



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ GNOME, MEDSLIK ΚΑΙ
FLOW3D-L ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΡΟΧΙΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ**

Στέφανος Στ. Ποτουρίδης

Επιβλέπουσα: **Βασιλική Κ. Τσουκαλά**
Επ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ GNOME, MEDSLIK ΚΑΙ
FLOW3D-L ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΡΟΧΙΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ**

Στέφανος Στ. Ποτουρίδης

Το Περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν 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.

Στέφανος Στ. Ποτουρίδης

Επιβλέπουσα: **Βασιλική Κ. Τσουκαλά**

Επ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όσους με βοήθησαν για την εκπόνησή της.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της προπτυχιακής εργασίας, κα Τσουκαλά Βασιλική, Επίκουρο Καθηγήτρια ΕΜΠ, κάτω από τη σταθερή καθοδήγηση και συντονισμό της οποίας, ολοκληρώθηκε αυτή η προσπάθεια. Το συνεχές ενδιαφέρον που επέδειξε, με ενθάρρυνε να συνεχίσω με σταθερούς ρυθμούς, ενώ οι επισημάνσεις και οι διορθώσεις της ήταν καθοριστικές για την διαμόρφωση της παρούσας έρευνας.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της παρούσας εργασίας, κ. Στάμου Α., Καθηγητή ΕΜΠ και κ. Μπαλτά Ε., Αν. Καθηγητή ΕΜΠ για τις πολύτιμες διορθώσεις και σχόλια-παρατηρήσεις.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα και φίλο Μιχάλη Χονδρό για το συνεχές ενδιαφέρον του για την εξέλιξη της εργασίας αυτής και την ευρύτερη υποστήριξη που μου παρείχε τόσο σε επιστημονικά θέματα όσο και σε πρακτικά.

Ευχαριστώ ακόμη, την Υποψήφια Διδάκτορα Παπαδονικολάκη Γεωργία επίσης για το συνεχές ενδιαφέρον της για την εξέλιξη της εργασίας αυτής, για τη συστηματική καθοδήγηση της, καθώς επίσης και για τη συρροή πληροφοριών που μου παρείχε, με στόχο την ολοκληρωμένη προσέγγιση του θέματος.

Ευχαριστώ, τέλος, τους γονείς μου Σταύρο και Καλλιόπη για την ψυχολογική στήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αθήνα 2013 Ποτουρίδης Στέφανος

Περιεχόμενα

Περίληψη	vii
Abstract	ix
1. Εισαγωγή	3
1.1 Αντικείμενο της Εργασίας	4
1.2 Πρωτότυπα Σημεία	4
1.3 Διάρθρωση της Εργασίας	4
2. Το πετρέλαιο	7
2.1 Εισαγωγή	7
2.2 Σύσταση	7
2.3 Προέλευση.....	9
2.4 Φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες	10
2.5 Συμπεριφορά στο θαλάσσιο περιβάλλον	11
2.5.1 Εξάπλωση	11
2.5.2 Εξάτμιση	11
2.5.3 Διασπορά	12
2.5.4 Γαλακτωματοποίηση.....	12
2.5.5 Διάλυση	13
2.5.6 Οξείδωση.....	14
2.5.7 Καθίζηση	14
2.5.8 Βιοαποικοδόμηση	14
2.6 Άντληση	15
3. Πετρελαιοκηλίδες	19
3.1 Εισαγωγή	19
3.2 Ορισμός	19
3.3 Αίτια δημιουργίας πετρελαιοκηλίδων	19
3.4 Τα μεγαλύτερα ατυχήματα στον κόσμο.....	20
3.5 Τα μεγαλύτερα ατυχήματα στην Ελλάδα.....	31

3.6 Πετρελαιοφόρα Δεξαμενόπλοια	33
3.7 Πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου	35
3.8 Επιπτώσεις πετρελαιοκηλίδων.....	38
3.8.1 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις	38
3.8.2 Κοινωνικο-Οικονομικές Επιπτώσεις	42
3.9 Νομοθεσία για ρύπανση από θαλάσσια ατυχήματα.....	44
3.10 Εκτίμηση επικινδυνότητας (Risk Assesment)	45
3.11 Τρόποι αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων	46
3.11.1 Εισαγωγή	46
3.11.2 Μηχανικές μέθοδοι καθαρισμού	47
3.11.3 Χημικές Μέθοδοι Καθαρισμού	52
3.11.4 Φυσική αποδόμηση	54
3.11.5 Εναλλακτικές μέθοδοι	54
3.11.6 Καθαρισμός ακτών	55
3.11.7 Κόστος καθαρισμού	57
4. Μοντελοποίηση Πετρελαιοκηλίδων	60
4.1 Εισαγωγή	60
4.2 Τύποι Μοντέλων.....	61
4.2.1 Oil Weathering models.....	61
4.2.2 Στοχαστικά μοντέλα / Μοντέλα πιθανοτήτων.....	62
4.2.3 Ντετερμινιστικά μοντέλα	62
4.2.4 Hind-cast μοντέλα	63
4.2.5 Τριών διαστάσεων (3D).....	63
4.3 Απαιτήσεις Δεδομένων	64
4.3.1 Γενικά	64
4.3.2 Υδροδυναμικά Δεδομένα.....	65
4.3.3 Ανεμολογικά Στοιχεία	66
4.3.4 Τύπος Πετρελαίου.....	66
4.4 Σχεδιασμός Έκτακτης Ανάγκης	66
4.5 Επιχειρησιακά Μοντέλα	67
4.6 Προσομοίωση Στρατηγικών Αντιμετώπισης	68
4.7 Χρήση για Έρευνα.....	68

4.8 Σχετικά με τη Χρήση των Αποτελεσμάτων των Μοντέλων	69
4.9 Συμπεράσματα	69
5. Το MEDSLIK	71
5.1 Εισαγωγή - Γενικά	71
5.2 Εισαγωγή δεδομένων πετρελαιοκηλίδας	75
5.3 Το μαθηματικό μοντέλο	77
5.3.1 Μεταφορά – Διάχυση – Προσαιγιάλωση	77
5.3.2 Φυσικές διεργασίες	80
5.3.3 Εξάτμιση	82
5.3.4 Γαλακτωματοποίηση	83
5.3.5 Διασπορά	84
5.3.6 Εξάπλωση	87
5.4 Αποτελέσματα – Γραφικά	88
6. Το GNOME	90
6.1 Εισαγωγή - Γενικά	90
6.2 Εισαγωγή δεδομένων πετρελαιοκηλίδας	93
6.3 Το μαθηματικό μοντέλο	95
6.3.1 Μεταφορά – Διάχυση – Προσαιγιάλωση	95
6.3.2 Φυσικές διεργασίες	99
6.3.3 Εξάτμιση	101
6.3.4 Γαλακτωματοποίηση	101
6.3.5 Διασπορά	101
6.3.6 Εξάπλωση	102
6.4 Αποτελέσματα – Γραφικά	103
7. Το FLOW 3D-L	104
7.1 Εισαγωγή - Γενικά	104
7.2 Εισαγωγή δεδομένων πετρελαιοκηλίδας	104
7.3 Το μαθηματικό μοντέλο	105
7.3.1 Μεταφορά – Διάχυση – Προσαιγιάλωση	105
7.3.2 Φυσικές διεργασίες	108
7.3.3 Εξάτμιση	108
7.3.4 Γαλακτωματοποίηση	109

7.3.5 Διασπορά	110
7.3.6 Εξάπλωση	110
7.4 Αποτελέσματα – Γραφικά.....	111
8. Επιλογή Σεναρίων Ατυχήματος Πετρελαιοκηλίδας.....	113
8.1 Εισαγωγή	113
8.2 Περιγραφή Μεθοδολογίας Επικινδυνότητας	115
8.3 Επιλογή Τιμών Παραμέτρων Πετρελαίου	117
8.4 Θέση Περιστατικών	117
9. Ανάλυση Αποτελεσμάτων.....	120
9.1 Ανάλυση Αποτελεσμάτων MEDSLIK	120
9.1.1 Εισαγωγή	120
9.1.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	121
9.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων GNOME	123
9.2.1 Εισαγωγή	123
9.2.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	124
9.3 Ανάλυση Αποτελεσμάτων FLOW 3DL.....	127
9.3.1 Εισαγωγή	127
9.3.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	127
9.4 Σύγκριση των Προγραμμάτων.....	129
9.4.1 Εισαγωγή	129
9.4.2 Αναλυτικά.....	129
10. Συμπεράσματα - Προτάσεις.....	135
10.1 Συμπεράσματα	135
10.2 Πρόταση Για Περαιτέρω Διερεύνηση	136
Βιβλιογραφία	137
Παράρτημα	139

Περίληψη

Στην παρούσα μελέτη ακολουθείται μια προσέγγιση για να συγκριθούν με ακρίβεια δύο προγράμματα υπολογισμού τροχιάς πετρελαιοκηλίδας ευρείας κυκλοφορίας μεταξύ τους και με ένα πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο στο Εργαστήριο Υδραυλικής. Το βασικό σημείο αυτής της εργασίας είναι η χρησιμοποίηση του Σαρωνικού Κόλπου για τη σύγκριση των προγραμμάτων με σενάρια που θα μπορούσαν ενδεχομένως να είναι πραγματικά ατυχήματα διαρροής πετρελαίου.

Πιο συγκεκριμένα, για την εύρεση των σημείων διαρροής χρησιμοποιήθηκε για το Σαρωνικό Κόλπο το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Υδραυλικής του ΕΜΠ (Stamou et. Al, 2013), το οποίο προβλέπει τη συχνότητα των θαλάσσιων ατυχημάτων και τη γεωγραφική κατανομή των χώρων που μπορούν να λάβουν χώρα. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε έρευνα για το ποιες είναι οι συνηθέστερες εντάσεις ανέμου στην περιοχή μελέτης και για το είδους πετρέλαιο μεταφέρεται συνήθως εντός των ελληνικών θαλασσών.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας, λειτούργησαν ως δεδομένα εισόδου στους υπολογισμούς των μοντέλων προς σύγκριση. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν τρεξίματα σε κάθε ένα από τα προγράμματα για όλα τα σημεία διαρροής, για τις οχτώ κύριες διευθύνσεις ανέμου, με έξι διαφορετικές εντάσεις (από 1 έως 6 bf) και σε τέσσερα στιγμιότυπα (T, T/2, T/4, T/8, όπου T ο χρόνος ώστε το 10% των σωματιδίων της πετρελαιοκηλίδας να έχει φτάσει στην ακτή). Πραγματοποιήθηκε ένα σύνολο 2.304 μετρήσεων, που αντιστοιχεί σε 576 σενάρια διαρροής. Σε κάθε μία από τις μετρήσεις αντιστοιχεί και μία εικόνα.

Στη συνέχεια συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των τρεξιμάτων στα αντίστοιχα σενάρια και χρόνους. Καθοριστικό ρόλο παίζουν σε κάθε επίπεδο της παρούσας μελέτης, όσον αφορά τους υπολογισμούς, ο ακριβής ορισμός των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στα προγράμματα και των παραγόντων κίνησης ή αποσάθρωσης του πετρελαίου.

Στο τέλος της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν όσον αφορά τη σύγκριση των τριών προγραμμάτων ενώ προτείνονται πεδία προς περαιτέρω διερεύνηση.

Abstract

This study followed an approach to accurately compare two widely known programs for calculating oil spill trajectory among themselves and with a program developed at the National Technical University of Athens, Laboratory of Hydraulics. The key point of this work is the use of the Saronic Gulf to compare programs with scenarios that could possibly be real oil spill accidents.

More specifically, in order to estimate the rushes, the model developed in the Hydraulics Laboratory of NTUA (Stamou et. Al, 2013) was used. The model provides the frequency of accidents at sea and in the distribution of sites eligible country. Then a survey was conducted on what wind is the most in the study area and the kind of oil is usually transported within the Greek seas.

The results of this survey, served as input to the calculations of models being compared. In particular, runs made at each one of the programs for all points of leakage, for the eight main directions of wind, with six different intensities (from 1 to 6 bf) and in four shots (T, T / 2, T / 4, T / 8, where T is the time that it takes for 10 % of the particles of the oil spill to reach the coast). A total 2.304 measurements, corresponding to 576 leakage scenarios. Each of the measurements corresponds to one image.

Then, the results from all programs in the respective scenarios and times were compared. It can be clearly seen that the exact definition of the variables used in the programs and the factors of movement or disintegration of oil play a crucial role at every level of this study, regarding calculations.

At the end of this work, conclusions regarding the comparison of the three programs are presented and, finally, areas for further investigation are proposed.

Παράρτημα

Πίνακας Π. 1 Παράρτημα Πινακών

A/A	Πίνακας	Λεζάντα	Πηγή
1	2.1	Στοιχεία και ποσοστό στο Πετρέλαιο	Wikipedia "petroleum"
2	2.2	Πίνακας που παρουσιάζει διάφορες τιμές κατανάλωσης και παραγωγής για μεγάλα κράτη	US Energy Information Administration, 2011
3	2.3	Πίνακας Κλασμάτων Πετρελαίου	Wikipedia "petroleum"
4	2.4	Ποσότητα Εξόρυξης ανά χώρα παραγωγής	US Energy Information Administration, 2011
5	3.1	Τα 10 μεγαλύτερα ατυχήματα που έχουν συμβεί παγκοσμίως	Anne Casselman (2009) 10 Biggest Oil Spills in History, No, the 1989 Exxon-Valdez spill doesn't make the list, Popular Mechanics
6	3.2	Οι εκτιμήσεις της NOAA για το τι απέγινε το πετρέλαιο που διέρρευσε στον κόλπο του Μεξικού	NOAA Information Desk
7	3.3	Τα 10 σημαντικότερα ατυχήματα διαρροής πετρελαίου στην Ελλάδα	Greenpeace (2007), «Οι σημαντικότερες πετρελαιοκηλίδες στην Ελλάδα»
8	3.3	Νέα κατάταξη πετρελαιοφόρων	Wikipedia "Δεξαμενόπλοιο"
9	4.1	Πίνακας που περιγράφει που μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κάθε κατηγορία μοντέλου	iTac (2008), Technical Paper "Use of Models in Oil Spill Response"
10	4.2	Πίνακας Κατηγορίες μοντέλων και παράδειγμα	-
11	6.1	Οι τύποι ρύπων που υποστηρίζονται στο GNOME	NOAA, Office of Response and Restoration (2012) "General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) Technical Documentation"
12	8.1	Υδρογραφικοί Παράγοντες Πλοήγησης	Otay et. al, (2013) RISK ASSESSMENT OF OIL SPILL ACCIDENTS
13	Π.1	Παράρτημα Πινακών	-
14	Π.2	Παράρτημα Εικόνων	-

Πίνακας Π. 2 Παράρτημα Εικόνων

A/A	Εικόνα	Λεζάντα	Πηγή
1	1. 1	Η δομή του πετρελαίου	Wikipedia "petroleum"
2	3. 1	Εικόνα από τις καταστροφές και τους ανοιχτούς αγωγούς στον Πόλεμο του Κόλπου	Anne Casselman (2009) 10 Biggest Oil Spills in History, No, the 1989 Exxon-Valdez spill doesn't make the list, Popular Mechanics
3	3. 2	Προσπάθειες κατάσβεσης της φωτιάς στην εξέδρα DeepWater Horizon	Anne Casselman (2009) 10 Biggest Oil Spills in History, No, the 1989 Exxon-Valdez spill doesn't make the list, Popular Mechanics
4	3. 3	Αεροφωτογραφία από περιοχή που πλήττεται από τη διαρροή	Anne Casselman (2009) 10 Biggest Oil Spills in History, No, the 1989 Exxon-Valdez spill doesn't make the list, Popular Mechanics
5	3. 4	Εικόνα από την πηγή της πετρελαιοκηλίδας	Anne Casselman (2009) 10 Biggest Oil Spills in History, No, the 1989 Exxon-Valdez spill doesn't make the list, Popular Mechanics
6	3. 5	Το πλοίο που φλέγεται (δεξαμενόπλοιο Haven)	Anne Casselman (2009) 10 Biggest Oil Spills in History, No, the 1989 Exxon-Valdez spill doesn't make the list, Popular Mechanics
7	3. 6	Χάρτης ατυχημάτων	
8	3. 7	Εικόνα που απεικονίζει τη δομή των πετρελαιοφόρων	Wikipedia "Δεξαμενόπλοιο"
9	3. 8	Κατηγορίες Πλατφορμών	Wikipedia "Oil platform"
10	3. 9	Φωτογραφία πάνω από το ναυάγιο του ABT Summer όπου και χρησιμοποιήθηκαν φράγματα	Anne Casselman (2009) 10 Biggest Oil Spills in History, No, the 1989 Exxon-Valdez spill doesn't make the list, Popular Mechanics
11	3. 10	Μηχανικός Πετρελαιοσυλλάκτης skimmer	Wikipedia "Skimmer"
12	3. 11	Χειρωνακτικός καθαρισμός ακτής που έχει πληγεί από πετρελαιοκηλίδα	Wikipedia «Πετρελαιοκηλίδα»
13	4. 1	Το παράθυρο εργασίας του ADIOS (μοντέλο oil weathering). Αριστερά τα δεδομένα του σεναρίου της κηλίδας και στα δεξιά διάγραμμα που δείχνει τι απέγινε το πετρέλαιο μετά από συγκεκριμένο χρόνο.	-
14	4. 2	Το παράθυρο εργασίας του GNOME (ντετερμινιστικό μοντέλο). Στα αριστερά τα δεδομένα του σεναρίου, στα δεξιά η πρόβλεψη της τροχιάς της κηλίδας	-
15	4. 3	Πρόγραμμα Τριών Διαστάσεων, JAG3D Model	iTac (2008), Technical Paper "Use of Models in Oil Spill Response"

16	4.4	Saronicos Gulf surface currents for (a) N wind – 4 bf, (b) S wind – 3 bf	Otay et. al, (2013) RISK ASSESSMENT OF OIL SPILL ACCIDENTS
17	5.1	Αρχικό παράθυρο εργασίας προγράμματος MEDSLIK	-
18	5.2	Πεδίο εισαγωγής δεδομένων πετρελαιοκηλίδας MEDSLIK	-
19	5.3	Πεδίο εισαγωγής διεύθυνσης, έντασης και διάρκειας ανέμου MEDSLIK	-
20	5.4	Μοντέλο προσκόλλησης πετρελαίου στην ακτή MEDSLIK	-
21	5.5	Μοντέλο γαλακτωματοποίησης MEDSLIK	-
22	5.6	Μοντέλο εξάπλωσης του MEDSLIK	-
23	5.7	Γραφική απεικόνιση του πετρελαίου μετά από ατύχημα MEDSLIK	-
24	5.8	Διαγράμματα παραμέτρων συναρτήσεϊ του χρόνου MEDSLIK	-
25	6.1	Αρχικό παράθυρο εργασίας προγράμματος GNOME στη λειτουργία Diagnostic Mode	-
26	6.2	Πεδίο εισαγωγής δεδομένων πετρελαιοκηλίδας GNOME	-
27	6.3	Πεδίο εισαγωγής διεύθυνσης, έντασης και διάρκειας ανέμου GNOME	-
28	6.4	Αποτέλεσμα του GNOME	-
29	7.1	Interface από τον κώδικα του FLOW 3DL	-
30	7.2	Υδροδυναμικό Σαρωνικού κόλπου υπολογισμένο από το FLOW 3D-L	-
31	7.3	Interface του προγράμματος Surfer όπου φαίνονται και οπτικοποιημένα αποτελέσματα του FLOW 3DL	-
32	8.1	Χάρτης Σαρωνικού και συχνότητα ατυχημάτων(με μπλε οι λιγότερο πιθανές, με καφέ οι περισσότερο πιθανές)	Otay et. al, (2013) RISK ASSESSMENT OF OIL SPILL ACCIDENTS
33	8.2	Τα 4 σημεία σημειωμένα πάνω στο χάρτη	-
34	8.3	Ενδεικτική Γεωγραφική Κατανομή της ρύπανσης στο Σαρωνικό Κόλπο	-
35	9.1	Η διαβάθμιση της συγκέντρωσης του πετρελαίου	-
36	9.2	Ποσοστό εξάτμισης, στην επιφάνεια, στην ακτή	-
37	9.3	Θέση Διαρροής: 2, Άνεμος:2 bf N Αριστερά: T/2 Κέντρο:T Δεξιά: Πετρέλαιο στην ακτή	-
38	9.4	Θέση Διαρροής: 2, Άνεμος:6+ bf E, Αριστερά: T/8 Δεξιά: T/4, Στα αριστερά η πετρελαιοκηλίδα τείνει να διασπαστεί	-
39	9.5	Θέση Διαρροής: 4, Άνεμος:1 bf NE, Παράδειγμα εξάπλωσης της πετρελαιοκηλίδας στο GNOME μετά από πολύ χρόνο	-

40	9. 6	Σημείο Διαρροής 1, Ένταση Ανέμου 2 bf N, Παράδειγμα όπου φαίνεται η κωνοειδής εξάπλωση του πετρελαίου	-
41	9. 7	Σημείο Διαρροής 2, Ένταση Ανέμου 3 bf, SE, Παράδειγμα όπου φαίνεται η κωνοειδής εξάπλωση του πετρελαίου	-
42	9. 8	Αποτελέσματα από το FLOW 3DL και η Κλίμακα Διαβάθμισης της Συγκέντρωσης του Πετρελαίου ως πηλίκιο της Μάζας του παραμένουτος πετρελαίου προς τη Μάζα της αρχικής κηλίδας	-
43	9. 9	Χάρτης Σαρωνικού που χρησιμοποιήθηκε στο FLOW 3DL	-
44	9. 10	Αριστερά: Χαμηλή συγκέντρωση Δεξιά: Υψηλή συγκέντρωση	-
45	9. 11	Οι αντίστοιχες μετρήσεις με Εικόνα 9.11 από το MEDSLIK	-
46	9. 12	Σενάριο διαρροής στο FLOW 3DL από το SURFER και στα δεξιά η κλίμακα	-
47	9. 13	Σημείο διαρροής 2 Σενάριο Νηνεμίας από αριστερά προς δεξιά MEDSLIK, GNOME και FLOW 3D-L	-
48	9. 14	Από αριστερά προς δεξιά FLOW 3DL, GNOME και MEDSLIK	-
49	9. 15	Από αριστερά προς δεξιά FLOW 3DL, GNOME και MEDSLIK	-
50	9. 16	Από αριστερά προς δεξιά FLOW 3DL, GNOME και MEDSLIK	-



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**Σύγκριση των Προγραμμάτων GNOME, MEDSLIK και FLOW 3D-L Για
τον Υπολογισμό Τροχιάς Πετρελαιοκηλίδας**

1.Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Για την προστασία των ακτών και των υδάτων εξαιτίας της ρύπανσης που μπορεί να προκληθεί από πετρέλαιο είναι απαραίτητη η κατάστρωση ενός σχεδίου πρόληψης ατυχημάτων διαρροής και ενός χάρτη με ζώνες επικινδυνότητας σε περιοχές που κινδυνεύουν από ατυχήματα. Για να γίνουν τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι είναι απαραίτητη η γνώση της συμπεριφοράς του πετρελαίου εντός των υδάτων ή μπορεί να προβλεφθεί με μεγάλη ακρίβεια. Για την όσο το δυνατόν ευρύτερη προστασία των ακτών και των υδάτων έχουν αναπτυχθεί μοντέλα πρόβλεψης – εκτίμησης της συμπεριφοράς του πετρελαίου εντός των θαλάσσιων υδάτων ύστερα από ένα ατύχημα διαρροής πετρελαίου. Στον όρο συμπεριφορά συμπεριλαμβάνονται και τα δύο επίπεδα τα οποία επηρεάζουν τις συνέπειες ενός ατυχήματος πετρελαίου, δηλαδή συμπεριλαμβάνεται τόσο η μετακίνηση – τροχιά του πετρελαίου όσο και η σύσταση του πετρελαίου όσον αφορά την αποσύνθεσή του λόγω των διάφορων χημικών, φυσικών και μηχανικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε ένα σενάριο διαρροής πετρελαίου εντός θαλάσσιων υδάτων σε συγκεκριμένο χρόνο. Οι προβλέψεις αυτές γίνονται μέσω μεθόδων που αναπτύχθηκαν από την επεξεργασία και μελέτη μεγάλου αριθμού πειραμάτων, ύστερα από χρόνια παρατηρήσεων από βάσεις δεδομένων προγενέστερων ατυχημάτων κι ύστερα από εκτεταμένες αριθμητικές προσομοιώσεις που πέρασαν από αλληπάλληλες διαδικασίες βελτιστοποίησης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια προσπάθεια να συγκριθούν στο μέτρο του δυνατού (λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων τους) τρία προγράμματα πρόβλεψης της συμπεριφοράς της πετρελαιοκηλίδας και συγκεκριμένα το MEDSLIK (R.W.Lardner B.A., Ph.D., Sc.D. (Cambridge) (2004,2011) MEDSLIK User Manual), το GNOME (NOAA, Office of Response and Restoration (2012) “General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) Technical Documentation”) και το FLOW 3D-L(Stamou, A.I., Memos, C.D., Kapetanaki M.E. (2007) Modeling water renewal in a coastal embayment. Proceedings of ICE - Maritime Engineering, 160(MA3), pp. 93-104). Το βασικό αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η σύγκριση των τριών προγραμμάτων με πραγματικές παραμέτρους, σύμφωνες με τα δεδομένα του Σαρωνικού (η ποσότητα διαρροής, ο τύπος του πετρελαίου και τα ανεμολογικά στοιχεία ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα), σε τέσσερα σημεία του

Σαρωνικού με τη μεγαλύτερη επικινδυνότητα (Stamou et. al, (2013) RISK ASSESSMENT OF OIL SPILL ACCIDENTS).

Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για εντάσεις ανέμου 1 – 6+ bf για τις οχτώ διαφορετικές διευθύνσεις πνοής του ανέμου (48 μετρήσεις), σε κάθε ένα από τα προγράμματα για κάθε ένα από τα τέσσερα σημεία που προέκυψαν από το προαναφερθέν μοντέλο ανάλυσης επικινδυνότητας. Ένα σύνολο 576 τρεξιμάτων που καλύπτει το πλήρες φάσμα των πιθανών σεναρίων ατυχημάτων στον Σαρωνικό Κόλπο.

1.2 Πρωτότυπα Σημεία

Η παρούσα έρευνα παρουσιάζει σημεία πρωτοτυπίας, καθώς:

- 1) Συνδυάζει και συγκρίνει τις προβλέψεις από τρία διαφορετικά και διαφορετικού τύπου μοντέλα εκτίμησης της συμπεριφοράς της πετρελαιοκηλίδας
- 2) Εφαρμόζει τη σύγκριση των προγραμμάτων με σενάρια όπου τα σημεία διαρροής είναι τα τέσσερα σημεία του Σαρωνικού Κόλπου με την μεγαλύτερη επικινδυνότητα (Stamou et. al, (2013) RISK ASSESSMENT OF OIL SPILL ACCIDENTS) με πραγματικές παραμέτρους.

1.3 Διάρθρωση της Εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει συμπεριλαμβανομένης της παρούσας Εισαγωγής (Κεφάλαιο 1) 10 κεφάλαια και ένα Παράρτημα.

Στο Κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση και παρουσίαση των ιδιοτήτων του πετρελαίου και των χημικών διεργασιών που υφίσταται σαν ρυπαντής σε θαλάσσιο αποδέκτη.

Στο Κεφάλαιο 3 εισάγεται η έννοια της Πετρελαιοκηλίδας (Καθ. Τριανταφύλλου Γ. (2004), Πετρελαιοκηλίδες, περιβάλλον και ανάπτυξη). Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα αίτια και οι επιπτώσεις των πετρελαιοκηλίδων, ενώ γίνεται συνοπτική αναφορά στα μεγαλύτερα ατυχήματα διαρροής στον κόσμο (Anne Casselman (2009) 10 Biggest Oil Spills in History, No, the 1989 Exxon-Valdez spill doesn't make the list, Popular Mechanics) και στην Ελλάδα (Greenpeace (2006) “ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ

ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΕΙΔΗ”). Ακόμη γίνεται αναφορά και στο νόμο (Κλαδή Μαριάνθη (2005), Ευρωπαϊκή Πολιτική Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος) που διέπει τα ατυχήματα διαρροής στη θάλασσα. Παρουσιάζονται, τέλος, οι βασικοί τρόποι αντιμετώπισης μιας πετρελαιοκηλίδας ενώ γίνεται αναφορά και στο κόστος αντιμετώπισης των πετρελαιοκηλίδων (Καθ. Τριανταφύλλου Γ. (2004), Πετρελαιοκηλίδες, περιβάλλον και ανάπτυξη).

Στο Κεφάλαιο 4 εισάγεται η έννοια της μοντελοποίησης των πετρελαιοκηλίδων (iTac (2008), Technical Paper “Use of Models in Oil Spill Response”) και παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των μοντέλων, περιγράφοντας τα είδη, τις κατηγορίες και τα χαρακτηριστικά τους.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται το μοντέλο MEDSLIK (R.W.Lardner B.A., Ph.D., Sc.D. (Cambridge) (2004,2011) MEDSLIK User Manual οι εξισώσεις που διέπουν τους υπολογισμούς του, οι βασικές αρχές λειτουργίας του και τα χαρακτηριστικά του.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται το μοντέλο GNOME (NOAA, Office of Response and Restoration (2012) “General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) Technical Documentation”), οι εξισώσεις που διέπουν τους υπολογισμούς του, οι βασικές αρχές λειτουργίας του και τα χαρακτηριστικά του.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζεται το μοντέλο FLOW 3D-L, οι εξισώσεις που διέπουν τους υπολογισμούς του, οι βασικές αρχές λειτουργίας του και τα χαρακτηριστικά του.

Στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται η μεθοδολογία για την κατάστρωση των σεναρίων (Stamou et al, Otay N., Tsoukala V., Copty N., Karakoc F., Christodoulou G., Papadopoulos A., Papadonikolaki G., Altan Y. (2013), Risk Assessment of oil spill), όσον αφορά τα ανεμολογικά στοιχεία, τις ιδιότητες του πετρελαίου και τις θέσεις διαρροής.

Στο Κεφάλαιο 9 σχολιάζονται τα οπτικοποιημένα αποτελέσματα από τα τρία προγράμματα για τα τέσσερα σημεία και για όλα τα σενάρια διαρροής και γίνεται σύγκριση των προγραμμάτων.

Στο Κεφάλαιο 10 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

2. Το πετρέλαιο

2.1 Εισαγωγή

Το πετρέλαιο (petroleum, από το ελληνικό πέτρα και έλαιο, «λάδι της πέτρας») είναι ένα παχύρρευστο, μαύρο ή βαθύ καφετί ή πρασινωπό υγρό πέτρωμα που αποτελεί σήμερα τη σπουδαιότερη φυσική πηγή ενέργειας. Σύμφωνα με την Διοίκηση Πληροφοριών για την Ενέργεια των Ηνωμένων Πολιτειών ο κόσμος καταναλώνει 87,5 εκατομμύρια βαρέλια τη μέρα (US Energy Information Administration, 2011).

2.2 Σύσταση

Το αργό (ακατέργαστο) πετρέλαιο είναι υγρό πέτρωμα, μίγμα υδρογονανθράκων, δηλαδή ουσιών που περιέχουν άνθρακα και υδρογόνο, κατά ένα μεγάλο μέρος της σειράς των αλκανίων, που όμως περιέχει και αρκετούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες, καθώς και άλλες οργανικές ενώσεις. Το πετρέλαιο εντοπίζεται μέσα σε κοιλάτητες διαφόρων πετρωμάτων στα ανώτερα στρώματα μερικών περιοχών τού φλοιού της Γης (<http://en.wikipedia.org/wiki/Petroleum>).

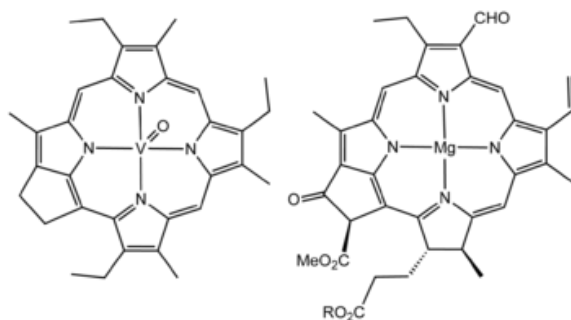
Το πετρέλαιο σχηματίστηκε από οργανικά υπολείμματα νεκρών οργανισμών, σε διάφορες χρονικές περιόδους της ιστορίας της γης, που διατηρήθηκαν με μορφή απολιθωμάτων, σε μέρη όπου η απουσία οξυγόνου εμπόδισε την αποικοδόμησή τους.

Λόγω της διαφορετικής του προέλευσης, η ποιότητα και η σύσταση του πετρελαίου διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Διακόσιες ως τριακόσιες διαφορετικές ενώσεις περιέχονται στο αργό πετρέλαιο. Το 50-98% αποτελείται από υδρογονάνθρακες, οι κυριότερες κατηγορίες των οποίων είναι:

- 1) Αλκάνια (παραφίνες): Οι ενώσεις με 5-7 άτομα άνθρακα είναι υγρές, ενώ εκείνες με μεγαλύτερο αριθμό ατόμων βρίσκονται σε στερεή κατάσταση. Τα αλκάνια είναι σχετικά μη τοξικές ενώσεις και βιοαποικοδομούνται από διάφορους μικροοργανισμούς.

- 2) Κυκλοαλκάνια: Αυτά με 5-6 άτομα άνθρακα αποτελούν το 30-60% του πετρελαίου. Εκτός αυτών, περιέχονται δικυκλικά και πολυκυκλικά ναφθένια. Οι ενώσεις αυτές είναι πολύ ανθεκτικές στη μικροβιολογική αποικοδόμηση.
- 3) Αρωματικές ενώσεις: Είναι πτητικές ενώσεις και αποτελούν το 2-4% του πετρελαίου. Υπάρχουν μερικοί μικροοργανισμοί που επιλεκτικά αποικοδομούν τις ενώσεις αυτές.
- 4) Άλλες ενώσεις: Εκτός των υδρογονανθράκων υπάρχουν κι άλλες ενώσεις στο πετρέλαιο. Οι πιο σημαντικές είναι οι θειούχες.

Επίσης, υπάρχουν λιπαρά οξέα, ενώσεις του αζώτου, βαναδίου και νικελίου. Ένας αριθμός από τις ενώσεις αυτές αποικοδομείται από μικροοργανισμούς, ενώ για τις υπόλοιπες οι βιοχημικές διεργασίες μικροβιολογικής αποικοδόμησης είναι πολύπλοκες.



Εικόνα 1. Η δομή του πετρελαίου (Πηγή: Wikipedia "petroleum")

Το ορυκτό πετρέλαιο, ή "αργό πετρέλαιο" όπως λέγεται, μπορεί να ποικίλει στην εμφάνιση, τη σύνθεση, και την καθαρότητα. Λαμβάνοντας υπόψη τη σύνθεση των πετρελαίων, αυτά κατατάσσονται σε τρεις βασικές κατηγορίες (<http://en.wikipedia.org/wiki/Petroleum>):

- 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. Και τα μεν πρώτα της σειράς αυτής δηλαδή μεθάνιο, αιθάνιο, προπάνιο και 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, και

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

2.3 Προέλευση

Για την ερμηνεία της δημιουργίας του πετρελαίου, υπάρχουν πολλές και μάλιστα αλληλοσυγκρουόμενες θεωρίες (<http://el.wikipedia.org/wiki/Πετρέλαιο>). Παλαιότερα παραδέχονταν οι χημικοί και γεωλόγοι ερευνητές του αντικειμένου ότι το πετρέλαιο σχηματίστηκε από ανθρακομεταλλικές ενώσεις, τα λεγόμενα καρβίδια, όπως ακριβώς από το ανθρακαργίλιο σχηματίζεται το μεθάνιο, από το ανθρακασβέστιο, το ακετυλένιο, και από άλλα καρβίδια άλλοι κατώτεροι υδρογονάνθρακες όπως αυτοί που απαντώνται στο πετρέλαιο. Αν και η θεωρία αυτή ανάγει στη δημιουργία του πετρελαίου από ανόργανες πρώτες ύλες, είναι πράγματι ευφυής, παρά ταύτα σήμερα έχει τελείως εγκαταλειφθεί. Δύο από τους ισχυρότερους λόγους που αποτελούν τα επίμαχα και ισχυρά επιχειρήματα υπέρ της ακολουθούμενης σύγχρονης θεωρίας είναι η παρουσία αζωτούχων ενώσεων αφενός, και η εμφάνιση οπτικής στροφικής ικανότητας ορισμένων πετρελαίων αφετέρου. Η δεύτερη αυτή θεωρία, που είναι και γενικότερα παραδεκτή ανάγει την δημιουργία του πετρελαίου σε φυτικές και ζωικές πρώτες ύλες.

Επιστήμονες αργότερα ξεκίνησαν να δέχονται πως το πετρέλαιο είναι προϊόν αποσύνθεσης ζωικών και φυτικών οργανισμών που εγκλείστηκαν μέσα στα πετρώματα σε μεγάλο βάθος στη Γη. Οπαδοί αυτού δέχονται επίσης πως οι εν λόγω οργανισμοί ήταν κυρίως θαλάσσιοι, ανάλογοι με εκείνους που αποτελούν το πλαγκτόν. Τα λείψανα αυτών των οργανισμών παρασύρθηκαν από θαλάσσια ρεύματα και ανέμους και συγκεντρώθηκαν κατά μεγάλες ποσότητες στους πυθμένες θαλασσίων λεκανών (κόλπων, λιμνοθαλασσών κ.τ.λ.). Οι λεκάνες αυτές στη συνέχεια από διάφορες αναστατώσεις της επιφάνειας της Γης αποκλείστηκαν και καταχώθηκαν. Έτσι, εκ του αποκλεισμένου αυτού οργανικού υλικού προέκυψε με αποσύνθεση, υπό την επίδραση αναεροβίων βακτηρίων, το πετρέλαιο.

Η θεωρία αυτή βασίστηκε επίσης στο γεγονός ότι στα διάφορα πετρέλαια βρέθηκαν επίσης ίχνη χλωροφύλλης και αιμίνης. Η ύπαρξη των ενώσεων αυτών αποδεικνύει αφενός τη φυτική και ζωική προέλευση, αφετέρου ότι η δημιουργία αυτή έγινε κάτω από ήπια βιολογική δράση, δεδομένου ότι οι ενώσεις αυτές αποσυντίθενται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 250 βαθμών. Η θεωρία αυτή ενισχύεται ακόμη περισσότερο και από το

γεγονός ότι τα πετρέλαια σήμερα εντοπίζονται πάντα σε τυπικά ιζηματογενή πετρώματα, ενώ στη βάση των πετρελαϊκών κοιτασμάτων ανευρίσκεται, σχεδόν πάντα, αλμυρό νερό.

Πίνακας 2. 1 Στοιχεία και ποσοστό στο Πετρέλαιο (Πηγή: Wikipedia “petroleum”)

Στοιχείο	Ποσοστό
Άνθρακας	83 to 87%
Υδρογόνο	10 to 14%
Άζωτο	0.1 to 2%
Οξυγόνο	0.05 to 1.5%
Θείο	0.05 to 6.0%
Μέταλλα	< 0.1%

2.4 Φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες

Το πετρέλαιο και τα προϊόντα διύλισής του παρουσιάζουν μια μεγάλη ποικιλία στη χημική τους σύσταση, γεγονός καταλυτικό για την τύχη τους στο θαλάσσιο περιβάλλον (<http://el.wikipedia.org/wiki/Πετρέλαιο>). Ο αριθμός των ατόμων άνθρακα ανά μόριο στα διάφορα κλάσματα είναι αποφασιστικής σημασίας για τη φυσική και χημική μεταφορά του στους ωκεανούς. Επίσης, περιβαλλοντικοί παράγοντες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της τύχης του πετρελαίου στη θάλασσα.

Το πετρέλαιο με την είσοδό του στη θάλασσα μεταφέρεται με τους ανέμους, τα θαλάσσια ρεύματα, τα κύματα και την παλίρροια. Παράλληλα, ένα πλήθος φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών λαμβάνει χώρα με στενή αλληλεπίδραση. Οι διεργασίες αυτές είναι:

- 1) Εξάπλωση / μεταφορά (spreading / transport)
- 2) Εξάτμιση (evaporation)
- 3) Διασπορά / Διάχυση (dispersion / diffusion)
- 4) Γαλακτωματοποίηση (emulsification)
- 5) Διάλυση (dissolution)
- 6) Οξείδωση (oxidation)
- 7) Καθίζηση / Καταβύθιση (sedimentation / sinking)

8) Βιοαποικοδόμηση (biodegradation)

2.5 Συμπεριφορά στο θαλάσσιο περιβάλλον

2.5.1 Εξάπλωση

Μόλις γίνει διαρροή πετρελαίου στη θάλασσα αρχίζει η οριζόντια εξάπλωσή του υπό την επίδραση των δυνάμεων βαρύτητας, ιξώδους και επιφανειακής τάσης. Αρχικά συμβαίνει εξάπλωση του πετρελαίου ως μεμονωμένης κηλίδας λόγω κυρίως των δυνάμεων βαρύτητας αλλά και του ιξώδους. Μόλις 10 λεπτά μετά τη διαρροή, 1 τόνος πετρελαίου μπορεί να έχει εξαπλωθεί σε ακτίνα 50m σχηματίζοντας στρώμα πάχους 10mm. Το πάχος της κηλίδας μειώνεται με την εξάπλωση (σε επίπεδο δεκάτων του χιλιοστού ή και μικρομέτρων) και μπορεί να καλύψει μέχρι και έκταση 12 km². Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, η επιφανειακή τάση διαδέχεται τη βαρύτητα σαν κύρια δύναμη εξάπλωσης.

Λίγες ώρες μετά τη διαρροή του πετρελαίου στη θάλασσα, η πετρελαιοκηλίδα αρχίζει να διαχωρίζεται σχηματίζοντας μικρότερες κηλίδες με πάχος της τάξης των 0,1 mm. Τα μικρότερα αυτά τμήματα πετρελαιοκηλίδων κινούνται επιπλέον λόγω των ανέμων, των κυμάτων και της τύρβης ακολουθώντας την διεύθυνση του ανέμου. Ο ρυθμός με τον οποίο εξαπλώνεται η κηλίδα εξαρτάται επίσης από συνθήκες όπως η θερμοκρασία, τα θαλάσσια ρεύματα, η παλίρροια και η ταχύτητα του ανέμου. Όσο πιο έντονες είναι οι συνθήκες, τόσο πιο γρήγορα εξαπλώνεται και κομματιάζεται η πετρελαιοκηλίδα. Η ταχύτητα μετακίνησης μιας πετρελαιοκηλίδας έχει μεγάλη σημασία γιατί καθορίζει τη δυνατότητα ή μη έγκαιρης αντιμετώπισής της (Κλωνάρης Γιώργος, Διπλωματική Εργασία ΑΠΘ «Διερεύνηση Τροχιάς Πετρελαιοκηλίδας στο Θερμαϊκό Κόλπο», 2009).

2.5.2 Εξάτμιση

Παράλληλα με την εξάπλωση της πετρελαιοκηλίδας, τα πλέον πτητικά και ελαφρά κλάσματα (C15) εξατμίζονται, ενώ τα βαριά (C>25) σχηματίζουν πηκτώδη σφαιρίδια (Tar balls) που παραμένουν στην επιφάνεια και τελικά καταλήγουν σε κάποια ακτή ή αποικοδομούνται με την πάροδο του χρόνου με μικροοργανισμούς. Ο ρυθμός εξάτμισης εξαρτάται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία, ο τύπος του πετρελαίου, η ταχύτητα του ανέμου και η κατάσταση της θάλασσας. Συγκεκριμένα, μεγάλες ταχύτητες ανέμου και υψηλές θερμοκρασίες αυξάνουν το ρυθμό εξάτμισης. Όταν η θάλασσα είναι ταραγμένη, η

ταχύτητα εξάτμισης αυξάνεται γιατί διευκολύνεται η απώλεια πετρελαίου από τις κορυφές των κυμάτων, υπό μορφή σταγονιδίων (ταυτόχρονα βέβαια ενισχύεται η γαλακτωματοποίηση). Οι πετρελαιοκηλίδες από προϊόντα διύλισης (βενζίνη, κηροζίνη, ντίζελ) χάνουν λόγω εξάτμισης μέχρι και το 40% του όγκου τους στις πρώτες 48 ώρες δημιουργώντας κίνδυνο πυρκαγιάς σε κλειστές περιοχές, όπως τα λιμάνια. Αντίθετα, πετρελαιοκηλίδες από βαρύ πετρέλαιο που περιέχουν λίγες πτητικές ενώσεις, θα παρουσιάσουν λίγη εξάτμιση ακόμη και μετά από αρκετές μέρες. Τέλος, η εξάτμιση μπορεί να αυξηθεί καθώς εξαπλώνεται η κηλίδα εξαιτίας της αυξανόμενης επιφάνειάς της.

2.5.3 Διασπορά

Τα κύματα και η τύρβη στην επιφάνεια της θάλασσας μπορούν να προκαλέσουν τη διάσπαση ολόκληρης ή τμήματος της πετρελαιοκηλίδας σε σφαιρίδια διαφόρων μεγεθών, τα οποία αναμιγνύονται με τα ανώτερα στρώματα της στήλης νερού. Μερικά από τα μικρότερα αυτά σταγονίδια παραμένουν αιωρούμενα στο νερό, ενώ τα μεγαλύτερα τείνουν να επανέλθουν στην επιφάνεια, όπου είτε συγχωνεύονται με άλλα σταγονίδια σχηματίζοντας νέα κηλίδα, είτε εξαπλώνονται σχηματίζοντας ένα πολύ λεπτό υμένα («φιλμ») που στη διεθνή ορολογία ονομάζεται «sheen». Το πετρέλαιο με τη μορφή μικρότερων σφαιριδίων που παραμένουν αιωρούμενα στο νερό έχει πλέον μεγαλύτερη επιφάνεια από ότι είχε πριν συμβεί η διασπορά. Το γεγονός αυτό ευνοεί άλλες φυσικές διαδικασίες, όπως η διάλυση, η βιοαποικοδόμηση και η καθίζηση. Η ταχύτητα διασποράς εξαρτάται από τη φύση του πετρελαίου και την κατάσταση της θάλασσας. Είναι μεγαλύτερη για ελαφρύ πετρέλαιο, χαμηλού ιξώδους και για ταραγμένη θάλασσα. Οι παράγοντες αυτοί οδήγησαν στην πλήρη διασπορά της πετρελαιοκηλίδας του δεξαμενόπλοιου Braer (Νησιά Σέτλαντ Σκωτία, Ιανουάριος 1993).

2.5.4 Γαλακτωματοποίηση

Γαλάκτωμα σχηματίζεται όταν συνδυάζονται δύο υγρά με αποτέλεσμα το ένα να ενσωματώνεται στο άλλο. Όταν η επιφάνεια του θαλασσινού νερού αναδεύεται με την επίδραση του ανέμου και κυρίως όταν σχηματίζεται αφρός λόγω της τύρβης, το νερό προσροφάται από τη μάζα του πετρελαίου. Η γαλακτωματοποίηση του πετρελαίου στη θάλασσα εξαρτάται από τη σύσταση του πετρελαίου και από το καθεστώς στροβιλισμών στη στήλη του νερού. Το γαλάκτωμα που προκύπτει είναι συνήθως μεγάλου ιξώδους και μεγαλύτερης ανθεκτικότητας από το αρχικό πετρέλαιο και στη διεθνή ορολογία αναφέρεται

ως «chocolate mousse» λόγω της όψης του. Ο σχηματισμός του γαλακτώματος αυτού προκαλεί αύξηση του όγκου του ρυπαντή από 3 ως 4 φορές. Το γεγονός αυτό επιβραδύνει και καθυστερεί άλλες διεργασίες που θα επέτρεπαν διάλυση του πετρελαίου. Τα σταθερά γαλακτώματα νερού σε πετρέλαιο (water-in-oil emulsions) περιέχουν νερό σε ποσοστό 30-80% και σχηματίζονται συνήθως μετά από ισχυρές θύελλες, σε περιοχές κηλίδων πετρελαίου βαρέως τύπου με χαμηλό ποσοστό πτητικών συστατικών. Τα γαλακτώματα αυτού του τύπου μπορεί να παραμείνουν στην επιφάνεια για μήνες ή ακόμη και χρόνια. Η σταθερότητά τους συνήθως αυξάνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας.

Εκτός από τα γαλακτώματα νερού σε πετρέλαιο, σχηματίζονται επίσης γαλακτώματα πετρελαίου σε νερό, κυρίως όταν προστίθενται χημικές γαλακτωματοποιητικές ουσίες. Τα ασταθή γαλακτώματα αυτά (oil-in-water emulsions) αποτελούνται από σωματίδια διαμέτρου από 5 μm ως μερικά χιλιοστά και μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις στην επιφάνεια της θάλασσας, με τα κύματα και την ανάδευση και ενδεχόμενα διαλύονται στην υδάτινη φάση, προσροφώνται στα αιωρούμενα σωματίδια και εναποτίθενται στα ιζήματα ή βιοαποικοδομούνται (Κλωνάρης Γιώργος, Διπλωματική Εργασία, 2010).

