα πρόβλημα και να προβλέψει τις συνέπειες μιας παρέμβασης.

## 4. Υφιστάμενα μοντέλα πετρελαιοκηλίδας

### 4.1 Εισαγωγή

Για την πρόληψη και την αντιμετώπιση των πετρελαιοκηλίδων έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα με διαφορετικούς στόχους και προσεγγίσεις ως προς τις διεργασίες και την εξέλιξη μιας πετρελαιοκηλίδας. Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται η παρουσίαση των βασικών αρχών λειτουργίας των μοντέλων, περιγράφοντας τα είδη και τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών κατηγοριών στις οποίες χωρίζονται (iTac (2008), Technical Paper "Use of Models in Oil Spill Response"). Παρουσιάζονται τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα σε κάθε κατηγορία και περιγράφονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά τους, σημειώνοντας ότι υπάρχει δυνατότητα να ανήκουν σε παραπάνω από μία κατηγορίες τα καθένα.

Τα μοντέλα εκτίμησης της συμπεριφοράς των πετρελαιοκηλίδων χρησιμοποιούνται για να προβλεφθεί η εξέλιξη και η συμπεριφορά των πετρελαιοκηλίδων στο νερό. Είναι χρήσιμα για την ενίσχυση σε περίπτωση ατυχήματος διαρροής πετρελαίου, τόσο στον καταρτισμό σχεδίου έκτακτης ανάγκης, όσο και στην ανάπτυξη μέτρων αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων. Η μοντελοποίηση των περιστατικών διαρροής πετρελαίου μπορεί επίσης να αποτελέσει ένα εργαλείο ζωτικής σημασίας για την υποστήριξη των αρχικών σταδίων των πραγματικών εργασιών αντιμετώπισης και περιορισμού ενός περιστατικού και να λειτουργήσει ως ένα επιπλέον μέσο παρακολούθησης της κηλίδας κατά τη διάρκεια περιόδων όπου η οπτική παρατήρηση δεν καθίσταται εφικτή.

Η τροχιά μιας πετρελαιοκηλίδας μπορεί να υπολογιστεί σε ένα σύστημα αναφοράς με το συνδυασμό των δεδομένων που αφορούν τον άνεμο και τις τρέχουσες συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Η καταγραφή αυτής της πληροφορίας γινόταν ιστορικά με το χέρι πάνω σε ναυτικούς χάρτες, όπου και προέκυπταν οι εκτιμήσεις για την τροχιά της πετρελαιοκηλίδας. Με την έλευση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, αναπτύχθηκε λογισμικό για την πρόβλεψη της τροχιάς και την εκτίμηση, μέσω περίπλοκων αλγορίθμων, της εξέλιξης και της συμπεριφοράς των πετρελαιοκηλίδων στο νερό.

Τα τελευταία 40 χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα πρόβλεψης τροχιάς πετρελαιοκηλίδας. Ποικίλλουν ως προς την πολυπλοκότητα, τη δυνατότητα εφαρμογής στην τοποθεσία και την ευκολία χρήσης. Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες μοντέλων πετρελαιοκηλίδας. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα μοντέλα που εκτιμούν τις αλλαγές που υφίσταται το προφίλ του πετρελαίου με την πάροδο του χρόνου, αφού αυτό διαρρεύσει στο θαλάσσιο περιβάλλον, αλλά δεν προβλέπουν την πιθανή μετακίνηση της κηλίδας. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα μοντέλα στα οποία, εκτός από την πρόβλεψη της αλλαγής των ιδιοτήτων του πετρελαίου, υπολογίζεται και η προβλεπόμενη πορεία μιας κηλίδας με την πάροδο του χρόνου και μπορεί να παρασταθεί σε ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS). Τα συγκεκριμένα προγράμματα επιτρέπουν επίσης την εμφάνιση συνοδευτικών πληροφοριών σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Για παράδειγμα, μια πετρελαιοκηλίδα μπορεί να παρασταθεί σε κλασσικά διαγράμματα πλοίων, με ένα εύρος περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών πληροφοριών για

την ευαισθησία, την τοποθεσία των μέσων αντίδρασης και με σημαντικές πληροφορίες για την πρόσβασή της μέσω δρόμων και της ακτογραμμής.

## 4.2 Τύποι μοντέλων

### 4.2.1 Μοντέλα Oil Weathering

Πρόκειται για μοντέλα που προβλέπουν τις αλλαγές στα χαρακτηριστικά του πετρελαίου, οι οποίες μπορούν να συμβούν με την πάροδο του χρόνου, υπό την επίδραση ενός εύρους από περιβαλλοντικές συνθήκες και παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία του νερού, η ταχύτητα του ανέμου, το ύψος κύματος, η αλατότητα, η συγκέντρωση ιζήματος εντός θάλασσας, οι οποίες εισάγονται από το χρήστη. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής του τύπου του πετρελαίου που διαρρέει από τη βάση δεδομένων του μοντέλου. Το μοντέλο υπολογίζει στη συνέχεια το ποσοστό της κηλίδας που εξατμίστηκε, που γαλακτωματοποιήθηκε και που εξαπλώθηκε λόγω διασποράς. Τα μοντέλα αυτά είναι συνήθως εύκολα στη χρήση και δεν απαιτούν μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους. Διαδεδομένα μοντέλα που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι το SIMPAR, το ADIOS/ADIOS2, το GNOME και το OWM.

### 4.2.2 Ντετερμινιστικά μοντέλα

Πρόκειται για μοντέλα που χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν την τροχιά μιας πετρελαιοκηλίδας με την πάροδο του χρόνου και συνήθως εκτιμούν την αλλαγή των ιδιοτήτων του πετρελαίου κάτω από συγκεκριμένες υδροδυναμικές και μετεωρολογικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα στα οποία καταλήγουν περιλαμβάνουν την προβλεπόμενη τροχιά της κηλίδας και τις εκτιμήσεις όσον αφορά τον όγκο, τη διασπορά, τη γαλακτωματοποίηση και την εξάτμιση της κηλίδας με την πάροδο του χρόνου. Επιπλέον, παρέχουν λεπτομέρειες για την περιοχή που συνέβη η διαρροή, για τις αλλαγές στις ιδιότητες του πετρελαίου (π.χ. για το ιξώδες και το σημείο ανάφλεξης), για πιθανές τοποθεσίες όπου πλήττει τις ακτές και σε τι ποσότητα και για το συνολικό μήκος ακτογραμμής που προσβάλλεται. Διαδεδομένα μοντέλα που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι το OSIS, το SIMAP, το GNOME και το MEDSLIK, που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία και θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5.

### 4.2.3 Στοχαστικά μοντέλα

Πρόκειται για μοντέλα τα οποία υπολογίζουν την πιθανότητα μια πετρελαιοκηλίδα να επηρεάσει τη θάλασσα και την ακτή σε διαφορετικές χρονικές περιόδους που ορίζονται από το χρήστη. Για τα μοντέλα αυτά απαιτούνται ιστορικά ανεμολογικά δεδομένα που περιέχουν τη συχνότητα εμφάνισης της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου. Με βάση τα ανεμολογικά δεδομένα εκτελούνται όλα τα πιθανά σενάρια και υπολογίζεται η πιθανότητα η τροχιά του πετρελαίου να έχει μια συγκεκριμένη εξέλιξη. Τα αποτελέσματα του μοντέλου παρουσιάζουν την πιθανότητα μιας περιοχής να προσβληθεί από την κηλίδα, αλλά όχι την ποσότητα πετρελαίου σε αυτή και δείχνουν την πιθανότητα μερικές περιοχές να είναι σε μεγαλύτερο κίνδυνο κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων εποχών. Επιπλέον, τα στοχαστικά μοντέλα μπορούν να

παρέχουν διαγράμματα συναρτήσεως του χρόνου, τα οποία απεικονίζουν το χρόνο που απαιτείται για το πετρέλαιο, ώστε να διανύσει μια συγκεκριμένη απόσταση ή μέχρι να προσαιγιαλωθεί. Διαδεδομένα μοντέλα που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι το OILMAP, το SIMAP και το OSCAR.

#### 4.2.4 Μοντέλα *Hind-Cast*

Πρόκειται για μοντέλα που αντιστρέφουν τη διαδικασία των ντετερμινιστικών μοντέλων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της προέλευσης μιας διαρροής όταν το σημείο πηγής ή απελευθέρωσης δεν είναι γνωστό. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει τα μοντέλα OSCAR, SIMAP και MEDSLIK.

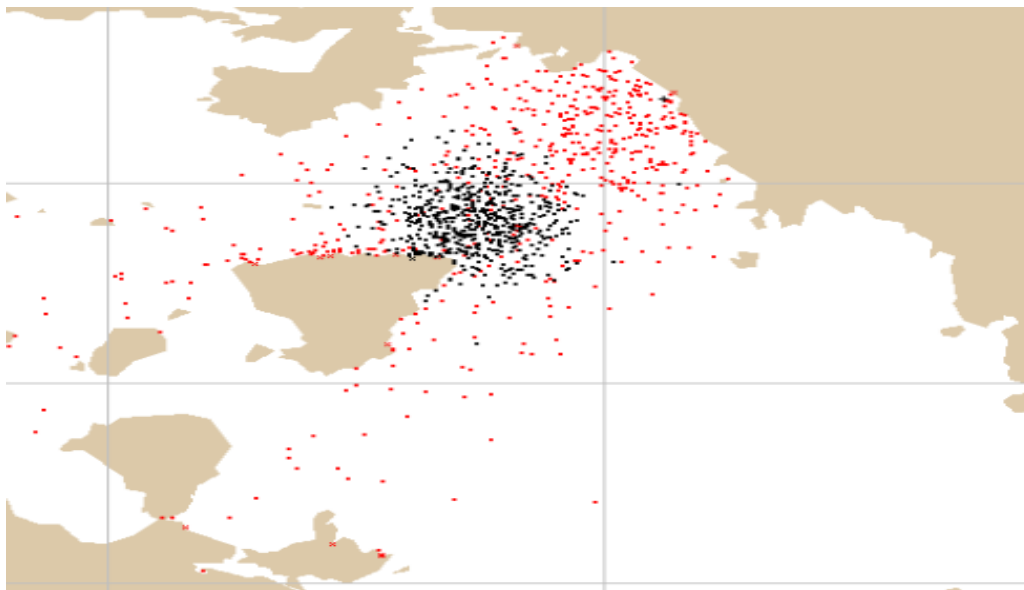
#### 4.2.5 Μοντέλα τριών διαστάσεων (3D)

Πρόκειται για μοντέλα τα οποία κάνουν εκτιμήσεις για το προφίλ και την τροχιά της πετρελαιοκηλίδας σε 3 διαστάσεις. Τα μοντέλα αυτά χρειάζονται αναλυτικότερα δεδομένα για να είναι ακριβής η πρόβλεψη, καθώς τα συστατικά του πετρελαίου αντιδρούν διαφορετικά κάτω από την επιφάνεια του νερού. Τα σωματίδια πετρελαίου που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του νερού κινούνται μέσα σε ένα πλέγμα τριών διαστάσεων που δείχνει τη θέση τους κάθε χρονική στιγμή και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεών τους στο νερό. Επιπλέον, υπάρχουν τρισδιάστατα μοντέλα που ειδικεύονται στην προσομοίωση υποθαλάσσιων ρυπαντών. Τα μοντέλα προσομοίωσης τριών διαστάσεων απαιτούν πολύπλοκα δεδομένα και λεπτομερή περιγραφή των ιδιοτήτων του πετρελαίου προκειμένου να παρέχουν μια αξιόπιστη εκτίμηση για το πώς θα συμπεριφερθεί το πετρέλαιο και πώς θα μετακινηθεί και σε βάθος. Στην κατηγορία των μοντέλων τριών διαστάσεων ανήκουν το OSERIT, το MOHID, το JAG3D, το SIMAP και το MEDSLIK.

### 4.3 Μοντέλα πετρελαιοκηλίδας

#### 4.3.1 GNOME (General NOAA Oil Modeling Environment)

Το GNOME (πηγή: [response.restoration.noaa.gov/gnome](http://response.restoration.noaa.gov/gnome)) είναι ένα φιλικό στο χρήστη μοντέλο πετρελαιοκηλίδας που προσομοιώνει την κίνηση της πετρελαιοκηλίδας λόγω ανέμων, ρευμάτων, παλίρροιας και διάδοσης. Αναπτύχθηκε από την HAZMAT (Hazardous Materials Response Division) της NOAA OR&R (National Oceanic and Atmospheric Administration Office of Response and Restoration) δημιουργώντας ένα εργαλείο πρόβλεψης της τροχιάς με σκοπό την όσο το δυνατό αμεσότερη επέμβαση σε περίπτωση ατυχήματος. Με το GNOME μπορεί κανείς να προβλέψει το πώς ο άνεμος, τα ρεύματα και άλλες διεργασίες μπορεί να μετακινήσουν και να εξαπλώσουν την πετρελαιοκηλίδα στο νερό, να παρατηρήσει πώς οι προβλεπόμενες τροχιές επηρεάζονται από την αβεβαιότητα στις παρατηρήσεις και τις προβλέψεις στα ρεύματα και τους ανέμους και να μάθει πώς θα επηρεαστεί η σύσταση της πετρελαιοκηλίδας με την πάροδο του χρόνου, καθώς παραμένει στην επιφάνεια του νερού. Μετά από την επεξεργασία κάθε σεναρίου το πρόγραμμα παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε μορφή ταινίας επάνω στο χάρτη της περιοχής μελέτης.



**Σχήμα 4.1:** Παράδειγμα εξάπλωσης πετρελαιοκηλίδας στο GNOME, με άνεμο 1bf, NE, μετά από πολύ χρόνο (πηγή: Στέφανος Ποτουρίδης, 2013, Σύγκριση των προγραμμάτων GNOME, MEDSLIK και FLOW-3DL για τον υπολογισμό τροχιάς πετρελαιοκηλίδας)

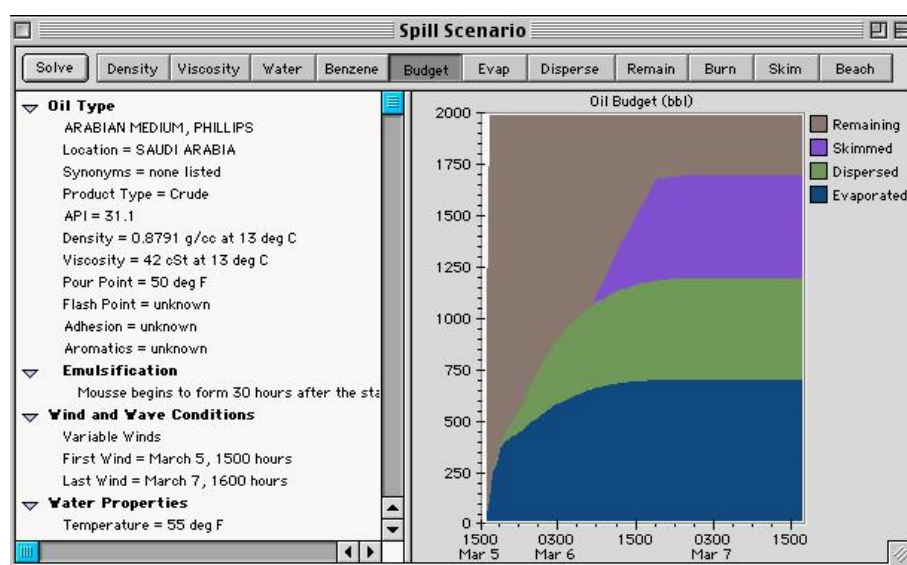
#### 4.3.2 SIMAP

Το SIMAP (πηγή: SIMAP, Integrated Oil Spill Impact Model System) είναι ένα τρισδιάστατο μοντέλο που αναπτύχθηκε από την ASA (Applied Science Associates) και εκτιμά τη φυσική εξέλιξη και τις βιολογικές διεργασίες μιας πετρελαιοκηλίδας. Ανήκει και στις κατηγορίες των hind-cast και των στοχαστικών μοντέλων, καθώς μπορεί να υπολογίσει τρισδιάστατα και την πιθανή επίπτωση μιας πετρελαιοκηλίδας με την πάροδο του χρόνου. Ο χρήστης εισάγει στο μοντέλο μετεωρολογικά και υδροδυναμικά στοιχεία και σε συνδυασμό με ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS), το οποίο περιλαμβάνει μια εξελιγμένη βάση δεδομένων αποτελούν τα απαραίτητα στοιχεία εισόδου ώστε να προκύψουν αποτελέσματα από το μοντέλο. Η βάση δεδομένων περιέχει στοιχεία που αφορούν τα περιβαλλοντικά και βιολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής που γίνεται η διαρροή, τα οποία είναι ο χάρτης και ο τύπος της ακτογραμμής, η βαθυμετρία, η οικολογία της περιοχής, η πιθανή εποχιακή κάλυψη από πάγο, η θερμοκρασία, η αλατότητα και τη δυνατότητα σύστασης της εποχιακής ή μέσης αφθονίας ανά είδος και τύπο οικοτόπου για κάθε περιοχή του πλανήτη. Περιλαμβάνει, επίσης, τις φυσικοχημικές ιδιότητες διαφορετικών τύπων πετρελαίων, δίνοντας τη δυνατότητα στο χρήστη να προσθέσει τα χαρακτηριστικά διαφορετικού πετρελαιοειδούς ή να διπλασιάσει ένα ήδη υπάρχον πετρελαιοειδές και να πραγματοποιήσει αλλαγές στις ιδιότητές τους, διατηρώντας ωστόσο τα αρχικά δεδομένα.

#### 4.3.3 ADIOS (Automated Data Inquiry for Oil Spills)

Το ADIOS (πηγή: Oil Spill Modeling, [oceanecology.ca/oil.htm](http://oceanecology.ca/oil.htm)) είναι ένα φιλικό στο χρήστη μοντέλο τύπου Oil Weathering που αναπτύχθηκε από τη NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Το μοντέλο έχει ενσωματωμένη μία βάση

δεδομένων που περιέχει περισσότερα από 1000 είδη αργού πετρελαίου και παραγώγων του και παρέχει γρήγορες εκτιμήσεις για την εξέλιξη της συμπεριφοράς και των χαρακτηριστικών του πετρελαιοειδούς που έχει διαρρεύσει στο θαλάσσιο περιβάλλον. Το μοντέλο μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της αποδοτικότητας που θα έχει η πιθανή χρήση κοινών τεχνικών αντιμετώπισης της κηλίδας, όπως τα χημικά διασκορπιστικά, οι πετρελαιοσυλλέκτες ή η καύση του πετρελαίου, οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά στην παράγραφο 2.6. Το ADIOS χρησιμοποιεί μαθηματικές εξισώσεις και πληροφορίες από τη βάση δεδομένων του για να προβλέψει τις αλλαγές στις ιδιότητες του πετρελαίου με την πάροδο του χρόνου, όπως η πυκνότητα, το ιξώδες, τα ποσοστά εξάτμισης και η περιεκτικότητα σε νερό, καθώς και το ρυθμό με τον οποίο σχηματίζεται ένα γαλάκτωμα πετρελαίου στο νερό. Έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιεί τα ελάχιστα δυνατά δεδομένα, τα οποία μπορούν εύκολα και άμεσα να προκύψουν από μετρήσεις πεδίου, όπως η ταχύτητα του ανέμου, το ύψος κύματος, η θερμοκρασία, η πυκνότητα και η αλατότητα του νερού, ο τύπος, η ποσότητα και ο ρυθμός διαρροής του πετρελαίου. Οι προβλέψεις που πραγματοποιούνται παρουσιάζονται τόσο γραφικά, όσο και σε μορφή κειμένου και είναι σχεδιασμένες για να επιλύουν τις απορίες που προκύπτουν κατά τις ενέργειες αντιμετώπισης και καθαρισμού της κηλίδας.



**Σχήμα 4.2:** Το παράθυρο εργασίας του ADIOS. Αριστερά τα δεδομένα του σεναρίου της κηλίδας και στα δεξιά διάγραμμα με την εξέλιξη του πετρελαίου μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (πηγή: Oil Spill Modeling, [oceanecology.ca/oil.htm](http://oceanecology.ca/oil.htm)).

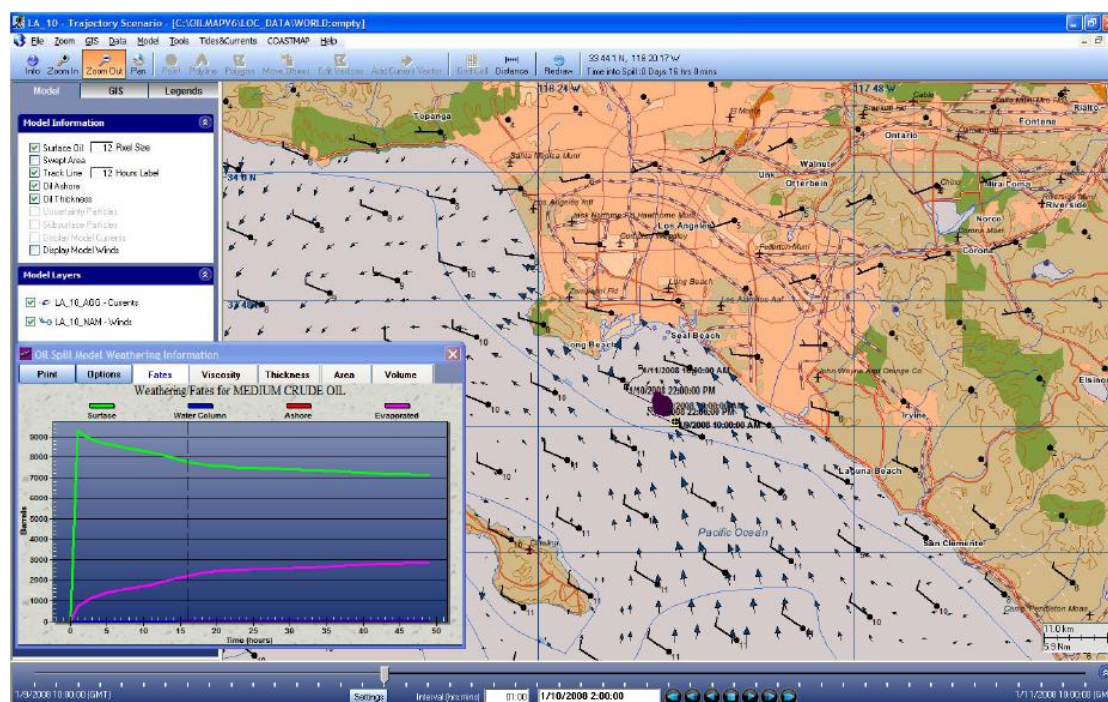
#### 4.3.4 SIMPAR

Το SIMPAR (πηγή: <http://edepot.wur.nl/174587>) αναπτύχθηκε από το ινστιτούτο RIKZ (National Institute for Coastal and Marine Management) και από το Delft University of Technology της Ολλανδίας. Είναι ένα δισδιάστατο μοντέλο που δίνει ιδιαίτερη έμφαση στη μαθηματική ακρίβεια, αν και δεν θεωρείται φιλικό στο χρήστη, και προσφέρει δύο μορφές διάχυσης: η μία με ένα σταθερό συντελεστή διάχυσης και μία χρονοεξαρτώμενη διάχυση. Το μοντέλο έχει αναπτυχθεί ειδικά για την ολλανδική παράκτια ζώνη, η οποία χαρακτηρίζεται μεταξύ άλλων από την ξηρασία και τις

πλημμύρες. Προσομοιώνει τη μεταφορά των αιωρούμενων σωματιδίων ή σωματιδίων που συμπεριφέρονται σαν διαλυμένες ουσίες. Υπολογίζει την κίνηση των σωματιδίων αυτών λόγω ανέμου, οριζόντιας μεταφοράς και διάχυσης βάσει τυχαιότητας. Η διάχυση δηλαδή αντιπροσωπεύεται από ένα στοχαστικό μοντέλο στο οποίο τα σωματίδια πραγματοποιούν τυχαία άλματα στην κατεύθυνση, είτε παράλληλα, είτε κάθετα στη ροή του νερού, όπως επίσης και το μέγεθος του άλματος καθορίζεται τυχαία.

### 4.3.5 OILMAP

Το OILMAP (πηγή: OILMAP: Oil Spill Model and Response System Overview) είναι ένα φιλικό στο χρήστη μοντέλο πετρελαιοκηλίδας που αναπτύχθηκε από την ASA (Applied Science Associates) και ανήκει στις κατηγορίες των ντετερμινιστικών και των στοχαστικών μοντέλων. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιεί μπορούν να είναι είτε δισδιάστατες είτε τρισδιάστατες και περιλαμβάνει ένα απλό σύστημα εισαγωγής των πληροφοριών για τη διαρροή του πετρελαίου, η οποία μπορεί να είναι είτε στιγμιαία είτε να διαρκεί ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια, συνδέεται με διαδικτυακούς σέρβερ πρόγνωσης του καιρού, για να ενημερωθεί για τα ακριβή στοιχεία των ανέμων και των ρευμάτων της περιοχής μελέτης. Έχει πρόσβαση σε ένα πλήθος ηλεκτρονικών συστημάτων χαρτών, συμπεριλαμβανομένων των παγκόσμιων ναυτικών χαρτών CMAP της Jeppesen Marine και είναι συμβατό με το σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών ESRI GIS. Το δυνατό σημείο του μοντέλου είναι ότι μπορεί να παρέχει ταχέως τις προβλέψεις για την τροχιά μιας πετρελαιοκηλίδας οπουδήποτε στον κόσμο, καθιστώντας εφικτή την άμεση προσομοίωση ενός περιστατικού από μία κυβερνητική υπηρεσία ή από τις εταιρίες μεταφοράς και εκμετάλλευσης του πετρελαίου.

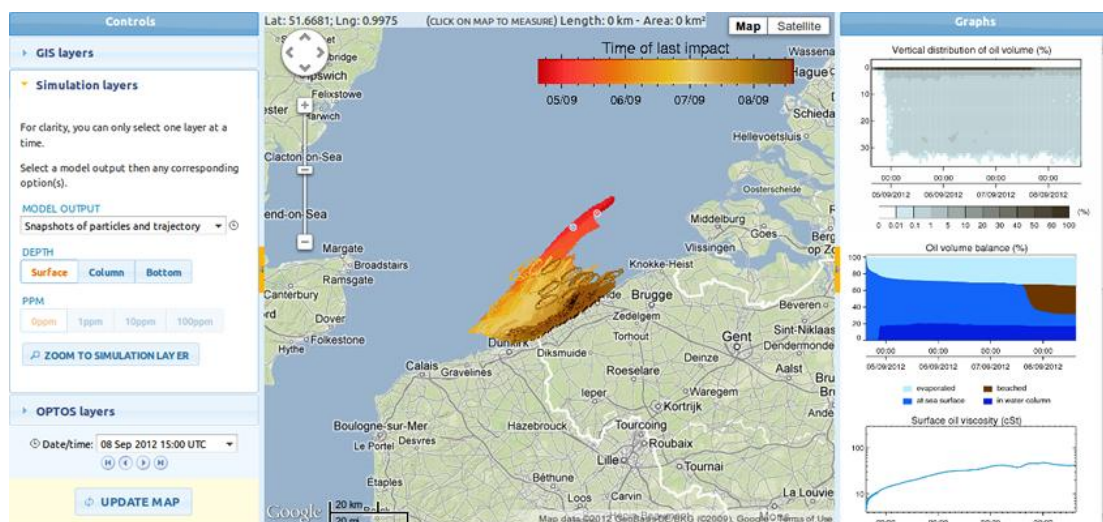


**Σχήμα 4.3:** Το παράθυρο εργασίας του OILMAP για την προσομοίωση της τροχιάς πετρελαιοκηλίδας στη Νότια Καλιφόρνια (πηγή: OILMAP: Oil Spill Model and Response System Overview)



### 4.3.6 OSERIT

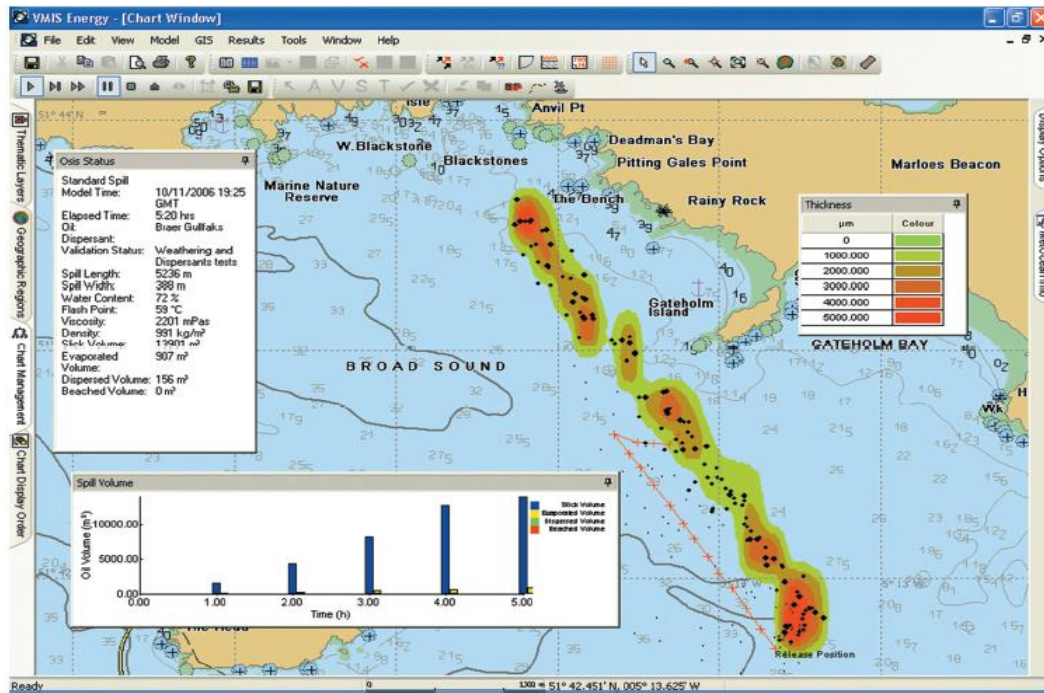
Το Oserit (πηγή: V.Duliere et al., OSERIT-Development of an Integrated Software for Forecasting the Impacts of Accidental Oil Pollution) είναι ένα φιλικό στο χρήστη τρισδιάστατο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε για την προστασία της Βόρειας Θάλασσας από τις Βελγικές Αρχές (Belgian Intervention Plan for Pollution Response at Sea). Υπολογίζει την εξέλιξη και τη μετακίνηση της πετρελαιοκηλίδας περιλαμβάνοντας υδροδυναμικές παραμέτρους και δίνει αποτελέσματα σε χάρτες. Η προσβασιμότητα του μοντέλου εξασφαλίζεται, με την εκτέλεσή του να βασίζεται εξ ολοκλήρου στο διαδίκτυο. Με λίγες κινήσεις, μπορεί να προσομοιώσει ένα σενάριο πετρελαιοκηλίδας και να δώσει αποτελέσματα σε λιγότερο από μισή ώρα. Συγκεκριμένα, οι πληροφορίες που προκύπτουν έχουν να κάνουν με την τροχιά της πετρελαιοκηλίδας, την συγκέντρωση του πετρελαίου σε ευαίσθητες περιοχές και το ποσοστό του πετρελαίου που εξατμίζεται, γαλακτωματοποιείται και διασκορπίζεται. Η διαρροή του πετρελαίου μπορεί να είναι είτε στιγμιαία είτε συνεχής και η αρχή του περιστατικού μπορεί να προσομοιωθεί σε οποιοδήποτε βάθος και να συμβεί, συμπεριλαμβανομένων της επιφάνειας και του πυθμένα της θάλασσας.



**Σχήμα 4.4:** Το παράθυρο εργασίας του OSERIT για την προσομοίωση της τροχιάς πετρελαιοκηλίδας (πηγή: V.Duliere et al., OSERIT-Development of an Integrated Software for Forecasting the Impacts of Accidental Oil Pollution)

### 4.3.7 OSIS

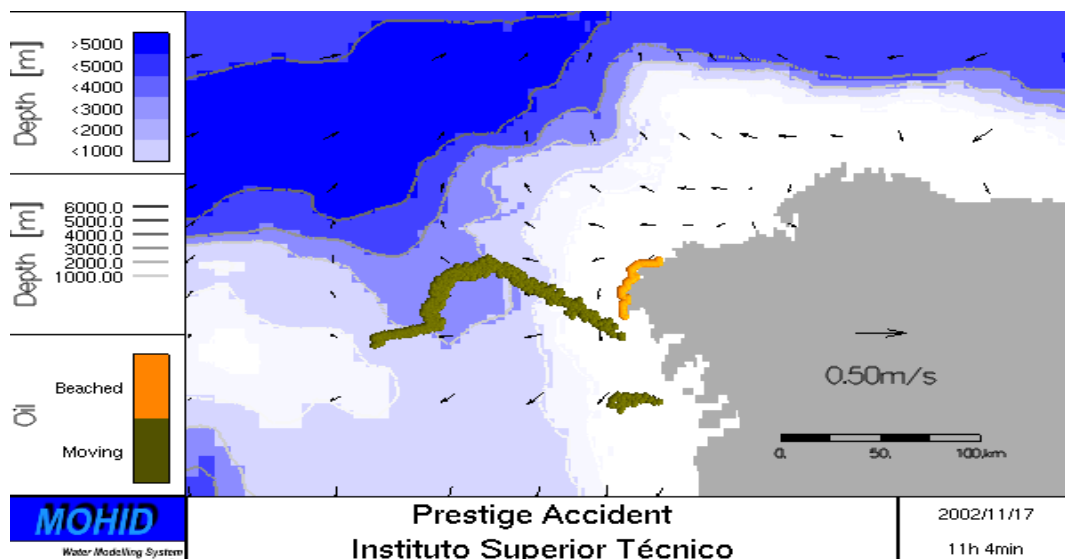
Το OSIS (πηγή: Oil Spill Information System - OSIS v4.5) είναι ένα μοντέλο πρόβλεψης της εξέλιξης μιας πετρελαιοκηλίδας που έχει αναπτυχθεί από την εταιρία λογισμικού BMT ARGOS και την NCEC. Ανήκει, επίσης, στην κατηγορία των στοχαστικών μοντέλων, περιλαμβάνει μία εξελιγμένη βάση δεδομένων η οποία περιέχει πάνω από 120 τύπους πετρελαιοειδών με τα χαρακτηριστικά τους και συνδέεται με ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS). Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις προβλέψεις του μοντέλου είναι τα ανεμολογικά δεδομένα, τα ρεύματα και η δράση των κυμάτων, η μεταφορά του πετρελαίου και τα ποσοστά εξατμίσεως, γαλακτωματοποίησης και διασποράς της κηλίδας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να εξαχθούν τόσο γραφικά, όσο και σε μορφή κειμένου.



**Σχήμα 4.5:** Το παράθυρο εργασίας του OSIS (πηγή: Oil Spill Information System - OSIS v4.5)

#### 4.3.8 MOHID

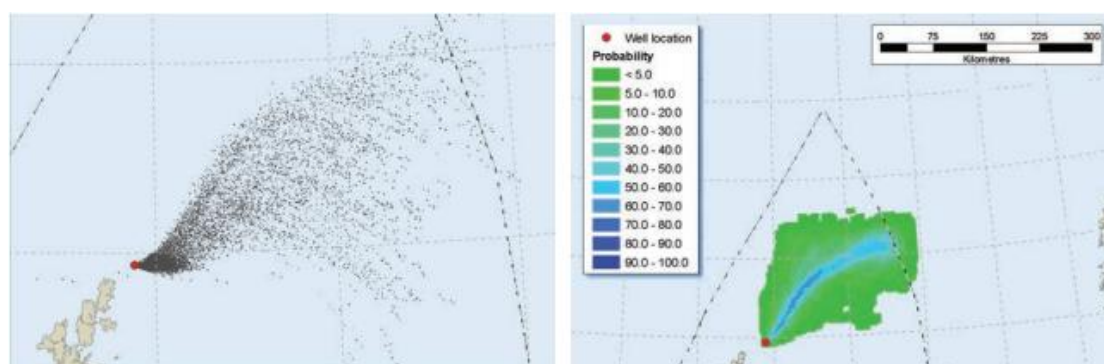
Το MOHID (πηγή: [mohid.com/Prestige/Oil\\_Spills\\_in\\_MOHID.htm](http://mohid.com/Prestige/Oil_Spills_in_MOHID.htm)) είναι ένα τρισδιάστατο μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε από το MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center) στο τεχνικό πανεπιστήμιο της Λισαβόνας. Το μοντέλο της πετρελαιοκηλίδας συμπεριλαμβάνει ιδιότητες του πετρελαίου, όπως η πυκνότητα και το ιξώδες, και χρησιμοποιεί τα τρισδιάστατα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μέρους του μοντέλου προκειμένου να προσομοιωθούν οι διεργασίες της εξάπλωσης, της εξάτμισης, της διασποράς, της καθίζησης, της διάλυσης και της γαλακτωματοποίησης. Επιπλέον, περιλαμβάνει στοιχεία για την προσάραξη του πετρελαίου στην ακτή και τις τεχνικές αφαίρεσης.



**Σχήμα 4.6:** Το παράθυρο εργασίας του MOHID (πηγή: [www.mohid.com](http://www.mohid.com))

### 4.3.9 OSCAR

Το OSCAR (πηγή: Oil Spill Modelling with OSCAR, Xodus Group) είναι ένα τρισδιάστατο μοντέλο πετρελαιοκηλίδας που έχει αναπτυχθεί από τον SINTEF, το μεγαλύτερο ανεξάρτητο οργανισμό στη Σκανδιναβία. Ανήκει στις κατηγορίες των ντετερμινιστικών, των στοχαστικών και των hind-cast μοντέλων. Περιλαμβάνει μία βάση δεδομένων με πολλούς τύπους πετρελαιοειδών, η οποία είναι διαθέσιμη στο χρήστη. Το ντετερμινιστικό μέρος του μοντέλου, πέρα από την τροχιά και την εξέλιξη των ιδιοτήτων της πετρελαιοκηλίδας, μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με την περιοχή της διαρροής, με το χρονοδιάγραμμα εξέλιξης του περιστατικού, για την πιθανότητα και την ποσότητα του πετρελαίου που μπορεί να προσαράξει στην ακτή και το μήκος ακτογραμμής που πλήττεται. Το στοχαστικό μέρος του μοντέλου χρησιμοποιεί ιστορικά ανεμολογικά δεδομένα, για να προσομοιώσει πολλά σενάρια εξέλιξης της τροχιάς της κηλίδας, τα οποία στη συνέχεια συνδυάζει για να προκύψουν οι πιθανότητες για το πώς θα μετακινηθεί η κηλίδα μέσα σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.