2.5.5 Διάλυση

Στο πετρέλαιο υπάρχουν συστατικά τα οποία είναι διαλυτά στο νερό. Η διαλυτότητα του πετρελαίου εξαρτάται από τη σύσταση και την κατάσταση του πετρελαίου. Συγκεκριμένα, συμβαίνει ταχύτερα όταν έχει επέλθει η πλήρης διασπορά του στη στήλη νερού. Το φαινόμενο της διάλυσης για μίγμα διαφόρων ενώσεων γίνεται ιδιαίτερα πολύπλοκο. Μέχρι σήμερα δεν έχει διευκρινιστεί πλήρως, αν πρόκειται για καθαρή διάλυση και αν ο σχηματισμός κολλοειδών μυκηλίων ή η προσρόφηση σε μικρά σωματίδια διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο.

Η διάλυση είναι μία διεργασία που αφορά κυρίως τους ελαφρούς υδρογονάνθρακες και ιδίως τους αρωματικούς. Βέβαια, αυτές είναι και οι ενώσεις που εξατμίζονται πρώτες με μία διεργασία 10-100 φορές γρηγορότερη από τη διάλυση. Τα αποτελέσματα της διάλυσης είναι τελείως διαφορετικά από εκείνα της εξάτμισης, επειδή οι υδρογονάνθρακες πετρελαίου που εισέρχονται στην υδάτινη φάση είναι δυνατόν να προσληφθούν από τους θαλάσσιους οργανισμούς, σε αντίθεση με εκείνους που εξατμίζονται και έτσι απομακρύνονται από το θαλάσσιο περιβάλλον. Επειδή η συγκέντρωση των αρωματικών υδρογονανθράκων στο πετρέλαιο είναι μικρή, η διάλυση είναι από τις λιγότερο σημαντικές

διεργασίες. Η διαλυτότητα εξαρτάται επίσης από την αλατότητα και τη θερμοκρασία του νερού. Συγκεκριμένα, η διαλυτότητα είναι μεγαλύτερη σε νερό μεγαλύτερης θερμοκρασίας, ενώ όσο αλμυρότερη είναι η θάλασσα, τόσο ασθενέστερη είναι η διάλυση. Τέλος, αντίθετα με τα ελαφρά συστατικά του πετρελαίου, τα βαριά συστατικά είναι πρακτικά αδιάλυτα στο νερό.

2.5.6 Οξείδωση

Οι υδρογονάνθρακες του πετρελαίου αντιδρούν με το οξυγόνο και σχηματίζουν είτε ευδιάλυτες ενώσεις, είτε ανθεκτικά πηκτώδη κατάλοιπα. Η διεργασία αυτή, που ονομάζεται φωτοχημική οξείδωση, ενισχύεται με την παρουσία του ηλιακού φωτός και εξαρτάται από τη χημική σύσταση του πετρελαίου και τη θερμοκρασία. Ένα σύνολο θειούχων ενώσεων παρεμποδίζει τη διαδικασία, ενώ μερικά μέταλλα δρουν σαν καταλύτες. Παρότι η οξείδωση συνεχίζει καθ' όλη τη διάρκεια ύπαρξης μιας πετρελαιοκηλίδας, η συνεισφορά της είναι ελάχιστη σε σχέση με τις άλλες διεργασίες.

2.5.7 Καθίζηση

Πολύ λίγα πετρελαϊκά προϊόντα έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη από αυτή του θαλασσινού νερού (περίπου 1025 kg/m^3) με αποτέλεσμα να βυθίζονται με το που διαρρέουν στη θάλασσα. Τα περισσότερα είδη πετρελαίου έχουν σχετικά μικρή πυκνότητα, με αποτέλεσμα να επιπλέουν στο νερό της θάλασσας. Ένα ποσοστό τους όμως, προσκολλάται σε αιωρούμενα στο νερό σωματίδια ή σε οργανικές ενώσεις με αποτέλεσμα να καθιζάνει. Αυτό συμβαίνει κυρίως σε μία στενή παράκτια ζώνη, όπου τα βάθη του νερού είναι μικρά και η παράκτια στερεομεταφορά έντονη. Οι εποχιακοί κύκλοι της εναπόθεσης και διάβρωσης των ιζημάτων προκαλούν διαδοχικά το θάψιμο και το ξεσκέπασμα στρωμάτων πετρελαίου.

Όταν χρησιμοποιούνται χημικά απορρυπαντικά για την καταπολέμηση της πετρελαιοκηλίδας, το πετρέλαιο διεισδύει σε μεγάλο βαθμό ανάμεσα στους κόκκους των ιζημάτων. Εισχωρώντας βαθιά στο ίζημα, παραμένει σταθερό εφόσον δεν έρχεται σε επαφή με το επιφανειακό στρώμα που περιέχει οξυγόνο και αφού η βακτηριακή αποικοδόμηση σπάνια συμβαίνει υπό αναερόβιες συνθήκες.

2.5.8 Βιοαποικοδόμηση

Το θαλασσινό νερό περιλαμβάνει τουλάχιστον 90 είδη μικροοργανισμών που είναι ικανοί να βιοαποικοδομήσουν μερικά συστατικά του πετρελαίου. Τέτοιοι μικροοργανισμοί είναι βακτήρια, μύκητες, πρωτόζωα, μονοκύτταρα άλγη και μερικά φύκη. Τέτοιοι

μικροοργανισμοί εμφανίζονται ευρέως σε όλες τις θάλασσες του κόσμου, αλλά αφθονούν κυρίως σε χρόνια μολυσμένες παράκτιες περιοχές, όπως αυτές τις οποίες διασχίζουν συστηματικά δεξαμενόπλοια ή αυτές στις οποίες απορρίπτονται ανεπεξέργαστα βιομηχανικά απόβλητα.

Ο ρυθμός και η έκταση της βιοαποικοδόμησης εξαρτώνται από ένα πλήθος παραγόντων όπως:

- 1) τα χαρακτηριστικά του πετρελαίου
- 2) τη διαθεσιμότητα οξυγόνου και την παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων
- 3) την παρουσία θρεπτικών συστατικών (κυρίως αζωτούχων και φωσφορικών ενώσεων)
- 4) την παρουσία οργανικών ενώσεων
- 5) τη θερμοκρασία

2.6 Άντληση

Η άντληση του πετρελαίου γίνεται από ειδικές πυργωτές εγκαταστάσεις, που εγκαθίστανται πάνω στις λεγόμενες πετρελαιοπηγές (<http://el.wikipedia.org/wiki/Πετρέλαιο>). Το πετρέλαιο λαμβάνεται μετά από διάτρηση του εδάφους, τη λεγόμενη γεώτρηση με τη μορφή αρτεσιανού φρέατος όπου το πετρέλαιο, σε ορισμένες περιπτώσεις, λόγω των υφιστάμενων πιέσεων, αναβλύζει υπό μορφή πίδακα ύψους πολλών μέτρων. Συνηθέστερα όμως εξάγεται με απάντληση κατόπιν προκαλούμενης πίεσης, στην αρχή, νερού επί του οποίου και επιπλέει το προς εξόρυξη πετρέλαιο.

Συνεπώς, υπάρχουν πολλές μέθοδοι αύξησης της παραγωγής πετρελαίου από τις πηγές όπως με εξακόντιση νιτρογλυκερίνης ή με εισαγωγή, υπό πίεση, υδροχλωρικού οξέος ή ακόμα μετά από διαβίβαση αερίων υπό πίεση.

Γενικά το πετρέλαιο από τις πετρελαιοπηγές φέρεται αναμεμιγμένο με αέρια, νερό καθώς και με μικρές ποσότητες άμμου. Τα μεν αέρια αποχωρίζονται μέσω ενός διαχωριστή και χρησιμοποιούνται είτε προς επανεισαγωγή εντός των πηγών (όπως αναφέρθηκε παραπάνω) είτε οδηγούνται προς το εμπόριο ως φυσικά αέρια, είτε, τέλος, διαβιβάζονται μέσα σε απορροφητικού έλαιο, το δε νερό αποχωρίζεται από το πετρέλαιο με παραμονή του σε δεξαμενές, οπότε και αποχωρίζεται και η άμμος (με καθίζηση). Αν, όμως, έχει

αναμιχθεί το πετρέλαιο με το νερό ως γαλάκτωμα, τότε είναι απαραίτητο να ακολουθήσουν ιδιαίτερες διεργασίες θέρμανσης, καθώς και χημικές ή ηλεκτρικές μέθοδοι αποχωρισμού του νερού. Το καθαρό πλέον ακατέργαστο πετρέλαιο συλλέγεται σε δοχεία ορισμένης χωρητικότητας από τα οποία και οδηγείται σε μεγάλες δεξαμενές από τις οποίες και θα ακολουθήσει η περαιτέρω κατεργασία του, δηλαδή η διύλιση του (κλασματική απόσταξη).

Ενδείξεις κοιτάσματος: Η παρουσία πετρελαϊκού κοιτάσματος στο υπέδαφος δεν αποκαλύπτει πάντοτε και επιφανειακές ενδείξεις. Συνεπώς η ανακάλυψη τέτοιων κοιτασμάτων μπορεί να γίνει τελείως συμπτωματικά. Τέτοια περίπτωση ήταν στην Αργεντινή το 1908 όταν σε γεώτρηση για πόσιμο νερό ανακαλύφθηκε πετρέλαιο.

Επιφανειακές ενδείξεις μπορεί να θεωρηθούν οι ακόλουθες:

- 1) Εκτεταμένη γυμνή όψη επιφάνειας όπου δεν παρατηρείται βλάστηση.
- 2) Ύπαρξη πηγών αλμυρών ή θειούχων θερμών υδάτων.
- 3) Παρατηρούμενα εξερχόμενα αέρια από το υπέδαφος, συχνά αποτελούν σοβαρή εξωτερική εκδήλωση πετρελαϊκού κοιτάσματος.
- 4) Επίσης τα ιλυώδη ή βορβορώδη ηφαίστεια βρίσκονται κοντά σε τέτοια κοιτάσματα, όπως στην περίπτωση του Καυκάσου.
- 5) Αναβλύσεις πετρελαίου ή πίσσας αποτελούν την κυριότερη επιφανειακή εκδήλωση ύπαρξης κοιτάσματος. Είναι, όμως, αδύνατον με μόνον αυτή την παρατήρηση να εξαχθούν συμπεράσματα επί της οικονομικής εκμετάλλευσης του τυχόν υπάρχοντος κοιτάσματος.

Το πετρέλαιο – 2^ο Κεφάλαιο

Πίνακας 2. 2 Πίνακας που παρουσιάζει διάφορες τιμές κατανάλωσης και παραγωγής για μεγάλα κράτη (πηγή: US Energy Information Administration, 2011)

Κράτος Καταναλωτής	(1000 bbl/day)	(1000 m ³ /day)	πληθυσμός σε εκατομμύρια	bbl/year ανά κάτοικο	m ³ /year ανά κάτοικο	Εθνική Παραγωγή Κατανάλωση
United States	18,835.5	2,994.6	314	21.8	3.47	0.51
China	9,790.0	1,556.5	1345	2.7	0.43	0.41
Japan	4,464.1	709.7	127	12.8	2.04	0.03
India	3,292.2	523.4	1198	1	0.16	0.26
Russia	3,145.1	500.0	140	8.1	1.29	3.35
Saudi Arabia (OPEC)	2,817.5	447.9	27	40	6.4	3.64
Brazil	2,594.2	412.4	193	4.9	0.78	0.99
Germany	2,400.1	381.6	82	10.7	1.70	0.06
Canada	2,259.1	359.2	33	24.6	3.91	1.54
South Korea	2,230.2	354.6	48	16.8	2.67	0.02
Mexico	2,132.7	339.1	109	7.1	1.13	1.39
France	1,791.5	284.8	62	10.5	1.67	0.03
Iran (OPEC)	1,694.4	269.4	74	8.3	1.32	2.54
UK	1,607.9	255.6	61	9.5	1.51	0.93
Italy	1,453.6	231.1	60	8.9	1.41	0.10

Πίνακας 2. 3 Πίνακας Κλασμάτων Πετρελαίου (Πηγή: Wikipedia “petroleum”)

Κοινά κλάσματα πετρελαίου	
Είδος	Σημείο Βρασμού °C
Liquefied petroleum gas (LPG)	-40
Butane	-12 to -1
Petrol	-1 to 110
Jet fuel	150 to 205
Kerosene	205 to 260
Fuel oil	205 to 290
Diesel fuel	260 to 315

Το πετρέλαιο – 2^ο Κεφάλαιο

Πίνακας 2. 4 Ποσότητα Εξόρυξης ανά χώρα παραγωγής (πηγή: US Energy Information Administration, 2011)

	Χώρα Παραγωγής	10 ³ bbl/d (2006)	10 ³ bbl/d (2007)	10 ³ bbl/d (2008)	10 ³ bbl/d (2009)
1	<i>Saudi Arabia</i>	10,665	10,234	10,782	9,76
2	<i>Russia</i>	9,677	9,876	9,789	9,934
3	<i>United States</i>	8,331	8,481	8,514	9,141
4	<i>Iran</i>	4,148	4,043	4,174	4,177
5	<i>China</i>	3,846	3,901	3,973	3,996
6	<i>Canada</i>	3,288	3,358	3,35	3,294
7	<i>Mexico</i>	3,707	3,501	3,185	3,001
8	<i>Un. Arab Emir.</i>	2,945	2,948	3,046	2,795
9	<i>Kuwait</i>	2,675	2,613	2,742	2,496
10	<i>Venezuela</i>	2,803	2,667	2,643	2,471
11	<i>Norway</i>	2,786	2,565	2,466	2,35
12	<i>Brazil</i>	2,166	2,279	2,401	2,577
13	<i>Iraq</i>	2,008	2,094	2,385	2,4
14	<i>Algeria</i>	2,122	2,173	2,179	2,126
15	<i>Nigeria</i>	2,443	2,352	2,169	2,211
16	<i>Angola</i>	1,435	1,769	2,014	1,948
17	<i>Libya</i>	1,809	1,845	1,875	1,789
18	<i>UK</i>	1,689	1,69	1,584	1,422
19	<i>Kazakhstan</i>	1,388	1,445	1,429	1,54
20	<i>Qatar</i>	1,141	1,136	1,207	1,213
21	<i>Indonesia</i>	1,102	1,044	1,051	1,023
22	<i>India</i>	854	881	884	877
23	<i>Azerbaijan</i>	648	850	875	1,012
24	<i>Argentina</i>	802	791	792	794
25	<i>Oman</i>	743	714	761	816
26	<i>Malaysia</i>	729	703	727	693
27	<i>Egypt</i>	667	664	631	678
28	<i>Colombia</i>	544	543	601	686
29	<i>Australia</i>	552	595	586	588
30	<i>Ecuador</i>	536	512	505	485
31	<i>Sudan</i>	380	466	480	486
32	<i>Syria</i>	449	446	426	400
33	<i>Guinea</i>	386	400	359	346
34	<i>Thailand</i>	334	349	361	339
35	<i>Vietnam</i>	362	352	314	346
36	<i>Yemen</i>	377	361	300	287
37	<i>Denmark</i>	344	314	289	262
38	<i>Gabon</i>	237	244	248	242
39	<i>South Africa</i>	204	199	195	192
40	<i>Turkmenistan</i>	No data	180	189	198
41	<i>Trinidad</i>	181	179	176	174

3. Πετρελαιοκηλίδες

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο δίνεται ο ορισμός της πετρελαιοκηλίδας (βλ. **3.2**) και αναλύονται τα αίτια δημιουργίας στη θάλασσα (βλ **3.3**), ποιες είναι οι συνηθέστερες διαρροές και από τι εγκαταστάσεις προκαλούνται (βλ. **3.6** και **3.7**), ποιες είναι οι επιπτώσεις (βλ. **3.8**), ποια τα μεγαλύτερα ατυχήματα που έχουν συμβεί στην Ελλάδα (βλ. **3.5**) και στον κόσμο (βλ. **3.4**) από πετρελαιοκηλίδα, ποιοι οι τρόποι αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδας (βλ. **3.11**) και το κόστος καθαρισμού ακτών ή θαλασσών που έχουν μολυνθεί από ατύχημα διαρροής.

3.2 Ορισμός

Πετρελαιοκηλίδες ή αλλιώς πετρελαϊκά ρυπαντικά περιστατικά είναι συμβάντα κατά τα οποία ποσότητες πετρελαίου λόγω ατυχήματος ή ανθρώπινης αμέλειας διαρρέουν και εξαπλώνονται στην επιφάνεια της θάλασσας, αποτελώντας μία από τις σοβαρότερες αιτίες ρύπανσης και καταστροφής της χλωρίδας και της πανίδας στην έκταση που καταλαμβάνουν (Καθ. Τριανταφύλλου Γ. (2004), Πετρελαιοκηλίδες, περιβάλλον και ανάπτυξη).

3.3 Αίτια δημιουργίας πετρελαιοκηλίδων

Πετρελαιοκηλίδες μπορούν να προκληθούν από ατυχήματα σε πετρελαιοφόρα δεξαμενόπλοια (βύθιση, δυναμική προσάραξη, σύγκρουση ή επαφή, έκρηξη ή πυρκαγιά), από τον παράνομο καθαρισμό των δεξαμενών καυσίμου των πλοίων στην ανοιχτή θάλασσα και την απόρριψη χρησιμοποιημένων λιπαντικών και υπολειμμάτων καύσης, από ατυχήματα σε εξέδρες υποθαλάσσιων γεωτρήσεων πετρελαίου ή λοιπές εξέδρες αποθήκευσης ή επεξεργασίας πετρελαίου και τέλος από διάφορους ρυπαντικούς παράγοντες λειτουργικής ρύπανσης και ατυχηματικής ρύπανσης (Καθ. Τριανταφύλλου Γ. (2004), Πετρελαιοκηλίδες, περιβάλλον και ανάπτυξη).

Υπολογίζεται ότι 3.320.000 τόνοι πετρελαίου απορρίπτονται ετήσια στη θάλασσα (Καθ. Τριανταφύλλου Γ. (2004), Πετρελαιοκηλίδες, περιβάλλον και ανάπτυξη). Στη Μεσόγειο θάλασσα οι εκτιμήσεις κυμαίνονται από 500.000-1.700.000 τόνους το χρόνο με πιο πιθανή

τιμή τους 650.000 τόνους. Από αυτούς 300.000 τόνοι/χρόνο προέρχονται από τα εμπορικά πλοία. Αντίστοιχα στα Ελληνικά ύδατα οι εκχύσεις πετρελαίου ξεπερνούν τους 100.000 τόνους εκ των οποίων το 80% προκαλείται από δεξαμενόπλοια. Συγκεκριμένα:

- 1) Αιγαίο: 25.000-60.000 τόνοι/χρόνο
- 2) Ιόνιο: 10.000-30.000 τόνοι/χρόνο
- 3) Λιβυκό: 35.000 τόνοι/χρόνο
- 4) Σύνολο : 70.000-125.000 τόνοι/χρόνο

Δηλαδή 10% με 20% του συνολικού πετρελαίου που εκτιμάται ότι απορρίπτεται στη Μεσόγειο (Greenpeace, 1992).

Σύμφωνα με έρευνα τις Intertanco την τελευταία 20ετία έχει σημειωθεί αξιοσημείωτη πρόοδος (βλ. 3.5) καθώς έχει παρατηρηθεί ότι :

- 1) Η λειτουργική ρύπανση έχει μειωθεί κατά 85%.
- 2) Η ατυχηματική ρύπανση έχει μειωθεί κατά 50%
- 3) Οι ανθρώπινες ζωές που έχουν χαθεί σε ατυχήματα από tanker έχουν μειωθεί τουλάχιστον κατά 50%.

3.4 Τα μεγαλύτερα ατυχήματα από Πετρελαιοκηλίδα στον κόσμο

Στη συνέχεια δίνονται στοιχεία από τα 10 μεγαλύτερα ατυχήματα που έχουν συμβεί παγκοσμίως (Anne Casselman (2009) 10 Biggest Oil Spills in History, No, the 1989 Exxon-Valdez spill doesn't make the list, Popular Mechanics).

Πίνακας 3. 1 Τα 10 μεγαλύτερα ατυχήματα που έχουν συμβεί παγκοσμίως

A/A	Πετρελαιοκηλίδα	Τοποθεσία	Ποσότητα Διαρροής (Τόνοι)	Χρονολογία
1	Πόλεμος του Κόλπου	Κουβέιτ	7.500.000 – 11.000.000	1991
2	Πετρελαιοκηλίδα BP	Κόλπος του Μεξικού	5.040.000	2010
3	Ixtoc1 Πετρελαιοπηγή	Κόλπος Καμπέτσε, Μεξικό	4.408.795	1979
4	Atlantic Empress	Τρινιδάδ και Τομπάγκο	2.771.250	1979
5	Fergana Valley	Ουζμπεκιστάν	2.771.250	1992
6	Nowruz Oil Field	Περσικός Κόλπος	2.520.000	1983
7	ABT Summer	Ανγκόλα	2.520.000	1991
8	Castillo den Bellver	Κόλπος Saldanha, Νότια Αφρική	2.470.000	1983
9	Amoco Cadiz	Μεταξύ Αγγλίας και Γαλλίας	2.160.000	1978
10	Haven	Ιταλία	1.000.000	1991

- Πόλεμος του Κόλπου, Κουβέιτ, 1991

Ποσότητα διαρροής: 7.500.000 – 11.000.000 τόνοι

Συνέβη όταν οι ιρακινές δυνάμεις αποχωρούσαν από το Κουβέιτ στο πέρας του πρώτου Πολέμου του Κόλπου, καθώς άνοιξαν τις βαλβίδες των αγωγών εξόρυξης πετρελαίου σε μια προσπάθεια να επιβραδύνουν την επίθεση των αμερικανικών στρατευμάτων. Το αποτέλεσμα ήταν η μεγαλύτερη πετρελαιοκηλίδα στην ιστορία. Περίπου 240 εκατομμύρια γαλόνια αργού πετρελαίου διέρρευσε στον Περσικό Κόλπο. Η προκύπτουσα πετρελαιοκηλίδα κάλυψε μια περιοχή περίπου 28.000 τετραγωνικών χιλιομέτρων με πάχος 5 ιντσών.



Εικόνα 3. 1 Εικόνα από τις καταστροφές και τους ανοιχτούς αγωγούς στον Πόλεμο του Κόλπου

Οι συμμαχικές δυνάμεις κατάφεραν να σφραγίσουν από μακριά μερικές από τις βαλβίδες των ανοικτών αγωγών με τη χρήση έξυπνων βομβών, αλλά οι ενέργειες πλήρους αποκατάστασης έπρεπε να περιμένουν μέχρι το πέρας του πολέμου οπότε και τοποθετήθηκαν 25 μίλια από διαχωριστικά φράγματα που περικλείουν το πετρέλαιο. Ταυτόχρονα χρησιμοποιήθηκαν 21 μηχανήματα τύπου skimmer (μηχανές που διαχωρίζουν το πετρέλαιο από το νερό) εντός του κόλπου, κυρίως για την προστασία των εγκαταστάσεων πρόσληψης νερού για αφαλάτωση και των εγκαταστάσεων ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούσαν το νερό του κόλπου. Στην επιχείρηση συμμετείχαν και οχήματα εκκένωσης που για την περίσταση δέχθηκαν κάποιες μετατροπές για να είναι πλωτά. Τέλος με όλες αυτές τις επεμβάσεις περίπου 58,8 εκατομμύρια γαλόνια πετρελαίου ανακτήθηκαν από τον κόλπο.

Η μεγαλύτερη πετρελαιοκηλίδα στην ιστορία της ανθρωπότητας εξανάγκασε σε μόνιμη βλάβη τα οικοσυστήματα του Κόλπου και προκάλεσε μόνιμη αναστολή της τοπικής αλιείας, σύμφωνα με μια έκθεση από τη Διακυβερνητική Ωκεανογραφική Επιτροπή της Unesco. Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι περίπου το μισό πετρέλαιο εξατμίστηκε, το ένα

όγδοο από αυτό ανακτήθηκε και άλλο ένα τέταρτο ξεβράστηκε, κυρίως στη Σαουδική Αραβία.

- Πετρελαιοκηλίδα BP, Κόλπος του Μεξικού, 2010

Ποσότητα διαρροής: 5.040.000 τόνοι

Στις 20 Απριλίου 2010, στην πλατφόρμα εξόρυξης πετρελαίου DeepWater Horizon στον κόλπο του Μεξικού, ιδιοκτησίας και εκμετάλλευσης της BP, συνέβη ένα δυστύχημα που αργότερα μένει στην ιστορία ως η μεγαλύτερη οικολογική καταστροφή στην ιστορία της Αμερικής. Η εξέδρα Deepwater Horizon βυθίστηκε από φουσαλίδα μεθανίου που ανέβηκε στην επιφάνεια και εξερράγη. Πυροδοτήθηκε έκρηξη εντός της πλατφόρμας, έκρηξη που κατέστρεψε και βύθισε το γεωτρύπανο εξόρυξης πετρελαίου και κόστισε και τη ζωή 11 εργατών που εργάζονταν στην πλατφόρμα. Η επέμβαση της ακτοφυλακής όσον αφορά την κατάσβεση της φωτιάς που προκάλεσε η έκρηξη ήταν άμεση, ωστόσο ανεπιτυχής. Η Πλατφόρμα DeepWater Horizon βυθίζεται εξολοκλήρου 2 μέρες μετά την έκρηξη. Μέχρι και το απόγευμα της 22^{ης} Απριλίου δεν είχε παρατηρηθεί διαρροή πετρελαίου, όταν και εμφανίστηκε πετρέλαιο στην περιοχή που ήταν εγκατεστημένη η πλατφόρμα. Η άδεια εξόρυξης για την συγκεκριμένη πλατφόρμα ανέφερε παροχή αιχμής των αγωγών εξόρυξης της BP ίση με 6,8 εκατομμυρίων γαλονιών τη μέρα, ωστόσο άργησε από αμέλεια να υπάρξει κάποια πρόληψη για πιθανή πετρελαιοκηλίδα. Η διαρροή κράτησε 3 μήνες με παροχή περίπου 160.000 γαλονιών/μέρα.



Εικόνα 3. 2 Προσπάθειες κατάσβεσης της φωτιάς στην εξέδρα DeepWater Horizon

Οι τρεις βασικές προσεγγίσεις για την απομάκρυνση του πετρελαίου από το νερό ήταν:

- 1) Το κάψιμο του πετρελαίου

- 2) Το φιλτράρισμα υπεράκτια και
- 3) Η συλλογή για μεταγενέστερη επεξεργασία

Στις 28 Απριλίου, η αμερικανική ακτοφυλακή ανακοίνωσε τα σχέδιά της να συλλέξει από τον Κόλπο και να κάψει μέχρι και 1.000 βαρέλια (160 m³) του πετρελαίου κάθε μέρα. Στόχος ήταν να δοκιμαστεί πόσο περιβαλλοντικά επιζήμια μπορεί να ήταν μια μικρή, ελεγχόμενη καύση των 100 βαρελιών ανά μέρα. Η καύση θα γινόταν εντός της θάλασσας σε πετρέλαιο το οποίο επερικλείετο από ειδικά φράγματα. Γρήγορα εγκαταλείφθηκε η προσπάθεια καθώς δεν θα μπορούσε να προχωρήσει σε ένα ανοικτό ωκεανό εξαιτίας των κακών συνθηκών.

Η BP ανέφερε ότι περισσότερα από 215.000 βαρέλια του μίγματος πετρελαίου-νερού είχαν ανακτηθεί μέχρι τις 25 Μαΐου. Στα μέσα Ιουνίου, η BP παρήγγειλε 32 μηχανές τύπου Skimmer (διαχωρίζουν το πετρέλαιο και το νερό) με κάθε μηχανή ικανή να εξαγει μέχρι 2.000 βαρέλια ανά ημέρα. Οι αρχές συμφώνησαν με την BP να χρησιμοποιήσουν τις μηχανές δοκιμαστικά για μία εβδομάδα. Μέχρι τις 28 Ιουνίου, μέσω της πρωτοβουλίας της BP είχαν αφαιρεθεί επιτυχώς 890.000 βαρέλια πετρελαίου και είχαν καεί περίπου 314.000 βαρέλια του πετρελαίου.

Τον Νοέμβριο η ακτοφυλακή ανέφερε ότι υπήρξαν επιτυχείς προσπάθειες που έγιναν για να περιοριστούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της πετρελαιοκηλίδας υλοποιώντας την ιδέα του Απριλίου για «επί τόπου καύση» του πετρελαίου σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα όσον αφορά την επιφάνεια του ωκεανού και τις καιρικές συνθήκες έτσι ώστε να περιορίζονται οι περιβαλλοντικές ζημιές στον ωκεανό και στις ακτές. Έλαβαν χώρα 411 ελεγχόμενες επιχειρήσεις επί τόπου καύσης, εκ των οποίων 410 θα μπορούσαν να ποσοτικοποιηθούν σε περίπου 11.100.000 γαλόνια.

Η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος απαγόρευσε τη χρήση skimmers που «αφήνουν» πάνω από 15 μέρη πετρελαίου ανά εκατομμύριο, στο νερό. Έτσι πολλά μηχανήματα τύπου skimmer μεγάλης κλίμακας ήταν επόμενο να τεθούν σε αχρηστία καθώς υπερέβαιναν το όριο αυτό. Ακόμα η Αμερική δέχθηκε και τη βοήθεια άλλων κρατών όπως η Ταϊβάν όχι όμως με μεγάλη επιτυχία.



Εικόνα 3. 3 Αεροφωτογραφία από περιοχή που πλήττεται από τη διαρροή

Η Ακτοφυλακή των ΗΠΑ δήλωσε ότι 33.000.000 γαλόνια (120.000 m^3) του μολυσμένου νερού ανακτήθηκαν, με 5.000.000 γαλόνια να είναι καθαρό πετρέλαιο. Εκτιμάται ότι 11.000.000 γαλόνια ΗΠΑ (42.000 m^3) του πετρελαίου κάηκαν. Η BP δήλωσε ότι 826.000 βαρέλια είχαν ανακτηθεί ή είχαν καεί. Η Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (NOAA), δήλωσε ότι εκτιμάται ότι περίπου το 25% του πετρελαίου είχε αφαιρεθεί από τον Κόλπο.

Με βάση τις εκτιμήσεις της NOAA καθίσταται σαφές ότι περίπου το 75% από τα 160.000.000 γαλόνια πετρελαίου που διέρρευσαν ακόμα βρίσκονται εντός του κόλπου με διάφορες μορφές. Λέγεται ότι η συλλογή πετρελαίου συνεχίζεται ακόμα και σήμερα σε μεγάλες ποσότητες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η εμφάνιση μια πετρελαιοκηλίδας μεγέθους 8 τόνων πετρελαίου στις ακτές της Αλαμπάμα το Μάρτιο 2011 μετά από μια καταιγίδα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις της NOAA για το τι απέγινε το πετρέλαιο που διέρρευσε στον κόλπο του Μεξικού λόγω του ατυχήματος.

Πίνακας 3. 2 Οι εκτιμήσεις της NOAA για το τι απέγινε το πετρέλαιο που διέρρευσε στον κόλπο του Μεξικού (πηγή: NOAA Information Desk)

Κατηγορία	Εκτίμηση
Άμεση ανάκτηση από τον αγωγό	17%
Κάηκε στην επιφάνεια	5%
Ανακτήθηκε από την επιφάνεια της θάλασσας	3%
Χημικώς διαλυμένο	8%
Φυσικώς διεσπαρμένο	16%
Εξατμίσθηκαν	25%
Υπόλειμμα	26%

- Ιχτος1 Πετρελαιοπηγή, Κόλπος Καμπέτσε, Μεξικό, 1979

Ποσότητα διαρροής: 4.408.795 τόνοι

Τον Ιούνιο του 1979, η πετρελαιοπηγή στον Κόλπο του Καμπέτσε κατέρρευσε μετά από έκρηξη που προκλήθηκε από υπερπίεση σε αγωγό. Κατά τη διάρκεια των επόμενων 10 μηνών περίπου 140 εκατομμύρια γαλόνια αργού πετρελαίου διέρρευσαν στον Κόλπο του Μεξικού από την κατεστραμμένη πετρελαιοπηγή. Στις φωτογραφίες φαίνεται το πετρέλαιο να αναβλύζει μέσα από τη θάλασσα.



Εικόνα 3. 4 Εικόνα από την πηγή της πετρελαιοκηλίδας (πηγή: Anne Casselman (2009) 10 Biggest Oil Spills in History, No, the 1989 Exxon-Valdez spill doesn't make the list, Popular Mechanics)

Προκειμένου να επιβραδυνθεί η ροή του πετρελαίου από το κατεστραμμένη πετρελαιοπηγή, τοποθέτησαν λάσπη και αργότερα σφαιρίδια από χάλυβα, σίδηρο και μόλυβδο στον άξονα της πηγής. Σύμφωνα με την ΡΕ.ΜΕΧ. (Πετρέλαια του Μεξικού), το μισό πετρέλαιο καιγόταν όταν έφτανε στην επιφάνεια της θάλασσας και το ένα τρίτο

εξατμίστηκε. Η ΡΕ.ΜΕΧ. προσέλαβε, επίσης, μια εταιρεία για να ψεκάσει το πετρέλαιο που είχε ξεφύγει από την περιοχή λόγω διασποράς. Πάνω από 1100 τετραγωνικά μίλια κυκλικά γύρω από την πετρελαιοκηλίδα ψεκάστηκαν με διαλυτικά που λειτουργούν όπως το σαπούνι πιάτων, διαλύουν το πετρέλαιο, έτσι ώστε το μεγαλύτερο κομμάτι από αυτό να αναμειγνύεται με νερό. Ουσιαστικά δεν πρόκειται για την πιο οικολογική αντιμετώπιση, ωστόσο με αυτόν τον τρόπο, μπόρεσαν να μειώσουν την επίδραση της πετρελαιοκηλίδας στις ακτές. Στην αντίπερα όχθη του κόλπου, από την πλευρά του Τέξας, skimmers και boomers είχαν τοποθετηθεί στο νερό για να προστατεύσουν τις ακτές και τις λιμνοθάλασσες των Νησιών Barrier.

- Atlantic Empress, Τρινιδάδ και Τομπάγκο, Καραϊβική Θάλασσα, 1979

Ποσότητα διαρροής: 2.771.250 τόνοι

Τον Ιούλιο του 1979, μετά από μια θύελλα δύο πλήρη φορτηγά πλοία πετρελαιοφόρα (supertankers) συγκρούστηκαν στα ανοικτά των ακτών του Τομπάγκο στην Καραϊβική Θάλασσα, δημιουργώντας την μεγαλύτερη, μη προερχόμενη από πετρελαιοπηγή, πετρελαιοκηλίδα στην ιστορία. Διαλυμένα από το ατύχημα, τα δύο πλοία άρχισαν να διαρρέουν το ακατέργαστο πετρέλαιο που έφεραν, ενώ δεν άργησε να ξεσπάσει φωτιά και στα δύο δεξαμενόπλοια. Η πυρκαγιά σε ένα από τα πλοία, στο Aegean Captain, σύντομα ελέγχεται, και το κατεστραμμένο σκάφος ρυμουλκήθηκε στο Κουρασάο, όπου το υπόλοιπο εναπομείναν φορτίο του ανακτήθηκε. Το άλλο δεξαμενόπλοιο, το Atlantic Empress, ρυμουλκήθηκε μακρύτερα στη θάλασσα μέχρι να εκραγεί 300 ναυτικά μίλια ανοικτά στη θάλασσα. Συνολικά, 26 μέλη του πληρώματος σκοτώθηκαν κατά την καταστροφή και σχεδόν 90 εκατομμύρια γαλόνια αργού διέρρευσαν στη θάλασσα.

Η αντιμετώπιση για το συγκεκριμένο περιστατικό ήταν κατ' αρχήν οι προσπάθειες πυρόσβεσης για την αποφυγή της ανεξέλεγκτης διαρροής και εν συνεχεία η χρήση διαλυτικών πετρελαίου για τη διάλυση του πετρελαίου που διέρρευσε τόσο κατά τη διάρκεια του ατυχήματος όσο και στη συνέχεια όταν το Atlantic Empress ρυμουλκήθηκε μακριά. Παρατηρήθηκε μόνο ελάχιστος σημασίας ρύπανση στις κοντινές ακτές.

- Fergana Valley, Ουζμπεκιστάν, 1992

Ποσότητα διαρροής: 2.771.250 τόνοι

Σχεδόν 88 εκατομμύρια γαλόνια πετρελαίου διέρρευσαν ύστερα από έκρηξη της πετρελαιοπηγής στην κοιλάδα Φεργκάνα, μια από τις πιο σημαντικές πετρελαιοπηγές και μονάδες ενέργειας και διύλισης πετρελαίου στο Ουζμπεκιστάν. Ενώ η διαρροή δεν απασχόλησε ποτέ εντόνως τα μέσα, είναι η μεγαλύτερη πετρελαιοκηλίδα που έχει αναφερθεί ποτέ σε χερσαίο χώρο.

Το έδαφος απορρόφησε πλήρως άμεσα αυτή διαρροή, αφήνοντας ελάχιστες ποσότητες για καθαρισμό σε πληρώματα που συστήθηκαν για την αντιμετώπιση της.

- Nowruz Oil Field, Περσικός Κόλπος, 1983

Ποσότητα διαρροής: 2.520.000 τόνοι

Κατά τη διάρκεια του πολέμου Ιράν-Ιράκ, ένα πετρελαιοφόρο συγκρούστηκε με την Πλατφόρμα εξόρυξης πετρελαίου Νορούζ στον Περσικό Κόλπο και χτύπησε τις βάσεις της, καταστρέφοντας την πλατφόρμα. Αμέσως ξεκίνησε διαρροή η οποία εκτιμάται περίπου σε 1500 βαρέλια την ημέρα. Η επέμβαση των αρχών άργησε να λάβει χώρα καθώς το ατύχημα συνέβη ακριβώς στο κέντρο της εμπόλεμης ζώνης και κατά τη διάρκεια του πολέμου. Πέρασαν επτά μήνες διαρροής πετρελαίου πριν από την επέμβαση των αρχών.

Η Norpol, μια νορβηγική εταιρεία, κλήθηκε για να αντιμετωπίσει την πετρελαιοκηλίδα. Χρησιμοποιήθηκαν πλωτά φράγματα (booms) και μηχανήματα skimmers για να σταματήσει η εξάπλωση του πετρελαίου και να γίνει ανάκτηση μεγάλου μέρους της διαρροής.

- ABT Summer, Ανοιχτά της Αγκόλα, 1991

Ποσότητα διαρροής: 2.520.000 τόνοι

Στο δεξαμενόπλοιο ABT Summer με προορισμό το Ρότερνταμ, ενώ ήταν 900 μίλια ανοικτά της Αγκόλα, πραγματοποιείται έκρηξη λόγω μικρής διαρροής εντός του σκάφους. Το πλοίο ήταν πλήρως φορτωμένο όταν λόγω της έκρηξης έπιασε φωτιά. Όλο το ωφέλιμο φορτίο του πετρελαιοφόρου διέρρευσε στον ωκεανό. Γύρω από το βυθιζόμενο πλοίο δημιουργήθηκε πετρελαιοκηλίδα έκτασης 80 τετραγωνικών μιλίων. Το δεξαμενόπλοιο καιγόταν επί 3 μέρες μέχρι που βυθίστηκε.

Αν και κανείς δεν μπορεί να πει τι ποσοστό του πετρελαίου βυθίστηκε ή κάηκε, το μεγαλύτερο μέρος του πετρελαίου θεωρείται ότι έχει διαλυθεί στην ανοικτή θάλασσα με μικρό περιβαλλοντικό κόστος, χάρη στην τοποθεσία του περιστατικού και τα κυματικά και

ανεμολογικά χαρακτηριστικά. Τοποθετήθηκαν προληπτικά φράγματα για δειγματοληπτικούς ελέγχους που επιβεβαίωσαν τα παραπάνω.

- Castillo den Bellver, Κόλπος Saldanha, Νότια Αφρική, 1983

Ποσότητα διαρροής: 2.470.000 τόνοι

Το δεξαμενόπλοιο Castillo den Bellver βρισκόμενο 70 χλμ βορειοδυτικά του Κέιπ Τάουν στη Νότια Αφρική πιάνει φωτιά. Το πλοίο εγκαταλείπεται από το πλήρωμα και παρασύρεται παράκτια όπου και τελικά διχοτομείται από τις συγκρούσεις με την ακτή. Η πρύμνη ανετράπη και βυθίστηκε στα ανοιχτά πριν το πλοίο παρασυρθεί στις ακτές. Στις δεξαμενές του πλοίου παρέμειναν περίπου 110.000 τόνοι πετρελαίου. Το τμήμα της πλώρης που παρέμεινε ρυμουλκήθηκε στα ανοιχτά και βυθίστηκε με ελεγχόμενη έκρηξη. Το πλοίο μετέφερε συνολικά 78.5 εκατομμύρια γαλόνια το χρόνο του ατυχήματος τα οποία και διέρρευσαν στη θάλασσα.

Οι επιχειρήσεις εκκαθάρισης ήταν ελάχιστες. Πραγματοποιήθηκε ψεκασμός με διαλυτικά πετρελαίου αλλά σε γενικές γραμμές οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ήταν μικρές. Τον καιρό του ατυχήματος περίπου 1500 θαλασσοπούλια είχαν συγκεντρωθεί σε ένα κοντινό νησί και ετοιμάζονταν για την εποχή της αναπαραγωγής τους. Τα θαλασσοπούλια αναφέρθηκε ότι επηρεάστηκαν από το πετρέλαιο καθώς βουτούν στη θάλασσα για να αλιεύσουν την τροφή τους. Ωστόσο ο αντίκτυπος στην τοπική αλιεία ήταν ελάχιστος.

- Amoco Cadiz, Μεταξύ Αγγλίας και Γαλλίας, 1978

Ποσότητα διαρροής: 2.160.000 τόνοι

Το δεξαμενόπλοιο Amoco Cadiz παρασύρθηκε και προσάραξε ανοικτά των ακτών της Βρετανίας μετά από βλάβη του συστήματος διεύθυνσής του σε μια σφοδρή καταιγίδα. Ολόκληρο το φορτίο του, περίπου 246.000 τόνοι αργού πετρελαίου, διέρρευσε στα αναστατωμένα νερά της Μάγχης, με συνέπεια να υποστεί σοβαρές συνέπειες το τοπικό θαλάσσιο οικοσύστημα, περισσότερες από οποιαδήποτε άλλη πετρελαιοκηλίδα μέχρι εκείνη την εποχή, στην Ευρώπη.

Αμέσως μετά το ατύχημα έγιναν προσπάθειες για διάλυση του πετρελαίου που διέρρευσαν με χρήση πάνω από 3300 τόνων διαλυτικών. Οι προσπάθειες όμως κρίθηκαν μάταιες καθώς στην περιοχή έπνεαν ισχυροί άνεμοι ενώ η θάλασσα ήταν έντονα κυματώδης. Μέσα σε ένα

μήνα από το ατύχημα, το πετρέλαιο είχε μολύνει 200 μίλια γαλλικών ακτών. Για την ανάκτηση και απορρόφηση του πετρελαίου που είχε μολύνει τις ακτές χρησιμοποιήθηκαν φορτηγά και γεωργικά μηχανήματα αν και σε μεγάλο μέρος της καταστροφής η χειρονακτική εργασία με φτυάρια και μόνο, ήταν αρκετή.

- Haven, Ανοιχτά της Γένοβα, Ιταλία, 1991

Ποσότητα διαρροής: 1.000.000 τόνοι

Το δεξαμενόπλοιο Haven έπλεε ανοιχτά της Γένοβα όταν συνέβη μια βίαιη έκρηξη προερχόμενη πιθανώς από κάποια διαρροή. Η έκρηξη κόστισε τη ζωή 6 μελών του πληρώματος ενώ ταυτόχρονα προκάλεσε τη βύθιση του πλοίου και τη διαρροή 145.000 τόνων πετρελαίου στα ανοιχτά των ακτών της Ιταλίας. Υπολογίζεται ότι περίπου το 70% του πετρελαίου που μετέφερε το πλοίο κάηκε στη φωτιά που επακολούθησε την έκρηξη στο πλοίο. Αμέσως μετά το συμβάν, μια προσπάθεια από τους Ιταλούς για να ρυμουλκήσουν το Haven στην ακτή απέτυχε, και το μήκους 250 μέτρων πλοίο βυθίστηκε στα ανοικτά των ακτών της Γένοβας. Είναι το μεγαλύτερο ναυάγιο στον κόσμο. Στις περισσότερες περιπτώσεις το πετρέλαιο διαρρέει προς την επιφάνεια της θάλασσας και παραμένει εκεί. Ωστόσο σε αυτό το ναυάγιο μεγάλο μέρος του πετρελαίου βυθίστηκε μαζί με το δεξαμενόπλοιο. Αναφέρεται πως πετρέλαιο από το Haven βρέθηκε αργότερα και σε βάθος μέχρι και 500 μέτρων στον πυθμένα της θάλασσας. Για τα επόμενα 12 χρόνια αναφέρθηκαν περιστατικά μόλυνσης των ακτών της Ιταλίας και της Γαλλίας λόγω του ναυαγίου, ειδικά γύρω από Γένοβα και τη νότια Γαλλία.

Αμέσως μετά την έκρηξη οι ιταλικές αρχές έσπευσαν να καταπολεμήσουν τη φωτιά και έκαναν προσπάθειες για έλεγχο της εξάπλωσης της διαρροής χρησιμοποιώντας έξι μίλια από φουσκωτά εμπόδια – φράγματα (booms) που βυθίζονταν κάτω από την επιφάνεια του νερού και γύρω από το σκάφος. Το πετρέλαιο το οποίο αναδυόταν στην επιφάνεια απορροφόταν άμεσα από μηχανήματα τύπου skimmer που είχαν πλεύσει στην περιοχή.

Όταν το ναυάγιο κηρύχθηκε ασφαλές, ομάδα από δύτες διαπίστωσε πως το οπίσθιο μέρος του πλοίου είχε προσαραχτεί κατά τη βύθιση σε βραχώδη περιοχή με προεξοχές ευτυχώς όχι ικανές να ανοίξουν νέες τρύπες στο κύτος. Από την αυτοψία των δυτών αναφέρθηκε πως οι υπόλοιποι από τους 80.000 τόνους αργού πετρελαίου, που είτε είχαν καεί είτε είχαν ανακτηθεί από την επιφάνεια, ήταν σε στερή κατάσταση εντός του πλοίου.



Εικόνα 3.5 Το πλοίο που φλέγεται (πηγή: Anne Casselman (2009) 10 Biggest Oil Spills in History, No, the 1989 Exxon-Valdez spill doesn't make the list, Popular Mechanics)



Εικόνα 3.6 Χάρτης ατυχημάτων

3.5 Τα μεγαλύτερα ατυχήματα στην Ελλάδα

Λόγω της γεωγραφικής της θέσης σε σχέση με τους δρόμους διακίνησης πετρελαίου, στην Ελλάδα έχουν συμβεί πολλά ατυχήματα διαρροής πετρελαίου κυρίως προερχόμενα από

ατυχήματα με φορτηγά πλοία τύπου τάνκερ. Στη χώρα μας διακινούνται με πλοία περισσότεροι από 100.000.000 τόνοι πετρελαίου ετησίως τη στιγμή που δεν υπάρχει κανένα μέτρο πρόληψης ενός ατυχήματος πετρελαιοκηλίδας. Η διακίνησή τους γίνεται κυρίως σε κλειστούς κόλπους με ιδιαίτερη ναυτιλιακή κίνηση, ενώ η ανάπτυξη και η τοποθέτηση των βιομηχανικών περιοχών κατά μήκος του άξονα Θεσσαλονίκης, Βόλου, Αθήνας, Πάτρας δημιουργεί πολλαπλούς κινδύνους ρύπανσης στις γειτονικές θαλάσσιες περιοχές. Εξάλλου, με την αποθήκευση των πετρελαιοειδών, τόσο στα διυλιστήρια, όσο και στα πρατήρια καυσίμων, διαβρώνονται οι εγκαταστάσεις, οπότε το πετρέλαιο και τα προϊόντα του ρυπαίνουν τα υπόγεια νερά και τους υδροφορείς τους. Η Ελλάδα είναι μια χώρα με πλούσιο οικοσύστημα, κλειστές θάλασσες και «κατσαρές» ακτογραμμές γεγονός που συνυπολογιζόμενο με τις στατιστικές που αναφέρουν πως κάθε χρόνο υπολογίζεται ότι 1/1.000 του μεταφερομένου πετρελαίου διεθνώς τελικά διαρρέει στις θάλασσες (κάπου 2 εκατ. τόνοι τον χρόνο), καθιστά το Αιγαίο Πέλαγος (που κυρίως πλήττεται) μια ωρολογιακή βόμβα. Τη Μεσόγειο διαπλέουν κάθε χρόνο περισσότερα από 220.000 πλοία (το 30% του συνολικού όγκου των εμπορικών θαλάσσιων μεταφορών και το 20% της μεταφοράς πετρελαίου διά πλοίων γίνονται μέσα στη Μεσόγειο) και σε αυτήν καταλήγουν 650.000 τόνοι πετρελαιοειδών κάθε χρόνο. Στην Ελλάδα, εκτός των άλλων, δεν υπάρχουν αρκετές εγκαταστάσεις υποδοχής των πετρελαϊκών αποβλήτων των πλοίων, με αποτέλεσμα, σε συνδυασμό με τον πλημμελή έλεγχο από τις αρμόδιες αρχές, να δίνεται το «πράσινο φως» σε πλοιοκτήτες και καπετάνιους που κερδίζουν χρόνο και χρήμα να αδειάζουν και να καθαρίζουν τις δεξαμενές των καραβιών εν πλω.

Η ανάγκη προστασίας των θαλασσών της Ελλάδας από την πετρελαϊκή ρύπανση αποτελεί μείζον ζήτημα καθώς, εκτός των άλλων, ο ελληνικός θαλάσσιος χώρος πλήττεται από τις διαρροές πετρελαιοειδών κατά τη φόρτωση και την εκφόρτωση ποσοτήτων πετρελαίου στις χερσαίες εγκαταστάσεις αλλά και από την παράνομη τακτική του ξεπλύματος αμπαριών μεσοπέλαγα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τα σημαντικότερα ατυχήματα διαρροής πετρελαίου που έχουν συμβεί στην Ελλάδα:

- 1) 23/2/80, Ατύχημα στο πετρελαιοφόρο "Irenes Serenade" με αποτέλεσμα 40.000 τόνοι πετρελαίου να καταλήξουν στη θάλασσα κοντά στις ακτές της Πύλου.

- 2) 9/10/93, 800 τόνοι πετρελαίου διαρρέουν στην ευρύτερη περιοχή της Πύλου από το πετρελαιοφόρο "Iliad". Τα ρεύματα παρασύρουν το πετρέλαιο έξω από τον προστατευμένο όρμο και το κατευθύνουν στην παραλία της Βοϊδοκοιλιάς. Πετρέλαιο εντοπίζεται και σε άλλες ακτές. Στην προσπάθεια των δυτών να δουν τις επιπτώσεις από το πετρέλαιο που διέρρευσε από το "Iliad" ανακαλύφθηκαν ορατά ακόμα τα σημάδια από το ατύχημα (20 χρόνια πριν). Το πετρέλαιο του "Irenes Serenade" βρέθηκε να καλύπτει σημεία του πυθμένα.
- 3) 1/10/94, ατύχημα στο πετρελαιοφόρο "La Guardia", κατά τη φορτοεκφόρτωση, στις εγκαταστάσεις του Ασπρόπυργου. 400-800 τόνοι πετρελαίου καταλήγουν στον Κόλπο της Ελευσίνας.
- 4) 8/8/1996, ατύχημα στο πετρελαιοφόρο "Kriti Sea" στα διυλιστήρια της Motor Oil εντός του Σαρωνικού κόλπου στους Άγιους Θεόδωρους κατά τη φορτοεκφόρτωση. Διαρροή 300-500 τόνων στη θάλασσα. Γίνεται σημαντική κινητοποίηση για την αντιμετώπιση της πετρελαιοκηλίδας που εκτός από τους Άγιους Θεόδωρους, φτάνει τις ακτές της Αίγινας και του Αγκιστριού.

Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται συνοπτικά τα στοιχεία των 10 σημαντικότερων ατυχημάτων που έχουν συμβεί στον Ελλαδικό χώρο (Greenpeace (2007), «Οι σημαντικότερες πετρελαιοκηλίδες στην Ελλάδα»):

Πίνακας 3. 3 Τα 10 σημαντικότερα ατυχήματα διαρροής πετρελαίου στην Ελλάδα

	Χρονολογία	Πλοίο	Τοποθεσία	Ποσότητα (Τόνοι)
1.	1972	"Trader"	Βόρειο Αιγαίο	36.500
2.	1979	"Μεσσηνιακή Φροντίς"	Καλοί Λιμένες Κρήτης	12.000
3.	1980	"Irenes Serenade"	Πύλος	40.000
4.	1987	"Rabigh Bay III"	Ασπρόπυργος	750
5.	1988	"Jupiter" & "Adige"	Πειραιάς	750
6.	1992	"Geori Chernomorya"	Κεντρικό Αιγαίο	1.700
7.	1993	"Iliad"	Πύλος	800
8.	1994	"La Guardia"	Ασπρόπυργος	600
9.	1996	"Kriti Sea"	Άγιοι Θεόδωροι	400
10.	2000	"Eurobulker X"	Νότιος Ευβοϊκός	300
			Σύνολο:	93.800

3.6 Πετρελαιοφόρα Δεξαμενόπλοια

Με τον όρο Δεξαμενόπλοιο χαρακτηρίζονται δύο διαφορετικοί τύποι πλοίων, ο ένας είναι ο γνωστότερος τύπος "Τάνκερ" ή "Γκαζάδικο" και ο άλλος είναι ιδιαίτερη κατασκευή πλοίου, συνήθως πολεμικού, που μοιάζει με αυτοκινούμενη πλωτή δεξαμενή, τα λεγόμενα "Δεξαμενόπλοια λιφτς" που χρησιμοποιούνται για δεξαμενισμούς ή μεταφορές άλλων πλοίων, στη κατηγορία αυτών υπάγονται και τα εξειδικευμένα πλοία διάσωσης - ανέλκυσης υποβρυχίων (<http://el.wikipedia.org/wiki/Δεξαμενόπλοιο>).

Το Δεξαμενόπλοιο (Tanker) είναι ένα πλοίο σχεδιασμένο να μεταφέρει υγρά φορτία χύδην (χύμα).

Τα δεξαμενόπλοια αυτά ποικίλλουν σε μέγεθος. Ξεκινούν από μερικές εκατοντάδες τόνους, τα οποία εξυπηρετούν μικρά λιμάνια, ως βοηθητικά λιμένες ή ναυστάθμου και φτάνουν μέχρι μερικές εκατοντάδες χιλιάδες τόνους, τα οποία χρησιμοποιούνται για μεταφορές μεγάλων ποσοτήτων σε μεγάλες αποστάσεις.

Με δεξαμενόπλοια μεταφέρεται μεγάλη ποικιλία υγρών φορτίων, όπως:

- 1) Προϊόντα υδρογονανθράκων, π.χ. ακατέργαστο πετρέλαιο, βενζίνες, πετρέλαια καύσης, λιπαντικά έλαια, κριεζώτον, φυτικά έλαια, ψαρέλαια και μελάσες, όπου στη προκειμένη περίπτωση τα δεξαμενόπλοια χαρακτηρίζονται γενικά πετρελαιοφόρα, ή υγροποιημένο φυσικό αέριο όπου τότε χαρακτηρίζονται υγραεριοφόρα.
- 2) Χημικά, όπως αμμωνία, χλώριο και
- 3) Νερό, όπου στη περίπτωση αυτή τα δεξαμενόπλοια ονομάζονται υδροφόρα.

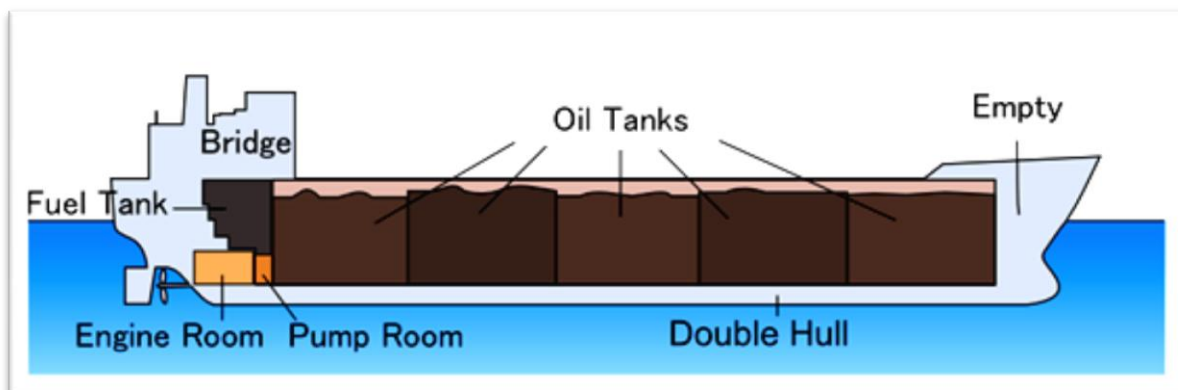
Ως Πετρελαιοφόρο (Π/Φ) πλοίο χαρακτηρίζεται ειδικός τύπος Δεξαμενοπλοίου με ιδιαίτερο εξοπλισμό και μέσα μεταφοράς πετρελαιοειδών καυσίμων, και άλλων παραγώγων. Το μέγεθος αυτών των πλοίων είναι πολύ μεγάλο και έχουν μεταφορική ικανότητα έως και 550.000 τόνους. Τα φορτία που μεταφέρονται είναι πολύ επικίνδυνα και τα πλοία είναι εφοδιασμένα με πλήρωση αδρανούς αερίου (Inert Gas) στις δεξαμενές τους. Καθ' όλη τη διάρκεια φόρτωσης, μεταφοράς και εκφόρτωσης πετρελαιοειδών απαραίτητα πρέπει να φέρουν επηρμένο το σήμα Μπράβο (Bravo) που σημαίνει ότι μεταφέρουν ή διενεργούν φόρτωση ή εκφόρτωση εύφλεκτων υλών.

Μια άτυπη κατάταξη που χρησιμοποιείται, χωρίς τα όρια της κάθε κατηγορίας να είναι αυστηρά καθορισμένα, είναι η ακόλουθη:

Πίνακας 3. 3 Νέα κατάταξη πετρελαιοφόρων (Πηγή: <http://el.wikipedia.org/wiki/Δεξαμενόπλοιο>)

Κατηγορία	Τόνοι ξηρού φορτίου
Product Tanker	10.000-60.000 dwt
Panamax	60.000-80.000 dwt
Aframax	80.000-120.000 dwt
Suezmax	120.000-200.000 dwt
VLCC	200.000-315.000 dwt
ULCC	315.000-550.000 dwt

Το dwt σημαίνει dead weight tonnage και είναι η χωρητικότητα εκτοπίσματος. Υπολογίζεται σε τόνους "νεκρού βάρους". Η χωρητικότητα υπολογίζεται σε βάρος, δηλαδή σε τόνους των 2.240 λιβρών. Η χωρητικότητα εκτοπίσματος προσδιορίζει το μέγιστο συνολικό βάρος που μπορεί να μεταφέρει ασφαλώς το πλοίο σε φορτίο, εφόδια κ.ά. εφόσον διατηρεί το βύθισμα (γραμμή φόρτωσης) που προβλέπεται από τους ισχύοντες κανονισμούς. Από το συνολικό αυτό βάρος αν αφαιρεθεί το βάρος καυσίμων, εφοδίων (ύδατος, τροφίμων, κλπ) και έρματος προκύπτει το πραγματικό βάρος που μένει για το φορτίο δηλ. η πραγματική σε φορτίο μεταφορική ικανότητα του πλοίου, που ονομάζεται «Χωρητικότητα φορτίου (loading or carrying capacity)».



Εικόνα 3. 7 Εικόνα που απεικονίζει τη δομή των πετρελαιοφόρων

3.7 Πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου

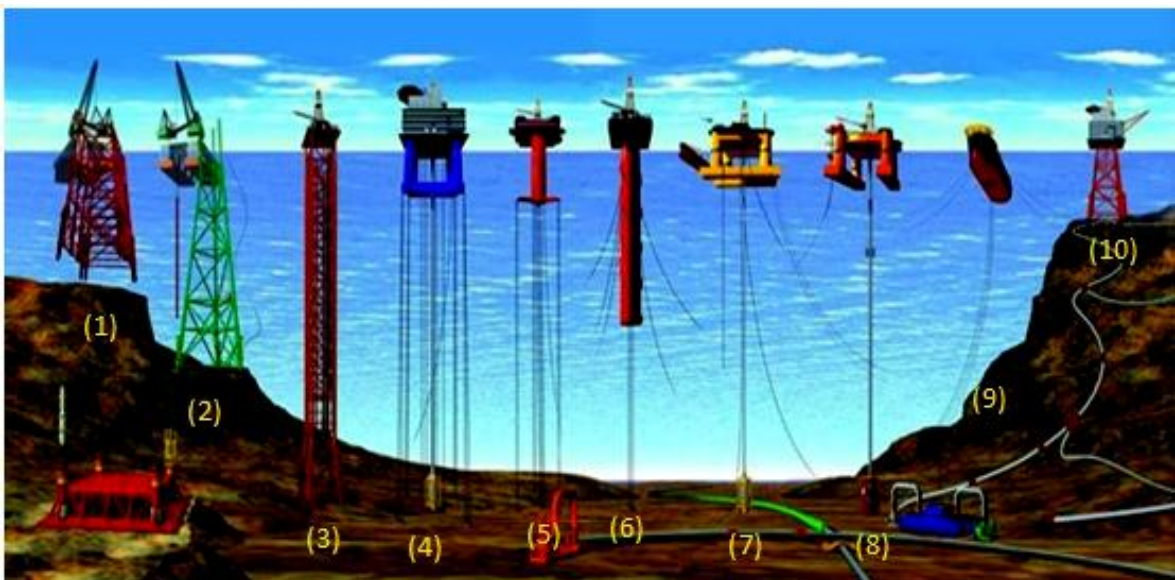
Μια πλατφόρμα-εξέδρα άντλησης πετρελαίου, που συχνά αναφέρεται ως υπεράκτια πλατφόρμα, είναι μια μεγάλη συνήθως κατασκευή με εγκαταστάσεις για τη διάνοιξη πηγαδιών, την εξαγωγή και (σπάνια) επεξεργασία-κατεργασία του πετρελαίου, καθώς και για την προσωρινή αποθήκευση των προϊόντων μέχρι να μπορούν να μεταφερθούν για δύλιση και εμπορία. Σε πολλές περιπτώσεις, η πλατφόρμα περιλαμβάνει και εγκαταστάσεις για να στεγάσει το εργατικό δυναμικό (http://en.wikipedia.org/wiki/Oil_platform).

Ανάλογα με τις περιστάσεις, η πλατφόρμα μπορεί να θεμελιώνεται στον πυθμένα του ωκεανού, μπορεί να κατασκευάζεται σε ένα τεχνητό νησί, ή μπορεί ακόμα να είναι πλωτή.

Οι υπεράκτιες αυτές πλατφόρμες κατασκευάζονται συνήθως κοντά σε πετρελαιοπηγές ώστε να είναι εύκολη και λιγότερο δαπανηρή η άντληση του πετρελαίου.

Υπάρχουν ωστόσο και περιπτώσεις που υπάρχουν απομακρυσμένα από την πλατφόρμα υποθαλάσσια φρέατα τα οποία συνδέονται με την πλατφόρμα με ένα ή περισσότερους αγωγούς.

i) Τύποι πλατφόρμων



Εικόνα 3. 8 Κατηγορίες Πλατφορμών(πηγή: http://en.wikipedia.org/wiki/Oil_platform)^[8]

Στις περιπτώσεις (1) και (2) της Εικόνας 3.8, οι πλατφόρμες είναι «Σταθερές Πλατφόρμες» (Fixed Platforms). Αυτές οι πλατφόρμες κατασκευασμένες είτε από σκυρόδεμα είτε από χάλυβα ή και από τα 2 υλικά, στηρίζονται απευθείας στο βυθό. Η δομή τους είναι τέτοια που το υποθαλάσσιο μέρος της κατασκευής στηρίζει το κατάστρωμα όπου και βρίσκονται τα θαλάσσια γεωτρήπανα, οι εγκαταστάσεις παραγωγής και επεξεργασίας και οι χώροι διαμονής για το πλήρωμα εργασίας. Αυτές οι πλατφόρμες λόγω της μη δυνατότητας μετακίνησής τους είναι σχεδιασμένες για μακροχρόνια χρήση. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι υλικών όπως: πλωτός χάλυβας, πλωτό σκυρόδεμα, σκυρόδεμα τύπου Caisson και άλλα. Πιο συχνές κατασκευές σήμερα είναι οι σύμμικτες από σωληνοειδή χάλυβα και σκυρόδεμα. Οι πλατφόρμες αυτές συχνά συνοδεύονται από ενσωματωμένες δεξαμενές αποθήκευσης πετρελαίου που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Ως επί το πλείστον οι πλατφόρμες κατασκευάζονται στη στεριά ή παραθαλάσσια σε άλλες πλωτές κατασκευές και μετά της ολοκλήρωσης μεγάλου ποσοστού της κατασκευής τους ρυμουλκούνται στο επιθυμητό σημείο και ολοκληρώνεται η κατασκευή και εγκατάστασή τους. Οι Σταθερές πλατφόρμες είναι οικονομικά εφικτές για εγκατάσταση σε βάθος νερού μέχρι περίπου 1.700 ft (520 m).

Στην περίπτωση (3) της εικόνας 3.8, η πλατφόρμα είναι «Πλατφόρμα επί Πύργου» (Compliant Towers Platforms). Αυτές οι πλατφόρμες αποτελούνται από έναν λεπτό εύκαμπτο πύργο, κατασκευασμένο από χάλυβα, που στηρίζει ένα συμβατικό κατάστρωμα με χώρο για τα θαλάσσια γεωτρήπανα και τις διάφορες δραστηριότητες της πλατφόρμας. Οι πύργοι είναι έτσι σχεδιασμένοι ώστε να είναι ανθεκτικοί σε μεγάλη πλευρική κάμψη και καταπόνηση από δυνάμεις. Συνήθως αυτού του τύπου οι πλατφόρμες χρησιμοποιούνται σε βάθη από 1.200 έως 3.000 πόδια (370 έως 910 μέτρα).

Στις περιπτώσεις (4) και (5) της εικόνας 3.8, οι πλατφόρμες είναι «Δεμένες Πλωτές Πλατφόρμες» (Tension Leg Platforms = TLPs). Τα TLP είναι πλωτές εξέδρες δεμένες στο θαλάσσιο πυθμένα κατά τρόπο που να εξαλείφει κατά το μέγιστο βαθμό τις κατακόρυφες κινήσεις της κατασκευής. Υπάρχουν 2 είδη τέτοιων πλατφορμών: οι κατακόρυφου δεσίματος πλατφόρμες με 4 «πόδια» και οι πλατφόρμες με ένα και μόνο ανωστικό «πόδι» κάτω από το κατάστρωμα και με λοξό δέσιμο. Τα συμβατικά TLP χρησιμοποιούνται σε βάθη νερού μεταξύ 600 και 4.300 ποδιών (180 έως 1.300 μέτρα). Ακόμα τα TLP μπορούν να

χρησιμοποιηθούν, όντας φθηνότερη κατασκευή, ως επικουρικές πλατφόρμες, πλατφόρμες για δορυφόρους κλπ.

Στην περίπτωση (6) της εικόνας 3.8, η πλατφόρμα είναι «Πλατφόρμα Spar». Spar ονομάζονται τα κούτσουρα τα οποία χρησιμοποιούνται ως σηματοδούρες στη ναυτιλία και είναι αγκυροβολημένα στη θέση τους κάθετα στην επιφάνεια της θάλασσας. Έτσι και οι πλατφόρμες τύπου Spar είναι ένα είδος πλωτής πλατφόρμας που χρησιμοποιείται σε πολύ βαθιά νερά. Οι πλατφόρμες τέτοιου τύπου αποτελούνται από έναν μεγάλης διαμέτρου κύλινδρο που στηρίζει ένα ευρύ κατά τα γνωστά κατάστρωμα. Ο κύλινδρος αυτός είναι βεβαρυμμένος στον πυθμένα του με ένα υλικό με μεγαλύτερη πυκνότητα από το νερό για να χαμηλώσει το κέντρο βάρους της κατασκευής και να παρέχει σταθερότητα. Τα Spars στερεώνονται στο βυθό μέσω ενός τύπου πρόσδεσης όμοιο με των TLP κατακόρυφου δεσίματος. Σήμερα υπάρχουν τέτοιου είδους πλατφόρμες εγκατεστημένες σε βάθη μέχρι και 2.500 μέτρων.

Στις περιπτώσεις (7) και (8) της εικόνας 3.8, οι πλατφόρμες είναι «Ημιυποβρύχιες Πλατφόρμες». Οι πλατφόρμες τέτοιου τύπου είναι εξ ολοκλήρου πλωτές πλατφόρμες και αποτελούνται από στήλες και προβλήτες που παρέχουν επαρκή πλευστότητα στην κατασκευή και ταυτόχρονα είναι έτσι μοιρασμένο το βάρος της κατασκευής ώστε το κατάστρωμα να παραμένει σε οριζόντια θέση. Οι Ημιυποβρύχιες Πλατφόρμες έχουν το πλεονέκτημα της εύκολης μετακίνησης από μέρος σε μέρος. Ανάλογα με το γεωτρύπανο, τους αγωγούς και τις εγκαταστάσεις που τις συνοδεύουν παρέχουν και πολλές επιλογές για χρήση όσον αφορά την παροχή της πετρελαιοπηγής. Οι πλατφόρμες αυτές κατά τη χρήση τους είναι αγκυροβολημένες – δεμένες από αλυσίδες, σύρματα και σχοινιά. Οι πλατφόρμες τέτοιου τύπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βάθη από 200 έως και 10.000 πόδια (60 έως 3.000 μέτρα).

Στην περίπτωση (9) της εικόνας 3.8, η πλατφόρμα είναι «Πλωτή Πλατφόρμα Αποθήκευσης και Επεξεργασίας». Οι πλωτές αυτές κατασκευές αποτελούνται από μία μεγάλη δεξαμενή (συχνά σχήματος πλοίου) και ένα μικρό σχετικά κατάστρωμα για εκφόρτωση και φόρτωση. Είναι προσεγγίσιμες από πλοία και αγκυροβολημένες για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Στην ουσία σχεδόν ποτέ δεν συνοδεύονται από γεωτρύπανο, καθώς σπάνια εκτελούνται διαδικασίες εξόρυξης πετρελαίου σε τέτοιου είδους πλατφόρμες. Χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά για αποθήκευση πετρελαίου. Μεταξύ όλων των πλατφορμών είναι η

οικονομικότερη για αποθήκευση πετρελαίου ενώ έχει και το πλεονέκτημα της εύκολης μετακίνησης.

Στην περίπτωση (10) της εικόνας 3.8, παρατηρείται μια μεικτή κατασκευή από μία σταθερή πλατφόρμα, σε μικρό βάθος νερού, που συνδέεται με άλλες απομακρυσμένες υποθαλάσσιες ημιαυτόνομες κατασκευές εξόρυξης πετρελαίου μέσω ελαστικών αγωγών. Είναι ως επί το πλείστον μικρές εγκαταστάσεις.

3.8 Επιπτώσεις πετρελαιοκηλίδων

3.8.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Η ρύπανση της θάλασσας με πετρελαιοειδή έχει τεράστιες συνέπειες στο φυσικό περιβάλλον. Το πετρέλαιο είναι ελαφρότερο από το νερό και γι' αυτό επιπλέει στην επιφάνειά του. Από τη στιγμή που το πετρέλαιο θα βρεθεί στη θάλασσα, αρχίζει μια αργή, φυσική διαδικασία οξείδωσης και βιοδιάσπασής του από μικροοργανισμούς που έχουν την ικανότητα να διασπούν υδρογονάνθρακες. Το υπόλειμμα του πετρελαίου τρεις μήνες περίπου μετά τη δημιουργία της πετρελαιοκηλίδας αποτελείται από ένα υδρόφοβο τμήμα, που συσσωματώνεται σε σβώλους, και ένα υδρόφιλο τμήμα, το οποίο προσλαμβάνει μεγάλες ποσότητες νερού και μετατρέπεται σε ένα παχύρρευστο γαλάκτωμα με τη μορφή ελαιώδους λάσπης, που ονομάζεται "μους σοκολάτα". Οι σβώλοι κατακάθονται στο βυθό ή μεταφέρονται με τη βοήθεια ρευμάτων στις κοντινές ακτές μαζί με τη "μους σοκολάτα", όπου παραμένουν για λίγους μήνες (ακτές με έντονα κύματα) ή και για χρόνια (ήρεμες ακτές). Το 30-40% των πετρελαιοειδών που ρίχνονται στην επιφάνεια της θάλασσας αποτελείται από πτητικά συστατικά, τα οποία εξατμίζονται γρήγορα, ενώ τα υπόλοιπα συστατικά σχηματίζουν ένα λεπτό, «μονομοριακό» όπως λέγεται, στρώμα πετρελαίου το οποίο εμποδίζει τις φυσικές ανταλλαγές που συμβαίνουν μεταξύ νερού και ατμοσφαιρικού αέρα, και οι οποίες είναι απαραίτητες για το βιολογικό κύκλο της θαλάσσιας ζωής. Το στρώμα αυτό του πετρελαίου, με άλλα λόγια, μειώνει στο ελάχιστο την ανανέωση του νερού με το οξυγόνο του αέρα, εμποδίζει τις ακτίνες του ήλιου να εισχωρήσουν βαθιά στη θάλασσα για τη φωτοσύνθεση, προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του νερού και υπερβολική ανάπτυξη μικροοργανισμών που καταναλώνουν οξυγόνο. Τα μαλάκια και τα

φυτά είναι ιδιαίτερα ευπαθή σε αυτή τη ρύπανση γιατί δηλητηριάζονται και πεθαίνουν από ασφυξία (http://5dim-pyrgou.ilei.sch.gr/sea_web/htm/polution2.html).

Το ίδιο συμβαίνει και με τα ψάρια εκείνα που δεν εγκαταλείπουν έγκαιρα τη ρυπασμένη περιοχή. Τα υδατοδιαλυτά συστατικά του αργού πετρελαίου και των διυλισμένων προϊόντων του, περιέχουν μια ποικιλία ενώσεων που είναι τοξικές για ένα ευρύ φάσμα θαλασσίων οργανισμών. Τα αυγά, οι προνύμφες των ψαριών και τα νεαρά άτομα είναι γενικά πιο ευαίσθητα στη ρύπανση από πετρελαιοειδή. Το πετρέλαιο προκαλεί διαταραχές στη φυσιολογία και τη συμπεριφορά των οργανισμών, καθώς και ανωμαλίες στην ανάπτυξη των ψαριών, οδηγώντας τελικά στον πρόωρο θάνατό τους. Ακόμη και 1 μg/l (1ppb) πετρελαίου στη θάλασσα μπορεί να βλάψει τους πιο ευαίσθητους οργανισμούς (UNEP, 1988). Ίχνη πετρελαίου στο νερό επηρεάζουν τη σεξουαλική συμπεριφορά των θαλασσίων οργανισμών, τη δυνατότητα προσανατολισμού τους και τους ρυθμούς αφομοίωσης της τροφής. Κάποιες από τις συνέπειες αυτές ενισχύονται από τη χαμηλή αλατότητα και τις υψηλές θερμοκρασίες, ενώ υπάρχει συνεργαστική δράση ανάμεσα στους αρωματικούς υδρογονάνθρακες και κάποια μέταλλα (UNEP, 1988).

Μόλις 0,2 μg/l πετρελαίου στο θαλασσινό νερό μπορούν να επηρεάσουν την αναπαραγωγή ορισμένων αλγών (Steele, 1977). Σε συγκεντρώσεις 2-10 μg/l το πετρέλαιο επηρεάζει την επιβίωση των νυμφών των ψαριών (Vandermeulen & Caruzzo, 1983) και ελαττώνει την παραγωγή αυγών και την πιθανότητα επιτυχούς ωοτοκίας (Kuijthoff et al, 1978). Σε συγκεντρώσεις 20-40 μg/l το πετρέλαιο μπορεί να επιφέρει αλλαγές στη σύσταση του φυτοπλαγκτού, ευνοώντας πχ. τα μικρότερα είδη, ανατρέποντας κατ' αυτό τον τρόπο τις ισορροπίες ολόκληρης της τροφικής αλυσίδας (Lee, 1977). Συγκεντρώσεις της τάξης των 0,1 g/Kg στα ιζήματα μπορούν να επιφέρουν δυσμενείς επιπτώσεις στους βενθικούς οργανισμούς (Elmgren & Frithsen, 1982).

Η πίσσα που εκβράζεται στις παραλίες καταστρέφει τους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς, ενώ έχει υπολογιστεί ότι απαιτούνται 2-3 χρόνια για να αποκατασταθεί μερικώς η παράκτια χλωρίδα (Greenpeace (2006) “ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΕΙΔΗ”). Το πετρέλαιο προσκολλάται στα παράκτια φυτά και δεν ξεπλένεται εύκολα με την παλίρροια. Τα φύλλα κιτρινίζουν και τελικά νεκρώνονται μετά από μερικές μέρες. Όταν η ρύπανση είναι μικρής έκτασης, τα φυτά ξαναβγάζουν νέα φύλλα μέσα σε τρεις εβδομάδες περίπου. Σε περίπτωση όμως σοβαρής ρύπανσης νεκρώνονται τελείως. Τα

ετήσια φυτά νεκρώνονται από την επάλειψη με πετρέλαιο και η επανάκαμψη του οικοσυστήματος απαιτεί δύο με τρεις περιόδους. Τα πολυετή φυτά δείχνουν μια ποικιλία από αντιδράσεις, από ανθεκτικότητα μέχρι νέκρωση ανάλογα με τις συνθήκες και τις ποσότητες του πετρελαίου. Κάποια φυτά εκδηλώνουν επίσης προβλήματα ανθοφορίας (Rostron, 1990). Το πετρέλαιο επηρεάζει το έδαφος στις ακτές με δύο τρόπους. Πρώτον διαπερνά το χώμα και επηρεάζει το ριζικό σύστημα των φυτών, τους μικροβιακούς πληθυσμούς και τη διαθεσιμότητα του οξυγόνου. Δεύτερον, όταν επικαθίσει πετρέλαιο στους βλαστούς των φυτών επηρεάζεται η διάχυση του οξυγόνου προς το ριζικό σύστημα και εμποδίζεται έτσι η οξυγόνωση των ριζών και των μικροοργανισμών του εδάφους. Το πλαγκτόν και ιδιαίτερα το νευστόν που ζει στην επιφάνεια της θάλασσας είναι ιδιαίτερα ευπαθές στις πετρελαιοκηλίδες. Πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων, της τάξης των 50 ng/g, επιταχύνουν τη φωτοσύνθεση επειδή δρουν ίσως ως θρεπτικά. Πάνω από τις συγκεντρώσεις αυτές όμως υπάρχει μια σταδιακή ελάττωση των ρυθμών της φωτοσύνθεσης. Σε συγκεντρώσεις της τάξης των 250 ng/g οι διατροφικές συνήθειες και λειτουργίες κάποιων οργανισμών μεταβάλλονται (Clark, 1986). Μια σειρά από άλλες επιπτώσεις σε πλαγκτονικούς μικροοργανισμούς μαρτυρούν ότι το πετρέλαιο δρα ως δηλητήριο για το πλαγκτόν, παρεμποδίζοντας την ανάπτυξη και τον πολλαπλασιασμό του και οδηγώντας στον πρόωρο θάνατο πολλών οργανισμών. Το ζωπλαγκτόν καταναλώνει μικρά σταγονίδια πετρελαίου και μ' αυτόν τον τρόπο οι υδρογονάνθρακες περνούν σε υψηλότερα τροφικά επίπεδα. Επιπλέον, μη αφομοιώσιμες ουσίες καταλήγουν στο βένθος με τα εκκρίματα των οργανισμών αυτών. Αν και δεν έχει προχωρήσει αρκετά η έρευνα σχετικά με το μεταβολισμό των υδρογονανθράκων από το ζωπλαγκτόν, υπάρχουν ενδείξεις ότι είναι δυνατός ο μεταβολισμός πολλών υδρογονανθράκων από ορισμένους μικροοργανισμούς, αλλά οι μεταβολίτες που προκύπτουν παραμένουν στους οργανισμούς αυτούς και δεν αποβάλλονται στο περιβάλλον (Greenpeace (2006) "ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΕΙΔΗ"). Σε πολλές περιπτώσεις οι μεταβολίτες αυτοί και κάποια ενδιάμεσα προϊόντα είναι καρκινογόνα (Rostron, 1990).

Ως προς τα πουλιά οι επιπτώσεις της ρύπανσης είναι δραματικές. Τα φτερά τους καλύπτονται από πετρέλαιο, δεν μπορούν να πετάξουν, πεθαίνουν από το κρύο γιατί δεν έχουν πλέον το μονωτικό στρώμα των φτερών και των πούπουλων, ενώ όσα επιβιώνουν, δηλητηριάζονται και πεθαίνουν στην προσπάθειά τους να απαλλαγούν από το πετρέλαιο

(Greenpeace (2006) “ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΕΙΔΗ”). Στη Μεσόγειο και σε άλλες θάλασσες με όμοια χαρακτηριστικά λόγω της απουσίας μεγάλων κυμάτων, έντονων καιρικών φαινομένων, αλλά και μεγαλύτερης συγκέντρωσης αλατότητας, η φυσική διάλυση μιας πετρελαιοκηλίδας δυσχεραίνεται. Ο ρυθμός των ποσοτήτων του πετρελαίου που βουλιάζουν ή διαλύονται είναι αργός κατά τη διάρκεια μιας πετρελαιορύπανσης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι συνέπειες μιας πετρελαιοκηλίδας για διαφορετικούς τύπους ακτών.

- Πετρελαιοκηλίδες σε Αμμώδεις ακτές:

Το πετρέλαιο δεν αποκολλάται εύκολα από τις αμμώδεις ακτές. Όταν μάλιστα βρίσκεται ακόμα σε υγρή μορφή, τότε απορροφάται σε μεγαλύτερο βάθος. Εκεί λόγω χαμηλότερης διαθεσιμότητας οξυγόνου δεν ευνοείται η αποδόμηση του πετρελαίου, το οποίο διατηρεί έτσι τις τοξικές του ιδιότητες για μεγαλύτερο διάστημα (Rostron, 1990). Στο ατύχημα του Amoco Cadiz έξω από τις ακτές της Βρετάνης τον Μάρτιο του 1978, κατά το οποίο χύθηκαν 223.000 τόνοι αργού πετρελαίου, ένα μεγάλο μέρος του πετρελαίου μεταφέρθηκε στις εκβολές των παρακείμενων ποταμών και κατακάθισε στα ιζήματα. Πέρα από τις άμεσες επιπτώσεις στην πανίδα, οι χαμηλοί ρυθμοί αποδόμησης, που όπως είπαμε καθιστούν το πετρέλαιο τοξικό για μεγαλύτερο διάστημα, εμπόδισαν την επανάκαμψη των οικοσυστημάτων της περιοχής. Επιπλέον, πετρέλαιο που προέρχονταν από τα ιζήματα συνέχιζε να ρυπαίνει την περιοχή και τον ερχόμενο χρόνο (Clark, 1986). Τα συστατικά του πετρελαίου μπορούν να παραμείνουν στα ιζήματα ακόμη και για δεκάδες ή εκατοντάδες χρόνια αν επικρατούν αναερόβιες συνθήκες (Howarth & Marino, 1991).

- Πετρελαιοκηλίδες σε Βραχώδεις ακτές:

Όπως προκύπτει από την εμπειρία από ατυχήματα όπως αυτό του Torrey Canyon τον Μάρτιο του 1967 στη νοτιοδυτική Αγγλία ή του Tampico Maru στο Μεξικό (Μάρτιος 1957), οι επιπτώσεις των πετρελαιοκηλίδων στα οικοσυστήματα των βραχωδών ακτών είναι ιδιαίτερα σοβαρές. Ένας μεγάλος αριθμός ζώων και τα πιο ευαίσθητα κόκκινα και πράσινα άλγη πεθαίνουν. Σε όλες τις περιπτώσεις υπήρξε διαταραχή του οικοσυστήματος και η επανάκαμψη δεν έγινε δυνατή για πολλά χρόνια εξαιτίας μιας αρχικής εξάλειψης των κυρίαρχων φυτοφάγων οργανισμών, με αποτέλεσμα την υπέρμετρη ανάπτυξη και επικράτηση των αλγών, γεγονός που με τη σειρά του εμπόδισε την επαναποικιοποίηση της

περιοχής με φυτοφάγους οργανισμούς (Wardley-Smith, 1983). Στην περίπτωση του Torrey Canyon, ακόμα και δέκα χρόνια μετά, η πανίδα της περιοχής δεν είχε τον πλούτο και την ποικιλία που είχε πριν το ατύχημα (Clark, 1986).

3.8.2 Κοινωνικο-Οικονομικές επιπτώσεις

Αν και οι άμεσες επιπτώσεις του πετρελαίου στις τροφικές αλυσίδες και δίκτυα θεωρούνται συχνά μικρής κλίμακας, δεν αποκλείονται μακροχρόνιες επιπτώσεις καθώς και φαινόμενα βιοσυσσώρευσης κυρίως καρκινογόνων πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (Greenpeace (2006) “ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΕΙΔΗ”). Οι βενθικοί οργανισμοί που φιλτράρουν την τροφή τους (π.χ μύδια, στρείδια) συσσωρεύουν υδρογονάνθρακες με γοργούς ρυθμούς. Τα στρείδια αποκτούν δυσάρεστη γεύση όταν οι συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων φτάνουν τα 10 ppb. Για τα ψάρια και τα καρκινοειδή οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις κυμαίνονται από 4-300 ppm (Rostron, 1990). Τα θαλασσινά περιέχουν γενικά μικρές ποσότητες καρκινογόνων πολυκυκλικών υδρογονανθράκων (PAH). Η κατανάλωση θαλασσινών εκτιμάται ότι συνεισφέρει 2-3% της συνολικής κατανάλωσης PAH από τρόφιμα. Ακόμη κι αν οι συγκεντρώσεις αυτές των PAH δεν αποτελούν άμεσο κίνδυνο για τον άνθρωπο, οι καρκινογόνες αυτές ουσίες ευθύνονται για όγκους και απολεπίσεις ψαριών από περιοχές με χρόνια ρύπανση με πετρελαιοειδή και όγκους και προκαρκινικές καταστάσεις σε όστρακα αυτών των περιοχών (Clark, 1986).

Μια από τις συνηθισμένες επιπτώσεις σε κοινωνικο-οικονομικό επίπεδο, είναι το πλήγμα που δέχεται ο τουρισμός (Διαμαντή Κατερίνα, (2010), Διπλωματική Εργασία, «Θαλάσσιες Μεταφορές και Θαλάσσια Ρύπανση στη Μεσόγειο»). Πέρα από την θάλασσα, από την ρύπανση πλήττονται συνήθως και οι πιο προσιτές ακτές στον τόπο του ατυχήματος. Και συνήθως τέτοιες περιοχές λόγω της γεωγραφικής τους θέσης έχουν αυξημένη τουριστική ανάπτυξη. Σε τέτοιες περιοχές υπάρχουν δηλαδή συνήθως ξενοδοχειακές μονάδες, καταστήματα και διάφορες τουριστικές επιχειρήσεις. Ρυπαίνοντας επομένως αυτές τις περιοχές, πολλές φορές ανεπανόρθωτα, χάνουν την φυσική τους ομορφιά και την αίγλη τους και παύουν να αποτελούν τον πόλο έλξης για τους τουρίστες. Αυτό θα έχει ως συνέπεια όλες οι παραπάνω τουριστικές επιχειρήσεις να δεχτούν μεγάλο πλήγμα, το οποίο θα μπορούσε να πάρει ακόμη και εθνικές διαστάσεις, αν ληφθεί υπόψη ότι για κάποιες χώρες ο τουρισμός αποτελεί βασικό έσοδο της οικονομίας τους. Επίσης στις παραθαλάσσιες περιοχές που έχουν ρυπανθεί θα πρέπει να σταματήσει η αλιεία ή

τουλάχιστον θα μειωθεί σημαντικά, λόγω των σοβαρότατων οικολογικών προβλημάτων που θα αντιμετωπίζει η περιοχή. Ακόμη και η ανοικοδόμηση κατοικιών σε αυτές τις περιοχές θα σταματήσει πιθανόν, καθώς το μέρος θα χάσει σημαντικά από την προηγούμενη αίγλη του. Τέλος, θα μπορούσαν να αναφερθούν οι «απώλειες ευζωίας», δηλαδή οι χαρές και οι συνήθειες του παρελθόντος που στερούνται κάποιοι άνθρωποι και οι οποίες δεν καλύπτονται από αποζημιώσεις. Τέτοιες είναι:

- 1) οι απώλειες που προέκυψαν από τη διακοπή του ψαρέματος των ιδιωτών από τις ακτές που επηρεάστηκαν από την πετρελαιοκηλίδα,
- 2) από τη διακοπή της κολύμβησης στη θάλασσα, ακόμη και
- 3) η ευδαιμονία που προκαλούσε μια βόλτα στην περιοχή.

Ένας τρόπος υπολογισμού των απωλειών ευζωίας είναι υποθέτοντας ότι το πλεόνασμα των κατοίκων της περιοχής θα ισούται των εξόδων που κάνει ο τουρίστας κάθε μέρα. Γνωρίζοντας επίσης την συχνότητα των επισκέψεων στον τόπο καθώς και τις μέρες που δεν υπάρχει περίπτωση κάποιος να επισκεφθεί το μέρος, γίνονται εύκολα οι υπολογισμοί.

Στις οικονομικές συνέπειες πρέπει να συνυπολογιστεί και το κόστος του καθαρισμού. Είναι σχεδόν αδύνατον να υπολογιστεί το κόστος αυτό βάσει της ποσότητας του πετρελαίου που έχει χυθεί, καθώς ποτέ δύο πετρελαιοκηλίδες δεν είναι ίδιες.

Ακόμα πρέπει να συνυπολογισθεί και το κόστος αποζημίωσης καθώς το 95% των 358 ατυχημάτων που έχουν συμβεί τα τελευταία 10 χρόνια έχουν αποζημιωθεί πλήρως σύμφωνα την CLC 1992. Το ποσοστό αυτό έχει αυξηθεί σε 96% σύμφωνα με τα αυξημένα όρια του 2003. Σύμφωνα με την ανάλυση του συνολικού κόστους των παραπάνω ατυχημάτων προκύπτει ότι τα κόστη διαμοιράστηκαν ισότιμα μεταξύ πλοιοκτητών υπό την CLC 1992 και μεταξύ των πετρελαιοπαραγωγών υπό το 1992 Fund. Ωστόσο δεν υπάρχει γραμμική αναλογία μεταξύ του κόστους μιας πετρελαιοκηλίδας και του μεγέθους ενός τάνκερ. Πράγματι, κάποιες από τις ακριβότερες πετρελαιοκηλίδες προκλήθηκαν από σχετικά μικρά τάνκερ. Σε αυτές τις περιπτώσεις έπαιξε ρόλο το είδος του πετρελαίου που χύθηκε. Τέτοια παραδείγματα είναι οι πετρελαιοκηλίδες από τα ατυχήματα του NAKHODKA και ERIKA. Αντίθετα, 3 από τις μεγαλύτερες πετρελαιοκηλίδες όλων των εποχών (ATLANTIC EMPRESS, 1979 (287.000 t), ABT SUMMER, 1991 (260.000 t) και CASTILLO DE BELLVER, 1983 (252.000 t), δεν είχαν υψηλό κόστος καθαρισμού και ζημιών διότι δεν ρύπαναν τις ακτές.

Όσον αφορά το ρυθμό εξάπλωσης μιας πετρελαιοκηλίδας σχετικά με τις οικονομικές συνέπειες, συνοπτικά, η ίδια ποσότητα πετρελαίου που χάνεται για μερικούς μήνες από ένα χαλασμένο σκάφος κοντά στις ακτές, μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερη βλάβη, μπορεί να απαιτήσει εκτενέστερο καθαρισμό, περισσότερες αποζημιώσεις, μεγαλύτερο κόστος.

3.9 Νομοθεσία για ρύπανση από θαλάσσια ατυχήματα

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει δημιουργήσει έναν μεγάλο αριθμό προγραμμάτων για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος και πολλές συμβάσεις για την πρόληψη και την αντιμετώπιση των ναυτικών ατυχημάτων. Ο ρόλος της στην αντιμετώπιση της θαλάσσιας ρύπανσης είναι νομικά κατοχυρωμένος με την Απόφαση 2850(20/12/2000) του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου του Συμβουλίου, που θέτει ένα κοινοτικό πλαίσιο συνεργασίας για την αντιμετώπιση της ατυχηματικής ή εκούσιας θαλάσσιας ρύπανσης (Ζερβά Π. (2007), Διπλωματική Εργασία «Η οικονομική διάσταση της θαλάσσιας Ρύπανσης από τα ναυτικά ατυχήματα»).

Το Υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας, Αιγαίου και Νησιωτικής Πολιτικής θεσπίζει την ισχύουσα νομοθεσία και τις κυρώσεις που προβλέπονται σχετικά με την πετρελαϊκή ρύπανση. Σύμφωνα με τη νομοθεσία οι υπαίτιοι ρύπανσης της θάλασσας και των ακτών τιμωρούνται ποινικά και διοικητικά, ενώ οι Έλληνες ναυτικοί τιμωρούνται επιπρόσθετα και πειθαρχικά (Γιδαράκος Ε. (2010) «Ρύπανση θάλασσας και Παράκτιων Ζωνών από Ατυχήματα»).

- Ποινικές κυρώσεις: Από τα αρμόδια Ποινικά Δικαστήρια (φυλάκιση από 10 ημέρες μέχρι 5 χρόνια)
- Διοικητικές κυρώσεις: Από τις Λιμενικές αρχές επιβάλλεται πρόστιμο μέχρι 58.694 ευρώ και σε σοβαρά περιστατικά από τον Υπουργό Εμπορικής Ναυτιλίας μέχρι 1.173.881 ευρώ.
- Πειθαρχικές κυρώσεις: Από το Πειθαρχικό Συμβούλιο Εμπορικού Ναυτικού (ΠΣΕΝ) και περιλαμβάνουν την προσωρινή ή οριστική στέρση του ναυτικού επαγγέλματος.
- Αστική Ευθύνη: Έχει εφαρμογή η διεθνώς αποδεκτή Αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει».

3.10 Εκτίμηση Επικινδυνότητας ^[23]

Στην καθημερινή ομιλία ο όρος «κίνδυνος» χρησιμοποιείται πολύ αόριστα και συχνά συγχέεται με τον όρο «επικινδυνότητα». Οι δύο όροι έχουν διαφορετική έννοια και μπορούν να οριστούν ως (<http://www.tziola.gr/files/ch-18549046.pdf>):

- 1) Κίνδυνος, είναι μία ενέργεια που ενδέχεται να βλάψει την ανθρώπινη υγεία ή και το περιβάλλον
- 2) Επικινδυνότητα, είναι η πιθανότητα μια συγκεκριμένη επίπτωση να πραγματοποιηθεί εντός δεδομένης χρονικής περιόδου ή υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Η επικινδυνότητα μπορεί να οριστεί και ως η συχνότητα ενός περιστατικού επί τις συνέπειες του περιστατικού.

Οι κίνδυνοι που μπορούν να προκύψουν κατά τη λειτουργία μιας εγκατάστασης ή κατά τη πλεύση ενός τάνκερ όπου διακινούνται ή/και παράγονται επικίνδυνες ουσίες, μπορεί να οφείλονται σε

- 1) Αστοχία εξοπλισμού,
- 2) Λειτουργικές ανωμαλίες,
- 3) Ανθρώπινο παράγοντα,
- 4) Εξωτερικές αιτίες, ή φυσικά φαινόμενα.

Η Εκτίμηση της Επικινδυνότητας περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- 1) Αναγνώριση των κινδύνων που εμπεριέχει η λειτουργία μιας εγκατάστασης ή η διαδρομή ενός πλοίου, εξαιτίας των ιδιοτήτων τους και των συνθηκών παραγωγής και διακίνησης των υλικών και των προϊόντων.
- 2) Ανάλυση της επικινδυνότητας έκτακτων περιστατικών που μπορούν να προκύψουν και να θέσουν σε κίνδυνο ανθρώπινο δυναμικό και όχι μόνο. Γίνεται στην ουσία εκτίμηση των συνεπειών για τα σενάρια ατυχημάτων που έχουν προσδιοριστεί.
- 3) Ανάπτυξη συστήματος ασφαλούς διαχείρισης για την πρόληψη της εκδήλωσης ατυχήματος ή/και τον περιορισμό των επιπτώσεών του.

Οι συνηθέστερες μέθοδοι αναγνώρισης κινδύνων και εκτίμησης επικινδυνότητας που χρησιμοποιούνται είναι οι ακόλουθες τρεις:

- 1) Ανάλυση «Τι θα συμβεί αν...» (What if... analysis), βασίζεται σε μια προσέγγιση ανταλλαγής ιδεών κατά την οποία μία ομάδα έμπειρων ατόμων που γνωρίζουν καλά

τη μονάδα/εγκατάσταση, θέτουν ερωτήματα του τύπου «Τι θα συμβεί αν...». Αποτελεί μία αρκετά ελεύθερη αντιμετώπιση και γι' αυτό χρησιμοποιείται πολύ.

- 2) Ανάλυση HAZOP (Hazard and Operability study), βασίζεται στη χρήση μιας σειράς «ειδικών λέξεων» με τις οποίες γίνεται με τυποποιημένο τρόπο η αναγνώριση πιθανών κινδύνων. Σε αντίθεση με την ανάλυση «Τι θα συμβεί αν..», η ανάλυση HAZOP αποτελεί μια πολύ συστημική προσέγγιση στην αναγνώριση κινδύνου.
- 3) Ανάλυση FMEA (Failure Modes and Effects Analysis), βασίζεται στην αξιολόγηση πιθανής αστοχίας εξοπλισμού και στον αντίκτυπο που μπορεί να έχει σε ολόκληρη την μονάδα/εγκατάσταση.