**Σχήμα 4.7:** Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο ντετερμινιστικό και το στοχαστικό μέρος του OSCAR αντίστοιχα (πηγή: Oil Spill Modelling with OSCAR, Xodus Group)

## 4.4 Δεδομένα εισόδου

### 4.4.1 Γενικά

Η ιδανική περίπτωση για κάθε περιστατικό είναι να υπάρχουν τα πλήρη υδροδυναμικά δεδομένα, τα οποία πρέπει να περιλαμβάνουν τα παλιρροϊκά ρεύματα, τα ανεμολογικά στοιχεία και τη θερμοκρασία του νερού και του αέρα στην επιφάνεια της θάλασσας. Τα περισσότερα από αυτά τα στοιχεία υπάρχουν σε βάσεις δεδομένων στο διαδίκτυο. Η πλήρης γνώση των συνθηκών ενός ατυχήματος κρίνεται απαραίτητη για την καλύτερη αποτύπωση των αποτελεσμάτων ενός σεναρίου. Αυτό προϋποθέτει γνώση όλων των υδροδυναμικών δεδομένων και πληροφοριών σχετικών με τη διαρροή όπως ο τύπος και η ποσότητα του πετρελαίου, η διάρκεια της διαρροής (στιγμιαία ή διαρκής, αν έχει ολοκληρωθεί ή συνεχίζεται) και η ακριβής τοποθεσία του περιστατικού.

#### 4.4.2 Υδροδυναμικά δεδομένα

Τα υδροδυναμικά δεδομένα είναι η πιο σημαντική παράμετρος, διότι ασκούν τη μεγαλύτερη επιρροή στη μετακίνηση του πετρελαίου (το πετρέλαιο κινείται 100% λόγω των ρευμάτων του νερού και 3% σε σχέση με την κίνηση του αέρα). Ωστόσο, είναι συχνά το πιο δυσεύρετο σύνολο δεδομένων. Η ανάλυση των δεδομένων είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς η κακή ποιότητα των διαθέσιμων στοιχείων μπορεί να περιορίσει την αποτελεσματικότητα των μοντέλων, ειδικά για τις παράκτιες περιοχές, όπου είναι πιθανό να είναι πολύπλοκο το υφιστάμενο καθεστώς. Πληροφορίες σχετικά με τα τοπικά ρεύματα μπορούν να συγκεντρωθούν από αγκυροβολημένες σημαδούρες, οι οποίες παρακολουθούνται από ερευνητικά πλοία και με τηλεπισκόπηση. Η συλλογή αυτών των πληροφοριών μπορεί να είναι δαπανηρή και χρονοβόρα και θα πρέπει να πραγματοποιείται για μια μεγάλη περίοδο πριν από την πιθανή διαρροή, ιδιαίτερα σε περιοχές που εκτίθενται σε υψηλό κίνδυνο διαρροής πετρελαίου.

Εναλλακτικά τα υδροδυναμικά δεδομένα μπορούν να παραχθούν από χωριστά, εξειδικευμένα μοντέλα. Αυτά τα μοντέλα δίνουν μέσες συνθήκες που δεν αντιπροσωπεύουν ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως καταιγίδες και συνθήκες υψηλής απορροής. Με την τεχνολογική πρόοδο, βελτιώνεται συνεχώς η προσομοίωση ρεαλιστικών υδροδυναμικών δεδομένων, ωστόσο, όπως και οι παρατηρήσεις πεδίου έτσι και η ανάπτυξη των μοντέλων για τη ρεαλιστικότερη προσομοίωση των υδροδυναμικών δεδομένων είναι χρονοβόρα και δαπανηρή. Συνολικά, η αξία των υδροδυναμικών δεδομένων είναι ανάλογη με την αξία των προβλημάτων που διερευνώνται. Μερικά μοντέλα επιτρέπουν την πρόβλεψη των τρεχόντων δεδομένων να τροφοδοτηθεί άμεσα σε αυτά, ιδιότητα η οποία μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για καταστάσεις απόκρισης. Όσον αφορά τις μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική, στην προσομοίωση με το MEDSLIK τα υδροδυναμικά δεδομένα παράγονται συγχρόνως με την προσομοίωση που πραγματοποιεί το μοντέλο πετρελαιοκηλίδας, δηλαδή πρόκειται για ένα συνδυαστικό μοντέλο. Στη δεύτερη μεθοδολογία, οι υδροδυναμικοί υπολογισμοί που προκύπτουν με χρήση του υδροδυναμικού μοντέλου FLOW-3DL προηγούνται των υπόλοιπων υπολογισμών του μοντέλου συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδας (OSM), για το οποίο αποτελούν δεδομένα εισόδου.

#### 4.4.3 Ανεμολογικά δεδομένα

Τα ανεμολογικά δεδομένα είναι κατά κύριο λόγο διαθέσιμα από τις μετεωρολογικές υπηρεσίες και το διαδίκτυο. Οι συγκεκριμένες πηγές δεδομένων παρέχουν συνήθως αρκετές πληροφορίες σχετικά με την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου, των οποίων η ακρίβεια πρέπει να αξιολογείται και να επηρεάζει το πόσο ακριβείς θεωρούνται οι τελικές προβλέψεις των μοντέλων. Υπεράκτιες σημαδούρες και αεροδρόμια μπορούν να παρέχουν καλής ποιότητας στοιχεία, αλλά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η σχέση της θέσης των παρατηρήσεων, με τη θέση της διαρροής. Τα στοιχεία μπορούν να προκύψουν και από μετρήσεις πεδίου, ωστόσο ένα λάθος στο οποίο υποπίπτουν οι παρατηρητές είναι ότι όταν αναφερόμαστε σε ανέμους ο χαρακτηρισμός της κατεύθυνσής τους προκύπτει από την κατεύθυνση από την οποία

"έρχονται", σε αντίθεση με τα θαλάσσια ρεύματα που χαρακτηρίζονται από την κατεύθυνση στην οποία κινούνται.

#### 4.4.4 Τύπος πετρελαίου

Τα περισσότερα μοντέλα περιλαμβάνουν μία λίστα από είδη πετρελαιοειδών, τα οποία είναι διαθέσιμα προς ανάλυση. Όταν ο τύπος του πετρελαίου που έχει διαρρεύσει δεν είναι διαθέσιμος, επιλέγεται ο κοντινότερος τύπος πετρελαίου, σύμφωνα με τις πληροφορίες που έχουν συλλεχθεί. Εναλλακτικά, ένα δείγμα από το συγκεκριμένο πετρελαιοειδές μπορεί να αναλυθεί και να συμπεριληφθεί σε μία βάση δεδομένων.

### 4.5 Σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης

Η ανάπτυξη ενός σχεδίου έκτακτης ανάγκης είναι συχνά μια νομοθετική απαίτηση για κάθε δράση που μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας πετρελαιοκηλίδας. Τα σχέδια έκτακτης ανάγκης επικεντρώνονται σε μια εκτίμηση του κινδύνου που εντοπίζεται σε σενάρια δυνητικής διαρροής πετρελαίου, αξιολογώντας σε κάθε περίπτωση τις πιθανότητες εμφάνισής τους και τις πιθανές συνέπειες που θα έχουν. Αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για την πρόβλεψη της εξέλιξης της πετρελαιοκηλίδας, παρέχοντας προβλέψεις για την κίνηση της κηλίδας και πληροφορίες για τις διεργασίες του πετρελαίου κάτω από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που έχουν θεωρηθεί.

Με στόχο την πρόβλεψη των θέσεων που βρίσκονται σε μεγαλύτερο κίνδυνο έχουν αναπτυχθεί τα στοχαστικά μοντέλα, που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.2.3. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται εισάγοντας μηνιαία, τριμηνιαία ή ετήσια στοιχεία ανέμου, ανάλογα με τις διακυμάνσεις των ανεμολογικών παρατηρήσεων. Μέσω των στοχαστικών μοντέλων μπορούν να προκύψουν τα πιο πιθανά και τα πιο δυσμενή σενάρια και σε αυτά να γίνει περαιτέρω ανάλυση και διερεύνηση για τη συλλογή περισσότερων πληροφοριών. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται η ιεράρχηση των ενεργειών ανταπόκρισης σε ευαίσθητες περιοχές και η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου αντιμετώπισης ενός ενδεχόμενου ατυχήματος διαρροής πετρελαίου.

### 4.6 Επιχειρησιακά μοντέλα

Τα μοντέλα εκτίμησης της τροχιάς των πετρελαιοκηλίδων μπορεί να αποδειχθούν εξαιρετικά σημαντικά κατά τη διάρκεια επιχείρησης αντιμετώπισης διαρροής. Η πιο κοινή χρήση των επιχειρησιακών μοντέλων είναι η πρόβλεψη της τροχιάς της πετρελαιοκηλίδας σε πραγματικό χρόνο, εφόσον υπάρχουν διαθέσιμα έγκυρα μετεωρολογικά στοιχεία. Είναι ωστόσο πολύ σημαντική η έγκαιρη παροχή και ανανέωση των παρατηρήσεων, ώστε τα μοντέλα να μπορούν να εκτελεστούν χρησιμοποιώντας πραγματικές παραμέτρους. Τα επιχειρησιακά αυτά μοντέλα χρησιμοποιούνται συνήθως στα πρώτα στάδια αντιμετώπισης ενός περιστατικού διαρροής για να υποστηρίξουν τις λειτουργίες της αρχικής επιχείρησης. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα μοντέλα μπορούν να προσφέρουν πολύτιμη καθοδήγηση σε σχέση με το συμβάν, η οποία λειτουργεί επικουρικά στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την επιλογή ενεργειών αντιμετώπισης για τον περιορισμό της

ρύπανσης και των πιθανών επιπτώσεων. Τα πιο σημαντικά αποτελέσματα είναι η προβλεπόμενη τροχιά μιας κηλίδας με την πάροδο του χρόνου, το προφίλ του πετρελαίου που έχει διαρρεύσει υπό τις υπάρχουσες συνθήκες και η πιθανότητα να έχει προσαιγιαλωθεί το πετρέλαιο, σε ποιές θέσεις και σε τι ποσότητα.

Επιπλέον, πολλά μοντέλα επιτρέπουν τη λεπτομερή αποτύπωση της έκτασης της κηλίδας σε γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS) για τη σύνδεση της χωρικής με την περιγραφική πληροφορία. Η αποτύπωση της κηλίδας σε τέτοια συστήματα επιτρέπει την ανανέωση της τροχιάς της όποτε αυτό κριθεί απαραίτητο, ώστε να παρέχονται στο χρήστη τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Σε οποιαδήποτε περίπτωση πραγματικής αντιμετώπισης διαρροής, ο σχεδιασμός δεν πρέπει να βασιστεί μόνο στα υπηρεσιακά μοντέλα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι προβλεπόμενες τροχιές της πετρελαιοκηλίδας πρέπει να επαληθεύονται από τις παρατηρήσεις που γίνονται στο πεδίου. Ο ρόλος του μοντέλου είναι να συμπληρώνει τις παρατηρήσεις που γίνονται σε πραγματικό χρόνο. Τα μοντέλα είναι ένα συμπληρωματικό εργαλείο που λειτουργούν επικουρικά σε σύνθετες καταστάσεις όπου δεν είναι δυνατή η επιτόπια παρατήρηση της διαρροής.

Τα μοντέλα σε επιχειρησιακό επίπεδο μπορούν να υπολογίσουν και φυσικές διεργασίες όπως η εξάτμιση, η διασπορά και η γαλακτωματοποίηση και χρησιμοποιώντας backtrack συστήματα να προσδιορίσουν την πηγή μιας διαρροής, όταν η πηγή είναι διαφορούμενη ή άγνωστη.

#### **4.7 Προσομοίωση στρατηγικών αντιμετώπισης**

Ορισμένα από τα μοντέλα εκτίμησης τροχιάς πετρελαιοκηλίδας επιτρέπουν την προσομοίωση των δραστηριοτήτων αντιμετώπισης, όπως είναι τα φράγματα και τα χημικά διασκορπιστικά. Η τοποθεσία και ο χρόνος της λειτουργίας αντιμετώπισης εισάγονται από το χρήστη στο μοντέλο μαζί με άλλες λειτουργικές παραμέτρους (όπως η τρέχουσα ταχύτητα, το ύψος κύματος και ο ρυθμός άντλησης) και χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθεί και να προσομοιωθεί η απόδοση του εξοπλισμού. Σε γενικές γραμμές τα μοντέλα είναι αισιόδοξα στις εκτιμήσεις τους, οπότε η πραγματική πρόβλεψη των προβλημάτων που προκύπτουν δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με ακρίβεια από το μοντέλο. Αυτό το εργαλείο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για εξάσκηση και μπορεί να αποτελέσει ένα βοηθητικό μέσο σε επιχειρησιακό επίπεδο, καθώς μπορεί να αξιοποιηθεί μία λιγότερο αισιόδοξη πρόβλεψη για την εκτίμηση της αποδοτικότητας της μεθόδου αντιμετώπισης ενός περιστατικού.

#### **4.8 Χρήση των αποτελεσμάτων των μοντέλων**

Η ποιότητα των προσομοιώσεων των μοντέλων πετρελαιοκηλίδας εξαρτάται από την ακρίβεια των στοιχείων του σεναρίου διαρροής, την ποιότητα και την ανάλυση των περιβαλλοντικών παραμέτρων, καθώς και την εμπειρία του χειριστή του μοντέλου όσον αφορά την ερμηνεία των δεδομένων εισόδου και των αποτελεσμάτων. Οι στρατηγικές αντιμετώπισης πρέπει να αναπτύσσονται αξιοποιώντας όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες, συμπεριλαμβανομένων των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, τις παρατηρήσεις πεδίου και την τοπική γνώση, σε συνδυασμό με τη γνώση που έχει

προκύψει από προηγούμενες επιχειρήσεις αντιμετώπισης διαρροής. Στην ιδανική περίπτωση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θα πρέπει να ερμηνεύονται και να χρησιμοποιούνται από έμπειρο ή εξειδικευμένο προσωπικό. Οι έξοδοι του μοντέλου θα πρέπει να ερμηνεύονται σε συνδυασμό με την κατανόηση των τοπικών συνθηκών που επικρατούν και το είδος του πετρελαίου, προκειμένου να εκτιμηθεί η πιθανή σοβαρότητα των επιπτώσεων.

Οποιοδήποτε ηλεκτρονικό μοντέλο και να χρησιμοποιείται είναι σημαντικό τα αποτελέσματα να επαληθεύονται. Ο σχεδιασμός για την αντιμετώπιση διαρροών με μοντέλα πρέπει να γίνεται παράλληλα με την επιτήρηση του πεδίου και οι παρατηρήσεις που προκύπτουν να χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση των δεδομένων εισόδου. Κατά την επικύρωση των αποτελεσμάτων, ένας βαθμός διακύμανσης είναι πάντα αναμενόμενος. Η πρόκληση για το σχεδιαστή είναι να γνωρίζει τι εύρος διακύμανσης είναι αποδεκτό και αν υπάρχει μεγάλη απόκλιση να μπορεί να προσδιορίσει την αιτία και να προβεί στην επίλυση τυχόν προβλημάτων. Ακόμη και με αυτές τις επιφυλάξεις, τα μοντέλα μπορούν γρήγορα να παρέχουν ένα εύρος από σχετικές πληροφορίες σε δραστηριότητες ετοιμότητας και ενεργειών άμεσης αντίδρασης.

#### **4.9 Συμπεράσματα**

Τα συμπεράσματα που εξάγονται, είναι τα εξής:

- 1) Υπάρχουν πολλά διαφορετικά δωρεάν και εμπορικά διαθέσιμα προγράμματα για τη μελέτη της θαλάσσιας ρύπανσης από πετρέλαιο.
- 2) Η μοντελοποίηση των πετρελαιοκηλίδων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης σε ατύχημα διαρροής πετρελαίου και κατά τη διάρκεια εργασιών επέμβασης.
- 3) Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των μοντέλων μπορούν να δώσουν μια σειρά από χρήσιμες πληροφορίες για την ενδεχόμενη συμπεριφορά του πετρελαίου.
- 4) Όλα τα προγράμματα μοντελοποίησης απαιτούν μια σειρά από δεδομένα και η ποιότητα των αποτελεσμάτων οποιουδήποτε μοντέλου είναι ανάλογη με την ποιότητα των εισαχθέντων δεδομένων.
- 5) Είναι απαραίτητο οι πληροφορίες εισόδου που προέρχονται από μετρήσεις πεδίου να είναι όσο το δυνατόν ακριβείς και οι ενέργειες αντιμετώπισης της διαρροής να γίνονται έπειτα από την ενσωμάτωση όλων των διαθέσιμων πληροφοριών.

**Πίνακας 4.1:** Κατηγοριοποίηση διαδεδομένων μοντέλων πετρελαιοκηλίδας

MONTEΛΑ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ					
	Oil-Weathering	Στοχαστικά	Ντετερμινιστικά	Hind-Cast	2D	3D
GNOME	✓		✓		✓	
SIMAP	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ADIOS	✓				✓	
SIMPAR	✓				✓	
OILMAP	✓	✓	✓		✓	✓
OSERIT	✓	✓	✓		✓	✓
OSIS	✓	✓	✓		✓	✓
MOHID	✓		✓			✓
OSCAR	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MEDSLIK	✓	✓	✓	✓	✓	✓

**Πίνακας 4.2:** Πίνακας που περιγράφει πού μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάθε κατηγορία μοντέλου (πηγή: iTac (2008), Technical Paper "Use of Models in Oil Spill Response")

	Weathering	Trajectory	Stochastic	Backtrack
Σχεδιασμός Έκτακτης Ανάγκης	✓✓	✓	✓✓	✗
Έρευνα	✓✓	✓✓	✓✓	✓
Επιχειρήσεις Αντιμετώπισης	✓✓	✓✓	✓	✓✓

- ✓✓ Πολύ χρήσιμο
- ✓ Μπορεί να χρησιμοποιηθεί
- ✗ Περιορισμένη/Καθόλου χρήση



## 5. Το μοντέλο MEDSLIK

### 5.1 Εισαγωγή

Το μαθηματικό μοντέλο MEDSLIK (Lardner, 2004; 2011) είναι ένα φιλικό στο χρήστη λογισμικό πακέτο που σχεδιάστηκε για να προβλέπει την εξέλιξη των διεργασιών και τη μεταφορά μιας πετρελαιοκηλίδας σε υποπεριοχές της Μεσογείου. Το λογισμικό αποτελείται από τρία τμήματα:

- μία γραφική διεπαφή εισόδου, μέσω της οποίας ο χρήστης εισάγει τα δεδομένα σχετικά με τη διαρροή και τις περιβαλλοντικές συνθήκες
- το μαθηματικό μοντέλο που εκτελεί τους υπολογισμούς και προσομοιώνει τη συμπεριφορά της πετρελαιοκηλίδας
- μία γραφική διεπαφή εξόδου, μέσω της οποίας ο χρήστης μπορεί να εξετάσει τα αποτελέσματα και τις προβλέψεις του μοντέλου.

Ο σχεδιασμός του MEDSLIK από τους Robin Lardner και Γιώργο Ζωδιάτη βασίστηκε στην εμπειρία τους με μοντέλα προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδων που αναπτύχθηκαν από το Ινστιτούτο Ερευνών KFUPM (King Fahd University of Petroleum and Minerals), το οποίο για πολλά χρόνια αναπτύσσει και εφαρμόζει επιτυχώς παρόμοια προγράμματα για τον Περσικό Κόλπο και την Ερυθρά Θάλασσα.

Τα τρία βασικά ερωτήματα πρακτικής σημασίας που προκύπτουν σχετικά με οποιαδήποτε διαρροή πετρελαίου είναι: πού θα φτάσει το πετρέλαιο, πότε θα φτάσει εκεί και ποιά θα είναι η σύνθεση της πετρελαιοκηλίδας όταν φτάσει στο σημείο αναφοράς. Η απόκτηση μιας ρεαλιστικής απάντησης στο τρίτο ερώτημα βασίζεται στη χρήση αξιόπιστων αλγορίθμων πρόβλεψης της εξέλιξης της κηλίδας. Τα δύο πρώτα ερωτήματα είναι γενικά τα πιο κρίσιμα όσον αφορά την καταπολέμηση μιας διαρροής που εξετάζεται και εξαρτώνται απόλυτα από την ύπαρξη αξιόπιστων τιμών για τα θαλάσσια ρεύματα και αξιόπιστων ανεμολογικών δεδομένων.

Το MEDSLIK ενσωματώνει τη χρήση των προβλέψεων αυτών των μεταβλητών που αναπτύσσονται στο πλαίσιο του προγράμματος MFS (Mediterranean Forecast System) για ολόκληρη τη Μεσόγειο Θάλασσα και τις διάφορες υποπεριοχές της. Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν διαθέσιμες προβλέψεις για αυτά τα ρεύματα, το MEDSLIK περιέχει επίσης τις βάσεις δεδομένων των κλιματολογικών δεδομένων πλοίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη θέση τους.

Όσον αφορά τους ανέμους, τονίζεται ότι η εισαγωγή επακριβών ανεμολογικών δεδομένων αποτελεί τον πιο σημαντικό παράγοντα για την ικανοποιητική πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας πετρελαιοκηλίδας. Οι προβλέψεις των ανέμων σε χρησιμοποιήσιμη μορφή από το MEDSLIK μπορούν επίσης να μεταφορτωθούν είτε από το διαδικτυακό τόπο του προγράμματος, είτε από το πρόγραμμα SKIRON του Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (Lardner, 2004; 2011) το οποίο παρέχει ανεμολογικές προβλέψεις ανά μία ή ανά τρεις ώρες. Αυτές είναι και οι πιο αξιόπιστες προβλέψεις που διατίθενται για την Ανατολική Μεσόγειο. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις ο χρήστης έχει στη διάθεσή του πιο σύγχρονη βάση δεδομένων από αυτή που διατίθεται και για τα ρεύματα και για τους ανέμους. Σε αυτή την περίπτωση είναι

δυνατόν να εισαχθούν οι δεδομένες παρατηρήσεις ή προβλέψεις από το χρήστη χειροκίνητα.

Τα σωματίδια του πετρελαίου σε μια πετρελαιοκηλίδα μεταφέρονται από το νερό. Στη Μεσόγειο Θάλασσα υπάρχουν δύο κυρίαρχοι μηχανισμοί που οδηγούν τα ρεύματα του νερού: οι δυνάμεις που δημιουργούνται από τις επιφανειακές τάσεις του ανέμου και οι δυνάμεις που δημιουργούνται από την άνωση λόγω των διακυμάνσεων στην πυκνότητα του νερού. Οι μηχανισμοί αυτοί ενσωματώνονται στα αρχεία προβλέψεων του προγράμματος μαζί με άλλες μεταβλητές, όπως η θερμοκρασία και η αλατότητα του νερού.

Εκτός από τη δημιουργία των ρευμάτων του νερού, οι άνεμοι επηρεάζουν και απευθείας την πετρελαιοκηλίδα αποκολλώντας την από το νερό και αναγκάζοντάς την να κινηθεί σε σχέση με αυτό. Η συνήθης τεχνική για τη μοντελοποίηση του φαινομένου αυτού που χρησιμοποιείται από όλα σχεδόν τα προγράμματα προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδας είναι να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του παράγοντα του ανέμου «wind factor» και συγκεκριμένα να εκτιμηθεί η επίδραση του ανέμου στη μεταφορά του πετρελαίου, η οποία το αναγκάζει να κινηθεί με συγκεκριμένο ποσοστό της ταχύτητας του ανέμου σε διαφορετική κατεύθυνση υπό συγκεκριμένη γωνία. Επισημαίνεται ότι η κατεύθυνση της κίνησης της πετρελαιοκηλίδας προσδιορίζεται στα δεξιά της κατεύθυνσης του ανέμου. Με βάση τα πειράματα και τις μελέτες της κίνησης μιας ομάδας από πλωτές σημαδούρες στον Περσικό Κόλπο, με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, του Ινστιτούτου KFUPM (Al-Rabeh (1994) Estimating surface oil spill transport due to wind in the Arabian Gulf) βρέθηκε η βέλτιστη λύση του παράγοντα του ανέμου που είναι 1-4% επί της ταχύτητας του ανέμου και 1-4% προς τα δεξιά ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Μια τέτοια μορφή της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιείται και από το MEDSLIK, η οποία στην παρούσα μελέτη είναι ορισμένη 3% παντού, τόσο στο MEDSLIK όσο και στο OSM.

Όταν πραγματοποιείται διαρροή πετρελαίου, ένα παχύ στρώμα πετρελαίου σχηματίζεται και αρχικά εξαπλώνεται πάνω στην επιφάνεια του νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας. Ο μηχανισμός αυτός καθίσταται ασήμαντος μετά από τις πρώτες ώρες διαρροής και ένας πολύ σημαντικότερος μηχανισμός αναλαμβάνει, η διάχυση, που προκαλείται από τις δίνες στο νερό. Με τη διάχυση προκαλείται η ευρεία διάδοση της πετρελαιοκηλίδας και συχνά η διαίρεσή της σε δύο ή περισσότερα τμήματα. Το MEDSLIK χρησιμοποιεί έναν αυτόματο αλγόριθμο ώστε να προσομοιώσει αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο αριθμό υλικών σημείων Lagrange ίσου μεγέθους. Η προεπιλογή είναι να χρησιμοποιούνται 10.000 στοιχεία, όπως στην παρούσα διπλωματική εργασία, αλλά μπορούν να αυξηθούν μέχρι τα 100.000 στοιχεία. Η αύξηση των στοιχείων θα οδηγούσε στην καλύτερη και ακριβέστερη αναπαράσταση μιας συνεχούς πυκνότητας του πετρελαίου, αλλά θα είχε ως αποτέλεσμα σημαντικά αυξημένους υπολογιστικούς χρόνους ιδιαίτερα στα σενάρια όπου επηρεάζεται ένα μεγάλο τμήμα παράκτιας περιοχής από την πετρελαιοκηλίδα.

Μπορεί επίσης ένα συγκεκριμένο σωματίδιο πετρελαίου να ωθείται πάνω στην ακτή λόγω της οριζόντιας μετατόπισης. Για να εκτιμηθεί αυτή η διαδικασία, σε κάθε χρονικό βήμα το πρόγραμμα ελέγχει κατά πόσο η μετατόπιση του σωματιδίου τέμνει

οποιοδήποτε από τα τμήματα που χρησιμοποιούνται για την προσέγγιση της ακτογραμμής. Αν τέμνει περισσότερα του ενός, επιλέγεται εκείνο που βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο εκκίνησης του υλικού σημείου. Το υλικό σημείο μεταφέρεται στο σημείο τομής και χαρακτηρίζεται ως «beached». Η επίλυση της διαδικασίας αυτής ποικίλλει από περιοχή σε περιοχή, ανάλογα με την ποιότητα των χαρτών και την ανάλυση των ακτογραμμών. Για ορισμένες περιοχές είναι τόσο υψηλή η ποιότητα των χαρτών που υπάρχει μια αβεβαιότητα το πολύ 25 μέτρα, σε αντίθεση με άλλες όπου πλησιάζει τα 100 με 200 μέτρα.

Η προσαιγιάλωση των σωματιδίων του πετρελαίου δεν είναι υποχρεωτικά μόνιμη. Υπάρχει πάντα μια πιθανότητα ένα ποσοστό του πετρελαίου που βρίσκεται στην ακτή να επιστρέψει στο νερό. Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται αυτή η πιθανότητα παρουσιάζεται στην παράγραφο 5.3.1. Ωστόσο, ένα τμήμα του πετρελαίου παραμένει μόνιμα προσκολλημένο στην ακτή, είτε αναμιγνυόμενο με την άμμο, είτε προσκολλούμενο στο βράχια. Ο ρυθμός απορρόφησης καθώς και η πιθανότητα επαναφοράς του πετρελαίου στη θάλασσα ποικίλλει ανάλογα με τη μορφολογία της ακτής στην οποία έχει συμβεί το περιστατικό. Το μοντέλο επιτρέπει την ταξινόμηση των ακτών σε κατηγορίες με διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως η αμμώδης παραλία, με μικρά ή μεγάλα βότσαλα, οι βραχώδεις ακτές, ακρωτήρια και ούτω καθεξής.

Σε συνδυασμό με τη μεταφορά και τη διάχυση, τα σωματίδια σε μια πετρελαιοκηλίδα υφίστανται αλλαγές που συνδέονται με διάφορες φυσικές διεργασίες που επηρεάζουν το πετρέλαιο. Τα ελαφρύτερα κλάσματα του πετρελαίου εξαφανίζονται μέσω της εξάτμισης και τα υπόλοιπα κλάσματα αρχίζουν να απορροφούν νερό, ή να γαλακτωματοποιούνται. Οι αλλαγές αυτές αντανακλώνονται στις αλλαγές των ιδιοτήτων του πετρελαίου, όπως η πυκνότητα, το ιξώδες και ο όγκος της κηλίδας. Τέλος, μέρος του πετρελαίου οδηγείται κάτω από την επιφάνεια του νερού από τη δράση των κυμάτων. Το MEDSLIK χρησιμοποιεί μια τροποποιημένη έκδοση των αλγορίθμων Mackay για την εξάτμιση και τη γαλακτωματοποίηση και τον αλγόριθμο Buist και Mackay για τη διασπορά.

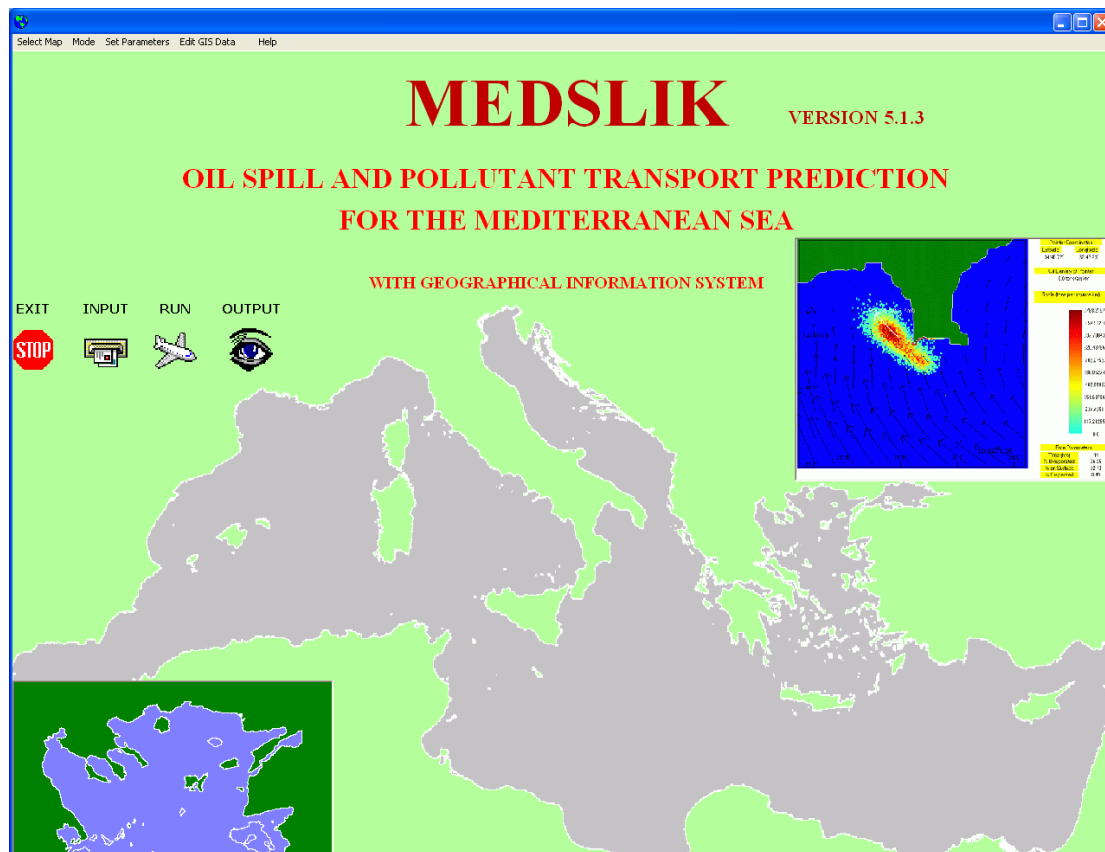
Το MEDSLIK έχει τη δυνατότητα εκτύπωσης των προβλέψεων για τη θέση της κηλίδας κατά τα χρονικά διαστήματα που καθορίζονται από το χρήστη. Για το σκοπό αυτό, η κηλίδα εκτιμάται από το μέσο όρο της πυκνότητας του πετρελαίου στα διάφορα κελιά του κανάβου. Στα αρχεία εξόδου, σε κάθε τέτοιο κελί προσδίδεται ένα χρώμα το οποίο αντιστοιχεί στην πυκνότητα του πετρελαίου μέσα σε αυτό. Με αυτό τον τρόπο η πετρελαιοκηλίδα αυτή παρουσιάζεται ως ένα συνονθύλευμα αντίστοιχων χρωματιστών τετραγώνων και η πραγματική εικόνα θα προέκυπτε αν εξομαλυνόταν το «μωσαϊκό» που προκύπτει από αυτή τη μελέτη. Η απεικόνιση της πετρελαιοκηλίδας έχει ένα δείκτη αβεβαιότητας που δεν υπολογίζεται, με αποτέλεσμα οι προγραμματιστές να συνιστούν τη μελέτη των αρχείων εξόδου ως ένα στατιστικό πίνακα. Παρ' όλα αυτά η απεικόνιση που προκύπτει είναι ικανοποιητικά ενιαία και πυκνή και αποδίδει κατά προσέγγιση την πραγματική θέση και το μέγεθος της κηλίδας. Η γραφική διασύνδεση εξόδου επιτρέπει επίσης στο χρήστη να δει τα γραφήματα της εξέλιξης των διεργασιών του πετρελαίου σε συνάρτηση με το χρόνο.

Το MEDSLIK επιτρέπει επίσης στο χρήστη να υπολογίζει απλές τροχιές επιπλεόντων αντικειμένων. Η κύρια χρήση αυτής της λειτουργίας είναι να ενισχύσει στον

εντοπισμό επιπλεόντων αντικειμένων που παρασύρθηκαν στην επιφάνεια της θάλασσας και ιδίως να βοηθήσει οργανισμούς όπως η Ακτοφυλακή να εντοπίσουν τους ανθρώπους που πιθανόν να χάθηκαν στη θάλασσα από ένα ατύχημα. Ωστόσο, αυτή η δυνατότητα είναι επίσης χρήσιμη σε μια πετρελαιοκηλίδα, για τον εντοπισμό της διαδρομής και του κέντρου της πετρελαιοκηλίδας.

## 5.2 Πεδίο εισαγωγής δεδομένων πετρελαιοκηλίδας

Με την εκκίνηση του προγράμματος εμφανίζεται στην οθόνη η εικόνα 5.1. Η εικόνα αυτή αποτελεί το σύνδεσμο μεταξύ των τριών τμημάτων του MEDSLIK, δηλαδή του πεδίου εισαγωγής δεδομένων (Input), του μαθηματικού μοντέλου (Run) και του πεδίου αποτελεσμάτων (Output). Εκτός των παραπάνω στο αρχικό menu υπάρχει ένα σύνολο επιλογών στο επάνω αριστερά τμήμα της οθόνης. Συγκεκριμένα, το πρώτο από αριστερά menu αφορά στην επιλογή του χάρτη περιοχής (select map). Στο κάτω αριστερά τμήμα της οθόνης εμφανίζεται ο επιλεγμένος χάρτης. Στη συνέχεια από την επιλογή mode του menu επιλέγεται «oil spill prediction», ενώ στο τρίτο menu «set parameters» επιλέγονται οι παράμετροι του μαθηματικού μοντέλου που θα περιγραφούν στην παράγραφο 5.3.