3.11 Τρόποι Αντιμετώπισης Πετρελαιοκηλίδων

3.11.1 Εισαγωγή

Το παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζει όλους τους τρόπους αντιμετώπισης ατυχήματος πετρελαιοκηλίδας (Καθ. Τριανταφύλλου Γ. (2004), Πετρελαιοκηλίδες, περιβάλλον και ανάπτυξη).

Η καλύτερη στρατηγική για την αντιμετώπιση της ρύπανσης που προκαλείται από ατύχημα διαρροής πετρελαίου είναι η πρόληψη. Σε περίπτωση που δεν έχει υπάρξει πρόληψη ή η πρόληψη δεν έφερε τα αναμενόμενα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο οι μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να περιοριστεί η ρύπανση και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον. Σε περίπτωση διαρροής πετρελαίου είναι προφανές ότι το πρώτο πράγμα που αφορά η αντιμετώπιση ενός ατυχήματος είναι να σταματήσει η περαιτέρω διαρροή του ρυπαντή στην πηγή της. Το πλέον σημαντικό ζήτημα είναι να περιοριστεί μια πετρελαιοκηλίδα πριν αυτή πλήξει τις περιοχές με μεγάλο δείκτη επικινδυνότητας (όπως ακτές).

Η αντιμετώπιση της ρύπανσης που προκαλείται από ένα ατύχημα διαρροής πετρελαίου χωρίζεται σε δύο φάσεις: α) στις ενέργειες απορρύπανσης στη θάλασσα και β) στις ενέργειες απορρύπανσης των ακτών αν αυτές έχουν προσβληθεί από το ρυπαντή.

Η αντιμετώπιση της ρύπανσης που προκαλείται από ένα ατύχημα διαρροής πετρελαίου όσον αφορά τις μεθόδους καθαρισμού χωρίζεται σε δύο είδη: α) οι μηχανικές μέθοδοι

καθαρισμού και β) οι χημικές. Οι δύο αυτές μέθοδοι συνδυάζονται στην πλειονότητα των περιπτώσεων διαρροής. Είναι γεγονός ότι τα μηχανικά μέσα μέχρι σήμερα είναι πιο αποτελεσματικά, ωστόσο πολλές φορές λόγω καιρικών συνθηκών ή/και βλαβών των μηχανικών μέσων η ανάκτηση ενός ρυπαντή μέσα από το θαλάσσιο περιβάλλον είναι δυνατή μέσω μόνον χημικών μέσων.

3.11.2 Μηχανικές Μέθοδοι Καθαρισμού

Οι μηχανικές μέθοδοι καθαρισμού στηρίζονται στη συγκέντρωση, συγκομιδή και ανάκτηση του πετρελαίου από την επιφάνεια της θάλασσας και είναι οι πλέον διαδομένοι μέθοδοι στην πρώτη φάση αντιρρυπαντικής επιχείρησης καθαρισμού ενός ατυχήματος διαρροής. Οι μέθοδοι έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- 1) Επένδυσή μεγάλου χρηματικού κεφαλαίου.
- 2) Ανάγκη τεχνικής υποστήριξης.
- 3) Η απόδοσή τους επηρεάζεται έντονα από τις καιρικές συνθήκες.
- 4) Η σωστή πρόβλεψη της εξέλιξης πολλών παραμέτρων είναι σημαντική.
- 5) Πρόβλημα διάθεσης συλλεγέντος υλικού και ρύπου.

Ο μηχανικός καθαρισμός συνήθως χρησιμοποιείται παράλληλα με φράγματα που βοηθούν στον περιορισμό της έκτασης της πετρελαιοκηλίδας και κατά συνέπεια της έκτασης της ρύπανσης και της συγκέντρωσης του ρύπου για την ευκολότερη περισυλλογή του.

- Φράγματα

Τα φράγματα είναι συσκευές (πλωτά φράγματα) που έχουν ειδικά κατασκευαστεί για τον έλεγχο της κίνησης του πετρελαίου στην επιφάνεια της θάλασσας.

Τα φράγματα αποτελούνται κατασκευαστικά από τέσσερα βασικά μέρη:

- 1) Το μέρος που επιπλέει (πλωτήρας).
- 2) Το μέρος που συγκρατεί το πετρέλαιο (ποδιά).
- 3) Το έρμα
- 4) Τους εντατήρες

Τα φράγματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για:

- 1) Εγκλωβισμό Κηλίδων Πετρελαίου

- 2) Συγκέντρωση Κηλίδων Πετρελαίου
- 3) Κατεύθυνση Κηλίδων Πετρελαίου
- 4) Οι κυριότεροι αντικειμενικοί σκοποί για τους οποίους χρησιμοποιούνται είναι για τη συγκέντρωση του πετρελαίου ώστε να διευκολυνθεί η ανάκτηση από τις κατάλληλες συσκευές και για να προστατεύσουμε ορισμένες περιοχές των ακτών από πετρέλαιο που διέρρευσε ή επανέπλευσε στην επιφάνεια της θάλασσας.

Τα φράγματα αναπτύσσονται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να εμποδίζεται η εξάπλωση του πετρελαίου στην επιφάνεια της θάλασσας. Η χρησιμοποίηση της μεθόδου εγκλωβισμού βοηθά στον περιορισμό του πετρελαίου που διέρρευσε κοντά στην πηγή διαρροής και στην παρεμπόδιση της εκ νέου προσβολής μιας ακτής από πετρέλαιο το οποίο έχει εγκλωβιστεί σε παραλίες μικρούς κόλπους και εσοχές.



Εικόνα 3. 9 Φωτογραφία πάνω από το ναυάγιο του ABT Summer όπου και χρησιμοποιήθηκαν φράγματα (πηγή: Anne Casselman (2009) 10 Biggest Oil Spills in History, No, the 1989 Exxon-Valdez spill doesn't make the list, Popular Mechanics)

Η απόδοση ενός φράγματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν δηλαδή την Ταχύτητα Ανέμου, την Ταχύτητα Ρεύματος και το Ύψος Κύματος.

Υπάρχει περίπτωση να έχουμε διαρροή και πετρελαιοκηλίδα άλλα να μην διαθέτουμε φράγματα. Μπορούμε όμως να αυτοσχεδιάσουμε και να κατασκευάσουμε φράγματα από οποιοδήποτε υλικό έχουμε στη διάθεσή μας. Παρόλο που τέτοιες μέθοδοι χρησιμοποιούνται ως προσωρινά μέσα για να συγκρατήσουν ή για απόκλιση μπορεί να

έχουν πολύ καλά αποτελέσματα σε ήρεμα νερά και κλειστούς κόλπους. Τα αυτοσχέδια φράγμα τα μπορούν να κατασκευαστούν από ξύλο, πλαστικούς σωλήνες, σωλήνες κατάσβεσης πυρκαγιάς, λάστιχα αυτοκινήτων και άδεια βαρέλια 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.

Σύμφωνα με την αρχή που χρησιμοποιείται για την περισυλλογή του πετρελαίου από την επιφάνεια της θάλασσας προσφέρει δυνατότητα διάκρισης. Έτσι μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες μηχανημάτων:

- 1) Μηχανικοί Πετρελαιοσυλλέκτες

Οι συσκευές αυτού του τύπου βασίζονται στις ιδιότητες των πετρελαίων και των μιγμάτων πετρελαίου/νερού, καθώς και στη διαφορά πυκνότητας μεταξύ ρύπου και του νερού.

- 2) Ελαιόφιλοι Πετρελαιοσυλλέκτες

Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στα χαρακτηριστικά ορισμένων υλικών που έχουν μεγαλύτερη συγγένεια στο πετρέλαιο παρά στο νερό. Τα υλικά αυτά είναι γνωστά ως ελαιόφιλα.

- Φράγματα περισυλλογής

Τέλος υπάρχει μία ακόμα κατηγορία μηχανικής μεθόδου αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδας, η μικτή μέθοδος με τα Φράγματα Περισυλλογής: Οι μονάδες αυτές δεν είναι δυνατόν να περιληφθούν σε καμία από τις κατηγορίες που αναφέρθηκαν, αφού είναι συνδυασμός φράγματος και πετρελαιοσυλλέκτη. Τα φράγματα περισυλλογής όπως αποκαλούνται οι μονάδες ανάκτησης αυτού του τύπου, αποτελούνται από ένα μέρος φράγματος με ενσωματωμένη συσκευή ανάκτησης πετρελαίου ή ξεχωριστό πετρελαιοσυλλέκτη, που συνδυάζεται με το φράγμα.

κατά την επιλογή θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας το σημείο εντοπισμού της κηλίδας και την ταχύτητα προσέγγισης των σκαφών ώστε να προλάβουμε την κηλίδα πριν αυτή πλήξει τις ακτές. Ακόμη λαμβάνουμε υπόψη μας την κατάσταση της θάλασσας και το μέγεθος ή την έκταση της ρύπανσης.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των σκαφών αυτών είναι η χρήση τους στην ανοιχτή θάλασσα. Η απόδοσή τους είναι αρκετά καλύτερη από αυτή των συσκευών περισυλλογής και μπορούν να χαρακτηρισθούν ανάλογα με το σύστημα ανάκτησης του ρύπου που χρησιμοποιούν.

Η χρήση τους περιορίζεται στην ανοιχτή θάλασσα αλλά και σε κλειστούς κόλπου με αρκετό βάθος.



Εικόνα 3. 10 Μηχανικός Πετρελαιοσυλλάκτης skimmer (Πηγή Wikipedia “Skimmer”)

- 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. Οι μεγαλύτεροι τύποι σκαφών διαθέτουν και δεξαμενές απόθεσης του πετρελαίου ενώ είναι ικανά για μεγαλύτερους ρυθμούς ανάκτησης, καλύτερη απόδοση και μπορούν να λειτουργήσουν και σε ταραγμένη θάλασσα. Η χρήση τους περιορίζεται στην ανοιχτή θάλασσα αλλά και σε κλειστούς κόλπου με αρκετό βάθος. Κατά την επιλογή τρόπου αντιμετώπισης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη μας το σημείο εντοπισμού της κηλίδας και η ταχύτητα προσέγγισης των σκαφών ώστε να καταπολεμιστεί η κηλίδα ει δυνατόν πριν αυτή πλήξει τις ακτές. Ακόμη λαμβάνεται υπόψη η κατάσταση της

θάλασσας και το μέγεθος ή έκταση της ρύπανσης. Υπάρχουν συνέχεια νέες σχεδιάσεις και το ενδιαφέρον για τα μέσα αυτά συνεχώς αυξάνει καθώς είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε πολύ δυσμενής καιρικές συνθήκες.

- Απορροφητικά υλικά

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. Τα απορροφητικά υλικά διασκορπίζονται (με εξαίρεση τα απορροφητικά φράγματα) στην κηλίδα όπου αφήνονται να κορεστούν από το πετρέλαιο και στη συνέχεια περισυλλέγονται δηλαδή χρησιμοποιούνται συνήθως σε συνδυασμό και με άλλα μέσα απορρύπανσης. Η απαιτούμενη ποσότητα απορροφητικών που απαιτείται για την καταπολέμηση σε μεγάλες κηλίδες καθιστούν τη χρήση δυνατή πρακτικά μόνο σε μικρές και μεσαίου μεγέθους κηλίδες (λίγοι τόνοι μέχρι μερικές δεκάδες τόνοι). Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιούνται για να αντιμετωπισθεί ρύπανση διαφορετικών μορφών, για τις οποίες άλλες μέθοδοι καταπολέμησης δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν λόγω τεχνικών ή οικολογικών λόγων. Τέτοιες περιπτώσεις είναι η καταπολέμηση πετρελαίων μεγάλου ιξώδους και συνήθως κοντά στις ακτές. Τα απορροφητικά που επιλέγονται θα πρέπει να έχουν καλές ελαιοφιλικές ιδιότητες. Αποτελεσματικά απορροφητικά είναι αυτά που είναι αβύθιστα και απωθούν το νερό. Επιπλέον μικρός χρόνος κορεσμού, μεγάλη απορροφητική ικανότητα (π.χ 70 φορές το βάρος τους) και επαρκή αντοχή για να συγκρατούν το πετρέλαιο και να αντέχουν κατά την ανάκτηση είναι βασικά χαρακτηριστικά για την απόδοση και αποτελεσματικότητά τους.

3.11.3 Χημικές μέθοδοι καθαρισμού

- Χημικές διασκορπιστικές ουσίες

Τα διασκορπιστικά είναι μίγματα στα οποία περιλαμβάνονται επιφανειακά ενεργές ουσίες οι οποίες μειώνουν την επιφανειακή τάση μεταξύ νερού και πετρελαίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη διάσπαση μιας πετρελαιοκηλίδας σε πολύ μικρά σταγονίδια που διασκορπίζονται εν συνεχεία στην υδάτινη στήλη, λόγω της φυσικής κίνησης του νερού. Τα διασκορπιστικά αποτελούνται από δύο κύρια συστατικά. Ένα προσκολλητικό επιφανείας και έναν κατάλληλο διαλύτη. Τα προσκολλητικά είναι μόρια τα οποία έλκονται από δύο

διαφορετικά υγρά, τα οποία δεν αναμιγνύονται, και δρουν ως διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους. Ένα μέρος των ουσιών αυτών έχει ελαιοφιλικές ιδιότητες ενώ ταυτόχρονα έλκεται από το νερό. Ο διαλύτης συντελεί στην διάσπαση του πετρελαίου σε σταγονίδια. Σε περιπτώσεις που οι συνθήκες θάλασσας είναι δύσκολες και η χρήση μηχανικών μέσων δεν ενδύκνεται, τα διασκορπιστικά είναι η μόνη μέθοδος η οποία θα διαλύσει το πετρέλαιο ώστε να αποφευχθεί η ρύπανση των ακτών. Η μεγάλη διαφορά σε σχέση με τις μηχανικές μεθόδους είναι ότι το πετρέλαιο δεν απομακρύνεται από το θαλάσσιο περιβάλλον, απλώς διασκορπίζεται σε αυτό, μειώνοντας έτσι τις επιπτώσεις. Η εφαρμογή τους στην επιφάνεια της κηλίδας θα πρέπει να αρχίζει το συντομότερο δυνατό, από τη στιγμή που θα ληφθεί η απόφαση για χημικό διασκορπισμό, όσο το ποσοστό γαλακτωματοποίησης και η διάσπαση της κηλίδας σε μικρότερες (διάσπαρτα κομμάτια) παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα. Ιδιαίτερα στη Μεσόγειο θάλασσα, (που είναι μια ευαίσθητη περιοχή), η χρησιμοποίηση διασκορπιστικών στην παράκτια ζώνη δεν θεωρείται η καλύτερη επιλογή για την καταπολέμηση μιας σοβαρής ρύπανσης. Ωστόσο επιλέγεται, αν ύστερα από σοβαρές οικολογικές μελέτες προκύψει ότι είναι αποδεκτή η τοπική χρησιμοποίησή τους.

Η χρήση τους, τέλος, παραμένει ένα αμφιλεγόμενο ζήτημα σε πολλές χώρες παρόλο που η μέθοδος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε ορισμένες περιπτώσεις. Αιτία είναι η τοξικότητά τους που τα καθιστά επικίνδυνα για πολλούς θαλάσσιους οργανισμούς. Σε πολλές χώρες όπως και στην Ελλάδα η χρήση τους θεωρείται ως η τελευταία επιλογή στην αντιμετώπιση της ρύπανσης, όταν άλλες μέθοδοι δεν δύναται να εφαρμοστούν.

- Άλλες χημικές ουσίες

Μερικά από τα προϊόντα αυτά έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί με επιτυχία κατά τη διάρκεια εργασιών καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων, ενώ άλλα χρησιμοποιούνται σπάνια και επί του παρόντος βρίσκονται στο στάδιο ανάπτυξης. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους ή χρησιμοποιούνται προκειμένου να καταστήσουν δυνατή την ανάκτηση του πετρελαίου με μηχανικά μέσα. Αναφέρονται παρακάτω τα κυριότερα από αυτά τα χημικά.

- 1) Μέσα Καταβύθισης (Sinking Agents) Είναι ειδικές ουσίες που εφαρμόζονται στην επιφάνεια της κηλίδας και απορροφούν τον ρύπο στην επιφάνειά τους.
- 2) Πτητικά Μέσα, Στερεοποιητές (Viscoelastic Additives) Στόχο έχουν την αύξηση του ιξώδους των πετρελαίων ώστε να γίνει ευκολότερη η ανάκτησή τους.

- 3) Απογαλακτοποιητές (Emulsion Breakers) Χρησιμοποιούνται για να διασπάσουν τα γαλακτώματα που δημιουργούνται κατά την παραμονή του πετρελαίου στη θάλασσα.
- 4) Μεταβολείς Επιφανειακής Τάσης (Gelling Agents) Τα προϊόντα αυτά εκτοξευόμενα στο νερό γύρω από την κηλίδα παρεμποδίζουν την εξάπλωση του πετρελαίου.
- 5) Βιολογικά Μέσα (Bioremediation Chemicals) Είναι ένας συνδυασμός ενζύμων, μικροοργανισμών και θρεπτικών συστατικών που βοηθούν στην αύξηση του ρυθμού της φυσικής αποικοδόμησης του πετρελαίου. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε ακτές κατά την τεχνική της Βιοαποικοδόμησης που αναφέρεται στη συνέχεια.
- 6) Μέσα Ανάφλεξης (Burning Agents) Είναι ουσίες που εισάγονται στις κηλίδες ώστε να καταστήσουν δυνατή την ανάφλεξη του πετρελαίου πάνω στην ακτή ή στη θάλασσα. Χρησιμοποιούνται κατά την εφαρμογή της τεχνικής της Επί-Τόπου Καύσης που συζητείται στη συνέχεια.
- 7) Neutralizing Agents Οι ουσίες αυτές αντιδρούν χημικά με το πετρέλαιο και τελικά σχηματίζουν λιγότερο τοξικές ενώσεις με στόχο να μειώσουν τις επιπτώσεις της ρύπανσης.
- 8) Herders Καλούνται επίσης και Collecting Agents. Δρουν επηρεάζοντας την επιφανειακή τάση του πετρελαίου και προκαλούν τη συγκέντρωση του ρύπου σε καθορισμένο σημείο περισυλλογής.

3.11.4 Φυσική αποδόμηση

Φυσική Αποδόμηση (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 κλάσματα διαρρέουν στην ανοικτή θάλασσα, μακριά από ακτές και σε καταστάσεις θαλασσοταραχής.

3.11.5 Εναλλακτικές μέθοδοι

Υπάρχουν τεχνικές που μελετούνται και προωθούνται τα τελευταία χρόνια ως εναλλακτικές ή συμπληρωματικές παρεμβάσεις στην απορρύπανση. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι η Βιοαποικοδόμηση (Bioremediation) και η μέθοδος της Επί Τόπου Καύσης (In-Situ Burning).

- Βιοαποικοδόμηση

Η βιοαποικοδόμηση είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα σύνολο διαδικασιών (προσθήκη ουσιών), που χρησιμοποιούνται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να αυξήσουν τους ρυθμούς της φυσικής αποικοδόμησης του πετρελαίου. Μια από τις σημαντικότερες μακροχρόνιες φυσικές διαδικασίες για την αφαίρεση του πετρελαίου από το θαλάσσιο περιβάλλον, είναι η αποικοδόμησή του από φυσικούς μικροοργανισμούς.

Στη θάλασσα, για την καταπολέμηση πετρελαιοκηλίδων, η χρησιμότητα της μεθόδου εξακολουθεί να μην είναι καθορισμένη. Στην ξηρά η εφαρμογή της μεθόδου γίνεται σε κλειστά ή προστατευόμενα περιβάλλοντα. Επίσης σε ακτές όπου είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθούν μηχανικά ή άλλα μέσα, όπως σε ευαίσθητα οικοσυστήματα η βιοαποικοδόμηση μπορεί να θεωρηθεί ως η μοναδική πιθανή επέμβαση καθαρισμού.

- Επί τόπου καύση

Ο όρος χαρακτηρίζει τη διαδικασία της καύσης κηλίδων πετρελαίου στην θάλασσα, ή κοντά στο σημείο διαρροής του ρύπου. Η καύση είναι μια μέθοδος η οποία έχει τη δυνατότητα να απομακρύνει μεγάλες ποσότητες πετρελαίου από την επιφάνεια της θάλασσας. Πρακτικά προβλήματα όμως περιορίζουν τις δυνατότητες της χρήσης της μεθόδου αυτής. Τέτοια προβλήματα είναι η ανάφλεξη, η διατήρηση της καύσης, οι μεγάλες ποσότητες καπνού στην ατμόσφαιρα, η δημιουργία και πιθανή βύθιση εξαιρετικά παχύρρευστων υπολειμμάτων και λόγοι ασφαλείας.

3.11.6 Καθαρισμός ακτών

Πολλές φορές η επιχείρηση απορρύπανσης στη θάλασσα είναι αδύνατο να εμποδίσει τμήμα της πετρελαιοκηλίδας, μικρό ή μεγάλο, να φθάσει στις ακτές. Οι επιχειρήσεις απορρύπανσης των ακτών, ανεξάρτητα της μεθόδου που χρησιμοποιείται, και προκειμένου να υπάρξει το επιθυμητό αποτέλεσμα, σχεδιάζονται με γνώμονα ορισμένες βασικές αρχές. Οι προσπάθειες απορρύπανσης πρέπει να ακολουθούν την παρακάτω σειρά εργασιών:

1^η Φάση: Περισυλλογή μεγάλων ποσοτήτων και ποσοτήτων που εξακολουθούν να επιπλέουν. Ο λόγος είναι το ενδεχόμενο οι ποσότητες αυτές να ξαναρυπάνουν τις περιοχές που έχουν ήδη καθαριστεί, να ρυπάνουν άλλες πιο ευαίσθητες περιοχές ή και τμήματα ακτής που δεν έχουν ρυπανθεί.

2^η Φάση: Περισυλλογή του πετρελαίου που επικάθισε στην ακτή.

3^η Φάση: Περισυλλογή μικρών διάσπαρτων πετρελαιοκηλίδων.

Όλες οι επιχειρήσεις καθαρισμού πρέπει να προγραμματίζονται και να συντονίζονται με ακρίβεια, αν μια τεχνική που εφαρμόζεται αδυνατεί να έχει τα αναμενόμενα αποτελέσματα θα πρέπει να επανεκτιμάται η εξέλιξή της και αν κριθεί απαραίτητο να αντικαθίσταται από άλλη.

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται. Αναλύονται όσες θεωρούνται αποδεκτές σύμφωνα με τις οδηγίες του ευρωπαϊκού οργανισμού REMPEC:

- 1) Χειρονακτική Περισυλλογή Υλικών (που προσβλήθηκαν από το πετρέλαιο): Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλους τους τύπους ακτών, για την περισυλλογή πετρελαίου και ρυπασμένου υλικού, ιδιαίτερα σε προσβολές μικρής και μεσαίας έκτασης.
- 2) Μηχανική Περισυλλογή Υλικών (που προσβλήθηκαν από το πετρέλαιο): Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε ακτές που είναι προσπελάσιμες από την ξηρά και μπορούν να αντέξουν την κίνηση βαρέων οχημάτων
- 3) Χρησιμοποίηση Βυτιοφόρων: Η μέθοδος αυτή είναι πολύ διαδεδομένη στα περισσότερα σοβαρά περιστατικά ρύπανσης και συνίσταται στη απομάκρυνση του πετρελαίου που είναι συσσωρευμένο σε εσοχές της ακτής και των ποσοτήτων που επιπλέουν κοντά στην ακτογραμμή.
- 4) Χρήση Μηχανημάτων Καθαρισμού Ακτών: Είναι ειδικά κατασκευασμένα μηχανήματα για τον καθαρισμό της άμμου και των χαλικιών από κομμάτια στερεοποιημένου πετρελαίου.
- 5) Αμμοβολή: Η μέθοδος πρέπει να περιορίζεται σε τεχνικές κατασκευές στις οποίες απαιτείται να γίνει τέλειος καθαρισμός. Περιστασιακά όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλες πέτρες ή βράχια που όμως δεν είναι οικολογικά ευαίσθητα.
- 6) Πλύση με Χαμηλή Πίεση: Για την αφαίρεση ελαφριού και όχι πολύ παχύρρευστου πετρελαίου από κάθε μορφή ακτής. Η μέθοδος δεν επηρεάζει σημαντικά το υπόστρωμα και έτσι είναι κατάλληλη και για οικολογικά ευαίσθητες περιοχές.
- 7) Πλύση με Υψηλή Πίεση: Η μέθοδος χρησιμοποιείται σε βραχώδεις ακτές ή σε μεγάλες πέτρες και τεχνικές κατασκευές.

- 8) Καθαρισμός με Ατμό: Η μέθοδος πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο όταν είναι απολύτως αναγκαίο για τον καθαρισμό πολύ παχύρρευστων πετρελαιοειδών και αφού γίνει εκτίμηση των πιθανών επιπτώσεων στο περιβάλλον. Είναι πολύ πιθανό να καταστραφεί κάθε ζωντανός οργανισμός στην επιφάνεια που καθαρίζεται για αυτό η χρήση συνίσταται σε τεχνικές κατασκευές.
- 9) Καύση: Η μέθοδος αυτή σπάνια χρησιμοποιείται γιατί είναι πολύ επιβλαβής για το περιβάλλον και επιπλέον δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική, διότι η καύση συνήθως είναι ατελής.
- 10) Μετατόπιση Υλικών (που προσβλήθηκαν από το πετρέλαιο) στη Θάλασσα: Διαδεδομένη μέθοδος για τον καθαρισμό ακτών με βότσαλα ή χαλίκια, μεγάλες πέτρες οι οποίες δεν έχουν ρυπανθεί σοβαρά από το πετρέλαιο. Η μέθοδος
- 11) Ανάμιξη με το Υπόστρωμα: Εφαρμόζεται στις περιπτώσεις εκείνες ακτών με χαλίκια ή άμμο οι οποίες δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο οικολογικό ή τουριστικό ενδιαφέρον. Το πετρέλαιο αφήνεται να αποδομηθεί υπό την επίδραση των φυσικών φαινομένων.
- 12) Αποφυγή Επέμβασης: Υπάρχουν περιπτώσεις η μόνη λύση που έχουμε είναι η αποφυγή της επέμβασης .Δεν γίνεται καμία ενέργεια και το πετρέλαιο αφήνεται στην φυσική αποικοδόμησή του. Η περιοχή επιθεωρείται περιοδικά για να ελέγχεται ο ρυθμός της αποικοδόμησης του πετρελαίου.

Είναι φανερό ότι γίνεται επιλογή της μεθόδου καθαρισμού ανάλογα με το τι μορφής είναι η ακτή η οποία έχει προσβληθεί από πετρέλαιο.



Εικόνα 3. 11 Χειρωνακτικός καθαρισμός ακτής που έχει πληγεί από πετρελαιοκηλίδα (πηγή Wikipedia «Πετρελαιοκηλίδα»)

3.11.7 Κόστος καθαρισμού

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:

-Οι περισσότεροι ειδικοί συμφωνούν ότι ο καθοριστικότερος παράγοντας για το κόστος είναι ο *τόπος 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, οργανώσεις και πολιτεία στους υπευθύνους για άμεσες, δραστικές και δαπανηρές μεθόδους καθαρισμού, δεν έχουν το καλύτερο 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 (Bioremediation)
- Κόστος Τεχνικής Επιτόπου Καύσης (In-Situ Burning)
- Κόστος Μηχανικού Καθαρισμού Ακτών
- Πρόσθετο Κόστος για οποιαδήποτε Μέθοδο
- Κόστος Αποκατάστασης Χλωρίδας και Πανίδας
- Κόστος Αποκατάστασης λόγω Καταστροφής Φυσικών Πόρων
- Κόστος Έρευνας
- Περιουσιακές, Οικονομικές, Περιβαλλοντολογικές Αποζημιώσεις
- Πρόστιμα και Ποινές

Παραδείγματα Κόστους Καθαρισμού:

Αναλύσεις κόστους της βάσης the International Oil Spill Database υποδεικνύουν ότι το κόστος καθαρισμού ποικίλει σημαντικά. Αναφέρονται ορισμένα παραδείγματα.

Peruvian Reefer: Τον Απρίλιο του 1991, στο λιμάνι του Helinsborg στη Σουηδία, για τον καθαρισμό 20-50 τόνων δαπανήθηκαν συνολικά \$702000 ή \$1759/τόννο.

Mystery Spill: Ο καθαρισμός 51 τόνων πίσσας από άγνωστη πηγή στο Ισραήλ τον Αύγουστο του 1992 κόστισε \$113700 συνολικά ή \$2228,52/τόννο.

Era: Ο καθαρισμός 296 τόνων τον Αύγουστο του 1992 στην Αυστραλία, λιμάνι του Bonython, έφθασε τα \$1.137.000 ή \$3842,28/τόννο.

Presidente Arturo Umberto Illia: 629 τόνοι τον Οκτώβριο του 1992 στο Puerto Rosales Terminal της Αργεντινής κόστισε \$568000 συνολικά, ή \$904,43/τόννο.

4. Μοντελοποίηση Πετρελαιοκηλίδων

4.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 4 εισάγεται η έννοια της μοντελοποίησης των πετρελαιοκηλίδων (ITac (2008), Technical Paper “Use of Models in Oil Spill Response”) και παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των μοντέλων, περιγράφοντας τα είδη, τις κατηγορίες και τα χαρακτηριστικά τους.

Τα μοντέλα εκτίμησης συμπεριφοράς των πετρελαιοκηλίδων χρησιμοποιούνται για να προβλεφθεί η πιθανή τύχη και η συμπεριφορά των πετρελαιοκηλίδων στο νερό. Είναι χρήσιμο για την ενίσχυση της ετοιμότητας σε περίπτωση ατυχήματος διαρροής πετρελαίου κατά την προετοιμασία σχεδίου έκτακτης ανάγκης, καθώς και για την ανάπτυξη και την προετοιμασία των ασκήσεων αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων. Η μοντελοποίηση του ατυχήματος και της περαιτέρω κίνησης της πετρελαιοκηλίδας μπορεί επίσης να είναι ένα ζωτικής σημασίας εργαλείο για την υποστήριξη των αρχικών σταδίων των πραγματικών εργασιών απόκρισης σε περιστατικά θαλάσσιας ρύπανσης και να συμπληρώσει, να λειτουργήσει επικουρικά όσον αφορά την παρακολούθηση κατά τη διάρκεια περιόδων όπου η οπτική παρακολούθηση μπορεί να μην είναι διαθέσιμη.

Η τροχιά μιας πετρελαιοκηλίδας μπορεί να υπολογιστεί από την επεξεργασία των δεδομένων σχετικά με τις τρέχουσες συνθήκες και τον άνεμο σχεδιασμένα πάνω σε ένα σύστημα αναφοράς. Ιστορικά η πληροφορία αυτή συνηθιζόταν να καταγράφεται στο χέρι σε ναυτικούς χάρτες, όπου και γινότουσαν πρόχειρες εκτιμήσεις σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Με την έλευση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, λογισμικό μοντελοποίησης αναπτύχθηκε για να προβλέψει την πορεία της πετρελαιοκηλίδας και την εκτίμηση της τύχης και της συμπεριφοράς των πετρελαιοκηλίδων με βάση πολύπλοκους αλγόριθμους.

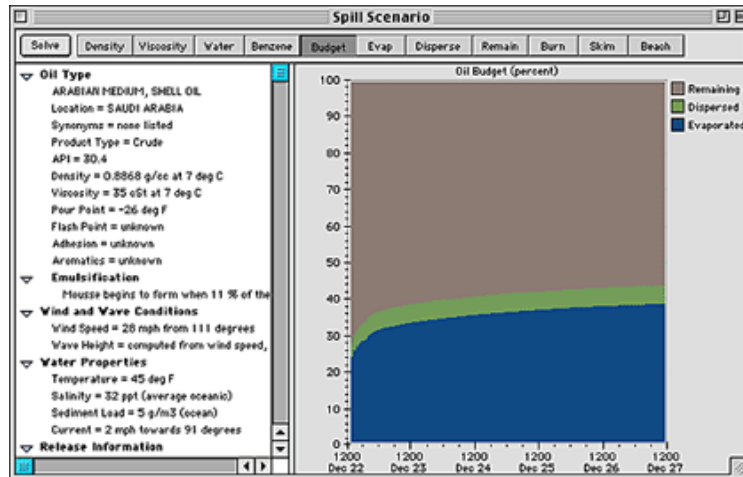
Πολλά μοντέλα εκτίμησης τροχιάς πετρελαιοκηλίδας έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία 40 χρόνια. Ποικίλλουν ως προς την πολυπλοκότητα, την εφαρμοσιμότητα στην τοποθεσία και την ευκολία χρήσης. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες μοντέλων πετρελαιοκηλίδας. Η πρώτη κατηγορία είναι τα μοντέλα που εκτιμούν - υπολογίζουν τις αλλαγές που υφίσταται το προφίλ του πετρελαίου (οι ιδιότητές του) με την πάροδο του χρόνου όταν αυτό χυθεί στο θαλάσσιο περιβάλλον, αλλά δεν προβλέπουν ενδεχόμενη μετακίνηση μιας κηλίδας. Η

δεύτερη κατηγορία είναι τα μοντέλα όπου, εκτός από την πρόβλεψη της αλλαγής των ιδιοτήτων του πετρελαίου, υπολογίζεται η προβλεπόμενη πορεία μιας κηλίδας στην πάροδο του χρόνου και συχνά μπορεί να παρασταθεί γραφικά σε ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS). Τα εν λόγω συστήματα επιτρέπουν επίσης συνοδευτικές πληροφορίες να εμφανίζονται σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Για παράδειγμα, μια πετρελαιοκηλίδα μπορεί να εμφανιστεί σε κλασσικά διαγράμματα πλοίων, με μια σειρά από περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές πληροφορίες για την ευαισθησία, την τοποθεσία των μέσων αντίδρασης, και τέλος σημαντικές πληροφορίες σχετικές με την άμεση αντιμετώπισή της με χαρακτηριστικά, όπως τοποθεσίες δρόμο και ακτογραμμή σημείο πρόσβασης.

4.2 Τύποι Μοντέλων

4.2.1 Μοντέλα Oil Weathering

Πρόκειται για μοντέλα που προβλέπουν τις μεταβολές των χαρακτηριστικών του πετρελαίου που μπορούν να συμβούν κατά τη διάρκεια του χρόνου υπό την επίδραση ενός εύρους περιβαλλοντικών συνθηκών και ποικίλων περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία του νερού, το ύψος κύματος, οι ταχύτητες των υγρών σωματιδίων, η αλατότητα, συγκέντρωση ιζήματος εντός θάλασσας οι οποίες εισάγονται από τον χρήστη. Επίσης η σύνθεση του πετρελαίου μπορεί να επιλέγεται από τη βάση δεδομένων του μοντέλου. Το μοντέλο υπολογίζει στη συνέχεια το ποσοστό των μεταβολών του πετρελαίου ποσοτικά και συγκεκριμένα πόσο πετρέλαιο εξατμίστηκε, πόσο γαλακτωματοποιήθηκε και πόσο μετακινήθηκε λόγω διασποράς. Τα μοντέλα αυτά είναι συνήθως πολύ εύκολα στη χρήση και έχουν πολύ μικρούς υπολογιστικούς χρόνους αφού είναι προγραμματισμένα σε σύγχρονες υπολογιστικές πλατφόρμες.



Εικόνα 4. 1 Το παράθυρο εργασίας του ADIOS (μοντέλο oil weathering). Αριστερά τα δεδομένα του σεναρίου της κηλίδας και στα δεξιά διάγραμμα που δείχνει τι απέγινε το πετρέλαιο μετά από συγκεκριμένο χρόνο.

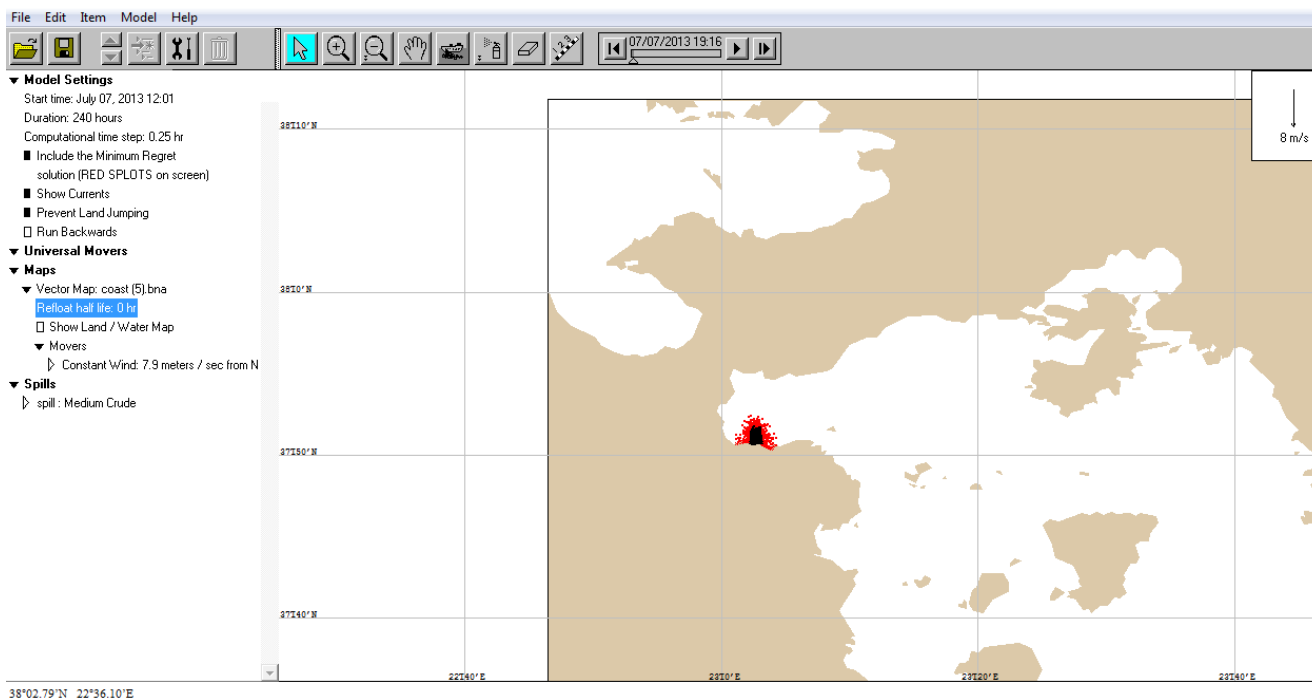
4.2.2 Στοχαστικά Μοντέλα

Πρόκειται για μοντέλα τα οποία δείχνουν την πιθανότητα μια πετρελαιοκηλίδα να επηρεάσει σε διαφορετικές χρονικές περιόδους που ορίζονται από το χρήστη. Για τα μοντέλα αυτά απαιτούνται ιστορικά ανεμολογικά στοιχεία που να περιέχουν τη συχνότητα της ταχύτητας και την κατεύθυνση του ανέμου σε όλες τις τροχιές υπό όλες τις συνθήκες. Με βάση τα δεδομένα εκτελούνται όλα τα πιθανά σενάρια και υπολογίζεται η πιθανότητα το πετρέλαιο να ταξιδεύει σε καθορισμένες χρονικές περιόδους. Τα αποτελέσματα του μοντέλου δείχνουν την πιθανότητα μερικές περιοχές να είναι σε μεγαλύτερο κίνδυνο κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων εποχών. Επιπλέον, με τη χρήση στοχαστικών μοντέλων προκύπτουν διαγράμματα συναρτήσεως του χρόνου, τα οποία απεικονίζουν τον χρόνο που απαιτείται για το πετρέλαιο να ταξιδέψει μια συγκεκριμένη απόσταση ή μέχρι να προσαράξει σε ακτή.

4.2.3 Ντετερμινιστικά ή Τροχιοδεικτικά μοντέλα

Πρόκειται για μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της διαδρομής μιας πετρελαιοκηλίδας στην πάροδο του χρόνου και συνήθως εκτιμούν την αλλαγή των ιδιοτήτων του πετρελαίου κάτω από συγκεκριμένες υδροδυναμικές και μετεωρολογικές συνθήκες. Τα outputs των μοντέλων αυτών περιλαμβάνουν την προβλεπόμενη τροχιά της κηλίδας και τις εκτιμήσεις της κηλίδας όσον αφορά τον όγκο, τη διασπορά, τη

γαλακτωματοποίηση και την εξάτμιση στην πάροδο του χρόνου. Λεπτομέρειες ακόμη δίνονται και για την περιοχή της κηλίδας όπως οι αλλαγές στις ιδιότητες του πετρελαίου στην πάροδο του χρόνου (π.χ. ιξώδες και το σημείο ανάφλεξης), πιθανές τοποθεσίες προσάραξης, και οι εκτιμήσεις του συνολικού ποσού της κηλίδας που προσαράσσεται στις ακτές.



Εικόνα 4. 2 Το παράθυρο εργασίας του GNOME (ντετερμινιστικό μοντέλο). Στα αριστερά τα δεδομένα του σεναρίου, στα δεξιά η πρόβλεψη της τροχιάς της κηλίδας

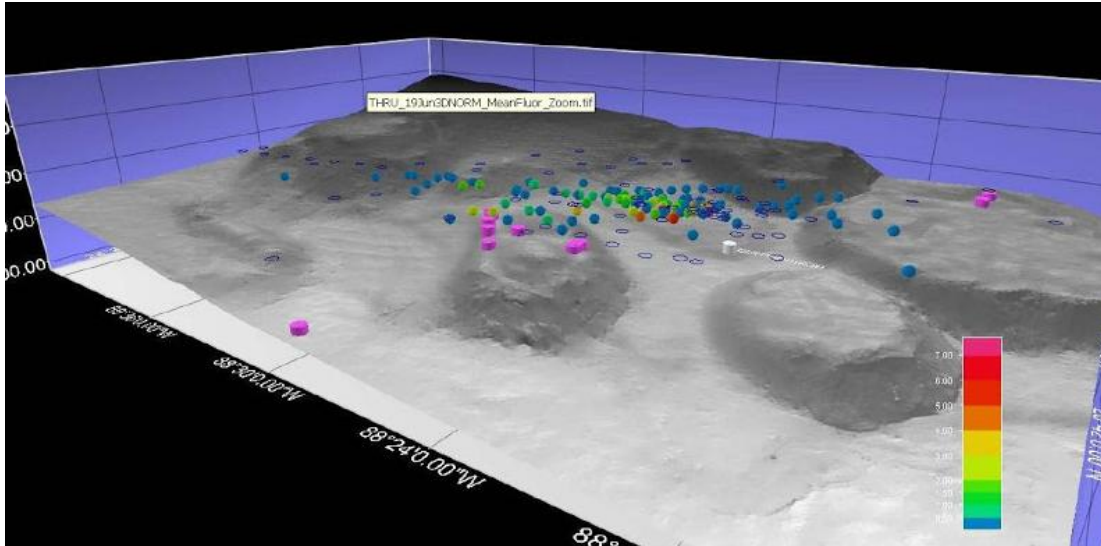
4.2.4 Μοντέλα Hind-Cast

Μοντέλα που αντιστρέφουν τη διαδικασία των ντετερμινιστικών μοντέλων. Αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της προέλευσης μιας διαρροής όπου το σημείο πηγής ή απελευθέρωσης είναι άγνωστο.

4.2.5 Τριών διαστάσεων (3D)

Αυτά τα μοντέλα κάνουν εκτιμήσεις σχετικά με το προφίλ του πετρελαίου σε 3 διαστάσεις, συμπεριλαμβανομένης της τροχιάς της κηλίδας. Τα μοντέλα αυτά χρειάζονται μεγαλύτερο όγκο δεδομένων ώστε να είναι ακριβής η πρόβλεψη καθώς τα συστατικά του πετρελαίου αντιδρούν διαφορετικά όταν βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του νερού. Ακόμα, υπάρχουν τρισδιάστατα μοντέλα που ειδικεύονται στην προσομοίωση υποθαλάσσιων ρυπαντών. Τα προγράμματα 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.



Εικόνα 4. 3 Πρόγραμμα Τριών Διαστάσεων (πηγή: iTac (2008), Technical Paper “Use of Models in Oil Spill Response”), JAG3D Model

4.3 Απαιτήσεις Δεδομένων

4.3.1 Γενικά

Η ιδανική περίπτωση είναι να υπάρχουν τα πλήρη υδροδυναμικά δεδομένα. Τα υδροδυναμικά δεδομένα πρέπει να περιλαμβάνουν:

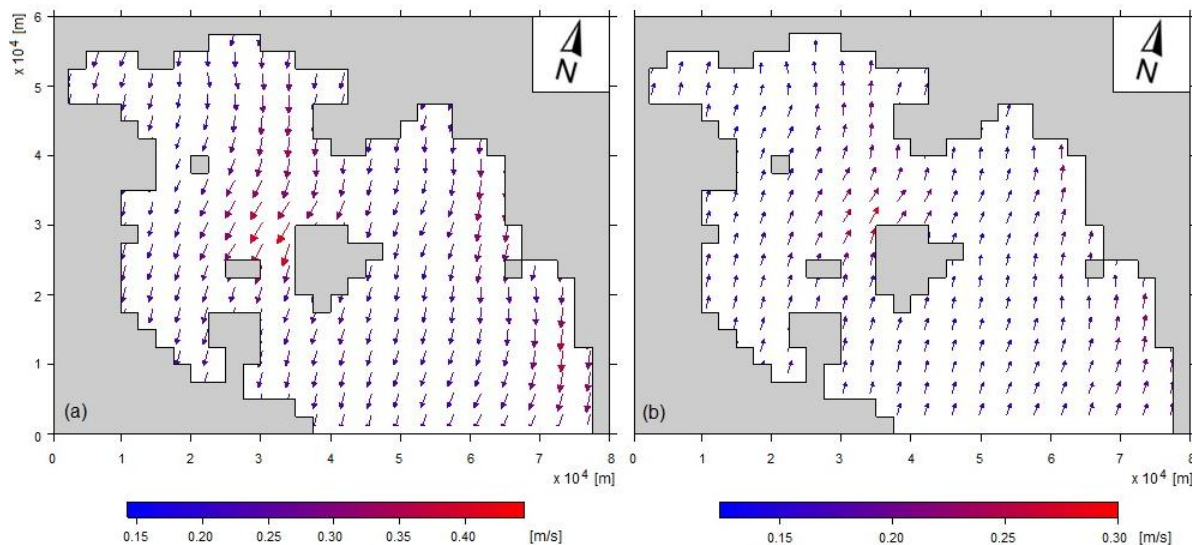
- 1) παλιρροιακά ρεύματα,
- 2) ανεμολογικά στοιχεία,
- 3) θερμοκρασία αέρα στην επιφάνεια θάλασσας
- 4) θερμοκρασία νερού στην επιφάνεια θάλασσας

Τα στοιχεία αυτά υπάρχουν σε βάσεις δεδομένων στο διαδίκτυο στην πλειοψηφία των προγραμμάτων. Για την καλύτερη αποτύπωση ενός υπολογισμού και για την άμεση αντιμετώπιση ενός ατυχήματος είναι απαραίτητη η πλήρης γνώση των συνθηκών του ατυχήματος. Αυτό σημαίνει γνώση όλων των υδροδυναμικών δεδομένων και πληροφορίες σχετικές με τη διαρροή όπως ο τύπος του πετρελαίου, ο όγκος, η ακριβής θέση της διαρροής και ο τύπος της διαρροής (στιγμιαία ή διαρκής απελευθέρωση).

4.3.2 Υδροδυναμικά Δεδομένα

Τα υδροδυναμικά δεδομένα είναι η πιο σημαντική παράμετρος, δεδομένου ότι έχουν τη μεγαλύτερη επιρροή για τη μετακίνηση του πετρελαίου (το πετρέλαιο κινείται λόγω ρεύματος κατά 100% και 3% σε σχέση με την κίνηση του αέρα). Ωστόσο, είναι συχνά το πιο δυσεύρετο σύνολο δεδομένων. Η ανάλυση των δεδομένων όσον αφορά την ποιότητα και την πυκνότητα των δεδομένων είναι πολύ σημαντική. Ανεπαρκή στοιχεία μπορούν να περιορίσουν 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 παρακολουθούμενες σηματοδούρες, από έρευνες πλοίων και με τηλεπισκόπηση. Η συλλογή αυτών των πληροφοριών μπορεί να είναι δαπανηρή και χρονοβόρα και θα πρέπει να πραγματοποιείται πολύ πριν από μια διαρροή πετρελαίου μπορεί να συμβεί, ιδίως για τομείς που εκτίθενται σε σημαντικό κίνδυνο διαρροής πετρελαίου.

Εναλλακτικά 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. Μέσω της τεχνολογικής πρόοδου, αναμένεται άμεσα η βελτίωση της προσομοίωσης ρεαλιστικών υδροδυναμικών δεδομένων, ωστόσο, όπως και οι παρατηρήσεις πεδίου έτσι και η ανάπτυξη μοντέλων για την ρεαλιστικότερη προσομοίωση των υδροδυναμικών δεδομένων είναι χρονοβόρα και δαπανηρή. Είναι φανερό πως η αξία των υδροδυναμικών δεδομένων είναι ανάλογη με την αξία των προβλημάτων που διερευνώνται. Μερικά μοντέλα επιτρέπουν την πρόβλεψη των υφιστάμενων δεδομένων βάσει των στατιστικών και περασμένων παρατηρήσεων, ιδιότητα η οποία μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για καταστάσεις απόκρισης.



Εικόνα 4. 4 Saronikos Gulf surface currents for (a) N wind – 4 bf, (b) S wind – 3 bf (Πηγή: Otay et. al, (2013) RISK ASSESSMENT OF OIL SPILL ACCIDENTS)

4.3.3 Ανεμολογικά Στοιχεία

Τα ανεμολογικά δεδομένα είναι ως επί το πλείστον διαθέσιμα από τις μετεωρολογικές υπηρεσίες και το διαδίκτυο. Οι πηγές δεδομένων παρέχουν συχνά αρκετές πληροφορίες σχετικά με την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου και αυτές πρέπει να αξιολογούνται και να λαμβάνονται υπόψη κατά την αξιολόγηση της ακρίβειας των προβλέψεων των μοντέλων. Υπεράκτιες σηματοδούρες και αεροδρόμια μπορούν να παρέχουν καλής ποιότητας πρόσφατα ιστορικά σύνολα αλλά πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν η θέση των παρατηρήσεων σε σχέση με τη θέση της διαρροής.

4.3.4 Τύπος Πετρελαίου

Τα περισσότερα μοντέλα περιλαμβάνουν μία λίστα από είδη πετρελαίου διαθέσιμα προς ανάλυση. Σε περίπτωση διαρροής είναι αναγκαίος ο χαρακτηρισμός του είδους του πετρελαίου που διαρρέει, αν κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό τότε επιλέγεται ο κοντινότερος τύπος πετρελαίου σύμφωνα με τις πληροφορίες που έχουν συλλεχθεί.

4.4 Σχεδιασμός Έκτακτης Ανάγκης

Πλέον η ανάπτυξη ενός σχεδίου έκτακτης ανάγκης είναι συχνά μια νομοθετική απαίτηση για κάθε δράση σε περιοχή που εκτίθεται σε κίνδυνο πετρελαιοκηλίδας. Υπάρχει κατά προσέγγιση ένα βιομηχανικό πρότυπο προστασίας από ατύχημα διαρροής και προκύπτει

κυρίως από μελέτες πρόβλεψης ατυχήματος διαρροής αξιολογούμενες όσον αφορά τη πιθανότητα εμφάνισης και την επικινδυνότητά τους.

Για το σκοπό αυτό και με στόχο την πρόβλεψη θέσεων που κινδυνεύουν σύμφωνα με μια σειρά από ανεμολογικές παρατηρήσεις χρησιμοποιούνται συνήθως τα στοχαστικά μοντέλα. Οι προσομοιώσεις λειτουργούν με μηνιαία, τριμηνιαία ή ετήσια στοιχεία ανέμου ανάλογα με τις διακυμάνσεις των ανεμολογικών παρατηρήσεων. Μέσω των στοχαστικών μοντέλων μπορούν να προκύψουν τα δυσμενέστερα σενάρια και σε αυτά να γίνει περαιτέρω ανάλυση και διερεύνηση με περισσότερες γνωστές πληροφορίες. Έτσι γίνεται η ιεράρχηση των επιλογών ανταπόκρισης σε ευαίσθητες περιοχές και η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού αντιμετώπισης ενός ενδεχόμενου ατυχήματος διαρροής πετρελαίου.

4.5 Επιχειρησιακά Μοντέλα

Τα μοντέλα εκτίμησης της τροχιάς των πετρελαιοκηλίδων μπορεί να αποδειχθούν εξαιρετικά σημαντικά κατά τη διάρκεια επιχείρησης αντιμετώπισης ατυχήματος διαρροής. Η πιο συχνή χρήση επιχειρησιακών μοντέλων είναι η πρόβλεψη και εκτίμηση της τροχιάς της πετρελαιοκηλίδας σε πραγματικό χρόνο από μετεωρολογικές πληροφορίες που συνήθως παρέχονται από παρατηρητές. Είναι ωστόσο πολύ σημαντική η έγκαιρη και τακτική κοινοποίηση και ανανέωση των παρατηρήσεων, έτσι ώστε τα μοντέλα να μπορούν να εκτελεστούν χρησιμοποιώντας τα καλύτερα διαθέσιμα στοιχεία. Τα επιχειρησιακά αυτά μοντέλα εκτίμησης της τροχιάς χρησιμοποιούνται συνήθως στα πρώτα στάδια του σχεδίου αντιμετώπισης ενός ατυχήματος για να υποστηρίξουν τις αρχικές επιχειρήσεις. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα μοντέλα μπορούν να προσφέρουν πολύτιμη καθοδήγηση σε σχέση με το συμβάν, καθοδήγηση που λειτουργεί επικουρικά στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την επιλογή των δράσεων επέμβασης για τον περιορισμό της ρύπανσης και των πιθανών επιπτώσεων. Το πιο σημαντικό αποτέλεσμα είναι η προβλεπόμενη πορεία μιας κηλίδας, το προφίλ του πετρελαίου που έχει διαρρεύσει υπό τις επικρατούσες συνθήκες και το ενδεχόμενο να έχει προσαράξει πετρέλαιο σε ποιες θέσεις και πόσο.

Επιπλέον πολλά μοντέλα επιτρέπουν την αποτύπωση της έκτασης της πετρελαιοκηλίδας σε GIS συστήματα για την καλύτερη επιτήρηση και αντιμετώπισή της. Η αποτύπωση της

κηλίδας σε τέτοια συστήματα επιτρέπει τη βέλτιστη ανανέωση και περαιτέρω εγγραφή παρατηρήσεων δίνοντας πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης, στο επιχειρησιακό επίπεδο δεν πρέπει κανείς να βασίζεται στα μοντέλα και μόνο. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι προβλεπόμενες τροχιές της πετρελαιοκηλίδας πρέπει να επαληθεύονται από τις παρατηρήσεις του πεδίου. Ο ρόλος της μοντελοποίησης είναι να συμπληρώνεις τις παρατηρήσεις που γίνονται σε πραγματικό χρόνο. Τα μοντέλα είναι ένα συμπληρωματικό εργαλείο που λειτουργούν επικουρικά σε σύνθετες καταστάσεις όπου εμποδίζεται η επιτόπια επιτήρηση της διαρροής.

Τα μοντέλα σε επιχειρησιακό επίπεδο μπορούν να υπολογίσουν ακόμα φυσικές διεργασίες όπως η εξάτμιση, η διασπορά και η γαλακτωματοποίηση ενώ παρέχεται ακόμα μια χρήσιμη ένδειξη του πετρελαίου που έχει αποσαθρωθεί. Μπορούν ακόμα χρησιμοποιώντας backtrack συστήματα να εντοπίσουν τη πηγή μιας διαρροής όταν η πηγή είναι διφορούμενη ή άγνωστη.

4.6 Προσομοίωση Στρατηγικών Αντιμετώπισης

Ορισμένα μοντέλα εκτίμησης τροχιάς πετρελαιοκηλίδας επιτρέπουν την προσομοίωση των δραστηριοτήτων αντιμετώπισης. Ο τόπος και ο χρόνος της λειτουργίας αντιμετώπισης εισάγονται από το χρήστη στο μοντέλο μαζί με άλλες λειτουργικές παραμέτρους (π.χ. τρέχουσα ταχύτητα, το ύψος κύματος και τιμές αντλίας) και χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθεί και να προσομοιωθεί η απόδοση του εξοπλισμού. Σε γενικές γραμμές, τα μοντέλα είναι αισιόδοξα στις εκτιμήσεις τους, η πραγματική πρόβλεψη των προβλημάτων που προκύπτουν δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί με ακρίβεια από το μοντέλο. Αυτό το εργαλείο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τις ασκήσεις, ενώ μπορεί να αποτελέσει ένα βοηθητικό εργαλείο σε επιχειρησιακό επίπεδο καθώς μπορεί να αξιοποιηθεί μια λιγότερη αισιόδοξη πρόβλεψη για την εκτίμηση της αντιμετωπισιμότητας ενός ατυχήματος.

4.7 Χρήση για έρευνα

Τα μοντέλα πρόγνωσης των πετρελαιοκηλίδων ακόμα χρησιμοποιούνται (όπως και στην παρούσα εργασία) με ακαδημαϊκό ή ερευνητικό ενδιαφέρον. Δημιουργούνται πιθανά σενάρια συνήθως για την εκτίμηση επικινδυνότητας ενδεχομένων ατυχημάτων.

4.8 Σχετικά με τη Χρήση των Αποτελεσμάτων των Μοντέλων

Η ποιότητα των μοντέλων πετρελαιοκηλίδας εξαρτάται από την ακρίβεια των στοιχείων του σενάριου διαρροής, την ποιότητα και την επίλυση των περιβαλλοντικών παραμέτρων, καθώς και την εμπειρία του χειριστή μοντέλου όσον αφορά την ερμηνεία των δεδομένων εισόδου και των αποτελεσμάτων (ITac (2008), Technical Paper “Use of Models in Oil Spill Response”). Οι στρατηγικές αντιμετώπισης πρέπει να αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες, συμπεριλαμβανομένων των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, τις παρατηρήσεις πεδίου και την τοπική γνώση, μαζί με τυχόν διδάγματα από προηγούμενες επιχειρήσεις αντιμετώπισης διαρροής. Στην ιδανική περίπτωση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θα πρέπει να ερμηνεύονται και να χρησιμοποιούνται από έμπειρο 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.

Με οποιοδήποτε ηλεκτρονικό μοντέλο είναι σημαντικό τα αποτελέσματα να επαληθεύονται. Ο σχεδιασμός για την αντιμετώπιση διαρροών με μοντέλα πρέπει να γίνεται παράλληλα με επιτήρηση του πεδίου και οι παρατηρήσεις που προκύπτουν να χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση των δεδομένων εισόδου. Κατά την επικύρωση των αποτελεσμάτων, ένας βαθμός ανασφάλειας είναι πάντα αναμενόμενος. Η πρόκληση για τον σχεδιαστή είναι να γνωρίζεται τι εύρος διακύμανσης είναι αποδεκτό και αν υπάρχει μεγάλη διαφορά να μπορεί να προσδιοριστεί η αιτία και η επίλυση τυχόν προβλημάτων. Ακόμη και με αυτές τις επιφυλάξεις, τα μοντέλα μπορούν να παρέχουν γρήγορα μια σειρά από σχετικές πληροφορίες σε δραστηριότητες ετοιμότητας και ενεργειών ταχείας αντίδρασης.

4.9 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που εξάγονται, είναι τα εξής:

- 1) Υπάρχουν πολλά διαφορετικά δωρεάν και εμπορικά διαθέσιμα προγράμματα μοντελοποίησης πετρελαιοκηλίδας
- 2) Η μοντελοποίηση πετρελαιοκηλίδων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης σε ατύχημα διαρροής πετρελαίου και κατά τη διάρκεια εργασιών επέμβασης.

- 3) Τα προϊόντα εξόδου των μοντέλων ανάλογα με τις ιδιότητες του προγράμματος μπορούν να δώσουν μια σειρά από χρήσιμες πληροφορίες για την ενδεχόμενη συμπεριφορά του πετρελαίου.
- 4) Όλα τα προγράμματα μοντελοποίησης απαιτούν μια σειρά από εισόδους, και η έξοδος από οποιοδήποτε μοντέλο εξαρτάται από την ποιότητα των εισαχθέντων δεδομένων.
- 5) Είναι σημαντικό οι πληροφορίες εισόδου να είναι όσο το δυνατόν ακριβέστερες και οι ενέργειες δράσης-αντιμετώπισης διαρροής να γίνονται μετά από ενσωμάτωση όλων των διαθέσιμων πληροφοριών

Πίνακας 4. 1 Πίνακας που περιγράφει που μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κάθε κατηγορία μοντέλου (πηγή iTac (2008), Technical Paper “Use of Models in Oil Spill Response”)

	Weathering	Trajectory	Stochastic	Backtrack
Σχεδιασμός Έκτακτης Ανάγκης	②	①	②	①
Έρευνα	②	②	②	①
Επιχειρήσεις Αντιμετώπισης	②	②	①	②

②	Πολύ χρήσιμο
①	Μπορεί να χρησιμοποιηθεί
①	Περιορισμένη Χρήση / Καθόλου Χρήση

Πίνακας 4. 2 Πίνακας Κατηγορίες μοντέλων και παράδειγμα

Κατηγορία Μοντέλου	Παράδειγμα
Oil Weathering	ADIOS, NOAA
Stochastic	OSIS, BMT Cordah
Deterministic	OILMAP, ASA
Hind Cast	WFS, OCG
3D	JAG 3D, NOAA

5. Το MEDSLIK

5.1 Εισαγωγή - Γενικά

Το MEDSLIK είναι ένα φιλικό προς το χρήστη λογισμικό σχεδιασμένο για να προβλέψει τη μοίρα και τη μεταφορά μιας πετρελαιοκηλίδας σε υπο-περιοχές της Μεσογείου (R.W.Lardner B.A., Ph.D., Sc.D. (Cambridge) (2004,2011) MEDSLIK User Manual). Το λογισμικό αποτελείται από τρία μέρη,

- μια γραφική διεπαφή εισόδου, μέσω της οποίας ο χρήστης εισάγει τα δεδομένα σχετικά με τη διαρροή και τις περιβαλλοντικές συνθήκες,
- το μέρος το οποίο επιλέγεται για την επεξεργασία των υπολογισμών που προσομοιώνουν τη διαρροή και τη συμπεριφορά της και ταυτόχρονα παράγει αρχείο εξόδου και τέλος
- μια γραφική διεπαφή εξόδου μέσω της οποίας ο χρήστης μπορεί να εξετάσει τα αποτελέσματα και τις προβλέψεις του μοντέλου.

Οι προγραμματιστές ανέπτυξαν το MEDSLIK στηριζόμενοι στην εμπειρία τους με μοντέλα προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδων που αναπτύχθηκαν από το Ινστιτούτο Ερευνών KFUPM (King Fahd University of Petroleum and Minerals) που για πολλά χρόνια αναπτύσσει επιτυχώς εφαρμογές παρόμοιων προγραμμάτων για τον Περσικό Κόλπο και την Ερυθρά Θάλασσα.

Τα τρία βασικά ζητήματα της πρακτικής σημασίας σχετικά με οποιαδήποτε διαρροή πετρελαίου είναι: πού θα φτάσει το πετρέλαιο, πότε θα φτάσει εκεί και ποια θα είναι η κατάσταση του πετρελαίου κατά την άφιξή του σε οποιοδήποτε σταθμό το εξετάσουμε. Η απόκτηση μιας λογικής απάντησης στο τρίτο ερώτημα έγκειται στη χρήση αξιόπιστων αλγορίθμων ζωής εξέλιξης του ρυπαντή εντός του αποδέκτη. Τα δύο πρώτα ερωτήματα είναι γενικά τα πιο κρίσιμα όσον αφορά την καταπολέμηση μιας διαρροής η οποία εξετάζεται και εξαρτώνται απόλυτα από την ύπαρξη αξιόπιστων τιμών ρευμάτων νερού και αξιόπιστων δεδομένων για τον άνεμο.

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

αυτά τα ρεύματα προβλέψεις, δεν είναι διαθέσιμα, το MEDSLIK περιέχει επίσης τις βάσεις δεδομένων των κλιματολογικών δεδομένων πλοίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη θέση τους. Γεγονός είναι ωστόσο ότι δεν έχει ανανεωθεί η βάση δεδομένων, πράγμα που σημαίνει ότι για την επεξεργασία ενός σεναρίου διαρροής ο χρήστης οφείλει να αναπτύσσει τις υδροδυναμικές συνθήκες εκ του μηδενός.

Όσον αφορά τους ανέμους, τονίζεται ότι η συμβολή των επακριβών δεδομένων είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας στην επίτευξη ικανοποιητικής πρόβλεψης της συμπεριφοράς μιας πετρελαιοκηλίδας. Οι προβλέψεις των ανέμων σε χρησιμοποιήσιμη μορφή από MEDSLIK μπορούν επίσης να μεταφορτωθούν από το δικτυακό τόπο του προγράμματος, είτε από το πρόγραμμα SKIRON του Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών ((R.W.Lardner B.A., Ph.D., Sc.D. (Cambridge) (2004,2011) MEDSLIK User Manual)). Αυτές είναι και οι πιο αξιόπιστες προβλέψεις που διατίθενται για την Ανατολική Μεσόγειο. Ωστόσο, συχνά, ο χρήστης χρειάζεται πιο σύγχρονη βάση δεδομένων από αυτή που διατίθεται και για τους ανέμους (όμοια με τα ρεύματα), σε αυτή την περίπτωση εισάγονται 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 τους ανέμους και η δυνάμεις που δημιουργούνται λόγω των διακυμάνσεων στη πυκνότητα του νερού. Αυτοί οι μηχανισμοί ενσωματώνονται στα αρχεία Forecast του προγράμματος μαζί με άλλες μεταβλητές όπως η θερμοκρασία του νερού και ο δείκτης αλατότητας. Εκτός από τον επηρεασμό της ροής του νερού, οι άνεμοι επίσης δρουν άμεσα επί την πετρελαιοκηλίδα αποκολλώντας την από το νερό αναγκάζοντας τη να κινηθεί και σε σχέση με το σώμα του νερού. Η συνήθης τεχνική για τη μοντελοποίηση του φαινομένου αυτού που χρησιμοποιείται από όλα σχεδόν τα προγράμματα προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδας είναι να χρησιμοποιηθεί μία προσέγγιση του παράγοντα ανέμου γνωστή και ως «wind factor» και συγκεκριμένα να εκτιμηθεί η επίδραση του ανέμου για τη μεταφορά του πετρελαίου που το αναγκάζει να κινηθεί με ορισμένο κλάσμα της ταχύτητας του ανέμου σε άλλη κατεύθυνση. Επισημαίνεται ότι η κατεύθυνση της κίνησης της πετρελαιοκηλίδας προσδιορίζεται στα δεξιά της κατεύθυνσης του ανέμου. Με βάση τα πειράματα και τις μελέτες του Ινστιτούτου Al Rabeih βρέθηκε η βέλτιστη λύση του παράγοντα του ανέμου που είναι 1-4% επί της ταχύτητας του ανέμου και

1-4% κλίση προς δεξιά ανάλογα με την ταχύτητα ανέμου. Μια τέτοια μορφή της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιείται και από το MEDSLIK, η οποία στην παρούσα μελέτη είναι ανεξάρτητη με την ταχύτητα ανέμου και είναι 3% ορισμένη παντού.

Όταν υπάρχει διαρροή πετρελαίου, δηλαδή πετρελαιοκηλίδα, ένα παχύ στρώμα πετρελαίου σχηματίζεται και απλώνεται πάνω από την επιφάνεια του νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας. Ο μηχανισμός αυτός καθίσταται ασήμαντος μετά τις πρώτες λίγες ώρες και ένας πολύ πιο σημαντικός μηχανισμός αναλαμβάνει, η διάχυση, που προκαλείται από τις δίνες στο νερό. Με τη διάχυση προκαλείται ευρεία ευρεία διάδοση της κηλίδας και συχνά τη διαίρεση της κηλίδας σε δύο ή περισσότερα κομμάτια. Το MEDSLIK χρησιμοποιεί έναν αυτόματο αλγόριθμο ώστε να μοντελοποιήσει αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο αριθμό Λαγκραντζιανών στοιχείων. Όσα περισσότερα επιλεγθούν τόσο πιο ρεαλιστικό είναι το αποτέλεσμα. (Η προεπιλογή είναι 10.000 στοιχεία, αλλά αυτό μπορεί να αυξηθεί έως και 100.000.)

Μπορεί επίσης να συμβεί η οριζόντια μετατόπιση να ωθεί ένα συγκεκριμένο σωματίδιο πετρελαίου πάνω στην ακτή. Για να εκτιμηθεί αυτή τη διαδικασία, σε κάθε στιγμή-βήμα τα προγράμματα ελέγχουν κατά πόσον η μετατόπιση του σωματιδίου τέμνει οποιοδήποτε από αυτά τα τμήματα της γραμμής που χρησιμοποιείται για την προσέγγιση της ακτογραμμής. Αν διασχίζει περισσότερα του ενός, το πλησιέστερο σημείο στην πρώτη τομή λαμβάνεται ως το σημείο που σταματάει το πετρέλαιο. Το υπόλοιπο πετρέλαιο κινείται όμοια. Η επίλυση αυτής της διαδικασίας ποικίλλει από περιοχή σε περιοχή, ανάλογα με την ποιότητα των χαρτών και την ανάλυση των ακτογραμμών. Για ορισμένες περιοχές είναι τόσο καλή η ποιότητα των χαρτών που υπάρχει μία αβεβαιότητα το πολύ 25 μέτρα σε άλλες όμως πλησιάζει τα 100 με 200 μέτρα, ο κίνναβος υπολογισμών είναι τετραγωνικός 100μ.

Η προσάραξη των σωματιδίων του πετρελαίου δεν είναι μόνιμη ωστόσο. Υπάρχει πάντα μια πιθανότητα κλάσμα του πετρελαίου που έχει φτάσει στην ακτή να πηγαίνει πίσω στο νερό. Αυτή η πιθανότητα στο MEDSLIK υπολογίζεται σε κάθε χρονικό βήμα και αφορά το μισό χρονικό βήμα από αυτό που υπολογίζεται. Ανάλογα με το τι μορφολογία ή και τι γεωλογία έχει η ακτή που έχει φτάσει το πετρέλαιο ποικίλλει ο ρυθμός αναρρόφησης και η ποσότητα ή πιθανότητα επανεισόδου του πετρελαίου στο νερό. Ο ρυθμός απορρόφησης καθώς και η πιθανότητα να επανεισέλθει το πετρέλαιο στο νερό εξαρτάται από το είδος των ακτών. και

το μοντέλο επιτρέπει την ταξινόμηση των ακτών σε κατηγορίες όπως αμμώδη παραλία, μικρά ή μεγάλα βότσαλα, βραχώδεις ακτές, ακρωτήριο, και ούτω καθεξής.

Εκτός των μεταφορικών μετατοπίσεων και των μετατοπίσεων λόγω διάχυσης, τα σωματίδια σε μια πετρελαιοκηλίδα μπορούν να υποστούν αλλαγές που συνδέονται με διάφορες φυσικές διαδικασίες που επηρεάζουν το πετρέλαιο. Τα ελαφρύτερα κλάσματα του πετρελαίου εξαφανίζονται μέσω της εξάτμισης και τα υπόλοιπα κλάσματα που αρχίζουν να απορροφούν νερό, ή να γαλακτωματοποιούνται. Οι αλλαγές αυτές αντανακλώνονται στις αλλαγές των ιδιοτήτων του πετρελαίου, όπως η πυκνότητα και το ιξώδες της, αλλά και στον όγκο 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 (R.W.Lardner B.A., Ph.D., Sc.D. (Cambridge) (2004,2011) MEDSLIK User Manual).

Το MEDSLIK έχει τη δυνατότητα εκτύπωσης των προβλέψεων της θέσης της κηλίδας κατά τα χρονικά διαστήματα που καθορίζονται από τον χρήστη. Για το σκοπό αυτό, η κηλίδα εκτιμάται από το μέσο όρο της πυκνότητας του πετρελαίου στα διάφορα κελιά του κανάβου, το μέγεθος των οποίων ο χρήστης επιλέγει ως ένα από τα δεδομένα εισόδου. Στα αρχεία εξόδου, σε κάθε τέτοιο κελί προσδίδεται ένα χρώμα που αντιστοιχεί στην πυκνότητα του πετρελαίου μέσα σε αυτό, κι έτσι κατά αυτόν τον τρόπο η κηλίδα αυτή παρουσιάζεται ως ένα συνονθύλευμα τέτοιων χρωματιστών τετραγώνων. Η απεικόνιση της κηλίδας έχει ένα δείκτη αβεβαιότητας που δεν υπολογίζεται. Οι προγραμματιστές συνιστούν τη μελέτη των Αρχείων Εξόδου ως ένα στατιστικό πίνακα. Η πραγματική εικόνα θα προέκυπτε αν εξαμολυνόταν το μωσαϊκό που προκύπτει με περαιτέρω μελέτη. Παρ'όλα αυτά αυτό που προκύπτει είναι αρκετά ενιαίο και πυκνό για να δώσει κατά προσέγγιση τη πραγματική θέση και το μέγεθος της κηλίδας. Η διασύνδεση εξόδου επιτρέπει επίσης στο χρήστη να δεί γραφήματα των διαφόρων μεταβλητών ως συνάρτηση του χρόνου.

Το MEDSLIK επιτρέπει επίσης στο χρήστη να υπολογίζει τροχιές επιπλέοντων αντικειμένων. Η κύρια χρήση αυτής της λειτουργίας είναι να βοηθήσει εντοπίσετε επιπλέοντα αντικείμενα που παρασύρθηκαν στην επιφάνεια της θάλασσας και ιδίως να βοηθήσει οργανισμούς όπως η Ακτοφυλακή να εντοπίσουν τους ανθρώπους που χάθηκαν στη θάλασσα. Ωστόσο,

αυτή η δυνατότητα είναι επίσης χρήσιμη για τον εντοπισμό της διαδρομής και του κέντρου της πετρελαιοκηλίδας.

5.2 Εισαγωγή δεδομένων πετρελαιοκηλίδας

Στο πεδίο Input γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων που αφορούν στο υποθετικό σενάριο πετρελαιοκηλίδας που εξετάζεται. Οι απαιτούμενες πληροφορίες είναι οι εξής:



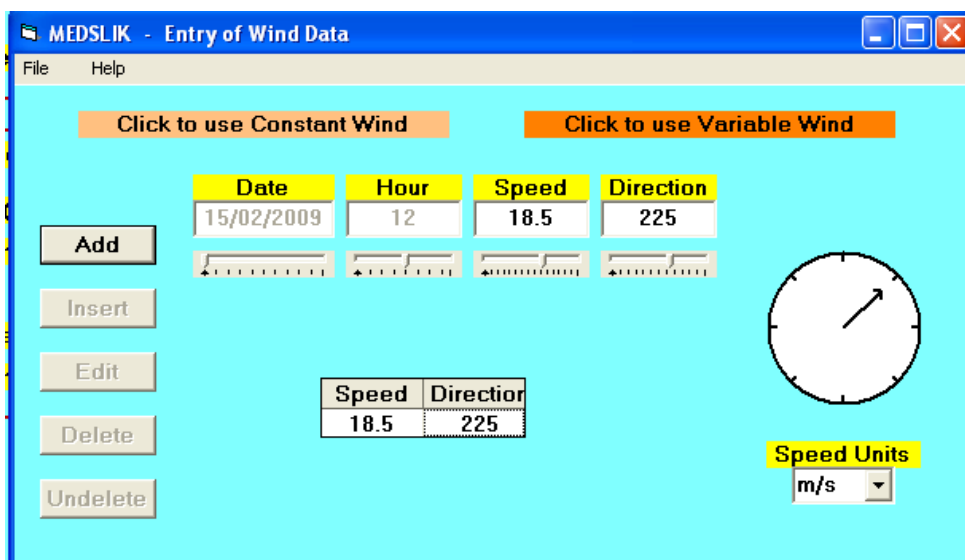
Εικόνα 5. 1 Αρχικό παράθυρο εργασίας προγράμματος MEDSLIK

- 1) Ημερομηνία εκκίνησης πετρελαιοκηλίδας (έτος, μήνας, ημέρα)
- 2) Ώρα εκκίνησης της πετρελαιοκηλίδας (ώρα, λεπτά)
- 3) Χρονικό διάστημα προσομοίωσης (σε ώρες) μετά την έναρξη της κηλίδας
- 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 ρικελ 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 και η θέση έναρξης της πετρελαιοκηλίδας.

Εικόνα 5.2 Πεδίο εισαγωγής δεδομένων πετρελαιοκηλίδας



Εικόνα 5. 2 Πεδίο εισαγωγής διεύθυνσης, έντασης και διάρκειας ανέμου

5.3 Το μαθηματικό μοντέλο

5.3.1 Μεταφορά – Διάχυση – Προσaiγιάλωση

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 α της ταχύτητας του ανέμου και σε μία διεύθυνση που σχηματίζει συγκεκριμένη δεξιόστροφη γωνία β 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 μετρείται κάθετα από κάτω προς τα πάνω. Στο τέλος του χρονικού βήματος διάρκειας t το υλικό σημείο θα βρίσκεται στη θέση με συντεταγμένες:

$$X'_i = X_i + \{u(X_i + Y_i + Z_i) + a(W_x \cos\beta + W_y \sin\beta)\}t + \Delta X_i^{(d)} \quad (5.1)$$

$$Y'_i = Y_i + \{v(X_i + Y_i + Z_i) + a(W_x \cos\beta + W_y \sin\beta)\}t + \Delta Y_i^{(d)} \quad (5.2)$$

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

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 περιλαμβάνεται 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 ανακλάται πίσω στην υδάτινη στήλη.

Οι μετατοπίσεις λόγω διάχυσης δίνονται από τις εξισώσεις:

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

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

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

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 $K_v=0.0.0001\text{m}^2/\text{sec}$ κάτω από το στρώμα ανάμιξης. Επίσης, $rand(0,1)$ 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 συναγωγής-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 β θεωρείται πολύ μεγάλη, το Medslik υιοθετεί την τιμή $\beta=0^\circ$.

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 σημείου τέμνει κάποιο από αυτά τα ευθύγραμμα τμήματα. Αν τέμνει περισσότερα από ένα, επιλέγεται αυτό που

βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο εκκίνησης και το υλικό σημείο Lagrange μεταφέρεται στην τομή χαρακτηριζόμενο ως «beached».

Η προσαιγιάλωση δεν είναι απαραίτητα μόνιμη. Αντίθετα, σε κάποιο επερχόμενο χρονικό βήμα, υπάρχει η πιθανότητα της επαναφοράς στη θάλασσα. Η πιθανότητα αυτή σε κάθε χρονικό βήμα διάρκειας t θεωρείται ίση με: πιθανότητα επαναφοράς = $(1 - 0,5^{t/T_w})$, όπου T_w είναι ο χρόνος ημιζωής του πετρελαίου, όσον αφορά στην παραμονή του 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 στην ίδια πλευρά της ακτής από όπου προήλθε. Ο χρόνος ημιζωής T_w εξαρτάται από τη φύση της ακτής (αμμώδης ή βραχώδης).

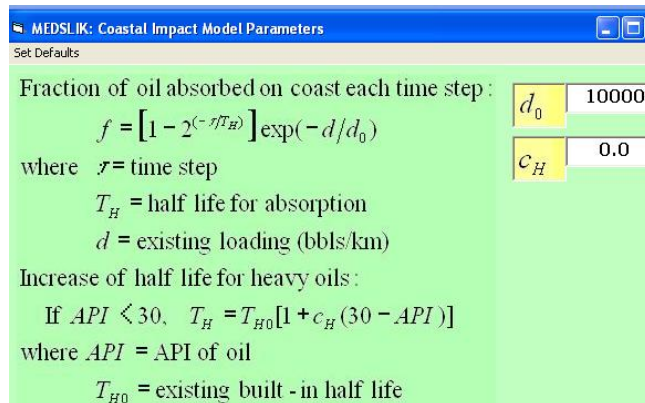
Πέρα από την παραπάνω διαδικασία, το Medslik υποθέτει πως κατά τη διάρκεια κάθε χρονικού βήματος ένα συγκεκριμένο ποσοστό του πετρελαίου του κάθε υλικού σημείου που έχει προσκολληθεί στην ακτή παραμένει μόνιμα εκεί. Αυτό συμβαίνει είτε με ανάμιξη με την άμμο, είτε δημιουργώντας ένα στρώμα πάνω στα βράχια. Σε κάθε χρονικό βήμα το μόνιμα προσκολλημένο ποσοστό 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 στο Λίβανο δείχνει 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 λαμβάνεται υπόψη από το Medslik μέσω της εξής φόρμουλας:

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 bbbls/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.



Εικόνα 5. 3 Μοντέλο προσκόλλησης πετρελαίου στην ακτή

5.3.2 Φυσικές διεργασίες

Εκτός από τη συναγωγή και τη διάχυση, τα υλικά σημεία (parcel) μιας πετρελαιοκηλίδας υφίστανται αλλαγές που οφείλονται σε διάφορες φυσικές διεργασίες που επηρεάζουν το πετρέλαιο. Κατά τη διάρκεια των πρώτων ωρών, μία πετρελαιοκηλίδα εξαπλώνεται μηχανικά στην επιφάνεια του νερού λόγω των δυνάμεων βαρύτητας και επομένως τα θεωρούμενα υλικά σημεία υπόκεινται σε μετατοπίσεις λόγω εξάπλωσης (spreading) της κηλίδας. Επιπλέον, τα ελαφρύτερα συστατικά του πετρελαίου εξατμίζονται και τα εναπομείναντα απορροφούν νερό σχηματίζοντας γαλακτώματα. Στο Medslik αυτές οι διεργασίες αντανακλώνται στις ιδιότητες των υλικών σημείων. Τέλος, ένα τμήμα του πετρελαίου οδηγείται κάτω από την επιφάνεια του νερού με τη δράση των κυματισμών. Η διασπορά αυτή του πετρελαίου αντιμετωπίζεται σαν μία τυχαία διαδικασία που μπορεί να οδηγήσει οποιοδήποτε υλικό σημείο στην υδάτινη στήλη. Μόλις βρεθεί εκεί, η κίνηση του διέπεται από το τριδιάστατο πεδίο ταχυτήτων του ρευστού.

Σε περίπτωση που η διαρροή πετρελαίου διαρκεί αρκετές ώρες ή μέρες, οι αρχικές ποσότητες θα έχουν απομακρυνθεί αρκετά λόγω ανέμου και ρευμάτων όταν διαρρεύσουν οι τελευταίες ποσότητες. Σε αυτή την περίπτωση το πρόγραμμα χωρίζει τη συνολική κηλίδα σε μικρότερες κηλίδες 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.

Το Medslik χρησιμοποιεί τροποποιημένες εκδόσεις του αλγόριθμου του Mackay για την εξάτμιση, τη γαλακτωματοποίηση και τη διασπορά. Η βάση του αλγόριθμου αυτού είναι ο χωρισμός της κηλίδας σε μία πυκνή και μία λεπτή κηλίδα (sheen). Η εξάτμιση και η

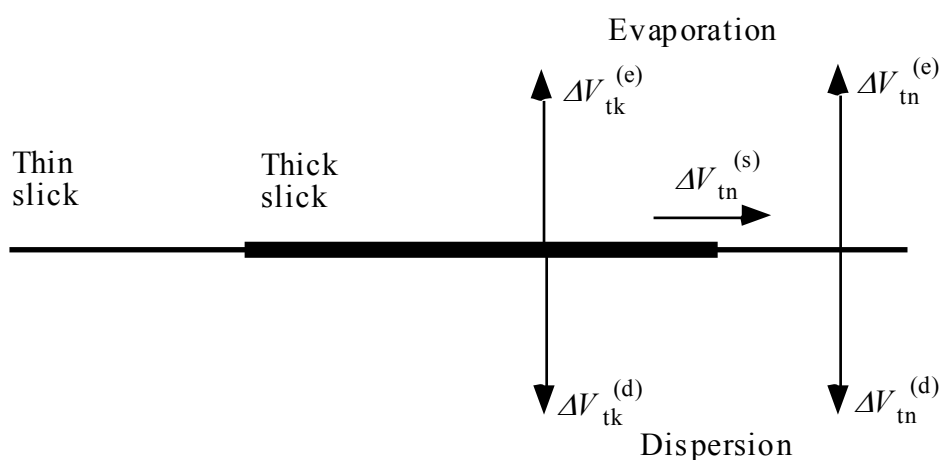
διασπορά εξετάζονται ξεχωριστά για τις δύο αυτές κηλίδες. Επιπλέον, το μοντέλο περιλαμβάνει τη ροή πετρελαίου από το πυκνό στρώμα στο λεπτό.

Για κάθε μία υπο-κηλίδα και 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 σταθερά ίσο με 10 μικρόμετρα, όσο δηλαδή είναι το τελικό πάχος ενός επιφανειακού «φίλμ» πετρελαίου (sheen). Σε κάθε χρονικό βήμα, οι όγκοι ανανεώνονται και παίρνουν τις τιμές:

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

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

Όπου $\Delta V_{tk}^{(e)}$ και $\Delta V_{tn}^{(e)}$ οι όγκοι που χάνονται λόγω εξάτμισης, $\Delta V_{tk}^{(d)}$ και $\Delta V_{tn}^{(d)}$ οι όγκοι που χάνονται λόγω διασποράς και $\Delta V_{tn}^{(s)}$ η ποσότητα πετρελαίου που ρέει από το παχύ στο λεπτό τμήμα της κηλίδας.



Σχήμα 5. 1 Μεταφορά όγκων πετρελαίου από την πυκνή και τη λεπτή κηλίδα [15]

Έχοντας ανανεώσει τους όγκους των δύο τμημάτων της κηλίδας, οι επιφάνειές τους ανανεώνονται επίσης σε κάθε χρονικό βήμα χρησιμοποιώντας ημι-εμπειρικά μοντέλα εξάπλωσης που περιγράφονται στις παρακάτω ενότητες. Έτσι, το νέο πάχος του πυκνού τμήματος δίνεται από την εξίσωση:

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

5.3.3 Εξάτμιση

Γίνεται η υπόθεση πως κάθε υλικό σημείο 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 Medslik από τον τύπο του πετρελαίου που εξετάζεται. Σε κάθε χρονικό βήμα, το ποσοστό των ελαφρών συστατικών που παραμένει σε κάθε υπο-κηλίδα μειώνεται χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Mackay για την εξάτμιση και η μείωση αυτή εφαρμόζεται σε όλα τα υλικά σημεία της υπο-κηλίδας.

Καταρχάς, για το πετρέλαιο της λεπτής κηλίδας, υποτίθεται ότι τα ελαφριά συστατικά εξατμίζονται αμέσως. Ο όγκος που εξατμίζεται σε κάθε χρονικό βήμα από την 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 γίνεται να εξατμιστούν και άρα αποτελεί τη μέγιστη δυνατή τιμή του f_{tn} .

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

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

Η πίεση ατμών δίνεται από την εξίσωση:

$$P_{oil} = P_0 \exp(-c f_{tk}) \quad (5.14)$$

όπου P_0 είναι η αρχική πίεση ατμών και c μία σταθερά που μετράει το ρυθμό μείωσης της πίεσης ατμών λόγω του ποσοστού που έχει ήδη εξατμιστεί. Η τιμή του παράγοντα εξάτμισης ΔE_{tk} εκφράζεται ως γινόμενο ενός συντελεστή μεταφοράς μάζας K_m , του χρονικού βήματος t , της περιοχής της κηλίδας 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 υπο-κηλίδας $V^{(0)}$:

$$\Delta E_{tk} = \frac{K_m V_{mol} A_{tk} t}{RTV^{(0)}} = \frac{K_m V_{mol} A_{tk} (1 - f_{tk}) t}{RTV_{tk}} \quad (15)$$

όπου V_{tk} είναι ο τρέχων όγκος του πετρελαίου στην παχιά κηλίδα ίσος με $V^{(0)}(1 - f_{tk})$. Οι προκαθορισμένες τιμές του Medslik που χρησιμοποιήθηκαν και στην εξέταση των υποθετικών σεναρίων είναι: $V_{mol}=0.0002$, $R=0.000082$ 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 γ συντελεστές με τιμές 0.000033 και 0.78 αντίστοιχα.

Ο όγκος που χάνεται λόγω εξάτμισης σε κάθε χρονικό βήμα, είναι ίσος 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 ελαφριά συστατικά της λεπτής κηλίδας έχουν εξατμιστεί, η κηλίδα αυτή τροφοδοτείται από την πυκνή που δεν έχει εξατμιστεί πλήρως. Έτσι, το ποσοστό f_{tn} του πετρελαίου που έχει εξατμιστεί στη 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, εξάγεται ο τύπος:

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

Συνεπώς, έχοντας υπολογίσει τους όγκους που έχουν εξατμιστεί από την πυκνή και τη λεπτή κηλίδα, μπορεί να υπολογιστεί το συνολικό ποσοστό πετρελαίου που έχει χαθεί λόγω εξάτμισης. Το ποσοστό αυτό προσαρμόζεται σε όλα τα υλικά σημεία της συγκεκριμένης υποκηλίδας. Η εξάτμιση σταματάει όταν το ποσοστό φτάσει το μέγιστο f_{max} των ελαφριών συστατικών της αρχικής κηλίδας.

Παράλληλα, η εξάτμιση οδηγεί σε αύξηση του ιξώδους του πετρελαίου. Το Medslik λαμβάνει υπόψη το γεγονός αυτό μέσω του τύπου:

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

όπου η_0 είναι το αρχικό ιξώδες και $K^{(e)}$ σταθερά με τιμή 4.

5.3.4 Γαλακτωματοποίηση

Έστω f_w το ποσοστό του νερού στο γαλάκτωμα νερού-πετρελαίου (mousse). Το μοντέλο του Mackay για την αλλαγή στο ποσοστό αυτό ανά χρονικό βήμα είναι:

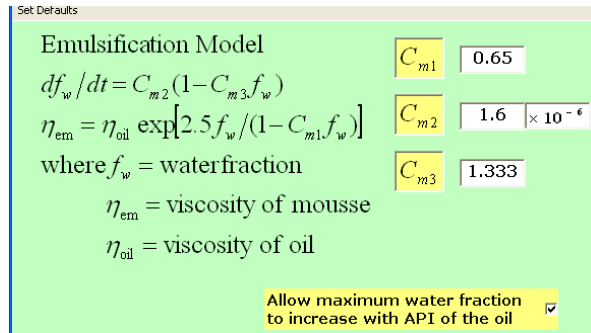
$$\Delta f_w = C_2^{(m)}(1 - C_3^{(m)} f_w)\tau \quad (5.21)$$

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%, αλλά μειώνεται με την

πυκνότητα API για βαριά πετρώματα). Η αρχική συνέπεια της γαλακτωματοποίησης είναι η δημιουργία ενός γαλακτώματος («mousse») με πολύ αυξημένο ιξώδες. Γίνεται η υπόθεση ότι το ιξώδες δίνεται από τη σχέση:

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

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



Εικόνα 5. 4 Μοντέλο γαλακτωματοποίησης

5.3.5 Διασπορά

Το μοντέλο της διασποράς του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη βασίζεται στην εργασία των Buist και Mackay. 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 πάλι με την κηλίδα και μικρές, που ανεβαίνουν πιο αργά και μπορούν να βυθιστούν αρκετά μακριά 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 ξεχωρίζει τις μικρές σταγόνες είναι ότι η ταχύτητα ανόδου τους υπό τις δυνάμεις άνωσης είναι συγκρίσιμη με την ταχύτητα διασποράς, ενώ για τις μεγάλες σταγόνες η ταχύτητα ανόδου είναι πολύ μεγαλύτερη.

Σε μία 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 η προς τα πάνω και προς τα κάτω ροή είναι ίσες:

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

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

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

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

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

όπου u_m είναι το κάθετο πάχος του σύννεφου σταγόνων, του οποίου η τιμή στα σενάρια θεωρήθηκε 0.5. Σε κάθε χρονικό βήμα, ένα ποσοστό των μικρών σταγόνων υποτίθεται ότι 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 έχει 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 διασποράς απαιτούνται εκφράσεις για τις προς τα κάτω ροές R_L και R_S . Για το λόγο αυτό, το ποσοστό του πετρελαίου που υπόκειται σε διασπορά σε κάθε χρονικό βήμα είναι τόσο για την πυκνή, όσο και για τη λεπτή κηλίδα

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

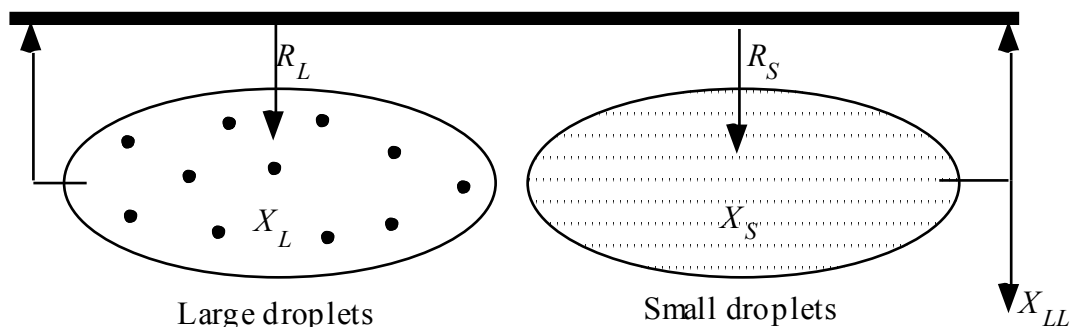
όπου $W_{m/s}$ είναι η ταχύτητα του ανέμου σε m/sec. Για την παχιά κηλίδα, το ποσοστό αυτό που αποτελείται από μικρές σταγόνες λαμβάνεται ως:

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

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

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

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



Σχήμα 5. 2 Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου διασποράς

Για τη λεπτή κηλίδα, χρησιμοποιείται η παρακάτω απλούστερη 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 πυκνές, 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 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 η_{em} φτάσει μια μέγιστη τιμή η_{max}

5.3.6 Εξάπλωση

Για την ολοκλήρωση των αλγόριθμων 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. 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 προς τη λεπτή κηλίδα. Ο όγκος αυτός συνδέεται με την αύξηση της επιφάνειας της λεπτής κηλίδας μέσω της σχέσης:

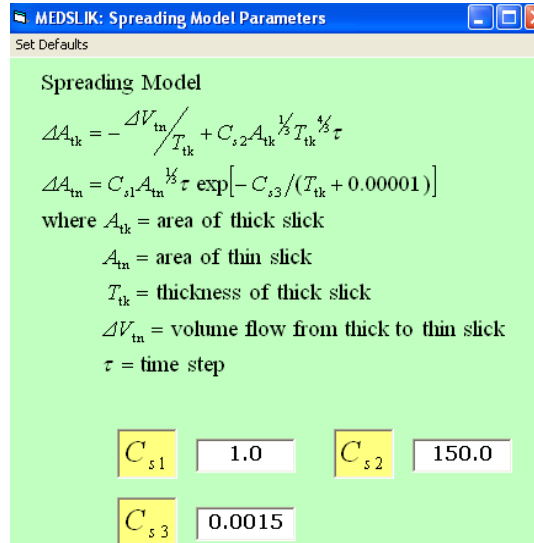
$$\Delta V_{tn}^{(s)} = \Delta A_{tn}^{(s)} T_{tn} \quad (5.38)$$

Ο Mackay προσέγγισε την αύξηση της επιφάνειας της λεπτής κηλίδας. Συγκεκριμένα, θεώρησε 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. Ο τύπος είναι:

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

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

Η μηχανική εξάπλωση θεωρείται ότι συμβαίνει τις πρώτες 48 ώρες μετά τη διαρροή της κάθε υπο-κηλίδας ή ώσπου το παχύ τμήμα της κηλίδας γίνει ίσο με το λεπτό. Μόλις συμβεί ένα από τα δύο, το πρόγραμμα τερματίζει κάθε περαιτέρω εξάπλωση, μεταφέρει όλο το εναπομείναν πετρέλαιο στην παχιά κηλίδα και στα σύννεφα σταγόνων κάτω από αυτό στη λεπτή κηλίδα. Από αυτό το σημείο και έπειτα, το Medslik αγνοεί την εξάτμιση και διασπορά της παχιάς κηλίδας.



Εικόνα 5. 5 Μοντέλο εξάπλωσης του Medslik

5.4 Αποτελέσματα – Γραφικά

Το τρίτο και τελευταίο μέρος του Medslik αφορά στα αποτελέσματα του μοντέλου εξέλιξης των πετρελαιοκηλίδων. Ένα από τα παρεχόμενα menu 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, πρόβλεψης της τροχιάς μίας ή πολλών κηλίδων, μελέτης της μεταφοράς της ρύπανσης. Ανάλογα με το ποια επιλογή θα γίνει, αντίστοιχα θα είναι τα αποτελέσματα του πεδίου Output.

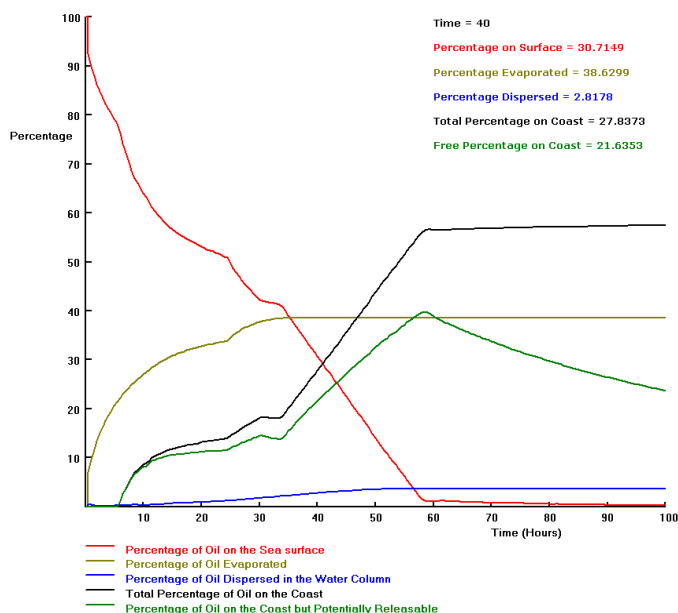


Εικόνα 5. 6 Γραφική απεικόνιση του πετρελαίου μετά από ατύχημα

Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν γραφικά της εικόνας της πετρελαιοκηλίδας σε διάφορους χρόνους, διαγράμματα για τις παραμέτρους συναρτήσει του χρόνου, αριθμητικά αποτελέσματα αλλά και animation.