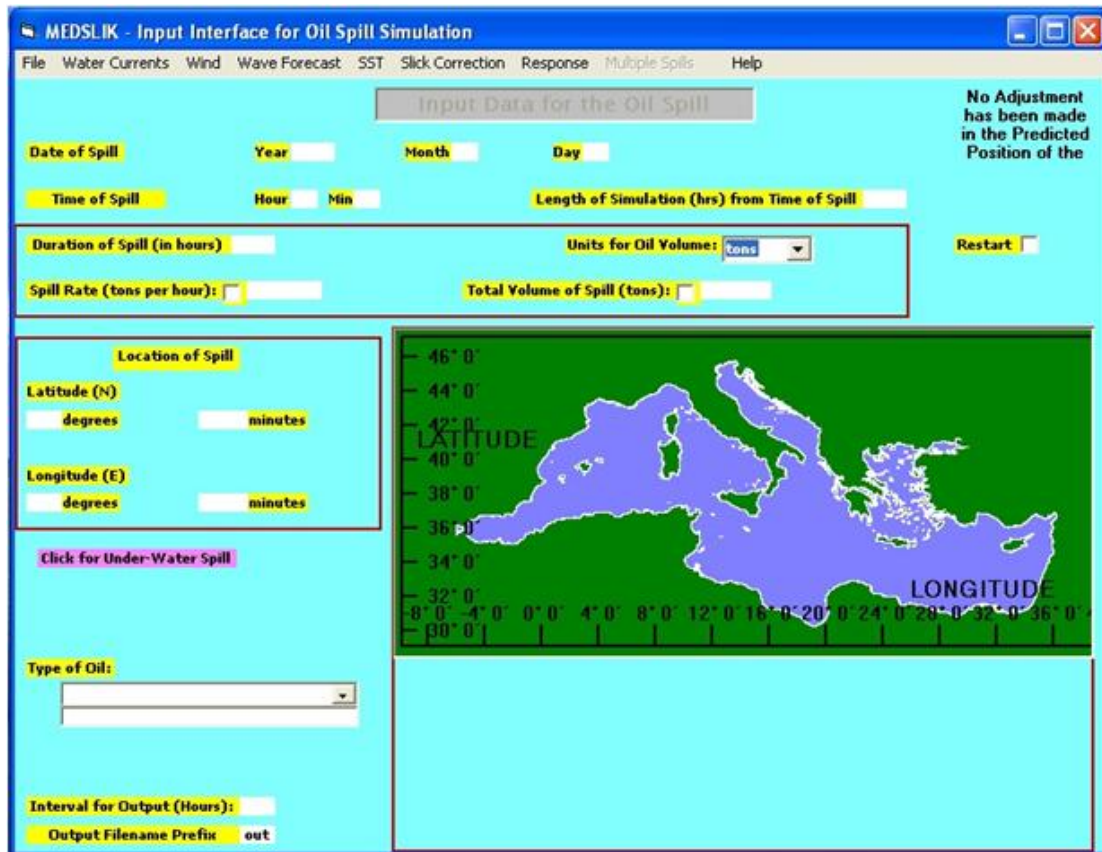


Εικόνα 5.1: Αρχικό παράθυρο εργασίας MEDSLIK (πηγή: [www.medess4ms.eu](http://www.medess4ms.eu))

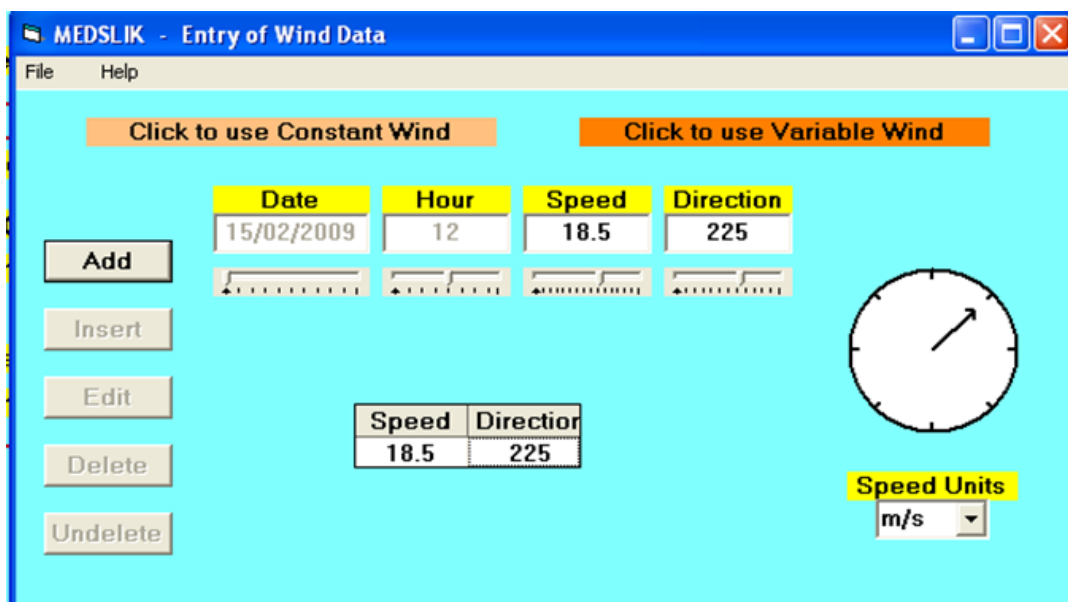
Στο πεδίο Input γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων που αφορούν στο υποθετικό σενάριο πετρελαιοκηλίδας που εξετάζεται (όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2). Οι απαιτούμενες πληροφορίες είναι οι εξής:

- 1) Ημερομηνία εκκίνησης πετρελαιοκηλίδας (έτος, μήνας, ημέρα)
- 2) Ώρα εκκίνησης της πετρελαιοκηλίδας (ώρα, λεπτά)
- 3) Χρονικό διάστημα προσομοίωσης (σε ώρες) μετά την έναρξη της διαρροής
- 4) Διάρκεια διαρροής πετρελαίου σε ώρες
- 5) Επιλογή μονάδας μέτρησης όγκου πετρελαιοκηλίδας (τόνοι, βαρέλια ή κυβικά μέτρα)
- 6) Ρυθμός διαρροής πετρελαίου
- 7) Συνολικός όγκος πετρελαίου που διαρρέει
- 8) Συντεταγμένες θέσης εκκίνησης πετρελαιοκηλίδας
- 9) Τύπος πετρελαίου (αυτόματα εμφανίζεται η χώρα προέλευσης)
- 10) Εισαγωγή θαλάσσιων ρευμάτων
- 11) Εισαγωγή ανεμολογικών δεδομένων
- 12) Επιφανειακή θερμοκρασία
- 13) Χρονικό βήμα ανάλυσης περιστατικού
- 14) Μέγεθος των pixel στα γραφικά των αποτελεσμάτων

Είναι εμφανές ότι δεδομένης της διάρκειας διαρροής του πετρελαίου, μία μόνο εκ των παραμέτρων του ρυθμού διαρροής και του συνολικού όγκου πετρελαίου συμπληρώνεται, ενώ η άλλη υπολογίζεται από το πρόγραμμα αυτόματα. Επίσης, δεξιά στην οθόνη εμφανίζεται ο χάρτης της περιοχής μελέτης και η θέση έναρξης της πετρελαιοκηλίδας.



Εικόνα 5.2: Πεδίο εισαγωγής δεδομένων πετρελαιοκηλίδας



Εικόνα 5.3: Πεδίο εισαγωγής διεύθυνσης, έντασης και διάρκειας ανέμου

### 5.3 Το μαθηματικό μοντέλο

#### 5.3.1 Μεταφορά-Διάχυση-Προσאיγίλωση

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, το MEDSLIK ενσωματώνει έναν «παράγοντα ανέμου» στη μεταφορά του πετρελαίου. Επομένως, η μεταφορά της επιφάνειας του πετρελαίου γίνεται με ταχύτητα που ισούται με ένα συγκεκριμένο ποσοστό  $\alpha$  της ταχύτητας του ανέμου και σε μια διεύθυνση που σχηματίζει συγκεκριμένη δεξιόστροφη γωνία  $\beta$  με τη διεύθυνση του ανέμου.

Στο MEDSLIK η πετρελαιοκηλίδα προσομοιώνεται με χρήση της μεθόδου Monte Carlo. Ο ρυπαντής χωρίζεται σε ένα μεγάλο αριθμό υλικών σημείων Lagrange ίσου μεγέθους. Σε κάθε χρονικό βήμα, δίνεται σε κάθε υλικό σημείο μία μετατόπιση λόγω μεταφοράς και μία λόγω διάχυσης.

Έστω  $X_i$ ,  $Y_i$  και  $Z_i$  η θέση του  $i$ -στού υλικού σημείου στην αρχή ενός συγκεκριμένου χρονικού βήματος, με το  $Z$  να μετριέται κατακόρυφα από τον πυθμένα προς τα πάνω. Στο τέλος κάθε χρονικού βήματος διάρκειας  $\tau$  το υλικό σημείο θα βρίσκεται στη θέση με συντεταγμένες:

$$X'_i = X_i + \{u(X_i + Y_i + Z_i) + a(W_x \cos\beta + W_y \sin\beta)\}\tau + \Delta X_i^{(d)} \quad (5.1)$$

$$Y'_i = Y_i + \{v(X_i + Y_i + Z_i) + a(W_x \cos\beta + W_y \sin\beta)\}\tau + \Delta Y_i^{(d)} \quad (5.2)$$

$$Z'_i = Z_i + \Delta Z_i^{(d)} \quad (5.3)$$

όπου  $u(x,y,z)$  και  $v(x,y,z)$  είναι οι ταχύτητες των θαλάσσιων ρευμάτων κατά  $x$  και  $y$  αντίστοιχα,  $W_x$  και  $W_y$  οι συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου και  $\Delta X_i^{(d)}$ ,  $\Delta Y_i^{(d)}$ ,  $\Delta Z_i^{(d)}$  οι μετατοπίσεις λόγω διάχυσης στις τρεις διευθύνσεις. Η κατακόρυφη ταχύτητα  $w$  δεν συμπεριλαμβάνεται στο μοντέλο, καθώς είναι γενικά πολύ μικρή.

Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις αναφέρονται μόνο στα υλικά σημεία που έχουν υποστεί διασπορά στην υδάτινη στήλη. Σε αυτή την περίπτωση η μεταφορά λόγω ανέμου δεν λαμβάνεται υπόψη. Στην περίπτωση που η κατακόρυφη μετατόπιση οδηγήσει θεωρητικά ένα υλικό σημείο πάνω από την επιφάνεια του νερού ή κάτω από τον πυθμένα, τότε αυτό ανακλάται πίσω στην υδάτινη στήλη.

Οι μετατοπίσεις λόγω διάχυσης δίνονται από τις εξισώσεις:

$$\Delta X_i^{(d)} = [2\text{rand}(0,1) - 1]\sqrt{6K_h}\tau \quad (5.4)$$

$$\Delta Y_i^{(d)} = [2\text{rand}(0,1) - 1]\sqrt{6K_h}\tau \quad (5.5)$$

$$\Delta Z_i^{(d)} = [2\text{rand}(0,1) - 1]\sqrt{6K_v}\tau \quad (5.6)$$

όπου  $K_h$  και  $K_v$  είναι οι συντελεστές οριζόντιας και κατακόρυφης διάχυσης αντίστοιχα. Στα σενάρια που μελετήθηκαν θεωρήθηκε  $K_h=2 \text{ m}^2/\text{sec}$  και  $K_v=0.01 \text{ m}^2/\text{sec}$  στο στρώμα ανάμιξης και  $K_v=0.0001 \text{ m}^2/\text{sec}$  κάτω από το στρώμα ανάμιξης. Επίσης,  $\text{rand}(0,1)$  είναι τυχαίοι αριθμοί με ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ 0 και 1. Αποδεικνύεται ότι ο τετραγωνικός μέσος των παραπάνω τιμών των μετατοπίσεων λόγω διάχυσης έχει τις παρακάτω τιμές αντίστοιχα:

$$r. m. s. \{\Delta X^{(d)}, \Delta Y^{(d)}, \Delta Z^{(d)}\} = \{\sqrt{2K_h}\tau, \sqrt{2K_h}\tau, \sqrt{2K_v}\tau\} \quad (5.7)$$

Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι αν οι μετατοπίσεις λόγω διάχυσης δίνονται από τις παραπάνω τιμές, τότε ικανοποιείται και η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης. Μέσω της ανάλυσης ελαχίστων τετραγώνων έχουν προκύψει οι βέλτιστες τιμές  $\alpha=0.031$  και  $\beta=26.03^\circ$  για τον αραβικό κόλπο. Επειδή σήμερα αυτή η τιμή του  $\beta$  θεωρείται πολύ μεγάλη για μία πετρελαιοκηλίδα, το MEDSLIK υιοθετεί την τιμή  $\beta=0^\circ$ .

**Εικόνα 5.4:** Μοντέλο μεταφοράς και διάχυσης του MEDSLIK

Όπως αναφέρθηκε, οι οριζόντιες μετατοπίσεις είναι πιθανό να οδηγήσουν κάποιο υλικό σημείο στην ακτή. Η ακτογραμμή προσομοιώνεται με διαδοχικά ευθύγραμμα τμήματα. Σε κάθε χρονικό βήμα το πρόγραμμα ελέγχει αν η μετατόπιση ενός υλικού σημείου τέμνει κάποιο από αυτά τα ευθύγραμμα τμήματα. Αν τέμνει περισσότερα από ένα, επιλέγεται εκείνο που βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο εκκίνησης και το υλικό σημείο μεταφέρεται στο σημείο τομής και χαρακτηρίζεται ως «beached».

Η προσαιγιάλωση των σωματιδίων του πετρελαίου δεν είναι απαραίτητα μόνιμη. Αντίθετα, σε κάποιο επερχόμενο χρονικό βήμα, υπάρχει η πιθανότητα επαναφοράς στη θάλασσα. Η πιθανότητα αυτή σε κάθε χρονικό βήμα  $t$  θεωρείται ίση με:



$$\text{Πιθανότητα επαναφοράς} = (1 - 0,5^{t/T_w})$$

όπου  $T_w$  είναι ο χρόνος ημιζωής του πετρελαίου που παραμένει στη στεριά πριν επανέλθει στη θάλασσα. Για κάθε υλικό σημείο εφαρμόζεται μία διαδικασία γέννησης τυχαίων αριθμών και το σημείο επανέρχεται στη θάλασσα αν:  $\text{rand}(0,1) < \text{πιθανότητα επαναφοράς}$ . Σε αυτή την περίπτωση το υλικό σημείο επανέρχεται στο ίδιο τμήμα της παράκτιας περιοχής από όπου προήλθε. Ο χρόνος ημιζωής  $T_w$  εξαρτάται από τη φύση της ακτής (αμμώδης ή βραχώδης).

Πέρα από την παραπάνω διαδικασία, το MEDSLIK υποθέτει πως κατά τη διάρκεια κάθε χρονικού βήματος ένα συγκεκριμένο ποσοστό του πετρελαίου του κάθε υλικού σημείου που έχει προσαιγιαλωθεί παραμένει μόνιμα εκεί. Αυτό συμβαίνει είτε λόγω ανάμιξης με την άμμο, είτε δημιουργώντας ένα στρώμα πίσσας πάνω στα βράχια. Σε κάθε χρονικό βήμα το ποσοστό του μόνιμα προσκολλημένου πετρελαίου στην ακτή είναι  $= (1 - 2^{-t/T_H})$ , όπου  $T_H$  είναι ο χρόνος ημιζωής για την προσκόλληση στην ακτή.

Η εμπειρία από την πετρελαιοκηλίδα του 2006 που συνέβη στο Λίβανο, αναλυτικές πληροφορίες για την οποία παρέχονται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος του Λιβάνου (πηγή: [www.moe.gov.lb/oilspill2006/](http://www.moe.gov.lb/oilspill2006/)), υποδεικνύει ότι όταν η ποσότητα του πετρελαίου σε ένα τμήμα της ακτής είναι πολύ μεγάλη, ο ρυθμός προσκόλλησης για τα νέα υλικά σημεία είναι μειωμένος. Το γεγονός αυτό οδήγησε στη μετατροπή της παραπάνω εξίσωσης ως εξής:

$$\text{Ποσοστό μόνιμης παραμονής στην ακτή} = [1 - 2^{-t/T_H}] \exp(-d/d_0)$$

όπου  $d$  είναι η υπάρχουσα πυκνότητα του πετρελαίου στο συγκεκριμένο τμήμα της ακτής σε bbls/km και  $d_0$  είναι παράμετρος θεωρούμενη ίση με 10000. Τέλος, δίνεται η δυνατότητα της τροποποίησης του χρόνου ημιζωής για βαριά πετρέλαια ( $API < 30$ ) μέσω της εξίσωσης:

$$T_H = T_{H0} [1 + c_H (30 - API)] \quad (5.8)$$

όπου  $T_H$  είναι ο προεπιλεγμένος χρόνος ημιζωής.

**Set Defaults**

Fraction of oil absorbed on coast each time step :

$$f = [1 - 2^{(-t/T_H)}] \exp(-d/d_0)$$

where  $t$  = time step

$T_H$  = half life for absorption

$d$  = existing loading (bbls/km)

Increase of half life for heavy oils :

If  $API < 30$ ,  $T_H = T_{H0} [1 + c_H (30 - API)]$

where  $API$  = API of oil

$T_{H0}$  = existing built - in half life

$d_0$	<b>10000</b>
$c_H$	<b>0,0</b>

Εικόνα 5.5: Μοντέλο προσκόλλησης πετρελαίου στην ακτή

### 5.3.2 Φυσικές διεργασίες

Σε περίπτωση που η διαρροή του πετρελαίου διαρκεί αρκετές ώρες ή μέρες, οι αρχικές ποσότητες θα έχουν απομακρυνθεί αρκετά λόγω του ανέμου και των ρευμάτων όταν διαρρεύσουν οι τελευταίες ποσότητες. Σε αυτή την περίπτωση, για να προσομοιωθεί η εξέλιξη του πετρελαίου, το πρόγραμμα χωρίζει τη συνολική πετρελαιοκηλίδα σε μικρότερες που ορίζονται ως η ποσότητα πετρελαίου που διαρρέει σε ένα χρονικό βήμα 30 λεπτών. Κάθε μία από αυτές τις μικρότερες κηλίδες κινείται ανεξάρτητα από τις άλλες. Στα δύο μοντέλα που εφαρμόζονται στην παρούσα διπλωματική θεωρήθηκε ότι η πετρελαιοκηλίδα τη χρονική στιγμή  $t=0$  sec είχε μηδενική έκταση και η διαρροή ήταν στιγμιαία.

Το MEDSLIK χρησιμοποιεί τροποποιημένες εκδόσεις του αλγορίθμου του Mackay για την εξάτμιση, τη γαλακτωματοποίηση και τη διασπορά. Η βάση του αλγορίθμου αυτού είναι ο χωρισμός της κηλίδας σε δύο μέρη, ένα παχύ και ένα λεπτό μέρος. Η εξάτμιση και η διασπορά εξετάζονται ξεχωριστά για τα δύο αυτά μέρη της κηλίδας. Επιπλέον, το μοντέλο περιλαμβάνει τη ροή πετρελαίου από το παχύ στρώμα στο λεπτό για την αναπλήρωση των απωλειών που προκαλούν οι διεργασίες της κηλίδας.

Για κάθε μία υποκηλίδα σε κάθε χρονικό βήμα, έστω  $V_{tk}$  και  $V_{tn}$  οι όγκοι του πετρελαίου που παραμένουν αντίστοιχα στην πυκνή και τη λεπτή κηλίδα,  $A_{tk}$  και  $A_{tn}$  οι επιφάνειές τους και  $T_{tk}$  και  $T_{tn}$  το πάχος τους. Γίνεται η υπόθεση ότι το πάχος  $T_{tn}$  της λεπτής κηλίδας είναι ίσο με 10 μικρόμετρα, όσο δηλαδή είναι το τελικό πάχος ενός επιφανειακού «φιλμ» πετρελαίου (sheen). Σε κάθε χρονικό βήμα, οι δύο όγκοι ανανεώνονται και παίρνουν τις τιμές:

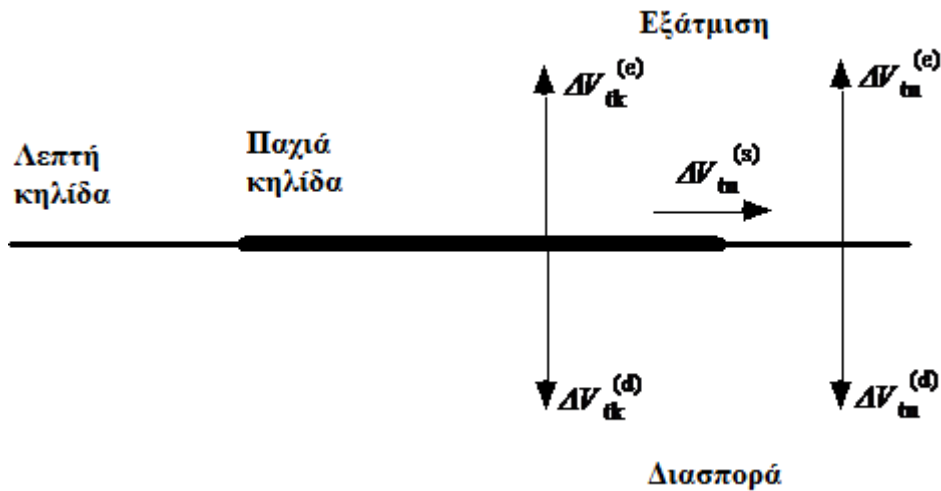
$$V'_{tk} = V_{tk} - \Delta V_{tk}^{(e)} - \Delta V_{tk}^{(d)} - \Delta V_{tk}^{(s)} \quad (5.9)$$

$$V'_{tn} = V_{tn} - \Delta V_{tn}^{(e)} - \Delta V_{tn}^{(d)} - \Delta V_{tn}^{(s)} \quad (5.10)$$

όπου  $\Delta V_{tk}^{(e)}$  και  $\Delta V_{tn}^{(e)}$  είναι οι ποσότητες που χάνονται λόγω εξάτμισης,  $\Delta V_{tk}^{(d)}$  και  $\Delta V_{tn}^{(d)}$  οι ποσότητες που χάνονται λόγω διασποράς και  $\Delta V_{tk}^{(s)}$  η ποσότητα πετρελαίου που ρέει από το παχύ στο λεπτό τμήμα της κηλίδας. Οι μεταφορές αυτές παρουσιάζονται σχηματικά στο Σχήμα 5.1.

Έχοντας ανανεώσει τους όγκους των δύο τμημάτων της κηλίδας, οι επιφάνειες που καλύπτουν ανανεώνονται επίσης σε κάθε χρονικό βήμα χρησιμοποιώντας ημιεμπειρικά μοντέλα εξάπλωσης, τα οποία παραγράφονται στις ενότητες που ακολουθούν. Ως αποτέλεσμα, το νέο πάχος του πυκνού τμήματος της κηλίδας δίνεται από την εξίσωση:

$$T_{tk} = V_{tk}/A_{tk} \quad (5.11)$$



**Σχήμα 5.1:** Μεταφορά όγκων πετρελαίου από την παχιά και τη λεπτή κηλίδα  
(πηγή: Lardner, 2004; 2011)

### 5.3.3 Εξάτμιση

Κάθε υλικό σημείο του πετρελαίου θεωρείται ότι αποτελείται από ένα ελαφρύ τμήμα που μπορεί να εξατμιστεί και ένα βαρύ που δεν μπορεί. Το αρχικό ποσοστό του τμήματος που μπορεί να εξατμιστεί προκύπτει στο μοντέλο από τον τύπο του πετρελαίου που εξετάζεται. Σε κάθε χρονικό βήμα, το ποσοστό των ελαφρών συστατικών που παραμένει σε κάθε υποκηλίδα μειώνεται χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Mackay για την εξάτμιση (Mackay and Paterson (1980), Calculation of the evaporation rate of the volatile liquids) και η μείωση αυτή εφαρμόζεται σε όλα τα υλικά σημεία της υποκηλίδας.

Αρχικά, για το πετρέλαιο της λεπτής κηλίδας υποτίθεται ότι τα ελαφριά συστατικά εξατμίζονται αμέσως. Ο όγκος που εξατμίζεται σε κάθε χρονικό βήμα από τη λεπτή κηλίδα αυτή είναι ίσος με τα συνολικά ελαφριά συστατικά της:

$$\Delta V_{tn}^{(e)} = V_{tn} (f_{\max} - f_{tn}) / (1 - f_{tn}) \quad (5.12)$$

όπου  $f_{tn}$  είναι το ποσοστό του πετρελαίου της λεπτής κηλίδας που έχει ήδη εξατμιστεί στην αρχή του χρονικού βήματος και  $f_{\max}$  είναι το αρχικό ποσοστό των συστατικών που δύναται να εξατμιστούν, αποτελώντας δηλαδή τη μέγιστη δυνατή τιμή του  $f_{tn}$ .

Για την παχιά κηλίδα, η αύξηση του ποσοστού  $f_{tk}$  του πετρελαίου που έχει εξατμιστεί εκφράζεται ως ένα γινόμενο της πίεσης των ατμών  $P_{oil}$  και ενός παράγοντα  $\Delta E_{tk}$ :

$$\Delta f_{tk} = P_{oil} \Delta E_{tk} \quad (5.13)$$

Η πίεση των ατμών δίνεται από τη σχέση:

$$P_{oil} = P_0 \exp\left(\frac{c}{1 - cf_{tk}}\right) \quad (5.14)$$

όπου  $P_0$  είναι η αρχική πίεση των ατμών και  $c$  μία σταθερά που υπολογίζει το ποσοστό μείωσης της πίεσης ατμών σε σχέση με το ποσοστό που έχει ήδη εξατμιστεί. Η τιμή του παράγοντα εξάτμισης  $\Delta E_{tk}$  εκφράζεται ως το γινόμενο ενός συντελεστή

μεταφοράς μάζας  $K_m$ , του χρονικού βήματος  $t$ , της περιοχής της πετρελαιοκηλίδας  $A_{tk}$  και του μοριακού όγκου  $V_{mol}$  του πετρελαίου, διαιρεμένων με τη σταθερά αερίων  $R$ , τη θερμοκρασία  $T$  σε βαθμούς Kelvin και τον αρχικό όγκο της υποκηλίδας  $V^{(0)}$ :

$$\Delta E_{tk} = \frac{K_m V_{mol} A_{tk} \tau}{RTV^{(0)}} = \frac{K_m V_{mol} A_{tk} (1-f_{tk}) \tau}{RTV_{tk}} \quad (5.15)$$

όπου  $V_{tk}$  είναι ο τρέχων όγκος του πετρελαίου στην παχιά κηλίδα ίσος με  $V^{(0)} \cdot (1-f_{tk})$ . Οι προκαθορισμένες τιμές του MEDSLIK που χρησιμοποιήθηκαν και στα υποθετικά σενάρια είναι:  $V_{mol}=0.0002$  και  $R=0.000082$  και

$$K_m = C^{(e)} (W_{kph})^\gamma \quad (5.16)$$

όπου  $W_{kph}$  είναι η ταχύτητα του ανέμου σε χιλιόμετρα ανά ώρα και  $C^{(e)}$  και  $\gamma$  συντελεστές με τιμές 0.000033 και 0.78 αντίστοιχα.

Ο όγκος που χάνεται λόγω εξάτμισης σε κάθε χρονικό βήμα ισούται με την αύξηση του ποσοστού που εξατμίζεται επί τον αρχικό όγκο:

$$\Delta V_{tk}^{(e)} = \Delta f_{tk} V^{(0)} = \Delta f_{tk} V_{tk} / (1 - f_{tk}) \quad (5.17)$$

Παρότι τα ελαφρά συστατικά της λεπτής κηλίδας εξατμίζονται ταχύτατα, η κηλίδα αυτή τροφοδοτείται από την παχιά που δεν έχει εξατμιστεί πλήρως. Έτσι, το ποσοστό  $f_{tn}$  του πετρελαίου που έχει εξατμιστεί από τη λεπτή κηλίδα πρέπει να μειωθεί από τη μέγιστη τιμή  $f_{max}$ . Εξισώνοντας το περιεχόμενο πετρελαίου της λεπτής κηλίδας πριν και μετά τη ροή:

$$V'_{tn} (1 - f_{tn}) = (V'_{tn} - \Delta V_{tn}^{(s)}) (1 - f_{max}) + \Delta V_{tn}^{(s)} (1 - f_{tk}) \quad (5.18)$$

όπου  $V'_{tn}$  είναι ο ανανεωμένος όγκος. Επομένως, προκύπτει η εξίσωση:

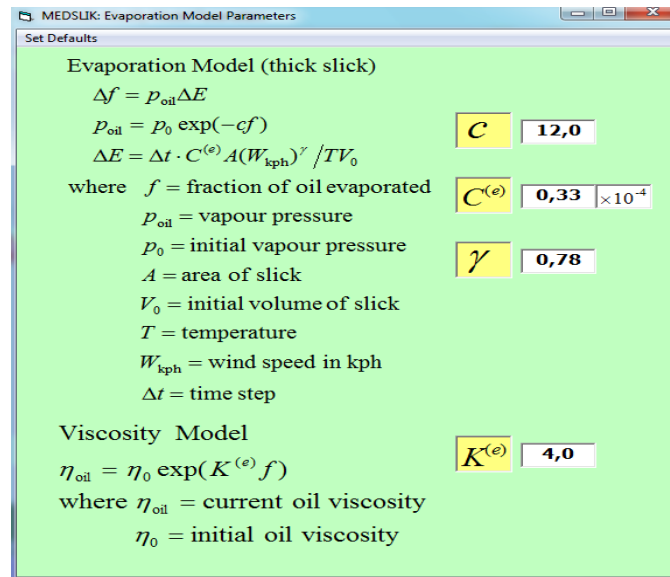
$$f_{tn} = f_{max} - \Delta V_{tn}^{(s)} (f_{max} - f_{tk}) / V'_{tn} \quad (5.19)$$

Συνεπώς, έχοντας υπολογίσει τους όγκους πετρελαίου που έχουν εξατμιστεί από την παχιά και τη λεπτή κηλίδα, μπορεί να υπολογιστεί το συνολικό ποσοστό πετρελαίου που έχει χαθεί λόγω εξάτμισης. Το ποσοστό αυτό προκύπτει από όλα τα υλικά σημεία της συγκεκριμένης υποκηλίδας. Η εξάτμιση σταματάει όταν το ποσοστό της φτάσει στη μέγιστη τιμή του  $f_{max}$  των ελαφριών συστατικών της αρχικής πετρελαιοκηλίδας.

Παράλληλα, η εξάτμιση οδηγεί σε αύξηση στο ιξώδες του πετρελαίου, η οποία υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης:

$$\eta_{oil} = \eta_0 \exp(K^{(e)} f_{tk}) \quad (5.20)$$

όπου  $\eta_0$  είναι το αρχικό ιξώδες και  $K^{(e)}$  σταθερά με τιμή 4.



Εικόνα 5.6: Μοντέλο εξάτμισης του MEDSLIK

### 5.3.4 Γαλακτωματοποίηση

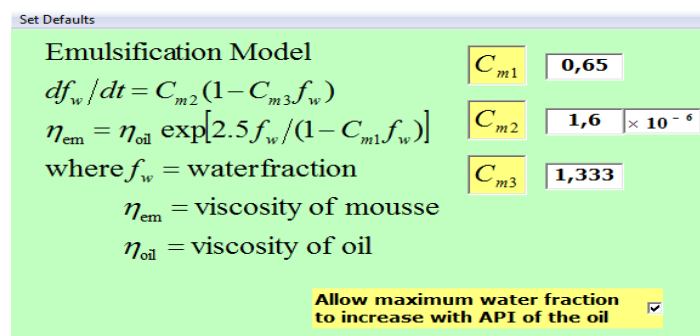
Η γαλακτωματοποίηση αναφέρεται στη διαδικασία μέσω της οποίας το πετρέλαιο αναμιγνύεται με το νερό στην κηλίδα. Έστω  $f_w$  το ποσοστό του νερού στο γαλάκτωμα νερού-πετρελαίου. Το μοντέλο του Mackay για την αλλαγή στο ποσοστό αυτό ανά χρονικό βήμα είναι (Mackay et al. (1979), Oil spill processes and models):

$$\Delta f_w = C_2^{(m)} (1 - C_3^{(m)} f_w) \tau \quad (5.21)$$

όπου  $C_2^{(m)}$  και  $C_3^{(m)}$  είναι σταθερές με τιμές 1.6 και 1.333 αντίστοιχα. Το ανώτερο ποσοστό του νερού στο γαλάκτωμα είναι  $C_3^{(m)-1}$  (προεπιλεγμένη τιμή 75% για τα ελαφριά πετρέλαια, αλλά μειώνεται με την πυκνότητα API για βαριά πετρέλαια). Η κύρια συνέπεια της γαλακτωματοποίησης είναι η δημιουργία ενός γαλακτώματος («mousse») με πολύ αυξημένο ιξώδες. Γίνεται η υπόθεση ότι το ιξώδες δίνεται από την εξίσωση:

$$\eta_{em} = \eta_{oil} \exp\left\{\frac{2.5 f_w}{1 - C_1^{(m)} f_w}\right\} \quad (5.22)$$

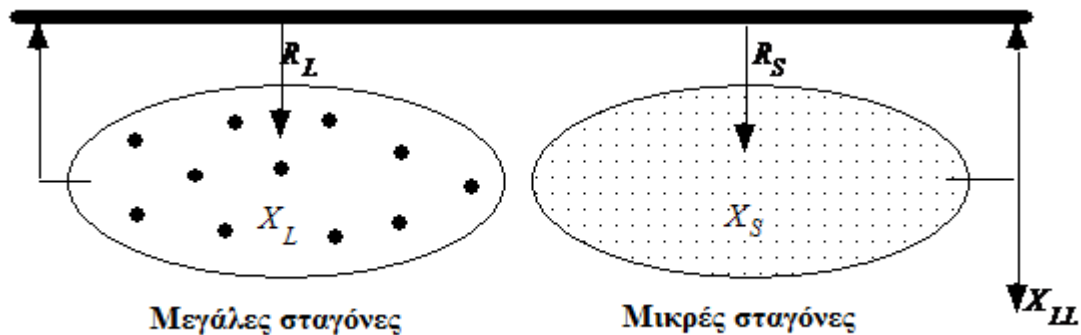
όπου  $C_1^{(m)}$  σταθερά με τιμή 0.65.



Εικόνα 5.7: Μοντέλο γαλακτωματοποίησης του MEDSLIK

### 5.3.5 Διασπορά

Το μοντέλο της διασποράς του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη βασίζεται στις εργασίες των Buist (Buist (1979), An experimental study of the dispersion of oil slick into the water column) και Mackay (Mackay et al. (1979), Oil spill processes and models). Η δράση των κυματισμών οδηγεί το πετρέλαιο μέσα στο νερό, δημιουργώντας ένα σύννεφο από σταγόνες κάτω από την πετρελαιοκηλίδα. Οι σταγόνες ταξινομούνται σε μεγάλες, που ανεβαίνουν γρήγορα και ενώνονται και πάλι με την κηλίδα και σε μικρές, που ανεβαίνουν πιο αργά και μπορούν να βυθιστούν για αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να υποστούν διασπορά στα κατώτερα στρώματα της υδάτινης στήλης. Στη δεύτερη αυτή περίπτωση, οι σταγόνες χάνονται από την επιφανειακή πετρελαιοκηλίδα και χαρακτηρίζονται ως υπό μόνιμη διασπορά. Το κριτήριο που διακρίνει τις μικρές σταγόνες είναι ότι η ταχύτητα ανόδου τους από δυνάμεις άνωσης είναι συγκρίσιμη με την ταχύτητα διασποράς, ενώ για τις μεγάλες ταχύτητες η ταχύτητα ανόδου είναι πολύ μεγαλύτερη.



Σχήμα 5.2: Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου διασποράς  
(πηγή: Lardner, 2004; 2011)

Σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, έστω  $R_L$  και  $R_S$  η προς τα κάτω ροή όγκου πετρελαίου ανά μονάδα επιφάνειας της κηλίδας που μπαίνει στο νερό σαν μεγάλες και μικρές σταγόνες αντίστοιχα. Έστω  $c_L$  και  $c_S$  οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις πετρελαίου και  $v_L$  και  $v_S$  οι ταχύτητες ανόδου των σταγόνων. Στην κατάσταση ισορροπίας οι προς τα κάτω και προς τα πάνω ροές πετρελαίου μπορούν να υπολογιστούν από τις εξισώσεις:

$$R_L = c_L v_L \quad (5.23)$$

$$R_S = \frac{1}{2} c_S (v_S + C_1^{(d)}) \quad (5.24)$$

όπου  $C_1^{(d)} \gg v_S = 0.0003$  είναι η προς τα πάνω ταχύτητα διασποράς των μικρών σταγόνων, η οποία θεωρήθηκε ίση με 0.001. Επίσης, θεωρήθηκε  $v_L = 0.08$ . Ο συνολικός όγκος του πετρελαίου κάτω από την παχιά κηλίδα υπό μορφή μεγάλων και μικρών σταγόνων αντίστοιχα είναι:

$$X_L = c_L u_m A_{tk} \quad (5.25)$$

$$X_S = c_S u_m A_{tk} = \frac{2R_S u_m A_{tk}}{C_1^{(d)} + v_S} \quad (5.26)$$

όπου  $u_m$  είναι το κάθετο πάχος του σύννεφου σταγόνων, του οποίου η τιμή στα σενάρια θεωρήθηκε 0.5. Σε κάθε χρονικό βήμα, γίνεται η υπόθεση ότι ένα μικρό ποσοστό των μικρών σταγόνων χάνεται στα κατώτερα στρώματα λόγω διασποράς. Ο συνολικός όγκος που χάνεται σε κάθε χρονικό βήμα είναι:

$$\Delta X_{LL} = \frac{1}{2} c_S (C_1^{(d)} - v_S) A_{tk} \tau = \frac{R_S A_{tk} \tau (C_1^{(d)} - v_S)}{v_S + C_1^{(d)}} \quad (5.27)$$

Ο συνολικός όγκος του πετρελαίου που βρίσκεται υπό διασπορά κάτω από την πυκνή κηλίδα αυξάνεται σε:

$$\Delta V_{tk}^{(d)} = \Delta X_{LL} + (X'_S - X_S) \quad (5.28)$$

όπου ο τελευταίος όρος αναπαριστά την αλλαγή στο σύννεφο των μικρών σταγόνων κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος λόγω αλλαγής των συνθηκών.

Για την ολοκλήρωση του μοντέλου της διασποράς απαιτούνται εξισώσεις για τις προς τα κάτω ροές  $R_L$  και  $R_S$ . Για το σκοπό αυτό, το ποσοστό του πετρελαίου που υπόκειται σε διασπορά σε κάθε χρονικό βήμα είναι τόσο για την πυκνή, όσο και για τη λεπτή κηλίδα:

$$\Delta f_d = C_3^{(d)} (W_{max} + 1)^2 \tau \quad (5.29)$$

όπου  $W_{m/s}$  είναι η ταχύτητα του ανέμου σε m/sec. Για την παχιά κηλίδα, το ποσοστό αυτό που αποτελείται από μικρές σταγόνες λαμβάνεται ως:

$$f_s = \left\{ 1 + C_4^{(d)} \left( \frac{\eta_{em}}{10} \right)^{0.5} \left( \frac{T_{tk}}{0.001} \right) \left( \frac{\sigma}{24} \right) \right\}^{-1} \quad (5.30)$$

όπου  $\sigma$  είναι η επιφανειακή τάση στη διεπιφάνεια νερού-πετρελαίου,  $C_4^{(d)}$  σταθερά με τιμή 50 και  $\eta_{em}$  το ιξώδες του γαλακτωματοποιημένου πετρελαίου. Η προς τα κάτω ροή ανά μονάδα επιφάνειας της κηλίδας σε κάθε χρονικό βήμα είναι:

$$R_S = f_s \left( \frac{\Delta f_d}{\tau} \right) \quad (5.31)$$

$$R_L = (1 - f_s) \left( \frac{\Delta f_d}{\tau} \right) \quad (5.32)$$

Για τη λεπτή κηλίδα χρησιμοποιείται η παρακάτω πιο απλή έκφραση για το ποσοστό των μικρών σταγόνων:

$$f_s = \left\{ 1 + C_5^{(d)} \left( \frac{\sigma}{24} \right) \right\}^{-1} \quad (5.33)$$

όπου  $C_5^{(d)}$  σταθερά η τιμή της οποίας θεωρήθηκε στα σενάρια που μελετήθηκαν ίση με 2000. Γίνεται η υπόθεση ότι όλες οι μικρές σταγόνες κάτω από τη λεπτή κηλίδα βρίσκονται μόνιμα σε διασπορά. Επομένως, η απώλεια όγκου δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta V_{tn}^{(d)} = f_s \Delta f_d V_{tn}^{(d)} \quad (5.34)$$

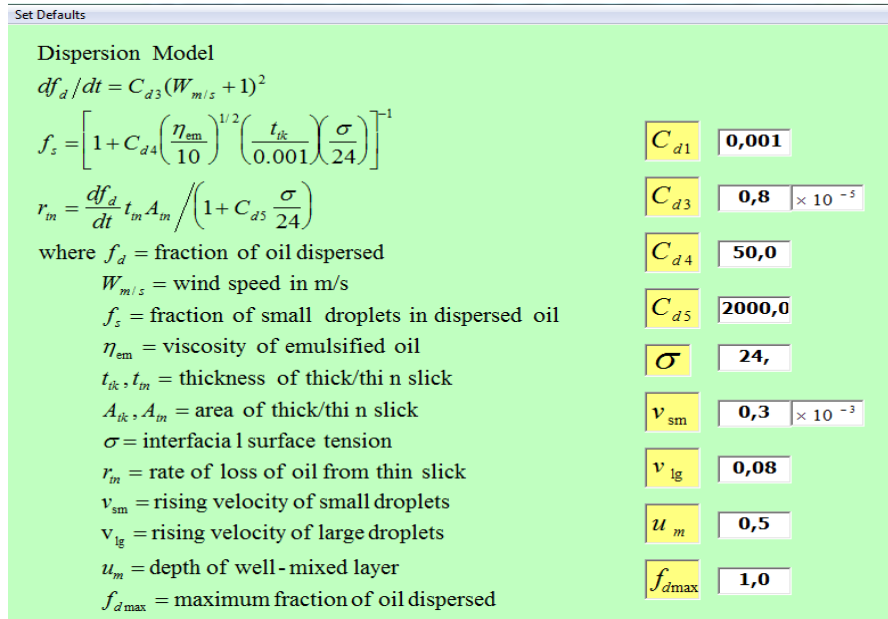
Ο συνολικός όγκος του πετρελαίου που έχει υποστεί διασπορά, τόσο από τις παχιές, όσο και από τις λεπτές κηλίδες, είναι:

$$\Delta V^{(d)} = \Delta V_{tk}^{(d)} + \Delta V_{tn}^{(d)} \quad (5.35)$$

Επομένως, η πιθανότητα ένα υλικό σημείο Lagrange να έχει υποστεί διασπορά στην υδάτινη στήλη, είναι για ένα δεδομένο χρονικό βήμα:

$$p^{(d)} = \frac{\Delta V^{(d)}}{V^{(0)}} \quad (5.36)$$

Για κάθε υλικό σημείο εφαρμόζεται μία διαδικασία γέννησης τυχαίων αριθμών. Το σημείο αυτό παθαίνει διασπορά αν  $\text{rand}(0,1) < p^{(d)}$ . Η διασπορά σταματάει όταν το ιξώδες του γαλακτώματος  $\eta_{em}$  φτάνει μια μέγιστη τιμή  $\eta_{max}$ .