Επιλέγοντας από το menu «File» την εντολή της προβολής του πετρελαίου στην επιφάνεια (view surface oil) σε συγκεκριμένο χρόνο, φαίνεται στην οθόνη μια εικόνα χάρτης. Στο χάρτη φαίνεται η εικόνα της πετρελαιοκηλίδας, το διάνυσμα της ταχύτητας του ανέμου και η κυκλοφορία των θαλάσσιων ρευμάτων. Στα δεξιά υπάρχει υπόμνημα της χρωματικής κλίμακας που αναπαριστά την πυκνότητα του πετρελαίου σε t / Km^2 . Τέλος, κάτω δεξιά φαίνονται η τιμές των διαφόρων παραμέτρων σχετικών με τις φυσικές διεργασίες που επηρεάζουν την κηλίδα. 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 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 συναρτήσει του χρόνου.



Εικόνα 5. 7 Διαγράμματα παραμέτρων συναρτήσει του χρόνου

6. Το GNOME

6.1 Εισαγωγή

Το πρόγραμμα GNOME (General NOAA Oil Modeling Environment) είναι ένα freeware open source πρόγραμμα - διαδραστικό περιβαλλοντικό σύστημα προσομοίωσης για την ταχεία διαμόρφωση των τροχιών ρύπων στο θαλάσσιο περιβάλλον (π.χ. πετρελαιοκηλίδα) του ινστιτούτου NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) γραμμένο σε C++ (NOAA, Office of Response and Administration (2002) GNOME User's Manual). Το GNOME 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.

Το GNOME παράγει την καλύτερη πρόβλεψη σύμφωνα με τα δεδομένα του σεναρίου διαρροής ενώ παράλληλα μπορεί να εμφανίσει και αποτελέσματα συμπεριλαμβανομένου ενός ελάχιστου βαθμού αβεβαιότητας.

Μέσω του GNOME δίνεται η εξέλιξη της τροχιάς του ρυπαντή και πως αυτή επηρεάζεται από τους ανέμους και μια σειρά από χημικές ή άλλες μηχανικές διαδικασίες όσο το πετρέλαιο που διέρρευσε παραμένει στην επιφάνεια του νερού.

Το GNOME παρουσιάζει τα αποτελέσματα από την επεξεργασία του σεναρίου διαρροής σε μορφή ταινίας επάνω στο χάρτη της περιοχής μελέτης. Με μαύρο χρώμα εμφανίζεται η βέλτιστη λύση ενώ με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η διασπορά του ρυπαντή συνυπολογιζόμενης της ελάχιστης αβεβαιότητας.

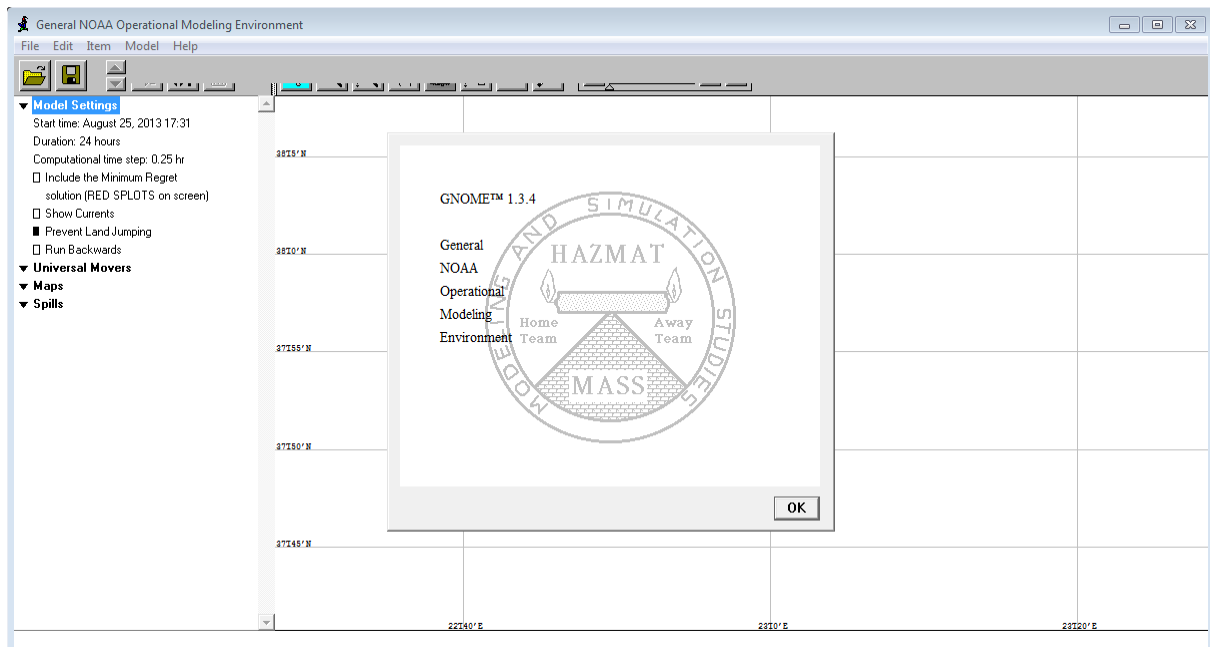
Το GNOME είναι ένα μοντέλο πρόβλεψης της τροχιάς που μπορεί να:

- 1) Υπολογίσει την τροχιά των διαρροών από την επεξεργασία των πληροφοριών που παρέχονται για τον άνεμο και τις καιρικές συνθήκες, τις συνθήκες κυκλοφορίας, τη ροή του ποταμού, και την πετρελαιοκηλίδα ή πετρελαιοκηλίδες που επιθυμείται να προσομοιωθούν.

- 2) Προβλέπει τις τροχιές που μπορούν να προκύψουν από την ανακρίβεια (αβεβαιότητα) στις παρατηρήσεις και στις προβλέψεις των καιρικών συνθηκών που εισέρχονται ως πληροφορίες στο πρόγραμμα.
- 3) Χρησιμοποιήσει τις καιρικές συνθήκες με αλγόριθμους για να κάνει απλές προβλέψεις σχετικά με τις αλλαγές που υφίσταται το πετρέλαιο ενώ είναι εκτεθειμένο στο περιβάλλον στην επιφάνεια της θάλασσας.
- 4) Γρήγορα να ενημερωθεί, να επαναυπολογίσει και να αποθηκευτεί με νέες πληροφορίες.
- 5) Παράσχει τροχιά εξόδου (συμπεριλαμβανομένων των εκτιμήσεων αβεβαιότητας) σε γεωγραφικά προσδιορισμένη μορφή, τέτοιου τύπου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος σε GIS (Geographic Information System) προγράμματα.

Επειδή το GNOME δημιουργήθηκε ως ένα εργαλείο για διάφορα είδη χρηστών, δημιουργήθηκαν τρεις διαφορετικοί τρόποι λειτουργίας και χρήσης του μοντέλου:

- 1) Βασική Λειτουργία (Standard Mode)
- 2) Λειτουργία Εξόδου GIS (GIS Output Mode)
- 3) Λειτουργία Διάγνωσης (Diagnostic Mode)



Εικόνα 6. 1 Αρχικό παράθυρο εργασίας προγράμματος GNOME στη λειτουργία Diagnostic Mode

Στη «Βασική Λειτουργία», την πιο αυτοματοποιημένη λειτουργία του GNOME, φορτώνεται στο πρόγραμμα ένα προανπτυγμένο αρχείο με όνομα Location File (Αρχείο Τοποθεσίας) το οποίο περιέχει κυρίως δεδομένα θέσης, όπως ένα χάρτη της περιοχής και τα κυρίαρχα

ρεύματα. Στη συνέχεια το πρόγραμμα μέσω αυτοματοποιημένης διαδικασίας ζητά τις πληροφορίες τις οποίες χρειάζεται για να τρέξει το μοντέλο. Ο χρήστης σε αυτή τη λειτουργία καλείται να κάνει απλά εισαγωγή κάποιων πληροφοριών όπως ποσότητα διαρροής, θέση διαρροής, είδος ρυπαντή (σταθερός ή μεταβαλλόμενος), διεύθυνση, ταχύτητα ανέμου και ώρα παρατηρήσεων σε περίπτωση μεταβαλλόμενου ανέμου, σε μια σειρά από παράθυρα σε αυτοματοποιημένα βήματα του αλγορίθμου του προγράμματος. Στην Βασική Λειτουργία, μπορεί να αποθηκευθεί το στήσιμο του μοντέλου για μεταγενέστερη χρήση, ή ακόμα μπορεί να εκτυπωθεί μια εικόνα ή να δημιουργηθεί μια ταινία η οποία να τρέχει το μοντέλο. Στη Βασική λειτουργία του το GNOME δεν είναι αρκετά ευέλικτο ώστε να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση διαρροών, αλλά είναι ένα καλό εργαλείο για την προσομοίωση διαρροών, σχετικά με τις κατασκευές και τις συνθήκες κυκλοφορίας τάνκερ σε συγκεκριμένες θέσεις όσον αφορά την επικινδυνότητα. Είναι ένα καλό εργαλείο για χρήση όσον αφορά την εκτίμηση επικινδυνότητας (Risk Assessment).

Στη Λειτουργία Εξόδου GIS, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ένα Αρχείο Τοποθεσίας για να δημιουργηθεί το επιθυμητό σενάριο. Σε αυτή τη λειτουργία, ωστόσο, μπορείτε να εξαχθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου σε GIS - συμβατή μορφή. Το GNOME μπορεί να παράγει ως output την τροχιά σε τύπο αρχείου που μπορεί να διαβαστεί σε έναν αριθμό διαφορετικών προγραμμάτων GIS. Τα δεδομένα από τα 2 προγράμματα (GNOME και κάποιο άλλο GIS πρόγραμμα) μπορούν να αποθηκευθούν σε ψηφιακή μορφή για περαιτέρω επεξεργασία και να εκτυπωθούν ως ένα. Η GIS Λειτουργία εξόδου χρησιμοποιείται κυρίως για τη χωρική ανάλυση ή για ανάλυση περιστατικών έκτακτης ανάγκης ατυχήματος διαρροής πετρελαίου.

Στην λειτουργία τακτικής απόκρισης του GNOME, Λειτουργία Διάγνωσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα Αρχείο Τοποθεσίας, λειτουργώντας επικουρικά για τη ρύθμιση του μοντέλου, ή μπορεί να δημιουργηθεί το μοντέλο από το μηδέν. (Χωρίς το Αρχείο Τοποθεσίας, το GNOME απαιτεί την εισαγωγή της ακτογραμμής και πληροφορίες σχετικά με το υδροδυναμικό της περιοχής.)

Στη Λειτουργία Διάγνωσης παρέχονται οι εξής επιπλέον δυνατότητες:

- 1) Πλήρης πρόσβαση σε όλες τις παραμέτρους του μοντέλου και τις επιλογές κλιμάκωσης.
- 2) Προσαρμογή του μοντέλου ώστε να εκπροσωπεί δεδομένα σε πραγματικό χρόνο.

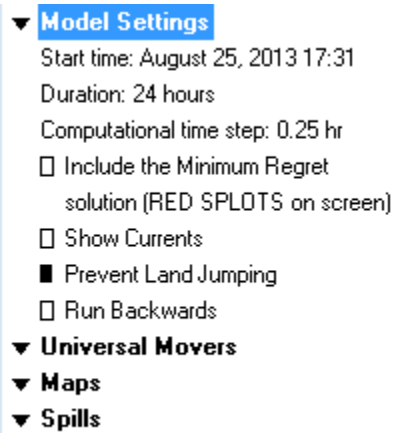
- 3) Με προηγμένη εκπαίδευση επάνω στο πρόγραμμα και εμπειρία πάνω στη δημιουργία υδροδυναμικών μοντέλων, δίνεται η δυνατότητα ανάπτυξης Αρχείων Τοποθεσίας.
- 4) Μπορούν να οριστούν συντελεστές που ελέγχουν το μέγεθος και την κατανομή των χρησιμοποιούμενων συντελεστών αβεβαιότητας στις εκτιμήσεις "Ελάχιστης Αβεβαιότητας". (Στη Βασική Λειτουργία και στη Λειτουργία Εξόδου GIS, οι τιμές καθορίζονται στα Αρχεία Τοποθεσίας από τους κατασκευαστές των Αρχείων και δεν είναι προσβάσιμες στο χρήστη.

Η Λειτουργία Διάγνωσης είναι σχεδιασμένη κυρίως για έμπειρους μοντελιστές, όπως σχεδιαστές έκτακτης ανάγκης και μοντελιστές που παρέχουν πλήρη τακτική υποστήριξη σε ομάδες για την αντιμετώπιση διαρροών. Η χρήση του προγράμματος στη Λειτουργία Διάγνωσης είναι αρκετά σύνθετη και η NOAA δε συνιστά τη χρήση του προγράμματος από άπειρους μοντελιστές για την αντιμετώπιση διαρροών.

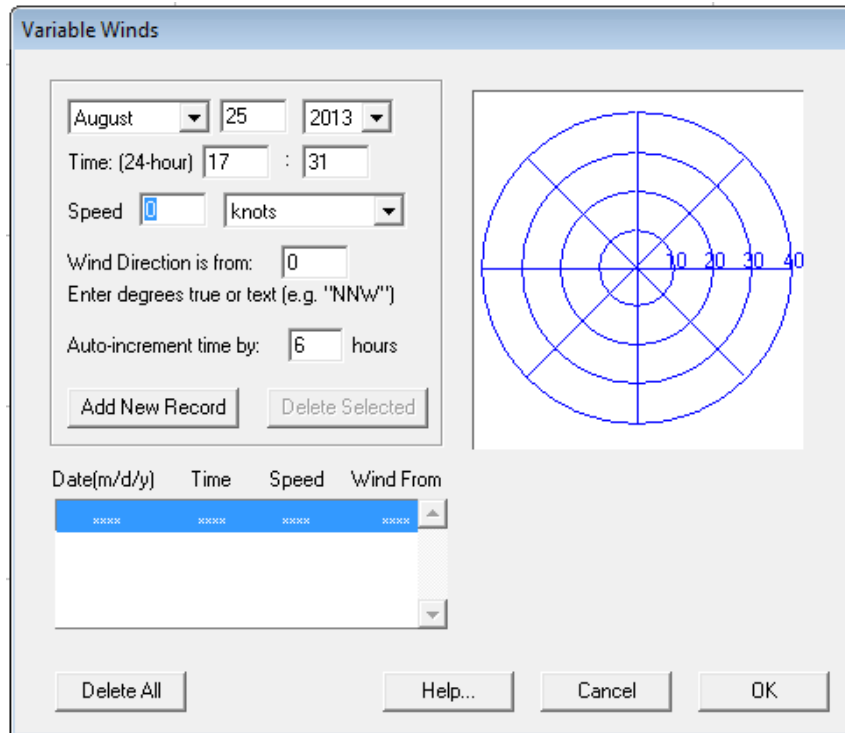
6.2 Εισαγωγή δεδομένων πετρελαιοκηλίδας

Για να χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα χρειάζεται ένα σενάριο διαρροής. Στη Βασική Λειτουργία το πρόγραμμα καθοδηγεί στην εισαγωγή των στοιχείων, ενώ στη Λειτουργία Διάγνωσης στα αριστερά του παραθύρου εργασίας του προγράμματος υπάρχει μία στήλη όπου εκεί συμπληρώνονται τα δεδομένα του σεναρίου. Το σενάριο αυτό θα πρέπει να περιέχει στοιχεία ικανά για να παράγουν αποτέλεσμα. Τέτοια στοιχεία είναι:

- 1) Το Location File (Αρχείο Τοποθεσίας). Είναι αρχεία του προγράμματος που περιέχουν το χάρτη της περιοχής και γενικές πληροφορίες σχετικά με την περιοχή μελέτης) στη Βασική λειτουργία, ή ένα χάρτη
- 2) Η ακριβής θέση της πηγής της διαρροής του ρυπαντή τόσο κατά την έναρξη όσο και κατά το πέρας της διαρροής.
- 3) Η ποσότητα του ρυπαντή που διέρρευσε.
- 4) Ο χρόνος που διήρκησε η διαρροή
- 5) Είδος (σταθερός ή μεταβαλλόμενος), διεύθυνση, ταχύτητα ανέμου και ρευμάτων και ώρα παρατηρήσεων σε περίπτωση μεταβαλλόμενου ανέμου και ρευμάτων.



Εικόνα 6. 2 Πεδίο εισαγωγής δεδομένων πετρελαιοκηλίδας



Εικόνα 6. 3 Πεδίο εισαγωγής διεύθυνσης, έντασης και διάρκειας ανέμου

6.3 Το μαθηματικό μοντέλο

Η λειτουργία του GNOME διέπεται από την επεξεργασία των δεδομένων εισόδου που προκαλούν την κίνηση του πετρελαίου που έχει διαρρεύσει, τα οποία το πρόγραμμα

ονομάζει «Μετακινητές» (Movers). Τα Movers (=μετακινητές) είναι οποιαδήποτε φυσική διαδικασία μπορεί να προκαλέσει κίνηση του ρύπου (δηλ. πετρελαίου) στο νερό τα ρεύματα, οι άνεμοι, και η διάχυση. Οι μετακινητές αυτοί εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες στο πρόγραμμα. Οικουμενικοί υποκινητές που ισχύουν παντού και συνήθως αποτελούνται από αέρα και διάχυση. Όλα τα άλλα ισχύουν μόνο για το χάρτη με τον οποίο συνδέονται. Η χρήση πολλαπλών χαρτών είναι πραγματικά μια χρήσιμη δυνατότητα που παρέχεται ως «κληρονομιά» από τα προηγούμενα μοντέλα της NOAA (μοντέλα που αναπτύχθηκαν σε μια εποχή που οι υπολογιστές δεν είχαν επαρκή μνήμη για ανάγνωση σε ένα χάρτη μια ολόκληρης παράκτιας περιοχής). Για το μεγαλύτερο εύρος των ατυχημάτων που μελετώνται, ένας ενιαίος χάρτης είναι πλέον επαρκής και όλοι οι μετακινητές μπορούν να τοποθετηθούν σε αυτόν τον χάρτη (NOAA, Office of Response and Restoration (2012) “General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) Technical Documentation”).

6.3.1 Μεταφορά – Διάχυση – Προσαιγιάλωση

Για να υπολογιστεί η συνολική κίνηση, η u (ανατολή-δύση) και η v (βορρά-νότου) συνιστώσες της ταχύτητας από τα ρεύματα, ο άνεμος, η διάδοση και κάθε άλλη αφορμή κίνησης προστίθενται μαζί σε κάθε χρονικό βήμα, i , χρησιμοποιώντας ένα σύστημα εξισώσεων Euler (δηλαδή, μια 1ης τάξης εξίσωση, Runge-Kutta μέθοδος). Στις εξισώσεις δίνεται ένα σημείο (x, y, z, t) και το μοντέλο καλείται να επιστρέψει μια μετατόπιση $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ σε t (1).

$$\Delta x = \frac{u}{\cos(y)} * \Delta t, \Delta y = \frac{v}{111,120.00024} * \Delta t, \text{ και } \Delta z = 0 \quad (6.1)$$

όπου

$\Delta t = t - t_1$ είναι ο χρόνος που μεσολάβησε μεταξύ των χρονικών βημάτων i

y είναι το γεωγραφικό πλάτος σε ακτίνια

111,120.00024 είναι ο αριθμός των μέτρων κατά διακριτική ευχέρεια (υποθέτει γεωγραφικό πλάτος $1' = 1$ ναυτικό μίλι παντού)

Και $(\Delta x, \Delta y)$ είναι η δισδιάστατη απεικόνιση του γεωγραφικού μήκους και του γεωγραφικού πλάτους μετατόπισης, αντίστοιχα, στο δεδομένο βάθος του στρώματος z . Προς το παρόν, η κατακόρυφη κίνηση δε μπορεί να υπολογιστεί στο GNOME (έτσι η μετατόπιση, Δz , που

πραγματοποιήθηκε είναι στο μηδέν). Η NOOA ισχυρίζεται ότι αυτό το χαρακτηριστικό είναι υπό ανάπτυξη.

Ο υπολογισμός της συνολικής μετατόπισης είναι μια απλή προσθήκη του διανύσματος της μετατόπισης ενός δεδομένου σωματιδίου ρύπου από κάθε μετακινητή στο χρονικό βήμα. Τυπικά υπάρχει σημαντική αβεβαιότητα στην ακρίβεια της πρόβλεψης εισόδου και / ή στα στοιχεία μετρήσεων. Επίσης, σε γενικές γραμμές οι εισροές στο μοντέλο είναι πλεγματικά δεδομένα που οδηγούν σε μη ομαλή πεδία ταχύτητας - περιορίζοντας τη δυνατότητα χρήσης εξισώσεων υψηλότερης τάξης Runge-Kutta (εάν πρόσθετη ακρίβεια είναι επιθυμητή, μειώνοντας στο μοντέλο το χρονικό βήμα συχνά παράγεται ένα βελτιωμένο αποτέλεσμα πολλές φορές όμοιο με κάποιο μοντέλο που θα χρησιμοποιούσε μια πιο πολύπλοκη μέθοδο ανώτερης τάξης). Κάθε μετακινητής που υπάρχει στο setup του μοντέλου μπορεί να είναι ενεργός ή ανενεργός σε κάθε δεδομένη στιγμή. Μόνο οι μετακινητές που έχουν επισημανθεί ως ενεργοί χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό κατά το τρέξιμο του μοντέλου.

Σε κάθε χρονικό βήμα και αφού τα σωματίδια έχουν μετακινηθεί, το GNOME ελέγχει το χάρτη για να ελεγχθεί αν οι νέες θέσεις των στοιχείων βρίσκονται στο έδαφος ή στο νερό. Ο αλγόριθμος προσάραξης ελέγχει το σύνολο της ακτογραμμής στον χάρτη ανάμεσα στο παλιό σημείο και στο νέο σημείο για να βεβαιωθεί ότι τα στοιχεία δεν πηδούν πάνω από την ξηρά και τις παραλίες. Η τοποθεσία στο νερό ακριβώς πριν φτάσουν τα σωματίδια στη γη αποθηκεύεται ώστε να χρησιμοποιήσει ως σημείο εκκίνησης όταν και εάν ένα σωματίδιο έχει εκ νέου διασπορά. Αν η επιλογή «prevent land jumping» δεν είναι επιλεγμένη, ένας απλοποιημένος αλγόριθμος εξετάζει εάν το νέο σημείο είναι στο νερό ή στην ξηρά και στη συνέχεια απλά αγνοεί την πορεία που πήρε το στοιχείο. Η προεπιλογή είναι να λαμβάνεται υπόψη η γη. Μέχρι τώρα δεν έχει υπάρξει στο GNOME κάποιο είδος μοντελοποίησης για την αλληλεπίδραση του ρύπου με ιζήματα.

Η ημιζωή είναι μια παράμετρος που περιγράφει εμπειρικά την πρόσφυση του πετρελαίου στην ακτογραμμή. Είναι μια συνάρτηση μεταξύ του υποστρώματος πορώδους, της παρουσίας ή απουσίας βλάστησης, της εγγενούς ακαμψίας του πετρελαίου και άλλων φυσικών ιδιοτήτων και διαδικασιών του περιβάλλοντος. Αυτές οι διαφορετικές παράμετροι έχουν συγχωνευθεί σε μία μόνο παράμετρο, την Ημιζωή ("Half-Life"). Αυτή η παράμετρος είναι ο αριθμός των ωρών κατά τον οποίο το ήμισυ του πετρελαίου σε μια συγκεκριμένη

ακτογραμμή αναμένεται να αποκολληθούν αν (1) υπάρξει άνεμος ή δυνάμεις διάχυσης και (2) το επίπεδο της θάλασσας είναι στο ίδιο επίπεδο, ή υψηλότερο, από ότι το επίπεδο του λαδιού. Αυτή η παράμετρος, μαζί με τα άλλα περιβαλλοντικά δεδομένα, επιτρέπει την ανέλκυση του πετρελαίου που έχει επηρεάσει μια δεδομένη ακτογραμμή. Η προεπιλογή της ημιζωής στο GNOME είναι 1 ώρα. Αν η τιμή είναι υψηλότερη το πετρέλαιο θα κολλήσει στην ακτογραμμή επιπλέον, ενώ για τις πολύ μικρές τιμές το πετρέλαιο αποκολλάται αμέσως και επανακυκλοφορεί στο θαλάσσιο περιβάλλον. Στη θεωρία ο χρόνος ημιζωής μπορεί να ρυθμιστεί σε διαφορετικές τιμές κατά μήκος διαφορετικών τμημάτων της ακτογραμμής ανάλογα με τον τύπο της παραλίας. Η πιθανότητα P ένα στοιχείο να επανακυκλοφορήσει στο θαλάσσιο περιβάλλον, που προσδιορίζεται με τον προεπιλεγμένο χρόνο ημιζωής (1 ώρα), δίνεται από την Εξίσωση (2).

$$p_{refloat} = 1 - e^{\frac{-t \cdot \ln(2)}{(1 \text{ hour})}} = 1 - 2^{-t} \quad (6.2)$$

Το GNOME δέχεται είτε εξαρτώμενα από τον χρόνο είτε σταθερά δεδομένα. Τα δεδομένα που εξαρτώνται από το χρόνο είναι συνήθως ρεύματα που επηρεάζονται από παλίρροια. Για παράδειγμα, η παλιρροϊκή εκπροσώπηση στα περισσότερα αρχεία τοποθεσίας είναι της μορφής $U(x, y) T(t)$. Χρησιμοποιείται ένα χωρικό πρότυπο από το υδροδυναμικό πρόγραμμα CATS της NOAA και οι εκροές του προγράμματος ονομάζονται U_CATS (NOAA, Office of Response and Restoration (2012) "General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) Technical Documentation"). Έτσι, για ένα σταθμό στο σημείο (x_0, y_0) , τα ρεύματα σε οποιοδήποτε σημείο $U(x, y)$ δίνεται από την Εξίσωση (3).

$$\vec{U}(x, y) = \vec{T}(x_0, y_0, t) * \frac{\vec{U}_{CATS}(x, y)}{\vec{U}_{CATS}(x_0, y_0)} \quad (6.3)$$

Το GNOME δέχεται επίσης δεδομένα από άλλα υδροδυναμικά μοντέλα σε ορθογώνια, καμπυλόγραμμα, και τριγωνικά πλέγματα για να χρησιμοποιούνται ως ρεύματα. Στα ορθογώνια πλέγματα GNOME επιτρέπει οι ταχύτητες να είναι στο κέντρο των κουτιών του καννάβου του πλέγματος ή στους κόμβους, αλλά σε κάθε περίπτωση δεν χρησιμοποιεί την ίδια τιμή για ένα κουτί δικτύου και δεν παρεμβάλλει. Τα ορθογώνια πλέγματα πρέπει να φορτώνονται πάνω σε ένα χάρτη. Για καμπυλόγραμμα και τριγωνικά πλέγματα GNOME δημιουργείται ένας χάρτης από το όριο του πλέγματος, εάν δεν υπάρχει διαθέσιμος BNA χάρτης. Όταν τοποθετούνται καμπυλόγραμμα πλέγματα το GNOME χωρίζει κάθε κουτί στο πλέγμα σε δύο τρίγωνα και υποθέτει ότι η ταχύτητα και για τα δύο τρίγωνα είναι στην κάτω

αριστερή γωνία. Το GNOME προεκτείνει επίσης το πλέγμα προς τα πάνω και δεξιά, και εφαρμόζει τις τιμές ταχύτητας για την πρώτη γραμμή και στην τελευταία στήλη εκεί.

Για τη μελέτη της όλης της τοπολογίας του δικτύου σε πεπερασμένα δίκτυα, το GNOME χρησιμοποιεί τον Αλγόριθμο δέντρου DAG. Στο GNOME, κάθε σωματίδιο αντιμετωπίζεται ως Λαγκραντζιανό Στοιχείο (Lagrangian Element, LE). Ο αλγόριθμος δέντρου DAG παρέχει τα μέσα για να προσδιορίσει κάθε LE σε ποια κυψελίδα είναι μέσα, έτσι ώστε να προσδιοριστεί η ταχύτητα στον πιο κοντινό κόμβο. Ο αλγόριθμος δέντρου DAG επιτρέπει στο GNOME να προσδιορίσει πότε ένα LE έχει περάσει έξω από την περιοχή σε άγνωστα νερά ή έχει προσαιγιαλωθεί.

Η τυχαία εξάπλωση, δηλαδή η διάδοση, η διάχυση του πετρελαίου γίνεται με ένα απλό αλγόριθμο τυχαιότητας με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Ο αλγόριθμος τυχαιότητας αυτός βασίζεται στην τιμή διάχυσης D , που στο μοντέλο αντιπροσωπεύει την οριζόντια δίνη διαχύσεως στο νερό. Μια χαμηλή τιμή είναι $1000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, και μία υψηλή τιμή είναι μεταξύ 100.000 έως και $1.000.000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. Η προεπιλογή του μοντέλου είναι $100.000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. Κατά τη διάρκεια των διαρροών, η τιμή του D υπολογίζεται από τα δεδομένα της έκτασης της πετρελαιοκηλίδας αντίστροφα από τον τύπο.

Το GNOME χρησιμοποιεί τους κλασσικούς τύπους διάχυσης όπως δίνονται στην Εξίσωση (6.4) και Εξίσωση (6.5).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C \quad (6.4)$$

όπου C είναι η συγκέντρωση του υλικού και το D είναι ο συντελεστής διάχυσης

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x * \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y * \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (6.5)$$

όπου A και D είναι οι συντελεστές διάχυσης διανυσμάτων στην x και y κατεύθυνση

Η μέση θέση παραμένει η αρχική, αλλά η διάχυση αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο. Η ακριβής μορφή της κατανομής πιθανοτήτων μετακίνησης του πετρελαίου λόγω διάχυσης είναι άσχετη όσο δεύτερη στιγμή του είναι $2D\Delta t$ (Csanady, 1973). Η διάχυση επομένως μπορεί να προσομοιωθεί με οποιαδήποτε κατανομή, με το συντελεστή διάχυσης είναι το ήμισυ της διακύμανσης της κατανομής όπου κάθε βήμα διαιρείται με τη χρόνο-βαθμίδα (Εξίσωση 6.6).

$$D_x = \frac{1}{2} * \frac{\sigma_x^2}{\Delta t} \quad (6.6)$$

Στο GNOME υπολογίζεται ένα $(\Delta x, \Delta y)$ από την είσοδο του συντελεστή διάχυσης D και σε κάθε βήμα μια dx και dy επιλέγονται τυχαία από μια ομοιόμορφη κατανομή (των αριθμών κινητής υποδιαστολής) μεταξύ -1 και 1 , έτσι ώστε $-\Delta x \leq dx \leq \Delta x$, $-\Delta y \leq dy \leq \Delta y$ και $\Delta x = \Delta y$. Αυτό οδηγεί σε μια τετραγωνική κατανομή των σημείων Η διακύμανση αυτής της κατανομής δίδεται από την εξίσωση (6.7), και ομοίως για σ_y^2 .

$$\sigma_x^2 = \int_{-\Delta x}^{\Delta x} \frac{x^2}{2 * \Delta x} dx = \frac{\Delta x^2}{3} \quad (6.7)$$

Τέλος τα Δx και Δy υπολογίζονται από την εξίσωση (6.8):

$$\Delta x = \frac{dx * \sqrt{\frac{6 * D}{10,000 * \Delta t}}}{\cos(y)}, \Delta y = dy * \frac{\sqrt{\frac{6 * D}{10,000 * \Delta t}}}{111,120.00024} \quad (6.8)$$

Τέλος υπάρχει ένα βάθος (z) που εξαρτάται από τη διάχυση και υπολογίζεται στο GNOME από την Εξίσωση 6.9, αλλά προς το παρόν ο υπολογισμός αυτός είναι διαθέσιμος μόνο για συγκεκριμένα Αρχεία Τοποθεσίας.

$$D = 10^{1+e^{(1-\frac{10}{z})}} \quad (6.9)$$

6.3.2 Φυσικές διεργασίες

Ο τύπος του ρύπου που επιλέγεται για την πετρελαιοκηλίδα καθορίζει τις παραμέτρους που επιλέγονται για την προσομοίωση της αποσάθρωσης και τοιουτοτρόπως υπολογίζεται η πρόβλεψη και απαιτούμενη για τον συγκεκριμένο τύπο πετρελαίου εξάτμιση. Αν η μάζα του στοιχείου είναι μηδέν μετά από κάποιο ορισμένο χρόνο, τότε το στοιχείο θεωρείται εξατμισμένο. Οι τύποι ρύπων που υποστηρίζονται στο GNOME δίνονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 6.1).

Ο πίνακας αυτός είναι κατάλληλος για απλές ασκήσεις και εκπαιδευτικές συγκρίσεις, αλλά δεδομένου ότι οι τύποι πετρελαίου του GNOME και οι καιρικές συνθήκες είναι πολύ στοιχειώδης, κατά τη διάρκεια μιας πραγματικής διαρροής οι τροχιές του GNOME υπολογίζονται ως μη αποσαθρώμενες. Για τον υπολογισμό του βαθμού εξάτμισης η NOAA συστήνει την εφαρμογή του ERD του προγράμματος ADIOS2 της NOAA. Το ADIOS2 έχει πληρέστερη βάση δεδομένων από το GNOME όσον αφορά τα είδη πετρελαίου. Το ADIOS2

είναι ένα εξειδικευμένο πρόγραμμα που πραγματεύεται την τύχη του πετρελαίου από τις διάφορες διαδικασίες αποσάθρωσης.

Πίνακας 6. 1 Οι τύποι ρύπων που υποστηρίζονται στο GNOME ^[22] (NOAA, Office of Response and Restoration (2012) "General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) Technical Documentation")

Pollutant Type	Percent Each Constituent	Half-Life Each Constituent (Hours)	Observational Threshold Time (Hours)
Gasoline	50.0	0.12	18.55
	50.0	5.3	18.55
	0.0	1.0×10^9	18.55
Kerosene & Jet Fuel	35.0	5.3	50.44
	50.0	14.4	50.44
	15.0	69.2	50.44
Diesel	30.0	14.4	170.1
	45.0	48.6	170.1
	25.0	243.0	170.1
Fuel Oil #4	24.0	14.4	170.1
	37.0	48.6	170.1
	39.0	1.0×10^9	170.1
Medium Crude	22.0	14.4	170.1
	26.0	48.6	170.1
	52.0	1.0×10^9	170.1
Fuel Oil #6	20.0	14.4	170.1
	15.0	48.6	170.1
	65.0	1.0×10^9	170.1
User Definable	100.0	1.0×10^9	3.5×10^9
	0.0	1.0×10^9	3.5×10^9
	0.0	1.0×10^9	3.5×10^9
Conservative	100.0	1.0×10^9	3.5×10^9
	0.0	1.0×10^9	3.5×10^9
	0.0	1.0×10^9	3.5×10^9
Default	100.0	1.0×10^9	3.5×10^9
	0.0	1.0×10^9	3.5×10^9
	0.0	1.0×10^9	3.5×10^9

6.3.3 Εξάτμιση

Για την εξάτμιση το GNOME χρησιμοποιεί έναν απλοϊκό αλγόριθμο τριών φάσεων (Εξίσωση 6.10, Boehm, Feist, Mackay, & Paterson, 1982), όπου ο ρύπος αντιμετωπίζεται ως ένα τριμερές συστατικό με ανεξάρτητες ημιζωές.

$$X_{prob} = \frac{P_1 * \left(\frac{-t_i}{2^{H_1-2}} \frac{t_{i-1}-2*t_i}{H_1} \right) + P_2 * \left(\frac{-t_i}{2^{H_2-2}} \frac{t_{i-1}-2*t_i}{H_2} \right) + P_3 * \left(\frac{-t_i}{2^{H_3-2}} \frac{t_{i-1}-2*t_i}{H_3} \right)}{P_1 * 2^{H_1} + P_2 * 2^{H_2} + P_3 * 2^{H_3}} \quad (6.10)$$

όπου

T και T₁ είναι ο χρόνος που παρήλθε (σε ώρες) κατά το χρονικό βήμα i και στο βήμα i-1, αντίστοιχα, από την κυκλοφορία του στοιχείου

H_i είναι οι ημιζωές κάθε συστατικού (σε ώρες) από τον Πίνακα 1 για τον ρύπο

P_i είναι τα ποσοστά του κάθε συστατικού (ως δεκαδικά) από τον Πίνακα 1 για τον ρύπο.

Για κάθε στοιχείο σε κάθε χρονικό βήμα i, παράγεται ένας τυχαίος αριθμός, το R (0,1), μεταξύ 0 και 1. Εάν το R (0,1) ≤ X, η μάζα του στοιχείου είναι ορισμένη ίση με μηδέν.

6.3.4 Γαλακτωματοποίηση

Για τη Γαλακτωματοποίηση ισχύει ότι ισχύει γενικά για τις φυσικές διεργασίες. Το GNOME δεν προβλέπει τη διαδικασία της γαλακτωματοποίησης του πετρελαίου ως ένα επί το πλείστον επιχειρησιακό πρόγραμμα.

6.3.5 Διασπορά

Το GNOME δεν προβλέπει τρισδιάστατη διασπορά του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη προς το παρόν παρά μόνο σε ορισμένα Αρχεία Τοποθεσίας. Ωστόσο για την ακρίβεια του υπολογισμού των παραγόμενων τροχιών ενσωματώθηκε και υπολογίζεται η επιρροή των κυματισμών που οδηγούν σταγονίδια πετρελαίου μέσα στο νερό. Η επιρροή ενσωματώνεται με το πεδίο εισαγωγής “Windage” (=επιρροή του ανέμου στην κίνηση της κηλίδας). Η ταχύτητα με την οποία ο αέρας κινεί το ρύπο υπολογίζεται συνήθως περίπου στο 3% της ταχύτητας του ανέμου με βάση αναλυτική μελέτη και την εμπειρική παρατήρηση ότι το πετρέλαιο τείνει να εξαπλωθεί και εκατέρωθεν της διεύθυνσης του ανέμου (Stolzenbach, Madsen, Adams, Pollack, & Cooper, 1977). Η εμπειρία και η παρατήρηση οδήγησαν τη NOAA να χρησιμοποιεί έναν συντελεστή της τάξης του 1% με 4%, που προσαρμόζεται με βάση τις επί τόπου παρατηρήσεις (Lehr & Šimeček-Beatty, 2000). Το ίδιο ποσοστό χρησιμοποιείται στο GNOME ως προεπιλογή με ομοιόμορφη κατανομή. Ένα δεδομένο σταγονίδιο πετρελαίου θα κινηθεί με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με το πόσο κοντά είναι στην επιφάνεια δηλαδή το κατά πόσο εκτίθεται άμεσα στον άνεμο. Η μετακινησιακή επιρροή του πετρελαίου είναι χαμηλότερη όσο το πετρέλαιο βρίσκεται

περισσότερο χρόνο κάτω από την επιφάνεια. Λόγω της συγκεκριμένης ιδιότητας του πετρελαίου το μοντέλο παρέχει δύο επιλογές όσον αφορά την αδρανειακή εμμόνη του πετρελαίου να μετακινηθεί λόγω της μετακινήσιακής επιρροής του ανέμου. Δεκαπέντε λεπτά είναι η τυπική (προεπιλογή) εμμόνη του πετρελαίου, και η άπειρη επιμονή είναι η δεύτερη επιλογή η οποία χρησιμοποιείται όταν μοντελοποιούνται βαρύτερα επιπλέοντα αντικείμενα. Σε γενικές γραμμές, θα μπορούσε κανείς να χρησιμοποιήσει την επιλογή της δεκαπεντάλεπτης εμμόνης για το πετρέλαιο, όπου η μετακινήσιακή επιρροή του ανέμου των μεμονωμένων σωματιδίων αυξάνεται και μειώνεται με το χρόνο όσο σωματίδια του πετρελαίου ωθούνται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας από τα κύματα. Άπειρη επιμονή χρησιμοποιείται όταν κάθε ένα από τα σωματίδια επηρεάζεται διαφορετικά από τον άνεμο, αλλά και διατηρεί τη διαφορά αυτή επ'αόριστον - όπως παράδειγμα επιπλέον συντριμμία από ένα σκάφος. Η ποσότητα της διασποράς λόγω του ανέμου δίνεται από την Εξίσωση (6.11).

$$\frac{d\sigma^2}{dt} = S(t) \quad (6.11)$$

όπου

σ^2 είναι η διακύμανση των θέσεων

και $S(t)$ είναι το πόσο εξαπλώνεται το στοιχείο, είναι μια συνάρτηση του χρόνου, επειδή η ταχύτητα του ανέμου είναι συνάρτηση του χρόνου.

Για ένα σταθερό άνεμο, S θα είναι συνεχής και $\sigma^2 = S * t$. Δηλαδή, η διακύμανση των σωματιδίων αυξάνεται γραμμικά στο χρόνο.

6.3.6 Εξάπλωση

Στο GNOME η εξάπλωση του πετρελαίου αντιμετωπίζεται ως στοχαστική διεργασία. Οι βαρυτικές δυνάμεις που επιδρούν στην εξάπλωση της διαρροής αγνοούνται καθώς είναι σημαντικές μόνο κατά τις πρώτες στιγμές μόνο της διαρροής. Η τυχαία εξάπλωση, δηλαδή η διάδοση του πετρελαίου γίνεται με ένα απλό αλγόριθμο τυχαιότητας με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων όπως περιγράφεται στο 6.3.1.

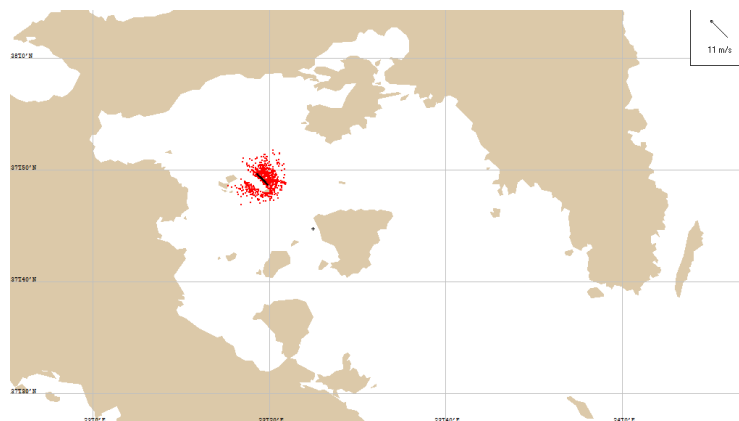
6.4 Αποτελέσματα – Γραφικά

Αφού έχουν εισαχθεί τα δεδομένα σχετικά με την τοποθεσία, τους μετακινητές και τη διαρροή, το μοντέλο τρέχει και παράγει την τροχιά. Το GNOME παρέχει δύο λύσεις για κάθε ένα σενάριο πετρελαιοκηλίδας:

- 1) Τη βέλτιστη λύση
- 2) Τη λύση ελάχιστης αβεβαιότητας

Η βέλτιστη λύση δείχνει το αποτέλεσμα του μοντέλου που προκύπτει από τα δεδομένα εισόδου και υποτίθεται ότι είναι σωστή. Ωστόσο, τα μοντέλα, οι παρατηρήσεις και οι προβλέψεις τους σπάνια είναι τέλεια. Κατά συνέπεια, έχει ενσωματωθεί στο GNOME το σύνολο των αβεβαιοτήτων (όπως οι διακυμάνσεις στον αέρα ή ρεύματα) που μπορεί να προκύψουν. Αυτή η δεύτερη λύση επιτρέπει στο μοντέλο να προβλέψει άλλες πιθανές τροχιές που όμως είναι λιγότερο πιθανό να συμβούν, τροχιές που μπορεί να έχουν υψηλότερη επικινδυνότητα. Η λύση ελάχιστης αβεβαιότητας δίνει πληροφορίες σχετικά με τους τομείς που θα μπορούσαν να επηρεαστούν εάν για παράδειγμα, ο άνεμος φυσάει από μια κάπως διαφορετική κατεύθυνση από ό,τι έχει οριστεί, ή αν τα ρεύματα στην περιοχή ρέουν κάπως πιο γρήγορα ή πιο αργά από ό,τι αναμενόταν.

Η βέλτιστη τροχιά εμφανίζεται ως ένα σύνολο από μικρά σωματίδια ρύπων, που στο χάρτη εμφανίζονται ως μαύρες κουκίδες. Η λύση της ελάχιστης αβεβαιότητας απεικονίζεται στο χάρτη με κόκκινες κουκίδες.



Εικόνα 6. 4 Αποτέλεσμα του GNOME

7. Το FLOW 3D-L

7.1 Εισαγωγή

Το μαθηματικό μοντέλο FLOW-3DL έχει δομηθεί στο Υπολογιστικό Κέντρο του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ υπό την επίβλεψη του κ. Α. Στάμου, Καθηγητή ΕΜΠ. Το FLOW-3DL είναι ένας κώδικας πεπερασμένων διαφορών γραμμένος σε γλώσσα FORTRAN. Έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει υδροδυναμική κυκλοφορία και φαινόμενα στερεομεταφοράς ενώ επιπλέον μπορεί να υπολογίζει συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών και τη μεταβολή της στάθμης του πυθμένα.

```

C*****ENTRY CALCOIL
C*****
C
C      TDAYS = TIME/86400.0
C      THOURS = TIME/3600.0
C      THIN = TIME/60.0
C      PI = 3.141592654
C      WRITE(*,*) 'TIME=' TIME, ' NITER=' NITER
C
C
C*****ENVIRONMENTAL FACTORS
C
C      Wind speed - in knots
C      SPWIN = (U10**2.0+V10**2.0)**0.5
C      SPWINK = SPWIN*1.943844
C      temperature - in Celsius scale
C      TEMP = 15.0
C      temperature - in Kelvin scale
C      TEMPK = TEMP+273.0
C
C      water properties
C      water density - in kg/m^3
C      DENSW = 1026.0
C      kinematic viscosity - in m^2/s
C      VISV = 1.1*10.0**(-6.0)
C      gravity acceleration - in m/s^2
C
C2*****FLOW VELOCITIES??????????????.03????
C
C      K=1
C      DO J=1,NM1
C      DO KK=1,KK(J,K)
C      DO I=IV(J,K,KK),IE(J,K,KK)
C      US(I,J)=0.03*U10+1.5*0.5*(UO(I,J,1)+UO(I+1,J,1))
C      VS(I,J)=0.03*V10+1.5*0.5*(VO(I,J,1)+VO(I,J+1,1))
C      WRITE(*,*) X(I),Y(J),US(I,J),VS(I,J)
C
C      ENDDO
C      ENDDO
C      ENDDO
    
```

Εικόνα 7. 1 Interface από τον κώδικα του FLOW 3DL

7.2 Εισαγωγή δεδομένων πετρελαιοκηλίδας

Οι αναγκαίες είσοδοι για το μοντέλο είναι (i) η ποσότητα (μάζα και όγκος) και οι ιδιότητες του χυμένου πετρελαίου, (ii) οι συντελεστές της ταχύτητας των επιφανειακών ρευμάτων σε κάθε διεύθυνση, (iii) τα χαρακτηριστικά του ανέμου, (iv) τα χαρακτηριστικά της θάλασσας (πυκνότητα και θερμοκρασία), και (v) οι θέσεις των ατυχημάτων στη θάλασσα σε κάρναβο που καθορίζεται από το μοντέλο. Η μέθοδος μελέτης και υπολογισμού σε σωματίδια υπό τη μορφή καννάβου χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο για την παρακολούθηση των διαδικασιών

της μεταφοράς-διασποράς ενώ για την προσομοίωση των διεργασιών αποσάθρωσης του πετρελαίου λόγω του καιρού εφαρμόζονται κλασικά εμπειρικά μοντέλα.

7.3 Το μαθηματικό μοντέλο

Το υδροδυναμικό μοντέλο FLOW-3DL περιλαμβάνει την τρισδιάστατη απεικόνιση της μη σταθερής κατάστασης των ρηχών νερών, τις εξισώσεις συνέχειας και ορμής, διακριτοποιημένες σε επίπεδα. Χρησιμοποιώντας σταθερές διαπερατές διεπαφές μεταξύ των επιπέδων, οι εξισώσεις του μοντέλου ενσωματώνονται καθετοποιημένες. Το πρόγραμμα λειτουργεί με τις εξής ακόλουθες υποθέσεις: (i) η κατανομή της πίεσης (p) είναι υδροστατική, (ii) η προσέγγιση Boussinesq είναι έγκυρη, και (iii) η πίεση (p) στην επιφάνεια τίθεται ίση με την ατμοσφαιρική (μηδέν). Στην παρούσα εργασία το μοντέλο εφαρμόζεται σε ένα ενιαίο στρώμα για να υπολογίσει καθολικές κατά βάθος μέσες ταχύτητες. Για να επιλυθούν οι εξισώσεις του πεδίου ροής και των ποιοτικών παραμέτρων χρειάζεται να ορισθούν οριακές συνθήκες στα ακόλουθα όρια, α) ελεύθερη επιφάνεια, β) πυθμένα, γ) στα στερεά όρια και δ) στα όρια ανοικτής θάλασσας. Στην παρούσα έκδοση του μοντέλου για την πρόγνωση της μοίρας της πετρελαιοκηλίδας λαμβάνονται υπόψη και υπολογίζονται οι διαδικασίες διάδοσης, εξάτμισης, διάλυσης και γαλακτωματοποίηση. Οι αναγκαίες εισοδοί για το μοντέλο είναι (i) η ποσότητα (μάζα και όγκος) και οι ιδιότητες του χυμένου πετρελαίου, (ii) οι συντελεστές της ταχύτητας των επιφανειακών ρευμάτων σε κάθε διεύθυνση, (iii) τα χαρακτηριστικά του ανέμου, (iv) τα χαρακτηριστικά της θάλασσας (πυκνότητα και θερμοκρασία), και (v) οι θέσεις των ατυχημάτων στη θάλασσα σε κάρναβο που καθορίζεται από το μοντέλο. Η μέθοδος μελέτης και υπολογισμού σε σωματίδια υπό τη μορφή καννάβου χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο για την παρακολούθηση των διαδικασιών της μεταφοράς-διασποράς ενώ για την προσομοίωση των διεργασιών αποσάθρωσης του πετρελαίου λόγω του καιρού εφαρμόζονται κλασικά εμπειρικά μοντέλα.

7.3.1 Μεταφορά – Διάχυση – Προσאיγιάλωση

Οι εξισώσεις συνέχειας και ορμής του μοντέλου έχουν ως εξής:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (7.1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = fV - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad (7.2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -fV - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial V}{\partial z} \right) \quad (7.3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad \text{ή} \quad P(z) = -g\rho(\zeta - z) \quad (7.4)$$

Οι μεταβλητές των εξισώσεων είναι η μέση συνιστώσα της ταχύτητας U , V και W , κατά μήκος των αξόνων X , Y και Z , αντιστοίχως για κάθε ένα από τα μελετώμενα επίπεδα σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, ζ η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και P η πίεση. Στον άξονα Z λαμβάνεται ως θετική φορά η ανοδική από την επιφάνεια της θάλασσας, f είναι η παράμετρος Coriolis, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και ρ είναι η πυκνότητα του νερού. Στις εξισώσεις δεύτερης τάξης των εξισώσεων της ορμής, στους όρους της διάχυσης, οι v_h και v_v είναι οι οριζόντιοι και κάθετοι συντελεστές ιξώδους δίνης, αντίστοιχα. Σε αυτή την περίπτωση οι κατανομές τους θεωρούνται σταθερές, ίσες με 100 και 0,1 $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, αντίστοιχα. Οι εξισώσεις (1) έως (4) έχουν λυθεί ρητώς σε ένα κλιμακωτό ορθογώνιο πλέγμα (U , V και W αναλύονται στις όψεις των όγκων ελέγχου, ενώ η ζ υπολογίζεται από τα κέντρα τους) χρησιμοποιώντας την ίδια φορά για την διακριτοποίηση της μεταφοράς και τους όρους διάχυσης. Οι οριακές συνθήκες για τα U , V , W και το ζ περιλαμβάνουν: (α) τα όρια της γης όπου δεν είναι δυνατή η μετακίνηση, 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) και (β) ανοιχτά όρια της θάλασσας, όπου χρησιμοποιείται το μοντέλο «κατάστασης ακτινοβολίας» για τις ταχύτητες (Κρεστενίτης, 1987). Η διαδικασία υπολογισμού έχει ως εξής: πρώτον, η κατανομή πίεσης προσδιορίζεται από την εξίσωση (4). Τότε οι ταχύτητες U και V υπολογίζονται από τις εξισώσεις (2) και (3), αντιστοίχως. Τέλος, οι ταχύτητες W προσδιορίζονται με την επίλυση της εξίσωσης συνέχειας (1), ενώ η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας συνάγεται από την εξίσωση (5), που είναι η γραμμική κινηματική οριακή συνθήκη στο επιφανειακό στρώμα. Στην ελεύθερη επιφάνεια, η εξίσωση συνέχειας γράφεται ως μια γραμμικοποιημένη οριακή κινηματική συνθήκη για τον προσδιορισμό της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} u_{\zeta} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} v_{\zeta} = w_{\zeta} \quad (7.5)$$

όπου ο δείκτης «ζ» συμβολίζει τις τιμές των ταχυτήτων στην ελεύθερη επιφάνεια.

Στην παρούσα εργασία το μοντέλο εφαρμόζεται σε ένα ενιαίο στρώμα για να υπολογίσει καθολικές κατά βάθος μέσες ταχύτητες. Τότε, οι ταχύτητες X και Y των επιφανειακών ρευμάτων (U_{surf} και V_{surf} αντίστοιχα) υπολογίζονται από τις εξισώσεις (6) και (7) (Κουτίτας 1985):

$$U_{surf} = 1.5U + 0.03U_{wx} \quad (7.6)$$

$$V_{surf} = 1.5V + 0.03U_{wy} \quad (7.7)$$

όπου U_{wx} και U_{wy} είναι οι συντελεστές ταχύτητας του ανέμου ($m s^{-1}$), στις διευθύνσεις X και Y, αντίστοιχα.

Υπενθυμίζεται ότι για να επιλυθούν οι εξισώσεις του πεδίου ροής και των ποιοτικών παραμέτρων χρειάζεται να ορισθούν οριακές συνθήκες στα ακόλουθα όρια:

- 1) στην ελεύθερη επιφάνεια,
- 2) στον πυθμένα,
- 3) στα στερεά όρια και
- 4) στα όρια ανοικτής θάλασσας.

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

$$\frac{\tau_{sx}}{\rho} = v_v \frac{\partial u}{\partial z} = C_s u_{10} \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2} \quad (7.8)$$

$$\frac{\tau_{sy}}{\rho} = v_v \frac{\partial v}{\partial z} = C_s v_{10} \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2} \quad (7.9)$$

όπου τ_{sx} και τ_{sy} [M/LT^2] είναι οι οριζόντιες συνιστώσες της διατμητικής τάσης τάσεις 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.

7.3.2 Φυσικές διεργασίες

Στην παρούσα έκδοση του μοντέλου για την πρόγνωση της μοίρας της πετρελαιοκηλίδας λαμβάνονται υπόψη και υπολογίζονται οι διαδικασίες διάδοσης, εξάτμισης, διάλυσης και γαλακτωματοποίησης.

Ο Mackay (1980) ανέπτυξε μία θεωρία πολλαπλών συντελεστών για τον υπολογισμό του ποσοστού διάλυσης του πετρελαίου που φαίνεται στην εξίσωση (10):

$$S_D = K_D A_s S \quad (7.10)$$

όπου S_D είναι ο συνολικός ρυθμός διαλύσεως της πετρελαιοκηλίδας ($gr\ s^{-1}$), K_D είναι ο συντελεστής μεταφοράς της μάζας διάλυσης, S είναι η διαλυτότητα του πετρελαίου σε νερό η οποία δίνεται από την εξίσωση (11):

$$S = S_0 e^{-at} \quad (7.11)$$

Όπου S_0 είναι η διαλυτότητα του φρέσκου αργού πετρελαίου ($gr\ s^{-1}$), a είναι η σταθερά απόσβεσης ($ημέρα^{-1}$).

7.3.3 Εξάτμιση

Η διαδικασία η οποία καθορίζει κυρίως την τύχη μιας πετρελαιοκηλίδας είναι η Εξάτμιση, δεδομένου ότι προκαλεί ταχεία μείωση στον όγκο του χυμένου πετρελαίου και επηρεάζει το ιξώδες και την πυκνότητα του υπολείμματος του πετρελαίου αυξάνοντάς τα. Ο Mackay (1980) πρότεινε μια αναλυτική μέθοδο για τον υπολογισμό του ρυθμού εξάτμισης του πετρελαίου, που εκφράζεται από την εξίσωση (12):

$$F_e = \left(\frac{T}{BT_G}\right) \ln \left(\theta \left(\frac{BT_G}{T}\right) \exp \left(A - \frac{BT_0}{T} \right) + 1 \right) \quad (7.12)$$

όπου F_e είναι το κλάσμα όγκου του πετρελαίου που εξατμίζεται, T είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (K), T_G , 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), θ είναι η έκθεση σε εξάτμιση,

δηλαδή ο όγκος του εκτιθέμενου ατμού σε χρόνο t συναρτήσει του αρχικού όγκου διαρροής, και υπολογίζεται από την εξίσωση (13):

$$\theta = \frac{K_2 A_s t}{V_0} \quad (7.13)$$

όπου V_0 είναι ο αρχικός όγκος της πετρελαιοκηλίδας (m^3), K_2 είναι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας για την εξάτμιση ($m s^{-1}$), που ορίζεται από την εξίσωση (16) (MacKay και Matsugu, 1973):

$$K_2 = 0.0107 U_w^{0.78} D_s^{-0.11} S_c^{-0.67} \quad (7.14)$$

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

7.3.4 Γαλακτωματοποίηση

Γαλακτωματοποίηση είναι η κύρια διεργασία αποσάθρωσης που συμβάλλει στην αύξηση του όγκου του πετρελαίου και συνεπώς στην εμμόνη της κηλίδας. Τα σταγονίδια νερού διασκορπίζονται μέσα στη μάζα του πετρελαίου σχηματίζοντας μια «μους» με αυξημένο ιξώδες και πυκνότητα. Ο Mackay (1980) πρότεινε μια εξίσωση (15) για τον υπολογισμό του ποσοστού γαλακτωματοποίησης η οποία για τον υπολογισμό λαμβάνει υπόψη την επίδραση των συνθηκών ανέμου, τη θερμοκρασία και τα χαρακτηριστικά του πετρελαίου:

$$F_w = K_b \left(1 - \exp \left(\frac{-K_a}{K_b} (U_w + 1)^2 t \right) \right) \quad (7.15)$$

όπου F_w είναι η κλασματική περιεκτικότητα σε νερό, K_a είναι μια σταθερά που δίνεται και είναι ανάλογη με την ταχύτητα του ανέμου, K_b είναι το ιξώδες. Σύμφωνα με Guo και Wang (2009), ο όγκος και η πυκνότητα της πετρελαιοκηλίδας αυξάνουν με το χρόνο λόγω της αλληλεπίδρασης των διαδικασιών της διάλυσης, εξάτμισης και γαλακτωματοποίησης. Η διαδικασία αυτή καθορίζεται από τις εξισώσεις (16) και (17), αντιστοίχως:

$$V_{oil} = \frac{V_0(1-(F_e+F_d))}{1-F_w} \quad (7.16)$$

$$\rho_{oil} = \rho_w F_w + (1 - F_w)(\rho_0 + K_b F_e) \quad (7.17)$$

όπου V_0 είναι ο αρχικός όγκος του χυμένου πετρελαίου (m^3), ρ_{oil} είναι η πυκνότητα του εναπομείναντος πετρελαίου και ρ_0 είναι η αρχική πυκνότητα του χυμένου πετρελαίου ($kg m^{-3}$). Ο όγκος της πετρελαιοκηλίδας V_{oil} , η πυκνότητα του πετρελαίου ρ_{oil} , υπολογίζονται σε κάθε χρονικό βήμα χρησιμοποιώντας τις εμπειρικές εξισώσεις (16) και (17).

7.3.5 Διασπορά

Για την προσομοίωση της μετατόπισης και της τυρβώδους μεταφοράς και διασποράς της πετρελαιοκηλίδας, χρησιμοποιείται η μέθοδος σωματιδίων. Σε κάθε χρονικό βήμα, η νέα μάζα της πετρελαιοκηλίδας χωρίζεται σε έναν αριθμό των σωματιδίων, όπου ο αλγόριθμος της τυχαία 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 x και y διευθύνσεις υπολογίζεται σε κάθε χρονικό βήμα (18)(19):

$$DS_x = U_{surf}Dt + DS\cos\theta \quad (7.18)$$

και

$$DS_y = V_{surf}Dt + DS\sin\theta \quad (7.19)$$

όπου DS είναι η απόσταση (m) που κάθε σωματίδιο ταξιδεύει, αυτό οφείλεται στην οριζόντια διασπορά σε κάθε χρονικό βήμα και δίνεται από την εξίσωση (22) (Chao, 2001.):

$$DS = [R]_0^1 \sqrt{12D_hDt} \quad (7.20)$$

όπου D_h είναι ο οριζόντιος συντελεστής διασποράς ($m^2 s^{-1}$), είναι ένας τυχαίος αριθμός στο διάστημα $[0,1]$ και περιλαμβάνει το στοχαστικό παράγοντα και θ είναι μία γωνία (rad) που υποδηλώνει την τυχαιότητα της κατεύθυνσης του κάθε σωματιδίου, σε κάθε χρονικό βήμα, λόγω της διασποράς, που υπολογίζεται από την εξίσωση (23):

$$\theta = 2\pi[R]_0^1 \quad (7.21)$$

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

$$X = X^0 + DS_x \quad \text{και} \quad Y = Y^0 + DS_y \quad (7.22)$$

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 στιγμής-βήμα.

7.3.6 Εξάπλωση

Από τη στιγμή που το πετρέλαιο έχει χυθεί, λαμβάνει χώρα οριζόντια εξάπλωση πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας η οποία διέπεται από τη βαρύτητα, τη δυναμική, την

επιφανειακή τάση και τις δυνάμεις ιξώδους. Σύμφωνα με Lehr (1984) η διάδοση αυτή του πετρελαίου, η οποία επηρεάζεται από τον άνεμο, είναι μη συμμετρική και μοιάζει με έλλειψη μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση (10):

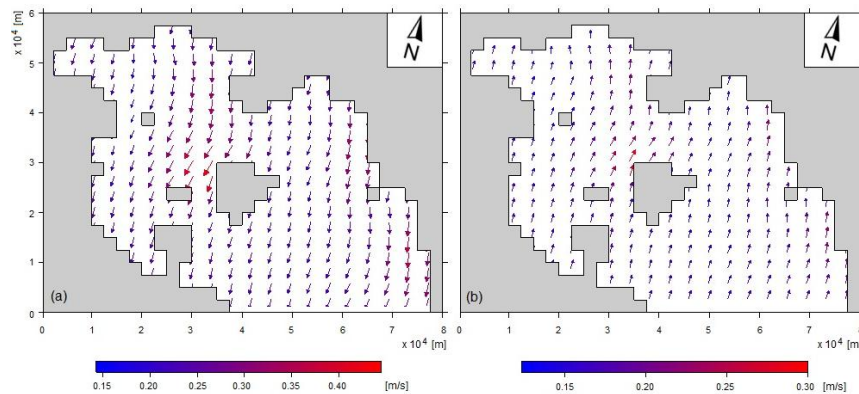
$$A_s = \frac{\pi}{4} L_{min} L_{max} \text{ ή } A_s = 2270 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_{oil}} \right)^{\frac{2}{3}} V_0^{\frac{2}{3}} t^{\frac{1}{2}} + 40 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_{oil}} \right)^{\frac{1}{3}} V_0^{\frac{1}{3}} U_w^{\frac{4}{3}} t \quad (7.23)$$

$$\text{όπου } L_{min} = 53.76 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_{oil}} \right)^{\frac{1}{3}} V_0^{\frac{1}{3}} t^{\frac{1}{4}} \text{ και } L_{max} = L_{min} + 0.95 U_w^{\frac{4}{3}} t^{\frac{3}{4}} \quad (7.24)$$

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 ρ_w και ρ_{oil} οι πυκνότητες του νερού και πετρελαίου, αντίστοιχα, ($kg\ m^{-3}$), V_0 ο όγκος του χυμένου πετρελαίου (βαρέλια), U_w η ταχύτητα του ανέμου (κόμβοι), t είναι ο χρόνος (λεπτά).

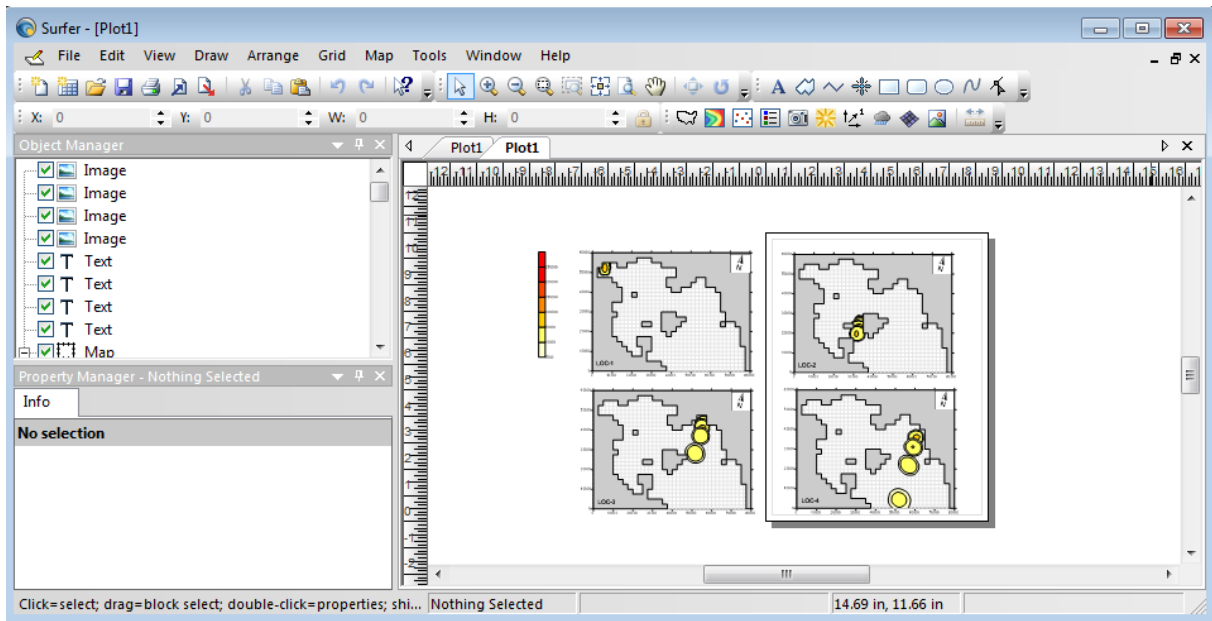
7.4 Αποτελέσματα – Γραφικά

Αφού έχουν εισαχθεί τα δεδομένα, σχετικά με την τοποθεσία, τους μετακινήτες και τη διαρροή, στον κώδικα, το μοντέλο τρέχει και παράγει τα αποτελέσματα σχετικά με την εξάπλωση και την τροχιά του πετρελαίου σε δεδομένους χρόνους σε μορφή υπολογιστικών κελιών. Τα αρχεία των αποτελεσμάτων μεταφορτώνονται στο πρόγραμμα Surfer που οπτικοποιεί τα υπολογιστικά φύλλα εργασίας.



Εικόνα 7. 2 Υδροδυναμικό Σαρωνικού κόλπου υπολογισμένο από το FLOW 3D-L

Το FLOW 3D-L – 7^ο Κεφάλαιο



Εικόνα 7. 3 Interface του προγράμματος Surfer όπου φαίνονται και οπτικοποιημένα αποτελέσματα του FLOW 3DL

8. Επιλογή Σεναρίων Ατυχήματος Πετρελαιοκηλίδας

8.1 Εισαγωγή

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1 είναι η αξιολόγηση και σύγκριση δύο εμπορικών προγραμμάτων (GNOME και MEDSLIK) για την πρόγνωση μετακίνησης της πετρελαιοκηλίδας καθώς επίσης και η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο αυτών μοντέλων με τα αποτελέσματα του προγράμματος FLOW 3DL το οποίο έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Υδραυλικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ (Stamou et al. 2013).

Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης για την και των τριών προγραμμάτων η περιοχή του Σαρωνικού Κόλπου με βασικό κριτήριο επιλογής την αυξημένη κίνηση πλοίων στην ευρύτερη περιοχή αλλά και το γεγονός ότι αποτελεί μία από τις περιοχές στην Ελλάδα που έχουν συμβεί συχνά και μεγάλα ατυχήματα πετρελαιοκηλίδας (βλ. Κεφάλαιο 3).

Απαραίτητη προϋπόθεση για την προσέγγιση του προβλήματος ήταν η επιλογή – εύρεση των πιθανότερων θέσεων των ατυχημάτων εντός του Σαρωνικού Κόλπου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα από τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο της Άγκυρας για την ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης επικινδυνότητας και μετακίνησης του πετρελαιοκηλίδας η οποία και αναπτύσσεται στη συνέχεια (Stamou et al (2013), RISK ASSESSMENT OF OIL SPILL ACCIDENTS Otay et. al, (2013) RISK ASSESSMENT OF OIL SPILL ACCIDENTS).

Οι παράκτιες περιοχές βρίσκονται σε μεγαλύτερο κίνδυνο από ότι οι ανοιχτές θάλασσες όσον αφορά την πιθανότητα ατυχήματος, τις επιπτώσεις και την ευαισθησία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα για το ανωτέρω είναι δύο πολλά μεγάλα ατυχήματα, το ατύχημα του Exxon Valdez και το ατύχημα του Atlantic Empress. Σε ένα από τα σημαντικότερα και πιο γνωστά ατυχήματα πετρελαιοκηλίδας στον κόσμο το ατύχημα με το πετρελαιοφόρο Exxon Valdez διέρρευσαν 40.000 τόνοι πετρελαίου παρακτίως, με τρομερά μεγάλες και σημαντικές συνέπειες, ενώ στο ατύχημα με το Atlantic Empress διέρρευσαν 287.000 τόνοι πετρελαίου δυτικά της Ινδίας στον ωκεανό και η πετρελαιοκηλίδα πέρασε απαρατήρητη σχεδόν στην ιστορία. Η γεινίαση με την ακτή δεν μπορεί από μόνη της να

περιγράψει τις επιπτώσεις και την επικινδυνότητα ενός ενδεχόμενου ατυχήματος. Μεγάλες πετρελαιοκηλίδες έχουν συμβεί και στην ευρύτερη περιοχή των ελληνικών υδάτων όπως το ατύχημα με το *Impress Serenade* (100.000 τόνοι) στον κόλπο του Ναυαρίνου στο Ιόνιο Πέλαγος και η διαρροή στο *Independenta* (94.000 τόνοι) στα στενά της Κωνσταντινούπολης στο Αιγαίο Πέλαγος. Τα ατυχήματα αυτά κατατάσσονται αρκετά υψηλά στην παγκόσμια λίστα ατυχημάτων διαρροής πετρελαίου με φθίνουσα σειρά όσον αφορά τις επιπτώσεις (Νούμερο 12 η διαρροή στο *Independenta*) ωστόσο τα ελληνικά ύδατα παραμένουν απροστάτευτα στο έλεος μιας νέας καταστροφής.

Μια σειρά από μαθηματικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για να προσομοιώσουν την τύχη και τη μετακίνηση των πετρελαιοκηλίδων στο θαλάσσιο περιβάλλον, όπως αναπτύχθηκε και στο Κεφάλαιο 4. Τα μοντέλα αυτά υπολογίζουν την τροχιά του πετρελαίου ενός μεμονωμένου γεγονότος διαρροής πετρελαίου και άλλα προβλέπουν την κατανομή του πετρελαίου στις διάφορες περιβαλλοντικές συνιστώσες, όπως τα επιφανειακά ύδατα, την ατμόσφαιρα, τη στήλη του νερού, υποθαλάσσια και παράκτια τμήματα (π.χ. Mackay 1980, Tan and Otay 1999, Wang et al 2005 2008, Zadeh and Hejazi 2012). Παρά το γεγονός ότι αυτά τα μοντέλα είναι πολύ χρήσιμα για την αξιολόγηση των επιπτώσεων των πετρελαιοκηλίδων, ισχύουν για συγκεκριμένα γεγονότα πετρελαιοκηλίδας και ειδικά με τις επικρατούσες καιρικές και περιβαλλοντικές συνθήκες κατά τη στιγμή του ατυχήματος. Υπάρχει επείγουσα ανάγκη για την ανάπτυξη μαθηματικών εργαλείων που μπορεί να τονίσει τις παράκτιες περιοχές που είναι πιο επιρρεπή σε ατυχήματα πετρελαιοκηλίδας. Τέτοιες προσπάθειες είναι ιδιαιτέρως αναγκαίες για την ανάπτυξη των εθνικών και διεθνών σχεδίων έκτακτης ανάγκης αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων (π.χ. SAFETEC 1999, MRC 2010).

Το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Stamou et al. 2013) ανέπτυξε μια μεθοδολογία για την αξιολόγηση των κινδύνων που συνδέονται με τη διαρροή πετρελαίου στη θάλασσα. Το Αιγαίο Πέλαγος είναι γνωστό ιστορικά για την έντονη θαλάσσια κυκλοφοριακή δραστηριότητα που λαμβάνει χώρα εντός του, για τους περιορισμένους ελιγμούς και τις οικολογικά και οικονομικά ευαίσθητες ακτές του. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται η μέθοδος εύρεσης των σημείων που έχουν το μεγαλύτερο κίνδυνο ατυχήματος.

8.2 Περιγραφή Μεθοδολογίας Επικινδυνότητας

Ο σχετικός κίνδυνος ατυχήματος στο μοντέλο της μεθοδολογίας που περιγράφηκε, περιγράφεται με ένα μοντέλο δικτύου Bayesian (Uluscu et al. 2009), το οποίο υπολογίζει το σχετικό κίνδυνο σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Οι όροι και οι παράγοντες της πιθανότητας ατυχήματος καθορίστηκαν από συνεντεύξεις και ερωτηματολόγια σε εμπειρογνώμονες και το μοντέλο βαθμονομήθηκε σύμφωνα με δεδομένα ατυχημάτων του παρελθόντος. Αυτή η προσέγγιση αναλύει το στατιστικό χαρακτήρα της κίνησης των σκαφών σε σχέση με τον αριθμό των ατυχημάτων. Η προσέγγιση αυτή έχει επεκταθεί και μελετά και τις διεργασίες που ακολουθούν του ατυχήματος με μοντέλα εκτίμησης της τροχιάς και της μοίρας του πετρελαίου.

Το μοντέλο προβλέπει τη συχνότητα των θαλάσσιων ατυχημάτων και τη γεωγραφική κατανομή των χώρων που μπορούν να λάβουν χώρα. Αυτή η πρόβλεψη στηρίζεται στις ακόλουθες παραμέτρους: (i) τα θαλάσσια δεδομένα κίνησης, (ii) την ταχύτητα των επιφανειακών ρευμάτων (Usurf και Vsurf) (iii) τα χαρακτηριστικά του σκάφους (μέγεθος, τον τύπο και το φορτίο), (iv) παράκτιες εγκαταστάσεις, (v) στατιστικά στοιχεία των ατυχημάτων που συνέβησαν, (vi) υδρογραφικά δεδομένα (γεωμετρία και βαθυμετρία της περιοχής μελέτης) και (vii) τα αιολικά χαρακτηριστικά (ταχύτητα και κατεύθυνση) (Otay et. al, (2013) RISK ASSESSMENT OF OIL SPILL ACCIDENTS).

Ως πρώτο βήμα, αναλύθηκαν τα μετεωρολογικά στοιχεία των περιοχών μελέτης για να προσδιοριστεί η κατανομή πιθανότητας του ανέμου, η οποία είναι η κύρια κινητήρια δύναμη για ρεύματα νερού. Δημιουργήθηκε έπειτα ένα μητρώο από τους 8 γεωγραφικούς τομείς {B, BA, A, NA, N, NΔ, Δ, ΒΔ} και από έξι κατηγορίες ανέμου (από 1 bf έως και 6+). Συνυπολογιζόμενης της νηνεμίας συνολικά 49 σενάρια αναλύθηκαν με αντίστοιχες πιθανότητες να χρησιμοποιηθούν ως όροι εισαγωγής στο υδροδυναμικό μοντέλο.

Επιλογή Σεναρίων Ατυχήματος Πετρελαιοκηλίδας – 8^ο Κεφάλαιο

Πίνακας 8. 1 Υδρογραφικοί Παράγοντες Πλοήγησης ^{[17] [18] [19][20][22]} (Πηγή :Otay et. al, (2013) RISK ASSESSMENT OF OIL SPILL ACCIDENTS)

		Relative Index							
Cell Characteristic		1	2	3	4	5	6	7	8
Current magnitude	Pr ($V_{max} > V_{cr}$)	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
Ratio of shoals (depth < 5m)	Pr ($A_{5m} < A_{tot}$)	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
Distance offshore	km	>20	15 - 20	0κτ-15	5-0κτ	0 - 5			
Maneuver restriction index	No of adjacent dry cells	1	2	3	4	5	6	7	8
Ship traffic density	No of ships	0	1-Φεβ	3-Μαϊ	6-Οκτ	Νοε-20	21-30	31-40	>40

Η προκύπτουσα χωρική κατανομή από τα 49 σενάρια χρησιμοποιήθηκε μαζί με τους υδρογραφικούς παράγοντες πλοήγησης του Πίνακα 8.1 που στο μοντέλο λαμβάνονται υπόψη ως οι πιο σημαντικοί όσον αφορά τη συχνότητα των ατυχημάτων στη θάλασσα. Οι εμπειρικοί αυτοί συντελεστές καθορίστηκαν από το MRC μετά τη σύσταση των κέντρων έκτακτης ανάγκης για την κατάστροψη σχεδίων έκτακτης ανάγκης για τις τούρκικες ακτές.

Εφαρμόζοντας τους παράγοντες του Πίνακα 8.1 σε κάθε κυψελίδα του υπολογιστικού τομέα, προσδιορίζεται ο σχετικός δείκτης συχνότητας ατυχημάτων και στη συνέχεια χρησιμοποιείται η χωρική κατανομή του για την επιλογή των πλέον πιθανών τοποθεσιών ατυχημάτων στις περιοχές εφαρμογής. Κάθε πιθανή τοποθεσία ατύχημα χρησιμοποιείται ως αρχική θέση διαρροής στα σενάρια χρησιμοποιώντας παραμέτρους διαρροής πιο πιθανές να συμβούν στις περιοχές που εξετάζονται ατυχήματα πετρελαίου, όπως ο όγκος της υπερχειλίσης και οι ιδιότητες του πετρελαίου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία σε όλα τα σενάρια και για όλα τα προγράμματα οι υπολογισμοί σταματούν όταν περίπου το 10% της αρχικής πετρελαιοκηλίδας προσαιγιαλωθεί.

8.3 Επιλογή Τιμών Παραμέτρων Πετρελαίου

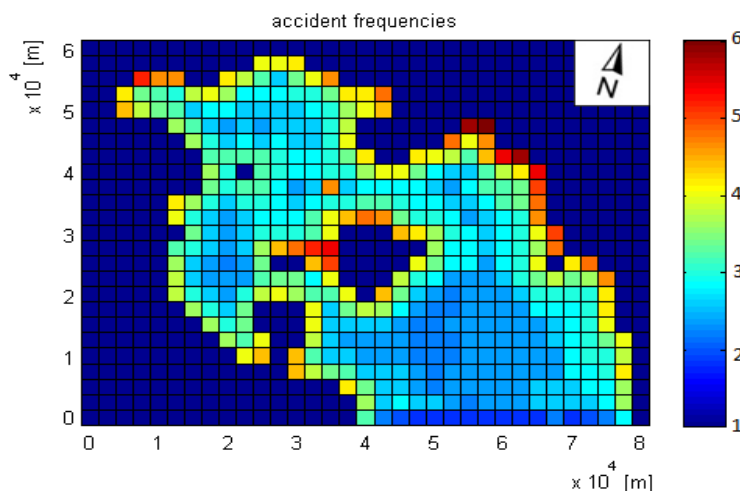
Όπως αναφέρεται και στο 9.2 οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι οι μέσες τιμές της βάσης δεδομένων κινήσεων πετρελαιοφόρων εντός του Σαρωνικού Κόλπου. Αναλυτικά:

- Είδος διαρροής: Μέσο Εμπορικό Πετρέλαιο Πυκνότητας: 827.0 kg/m^3
- Ποσότητα διαρροής: 1500 barrels

8.4 Θέση Περιστατικών

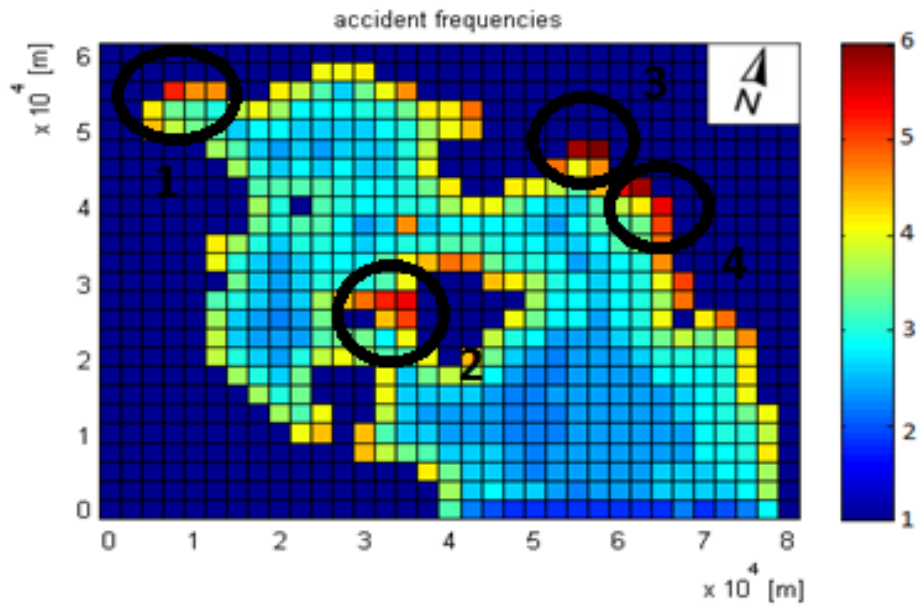
Παρακάτω παρουσιάζεται ο χάρτης του Σαρωνικού Κόλπου σε κάρναβο $2,5 \text{ χλμ} \times 2,5 \text{ χλμ}$ και η συχνότητα ατυχημάτων όπως προκύπτει από την παραπάνω μεθοδολογία (με μπλε οι λιγότερο πιθανές, με καφέ οι περισσότερο πιθανές). Είναι φανερό ότι οι παράκτιες περιοχές είναι αυτές με τη μεγαλύτερη συχνότητα ατυχημάτων λόγω του μικρού βάθους και της εντονότερης κυκλοφορίας. Οι τέσσερις περιοχές με τη μεγαλύτερη συχνότητα ατυχημάτων εντός του Σαρωνικού Κόλπου θα είναι και οι τέσσερις περιοχές στα αντίστοιχα σενάρια που εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Στον Πίνακα 8.2 παρουσιάζονται τα δεδομένα των «τρεξιμάτων» για κάθε ένα από τα σημεία διαρροής.

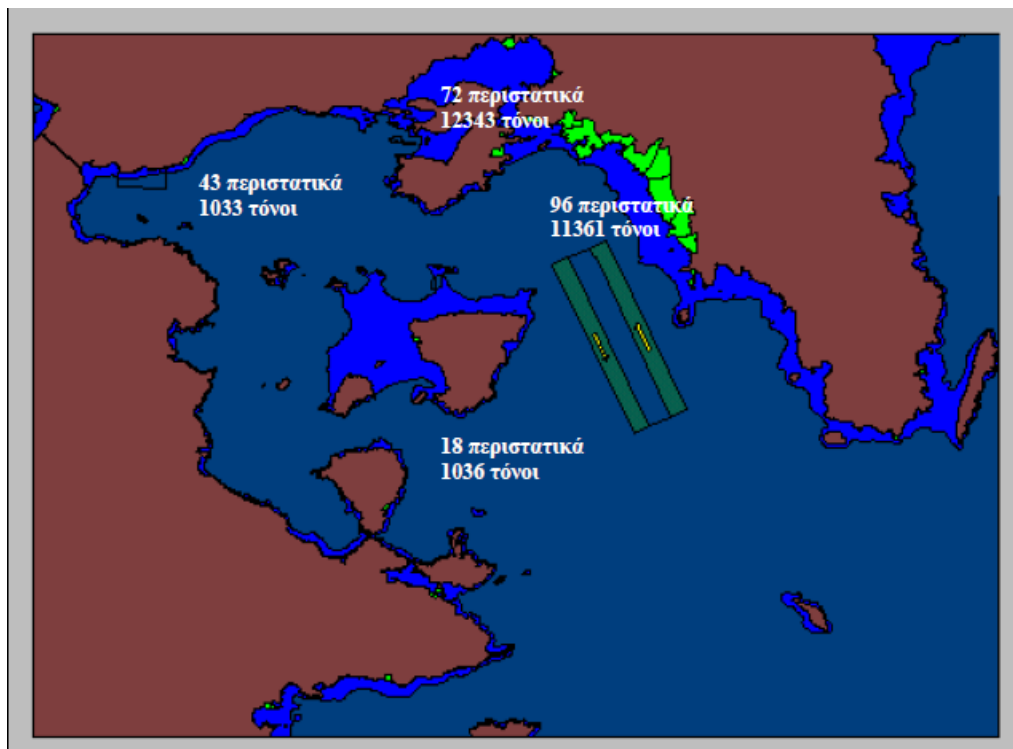


Εικόνα 8. 1 Χάρτης Σαρωνικού και συχνότητα ατυχημάτων(με μπλε οι λιγότερο πιθανές, με καφέ οι περισσότερο πιθανές).

Επιλογή Σεναρίων Ατυχήματος Πετρελαιοκηλίδας – 8^ο Κεφάλαιο



Εικόνα 8. 2 Τα 4 σημεία σημειωμένα πάνω στο χάρτη



Εικόνα 8. 3 Ενδεικτική Γεωγραφική Κατανομή της ρύπανσης στο Σαρωνικό Κόλπο

Επιλογή Σεναρίων Ατυχήματος Πετρελαιοκηλίδας – 8^ο Κεφάλαιο

Πίνακας 8. 2 Τα σενάρια και οι χρόνοι υπολογισμού

Scenario No	Wind Speed (m/s)	Wind Force (beaufort)	Wind direction (coming from)	Time to reach the coast (hr)			
				Location 1	Location 2	Location 3	Location 4
1	1,5	1	N	8,3	39,2	Η πετρελαιοκηλίδα εξέρχεται του κόλπου	Η πετρελαιοκηλίδα εξέρχεται του κόλπου
2	3,4	2	N	13,4	22,6		
3	5,4	3	N	9,1	14,1		
4	7,9	4	N	6,5	9,5		
5	10,7	5	N	4,8	6,9		
6	15	6	N	3,5	4,8		
7	1,5	1	NE	4,1	15,8	18,7	117,3
8	3,4	2	NE	2,3	6,7	9,9	55,7
9	5,4	3	NE	1,6	4,0	6,8	36,4
10	7,9	4	NE	1,2	2,7	6,3	25,9
11	10,7	5	NE	0,9	2,1	4,9	19,7
12	15	6	NE	0,7	1,6	3,6	14,3
13	1,5	1	E	3,8	111,2	7,3	6,8
14	3,4	2	E	2,2	52,9	4,9	4,4
15	5,4	3	E	1,5	34,2	3,9	3,1
16	7,9	4	E	1,1	23,6	3,1	2,4
17	10,7	5	E	0,8	17,3	2,4	1,9
18	15	6	E	0,6	12,1	1,8	1,4
19	1,5	1	SE	3,9	157,9	4,1	3,8
20	3,4	2	SE	2,4	69,0	2,4	2,1
21	5,4	3	SE	1,7	42,1	1,6	1,4
22	7,9	4	SE	1,3	28,2	1,2	1,0
23	10,7	5	SE	1,0	20,6	0,9	0,8
24	15	6	SE	0,7	14,6	0,7	0,6
25	1,5	1	S	3,8	5,8	3,8	3,5
26	3,4	2	S	2,2	3,5	2,2	1,9
27	5,4	3	S	1,5	2,5	1,6	1,3
28	7,9	4	S	1,1	1,9	1,2	1,0
29	10,7	5	S	0,8	1,5	0,9	0,7
30	15	6	S	0,6	1,2	0,7	0,6
31	1,5	1	SW	5,4	3,4	3,8	3,9
32	3,4	2	SW	3,4	1,8	2,3	2,5
33	5,4	3	SW	2,4	1,2	1,6	1,8
34	7,9	4	SW	1,8	0,9	1,1	1,3
35	10,7	5	SW	1,4	0,7	0,9	1,0
36	15	6	SW	1,1	0,5	0,6	0,8
37	1,5	1	W	26,3	3,3	3,8	3,8
38	3,4	2	W	14,3	1,7	2,1	2,1
39	5,4	3	W	9,1	1,2	1,4	1,4
40	7,9	4	W	5,8	0,8	1,0	1,0
41	10,7	5	W	4,6	0,6	0,8	0,8
42	15	6	W	3,3	0,5	0,6	0,6
43	1,5	1	NW	32,3	5,2	5,4	5,3
44	3,4	2	NW	16,2	3,0	3,3	3,2
45	5,4	3	NW	10,6	2,2	2,4	2,4
46	7,9	4	NW	7,5	1,6	1,7	4,8
47	10,7	5	NW	5,7	1,3	1,3	4,0
48	15	6	NW	4,1	1,0	1,0	3,0

9. Ανάλυση Αποτελεσμάτων

9.1 Ανάλυση Αποτελεσμάτων MEDSLIK

9.1.1 Παραδοχές Υπολογισμού

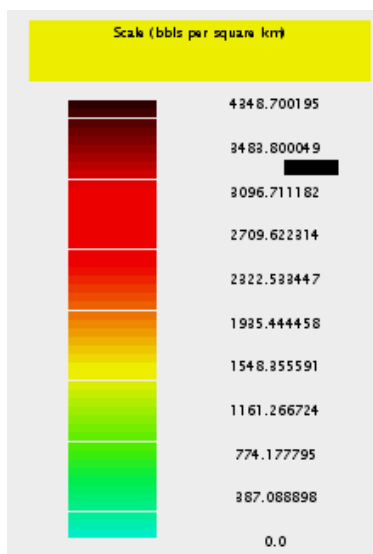
- 1) Σε όλα τα προγράμματα εισήχθησαν τα ίδια δεδομένα (άνεμος και ιδιότητες πετρελαίου διαρροής) και για 4 ίδια σημεία τα οποία όπως προαναφέρθηκε βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή του Σαρωνικού Κόλπου.
- 2) Το MEDSLIK παρουσιάζει τα αποτελέσματα υπό μορφή φωτογραφιών στην αντίστοιχη ώρα στην οποία αναφέρεται η εκάστοτε εικόνα. Στο MEDSLIK προβλέπεται μονάχα η δυνατότητα της ξεχωριστής προβολής αποτελεσμάτων για εικόνα του επιπλέοντος πετρελαίου για την επιλεγόμενη χρονική στιγμή, για εικόνα του πετρελαίου στην ακτή για την επιλεγόμενη χρονική στιγμή και για εικόνα του διεσπαρμένου πετρελαίου μέχρι την επιλεγόμενη χρονική στιγμή.
- 3) Το ελάχιστο χρονικό βήμα επεξεργασίας στο MEDSLIK είναι μία ώρα, γεγονός που συμβάλλει είτε σε σφάλμα είτε στην αδυναμία σύγκρισης των τριών προγραμμάτων όταν το χρονικό βήμα μεταξύ των στιγμιότυπων είναι μικρότερο της ώρας ή σε μη ακέραιο αριθμό ωρών. Σε αυτή την περίπτωση παρήχθησαν 4 διαδοχικά στιγμιότυπα για τις 4 πρώτες ώρες της διαρροής, οπουδήποτε αυτό είχε νόημα.
- 4) Πραγματοποιήθηκαν 192 «τρεξίματα» (4 σημεία διαρροής, 8 διευθύνσεις ανέμου, 6 εντάσεις ανέμου) τα οποία παρήγαγαν 960 στιγμιότυπα (5 στιγμιότυπα ανά σενάριο, 4 οι στιγμές και 1 στιγμιότυπο για το πετρέλαιο στην ακτή).
- 5) Ο χάρτης που χρησιμοποιήθηκε είναι ο χάρτης της Μεσογείου που παρέχεται από το πρόγραμμα, πρόγραμμα παγκοσμίας εμβέλειας και διεθνούς κύρους, και απομονώθηκε η περιοχή του Σαρωνικού Κόλπου.
- 6) Στο πρόγραμμα εισήχθη ως πληροφορία η μέση θερμοκρασία της θάλασσας του Σαρωνικού Κόλπου ίση με 19 βαθμούς Κελσίου (Περιβαλλοντική Έρευνα 7^{ου} ΓΕΛ Πειραιά, 2012).
- 7) Το χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται σε όλα τα τρεξίματα είναι μία ώρα (το ελάχιστο δυνατό), ανεξάρτητα από τα σενάρια.

- 8) Η πετρελαιοκηλίδα τη στιγμή $t=0$ έχει μηδενική έκταση
- 9) Στο παράθυρο των παραμέτρων (βλ. Κεφάλαιο 5) εισήχθησαν οι προεπιλεγμένες τιμές του προγράμματος.

9.1.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστούν ενδεικτικά κάποια αποτελέσματα και θα σχολιαστούν τα κοινά χαρακτηριστικά τους και τα προβλήματα που προκύπτουν.

- 1) Το MEDSLIK παρέχει τη δυνατότητα ανάλυσης της σύνθεσης του πετρελαίου που έχει διαρρεύσει. Σε κάθε στιγμιότυπο παρέχεται και η αντίστοιχη κλίμακα (διαβαθμισμένη σύμφωνα με τα χρώματα που είναι χρωματισμένη η κηλίδα) όσον αφορά τη συγκέντρωση του πετρελαίου όπου αυτό υπάρχει. Ακόμη υπολογίζεται σε κάθε στιγμή το ποσοστό του πετρελαίου που βρίσκεται στην ακτή, γεγονός που λειτουργεί επικουρικά για τη σύγκριση στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 9. 1 Η διαβάθμιση της συγκέντρωσης του πετρελαίου

Στην Εικόνα 9.1 δίδεται η μορφή με την οποία απεικονίζονται οι διάφορες συγκεντρώσεις πετρελαίου στα αποτελέσματα ανάλογα με το χρώμα που τους προσδίδεται.

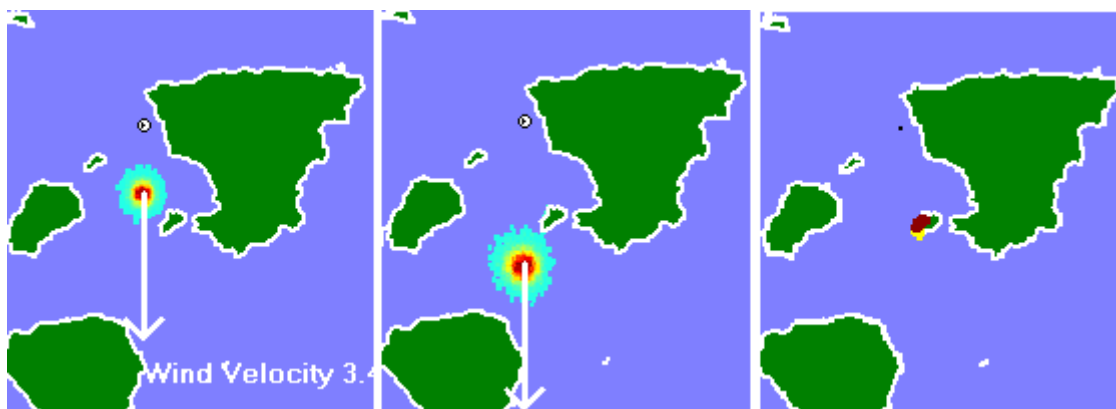
Στην Εικόνα 9.2 δίδεται ο πίνακας στον οποίο απεικονίζονται πληροφορίες για την πετρελαιοκηλίδα στο παράθυρο των αποτελεσμάτων. Στην πρώτη σειρά αναγράφονται οι ώρες στις οποίες αναφέρονται οι πληροφορίες, στη δεύτερη σειρά το ποσοστό εξάτμισης, στην Τρίτη σειρά το ποσοστό του πετρελαίου που ακόμα βρίσκεται στη θάλασσα, στην

τέταρτη σειρά το ποσοστό του πετρελαίου που έχει διασπαστεί και τέλος στην Πέμπτη σειρά το ποσοστό του πετρελαίου που έχει προσαιγιαλωθεί.