Εικόνα 5.8: Μοντέλο διασποράς του MEDSLIK

### 5.3.6 Εξάπλωση

Για να ολοκληρωθούν οι αλγόριθμοι του MEDSLIK απαιτούνται μοντέλα για τις αλλαγές στην επιφάνεια της παχιάς και της λεπτής κηλίδας και τη ροή πετρελαίου από τη μία στην άλλη. Για την παχιά κηλίδα, η εξάπλωση αποτελείται από δύο μέρη, από τη μία υπάρχει απώλεια επιφάνειας λόγω ροής προς τις λεπτές κηλίδες και από την άλλη συμβαίνει εξάπλωση λόγω βαρύτητας και ιξώδους, σύμφωνα με τη θεωρία του Fay (Fay (1971), Physical processes in the spread of oil on a water surface). Επομένως, η αλλαγή της επιφάνειας της παχιάς κηλίδας ανά χρονικό βήμα είναι:

$$\Delta A_{tk}^{(s)} = -\frac{\Delta V_{tn}^{(s)}}{T_{tk}} + C_2^{(s)} A_{tk}^{0.33} T_{tk}^{0.33} \tau \quad (5.37)$$

όπου  $C_2^{(s)}$  είναι σταθερά που θεωρήθηκε ίση με 150 και  $\Delta V_{tn}^{(s)}$  είναι η αύξηση του όγκου που ρέει από την παχιά στη λεπτή κηλίδα. Ο όγκος αυτός συνδέεται με την αύξηση της επιφάνειας της λεπτής κηλίδας μέσω της σχέσης:

$$\Delta V_{tn}^{(s)} = \Delta A_{tn}^{(s)} T_{tn} \quad (5.38)$$

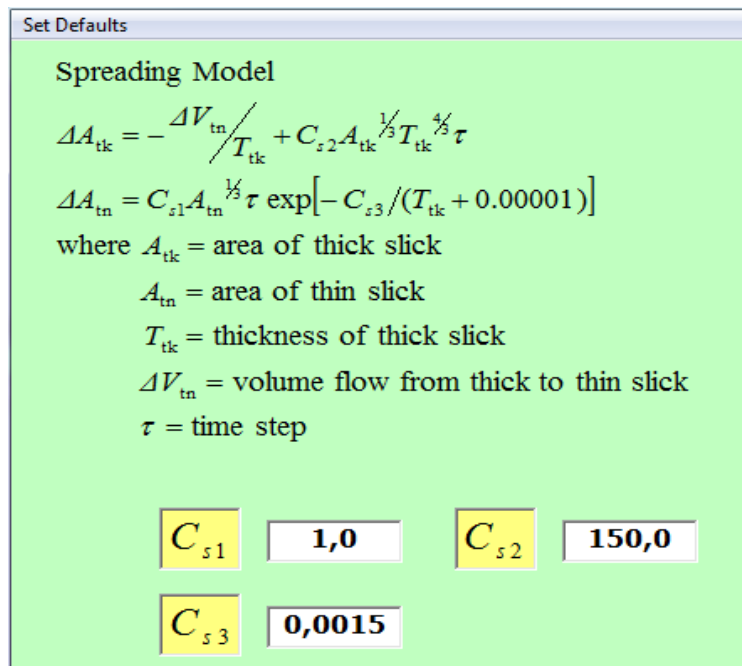


Ο Mackay προσέγγισε την αύξηση της λεπτής κηλίδας μέσω μιας εξίσωσης, η οποία θεωρεί την αύξηση αυτή ανάλογη της κυβικής ρίζας της επιφάνειας της λεπτής κηλίδας, του χρονικού βήματος και μιας εκθετικής συνάρτησης του πάχους της παχιάς κηλίδας που αντανακλά την τάση των κηλίδων να σταματούν την εξάπλωσή τους όταν γίνουν πολύ λεπτές. Η εξίσωση αυτή είναι:

$$\Delta A_{tn}^{(s)} = C_1^{(s)} A_{tn}^{0.33} \exp\left[\frac{-C_3^{(s)}}{(T_{tk} + 0.00001)}\right] \quad (5.39)$$

όπου  $C_1^{(s)}$  και  $C_3^{(s)}$  σταθερές με τιμές 1 και 0.0015 αντίστοιχα.

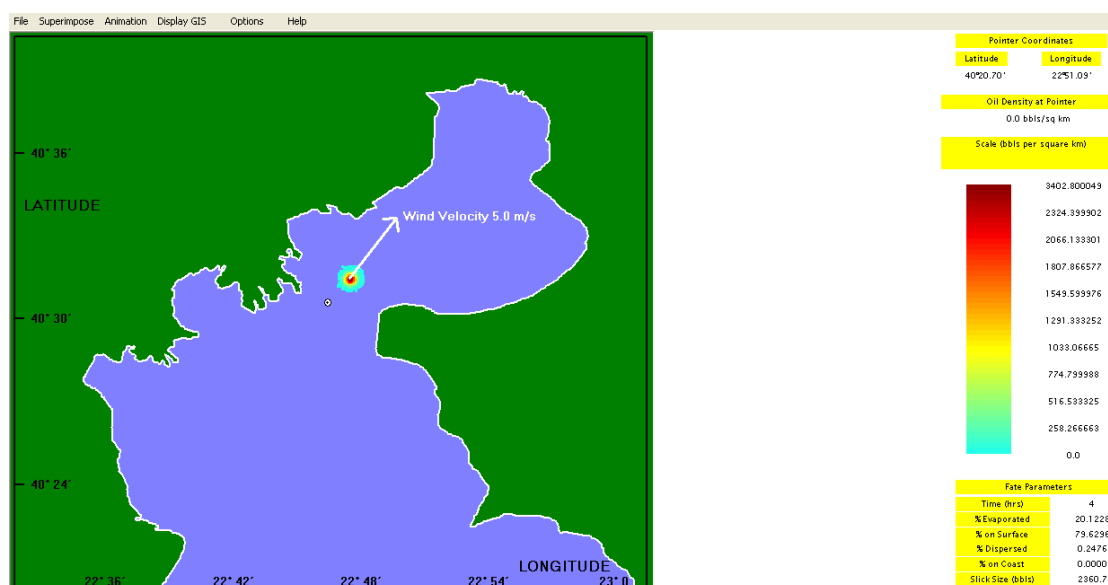
Η μηχανική εξάπλωση θεωρείται ότι πραγματοποιείται τις πρώτες 48 ώρες μετά τη διαρροή της κάθε υποκηλίδας ή μέχρι το παχύ τμήμα της κηλίδας να γίνει ίσο με το λεπτό. Μόλις συμβεί ένα από τα δύο, το πρόγραμμα τερματίζει κάθε περαιτέρω εξάπλωση και μεταφέρει όλο το εναπομείναν πετρέλαιο στην παχιά κηλίδα και στα σύννεφα σταγόνων κάτω από αυτό στη λεπτή κηλίδα. Από αυτό το σημείο και έπειτα αγνοούνται από το πρόγραμμα οι διεργασίες της εξάτμισης και της διασποράς της παχιάς κηλίδας.



Εικόνα 5.9: Μοντέλο εξάπλωσης του MEDSLIK

## 5.4 Αποτελέσματα – Γραφικά

Το τρίτο και τελευταίο τμήμα του MEDSLIK αφορά στα αποτελέσματα του μοντέλου εξέλιξης των πετρελαιοκηλίδων. Ένα από τα παρεχόμενα menu, όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.1, είναι το «mode». Σε αυτό το menu επιλέγεται εξαρχής το περιεχόμενο του περιστατικού που θα εξεταστεί. Συγκεκριμένα, δίνεται η δυνατότητα μελέτης της εξέλιξης μίας ή πολλών πετρελαιοκηλίδων συγχρόνως, πρόβλεψης της τροχιάς μίας ή πολλών κηλίδων και μελέτης της μεταφοράς της ρύπανσης. Ανάλογα με το ποια επιλογή θα γίνει, αντίστοιχα θα είναι τα αποτελέσματα του πεδίου Output.

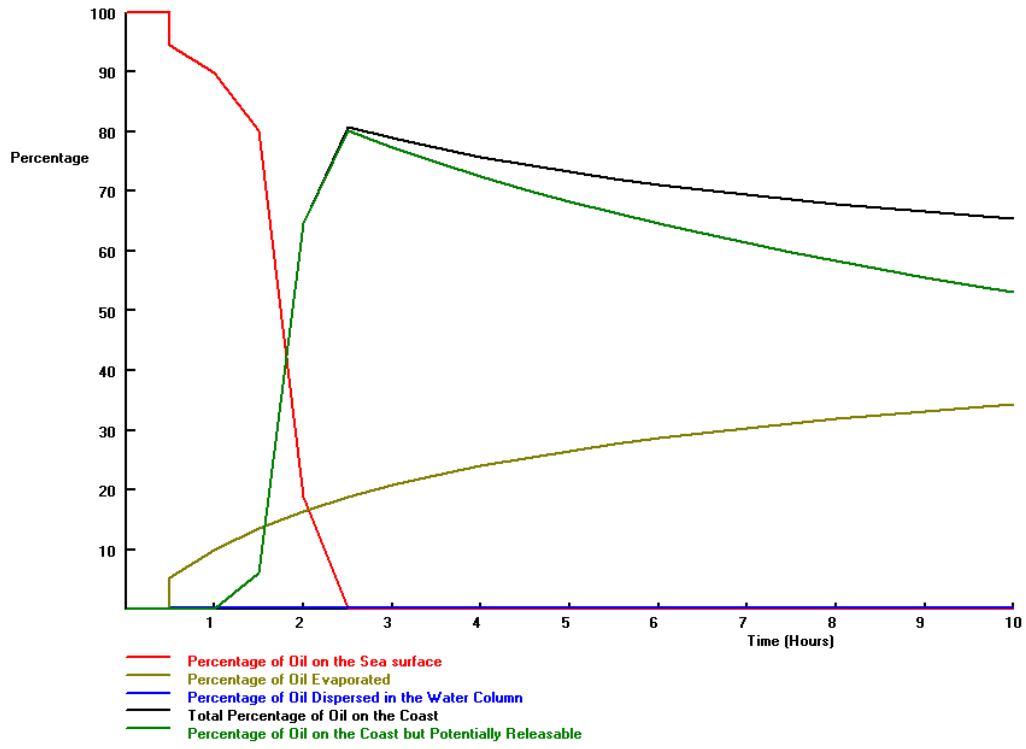


Σχήμα 5.3: Γραφική απεικόνιση του πετρελαίου μετά από ατύχημα στο Θερμαϊκό Κόλπο

Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν γραφικά της εικόνας της πετρελαιοκηλίδας σε διάφορους χρόνους που καθορίζονται από το χρήστη, διαγράμματα για τις παραμέτρους συναρτήσεως του χρόνου, αριθμητικά αποτελέσματα αλλά και animation.

Επιλέγοντας από το menu «File» την εντολή της προβολής του πετρελαίου στην επιφάνεια της θάλασσας (view surface oil) σε συγκεκριμένο χρόνο, φαίνεται στην οθόνη μία εικόνα-χάρτης. Στο χάρτη φαίνεται η εικόνα της πετρελαιοκηλίδας, το διάνυσμα της ταχύτητας του ανέμου και υπάρχει η δυνατότητα εμφάνισης της κυκλοφορίας των θαλάσσιων ρευμάτων. Στα δεξιά υπάρχει υπόμνημα της χρωματικής κλίμακας που αναπαριστά την πυκνότητα του πετρελαίου σε  $\text{bbls}/\text{Km}^2$ . Τέλος, κάτω δεξιά φαίνονται οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων σχετικών με τις φυσικές διεργασίες που επηρεάζουν την πετρελαιοκηλίδα. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται το ποσοστό του πετρελαίου που έχει εξατμιστεί, το ποσοστό που βρίσκεται στην επιφάνεια, το ποσοστό που έχει υποστεί διασπορά, το ποσοστό στην ακτή και το μέγεθος της κηλίδας σε τόνους εκείνη τη χρονική στιγμή.

Επιλέγοντας την εντολή «Display oil fate» του menu «File» και στη συνέχεια «oil fate parameters» εμφανίζεται το γράφημα του ποσοστού που εξατμίζεται, του ποσοστού στην επιφάνεια, του ποσοστού που έχει υποστεί διασπορά, του συνολικού ποσοστού στην ακτή και του ποσοστού του ελεύθερου πετρελαίου στην ακτή συναρτήσεως του χρόνου.



Σχήμα 5.4: Διαγράμματα εξέλιξης των διεργασιών της πετρελαιοκηλίδας συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης

## 6. Τα μοντέλα FLOW-3DL/OSM

### 6.1 Το υδροδυναμικό μοντέλο FLOW-3DL

#### 6.1.1 Εισαγωγή

Το μαθηματικό μοντέλο FLOW-3DL (Stamou et al. 1999; 2007a; 2007b) έχει δομηθεί στο Υπολογιστικό Κέντρο του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ με την επιστημονική ευθύνη του Καθηγητή Αναστάσιου Ι. Στάμου. Το FLOW-3DL είναι ένας κώδικας πεπερασμένων διαφορών γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN. Έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει την τρισδιάστατη υδροδυναμική συμπεριφορά και τις βασικές διεργασίες (μεταφορά, διάχυση, φυσικοχημικές και βιολογικές αντιδράσεις), οι οποίες καθορίζουν την ποιότητα των νερών στους υδάτινους αποδέκτες (Παπαδονικολάκη, 2013).

#### 6.1.2 Διαφορικές εξισώσεις πεδίου ροής

Οι θεμελιώδεις εξισώσεις που επιλύει το μοντέλο FLOW-3DL για τον υπολογισμό του πεδίου ροής είναι οι τρισδιάστατες διαφορικές εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης σε μη μόνιμη κατάσταση, διατυπωμένες για στρώματα σταθερού πάχους, στα οποία διαιρείται το εξεταζόμενο πεδίο. Θεωρώντας σταθερές διαπερατές διεπιφάνειες μεταξύ των στρωμάτων, οι εξισώσεις του μοντέλου ολοκληρώνονται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση στο βάθος  $h$  που αντιστοιχεί σε ένα υπολογιστικό στρώμα με το ίδιο πάχος, και επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

Για την κατανομή της πίεσης γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

- 1) η κατανομή της πίεσης είναι υδροστατική,
- 2) ισχύει η προσέγγιση Boussinesq και
- 3) η πίεση στην επιφάνεια είναι ίση με την ατμοσφαιρική (μηδέν).

Οι μεταβλητές του υδροδυναμικού μοντέλου είναι:

- 1) οι μέσες κατά βάθος συνιστώσες της ταχύτητας  $u$ ,  $v$  και  $w$  [ $L/T$ ] κάθε στρώματος κατά τους άξονες  $x$ ,  $y$  και  $z$  αντίστοιχα ενός καρτεσιανού συστήματος αξόνων και
- 2) η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας,  $\zeta$  [ $L$ ].

Ο άξονας  $z$  θεωρείται θετικός πάνω από τη στάθμη ηρεμίας της ελεύθερης επιφάνειας. Οι εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης γράφονται ως εξής:

Εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6.1)$$

Εξισώσεις ποσότητας κίνησης κατά τις διευθύνσεις  $x$ ,  $y$  και  $z$ :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (6.4)$$

όπου  $t$  [T] είναι ο χρόνος,  $u, v$  και  $w$  [L/T] είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας κατά τις διευθύνσεις  $x, y$  και  $z$  αντίστοιχα,  $p$  [F/A] είναι η πίεση,  $f$  είναι η παράμετρος Coriolis,  $g$  [L/T<sup>2</sup>] είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $\rho$  [M/L<sup>3</sup>] είναι η πυκνότητα του νερού και  $v_h$  και  $v_v$  [L<sup>2</sup>/T] είναι ο οριζόντιος και ο κατακόρυφος συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας αντίστοιχα. Σε αυτή την περίπτωση οι τιμές τους θεωρήθηκαν σταθερές, ίσες με 100 και 0,1 m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> αντίστοιχα.

Για δεδομένη κατά βάθος κατανομή της πυκνότητας, η πίεση  $p$  μπορεί να προσδιορισθεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση (6.4). Στη συνέχεια υπολογίζονται οι οριζόντιες συνιστώσες της ταχύτητας ( $u$  και  $v$ ) από τις εξισώσεις (6.2) και (6.3). Οι κάθετες ταχύτητες ( $w$ ) υπολογίζονται από την εξίσωση συνέχειας (6.1) για κάθε στρώμα αρχίζοντας από τον πυθμένα, όπου χρησιμοποιείται η οριακή συνθήκη  $w=0$ .

Στην ελεύθερη επιφάνεια, η εξίσωση συνέχειας (6.1) γράφεται ως μια γραμμικοποιημένη οριακή κινηματική συνθήκη για τον προσδιορισμό της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} u_\zeta + \frac{\partial \zeta}{\partial y} v_\zeta = w_\zeta \quad (6.5)$$

όπου με το δείκτη «ζ» συμβολίζονται οι τιμές στην ελεύθερη επιφάνεια.

Στην παρούσα εργασία το μοντέλο εφαρμόζεται σε ένα ενιαίο στρώμα για τον υπολογισμό των κατά βάθος μέσων ταχυτήτων. Τότε, οι οριζόντιες ταχύτητες, κατά  $x$  και  $y$  των επιφανειακών ρευμάτων ( $U_{surf}$  και  $V_{surf}$  αντίστοιχα) υπολογίζονται από τις εξισώσεις (6.6) και (6.7) (Κουτίτας, 1985):

$$U_{surf} = 1.5U + 0.03U_{wx} \quad (6.6)$$

$$V_{surf} = 1.5V + 0.03U_{wy} \quad (6.7)$$

όπου  $U_{wx}$  και  $U_{wy}$  είναι οι συντελεστές ταχύτητας του ανέμου (m·s<sup>-1</sup>), στις διευθύνσεις  $x$  και  $y$  αντίστοιχα.

### 6.1.3 Οριακές συνθήκες

Για να επιλυθούν οι εξισώσεις του πεδίου ροής και των ποιοτικών παραμέτρων χρειάζεται να ορισθούν πρώτα οριακές συνθήκες στα ακόλουθα όρια:

- 1) στην ελεύθερη επιφάνεια
- 2) στον πυθμένα
- 3) στις διεπιφάνειες μεταξύ στρωμάτων
- 4) στα στερεά όρια και
- 5) στα όρια ανοικτής θάλασσας.

### 6.1.3.1 Ελεύθερη επιφάνεια

Στην ελεύθερη επιφάνεια η διατμητική τάση που οφείλεται στον άνεμο υπολογίζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{\tau_{sx}}{\rho} = v_v \frac{\partial u}{\partial z} = C_s u_{10} \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2} \quad (6.7)$$

$$\frac{\tau_{sy}}{\rho} = v_v \frac{\partial v}{\partial z} = C_s v_{10} \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2} \quad (6.8)$$

όπου  $\tau_{sx}$  και  $\tau_{sy}$  [ $M/LT^2$ ] είναι οι οριζόντιες συνιστώσες της διατμητικής τάσης κατά τις διευθύνσεις  $x$  και  $y$ , αντίστοιχα, στην ελεύθερη επιφάνεια,  $u_{10}$  και  $v_{10}$  [ $L/T$ ] είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 10 m. από την ελεύθερη επιφάνεια, κατά μήκος των αξόνων  $x$  και  $y$ , αντίστοιχα, και  $C_s$  είναι ο συντελεστής (αδιάστατος) διατμητικής τάσης στην ελεύθερη επιφάνεια, ο οποίος εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου.

Ο συντελεστής τριβής επιφάνειας ( $C_s$ ) έχει σημαντική επίδραση στις τιμές των ταχυτήτων. Η μείωση της τιμής του συντελεστή τριβής επιφάνειας προκαλεί μείωση του μέτρου των ταχυτήτων με τάση προς απόσβεση των στροβιλισμών στις πολύ μικρές τιμές του.

### 6.1.3.2 Πυθμένας

Στον πυθμένα η διατμητική τάση υπολογίζεται από:

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = v_v \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=H} = C_b u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (6.9)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho} = v_v \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=H} = C_b v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (6.10)$$

όπου  $\tau_{bx}$  και  $\tau_{by}$  [ $M/LT^2$ ] είναι οι οριζόντιες συνιστώσες της διατμητικής τάσης που δρα στον πυθμένα κατά τις διευθύνσεις  $x$  και  $y$ , αντίστοιχα,  $C_b$  είναι ο συντελεστής διατμητικής τάσης στον πυθμένα,  $u_b$  και  $v_b$  [ $L/T$ ] είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας ροής στον πυθμένα κατά μήκος των αξόνων  $x$  και  $y$  αντίστοιχα και  $H$  είναι το συνολικό βάθος.

### 6.1.3.3 Διεπιφάνειες μεταξύ στρωμάτων

Στις διεπιφάνειες μεταξύ των οριζόντιων στρωμάτων του νερού, στην περίπτωση που έχουν επιλεγεί περισσότερα του ενός, η επιβαλλόμενη διατμητική τάση υπολογίζεται ως:

$$\frac{\tau_{ix}}{\rho} = v_v \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=h_i} = C_i (u_u - u_d) \sqrt{(u_u - u_d)^2 + (v_u - v_d)^2} \quad (6.11)$$

$$\frac{\tau_{iy}}{\rho} = v_v \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=h_i} = C_i (v_u - v_d) \sqrt{(u_u - u_d)^2 + (v_u - v_d)^2} \quad (6.12)$$

όπου  $\tau_{ix}$  και  $\tau_{iy}$  είναι οι οριζόντιες συνιστώσες της διατμητικής τάσης κατά τις διευθύνσεις  $x$  και  $y$ , αντίστοιχα, στη διεπιφάνεια μεταξύ των στρωμάτων,  $C_i$  είναι ο συντελεστής διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια,  $u_u$  και  $v_u$  οι συνιστώσες της

ταχύτητας στο υπερκείμενο στρώμα και  $u_d$  και  $v_d$  οι συνιστώσες της ταχύτητας στο υποκείμενο στρώμα κατά  $x$  και  $y$ , αντίστοιχα, και  $h_i$  είναι το βάθος της διεπιφάνειας.

#### 6.1.3.4 Στερεά όρια

Οι εγκάρσιες προς τα στερεά όρια συνιστώσες της ταχύτητας τίθενται ίσες με μηδέν. Η συνθήκη αυτή προϋποθέτει μη κατακλυσμό των χερσαίων ζωνών πέρα από την αρχική ακτογραμμή.

#### 6.1.3.5 Όρια ανοικτής θάλασσας

Στα όρια ανοικτής θάλασσας μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες συνθήκες (Κρεστενίτης, 1988):

- 1) Ελεύθερη (χωρίς ανάκλαση) διάβαση (για τις εγκάρσιες στα όρια ανοικτής θάλασσας ταχύτητες).
- 2) Γνωστή διακύμανση της ελεύθερης επιφάνειας ή των ταχυτήτων ροής (π.χ. περιοδική διακύμανση στάθμης, εξαιτίας παλίρροιας).
- 3) Συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων (π.χ. της ελεύθερης επιφάνειας, των ταχυτήτων ροής ή των ποιοτικών παραμέτρων), από μετρήσεις πεδίου.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η πρώτη περίπτωση, η συνθήκη ελεύθερης διάβασης.

### 6.1.4 Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής και της συμπεριφοράς ποιοτικών παραμέτρων

#### 6.1.4.1 Γενικά

Οι διαφορικές εξισώσεις του πεδίου ροής και των ποιοτικών παραμέτρων, οι οποίες παρουσιάστηκαν παραπάνω, γράφονται με την ακόλουθη γενική μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \text{div}(\rho U\Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S_\Phi \quad (6.13)$$

Θέτοντας:

- 1)  $\Phi=1$  προκύπτει η εξίσωση συνέχειας,
- 2)  $\Phi=u, v$  ή  $w$  προκύπτουν οι εξισώσεις ποσότητας κίνησης και
- 3)  $\Phi=T$  ή  $S$  προκύπτει η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης της ποιοτικής παραμέτρου συγκέντρωσης  $C$ .

Στη συντριπτική πλειοψηφία των πρακτικών εφαρμογών οι διαφορικές εξισώσεις της μορφής (6.13) δεν επιλύονται αναλυτικά. Η επίλυσή τους γίνεται με αριθμητικές μεθόδους, οι σημαντικότερες των οποίων είναι:

- 1) πεπερασμένων διαφορών ή διαφορικών όγκων,
- 2) πεπερασμένων στοιχείων, και
- 3) οριακών στοιχείων.

Στο μοντέλο FLOW-3DL χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών ή διαφορικών όγκων. Στη μέθοδο αυτή το συνεχές πεδίο υπολογισμού των διαφορικών εξισώσεων αντικαθίσταται από μικρές περιοχές υπολογισμού, οι οποίες καλούνται «διαφορικοί όγκοι», δο. Στους δο γίνεται η ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων

και προκύπτουν οι αριθμητικές εξισώσεις. Στη συνέχεια οι αριθμητικές εξισώσεις επιλύονται άμεσα με ρητό (explicit) σχήμα επίλυσης ανάντη διαφορών.

Σημειώνεται, ότι οι αριθμητικές εξισώσεις που προκύπτουν δεν είναι απόλυτα ακριβείς, όπως οι διαφορικές εξισώσεις, καθώς ο καθορισμός της μορφής μεταβολής των τιμών των συναρτήσεων μεταξύ των δο (σχήμα μεταβολής) ή η αντικατάσταση των όρων των διαφορικών εξισώσεων από προσεγγιστικές εκφράσεις εισάγουν σφάλματα υπολογισμού.

#### 6.1.4.2 Διακριτοποίηση του πεδίου ροής

Στο FLOW-3DL για την αριθμητική επίλυση γίνεται διακριτοποίηση του πεδίου κατά τις οριζόντιες, αλλά και κατά την κατακόρυφη διάσταση, με ορθογωνικό πλέγμα διαστάσεων  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  και  $\Delta z$ , αντίστοιχα.

Τα πλευρικά όρια των ακτών και της ανοικτής θάλασσας προσεγγίζονται τμηματικά με πλευρές δο, οι οποίες είναι παράλληλες προς την  $Ox$  ή την  $Oy$ .

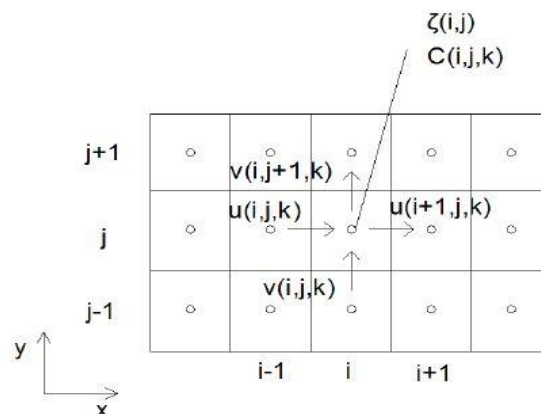
Το πλέγμα στο FLOW-3DL είναι έκκεντρο (staggered grid). Οι ταχύτητες ( $u, v$  και  $w$ ) και τα βαθμωτά μεγέθη (η ανύψωση  $\zeta$  της επιφάνειας και οι ποιοτικές παράμετροι  $\Phi$ ), υπολογίζονται σε χαρακτηριστικές θέσεις του έκκεντρου πλέγματος. Συγκεκριμένα:

- 1) οι  $u, v$  και  $w$  στις πλευρές των δο που είναι παράλληλοι προς τις  $Ox, Oy$  και  $Oz$ , αντίστοιχα και
- 2) η ανύψωση της επιφάνειας του νερού  $\zeta$  και των ποιοτικών παραμέτρων  $\Phi$  στο κέντρο των δο.

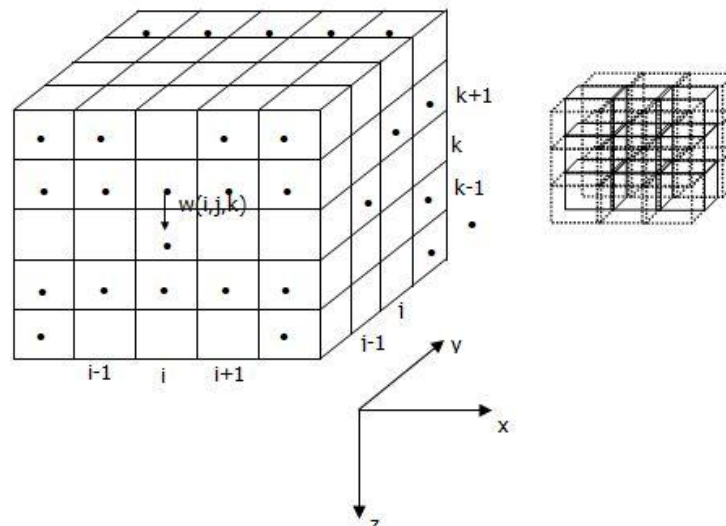
Επιπλέον, χαρακτηρίζονται με δείκτες ή εκθέτες που αντιστοιχούν στις τιμές των μεταβλητών  $x, y, z$  και  $t$ . Πιο συγκεκριμένα:

- 1) ο δείκτης  $i$  αναφέρεται στην τετμημένη  $Ox$  ( $x_i=i\Delta x$ ),
- 2) ο δείκτης  $j$  αναφέρεται στην τετμημένη  $Oy$  ( $y_j=j\Delta y$ ),
- 3) ο δείκτης  $k$  αναφέρεται στην τεταγμένη  $Oz$  ( $z_k=k\Delta z$ ) και
- 4) ο εκθέτης  $n$  αναφέρεται στο χρόνο ( $t^n=n\Delta t$ ).

Οι θέσεις υπολογισμού των  $u, v, w$  και  $\zeta$  στο Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων  $Oxyz$  και οι επισημάνσεις τους με δείκτες φαίνονται στο Σχήμα 6.1. Τα σύμβολα  $n, s, w$  και  $e$  χρησιμοποιούνται για την επισήμανση της βόρειας, νότιας, δυτικής και ανατολικής πλευράς των διαφορικών όγκων, αντίστοιχα.







**Σχήμα 6.1:** Σκαρίφημα αριθμητικού πλέγματος για τη διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων (Ρούμπα, 2012)

## 6.2 Το μοντέλο πετρελαιοκηλίδας OSM (Oil Spill Model)

### 6.2.1 Εισαγωγή

Το μοντέλο εκτίμησης της πετρελαιοκηλίδας OSM (Παπαδονικολάκη, 2013) αναπτύχθηκε για την πρόβλεψη των κινήσεων των σωματιδίων του πετρελαίου, επομένως της τροχιάς της πετρελαιοκηλίδας, στις δύο διαστάσεις (2D), λαμβάνοντας υπόψη τις διεργασίες παλαίωσης του πετρελαίου (weathering processes) οι οποίες χρησιμοποιούνται από την πλειοψηφία των μαθηματικών μοντέλων συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδας. Οι διεργασίες αυτές είναι η εξάπλωση, η εξάτμιση, η διασπορά, η διάλυση και η γαλακτωματοποίηση. Η μετάθεση και η διασπορά της πετρελαιοκηλίδας προσεγγίζονται με τη μέθοδο παρακολούθησης της κίνησης των σωματιδίων (particle tracking method). Η συνολική μάζα της πετρελαιοκηλίδας διαχωρίζεται σε συγκεκριμένο αριθμό σωματιδίων τα οποία μετατοπίζονται στο χώρο με τυχαίο τρόπο (random walk procedure) και ανεξάρτητα μεταξύ τους (Παπαδονικολάκη, 2013).

Οι αναγκαίες εισοδοι για το μοντέλο είναι:

- 1) η ποσότητα (μάζα και όγκος) και οι ιδιότητες του πετρελαίου που έχει διαρρεύσει,
- 2) οι συντελεστές της ταχύτητας των επιφανειακών ρευμάτων σε κάθε διεύθυνση,
- 3) τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά,
- 4) τα χαρακτηριστικά της θάλασσας (πυκνότητα και θερμοκρασία),
- 5) οι θέσεις των ατυχημάτων.

### 6.2.2 Φυσικές διεργασίες

Στην παρούσα έκδοση του μοντέλου για την εκτίμηση της εξέλιξης μιας πετρελαιοκηλίδας λαμβάνονται υπόψη και υπολογίζονται οι διεργασίες εξάπλωσης, εξάτμισης, διασποράς, διάλυσης και γαλακτωματοποίησης.

Ο Cohen (1980) ανέπτυξε μία θεωρία πολλαπλών συντελεστών για τον υπολογισμό του ποσοστού της μάζας του πετρελαίου που χάνεται λόγω διάλυσης που φαίνεται στην εξίσωση (6.14):

$$S_D = K_D A_s S \quad (6.14)$$

όπου  $S_D$  είναι ο συνολικός ρυθμός διάλυσης της πετρελαιοκηλίδας ( $\text{gr}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $K_D$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς της μάζας διάλυσης (συνήθως λαμβάνεται  $3\cdot 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $S$  είναι η διαλυτότητα του πετρελαίου σε νερό, η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$S = S_0 e^{-at} \quad (6.15)$$

όπου  $S_0$  είναι η διαλυτότητα του φρέσκου αργού πετρελαίου ( $\text{gr}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $a$  είναι η σταθερά απόσβεσης ( $\text{ημέρα}^{-1}$ ) και  $t$  είναι ο χρόνος σε ημέρες.

### 6.2.3 Εξάτμιση

Η εξάτμιση αποτελεί τον κυρίαρχο μηχανισμό που καθορίζει την εξέλιξη μιας πετρελαιοκηλίδας, καθώς προκαλεί ταχεία μείωση στον όγκο του πετρελαίου που έχει διαρρεύσει, μέχρι και 20-40% απώλειες κατά τις πρώτες ώρες διαρροής, και επηρεάζει το ιζώδες και την πυκνότητα του πετρελαίου που δεν εξατμίζεται, αυξάνοντάς τα. Ο Mackay (1980) πρότεινε μία αναλυτική μέθοδο για τον υπολογισμό του ρυθμού εξάτμισης του πετρελαίου, η οποία χρησιμοποιεί την ημιεμπειρική θεωρία σχετικά με την απόσταξη πολυσύνθετων υγρών, θεωρώντας ότι το εξατμιζόμενο ποσοστό του όγκου του πετρελαίου δεν παραμένει σταθερό. Η μέθοδος εκφράζεται από την εξίσωση:

$$F_e = \left( \frac{T}{BT_G} \right) \ln \left( \theta \left( \frac{BT_G}{T} \right) \exp \left( A - \frac{BT_0}{T} \right) + 1 \right) \quad (6.16)$$

όπου  $F_e$  είναι το κλάσμα του όγκου του πετρελαίου που εξατμίζεται,  $T$  είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (K),  $A$  και  $B$  είναι σταθερές που προέρχονται από τα δεδομένα απόσταξης,  $T_0$  είναι το αρχικό σημείο βρασμού σε  $F_e=0$  (K),  $T_G$  είναι η κλίση της καμπύλης απόσταξης (K),  $T$  είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (K),  $\theta$  είναι η έκθεση σε εξάτμιση, δηλαδή ο όγκος του εκτιθέμενου ατμού σε χρόνο  $t$  συναρτήσει του αρχικού όγκου διαρροής και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\theta = \frac{K_2 A_s t}{V_0} \quad (6.17)$$

όπου  $V_0$  είναι ο αρχικός όγκος της πετρελαιοκηλίδας ( $\text{m}^3$ ),  $K_2$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας για την εξάτμιση ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), που ορίζεται από την εξίσωση (6.18) (Mackay and Matsugu, 1973):

$$K_2 = 0.0107 U_w^{0.78} D_s^{-0.11} S_c^{-0.67} \quad (6.18)$$

όπου  $U_w$  είναι η ταχύτητα του ανέμου ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $D_s$  είναι η διάμετρος της πετρελαιοκηλίδας (m) και  $S_c$  είναι ο αριθμός Schmidt ο οποίος αντιπροσωπεύει την τραχύτητα της επιφάνειας.

### 6.2.4 Γαλακτωματοποίηση

Η γαλακτωματοποίηση είναι η διεργασία που συμβάλλει ιδιαίτερα στην αύξηση του όγκου του πετρελαίου και συνεπώς στην εμμονή της κηλίδας στην επιφάνεια του νερού. Τα σταγονίδια του νερού διασκορπίζονται μέσα στη μάζα του πετρελαίου και το μίγμα που προκύπτει έχει ιδιαίτερα αυξημένο ιξώδες και πυκνότητα. Ο Mackay (1980) προσέγγισε τον υπολογισμό του ποσοστού γαλακτωματοποίησης μέσω μιας εξίσωσης, η οποία λαμβάνει υπόψη την επίδραση των ανεμολογικών συνθηκών, τη θερμοκρασία και τα χαρακτηριστικά του πετρελαίου:

$$F_w = K_b \left( 1 - \exp\left(\frac{-K_a}{K_b} (U_w + 1)^2 t\right) \right) \quad (6.19)$$

όπου  $F_w$  είναι η κλασματική περιεκτικότητα σε νερό,  $K_a$  είναι μια σταθερά που δίνεται και είναι ανάλογη με την ταχύτητα του ανέμου και  $K_b$  είναι το ιξώδες. Σύμφωνα με τους Guo και Wang (2009), ο όγκος και η πυκνότητα της πετρελαιοκηλίδας αυξάνουν με το χρόνο λόγω της αλληλεπίδρασης των διεργασιών της εξάτμισης, της διάλυσης και της γαλακτωματοποίησης. Η διαδικασία αυτή καθορίζεται από τις εξισώσεις:

$$V_{oil} = \frac{V_0(1-(F_e+F_d))}{1-F_w} \quad (6.20)$$

$$\rho_{oil} = \rho_w F_w + (1 - F_w)(\rho_0 + K_b F_e) \quad (6.21)$$

όπου  $V_0$  είναι ο αρχικός όγκος του πετρελαίου που έχει διαρρεύσει ( $m^3$ ),  $\rho_{oil}$  είναι η πυκνότητα του εναπομείναντος πετρελαίου και  $\rho_0$  είναι η αρχική πυκνότητα του πετρελαίου ( $kg \cdot m^{-3}$ ). Ο όγκος της πετρελαιοκηλίδας  $V_{oil}$  και η πυκνότητα του πετρελαίου  $\rho_{oil}$ , υπολογίζονται σε κάθε χρονικό βήμα χρησιμοποιώντας τις εμπειρικές εξισώσεις (6.20) και (6.21).

### 6.2.5 Διασπορά

Για την προσομοίωση της μετατόπισης και της τυρβώδους μεταφοράς και διασποράς της πετρελαιοκηλίδας χρησιμοποιείται η μέθοδος παρακολούθησης των σωματιδίων. Σε κάθε χρονικό βήμα η νέα μάζα της πετρελαιοκηλίδας χωρίζεται σε έναν αριθμό σωματιδίων, όπου ο αλγόριθμος της τυχαίας διαδικασίας χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των τροχιών τους και των αλλαγών της πετρελαιοκηλίδας λόγω της μετατόπισης και της διασποράς. Η μετατόπιση του κάθε σωματιδίου στις δύο διευθύνσεις υπολογίζεται σε κάθε χρονικό βήμα από τις εξισώσεις:

$$DS_x = U_{surf} Dt + DS \cos \theta \quad (6.22)$$

$$DS_y = V_{surf} Dt + DS \sin \theta \quad (6.23)$$

όπου  $DS$  είναι η απόσταση (m) που κάθε σωματίδιο ταξιδεύει. Αυτό οφείλεται στην οριζόντια διασπορά σε κάθε χρονικό βήμα και δίνεται από την εξίσωση (Chao, 2001):

$$DS = [R]_0^1 \sqrt{12D_h Dt} \quad (6.24)$$

όπου  $D_h$  είναι ο οριζόντιος συντελεστής διασποράς ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ),  $R$  είναι ένας τυχαίος αριθμός στο διάστημα  $[0,1]$  και περιλαμβάνει το στοχαστικό παράγοντα και  $\theta$  είναι μια γωνία (rad) που υποδηλώνει την τυχαιότητα της κατεύθυνσης του κάθε σωματιδίου, σε κάθε χρονικό βήμα, λόγω της διασποράς, που υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\theta = 2\pi[R]_0^1 \quad (6.25)$$

Η νέα θέση ( $X, Y$ ) του κάθε σωματιδίου υπολογίζεται στη συνέχεια, σε κάθε χρονικό βήμα:

$$X = X^0 + DS_x \quad \text{και} \quad Y = Y^0 + DS_y \quad (6.26)$$

όπου  $X^0, Y^0$  είναι οι συντεταγμένες της θέσης ενός σωματιδίου σε συγκεκριμένο επίπεδο του χρόνου. Ο συνολικός αριθμός των σωματιδίων  $N$  και της μάζας  $M$  του πετρελαίου σε κάθε κελί του αριθμητικού πλέγματος μπορούν στη συνέχεια να εξαχθούν σε κάθε στιγμή-βήμα.

### 6.2.6 Εξάπλωση

Από τη στιγμή που συμβαίνει διαρροή πετρελαίου, πραγματοποιείται οριζόντια εξάπλωση πάνω στην επιφάνεια της θάλασσας λόγω της βαρύτητας, της δυναμικής, της επιφανειακής τάσης, του ιξώδους και της τυρβώδους διάχυσης. Σύμφωνα με τον Lehr (1984) η διάδοση αυτή του πετρελαίου, η οποία επηρεάζεται από τον άνεμο, είναι μη συμμετρική και μοιάζει με έλλειψη περιγράφεται από την εξίσωση:

$$A_s = \frac{\pi}{4} L_{\min} L_{\max} \quad \text{ή} \quad A_s = 2270 \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_{oil}} \right)^{\frac{2}{3}} V_0^{\frac{2}{3}} t^{\frac{1}{2}} + 40 \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_{oil}} \right)^{\frac{1}{3}} V_0^{\frac{1}{3}} U_w^{\frac{4}{3}} t \quad (6.27)$$

$$\text{όπου} \quad L_{\min} = 53.76 \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_{oil}} \right)^{\frac{1}{3}} V_0^{\frac{1}{3}} t^{\frac{1}{4}} \quad \text{και} \quad L_{\max} = L_{\min} + 0.95 U_w^{\frac{4}{3}} t^{\frac{3}{4}} \quad (6.28)$$

Όπου  $A_s$  το εμβαδό της κηλίδας ( $m^2$ ),  $L_{\min}$  και  $L_{\max}$  τα μήκη των μικρών και των μεγάλων αξόνων της πετρελαιοκηλίδας (m) αντίστοιχα,  $\Delta\rho = \rho_w - \rho_{oil}$ , όπου  $\rho_w$  και  $\rho_{oil}$  οι πυκνότητες του νερού και του πετρελαίου, αντίστοιχα, ( $kg \cdot m^{-3}$ ),  $V_0$  ο όγκος του πετρελαίου (βαρέλια),  $U_w$  η ταχύτητα του ανέμου (κόμβοι) και  $t$  είναι ο χρόνος (λεπτά).

### 6.2.7 Υπολογιστική διαδικασία

Στο παρόν μοντέλο συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδας (OSM) οι υδροδυναμικοί υπολογισμοί, που πραγματοποιούνται με εφαρμογή του μοντέλου FLOW-3DL, δε γίνονται παράλληλα, αλλά προηγούνται των υπόλοιπων υπολογισμών. Αφού ολοκληρωθεί ο υπολογισμός των μόνιμων συνθηκών του πεδίου ροής για συγκεκριμένη πνοή ανέμου και υπολογιστούν οι μέσες κατά βάθος ταχύτητες, εξάγονται οι ταχύτητες των επιφανειακών ρευμάτων και εισάγονται στο OSM. Το OSM χρησιμοποιεί το ίδιο υπολογιστικό πλέγμα με το υδροδυναμικό μοντέλο. Κάθε κελί του πλέγματος χαρακτηρίζεται από έναν αριθμό,  $N_i$ , με χρήση του οποίου

καταμετράται ο αριθμός σωματιδίων πετρελαίου που κινούνται στα όριά του, σε κάθε χρονικό βήμα. Τα βήματα της υπολογιστικής διαδικασίας είναι τα ακόλουθα:

- 1) Εισάγονται οι περιβαλλοντικοί παράγοντες, δηλαδή η ταχύτητα του ανέμου, η θερμοκρασία του αέρα, η πυκνότητα και η κινηματική συνεκτικότητα του θαλασσινού νερού. Εισάγονται, επίσης, οι ταχύτητες των επιφανειακών θαλάσσιων ρευμάτων κατά  $x$  και  $y$ , οι οποίες υπολογίζονται από τις εξισώσεις (6.6) και (6.7) αντίστοιχα.
- 2) Εισάγονται τα χαρακτηριστικά της αρχικής πετρελαιοκηλίδας, δηλαδή ο όγκος του πετρελαίου που διέρρευσε ( $V_o$ ), η πυκνότητά του ( $\rho_o$ ) και η θέση του ατυχήματος ( $X, Y$ ). Στο βήμα αυτό επιλέγεται και ο αριθμός,  $N$ , των σωματιδίων στον οποίο θα διαχωριστεί η πετρελαιοκηλίδα.
- 3) Γίνεται ο υπολογισμός του νέου όγκου,  $V_{oil}$ , της πετρελαιοκηλίδας και της πυκνότητας,  $\rho_{oil}$ , του πετρελαίου, λαμβάνοντας υπόψη κατά σειρά τις διεργασίες της εξάπλωσης, της εξάτμισης, της διάλυσης και της γαλακτωματοποίησης.
- 4) Υπολογίζεται η νέα συνολική μάζα της πετρελαιοκηλίδας,  $M_{oil}$ , σε κάθε χρονικό βήμα με την εισαγωγή των ανανεωμένων τιμών του όγκου,  $V_{oil}$ , και της πυκνότητας,  $\rho_{oil}$ , του πετρελαίου στην εξίσωση:

$$M_{oil} = V_{oil} \cdot \rho_{oil} \quad (6.29)$$

- 5) Η νέα συνολική μάζα της πετρελαιοκηλίδας,  $M_{oil}$ , χωρίζεται σε  $N$  αριθμό σωματιδίων ίσης μάζας τα οποία μετακινούνται και διασπείρονται στο υγρό πεδίο ανεξάρτητα μεταξύ τους. Η μάζα κάθε σωματιδίου,  $M_i$ , μεταβάλλεται στο χρόνο λόγω της επίδρασης των διεργασιών παλαίωσης του πετρελαίου. Ο αριθμός σωματιδίων θεωρείται σταθερός κατά τη διάρκεια της υπολογιστικής διαδικασίας και ίσος με 10.000 σωματίδια στη συγκεκριμένη εργασία. Η μάζα κάθε σωματιδίου, σε κάθε χρονικό βήμα, υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$M_i = M_{oil} / N \quad (6.30)$$

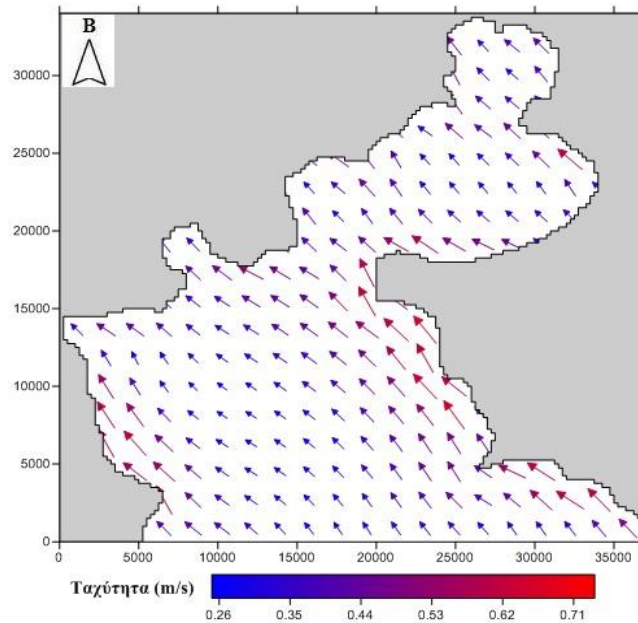
- 6) Υπολογίζεται από τις εξισώσεις (6.22) και (6.23) η μετατόπιση κάθε σωματιδίου, σε κάθε χρονικό βήμα, ως το άθροισμα των αποστάσεων που διανύει το καθένα λόγω μεταφοράς και διασποράς.
- 7) Προσδιορίζεται ο συνολικός αριθμός σωματιδίων,  $N_i$ , που περιλαμβάνεται σε κάθε κελί του υπολογιστικού πλέγματος. Τα σωματίδια που φτάνουν στην ακτή «αποθηκεύονται» στα αντίστοιχα κελιά ενώ τα σωματίδια που εξέρχονται από την περιοχή μελέτης μέσω του ανοικτού ορίου δε λαμβάνονται περαιτέρω υπόψη στους υπολογισμούς. Υπολογίζεται τελικά η παραμένουσα μάζα της πετρελαιοκηλίδας,  $M$ , σε κάθε κελί με χρήση της εξίσωσης:

$$M = M_i \cdot N_i \quad (6.31)$$

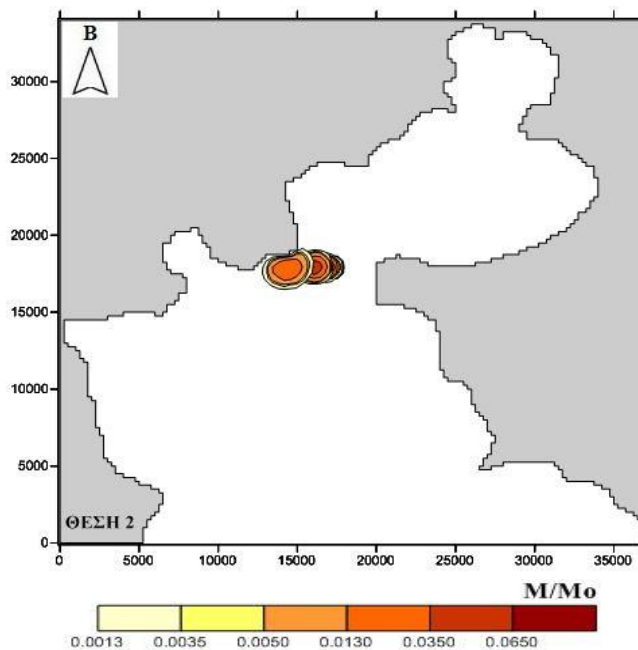
Τα βήματα 3 με 7 επαναλαμβάνονται μέχρις ότου ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού, δηλαδή μέχρις ότου το 10% των σωματιδίων του πετρελαίου εγκαταλείψει το πεδίο υπολογισμού είτε φτάνοντας στην ακτή, είτε εξερχόμενο από την περιοχή μελέτης μέσω του ανοικτού ορίου. Η χρονική στιγμή αυτή συμβολίζεται με  $T^*$  και αποθηκεύεται, ενώ στη συνέχεια οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται μέχρι το χρόνο  $T^*$  προκειμένου να γίνει παρακολούθηση της τροχιάς. Συγκεκριμένα γίνεται αποθήκευση των αποτελεσμάτων στις χρονικές στιγμές  $T^*/8$ ,  $T^*/4$ ,  $T^*/2$  και  $T^*$ , οι οποίες θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικές για την αναπαράσταση της τροχιάς της πετρελαιοκηλίδας.

### 6.3 Αποτελέσματα – Γραφικά

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο πετρελαιοκηλίδας OSM και το υδροδυναμικό μοντέλο του FLOW-3DL, δεν δίνονται άμεσα σε οπτικοποιημένη μορφή. Με το πέρας της υπολογιστικής διαδικασίας, τα αρχεία των αποτελεσμάτων μεταφορτώνονται στο πρόγραμμα Surfer, το οποίο οπτικοποιεί τα υπολογιστικά φύλλα εργασίας.



Σχήμα 6.2: Αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου για Νοτιοανατολικό άνεμο – 6 bf



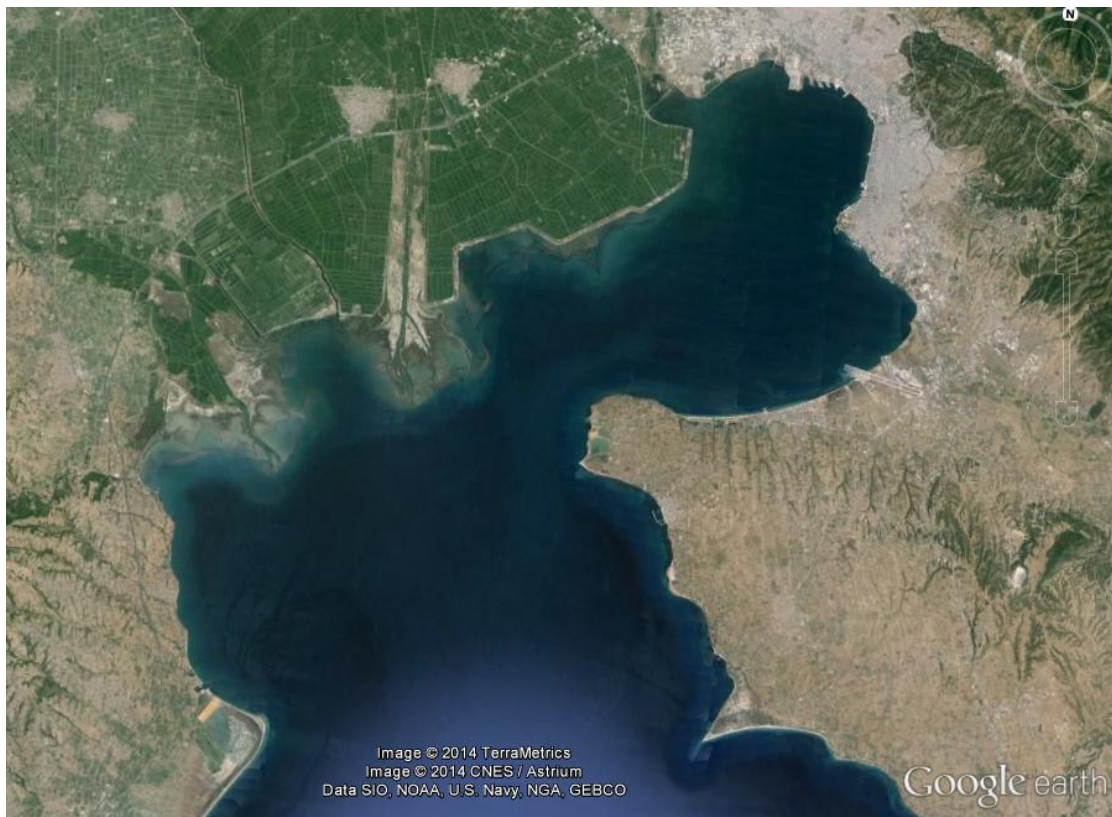
Σχήμα 6.3: Αποτελέσματα του μοντέλου πετρελαιοκηλίδας για Ανατολικό άνεμο – 3 bf στη θέση ατυχήματος 2

## 7. Εφαρμογή των μαθηματικών μοντέλων

### 7.1 Χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης

#### 7.1.1 Περιοχή μελέτης

Για την εφαρμογή και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο προγραμμάτων, επιλέγεται ως περιοχή μελέτης ο Θερμαϊκός Κόλπος. Ο Θερμαϊκός Κόλπος επιλέχθηκε διότι παρουσιάζει μεγάλη ναυτιλιακή κίνηση, καθώς περιλαμβάνει το δεύτερο μεγαλύτερο λιμάνι της Ελλάδας, αυτό της Θεσσαλονίκης, αλλά και μεγάλη περιβαλλοντική και τουριστική αξία για τους κατοίκους της Βόρειας Ελλάδας και των υπόλοιπων Βαλκανικών χωρών, αφού αποτελεί το σύνδεσμό τους με το Αιγαίο Πέλαγος και κατ' επέκταση με τη Μεσόγειο Θάλασσα. Επιπλέον, το υπάρχον ερευνητικό έργο του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. πάνω στη συμπεριφορά των πετρελαιοκηλίδων και στον καταρτισμό χαρτών με ζώνες επικινδυνότητας έχει πραγματοποιηθεί στο Σαρωνικό Κόλπο, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Με την επιλογή του Θερμαϊκού Κόλπου ως περιοχή μελέτης δίνεται η δυνατότητα να παρουσιαστεί η ποιοτική ανταπόκριση των δύο προγραμμάτων στις διαφορετικές συνθήκες και απαιτήσεις του θαλάσσιου συστήματος του Θερμαϊκού Κόλπου, χρησιμοποιώντας αντίστοιχες πραγματικές παραμέτρους.



**Χάρτης 7.1:** Περιοχή μελέτης - Θερμαϊκός Κόλπος  
(πηγή: [www.google.com/earth](http://www.google.com/earth))

Το τμήμα του Θερμαϊκού Κόλπου που μελετάται οριοθετείται από τους νομούς Θεσσαλονίκης (βόρειο και ανατολικό όριο, μέχρι το ύψος του νομού Χαλκιδικής) και Πιερίας (δυτικό όριο). Το νότιο όριο αποτελεί το όριο ανοικτής θάλασσας, μέσω του οποίου συνδέεται με το Αιγαίο πέλαγος και εφαρμόζεται η συνθήκη ελεύθερης διάβασης του πετρελαίου (Κρεστενίτης, 1988). Το πλάτος του κόλπου κυμαίνεται από 5 km στην περιοχή της Θεσσαλονίκης και φτάνει τα 50 km στο νοτιότερο τμήμα του, αποτελώντας το μεγαλύτερο κόλπο στο Αιγαίο πέλαγος. Η περιοχή μελέτης καλύπτει ένα σημαντικό τμήμα του Θερμαϊκού Κόλπου και έχει διαστάσεις 37,5 km x 34,5 km. Δεν περιλαμβάνει αξιοσημείωτα νησιά εντός των υδάτων του και ως μόνος μικρότερος κόλπος, μπορεί να θεωρηθεί αυτός της Θεσσαλονίκης, στο βόρειο τμήμα του, όπου περιλαμβάνει και το σημαντικό λιμάνι της πόλης. Οι ακτές του αποτελούν τις πιο πυκνοκατοικημένες περιοχές της Μακεδονίας, περιλαμβάνοντας το 50% του πληθυσμού της, κυρίως λόγω της παρουσίας της Θεσσαλονίκης, αλλά και λόγω των υπόλοιπων βιομηχανικών και παραθεριστικών παράκτιων δραστηριοτήτων. Επιπλέον, ένα ατύχημα διαρροής πετρελαίου στο Θερμαϊκό θα είχε σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην περιοχή, καθώς περιλαμβάνει σημαντικό αριθμό προστατευόμενων περιοχών και παραλιών κατά μήκος των ακτών του. Στα θαλάσσια νερά του κόλπου εκβάλλουν ο διασυνοριακός ποταμός Αξιός, ο Αλιάκμονας, ο Λουδίας, ο Γαλλικός και αρκετοί μικρότεροι.

### 7.1.2 Βαθυμετρία

Το βάθος του Θερμαϊκού κόλπου θεωρείται ομοιόμορφο και βαθμιαίως προς τα Νότια μεταβαλλόμενο. Ο εσωτερικός κόλπος της Θεσσαλονίκης είναι μία φυσική λεκάνη με όγκο νερού της τάξης των 500 εκατομμυρίων m<sup>3</sup> και βάθη που δεν ξεπερνούν τα 27 μέτρα. Στο εξωτερικό νότιο τμήμα του αυξάνουν τα βάθη και για την περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε φτάνουν τα 48 μέτρα, ενώ γενικά το βάθος εκτός περιοχής μελέτης φτάνει τα 100 μέτρα. Τα στοιχεία γεωμετρίας-βαθυμετρίας της ευρύτερης περιοχής μελέτης ελήφθησαν από το χάρτη της Υδρογραφικής Υπηρεσίας «Βόρειος Ευβοϊκός μέχρι κόλπο Καβάλας» κλίμακας 1:250.000, καθώς και τους χάρτες της ΓΥΣ 1:50.000 με ονομασίες «Βασιλικά» και «Επανομή», μετά από επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής εργασίας «Μαθηματική Προσομοίωση Πλουμίου Αιωρούμενων Στερεών από Θαλάσσια Βυθοκόρηση» (Ρούμπα, 2012).

### 7.1.3 Μετεωρολογικά δεδομένα

Τα μετεωρολογικά στοιχεία, δηλαδή η διεύθυνση και η ένταση του ανέμου που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία ελήφθησαν από το Σταθμό ΜΙΚΡΑ (622) της Ε.Μ.Υ. (Γεωγραφικό πλάτος: 40° 31' N, Γεωγραφικό μήκος: 22° 58' E, Ύψόμετρο: 4,8 m) κατά την περίοδο 1959-1997. Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται οι ετήσιες τιμές των συχνοτήτων παρατήρησης διευθύνσεων-εντάσεων του ανέμου σε κλίμακα Beaufort.



**Πίνακας 7.1:** Ετήσια συχνότητα (%) εμφάνισης διεύθυνσης του ανέμου και αντίστοιχης έντασης (κλίμακα Bf), (Σταθμός Μίκρας, περίοδος 1959-1997)

Beaufort	B	BA	A	NA	N	NA	Δ	BA	ΝΗΝΕΜΙΑ	ΣΥΝΟΛΟ
0									34,477	34,477
1	0,340	0,099	1,097	1,108	0,592	0,274	0,647	1,163		5,320
2	1,766	0,483	5,078	4,617	3,181	1,470	4,222	5,429		26,246
3	2,259	0,165	1,152	1,810	3,246	1,316	3,115	4,924		17,987
4	2,862	0,099	0,329	0,658	1,272	0,504	0,877	3,499		10,100
5	1,349	0,022	0,077	0,143	0,154	0,044	0,099	1,228		3,116
6	0,790	0,011	0,011	0,044	0,022	0,011	0,044	0,834		1,767
7	0,241	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,274		0,581
8	0,099	0	0	0	0	0	0,011	0,197		0,307
9	0,011	0	0,011	0,011	0	0	0,011	0,033		0,077
10	0	0	0	0	0	0	0	0,011		0,011
>11	0	0	0	0	0	0	0	0,011		0,011
ΣΥΝΟΛΟ	9,717	0,890	7,766	8,402	8,478	3,630	9,037	17,603	34,477	100

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 7.1, οι συχνότεροι άνεμοι που πνέουν στο Θερμαϊκό Κόλπο είναι βόρειας και δυτικής διεύθυνσης (B, BA και Δ) με συνολική ετήσια συχνότητα 36,4%. Η κύρια ένταση των ανέμων που πνέουν είναι 2-4 bf με ετήσια συχνότητα 54%. Μεγάλη συχνότητα παρουσιάζει και η νηνεμία, της οποίας η ετήσια συχνότητα ανέρχεται στο 34,477%.

Για την εισαγωγή των ανεμολογικών δεδομένων στα δύο προγράμματα έπρεπε να πραγματοποιηθεί μετατροπή της κλίμακας Beaufort σε m/s. Οι βαθμοί της κλίμακας συσχετίζονται με την ταχύτητα του ανέμου, όπως αυτή μετρείται από ένα ανεμόμετρο, μέσω του εμπειρικού τύπου:

$$u = 0,836 \cdot B^{3/2} \quad (7.1)$$

όπου  $u$  η ταχύτητα του ανέμου σε (m/s) και  $B$  οι βαθμοί της κλίμακας Beaufort.

#### 7.1.4 Στοιχεία παλίρροιας

Στον Πίνακα 7.2 παρουσιάζονται οι τιμές των κύριων χαρακτηριστικών της παλίρροιας στην περιοχή μελέτης. Οι τιμές αυτές θα χρησιμοποιηθούν για την εξέταση του σεναρίου της νηνεμίας, το οποίο παρουσιάζει την κυρίαρχη συχνότητα εμφάνισης στο Θερμαϊκό Κόλπο (Πίνακας 7.1). Το υδρογραφικό υπόβαθρο με τα μετρημένα βάθη ως προς την Κατώτατη Ρηχία, έχουν ληφθεί από το χάρτη Νο. 255 της Υδρογραφικής Υπηρεσίας κλίμακας 1:50.000 με τίτλο «Θερμαϊκός Κόλπος». Στις τιμές των βαθών αυτών προστίθεται και η στάθμη 0,87 m όπως μετρήθηκε από τον παλιρροιογράφο του Λιμένα Θεσσαλονίκης, ώστε τα βάθη να αναφερθούν ως προς τη Μέση Στάθμη Θάλασσας (Ρούμπα, 2012). Για παλιρροιακή κυκλοφορία με περίοδο  $T$  και ημιεύρος παλίρροιας  $\zeta_0$ , η εξίσωση που δίνει την ανύψωση ή την πτώση της ελεύθερης επιφάνειας ακολουθεί ημιτονοειδή μορφή:

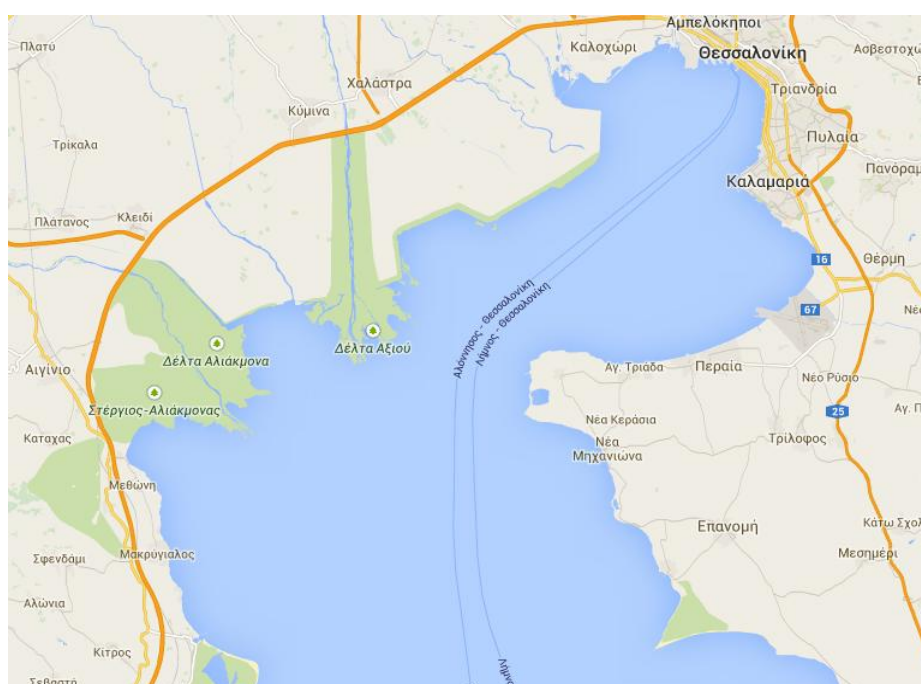
$$\zeta = \zeta_0 \sin(2\pi/T \cdot t) \quad (7.2)$$

**Πίνακας 7.2:** Κύρια χαρακτηριστικά της παλίρροιας στην περιοχή μελέτης (1967-2012)  
(πηγή: Ρούμπα, 2012)

Χαρακτηριστικό	Τιμή (m)
Μέγιστη πλήμμη	1,52
Μέση πλήμμη	0,99
Μέση στάθμη	0,87
Μέση ρηχία	0,74
Κατώτατη ρηχία	0,00

### 7.1.5 Λιμενικές εγκαταστάσεις

Το μεγαλύτερο και πιο σημαντικό λιμάνι που περιλαμβάνει ο Θερμαϊκός Κόλπος, είναι το υπερ-εθνικής εμβέλειας λιμάνι της Θεσσαλονίκης. Ο Λιμένας Θεσσαλονίκης (ΟΛΘ) περιλαμβάνει το συμβατικό λιμάνι, σταθμό Εμπορευματοκιβωτίων, επιβατικό σταθμό, εκτάσεις αποθήκευσης-φύλαξης, το αλιευτικό λιμάνι στη Μηχανιώνα, καθώς και τα αγκυροβόλια φορτοεκφόρτωσης πετρελαιοειδών και χημικών στο Καλοχώρι, που εξυπηρετούν ανάγκες σε Βαλκανικό επίπεδο. Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει και επιμέρους λιμάνια, που χρησιμοποιούνται κυρίως για αλιευτικούς λόγους, κανένα από τα οποία όμως δεν συγκρίνεται σε μέγεθος, κίνηση και επιβάρυνση με το λιμάνι της Θεσσαλονίκης και δεν έχει τη δυνατότητα να υποδεχτεί μεγάλα δεξαμενόπλοια ή άλλου τύπου πλοία που μεταφέρουν τις ποσότητες πετρελαιοειδών (1500 bbbls) που εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική. Για το λόγο αυτό, η επιλογή των τεσσάρων θέσεων ατυχημάτων, που αναλύεται στην παράγραφο 7.2.3, γίνεται σε μεγάλο βαθμό με βάση τις κύριες διαδρομές πλοίων στο Θερμαϊκό Κόλπο, οι οποίες παρουσιάζονται στο Χάρτη 7.2. Η πιθανότητα να συμβεί κάποιο ατύχημα πλοίου εκτός των καθιερωμένων διαδρομών είναι εξαιρετικά μικρή.



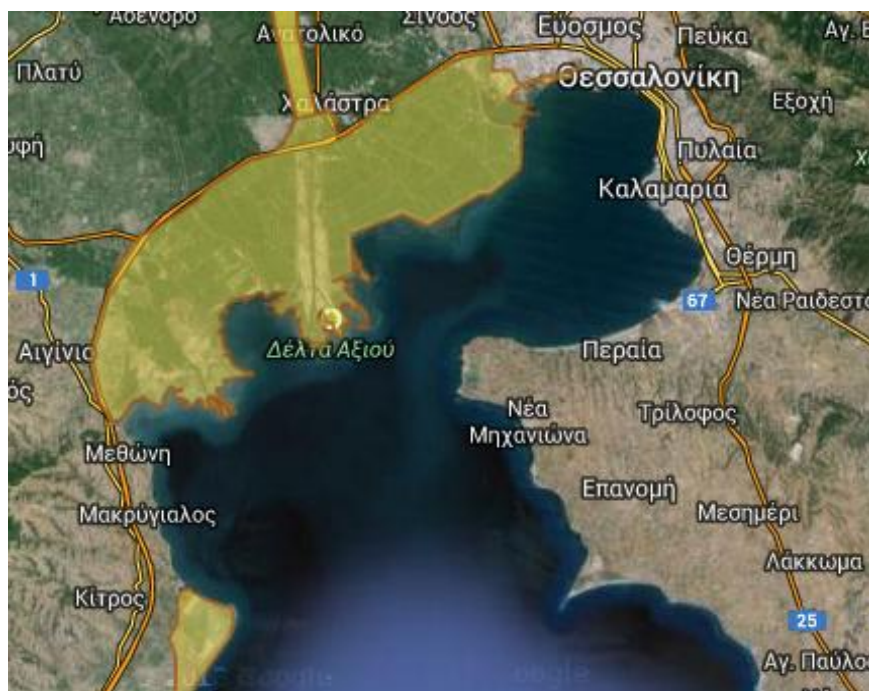
**Χάρτης 7.2:** Κύριες διαδρομές πλοίων στο Θερμαϊκό Κόλπο  
(πηγή: [www.marinetraffic.com/gr/](http://www.marinetraffic.com/gr/))

### 7.1.6 Περιοχές περιβαλλοντικής σημασίας

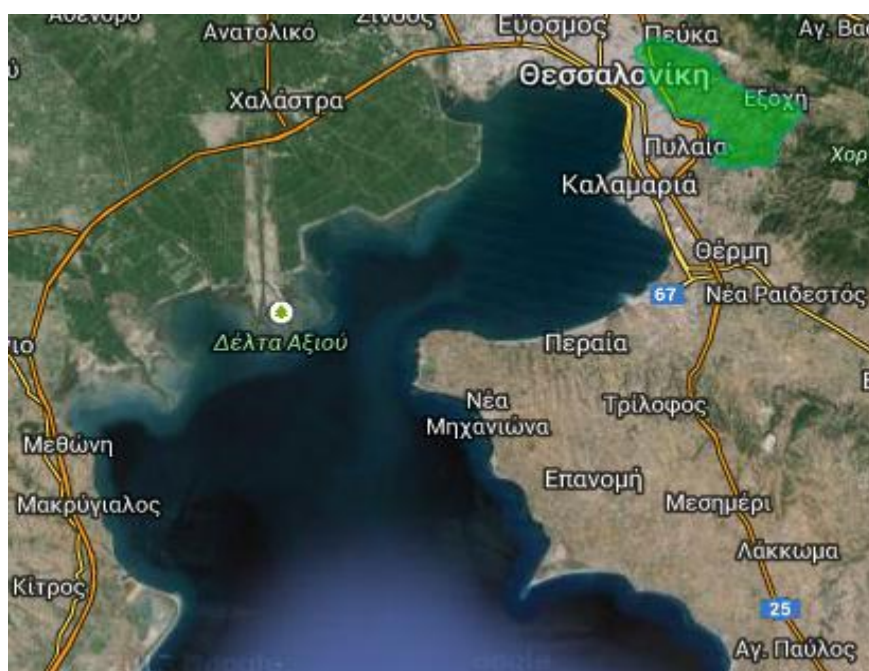
Πολλές περιοχές ιδιαίτερου φυσικού κάλλους και περιβαλλοντικής αξίας περιλαμβάνονται στο Θερμαϊκό Κόλπο. Στον κόλπο εκβάλλουν οι ποταμοί Αξιός και Αλιάκμονας, των οποίων τα Δέλτα είναι ιδιαίτερης περιβαλλοντικής αξίας. Οι φερτές ύλες και ιδίως το οργανικό ποσοστό τους, αποτέλεσε παραδοσιακά τον κύριο παράγοντα πρωτογενούς παραγωγής πολλών ειδών αλιευμάτων. Τα αβαθή παράκτια ύδατα λειτουργούν ως πεδίο αναπαραγωγής ψαριών, ενώ υπάρχουν και εκτεταμένες καλλιέργειες οστρακοειδών. Στους Χάρτες 7.3, 7.4, 7.5 απεικονίζονται οι περιοχές Natura, οι βιότοποι Corine και τα Τοπία Ιδιαίτερου Φυσικού Κάλλους που ανήκουν στην ευρύτερη περιοχή του Θερμαϊκού Κόλπου, σύμφωνα με στοιχεία της Βάσης «Φιλότης»-Δεδομένα για την Ελληνική Φύση (filotis.itia.ntua.gr). Οι περιοχές Natura είναι περιοχές με πλούσια χλωρίδα και πανίδα που προστατεύονται από το νόμο, ενώ οι βιότοποι Corine υποδηλώνουν ευαίσθητα οικοσυστήματα και ενδιαίτηματα. Όσον αφορά τα Τοπία Ιδιαίτερου Φυσικού Κάλλους πρόκειται για τοπία με ιδιαίτερη φυσική ομορφιά και το τοπίο τους είναι τόσο πολύτιμο που χρήζουν ιδιαίτερης προστασίας.



**Χάρτης 7.3:** Περιοχές Natura  
(πηγή: filotis.itia.ntua.gr)



**Χάρτης 7.4:** Βιότοποι Corine  
(πηγή: filotis.itia.ntua.gr)



**Χάρτης 7.5:** Τοπία Ιδιαίτερου Φυσικού Κάλλους  
(πηγή: filotis.itia.ntua.gr)

Όπως φαίνεται στους χάρτες, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός περιοχών υψηλής περιβαλλοντικής αξίας στις παράκτιες περιοχές του Θερμαϊκού Κόλπου. Οι περιοχές αυτές επικεντρώνονται κυρίως στα Δέλτα των ποταμών Αξιού και Αλιάκμονα, των οποίων η προστασία κρίνεται απαραίτητη για την ισορροπία του οικοσυστήματος. Αυτό υποδεικνύει τις καταστροφικές συνέπειες που θα είχε ένα ατύχημα πετρελαιοκηλίδας στα οικοσυστήματα και τους οργανισμούς των περιοχών αυτών.

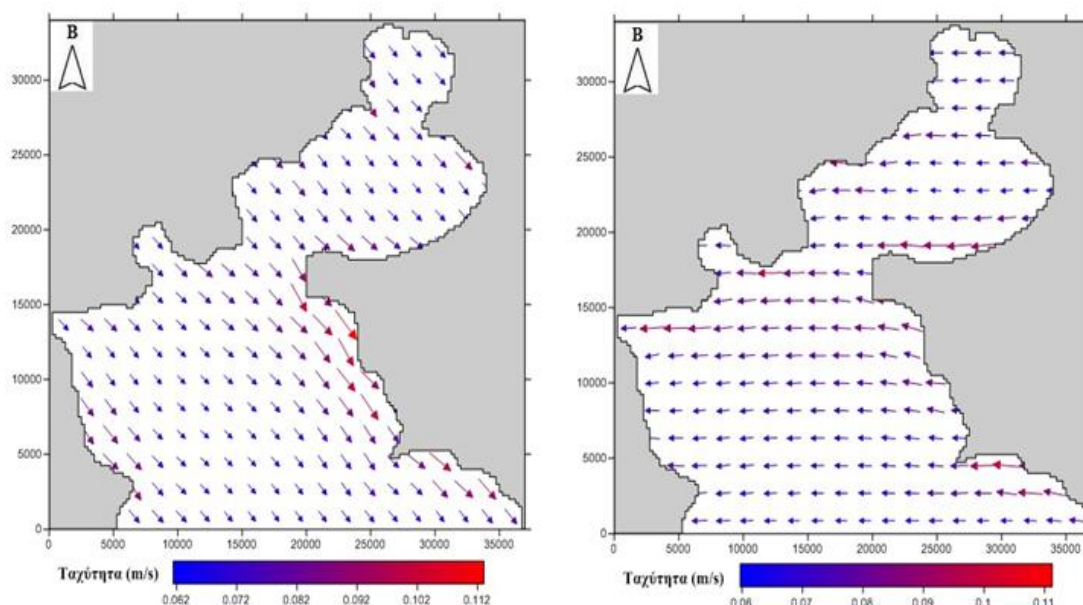
## 7.2 Δεδομένα εισόδου και θέσεις ατυχημάτων

### 7.2.1 Επιλογή τιμών παραμέτρων πετρελαίου

Ο αρχικός όγκος του πετρελαίου που διέρρευσε θεωρήθηκε ίσος με 1500 barrels = 197 tons, με πυκνότητα  $827 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , δηλαδή το μέσο εμπορικό πετρέλαιο τύπου Diesel. Η ποσότητα διαρροής και το είδος του πετρελαιοειδούς που διαρρέει είναι ανάλογα με τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή των προγραμμάτων στο Σαρωνικό Κόλπο (Παπαδονικολάκη, 2013) και (Ποτουρίδης, 2013), ώστε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που θα προκύψουν να μπορούν να είναι άμεσα συγκρίσιμα με τα ήδη υπάρχοντα. Για τη διαρροή του πετρελαίου και στα δύο προγράμματα θεωρείται ότι τη χρονική στιγμή  $t=0$  η πετρελαιοκηλίδα έχει μηδενική έκταση και η έκλυση είναι στιγμιαία. Για τις διάφορες παραμέτρους που εισάγονται στις εξισώσεις υπολογισμού των διεργασιών παλαίωσης του πετρελαίου (weathering processes) στο OSM χρησιμοποιήθηκαν τυπικές τιμές για το πετρέλαιο Diesel,  $T_0=517 \text{ K}$ ,  $T_G=139.8 \text{ K}$ ,  $A=20.274$  και  $B=18.052$ . Στο MEDSLIK με την επιλογή τύπου πετρελαιοειδούς γίνεται αυτόματα εισαγωγή των χαρακτηριστικών του.

### 7.2.2 Ανεμολογικά σενάρια

Για την υλοποίηση των υδροδυναμικών υπολογισμών, εξετάστηκαν 49 σενάρια ανέμου, έντασης από 1 έως 6 Beaufort. Συγκεκριμένα, οι 8 διευθύνσεις του ανέμου (B, BA, A, NA, N, NΔ, Δ, ΒΔ), για τις 6 πιθανές εντάσεις ανέμου (1-6 bf) μαζί με το σενάριο της νηνεμίας οδήγησαν σε 49 σενάρια για τους υδροδυναμικούς υπολογισμούς. Όπως αναφέρθηκε στα Κεφάλαια 5 και 6, στο MEDSLIK δεν χρειάζεται να πραγματοποιηθούν ξεχωριστά οι υδροδυναμικοί υπολογισμοί, αλλά υλοποιούνται ταυτόχρονα με την προσομοίωση της πετρελαιοκηλίδας, σε αντίθεση με το OSM, όπου για να υπολογίσει την εξέλιξη της πετρελαιοκηλίδας πρέπει να έχουν ολοκληρωθεί οι υδροδυναμικοί υπολογισμοί στο FLOW-3DL και να εισαχθούν σε αυτό ως δεδομένα υπολογισμού. Για την πραγματοποίηση των υδροδυναμικών υπολογισμών στο FLOW-3DL, εισήχθησαν ως δεδομένα τα χαρακτηριστικά του θαλασσινού νερού, τα οποία είναι: (α) η πυκνότητα του θαλασσινού νερού,  $\rho_w=1.026 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , (β) η κινηματική συνεκτικότητα,  $\nu_w=1.1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , (γ) ο συντελεστής οριζόντιας διασποράς  $D_h=100.0 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  (Κουτίτας, 1989), (δ) η παράμετρος Coriolis,  $f=2\omega \cdot \sin\phi$ , η οποία εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος  $\phi$ , το οποίο ελήφθη ίσο με  $\phi=40,30$  για την περίπτωση του Θερμαϊκού Κόλπου ( $\omega$  είναι η γωνιακή ταχύτητα της Γης, η οποία ελήφθη ίση με  $7.2921 \cdot 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ) και (ε) η θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας ίση με  $21^\circ\text{C}$ . Τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου για τα δύο πιο πιθανά σενάρια ανέμου, δηλαδή για ανέμους ΒΔ, 2 bf και Α, 2 bf (Πίνακας 7.1) παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.1.



**Σχήμα 7.1:** Επιφανειακά ρεύματα για τις περιπτώσεις ανέμου (α) ΒΔ-2 bf (β) Α-2 bf

### 7.2.3 Επιλογή θέσεων ατυχημάτων

Για να είναι αντιπροσωπευτικά τα αποτελέσματα της εργασίας, είναι πολύ σημαντική η επιλογή των πιθανών θέσεων ατυχημάτων εντός του Θερμαϊκού Κόλπου, ενώ δεν υπήρχε διαθέσιμη κάποια μελέτη εκτίμησης επικινδυνότητας, ώστε να προκύψουν άμεσα από αυτή. Έγινε επιλογή τεσσάρων περιοχών για την προσομοίωση της εξέλιξης ενός ατυχήματος πετρελαιοκηλίδας. Καθοριστικό ρόλο στην επιλογή των θέσεων ατυχημάτων αποτέλεσε η κίνηση των πλοίων εντός του Θερμαϊκού Κόλπου, καθώς υπάρχουν συγκεκριμένες διαδρομές πάνω στις οποίες κινούνται τα πλοία με δυνατότητα μεταφοράς της απαιτούμενης ποσότητας πετρελαίου, όπως παρουσιάζεται στην παράγραφο 7.1.4. Οι τρεις από τις τέσσερις θέσεις ατυχημάτων βρίσκονται «πάνω» στις κύριες διαδρομές πλοίων. Για την επιλογή της τέταρτης θέσης αναζητήθηκε η περιοχή με τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική αξία εντός του κόλπου, διότι υπάρχει πάντοτε μία μικρή πιθανότητα ένα πλοίο να παρεκκλίνει από την πορεία του και να προκληθεί ατύχημα σε κάποια άλλη θέση εντός του κόλπου. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 7.1.2, το βάθος στο Θερμαϊκό θεωρείται ομοιόμορφο και δεν παρατηρούνται ρηγά νερά κοντά στις κύριες διαδρομές πλοίων, ώστε να υπάρξει υψηλός κίνδυνος ατυχήματος. Στο χάρτη 7.6 φαίνονται αναλυτικά οι τέσσερις θέσεις ατυχημάτων. Η αρίθμηση των θέσεων ξεκινάει από τη θέση που βρίσκεται βορειότερα και καταλήγει στην πιο νότια θέση. Με εξαίρεση τη Θέση 1, οι υπόλοιπες θέσεις δεν βρίσκονται σε πολύ κοντινή απόσταση από την ακτή, διότι δεν υπάρχουν λιμένες να υποδεχθούν τους συγκεκριμένους τύπους πλοίων και συνεπώς δεν υπάρχουν και ανάλογες πιθανές διαδρομές.



**Χάρτης 7.6:** Θέσεις πιθανών ατυχημάτων στο Θερμαϊκό Κόλπο

Οι Θέσεις πιθανών ατυχημάτων 1, 2 και 4 βρίσκονται πάνω στις κύριες «γραμμές» διαδρομών των πλοίων. Η Θέση 1 τοποθετήθηκε μέσα στον εσωτερικό κόλπο του Θερμαϊκού, στην έξοδο του λιμανιού της Θεσσαλονίκης. Η συγκεκριμένη τοποθεσία είναι κομβικής σημασίας, καθώς επηρεάζει άμεσα τόσο την πόλη της Θεσσαλονίκης, όσο και τη συνεχή και απρόσκοπτη κίνηση των πλοίων από και προς το λιμάνι της πόλης. Η Θέση 2 τοποθετήθηκε στα όρια του εσωτερικού κόλπου του Θερμαϊκού. Απέχει εξίσου από την ακτή στα ανατολικά της και την ακτή στα βορειοδυτικά της, όπου βρίσκεται το ανατολικό τμήμα του Δέλτα του Αξιού ποταμού. Η Θέση 4 τοποθετήθηκε στο νότιο μέρος της περιοχής μελέτης. Βρίσκεται πάνω στις κύριες διαδρομές των πλοίων και παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, διότι από αυτήν προκύπτει το μικρότερο και συνεπώς δυσμενέστερο χρονικό διάστημα στο οποίο το πετρέλαιο διαρρέει εκτός των ήπιων συνθηκών του κόλπου, στο Αιγαίο Πέλαγος, σε περίπτωση βόρειων διευθύνσεων των ανέμων, που είναι και οι πιο συνηθισμένες στην περιοχή μελέτης. Προκύπτει, επίσης, το χρονικό διάστημα, για κάθε διεύθυνση ανέμου, στο οποίο φτάνει στην ακτή εντός του κόλπου πετρελαιοειδές που καταλήγει στο εσωτερικό του Θερμαϊκού. Επιπλέον, στα δυτικά της θέσης ατυχήματος βρίσκονται τα βόρεια παράλια της Πιερίας, με ιδιαίτερη τουριστική και περιβαλλοντική αξία και στα ανατολικά της βρίσκονται τα βορειοδυτικά παράλια της Χαλκιδικής, με ιδιαίτερη τουριστική και αλιευτική αξία. Η τέταρτη θέση πιθανού ατυχήματος, η Θέση 3, βρίσκεται στο ενδιάμεσο των κύριων διαδρομών των πλοίων και των Δέλτα του Αξιού και του Αλιάκμονα. Η περιοχή στην οποία καταλήγουν οι δύο ποταμοί είναι ιδιαίτερης περιβαλλοντικής αξίας και ανήκει συγχρόνως στις προστατευόμενες περιοχές Natura και στους βιότοπους Corine και η βαθυμετρία του κόλπου επιτρέπει σε ένα πλοίο να την προσεγγίσει. Ένα ατύχημα διαρροής πετρελαίου στη συγκεκριμένη τοποθεσία θα είχε εκτεταμένες συνέπειες στην ισορροπία του τοπικού οικοσυστήματος.

#### 7.2.4 Επιλογή σεναρίων ατυχημάτων πετρελαιοκηλίδας

Για κάθε μία από τις τέσσερις θέσεις ατυχημάτων υπάρχουν 49 διαθέσιμα σενάρια ανέμου, ωστόσο δεν εξετάστηκαν όλα για κάθε θέση. Για όλες τις θέσεις πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τα 10 πιο συχνά εμφανιζόμενα ανεμολογικά σενάρια, τα οποία, όπως προκύπτουν από τον Πίνακα 7.1, είναι: B-4 bf, A-2 bf, NA-2 bf, N-2 bf, N-3 bf, Δ-2 bf, Δ-3 bf, ΒΔ-2 bf, ΒΔ-3 bf και ΒΔ-4 bf. Στη Θέση 1 εξετάστηκαν και τα 49 σενάρια, καθώς βρίσκεται στον εσωτερικό κόλπο του Θερμαϊκού, όπου βρίσκονται το λιμάνι και τα παράλια της Θεσσαλονίκης. Από τις προσομοιώσεις προέκυψε ότι με οποιαδήποτε διεύθυνση και ένταση ανέμου το πετρέλαιο καταλήγει στην ακτή. Για τις υπόλοιπες τρεις θέσεις πιθανών ατυχημάτων, έγινε αρχικά προσομοίωση στο OSM με τη δυσμενέστερη ένταση ανέμου (6 bf) για κάθε διεύθυνση. Όταν το 10% της πετρελαιοκηλίδας έφτανε πρώτα στην ακτή και δεν έφευγε εκτός του ανοικτού ορίου, οι προσομοιώσεις συνεχίζονταν και για τις υπόλοιπες 5 εντάσεις ανέμου για τη συγκεκριμένη διεύθυνση, με σκοπό να βρεθεί το απαιτούμενο χρονικό διάστημα προσαιγιάλωσης σε κάθε πιθανό σενάριο. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν η πετρελαιοκηλίδα εξέρχεται από τον κόλπο, οι προσομοιώσεις δεν συνεχίστηκαν για τις υπόλοιπες εντάσεις ανέμου, εφόσον στη συγκεκριμένη διεύθυνση υπήρχε κάποιος από τους 10 πιο συχνά εμφανιζόμενους ανέμους. Με αυτή την επιλογή προκύπτει και το δυσμενέστερο-μικρότερο, αλλά και το πιο πιθανό χρονικό διάστημα που χρειάζεται η πετρελαιοκηλίδα για να εξέλθει από τον κόλπο. Το δυσμενέστερο χρονικό διάστημα προκύπτει με τον άνεμο εντάσεως 6 bf για τη συγκεκριμένη διεύθυνση, και τα πιο πιθανά από τους 10 ανέμους με την πιο συχνή εμφάνιση στο Θερμαϊκό Κόλπο. Στην περίπτωση που για τη συγκεκριμένη διεύθυνση ανέμου, δεν υπήρχε κάποιο σενάριο στα 10 πιο συχνά εμφανιζόμενα, η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με την πιο συχνά εμφανιζόμενη ένταση για την αντίστοιχη διεύθυνση ανέμου. Σε κάποια σενάρια παρατηρήθηκε ότι τη χρονική στιγμή που το 10% της κηλίδας έβγαινε εκτός των ορίων του κόλπου, ένα ελάχιστο ποσοστό της πετρελαιοκηλίδας έφτανε στην ακτή. Σε αυτά τα σενάρια θεωρήθηκε ότι η πετρελαιοκηλίδα εξέρχεται από τον κόλπο. Συνολικά εξετάστηκαν 176 πιθανά σενάρια διαρροής πετρελαίου στον Θερμαϊκό Κόλπο. Στον Πίνακα 7.3 παρουσιάζονται τα χρονικά διαστήματα που χρειάστηκαν σε κάθε σενάριο που εξετάστηκε στο OSM, είτε για την προσαιγιάλωση, είτε για την έξοδο του 10% της πετρελαιοκηλίδας από τον κόλπο.



Πίνακας 7.3: Συνολικά σενάρια και χρόνοι υπολογισμού στο OSM

Συνολικά Σενάρια	Ένταση Ανέμου (m/s)	Ένταση Ανέμου (bf)	Διεύθυνση Ανέμου	Διάρκεια Προσομοίωσης (hr)			
				Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4
1	0,836	1	B	19,1	-	-	-
2	2,365	2	B	11	-	-	-
3	4,344	3	B	7,2	-	-	-
4	6,688	4	B	5,3	24,6	16,7	4,1
5	9,347	5	B	4,2	-	-	-
6	12,287	6	B	7,2	14,5	8,7	2,5
7	0,836	1	BA	34,4	145,4	76,3	-
8	2,365	2	BA	17,2	62,3	31,22	13,0
9	4,344	3	BA	13,5	34,8	17,8	-
10	6,688	4	BA	22,1	22,43	11,5	-
11	9,347	5	BA	28,6	16,2	8,3	-
12	12,287	6	BA	22,1	12,2	6,3	3,3
13	0,836	1	A	21,8	20,8	33,2	83,4
14	2,365	2	A	12,0	9,7	21,5	38,7
15	4,344	3	A	7,1	6,0	14,6	22,6
16	6,688	4	A	4,8	4,3	9,7	15,0
17	9,347	5	A	3,5	3,3	6,9	10,8
18	12,287	6	A	2,7	2,6	5,2	8,6
19	0,836	1	NA	10,7	20,0	25,1	142,8
20	2,365	2	NA	5,8	8,9	11,1	59,3
21	4,344	3	NA	3,6	5,2	6,6	35,4
22	6,688	4	NA	2,5	3,5	4,6	24,8
23	9,347	5	NA	1,9	2,6	3,4	18,4
24	12,287	6	NA	1,5	2,0	2,7	14,9
25	0,836	1	N	8,6	40,8	30,4	120,7
26	2,365	2	N	4,6	20,0	13,7	58,1
27	4,344	3	N	2,9	12,0	8,0	40,0
28	6,688	4	N	2,1	8,3	5,3	28,2
29	9,347	5	N	1,6	6,2	3,9	21,2
30	12,287	6	N	1,3	4,9	2,9	16,8
31	0,836	1	ΝΔ	8,1	20,7	42,5	80,6
32	2,365	2	ΝΔ	4,3	43,3	22,6	33,1
33	4,344	3	ΝΔ	2,8	33,8	29,0	19,0
34	6,688	4	ΝΔ	2,0	23,8	24,5	13,0
35	9,347	5	ΝΔ	1,5	17,6	22,5	9,5
36	12,287	6	ΝΔ	1,2	13,7	18,2	7,5
37	0,836	1	Δ	9,0	12,3	90,2	82,0
38	2,365	2	Δ	4,9	5,5	37,4	34,8
39	4,344	3	Δ	3,1	3,3	21,3	27,5
40	6,688	4	Δ	2,2	2,2	14,3	19,4
41	9,347	5	Δ	1,7	1,6	9,9	15,2
42	12,287	6	Δ	1,3	1,3	7,6	11,8
43	0,836	1	ΒΔ	11,4	14,0	-	-
44	2,365	2	ΒΔ	6,0	6,7	64,6	12,8
45	4,344	3	ΒΔ	3,7	4,1	37,9	7,8
46	6,688	4	ΒΔ	2,6	2,8	25,5	5,4
47	9,347	5	ΒΔ	1,9	2,1	-	-
48	12,287	6	ΒΔ	1,5	1,6	14,5	3,2
49	0,0	0	NHNEMIA	18,0	75,0	149,7	29,3

Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.3, συνολικά εξετάστηκαν 176 σενάρια σε κάθε πρόγραμμα. Με γαλάζιο χρώμα παρουσιάζονται τα σενάρια κατά τα οποία στο δεδομένο χρονικό διάστημα η πετρελαιοκηλίδα εξέρχεται του κόλπου. Τα δυσμενέστερα σενάρια για κάθε θέση πιθανού ατυχήματος, δηλαδή τα σενάρια στα οποία απαιτείται το μικρότερο χρονικό διάστημα για την προσαιγιάλωση της πετρελαιοκηλίδας είναι:

**Πίνακας 7.4:** Δυσμενέστερα σενάρια για κάθε θέση πιθανού ατυχήματος

Θέση Ατυχήματος	Σενάριο	Διάρκεια Προσομοίωσης (hr)
1	NΔ-6 bf	1,2
2	Δ-6 bf	1,3
3	NA-6 bf	2,7
4	NΔ-6 bf	7,5

Σε ορισμένα σενάρια που εξετάστηκαν στο OSM χρειάζεται ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, πάνω από 48 ώρες, δηλαδή 2 ημέρες, για να φτάσει το 10% της πετρελαιοκηλίδας στην ακτή, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.3. Η πιθανότητα να μην έχουν ενημερωθεί οι αρμόδιες αρχές για το ατύχημα και να μην έχουν ξεκινήσει οι ενέργειες αντιμετώπισης μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα είναι πολύ μικρή.

Όπως, επίσης, είναι πολύ σπάνιο να επικρατούν οι ίδιες καιρικές συνθήκες, άρα και το ανάλογο υδροδυναμικό πεδίο ροής για ένα τέτοιο χρονικό διάστημα. Τα συγκεκριμένα, όμως, σενάρια εξετάστηκαν στο OSM για να υπάρξει οπτικοποιημένη εικόνα των χαρακτηριστικών του πετρελαίου μετά από ένα μεγάλο χρονικό διάστημα παραμονής του πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον και να φανεί η επιρροή των διεργασιών της πετρελαιοκηλίδας μέχρι αυτή να φτάσει στην ακτή. Στο MEDSLIK, όπου εισάγεται από τον ερευνητή το χρονικό διάστημα προσομοίωσης, ακολουθήθηκε διαφορετική προσέγγιση. Για όσα σενάρια προέκυψε από το OSM ότι η διάρκεια της προσομοίωσης είναι μικρότερη ή ίση των 12 ωρών μέχρι να προσεγγίσει την ακτή το 10% της πετρελαιοκηλίδας, η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για ανάλογο χρονικό διάστημα, ώστε να υπάρξει ικανός αριθμός σεναρίων για την ασφαλή σύγκριση των δύο προγραμμάτων. Σε όσα σενάρια η διάρκεια προσομοίωσης προέκυψε μεγαλύτερη των 12 ωρών, στο MEDSLIK τέθηκε ίση με 12 ώρες, με σκοπό να υπάρξει εικόνα των χαρακτηριστικών και της απόστασης που έχει διανύσει η πετρελαιοκηλίδα σε αυτό το χρονικό διάστημα, το οποίο κρίνεται ικανό για να ενημερωθούν οι αρμόδιες αρχές αναλυτικά για το περιστατικό που έχει συμβεί. Η χρονική διάρκεια των σεναρίων που εξετάστηκαν στο MEDSLIK παρουσιάζεται αναλυτικά στον Πίνακα 7.6.

## 7.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων

### 7.3.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων MEDSLIK

- Συνολικά εξετάστηκαν 176 σενάρια για τις 8 διευθύνσεις και 6 εντάσεις ανέμου, τα οποία παρήγαγαν 685 στιγμιότυπα (έως 5 στιγμιότυπα ανάλογα με το σενάριο, 4 οι χρονικές στιγμές και 1 στιγμιότυπο για το πετρέλαιο στην ακτή).

- Ο χάρτης που χρησιμοποιήθηκε είναι ο χάρτης της Μεσογείου που παρέχεται από το πρόγραμμα και απομονώθηκε η περιοχή του Θερμαϊκού Κόλπου. Οι συντεταγμένες των πιθανών θέσεων ατυχημάτων που επιλέχθηκαν είναι:

Θέση 1:  $\varphi = 40^{\circ}37'17''$   $\lambda = 22^{\circ}55'27''$

Θέση 2:  $\varphi = 40^{\circ}30'59''$   $\lambda = 22^{\circ}47'20''$

Θέση 3:  $\varphi = 40^{\circ}28'55''$   $\lambda = 22^{\circ}42'17''$

Θέση 4:  $\varphi = 40^{\circ}22'20''$   $\lambda = 22^{\circ}46'76''$

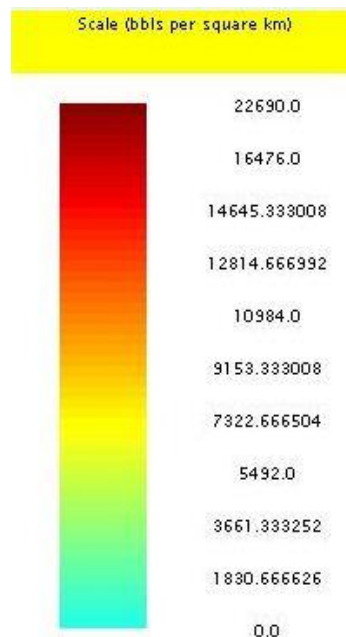
Παρότι απομονώθηκε η περιοχή του Θερμαϊκού, τα όρια του χάρτη είναι αυτά της Μεσογείου. Το ανοικτό όριο στα νότια του κόλπου τίθεται προσεγγιστικά σε κάθε σενάριο και ο μόνος τρόπος για να γίνει αντιληπτό αν η πετρελαιοκηλίδα έχει εξέλθει του κόλπου είναι ο οπτικός. Το πρόγραμμα δεν έχει τη δυνατότητα να παρέχει στο χρήστη την πληροφορία της ποσότητας του πετρελαίου που έχει εξέλθει από τον κόλπο αριθμητικά, σε αντίθεση με την ποσότητα του πετρελαίου στην ακτή, όπου το πρόγραμμα σε κάθε επιλεγμένη χρονική στιγμή υπολογίζει το ποσοστό της πετρελαιοκηλίδας που έχει προσαιγιαλωθεί.

- Το ελάχιστο βήμα επεξεργασίας στο MEDSLIK είναι μία ώρα και η προσομοίωση, αλλά και οι ενδιάμεσες χρονικές στιγμές που έχουν επιλεγεί για την παρακολούθηση της τροχιάς της πετρελαιοκηλίδας μπορούν να είναι μόνο ακέραιοι αριθμοί. Αυτό αποτελεί τροχοπέδη τόσο στην ασφαλή σύγκριση των δύο προγραμμάτων, όσο και στην επιλογή ενδιάμεσων χρονικών στιγμών για το λεπτομερή έλεγχο του ποσοστού του πετρελαίου που φτάνει στην ακτή σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ανάλογα με το χρονικό διάστημα προσομοίωσης έγινε επιλογή και για τις ενδιάμεσες χρονικές στιγμές που εξετάστηκαν, οι οποίες παρατίθενται στον Πίνακα 7.5. Σημειώνεται ότι το στιγμιότυπο για το πετρέλαιο που φτάνει στην ακτή συμβολίζεται με c (coast) και λαμβάνεται μόνο στις περιπτώσεις όπου ένα ποσοστό του πετρελαίου που έχει διαρρεύσει χαρακτηρίζεται ως «beached», διαδικασία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.

**Πίνακας 7.5:** Πιθανή διάρκεια σεναρίων και ενδιάμεσα στιγμιότυπα στο MEDSLIK

Διάρκεια Προσομοίωσης (hrs)	Χρονικές Στιγμές Αποτελεσμάτων (hrs)
2	1,2,c
3	1,2,3,c
4	1,2,3,4,c
5	1,3,5,c
6	2,4,6,c
8	2,4,6,8,c
9	3,6,9,c
12	3,6,9,12,c

- Για του υδροδυναμικούς υπολογισμούς έγινε η επιλογή των κλιματολογικών ρευμάτων της περιοχής, τα οποία είναι σταθερά για όλα τα σενάρια και αποτελούν εμπόδιο στην ακριβή σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο προγραμμάτων. Από το πρόγραμμα παρέχεται ένα αρχείο κλιματολογικών ρευμάτων για κάθε εποχή του χρόνου και έγινε επιλογή του χειμώνα, διότι τότε επικρατούν οι δυσμενέστερες συνθήκες. Στα σενάρια που μελετήθηκαν, έγινε στο menu «Wind» η επιλογή του «User-Defined Wind», δηλαδή η ένταση και η διεύθυνση του ανέμου καθορίζονται από τον ερευνητή και ο άνεμος θεωρείται σταθερός (Constant Wind).
- Το MEDSLIK παρέχει τη δυνατότητα ανάλυσης της σύνθεσης του πετρελαίου που έχει διαρρεύσει σε κάθε επιλεγόμενη χρονική στιγμή. Σε συνδυασμό με τα οπτικά αποτελέσματα για κάθε στιγμιότυπο παρέχεται και η αντίστοιχη κλίμακα που αφορά τη συγκέντρωση του πετρελαίου σε κάθε σημείο της περιοχής μελέτης. Η κλίμακα είναι διαβαθμισμένη με τα χρώματα που αναπαριστούν το πετρέλαιο στο θαλάσσιο περιβάλλον (Σχήμα 7.2). Επιπλέον, υπολογίζονται σε κάθε χρονική στιγμή τα ποσοστά της κηλίδας: (α) που έχει εξατμιστεί, (β) που βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας, (γ) που έχει διασπαρθεί και (δ) που βρίσκεται στην ακτή και (ε) και το μέγεθος της πετρελαιοκηλίδας (Σχήμα 7.3).

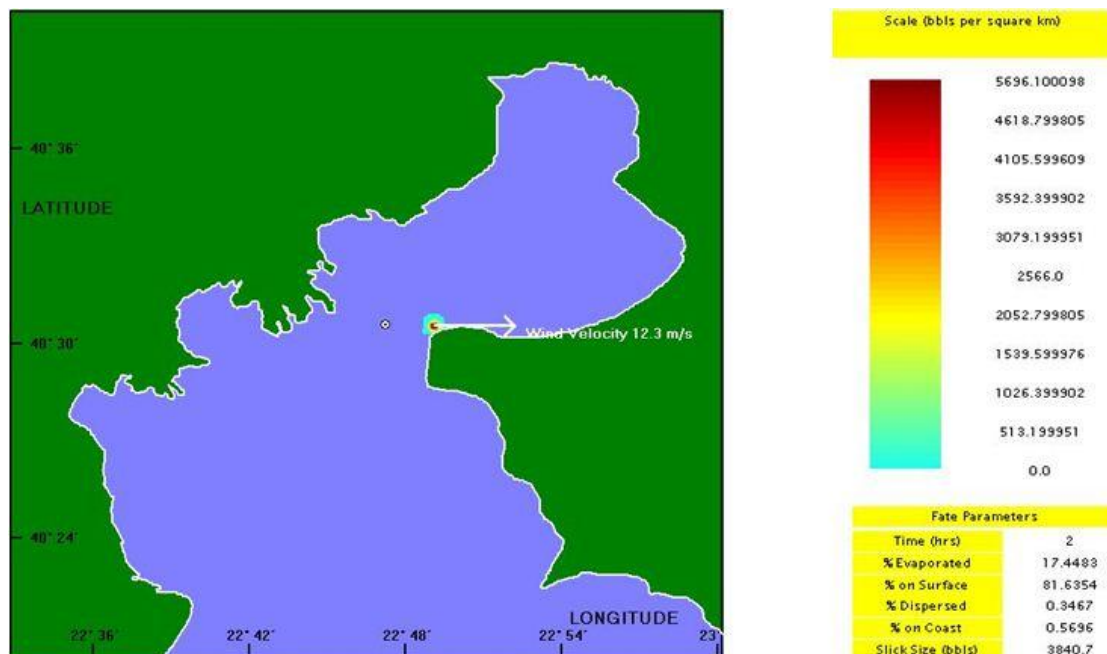


**Σχήμα 7.2:** Η διαβάθμιση της συγκέντρωσης πετρελαίου στο MEDSLIK

Fate Parameters	
Time (hrs)	2
% Evaporated	15.9604
% on Surface	9.5049
% Dispersed	0.2269
% on Coast	74.3078
Slick Size (bbbls)	348.74

**Σχήμα 7.3:** Ποσοστά που περιγράφουν την εξέλιξη της πετρελαιοκηλίδας στο θαλάσσιο περιβάλλον στο MEDSLIK

- Στο μοντέλο πραγματοποιείται διαβάθμιση της πετρελαιοκηλίδας στην έκτασή της σύμφωνα με τη συγκέντρωση του πετρελαίου στο νερό μέσω μιας χρωματικής κλίμακας. Σε όλα τα σενάρια χρησιμοποιείται η ίδια χρωματική διαβάθμιση, ωστόσο η συγκέντρωση του πετρελαίου διαφέρει σε κάθε σενάριο και σε κάθε ενδιάμεση χρονική στιγμή του.
- Το MEDSLIK διασπά την εικόνα της πετρελαιοκηλίδας στην πορεία της σε επιμέρους κομμάτια και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή κατά τη χρήση διότι υπάρχουν δύο περιπτώσεις που μπορεί να οδηγήσουν τον ερευνητή σε λάθος συμπεράσματα και ενέργειες. Η πρώτη περίπτωση αφορά στην επιλογή οπτικοποίησης του πετρελαίου που βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας σε κάποια χρονική στιγμή, όπου η πετρελαιοκηλίδα φαίνεται να βρίσκεται μακριά από την ακτή και δεν πρόκειται να την προσεγγίσει στις χρονικές στιγμές που ακολουθούν. Με επιλογή εμφάνισης του πετρελαίου στην ακτή υπάρχει πιθανότητα να έχουν ήδη προσαιγιαλωθεί σημαντικές ποσότητες πετρελαίου. Η δεύτερη περίπτωση αφορά τα σενάρια τα οποία στο πέρας του χρονικού διαστήματος προσομοίωσης προσεγγίζουν την ακτή και φαίνεται να έχει προσαιγιαλωθεί ένα σημαντικό μέρος της κηλίδας (Σχήμα 7.4), ωστόσο ο πίνακας του σχήματος 7.3 δίνει σχεδόν μηδενικά ποσοστά πετρελαίου στην ακτή και η επιλογή εμφάνισης του πετρελαίου στην ακτή αποδεικνύει επίσης ότι η ποσότητα πετρελαίου είναι μηδενική. Οι δύο αυτές περιπτώσεις αναδεικνύουν την ιδιαιτερότητα του προγράμματος στο ότι η επιλογή εμφάνισης πετρελαίου στην επιφάνεια και η εμφάνιση πετρελαίου στην ακτή αποτελούν δύο εντελώς διαφορετικές περιπτώσεις. Επομένως, είναι λάθος να εξάγονται συμπεράσματα για το κατά πόσο η πετρελαιοκηλίδα έχει προσβάλει την ακτή, χωρίς να εξετάζεται η συγκεκριμένη επιλογή από το πρόγραμμα.



Σχήμα 7.4: Θέση Διαρροής 2, Άνεμος Δ-6 bf, η πετρελαιοκηλίδα φαίνεται να έχει προσαιγιαλωθεί

Πίνακας 7.6: Συνολικά σενάρια και χρόνοι υπολογισμού στο MEDSLIK

Συνολικά Σενάρια	Ένταση Ανέμου (m/s)	Ένταση Ανέμου (bf)	Διεύθυνση Ανέμου	Διάρκεια Προσομοίωσης (hr)			
				Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4
1	0,836	1	B	12	-	-	-
2	2,365	2	B	12	-	-	-
3	4,344	3	B	8	-	-	-
4	6,688	4	B	6	12	12	4
5	9,347	5	B	4	-	-	-
6	12,287	6	B	8	12	9	3
7	0,836	1	BA	12	12	12	-
8	2,365	2	BA	12	12	12	12
9	4,344	3	BA	12	12	12	-
10	6,688	4	BA	12	12	12	-
11	9,347	5	BA	12	12	9	-
12	12,287	6	BA	12	12	6	3
13	0,836	1	A	12	12	12	12
14	2,365	2	A	12	12	12	12
15	4,344	3	A	8	6	9	12
16	6,688	4	A	5	5	6	12
17	9,347	5	A	4	4	5	12
18	12,287	6	A	4	3	3	9
19	0,836	1	NA	12	12	12	12
20	2,365	2	NA	6	9	12	12
21	4,344	3	NA	4	6	8	12
22	6,688	4	NA	3	4	5	12
23	9,347	5	NA	3	3	4	12
24	12,287	6	NA	2	2	3	12
25	0,836	1	N	9	12	12	12
26	2,365	2	N	5	12	12	12
27	4,344	3	N	3	12	8	12
28	6,688	4	N	2	9	5	12
29	9,347	5	N	2	6	4	12
30	12,287	6	N	2	5	3	12
31	0,836	1	NA	8	12	12	12
32	2,365	2	NA	4	12	12	12
33	4,344	3	NA	3	12	12	12
34	6,688	4	NA	2	12	9	12
35	9,347	5	NA	2	12	6	9
36	12,287	6	NA	2	12	4	8
37	0,836	1	Δ	9	12	12	12
38	2,365	2	Δ	5	6	12	12
39	4,344	3	Δ	3	4	12	12
40	6,688	4	Δ	3	3	12	12
41	9,347	5	Δ	2	2	9	12
42	12,287	6	Δ	2	2	8	12
43	0,836	1	BΔ	12	12	-	-
44	2,365	2	BΔ	6	8	12	12
45	4,344	3	BΔ	4	4	12	8
46	6,688	4	BΔ	3	3	12	6
47	9,347	5	BΔ	3	2	-	-
48	12,287	6	BΔ	2	2	12	3

### 7.3.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων OSM

- Συνολικά εξετάστηκαν 176 σενάρια για τις 8 διευθύνσεις και 6 εντάσεις ανέμου, τα οποία παρήγαγαν 704 στιγμιότυπα. Έστω  $T$  η χρονική διάρκεια του κάθε σεναρίου. Επιλέχθηκε να αποθηκευτούν τα αποτελέσματα για τις χρονικές στιγμές  $T/8$ ,  $T/4$ ,  $T/2$  και  $T$  για κάθε σενάριο υπολογισμού.
- Ως χάρτης χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς ψηφιοποιημένο υπόβαθρο του Θερμαϊκού Κόλπου (Ρούμπα, 2012) στο οποίο οι διαστάσεις της ευρύτερης περιοχής είναι 37.5km x 34.5km, και το οποίο περιέχει τη βαθυμετρία του κόλπου. Ο συνολικός αριθμός των διαφορικών όγκων του πλέγματος υπολογισμών είναι 20.700 (150 x 138), η μορφή του πλέγματος είναι ομοιόμορφη και οι διαστάσεις στον κάνναβο είναι 250m x 250m, με μηδενική στροφή προς το βορρά, καθώς το ανοικτό όριο του κόλπου, όπου χρειάζεται να καθοριστεί η αντίστοιχη οριακή συνθήκη συμπίπτει με το νότιο όριο της περιοχής μελέτης. Οι συντεταγμένες των διαφορικών όγκων, στους οποίους επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί η διαρροή του πετρελαίου, στο αριθμητικό πλέγμα είναι:

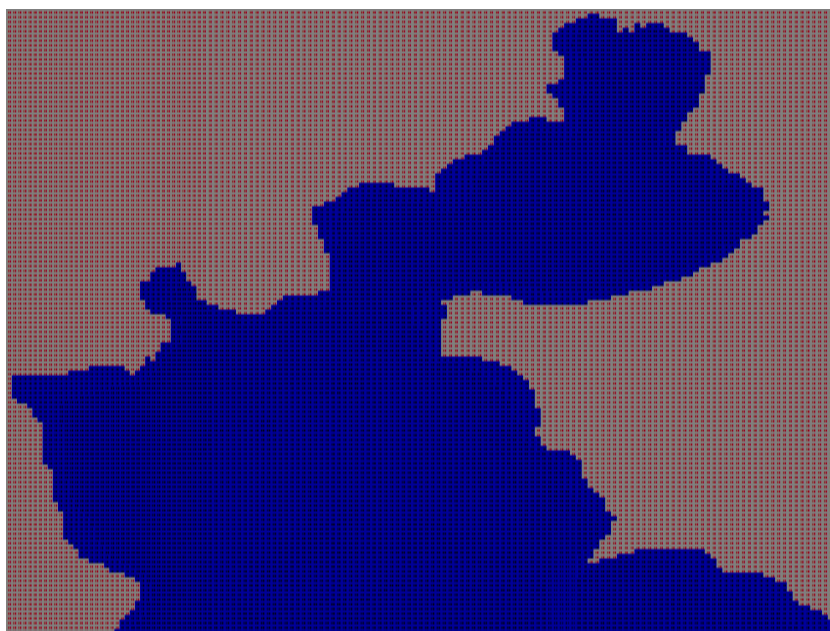
Θέση 1: I= 118 J= 125

Θέση 2: I= 72 J= 73

Θέση 3: I= 43 J= 51

Θέση 4: I= 71 J= 15

Η κάτοψη του πλέγματος σε μορφή αρχείου EXCEL παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.5.

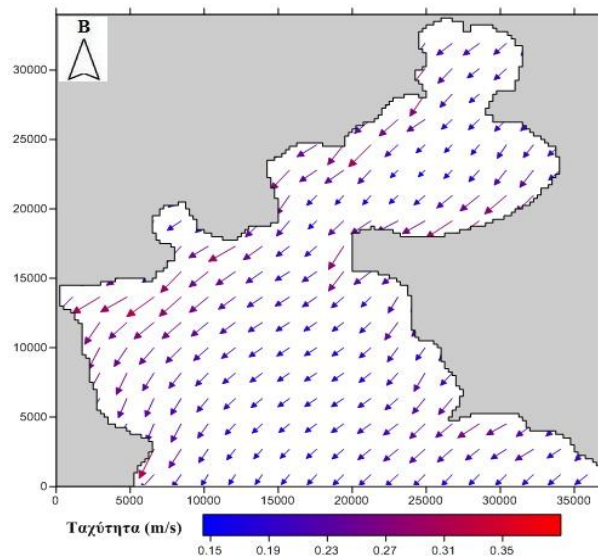


**Σχήμα 7.5:** Αριθμητικό πλέγμα υπολογισμών της περιοχής μελέτης  
(πηγή: Ρούμπα, 2012)

- Στο OSM υπολογίζεται το ακριβές χρονικό διάστημα που απαιτείται για την προσαιγιάλωση του 10% της πετρελαιοκηλίδας, καθώς και των ενδιάμεσων χρονικών στιγμών που έχουν επιλεγεί για εξέταση. Κατά την υπολογιστική διαδικασία, αρχικά υπολογίζεται το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να

φτάσει το 10% της πετρελαιοκηλίδας στην ακτή. Στη συνέχεια το χρονικό διάστημα  $T$  που προκύπτει εισάγεται ως δεδομένο στο πρόγραμμα και η προσομοίωση επαναλαμβάνεται για να ληφθούν στιγμιότυπα από τις ακριβείς χρονικές στιγμές που έχουν επιλεγεί.

- Οι υδροδυναμικοί υπολογισμοί χρειάζεται να πραγματοποιηθούν πριν την εφαρμογή του μοντέλου πετρελαιοκηλίδας. Οι υπολογισμοί εκτελούνται στο υδροδυναμικό μοντέλο FLOW-3DL, στο οποίο εισάγεται η ταχύτητα και η ένταση του ανέμου σε κάθε διεύθυνση για την παραγωγή των επιφανειακών ρευμάτων (Σχήμα 7.6).

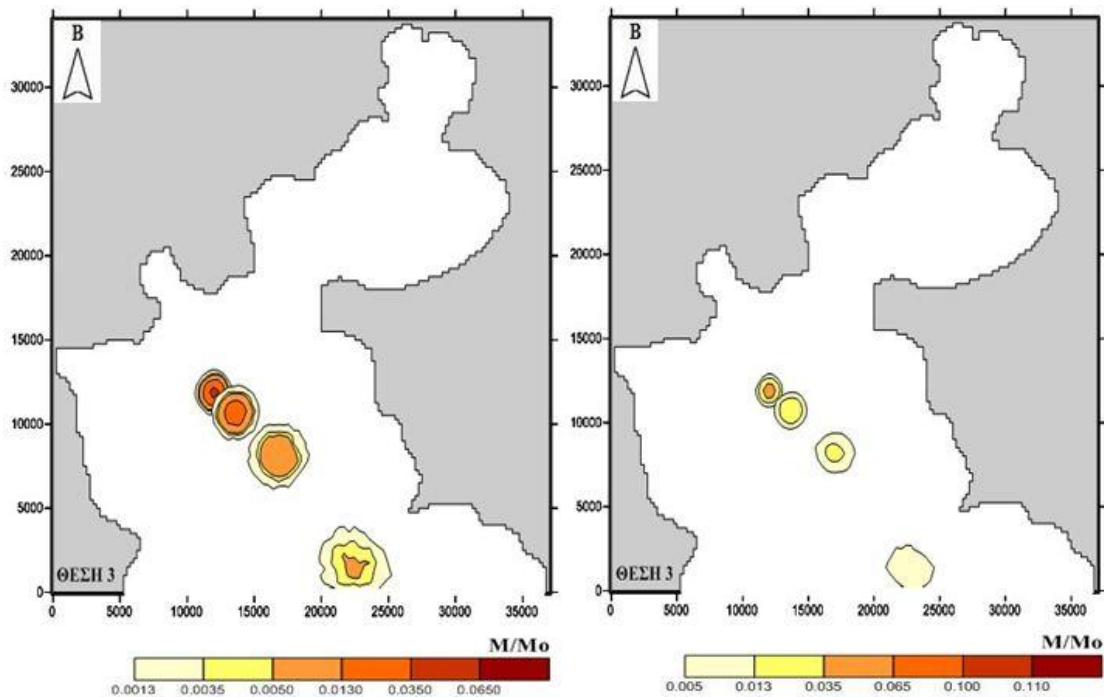


**Σχήμα 7.6:** Επιφανειακά ρεύματα για την περίπτωση ανέμου BA διευθύνσεως, εντάσεως 4 bf

- Το αριθμητικό πλέγμα που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της περιοχής μελέτης είναι πυκνό και αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό διαφορικών όγκων μικρού μεγέθους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους για την εξαγωγή των επιφανειακών ρευμάτων.
- Τα αποτελέσματα εξάγονται τόσο από το OSM, όσο και από το FLOW-3DL σε μορφή αρχείων υπολογιστικών φύλλων. Στη συνέχεια μέσω προγράμματος απεικόνισης (SURFER) γίνεται επεξεργασία στα αποτελέσματα και παρουσιάζονται γραφικά με εικόνες. Το SURFER παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα της σύνδεσης της χρονικής εξέλιξης ενός σεναρίου με την προβολή στο χάρτη όλων των ενδιάμεσων χρονικών στιγμών παρακολούθησης ενός σεναρίου (Σχήμα 7.7).
- Στο OSM μελετάται η εκτίμηση της μετακίνησης και της εξάπλωσης του πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον και δεν υπολογίζονται οι διαδικασίες που αφορούν στην προσαιγιάλωση του πετρελαίου, παρά μόνο η ποσότητα του πετρελαίου που θεωρείται ότι έχει φτάσει στους διαφορικούς όγκους στους οποίους έχουν τοποθετηθεί τα στερεά όρια. Η επιλογή, επομένως, του 10% για το ποσοστό της πετρελαιοκηλίδας στην ακτή (Παπαδονικολάκη, 2013) θεωρήθηκε ότι δεν θα επηρεάσει σημαντικά την πορεία των υπολογισμών και ακολουθήθηκε και στην παρούσα εργασία.



- Για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων στο SURFER χρησιμοποιείται διαβάθμιση της πετρελαιοκηλίδας και με διαφορετικά χρώματα αποτυπώνεται η μεταβολή της μάζας του πετρελαίου στο χώρο (Σχήμα 7.7). Οι κλίμακες που χρησιμοποιούνται αποδίδουν το πηλίκο της μάζας του παραμένουτος πετρελαίου προς τη μάζα της αρχικής πετρελαιοκηλίδας. Η δυσκολία που προέκυψε στη διαβάθμιση έγκειται στο ότι έγινε προσπάθεια να χρησιμοποιηθεί κοινή αριθμητική και χρωματική κλίμακα σε όλα τα σενάρια. Ωστόσο, σε κάθε σενάριο η εξέλιξη των χαρακτηριστικών της πετρελαιοκηλίδας είναι διαφορετική, ενώ μεγάλες διαφορές παρατηρούνται και στις διαφορετικές χρονικές στιγμές του ίδιου σεναρίου. Τελικά, έγινε επιλογή κοινής κλίμακας για τα σενάρια με ένταση ανέμου 1-2-3 bf και αντίστοιχα κοινής κλίμακας για τα σενάρια με ένταση ανέμου 4-5-6 bf (Σχήμα 7.7).



Σχήμα 7.7: Θέση διαρροής 3, Βορειοδυτικός άνεμος – 3 και 4 bf. Αποτελέσματα στο OSM

## 8. Σύγκριση των δύο μοντέλων

### 8.1 Εισαγωγή

Η σύγκριση των δύο μοντέλων έγινε στην υπολογιστική διαδικασία και στα αποτελέσματα. Για να είναι δυνατή η σύγκριση των μοντέλων εισήχθησαν και στα δύο τα ίδια δεδομένα, δηλαδή α) ίδιες ιδιότητες και ποσότητα διαρροής πετρελαίου, β) ίδιες θέσεις πιθανών ατυχημάτων και γ) έγινε εξέταση των ίδιων σεναρίων σε κάθε θέση. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των δύο μοντέλων παρουσιάζουν ομοιότητες, ωστόσο εντοπίζονται και αρκετές διαφορές που αφορούν α) στην υπολογιστική διαδικασία, β) στη μορφή που παίρνει η πετρελαιοκηλίδα με την πάροδο του χρόνου και τον τρόπο με τον οποίο εξαπλώνεται το πετρέλαιο στο θαλάσσιο περιβάλλον, γ) στην απόσταση την οποία καλύπτει σε κάθε σενάριο η πετρελαιοκηλίδα και η οποία παρουσιάζει αποκλίσεις στα αποτελέσματα των δύο μοντέλων. Αξίζει βέβαια να σημειωθεί ότι σε αρκετά σενάρια η εξέλιξη της τροχιάς του πετρελαίου προσεγγίζεται με τον ίδιο τρόπο στα αποτελέσματα και των δύο μοντέλων. Πιο αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων, α) σχετικά με την υπολογιστική διαδικασία και β) ως προς τα αποτελέσματα.

### 8.2 Ως προς την υπολογιστική διαδικασία

#### 8.2.1 Εισαγωγή

Η σύγκριση της υπολογιστικής διαδικασίας των δύο μοντέλων υλοποιήθηκε με βάση:

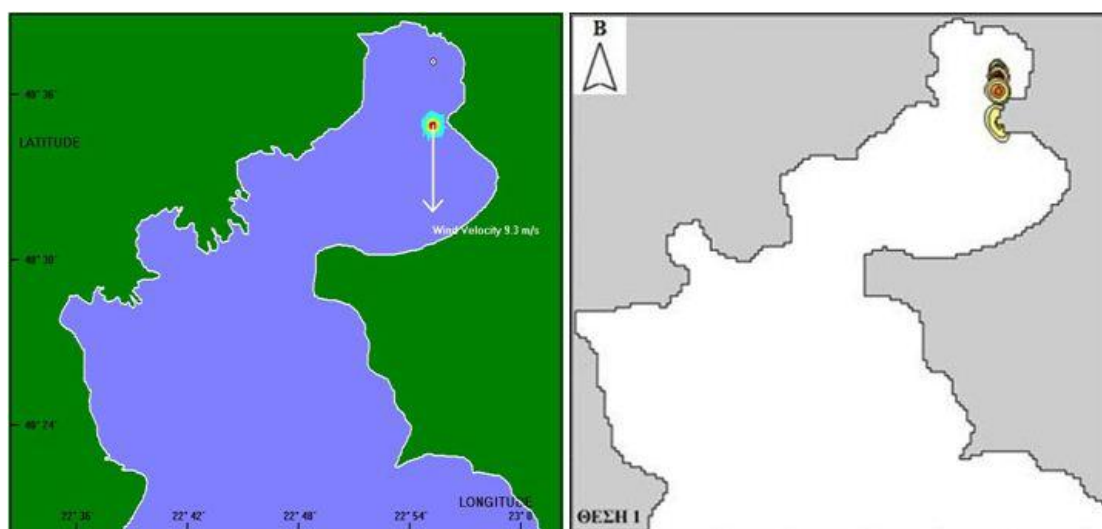
- 1) την περιοχή εφαρμογής,
- 2) το περιβάλλον εργασίας,
- 3) την εποπτεία των υπολογισμών και
- 4) τη χρονική διάρκεια των υπολογισμών.

#### 8.2.2 Περιοχή εφαρμογής

Το MEDSLIK είναι ένα εμπορικό μοντέλο και ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα και σε άλλες περιοχές, καθώς υπάρχουν έτοιμοι ψηφιοποιημένοι χάρτες και βάσεις δεδομένων για τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής. Επίσης δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να εξετάσει είτε σενάρια της επιλογής του, είτε σε πραγματικό χρόνο τις συνθήκες ενός ατυχήματος ή οποιασδήποτε άλλης προσομοίωσης μέσω της διαδικτυακής πλατφόρμας του προγράμματος. Αντίθετα, για να πραγματοποιηθεί στο OSM προσομοίωση σε διαφορετική περιοχή από αυτές που έχουν ήδη μελετηθεί πρέπει να βρεθούν οι αντίστοιχες παράμετροι εισαγωγής και να δημιουργηθεί ψηφιοποιημένο αριθμητικό πλέγμα που να περιέχει τη βαθυμετρία της περιοχής και εφόσον μελετάται πραγματικό ατύχημα ή απαιτούνται λεπτομερή αποτελέσματα, το πλέγμα πρέπει να είναι πυκνό και να αποτελείται από πολλούς διαφορετικούς όγκους. Κατά τη διαμόρφωση της βαθυμετρίας απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, ιδιαίτερα σε περιοχές

που παρουσιάζουν έντονη ανομοιομορφία στα βάθη τους, όπου ενδεχόμενα λάθη αλλοιώνουν σημαντικά τα αποτελέσματα.

Λόγω του διαφορετικού τρόπου επιλογής των θέσεων ατυχημάτων και της διαφορετικής γραφικής προσομοίωσης της περιοχής μελέτης, δεν ήταν δυνατή η επακριβής επιλογή των ίδιων θέσεων ατυχημάτων. Στο MEDSLIK η επιλογή των θέσεων έγινε με εισαγωγή των γεωγραφικών συντεταγμένων τους (πλάτος και μήκος) στο χάρτη που παρέχεται από το πρόγραμμα, ενώ στο OSM γίνεται μέσω των συντεταγμένων των διαφορετικών όγκων όπου πραγματοποιείται η διαρροή και οι οποίοι επιλέγονται στο αριθμητικό πλέγμα υπολογισμών που αναπαριστά την περιοχή μελέτης και τη βαθυμετρία της. Γίνεται κατανοητό ότι δεν είναι δυνατή η απόλυτη ταύτιση των θέσεων διαρροής πετρελαίου, αλλά έχει πραγματοποιηθεί πολύ λεπτομερής προσέγγιση, το σφάλμα της οποίας, ωστόσο, επηρεάζει και τα αποτελέσματα της υπολογιστικής διαδικασίας. Για παράδειγμα, στο σενάριο με βόρειο άνεμο στη θέση 1, εντάσεως 4 και 5 bf, στο ίδιο χρονικό διάστημα το πετρέλαιο στο OSM φτάνει στην ακτή, ενώ στο MEDSLIK την προσεγγίζει (Σχήμα 8.1) και ουσιαστικά εφάπτεται σε αυτή. Στοιχεία για τις επιλεγόμενες θέσεις παρουσιάστηκαν στις παραγράφους 7.3.1 και 7.3.2, αντίστοιχα.



**Σχήμα 8.1:** Θέση Διαρροής 1, Άνεμος B-5 bf – Σύγκριση αποτελεσμάτων στο MEDSLIK και το OSM

### 8.2.3 Περιβάλλον εργασίας

Τα δύο μοντέλα διαφέρουν στον τρόπο εισαγωγής των δεδομένων. Στην οπτική διεπαφή εισαγωγής δεδομένων στο MEDSLIK ο χρήστης εισάγει στα αντίστοιχα περιθώρια τα δεδομένα που έχουν επιλεγεί (Εικόνα 5.2) και δίπλα σε κάθε περιθώριο εξηγείται το πού αναφέρεται αυτό, ούτως ώστε να είναι εύκολος ο έλεγχος σε περίπτωση μη αναμενόμενων αποτελεσμάτων. Στο OSM, αντίθετα, τα δεδομένα εισάγονται μέσα στον κώδικα της FORTRAN, επομένως χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή για την αλλαγή των σωστών στοιχείων σε κάθε περίπτωση. Επίσης, ο χρήστης έρχεται σε επαφή με τον κώδικα σε κάθε βήμα της υπολογιστικής διαδικασίας και το οποιοδήποτε λάθος απροσεξίας ή τάξης μεγέθους μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγή των εντολών του κώδικα και σε λανθασμένα αποτελέσματα,

ακόμα και σε αδυναμία του κώδικα να επεξεργαστεί τις εντολές που πρέπει να εκτελέσει. Η επίλυση τέτοιων προβλημάτων μπορεί να είναι χρονοβόρα και επίπονη σε κάποιες περιπτώσεις, ωστόσο η ορθή λειτουργία του προγράμματος εξασφαλίζει τον έλεγχο σε κάθε βήμα της υπολογιστικής διαδικασίας.

#### 8.2.4 Εποπτεία υπολογισμών

Το OSM είναι ένα απλό μοντέλο και η ξεχωριστή εφαρμογή του υδροδυναμικού μοντέλου FLOW-3DL, δημιουργεί ένα κομβικό και ενδιάμεσο σημείο ελέγχου των υπολογισμών. Από τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου και το κατά πόσο αυτά συγκλίνουν εξάγεται το συμπέρασμα για τη σωστή λειτουργία του προγράμματος, ενώ αν προκύψει οποιοδήποτε πρόβλημα κατά την προσομοίωση της διαρροής του πετρελαίου έχει εξασφαλισθεί ότι για αυτό ευθύνεται το μοντέλο πετρελαιοκηλίδας και όχι το υδροδυναμικό και τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει σε αυτό. Αντίθετα, στο MEDSLIK, το οποίο είναι ένα συνδυαστικό μοντέλο και το σύνολο της υπολογιστικής διαδικασίας εκτελείται ταυτόχρονα, δεν υπάρχει κάποιο ενδιάμεσο σημείο ελέγχου προτού εξαχθούν τα τελικά αποτελέσματα.

#### 8.2.5 Χρονική διάρκεια υπολογισμών

Μία σημαντική διαφορά των δύο μοντέλων είναι η χρονική διάρκεια των υπολογισμών. Στο MEDSLIK, σε όλα τα σενάρια που μελετήθηκαν δεν χρειάστηκαν πάνω από 2 λεπτά για να ολοκληρωθεί η υπολογιστική διαδικασία. Αντίθετα στο OSM αυτό το διάστημα ποικίλε ανάλογα με την απόσταση της θέσης διαρροής από την ακτή στην οποία κατεύθυνε την πετρελαιοκηλίδα ο άνεμος (από 1 λεπτό έως 90 λεπτά για ορισμένα σενάρια). Στο υδροδυναμικό μοντέλο FLOW-3DL το μέσο χρονικό διάστημα που απαιτήθηκε για την εξαγωγή των επιφανειακών ρευμάτων στην περιοχή μελέτης ήταν 18 λεπτά. Για αυτό ευθύνεται το μέγεθος των διαφορικών όγκων, καθώς αν είχαν χρησιμοποιηθεί μεγάλα χωρικά βήματα, τότε η υπολογιστική διαδικασία θα απαιτούσε χρονικό διάστημα προσομοίωσης ανάλογο με του MEDSLIK για όλα τα σενάρια.

Ωστόσο, ένα μειονέκτημα του MEDSLIK είναι ότι χρησιμοποιεί ακέραια μόνο πολλαπλάσια της μίας ώρας ως χρονικά βήματα επεξεργασίας, σε αντίθεση με το OSM που υπολογίζει τον ακριβή χρόνο υπολογισμού μέχρι να προσαρμολογηθεί ή να εξέλθει της περιοχής μελέτης το επιλεγμένο από το χρήστη ποσοστό της πετρελαιοκηλίδας και ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δεδομένο για οποιαδήποτε περίπτωση επιλεγεί να εξεταστεί. Στην πλειοψηφία των σεναρίων που εξετάστηκαν στο OSM το χρονικό διάστημα που προέκυψε δεν ήταν ακέραιο πολλαπλάσιο της μίας ώρας (Πίνακας 7.3), επομένως εξ αρχής δεν μπορεί να υπάρξει ακριβής σύγκριση των αποτελεσμάτων, παρά μόνο προσεγγιστική. Η συγκεκριμένη αδυναμία του MEDSLIK δεν επιτρέπει την εξέταση της εξέλιξης της πετρελαιοκηλίδας σε μικρότερα χρονικά βήματα τα οποία θα οδηγούσαν σε διαφορετικά αποτελέσματα, ενώ στο OSM η ακρίβεια του εξαγόμενου χρονικού διαστήματος οδηγεί σε πολύ ακριβή και λεπτομερή αποτελέσματα και βοηθάει το χρήστη να εξετάσει οποιαδήποτε περίπτωση επιθυμεί, προσαρμόζοντας ανάλογα τις επιλεγόμενες παραμέτρους εισαγωγής και το χωρικό βήμα στο υπολογιστικό πλέγμα.

## 8.3 Ως προς τα αποτελέσματα

### 8.3.1 Εισαγωγή

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων υλοποιήθηκε με βάση:

- 1) την εξέλιξη της τροχιάς της πετρελαιοκηλίδας στα αντίστοιχα σενάρια,
- 2) τα σενάρια με εφαρμογή αντίστοιχων θαλάσσιων ρευμάτων,
- 3) τα σενάρια με μηδενικά θαλάσσια ρεύματα,
- 4) την εξάπλωση της πετρελαιοκηλίδας,
- 5) τις πληροφορίες που παρέχονται στο πέρας των προσομοιώσεων και
- 6) τη διαβάθμιση της πετρελαιοκηλίδας.

Η αντικειμενική σύγκριση των αποτελεσμάτων στα δύο μοντέλα ως προς την εξέλιξη της τροχιάς της πετρελαιοκηλίδας δεν είναι δυνατή. Στα δύο μοντέλα δεν χρησιμοποιούνται ανάλογες τιμές στα θαλάσσια ρεύματα, η επιρροή των οποίων είναι καθοριστική στη μετακίνηση της πετρελαιοκηλίδας στο θαλάσσιο περιβάλλον. Επιπρόσθετοι λόγοι που δυσχεραίνουν τη σύγκριση των δύο μοντέλων είναι:

- 1) η διαφορετική αποτύπωση της ακτογραμμής, όπως έχει αναφερθεί στην Παράγραφο 8.2.2 και
- 2) οι διαφορετικές διεργασίες που λαμβάνει υπόψη το κάθε μοντέλο κατά τη διαδικασία διάχυσης και εξάπλωσης της πετρελαιοκηλίδας και οι οποίες έχουν αναφερθεί αναλυτικά σε προηγούμενα κεφάλαια (στις Παραγράφους 5.3 και 6.2).

Στο OSM χρησιμοποιούνται σε κάθε σενάριο οι ταχύτητες των επιφανειακών ρευμάτων που εξάγονται από το FLOW-3DL και οι οποίες είναι προσαρμοσμένες στην αντίστοιχη διεύθυνση και ένταση του ανέμου. Στο MEDSLIK, αντίθετα, χρησιμοποιούνται οι προβλέψεις των κλιματολογικών συνθηκών για τα ρεύματα, ανάλογα με την εποχή του χρόνου στην οποία συμβαίνει το ατύχημα, δηλαδή σε όλα τα σενάρια γίνεται εφαρμογή των ίδιων θαλάσσιων ρευμάτων, ανεξαρτήτως του ανέμου που εξετάζεται. Ωστόσο, επιχειρήθηκε προσεγγιστική σύγκριση για τα 80 σενάρια τα οποία έχουν κοινό χρονικό διάστημα προσομοίωσης στον Πίνακα 8.1, από τα αποτελέσματα της οποίας αναδεικνύεται και η επιρροή της σταθερής κατεύθυνσης των θαλάσσιων ρευμάτων στο MEDSLIK.

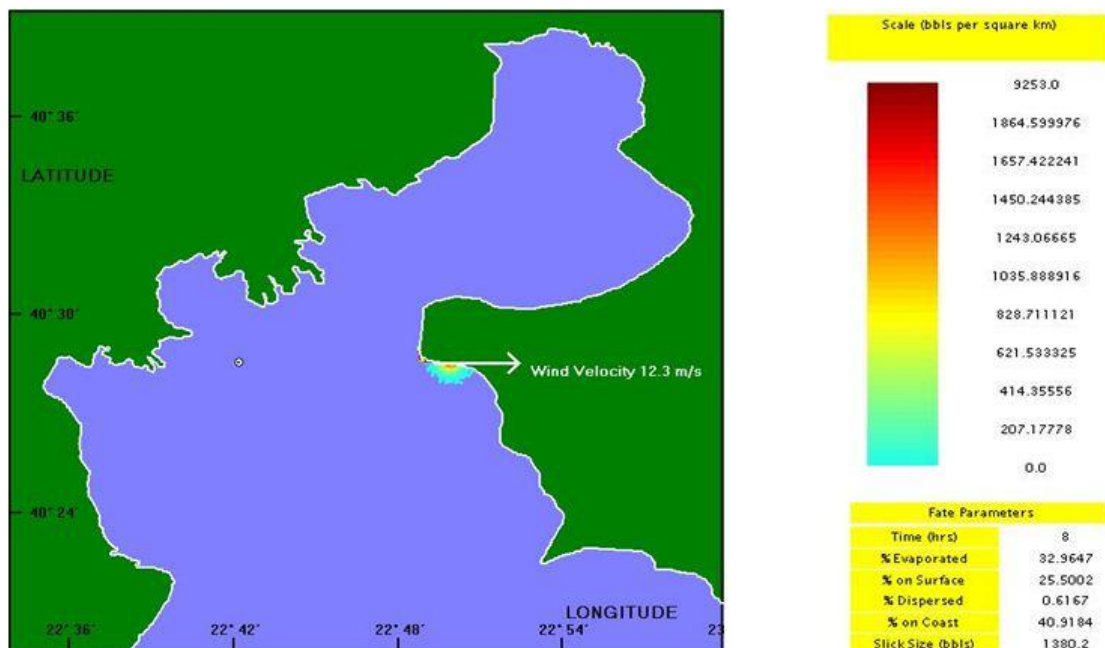
Στη συνέχεια και προκειμένου να υπάρξουν κοινές παράμετροι εισαγωγής για τα δύο μοντέλα έγινε εφαρμογή και σύγκριση για ένα σενάριο ανέμου και για τις 4 θέσεις ατυχημάτων, στο οποίο δομήθηκε προσεγγιστικά στο MEDSLIK πεδίο θαλάσσιων ρευμάτων αντίστοιχο με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το FLOW-3DL (Παράγραφος 8.3.3) και 10 διαφορετικών **υποθετικών** σεναρίων μηδενικών θαλάσσιων ρευμάτων (Παράγραφος 8.3.4), ώστε η σύγκριση να γίνει και για τα δύο μοντέλα στις αντίστοιχες συνθήκες και παραμέτρους.

Τα 10 σενάρια μηδενικών θαλάσσιων ρευμάτων που εξετάστηκαν αναφέρονται σε διαφορετικές διευθύνσεις και εντάσεις ανέμου για κάθε θέση πιθανής διαρροής. Η επιλογή έγινε με βάση τη διάρκεια των προσομοιώσεων και το κατά πόσο αυτή προσεγγίζει ακέραιους αριθμούς στις προσομοιώσεις στο OSM. Στο MEDSLIK η διάρκεια των προσομοιώσεων είναι ακέραιος αριθμός και γι' αυτό το λόγο

επιλέχθηκαν σενάρια των οποίων η διάρκεια προσέγγιζε ακέραιους αριθμούς στις αρχικές προσομοιώσεις στο OSM (Πίνακας 7.3). Επιπλέον, επιλέχθηκε μεγάλη διάρκεια προσομοίωσης ανάλογα με τη θέση διαρροής, για να προκύψουν οι διαφορές στην εξέλιξη της τροχιάς της πετρελαιοκηλίδας.

### 8.3.2 Εξέλιξη τροχιάς πετρελαιοκηλίδας στα αντίστοιχα σενάρια

Αρκετές διαφορές παρατηρούνται στα δύο μοντέλα στην απόσταση που καλύπτει η πετρελαιοκηλίδα στο ίδιο χρονικό διάστημα σε ορισμένα σενάρια, ιδιαίτερα σε μεγάλες εντάσεις ανέμου. Οι διαφορές παρατηρούνται τόσο σε σενάρια όπου η πετρελαιοκηλίδα δεν φτάνει στην ακτή, όσο και σε σενάρια όπου στο OSM προσαιγιαλώνεται το 10% της πετρελαιοκηλίδας, αλλά στο MEDSLIK είτε δεν φτάνει στην ακτή η πετρελαιοκηλίδα, είτε φτάνει ένα πολύ μεγαλύτερο ποσοστό της στο ίδιο χρονικό διάστημα (Σχήμα 8.2). Στα σενάρια στα οποία η πετρελαιοκηλίδα εξέρχεται του κόλπου μέσω του ανοικτού ορίου δεν μπορεί να υπάρξει σύγκριση, καθώς το MEDSLIK δεν παρέχει την πληροφορία της ποσότητας της πετρελαιοκηλίδας που έχει εξέλθει από τον κόλπο αριθμητικά, παρά μόνο οπτικά.



**Σχήμα 8.2:** Θέση Διαρροής 3, Άνεμος Δ-6. Στο OSM έχει φτάσει το 10% της πετρελαιοκηλίδας στην ακτή, ενώ στο MEDSLIK το 40,9%

**Πίνακας 8.1:** Ποσοστά πετρελαιοκηλίδας στην ακτή για ανάλογο χρόνο προσομοίωσης

A/A	Θέση Ατυχήματος	Σενάριο	Διάρκεια προσομοίωσης (hrs)		Ποσοστό Πετρ/δας στην Ακτή	
			OSM	MEDSLIK	OSM	MEDSLIK
1	2	BA-6 bf	12,2	12	10%	0%
2	3	BA-4 bf	11,5	12	10%	0%
3	3	BA-5 bf	8,3	9	10%	0,04%
4	3	BA-6 bf	6,3	6	10%	0%
5	1	A-2 bf	12	12	10%	0%
6	1	A-3 bf	7,1	8	10%	0%
7	1	A-4 bf	4,8	5	10%	0%
8	1	A-5 bf	3,5	4	10%	0%
9	1	A-6 bf	2,7	3	10%	0%
10	2	A-2 bf	9,7	12	10%	1,21%
11	2	A-3 bf	6	6	10%	0,19%
12	2	A-4 bf	4,3	5	10%	1,14%
13	2	A-5 bf	3,3	4	10%	7,5%
14	2	A-6 bf	2,6	3	10%	5,4%
15	3	A-3 bf	14,6	9	10%	46,5%
16	3	A-4 bf	9,7	6	10%	61,9%
17	3	A-5 bf	6,9	5	10%	72,4%
18	3	A-6 bf	5,2	3	10%	53%
19	4	A-5 bf	10,8	12	10%	54,8%
20	4	A-6 bf	8,6	9	10%	59%
21	1	NA-1 bf	10,7	12	10%	0,18%
22	1	NA-2 bf	5,8	6	10%	0%
23	1	NA-3 bf	3,6	4	10%	0%
24	1	NA-4 bf	2,5	3	10%	0%
25	1	NA-5 bf	1,9	3	10%	0,7%
26	1	NA-6 bf	1,5	2	10%	0%
27	2	NA-2 bf	8,9	9	10%	0,22%
28	2	NA-3 bf	5,2	6	10%	0,07%
29	2	NA-4 bf	3,5	4	10%	0%
30	2	NA-5 bf	2,6	3	10%	0%
31	2	NA-6 bf	2	2	10%	0%
32	3	NA-2 bf	11,1	12	10%	6,7%
33	3	NA-3 bf	6,6	8	10%	3,69%
34	3	NA-4 bf	4,6	5	10%	1,29%
35	3	NA-5 bf	3,4	4	10%	0,47%
36	3	NA-6 bf	2,7	3	10%	0,08%
37	1	N-1 bf	8,6	9	10%	0,35%
38	1	N-2 bf	4,6	5	10%	3,2%
39	1	N-3 bf	2,9	3	10%	3,3%
40	1	N-4 bf	2,1	2	10%	2,81%
41	1	N-5 bf	1,6	2	10%	74,3%
42	1	N-6 bf	1,3	2	10%	82,2%

43	2	N-3 bf	12	12	10%	7,56%
44	2	N-4 bf	8,3	8	10%	18%
45	2	N-5 bf	6,2	6	10%	39,5%
46	2	N-6 bf	4,9	5	10%	70,53%
47	3	N-3 bf	8	8	10%	3,46%
48	3	N-4 bf	5,3	5	10%	1,9%
49	3	N-5 bf	3,9	4	10%	1,95%
50	3	N-6 bf	2,9	3	10%	0,93%
51	1	NΔ-1 bf	8,1	8	10%	0,1%
52	1	NΔ-2 bf	4,3	4	10%	0,2%
53	1	NΔ-3 bf	2,8	3	10%	5,78%
54	1	NΔ-4 bf	2	2	10%	6,72%
55	1	NΔ-5 bf	1,5	2	10%	77,61%
56	3	NΔ-3 bf	29	12	10%	10,62%
57	3	NΔ-4 bf	24,5	9	10%	41,87%
58	3	NΔ-5 bf	22,5	6	10%	26%
59	3	NΔ-6 bf	18,2	4	10%	0,36%
60	4	NΔ-5 bf	9,5	9	10%	0,58%
61	4	NΔ-6 bf	7,5	8	10%	63,74%
62	1	Δ-1 bf	9	9	10%	0,01%
63	1	Δ-2 bf	4,9	5	10%	0%
64	1	Δ-3 bf	3,1	3	10%	0%
65	1	Δ-4 bf	2,2	2	10%	0%
66	1	Δ-5 bf	1,7	2	10%	4,47%
67	2	Δ-2 bf	5,5	6	10%	0,02%
68	2	Δ-3 bf	3,3	4	10%	0%
69	2	Δ-4 bf	2,2	3	10%	0,02%
70	2	Δ-5 bf	1,6	2	10%	0%
71	3	Δ-5 bf	9,9	9	10%	7,95%
72	3	Δ-6 bf	7,6	8	10%	40,9%
73	4	Δ-6 bf	11,8	12	10%	23,66%
74	1	BΔ-1 bf	11,4	12	10%	0,02%
75	1	BΔ-2 bf	6	6	10%	0,01%
76	1	BΔ-3 bf	3,7	4	10%	0%
77	1	BΔ-4 bf	2,6	3	10%	0,02%
78	1	BΔ-5 bf	1,9	2	10%	0%
79	1	BΔ-6 bf	1,5	2	10%	0,31%
80	2	BΔ-2 bf	6,7	8	10%	0,33%
81	2	BΔ-3 bf	4,1	4	10%	0%
82	2	BΔ-4 bf	2,8	3	10%	0%
83	2	BΔ-5 bf	2,1	2	10%	0%
84	2	BΔ-6 bf	1,6	2	10%	0,41%



Από τον πίνακα προκύπτει ότι σε 18 από τα 84 σενάρια έχει προσαιγιαλωθεί μεγαλύτερο ποσοστό της πετρελαιοκηλίδας στο MEDSLIK και στα υπόλοιπα 66 στο OSM, για ανάλογο χρονικό διάστημα προσομοίωσης. Η αντικειμενικότητα των αποτελεσμάτων επηρεάζεται από το πεδίο μόνιμων θαλάσσιων ρευμάτων του MEDSLIK, η επιρροή του οποίου απεικονίζεται και στα αποτελέσματα των εξεταζόμενων σεναρίων. Το συμπέρασμα που εξάγεται από τον πίνακα είναι ότι ανάλογα με την κατεύθυνση των θαλάσσιων ρευμάτων, για κάθε θέση ατυχήματος και διεύθυνση ανέμου, στο MEDSLIK τα ποσοστά προσαιγιάλωσης της πετρελαιοκηλίδας είναι είτε σχεδόν μηδενικά, είτε προσεγγίζουν ή είναι μεγαλύτερα του 10% που έχει εξαχθεί από το OSM.

Συγκεκριμένα, στη Θέση πιθανού ατυχήματος 1, τα ποσοστά προσαιγιάλωσης της πετρελαιοκηλίδας είναι σχεδόν μηδενικά για όλες τις διευθύνσεις ανέμου, πλην της νότιας και της νοτιοδυτικής, επομένως τα θαλάσσια ρεύματα στο MEDSLIK ευνοούν τη μετακίνηση της πετρελαιοκηλίδας προς αυτή τη διεύθυνση. Στη Θέση 2 η τάση των ρευμάτων του MEDSLIK ευνοεί κυρίως τη νότια, αλλά και την ανατολική διεύθυνση του ανέμου. Στη Θέση 3 από την κατεύθυνση των ρευμάτων στο MEDSLIK ευνοείται η ανατολική διεύθυνση του ανέμου, ενώ πολύ μεγάλα ποσοστά προσαιγιάλωσης παρουσιάζονται και για βορειοδυτικό άνεμο, γεγονός που οφείλεται ωστόσο στη διαφορετική αποτύπωση της ακτογραμμής στα δύο μοντέλα. Στη Θέση 4, τόσο για ανατολικούς, όσο και για δυτικούς και νοτιοδυτικούς ανέμους παρουσιάζονται μεγαλύτερα ποσοστά προσαιγιάλωσης στο MEDSLIK, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στη συγκεκριμένη θέση ατυχήματος δεν έχουν μεγάλη επιρροή τα κλιματολογικά ρεύματα του MEDSLIK. Για τις συγκεκριμένες διευθύνσεις ανέμου σε κάθε θέση ατυχήματος οι προβλέψεις του MEDSLIK είναι πιο συντηρητικές. Η εικόνα για τα θαλάσσια ρεύματα που χρησιμοποιούνται στο MEDSLIK θα ήταν αναλυτικότερη, εφόσον ήταν δυνατή η σύγκριση στα σενάρια στα οποία η πετρελαιοκηλίδα εξέρχεται του κόλπου.

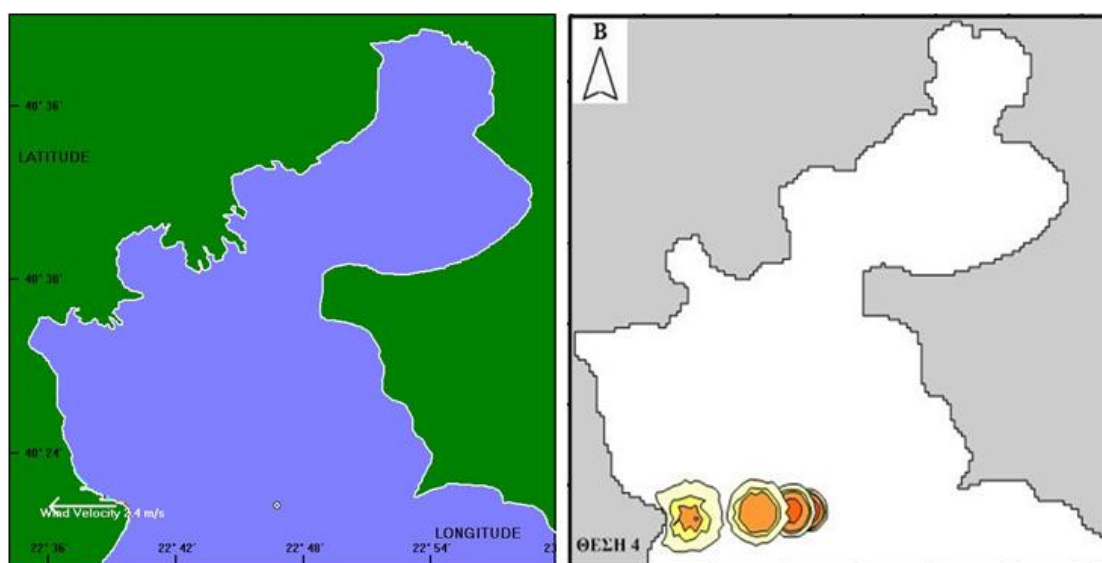
### 8.3.3 Σενάρια με εφαρμογή αντίστοιχων θαλάσσιων ρευμάτων

Σε αυτή την περίπτωση έγινε δόμηση του πεδίου θαλάσσιων ρευμάτων στο MEDSLIK για Ανατολικό άνεμο εντάσεως 2 bf, εισάγοντας σε ένα μεγάλο αριθμό σημείων της περιοχής μελέτης τις αντίστοιχες ταχύτητες των θαλάσσιων επιφανειακών ρευμάτων που προέκυψαν από το FLOW-3DL. Στη συνέχεια εξετάστηκε η διαρροή πετρελαίου στις 4 θέσεις ατυχημάτων (Πίνακας 8.2). Παρόλο που εισάγονται αντίστοιχα δεδομένα και στα δύο προγράμματα, δεν υπάρχει εικόνα των υδροδυναμικών υπολογισμών που εκτελούνται στο MEDSLIK.

**Πίνακας 8.2:** Σύγκριση σεναρίων χρησιμοποιώντας αντίστοιχα θαλάσσια ρεύματα

A/A	Θέση Ατυχήματος	Σενάριο	Διάρκεια προσομοίωσης (hrs)		Ποσοστό Πετρ/δας στην Ακτή	
			OSM	MEDSLIK	OSM	MEDSLIK
1	1	A-2 bf	12	12	10%	6,37%
2	2	A-2 bf	9,7	10	10%	62,72%
3	3	A-2 bf	21,5	21	10%	64,8%
4	4	A-2 bf	38,7	39	10%	60,81%

Στα σενάρια που εξετάστηκαν οι προβλέψεις είναι πιο συντηρητικές στο MEDSLIK, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.2, για την ίδια διεύθυνση και ένταση ανέμου στις 4 θέσεις διαρροής. Παρατηρείται μεγάλη διαφορά στα ποσοστά προσαιγιάλωσης για όλες τις θέσεις διαρροής, εκτός της θέσης 1, όπου στο ίδιο χρονικό διάστημα προσομοίωσης, φτάνει στην ακτή το 10% της πετρελαιοκηλίδας στο OSM και το 6,37% στο MEDSLIK. Στις υπόλοιπες θέσεις διαρροής, για ανάλογο χρονικό διάστημα προσομοίωσης φτάνει στην ακτή το 10% της πετρελαιοκηλίδας στο OSM, σε αντίθεση με το MEDSLIK, όπου τα ποσοστά προσαιγιάλωσης ξεπερνούν το 60%. Συγκεκριμένα, όπως παρουσιάζεται στα στοιχεία του Πίνακα 8.2, στη θέση 2 φτάνει το 62,72% της πετρελαιοκηλίδας στην ακτή, στη θέση 3 το 64,8% και στη θέση 4 το 60,81%, διαφορά που αποτυπώνεται και στο Σχήμα 8.3.



**Σχήμα 8.3:** Θέση Διαρροής 4, Άνεμος A-2 bf – Σύγκριση αποτελεσμάτων για αντίστοιχες συνθήκες θαλάσσιων ρευμάτων

#### 8.3.4 Σενάρια με μηδενικά θαλάσσια ρεύματα

Σε συνέχεια της σύγκρισης των σεναρίων για τα οποία έγινε η εφαρμογή των δύο μοντέλων στο Θερμαϊκό Κόλπο, εξετάστηκαν 10 υποθετικά σενάρια χωρίς θαλάσσια ρεύματα και στα δύο μοντέλα (Πίνακας 8.3). Η πετρελαιοκηλίδα μετακινείται στην επιφάνεια της θάλασσας μόνο με την επίδραση του ανέμου, με τη μέθοδο του παράγοντα του ανέμου «wind factor», δηλαδή με ποσοστό 3% της ταχύτητας του ανέμου και στα δύο μοντέλα, όπως αναλύθηκε στην Παράγραφο 5.1.

Πρόκειται για μία καθαρά υποθετική προσέγγιση, η οποία δεν μπορεί να έχει πρακτική εφαρμογή, καθώς σε πραγματικές συνθήκες υπάρχουν πάντα θαλάσσια ρεύματα στη θάλασσα, ακόμα και σε συνθήκες νηνεμίας, μόνο από τη δράση της παλίρροιας. Επιπλέον, αναιρεί την καθοριστική επιρροή των θαλάσσιων ρευμάτων σε κάθε μοντέλο. Ωστόσο, με αυτή την επιλογή εισάγονται κοινές παράμετροι και συνθήκες και στα δύο μοντέλα.

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 8.3.1, τα 10 σενάρια μηδενικών θαλάσσιων ρευμάτων που εξετάστηκαν αναφέρονται σε διαφορετικές διευθύνσεις και εντάσεις ανέμου για κάθε θέση πιθανής διαρροής. Η επιλογή έγινε με βάση τη διάρκεια των

προσομοιώσεων και το κατά πόσο αυτή προσεγγίζει ακέραιους αριθμούς στις αρχικές προσομοιώσεις στο OSM (Πίνακας 7.3).

**Πίνακας 8.3:** Σύγκριση σεναρίων χωρίς την επιρροή θαλάσσιων ρευμάτων

Α/Α	Θέση Ατυχήματος	Σενάριο	Διάρκεια προσομοίωσης (hrs)		Ποσοστό Πετρ/δας στην Ακτή	
			OSM	MEDSLIK	OSM	MEDSLIK
1	1	A-2 bf	12,1	12	10%	0%
2	1	Δ-2 bf	5,9	6	10%	0,74%
3	2	BA-6 bf	13,7	14	10%	15,26%
4	2	N-3 bf	11,8	12	10%	18,76%
5	3	BA-3 bf	19	19	10%	0,35%
6	3	Δ-6 bf	9,3	9	10%	58,29%
7	4	A-4 bf	14	14	10%	35,08%
8	4	A-5 bf	10	10	10%	35,36%
9	4	NA-6 bf	11,2	11	10%	1,35%
10	4	NΔ-4 bf	12,4	13	10%	8,58%

Από τη σύγκριση των 10 σεναρίων που επιλέχθηκαν προέκυψε ότι σε 5 σεναρία η ποσότητα του πετρελαίου στην ακτή είναι μεγαλύτερη στο OSM και σε 5 στο MEDSLIK, επομένως δεν μπορεί να εξαχθεί ξεκάθαρο συμπέρασμα για το ποιο είναι το πιο συντηρητικό πρόγραμμα. Το γεγονός αυτό οφείλεται και στην απόκλιση που παρουσιάζουν οι επιλεγόμενες θέσεις διαρροής στους δύο χάρτες, αλλά και στη διαφορετική ψηφιακή αποτύπωση της περιοχής μελέτης, όπως αναλύθηκε στην Παράγραφο 8.2.2.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.3, στη θέση 1 τα ποσοστά προσαιγιάλωσης είναι μηδενικά στο MEDSLIK, ενώ στη θέση 2 τα ποσοστά προσαιγιάλωσης βρίσκονται στα ίδια επίπεδα είτε για βορειοανατολικό (15,26%), είτε για νότιο άνεμο (18,76%) για τους αντίστοιχους χρόνους προσομοίωσης. Στη θέση 3 παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στα αποτελέσματα των δύο μοντέλων, καθώς για βορειοανατολικό άνεμο εντάσεως 3 bf φτάνει στην ακτή το 10% της πετρελαιοκηλίδας στο OSM και το 0,35% στο MEDSLIK, ενώ για δυτικό άνεμο εντάσεως 6 bf φτάνει στην ακτή το 10% στο OSM και το 58,29% στο MEDSLIK. Στη θέση 4, για ανατολικούς ανέμους εντάσεως 4 και 5 bf παρατηρείται ίδιας τάξης διαφορά στα ποσοστά προσαιγιάλωσης της πετρελαιοκηλίδας για τους αντίστοιχους χρόνους προσομοίωσης. Συγκεκριμένα και στα δύο σεναρία φτάνει το 10% της πετρελαιοκηλίδας στην ακτή στο OSM, ενώ στο MEDSLIK φτάνει το 35,08% και το 35,36% αντίστοιχα. Μικρότερες διαφορές παρατηρούνται στα αποτελέσματα των σεναρίων για νοτιοανατολικό άνεμο εντάσεως 6 bf, όπου φτάνει στην ακτή το 10% της πετρελαιοκηλίδας στο OSM και το 1,35% στο MEDSLIK και για νοτιοδυτικό άνεμο εντάσεως 4 bf, όπου προσαιγιαλώνεται το 10% της κηλίδας στο OSM και το 8,58% στο MEDSLIK.

### 8.3.5 Εξάπλωση πετρελαιοκηλίδας

Όσον αφορά τη σύγκριση της εξάπλωσης της πετρελαιοκηλίδας στα αποτελέσματα των σεναρίων που εξετάστηκαν στα δύο προγράμματα (Πίνακες 7.3 και 7.6) δεν μπορούν να υπάρξουν ασφαλή οπτικά συμπεράσματα για τα αντίστοιχα σεναρία, διότι στο OSM η διαβάθμιση της συγκέντρωσης της πετρελαιοκηλίδας στο νερό επιλέγεται από το χρήστη. Από αυτή την επιλογή εξαρτάται η οπτική απόδοση της πετρελαιοκηλίδας και το μέγεθος και η συνοχή που θα έχει αυτή. Δηλαδή είναι στην ευχέρεια του χρήστη η ελάχιστη συγκέντρωση πετρελαίου που θα είναι ορατή οπτικά και αυξάνοντας ή μειώνοντας την ποσότητα αυτή περιορίζεται ή επεκτείνεται η απεικόνιση της πετρελαιοκηλίδας. Επομένως, για να πραγματοποιηθεί αντικειμενική σύγκριση της εξάπλωσης του πετρελαίου στα δύο προγράμματα πρέπει να γίνεται κυρίως σύγκριση στη χρωματική κλίμακα διαβάθμισης της συγκέντρωσης του πετρελαίου σε κάθε σενάριο που εξετάζεται.

### 8.3.6 Πληροφορίες που παρέχονται στο πέρας των προσομοιώσεων

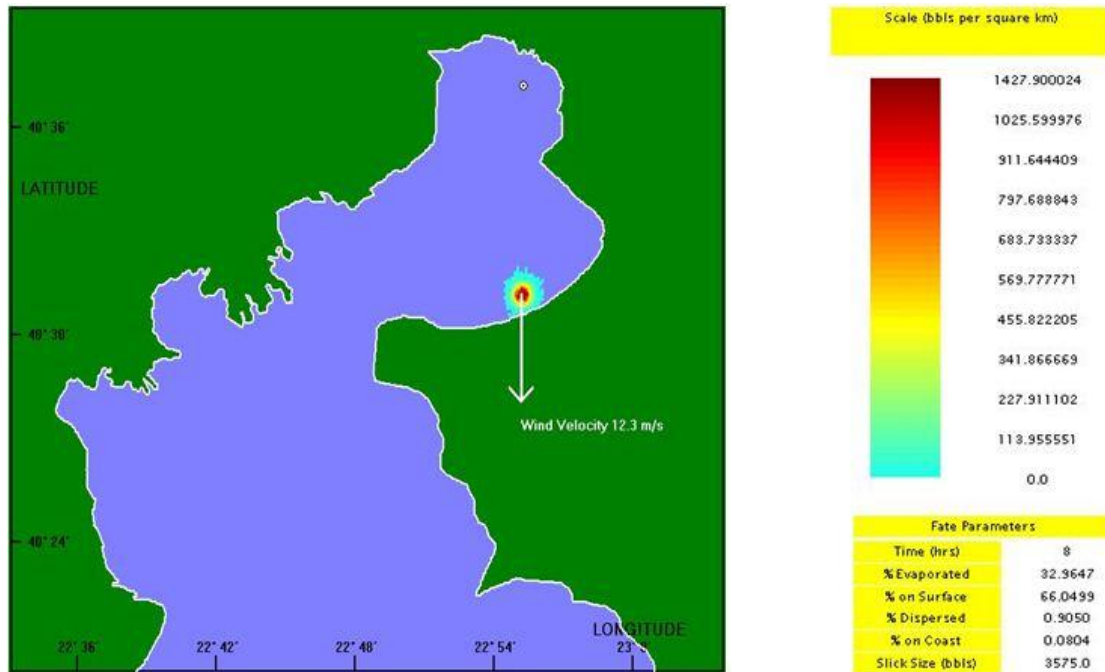
Κατά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων στο MEDSLIK παρέχεται το ποσοστό της πετρελαιοκηλίδας που βρίσκεται στην ακτή, αλλά στην περίπτωση που η κηλίδα εξέρχεται από τον κόλπο δεν δίνεται το αντίστοιχο ποσοστό του πετρελαίου. Αντίθετα, στο OSM η προσομοίωση ολοκληρώνεται όταν συγκεκριμένο ποσοστό (10%) του πετρελαίου που έχει διαρρεύσει είτε φτάνει στην ακτή, είτε εξέρχεται από τον κόλπο. Με αυτό τον τρόπο γίνεται διαρκής έλεγχος του ποσοστού της πετρελαιοκηλίδας που βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας εντός της περιοχής μελέτης, ενώ σε συνδυασμό με το ότι προκύπτει η ακριβής χρονική διάρκεια κάθε σεναρίου μπορούν να υπολογιστούν τα χρονικά διαστήματα που απαιτούνται για συγκεκριμένες αυξήσεις των ποσοστών της πετρελαιοκηλίδας είτε στην ακτή, είτε εκτός του κόλπου. Στο MEDSLIK η συγκεκριμένη διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολύ περιορισμένη έως ελάχιστη ακρίβεια, καθώς ο χρήστης μπορεί να εξάγει συμπεράσματα μόνο για χρονικά διαστήματα που είναι ακέραια πολλαπλάσια της μίας ώρας.

Επιπλέον, μέσω του SURFER υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης της εξέλιξης ενός σεναρίου, μέσω της οπτικοποίησης στον ίδιο χάρτη όλων των ενδιάμεσων στιγμών παρακολούθησης. Αντίθετα, τα οπτικοποιημένα αποτελέσματα που εξάγονται στο MEDSLIK αντιστοιχούν στη χρονική στιγμή στην οποία αναφέρεται η εκάστοτε εικόνα. Το μοντέλο δεν παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα της σύνδεσης της εξέλιξης ενός σεναρίου, παρά μόνο την ξεχωριστή προβολή του επιπλέοντος πετρελαίου για τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή και την εικόνα του διεσπαρμένου πετρελαίου και του πετρελαίου στην ακτή μέχρι την επιλεγόμενη χρονική στιγμή.

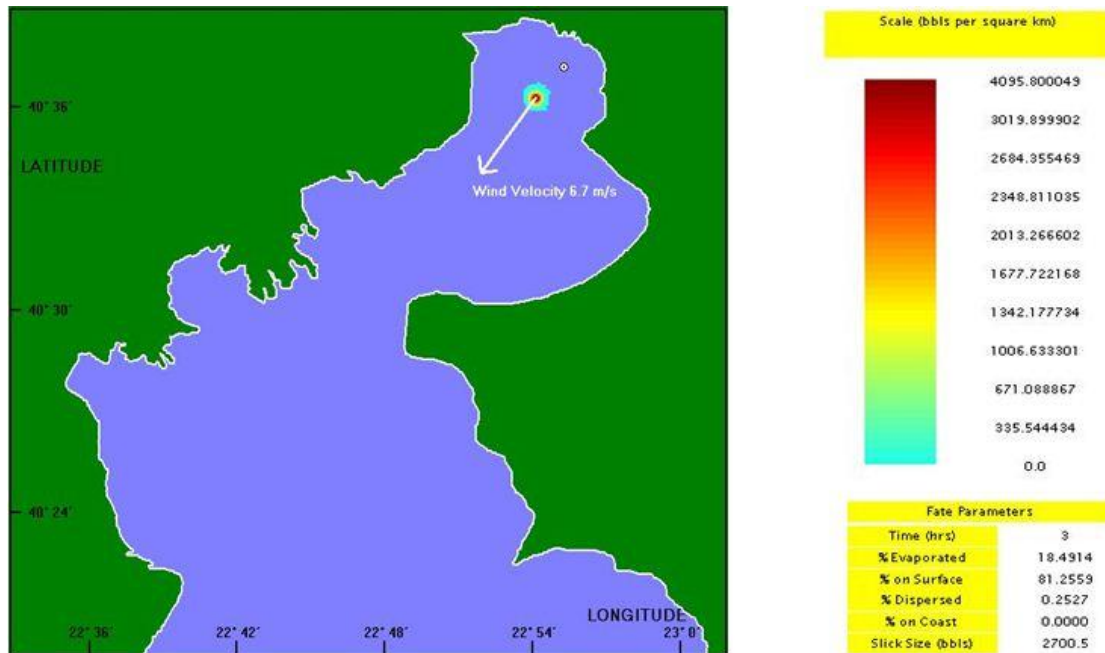
### 8.3.7 Διαβάθμιση πετρελαιοκηλίδας

Στο MEDSLIK πραγματοποιείται διαβάθμιση της κηλίδας στην έκτασή της σύμφωνα με τη συγκέντρωση του πετρελαίου στο νερό μέσω μιας χρωματικής κλίμακας. Σε όλα τα σεναρία χρησιμοποιείται η ίδια χρωματική διαβάθμιση, ωστόσο η συγκέντρωση του πετρελαίου διαφέρει σε κάθε σενάριο και σε κάθε ενδιάμεση χρονική στιγμή του. Επομένως κάθε σενάριο πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά με την

κλίμακά του για να μην προκαλείται σύγχυση από τη χρωματική ομοιομορφία που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της επεξεργασίας. Στα Σχήματα 8.4 και 8.5 παρουσιάζεται η πανομοιότυπη χρωματική διαβάθμιση της πετρελαιοκηλίδας, παρότι διαφέρουν σημαντικά οι συγκεντρώσεις του πετρελαίου στη θαλάσσια επιφάνεια.



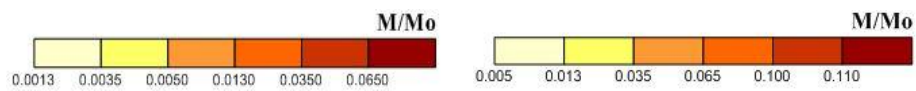
Σχήμα 8.4: Θέση Διαρροής 1, Άνεμος Δ-6 bf, χρωματική διαβάθμιση πετρελαιοκηλίδας



Σχήμα 8.5: Θέση Διαρροής 1, Άνεμος ΒΔ-4 bf, χρωματική διαβάθμιση πετρελαιοκηλίδας

Στο OSM ακολουθείται ίδια λογική με το MEDSLIK στη διαβάθμιση της πετρελαιοκηλίδας και η απεικόνισή της μεταβολής της μάζας του πετρελαίου στο νερό είναι αποτέλεσμα των ρυθμίσεων που εισάγονται στο πρόγραμμα σχεδίασης SURFER. Ωστόσο, η διαφορά των δύο μοντέλων έγκειται στο ότι στο OSM χρησιμοποιούνται δύο σταθερές κλίμακες σε όλα τα σενάρια, ανάλογα με την ένταση

του ανέμου, με αποτέλεσμα να απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές διαφορές στη συγκέντρωση του πετρελαίου σε κάθε σενάριο. Οι δύο κλίμακες που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.6.



**Σχήμα 8.6:** Οι δύο κλίμακες που χρησιμοποιούνται για τα σενάρια εντάσεως (1-3 bf) και (4-6 bf) αντίστοιχα

## 9. Συμπεράσματα – Προτάσεις

### 9.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με σκοπό την εφαρμογή και τη σύγκριση δύο μοντέλων για τον υπολογισμό της εξέλιξης της τροχιάς και των διεργασιών μιας πετρελαιοκηλίδας στο Θερμαϊκό Κόλπο. Η δημιουργία πετρελαιοκηλίδων έχει καταστροφικές συνέπειες για το περιβάλλον και τον άνθρωπο, όπως έχει αποδειχτεί από παλαιότερα ατυχήματα τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο, όσο και στον ελληνικό χώρο. Η αναφορά που έγινε στα αίτια, τις επιπτώσεις αλλά και το ιστορικό μεγάλων ατυχημάτων που είχαν ως αποτέλεσμα τη διαρροή πετρελαίου στη θάλασσα αναδεικνύει τη σημασία της πρόληψης και της εξέτασης ανάλογων ατυχημάτων, ώστε να είναι άμεση και αποτελεσματική η αντίδραση στην περίπτωση ενός πραγματικού περιστατικού.

Σε συνέχεια των εργασιών που εκπονήθηκαν στο Σαρωνικό Κόλπο, τα δύο προγράμματα ανταποκρίθηκαν στις διαφορετικές συνθήκες και στις ιδιαιτερότητες του Θερμαϊκού Κόλπου. Σημαντικό ρόλο για την ποιότητα των αποτελεσμάτων και τη σύγκριση των προγραμμάτων διαδραματίζουν οι επιλεγόμενες παράμετροι εισαγωγής στα δύο προγράμματα, οι χάρτες που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της περιοχής μελέτης και ο στόχος της εργασίας που πραγματοποιείται.

Από το χρήστη καθορίζεται η επιλογή των παραμέτρων, η οποία είναι ανάλογη των προσδοκώμενων αποτελεσμάτων, αφού πρέπει να τίθενται ανάλογες παράμετροι στα εξεταζόμενα προγράμματα, ώστε να μπορεί να υπάρξει σύγκριση μεταξύ τους. Ακόμα πιο σημαντικό είναι οι παράμετροι που επιλέγονται να ανταποκρίνονται στις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή μελέτης, γιατί αλλιώς η εφαρμογή στη συγκεκριμένη περιοχή χάνει το νόημά της και τα αποτελέσματα δεν θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ανάλογη περίπτωση. Εξίσου σημαντική είναι η ψηφιακή αποτύπωση της περιοχής μελέτης, καθώς τα αποτελέσματα επηρεάζονται άμεσα από τη βαθυμετρία και τη λεπτομερή αποτύπωση της ακτογραμμής.

Η ακριβής και απόλυτη σύγκριση των δύο μοντέλων θα μπορούσε να επιτευχθεί μόνο αν χρησιμοποιούσαν ίδιες παραμέτρους, αλλά και ίδιους χάρτες για την προσομοίωση της περιοχής μελέτης, ωστόσο αυτό δεν είναι δυνατόν να συμβεί. Οι διαφορές που παρουσιάζουν κυρίως στους υδροδυναμικούς υπολογισμούς δεν επιτρέπουν την εξαγωγή αντικειμενικών συμπερασμάτων για την εκτίμηση της τροχιάς της πετρελαιοκηλίδας μέσω της ποσοτικής σύγκρισης των σεναρίων που εξετάστηκαν. Γι' αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκε μία ποιοτική προσέγγιση στη σύγκριση των δύο μοντέλων, λαμβάνοντας υπόψη την υπολογιστική διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την εφαρμογή των δύο μοντέλων, τη μορφή των αποτελεσμάτων και των πληροφοριών που εξάγονται από τις προσομοιώσεις, αλλά και μέσω της προσεγγιστικής σύγκρισης των αποτελεσμάτων στα σεναρία στα οποία τέθηκε ανάλογο χρονικό διάστημα υπολογισμών στα δύο μοντέλα.

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι κάθε ένα από τα διαθέσιμα μοντέλα, συμπεριλαμβανομένων και των μοντέλων που δεν χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία, είναι αποτελεσματικό όταν χρησιμοποιείται στην κατάλληλη περίπτωση,

όπου μπορούν να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματά του. Το MEDSLIK είναι ένα εύχρηστο πρόγραμμα το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε επιχειρησιακό επίπεδο μέσω της διαδικτυακής πλατφόρμας του, αλλά αυτό μπορεί να συμβεί μόνο για τις επιλογές που προσφέρονται από το ίδιο το πρόγραμμα. Το OSM αντιθέτως, μπορεί να είναι πιο δύσκολο στη χρήση και να απαιτεί τη διαρκή προσοχή του ερευνητή, παρέχει όμως ελευθερία επιλογών στο χρήστη, μέσω της δυνατότητας επέμβασης στον κώδικα ανάλογα με την ποιότητα και τη λεπτομέρεια των αποτελεσμάτων που θέλει να εξάγει και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ερευνητικό επίπεδο.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν στην παρούσα εργασία, αλλά και σε ανάλογες περιπτώσεις δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται ως αυθεντία για την αντιμετώπιση πιθανών πραγματικών περιστατικών στην αντίστοιχη περιοχή μελέτης. Μπορούν, όμως, να χρησιμοποιούνται για επικουρικούς λόγους στα στάδια της σχεδίασης πιθανών τρόπων αντιμετώπισης, αλλά και για να ληφθούν μέτρα πρόληψης από τους αρμόδιους φορείς.

## 9.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας προτείνεται η εξέλιξη του μοντέλου OSM σε τρισδιάστατο, για να μπορούν να ληφθούν υπόψη διεργασίες όπως η καθίζηση και η διασπορά στην υδάτινη στήλη μέσω της δράσης των κυματισμών. Προτείνεται, επίσης, η στοχαστική προσέγγιση του προβλήματος, λόγω της αβεβαιότητας στις συνθήκες που επικρατούν και στα στοιχεία που εισάγονται στα μοντέλα, αλλά και η ανάπτυξη διαδικασιών για την προσαιγιάλωση της πετρελαιοκηλίδας, όπως η συσσώρευση στους διαφορικούς όγκους του αριθμητικού πλέγματος και η πιθανότητα επαναφοράς στη θάλασσα. Εφόσον εξελιχθεί ο υπολογιστικός κώδικας του OSM προς αυτές τις κατευθύνσεις, το τελευταίο βήμα για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως και σε επιχειρησιακό επίπεδο θα είναι η ανάπτυξή του και ο συνδυασμός του με κάποιο σύστημα GIS, ώστε να γίνεται άμεσα και αντικειμενικά η σύνδεση της χωρικής με την περιγραφική πληροφορία. Το MEDSLIK είναι ένα εμπορικό πρόγραμμα, οπότε δεν υπάρχει δυνατότητα επέμβασης στον κώδικά του στα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας. Ωστόσο, αν υπήρχε αυτή η δυνατότητα προτείνεται η μείωση του χρονικού βήματος και η ανάπτυξη του προγράμματος για να μπορεί να χρησιμοποιήσει ακριβή χρονικά διαστήματα που έχουν νόημα στις προσομοιώσεις. Επιπλέον, θα ήταν χρήσιμη η δυνατότητα επιλογής κοινής διαβάθμισης της συγκέντρωσης του πετρελαίου για ένα αριθμό υποθετικών σεναρίων.

Σε συνέχεια της παρούσας εργασίας, προτείνεται επίσης η χρήση των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων για την πραγματοποίηση μιας μελέτης εκτίμησης επικινδυνότητας στο Θερμαϊκό Κόλπο, μέσω της οποίας θα προκύψουν οι περιοχές που είναι περισσότερο επιρρεπείς ή ευαίσθητες στη δημιουργία πετρελαιοκηλίδων λόγω ναυτικών ατυχημάτων.



## Βιβλιογραφικές Αναφορές

### Διεθνείς

- Al-Rabeh A.H., 1994, *Estimating surface oil spill transport due to wind in the Arabian Gulf*, Ocean Engineering, 21, 461-465
- Buist I., 1979, *An experimental study of the dispersion of oil slicks into the water column*. M.A.Sc. thesis, Dept Chem. Engineering, University of Toronto
- Chao X., Shankar N.J. and Cheong H.F., 2001, *Two- and three-dimensional oil spill model for coastal waters*, Ocean Engineering, 28, pp. 1557-1573
- Cohen Y., Mackay D. and Shiu W.Y., 1980, *Mass transfer rates between oil slicks and water*, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 58, pp. 569-574
- Duliere V., Ovidio F. and Legrand S., *OSERIT-Development of an integrated software for forecasting the impacts of accidental oil pollution*, SSD (Science for a Sustainable Development)
- European Environment Agency (EEA), 2006, *Priority issues in the Mediterranean environment*, Report
- Fay J.A., 1971, *Physical processes in the spread of oil on a water surface*, Proc. Joint Conf. on Prevention and Control of Oil Spills, Amer. Petrol. Inst., Washington D.C., pp. 463-467
- Fredj G., Bellan-Santin D. and Meinardi M., 1992, *Etat des connaissances sur la faune marine Mediterranee. Speciation et biogeographie en Mer Mediterranee (ed. by D.Bellan)*, Bulletin de l' Institut Oceanographique, Monaco, Numero special 9, pp. 133-145
- Guo W.J. and Wang Y.X., 2009, *A numerical oil spill model based on a hybrid method*, Marine Pollution Bulletin, 58, pp. 726-734
- Hancock P., 2013, *Yong Win 3*, Article, [www.shipwrecklog.com](http://www.shipwrecklog.com)
- Harrison P., 2013, *Marine crude oil transport – global voyage losses steady in 2012*, Petroleum Review, September 2013
- Industry Technical Advisory Committee (iTac), 2008, *Use of models in oil spill response*, Technical Paper.
- International Tankers Owners Pollution Federation Limited (ITOPF), 2014, *Oil tanker spill statistics 2013*
- Lardner R.W., B.A., Ph.D., Sc.D., (2004;2011), *MEDSLIK user manual*, Cambridge
- Lehr W.J., Cekirge H.M., Fraga R.J. and Belen M.S., 1984, *Empirical studies of the spreading of oil spills*, Oil and Petrochemical Pollution, 2(1), pp. 7-11
- Mackay D. and Matsugu R.S., 1973, *Evaporation rates of liquid hydrocarbon spills on land and water*, Canadian Journal of Chemical Engineering, 51, pp. 434-439

- Mackay D., Buist I., Mascarenhas R. and Paterson S., 1979, *Oil spill processes and models*, Research Report, Arctic Marine Oilspill Program, Environmental Protection Service, Fisheries and Environment Canada
- Mackay D. and Paterson S., 1980, *Calculation of the evaporation rate of volatile liquids*, Proc. 1980 National Conf. on Control of Hazardous Material Spills, Louisville, Ky
- Mackay D., 1980, *Oil spill processes and models*, Environmental Protection Service, Canada
- Otay E.N., Stamou A.I., Altan Y.C, Papadonikolaki G., Copty N., Christodoulou G., Karakoc F.T., Tsoukala V.K., Koutsoyiannis D. and Papadopoulos A., 2013, *Risk assessment of oil spill accidents, Part 2: Application to Saronikos Gulf and Izmir Bay*, 13th International Conference on Environmental Science and Technology (CEST2013), September 5-7 2013, Athens, Greece
- Stamou A.I., Noutsopoulos C., Pipilis K.G., Gavalaki E. and Andreadakis A., 1999, *Hydrodynamic and water quality modeling of Southern Evoikos Gulf-Greece*, Global Nest the International Journal, 1(2), pp. 131-141
- Stamou A.I., Memos C.D. and Spanoudaki K., 2007a, *Estimating water renewal time in semi-enclosed coastal areas with complicated geometry using a hydrodynamic model*, Journal of Coastal Research, 50, pp. 282-286
- Stamou A.I., Memos C.D. and Kapetanaki M.E., 2007b, *Modelling water renewal in a coastal embayment*, Proceedings of the ICE-Maritime Engineering, 160(MA3), 93-104
- Stamou A.I., Otay E.N., Tsoukala V.K., Copty N., Karakoc F.T., Christodoulou G., Papadopoulos A., Papadonikolaki G. and Altan Y.C., 2013, *Risk assessment of oil spill accidents, Part 1: Presentation of the methodology*, 13th International Conference on Environmental Science and Technology (CEST2013), September 5-7 2013, Athens, Greece
- Uluscu O.S., Ozbas B., Altioek T. and Or I. (2009), *Risk Analysis of the Vessel Traffic in the Strait of Istanbul*, Risk Analysis, 29:1454-72
- United Nations Environment Programme (UNEP), 1972, *Declaration of the United Nations Conference of the Human Environment*, Stockholm 1972

## Ελληνικές

- Αλεξόπουλος Α., 2005, καθηγητής του Τμήματος Ναυτιλιακών Σπουδών, *Διεθνές θαλάσσιο περιβαλλοντικό δίκαιο*, πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πειραιώς
- Ζέρβα Π., 2007, *Η οικονομική διάσταση της θαλάσσιας ρύπανσης από τα ναυτικά ατυχήματα*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ
- Καλογήρου Στ., Dr Σιούλας Ανδρ. και Corsini-Φωκά Μ., *Ποσειδωνίες, τα υποθαλάσσια δάση μας*, Άρθρο, Οικολογική Επιθεώρηση (oikologos.gr)

- Κλωνάρης Γ., 2009, *Μελέτη ατυχημάτων πετρελαιοκηλίδων στο βόρειο Αιγαίο*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΑΠΘ
- Κορρός Κ., 2008, *Μοντέλο τύξης/γήρανσης κηλίδων πετρελαίου*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ
- Κουτίτας Χ.Γ., 1985, *Μαθηματικά ομοιώματα στην παράκτια μηχανική: με εφαρμογές των μικρο-Η/Υ*, Θεσσαλονίκη
- Κουτίτας Χ.Γ., 2008, *Θερμαϊκός η οπτική του ΑΠΘ και η πρακτική του ΟΛΘ*, Εισήγηση του Χ. Κουτίτα, Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ
- Κραγιοπούλου Ελ., 2014, *Εκτίμηση επικινδυνότητας ατυχημάτων πετρελαιοκηλίδας-Εφαρμογή δύο μεθοδολογιών στο Σαρωνικό Κόλπο*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Κρεστενίτης Ι.Ν., 1988, *Αριθμητική μελέτη της ανεμογενούς παράκτιας κυκλοφορίας και διερεύνηση των συνθηκών στο όριο ανοικτής θάλασσας. Εφαρμογή στο Θερμαϊκό Κόλπο*, Τεχνική Έκθεση, Techn. Chron.-A. Greece 1988, Vol. 3, No 4
- Παπαδονικολάκη Γ., 2013, *Μαθηματική προσομοίωση της συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδων*, Μεταπτυχιακή Εργασία του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ
- Ποτουρίδης Στ., 2013, *Σύγκριση των προγραμμάτων GNOME, MEDSLIK και FLOW-3DL για τον υπολογισμό τροχιάς πετρελαιοκηλίδας*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ
- Ρούμπα Δ., 2012, *Μαθηματική προσομοίωση πλουμίου αιωρούμενων στερεών από θαλάσσια βυθοκόρηση*, Μεταπτυχιακή Εργασία του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ
- Σταυρίδης Γ., 2007, *Πετρελαϊκή ρύπανση από ατυχήματα Δ/Ξ στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ
- Τριανταφύλλου Γ., 2004, Καθηγητής ΕΜΠ, *Πετρελαιοκηλίδες*, Περιβάλλον και ανάπτυξη, πανεπιστημιακές σημειώσεις, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα

### **Διαδικτυακές αναφορές (τελευταία πρόσβαση Οκτώβριος 2014)**

[www.arkive.org](http://www.arkive.org)

[www.asascience.com/software/PDF/ASA\\_OILMAP\\_Overview.pdf](http://www.asascience.com/software/PDF/ASA_OILMAP_Overview.pdf)

[www.asascience.com/software/PDF/SIMAP\\_TechBrochure.pdf](http://www.asascience.com/software/PDF/SIMAP_TechBrochure.pdf)

[www.bmt-software-solutions.com/Libraries/OSIS/Oil\\_Spill\\_Information\\_System\\_OSIS\\_v4\\_5\\_product\\_sheet.sflb.ashx](http://www.bmt-software-solutions.com/Libraries/OSIS/Oil_Spill_Information_System_OSIS_v4_5_product_sheet.sflb.ashx)

[commons.wikimedia.org](http://commons.wikimedia.org)

<http://edepot.wur.nl/174587>

[www.filotis.itia.ntua.gr](http://www.filotis.itia.ntua.gr)

[www.google.com/earth](http://www.google.com/earth)

[www.greenpeace.org/greece/el/news/newstories-archive/oil-pump/oilspills-in-greece/](http://www.greenpeace.org/greece/el/news/newstories-archive/oil-pump/oilspills-in-greece/)  
«Οι Σημαντικότερες Πετρελαιοκηλίδες στην Ελλάδα», 2007

[www.itopf.com](http://www.itopf.com)

[www.marinetraffic.com/gr](http://www.marinetraffic.com/gr)

[www.medess4ms.eu](http://www.medess4ms.eu)

[www.moe.gov.lb/oilspill2006/](http://www.moe.gov.lb/oilspill2006/)

[www.mohid.com/Prestige/Oil\\_Spills\\_in\\_MOHID.htm](http://www.mohid.com/Prestige/Oil_Spills_in_MOHID.htm)

[www.oceanecology.ca/oil.htm](http://www.oceanecology.ca/oil.htm)

[response.restoration.noaa.gov/gnome](http://response.restoration.noaa.gov/gnome)

[www.smashinglive.com](http://www.smashinglive.com)

[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

[www.yen.gr](http://www.yen.gr) «Περιβάλλον: Νομοθεσία-Κυρώσεις»

[www.ypeka.gr](http://www.ypeka.gr)