Fate Parameters	
Time (hrs)	4
% Evaporated	24.2661
% on Surface	75.8856
% Dispersed	0.0227
% on Coast	0.0000

Εικόνα 9. 2 Ποσοστό εξάτμισης, στην επιφάνεια, στην ακτή

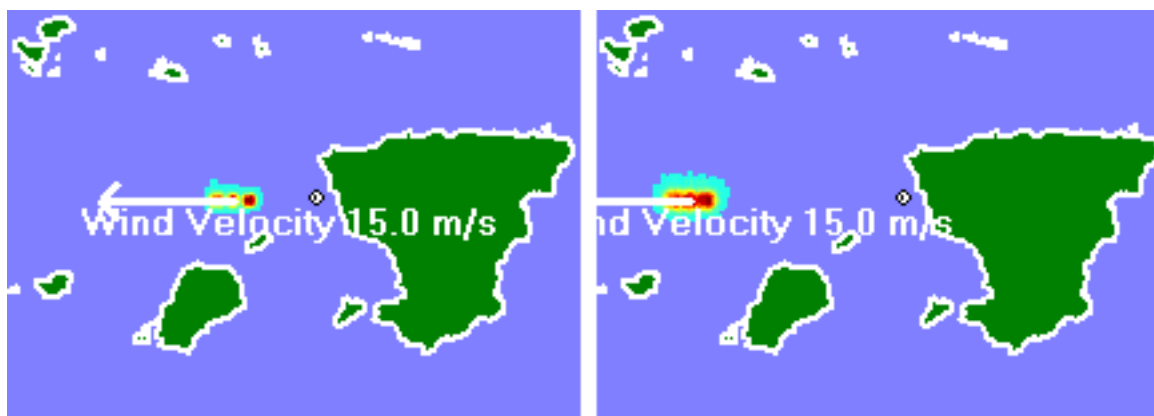
2) Το MEDSLIK λόγω της φύσης του προγράμματος να διασπά την εικόνα της πετρελαιοκηλίδας στην πορεία της σε επί μέρους κομμάτια απαιτεί μεγαλύτερη προσοχή κατά τη χρήση. Σε πολλές περιπτώσεις, υπάρχουν στιγμιότυπα στην επιλογή «πετρέλαιο που επιπλέει» όπου φαίνεται η κηλίδα να βρίσκεται μακριά από την ακτή με κατεύθυνση περαιτέρω απομάκρυνσης. Ωστόσο η επιλογή εμφάνισης «πετρελαίου στην ακτή» καταμαρτυρά ότι σημαντικές ποσότητες ή ποσότητες με σημαντική συγκέντρωση πετρελαίου έχουν ήδη προσαιγιαλωθεί.



Εικόνα 9. 3 Θέση Διαρροής: 2, Άνεμος:2 bf N Αριστερά: T/2 Κέντρο:T Δεξιά: Πετρέλαιο στην ακτή

3) Επιπροσθέτως σε μεγάλες ταχύτητες (στην παρούσα εργασία μέγιστη ταχύτητα ανέμου = 15m/s) παρατηρείται το φαινόμενο της μείωσης της συνοχής της πετρελαιοκηλίδας. Η πετρελαιοκηλίδα φαίνεται στην αρχή της μετακίνησής της να τείνει να διασπαστεί ή και σε άλλες περιπτώσεις διασπάται, σε περισσότερα από ένα κομμάτια στη διεύθυνση του ανέμου που τη μετακινεί. Στη συνέχεια

αυξανόμενης της έκτασης της πετρελαιοκηλίδας η πετρελαιοκηλίδα αποκτά και πάλι τη συνοχή της.



Εικόνα 9. 4 Θέση Διαρροής: 2, Άνεμος:6+ bf E, Αριστερά: T/8 Δεξιά: T/4, Στα αριστερά η πετρελαιοκηλίδα τείνει να διασπαστεί

9.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων GNOME

9.2.1 Παραδοχές Υπολογισμού

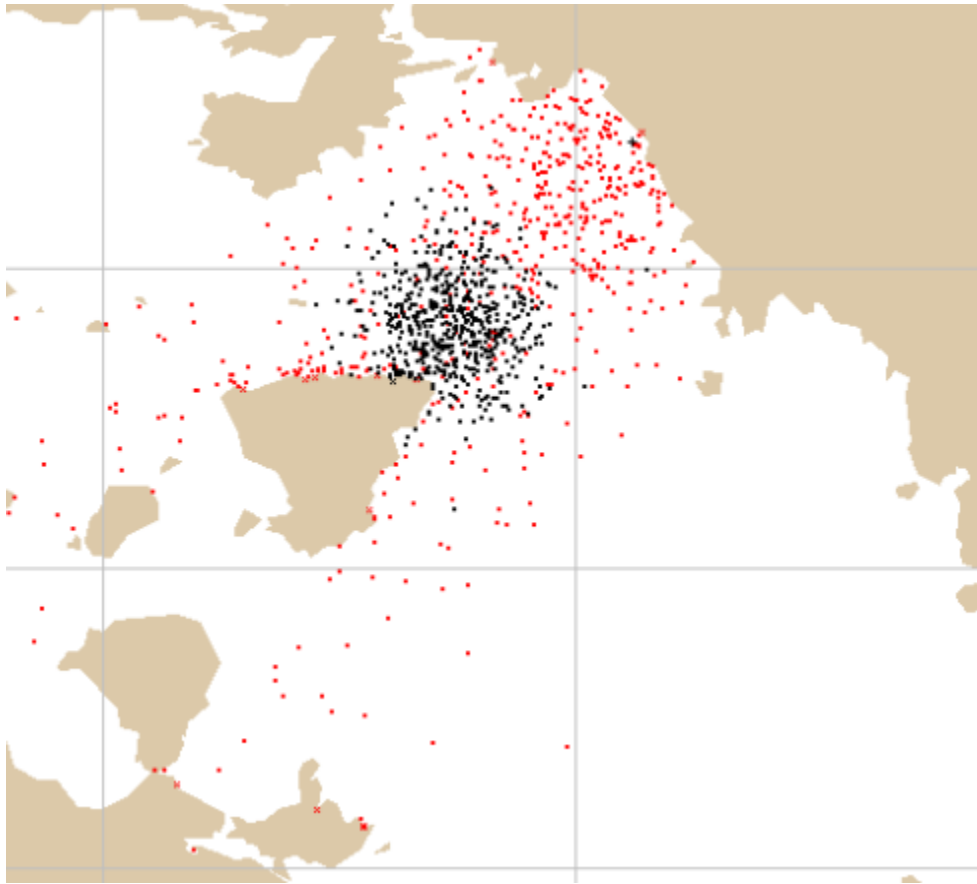
- 1) Σε όλα τα προγράμματα εισήχθησαν τα ίδια δεδομένα (μετακινητές και ιδιότητες πετρελαίου διαρροής) και σε 4 ίδια σημεία στην ίδια περιοχή, την ευρύτερη περιοχή του Σαρωνικού Κόλπου.
- 2) Το GNOME παρουσιάζει τα αποτελέσματα υπό μορφή Video προβάλλοντας στο περιβάλλον του προγράμματος και την αντίστοιχη ώρα στην οποία αναφέρεται η εκάστοτε εικόνα. Πραγματοποιήθηκαν 192 μετρήσεις (4 σημεία διαρροής, 8 διευθύνσεις ανέμου, 6 εντάσεις ανέμου) οι οποίες παρήγαγαν 768 στιγμιότυπα (4 στιγμιότυπα ανά σενάριο).
- 3) Ο χάρτης που χρησιμοποιήθηκε είναι ο χάρτης που παρέχεται από το Google Earth, πρόγραμμα παγκοσμίας εμβέλειας και διεθνούς κύρους, και απομονώθηκε η περιοχή του Σαρωνικού Κόλπου.
- 4) Χρησιμοποιήθηκε, όπως συνίσταται και από τους προγραμματιστές του προγράμματος, η λειτουργία της «Αβεβαιότητας» (βλ. Κεφάλαιο 6).
- 5) Χρησιμοποιήθηκε η «Εμμόνη των 15 λεπτών» (βλ. Κεφάλαιο 6) και συνυπολογίστηκε η άμεση δύναμη μεταφοράς του αέρα σε ποσοστό 2,5 % όπως συνίσταται από τους προγραμματιστές του προγράμματος αντίστοιχα.

- 6) Η πετρελαιοκηλίδα τη στιγμή $t=0$ έχει μηδενική έκταση
- 7) Χρησιμοποιήθηκε ένας τυπικός - μέσος συντελεστής διάχυσης $D=100000 \text{ cm}^2$ ο οποίος χρησιμοποιείται και στη διαδικασία της εξάπλωσης.
- 8) Το στιγμιότυπο αναφέρεται ακριβώς στην ώρα που πρέπει καθώς στο GNOME παρέχεται η δυνατότητα της πληκτρολόγησης της επιθυμητής ώρας έως και δευτερολέπτου.

9.2.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

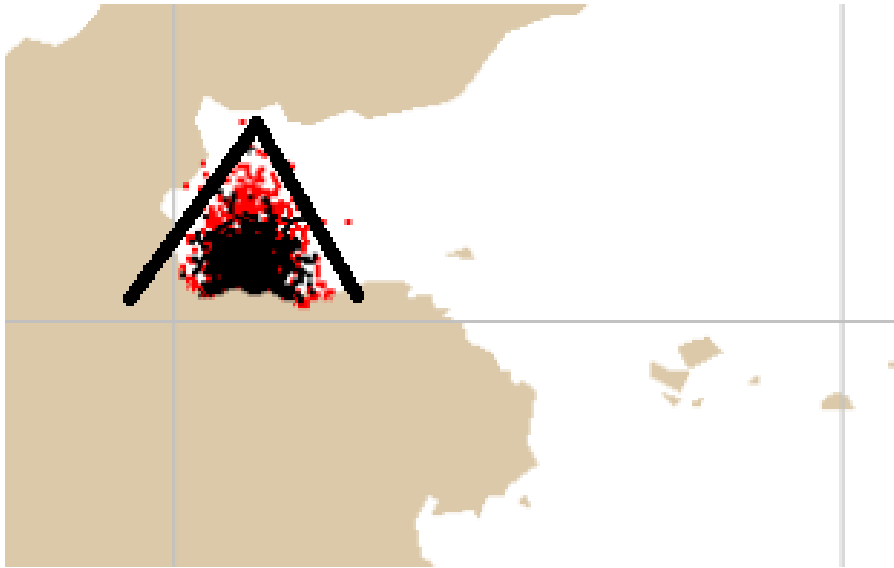
Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστούν ενδεικτικά κάποια αποτελέσματα και θα σχολιαστούν τα κοινά χαρακτηριστικά τους και τα προβλήματα που προκύπτουν.

- 1) Η «βέλτιση τροχιά» εμφανίζεται ως ένα σύνολο από μικρά σωματίδια ρύπων, που στο χάρτη εμφανίζονται ως μαύρες κουκίδες. Η λύση της «ελάχιστης αβεβαιότητας» απεικονίζεται στο χάρτη με κόκκινες κουκίδες. Η πυκνότητα όμως των κουκίδων δεν εξηγείται επαρκώς ποσοτικά και ποιοτικά. Σε σενάρια όπου η κηλίδα παραμένει πολύ χρόνο μέσα στο νερό ή/και διανύει μεγάλη απόσταση είναι τέτοια η εξάπλωση των κηλίδων, τόσο για τη βέλτιστη λύση όσο και για τη λύση της αβεβαιότητας, που σε κάποια σημεία υπάρχουν απομονωμένες κουκίδες χωρίς κάποια ποσοτική ή ποιοτική διαβάθμιση. Είναι προφανές ότι για το ίδιο σημείο διαρροής, την ίδια διεύθυνση ανέμου και διαφορετική ένταση ανέμου, η συνοχή της πετρελαιοκηλίδας είναι μεγαλύτερη στο σενάριο της μεγαλύτερης έντασης ανέμου. Το GNOME ως επιχειρησιακό πρόγραμμα στην ουσία προειδοποιεί ότι υπάρχει περίπτωση να υπάρχουν σωματίδια πετρελαίου στην υπόψη περιοχή.

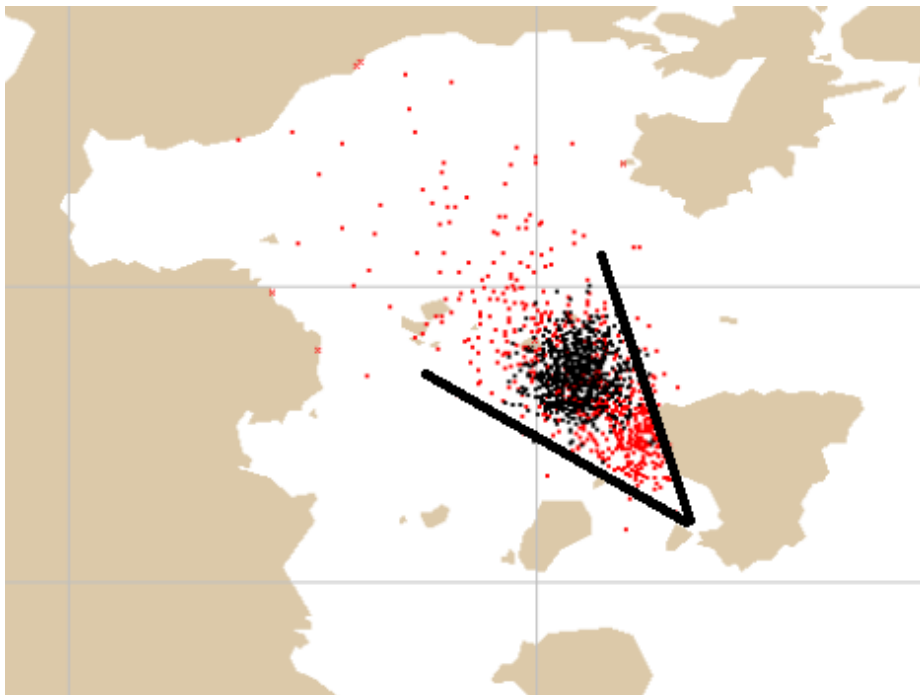


Εικόνα 9. 5 Θέση Διαρροής: 4, Άνεμος:1 bf NE, Παράδειγμα εξάπλωσης της πετρελαιοκηλίδας στο GNOME μετά από πολύ χρόνο

- 2) Ακόμα η ιδιότητα της εμμονής του ρυπαντή, σύμφωνα με το πρόγραμμα, στην πηγή της πετρελαιοκηλίδας είτε για ένα τέταρτο είτε για άπειρο χρόνο (ακόμα και για στιγμιαία διαρροή) αποδίδει ένα κωνοειδές σχήμα στην τροχιά της πετρελαιοκηλίδας, ιδιότητα που γίνεται πιο έντονη στα σενάρια με μικρό χρόνο εξέτασης. Στην παρούσα μελέτη όπως έχει αναφερθεί χρησιμοποιήθηκε η εμμονή των 15 λεπτών. Ωστόσο είναι πολύ εντονότερη η ιδιότητα της δημιουργίας κωνοειδούς τροχιάς στην περίπτωση της αένας εμμονής της διαρροής στην πηγή της.



Εικόνα 9. 6 Σημείο Διαρροής 1, Ένταση Ανέμου 2 bf N, Παράδειγμα όπου φαίνεται η κωνοειδής εξάπλωση του πετρελαίου



Εικόνα 9. 7 Σημείο Διαρροής 2, Ένταση Ανέμου 3 bf, SE, Παράδειγμα όπου φαίνεται η κωνοειδής εξάπλωση του πετρελαίου

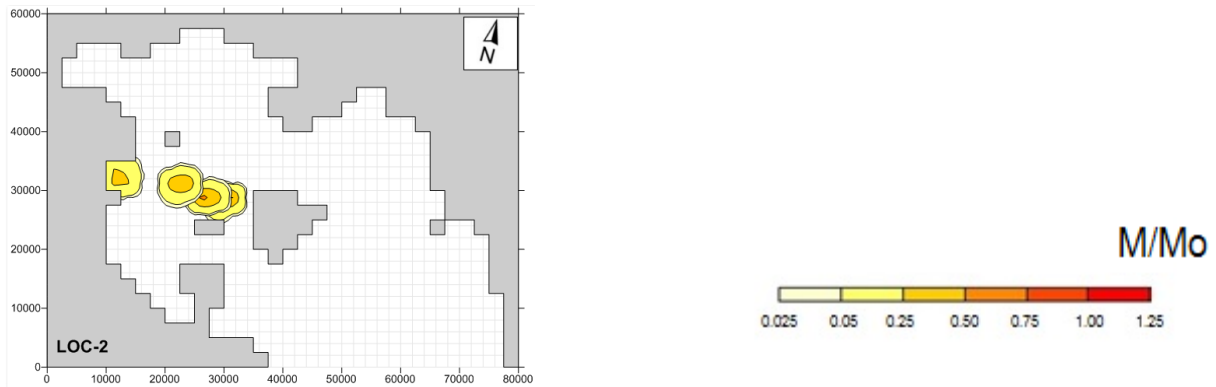
9.3 Ανάλυση Αποτελεσμάτων FLOW 3DL

9.3.1 Παραδοχές Υπολογισμού

- 1) Σε όλα τα προγράμματα εισήχθησαν τα ίδια δεδομένα (μετακινήτες και ιδιότητες πετρελαίου διαρροής) και σε 4 ίδια σημεία στην ίδια περιοχή, την ευρύτερη περιοχή του Σαρωνικού Κόλπου.
- 2) Το FLOW 3DL παρουσιάζει τα αποτελέσματα υπό μορφή αρχείων υπολογιστικών φύλλων και στη συνέχεια μέσω προγράμματος απεικόνισης (SURFER) τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και γραφικά με εικόνες.
- 3) Πραγματοποιήθηκαν 192 μετρήσεις (4 σημεία διαρροής, 8 διευθύνσεις ανέμου, 6 εντάσεις ανέμου) οι οποίες παρήγαγαν 768 στιγμιότυπα (4 στιγμιότυπα ανά σενάριο, 4 οι στιγμές και 1 στιγμιότυπο για το πετρέλαιο στην ακτή).
- 4) Ως υπόβαθρο για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε ψηφιοποιημένο υπόβαθρο του Σαρωνικού Κόλπου (Κουτίτας, 1989) με κάναβο 2,5 χλμ X 2,5 χλμ, το οποίο είχε στροφή ως προς το βορρά 30 μοίρες.
- 5) Η πετρελαιοκηλίδα τη στιγμή $t=0$ έχει μηδενική έκταση
- 6) Τα τέσσερα στιγμιότυπα αναφέρονται στην ακριβή ώρα υπολογισμού. Ο χρόνος ως σημείο αναφοράς για τη σύγκριση προήλθε από τα αποτελέσματα του FLOW 3DL.
- 7) Μέσω του προγράμματος πλοταρίσματος παρέχεται η δυνατότητα της «εκτύπωσης» παραπάνω από ενός στιγμών στο ίδιο παράθυρο εργασίας.
- 8) Με διαφορετικά χρώματα φαίνονται διαφορετικές συγκεντρώσεις. η Κλίμακα Διαβάθμισης της Συγκέντρωσης του Πετρελαίου ως πηλίκο της Μάζας του παραμένουτος πετρελαίου προς τη Μάζα της αρχικής κηλίδας (Εικόνα 9.8)

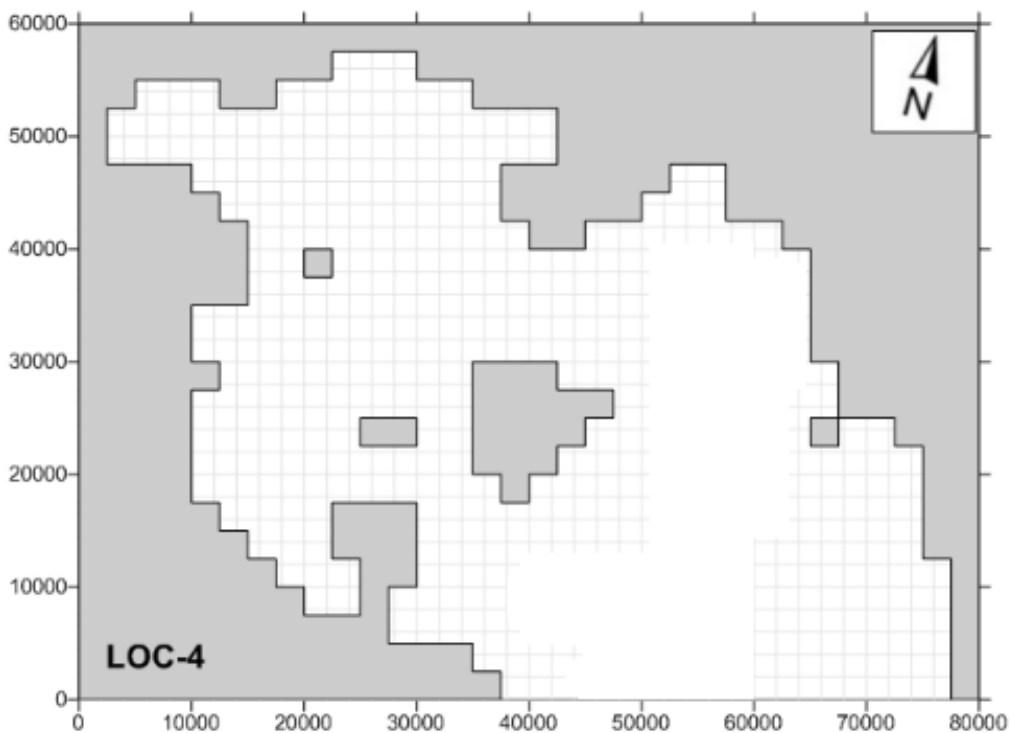
9.3.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

- 1) Το FLOW 3DL παράγει την εκτίμηση της μετακίνησης και της εξάπλωσης ρυπαντή μέσα σε υδάτινο αποδέκτη και για αυτό το λόγο δεν μπορεί να υπολογίσει διαδικασίες που αφορούν την προσαιγιάλωση του πετρελαίου. Με αυτή τη λογική επιλέχθηκε το 10% ως μια λογική τιμή η οποία θα επηρεάσει λιγότερο την πορεία των υπολογισμών.
- 2) Το FLOW 3DL υπολογίζει την μετακίνηση του συνόλου των ρύπων. Ωστόσο για την εκτύπωση – πλοτάρισμα των αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται η διαβάθμιση.



Εικόνα 9. 1 Αποτελέσματα από το FLOW 3DL και η Κλίμακα Διαβάθμισης της Συγκέντρωσης του Πετρελαίου ως πηλίκο της Μάζας του παραμένουτος πετρελαίου προς τη Μάζα της αρχικής κηλίδας

- 3) Διαφορετικά χρώματα αποτυπώνουν διαφορετικές συγκεντρώσεις πετρελαίου στο νερό.
- 4) Ο χάρτης που χρησιμοποιείται είναι σαθρός (Εικόνα 9.10), γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα (βλ. 9.4 Αναλυτικότερα)



Εικόνα 9. 9 Χάρτης Σαρωνικού που χρησιμοποιήθηκε στο FLOW 3DL

9.4 Σύγκριση των Προγραμμάτων

9.4.1 Εισαγωγή

Τα τρία προγράμματα σε γενικές γραμμές παρήγαγαν όμοια αποτελέσματα. Ωστόσο υπάρχουν διαφορές όσον αφορά:

- 1) Τη μορφή που παίρνει στο πέρας του χρόνου η πετρελαιοκηλίδα
- 2) Την εξάπλωση του ρυπαντή πετρελαίου μέσα στο νερό στην πάροδο του χρόνου
- 3) Την απόσταση που έχει διανύσει κατά μέσο όρο κάθε σωματίδιο της πετρελαιοκηλίδας στο δεδομένο χρόνο

9.4.2 Αναλυτικά

1) Όσον αφορά τη μορφή που παίρνει στο πέρας του χρόνου η πετρελαιοκηλίδα και τα τρία προγράμματα ακολουθούν τη λογική της μελέτης της πετρελαιοκηλίδας σε επιμέρους σωματίδια, ωστόσο όσον αφορά την «εκτύπωση» των αποτελεσμάτων η μορφή της πετρελαιοκηλίδας διαφέρει.

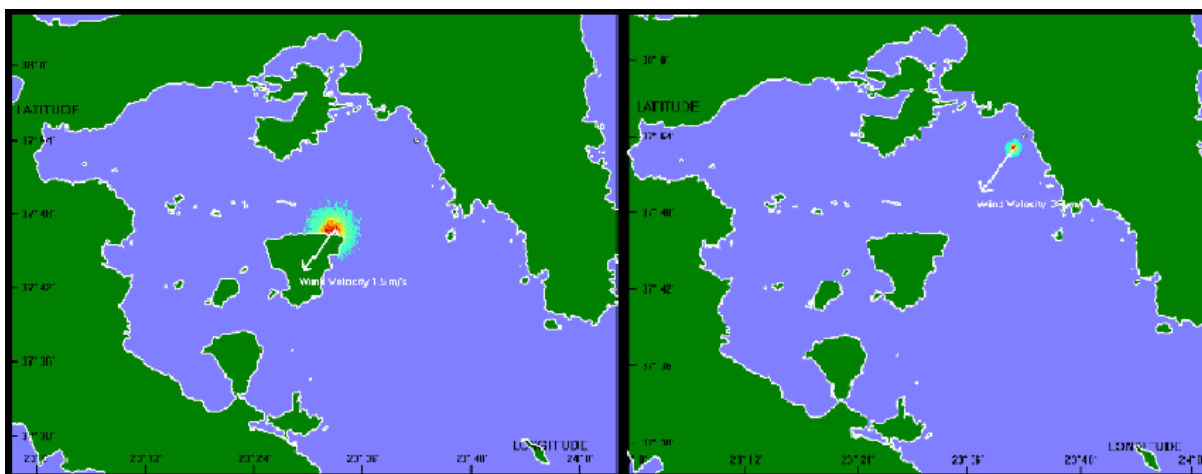
Στο **GNOME** υπάρχει η ιδιαιτερότητα της λύσης ελάχιστης αβεβαιότητας, επομένως επί της αρχής με δεδομένη τη χρήση της παραπάνω δυνατότητας για χάρη της παρούσας μελέτης αναμένονταν διαφορετικής μορφής αποτελέσματα.

Το **GNOME** είναι ένα επιχειρησιακό πρόγραμμα για επέμβαση σε περίπτωση ανάγκης με έγκαιρη και εί δυνατόν βέλτιστη πρόβλεψη της τροχιάς μιας διαρροής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την απουσία λεπτομερούς διαβάθμισης της πυκνότητας του πετρελαίου στον υδάτινο αποδέκτη στην έκταση της κηλίδας. Αντί αυτού παρέχεται οπτικά ένα σύνολο κουκίδων τα οποία όταν το πετρέλαιο βρίσκεται σε μεγάλη συγκέντρωση είναι κοντά σχηματίζοντας μία ενιαία πετρελαιοκηλίδα και όταν απομακρύνονται αναφέρονται είτε σε χαμηλές συγκεντρώσεις πετρελαίου είτε σποραδικά σε μεμονωμένες μικρότερες πετρελαιοκηλίδες. Σε κάθε περίπτωση αυτό επιτυγχάνει την ευρύτερη δυνατή πρόβλεψη των περιοχών που πλήττονται από πετρέλαιο σε μικρή ή μεγάλη συγκέντρωση και την αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση στην περίπτωση που απαιτείται παρέμβαση.



Εικόνα 9. 20 Αριστερά: Χαμηλή συγκέντρωση Δεξιά: Υψηλή συγκέντρωση

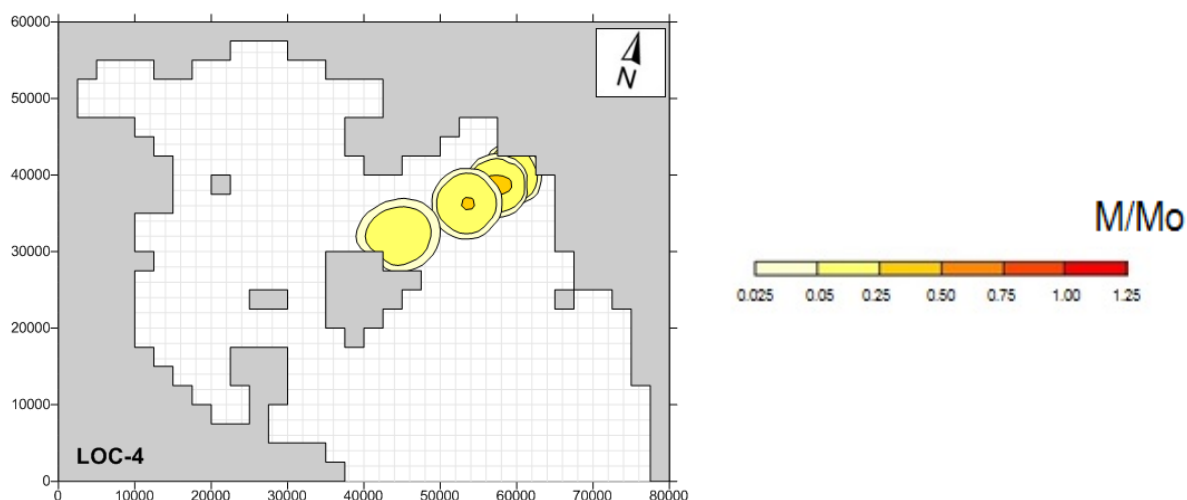
Στο **MEDSLIK** ακολουθείται η λογική της διαβάθμισης της πετρελαιοκηλίδας στην έκτασή της σύμφωνα με τη συγκέντρωση του πετρελαίου στο νερό. Η κλίμακα αυτή παρουσιάζεται χρωματικά. Στη λογική αυτή είναι προφανές ότι η πετρελαιοκηλίδα παρουσιάζεται ως ένα ενιαίο σώμα (ή λίγα ενιαία σώματα σε περίπτωση που λόγω ταχύτητας ανέμου διασπάται η πετρελαιοκηλίδα). Η πετρελαιοκηλίδα σε αντίστοιχη φάση με το **GNOME** φαίνεται να καταλαμβάνει μικρότερη έκταση



Εικόνα 9. 31 Οι αντίστοιχες μετρήσεις με Εικόνα 9.10 από το MEDSLIK

Όσον αφορά το **FLOW 3DL** σε αυτή την κατηγορία η απεικόνιση των αποτελεσμάτων είναι αποτέλεσμα των ρυθμίσεων που εισάγονται στο πρόγραμμα απεικόνισης (SURFER στην παρούσα εργασία). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε λογική όμοια με του **MEDSLIK**, δηλαδή διαβάθμιση ανάλογα με την πυκνότητα του πετρελαίου στο νερό. Και σε αυτή την περίπτωση η πετρελαιοκηλίδα στα αποτελέσματα φαίνεται να κρατά τη συνοχή της, καθώς καταγράφεται πετρελαιοκηλίδα άνωθεν κάποιας συγκέντρωσης. Και σε αυτή την

περίπτωση λόγω της συγκεκριμένης λογικής η πετρελαιοκηλίδα φαίνεται να καταλαμβάνει μικρότερη έκταση από το **GNOME**.



Εικόνα 9. 42 Σενάριο διαρροής στο FLOW 3DL από το SURFER και στα δεξιά η κλίμακα

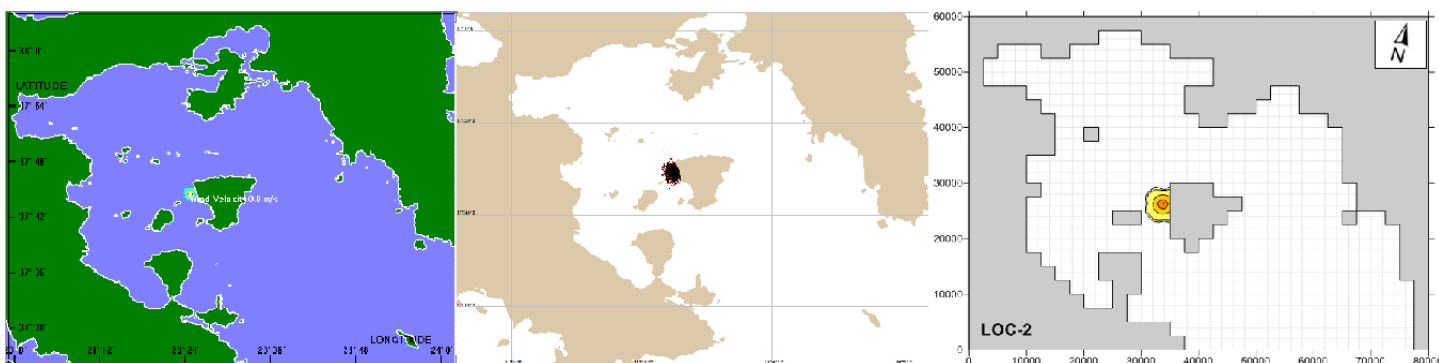
2) Για τη σύγκριση της εξάπλωσης του πετρελαίου μέσα στο νερό στην πάροδο του χρόνου, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα από τα σενάρια διαρροής της μελέτης (βλ. Πίνακα 8.2), ενώ πραγματοποιήθηκε και σύγκριση με σενάριο διαρροής σε συνθήκες νηνεμίας.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα από τα σενάρια διαρροής της μελέτης εκ πρώτης όψεως είναι φανερό ότι μεγαλύτερη εξάπλωση φαίνεται να παρουσιάζει το πετρέλαιο στο **GNOME** λόγω της μορφής που αποτυπώνονται τα αποτελέσματα. Ωστόσο, αφαιρώντας τη λύση ελάχιστης αβεβαιότητας, αν αναλυτικά υποτεθεί ότι έχει λογική η ύπαρξη πετρελαιοκηλίδας, στα οπτικοποιούμενα αποτελέσματα, από κάποια συγκέντρωση σωματιδίων και άνω τότε περιορίζεται σημαντικά η έκτασή της πετρελαιοκηλίδας.

Η σύγκριση μεταξύ των άλλων δύο προγραμμάτων είναι ευκολότερη. Ωστόσο, για το **FLOW 3DL** η σύγκριση αφορά τη διαβάθμιση που ο μελετητής επιλέγει να χρησιμοποιήσει όσον αφορά τη συγκέντρωση του πετρελαίου στο νερό. Δηλαδή επιλέγεται να εμφανίζεται ως κηλίδα, μάζα που έχει μεγαλύτερη συγκέντρωση πετρελαίου από μία συγκεκριμένη ποσότητα (έτσι επιτυγχάνεται και η συνοχή). Αυξάνοντας ή μειώνοντας την ποσότητα αυτή περιορίζεται ή επεκτείνεται η πετρελαιοκηλίδα στην απεικόνιση των αποτελεσμάτων.

Όσον αφορά τη διαρροή σε νηνεμία, έγιναν «τρεξίματα» στα τέσσερα σημεία διαρροής, της ίδιας ποσότητας με την ίδια λογική για χρόνο T. Από τις μετρήσεις προκύπτει ότι με τις

παραπάνω παραμέτρους μεγαλύτερη εξάπλωση παρουσιάζεται στο **GNOME**, έπειτα στο **FLOW 3D-L** και τέλος στο **MEDSLIK**.

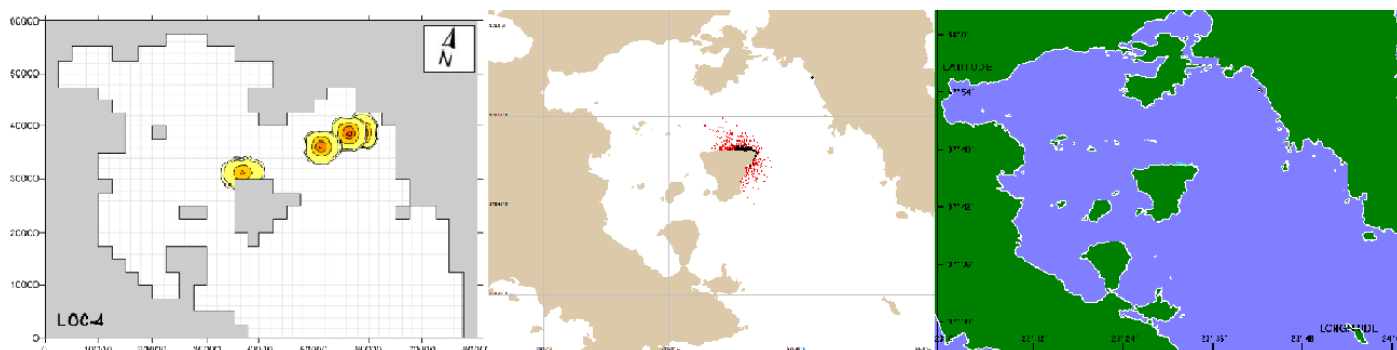


Εικόνα 9. 5 Σημείο διαρροής 2 Σενάριο Νημεμίας από αριστερά προς δεξιά MEDSLIK, GNOME και FLOW 3D-L

3) Για τη σύγκριση της απόστασης που έχει καλύψει κατά μέσο όρο κάθε σωματίδιο σε δεδομένο χρόνο, δηλαδή τη σύγκριση των μετακινήτων ή μετακινητικών δυνάμεων των προγραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα από όλα τα σενάρια στα οποία η παραπάνω σύγκριση είναι δυνατή. Δυνατή είναι η σύγκριση όταν υπάρχει απόσταση, από το σημείο του ατυχήματος προς τη κατεύθυνση του ανέμου, για να καλυφθεί.

Από τη σύγκριση προκύπτει ότι τα προγράμματα σε αυτό τον τομέα παρουσίασαν τις μεγαλύτερες διαφορές. Τα **GNOME** και **MEDSLIK** παρήγαγαν όμοια αποτελέσματα ενώ τα αποτελέσματα του **FLOW 3D-L** σε κάποιες περιπτώσεις είναι διαφορετικά (βλ. Παράρτημα σε CD).

Ένα από τα σενάρια στα οποία παρατηρείται μεγάλη διαφορά είναι η διαρροή στο τέταρτο σημείο διαρροής με βορειανατολική κατεύθυνση ανέμου 4-6+ bf.



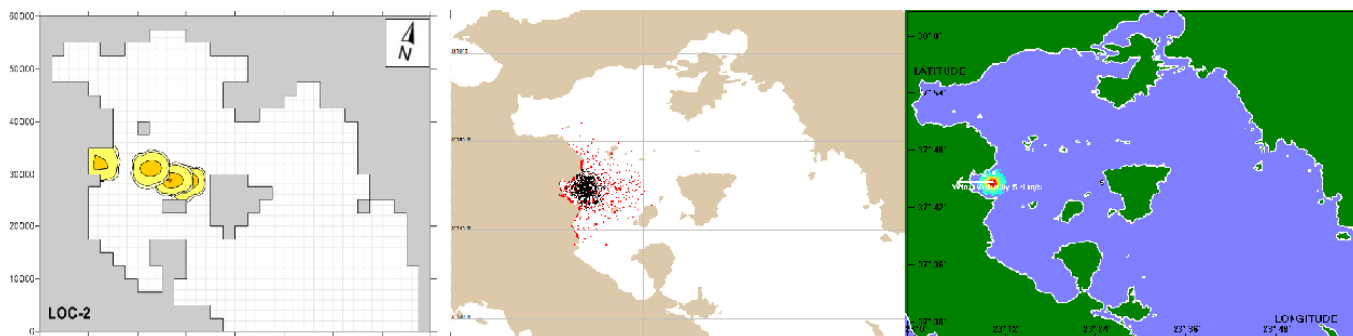
Εικόνα 9. 64 Από αριστερά προς δεξιά FLOW 3DL, GNOME και MEDSLIK, στα 2 δεξιά προγράμματα όλο το πετρέλαιο έχει προσαιγαλωθεί

Γίνεται φανερό στην παραπάνω Εικόνα ότι στο χρόνο που απαιτείται ώστε το 10% των σωματιδίων που αποτελούν την πετρελαιοκηλίδα να φτάσει στην ακτή σύμφωνα με το

FLOW 3D-L, η πετρελαιοκηλίδα στα δύο άλλα προγράμματα έχει φτάσει εξ ολοκλήρου στην ακτή.

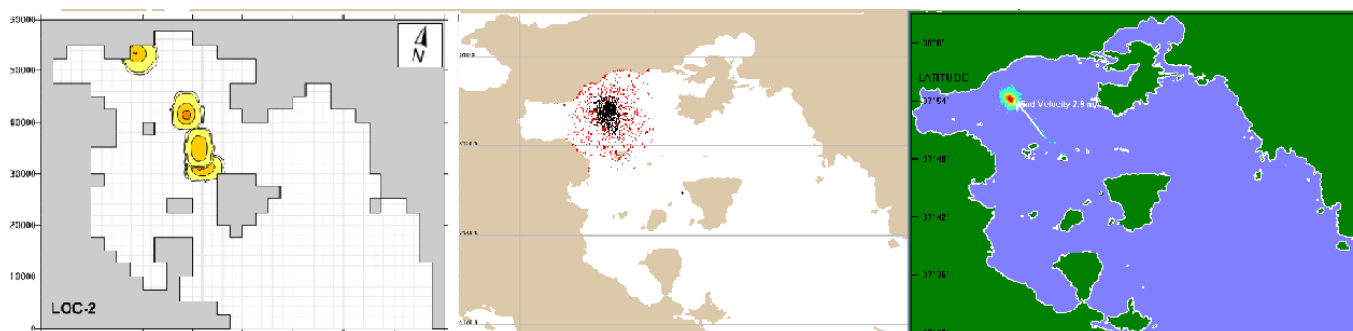
Αυτό εξηγείται από τον αβρό κάνναβο – πλέγμα, (μεγάλα χωρικά βήματα) που χρησιμοποιείται στο **FLOW 3DL**. Μπορεί κανένας να παρατηρήσει ότι συμπεριλαμβανομένης και της στροφής του καννάβου κατά 30 μοίρες η Αίγινα σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να αποτυπωθεί σε κάνναβο 2,5 επί 2,5 χλμ με ακρίβεια. (Είναι φανερό ότι στο χάρτη που χρησιμοποιείται στο **FLOW 3DL** απουσιάζει ο κόλπος της Ελευσίνας) Η κακή αποτύπωση σε μεγάλο κάνναβο μπορεί να αποδώσει αβρά αποτελέσματα στο πρόγραμμα.

Σε άλλα αντίστοιχα παραδείγματα όπου η αποτύπωση της ακτής σε αβρό κάνναβο είναι ευμενέστερη οι διαφορές είναι μικρότερες ή ακόμη παρουσιάζονται και όμοια αποτελέσματα.



Εικόνα 9. 7 Από αριστερά προς δεξιά FLOW 3DL, GNOME και MEDSLIK

Στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 9.15) τα αποτελέσματα των τριών προγραμμάτων είναι όμοια. Ωστόσο σε σύγκριση με την προηγούμενη εικόνα (βλ. Εικόνα 9.14) που το **FLOW 3D-L** μοιάζει πιο «αργό» σε αυτήν το FLOW 3DL μοιάζει πιο «γρήγορο» από τα άλλα δύο προγράμματα. Όμοια και στην Εικόνα 9.16



Εικόνα 9. 8 Από αριστερά προς δεξιά FLOW 3DL, GNOME και MEDSLIK

10. Συμπεράσματα - Προτάσεις

10.1 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας προπτυχιακής εργασίας επιχειρήθηκε μια συνοπτική βιβλιογραφική επισκόπηση των αιτιών, των επιπτώσεων και των τρόπων αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδας όπως επίσης και των προγραμμάτων υπολογισμού τροχιάς πετρελαιοκηλίδας.

Επιπλέον έγιναν 2304 μετρήσεις για 768 διαφορετικά σενάρια διαρροής στα προγράμματα GNOME, MEDSLIK και FLOW 3D-L. Σε κάθε μία από τις μετρήσεις αντιστοιχεί μία εικόνα – οπτικοποιημένο αποτέλεσμα του «τρεξίματος».

Τέλος συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα και των τριών προγραμμάτων όσον αφορά τη μορφή, την έκταση και την ταχύτητα μεταφοράς της πετρελαιοκηλίδας.

Από τη σύγκριση των τριών προγραμμάτων τα κύρια συμπεράσματα συνοψίζονται στα εξής:

- Μείζονα ρόλο στη σύγκριση των προγραμμάτων παίζουν οι επιλεγόμενες παράμετροι. Αλλάζοντας τις παραμέτρους αλλάζουν άρδην τα αποτελέσματα ακόμα και εντός του ίδιου προγράμματος σε δύο επίπεδα. Πρώτον οι παράμετροι που επιλέγονται όσον αφορά τους υπολογισμούς (π.χ. συντελεστές διάχυσης ή εξάτμισης) και δεύτερον οι παράμετροι οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων .
- Μείζονα ρόλο παίζει ο επιλεγόμενος χάρτης στον οποίο εξετάζεται το σενάριο διαρροής. Η ποιότητα της αποτυπωμένης ακτογραμμής και εν γένει η ακρίβεια του χάρτη επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα, καθώς η πετρελαιοκηλίδα τόσο στα προγράμματα όσο και στην πραγματικότητα συμπεριφέρεται απολύτως διαφορετικά όταν έρθει σε επαφή με τη στεριά.
- Τέλος κατά την αναζήτηση του βέλτιστου προγράμματος για ένα μελετητή, η επιλογή επαφίεται στο τι αντικείμενο θέλει να εξετάσει. Τα δύο εμπορικά προγράμματα είναι εύχρηστα και με ευχάριστο περιβάλλον λειτουργίας (με το GNOME να είναι πιο εύκολο και σύγχρονο) αλλά δεν είναι προσβάσιμα στο μελετητή για αλλαγή και πειραματισμούς στον κώδικα και στους υπολογισμούς. Το FLOW 3DL από την άλλη είναι ένα πρόγραμμα πιο δύσκολο στη χρήση, με λιγότερο ευχάριστο

περιβάλλον λειτουργίας (Γλώσσα Προγραμματισμού) που παρέχει όμως ελευθερία στον ερευνητή.

10.2 Πρόταση Για Περαιτέρω Διερεύνηση

Ορισμένες προτάσεις που θα μπορούσαν να οδηγήσουν προς την κατεύθυνση της εξέλιξης του θέματος είναι:

- Η ανάπτυξη Υδροδυναμικού Πεδίου συμβατού, ως αρχείο εισαγωγής δεδομένων, με τα δύο εμπορικά προγράμματα και εν συνεχεία η επεξεργασία διαφόρων σεναρίων και η επανασύγκρισή τους. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούν να συμπεριληφθούν και η δύναμη Coriolis στα δύο προγράμματα που δεν συνυπολογίστηκε (της οποίας η επιρροή είναι μικρή όπως υπολογίστηκε από το FLOW 3DL) ή άλλου είδους ρεύματα γεωστροφικά ή θερμοκρασίας.
- Η ανάπτυξη ενός χάρτη ακριβείας (με μικρά χωρικά βήματα) για χρήση στο FLOW 3DL και εν συνεχεία σύγκριση ξανά των προγραμμάτων (αναπτύσσεται ήδη στο Εργαστήριο Υδραυλικής ΕΜΠ).
- Η επαλήθευση ενός πραγματικού σεναρίου διαρροής και από τα τρία προγράμματα.

Βιβλιογραφία

Παρακάτω δίνεται σε αλφαβητική σειρά μια καταγραφή των δημοσιεύσεων, συγγραμμάτων, εργασιών και βιβλίων, στα οποία βασίστηκε η ανάπτυξη της παρούσας εργασίας, κυρίως της διεθνούς βιβλιογραφίας.

- > NOAA (2002), "Automated Data Inquiry for Oil Spills ADIOS2"
- > Anne Casselman (2009), "10 Biggest Oil Spills in History, No, the 1989 Exxon-Valdez spill doesn't make the list", Popular Mechanics
- > CNN (2010), "Oil disaster by the numbers"
- > Greenpeace (2006) "ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΕΙΔΗ"
- > Greenpeace (2007), "Οι σημαντικότερες πετρελαιοκηλίδες στην Ελλάδα"
- > iTac (2008), Technical Paper "Use of Models in Oil Spill Response"
- > NOAA, Office of Response and Administration (2002) "GNOME User's Manual"
- > NOAA, Office of Response and Restoration (2012) "General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) Technical Documentation"
- > Otay et. al (2013) "RISK ASSESSMENT OF OIL SPILL ACCIDENTS"
- > R.W.Lardner B.A., Ph.D., Sc.D. (2011), MEDSLIK User Manual
- > Stamou A. (2010) "Μοντέλο Παράκτιων Υδάτων FLOW 3DL"
- > Stamou et al, Otay N., Tsoukala V., Coptoy N., Karakoc F., Christodoulou G., Papadopoulos A., Papadonikolaki G., Altan Y. (2013), Risk Assessment of oil spill
- > Stamou et. al, (2013) "RISK ASSESSMENT OF OIL SPILL ACCIDENTS"
- > Stamou, A.I, Noutsopoulos, C., Pipilis, K.G., Gavalaki, E., Andreadakis, A. (1999), "Hydrodynamic and water quality modeling of Southern Evoikos Gulf – Greece", Global Nest: the International Journal, 1(2), pp. 5-15.

- Stamou, A.I., Memos, C.D., Kapetanaki M.E. (2007). Modeling water renewal in a coastal embayment. Proceedings of ICE - Maritime Engineering, 160(MA3), pp. 93-104.
- > Stamou, A.I., Memos, K., Pipilis, K. (1999), "Mathematical modelling of thermal discharges in coastal regions", Proceedings of the 28th IAHR Congress, Graz, Austria.
- > Γιδαράκος Ε. (2010) «Ρύπανση θάλασσας και Παράκτιων Ζωνών από Ατυχήματα»
- > Διαμαντή Κατερίνα (2010), Διπλωματική Εργασία, "Θαλάσσιες Μεταφορές και Θαλάσσια Ρύπανση στη Μεσόγειο"
- > Δρ Κώστας Παπασταύρος, (2012) "Οργάνωση για αντιμετώπιση μεγάλων πετρελαιοκηλίδων", Υπουργείο Γεωργίας, φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Κύπρος
- > Ζερβά Π. (2007), Διπλωματική Εργασία "Η οικονομική διάσταση της θαλάσσιας Ρύπανσης από τα ναυτικά ατυχήματα"
- > Καθ. Τριανταφύλλου Γ. (2004), "Πετρελαιοκηλίδες, περιβάλλον και ανάπτυξη"
- > Κλαδή Μαριάνθη (2005), "Ευρωπαϊκή Πολιτική Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος "