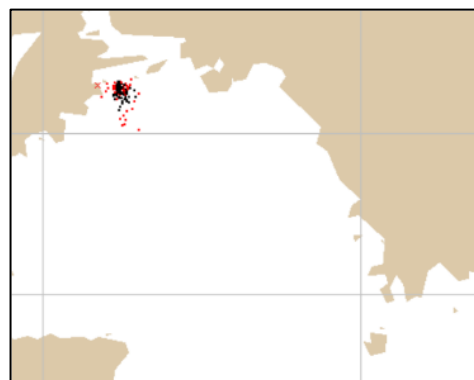
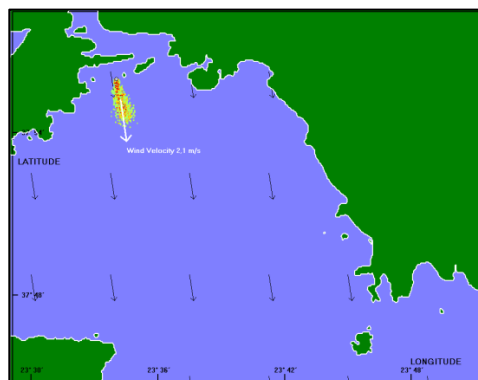




# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

## ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ ΣΤΟ ΣΑΡΩΝΙΚΟ ΚΟΛΠΟ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΤΟΥ ΔΕΞΑΜΕΝΟΠΛΟΙΟΥ «ΑΓΙΑ ΖΩΝΗ II»: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ MEDSLIK ΚΑΙ GNOME



Σοφία Σ. Παπαδοπούλου

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Επιβλέπων: Αναστάσιος Ι. Στάμου,  
Καθηγητής ΕΜΠ



**ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ ΣΤΟ  
ΣΑΡΩΝΙΚΟ ΚΟΛΠΟ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΤΟΥ ΔΕΞΑΜΕΝΟΠΛΟΙΟΥ «ΑΓΙΑ ΖΩΝΗ II»:  
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ MEDSLIK ΚΑΙ GNOME**

**Λέξεις κλειδιά:** Σαρωνικός, Πετρελαιοκηλίδα, Πετρέλαιο, Αγία Ζώνη II, MEDSLIK, GNOME, Σύγκριση μοντέλων, Δεξαμενόπλοιο, Διαρροή

**MATHEMATICAL SIMULATION OF OIL SPILL BEHAVIOR IN SARONIKOS  
GULF DUE TO THE LEAKAGE FROM THE TANKER “AGIA ZONI II”:  
A Comparison between MEDSLIK and GNOME Oil Spill Models**

**Key words:** Saronikos, Oil Spill, Oil, “Agia Zoni II”, MEDSLIK, GNOME, Models Comparison, Tanker, Leakage





## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Αναστασίου Ι. Στάμου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου Αναστάσιο Ι. Στάμου που μου έδωσε την ευκαιρία να εργαστώ με αυτό το ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα. Θα ήθελα επίσης να τον ευχαριστήσω για την βοήθεια, ενθάρρυνση, στήριξη και καθοδήγηση του, που συνέβαλαν καθοριστικά στην επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον Παναγιώτη Μακατούνη για την εξαιρετική επικοινωνία και την πολύτιμη βοήθεια του και τις χρήσιμες συμβουλές του.

Επιπρόσθετα, θέλω να ευχαριστήσω την Γεωργία Παπαδονικολάκη για τη βοήθεια της, καθώς και την Λυδία Τσιάτσου και τον Στέφανο Ποτουρίδη για την συνεργασία και την χορήγηση των δεδομένων που συνέβαλαν στη διεκπεραίωση της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να απευθύνω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και ιδιαίτερα στον αδερφό μου, που πίστευε πάντα στις δυνατότητες μου και με στηρίζει σε κάθε προσπάθειά μου, και στους φίλους μου για τη συνεχή ενθάρρυνση.

## Περιεχόμενα

Ευρετήριο Εικόνων .....	1
Ευρετήριο Πινάκων .....	3
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	4
<b>EXTENDED ABSTRACT</b> .....	5
<b>1. Introduction</b> .....	5
<b>2. Materials and methods</b> .....	5
2.1 <i>Oil Spill Model</i> .....	5
2.2 <i>Input data</i> .....	6
<b>3. Results and discussion</b> .....	7
3.1 <i>Results from MEDSLIK simulation</i> .....	7
3.2 <i>Comparison between MEDSLIK and GNOME</i> .....	11
3.3 <i>Sensitivity analysis investigation</i> .....	15
<b>4. Conclusion</b> .....	19
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	20
<b>2. ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ</b> .....	21
<b>2.1 Αίτια δημιουργίας πετρελαιοκηλίδων</b> .....	21
<b>2.2 Αξιολόγηση Κινδύνου Ατυχήματος στην Ελλάδα.</b> .....	23
<b>2.3 Η συμπεριφορά και η τύχη του πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον</b> .....	27
2.3.1 <i>Εξάπλωση (Spreading)</i> .....	28
2.3.2 <i>Εξάτμιση (Evaporation)</i> .....	29
2.3.3 <i>Διασπορά (Dispersion)</i> .....	30
2.3.4 <i>Διάλυση (Dissolution)</i> .....	31
2.3.5 <i>Γαλακτωματοποίηση (Emulsification)</i> .....	31
2.3.6 <i>Φωτοχημική οξείδωση (Photo-oxidation)</i> .....	33
2.3.7 <i>Καθίζηση (Sedimentation)</i> .....	34
2.3.8 <i>Βιοδιάσπαση (Biodegradation)</i> .....	34
<b>2.4 Επιπτώσεις των πετρελαιοκηλίδων</b> .....	35
2.4.1 <i>Επιπτώσεις στο Οικοσύστημα</i> .....	35
2.4.2 <i>Επιπτώσεις στις ανθρώπινες δραστηριότητες</i> .....	39
<b>2.5 Μέθοδοι αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων</b> .....	40
2.5.1 <i>Εντοπισμός πετρελαιοκηλίδων μέσω δορυφόρου</i> .....	40
2.5.2 <i>Μηχανικός καθαρισμός</i> .....	40
2.5.3 <i>Χημικός καθαρισμός</i> .....	44
2.5.4 <i>Εναλλακτικές μέθοδοι</i> .....	45

<b>3. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΩΝ .....</b>	<b>46</b>
<b>3.1 Εισαγωγή.....</b>	<b>46</b>
<b>3.2 Τύποι Μοντέλων Προσομοίωσης .....</b>	<b>46</b>
3.2.1 Μοντέλα Προσομοίωσης <i>Oil Weathering</i> .....	46
3.2.2 Ντετερμινιστικά ή Τροχιοδεικτικά μοντέλα .....	47
3.2.3 Στοχαστικά Μοντέλα .....	47
3.2.4 Μοντέλα <i>Hind-Cast</i> .....	48
3.2.5 Τριών διαστάσεων (3D).....	48
<b>3.3 Δεδομένα μοντέλων προσομοίωσης.....</b>	<b>49</b>
3.3.1 Γενικά.....	49
3.3.2 Υδροδυναμικά δεδομένα .....	49
3.3.3 Ανεμολογικά δεδομένα .....	50
3.3.4 Τύπος πετρελαίου .....	50
<b>3.4 Σχεδιασμός Έκτακτης Ανάγκης.....</b>	<b>50</b>
<b>3.5 Επιχειρησιακά μοντέλα.....</b>	<b>50</b>
<b>3.6 Προσομοίωση Στρατηγικών Αντιμετώπισης .....</b>	<b>51</b>
<b>4. Η ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑ ΣΤΟ ΣΑΡΩΝΙΚΟ ΚΟΛΠΟ ΤΟ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟ ΤΟΥ 2017 .....</b>	<b>52</b>
<b>4.1 Αγία Ζώνη II .....</b>	<b>52</b>
<b>4.2 Περιγραφή περιστατικού.....</b>	<b>54</b>
4.2.1 Ημερολόγιο Περιστατικού .....	54
4.2.2 Η ανέλκυση του δεξαμενόπλοιου «ΑΓΙΑ ΖΩΝΗ II».....	68
4.2.3 Έκθεση ΑΣΝΑ – Οκτώβρης 2018.....	69
4.2.4 Το πόρισμα του ΕΜΠ – Απρίλιος 2019.....	70
<b>4.3 Επιπτώσεις του ατυχήματος .....</b>	<b>71</b>
<b>5. ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ MEDSLIK .....</b>	<b>75</b>
<b>5.1 Εισαγωγή.....</b>	<b>75</b>
<b>5.2 Διεργασίες και εξισώσεις του μαθηματικού μοντέλου .....</b>	<b>77</b>
5.2.1 Μετακίνηση και διάχυση της κηλίδας ( <i>advection and diffusion of the slick</i> ) .....	77
5.2.2 Προσאיγιάλωση ( <i>beaching</i> ) .....	78
5.2.3 Φυσικές Διεργασίες στο MEDSLIK ( <i>Fate models</i> ).....	79
5.2.4 Εξάτμιση ( <i>Evaporation</i> ) .....	80
5.2.5 Γαλακτωματοποίηση ( <i>Emulsification</i> ) .....	82
5.2.6 Διασπορά ( <i>Dispersion</i> ).....	82
5.2.7 Εξάπλωση ( <i>Spreading</i> ).....	85
<b>5.3 Δεδομένα εισόδου μαθηματικού μοντέλου .....</b>	<b>86</b>

5.3.1 Χαρακτηριστικά υπολογισμών και πετρελαιοκηλίδας.....	87
5.3.2 Χάρτης περιοχής.....	90
5.3.3 Χαρακτηριστικά ανέμου και ρευμάτων .....	90
<b>5.4 Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου .....</b>	<b>95</b>
<b>6. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ ΤΟΥ «ΑΓΙΑ ΖΩΝΗ II» .....</b>	<b>99</b>
<b>6.1 Δεδομένα .....</b>	<b>99</b>
6.1.1 Σύγκριση Δεδομένων.....	99
6.1.2 Τα υδροδυναμικά δεδομένα που εισήχθησαν στο MEDSLIK.....	99
6.1.3 Στοιχεία Διαρροής- Υπολογισμών .....	101
<b>6.2 Αποτελέσματα Υπολογισμών.....</b>	<b>102</b>
<b>6.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων.....</b>	<b>103</b>
<b>6.4 Ανάλυση Ευαισθησίας.....</b>	<b>112</b>
<b>7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ .....</b>	<b>114</b>
Βιβλιογραφία.....	116
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: Εισαγωγή παραμέτρων στο μοντέλο MEDSLIK .....</b>	<b>120</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: Υδροδυναμικά Δεδομένα Εισόδου .....</b>	<b>122</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3: Αποτελέσματα προσομοίωσης MEDSLIK.....</b>	<b>124</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4: Ανάλυση ευαισθησίας.....</b>	<b>132</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5: Προβολή αποτελεσμάτων στην εφαρμογή Google Earth.....</b>	<b>135</b>

## Ευρετήριο Εικόνων

<b>Εικόνα 2.1</b> Παράδειγμα πρόκλησης πετρελαιοκηλίδας από σύγκρουση στη Μεσόγειο (Οκτώβριος 2018) .....	21
<b>Εικόνα 2.2</b> Αίτια διαρροής 1970 -2018.....	22
<b>Εικόνα 2.3</b> Αριθμός πετρελαιοκηλίδων από το 1970-2018.....	23
<b>Εικόνα 2.4</b> Διεθνές θαλάσσιο εμπόριο 1980-2017 (εκατομμύριο τόνοι) .....	23
<b>Εικόνα 2.5:</b> Θαλάσσιες μεταφορές- Ναυτιλιακά Ατυχήματα-Tankers .....	24
<b>Εικόνα 2.6</b> Οι κορυφαίες 10 χώρες ιδιοκτησίας πλοίων σε χωρητικότητα (dead weight tons). .....	25
<b>Εικόνα 2.7</b> Σταθμοί εμπορίας και αποθήκευσης καυσίμων στην Ελλάδα .....	26
<b>Εικόνα 2.8</b> Κύριες διεργασίες «γήρανσης» της Πετρελαιοκηλίδας .....	27
<b>Εικόνα 2.9</b> Η σημασία των διεργασιών «γήρανσης» σε σχέση με τον χρόνο. ....	28
<b>Εικόνα 2.10</b> Διαρροή πετρελαίου στη θάλασσα . ....	29
<b>Εικόνα 2.11</b> Σχηματισμός λεπτών λωρίδων παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου .....	29
<b>Εικόνα 2.12</b> Εξάτμιση της πετρελαιοκηλίδας .....	30
<b>Εικόνα 2.13</b> Διασκόρπιση πετρελαίου σε σταγονίδια λόγω της επίδρασης των κυματισμών. ....	31
<b>Εικόνα 2.14</b> Σωματίδια γαλακτωματοποίησης.....	32
<b>Εικόνα 2.15</b> Γαλακτωματοποίηση.....	33
<b>Εικόνα 2.16</b> Πίσσα (tar bar) στην ακτή .....	33
<b>Εικόνα 2.17</b> Ιζήματα πετρελαίου στον πυθμένα της θάλασσας. ....	34
<b>Εικόνα 2.18</b> Επιπτώσεις πετρελαιοκηλίδας.....	36
<b>Εικόνα 2.19</b> Επιπτώσεις πετρελαίου στα ψάρια .....	37
<b>Εικόνα 2.20</b> Επιπτώσεις πετρελαιοκηλίδας στα πτηνά .....	37
<b>Εικόνα 2.21</b> Αμμώδης ακτή μετά από τη ρύπανση του Σαρωνικού .....	38
<b>Εικόνα 2.22</b> Φράγματα (booms).....	42
<b>Εικόνα 2.23</b> Πετρελαιοσυλλέκτες (skimmers) .....	43
<b>Εικόνα 2.24</b> Σκάφη περισυλλογής (skimmers vessels) .....	43
<b>Εικόνα 2.25</b> Απορροφητικά υλικά (sorbents).....	44
<b>Εικόνα 2.26</b> Εφαρμογή διασκορπιστικών.....	45
<b>Εικόνα 2.27</b> Μέθοδος επί τόπου καύσης .....	45
<b>Εικόνα 3.1</b> Μοντέλο ADIOS.....	46
<b>Εικόνα 3.2</b> Μοντέλο GNOME .....	47
<b>Εικόνα 3.3</b> Μοντέλο SIMAP.....	48
<b>Εικόνα 3.4</b> Μοντέλο MEDSLIK.....	48
<b>Εικόνα 3.5</b> Μοντέλο τριών διαστάσεων 3D.....	49
<b>Εικόνα 4.1</b> Δεξαμενόπλοιο Αγία Ζώνη II .....	52
<b>Εικόνα 4.2</b> Gross Tonnage.....	53
<b>Εικόνα 4.3</b> Τροχιά πετρελαιοκηλίδας 10/09/2019 .....	55
<b>Εικόνα 4.4</b> Στεγανοποίηση Αγία Ζώνη II.....	55
<b>Εικόνα 4.5</b> Ρύπανση στη Σαλαμίνα.....	56
<b>Εικόνα 4.6</b> Από την επιχείρηση καθαρισμού στη Σαλαμίνα .....	57
<b>Εικόνα 4.7</b> Εμφάνιση πετρελαίου στα βράχια της Φρεαττύδας .....	57
<b>Εικόνα 4.8</b> Τροχιά πετρελαιοκηλίδας 12/09/2017 .....	58
<b>Εικόνα 4.9</b> Ρύπανση στη Γλυφάδα .....	59
<b>Εικόνα 4.10</b> Η απάντληση στο πλοίο Αγία Ζώνη II .....	59
<b>Εικόνα 4.11</b> Τροχιά πετρελαιοκηλίδας 13/09/2017 .....	60
<b>Εικόνα 4.12</b> Τροχιά πετρελαιοκηλίδας 13/09/2017 .....	60
<b>Εικόνα 4.13</b> Τροχιά πετρελαιοκηλίδας 13/09/2017 .....	61

<b>Εικόνα 4.14</b> Τροχιά πετρελαιοκηλίδας 15/09/2017 .....	62
<b>Εικόνα 4.15</b> Τροχιά πετρελαιοκηλίδας 15/09/2017 .....	62
<b>Εικόνα 4.16</b> Τροχιά πετρελαιοκηλίδας 16/09/2017 .....	63
<b>Εικόνα 4.17</b> Τροχιά πετρελαιοκηλίδας ανά μέρα τοποθετημένη στην ευρύτερη περιοχή του Σαρωνικού κόλπου. (WWF Ελλάς, 2017) .....	67
<b>Εικόνα 4.18</b> Κατάσταση «Αγία Ζώνη II» στις 25/11/2017 .....	68
<b>Εικόνα 4.19</b> Ανέλκυση «Αγία Ζώνη II» .....	69
<b>Εικόνα 4.20</b> Ρύπανση στη Γλυφάδα .....	73
<b>Εικόνα 4.21</b> Ρύπανση στη Σαλαμίνα .....	73
<b>Εικόνα 4.22</b> Επίδραση στα πτηνά - Ρύπανση Σαρωνικού .....	74
<b>Εικόνα 5.1</b> Μεταφορά όγκων από το πυκνό στο λεπτό στρώμα της κηλίδας .....	80
<b>Εικόνα 5.2</b> Μηχανισμός της διασποράς .....	83
<b>Εικόνα 5.3</b> Το μοντέλο της διασποράς .....	83
<b>Εικόνα 5.4:</b> Περιβάλλον εργασίας MEDSLIK .....	87
<b>Εικόνα 5.5:</b> Περιβάλλον εισαγωγής δεδομένων .....	88
<b>Εικόνα 5.6:</b> Επιλογή περιοχής μελέτης .....	90
<b>Εικόνα 5.7</b> Επιλογή μεθόδου εισαγωγής ρευμάτων στο MEDSLIK .....	91
<b>Εικόνα 5.8:</b> Εισαγωγή ρευμάτων σταθερά ως προς το χώρο και μεταβλητά ως προς το χρόνο .....	92
<b>Εικόνα 5.9:</b> Ορισμός διεύθυνσης ρευμάτων .....	92
<b>Εικόνα 5.10</b> Επιλογή μεθόδου εισαγωγής ανέμων .....	93
<b>Εικόνα 5.11:</b> Εισαγωγή ανέμων μεταβλητούς ως προς τον χρόνο .....	94
<b>Εικόνα 5.12:</b> Ορισμός διεύθυνσης ανέμου .....	94
<b>Εικόνα 5.13:</b> Προσομοίωση τροχιάς πετρελαιοκηλίδας .....	95
<b>Εικόνα 5.14:</b> Διάγραμμα επιρροής παραμέτρων .....	96
<b>Εικόνα 5.15:</b> Χρονική μεταβολή του ιξώδες του πετρελαίου .....	97
<b>Εικόνα 5.16:</b> Χρονική μεταβολή της πυκνότητας του πετρελαίου .....	97
<b>Εικόνα 5.17:</b> Χρονική μεταβολή του όγκου της κηλίδας .....	98
<b>Εικόνα 6.1:</b> Υπόδειγμα αποτελεσμάτων MEDSLIK .....	102
<b>Εικόνα 6.2:</b> Μεταβολή της μάζας του πετρελαίου συναρτήσει του χρόνου στο μοντέλο του MEDSLIK .....	103
<b>Εικόνα 6.3</b> Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις 10/09/2017 στις 08:00 το πρωί. Πάνω αποτελέσματα MEDSLIK, κάτω αριστερά GNOME και κάτω δεξιά δορυφορικές από την WWF .....	104
<b>Εικόνα 6.4</b> Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις 10/09/2017 αργά το απόγευμα. Αριστερά αποτελέσματα MEDSLIK, και δεξιά αποτελέσματα GNOME. ....	104
<b>Εικόνα 6.5</b> Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις 11/09/2017 το απόγευμα. Πάνω αριστερά το επιφανειακό και δεξιά το πετρέλαιο στην ακτή στο MEDSLIK, και κάτω τα αποτελέσματα του GNOME .....	105
<b>Εικόνα 6.6</b> Προσομοίωση MEDSLIK στις 12/09/2017 στις 11:00 .....	105
<b>Εικόνα 6.7</b> Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις 12/09/2017. Πάνω αποτελέσματα MEDSLIK, κάτω αριστερά GNOME και κάτω δεξιά δορυφορικές από την WWF .....	106
<b>Εικόνα 6.8</b> Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις 13/09/2017. Πάνω αποτελέσματα MEDSLIK, κάτω αριστερά GNOME και κάτω δεξιά δορυφορικές από την WWF .....	107
<b>Εικόνα 6.9</b> Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις 15/09/2017. Πάνω αποτελέσματα MEDSLIK, κάτω αριστερά GNOME και κάτω δεξιά δορυφορικές από την WWF .....	108
<b>Εικόνα 6.10</b> Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις 16/09/2017. Πάνω αριστερά το επιφανειακό και δεξιά το πετρέλαιο στην ακτή στο MEDSLIK, κάτω αριστερά GNOME και κάτω δεξιά δορυφορικές από την WWF .....	109
<b>Εικόνα 6.11:</b> Μεταβολή της μάζας του πετρελαίου συναρτήσει του χρόνου στο μοντέλο του GNOME .....	111
<b>Εικόνα 6.12:</b> Μεταβολή της μάζας του πετρελαίου συναρτήσει του χρόνου στο μοντέλο του MEDSLIK .....	111

## Ευρετήριο Πινάκων

<b>Πίνακας 2.1.</b> Τα 10 σημαντικότερα ατυχήματα που έχουν συμβεί στον Ελλαδικό χώρο .....	26
<b>Πίνακας 3.1</b> Κατηγορίες Μοντέλων Πετρελαιοκηλίδων .....	51
<b>Πίνακας 4.1</b> Στοιχεία πλοίου ΑΓΙΑ ΖΩΝΗ II.....	53
<b>Πίνακας 4.2</b> Απαγορευμένες ακτές κολύμβησης .....	71
<b>Πίνακας 4.3</b> Μετρήσεις Δειγματοληψιών (ΕΛΚΕΘΕ, 2018) .....	72
<b>Πίνακας 5.1</b> Κατηγοριοποίηση τύπων πετρελαίου με βάση το βαθμό API .....	90
<b>Πίνακας 6.1</b> Δεδομένα Εισόδου Ανέμου .....	100
<b>Πίνακας 6.2</b> Δεδομένα Εισόδου Ρευμάτων .....	101
<b>Πίνακας 6.3</b> Στοιχεία Διαρροής ΑΓΙΑ ΖΩΝΗ II και Υπολογισμών MEDSLIK.....	101
<b>Πίνακας 6.4</b> Σενάρια παραμέτρων για την ανάλυση ευαισθησίας.....	112

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι πετρελαιοκηλίδες θεωρούνται από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά ζητήματα που αφορούν την θάλασσα και τις παράκτιες περιοχές. Μια πετρελαιοκηλίδα στη θάλασσα έχει πολλές επιπτώσεις σε πολλές διαφορετικές πτυχές όπως το περιβάλλον, η υγεία, η κοινωνία, καθώς και σε πολλές οικονομικές δραστηριότητες, συμπεριλαμβανομένου του τουρισμού, μία από τις σημαντικότερες πηγές της οικονομίας, ειδικά για την Ελλάδα. Τις τελευταίες δεκαετίες, τα περιστατικά πετρελαιοκηλίδας έχουν μειωθεί σημαντικά, γεγονός πολύ θετικό και αισιόδοξο. Αυτό οφείλεται στην αυξανόμενη ασφάλεια των θαλάσσιων οδών παγκοσμίως, στον έλεγχο των διαρροών από τα δορυφορικά συστήματα αλλά και στη νομοθεσία και τις κυρώσεις.

Η ύπαρξη ενός σχεδίου έκτακτης ανάγκης που περιλαμβάνει τις απαραίτητες ενέργειες και μεθόδους αντιμετώπισης είναι ύψιστης σημασίας σε περίπτωση περιστατικού διαρροής. Η ικανότητα πρόβλεψης της πιθανής τροχιάς της πετρελαιοκηλίδας είναι σημαντική για την ανάπτυξη αυτού του σχεδίου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των μοντέλων προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδας, τα οποία λαμβάνουν υπόψη τις διεργασίες του πετρελαίου και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, προκειμένου να προσομοιώσουν την τροχιά της πετρελαιοκηλίδας.

Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στο περιστατικό του δεξαμενόπλοιου "Αγία Ζώνη II" που συνέβη στις 10 Σεπτεμβρίου 2017 στις 01:45 στον Σαρωνικό Κόλπο. Η συμπεριφορά της πετρελαιοκηλίδας αυτού του συμβάντος προσομοιώνεται και συγκρίνεται με τις παρατηρήσεις και άλλα μοντέλα προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδας.

Σε αυτή τη μελέτη, το περιστατικό αυτό προσομοιώνεται με τη χρήση του μοντέλου MEDSLIK, προκειμένου να αναπαραχθεί η τροχιά της πετρελαιοκηλίδας και να συγκριθεί με τα αποτελέσματα των υπολογισμών του μοντέλου του GNOME. Επιπλέον, γίνεται μια ανάλυση ευαισθησίας τροποποιώντας διάφορες παραμέτρους όπως τον συντελεστή διάχυσης και τον αριθμό των σωματιδίων.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων αποκαλύπτει ότι οι τροχιές της πετρελαιοκηλίδας και στα δύο μοντέλα είναι σχεδόν παρόμοιες και ανταποκρίνονται στην πραγματική εξέλιξη της. Ωστόσο, υπάρχουν διαφορές στην προσομοίωση των διεργασιών και στην ισορροπία της μάζας του πετρελαίου, οι οποίες δικαιολογούνται λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις και τις διεργασίες που προσομοιώνει το κάθε μοντέλο.



# EXTENDED ABSTRACT

## 1. Introduction

Oil spills are considered to be one of the major environmental issues for all marine and coastal environments. An oil spill in the sea has many impacts on many different aspects such as the environment, health and society as well as plenty of financial activities including tourism, one of the most important sources of the economy especially for Greece. Over the last decades, the oil spill incidents have significantly decreased, which is a very positive and optimistic fact. This is attributed to the increasing safety of shipping routes worldwide, the leakage control from satellite systems and the legislation and sanctions.

The existence of an emergency plan including the necessary response actions and methods is of paramount importance in the case of a leakage incident. The ability to predict the possible trajectory of the oil spill is significant for the development of this plan. This can be achieved via the oil spill simulation models, which consider the weathering processes of the oil and the environmental conditions in order to simulate oil spill trajectories. There are several oil spill models, including oil weathering, deterministic, stochastic and hind cast models.

This study is focused on the incident of the tanker “Agia Zoni II” on September 10th 2017 at 01:45. Under unknown circumstances, the tanker wrecked at the East waterside of Salamina Island. The vessel in total carried approximately 2732 metric tons of oil cargo, bunkers and chemicals. After the incident, approximately 600 meters of floating oil boom and sorbents were deployed. Despite the considerable resources and efforts, approximately 4 km of the coastline of Salamina Island and 20–25 kilometers of the heavily-populated coastline south of Piraeus port and Athens were contaminated, including the oiling of some 300 small pleasure craft berthed in various marinas along the respective coasts. In this study, the oil spill behavior of this incident is simulated and compared against observations and other oil spill simulation models.

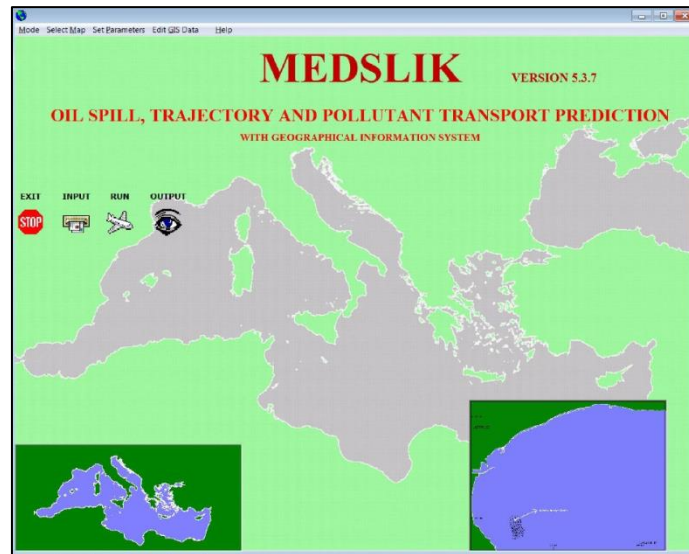
The leakage incident of “Agia Zoni II” is simulated using the GNOME (Tsiatsiou, 2018) oil spill model with satisfactory results. For our analysis, this incident is simulated using the oil spill model MEDSLIK (R.W. Lardner B.A., Ph.D., Sc.D., 2004,2011), in order to reproduce the trace of the oil spill and compare the results with the calculations of Tsiatsiou (2018). In addition, a sensitivity analysis is made by modifying various parameters as diffusion coefficient and the number of parcels. It is assumed that the response effort (skimming, burning, and dispersant application) did not alter the spatial distribution of the oil reaching the shoreline but only reduced the amount of oil reaching the shorelines. This assumption is made because GNOME does not take into consideration the treatment mechanisms. The comparison of the results of those two models, reveals that the oil spill trajectories are very similar. However, there are discrepancies in the simulation of the weathering processes and the oil mass balance.

## 2. Materials and methods

### 2.1 Oil Spill Model

MEDSLIK (R.W. Lardner B.A., Ph.D., Sc.D., 2004,2011) is a user-friendly software package which is designed to predict the fate and the transport of an oil spill in sub-regions of the Mediterranean Sea. The particles of oil move mostly because of the water currents and the wind. The weathering processes that MEDSLIK simulates are: diffusion, evaporation, emulsification, dispersion, the spreading and the beaching of oil (R.W. Lardner B.A., Ph.D., Sc.D., 2004,2011). MEDSLIK consists of three parts; (a) a graphical input

interface through which the user is able to enter the data concerning the spill and environmental conditions, (b) a run module that performs the computations that simulate the spill behavior and (c) a graphical output interface through which the user can examine the predictions of the model, as shown in Fig. 1.



**Figure 1** MEDSLIK interface (R.W. Lardner B.A., Ph.D., Sc.D., 2004,2011)

## 2.2 Input data

In order to be able to compare the GNOME results, the input data are the same as in the simulation by Tsiatsiou (2018). Firstly, as the Table 1 indicates, the problem and the oil spill characteristics are defined based on the incident. The study area is Saronikos Gulf, as shown in Fig. 2. The wind and the current data are inserted in the model with a 3-hour step, in accordance with the study of Tsiatsiou (2018).

**Table 1** Characteristics of Oil Spill

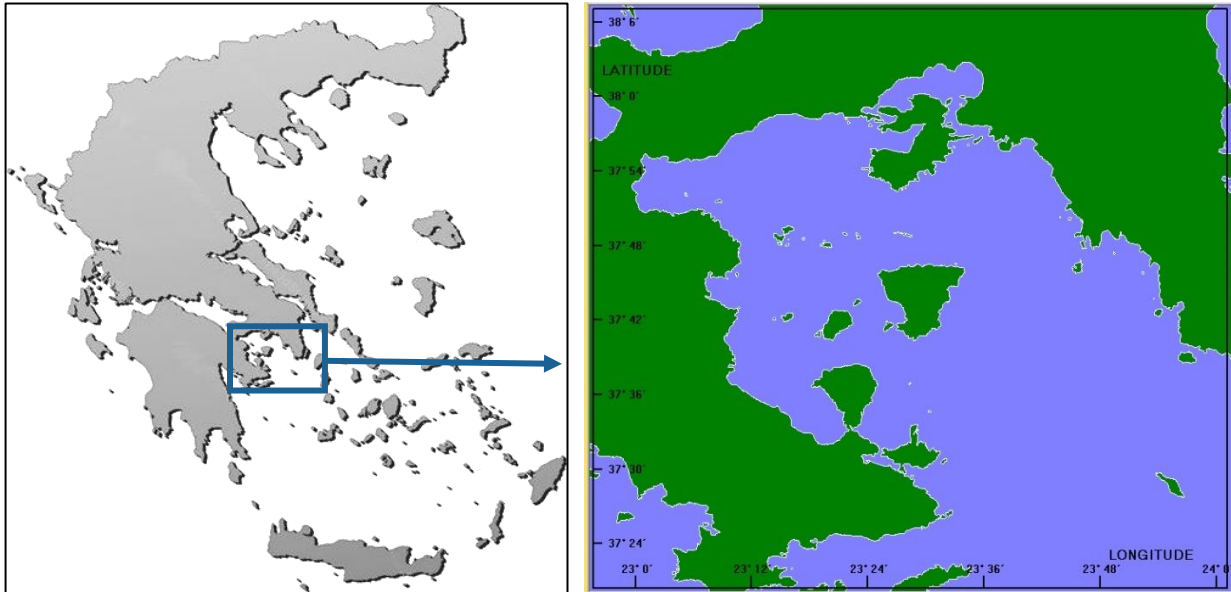
Simulation start Date	10 September 2017
Leakage Time	01:45
Simulation Time	2:00 <sup>(1)</sup> <sup>1</sup>
Duration of Simulation (hours)	213
Time step (/hour)	2
Oil Spill Name	Agia Zoni II
Type of Oil	Generic Type : API: 16
Quantity of leakage (metric tons)	137
Location of Leakage	Lat 37.93, Long 23.56
End date of oil spill	12 September 2017
End Time of oil spill	9:10
Number of parcels	10000
Wind Factor	0.031
Diffusion Coefficient (cm <sup>2</sup> /s)	20.000

The overall oil spill assessment is modeled as follows: In the simulation, there are 10000 parcels released at the water surface of the location, with Latitude: 37.93 and Longitude: 23.56, daily, until the tanker was sealed. These parcels represent the average amount of oil released to the water surface without depicting

<sup>1</sup> Even though the leakage was started at 01:45, MEDSLIK could not accept the value "45" for minutes, because it can recognize values until "24".

any oil volume. The parcels represent 137 metric tons of Fuel with API number 16 as it is estimated from the Ministry of Maritime and Island Policy. The model run period is taken equal to 213 hours of oil spill trajectory, from September 10th until September 18th, with a computational time step equal to 30 minutes.

The study area consists of the whole Saronikos Gulf, including the islands. The Latitude of the study area varies from 37°24'' to 38°6'', and the Longitude from 23° 8'' to 24°4''. In this particular area, there is the anchorage and the port of Piraeus, which is the biggest and the most important port of Greece. As a result, the location is of paramount importance; most of the financial and social activities of Greece occur there. Thus, the oil spill in Saronikos Gulf creates a significant increased risk.



**Figure 2** The area of study

The simulation in this study is made using the same wind data of the simulation of GNOME (Tsiatsiou, 2018).

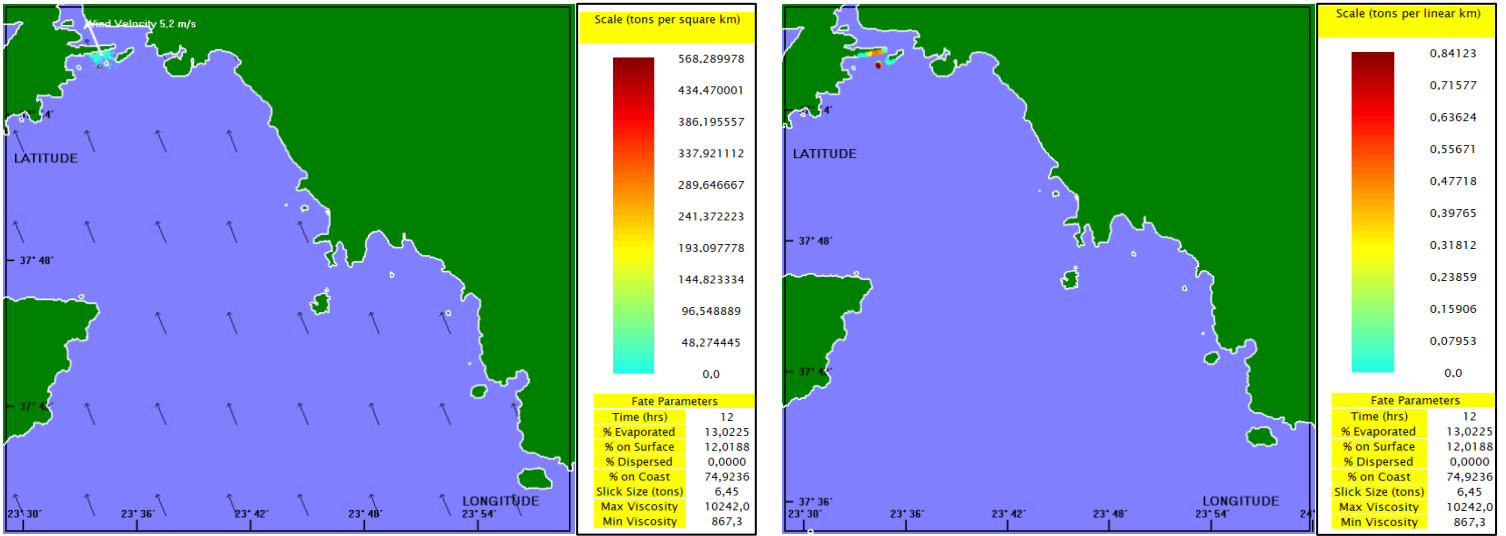
The diffusion coefficient is selected as equal to  $20000 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$  and the “wind factor” is 3.1 % (R.W. Lardner B.A., Ph.D., Sc.D., 2004,2011). Oil is expected to be vanished from the surface because of the various physical and chemical mechanisms. Some of these are the dispersion through entrainment into the water column, the droplets because of the waves, as well as the evaporation, the photo oxidation, the dissolution, the emulsification and the biodegradation. All these mechanisms, including the beaching of oil, contribute to the oil weathering. In addition, based on these assumptions and the final computations, a sensitivity analysis (SA) is performed by altering certain parameters and reaching to variant results and conclusions. Furthermore, there is a comparison between the final computations and the SA scenarios.

### **3. Results and discussion**

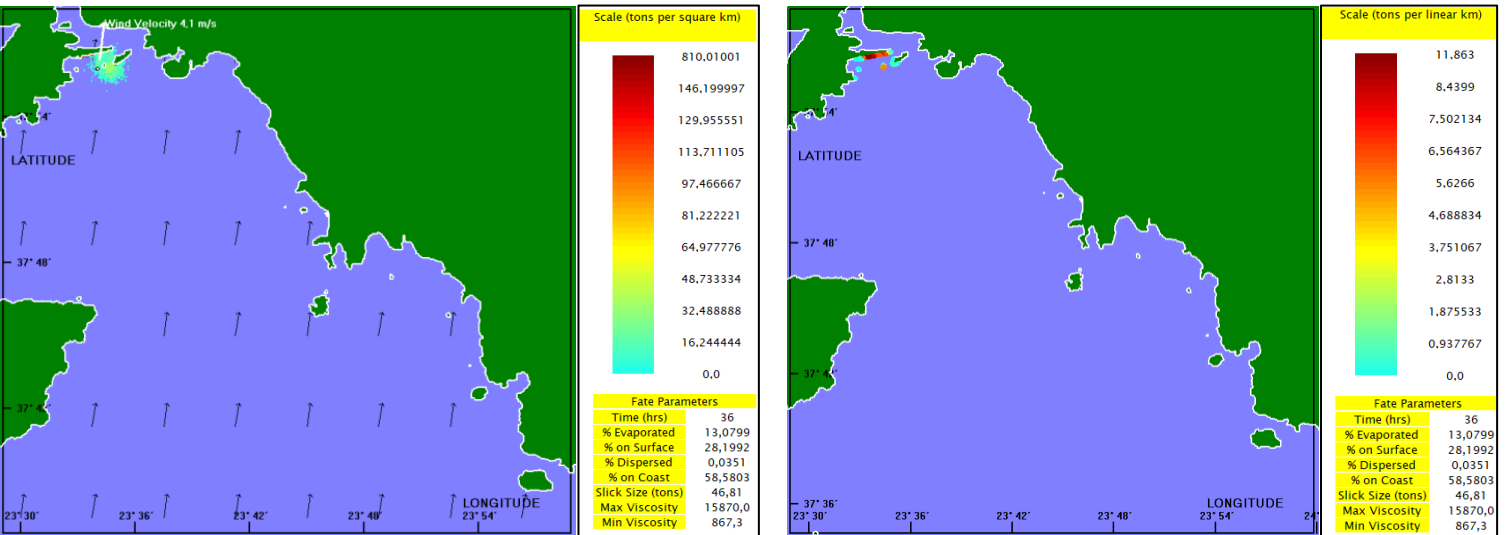
#### **3.1 Results from MEDSLIK simulation**

The simulation results are shown in Fig. 3 for all days of simulation at 14:00.

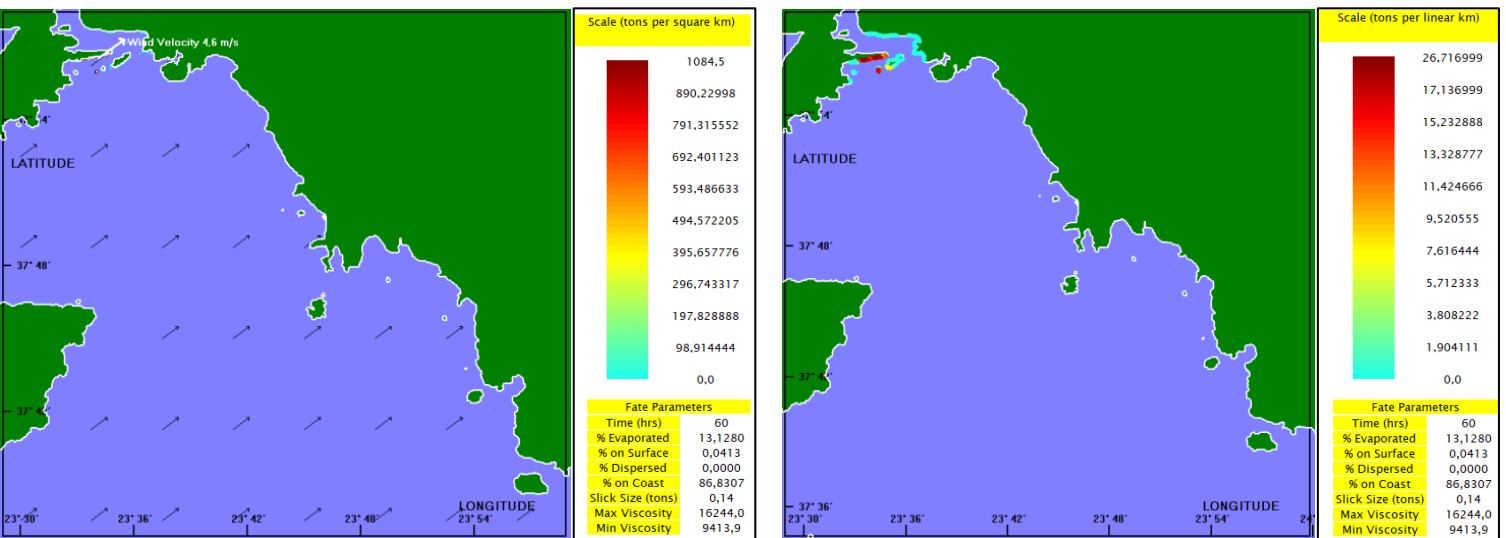
10/09/2017 Time: 14:00



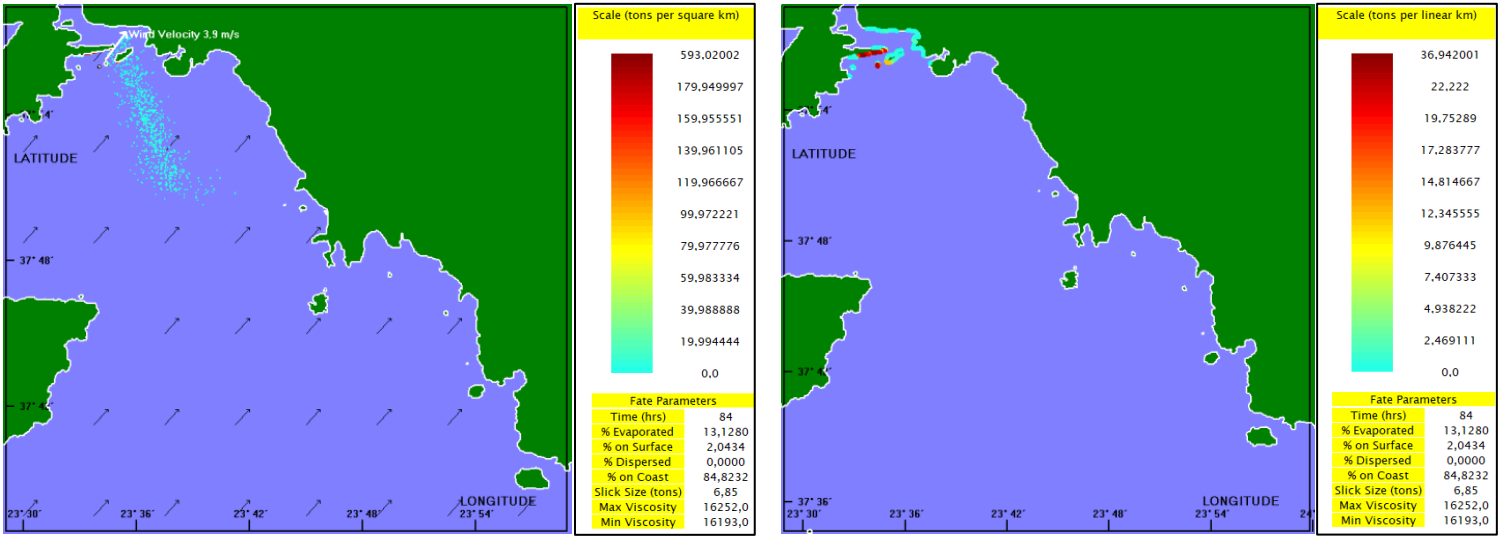
11/09/2017 Time: 14:00



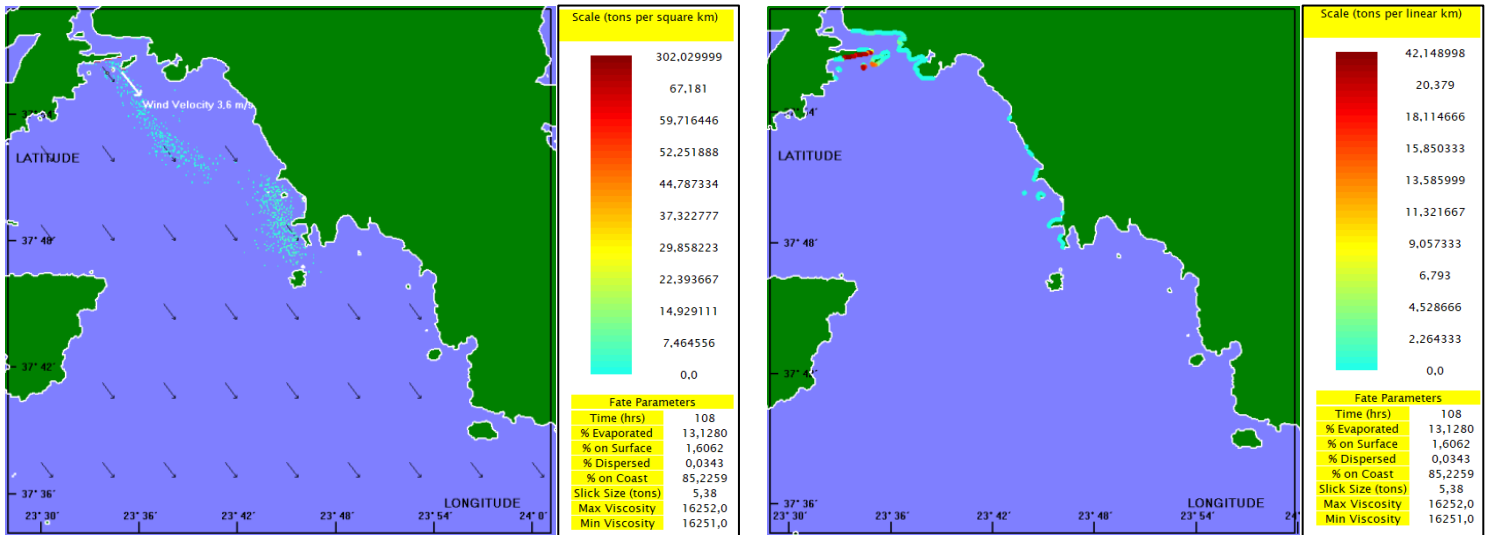
12/09/2017 Time: 14:00



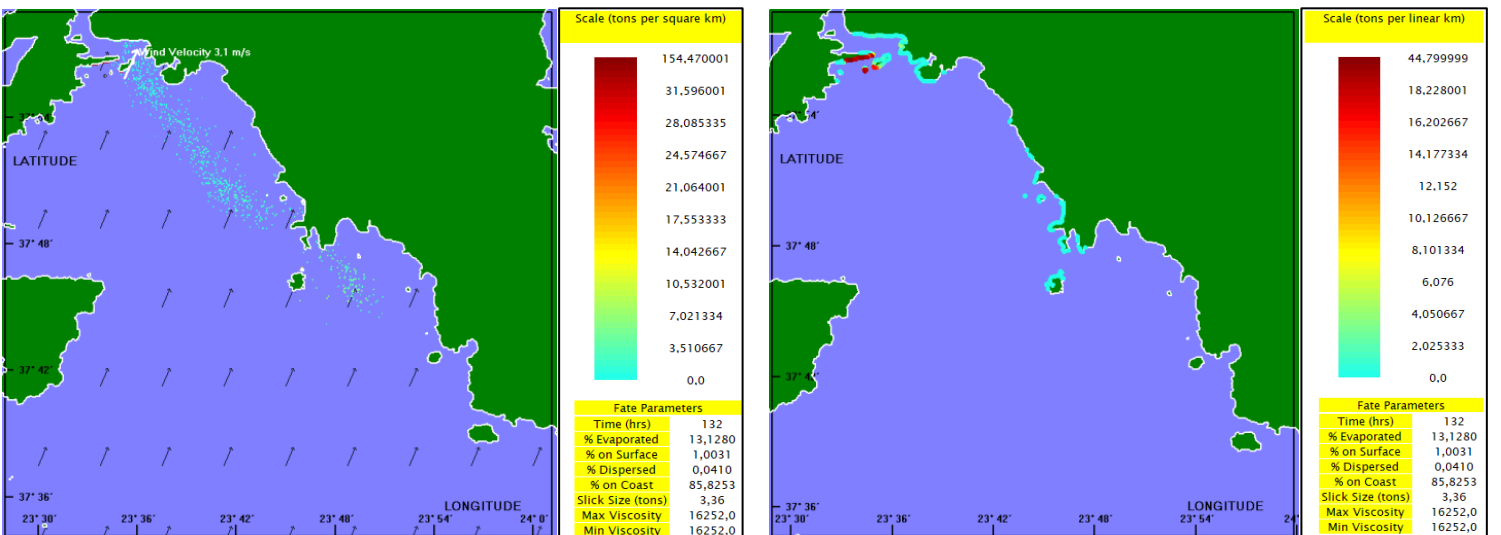
13/09/2017 Time: 14:00



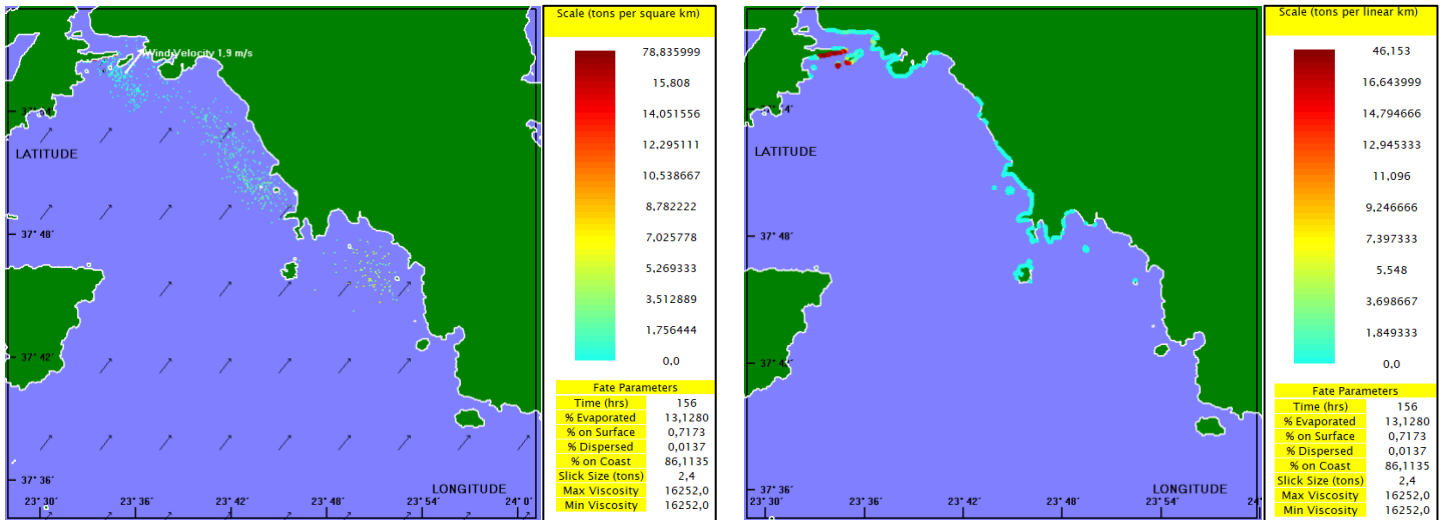
14/09/2017 Time: 14:00



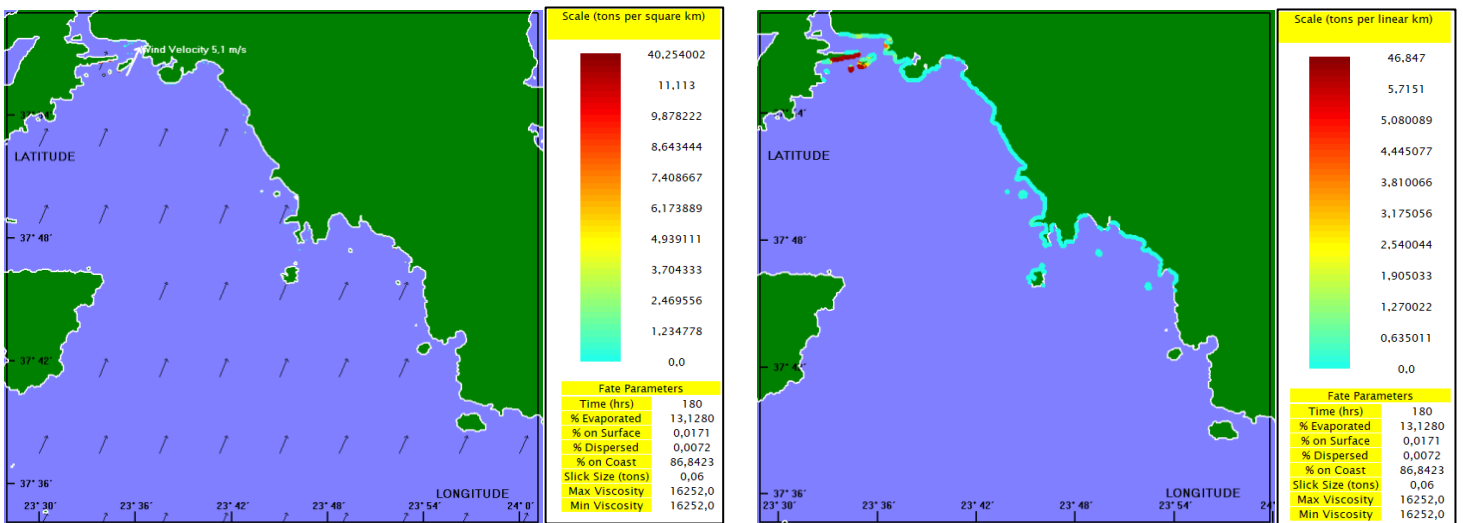
15/09/2017 Time: 14:00



16/09/2017 Time: 14:00



17/09/2017 Time: 14:00



18/09/2017 Time: 14:00

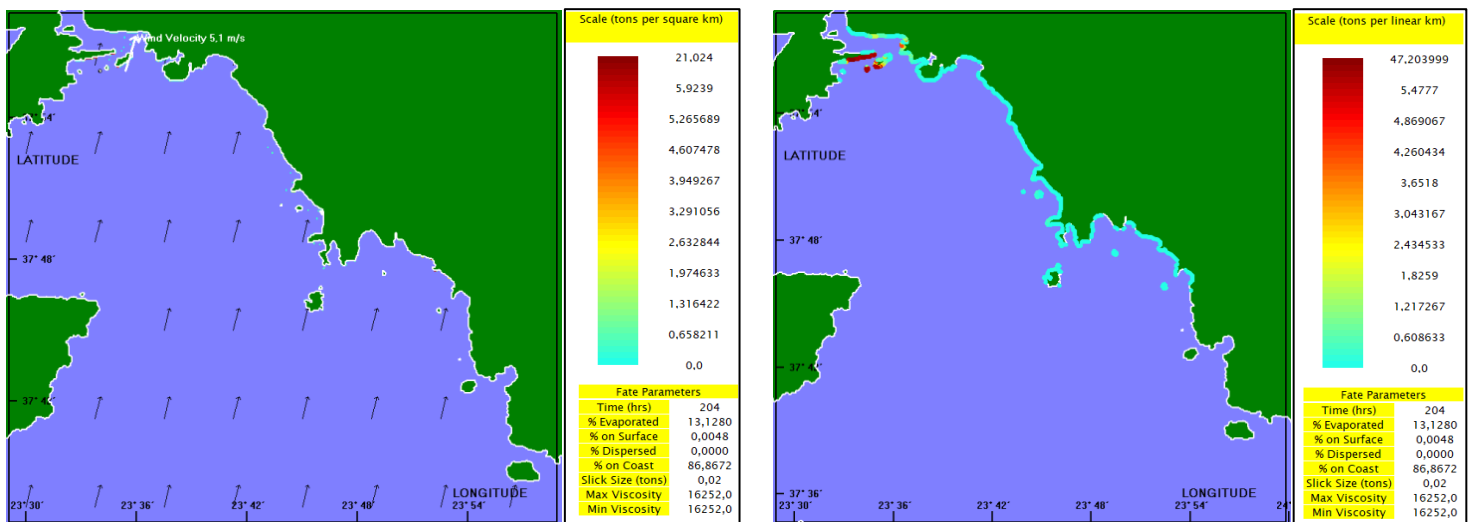
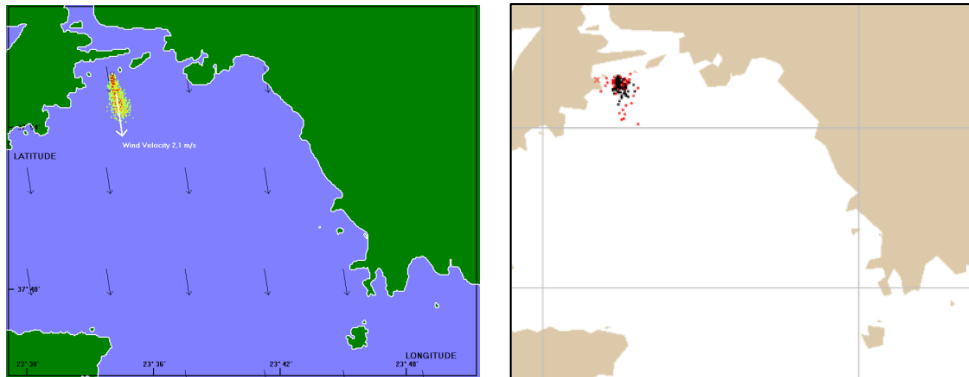


Figure 3 MEDSLIK results

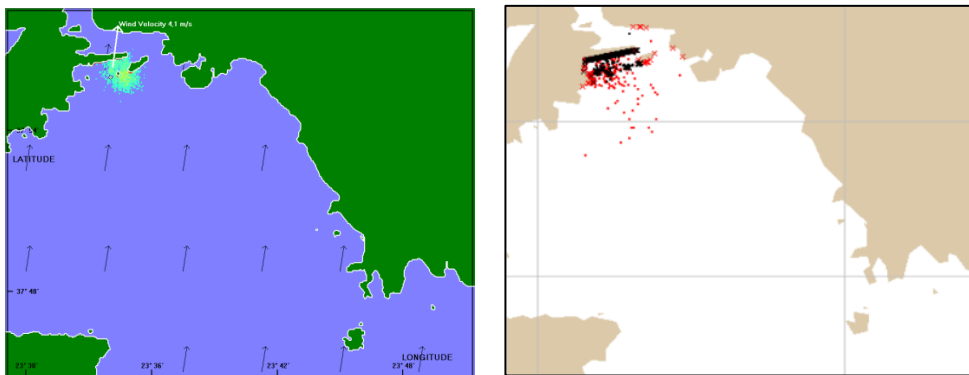
In conclusion, it is obvious that the wind was the most important factor in obtaining a satisfactory prediction of the behavior of the oil spill. The current data, given from Copernicus, did not satisfy the prediction of the real incident, since they did not affect the movement of the oil spill (Tsiatsiou, 2018). Thus, in this study, the current data used are calculated as the wind induced currents with a simple approach (Huacan Fang & Meglan Duan, 2014). MEDSLIK reproduced satisfactorily the trajectory of the real oil spill.

### 3.2 Comparison between MEDSLIK and GNOME

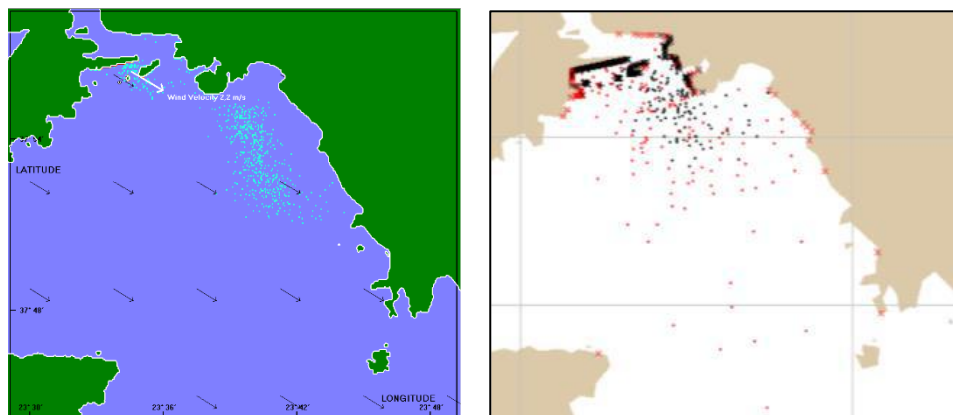
Figures 4-9 show the comparison between the results of MEDSLIK and GNOME simulations.



**Figure 4** Comparison between MEDSLIK and GNOME at 10/09/2017 08:00

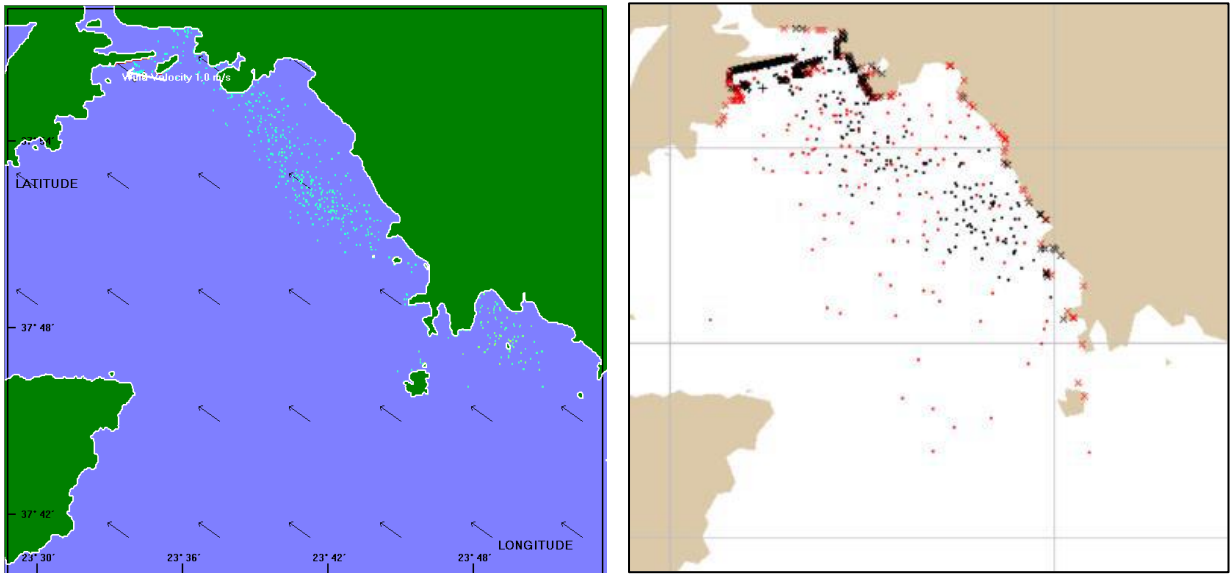


**Figure 5** Comparison between MEDSLIK and GNOME at 11/09/2017 afternoon

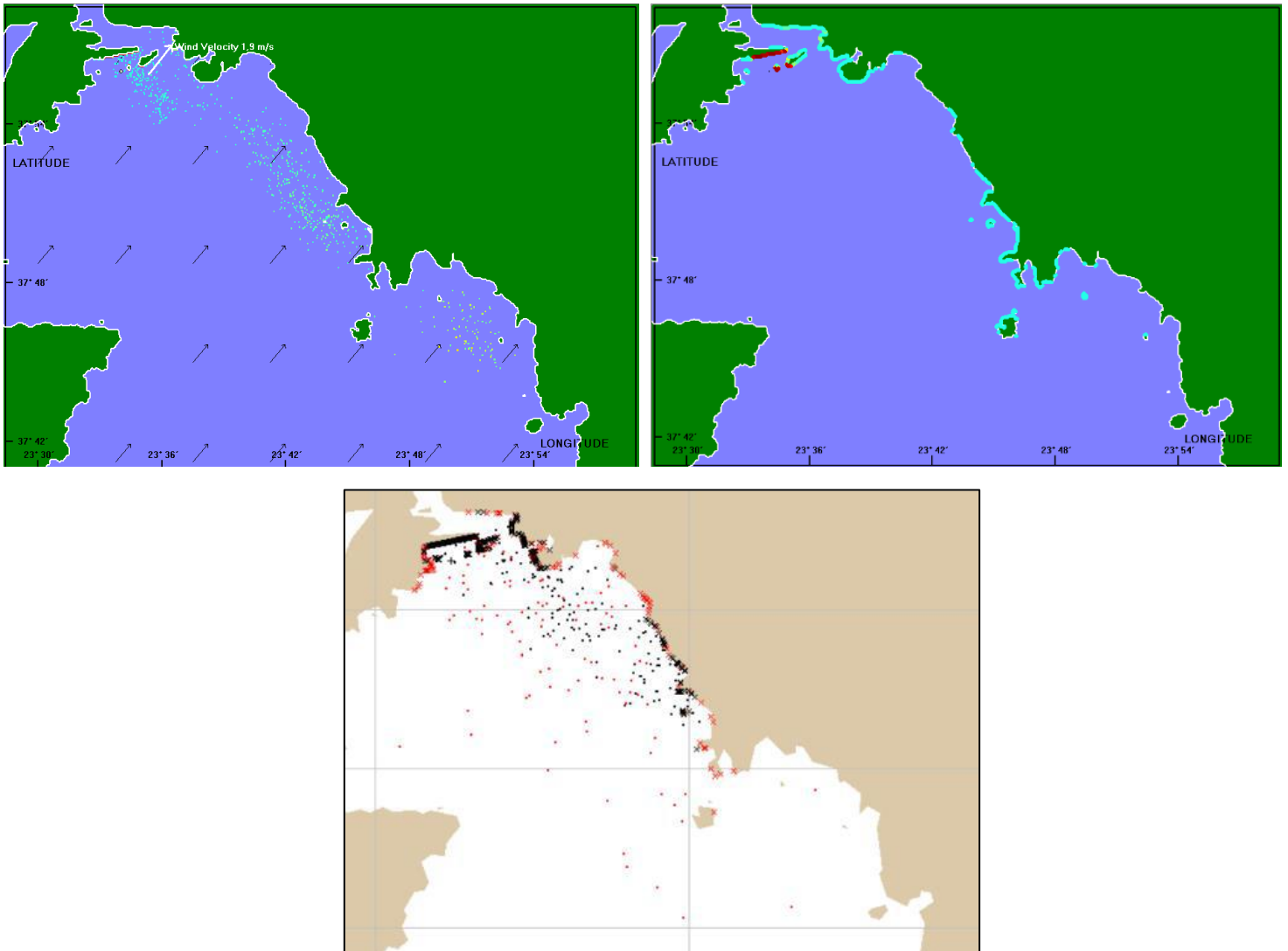


**Figure 6** Comparison between MEDSLIK and GNOME at 13/09/2017





**Figure 7** Comparison between MEDSLIK and GNOME at 15/09/2017



**Figure 8** Comparison between MEDSLIK and GNOME at 16/09/2017

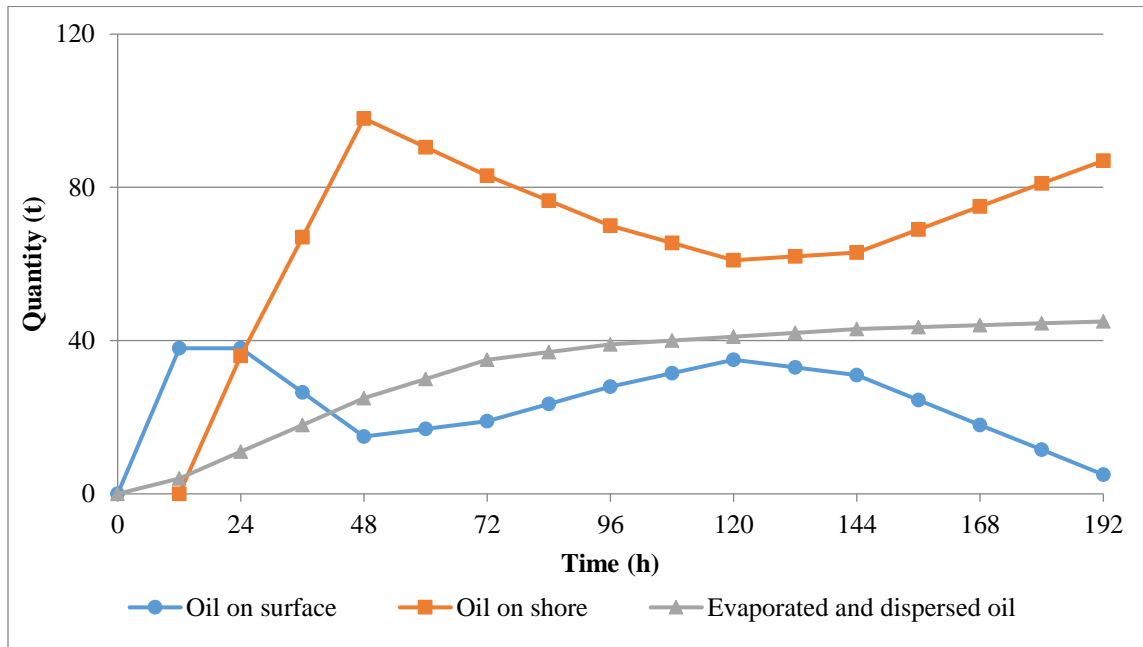


The results of the two models are very similar, despite the fact that GNOME shows the oil spill more scattered. In contrast, MEDSLIK shows the oil spill more concentrated near the shore. Both models coincide on the affected from oil coasts. The results are satisfactory taking into account the real incident and the observations.

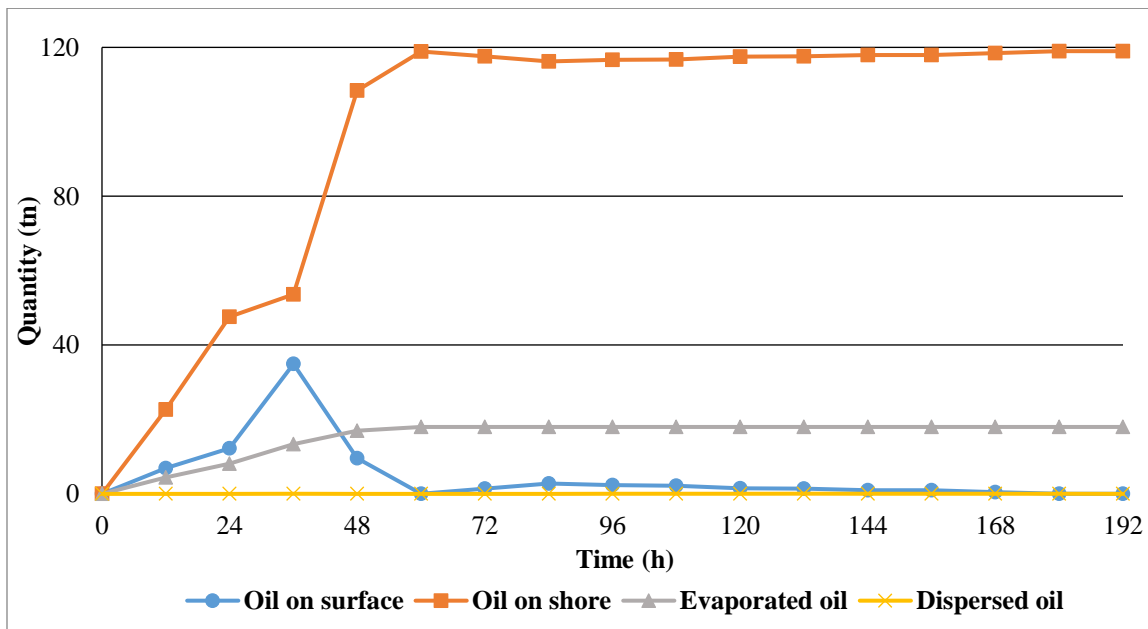
MEDSLIK and GNOME have many differences as models, which justifies why their results also differ. MEDSLIK simulates the weathering processes of advection, diffusion, beaching, evaporation, emulsification and dispersion. On other hand, GNOME simulates the processes of advection, beaching, diffusion and evaporation. As a result, the two processes that MEDSLIK takes into account while GNOME does not, are the emulsification and the dispersion. The results indicate that the dispersion does not have a considerable impact on oil spill. However, the emulsification, especially the first hours of the oil leakage, has a significant influence on the volume of the oil slick, something that the GNOME model does not take into consideration. The following Table (Table 2) shows the differences of the oil spill models. Following this, in Fig. 9-10 there is the comparison of the mass balance of the two models.

**Table 2:** Overview of MEDSLIK and GNOME oil spill models, "√" means the model can simulate the process.

	MEDSLIK	GNOME
Open Source Code		√
Advection	√	√
Diffusion	√	√
Wind Drift	√	√
Stokes Drift		
Backtracking	√	
Beaching	√	√
Spreading	√	√
Evaporation	√	√
Emulsification	√	
Natural Dispersion	√	
Vertical Movement	√	
Dissolution		
Sedimentation		
Biodegration		



**Figure 9** Mass balance of oil function of time in GNOME oil spill model (Tsiatsiou, 2018)



**Figure 10** Mass balance of oil function of time in MEDSLIK oil spill model

The comparison of the mass balance of both models reveal that the models coincide in the evolution of the evaporation, which rises gradually and after the leakage, it remains stable. MEDSLIK calculates less evaporated oil than the GNOME. There are two reasons why this occurs. Firstly, MEDSLIK in order to calculate the evaporated oil takes in account the volume of oil slick. Secondly, MEDSLIK calculates the emulsification process which makes the evaporation of the oil difficult. Subsequently, it is obvious that MEDSLIK calculates bigger amounts of beaching oil than GNOME, but both show the peak value at 48 hours. GNOME calculates less quantity on coasts and more quantity on surface. This can be justified by the fact that GNOME shows the oil spill more scattered than the MEDSLIK model. This is happening because GNOME does not take into account the emulsification process, which affects the volume and the viscosity

of oil slick. It is of paramount importance to note that both models are of the same size, for example surface oil in both cases do not exceed the 40 tons.

### 3.3 Sensitivity analysis investigation

Furthermore, the sensitivity analysis is constituted of 12 SA (Sensitivity Analysis) scenarios and each one resulted in different outcomes, depending on the changing parameters. These parameters are the diffusion coefficient, the number of the parcels and the time step of computations as it is described in the Table 3.

**Table 3** Sensitivity analysis scenarios

Scenarios	Parameter	Value
Scenario 1	Diffusion Coefficient	1000 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Scenario 2	Diffusion Coefficient	5000 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Scenario 3	Diffusion Coefficient	10000 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Scenario 4	Diffusion Coefficient	50000 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Scenario 5	Diffusion Coefficient	100000 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Scenario 6	Number of Parcels	1000
Scenario 7	Number of Parcels	5000
Scenario 8	Number of Parcels	50000
Scenario 9	Number of Parcels	100000
Scenario 10	Time step of computations	1 per hour
Scenario 11	Time step of computations	3 per hour
Scenario 12	Time step of computations	6 per hour

At the Scenarios 1-5, where the diffusion coefficient changes, it is observed that the oil spill for small values is concentrated and for large values spreads more on surface.

At Scenarios 6-9, where the number of parcels changes, the surface oil is affected. The smaller number of parcels leads to scattered surface oil spill. After this, the surface is increased so as to the oil spill become more compact. This parameter also affects the computational time. For the Scenario 6, the run time is 0:42 minutes, for the Scenario 7 is 0:59 minutes, for the Scenario 8 is 03:59 minutes and finally, for the Scenario 9 is 07:14 minutes.

For the Scenarios 10-12, the parameter that changes, is the time step per hour. There are not obvious differences with the main scenario where the time step is 2 per hour. The main difference occurs in run time. At the Scenario 10, the run time is 0:55 minutes, at the Scenario 11 is 01:40 minutes and at the Scenario 12 is 03:07 minutes.

The results of the sensitivity analysis are given below on the left part (Sc. 1-9) at 11/09/2017 at 11:00 and the results of the main scenario are on the right part, to make the differences obvious and understandable.

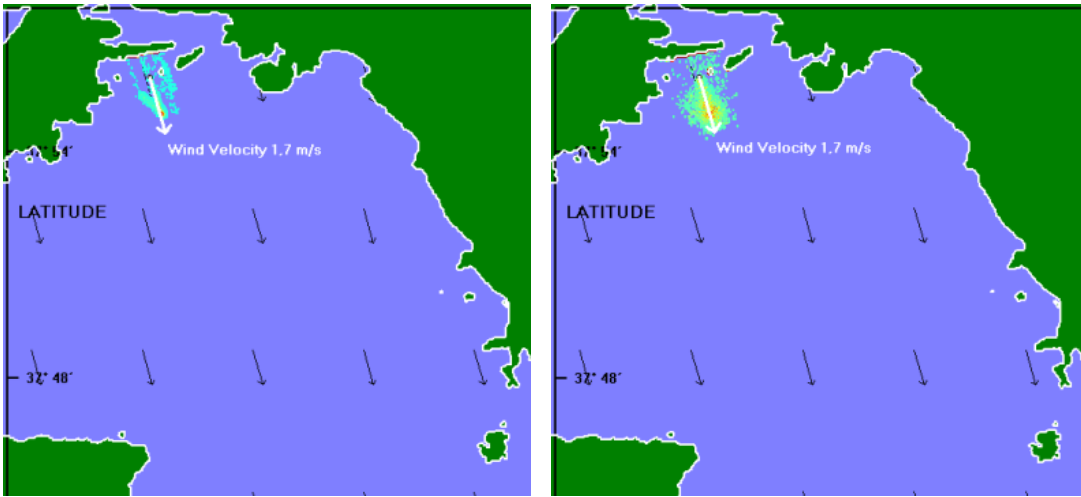


Figure 11 Scenario 1

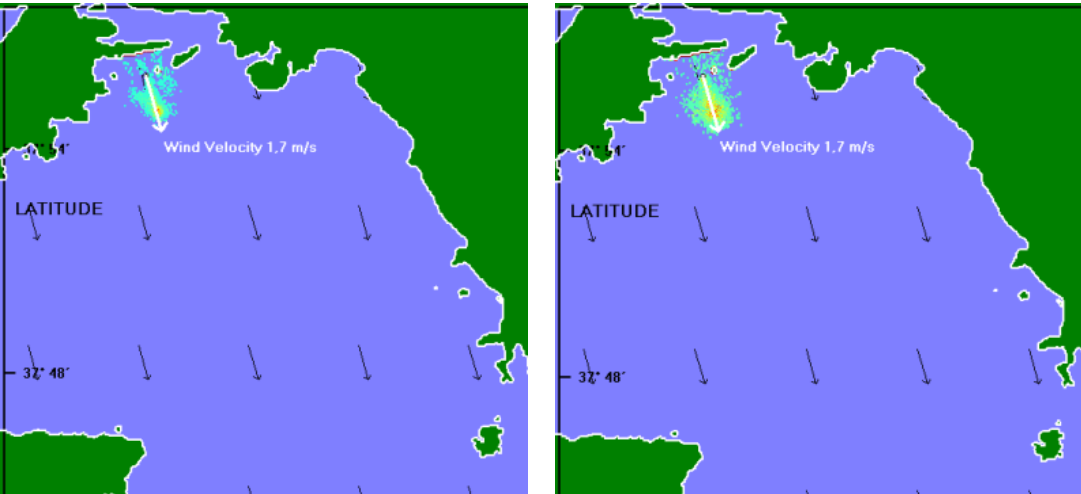


Figure 12 Scenario 2

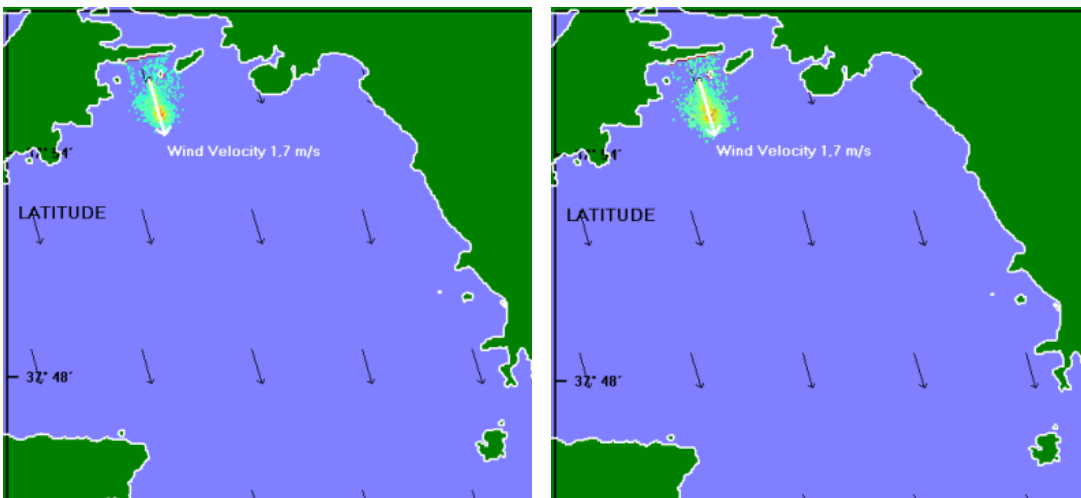


Figure 13 Scenario 3

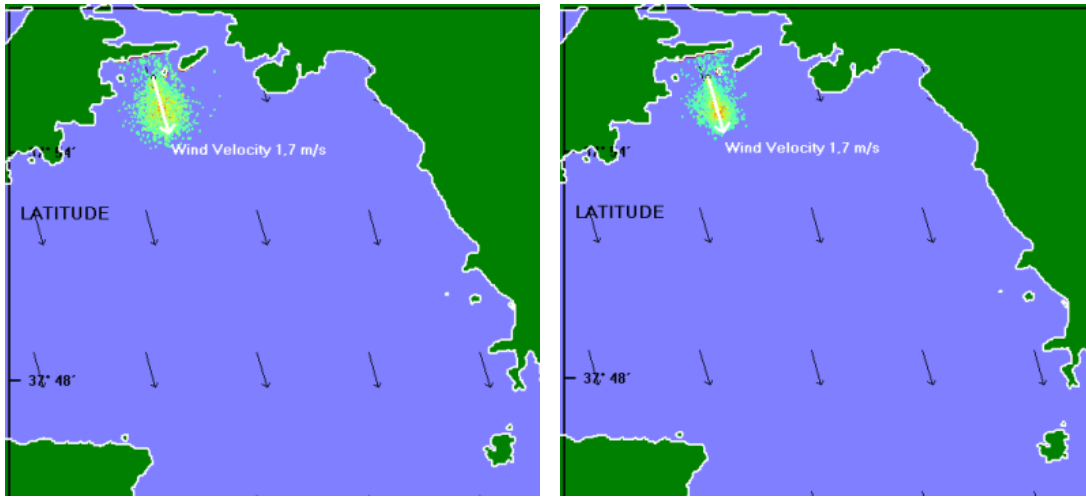


Figure 14 Scenario 4

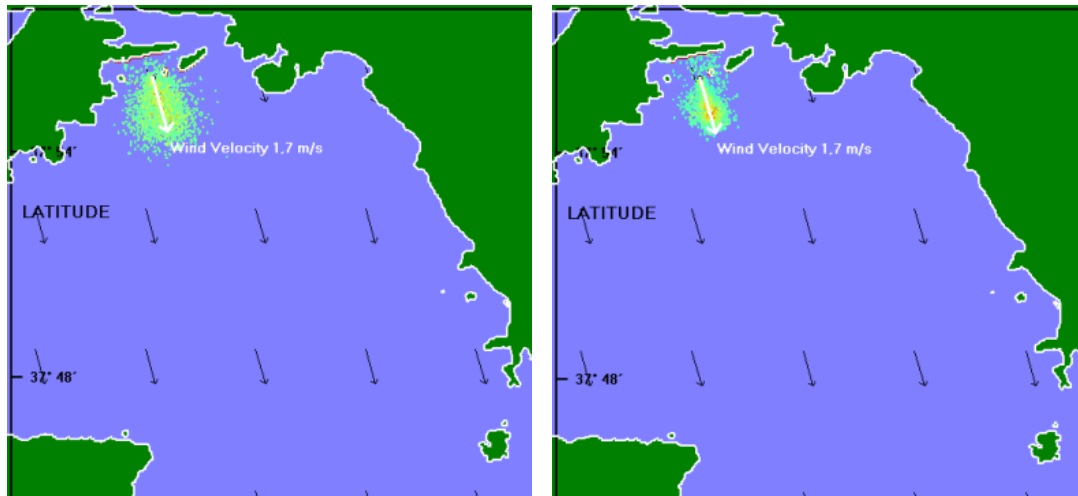


Figure 15 Scenario 5

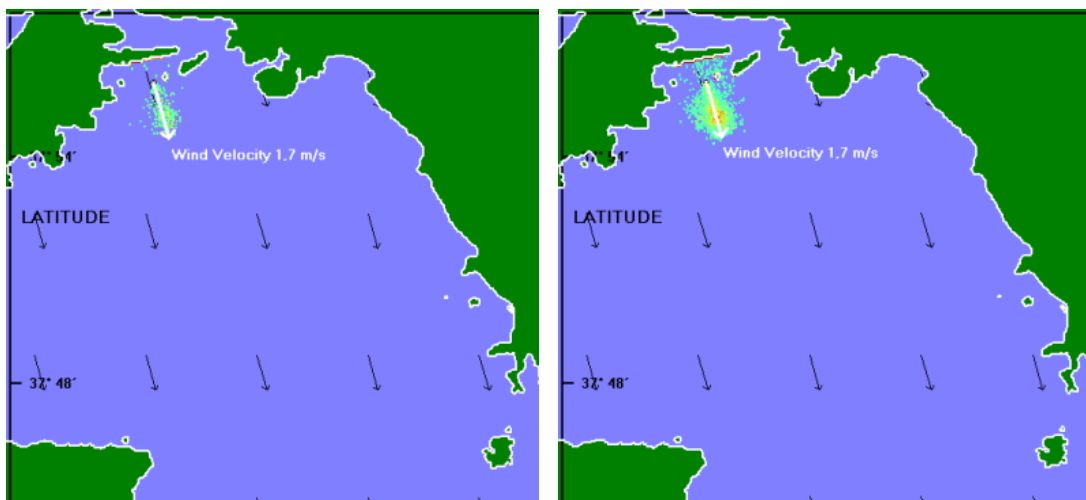


Figure 16 Scenario 6

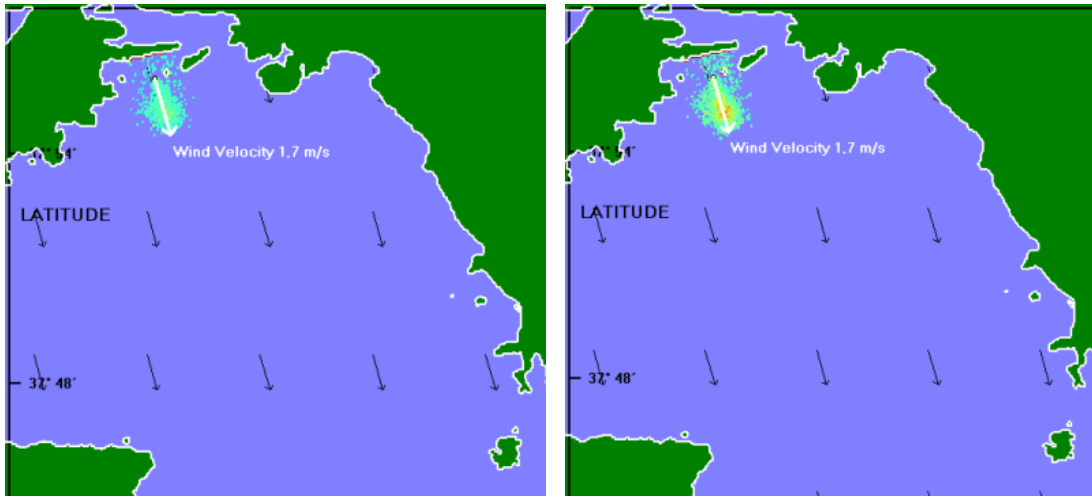


Figure 17 Scenario 7

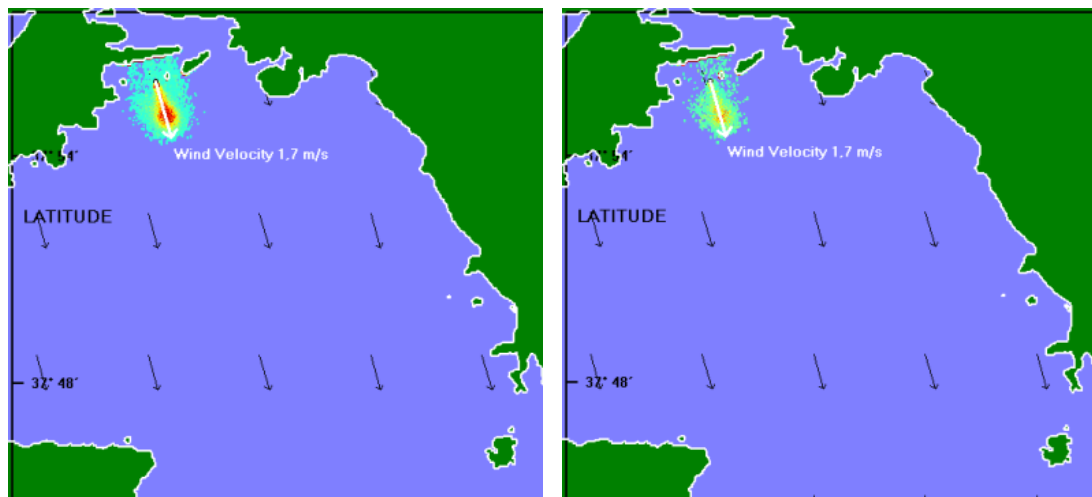


Figure 17 Scenario 8

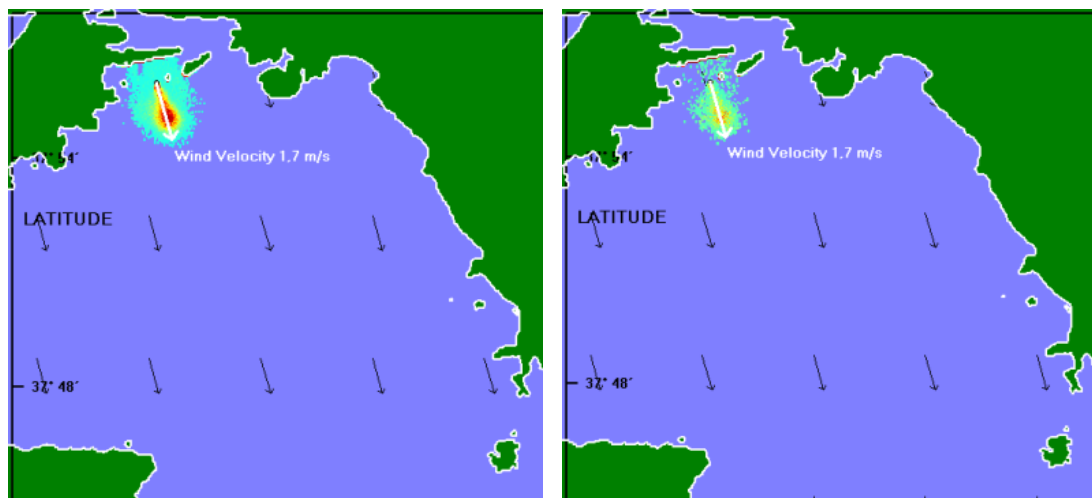


Figure 18 Scenario 9

## 4. Conclusion

This study uses the 3D mathematical oil spill model MEDSLIK in order to simulate the leakage of the oil spill from tanker “Agia Zoni II”, which took place at Saronikos Gulf on the 10th of September 2017. The total leakage of the tanker was 137 tons and it affected the coastal area and the activities at the north side of the Gulf.

The calculations are compared with the results of Tsiatsiou (2018), who used the oil spill model GNOME in order to simulate this accident; the same input data were used for both models. By comparing the two programs the main conclusions can be summarized as follows:

1. The comparison with the real incident of “Agia Zoni II” is satisfactory for both models, despite the fact that there are many differences between them.
2. The main difference is that they do not simulate the same weathering processes as MEDSLIK simulates emulsification and dispersion whereas GNOME does not. Thus, GNOME presents bigger quantity of oil to evaporate.
3. GNOME presents the droplets of the oil spill, without any information while MEDSLIK shows the oil spill with a patch of colors, which represent the quantity of the oil per square kilometers; this is very helpful in order to assess the oil spill.
4. MEDSLIK is a user-friendly program that can be used at a business level, but only for the options the program provides. One of the main disadvantages of the model is that this version is backed by old software (Windows 95, 98, 2000 or XP) which is difficult to be found.

Moreover, an extensive sensitivity analysis is performed, by changing three parameters; the diffusion coefficient, the number of parcels and the time step of the computations, from which the following conclusions were drawn.

1. For small diffusion coefficients, the oil spill is very restricted, and it diffuses as the coefficient value rises. Here, it is very important to mention that the run time is affected a lot by this parameter.
2. The number of parcels has also the same effects, both at the oil spill and the run time of the model. The surface oil spill is presented based on this value. In case this value grows then the surface oil of spill also grows. This parameter should be used with caution, since the results may not represent the reality.
3. In terms of the time step, the sensitivity analysis only differs in the run time of the model.

To conclude with, the oil spill models are significantly affected by changing some parameters and in this way, their results and the run time are also differentiated.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί την μαθηματική προσομοίωση της συμπεριφοράς της πετρελαιοκηλίδας που προκλήθηκε στις 10 Σεπτεμβρίου 2017, από τη βύθιση του δεξαμενόπλοιου «Αγία Ζώνη II» στο Σαρωνικό κόλπο.

Το κύριο μέρος της εργασίας αφορά σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με άλλα μοντέλα προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδας και με το πραγματικό συμβάν. Επιπλέον, διεξάγεται περαιτέρω μελέτη για την ευαισθησία του μοντέλου, μέσω της δοκιμής με διάφορες μεταβλητές.

Στην εργασία εκτιμάται αν το μαθηματικό μοντέλο μπορεί να προσομοιάσει ικανοποιητικά ερευνητικά ή ακόμα και επιχειρησιακά κάποιο αντίστοιχο ατύχημα διαρροής πετρελαίου. Αυτό θα βοηθήσει σημαντικά στην πρόληψη, πρόβλεψη ακόμα και στην αντιμετώπιση μιας τέτοιας ρύπανσης.

Για την προσομοίωση της πετρελαιοκηλίδας χρησιμοποιήθηκε το 3D μαθηματικό μοντέλο MEDSLIK.

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφεται η έννοια της πετρελαιοκηλίδας, όλες οι διεργασίες που ακολουθούν, καθώς και οι επιπτώσεις που επιφέρουν και πως αυτές μπορούν να αντιμετωπιστούν.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται τα είδη των μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση και την πρόγνωση τροχιάς των πετρελαιοκηλίδων.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται αναφορά στο συμβάν του δεξαμενόπλοιου «Αγία Ζώνη II, με βάση διάφορες πηγές και αναφορές εκείνης της περιόδου αλλά και πιο επίκαιρες.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο MEDSLIK σχετικά με χρήση του, με τα δεδομένα εισόδου και με το πως εξάγει τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης.

Στο κεφάλαιο 6 περιγράφεται η μαθηματική προσομοίωση του ατυχήματος και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή, η σύγκριση με το μοντέλο GNOME και με την προσομοίωση της WWF καθώς και η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου.

Στο κεφάλαιο 7 αναφέρονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν και προτάσεις για περαιτέρω μελλοντική ερεύνα και διερεύνηση.

Τέλος, στο παράρτημα παρατίθενται τα δεδομένα εισόδου του προγράμματος, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της ανάλυση ευαισθησίας.



## 2. ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ

### 2.1 Αίτια δημιουργίας πετρελαιοκηλίδων

Πετρελαιοκηλίδα είναι η απελευθέρωση υγρού υδρογονάνθρακα στο περιβάλλον, ειδικότερα σε θαλάσσιες εκτάσεις, συντελούμενη από ανθρώπινη δραστηριότητα, και αποτελεί μορφή ρύπανσης. Οι πετρελαιοκηλίδες επιφέρουν σοβαρές περιβαλλοντολογικές, οικονομικές και κοινωνικές βλάβες και συνέπειες. Για τους λόγους αυτούς, διαχρονικά έχουν ληφθεί ουσιαστικά μέτρα από τους φορείς άσκησης πολιτικών για τη μείωση του αντίκτυπου τους, συμπεριλαμβανομένης της παρακολούθησης και αντιμετώπισης τους. (Copernicus Marine Service)

Κύριες αιτίες πρόκλησης των πετρελαιοκηλίδων στη θάλασσα είναι τα ατυχήματα σε πετρελαιοφόρα δεξαμενόπλοια (βύθιση, προσάραξη, σύγκρουση ή επαφή, έκρηξη ή πυρκαγιά), ο παράνομος καθαρισμός των δεξαμενών καυσίμου των πλοίων στην ανοιχτή θάλασσα και η απόρριψη σε αυτή χρησιμοποιημένων λιπαντικών και υπολειμμάτων καύσης. (Τριανταφύλλου Γ., και Βεργέτης Μ, 2004). Επίσης πιθανή αιτία είναι και τα ατυχήματα σε εξέδρες υποθαλάσσιων γεωτρήσεων πετρελαίου ή λοιπές εξέδρες αποθήκευσης, μεταφοράς ή επεξεργασίας πετρελαίου.

Οι περιπτώσεις απωλειών πλοίων ή/και φορτίων που συνήθως οδηγούν σε ρύπανση του θαλάσσιου περιβάλλοντος μπορούν να συνοψιστούν στις εξής: (ITOPF, 2018)

- Σύγκρουση ή επαφή του πλοίου (Collision/Allision). Στην πρώτη περίπτωση με άλλο ή με αλλά πλοία κυρίως στις θαλάσσιες περιοχές με συχνή κυκλοφορία (εσωτερικά ύδατα, αιγιαλίτιδες ζώνες, διεθνή στενά). Οι συγκρούσεις τις περισσότερες φορές είναι αποτέλεσμα ανθρώπινου λάθους.



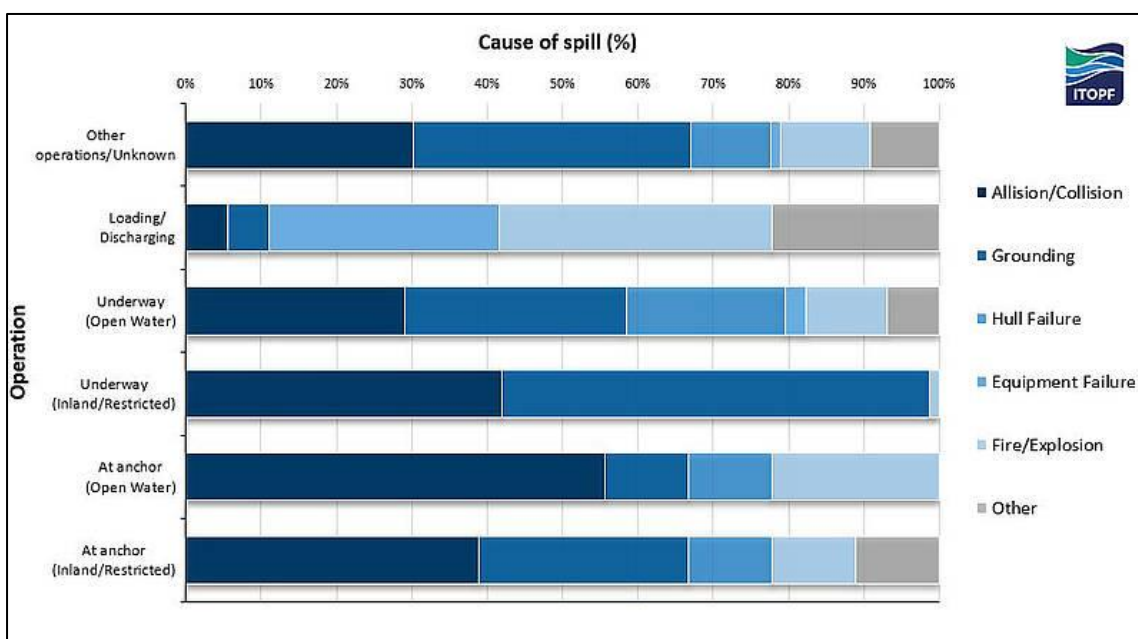
**Εικόνα 2.1** Παράδειγμα πρόκλησης πετρελαιοκηλίδας από σύγκρουση στη Μεσόγειο (Οκτώβριος 2018) (<https://www.kathimerini.gr/988670/gallery/epikairothta/kosmos/megalh-diarroh-kaysimwn-meta-th-syggkroysh-ploiwn-anoixta-ths-korsikhs-fwtografies>)

- Δυναμική προσάραξη πλοίου (Grounding), ή όταν το πλοίο εξοκείλει, συνήθως σε παράκτιες περιοχές με πυκνή κυκλοφορία εξαιτίας μηχανικής βλάβης, κακοκαιρίας, λανθασμένης πλοήγησης. Τα μεγάλα

πλοία συχνά πέφτουν θύματα προσάραξης όταν βρίσκονται κοντά σε διεθνή στενά, κανάλια, κ.λ.π, επειδή υπάρχει ελάχιστος χώρος για ελιγμούς.

- Ζημιές στη δομή του πλοίου (Hull Failure) ιδιαίτερα στο εξωτερικό περίβλημα ή στα τοιχώματα των δεξαμενών λόγω κλιματολογικών συνθηκών, μετατόπισης φορτίου, κακής συντήρησης με προφανή συνέπεια τη μη αντοχή των υλικών.
- Ζημιές στον εξοπλισμό του πλοίου (Equipment Failure)
- Πυρκαγιά ή έκρηξη (Fire or Explosion) στις περιπτώσεις εκείνες που μεταφέρονται επικίνδυνα φορτία.
- Διάφορα ατυχήματα (Other) τα οποία περιλαμβάνουν: i) μικτές μορφές των παραπάνω, π.χ. πυρκαγιά και βύθιση, πρόσκρουση και βύθιση ii) εσκεμμένη βύθιση πλοίου με τη μέθοδο του ανοίγματος σπών στα ύφαλα του πλοίου πιθανότατα για να μην περιέλθει το πλοίο στον έλεγχο του εχθρού ή την εξοικονομήσει χρημάτων, π.χ. από την ασφάλεια του iii) εξαφάνιση του πλοίου χωρίς αιτιολόγηση και iv) εγκατάλειψη του πλοίου.

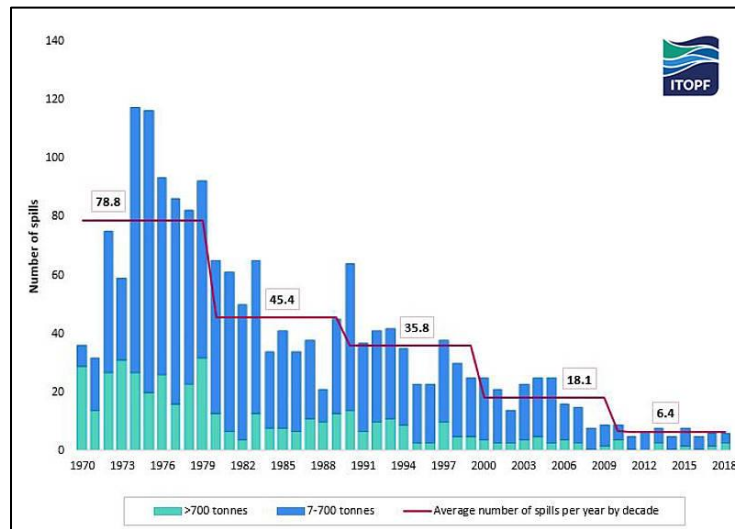
Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.2 (ITOPF, 2018) η αιτία της κάθε διαρροής ποικίλει ανάλογα με την δραστηριότητα. Στο διάγραμμα φαίνεται ότι όταν τα πλοία είναι σε κίνηση ή όταν είναι αγκυροβολημένα είτε στα ανοιχτά είτε σε παράκτιες περιοχές η κύρια αιτία ατυχήματος είναι η σύγκρουση με ποσοστό να φτάνει και το 99% σε στενά περάσματα. Όταν τα πλοία φορτώνουν ή εκφορτώνουν το φορτίο, η πιο πιθανή αιτία πρόκλησης ατυχήματος είναι είτε μια ζημιά στο πλοίο ή στον εξοπλισμό ή να συμβεί κάποια έκρηξη ή φωτιά.



**Εικόνα 2.2** Αιτία διαρροής 1970 -2018  
(ITOPF, 2018)

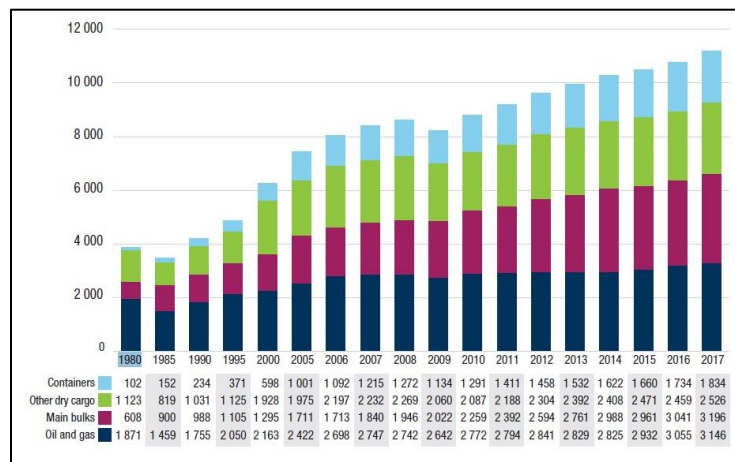
Οι πετρελαιοκηλίδες έχουν μειωθεί σε αριθμό τις τελευταίες δεκαετίες καθώς και οι αντίστοιχες ποσότητες διαρροής, οι μικρές λειτουργικές διαρροές των πλοίων, καθώς και η παράνομη διοχέτευση λιπαντικών στη θάλασσα. Αυτή η μείωση επιτεύχθηκε λόγω της αύξησης της θαλάσσιας επιτήρησης (π.χ. υπηρεσία ανίχνευσης πετρελαιοκηλίδων CleanSeaNet της EMSA). Επιπρόσθετα, οι διεθνείς συμβάσεις

επιβάλλουν σημαντικά περιοριστικά μέτρα (πχ διπλό κύτος) και τα συστήματα παρακολούθησης αναπτύσσονται συνεχώς (VTS, AIS, τηλεανίχνευση).



**Εικόνα 2.3** Αριθμός πετρελαιοκηλίδων από το 1970-2018  
(ITOPF, 2018)

Ένα σημαντικό στοιχείο είναι ότι το εμπόριο του πετρελαίου γίνεται κατά αποκλειστικότητα μέσω της θάλασσας. Το θαλάσσιο εμπόριο του πετρελαίου αποτελεί το 90% της παγκόσμια αγοράς. Αυτό σημαίνει ότι τα φορτία συνεχώς αυξάνονται για να ικανοποιήσουν την αύξηση του εμπορίου και των αγορών. Αυτό φυσικά αυξάνει τις πιθανότητες ενός μεγάλου ατυχήματος πετρελαιοκηλίδας, και για αυτό τον λόγο θα πρέπει να υπάρχει και η απαραίτητη πρόληψη για να αποφευχθούν οι όποιες επιπτώσεις της .



**Εικόνα 2.4** Διεθνές θαλάσσιο εμπόριο 1980-2017 (εκατομμύριο τόνοι)  
(UNCTAD, 2018)

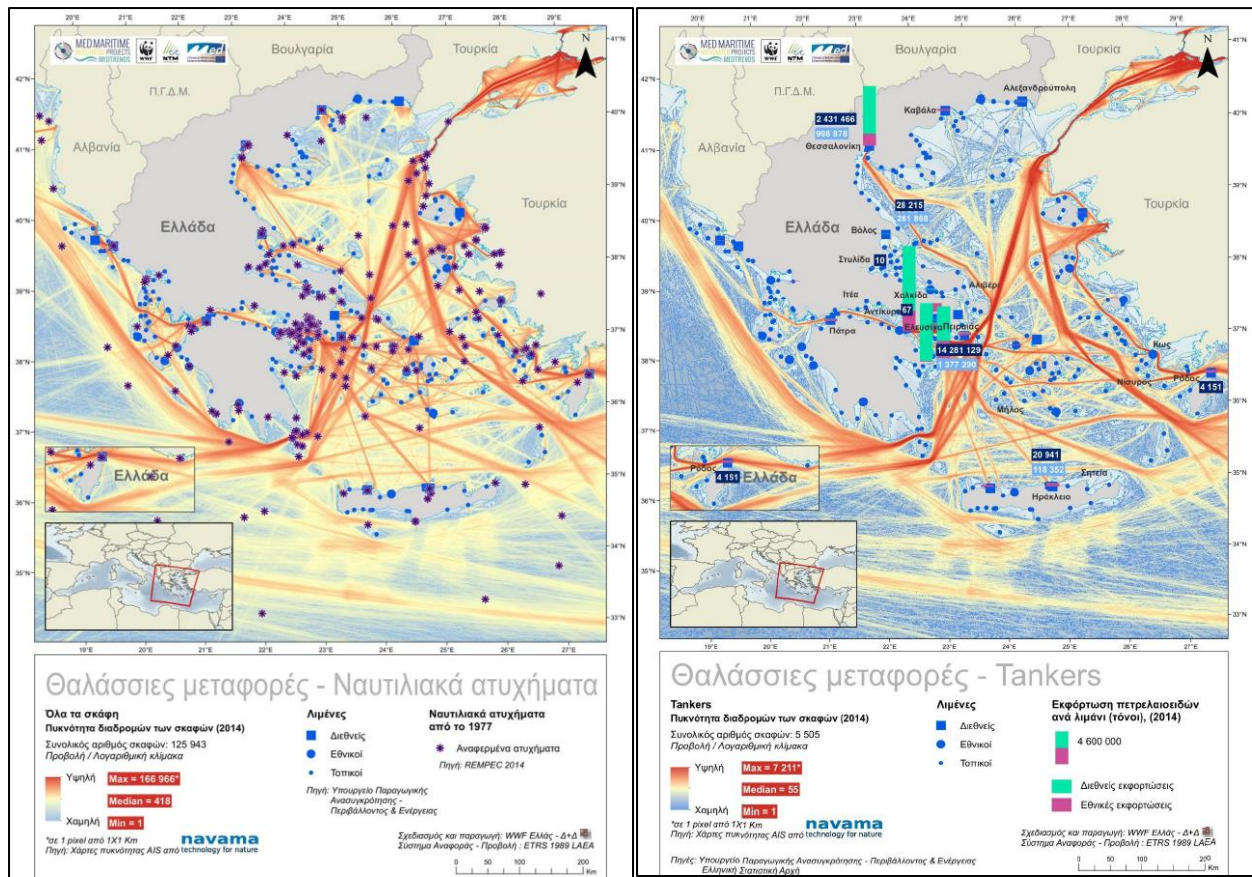
## 2.2 Αξιολόγηση Κινδύνου Ατυχήματος στην Ελλάδα.

Τα τελευταία 50 χρόνια, στη Μεσόγειο έχει αυξηθεί ιδιαίτερα η κυκλοφορία των πλοίων. Η Ελλάδα είναι μία χώρα με μεγάλο θαλάσσιο χώρο όπου υπάρχει μεγάλη κίνηση πλοίων, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες. Από την Ελλάδα επίσης διέρχονται οι θαλάσσιοι εμπορικοί δρόμοι της Μεσογείου για την Ανατολική Μεσόγειο, κάτι που αυξάνει τον κίνδυνο πετρελαιοκηλίδας στην Ελλάδα.



Στη 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.

Το Αιγαίο έχει τον υψηλότερο βαθμό ατυχημάτων στη Μεσόγειο και θεωρείται περιοχή υψηλού κινδύνου. Οι συνθήκες ναυτιλίας που επικρατούν στο Αιγαίο μπορούν να θεωρηθούν πολύ επικίνδυνες, καθώς δεν έχουν οριστεί δίοδοι ναυσιπλοΐας και δεν γίνεται παρακολούθηση και έλεγχος τήρησης των κανονισμών. Είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο γιατί σε μικρό χώρο κινούνται πολλά πλοία, με πολλά από τα αυτά να μεταφέρουν και επικίνδυνα φορτία. Επίσης η Ελλάδα είναι μια χώρα με πλούσιο οικοσύστημα, πολλές προστατευόμενες περιοχές (NATURA) αλλά και κλειστές θάλασσες με πολύπλοκη ακτογραμμή. (Archipelagos)

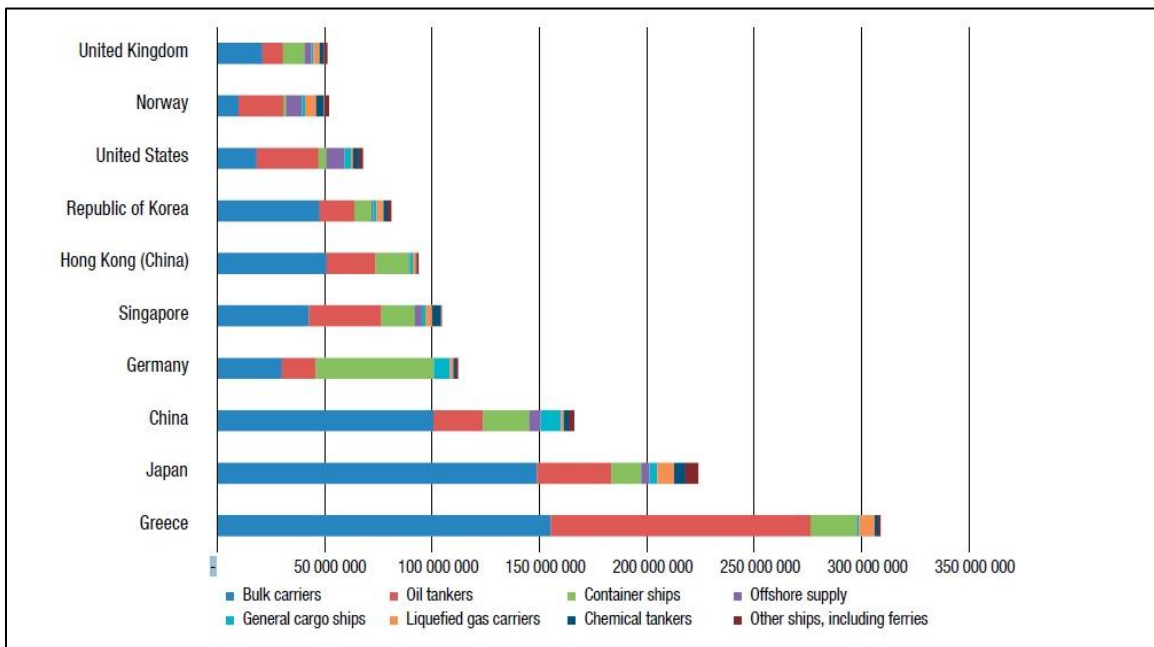


**Εικόνα 2.5:** Θαλάσσιες μεταφορές- Ναυτιλιακά Ατυχήματα-Tankers  
(WWF HELLAS, 2015)

Ενδεικτικά το ισοτιούτο Αρχιπέλαγος από το Νοέμβριο του 2009 μέχρι το Νοέμβριο του 2011 πραγματοποίησε μια επιχείρηση καταγραφής στο Αιγαίο Πέλαγος και συγκεκριμένα στα στενά περάσματα Εύβοια-Άνδρος, Μύκονος-Ικαρία, Ικαρία-Σάμος. Καταγράφηκαν συνολικά 72.919 πλοία να διασχίζουν αυτά τα τρία «περάσματα» τα δύο αυτά χρόνια. Η καταγραφή αυτή ισοδυναμεί με 100 πλοία την ημέρα να διασχίζουν τις περιοχές αυτές. Από αυτά το 65% ήταν φορτηγά πλοία, το 21% τάνκερ, και το 5% επιβατηγά πλοία. (Archipelagos)

Πέρα όμως από την μεταφορά των πλοίων έχει ιδιαίτερη σημασία και η θέση της Ελλάδας στην Διεθνή οικονομία των θαλάσσιων μεταφορών. Είναι χαρακτηριστικό ότι η Ελλάδα διαθέτει τα περισσότερα πλοία

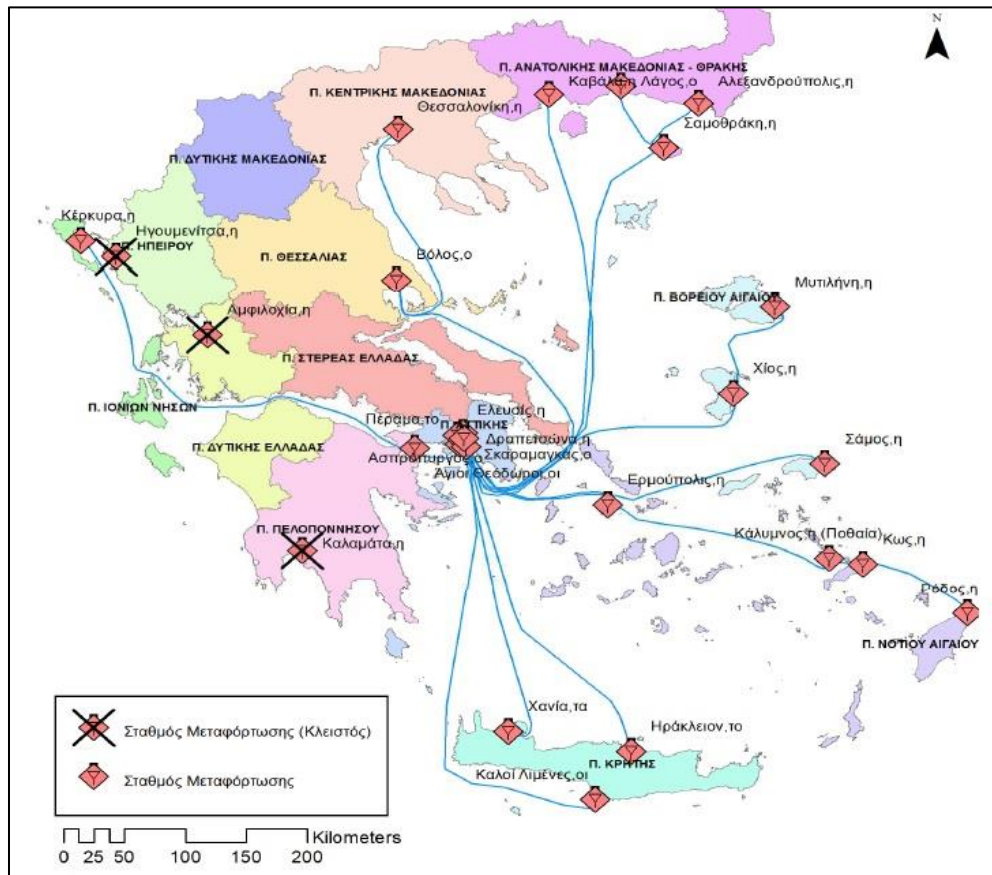
και σε αριθμό και σε χωρητικότητα. Σε αριθμό πλοίων η Ελλάδα σύμφωνα με (UNCTAD, 2017) είναι πρώτη σε θέση παγκοσμίως και διαθέτει 4.199 πλοία, τα οποία έχουν 308.836.933 DWT .



**Εικόνα 2.6** Οι κορυφαίες 10 χώρες ιδιοκτησίας πλοίων σε χωρητικότητα (dead weight tons).  
(UNCTAD, 2017)

Στην Ελλάδα διακινούνται με πλοία περισσότεροι από 100.000.000 τόνοι πετρελαίου ετησίως. Η διακίνηση των φορτίων γίνεται κυρίως στον άξονα των βιομηχανικών κέντρων Θεσσαλονίκης, Βόλου, Αθήνας, Πάτρας κάτι το οποίο αυξάνει την πιθανότητα ατυχήματος σε αυτές τις περιοχές.

Πέρα όμως από αυτό, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί και στις πιο απομακρυσμένες περιοχές της χώρας εγκαταστάσεις εμπορίας και αποθήκευσης πετρελαιοειδών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.7. Οι μεγάλες αποστάσεις και οι πολλές διαδρομές αυξάνουν την κίνηση πετρελαιοφόρων στις Ελληνικές Θάλασσες και την πιθανότητα ατυχήματος είτε στις εγκαταστάσεις αυτές είτε στην ανοιχτή θάλασσα.



**Εικόνα 2.7** Σταθμοί εμπορίας και αποθήκευσης καυσίμων στην Ελλάδα  
(Λ. Παπαδά, Γ. Παναγιωτόπουλος, Δ. Καλιαμπάκος, 2017)

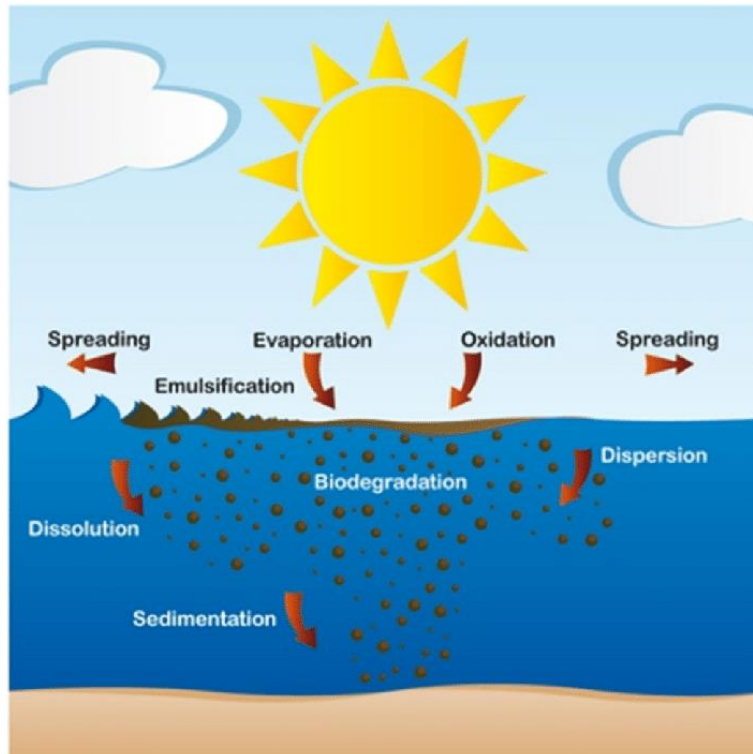
Λόγω όλων των παραπάνω στην Ελλάδα ήδη έχουν γίνει ατυχήματα διαρροής πετρελαίου τα οποία παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

**Πίνακας 2.1.** Τα 10 σημαντικότερα ατυχήματα που έχουν συμβεί στον Ελλαδικό χώρο

	<b>Χρονολογία</b>	<b>Πλοίο</b>	<b>Τοποθεσία</b>	<b>Ποσότητα (Τόνοι)</b>
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 Chernomorja"	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
11.	2007	"Sea Diamond"	Σαντορίνη	450
12.	2017	"ΑΓΙΑ ΖΩΝΗ II"	Αταλάντη	137
13.	2017	"Little Seyma"	Μύκονος	(μικρές ποσότητες)
				<b>94.387</b>

## 2.3 Η συμπεριφορά και η τύχη του πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον

Κύριοι παράγοντες για την εξέλιξη μιας πετρελαιοκηλίδας είναι η (οριζόντια) μεταφορά, η οποία γίνεται λόγω της δράσης του ανέμου και της ροής του πεδίου, και λόγω της γήρανσής του πετρελαίου. Η γήρανση του πετρελαίου είναι οι φυσικές διεργασίες που συμβάλλουν στην μείωση του ή στην αύξηση της μάζας του επηρεάζοντας την πυκνότητα και τον όγκο του. Οι σημαντικότερες διεργασίες «γήρανσης» που παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.8 είναι : η εξάπλωση, η εξάτμιση, η διασπορά, η γαλακτωματοποίηση, η διάλυση, η καθίζηση, η φωτοξείδωση και η βιοαποικοδόμηση, τα οποία αναλύονται στα επόμενα υποκεφάλαια.



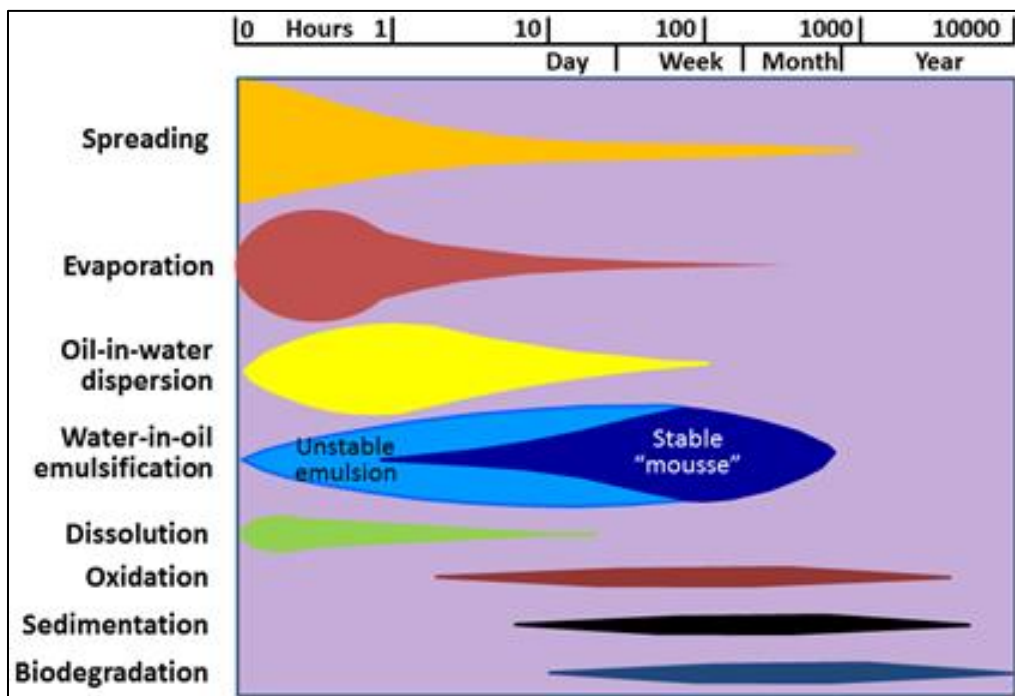
Εικόνα 2.8 Κύριες διεργασίες «γήρανσης» της Πετρελαιοκηλίδας  
(ITOPF, 2011)

Κατά την διαρροή πετρελαίου στη θάλασσα παρατηρείται ένα λεπτό στρώμα το οποίο κινείται κατά μήκος, ανάλογα με τις διευθύνσεις και τις εντάσεις των ανέμων που πνέουν στην περιοχή τη δεδομένη στιγμή, καθώς και από τις εντάσεις των ρευμάτων. Κύριο κριτήριο για τη μεταφορά του πετρελαίου είναι το κυματικό κλίμα, η αλληλεπίδραση δηλαδή των κυματισμών, των ανέμων, των ρευμάτων καθώς και από την ορμητική τυρβώδη διάχυση. Το κύριο μέρος της ποσότητας του πετρελαίου παραμένει στην επιφάνεια, αν και ο μηχανισμός της διασποράς προκαλεί ένα σημαντικό διαχωρισμό του πετρελαίου στην στήλη νερού σε μορφή σταγονιδίων διαφόρων μεγεθών. Πέρα όμως από την διασπορά στην κατακόρυφη κίνηση του πετρελαίου συμβάλλουν η βιοαποικοδόμηση, η καθίζηση και η διάλυση. Η επίδραση τους όμως είναι αμελητέα σε σχέση με τον μηχανισμό της τυρβώδης διάχυσης και της διασποράς.

Δεδομένου ότι το πετρέλαιο είναι ένα μίγμα διαφορετικών οργανικών ενώσεων και όχι μια καθαρή χημική ουσία, οι ιδιότητές του αλλάζουν κατά τη διάρκεια της ζωής της κηλίδας. Οι καθοριστικοί παράγοντες για την εξέλιξη των ιδιοτήτων του πετρελαίου, και συνεπώς τη «γήρανση» ή αλλιώς τον «αποχρωματισμό» (weathering) είναι οι περιβαλλοντικές, μετεωρολογικές και υδροδυναμικές συνθήκες που επικρατούν στη



δεδομένη περιοχή. Το πιο καθοριστικό για την τύχη της διαρροής πετρελαίου είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η ταχύτητα του ανέμου και το κυματικό κλίμα της περιοχής. Πέρα όμως από αυτά, σημαντική συμβολή έχει και η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του αέρα, η πυκνότητα του νερού, η αλατότητα, η κάλυψη πάγου και το φορτίο ιζήματος στο νερό (Lehr, 2001). Επιπλέον, η συμβολή κάθε διαδικασίας στον «αποχρωματισμό» ποικίλει με το χρόνο και το μέγεθος της διαρροής. Αν και κάθε διεργασία συμβαίνει ταυτόχρονα με τις υπόλοιπες, η σημασία της κάθε μιας στη διάρκεια ζωής της κηλίδας διαφέρει. Οι διεργασίες αυτές απεικονίζονται στην Εικόνα 2.9.



Εικόνα 2.9 Η σημασία των διεργασιών «γήρανσης» σε σχέση με τον χρόνο.  
(AMSA, 2017)

Οι διεργασίες της εξάπλωσης, της διασποράς, της διάλυσης και της γαλακτωματοποίησης, είναι σημαντικές στα πρώτα στάδια ζωής της πετρελαιοκηλίδας. Αντίθετα, η οξείδωση, η καθίζηση (ιζηματοποίηση) και η βιοαποικοδόμηση, είναι μακροχρόνιες διεργασίες.

### 2.3.1 Εξάπλωση (Spreading)

Η πρώτη εμφανής διεργασία που αρχίζει αμέσως με τη διαρροή του πετρελαίου στη θάλασσα, είναι η οριζόντια εξάπλωση του. Η ταχύτητα εξάπλωσης καθορίζεται ως επί το πλείστον από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες της περιοχής (ταχύτητα ανέμου, υδάτινα ρεύματα, ύψος κύματος, θερμοκρασία επιφάνειας θάλασσας), καθώς και από το πάχος της κηλίδας και τις ιδιότητες του πετρελαίου (ιξώδες).

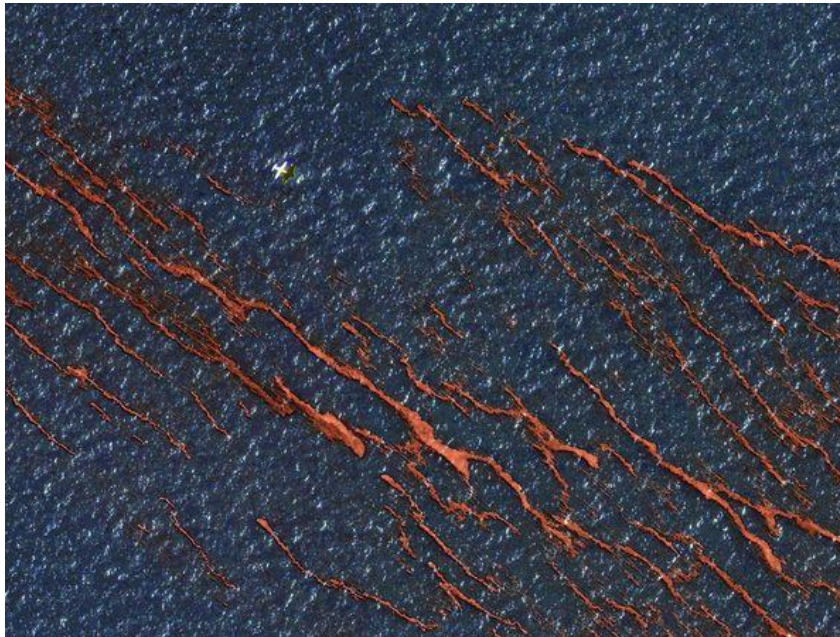
Υπολογίζεται ότι 1 τόνος περσικού αργού πετρελαίου σχηματίζει μέσα σε 10 min κηλίδα πάχους 0,1 mm και διαμέτρου 48 m. Στην αρχή το πετρέλαιο εξαπλώνεται ως μια συνεκτική κηλίδα, η οποία γρήγορα αρχίζει να σπάει σε κομμάτια. (Κοτρίκλα Ά. Μ., 2015)





**Εικόνα 2.10** Διαρροή πετρελαίου στη θάλασσα .  
([https://en.wikipedia.org/wiki/Ixtoc\\_1\\_oil\\_spill](https://en.wikipedia.org/wiki/Ixtoc_1_oil_spill), 2019)

Στην ανοιχτή θάλασσα ο αέρας δημιουργεί στενές ζώνες παράλληλες με την κατεύθυνση του ανέμου όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.11. Επίσης, καθώς το πετρέλαιο εξαπλώνεται και το πάχος της πετρελαιοκηλίδας μειώνεται, αλλάζει και το χρώμα της: από μαύρο ή σκούρο καφέ γίνεται ιριδίζον και ασημί. (Κοτρίκλα Ά. Μ., 2015)



**Εικόνα 2.11** Σχηματισμός λεπτών λωρίδων παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου.  
(<https://www.popsci.com/environment/article/2010-04/oil-slick-seen-space/>, 2010)

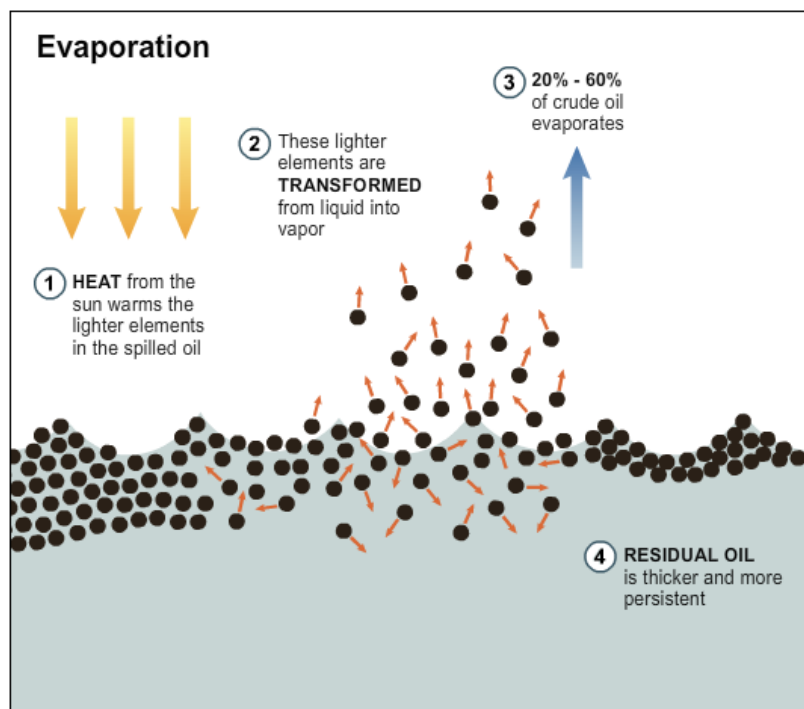
### 2.3.2 Εξάτμιση (Evaporation)

Με τον όρο εξάτμιση, εννοούμε τη διαδικασία μεταφοράς μέρους της μάζας του πετρελαίου από την κηλίδα στην ατμόσφαιρα. Η διαδικασία της εξάτμισης ξεκινά λίγες ώρες μετά την εισροή του πετρελαίου στη θάλασσα. Οι ρυθμοί εξάτμισης εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, την ταχύτητα του ανέμου, την ηλιακή ακτινοβολία, το πάχος της κηλίδας και τη φύση του πετρελαίου. Έτσι, οι υψηλές θερμοκρασίες και ο

δυνατός άνεμος ευνοούν την εξάτμιση. Επίσης, όσο μικρότερο είναι το πάχος της πετρελαιοκηλίδας τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο λόγος επιφάνειας προς όγκο και τόσο μεγαλύτερη η εξάτμιση, καθώς είναι επιφανειακό φαινόμενο (Clark R. B., Frid Ch & Attrill M, 2003).

Η εξάπλωση της κηλίδας ενισχύει την διαδικασία της εξάτμισης, καθώς το πάχος αυτής μειώνεται ενώ αντίθετα η επιφάνειά της αυξάνεται. Η εξάτμιση, η οποία διαρκεί περίπου μία εβδομάδα, προκαλεί αύξηση της πυκνότητας και του ιξώδους της κηλίδας. Στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η διαδικασία της γαλακτωματοποίησης και της πήξης, που ελαττώνουν την επιφάνεια (εμβαδόν) της πετρελαιοκηλίδας, καθώς και το ρυθμό εξάτμισης αυτής.

Εκτιμάται ότι ανάλογα με τη σύσταση του πετρελαίου και τις μετεωρολογικές συνθήκες ποσοστό ίσο με το 20-50% του όγκου του αργού πετρελαίου απομακρύνεται λόγω εξάτμισης. Πετρελαιοκηλίδες προϊόντων πετρελαίου όπως η κηροζίνη και η βενζίνη μπορεί να εξατμιστούν τελείως μέσα σε λίγες ώρες (ITOPF, 2011). Όμως, όταν τόσο πηκτικά πετρέλαια διαρρεύσουν σε περιορισμένες περιοχές υπάρχει κίνδυνος φωτιάς και έκρηξης.



Εικόνα 2.12 Εξάτμιση της πετρελαιοκηλίδας

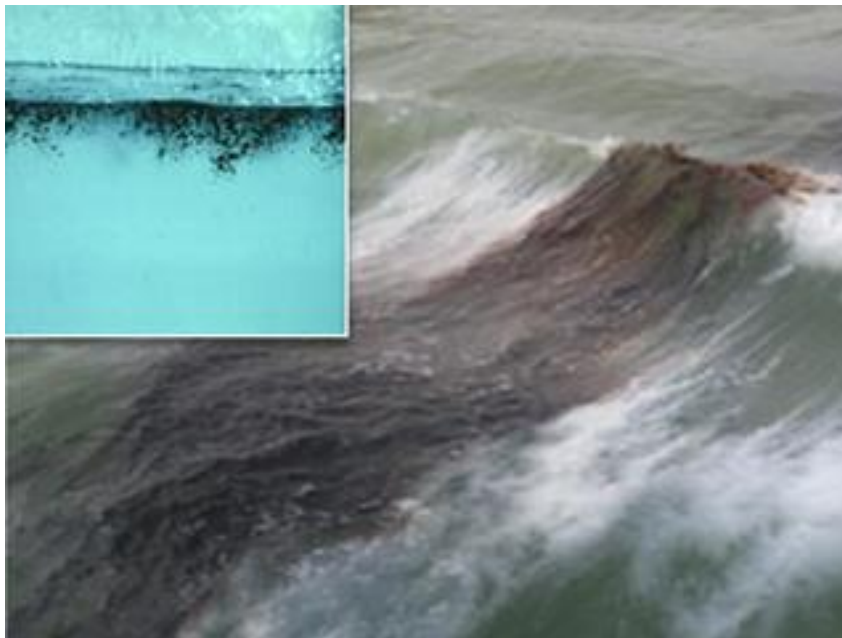
(<http://www.fastcompany.com/1659822/infographic-day-physics-oil-spills>, 2010)

### 2.3.3 Διασπορά (Dispersion)

Η πετρελαιοκηλίδα διασπάται σε «τεμάχια» και σταγονίδια διαφόρων μεγεθών λόγω της αναταραχής που προκαλείται από την ενέργεια του ανέμου και των κυμάτων. Τα σταγονίδια αυτά στη συνέχεια αναμιγνύονται με νερό. Τα μικρότερα τείνουν να αναμιγνύονται με θαλασσινό νερό, ενώ τα μεγαλύτερα τείνουν να επιστρέφουν στην επιφάνεια της θάλασσας και πιθανώς να ενωθούν με άλλα σταγονίδια για να ανασχηματίσουν μια κηλίδα.

Η διασπορά δεν εξαφανίζει το πετρέλαιο από τη θάλασσα (όπως γίνεται με την εξάτμιση), αλλά το μεταφέρει από την επιφάνεια της θάλασσας σε όλη τη στήλη του νερού, όπου μπορεί να προσροφηθεί σε αιωρούμενα σωματίδια ή να εναποτεθεί στο ίζημα. (Κοτρίκλα Α. Μ., 2015).

Η διασπορά εξαρτάται κυρίως από τη φύση του πετρελαίου και την κατάσταση της θάλασσας και ευνοείται από το σχετικά μικρό ιξώδες του πετρελαίου και από τη θραύση κυμάτων. Υπό κατάλληλες συνθήκες, μια πετρελαιοκηλίδα μπορεί να διασπαρεί τελείως μέσα σε λίγες μέρες. Η τάση αυτή του πετρελαίου ενισχύεται από χημικές ουσίες που ονομάζονται διασκορπιστικά (βλ. ενότητα 2.5.3). Αντιστρόφως, ιξώδη πετρέλαια τείνουν να σχηματίζουν κομμάτια μεγάλου πάχους στην επιφάνεια και δεν διασπείρονται ακόμα και με τη δράση διασκορπιστικών (ITOPF, 2011).



**Εικόνα 2.13** Διασκόρπιση πετρελαίου σε σταγονίδια λόγω της επίδρασης των κυματισμών.  
(ITOPF, 2011)

### 2.3.4 Διάλυση (Dissolution)

Η διάλυση είναι ενεργή κυρίως μετά τη διαρροή και επηρεάζει μερικά από τα κλάσματα υδρογονάνθρακα όπως η εξάτμιση. Η σύνθεση του πετρελαίου και η περιοχή διεπιφάνειας επηρεάζουν σημαντικά τη διαδικασία διάλυσης. Η διαλυτότητα των συστατικών του πετρελαίου στο νερό είναι πολύ μικρή και μειώνεται απότομα με την αύξηση του μοριακού τους βάρους. Σύμφωνα με τον (Novelli, 2011) είναι μια διαδικασία σχετικά ασήμαντη στον προσδιορισμό της ισορροπίας της μάζας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μόνο λίγα συστατικά του αργού πετρελαίου είναι διαλυτά στο νερό σε έναν αξιόλογο βαθμό. Γενικά, η διάλυση του πετρελαίου στο νερό είναι μικρή και αφορά μόνο τα ελαφρά συστατικά. Τα βαριά συστατικά είναι πρακτικά αδιάλυτα, ενώ οι αρωματικού υδρογονάνθρακες (βενζόλιο, τολουόλιο) είναι ελάχιστα διαλυτοί. Ωστόσο, η διάλυση είναι πολύ σημαντική από την άποψη του δυνητικού βιολογικού παράγοντα δεδομένου ότι τα αραιωμένα συστατικά μπορούν να έχουν τοξικές επιπτώσεις στους θαλάσσιους οργανισμούς.

### 2.3.5 Γαλακτωματοποίηση (Emulsification)

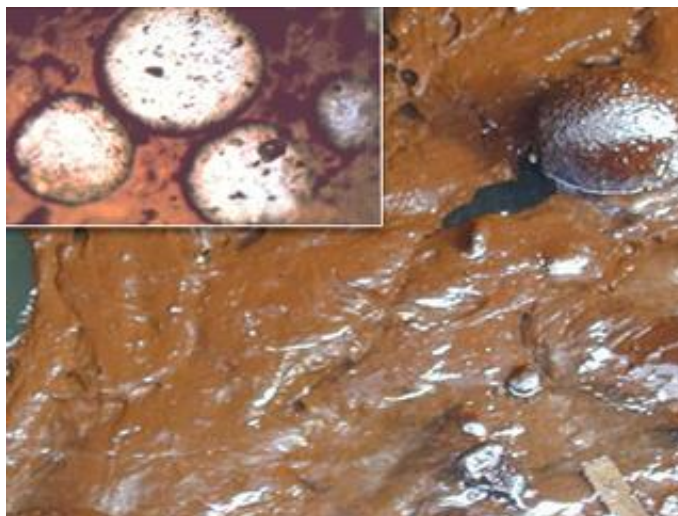
Το πετρέλαιο που διαρρέει στη επιφάνεια της θάλασσας μπορεί υπό ορισμένες συνθήκες – έντονος κυματισμός, μεγάλη ταχύτητα ανέμου – να διασπαστεί σε σταγονίδια που παρασύρονται από τον άνεμο, χωρίς να προσβάλλεται η χημική τους σύσταση. Η διαδικασία είναι γνωστή ως γαλακτωματοποίηση του πετρελαίου στο νερό (oil-in-water emulsion). Στις περιπτώσεις της γαλακτωματοποίησης του πετρελαίου στο νερό, η πετρελαιοκηλίδα μπορεί να αναδομηθεί σε απόσταση από την πηγή της ρύπανσης, δεδομένου ότι τα σταγονίδια του πετρελαίου δεν χάνουν τους μοριακούς τους δεσμούς και εξακολουθούν να



παραμένουν ενεργά στην επιφάνεια της θάλασσας. Τα γαλακτώματα πετρελαίου στο νερό, μπορούν να αυξήσουν τον όγκο του πετρελαίου έως και πέντε φορές. (Κοτρίκλα Α. , 2015)

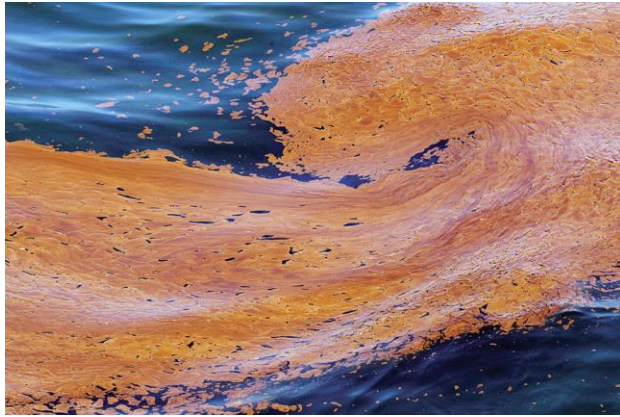
Η ταχύτητα γαλακτωματοποίησης εξαρτάται από την κατάσταση θάλασσας στην οποία βρίσκεται το πετρέλαιο. Αν η θάλασσα είναι ταραγμένη, ευνοείται το φαινόμενο και έχουμε ταχύτερη διεργασία γαλακτωματοποίησης από ότι σε ήρεμη θάλασσα, στην οποία το φαινόμενο εξελίσσεται πιο αργά. Η διαδικασία της απορρόφησης του νερού, ολοκληρώνεται σε μερικές ώρες. Η παραπάνω διεργασία δυσχεραίνει το φαινόμενο της εξάτμισης και την τυχόν διαδικασία καθαρισμού. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.14, τα γαλακτώματα νερού στο πετρέλαιο έχουν χρώμα καφέ/κόκκινο, πορτοκαλί ή κιτρινωπό και είναι γνωστά ως «chocolate mousse». (Κοτρίκλα Α. , 2015)

Η γαλακτωματοποίηση πέρα από τις συνθήκες του ανέμου και των κυμάτων, επηρεάζεται και από τη θερμοκρασία και τα χαρακτηριστικά της διαρροής. Οι τύποι των πετρελαίων με περιεκτικότητα σε ασφαλτένιο μεγαλύτερο από 0,5% τείνουν να σχηματίζουν σταθερά γαλακτώματα που μπορεί να παραμείνουν για πολλούς μήνες μετά την αρχική διαρροή. Ενώ οι τύποι πετρελαίου που περιέχουν χαμηλότερο ποσοστό ασφαλτενίων είναι λιγότερο πιθανό να σχηματίσουν γαλακτώματα και είναι πιο πιθανό να διασκορπιστούν. Τα γαλακτώματα μπορούν να διαχωριστούν σε πετρέλαιο και νερό και πάλι εάν θερμανθούν από το ηλιακό φως σε ήρεμες συνθήκες ή όταν θραυτούν στις ακτές (ITOPF, 2011)



**Εικόνα 2.14** Σωματίδια γαλακτωματοποίησης  
(ITOPF, 2011)

Το πετρέλαιο μπορεί να πάρει μέχρι και το 80% του νερού, αλλάζοντας δραστικά την πυκνότητα του και να αυξάνοντας τον όγκο του έως και πέντε φορές συγκριτικά με τον αρχικό όγκο. Επίσης αυξάνεται δραστικά το ιξώδες (Xie, H. , Yara, P.D., and Nakata, K. , 2007). Το σχηματισμένο γαλακτώμα είναι συνήθως πολύ παχύρρευστο και πιο ανθεκτικό από το αρχικό πετρέλαιο. Ο σχηματισμός των γαλακτωμάτων μπορεί να μεγαλώσει μέχρι και στο δεκαπλάσιο τον όγκο του ρύπου, επιβραδύνει τις υπόλοιπες διαδικασίες της γήρανσης και τον μετασηματίζει σε μορφή που μοιάζει να είναι περισσότερο στερεή παρά υγρή. Πρόκειται λοιπόν για την πλέον μη επιθυμητή εξέλιξη ρύπανσης από πετρελαιοειδή στη θάλασσα και αυτήν που δυσχεραίνει περισσότερο το έργο των μηχανισμών αντιμετώπισης.



**Εικόνα 2.15** Γαλακτωματοποίηση

(<https://www.csmonitor.com/USA/2010/0510/Gulf-oil-spill-s-environmental-impact-How-long-to-recover, 2019>)

### 2.3.6 Φωτοχημική οξείδωση (Photo-oxidation)

Η χημική αντίδραση του οξυγόνου με τους υδρογονάνθρακες πετρελαίου ονομάζεται οξείδωση. Αυτή συμβαίνει στην επιφάνεια της θάλασσας και επιταχύνεται μετά την εξάπλωση του πετρελαίου και την δημιουργία λεπτών στρωμάτων (films) κηλίδων. Όταν έχουμε ταυτόχρονη παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας, τότε γίνεται λόγος για το φαινόμενο της φωτοχημικής οξείδωσης (φωτοξείδωση). Αυτή εξαρτάται από το πάχος του υμενίου. Σε ιδανικές συνθήκες θάλασσας και υπό την επίδραση ισχυρού ηλιακού φωτός, θεωρείται ότι ο ρυθμός της διάσπασης των λεπτών φιλμ (φωτοξείδωση) μπορεί να ανέλθει στο 0,1% ανά ημέρα (ITOPF, 2011).

Η φωτοχημική οξείδωση παχίων στρωμάτων μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ενώσεων μεγάλου μοριακού βάρους με μεγάλους χρόνους ζωής. Έτσι σχηματίζονται κομμάτια πίσσας (tar bars), μαύρου χρώματος, που έχουν σκληρό εξωτερικό περίβλημα, εικόνα που είναι αρκετά συνήθης σε παραλίες και ακτές της χώρας μας.



**Εικόνα 2.16** Πίσσα (tar bar) στην ακτή

(ITOPF, 2011)

Η φωτοχημική οξείδωση των υδρογονανθράκων πετρελαίου εξαρτάται από τη χημική τους σύσταση, τη θερμοκρασία και το ηλιακό φως. Οι θειούχες ενώσεις εμποδίζουν την οξείδωση, ενώ μερικά μέταλλα δρουν ως καταλύτες. Τα προϊόντα της οξείδωσης είναι συχνά περισσότερο ευδιάλυτα στο νερό από ότι οι αρχικές ενώσεις και διασκορπίζονται στην υδάτινη φάση.

Η φωτοχημική οξείδωση δεν είναι σημαντική κατά τις πρώτες ημέρες της διαρροής, αλλά μπορεί να γίνει αισθητή αργότερα (μετά από μια εβδομάδα ή περισσότερο). Επίσης, η διαδικασία αυτή δεν επηρεάζει την ισορροπία της μάζας. Ωστόσο, τα προϊόντα της μπορεί να είναι πιο τοξικά από αυτά του μητρικού υλικού. (Lacaze, J.C., and Villedon de Naide, O., 1976).

### 2.3.7 Καθίζηση (Sedimentation)

Οι διαδικασίες της γήρανσης που αυξάνουν την πυκνότητα του πετρελαίου μπορεί να οδηγήσουν ορισμένα βαριά κλάσματα σε βύθιση. Συχνά η αιτία της βύθισης είναι η προσκόλληση ιζημάτων και άλλων οργανικών ουσιών ή και άμμου σε ρηχές θάλασσες με αμμώδη βυθό. Αλλαγές της θερμοκρασίας μπορούν να προκαλέσουν παροδική βύθιση και στη συνέχεια ανάδυση του πετρελαίου. Τα επιπλέοντα πισσώδη σφαιρίδια, πολλές φορές αποτελούν θρεπτικό υπόστρωμα για ορισμένους θαλάσσιους οργανισμούς, όπως για τα θυσανόποδα για παράδειγμα. Τα ασβεστούχα τμήματα των οργανισμών εκείνων, μπορούν να αυξήσουν το ειδικό βάρος αυτών των σφαιριδίων τόσο, με συνέπεια να γίνει μεγαλύτερο από το ειδικό βάρος του νερού και να έχουμε σαν αποτέλεσμα την καταβύθιση αυτών των σφαιριδίων και την εναπόθεσή τους στα ιζήματα. Αυτή η διαδικασία ενισχύεται καθώς η πυκνότητα του νερού μειώνεται από την εισροή γλυκού νερού (ITOPF, 1987), (Neff, J.M., 1990).

Αξίζει τέλος να αναφερθεί, ότι ιζήματα ωκεανών εμπεριέχουν 1mg/kg ή 50mg/m υδρογονάνθρακες πετρελαίου, ποσότητα η οποία είναι συγκρίσιμη με αυτές που υπάρχουν στην υδάτινη μάζα ή επιπλέουν στην επιφάνεια σαν πισσώδη σφαιρίδια.



**Εικόνα 2.17** Ιζήματα πετρελαίου στον πυθμένα της θάλασσας.

(<http://blog.nus.edu.sg/lucastange3246/2015/03/05/analysis-bp-oil-spill-missing-oil/>)

### 2.3.8 Βιοδιάσπαση (Biodegradation)

Το αργό πετρέλαιο προέρχεται από υπολείμματα πλαγκτόν και άλλων οργανισμών, έχει δηλαδή φυσική προέλευση. Επίσης υπάρχουν περιοχές στον πλανήτη που εκρέει φυσικά σε υποθαλάσσια κοιτάσματα. Γι' αυτό υπάρχουν θαλάσσιοι μικροοργανισμοί που έχουν αναπτύξει την ικανότητα να το διασπούν. Οι οργανισμοί αυτοί βρίσκονται παντού στις θάλασσες, αλλά είναι τυπικά περισσότεροι σε περιοχές με φυσικές εκροές πετρελαίου και σε χρόνια ρυπασμένες, κυρίως παράκτιες περιοχές που δέχονται ανεπεξέργαστα αστικά και βιομηχανικά απόβλητα (ITOPF, 2011).

Στον ρυθμό και στην έκταση της βιοδιάσπασης επιδρούν τα χαρακτηριστικά του πετρελαίου, η διαθεσιμότητα οξυγόνου και θρεπτικών συστατικών και η θερμοκρασία. Όλα τα συστατικά του αργού πετρελαίου διασπώνται από βακτήρια και μύκητες με διαφορετικούς ρυθμούς, ανάλογα με τη χημική τους δομή. Κάθε τύπος μικροοργανισμού τείνει να διασπά συγκεκριμένες κατηγορίες υδρογονανθράκων και έτσι απαιτείται μεγάλο εύρος οργανισμών να δράσουν ταυτόχρονα ή διαδοχικά για να προχωρήσει η βιοδιάσπαση (ITOPF, 2011)

Η βιοδιάσπαση συμβαίνει στη διεπιφάνεια πετρελαίου - νερού. Η φυσική ή η υποβοηθούμενη με χημικά διασπορά του πετρελαίου σε όλη τη στήλη του νερού οδηγεί σε αύξηση της διαθέσιμης διεπιφάνειας πετρελαίου - νερού, ενισχύοντας τη βιοδιάσπαση. Αντίθετα, πετρέλαιο που επιπλέει στην επιφάνεια (ως πετρελαιοκηλίδα ή γαλάκτωμα νερού σε πετρέλαιο) έχει μικρότερη διεπαφή με το νερό και άρα διασπάται αργά. Ομοίως, πετρέλαιο που εκβράζεται στις ακτές σε παχιά στρώματα μπορεί να παραμείνει ανέπαφο για χρόνια. Τέλος, στα βαθιά νερά και τα ιζήματα οι ταχύτητες βιολογικής οξειδωσης είναι μικρές, λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών και της έλλειψης οξυγόνου. (Κοτρίκλα Α. Μ., 2015)

Εκτιμάται ότι για την διάσπαση 1mg υδρογονάνθρακα, απαιτούνται εκτός από οξυγόνο, 0.1 mg αζώτου και 0.015 mg φωσφόρου – στην Μεσόγειο οι περιεκτικότητες των στοιχείων αυτών είναι περίπου, 500 mg/m<sup>3</sup> και 70 mg/ m<sup>3</sup> αντίστοιχα – γεγονός που αποδεικνύει ότι οι ποσότητες που βιοδιασπώνται τελικά είναι πολύ μικρές. Υπό ιδανικές καιρικές συνθήκες στην λεκάνη της Μεσογείου, έχει εκτιμηθεί ότι ο ρυθμός της βιοδιασπώμενης ποσότητας πετρελαιοειδών δεν μπορεί να ξεπεράσει το ένα γραμμάριο ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας ρυπογόνου. (Κόρρος, 2008)

Η βιοδιάσπαση είναι μια αργή διαδικασία με περιορισμούς. Παρ' όλα αυτά μακροπρόθεσμα είναι ο βασικός μηχανισμός φυσικής απομάκρυνσης του παραμένου πετρελαίου από τις ακτές και τη θάλασσα (ITOPF, 2011).

## **2.4 Επιπτώσεις των πετρελαιοκηλίδων**

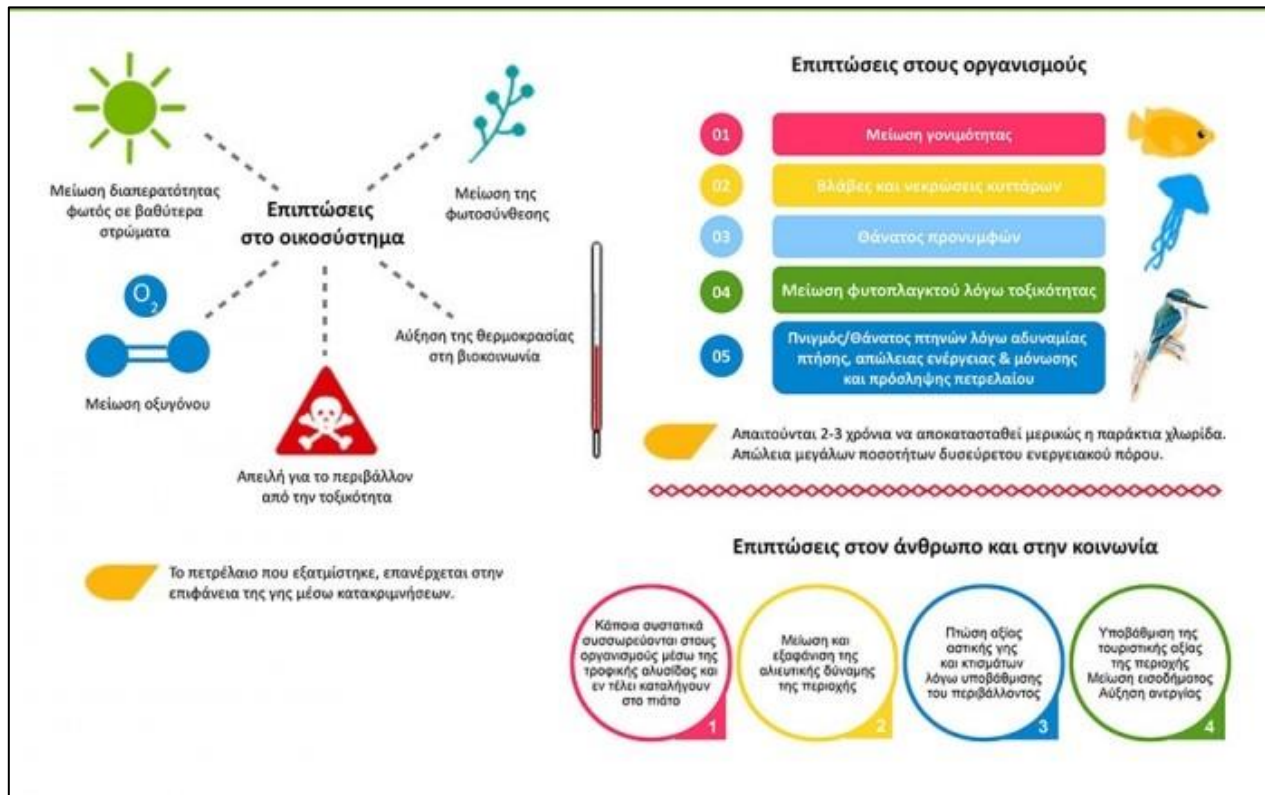
Η φύση και η διάρκεια των συνεπειών που μπορούν να προκληθούν από μία πετρελαιοκηλίδα εξαρτώνται από έναν ικανό αριθμό παραγόντων. Σε αυτούς περιλαμβάνονται το είδος του πετρελαιοειδούς, το μέγεθος, η διάρκεια και η ταχύτητα εκροής της κηλίδας, η τοποθεσία που συνέβη και αν πλήττει ακτογραμμές και κατοικημένες περιοχές, οι καιρικές συνθήκες και η εποχή του ατυχήματος. Εδώ θα εξεταστούν οι επιπτώσεις της πετρελαιοκηλίδας στο οικοσύστημα καθώς και στις ανθρώπινες δραστηριότητες.

### **2.4.1 Επιπτώσεις στο Οικοσύστημα**

Το πετρέλαιο αποτελεί ένα μίγμα από οργανικές ενώσεις, πολλές από τις οποίες είναι τοξικές για τους θαλάσσιους οργανισμούς. Γενικά διακρίνονται τρεις κατηγορίες:

1. Ενώσεις μικρού μοριακού βάρους οι οποίες είναι πτητικές (εξατμίζονται γρήγορα) και για αυτό το λόγο έχουν σχετικά μικρές επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον.
2. Ενώσεις μεσαίου μοριακού βάρους που παραμένουν για μεγαλύτερο διάστημα στο θαλάσσιο περιβάλλον και είναι οι κυρίως υπεύθυνες για την τοξικότητα του πετρελαίου.
3. Μεγάλου μοριακού βάρους (πίσσες), που είναι αδρανείς από χημική άποψη αλλά προκαλούν μηχανικής φύσης παρενέργειες στο οικοσύστημα.





**Εικόνα 2.18** Επιπτώσεις πετρελαιοκηλίδας

(<https://www.emprosnet.gr/perivallon/perivallontiki-katastrofi-apo-tin-petrelaiokilida-epiptoseis-xronos-anakampsis-kai-protaseis-gia-tin-epomeni-imeria>)

Η τοξικότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη διαλυτότητα στο νερό. Πολλές φορές αυξάνει αντιστρόφως ανάλογα προς το χρόνο έκθεσης στο φως, λόγω του σχηματισμού οξέων.

### α) Θαλάσσια φυτά – Πλαγκτόν- Ψάρια

Η διαρροή πετρελαίου στη θάλασσα οδηγεί στην καταστροφή φυκιών και υποθαλάσσιων φυτών. Το πετρέλαιο είναι ελαφρύτερο από το νερό με αποτέλεσμα να επιπλέει στην επιφάνειά του. Καθώς λοιπόν το στρώμα των πετρελαιοειδών έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια της θάλασσας παρεμποδίζει την είσοδο του αέρα και μειώνει τη διαπερατότητα του φωτός, με αποτέλεσμα να μειώνεται η φωτοσυνθετική ικανότητα των υποθαλάσσιων φυτών, αφού μειώνεται στο ελάχιστο η ανανέωση του νερού με το οξυγόνο του αέρα. (Χρηστάκης, 2014)

Από το πετρέλαιο που βυθίζεται, λόγω μεγαλύτερου ειδικού βάρους, καταστρέφονται τα φύκια που δίνουν τροφή και κάλυψη σε πολλούς οργανισμούς. Στο Αιγαίο βρίσκονται μεγάλες προστατευόμενες εκτάσεις από θαλάσσια λιβάδια Ποσειδωνίας, από τα οποία προέρχεται η μεγαλύτερη ποσότητα παραγωγής οξυγόνου στη θάλασσα, απαραίτητη για τη διατήρηση της υποθαλάσσιας ζωής, ενώ δεσμεύουν και διοξείδιο του άνθρακα. Τα λιβάδια Ποσειδωνίας συμβάλλουν στην προστασία κατά της διάβρωσης των ακτών, βοηθούν σημαντικά στη βιοποικιλότητα της παράκτιας ζώνης και βελτιώνουν την ποιότητα του νερού, αυξάνουν την παραγωγή εμπορεύσιμων ειδών και φιλοξενούν εποχικά ψάρια για τροφή και αναπαραγωγή (Καλογήρου Στ., 2010).





**Εικόνα 2.19** Επιπτώσεις πετρελαίου στα ψάρια  
(<http://archipelago.gr/atichimata-ke-ripansi/>)

### **β) Θαλάσσια πτηνά**

Τα θαλάσσια πουλιά είναι οι πιο ευαίσθητοι οργανισμοί στην πετρελαϊκή ρύπανση. Ιδιαίτερα τα είδη που έχουν επαφή με το νερό για τροφή ή κινούνται στο επίπεδο της επιφάνειας της θάλασσας βρίσκονται σε σοβαρό κίνδυνο. Αν και η απλή κατάποση πετρελαίου μπορεί να είναι θανατηφόρα για τα πουλιά, οι συνήθεις αιτίες θανάτου είναι από πνιγμό, από έλλειψη τροφής και από τις θερμικές μεταβολές του σώματος. (Κλωνάρης, 2009).



**Εικόνα 2.20** Επιπτώσεις πετρελαιοκηλίδας στα πτηνά  
(<https://www.eleftherostypos.gr/istories/127726-oi-megalyteres-petrelaiokilides-ston-kosmo-pos-kai-poy-dimioygrithikan/>)

### **γ) Θαλάσσια θηλαστικά**

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

γούνα τους καλυφθεί με πετρέλαιο μπορούν, ανάλογα με την εποχή, να πεθάνουν από υποθερμία ή υπερθέρμανση.

#### **δ) Παράκτια ζώνη**

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

#### **ε) Αμμώδεις ακτές**

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



**Εικόνα 2.21** Αμμώδης ακτή μετά από τη ρύπανση του Σαρωνικού

(<https://www.kathimerini.gr/971130/article/epikairothta/ellada/petrelaiokhlida-sarwnikoy-ti-symvainei-sxedon-ena-xrono-meta>)

#### **ζ) Βραχώδεις ακτές**

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

#### **2.4.2 Επιπτώσεις στις ανθρώπινες δραστηριότητες**

Οι κύριες ανθρωπογενείς δραστηριότητες που επηρεάζουν το παράκτιο θαλάσσιο οικοσύστημα του Σαρωνικού μπορούν να ομαδοποιηθούν ως εξής: αστικοποίηση, βιομηχανία (διυλιστήρια, χαλυβουργία, βυρσοδεψία), αλιεία, υδατοκαλλιέργειες, τουρισμός, ναυτιλία. Συγκεκριμένα, οι διεθνείς και εθνικές ναυτιλιακές δραστηριότητες που διεξάγονται στην ευρύτερη περιοχή του Πειραιά, ένα από τα μεγαλύτερα λιμάνια της Ευρώπης και του κόσμου, δημιουργούν εστίες ρύπανσης μέσω ναυαγίων όπως το εν λόγω, παρατημένα πλοία και εκροές από μηχανοστάσια.

##### **α) Τουρισμός - Ψυχαγωγία**

Οι επιπτώσεις της ρύπανσης είναι σημαντικές στον τουρισμό. Οι περιοχές οι οποίες πλήττονται, λόγω της γεωγραφικής τους θέσης, είναι σύνηθες να παρουσιάζουν τουριστική ανάπτυξη. Ιδιαίτερα στην Ελλάδα, όπου η πλειοψηφία των νησιών και των ακτών του Αιγαίου αποτελούν περιοχές ιδιαίτερου φυσικού κάλλους, η οικονομία τους σε τοπικό, αλλά και εθνικό, επίπεδο βασίζεται στην ευημερία του τουριστικού τομέα. Η δημιουργία μιας πετρελαιοκηλίδας θα είχε ως συνέπεια να υποβαθμιστεί η φυσική ομορφιά των περιοχών και να μειωθεί κατακόρυφα η τουριστική κίνηση. Τα αποτελέσματα θα είναι ορατά στο χώρο των ξενοδοχείων, των καταστημάτων και της εστίασης. Εκτός όμως από τις επιπτώσεις στον τουρισμό, δεν μπορεί να παραβλεφθεί και η ακύρωση οποιασδήποτε ανθρώπινης ψυχαγωγικής δραστηριότητας σε μία ρυπασμένη περιοχή. Η ρύπανση, μπορεί να προκαλέσει σειρά επιπτώσεων που συνδέονται με την περιβαλλοντική ευαισθησία των κατοίκων της πληγείσας περιοχής και τη σοβαρότητα με την οποία αντιμετωπίζουν τη μη χρηστική διάσταση του περιβάλλοντος.

##### **β) Αλιεία και ιχθυοκαλλιέργειες**

Οι συνέπειες από τη διαρροή πετρελαίου είναι ιδιαίτερα σημαντικές και στην αλιεία και τις ιχθυοκαλλιέργειες. Η αλιεία θα μειωθεί σημαντικά και πιθανόν να διακοπούν όλες οι δραστηριότητες λόγω της παρουσίας του πετρελαίου ή των ενεργειών καθαρισμού του. Ακόμα και μικρές συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων δημιουργούν μία δυσάρεστη γεύση στα ψάρια και σε άλλα αλιεύματα και τα καθιστούν ακατάλληλα για εμπόριο. Όσον αφορά τις ιχθυοκαλλιέργειες, είναι ιδιαίτερα ευάλωτες στη διαρροή πετρελαίου, καθώς πολλές φορές τα ψάρια δεν έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν τους φυσικούς μηχανισμούς αποφυγής τους και η παρουσία του εξοπλισμού της καλλιέργειας παρέχει τη δυνατότητα παρατεταμένης εισόδου στα συστατικά του πετρελαίου. (Χρηστάκης, 2014)

Στην περιοχή του Σαρωνικού είναι νηολογημένα 1034 επαγγελματικά αλιευτικά σκάφη μέσης και παράκτιας αλιείας (897 στην ευρύτερη περιοχή που επηρεάστηκε από την πετρελαιοκηλίδα) αν και δεν είναι απαραίτητο ότι αυτά τα σκάφη ψάρευαν εντός του Σαρωνικού κόλπου. Γενικώς όσον αφορά στην ποσότητα αλιευμάτων κατά περιοχή αλιείας, ο Σαρωνικός μαζί με τον Αργολικό κόλπο (όπως δηλαδή εμφανίζονται τα στοιχεία από την ΕΛ.ΣΤΑΤ) είναι η 4η περιοχή αλιείας στην Ελλάδα από τις 16 (ΕΛΣΤΑΤ, 2017). Επιπλέον στη Σαλαμίνα υπάρχουν μονάδες υδατοκαλλιέργειας και γενικά η Αττική έχει το 8% των μονάδων ιχθυοκαλλιέργειας της Ελλάδας (WWF Ελλάς, 2017).

##### **γ) Βιοτικό επίπεδο**

Με τη διαρροή του πετρελαίου οι κάτοικοι της περιοχής έχουν και απώλειες ευζωίας, αφού χάνουν πολλές από τις δυνατότητες που είχαν, όπως την κολύμβηση, τις καταδύσεις και το ιδιωτικό ψάρεμα. Σημαντικότερος είναι ο κίνδυνος για τη δημόσια υγεία, λόγω της εισπνοής και της επαφής με τα συστατικά του πετρελαίου, καθώς και από την κατανάλωση ψαριών που έχουν μολυνθεί. Οικονομικές επιπτώσεις υπάρχουν από την πτώση της αξίας των οικοπέδων και των κτισμάτων στην περιοχή, αλλά και από τη μείωση του ενδιαφέροντος ανοικοδόμησης νέων κτιρίων και αποτελούν τροχοπέδη για την ανάπτυξη της

περιοχής. Επιπλέον, πολλές βιομηχανίες και εργοστάσια χρειάζονται καθαρό νερό για τη λειτουργία και τον καθαρισμό τους και υπάρχει σημαντικό ρίσκο εφόσον εισχωρήσει πετρέλαιο στα συστήματά τους.

## 2.5 Μέθοδοι αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων

Η καλύτερη στρατηγική για την αντιμετώπιση της ρύπανσης είναι αυτή της πρόληψης. Εάν όμως το ατύχημα της πετρελαιοκηλίδας τελικά συμβεί, πρέπει να εφαρμοστούν μέθοδοι που θα περιορίσουν τη ρύπανση και θα εμποδίσουν όσο το δυνατόν τις ζημιές στο φυσικό και ανθρώπινο περιβάλλον. Η δυνατότητα αυτοκαθαρισμού της θάλασσας έχει σταματήσει να αποτελεί λύση, διότι η διαδικασία αυτή είναι αργή και περιορισμένη. Κύριος στόχος, λοιπόν, σε περίπτωση πετρελαιοκηλίδας, είναι αυτή να αντιμετωπιστεί στην πηγή της και να εμποδιστεί η περαιτέρω διαρροή, ενώ το σημαντικότερο είναι να μην φτάσει να πλήξει τις ακτές. Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά οι κλασικοί μέθοδοι που υπάρχουν για την αντιμετώπιση της πετρελαϊκής ρύπανσης στη θάλασσα και στις ακτές (Τριανταφύλλου Γ, 2004).

### 2.5.1 Εντοπισμός πετρελαιοκηλίδων μέσω δορυφόρου

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο για την αντιμετώπιση μιας πετρελαϊκής ρύπανσης είναι ο έγκαιρος εντοπισμός της πετρελαιοκηλίδας. Όσο πιο γρήγορα εντοπιστεί η διαρροή του πετρελαίου, τόσο πιο αποτελεσματική θα είναι η αντιμετώπιση του. Επίσης μπορεί πιο εύκολα να βρεθεί η πηγή της ρύπανσης και να επιβληθούν κυρώσεις. Οι δορυφόροι που είναι εξοπλισμένοι με Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (ΡΣΑ) (Synthetic Aperture Radar – SAR) αποτελούν ιδανικά εργαλεία για τη συμπλήρωση των συμβατικών αεροπορικών μέσων εντοπισμού πετρελαιοκηλίδων, λόγω της ικανότητάς τους να ανιχνεύουν πετρελαιοκηλίδες στην επιφάνεια της θάλασσας αλλά και να επιθεωρούν μεγάλες θαλάσσιες περιοχές ανεξάρτητα από το φως του ήλιου και τη νεφοκάλυψη (Τοπουζέλης, Κ., Καραθανάση, Β., Παυλάκης, Π., Ρόκος, Δ., 2005).

Το CleanSeaNet είναι ένα ευρωπαϊκό πρόγραμμα εντοπισμού πετρελαιοκηλίδων και πλοίων που σχετίζονται με ρυπάνσεις μέσω δορυφόρου (EMSA). Οι υπηρεσίες που προσφέρονται στα ευρωπαϊκά κράτη μέσω του CleanSeaNet είναι οι εξής:

- Εντοπισμός/ανίχνευση ρύπανσης από πετρέλαιο στην επιφάνεια της θάλασσας.
- Παρακολούθηση της ατυχηματικής ρύπανσης σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.
- Εντοπισμός των πλοίων που σχετίζονται με τη ρύπανση.

Η υπηρεσία CleanSeaNet βασίζεται σε δορυφορικές εικόνες ραντάρ που καλύπτουν όλες τις θαλάσσιες περιοχές της Ευρώπης, οι οποίες αναλύονται με σκοπό τον εντοπισμό πιθανών πετρελαιοκηλίδων στην επιφάνεια της θάλασσας. Όταν μια πιθανή πετρελαιοκηλίδα ανιχνευτεί σε εθνικά ύδατα, αποστέλλεται ένα προειδοποιητικό μήνυμα στην αντίστοιχη χώρα, εντός 30 λεπτών από τη λήψη των δεδομένων του δορυφόρου. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να συσχετιστούν με τα δεδομένα της κυκλοφορίας των πλοίων (SafeSeaNet) και να εντοπιστεί το πλοίο που προκάλεσε τη ρύπανση. (Κοτρίκλα Ά. Μ., 2015)

### 2.5.2 Μηχανικός καθαρισμός

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



## **α) Φράγματα (Barriers/Booms)**

Είναι συσκευές (πλωτά φράγματα) που έχουν ειδικά κατασκευαστεί για τον έλεγχο της κίνησης του πετρελαίου στην επιφάνεια της θάλασσας. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εγκλωβισμό, τη συγκέντρωση και την κατεύθυνση κηλίδων πετρελαίου. (ITOPF, Containment & Recovery, 2019)

Τα φράγματα διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους:

- Τύπου φράκτου
- Τύπου κουρτίνας

Ο τύπος του φράγματος που θα επιλεγεί και ο τρόπος που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, σημαντικότεροι από τους οποίους είναι οι :

- Η θέση και το μέγεθος της κηλίδας
- Η κίνησή της
- Μετεωρολογικές συνθήκες
- Υδρολογικές συνθήκες
- Μορφολογία ξηράς και σχήμα υδάτινης μάζας
- Προτεραιότητες όσον αφορά την προστασία

Οι λειτουργίες του φράγματος είναι:

- Εγκλωβισμός

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 ρύπανσης μιας ακτής από πετρέλαιο το οποίο έχει εγκλωβιστεί σε μικρούς κόλπους, εσοχές, παραλίες κ.λπ.

- Απόκλιση

Η λειτουργία της απόκλισης χρησιμεύει στην εκτροπή της εξάπλωσης του πετρελαίου από μια ευαίσθητη οικολογικά ή και οικονομικά περιοχή προς μία άλλη λιγότερη ευαίσθητη και πλέον κατάλληλη για την περισυλλογή του πετρελαίου.

- Προστασία

Όταν μια ιδιαίτερα ευαίσθητη περιοχή (περιβαλλοντικά, οικονομικά, τεχνολογικά) πρέπει να προστατευθεί από το πετρέλαιο τότε εφαρμόζεται προστατευτική περίφραξη, που συνδυάζεται στη συνέχεια με ανάκτηση του πετρελαίου.

- Περισυλλογή

Κατά την περισυλλογή γίνεται συγκέντρωση του ρύπου που επιπλέει στην επιφάνεια της θάλασσας, διευκόλυνση της απομάκρυνσής του και ελαχιστοποίηση της εξάπλωσης της κηλίδας. Τα φράγματα χρησιμοποιούνται με στατικό τρόπο (αγκυροβολημένα για εγκλωβισμό και εκτροπή και προστασία) ή με κινητικό τρόπο για περισυλλογή.

Η απόδοση των φραγμάτων και η ικανότητα εγκλωβισμού του πετρελαίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν, δηλαδή από την ταχύτητα του ανέμου, την ταχύτητα του ρεύματος και το ύψος κύματος. (Κοτρίκλα Ά. Μ., 2015)



**Εικόνα 2.22** Φράγματα (booms)  
(<http://www.canatec.com/containment-booms>)

### **β) Πετρελαιοσυλλέκτες (skimmers)**

Οι πετρελαιοσυλλέκτες (Skimmers) 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. (ITOPF, Containment & Recovery, 2019)

- Μηχανικοί πετρελαιοσυλλέκτες

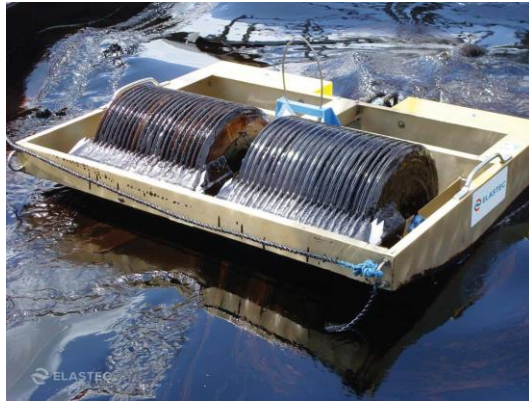
Οι συσκευές αυτού του τύπου βασίζονται στις ιδιότητες των πετρελαίων και των μιγμάτων πετρελαίου/νερού, καθώς και στη διαφορά πυκνότητας μεταξύ ρύπου και του νερού.

- Ελαιόφιλοι πετρελαιοσυλλέκτες

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

- Φράγματα περισυλλογής

Οι μονάδες αυτές 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.



**Εικόνα 2.23** Πετρελαιοσυλλέκτες (skimmers)  
(<https://www.elastec.com/products/oil-spill-skimmers/>)

### **γ) Σκάφη περισυλλογής (Skimmer vessels)**

Τα σκάφη περισυλλογής (Skimmer Vessels) είναι σκάφη των οποίων ο κύριος τύπος που χρησιμοποιείται έχει ενσωματωμένη κάποια ειδική διάταξη, ανάλογη συσκευή, μηχανική ή ελαιόφιλη, για τη συλλογή του πετρελαίου. Άλλοι πάλι τύποι δέχονται διαφόρων ειδών συσκευές περισυλλογής. 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 διαταραγμένη θάλασσα. 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.



**Εικόνα 2.24** Σκάφη περισυλλογής (skimmers vessels)  
(<http://www.nauticexpo.com/prod/rozema-boats-works/product-34023-234059.html>)

### **δ) Απορροφητικά υλικά (Sorbents)**

Τα απορροφητικά υλικά, είναι υλικά που χρησιμοποιούν απορροφητικές ή προσκολλητικές ιδιότητες προκειμένου να περισυλλέξουν ρευστά, πιο συγκεκριμένα το πετρέλαιο. Τα υλικά αυτά διακρίνονται ανάλογα με την πρώτη ύλη κατασκευής τους σε:

- Συνθετικά- Πολυμερή
- Κατεργασμένα ορυκτά
- Κατεργασμένα φυτικά

Η απόδοση και η ικανότητα ανάκτησής τους εξαρτάται από την απορροφητική τους ικανότητα, (ο λόγος της συνολικής ποσότητας πετρελαίου που ανακτάται προς το βάρος του απορροφητικού), την απορροφητικότητα (ο λόγος της ποσότητας ρύπου προς τη συνολική ποσότητα μίγματος νερού-πετρελαίου που ανακτάται και χαρακτηρίζει το κατά πόσο το υλικό είναι ελαιοφιλικό) και ο χρόνος κορεσμού (η ποσότητα που ανακτάται στη μονάδα του χρόνου). (Τσιάτσου, 2018)



**Εικόνα 2.25** Απορροφητικά υλικά (sorbents)  
(<http://www.guardianlab.com/product/oil-sorbents-pads/>)

### 2.5.3 Χημικός καθαρισμός

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

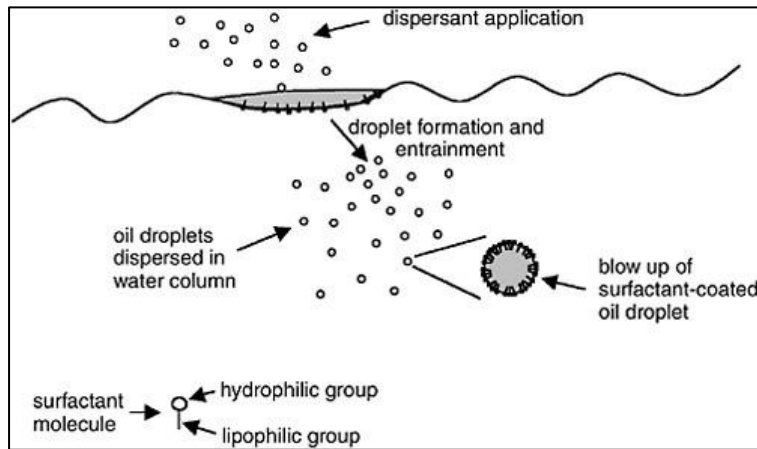
#### **α) Χημικές Διασκορπιστικές ουσίες (Dispersants)**

Οι χημικές διασκορπιστικές ουσίες είναι μίγματα στα οποία περιλαμβάνονται επιφανειακά ενεργές ουσίες όπου 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 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.

#### **β) Άλλα χημικά**

Υπάρχουν και άλλα χημικά τα οποία χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους ή χρησιμοποιούνται προκειμένου να καταστήσουν δυνατή την ανάκτηση του πετρελαίου με μηχανικά μέσα. Μερικά κύρια από αυτά είναι: μέσα καταβύθισης, πτητικά μέσα/στερεοποιητές, απογαλακτοποιητές, βιολογικά μέσα, μεταβολείς επιφανειακής τάσης και άλλα.





**Εικόνα 2.26** Εφαρμογή διασκορπιστικών  
(National Research Council, 2005)

### 2.5.4 Εναλλακτικές μέθοδοι

Υπάρχουν μέθοδοι υπό μελέτη οι οποίες λειτουργούν ως συμπληρωματικές ή εναλλακτικές ενέργειες στη διαδικασία απορρύπανσης. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι η βιοαποικοδόμηση (Bioremediation) και η μέθοδος της επί τόπου καύσης (In-Situ Burning).

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.

Η επί τόπου 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 (Τριανταφύλλου Γ., και Βεργέτης Μ, 2004).



**Εικόνα 2.27** Μέθοδος επί τόπου καύσης  
(IPIECA- IOGP, 2016)

### 3. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΩΝ

#### 3.1 Εισαγωγή

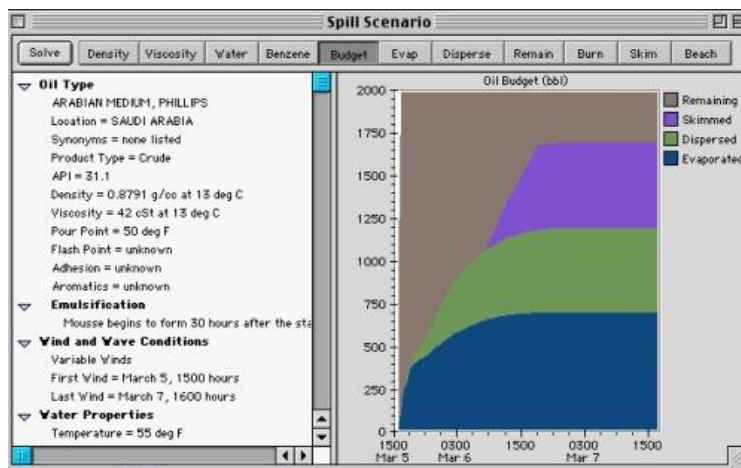
Η ανάπτυξη και η αξιοποίηση των μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης για τις πετρελαιοκηλίδες γίνεται έτσι ώστε να επιτευχθεί μία αξιόπιστη πρόβλεψη για την συμπεριφορά τους στο νερό αλλά και για την τύχη τους. Τα παραπάνω συμβάλλουν ώστε σε περίπτωση ατυχήματος να υπάρχει ολοκληρωμένο σχέδιο εκτάκτου ανάγκης και ετοιμότητα προκειμένου να περιοριστούν οι επιπτώσεις μιας πετρελαιοκηλίδας στο περιβάλλον. Είναι πολύ σημαντική η πρόβλεψη αυτή, καθώς σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει η δυνατότητα άμεσης παρατήρησης, αλλά και σε περιστατικά σε πρώιμο στάδιο, μπορεί να εκτιμηθεί πολύ γρήγορα και αξιόπιστα η συμπεριφορά της πετρελαιοκηλίδας, η κατεύθυνση της και οι επιπτώσεις της. Η εκτίμηση αυτή επίσης θα συνδράμει και στην άμεση επέμβαση στις ιδιαίτερα κρίσιμες περιοχές.

Η τροχιά μιας πετρελαιοκηλίδας μπορεί να εκτιμηθεί από την επεξεργασία δεδομένων τα οποία αφορούν τις συνθήκες της διαρροής (άνεμος, θερμοκρασία, ρεύματα) σε ένα σύστημα αναφοράς. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας αναπτύχθηκε λογισμικό προσομοίωσης με στόχο την πρόβλεψη της ρύπανσης της πετρελαιοκηλίδας και την εκτίμηση της τύχης και της συμπεριφοράς του πετρελαίου μέσω πολύπλοκων αλγορίθμων. (Ποτουρίδης, 2013)

#### 3.2 Τύποι Μοντέλων Προσομοίωσης

##### 3.2.1 Μοντέλα Προσομοίωσης Oil Weathering

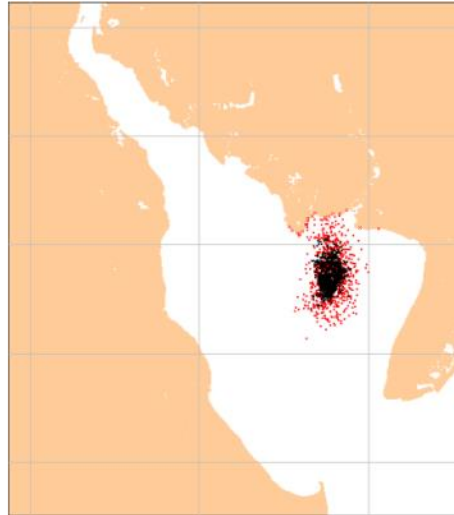
Τα μοντέλα προσομοίωσης Oil Weathering προβλέπουν τις μεταβολές των χαρακτηριστικών του πετρελαίου σε συνάρτηση με το χρόνο υπό την επίδραση κάποιων περιβαλλοντικών συνθηκών και παραμέτρων. Τέτοιες περιβαλλοντικές παράμετροι είναι η θερμοκρασία του νερού, το ύψος κύματος, οι τροχιές των υγρών σωματιδίων, η αλατότητα, η συγκέντρωση ιζήματος στη θάλασσα οι οποίες εισάγονται στο μοντέλο από τον χρήστη. Η σύνθεση του πετρελαίου εισάγεται από τον χρήστη από μία βάση δεδομένων. Το μοντέλο εκτιμά ποιοτικά και ποσοτικά τις μεταβολές του πετρελαίου. Υπολογίζει δηλαδή το ποσοστό του πετρελαίου που εξατμίστηκε, πόσο γαλακτωματοποιήθηκε, πόσο εξαπλώθηκε, πόσο διασκορπίστηκε ακόμα και πόσο έχει φτάσει στις ακτές. Χαρακτηριστικά αυτών των μοντέλων είναι η ευκολία στη χρήση και η γρήγορη λειτουργία.



Εικόνα 3.1 Μοντέλο ADIOS  
(<http://www.oceanecology.ca/oil.htm>)

### 3.2.2 Ντετερμινιστικά ή Τροχιοδεικτικά μοντέλα

Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της τροχιάς μιας πετρελαιοκηλίδας συναρτήσει του χρόνου και συνήθως εκτιμούν την αλλαγή των ιδιοτήτων του πετρελαίου κάτω από συγκεκριμένες υδροδυναμικές και μετεωρολογικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα των μοντέλων αυτών περιλαμβάνουν τις ποσότητες της κηλίδας όσο αφορά τον όγκο, τη διασπορά, τη γαλακτωματοποίηση και την εξάτμιση της σε σχέση με τον χρόνο. Εξάγονται αποτελέσματα για τις αλλαγές στις ιδιότητες του πετρελαίου κατά τη διάρκεια της ρύπανσης (π.χ. ιξώδες και σημείο ανάφλεξης), πιθανές ακτές προσέγγισης και τις ποσότητες πετρελαίου που φτάνουν σε αυτές. Ντετερμινιστικό μοντέλο είναι και το MEDSLIK που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.

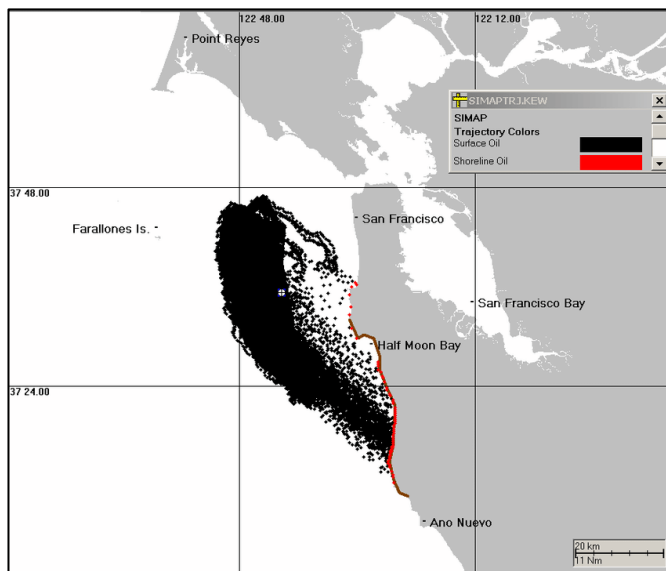


Εικόνα 3.2 Μοντέλο GNOME

<https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/response-tools/gnome.html>

### 3.2.3 Στοχαστικά Μοντέλα

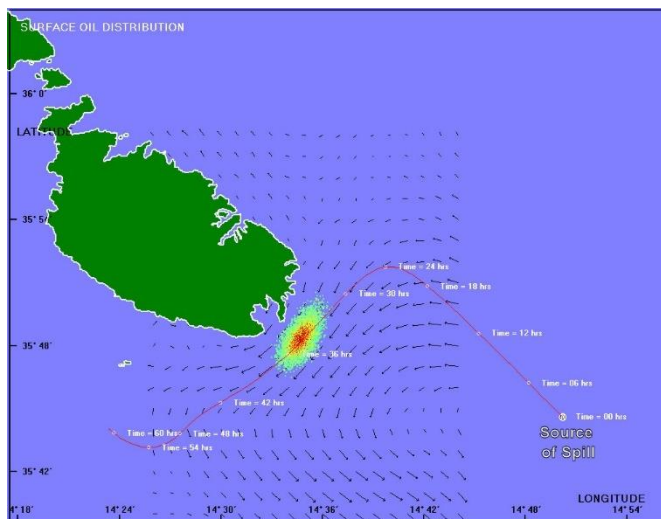
Πρόκειται για μοντέλα τα οποία προβλέπουν με πιθανότητες που μπορεί να γίνει ατύχημα πετρελαιοκηλίδας σε καθορισμένες χρονικές περιόδους. Για τα μοντέλα αυτά απαιτούνται ιστορικά ανεμολογικά δεδομένα που να περιέχουν τη συχνότητα της ταχύτητας και τη διεύθυνση του ανέμου για όλες τις συνθήκες. Τα δεδομένα αυτά σε συνδυασμό με τα πιθανά σενάρια απεικονίζουν σε ποια περιοχή υπάρχει πιθανότητα εξάπλωσης πετρελαίου τη δεδομένη χρονική στιγμή. Τα αποτελέσματα του μοντέλου αυτού είναι κυρίως ποιοτικά, καθώς δείχνουν ποιες περιοχές διατρέχουν τον μεγαλύτερο κίνδυνο τη δεδομένη στιγμή και όχι τον όγκο του πετρελαίου που θα φτάσει σε αυτές. Έτσι μπορούμε να γνωρίζουμε ποιες περιοχές χρήζουν άμεσης αντιμετώπισης. Επιπρόσθετα, μέσω των μοντέλων αυτών προκύπτουν διαγράμματα συναρτήσει του χρόνου, τα οποία απεικονίζουν τον χρόνο που χρειάζεται το πετρέλαιο για να διανύσει μια απόσταση ή να φτάσει σε μια ακτή. Σε αυτή τη κατηγορία είναι τα μοντέλα OILMAP, OSCAR και SIMAP.



**Εικόνα 3.3** Μοντέλο SIMAP  
*(Tebeau, P. & Etkin, D. & French-McCay, Deborah. (2006))*

### 3.2.4 Μοντέλα Hind-Cast

Πρόκειται για μοντέλα που αντιστρέφουν τη διαδικασία των ντετερμινιστικών μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της προέλευσης μιας διαρροής όπου το σημείο πηγής είναι άγνωστο. Σε αυτή τη κατηγορία είναι τα μοντέλα SIMAP, OSCAR και MEDSLIK.

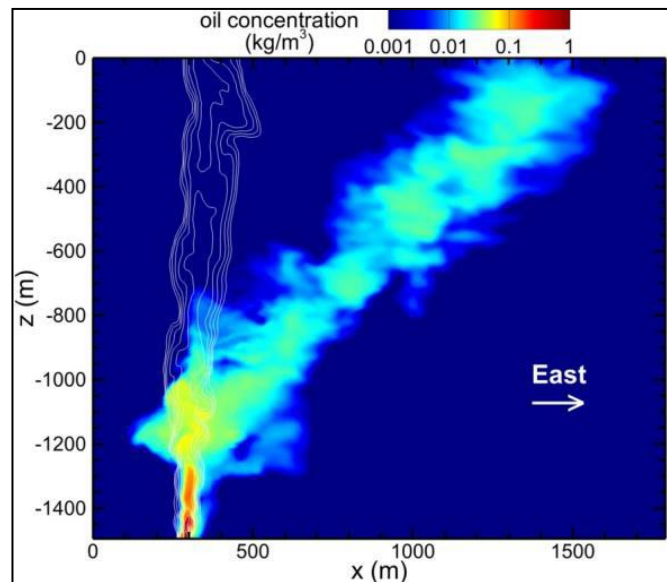


**Εικόνα 3.4** Μοντέλο MEDSLIK  
<http://www.capemalta.net/news/medslik>

### 3.2.5 Τριών διαστάσεων (3D)

Αυτά τα μοντέλα κάνουν εκτιμήσεις σχετικά με το προφίλ του πετρελαίου στις τρεις διαστάσεις συναρτήσει του χρόνου. Προσομοιώνουν την εξάπλωση μέσα στην υδάτινη στήλη νερού και εκτιμούν τη συγκέντρωση των συστατικών του, τα οποία και αντιδρούν διαφορετικά όταν βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του νερού. Επιπλέον, υπάρχουν τρισδιάστατα μοντέλα πιο ειδικευμένα 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 σε σχέση με το βάθος. Μοντέλα τριών διαστάσεων είναι το MOHID, MEDSLIK, OSERIT και SIMAP.



Εικόνα 3.5 Μοντέλο τριών διαστάσεων 3D

<http://gulfresearchinitiative.org/improving-oil-spill-models-predict-plume-dispersion-transport>

### 3.3 Δεδομένα μοντέλων προσομοίωσης

#### 3.3.1 Γενικά

Για την σωστή και αξιόπιστη προσομοίωση ενός ατυχήματος πετρελαιοκηλίδας, είναι απαραίτητα τα δεδομένα τα οποία περιγράφουν το ατύχημα να είναι πλήρη και αξιόπιστα. Τα δεδομένα αυτά αφορούν τις υδροδυναμικές συνθήκες, δηλαδή δεδομένα ανέμων, ρευμάτων και παλίρροιας, τον τύπο του πετρελαίου, όπου στις περισσότερες περιπτώσεις επιλέγεται από μια βάση δεδομένων του μοντέλου, τα χαρακτηριστικά της διαρροής (ποσότητα, τοποθεσία, διάρκεια) και τέλος την θερμοκρασία του νερού και του αέρα. Πολλά από αυτά τα δεδομένα είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο και στις διάφορες υπηρεσίες πρόγνωσης καιρού οι οποίες προσφέρουν συνολικά δεδομένα από σταθμούς καταγραφής σε διάφορες περιοχές στην Ελλάδα. Τα δεδομένα αυτά αναφέρουν τις διευθύνσεις και τις εντάσεις των ανέμων, καθώς και τις συχνότητες εμφάνισής τους.

#### 3.3.2 Υδροδυναμικά δεδομένα

Τα πιο σημαντικά δεδομένα για την προσομοίωση μιας πετρελαιοκηλίδας είναι τα υδροδυναμικά δεδομένα καθώς είναι αυτά τα οποία ορίζουν στην ουσία την τύχη της. Τα δεδομένα αυτά είναι δυσεύρετα καθώς η συλλογή τους είναι μια διαδικασία δαπανηρή και ιδιαίτερα χρονοβόρα. Όμως η πληρότητα και η ορθότητα των δεδομένων είναι πολύ σημαντική, καθώς σε περιοχές με πολύπλοκη ακτογραμμή μπορεί να εξαχθούν τελείως λάθος αποτελέσματα.

Τα ρεύματα μιας περιοχής μπορούν να συλλεχθούν με τη χρήση μιας αγκυροβολημένης σημαδούρας από ερευνητικά πλοία καθώς και με τηλεπισκόπηση. Μπορεί η διαδικασία αυτή όπως προαναφέρθηκε να είναι χρονοβόρα και δαπανηρή, όμως σε περιοχές με ιδιαίτερα μεγάλο κίνδυνο θα πρέπει να καταγράφονται τα δεδομένα αυτά συνεχώς. Σκοπός είναι να υπάρχουν αυτά τα δεδομένα πριν την διαρροή του πετρελαίου

έτσι ώστε να μπορεί να γίνει σωστή πρόβλεψη για την τύχη της πετρελαιοκηλίδας και συνεπώς να υπάρχει αντίστοιχη δράση και επέμβαση. Διαφορετικά τα δεδομένα αυτά μπορούν να εξαχθούν από χωριστά, ειδικευμένα μοντέλα υδροδυναμικής ανάλυσης. Τα μοντέλα αυτά εξάγουν αποτελέσματα για τις μέσες συνθήκες, και δεν δίνουν αποτελέσματα για ακραίες καταστάσεις όπως οι καταιγίδες. Όσο η τεχνολογία αναπτύσσεται τα μοντέλα αυτά δίνουν όλο και πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα, τα οποία όμως μπορεί να αποδειχθούν το ίδιο χρονοβόρα και δαπανηρά όπως και η συλλογή των δεδομένων. Κάποια μοντέλα όμως μπορούν να προβλέψουν τα δεδομένα με στατιστική ανάλυση.

### **3.3.3 Ανεμολογικά δεδομένα**

Οι μετεωρολογικές υπηρεσίες διαθέτουν σταθμούς καταγραφής δεδομένων σε πολλά σημεία στον Ελλαδικό χώρο. Αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς έτσι είναι διαθέσιμα τα ανεμολογικά δεδομένα για διάφορες περιοχές και για πολλές χρονολογικές περιόδους. Τα δεδομένα αυτά αναφέρουν τις διευθύνσεις των ανέμων, τις εντάσεις τους καθώς και τις συχνότητες εμφάνισης τους. Θα πρέπει τα δεδομένα αυτά να είναι από αξιόπιστη πηγή έτσι ώστε να είναι σωστά τα αποτελέσματα των μοντέλων.

### **3.3.4 Τύπος πετρελαίου**

Ο τύπος του πετρελαίου μπορεί να οριστεί από μια λίστα από είδη πετρελαίου την οποία την διαθέτει κάθε μοντέλο προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδας. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει ο συγκεκριμένος τύπος πετρελαίου μπορεί να επιλεγεί ένα πετρέλαιο με παρόμοιες ιδιότητες. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα ορισμού του τύπου πετρελαίου με βάση τον βαθμό API που διαθέτει.

## **3.4 Σχεδιασμός Έκτακτης Ανάγκης**

Σε εγκαταστάσεις που έχουν άμεσο κίνδυνο διαρροής πετρελαίου απαραίτητη είναι η ανάπτυξη σχεδίου έκτακτης ανάγκης για την αντιμετώπιση της. Το παραπάνω απαιτείται τα τελευταία χρόνια και από την νομοθεσία για την περιβαλλοντική αδειοδότηση τέτοιων εγκαταστάσεων. Το σχέδιο έκτακτης ανάγκης διαμορφώνεται για το πιο πιθανό σενάριο διαρροής ανάλογα με την πιθανότητα να συμβεί και τις επιπτώσεις που μπορεί να έχει στην ευρύτερη περιοχή.

Η αξιοποίηση των μοντέλων είναι ιδιαίτερα σημαντική για την κατάστροψη του σχεδίου αυτού καθώς έτσι μπορεί να προβλεφθεί η πιο πιθανή τροχιά της πετρελαιοκηλίδας καθώς και οι διεργασίες του πετρελαίου που θα γίνουν λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών. Οι προβλέψεις γίνονται με βάση τα ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής. Με τη βοήθεια των στοχαστικών μοντέλων μπορεί να προβλεφθεί η δυσμενέστερη περίπτωση διαρροής. Αυτό βοηθά στην σωστή εκτίμηση του κινδύνου, στην άμεση αντιμετώπιση και ιεράρχησή των απαιτούμενων ενεργειών. Έτσι είναι εφικτή η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου αντιμετώπισης όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 2.5.

## **3.5 Επιχειρησιακά μοντέλα**

Σε περίπτωση ατυχήματος τα μοντέλα προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδας μπορούν να φανούν ιδιαίτερα χρήσιμα για την πρόβλεψη της κίνησης της πετρελαιοκηλίδας. Θα πρέπει όμως για την σωστή εκτίμηση της να υπάρχουν διαθέσιμα τα μετεωρολογικά δεδομένα από τους σταθμούς παρατήρησης έτσι ώστε αυτά να εισαχθούν στο μοντέλο και να γίνει μια αξιόπιστη εκτίμηση. Είναι πολύ σημαντικό να μπορεί να γίνει στο αρχικό στάδιο της διαρροής τέτοια εκτίμηση σε συνδυασμό με την παρατήρηση στο πεδίο, έτσι



ώστε να εφαρμοστεί το κατάλληλο σχέδιο. Τα πιο σημαντικά αποτελέσματα και πληροφορίες που μπορεί να δώσει το μοντέλο στην επιχείρηση αντιμετώπισης είναι η κατεύθυνση της κηλίδας, οι διεργασίες του πετρελαίου που δίνονται λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών (εξάτμιση, διάχυση, γαλακτωματοποίηση κ.α.) καθώς και το σε πόσο χρόνο θα φτάσει το πετρέλαιο στην ακτή και σε ποια ποσότητα.

Επίσης είναι δυνατό πολλά μοντέλα να αποτυπώσουν την έκταση της πετρελαιοκηλίδας με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) έτσι ώστε οι παρατηρήσεις και η επιτήρηση να είναι συνδυασμένες χωρικά. Αν αποτυπωθεί η πετρελαιοκηλίδα σε αυτά τα συστήματα μπορεί να αντιμετωπιστεί καλύτερα καθώς θα είναι με μεγαλύτερη ακρίβεια τοποθετημένη στο χώρο και κατα επέκταση μπορεί να ανανεωθεί η τροχιά της συνεχώς με βάση τις παρατηρήσεις.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η χρήση του μοντέλου σε τέτοιες περιπτώσεις θα πρέπει να συνδυάζεται με τις παρατηρήσεις στο πεδίο. Θα πρέπει το μοντέλο να τροφοδοτεί τις παρατηρήσεις και όχι το αντίστροφο, εκτός και αν δεν είναι δυνατή η παρατήρηση.

### 3.6 Προσομοίωση Στρατηγικών Αντιμετώπισης

Κάποια μοντέλα προσομοίωσης δίνουν την δυνατότητα εφαρμογής κάποιων μεθόδων αντιμετώπισης όπως η τοποθέτηση φραγμάτων, η χρήση διασκορπιστικών, ο μηχανικός καθαρισμός κ.α. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ποια μέθοδο προτιμά με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου και να ορίσει το σημείο και το χρόνο εφαρμογής. Έτσι ο χρήστης μπορεί να εκτιμήσει ποια μέθοδος θα είναι πιο αποτελεσματική και πιο γρήγορη. Τα μοντέλα σε αυτές τις εκτιμήσεις τους είναι πιο αισιόδοξα από την πραγματικότητα. Για αυτό θα πρέπει πάντα το αποτέλεσμα του μοντέλου να έχει συμβουλευτική χρήση και πάντα να γίνεται εξέταση τι εξοπλισμός είναι διαθέσιμος και τι συνθήκες επικρατούν κάθε φορά.

Συνεπώς οι κατηγορίες των μοντέλων προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδων μπορούν να συνοψιστούν στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 3.1** Κατηγορίες Μοντέλων Πετρελαιοκηλίδων  
(iTac, 2008)

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

## 4. Η ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑ ΣΤΟ ΣΑΡΩΝΙΚΟ ΚΟΛΠΟ ΤΟ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟ ΤΟΥ 2017

### 4.1 Αγία Ζώνη II

Το ατύχημα στον Σαρωνικό κόλπο το Σεπτέμβρη του 2017 συνέβη με το πλοίο Αγία Ζώνη II. Το πλοίο αυτό είναι ένα δεξαμενόπλοιο (tanker), το οποίο μετέφερε υγρά φορτία. Αυτά τα υγρά φορτία ήταν καύσιμα τα οποία αποτελούν χημικό φορτίο και για αυτό και χαρακτηρίζεται ως Oil/Chemical Tanker.

Το «Αγία Ζώνη II» αλλά και γενικά όλα τα δεξαμενόπλοια διαθέτουν στεγανές δεξαμενές στις οποίες και αποθηκεύουν το φορτίο τους. Υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς και διαφορετικού φορτίου το οποίο διαχωρίζεται στις δεξαμενές. Τα μεγέθη αυτών των σκαφών ποικίλουν ανάλογα με τις απαιτήσεις και τον σχεδιασμό. Τα δεξαμενόπλοια φορτώνουν ή εκφορτώνουν είτε σε σχεδιασμένες προβλήτες είτε σε ειδικά διαμορφωμένα αγκυροβόλια. Η μεταφορά του υγρού φορτίου από και προς τις δεξαμενές γίνεται με τη χρήση αντλιών. Για να είναι ασφαλής η μεταφορά του, θα πρέπει να ελέγχεται η συμβατότητα της περιοχής μεταφοράς, η συμβατότητα του πλοίου, να υπάρχει έγκριση από τις αρχές, ιδανικές καιρικές συνθήκες ανάλογα με την περιοχή και το σύστημα αγκυροβολίας, εξιδανικευμένο προσωπικό ,κατάλληλος εξοπλισμός ,σχέδιο έκτακτης ανάγκης και σωστή μεθοδολογία προσέγγισης και πρόσδεσης ανάλογα με το αγκυροβόλιο για να αποτραπούν τα ατυχήματα κατά την διαδικασία προσέγγισης.



Εικόνα 4.1 Δεξαμενόπλοιο Αγία Ζώνη II

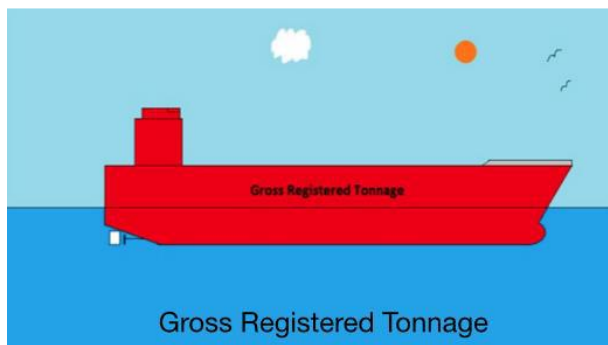


#### Πίνακας 4.1 Στοιχεία πλοίου ΑΓΙΑ ΖΩΝΗ ΙΙ

([https://www.marinetraffic.com/el/ais/details/ships/shipid:213750/mmsi:-7126152/imo:7126152/vessel:AGIA\\_ZONI\\_II](https://www.marinetraffic.com/el/ais/details/ships/shipid:213750/mmsi:-7126152/imo:7126152/vessel:AGIA_ZONI_II))

Στοιχεία Πλοίου Αγία Ζώνη ΙΙ	
IMO	7126152
Διακριτικό (Call Sign)	SV4D4
Σημαία	Greece (GR)
Τύπος Σκάφους	Oil/ Chemical Tanker
Ολική Χωρητικότητα (GRT)	1521
Χωρητικότητα (DWT)	3205 t
LOA	91.32 m
B	13.7 m
Ετος ναυπήγησης	1972
D	4.8 m
Ταχύτητα (Μέγιστη/Μέση)	7.9 / 7.3 knots
Τελευταία τοποθεσία	37.9317ο/ 23.56707ο

**Ολική Χωρητικότητα (GRT):** Εκφράζει το μέγεθος του πλοίου και υπολογίζεται με βάση τους κανονισμούς καταμέτρησης. Η χωρητικότητα είναι στοιχείο που σχετίζεται κυρίως με την οικονομική εκμετάλλευση των πλοίων. Αποτελεί κριτήριο υπολογισμού των τελών που καταβάλλονται από τα πλοία στα λιμάνια, στα στενά, κ.ά. Η ολική χωρητικότητα (Gross Register Tonnage, GRT), εκφράζει τον όγκο όλων των κλειστών χώρων του πλοίου.



**Εικόνα 4.2** Gross Tonnage  
(Υπχος (Μ) Ι. Δήμου ΠΝ, 2015)

**Χωρητικότητα (DWT-dead weight):** Είναι η διαφορά του εκτοπίσματος στην εκάστοτε κατάσταση πλεύσης από το βάρος του άφορτου πλοίου. Περιλαμβάνει το βάρος του μεταφερόμενου φορτίου (payload), το βάρος του πληρώματος, των αναλώσιμων και των εφοδίων.

**Ολικό Μήκος πλοίου (LOA-Length Overall):** Είναι η οριζόντια (διαμήκης) απόσταση μεταξύ των δύο ακραίων σημείων του πλοίου στην πλήρη και στην πρύμνη.

**Πλάτος (B-Beam ή Breadth):** Είναι η εγκάρσια απόσταση μεταξύ των δύο πλευρών της γάστρας. Συνήθως, με τον όρο πλάτος υπονοείται το μέγιστο πλάτος του πλοίου (beam overall, BOA), το οποίο παρουσιάζεται στην περιοχή της μέσης τομής στο ύψος του κυρίου καταστρώματος.

**Βύθισμα (D-Draught ή Draft):** Είναι η κατακόρυφη απόσταση από το βασικό επίπεδο αναφοράς μέχρι την ίσαλο επιφάνεια. (Υπχος (Μ) Ι. Δήμου ΠΝ, 2015)

## 4.2 Περιγραφή περιστατικού

### 4.2.1 Ημερολόγιο Περιστατικού

#### Σάββατο 9 Σεπτεμβρίου 2017

**10:00:** Το πλοίο «Αγία Ζώνη II» με πλήρωμα 11 ατόμων αποχώρησε από τα διυλιστήρια των ΕΛΠΕ του Ασπροπύργου. Το πλοίο είχε φορτίο 2362 μετρικούς τόνους πετρελαίου εξωτερικής καύσης (Fuel Oil) και 370 μετρικούς τόνους πετρελαίου ναυτιλίας εσωτερικής καύσης (Marine Gas Oil). Το πλοίο μετέφερε επίσης περίπου 15 μετρικούς τόνους επιπλέον κάρβουνο πετρελαίου ναυτιλιακής χρήσης και περίπου 300 λίτρα λιπαντικών και 200-300 λίτρα χημικών ουσιών. Σύμφωνα με το Υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας (ΥΕΝ) η διαρροή αφορά στο 5% (δηλαδή 137 τόνοι) του φορτίου (IOPC FUNDS, 2019).

#### Κυριακή 10 Σεπτεμβρίου 2017

**01:45:** Το δεξαμενόπλοιο «Αγία Ζώνη II» βυθίστηκε νοτιοδυτικά της νησίδας Αταλάντη στα ανοιχτά της Σαλαμίνας. Η βύθιση του προκλήθηκε λόγω διαρροής και από τη πρώτη στιγμή έγινε αντιληπτή η διαρροή των πετρελαιοειδών στη θάλασσα. Από την διαρροή υπήρχε σε αρχικό στάδιο εκτεταμένη ρύπανση του θαλάσσιου αλλά και του παράκτιου χώρου ανοιχτά της Σαλαμίνας. Στη συνέχεια το πετρέλαιο εξαπλώθηκε και στην ευρύτερη περιοχή.

**02:45-02:50:** Σύμφωνα με τον Γιάννη Φατσέα, τον επικεφαλής της επιχείρησης ασφάλισης ναυαγίου ομίλου Σπανόπουλου, ειδοποιήθηκαν και έφτασαν τα ρυμουλκά στο σημείο του περιστατικού. Ο καπετάνιος τον ενημέρωσε πως το πλοίο ήταν μισοβυθισμένο και δεν γινόταν να κάνει κάτι έτσι ώστε να μην βυθιστεί. (<http://www.skai.gr/player/tv/?mmid=296440>, ΣΚΑΪ, 31/10/2017, ΙΣΤΟΡΙΕΣ, Η αυτοψία στο ναυάγιο του Αγία Ζώνη II, 2017)

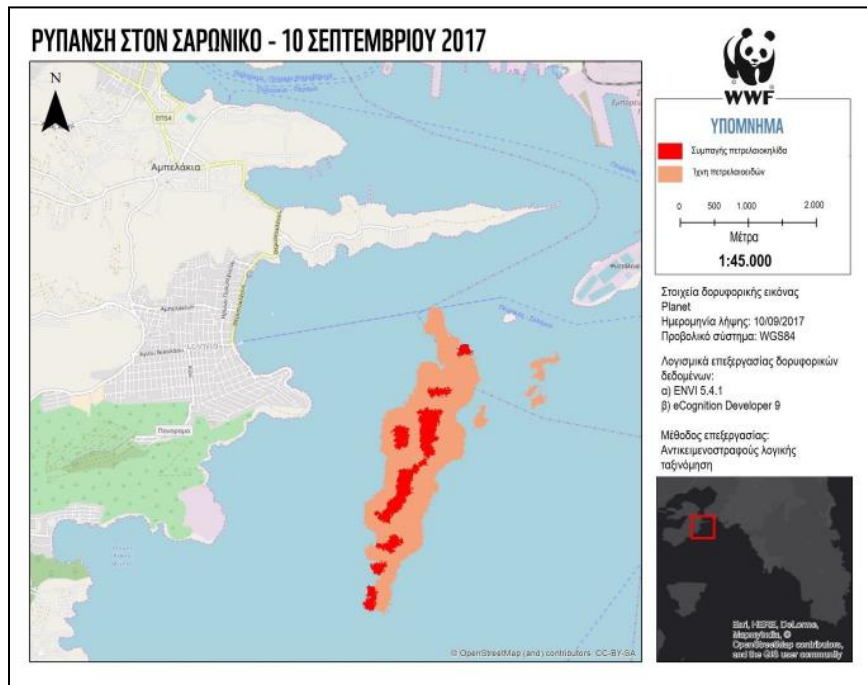
**05:30:** Κατέπλευσε στην περιοχή αντιρρυσπαντικό σκάφος προς αντιμετώπιση της θαλάσσιας ρύπανσης.

**07:25:** Αεροσκάφος του λιμενικού σώματος διενέργησε περιπολία στην περιοχή του συμβάντος, όπου και εντοπίζεται διάσπαρτη ρύπανση από το σημείο της (Ανακοίνωση Λιμενικού Σώματος, 10/09/2017, 13:40, <http://www.hcg.gr/node/15922> ).

**09:30:** Σύμφωνα με τον Υπουργό Ναυτιλίας είχαν μπει τα φράγματα (<https://www.protothema.gr/greece/article/716865/to-shedio-pou-xehasan-na-efarmosoun-sto-agia-zoni-ii-efarmostike-gia-ena-ammoliptiko/>) Τα πρώτα φράγματα είχαν μήκος περίπου 600 μέτρα γύρω από την περιοχή του περιστατικού (IOPC FUNDS, 2019).

**18:00:** Το αεροσκάφος του λιμενικού σώματος διενέργησε συμπληρωματική περιπολία στην περιοχή του συμβάντος. Παρατηρήθηκε ρύπανση από πετρελαιοειδή, σε διάφορα σημεία από το ακρωτήριο Κυνοσούρας μέχρι τον όρμο Σεληνίων. Από το δημοτικό Λιμενικό Ταμείο Σαλαμίνας τοποθετήθηκε πλωτό φράγμα στον λιμενίσκο Σεληνίων.

Στην εικόνα 4.3 παρατίθεται από την έκθεση της WWF (WWF Ελλάς, 2017) η τροχιά της πετρελαιοκηλίδας την πρώτη μέρα της διαρροής.



**Εικόνα 4.3** Τροχιά πετρελαιοκηλίδας 10/09/2019  
(WWF Ελλάς, 2017)

#### **Δευτέρα 11 Σεπτεμβρίου 2017**

Από τις πρωινές ώρες είχε ξεκινήσει ο καθαρισμός από ιδιωτικές εταιρείες της περιοχής Κυνοσούρας και Σεληνίων στην Σαλαμίνα. (<https://www.ert.gr/eidiseis/ellada/kinonia/vythisi-dexamenopliou-ryransi-15-chil-apo-petroleoidi-ke-pissa-ston-saroniko-video/>)

Το αεροσκάφος του λιμενικού σώματος πραγματοποίησε περιπολία στην περιοχή του συμβάντος. Στο σημείο της βύθισης του πλοίου τοποθετούνται επάλληλες σειρές πλωτών φραγμάτων. (Ανακοίνωση Λιμενικού Σώματος, 11/09/2017, 18:39, <http://www.hcg.gr/node/15937>).



**Εικόνα 4.4** Στεγανοποίηση Αγία Ζώνη II  
(<https://www.star.gr/eidiseis/ellada/385883/apokleistikes-ypobryxies-eikones-apo-to-bythismeno-ploio-agia-zwnh-2>)

Περιμετρικά από το σημείο όπου είχε βυθιστεί το δεξαμενόπλοιο είχαν τοποθετηθεί δύο σειρές πλωτά φράγματα, ενώ οι εργασίες στεγανοποίησης στο «ΑΓΙΑ ΖΩΝΗ II», εκτελέστηκαν από ιδιώτες δύτες και ιδιωτικό συνεργείο να προχώρησε στην απάντηση καυσίμων. (<https://www.ert.gr/eidiseis/ellada/kinonia/vythisi-dexamenopliou-rypansi-15-chil-apo-petrelleoidi-ke-pissa-ston-saroniko-video/>). Παρόλα αυτά η ρύπανση από τα πετρελαιοειδή και την πίσσα επεκτάθηκε σε μήκος 1,5 χιλιομέτρου.



**Εικόνα 4.5** Ρύπανση στη Σαλαμίνα

(<https://www.newsbeast.gr/environment/arthro/2829701/mavrise-i-thalassa-sti-salamina-apo-ti-vithisi-dexamenopliou>)

Η Δήμαρχος της Σαλαμίνας Ισιδώρα Παπαθανασίου ανέφερε πως από το απόγευμα της Κυριακής ο καιρός και έφερε την πετρελαιοκηλίδα στο νησί. Καθώς, επισημαίνει πως όλες οι ακτές της ανατολικής πλευράς έχουν γεμίσει μαζούτ και ότι η ρύπανση έχει γεμίσει όλο το στενό. (<http://www.kathimerini.gr/926110/gallery/epikairothta/ellada/petrelaio-stis-aktes-ths-salaminas-apo-th-vy8ish-toy-de3amenoploioy-agia-zwnh> ).

### **Τρίτη 12 Σεπτεμβρίου 2017**

**09:10:** Σύμφωνα με την εταιρία απορρύπανσης επιτεύχθηκε η στεγανοποίηση του πλοίου και ο ουσιαστικός περιορισμός της διαρροής πετρελαίου (<http://newpost.gr/ellada/629176/ploiokthths-oikologikhs-bombas-agia-zwnh-ii-ola-htan-nomima-to-ploio-eixe-epithewrhthei-prin-apo-enamish-mhna>).

Τουλάχιστον είκοσι κυβικά πετρελαιοειδών και επτά κυβικά στερεά απόβλητα, έχουν περισυλλεγεί έως σήμερα από τη θαλάσσια περιοχή μεταξύ Κυνοσούρας και Σεληνίων, μετά τη ρύπανση που προκλήθηκε από τη βύθιση του δεξαμενόπλοιο. (<https://www.news247.gr/koinonia/oikologiki-katastrofi-sto-saroniko-mayrisan-oi-paralies-sti-salamina.6518087.html>)





**Εικόνα 4.6** Από την επιχείρηση καθαρισμού στη Σαλαμίνα

(<https://www.iefimerida.gr/news/361959/stin-peiraiki-eftase-i-petrelaiokilida-apo-ti-salamina-anisyhoyn-oi-arhes-eikonesvnteo>)

Το μεσημέρι της Τρίτης, 5 αντιρρυπαντικά σκάφη ιδιωτικής εταιρείας στόχευσαν στην αντιμετώπιση μεγάλων κομματιών της πετρελαιοκηλίδας που παρέσυραν οι άνεμοι προς την πλευρά της Πειραιϊκής (<http://www.documentonews.gr/article/sthn-peiraikh-eftase-h-petrelaiokhlida-toy-agia-zwnh-2-yperanthrwpes-prospatheies-na-perioristei-h-rypansh-video> ).

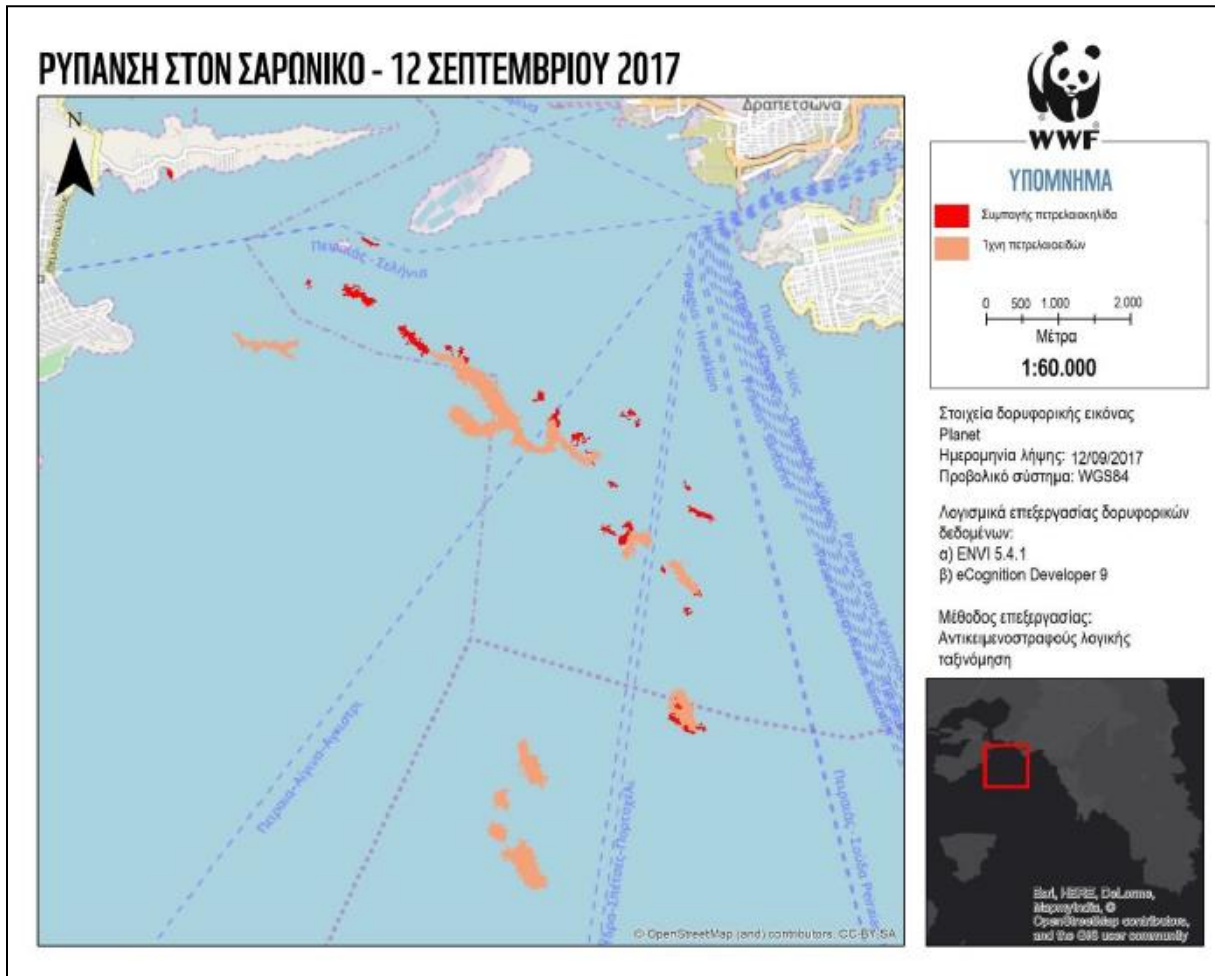
Το απόγευμα της 12ης Σεπτεμβρίου παρουσιάστηκαν κομμάτια πετρελαιοκηλίδας κοντά στις ακτές της Φρεαττύδας με έντονη δυσοσμία (<http://www.iefimerida.gr/news/361959/stin-peiraiki-eftase-i-petrelaiokilida-apo-ti-salamina-anisyhoyn-oi-arhes-eikonesvnteo>). Στο σημείο είχαν ποντιστεί πλωτά φράγματα και η όλη επιχείρηση επιτηρήθηκε από δύο σκάφη του λιμενικού.



**Εικόνα 4.7** Εμφάνιση πετρελαίου στα βράχια της Φρεαττύδας

Στη συνέχεια γίνεται ανακοίνωση από το Αρχηγείο Λιμενικού Σώματος ότι εντός της ζώνης του Οργανισμού Λιμένα Πειραιώς το απόγευμα της 9/9/2017 προκλήθηκε διαρροή πετρελαιοειδών από ρυμουλκούμενο επιβατηγό – οχηματογωγό «Blue Star Patmos» λόγω υφιστάμενου ρήγματος. Η θαλάσσια ρύπανση που προκλήθηκε είναι έκτασης περίπου 350 τ.μ., η οποία όμως εγκλωβίστηκε άμεσα σε πλωτό φράγματος πέριξ της δεξαμενής.

Στην εικόνα 4.8 παρατίθεται από την έκθεση της WWF (WWF Ελλάς, 2017) η τροχιά της πετρελαιοκηλίδας στις 12/09/2017.



Εικόνα 4.8 Τροχιά πετρελαιοκηλίδας 12/09/2017  
(WWF Ελλάς, 2017)

### **Τετάρτη 13 Σεπτεμβρίου 2017**

Τεχνικά συνεργεία από τις πρώτες πρωινές ώρες επιχειρούσαν στη θαλάσσια περιοχή της Πειραιϊκής προκειμένου να εκτιμήσουν την κατάσταση και να προχωρήσουν σε συντονισμένες ενέργειες για να γίνει η απορρύπανση των υδάτων. (<https://www.protothema.gr/greece/article/713025/oikologiki-vomva-stin-peiraiiki-eftase-i-petrelaiokilida-maures-oi-aktes-tis-salaminas-/>)

**16:00:** Ο Δήμος Βάρης - Βούλας – Βουλιαγμένης έλαβε επείγον σήμα από το Λιμενικό. Η πετρελαιοκηλίδα απείχε μόλις 300-400 μέτρα από την Βούλα. Ο Δήμος είχε ενεργοποιήσει το σχέδιο έκτακτης ανάγκης και έχει τοποθετήσει πλωτό φράγμα για να ανακόψει την δυτική φορά της πετρελαιοκηλίδας (<http://www.thetoc.gr/koinwnia/article/apisteuto-300-m-apo-tis-aktes-tis-boulas-i-petrelaiokilida>).





**Εικόνα 4.9** Ρύπανση στη Γλυφάδα

(<https://www.liberal.gr/news/anupologisti-rupansi---2570-tonoi-kausima-ston-saroniko-/165289>)

Σε εξέλιξη βρισκόταν η διαδικασία άντλησης του φορτίου του πλοίου, εξειδικευμένα συνεργεία με βυτιοφόρα οχήματα επιχειρούσαν για τον καθαρισμό της ρύπανσης κατά μήκος του όρμου Κυνοσούρας, του κόλπου Σεληνίων, καθώς και σε σημεία της ακτογραμμής μεταξύ Σχολής Ναυτικών Δοκίμων έως τη μαρίνα Ζέας, παράλληλα με την τοποθέτηση πλωτών φραγμάτων. Οι μηχανισμοί αντιμετώπισης της θαλάσσιας ρύπανσης, ενισχύθηκαν από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό για την Ασφάλεια στη Θάλασσα “EMSA” (European Maritime Safety Agency) με το αντιρρυπαντικό σκάφος ΑΚΤΑΙΑ OSRV (Ανακοίνωση Λιμενικού Σώματος, 13/09/2017, 20:03, <http://www.hcg.gr/node/15945> ). (Τσιάτσιου, 2018)

Σύμφωνα με τον Δήμαρχο του Παλαιού Φαλήρου, Διονύση Χατζηδάκη εκείνες τις μέρες ο άνεμος ήταν βορειοδυτικός (<https://www.cnn.gr/news/perivallon/story/110563/saronikos-kai-meta-tin-petrelaiokilidati>).



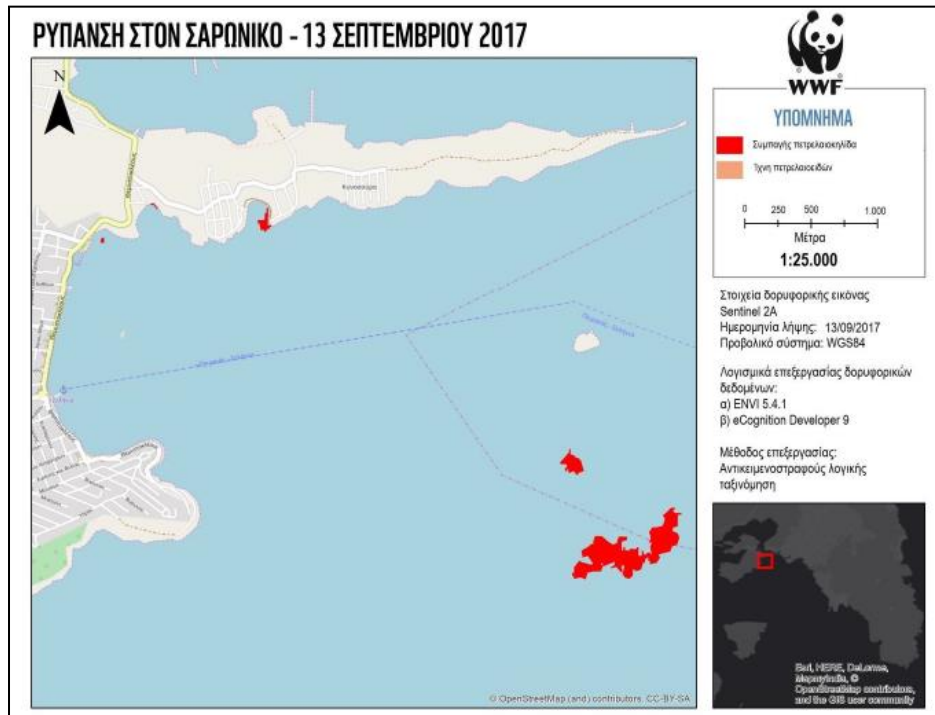
**Εικόνα 4.10** Η απάντληση στο πλοίο Αγία Ζώνη II

(<https://www.ant1news.gr/Economy/article/484275/new-anakoinosi-tis-etairias-toy-agia-zoni-ii>)

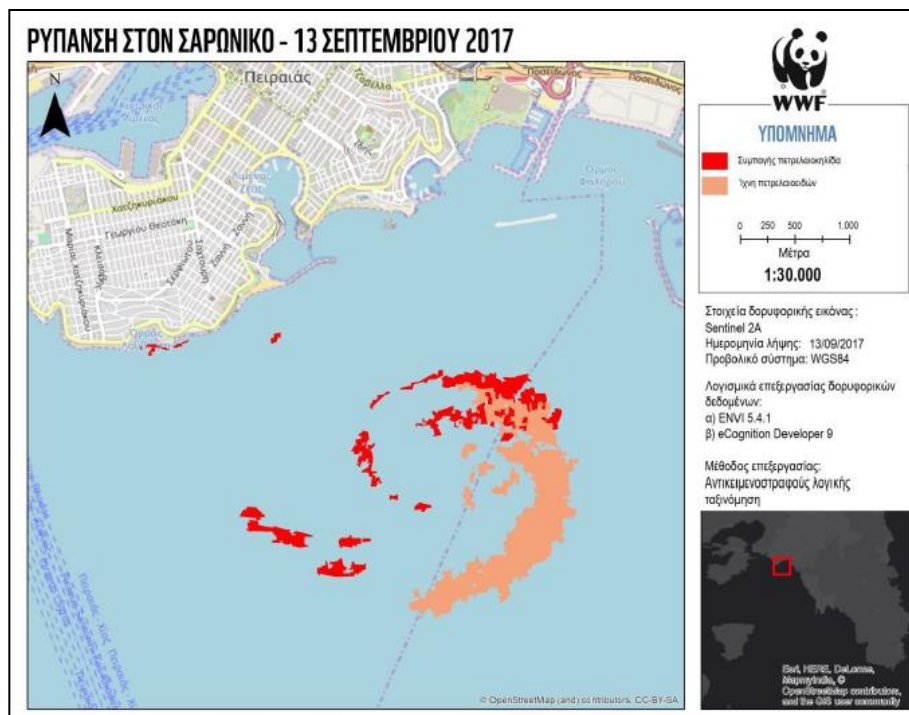
Ο Δήμαρχος Γλυφάδας Γιώργος Παπανικολάου επισήμανε πως άρχισε η άντληση πετρελαίου από το νερό με πλωτά μέσα και το απόγευμα η άντληση στις ακτές. Χαρακτηριστικά ανέφερε πως μόνο από την παραλία του Ζέρβα αντλήθηκαν 28 τόνοι πετρέλαιο (<http://www.thetoc.gr/koinwnia/article/apisteuto-300-m-apo-tis-aktes-tis-boulas-i-petrelaiokilida> ).

Σύμφωνα με το notiaerport.gr το βράδυ της Τετάρτης εντοπίστηκε κηλίδα έκτασης περίπου 5 στρεμμάτων, 3,2 μίλια ανοιχτά της Χερσονήσου του ΠΙΚΠΑ στη Βούλα (<http://www.onalert.gr/stories/aperanto-mauro-h-paraliaki-ews-th-boula-kommatia-apo-thn-petraiochlida/59348> ). (Τσιάτσιου, 2018)

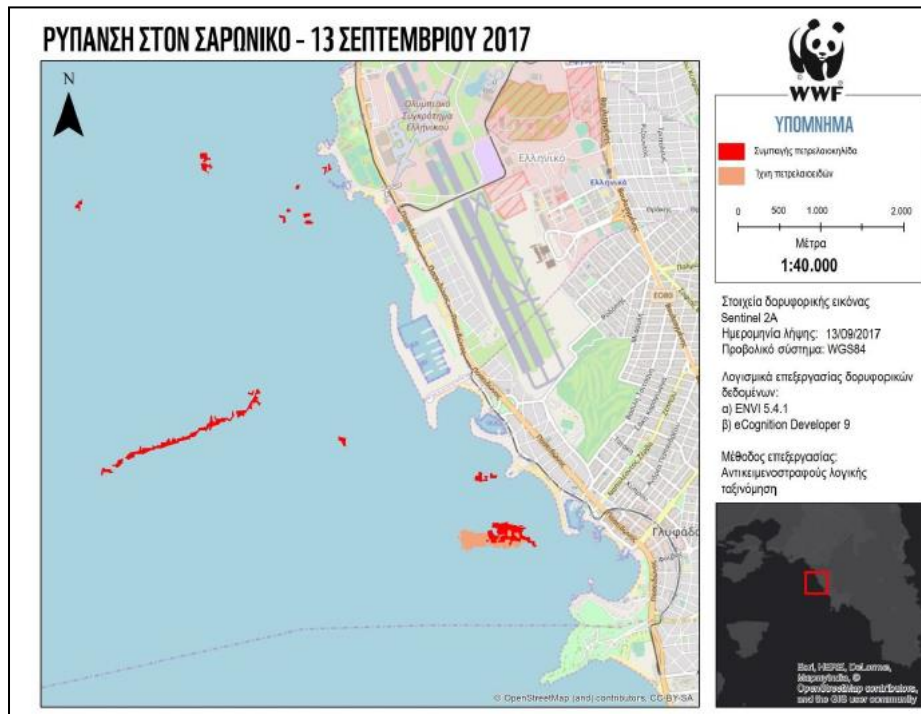
Παρακάτω φαίνεται η έκταση της ρύπανσης από την WWF Ελλάς. (WWF Ελλάς, 2017)



Εικόνα 4.11 Τροχιά πετρελαιοκηλίδας 13/09/2017  
(WWF Ελλάς, 2017)



Εικόνα 4.12 Τροχιά πετρελαιοκηλίδας 13/09/2017  
(WWF Ελλάς, 2017)



Εικόνα 4.13 Τροχιά πετρελαιοκηλίδας 13/09/2017  
(WWF Ελλάς, 2017)

#### Πέμπτη 14 Σεπτεμβρίου 2017

Για την αντιμετώπιση της εκτεταμένης ρύπανσης ξεκίνησε από νωρίς της Πέμπτης η τοποθέτηση 3 χιλιομέτρων πλωτών αντιρρυπαντικών φραγμάτων, από την άκρη της χερσονήσου της Πούντας (Χερσόνησος ΠΙΚΠΑ) με κατεύθυνση νότια προς την Αίγινα. Το φράγμα είχε ύψος 70 cm πάνω από το νερό ώστε να αποτρέπει κάθε πιθανή προσπέλαση της ρύπανσης προς τις ακτές. (<http://www.documentonews.gr/article/petrelaiokhlida-oa-sygkrinoyn-deigma-kaysimwn-kai-toy-blue-star-synexizetai-h-aporrypansh> )

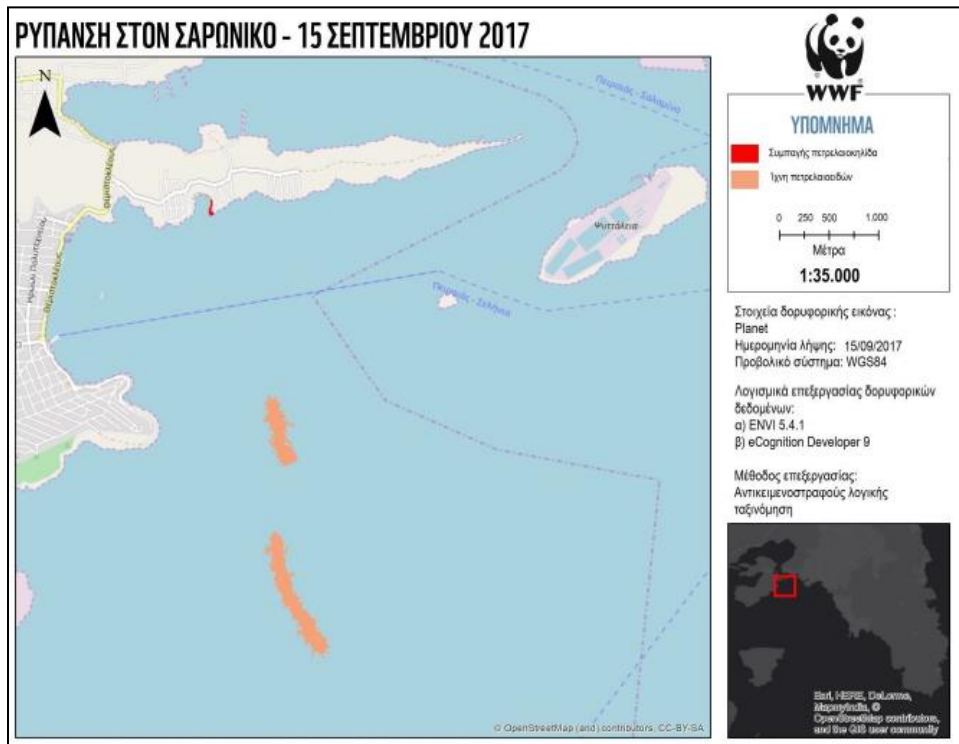
Επίσης ταυτόχρονα γίνεται επιχείρηση 13 ιδιωτικών, 4 σκαφών του λιμενικού σώματος, άλλα 3 τα οποία διέθεταν αντιρρυπαντικό εξοπλισμό, μαζί με το μεγάλο αντιρρυπαντικό σκάφος της EMSA, ΑΚΤΑΙΑ OSRV και 2 αεροσκάφη του Λιμενικού. Από σεριάς 8 με 10 συνεργεία συμμετείχαν στην επιχείρηση απορρύπανσης των ακτών (Ανακοίνωση Λιμενικού Σώματος, 14/09/2017, 18:07, <http://www.hcg.gr/node/15965> ).

#### Παρασκευή 15 Σεπτεμβρίου 2017

Εξειδικευμένο προσωπικό της απορρυπαντικής εταιρίας συνέχισε την επιχείρηση με πλωτά και χερσαία μέσα, τόσο στο σημείο βύθισης όσο και περιμετρικά του ναυαγίου. (<http://newpost.gr/ellada/629176/ploiokthths-oikologikhs-bombas-agia-zwnh-ii-ola-htan-nomima-to-ploio-eixe-epithewrththei-prin-apo-enamish-mhna> )

Παρακάτω φαίνεται η τροχιά της πετρελαιοκηλίδας 6 μέρες μετά από το ατύχημα.





Εικόνα 4.14 Τροχιά πετρελαιοκηλίδας 15/09/2017  
(WWF Ελλάς, 2017)



Εικόνα 4.15 Τροχιά πετρελαιοκηλίδας 15/09/2017  
(WWF Ελλάς, 2017)

## Σάββατο 16 Σεπτεμβρίου 2017

**14:15:** Με εντολή του Αρχηγείου Λιμενικού Σώματος-Ελληνικής Ακτοφυλακής αεροσκάφος του Λ.Σ. απογειώθηκε για επιτήρηση της θαλάσσιας περιοχής Σαρωνικού μεταξύ Άκρας Σουνίου και Ελληνικού. Στη θαλάσσια περιοχή ανοιχτά της ακτογραμμής αυτής δεν παρατηρήθηκε κανενός είδους θαλάσσια ρύπανση (<https://www.news247.gr/koinonia/rypansi-ston-saroniko-apantlisi-800-tonon-mazoyt-apo-to-ag-zoni-ii.6518660.html>).

**18:25:** Αεροσκάφος απογειώθηκε για επιτήρηση θαλάσσιας περιοχής Σαρωνικού, μεταξύ όρμων Βουλιαγμένης και νήσου Σαλαμίνας. Στο παραλιακό μέτωπο από τη Γλυφάδα μέχρι τον επιβατηγό λιμένα Πειραιά παρατηρήθηκαν μεμονωμένες και μικρού μεγέθους ζώνες ιριδισμού, ενώ δεν εντοπίστηκαν βαρέα πετρελαιοειδή (<https://www.news247.gr/koinonia/rypansi-ston-saroniko-apantlisi-800-tonon-mazoyt-apo-to-ag-zoni-ii.6518660.html>).

Πετρελαιοειδή εντοπίστηκαν μπροστά από την παραλία «Φλώρας Σεληνίων» τα οποία εγκλωβίστηκαν με πλωτό φράγμα από προσωπικό ιδιωτικής εταιρείας και περισυλλέγησαν, ενώ μπροστά από την παραλία τοποθετήθηκε 225 μέτρα πλωτό φράγμα (<https://www.news247.gr/koinonia/rypansi-ston-saroniko-apantlisi-800-tonon-mazoyt-apo-to-ag-zoni-ii.6518660.html>).

Από το φορτίο του ναυαγισμένου «Αγία Ζώνη II» αντλήθηκαν 500 m<sup>3</sup> βαρέως πετρελαίου (WWF Ελλάς, 2017).



## Κυριακή 17 Σεπτεμβρίου 2017

Τουλάχιστον 800 τόνοι μαζούτ έχουν απαντηθεί από το βυθισμένο δεξαμενόπλοιο «ΑΓΙΑ ΖΩΝΗ II» στον Σαρωνικό νότια της νήσου Αταλάντης (<https://www.news247.gr/koinonia/rypansi-ston-saroniko-apantlisi-800-tonon-mazoyt-apo-to-ag-zoni-ii.6518660.html>).

Στην περιοχή του Παλαιού Φαλήρου ποντίστηκε πλωτό φράγμα μήκους 200 μέτρων (<https://www.news247.gr/koinonia/saronikos-pano-apo-800-tonoi-mazoyt-echoyn-apantlithei-apo-to-ag-zoni-ii.6518660.html> ).

Στη θαλάσσια περιοχή αρμοδιότητας Α' Λιμενικού Τμήματος, έγινε έλεγχος και δεν βρέθηκαν ίχνη ρύπανσης. Στη θαλάσσια περιοχή μεταξύ Ψυττάλειας και εισόδου Λιμένα Πειραιά εντοπίστηκαν, διάσπαρτες πετρελαιοκηλίδες, μικρού μεγέθους που αντιμετωπίστηκαν (<https://www.news247.gr/koinonia/rypansi-ston-saroniko-apantlisi-800-tonon-mazoyt-apo-to-ag-zoni-ii.6518660.html> ).

### **Τρίτη 19 Σεπτεμβρίου 2017**

Μετά από 10 μέρες από το ατύχημα σε κάποιες οι ακτές της περιοχής του Σαρωνικού υπάρχει ακόμα πρόβλημα ρύπανσης, ενώ κάποιες έχουν καθαρίσει σε ικανοποιητικό βαθμό.

(<https://www.naftemporiki.gr/story/1277625/pos-ekselisontai-oi-ergasies-aporrupansis-ston-saroniko>)

Στη θαλάσσια περιοχή Ψυττάλειας και εισόδου Λιμένα Πειραιά εντοπίστηκαν διάσπαρτοι, μικρού μεγέθους ιριδισμοί, οι οποίοι αντιμετωπίστηκαν αμέσως.

Στην Ακτή Τζελέπη δεν βρέθηκαν ίχνη ρύπανσης όπως και στην περιοχή του Περάματος.

Στη Σαλαμίνα έγιναν εργασίες αντιρρύπανσης από προσωπικό ιδιωτικών εταιρειών, ενώ στις εργασίες συμμετείχαν τριάντα στελέχη του Πολεμικού Ναυτικού. Παρατηρήθηκαν διάσπαρτες κηλίδες πετρελαιοειδών στον Όρμο Κακής Βίγλας και Γυάλας, οι οποίες αντιμετωπίστηκαν.

Στη θαλάσσια περιοχή Ζέας δεν παρουσιάζεται επιφανειακή ρύπανση. Συνεχίστηκαν με εντατικούς ρυθμούς οι εργασίες αντιρρύπανσης από συνεργείο της αναδόχου εταιρείας στον “Όρμο Αφροδίτης” όπου παραμένει απορροφητικό φράγμα και λοιπά απορροφητικά υλικά. Μπροστά από την περιοχή της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων πραγματοποιήθηκε εκτεταμένος καθαρισμός, ενώ συνεχίστηκαν οι εργασίες καθαρισμού με απορροφητικά υλικά.

Στη θαλάσσια λουτρική εγκατάσταση “ΦΡΕΑΤΤΥΔΑ”, πραγματοποιήθηκε καθαρισμός του αιγιαλού κατά μήκος της βραχώδους ακτογραμμής. Η γενική εικόνα της Πειραιϊκής κρίνεται πολύ ικανοποιητική.

Στη θαλάσσια περιοχή Παλαιού Φαλήρου η κατάσταση παρουσιάζεται σταθερά βελτιωμένη. Παραμένουν τα πλωτά φράγματα που έχουν τοποθετηθεί στην περιοχή, ενώ καθαρισμό επιχείρησε συνεργείο τεσσάρων ατόμων στη θέση Μπάτη Αλίμου.

Στη θαλάσσια περιοχή του Ελληνικού η κατάσταση παρουσιάζεται σταθερή και ικανοποιητική. Στην παραλία του Άγιου Κοσμά επιχείρησε ιδιωτικό συνεργείο δεκατεσσάρων ατόμων. Μπροστά από το ΕΛΚΕΘΕ επιχείρησαν συνεργείο ιδιωτικής εταιρείας έξι ατόμων και δύο βυτιοφόρα οχήματα, ενώ στην περιοχή του Ναυτικού Ομίλου Αιγυπτιωτών (Ε.Ν.Ο.Α.) επιχείρησαν δύο βυτιοφόρα οχήματα αναδόχου εταιρείας, συνεργείο καθαρισμού από την ακτή είκοσι εννέα ατόμων και παραμένει τοποθετημένο πλωτό φράγμα.

Στην θαλάσσια περιοχή της Γλυφάδας (2η-3η -4η μαρίνα) η κατάσταση παρουσιάζεται βελτιωμένη. Επιχείρησαν συνεργείο συνολικά σαράντα τριών ατόμων της αναδόχου εταιρείας, δέκα άτομα του Δήμου Γλυφάδας, δώδεκα εθελοντές και σαράντα Δόκιμοι Λιμενοφύλακες.



Στην εγκατάσταση “ARC-BALUX” η κατάσταση παρουσιάζεται σταθερή. Επιχείρησαν είκοσι πέντε άτομα ιδιωτικής εταιρείας, τρία βυτία και πέντε αντλίες. Στα ανοιχτά του “ARC-BALUX” επιχείρησαν δύο αντιρρυπαντικά σκάφη Λ.Σ. και ένα αντιρρυπαντικό της αναδόχου εταιρείας.

Στη θαλάσσια περιοχή Βάρης – Βούλας – Βουλιαγμένης η κατάσταση κρίνεται σταθερή και ικανοποιητική. Στο Μεγάλο και Μικρό Καβούρι συνεχίστηκαν ανά τακτά χρονικά διαστήματα οι εργασίες καθαρισμού των ακτών, από συνεργεία του Δήμου Βάρης-Βούλας- Βουλιαγμένης. Στην περιοχή της Βουλιαγμένης δεν παρατηρήθηκε ρύπανση, ωστόσο παραμένουν προληπτικά τα πλωτά φράγματα κατά μήκος της ακτογραμμής της λουτρικής εγκατάστασης “ASTIRBEACH” και εντός του ξενοδοχειακού συγκροτήματος “ΑΣΤΕΡΑΣ”.

Στη θαλάσσια περιοχή Λαγονησίου δεν παρουσιάζεται θαλάσσια ρύπανση, ενώ παραμένουν τα πλωτά φράγματα στο ξενοδοχειακό συγκρότημα “GRAND RESORT”.

Σταμάτησε η απάντληση των καυσίμων από το βυθισμένο Δ/Ξ «ΑΓΙΑ ΖΩΝΗ II» από το πλοίο που την εκτελούσε. Πλην όμως, είναι σε πλήρη εξέλιξη όλες εκείνες οι ενέργειες που απαιτούνται, προκειμένου να συνεχιστεί η απάντληση των καυσίμων και σύμφωνα με την ανάδοχο εταιρεία, την Τετάρτη 20-09-2017, νέο πλοίο ήταν να συνεχίσει τις εργασίες απάντλησης.

Με βάση την ενημέρωση της εταιρείας που έχει αναλάβει την απάντληση του φορτίου από το Δ/Ξ «ΑΓΙΑ ΖΩΝΗ II», είχαν απαντηθεί περίπου μέχρι στιγμής, 1550m<sup>3</sup> φορτίου.

Στις εργασίες αντιρρύπανσης συνδράμει την ανάδοχο εταιρεία το ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. και το Τμήμα Βιοχημικής του Πανεπιστημίου της Κρήτης. Επισημαίνεται πως δεν γίνεται η παραμικρή χρήση χημικών ουσιών παρά μόνο χρήση μηχανικών μέσων ([www.yen.gr](http://www.yen.gr)).

Από το μόλο Αγίου Νικολάου Σεληνίων μέχρι και την παραλία «ΦΛΩΡΑΣ ΣΕΛΗΝΙΩΝ» τοποθετήθηκε πλωτό φράγμα, 245 μέτρων και μπροστά από την παραλία του Ε.Ν.Ο.Α. και την παραλία ΕΛΚΕΘΕ ακόμη ένα φράγμα μήκους 500 μέτρων.

### **Πέμπτη 28 Σεπτεμβρίου 2017**

Η εικόνα είναι σαφώς βελτιωμένη και δεν παρουσιάζεται επιφανειακή ρύπανση, σύμφωνα με το αρχηγείο του Λιμενικού Σώματος. Την ίδια ώρα, από το δεξαμενόπλοιο «Siros» άρχισε και πάλι το Σάββατο η απάντληση των πετρελαιοειδών από το βυθισμένο πλοίο «ΑΓ. ΖΩΝΗ II».

Σύμφωνα με την τελευταία ενημέρωση από το ΛΣ-Ελληνική Ακτοφυλακή, στις εργασίες απορρύπανσης από τη Σαλαμίνα έως τη Γλυφάδα επιχειρούν από θαλάσσης έξι αντιρρυπαντικά σκάφη του λιμενικού και έξι ιδιωτικά, δεκάδες εθελοντές και εξειδικευμένα συνεργεία της αναδόχου εταιρείας με συνολικά 289 άτομα.

Στη Σαλαμίνα δεν υπήρξε επιφανειακή ρύπανση και εκτελέστηκε καθαρισμός των ακτών στην ευρύτερη περιοχή του όρμου Σεληνίων – Λιμνιώνα – Κυνοσούρας, από προσωπικό 135 ατόμων ιδιωτικών εταιρειών, με 7 πλυστικά μηχανήματα. Επίσης, δύτες έλεγξαν τον βυθό και σκάφη του Λ.Σ – ΕΛ.ΑΚΤ. τις ανατολικές και νότιες ακτές της νήσου. ([https://www.alfavita.gr/koinonia/232731\\_beltiomeni-i-eikona-ston-saroniko-xanarhise-i-apantlisi](https://www.alfavita.gr/koinonia/232731_beltiomeni-i-eikona-ston-saroniko-xanarhise-i-apantlisi))

Στη θαλάσσια περιοχή Πειραιϊκής δεν παρουσιάστηκε θαλάσσια ρύπανση. Στο λιμανάκι της Αφροδίτης, εκτελέστηκαν εργασίες καθαρισμού με απορροφητικά υλικά, ενώ στη θαλάσσια λουτρική εγκατάσταση

«ΦΡΕΑΤΤΥΔΑ», πραγματοποιήθηκε καθαρισμός του αιγιαλού και της βραχώδους ακτογραμμής από συνεργείο ιδιωτικής εταιρείας.

Στη θαλάσσια περιοχή Παλαιού Φαλήρου η κατάσταση στις ακτές παρουσιάστηκε βελτιωμένη. Επιχείρησαν συνολικά 36 άτομα της αναδόχου εταιρείας, με πλυστικά και πιεστικά μηχανήματα.

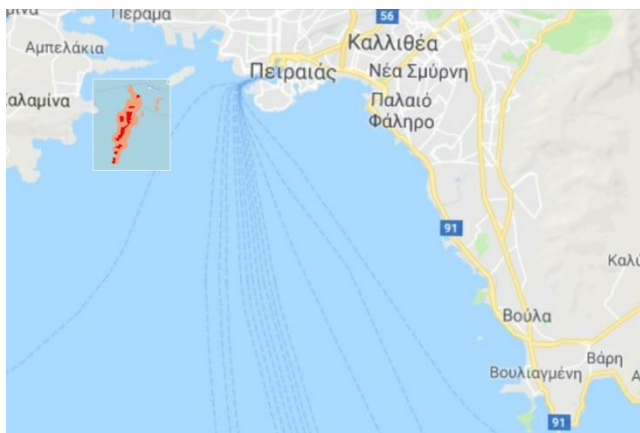
Στη θαλάσσια περιοχή του Αλίμου, στο Α' και Β' Αλίπεδο Αλίμου επιχείρησαν 18 άτομα ιδιωτικής εταιρείας στον καθαρισμό των ακτών. Μπροστά από τις παραλίες των Δήμων Αλίμου και Ελληνικού (και ειδικότερα της Παλιάς Φαντασίας, του Ελληνικού Ναυτικού Ομίλου Αιγυπτιωτών, του ΕΛΚΕΘΕ, του Αγίου Κοσμά και του Αγίου Αλεξάνδρου), επιχείρησαν συνολικά 39 άτομα ιδιωτικού συνεργείου με πιεστικά μηχανήματα, αντλίες και μπετονιέρα επεξεργασίας άμμου με αποτέλεσμα την βελτιωμένη κατάσταση.

Στη θαλάσσια περιοχή Γλυφάδας (1η-2η-3η-4η μαρίνα) παρουσιάστηκε βελτιωμένη κατάσταση και επιχείρησε συνεργείο με 3 πλυστικά μηχανήματα, αποτελούμενο από 40 άτομα, μεταξύ των οποίων άτομα της αναδόχου εταιρείας και εθελοντές.

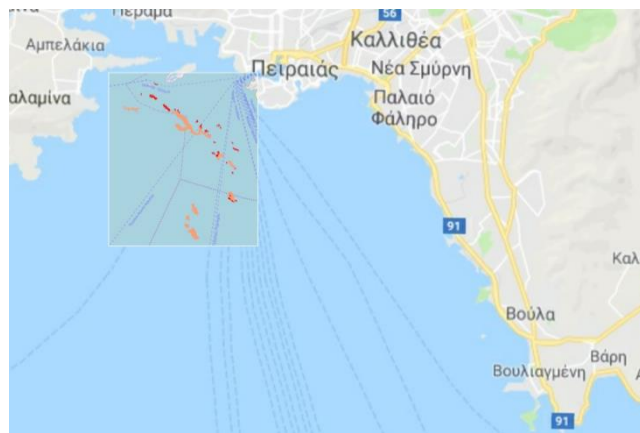
Στην εγκατάσταση «Αστέρας Γλυφάδας» η κατάσταση παρουσιάστηκε βελτιωμένη. Επιχείρησε συνεργείο 27 ατόμων της αναδόχου εταιρείας, πραγματοποιήθηκαν εργασίες από 6 πλυστικά μηχανήματα και εντός της ημέρας επιχείρησαν επιπλέον 3 βυτιοφόρα οχήματα, 2 αντλίες εκ των οποίων η μία ήταν του Πολεμικού Ναυτικού, τηλεκατευθυνόμενο φράγμα και συσκευή νέων τεχνολογιών. Παράλληλα σκάφη απορρύπανσης του Λιμενικού Σώματος – Ελληνικής Ακτοφυλακής και της αναδόχου εταιρείας έλεγξαν την περιοχή.

Στη θαλάσσια περιοχή Βάρης – Βούλας – Βουλιαγμένης και Λαγονησίου δεν παρατηρήθηκε θαλάσσια ρύπανση, ενώ στο ξενοδοχειακό συγκρότημα «ΑΣΤΕΡΑΣ» Βουλιαγμένης, εκτελέστηκαν εργασίες καθαρισμού των ακτών από συνεργείο ιδιωτικής εταιρείας.

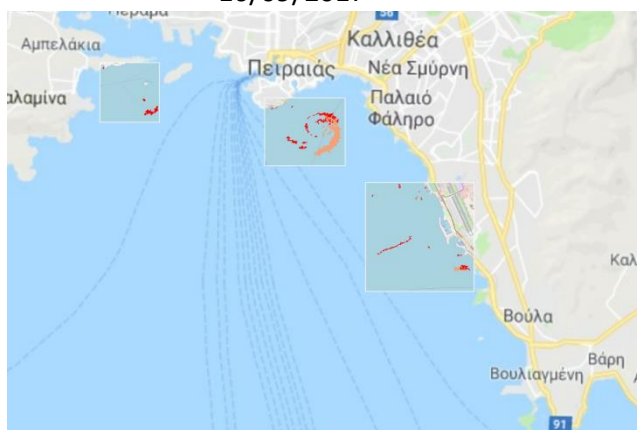
Έγινε επιχείρηση από 4 σκάφη απορρύπανσης του Λιμενικού Σώματος – Ελληνικής Ακτοφυλακής, 2 περιπολικά σκάφη του Λιμενικού Σώματος – Ελληνικής Ακτοφυλακής, 7 ιδιωτικά σκάφη απορρύπανσης, συμπεριλαμβανομένου και του σκάφους «ΑΚΤΕΑ» της EMSA, καθώς και λοιπά σκάφη της αναδόχου εταιρείας. (Τσιάτσου, 2018)



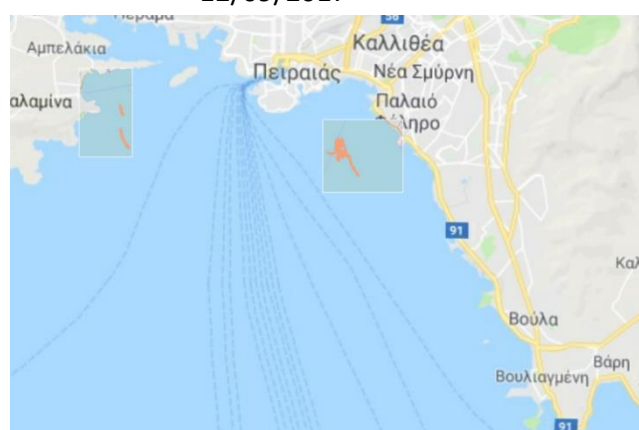
10/09/2017



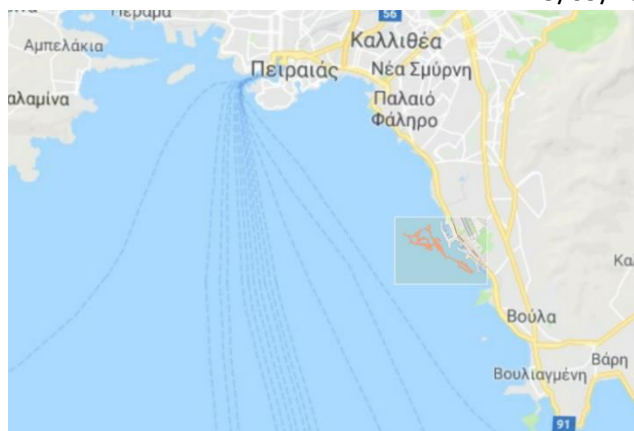
12/09/2017



13/09/2017



15/09/2017



16/09/2017

**Εικόνα 4.17** Τροχιά πετρελαιοκηλίδας ανά μέρα τοποθετημένη στην ευρύτερη περιοχή του Σαρωνικού κόλπου. *(WWF Ελλάς, 2017)*

#### 4.2.2 Η ανέλκυση του δεξαμενόπλοιου «ΑΓΙΑ ΖΩΝΗ II»

Οι απαιτούμενες ενέργειες για την ανέλκυση του δεξαμενόπλοιου «Αγία Ζώνη II» ξεκίνησαν στις 27 Οκτωβρίου 2017 με την επιστολή της αρμόδιας εταιρείας καθαρισμού στο Υπουργείο Ναυτιλίας. Μέχρι εκείνη την μέρα είχαν απαντηθεί περίπου 2.535 μίγματα πετρελαίου από το βυθισμένο δεξαμενόπλοιο. Η αρμόδια εταιρεία καθαρισμού στην επιστολή της είχε κάνει σαφές ότι κατά την ανέλκυση του δεξαμενοπλοίου θα παρθούν όλα τα μέτρα με χρήση αντιρρυπαντικών μέσων και εξοπλισμό έτσι ώστε να καταπολεμηθεί οποιαδήποτε πιθανή διαρροή του ναυαγίου κατά τη διάρκεια της ανέλκυσης. (<http://www.iefimerida.gr/news/372107/xekinoy-n-oi-energeies-gia-tin-anelkysi-toy-dexamenoploioy-agia-zoni-ii>)

Στις 25 Νοεμβρίου ξεκίνησε η ανέλκυση του ναυαγίου «Αγία Ζώνη II», αλλά σταμάτησε καθώς το δεξαμενόπλοιο έχανε αέρα από τις δεξαμενές του, γεγονός που δυσκόλεψε την επιχείρηση. Για την ανέλκυση του απαραίτητη είναι η εισροή αέρα στις δεξαμενές του πλοίου έτσι ώστε να ανέβει πιο εύκολα στην επιφάνεια. (<https://www.protothema.gr/greece/article/735248/ebloki-stin-anelkusi-tou-agia-zoni-ii/>)



**Εικόνα 4.18** Κατάσταση «Αγία Ζώνη II» στις 25/11/2017

Στις 29 Νοεμβρίου 2017 ολοκληρώθηκε η ανέλκυση του «Αγία Ζώνη II». Το πλοίο ρυμουλκήθηκε στα ναυπηγεία στα Αμπελάκια Σαλαμίνας με τη συνοδεία απορρυπαντικών σκαφών αλλά και από πλωτά του Λιμενικού Σώματος. Στο σημείο όπου ρυμουλκήθηκε τοποθετήθηκαν πλωτά φράγματα για προληπτικούς λόγους. (<https://www.kathimerini.gr/936888/article/epikairothta/ellada/oloklhrw8hke-h-anelkysh-toy-de3amenoploioy-agia-zwnh-ii>)





Εικόνα 4.19 Ανέλκυση «Αγία Ζώνη II»

#### 4.2.3 Έκθεση ΑΣΝΑ – Οκτώβρης 2018

Πρόκειται για την έκθεση 111/2018 του Γ' Ανακριτικού Συμβουλίου Ναυτικών Ατυχημάτων (ΑΣΝΑ) <https://www.kathimerini.gr/1039667/article/epikairothta/ellada/h-wra-ths-alh8eias-gia-to-nayagio-toy-agia-zwnh> για το ναυάγιο η οποία ολοκληρώθηκε τον Οκτώβρη του 2018. Η έκθεση αυτή ισχυρίζεται: « για τη βύθιση του πλοίου, που προκάλεσε μεγάλης έκτασης ρύπανση σε όλη την περιοχή του Αργοσαρωνικού, υπάρχουν ενδείξεις, από τις οποίες συμπεραίνεται ότι συγκεκριμένες ενέργειες συντελέστηκαν βάσει σχεδίου προκειμένου να αποκομιστεί οικονομικό όφελος, όπως η λήψη της ασφαλιστικής αποζημίωσης και των ειδικών αποζημιώσεων για το κόστος των εργασιών, υλικών και μέσων απορρύπανσης από το Πράσινο Ταμείο».

Σύμφωνα με την έκθεση του ΑΣΝΑ, η βύθιση του δεξαμενόπλοιου οφείλεται σε «ενέργεια που έλαβε χώρα επί του πλοίου» και αναφέρεται στο άνοιγμα «των επιστομίων θαλάσσης/ερματισμού», στον τρόπο διαρροής πετρελαίου στη θάλασσα, στην αποφυγή ενημέρωσης των λιμενικών αρχών, όπως επίσης και στην ανάθεση των εργασιών απορρύπανσης από την πλοιοκτήτρια εταιρεία σε συγκεκριμένη εταιρεία, η οποία στη συνέχεια με ιδιωτικό συμφωνητικό ανέθεσε μεγάλο τμήμα του σε τρίτη εταιρεία, και ειδικότερα το έργο της θαλάσσιας απορρύπανσης και του καθαρισμού των ακτών.

Το ΑΣΝΑ συνεχίζει και δηλώνει πως «τα συμφέροντα που εξυπηρετήθηκαν, εν προκειμένω, προκύπτουν καταφανέστατα από τα οικονομικά οφέλη που εξήγαγαν από τη διαχείριση της αντιρρύπανσης και απορρύπανσης οι εταιρείες στις οποίες ο πλοιοκτήτης ανέθεσε τις επιχειρήσεις αυτές». «Ενόψει τούτων, το περιουσιακό όφελος συνίσταται αφενός στη λήψη της ασφαλιστικής αποζημίωσης και αφετέρου στην αποκόμιση από το Πράσινο Ταμείο των ειδικών αποζημιώσεων για το κόστος των εργασιών, υλικών και μέσων απορρύπανσης», υπογραμμίζει και προσθέτει ότι «επομένως, υπάρχουν αποχρώσεις ενδείξεις» βάσει των οποίων συμπεραίνεται ότι οι ενέργειες των κατονομαζομένων στην έκθεση προσώπων

«συντελέσθηκαν βάσει σχεδίου σε συνεργασία με τις εταιρείες αυτές προκειμένου να αποκομίσουν οικονομικό όφελος». <https://www.kathimerini.gr/1039667/article/epikairothta/ellada/h-wra-ths-alh8eias-gia-to-nayagio-toy-agia-zwnh>

#### 4.2.4 Το πόρισμα του ΕΜΠ – Απρίλιος 2019

Σύμφωνα με το πόρισμα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου ([www.lifo.gr](http://www.lifo.gr)) μια ισχυρή έκρηξη στη δεξιά πλευρά του δεξαμενόπλοιου «Αγία Ζώνη II», ευθύνεται για τη βύθιση του. Οι ερευνητές αποκλείουν το ενδεχόμενο ναυτικού ατυχήματος λόγω φθοράς, αφού όλα τα στοιχεία συγκλίνουν στο σενάριο της δολιοφθοράς. Το πόρισμα των 330 σελίδων που συνέταξε το Τμήμα Ναυπηγικής και Τεχνολογίας του ΕΜΠ προστέθηκε στην ογκωδέστατη δικογραφία που έχει σχηματίσει η Εισαγγελία Πειραιά.

Το επιστημονικό κλιμάκιο του ΕΜΠ επιθεώρησε ενδελεχώς το ναυάγιο και τα συμπεράσματα που έβγαλε, ενισχύουν τις αντίστοιχες διαπιστώσεις του Γ' Ανακριτικού Συμβουλίου Ναυτικών Ατυχημάτων για δολιοφθορά. Οι δύο ναυτικοί που επέβαιναν εκείνη την ώρα στο πλοίο βούτηξαν στα νερά του Σαρωνικού για να σωθούν. Τρεις ώρες αργότερα το πλοίο βρισκόταν εξ ολοκλήρου στον βυθό. «Από όλες τις εκθέσεις επιθεωρήσεως καθώς και τα πιστοποιητικά του πλοίου που ελέγχθηκαν ουδεμία έλλειψη ή παρατυπία δεν εντοπίστηκε. Το πλοίο συντηρείτο ενδελεχώς και ήταν αξιόπλοο», αναφέρεται στο πόρισμα του ΕΜΠ.

Οι ερευνητές απορρίπτουν την πιθανότητα να κατακλύστηκε το μηχανοστάσιο του πλοίου από διαρροή λόγω φθοράς του πλοίου (π.χ στο δίκτυο θαλάσσης ή στα ελάσματα των πλευρών και του πυθμένα). Επίσης αποκλείστηκε η πιθανότητα κατάκλισης του μηχανοστασίου λόγω λειτουργίας των αντλιών θαλάσσης του πλοίου. Αντίθετα, από τα ευρήματα της μελέτης των ελασμάτων του μεγάλου ρήγματος στη δεξιά πλευρά του πλοίου και από συγκριτική αντίστοιχη μελέτη υλικού από έλασμα που βρέθηκε μακριά από το ρήγμα, συμπεραίνεται πως «η επίμαχη περιοχή φέρει χαρακτηριστικά αστοχίας που σχετίζονται με θραύση εξαιτίας πολύ μεγάλου ρυθμού παραμόρφωσης των ελασμάτων της, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από μελέτη της διεθνούς βιβλιογραφίας». Οι επιστήμονες κάνουν λόγο για «εκρηκτική φόρτιση».

«Εγκάρσιες άνισες παραμορφώσεις των τμημάτων των ελασμάτων εκατέρωθεν μιας ρωγμής προς το εσωτερικό του πλοίου. Ψαθυρές αστοχίες, τόσο κατά μήκος συγκολλήσεων όσο και ανυποστήρικτων ελασμάτων, μέσω εμφάνισης ευθύγραμμων ρωγματώσεων. Δημιουργία λωρίδων υλικού, δημιουργία αυτόνομων θραυσμάτων, απομείωση πάχους των ελασμάτων και αύξηση της σκληρότητας του υλικού τους. Παραμόρφωση κόκκων υλικού και σημαντικές αλλαγές στη μικροδομή μέσω της εμφάνισης χαρακτηριστικών ζωνών αδιαβατικής διάτμησης (λευκές ζώνες). Η ταυτόχρονη παρουσία των παραπάνω ευρημάτων στις επιφάνειες αστοχίας, σύμφωνα με όσα γνωρίζουν οι συγγραφείς της παρούσας έκθεσης, παραπέμπει σε εκρηκτική φόρτιση. Μετά από τη μελέτη της ευστάθειας και της κατάκλισης του πλοίου προέκυψε ότι αυτό βυθίστηκε μετά από τη δημιουργία ρήγματος μέσω του οποίου κατακλύστηκαν οι δεξιές πλευρικές δεξαμενές έρματος Νο3 και Νο4, με αποτέλεσμα το πλοίο να λάβει κλήση 25.780 και έμπρυμνη διαγωγή 1.308 m. Λόγω της κλίσης και της διαγωγής του πλοίου εισήλθε νερό από το πρυμναίο φινιστρίνι της δεξιάς πλευράς, το οποίο εν συνεχεία οδηγήθηκε εντός του μηχανοστασίου το οποίο και κατέκλυσε. Μετά την κατάκλιση και του μηχανοστασίου, το πλοίο έχασε παντελώς την ευστάθεια του και βυθίστηκε». ([www.lifo.gr](http://www.lifo.gr))



### 4.3 Επιπτώσεις του ατυχήματος

Ύστερα από την θαλάσσια ρύπανση λόγω της πετρελαιοκηλίδας που προκλήθηκε από το δεξαμενόπλοιο «Αγία Ζώνη II», το Υπουργείο Υγείας με Υπουργική Απόφαση του έτους 2017 ανακοινώνει τις ακτές όπου απαγορεύεται η κολύμβηση (Πίνακας 4.2). Στην Υπουργική απόφαση επισημαίνεται ότι η κατάσταση αυτή είναι δυναμική και ότι η απόφαση αυτή μπορεί να τροποποιηθεί. (<https://www.news247.gr/koinonia/saronikos-se-poes-aktes-apagoreyetai-to-kolympi-nea-odigia-toy-ypourgeiou-ygeias.6519051.html>)

Πίνακας 4.2 Απαγορευμένες ακτές κολύμβησης

ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ	ΔΗΜΟΣ	ΑΚΤΕΣ ΚΟΛΥΜΒΗΣΗΣ
ΠΕΙΡΑΙΑ & ΝΗΣΩΝ	ΣΑΛΑΜΙΝΑΣ	Στον όρμο Λιμνιώνα κατά μήκος της ακτής εκατέρωθεν του πέτρινου θεάτρου Σεληνίων, έμπροσθεν του ιστιοπλοϊκού ομίλου Σεληνίων και κατά μήκος της ακτογραμμής επί της οδού Ακτής Θεμιστοκλέους μέχρι την εκκλησία του Αγίου Νικολάου.
	ΠΕΙΡΑΙΑ	1. Από την ακτή κολύμβησης πλησίον της σχολής Ναυτικών Δοκίμων (Ακτή Θεμιστοκλέους 334) μέχρι και την παραλία της Φρεατύδας. 2. Στις ακτές κολύμβησης της περιοχής "Βοτσαλάκια"
ΝΟΤΙΟΥ ΤΟΜΕΑ ΑΘΗΝΑΣ	ΑΛΙΜΟΥ	Σε όλες τις ακτές κολύμβησης
	ΠΑΛΑΙΟΥ ΦΑΛΗΡΟΥ	Σε όλες τις ακτές κολύμβησης
	ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ-ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗΣ	Σε όλες τις ακτές κολύμβησης
	ΓΛΥΦΑΔΑΣ	Σε όλες τις ακτές κολύμβησης

Το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας στις 17 Οκτωβρίου 2017 πραγματοποίησε συνεδρίαση της γνωμοδοτικής Επιτροπής Αντιμετώπισης Περιβαλλοντικών Ζημιών (ΕΑΠΕΖ), με θέμα τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την πετρελαιοκηλίδα του «Αγία Ζώνη II». Σύμφωνα με τις μετρήσεις που είχε πραγματοποιήσει το ΕΛΚΕΘΕ, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάστηκαν στην συνεδρίαση έδειχναν πως ακόμα ήταν δύσκολη η τεκμηρίωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Συγκεκριμένα, η κατάσταση της υδάτινης στήλης χαρακτηρίστηκε ως «μέτρια – καλή», ενώ δεν υπήρχε εικόνα για την κατάσταση του βυθού και τις βενθικές κοινότητες.

Υψηλές συγκεντρώσεις ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων καταγράφηκαν στις 3/10 στη θάλασσα του Αγίου Κοσμά, εγκαταστάσεις ΕΛΚΕΘΕ, παραλίες Γλυφάδας 4 και 5, Σελήνια και Κυνόσουρα Σαλαμίνας (WWF Ελλάς, 2017). Επίσης δειγματοληψίες (με δείγμα νερού από τις παράκτιες ζώνες) πραγματοποιήθηκαν από το ΕΛΚΕΘΕ και στις 10 και 23 Οκτωβρίου 2017 όπου έδειξαν υψηλές τιμές πετρελαϊκών υδρογονανθράκων. Οι τελευταίες δειγματοληψίες έγιναν στις 04 Δεκεμβρίου 2017 και στις 21 Μαρτίου 2018, όπου οι ποσότητες είναι αισθητά μειωμένες. Χαρακτηριστικά κάποιες μετρήσεις σε κάποιες περιοχές φαίνονται στον Πίνακα 4.3. (ΕΛΚΕΘΕ, 2018)

**Πίνακας 4.3** Μετρήσεις Δειγματοληψιών (ΕΛΚΕΘΕ, 2018)

Τοποθεσία	Ημερομηνία Δειγματοληψίας	Ποσότητα (μg/L)
Κυνοσούρα	29/9/2017	>1500
	4/12/2018	2.5
	21/3/2018	3.1
Σελήνια Ι	29/9/2017	>1500
	4/12/2018	2.9
Τύμβο Θεμιστοκλέους	10/10/2017	1200
	23/10/2017	344
Φλοίσβος	22/9/2017	34.2
	10/10/2017	100
	23/10/2017	14.1
Άγιος Κοσμάς	22/9/2017	529
	3/10/2017	159
	23/10/2017	269
	4/12/2017	6.5
Εγκαταστάσεις ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.	18/9/2017	>1500
	3/10/2017	110
	4/12/2017	2.4
Φάρος Ακρωτήρι	18/9/2017	>1500
	10/10/2017	3.2
Ναυτικός Όμιλος Αιγυπτιωτών	23/10/2017	284
	4/12/2017	7.0
Παραλία Γλυφάδας 2	18/9/2017	>1500
	3/10/2017	5.8
Παραλία Γλυφάδας 3	18/9/2017	352
	3/10/2017	2.9
Παραλία Γλυφάδας 4	18/9/2017	>1500
	22/9/2017	>1500
	3/10/2017	331
	23/10/2017	61.4
	4/12/2017	6.3
Παραλία Γλυφάδας 5	18/9/2017	>1500
	22/9/2017	>1500
	3/10/2017	85.5
	23/10/2017	40.9
	4/12/2017	Δεν Ανιχνεύτηκε
Ασκληπιείο Βούλας	18/9/2017	139
	3/10/2017	Δεν Ανιχνεύτηκε

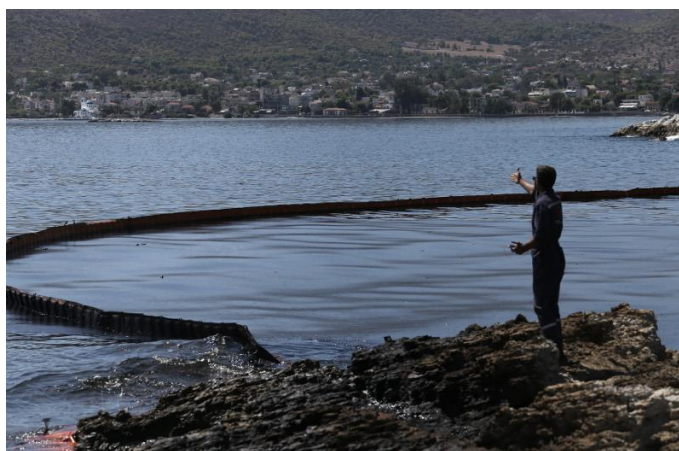
Σύμφωνα με τις μετρήσεις του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. και τα συμπεράσματα τις επιστημονικής έκθεσης, όσον αφορά τους ολικούς πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες, στους 37 από τους 56 παράκτιους σταθμούς οι συγκεντρώσεις τους κυμάνθηκαν σε φυσιολογικά επίπεδα σε κάθε χρονική περίοδο δειγματοληψίας. Αντίθετα, έντονη επιβάρυνση από πετρελαιοειδή παρατηρήθηκε αρχικά (Σεπτέμβριος 2017) στις περιοχές Ελληνικού, Γλυφάδας, Σεληνίων και Κυνόσουρας. Μικρότερη επιβάρυνση από πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες παρατηρήθηκε επίσης στην περιοχή του Φλοίσβου (έως τις 10/10/2017), στο Ασκληπιείο Βούλας (στις 18/09/2017), στο Μεγάλο Καβούρι (στις 18/09/2017), στην πλαζ Βουλιαγμένης

(στις 18/09/2017) και στο Μαύρο Λιθάρι Αναβύσσου (στις 18/09/2017) καθώς και τοπικά εντός του Τύμβου Θεμιστοκλέους στον Πειραιά. Σε κάποιες από τις περιπτώσεις αυτές καταγράφηκαν επίσης τιμές μεγαλύτερες της μέγιστης επιτρεπόμενης συγκέντρωσης για τους ΠΑΥ βενζο(α)πυρένιο και βενζο(ghi)περυλένιο.



**Εικόνα 4.20** Ρύπανση στη Γλυφάδα

[\(https://www.mag24.gr/eikones-apo-drone-sti-glyfada-oikologiki-vomva-mia-anasa-apo-ta-spitia-2/\)](https://www.mag24.gr/eikones-apo-drone-sti-glyfada-oikologiki-vomva-mia-anasa-apo-ta-spitia-2/)



**Εικόνα 4.21** Ρύπανση στη Σαλαμίνα

<https://www.eleftheriaonline.gr/ellada-kosmos/koinonia/item/134003-oi-epiptoseis-apo-ti-rypansi-tou-saronikoy>

Με την πάροδο του χρόνου τα επίπεδα ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων μειώθηκαν συστηματικά και στις 02/11/2017 αλλά και στις 04/12/2017 και 19/01/2018 καταγράφηκαν σε φυσιολογικά επίπεδα, ενώ και οι τιμές των ΠΑΥ καταγράφηκαν εντός ορίων σε όλες τις θέσεις δειγματοληψίας. Ελαφρά αυξημένη τιμή ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων παρατηρήθηκε στο Ναυτικό Όμιλο Αιγυπτιατών και στο Μπάτη στις 19/01/2018 (μετά από έντονη θαλασσοταραχή), με τις τιμές να καταγράφονται σε φυσιολογικά επίπεδα στις 21/03/2018. Όσον αφορά τον ανοικτό Σαρωνικό κόλπο, κατά τις ημερομηνίες δειγματοληψίας υδάτων (21-22/09/2017 και 13-14/11/2017) που πραγματοποιήθηκαν από το επιφανειακό στρώμα του θαλασσινού νερού και διάφορα βάθη στους 14 σταθμούς δειγματοληψίας δεν

καταγράφηκε επιβάρυνση από πετρελαιοειδή, με τις συγκεντρώσεις ολικών πετρελαϊκών αλλά και πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων να κυμαίνονται σε φυσιολογικά επίπεδα.

Όσον αφορά τα ιζήματα στον ανοικτό Σαρωνικό κόλπο πραγματοποιήθηκαν τρεις δειγματοληψίες (21-22/09/2017, 13-14/11/2017 και 23-24/01/2018) σε δίκτυο παρακολούθησης που περιέλαβε 22 σταθμούς, σε βάθη από 22 έως 92 μέτρα, ενώ συνελέγησαν συνολικά 59 επιφανειακά δείγματα ιζημάτων. Στα δείγματα προσδιορίστηκαν οι αλειφατικοί και πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, καθώς και τα μέταλλα βανάδιο και νικέλιο τα οποία απαντώνται στο πετρέλαιο.



**Εικόνα 4.22** Επίδραση στα πτηνά - Ρύπανση Σαρωνικού

(<https://www.eleftheriaonline.gr/ellada-kosmos/koinonia/item/134003-oi-epiptoseis-apo-ti-rypansi-tou-saronikoy>)

Κατά τη μακροσκοπική ανάλυση των ιζημάτων τη στιγμή της δειγματοληψίας τους δεν παρατηρήθηκαν πισσώδη συσσωματώματα ή ίχνη εκτενούς πετρελαϊκής ρύπανσης ούτε στο επιφανειακό ούτε στο υποεπιφανειακό στρώμα του ιζήματος. Τα επίπεδα αλειφατικών και πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων στους σταθμούς δειγματοληψίας που ανήκουν στο δίκτυο συστηματικής παρακολούθησης του Σαρωνικού κόλπου που εκτελείται από το ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. ήταν σε γενικές γραμμές σε παρόμοια και σε αρκετές περιπτώσεις χαμηλότερα επίπεδα με αντίστοιχες μετρήσεις πριν το ατύχημα.

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από την επιστημονική μελέτη του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. είναι ότι οι κύριες επιπτώσεις του ατυχήματος περιορίστηκαν στην παράκτια ζώνη, ιδιαίτερα στις περιοχές της Σαλαμίνας, Γλυφάδας και Ελληνικού και μόνο για την περίοδο των τριών πρώτων μηνών μετά τη διαρροή του πετρελαίου. Μετά το Δεκέμβριο 2017 φαίνεται ότι σε όλη την ακτογραμμή δεν υπήρχαν πλέον σημαντικά ευρήματα σε ότι αφορά την παρουσία πετρελαϊκών υδρογονανθράκων. Οι θαλάσσιοι οργανισμοί φαίνεται ότι δεν έχουν επηρεαστεί, ενώ δε βρέθηκαν ενδείξεις βιοσυσσώρευσης ρυπογόνων ουσιών που προέρχονται από το ναυάγιο. Σε ότι αφορά το θαλάσσιο πυθμένα, τόσο από τις υποβρύχιες βιντεοσκοπήσεις σε βάθη 3-20 m, όσο και από τα δείγματα ιζημάτων που συλλέχθηκαν σε επιλεγμένα σημεία σε μεγαλύτερα βάθη (έως 92 μέτρα) δε διαπιστώθηκε η ύπαρξη κατάλοιπων πετρελαιοειδών. (ΕΛΚΕΘΕ, 2018)

## 5. ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ MEDSLIK

### 5.1 Εισαγωγή

Το μαθηματικό μοντέλο MEDSLIK είναι ένα λογισμικό πρόβλεψης της τροχιάς και της μεταφοράς μιας πετρελαιοκηλίδας σε περιοχές στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου και χαρακτηριστικό του είναι ότι είναι εύκολο προς τη χρήση του (R.W. Lardner B.A., Ph.D., Sc.D., 2004,2011). Το λογισμικό αποτελείται από τρία μέρη, μια γραφική διεπαφή εισόδου (input), μέσω της οποίας ο χρήστης μπορεί να εισάγει τα δεδομένα σχετικά με τη διαρροή πετρελαίου καθώς και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Στη συνέχεια, το μέρος το οποίο επιλέγεται για την εκτέλεση των υπολογισμών (run) που προσομοιώνουν τη διαρροή και τη συμπεριφορά της και ταυτόχρονα εξάγει τα αποτελέσματα σε αρχεία εξόδου. Τέλος διαθέτει μια πλατφόρμα στην οποία ο χρήστης μπορεί να προβάλει τα αποτελέσματα (output) και κρίνει τα αποτελέσματα του μοντέλου στην περιοχή μελέτης.

Η ανάπτυξη του MEDSLIK στηρίχθηκε στην εμπειρία από άλλα μοντέλα προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδων τα οποία αναπτύχθηκαν από το Ινστιτούτο Ερευνών KFUPM (King Fahd University of Petroleum and Minerals) το οποίο για πολλά χρόνια αναπτύσσει επιτυχώς εφαρμογές παρόμοιων προγραμμάτων για τον Περσικό Κόλπο και την Ερυθρά Θάλασσα. Τα βασικά ζητήματα που θα πρέπει να εξετάζει κάθε πρόγραμμα προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδων είναι: την τοποθεσία άφιξης του πετρελαίου, τη χρονική στιγμή άφιξης καθώς και την κατάσταση του. Τα δύο πρώτα ερωτήματα, τα οποία είναι και τα πιο κρίσιμα, εξαρτώνται από την αξιοπιστία και την πληρότητα των δεδομένων εισόδου των υδροδυναμικών στοιχείων. Το τρίτο ερώτημα για την κατάσταση του πετρελαίου σημαντική είναι η χρήση αξιόπιστων αλγορίθμων ζωής και εξέλιξης του ρυπαντή εντός του αποδέκτη.

Το MEDSLIK έχει τη δυνατότητα εισαγωγής προβλέψεων αυτών των μεταβλητών που αναπτύσσονται στο πλαίσιο του προγράμματος MFS (Mediterranean Forecasting System) για όλη τη Μεσόγειο Θάλασσα και για τη Θάλασσα του Λεβάντε και τις υπό-περιοχές τους. Σε περίπτωση που αυτές οι προβλέψεις δεν είναι διαθέσιμες, στη θέση τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν κλιματολογικά θαλάσσια δεδομένα από βάσεις δεδομένων που διαθέτει το MEDSLIK. Δυστυχώς όμως, αυτή η βάση δεδομένων δεν έχει ανανεωθεί, γεγονός που σημαίνει ότι ο χρήστης θα πρέπει να διαθέτει τα υδροδυναμικά δεδομένα της διαρροής που θέλει να προσομοιώσει.

Όσον αφορά τους ανέμους, είναι πολύ σημαντικό τα στοιχεία εισόδου όπως έχει προαναφερθεί να είναι αξιόπιστα και πλήρη έτσι ώστε να προκύψουν σωστά αποτελέσματα για την συμπεριφορά της πετρελαιοκηλίδας. Οι προβλέψεις των ανέμων για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το μοντέλο μπορούν ληφθούν από το πρόγραμμα SKIRON του Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, τα οποία είναι πιο αξιόπιστα για την ανατολική Μεσόγειο (R.W. Lardner B.A., Ph.D., Sc.D., 2004,2011). Παρόλα αυτά ο χρήστης έχει την δυνατότητα να εισάγει δεδομένα χειροκίνητα, τα οποία μπορεί να έχουν προκύψει είτε από παρατήρηση είτε από μετρήσεις.

Τα σωματίδια μιας πετρελαιοκηλίδας μεταδίδονται με το νερό. Στη Μεσόγειο θάλασσα υπάρχουν δύο κυρίαρχοι μηχανισμοί οι οποίοι κινούν τα θαλάσσια ρεύματα. Τα ανεμογενή ρεύματα, τα οποία παράγονται από την δύναμη που αναπτύσσεται λόγω της επίδρασης του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας και τα ρεύματα τα οποία διαδίδονται λόγω των εναλλαγών της πυκνότητας του νερού από περιοχή σε περιοχή. Αυτοί οι μηχανισμοί εισάγονται στις προβλέψεις της ροής και άλλες θαλάσσιες μεταβλητές όπως η θερμοκρασία του νερού και η αλατότητα.



Ο άνεμος πέρα από την επίδραση που έχει στα ρεύματα, δρα απευθείας και στην πετρελαιοκηλίδα εξαναγκάζοντας της να κινείται σε σχέση με το σώμα του νερού. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος για την προσομοίωση αυτού του φαινομένου, η οποία εφαρμόζεται στα περισσότερα προγράμματα προσομοίωσης, είναι η χρήση του παράγοντα του ανέμου (wind factor). Ο παράγοντας αυτός εκφράζει την επίδραση του ανέμου στην μετάδοση του πετρελαίου που το αναγκάζει να κινηθεί με ορισμένο μέρος της ταχύτητας του ανέμου και με διεύθυνση μια συγκεκριμένη γωνία δεξιά της διεύθυνσης της ταχύτητας του ανέμου.

Πέρα από την μετάδοση από το νερό και τον άνεμο, τα σωματίδια κινούνται λόγω άλλων δύο μηχανισμών. Πρώτα ένα πυκνό στρώμα πετρελαίου εξαπλώνεται την επιφάνεια της θάλασσας λόγω της δράσης της βαρύτητας. Αυτός ο μηχανισμός δεν είναι τόσο σημαντικός ύστερα από μερικές ώρες. Εκείνη τη στιγμή σημαντικό ρόλο παίζει ο δεύτερος μηχανισμός, η διάχυση, η οποία προκαλείται από τις δίνες στο νερό. Με τη διάχυση η πετρελαιοκηλίδα εξαπλώνεται και συχνά διαιρείται σε δύο ή περισσότερα κομμάτια. Το MEDSLIK χρησιμοποιεί έναν αυτόματο αλγόριθμο με έναν μεγάλο αριθμό Λαγκρατζιανών στοιχείων προκειμένου να μοντελοποιήσει αυτή τη διαδικασία. Όσα περισσότερα στοιχεία επιλεγούν τόσο πιο ρεαλιστικό είναι το αποτέλεσμα. (Η προεπιλογή του προγράμματος ορίζει 10.000 στοιχεία, αυτό όμως μπορεί αν φτάσει και τα 100.000 στοιχεία.)

Πέρα από τα παραπάνω, η οριζόντια μετατόπιση της πετρελαιοκηλίδας μπορεί να ωθήσει το πετρέλαιο στην ακτή. Για να μπορέσει να γίνει σωστή εκτίμηση της διαδικασίας, σε κάθε χρονική στιγμή, ανάλογα με το χρονικό βήμα των υπολογισμών, το πρόγραμμα ελέγχει αν κάποιο σωματίδιο έρχεται σε επαφή με κάποιο χωρικό διάστημα, το οποίο χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα για την προσέγγιση της ακτογραμμής. Αν έρθει σε επαφή με περισσότερα από ένα, το πλησιέστερο στο αρχικό σημείο δεσμεύεται, και το σωματίδιο κινείται μέχρι το σημείο τομής και χαρακτηρίζεται ως «beached». Η ανάλυση του χάρτη ποικίλει από περιοχή σε περιοχή, σε κάποιες μπορεί να είναι μικρότερη των 25 μέτρων ενώ σε άλλες 100-200 μέτρα.

Η προσκόλληση των σωματιδίων στην ακτή δεν είναι ένα στατικό φαινόμενο, καθώς υπάρχει πιθανότητα το κλάσμα του πετρελαίου που φτάνει στην ακτή να γυρίσει πίσω στο νερό. Ο υπολογισμός της πιθανότητας αυτής παρουσιάζεται στην παράγραφο 5.2.2. Παρόλα αυτά ένα τμήμα του πετρελαίου παραμένει στην ακτή, είτε αναμιγμένο με την άμμο είτε κολλημένο πάνω στα βράχια. Συνεπώς το πετρέλαιο στην ακτή μπορεί να κατανεμηθεί σε δύο κατηγορίες, σε αυτό που μπορεί να γυρίσει πίσω στο νερό και σε αυτό που θα προσκολληθεί στην ακτή. Ο ρυθμός της απορρόφησης αλλά αντίστοιχα και η πιθανότητα επαναφοράς του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη, εξαρτάται από τον τύπο και τη μορφολογία της ακτής. Το μοντέλο επιτρέπει την ταξινόμηση των ακτών, όπως αμμώδης παραλία, μικρά ή μεγάλα βότσαλα, βραχώδεις ακτές, ακρωτήρια κ.ο.κ.

Επιπρόσθετα στις διεργασίες μεταφοράς και διάχυσης, τα σωματίδια μιας πετρελαιοκηλίδας υφίσταται αλλαγές οι οποίες έχουν να κάνουν με φυσικές διεργασίες οι οποίες επηρεάζουν το πετρέλαιο. Τα ελαφρύτερα κλάσματα πετρελαίου εξαφανίζονται από την εξάτμιση και τα εναπομείναντα αρχίζουν να απορροφούν νερό ή να γαλακτωματοποιούνται. Αυτές οι αλλαγές αντικατοπτρίζονται στις αλλαγές των ιδιοτήτων του πετρελαίου, όπως η πυκνότητα και το ιξώδες του αλλά και στον όγκο του επιφανειακού στρώματος. Τελικά κάποιο μέρος του πετρελαίου κινείται κάτω από την επιφάνεια λόγω της επίδρασης των κυματισμών.

Το MEDSLIK έχει τη δυνατότητα να εκτυπώνει αποτελέσματα ανά χρονικά διαστήματα τα οποία ορίζονται από τον χρήστη. Για το λόγο αυτό η κηλίδα προσεγγίζεται από το μέσο όρο της πυκνότητας του πετρελαίου σε διάφορα κελιά του κανάβου υπολογισμού. Το αποτέλεσμα του μοντέλου δίνει σε κάθε κελί ένα χρώμα, στο οποίο αντιστοιχεί η παρουσία του πετρελαίου στην επιφάνεια. Έτσι δημιουργείται ένα μωσαϊκό χρωματιστών τετραγώνων τα οποία προσομοιώνουν την πετρελαιοκηλίδα. Η προσομοίωση αυτή



έχει ένα δείκτη αβεβαιότητας ο οποίος όμως δεν υπολογίζεται, με αποτέλεσμα να συνίσταται η μελέτη των αρχείων εξόδου ως ένας στατιστικός πίνακας. Ωστόσο, το μωσαϊκό που προκύπτει είναι αρκετά ικανοποιητικό καθώς η πετρελαιοκηλίδα είναι ενιαία και πυκνή και μπορεί να γίνει προσέγγιση για το μέγεθος της και την πραγματική της θέση. Το περιβάλλον της γραφικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να δει τα αποτελέσματα ανά χρονική στιγμή, έτσι ώστε να βγάλει συμπεράσματα για την πετρελαιοκηλίδα συναρτήσει του χρόνου.

Τέλος στο MEDSLIK υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού και εκτύπωσης της τροχιάς επιπλεόντων αντικειμένων. Η ανάπτυξη αυτής της δυνατότητας έχει ιδιαίτερη σημασία σε εντοπισμούς επιπλεόντων αντικειμένων που παρασύρθηκαν από την επιφάνεια της θάλασσας, αλλά κυρίως για τον εντοπισμό ανθρώπων που μπορεί να χάθηκαν στην θάλασσα. Ωστόσο, αυτή η δυνατότητα είναι επίσης χρήσιμη για τον εντοπισμό της διαδρομής και του κέντρου της πετρελαιοκηλίδας.

## 5.2 Διεργασίες και εξισώσεις του μαθηματικού μοντέλου

### 5.2.1 Μετακίνηση και διάχυση της κηλίδας (advection and diffusion of the slick)

Τα σωματίδια του πετρελαίου μεταφέρονται με το νερό μέσα στο οποίο ή πάνω στο οποίο αυτά βρίσκονται. Στο MEDSLIK ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει τα ρεύματα χειροκίνητα, μπορεί να τα επιλέξει κλιματολογικά ρεύματα (μακροπρόθεσμος μέσος όρος) ή να χρησιμοποιήσει προβλέψεις από διάφορες υπηρεσίες.

Οι προβλέψεις για τα ρεύματα γενικά, εκτός από τα ρηγά, δεν αντιπροσωπεύουν σωστά την επίδραση του ανέμου στο πάνω μέρος της ροής λίγα χιλιοστά από την υδάτινη στήλη. Επομένως τα ρεύματα δεν επαρκούν για την προσομοίωση, καθώς δεν μπορούν να δείξουν την επίδραση του ανέμου στην κηλίδα. Για αυτό το λόγο το MEDSLIK, όπως και τα περισσότερα προγράμματα προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδων, εισάγει έναν επιπρόσθετο όρο τριβής ανέμου στην μετακίνηση των σωματιδίων. Σύμφωνα με αυτό, εκτιμάται ότι η επιφάνεια του πετρελαίου μετακινείται με ταχύτητα η οποία ισούται με ένα συγκεκριμένο ποσοστό  $\alpha$  της ταχύτητας του ανέμου και σε μία διεύθυνση που σχηματίζει συγκεκριμένη δεξιόστροφη γωνία  $\beta$  με τη διεύθυνση του ανέμου. (R.W. Lardner B.A., Ph.D., Sc.D., 2004,2011)

Επίσης στο MEDSLIK χρησιμοποιείται η μέθοδος Monte Carlo. Ο ρυπαντής χωρίζεται σε ένα μεγάλο αριθμό υλικών στοιχείων 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 στοιχείου στην αρχή ενός συγκεκριμένου χρονικού βήματος, με το  $Z$  να μετριέται κάθετα από κάτω προς τα πάνω. Στο τέλος του χρονικού βήματος διάρκειας  $t$  το υλικό σημείο θα βρίσκεται στη θέση με συντεταγμένες:

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

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

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

Όπου:

- $u(x,y,z)$  και  $v(x,y,z)$  είναι οι ταχύτητες των θαλάσσιων ρευμάτων κατά  $x$  και  $y$  αντίστοιχα,
- $W_x$  και  $W_y$  οι συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου και
- $\Delta X_i^{(d)}$ ,  $\Delta Y_i^{(d)}$ ,  $\Delta Z_i^{(d)}$  οι μετατοπίσεις λόγω διάχυσης στις τρεις διευθύνσεις.

Η κατακόρυφη ταχύτητα  $w$  δεν περιλαμβάνεται στο μοντέλο, καθώς είναι γενικά πολύ μικρή. Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις αναφέρονται μόνο στα υλικά σημεία που έχουν διασπαρθεί στην υδάτινη στήλη και σε αυτή την περίπτωση η μεταφορά λόγω ανέμου εξαιρείται από τους υπολογισμούς. Στην περίπτωση που η κατακόρυφη μετατόπιση οδηγήσει θεωρητικά ένα υλικό στοιχείο 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:

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

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

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

Όπου:

- $K_h$  και  $K_v$  είναι οι συντελεστές της οριζόντιας και της κάθετης διάχυσης. Στους υπολογισμούς που έγιναν στην παρούσα θεωρήθηκε  $K_h=2 \text{ m}^2/\text{sec}$  και  $K_v=0.01 \text{ m}^2/\text{sec}$  στο στρώμα ανάμιξης και  $K_v=0,0001 \text{ m}^2/\text{sec}$  κάτω από το στρώμα ανάμιξης.
- $\text{rand}(0,1)$  είναι τυχαίοι αριθμοί με ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ 0 και 1.

Αποδεικνύεται ότι ο τετραγωνικός μέσος των παραπάνω τιμών των μετατοπίσεων λόγω διάχυσης έχει τις παρακάτω τιμές αντίστοιχα (R.W. Lardner B.A., Ph.D., Sc.D., 2004,2011):

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

Επίσης, μπορεί να αποδειχθεί ότι τα σωματίδια υποβάλλονται σε τυχαίες μετακινήσεις. Η παραπάνω εξίσωση ικανοποιεί την εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης με  $K_h$  και  $K_v$  τους συντελεστές οριζόντιας και κάθετης διάχυσης.

Με βάση τα πειράματα και τις μελέτες της κίνησης μιας ομάδας από πλωτές σημαδούρες στον Περσικό Κόλπο, και με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, (Al Rabeih, A.H., 1994) προέκυψαν οι βέλτιστες τιμές  $\alpha=0.031$  για τον παράγοντα τριβής του ανέμου και  $\beta=26.03^\circ$  για τον παράγοντα αλλαγής της γωνίας λόγω της επίδρασης του ανέμου. Επειδή όμως η τιμή του  $\beta$  θεωρείται πολύ μεγάλη για την προσομοίωση μιας πετρελαιοκηλίδας, το μοντέλο χρησιμοποιεί ως προεπιλογή το  $\beta=0^\circ$ .

Ο πίνακας με τις παραμέτρους παρουσιάζεται στο Παράρτημα 1.

### 5.2.2 Προσאיγιάλωση (beaching)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι οριζόντιες μετατοπίσεις είναι πιθανό να οδηγήσουν κάποιο υλικό στοιχείο 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 στοιχείο Lagrange μεταφέρεται στην τομή χαρακτηριζόμενο ως «beached». (R.W. Lardner B.A., Ph.D., Sc.D., 2004,2011)

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

$$\text{Πιθανότητα επαναφοράς} = 1 - 0.5^{t/T_w} \quad (5.8)$$

όπου  $T_w$  είναι ο χρόνος ημιζωής του πετρελαίου για να μείνει στην ακτή και να μην ξαναγυρίσει στη θάλασσα. Για κάθε υλικό στοιχείο εφαρμόζεται μία διαδικασία γέννησης τυχαίων αριθμών και το σημείο επανέρχεται στη θάλασσα αν:

$$\text{rand}(0,1) < \text{Πιθανότητα επαναφοράς} \quad (5.9)$$

Σε αυτή την περίπτωση το υλικό σημείο επανέρχεται στην ίδια πλευρά της ακτής από όπου προήλθε. Ο χρόνος ημιζωής  $T_w$  εξαρτάται από τον τύπο της ακτής (αμμώδης ή βραχώδης). Φυσικά το μοντέλο ελέγχει αμέσως αν το συγκεκριμένο στοιχείο προσκολληθεί σε άλλο τμήμα ακτής.

Το MEDSLIK υποθέτει πως κατά τη διάρκεια κάθε χρονικού βήματος ένα συγκεκριμένο ποσοστό του πετρελαίου του κάθε υλικού στοιχείου 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:

$$\text{Ποσοστό προσκόλλησης} = 1 - 2^{-\tau/T_s} \quad (5.10)$$

, όπου  $T_s$  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 στοιχεία είναι μειωμένος. Για το λόγο αυτό το MEDSLIK χρησιμοποιεί την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{Ποσοστό μόνιμης παραμονής στην ακτή} = \left[ 1 - 2^{\tau/T_s} \right] \exp\left(-\frac{d}{d_0}\right) \quad (5.11)$$

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

$$T_s = T_{s0} \left[ 1 + c_H (30 - API) \right] \quad \text{για } API < 30 \quad (5.12)$$

όπου  $T_s$  είναι ο προεπιλεγμένος χρόνος ημιζωής.

Αναλυτικά η εισαγωγή των παραμέτρων για αυτή την διεργασία παρουσιάζονται στο Παράρτημα 1.

### 5.2.3 Φυσικές Διεργασίες στο MEDSLIK (Fate models)

Το μοντέλο χρησιμοποιεί τροποποιημένες εκδόσεις των αλγορίθμων Mackay για την εξάτμιση, τη διασπορά και την γαλακτωματοποίηση. Η βάση των αλγορίθμων είναι η διαίρεση της κηλίδας σε ένα πυκνό και σε ένα λεπτό μέρος. Η εξάτμιση και η διασπορά αντιμετωπίζονται ως δύο μέρη της κηλίδας. Επίσης το μοντέλο διαθέτει τη ροή του πετρελαίου από το πυκνό μέρος στο λεπτό.

Για ένα κομμάτι κηλίδας σε κάθε χρονικό βήμα, έστω  $V_{tk}$  και  $V_{tn}$  οι όγκοι του πετρελαίου που μένουν στο πυκνό και στο λεπτό στρώμα αντίστοιχα,  $A_{tk}$  και  $A_{tn}$  οι επιφάνειες τους και  $T_{tk}$  και  $T_{tn}$  τα αντίστοιχα πάχη. Θεωρείται ότι το πάχος  $T_{tn}$  του λεπτού στρώματος είναι σταθερό και ίσο με 10 μικρόμετρα, όσο δηλαδή είναι το τελικό πάχος ενός επιφανειακού «φιλμ» πετρελαίου. Σε κάθε χρονικό βήμα, οι δύο όγκοι ανανεώνονται και παίρνουν τις τιμές:

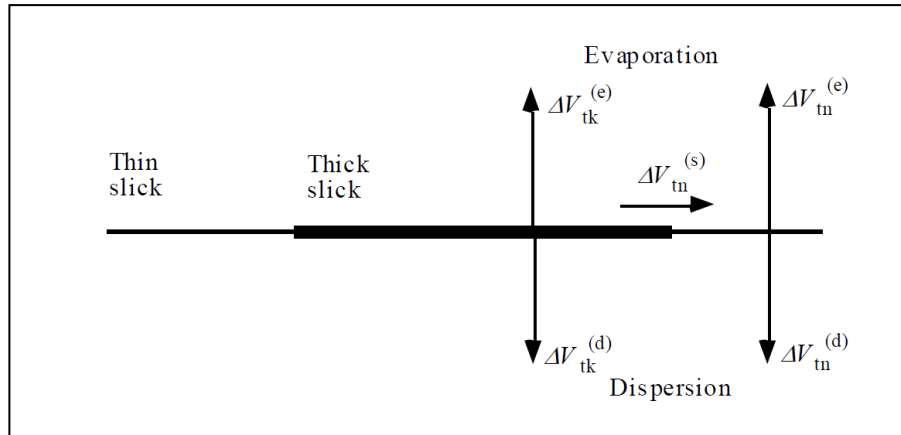
$$V'_{tk} = V_{tk} - \Delta V_{tk}^{(e)} - \Delta V_{tk}^{(d)} - \Delta V_{tn}^{(s)} \quad (5.13)$$

$$V_{in}' = V_{in} - \Delta V_{in}^{(e)} - \Delta V_{in}^{(d)} - \Delta V_{in}^{(s)} \quad (5.14)$$

Όπου:

- $\Delta V_{tk}^{(e)}$  και  $\Delta V_{tn}^{(e)}$  είναι οι ποσότητες που χάνονται λόγω εξάτμισης
- $\Delta V_{tk}^{(d)}$  και  $\Delta V_{tn}^{(d)}$  είναι οι ποσότητες που χάνονται λόγω διασποράς
- $\Delta V_{tn}^{(s)}$  είναι η ποσότητα πετρελαίου που πηγαίνει από το πυκνό στο λεπτό στρώμα της κηλίδας

Η παραπάνω διαδικασία φαίνεται παρακάτω.



**Εικόνα 5.1** Μεταφορά όγκων από το πυκνό στο λεπτό στρώμα της κηλίδας  
(*R.W. Lardner B.A., Ph.D., Sc.D., 2004,2011*)

Εφόσον έχουν αλλάξει οι όγκοι των στρωμάτων της κηλίδας, αλλάζουν και οι επιφάνειες που καλύπτουν σε κάθε χρονικό βήμα. Το νέο πάχος του πυκνού στρώματος δίνεται από τον τύπο:

$$T_{tk} = \frac{V_{tk}}{A_{tk}} \quad (5.15)$$

#### 5.2.4 Εξάτμιση (Evaporation)

Κάθε υλικό στοιχείο του πετρελαίου αποτελείται από ένα μέρος το οποίο είναι ελαφρύ και μπορεί να εξατμιστεί και από ένα άλλο πιο βαρύ το οποίο δεν μπορεί να εξατμιστεί. Το αρχικό ποσοστό της ποσότητας που θα εξατμιστεί εξαρτάται από τον τύπο πετρελαίου που επιλέγεται. Σε κάθε χρονικό βήμα, το ποσοστό των ελαφρών στοιχείων σε κάθε υπό-κηλίδα μειώνεται χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Mackay για την εξάτμιση, και αυτή η μείωση γίνεται σε όλα τα στοιχεία της υπό-κηλίδας. (Mackay, D. and Paterson, S., 1980)

Αρχικά, για το πετρέλαιο στο λεπτό στρώμα, θεωρείται ότι τα ελαφριά στοιχεία εξατμίζονται αμέσως. Ο όγκος που εξατμίζεται σε κάθε χρονικό βήμα από τη λεπτή κηλίδα αυτή είναι ίσος με τα συνολικά ελαφριά συστατικά της:

$$\Delta V_{in}^{(e)} = V_{in} \frac{f_{max} - f_{in}}{1 - f_{in}} \quad (5.16)$$

Όπου:

- $f_m$  είναι το μέρος του πετρελαίου στο λεπτό στρώμα το οποίο έχει ήδη εξατμιστεί στην αρχή του χρονικού βήματος
- $f_{max}$  είναι το αρχικό μέρος των στοιχείων που πρόκειται να εξατμιστούν, τα οποία είναι και η μέγιστη τιμή του  $f_m$ .

Για το πυκνό στρώμα, η αύξηση του ποσοστού  $f_{tk}$  του πετρελαίου που έχει εξατμιστεί εκφράζεται ως προϊόν της πίεσης των ατμών  $P_{oil}$  και της μεταβολής ενός παράγοντα εξατμίσεως  $\Delta E_{tk}$ .

$$\Delta f_{tk} = P_{oil} \Delta E_{tk} \quad (5.17)$$

Η πίεση των ατμών  $P_{oil}$  δίνεται από τη σχέση:

$$P_{oil} = P_0 e^{-cf_{tk}} \quad (5.18)$$

Όπου:

- $P_0$  είναι η αρχική πίεση των ατμών
- $c$  είναι η σταθερά η οποία μετρά τον ρυθμό μείωσης της πίεσης των ατμών με το μέρος που έχει ήδη εξατμιστεί

Η αύξηση της έκθεσης εκφράζεται ως προϊόν του συντελεστή μεταφοράς μάζας  $K_m$ , το χρονικό βήμα  $t$ , την επιφάνεια της κηλίδας  $A_{tk}$  και τον μοριακό όγκο του πετρελαίου  $V_{mol}$ , διαιρεμένα με την σταθερά αερίων  $R$ , την θερμοκρασία  $T$  σε βαθμούς Kelvin και τον αρχικό όγκο της υπό-κηλίδας  $V^{(0)}$ .

$$\Delta E_{tk} = \frac{K_m V_{mol} A_{tk} \tau}{RTV^{(0)}} = \frac{K_m V_{mol} A_{tk} (1-f_{tk}) \tau}{RTV_{tk}} \quad (5.19)$$

όπου  $V_{tk}$  είναι ο τρέχων όγκος του πετρελαίου στο πυκνό στρώμα και ισούται με  $V^{(0)}(1-f_{tk})$ . Το μοντέλο έχει ορίσει ως προεπιλογή τις τιμές:  $V_{mol}=0.0002$ ,  $R=0.000082$  και

$$K_m = C^{(e)} (W_{kph})^\gamma \quad (5.20)$$

Όπου

- $W_{kph}$  είναι η ταχύτητα του ανέμου σε χιλιόμετρα ανά ώρα (km/h)
- $C^{(e)}$  συντελεστής με τιμή 0.000033 και
- $\gamma$  συντελεστής με τιμή 0.78

Ο όγκος που χάνεται λόγω εξατμίσεως σε κάθε χρονικό βήμα, είναι ίσος με την αύξηση του ποσοστού που εξατμίζεται επί τον αρχικό όγκο:

$$\Delta V_{tk}^{(e)} = \Delta f_{tk} V^{(0)} = \Delta f_{tk} V_{tk} / (1-f_{tk}) \quad (5.21)$$

Παρότι θεωρείται ότι τα στοιχεία που είναι να εξατμιστούν από το λεπτό στρώμα εξαφανίζονται αμέσως, το λεπτό στρώμα τροφοδοτείται με πετρέλαιο από το πυκνό στρώμα το οποίο δεν έχει εξατμιστεί πλήρως. Έτσι, το μέρος  $f_{tn}$  του πετρελαίου που έχει εξατμιστεί από το λεπτό στρώμα της κηλίδας πρέπει να μειωθεί από τη μέγιστη τιμή  $f_{max}$ . Εξισώνοντας το περιεχόμενο πετρελαίου του λεπτού στρώματος πριν και μετά τη ροή προκύπτει:

$$V_{tn}' (1-f_{tn}') = (V_{tn}' - \Delta V_{tn}^{(s)}) (1-f_{max}') + \Delta V_{tn}^{(s)} (1-f_{tk}') \quad (5.22)$$

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

$$f_{tn} = f_{max} - \Delta V_{tn}^{(s)} (f_{max} - f_{tk}) / V'_{tn} \quad (5.23)$$

Στη συνέχεια έχοντας υπολογίσει τους όγκους που έχουν εξατμιστεί από το πυκνό και το λεπτό στρώμα της κηλίδας, μπορεί να υπολογιστεί το συνολικό ποσοστό πετρελαίου που έχει εξατμιστεί. Το ποσοστό αυτό προσαρμόζεται σε όλα τα υλικά στοιχεία της συγκεκριμένης υπό-κηλίδας. Η εξάτμιση σταματάει όταν το μέρος του πετρελαίου που εξατμίστηκε φτάσει το μέγιστο  $f_{max}$  των ελαφριών συστατικών της αρχικής κηλίδας.

Η εξάτμιση οδηγεί σε αύξηση του ιξώδους του πετρελαίου. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με τον παρακάτω τύπο:

$$\eta_{oil} = \eta_0 \exp(K^{(e)} f_{tk}) \quad (5.24)$$

Όπου

- $\eta_0$  είναι το αρχικό ιξώδες και
- $K^{(e)}$  είναι μία σταθερά η οποία καθορίζει την αύξηση του ιξώδους με την εξάτμιση. Προεπιλογή του μοντέλου είναι η τιμή 4.0.

Αναλυτικά η εισαγωγή των παραμέτρων για αυτή την εξάτμιση παρουσιάζονται στο Παράρτημα 1.

### 5.2.5 Γαλακτωματοποίηση (Emulsification)

Η γαλακτωματοποίηση αναφέρεται στην διεργασία όπου το πετρέλαιο της κηλίδας αναμιγνύεται με το νερό. Έστω  $f_w$  να είναι το ποσοστό του νερού στο γαλάκτωμα πετρελαίου-νερού (mousse). Το μοντέλο Mackay για την αλλαγή αυτού του ποσοστού συναρτήσει του χρόνου είναι (Mackay, D. Buist, I., Mascarenhas, R. and Paterson, S. , 1979):

$$\Delta f_w = C_2^{(m)} (1 - C_3^{(m)} f_w) \tau \quad (5.25)$$

Όπου  $C_2^{(m)}$  και  $C_3^{(m)}$  είναι σταθερές με τιμές 1.6 και 1.333 αντίστοιχα. Το μοντέλο βασίζεται στη θεώρηση ότι στην αρχική διεργασία μεταξύ νερού και πετρελαίου υπάρχει ανώτερο όριο στο ποσοστό του νερού στο γαλάκτωμα τον αριθμό API για βαριά πετρέλαια.

Η αρχική συνέπεια της γαλακτωματοποίησης είναι η δημιουργία ενός γαλακτώματος («mousse») με πολύ αυξημένο ιξώδες. Το ιξώδες  $\eta_{em}$  για το γαλάκτωμα δίνεται από τον τύπο:

$$\eta_{em} = \eta_{oil} \exp \left[ \frac{2.5 f_w}{1 - C_1^{(m)} f_w} \right] \quad (5.26)$$

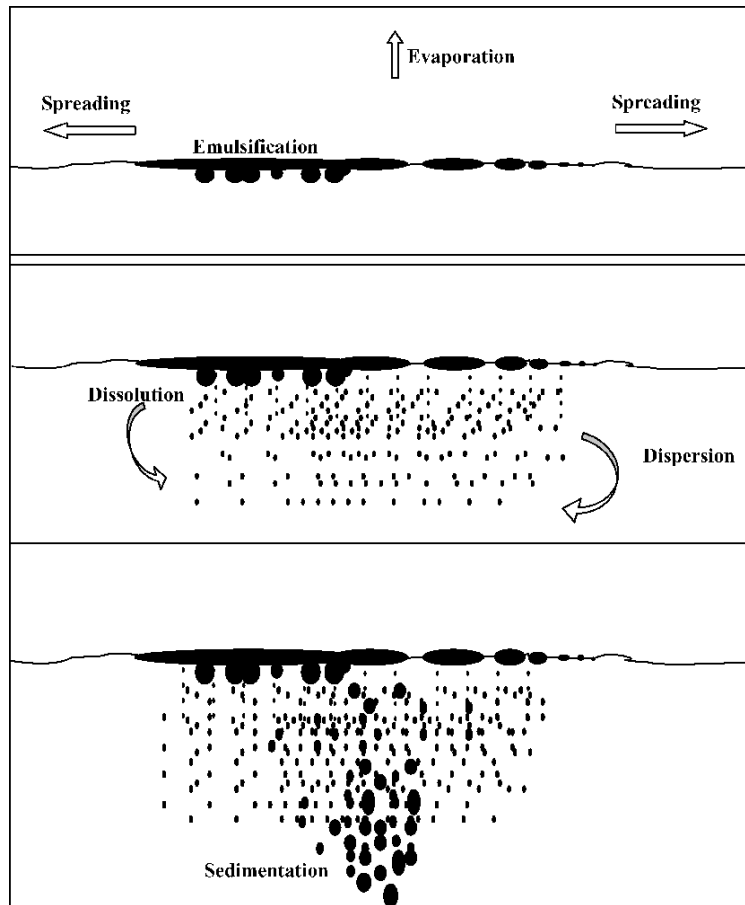
Όπου  $C_1^{(m)}$  είναι μία σταθερά που καθορίζει την αύξηση του ιξώδους λόγω της γαλακτωματοποίησης, με προεπιλεγμένη τιμή 0.65. Στο Παράρτημα 1 παρουσιάζεται το πώς εισάγονται αυτές οι παράμετροι στο MEDSLIK.

### 5.2.6 Διασπορά (Dispersion)

Το μοντέλο της διασποράς του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη βασίζεται στην εργασία των Buist (Buist, I. , 1979) και Mackay (Mackay, D. Buist, I., Mascarenhas, R. and Paterson, S. , 1979). Η δράση των κυματισμών οδηγεί το πετρέλαιο μέσα στο νερό, δημιουργώντας ένα σύννεφο από σταγόνες κάτω από την πετρελαιοκηλίδα όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Οι σταγόνες ταξινομούνται σε μεγάλες, που

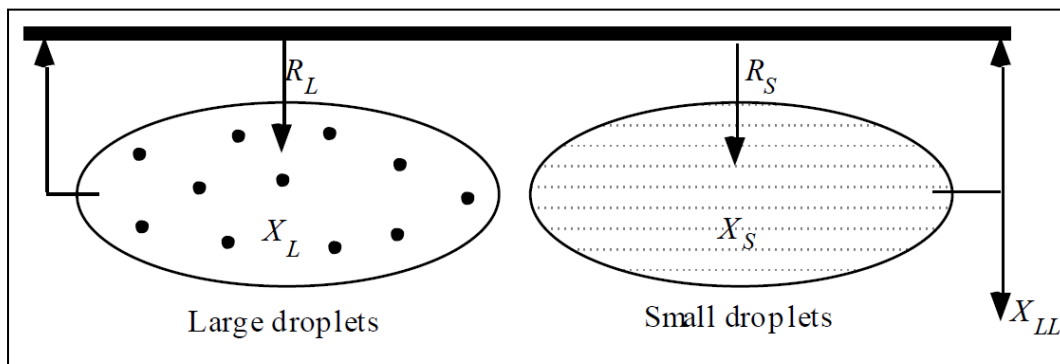


ανεβαίνουν γρήγορα στην επιφάνεια και ενώνονται πάλι με την κηλίδα και μικρές, που ανεβαίνουν πιο αργά και μπορούν να βυθιστούν αρκετά μακριά ώστε να υποστούν διασπορά στα κατώτερα στρώματα της υδάτινης στήλης.



**Εικόνα 5.2** Μηχανισμός της διασποράς  
(*Mohammad Hadi Riazi and Yousef A. Roomi, 2008*)

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.



**Εικόνα 5.3** Το μοντέλο της διασποράς  
(*R.W. Lardner B.A., Ph.D., Sc.D., 2004,2011*)

Αρχικά όσον αφορά το πυκνό στρώμα της κηλίδας, 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 οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις  $c_L$  και  $c_S$  πετρελαίου. Αν οι ταχύτητες ανόδου των μεγάλων και των μικρών σταγόνων είναι  $v_L$  και  $v_S$  αντίστοιχα, τότε σε κατάσταση ισορροπίας οι ροές προς τα κάτω και προς τα πάνω μπορούν να εξισωθούν.

$$R_L = c_L v_L \quad (5.27)$$

$$R_S = \frac{1}{2} c_S (v_S + C_1^{(d)}) \quad (5.28)$$

Όπου  $C_1^{(d)}$  ( $\gg v_S=0.0003$ ) είναι η προς τα πάνω ταχύτητα διασποράς για τις μικρές σταγόνες, που θεωρήθηκε ίση με 0.001 από την προεπιλογή του μοντέλου. Επίσης, το μοντέλο θεωρεί  $v_L=0.08$ .

Ο συνολικός όγκος του πετρελαίου κάτω από το πυκνό στρώμα κηλίδας υπό μορφή μεγάλων και μικρών σταγόνων αντίστοιχα είναι:

$$X_L = c_L u_m A_{tk}$$

(5.29)

$$X_S = c_S u_m A_{tk} = \frac{2R_S u_m A_{tk}}{C_1^{(d)} + v_S} \quad (5.30)$$

όπου  $u_m$  είναι το κάθετο πάχος του σύννεφου των σταγόνων, του οποίου η τιμή θεωρήθηκε 0.5. Σε κάθε χρονικό βήμα, ένα μέρος των μικρών σταγόνων υποτίθεται ότι χάνεται λόγω διάχυσης στα κατώτερα στρώματα της υδάτινης στήλης. Ο συνολικός όγκος που χάνεται σε κάθε χρονικό βήμα είναι:

$$\Delta X_{LL} = \frac{1}{2} c_S (C_1^{(d)} - v_S) A_{tk} \tau = \frac{R_S A_{tk} \tau (C_1^{(d)} - v_S)}{C_1^{(d)} + v_S} \quad (5.31)$$

Ο συνολικός όγκος του πετρελαίου που έχει διασπαρθεί κάτω από το πυκνό στρώμα της κηλίδας αυξάνεται σύμφωνα με:

$$\Delta V_{tk}^{(d)} = \Delta X_{LL} + (X'_S - X_S) \quad (5.32)$$

,όπου ο τελευταίος όρος αναπαριστά τη μεταβολή 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 μέρος του πετρελαίου που υπόκειται σε διασπορά σε κάθε χρονικό βήμα τόσο για το πυκνό, όσο και για το λεπτό στρώμα της κηλίδας υπολογίζεται από:

$$\Delta f_d = C_3^{(d)} (W_{m/s} + 1)^2 \tau \quad (5.33)$$

όπου  $W_{m/s}$  είναι η ταχύτητα του ανέμου σε m/sec. Για το πυκνό μέρος της κηλίδας, το μέρος αυτό που αποτελείται από μικρές σταγόνες λαμβάνεται ως:

$$f_s = \left\{ 1 + C_4^{(d)} \left( \frac{\eta_{em}}{10} \right)^{0.5} \left( \frac{T_{tk}}{0.001} \right) \left( \frac{\sigma}{24} \right) \right\}^{-1} \quad (5.34)$$

Όπου

- $\sigma$  είναι η επιφανειακή τάση στη διεπιφάνεια νερού-πετρελαίου,
- $C_4^{(d)}$  σταθερά με τιμή 50 και
- $\eta_{em}$  το ιξώδες του γαλακτωματοποιημένου πετρελαίου.

Η προς τα κάτω ροή ανά μονάδα επιφάνειας της κηλίδας σε κάθε χρονικό βήμα είναι:

$$R_s = f_s \left( \frac{\Delta f_d}{\tau} \right) \quad (5.35)$$

$$R_L = (1 - f_s) \left( \frac{\Delta f_d}{\tau} \right) \quad (5.36)$$

Για το λεπτό στρώμα της κηλίδας, χρησιμοποιείται μια πιο απλουστευμένη έκφραση για το ποσοστό των μικρών σταγόνων:

$$f_s = \left\{ 1 + C_5^{(d)} \left( \frac{\sigma}{24} \right) \right\}^{-1} \quad (5.37)$$

όπου  $C_5^{(d)}$  σταθερά με προεπιλεγμένη τιμή 2000. Γίνεται η υπόθεση ότι όλες οι μικρές σταγόνες κάτω από το λεπτό στρώμα βρίσκονται μονίμως σε διασπορά. Επομένως, η απώλεια όγκου δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta V_{in}^{(d)} = f_s \Delta f_d V_{in}^{(d)} \quad (5.38)$$

Ο συνολικός όγκος του πετρελαίου που έχει υποστεί διασπορά, τόσο από το πυκνό, όσο και από το λεπτό στρώμα, είναι:

$$\Delta V^{(d)} = \Delta V_{tk}^{(d)} + \Delta V_{in}^{(d)} \quad (5.39)$$

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

$$p^{(d)} = \frac{\Delta V^{(d)}}{V^{(0)}} \quad (5.40)$$

Για κάθε υλικό στοιχείο εφαρμόζεται μία διαδικασία γέννησης τυχαίων αριθμών. Το στοιχείο αυτό παθαίνει διασπορά αν  $\text{rand}(0,1) < p^{(d)}$ .

Η διασπορά σταματάει όταν το ιξώδες του γαλακτώματος  $\eta_{em}$  φτάσει μια μέγιστη τιμή  $\eta_{max}$ . Αναλυτικά οι τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στο Παράρτημα 1.

### 5.2.7 Εξάπλωση (Spreading)

Για την ολοκλήρωση των αλγόριθμων του μοντέλου απαιτούνται μοντέλα για τις αλλαγές στην επιφάνεια του πυκνού και του λεπτού στρώματος και τη ροή πετρελαίου από τη μία στην άλλη. (Mackay, D. and Leinonen, P.J., 1977) (Mackay, D., Paterson, S. and Trudel, K., 1980) Για το πυκνό στρώμα, η εξάπλωση αποτελείται από δύο μέρη, από τη μία υπάρχει η απώλεια επιφάνειας λόγω ροής από το πυκνό στρώμα προς το λεπτό στρώμα της κηλίδας και από την άλλη συμβαίνει εξάπλωση λόγω βαρύτητας και ιξώδους, σύμφωνα με τη θεωρία του Fay (Fay, J.A., 1971). Επομένως, η αλλαγή της επιφάνειας της παχιάς κηλίδας ανά χρονικό βήμα είναι:

$$\Delta A_{tk}^{(s)} = - \frac{\Delta V_{in}^{(s)}}{T_{tk}} + C_2^{(s)} A_{tk}^{1/3} T_{tk}^{4/3} \tau \quad (5.41)$$

όπου  $C_2^{(s)}$  είναι σταθερά που θεωρήθηκε ίση με 150 και  $\Delta V_{tn}^{(s)}$  είναι η αύξηση του όγκου που ρέει από το πυκνό στρώμα προς το λεπτό στρώμα της κηλίδας. Ο όγκος αυτός συνδέεται και με την αύξηση της επιφάνειας του λεπτού στρώματος της κηλίδας μέσω της σχέσης:

$$\Delta V_{tn}^{(s)} = \Delta A_{tn}^{(s)} T_{tn} \quad (5.42)$$

Ο Mackay προσέγγισε την αύξηση της επιφάνειας του λεπτού στρώματος με μία μέθοδο παρόμοια με του Fay. Συγκεκριμένα, θεώρησε την αύξηση αυτή ανάλογη της κυβικής ρίζας της επιφάνειας του λεπτού στρώματος, του χρονικού βήματος και μιας εκθετικής συνάρτησης του πάχους του πυκνού στρώματος που αντανακλά την τάση των κηλίδων να σταματούν την εξάπλωσή τους όταν γίνουν πολύ λεπτές. Ο τύπος είναι:

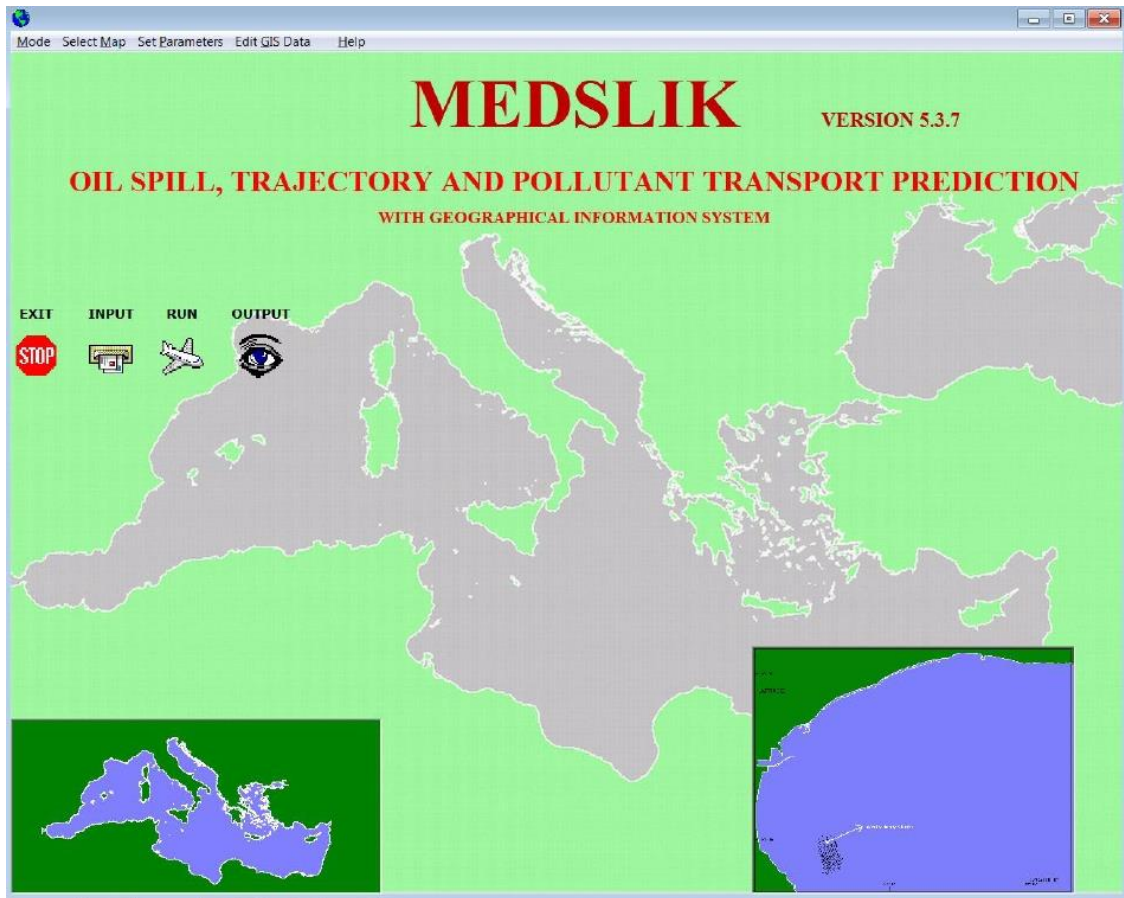
$$\Delta A_{tn}^{(s)} = C_1^{(s)} A_{tn}^{1/3} \tau \exp\left(-\frac{C_3^{(s)}}{T_{tk} + 0.00001}\right) \quad (5.43)$$

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 υπό-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. Το μοντέλο της εξάπλωσης και οι τιμές εισόδου παρουσιάζονται στο Παράρτημα 1.

### 5.3 Δεδομένα εισόδου μαθηματικού μοντέλου

Στο μοντέλο MEDSLIK κατά την εκκίνηση του, εμφανίζεται στην οθόνη το περιβάλλον που φαίνεται στην Εικόνα 5.4. Στο περιβάλλον αυτό διακρίνονται τα τρία βασικά μέρη του μοντέλου. Αρχικά το πεδίο εισαγωγής δεδομένων (Input), στη συνέχεια το πεδίο εκτέλεσης του προγράμματος (Run) και τέλος το πεδίο εμφάνισης των αποτελεσμάτων (Output). Πέρα από τα παραπάνω μπορούμε να διακρίνουμε και άλλες λειτουργίες όπως το Select Map όπου ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τον χάρτη της περιοχής μελέτης του. Στη συνέχεια την επιλογή Mode, όπου επιλέγεται το «oil spill prediction», καθώς και μια τρίτη λειτουργία «set parameters» όπου ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τις παραμέτρους με τις οποίες θα εκτελεστούν οι υπολογισμοί. Τα επιμέρους παράθυρα για τις παράμετρους παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.



**Εικόνα 5.4:** Περιβάλλον εργασίας MEDSLIK

Συνοψίζοντας για την σωστή παρουσίαση του μοντέλου είναι ιδιαίτερα σημαντικό να οριστούν τα:

1. Χαρακτηριστικά υπολογισμών και πετρελαιοκηλίδας.
2. Χάρτης περιοχής
3. Χαρακτηριστικά ανέμου και ρευμάτων.

### **5.3.1 Χαρακτηριστικά υπολογισμών και πετρελαιοκηλίδας**

Στο πεδίο (Input) όπως προαναφέρθηκε γίνεται η εισαγωγή όλων των δεδομένων που αφορούν την διαρροή και τα χαρακτηριστικά των υπολογισμών. Τα δεδομένα μπορούν είτε να εισαχθούν στο περιβάλλον του MEDSLIK (Εικόνα 5.5) , είτε να δομηθούν σε ένα αρχείο εισαγωγής δεδομένων (input file-medslk5.inp).

Εικόνα 5.5: Περιβάλλον εισαγωγής δεδομένων

Συγκεκριμένα:

1. Συμβολισμός περιοχής. Για το αρχείο εισαγωγής δεδομένων πρέπει να εισαχθεί ένα σύμβολο με τέσσερα γράμματα το οποίο να δείχνει την περιοχή της προσομοίωσης. Για παράδειγμα *cyba* για τον κόλπο της Κύπρου και *medf* για την Μεσόγειο Θάλασσα.
2. Στη συνέχεια τον τύπο των υπολογισμών. Ο τύπος των υπολογισμών γράφεται στην δεύτερη γραμμή του αρχείου εισαγωγής δεδομένων, ενώ στο περιβάλλον του MEDSLIK ορίζεται στην αρχική οθόνη εργασίας στην επιλογή "Mode" (Εικόνα 5.4). Στην παρούσα επιλέχθηκε η προσομοίωση πετρελαιοκηλίδας (oil spill prediction).
3. Αριθμός κηλίδων. Υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής του αριθμού των ταυτόχρονων κηλίδων που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή μελέτης. Το συγκεκριμένο γράφεται στην τρίτη γραμμή του αρχείου εισαγωγής δεδομένων.
4. Επιλογή επανεκκίνησης πετρελαιοκηλίδας (Restart).



5. Ημερομηνία εκκίνησης πετρελαιοκηλίδας (Date of Spill). Σε αυτό το σημείο εισάγεται ο χρόνος, ο μήνας και η μέρα την οποία ξεκίνησε η πετρελαιοκηλίδα. Αυτά γράφονται στην πέμπτη γραμμή του αρχείου.
6. Χρόνος εκκίνησης (Time of Spill). Ποια ώρα της ημέρας ξεκίνησε η πετρελαιοκηλίδα. Οι επιτρεπόμενες τιμές σε αυτό το σημείο είναι 0 έως 23. Επίσης στο αρχείο μπορεί να γραφτεί στην έκτη γραμμή με μορφή *hhmm*.
7. Διάρκεια πετρελαιοκηλίδας (Duration of Spill). Ο αριθμός των ωρών κατά τη διάρκεια των οποίων υπάρχει διαρροή. Για στιγμιαία διαρροή ο αριθμός αυτός ορίζεται με 0. Το συγκεκριμένο γράφεται στην έβδομη γραμμή του αρχείου.
8. Τοποθεσία διαρροής (Location of Spill). Για να οριστεί η τοποθεσία απαραίτητη είναι η εισαγωγή του γεωγραφικού πλάτους (latitude) και του γεωγραφικού μήκους (longitude) σε μοίρες και δεκαδικά λεπτά.
9. Διάρκεια προσομοίωσης (Length of Simulation). Οι ώρες που θα διαρκέσει η προσομοίωση της πετρελαιοκηλίδας. Το συγκεκριμένο εισάγεται στην δωδέκατη σειρά του αρχείου.
10. Ονομασία αρχείου εξόδου (Output Filename Prefix). Το όνομα του αρχείου εξόδου πρέπει να δοθεί με τρία γράμματα. Προεπιλογή του προγράμματος είναι το "out". Δεν επιτρέπονται νούμερα, παρά μόνο γράμματα. Γράφεται στην εντεκάτη γραμμή του αρχείου εισόδου. Ο ορισμός του ονόματος θέλει ιδιαίτερη προσοχή καθώς το πρόγραμμα κατά την εκτέλεση του αντικαθιστά προηγούμενα αρχεία με το ίδιο όνομα.
11. Χρονικό διάστημα εκτύπωσης αποτελεσμάτων (Time interval for Output). Είναι το χρονικό βήμα των αποτελεσμάτων σε ώρες. Μπορεί να γραφτεί στην δέκατη τρίτη σειρά του αρχείου.
12. Μονάδες όγκου κηλίδας (Units of Oil Volume). Σε αυτό το σημείο ορίζονται οι μονάδες του όγκου της πετρελαιοκηλίδας, οι οποίες μπορεί να είναι είτε βαρέλια (barrels), τόνοι (tons) ή κυβικά μέτρα πετρελαίου (cubic meters).
13. Συνολική ποσότητα διαρροής (Total Volume of Spill). Υπάρχει η επιλογή με το τσεκάρισμα του αντίστοιχου κουτιού να γίνει η εισαγωγή της συνολικής ποσότητας διαρροής σε μονάδες που έχουν ορισθεί παραπάνω. Σε αυτή την περίπτωση ο ρυθμός διαρροής υπολογίζεται αυτόματα.
14. Ρυθμός διαρροής (Spill Rate). Αν είναι γνωστός ο ρυθμός της διαρροής τότε με την επιλογή του αντίστοιχου κουτιού μπορεί να γίνει η εισαγωγή του στα δεδομένα. Έτσι το πρόγραμμα στη συνέχεια υπολογίζει τον όγκο της συνολικής διαρροής. Το στοιχείο αυτό μπορεί να γραφτεί στην δέκατη έβδομη σειρά του αρχείου.
15. Ο τύπος του πετρελαίου (Type of oil). Το όνομα και ο τύπος του πετρελαίου μπορεί να επιλεγθεί από μια λίστα με πάνω από 200 πετρέλαια. Το όνομα του πετρελαίου μπορεί να μπει στην δέκατη όγδοη σειρά του αρχείου εισαγωγής δεδομένων. Σε περίπτωση που το πετρέλαιο μελέτης δεν αντιστοιχεί σε κάποιο από αυτά της βάσης δεδομένων, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής «Generic Oil», το οποίο είναι και πρώτο στη λίστα. Σε αυτή τη περίπτωση γίνεται εισαγωγή του βαθμού API για το πετρέλαιο. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται ενδεικτικά οι τύποι πετρελαίου και τα αντίστοιχα API.

**Πίνακας 5.1** Κατηγοριοποίηση τύπων πετρελαίου με βάση το βαθμό API  
(Santos, Loh, Bannwart & Trevisan, 2014)

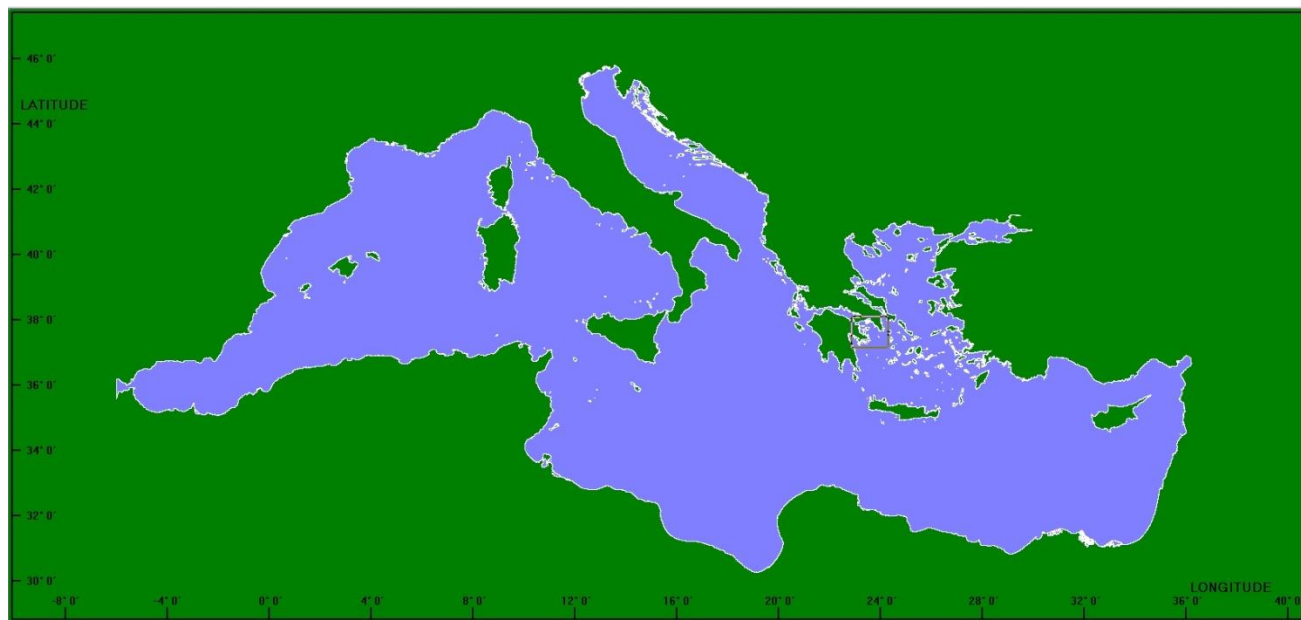
Κατάταξη πετρελαίου	° API
Ελαφρύ	° API $\geq$ 31
Μέτριο	$22 \leq$ ° API < 31
Βαρύ	$10 \leq$ ° API < 22
Πολύ βαρύ	° API $\leq$ 10

16. Μέγεθος κελιού κανάβου (Output Pixel Size). Το μέγεθος σε μέτρα των τετραγώνων του κανάβου υπολογισμού της πυκνότητας του πετρελαίου στην επιφανειακή κηλίδα και του πετρελαίου που έχει υποστεί διασπορά. Προτείνεται η τιμή του να κυμαίνεται από 25 έως 150 ανάλογα με την κλίμακα της κηλίδας. Το συγκεκριμένο γράφεται στην εικοστή τρίτη σειρά.

### 5.3.2 Χάρτης περιοχής

Στο περιβάλλον του MEDSLIK ο χάρτης της περιοχής επιλέγεται μέσα από το πρόγραμμα. Αφού επιλεγεί από το «Select Map» η ευρύτερη περιοχή μελέτης, πχ η Μεσόγειος Θάλασσα όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.6, στη συνέχεια μπορεί να γίνει μεγέθυνση σε οποιοδήποτε σημείο αυτής. Για την εμφάνιση των χαρτών απαραίτητα είναι τα αρχεία GIF τα οποία διαθέτει το πρόγραμμα για όλες τις περιοχές που διαθέτει.

Το είδος των ακτών της Μεσογείου θεωρείται από το πρόγραμμα ότι είναι αμμώδεις ακτές.



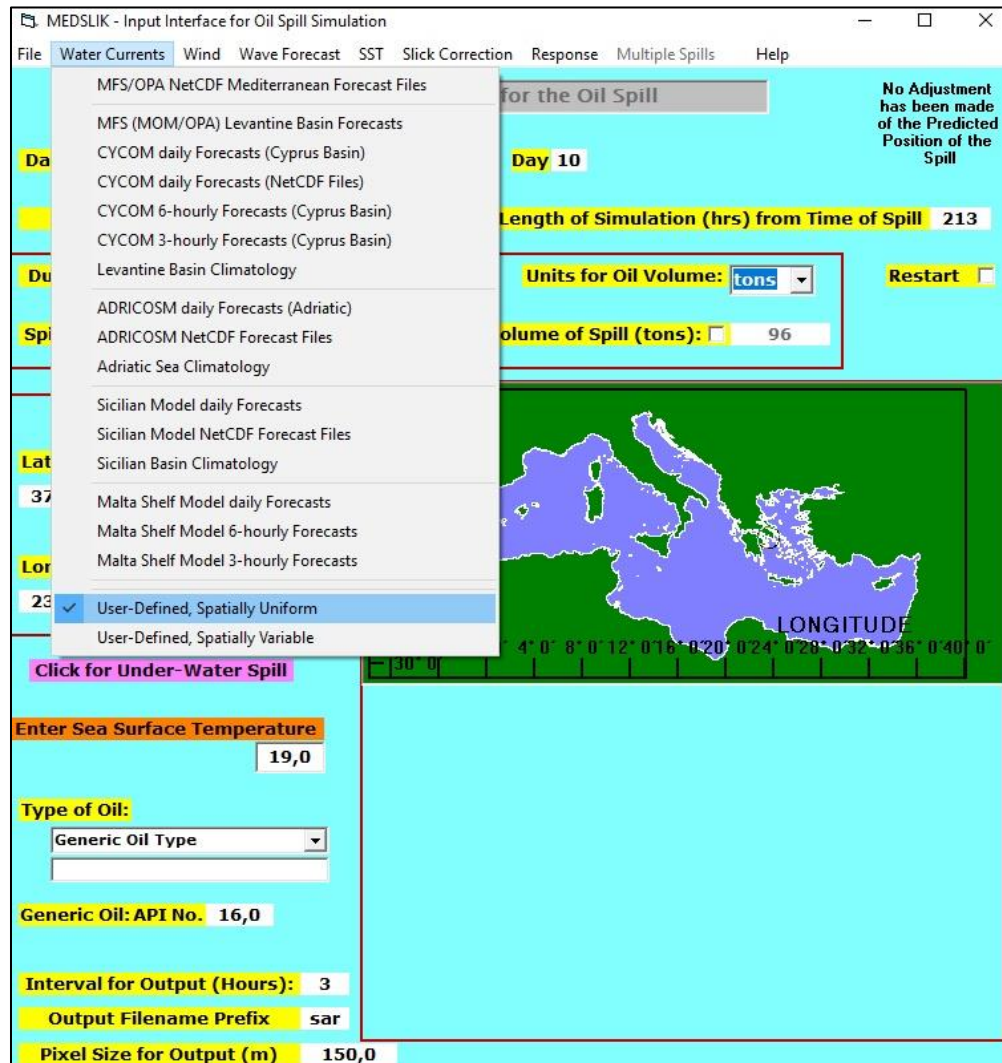
**Εικόνα 5.6:** Επιλογή περιοχής μελέτης

Σε περίπτωση που η περιοχή προσομοίωσης δεν υπάρχει στη βάση δεδομένων του MEDSLIK, υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας νέας περιοχής μελέτης. (R.W. Lardner B.A., Ph.D., Sc.D., 2004,2011)

### 5.3.3 Χαρακτηριστικά ανέμου και ρευμάτων

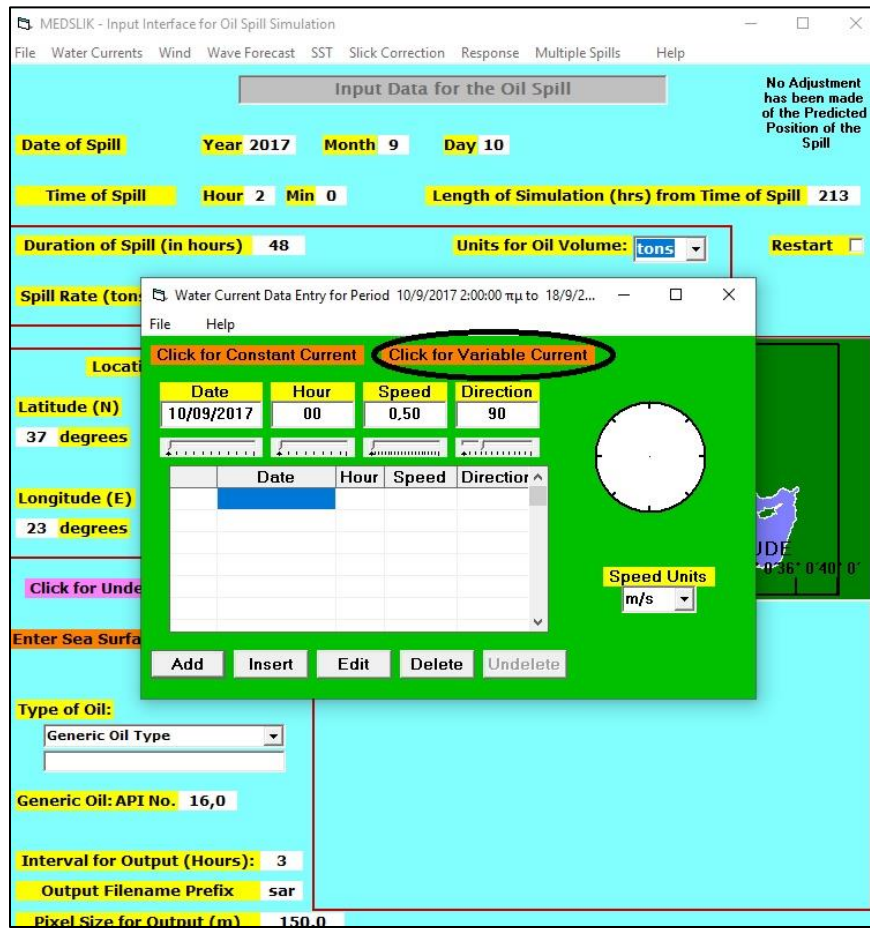
Αρχικά όσον αφορά τα ρεύματα το MEDSLIK έχει τη δυνατότητα εισαγωγής ρευμάτων τα οποία δίδονται από διάφορες υπηρεσίες, αναλυτικά αυτά φαίνονται στην επόμενη εικόνα από το περιβάλλον του

MEDSLIK. Αν όμως ο χρήστης δεν διαθέτει αυτά τα δεδομένα, υπάρχει η δυνατότητα να εισάγει χειροκίνητα τα ρεύματα της περιοχής μελέτης επιλέγοντας σε πρώτη φάση αν επιθυμεί να είναι χωρικά σταθερά ή μεταβλητά. Η συγκεκριμένη επιλογή είναι η κατάλληλη όταν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία από τοπικούς σταθμούς για μία συγκεκριμένη τοποθεσία.

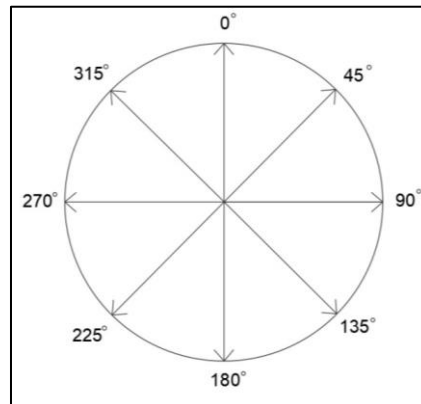


Εικόνα 5.7 Επιλογή μεθόδου εισαγωγής ρευμάτων στο MEDSLIK

Στη συγκεκριμένη επιλογή ο χρήστης πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός στην εισαγωγή της ημερομηνίας καθώς τα δεδομένα πρέπει να ξεκινούν όταν ξεκινά η διαρροή και να σταματούν στο τέλος της προσομοίωσης. Επίσης οι τιμές των ταχυτήτων δίνονται με έως και τρία δεκαδικά και για υποδιαστολή χρησιμοποιείται μόνο η τελεία (.). Τέλος οι διευθύνσεις των ταχυτήτων των ρευμάτων ορίζονται όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.9.

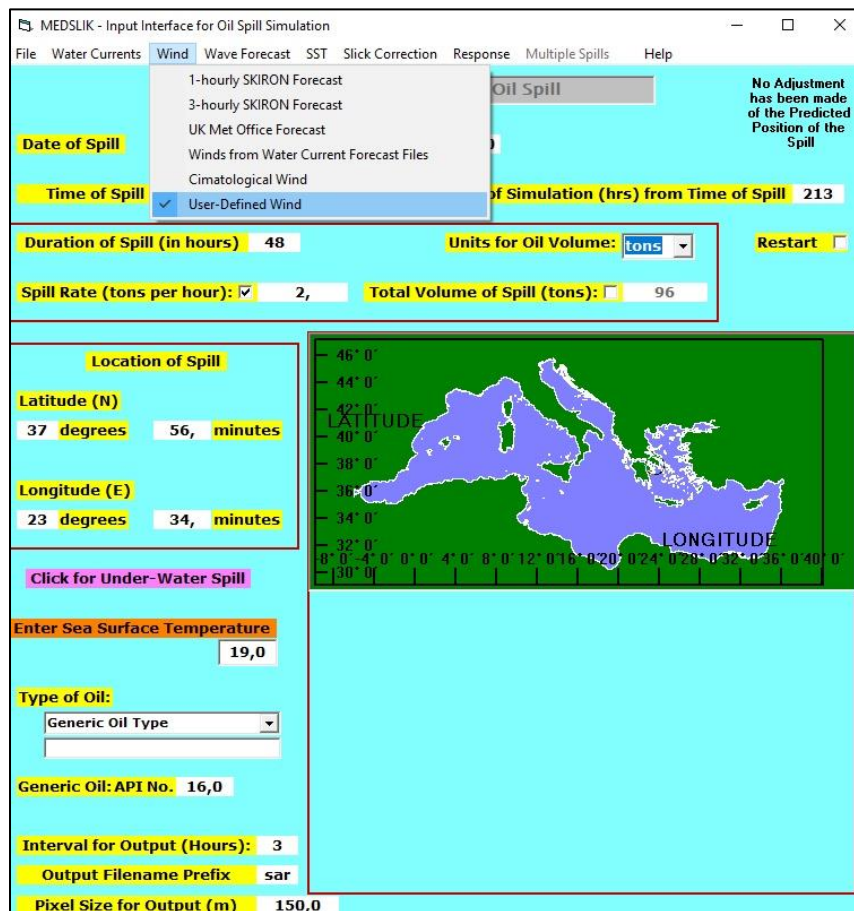


Εικόνα 5.8: Εισαγωγή ρευμάτων σταθερά ως προς το χώρο και μεταβλητά ως προς το χρόνο



Εικόνα 5.9: Ορισμός διεύθυνσης ρευμάτων

Για την εισαγωγή των ανέμων στην προσομοίωση υπάρχει μια σχετικά αντίστοιχη διαδικασία. Το μοντέλο έχει τη δυνατότητα εισαγωγής ανέμων από προβλέψεις διάφορων υπηρεσιών, αναλυτικά αυτά φαίνονται στην Εικόνα 5.10 από το περιβάλλον του MEDSLIK.



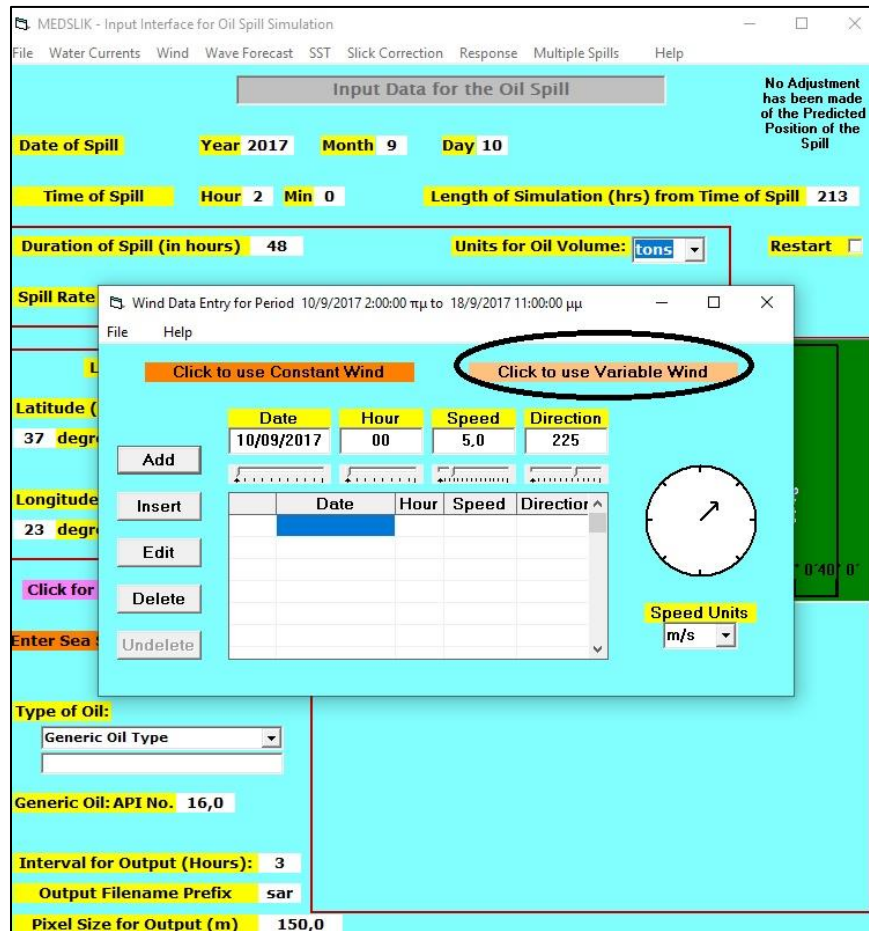
Εικόνα 5.10 Επιλογή μεθόδου εισαγωγής ανέμων

Όπως φαίνεται και στην εικόνα το MEDSLIK επεξεργάζεται:

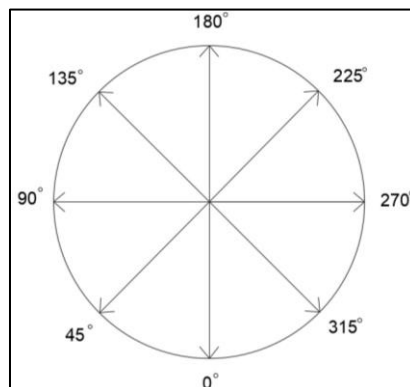
- Δεδομένα SKIRON για μία ή τρεις ώρες. Επισημαίνεται ότι τα δεδομένα προβλέψεων του SKIRON είναι τα πιο αξιόπιστα για την Ανατολική Μεσόγειο.
- Δεδομένα από το UK Met Office Wind Forecasts. Τα δεδομένα αυτά καλύπτουν τις περιοχές της Μεσογείου Βόρεια του γεωγραφικού πλάτους  $32.56^\circ$  και δυτικά του γεωγραφικού μήκους  $34.36^\circ$ .
- Δεδομένα από αρχεία προβλέψεων ρευμάτων.
- Δεδομένα από Climatological Wind. Σε αυτή την επιλογή η προσομοίωση χρησιμοποιεί τους μέσους ανέμους του χρόνου για την πετρελαιοκηλίδα και την τοποθεσία της, οι οποίοι είναι διαθέσιμοι σε μία βάση δεδομένων με μηνιαίους μέσους ανέμους. Αυτή η επιλογή είναι χρήσιμη για προσομοιώσεις πρόβλεψης κινδύνου.
- Δεδομένα τα οποία εισάγονται χειροκίνητα από τον χρήστη. Αυτή η επιλογή δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει τα δικά του δεδομένα τα οποία μπορεί να έχουν βασιστεί στην παρατήρηση και σε μετρήσεις για την τοποθεσία της διαρροής. Μπορεί να δώσει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα της τροχιάς της πετρελαιοκηλίδας αν υπάρχουν δεδομένα ανέμου από τοπικούς σταθμούς για την τοποθεσία της διαρροής. Ειδικά σε περιπτώσεις προσομοίωσης ατυχημάτων είναι η ιδανική επιλογή. Σε αυτή την περίπτωση όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.11 αναγκαία είναι η εισαγωγή της χρονικής στιγμής, η οποία θα πρέπει να ξεκινάει την στιγμή έναρξης της διαρροής



και να τελειώνει στο τέλος της προσομοίωσης. Καλό είναι το χρονικό βήμα που θα εισαχθούν οι άνεμοι να συμπίπτει με το χρονικό βήμα εξαγωγής αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια γίνεται εισαγωγή της ταχύτητας του ανέμου με ένα δεκαδικό ψηφίο και με τελεία (.) η υποδιαστολή. Τέλος πρέπει να δοθεί η διεύθυνση του ανέμου η οποία ορίζεται όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.12 και θέλει προσοχή καθώς είναι αντίθετη αυτής των ρευμάτων.



Εικόνα 5.11: Εισαγωγή ανέμων μεταβλητούς ως προς τον χρόνο



Εικόνα 5.12: Ορισμός διεύθυνσης ανέμου

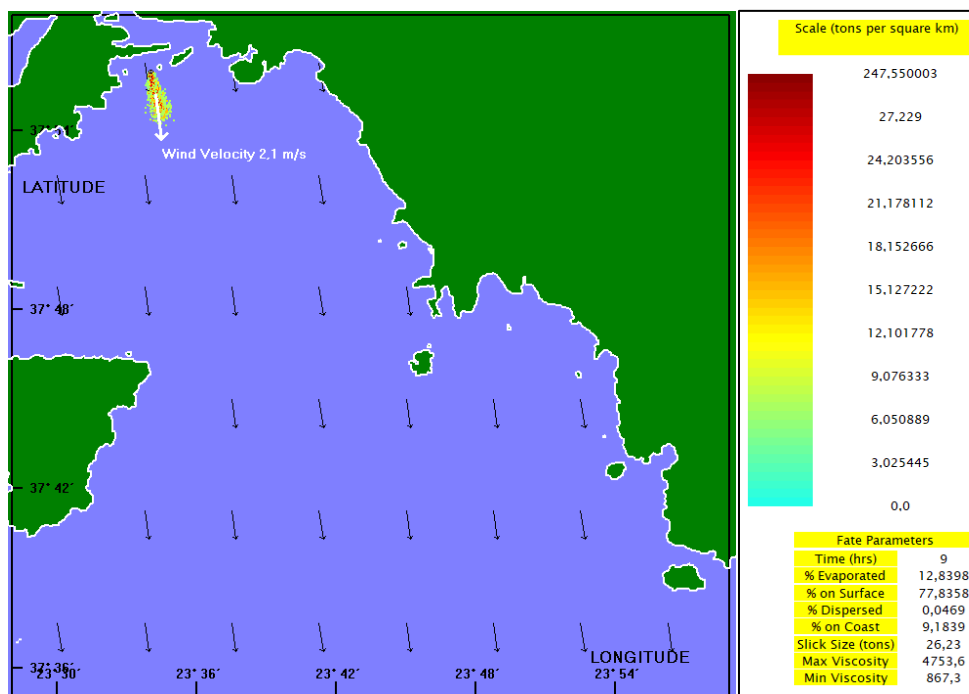


## 5.4 Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου

Αφού το MEDSLIK πραγματοποιήσει τους υπολογισμούς με τα δεδομένα που εισήχθησαν, στο τρίτο μέρος του μοντέλου υπάρχει η δυνατότητα εμφάνισης των αποτελεσμάτων αυτών (Output).

Αρχικά από την επιλογή “File” μπορεί ο χρήστης να επιλέξει το αποτέλεσμα που επιθυμεί να δει. Για παράδειγμα μπορεί να επιλέξει την εντολή προβολής του πετρελαίου στη επιφάνεια της θάλασσας (view surface oil) στον χρόνο που επιθυμεί.

Τα αποτελέσματα εμφανίζονται ανάλογα με το χρονικό διάστημα εκτύπωσης αποτελεσμάτων (Time interval for Output) που έχει οριστεί στην εισαγωγή των δεδομένων. Το μοντέλο έχει την δυνατότητα να δώσει στον χρήστη γραφικά την πετρελαιοκηλίδα μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή με υπόμνημα που δείχνει την παρουσία του πετρελαίου σε τόνους ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο. Υπάρχει η δυνατότητα να εμφανιστούν και τα ρεύματα και ο άνεμος που εισήχθηκε για τον υπολογισμό. Επίσης δίδονται διαγράμματα για τις παραμέτρους καθώς και animation για όλες τις χρονικές στιγμές, έτσι ώστε να είναι πιο κατανοητή η τροχιά της πετρελαιοκηλίδας.



Εικόνα 5.13: Προσομοίωση τροχιάς πετρελαιοκηλίδας

Στην εικόνα φαίνεται αρχικά ο χάρτης της περιοχής μελέτης με την πετρελαιοκηλίδα στην δεδομένη χρονική στιγμή. Επίσης φαίνεται το διάνυσμα της ταχύτητας του ανέμου καθώς και τα διανύσματα των θαλάσσιων ρευμάτων. Στα δεξιά το μοντέλο εμφανίζει ένα υπόμνημα σε tons/km<sup>2</sup> το οποίο αντιπροσωπεύει τις ποσότητες ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο που απεικονίζονται στην πετρελαιοκηλίδα. Τέλος, δεξιά εμφανίζονται τα ποσοστά επιρροής των παραμέτρων στην πετρελαιοκηλίδα.

Στο μοντέλο υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής γραφημάτων για τις παραμέτρους των διεργασιών της πετρελαιοκηλίδας συναρτήσει του χρόνου. Επιλέγοντας την εντολή «Display oil fate» από το μενού «File» ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τέσσερα είδη γραφημάτων. Αρχικά το «oil fate parameters» το οποίο δίνει τα ποσοστά των παραμέτρων σε συνάρτηση με το χρόνο. Αυτά τα ποσοστά έχουν να κάνουν με το ποσοστό του πετρελαίου που έχει μείνει στην επιφάνεια της θάλασσας, το ποσοστό που έχει εξατμιστεί, το

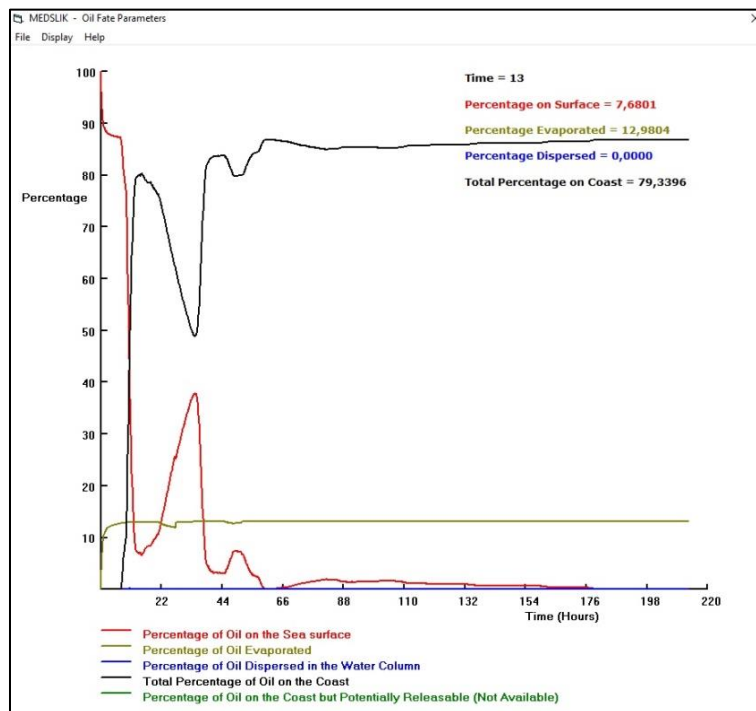
ποσοστό που έχει διασπαστεί στην στήλη ύδατος λόγω της δράσης των κυμάτων, το ποσοστό που έχει προσκολληθεί στην ακτή, καθώς και αυτό που μπορεί να ξαναγυρίσει πίσω δεδομένων των συνθηκών. (Εικόνα 5.14)

Στη συνέχεια είναι η επιλογή «oil viscosity» που δίνει τη συνάρτηση για το ιξώδες του πετρελαίου. Το ιξώδες αυξάνεται με τον χρόνο καθώς γίνονται οι διεργασίες της εξάτμισης και της γαλακτωματοποίησης. Σε αυτή την επιλογή το διάγραμμα δίνει το μέγιστο και το ελάχιστο ιξώδες της πετρελαιοκηλίδας μόνο λόγω της εξάτμισης, αλλά και το μέγιστο και το ελάχιστο της κρέμας «mousse» από την γαλακτωματοποίηση. (Εικόνα 5.15)

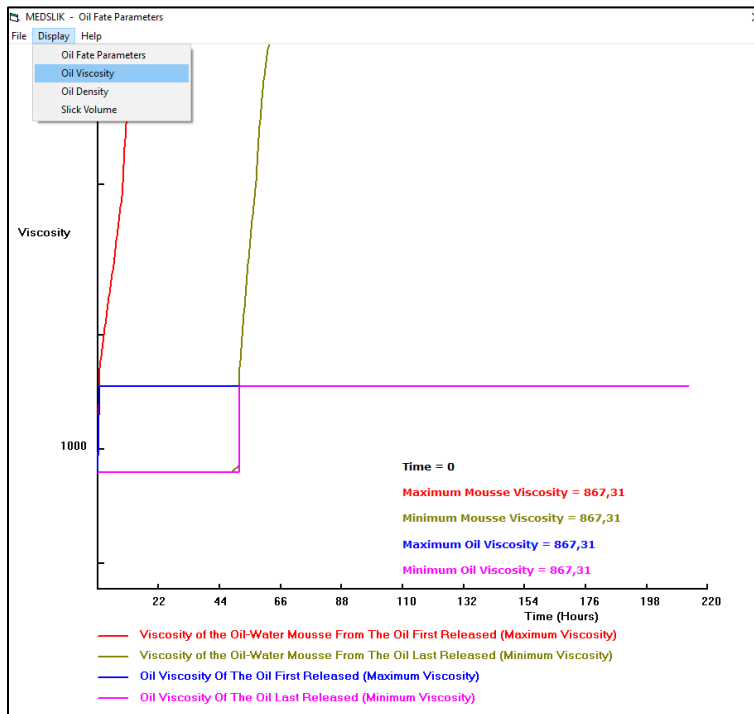
Η επόμενη επιλογή που έχει ο χρήστης είναι η «oil density», όπου φαίνεται η πυκνότητα του πετρελαίου συναρτήσει του χρόνου, καθώς λαμβάνουν χώρα η εξάτμιση και η γαλακτωματοποίηση. Το διάγραμμα δίνει τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές για την πυκνότητα της πετρελαιοκηλίδας αλλά και τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές για το κλάσμα του νερού που έχει γαλακτωματοποιηθεί. (Εικόνα 5.16)

Τέλος υπάρχει η επιλογή «slick volume». Ο όγκος της κηλίδας μειώνεται με την εξάτμιση αλλά αυξάνεται όταν λαμβάνει χώρα η γαλακτωματοποίηση. Το διάγραμμα δίνει τον όγκο του πετρελαίου που έχει διαρρεύσει και τον όγκο της κρέμας «mousse» της γαλακτωματοποίησης. Συνήθως ο όγκος της κρέμας αυξάνεται πολύ γρήγορα και μπορεί να φτάσει και τον όγκο της διαρροής. Μετά όμως μειώνεται λόγω της διάσπασης και πιθανά λόγω της προσαιγιάλωσης. (Εικόνα 5.17)

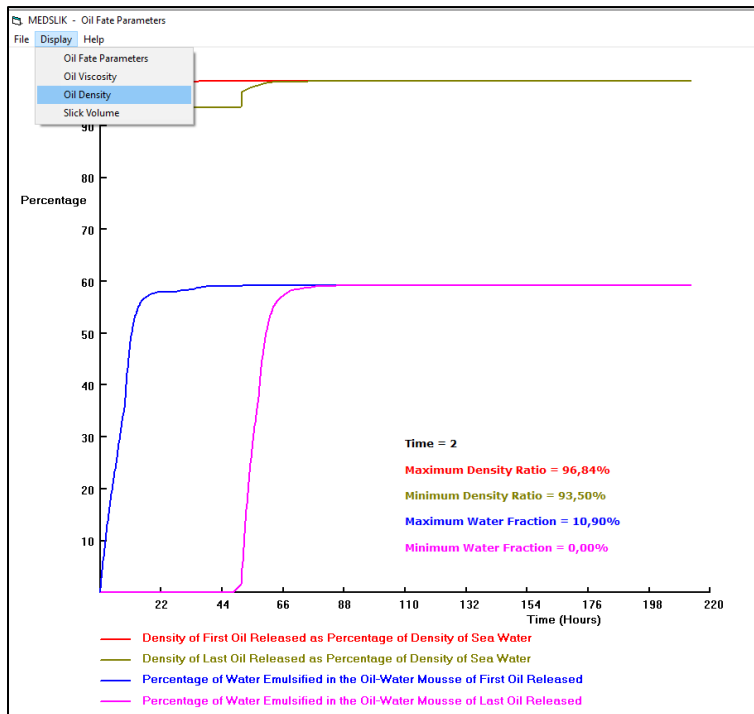
Τα διαγράμματα αυτά έχουν την δυνατότητα επιλογής συγκεκριμένης χρονικής στιγμής με τον κέρσορα και εμφάνισης των επιμέρους τιμών για κάθε μεταβλητή του διαγράμματος.



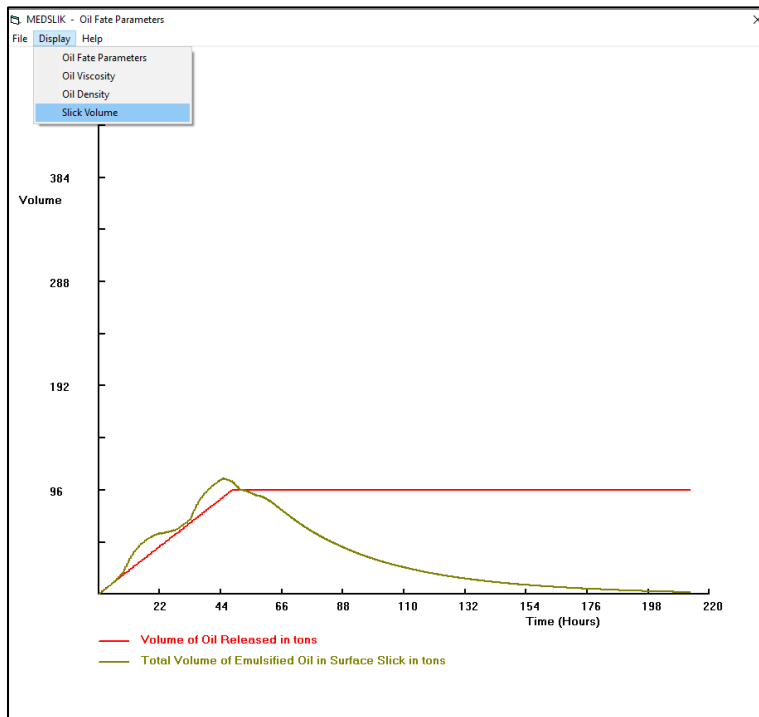
Εικόνα 5.14: Διάγραμμα επιρροής παραμέτρων



Εικόνα 5.15: Χρονική μεταβολή του ιξώδες του πετρελαίου



Εικόνα 5.16: Χρονική μεταβολή της πυκνότητας του πετρελαίου



Εικόνα 5.17: Χρονική μεταβολή του όγκου της κηλίδας

## 6. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ ΤΟΥ «ΑΓΙΑ ΖΩΝΗ II»

### 6.1 Δεδομένα

Για την προσομοίωση της πετρελαιοκηλίδας είναι απαραίτητα τα υδροδυναμικά δεδομένα για την περιοχή του Σαρωνικού για τις ημέρες του ατυχήματος. Για την επιλογή των πιο αξιόπιστων δεδομένων έχει ήδη γίνει έλεγχος στο πρόγραμμα GNOME (Τσιάτσου, 2018), με βάση τις παρατηρήσεις για την εξέλιξη της πετρελαιοκηλίδας, όπως αυτή παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4. Στη συνέχεια αναφέρεται ποια δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα προσομοίωση.

#### 6.1.1 Σύγκριση Δεδομένων

Παρακάτω αναφέρονται οι διαθέσιμες πηγές για τα υδροδυναμικά δεδομένα τα οποία και εξετάστηκαν στο πρόγραμμα προσομοίωσης GNOME.

Για τους ανέμους οι πηγές που εξετάστηκαν ήταν :

- Σύστημα ΠΟΣΕΙΔΩΝ
- Ιστοσελίδα πρόβλεψης καιρού ([www.timeanddate.de](http://www.timeanddate.de) )
- Ιστοσελίδα πρόβλεψης καιρού ([www.wunderground.com](http://www.wunderground.com) )
- Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY)
- Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών

Για τα ρεύματα η μόνη πηγή που εξετάστηκε ήταν το Σύστημα ΠΟΣΕΙΔΩΝ.

Με βάση τα αποτελέσματα του GNOME (Τσιάτσου, 2018), η καλύτερη προσομοίωση με τους ανέμους έγινε με τα δεδομένα από την ιστοσελίδα [www.wunderground.com](http://www.wunderground.com) καθώς και από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία. Τα ρεύματα δεν έδωσαν τα επιθυμητά αποτελέσματα καθώς κινούσαν την πετρελαιοκηλίδα μόνο για τις πρώτες ώρες.

Για τη εξαγωγή των τελικών δεδομένων για τον άνεμο, έγινε βαθμονόμηση των ανεμολογικών δεδομένων από τέσσερις πηγές. Καταγράφηκαν τα δεδομένα από το Σύστημα ΠΟΣΕΙΔΩΝ, από τις ιστοσελίδες πρόγνωσης καιρού καθώς και από τα ιστορικά δεδομένα της περιοχής και της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (EMY). Τα δεδομένα αυτά προσομοιάζουν πιο σωστά την τροχιά της πετρελαιοκηλίδας με βάση το πραγματικό περιστατικό.

#### 6.1.2 Τα υδροδυναμικά δεδομένα που εισήχθησαν στο MEDSLIK

Συνεπώς με βάση την σύγκριση των δεδομένων και την βαθμονόμηση τους (Τσιάτσου, 2018), επιλέχθηκαν τα δεδομένα για τον άνεμο που προσομοιάζουν το ατύχημα και εισήχθησαν με την χειροκίνητη μέθοδο όπως φαίνεται και στην παράγραφο 5.3.3 . Στον Πίνακα 6.1 φαίνονται ενδεικτικά ανά 12 ώρες οι τιμές που εισήχθησαν για τον άνεμο και αναλυτικά στο Παράρτημα 2.

**Πίνακας 6.1** Δεδομένα Εισόδου Ανέμου

Χρονική Στιγμή Προσομοίωσης (hr)	Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Διεύθυνση Ανέμου (°)
0	2.06	340
12	4.70	140
24	0.00	0
36	3.60	180
48	0.00	0
60	4.63	250
72	2.57	340
84	3.89	225
96	2.62	308
108	3.58	315
120	1.09	297
132	4.12	190
144	1.53	302
156	1.94	225
168	0.00	0
180	4.12	190
192	1.54	99
204	4.63	190

Υπάρχει μία απλή μέθοδος η οποία μπορεί να υπολογίσει τα ρεύματα βασισμένη σε μετρήσεις σε παράκτιες περιοχές. Στα παράκτια ύδατα, τα ανεμογενή ρεύματα (αυτά που δημιουργούνται λόγω της δράσης του ανέμου) είναι τα βασικά που επηρεάζουν την υδροδυναμική κυκλοφορία. Συνεπώς, ανάλογα με τα δεδομένα για της ταχύτητες του ανέμου από τις μετρήσεις, μπορούν να υπολογιστούν οι ταχύτητες των ανεμογενών ρευμάτων με βάση την εξίσωση (Huacan Fang & Meglan Duan, 2014):

$$u_{cw} = K_w u_w \quad (6.1)$$

όπου  $u_{cw}$  είναι η τιμή που προκύπτει για την ταχύτητα του ρεύματος σε m/s.  $K_w$  είναι ο συντελεστής του ανέμου ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ  $0.024 < K_w < 0.050$ , γενικά χρησιμοποιείται η τιμή  $K_w=0.030$ , η οποία χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα για τους υπολογισμούς. Θεωρήθηκε ότι η διεύθυνση των ρευμάτων είναι ίδια με αυτή του ανέμου καθώς η μικρή διαφορά που μπορεί να υπάρχει δεν επηρεάζει σημαντικά την εξέλιξη της τροχιάς της πετρελαιοκηλίδας. Τέλος  $u_w$  είναι η ταχύτητα του ανέμου σε m/s.

Στον Πίνακα 6.2 φαίνονται ενδεικτικά ανά 12 ώρες οι τιμές που εισήχθησαν για τα ρεύματα και αναλυτικά στο Παράρτημα 2.



Πίνακας 6.2 Δεδομένα Εισόδου Ρευμάτων

Χρονική Στιγμή Προσομοίωσης (hr)	Ταχύτητα Ρεύματος (m/s)	Διεύθυνση Ρεύματος (°)
0	0.062	170
12	0.155	331
24	0.000	180
36	0.124	10
48	0.000	180
60	0.139	60
72	0.077	160
84	0.117	45
96	0.044	127
108	0.107	135
120	0.093	140
132	0.093	30
144	0.036	134
156	0.058	45
168	0.000	180
180	0.154	30
192	0.000	180
204	0.154	20

### 6.1.3 Στοιχεία Διαρροής- Υπολογισμών

Πίνακας 6.3 Στοιχεία Διαρροής ΑΓΙΑ ΖΩΝΗ II και Υπολογισμών MEDSLIK

Ημερομηνία εκκίνησης υπολογισμών	10 Σεπτέμβριος 2017
Ώρα έναρξης διαρροής	01:45
Ώρα έναρξης μοντέλου	2:00 <sup>(1)</sup>
Διάρκεια μοντέλου (ώρες)	213
Χρονικό βήμα υπολογισμών (/ώρα)	2
Όνομα πετρελαιοκηλίδας	Agia Zoni II
Τύπος πετρελαίου	Generic Type : API: 16
Ποσότητα διαρροής (μετρικοί τόνοι)	137
Τοποθεσία Διαρροής	Lat 37.93, Long 23.56
Ημερομηνία λήξης πετρελαιοκηλίδας	12 Σεπτέμβριος 2017
Ώρα λήξης πετρελαιοκηλίδας	9:10
Αριθμός σωματιδίων	10000
Συντελεστής ανέμου (wind factor)	0.031
Συντελεστής διάχυσης (cm <sup>2</sup> /s)	20.000

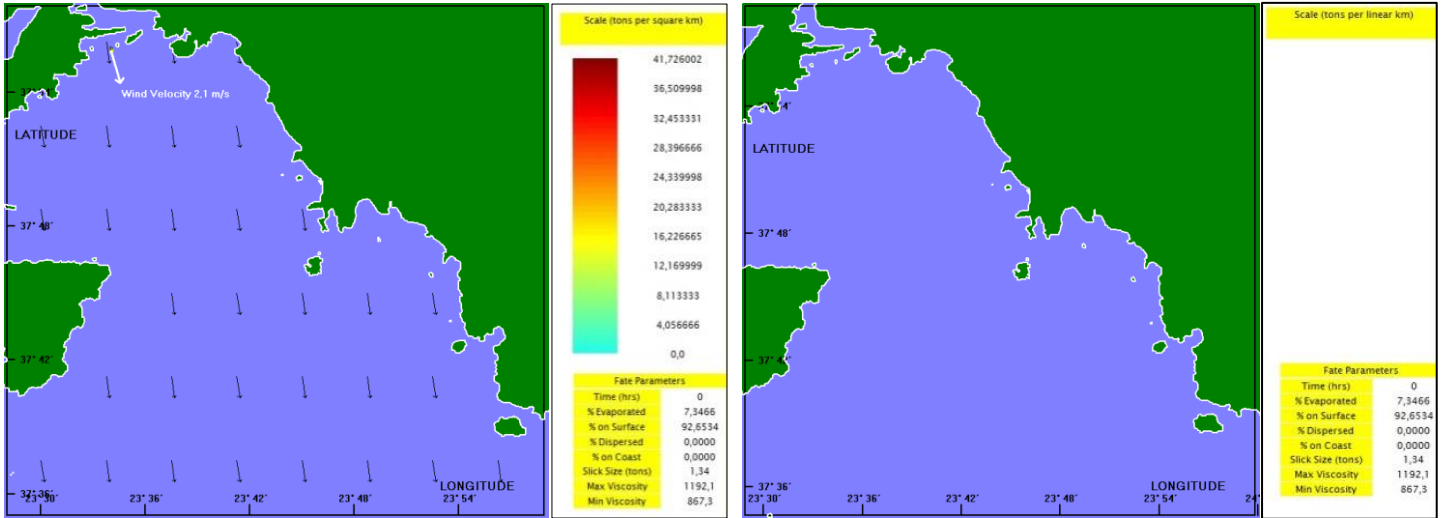
Σημείωση (1) : Ενώ το ατύχημα έγινε, σύμφωνα με τις μαρτυρίες και τα επίσημα στοιχεία στις 01:45, στο MEDSLIK δεν ήταν δυνατή η εισαγωγή της τιμής «45» στα λεπτά, καθώς μπορεί να αναγνωρίσει μόνο μέχρι το «24», όπως και στις ώρες.

Η περιοχή μελέτης είναι ο Σαρωνικός Κόλπος και στο πρόγραμμα του MEDSLIK η περιοχή αυτή εισάγεται όπως έχει ήδη περιγραφεί στην Παράγραφο 5.3.2.

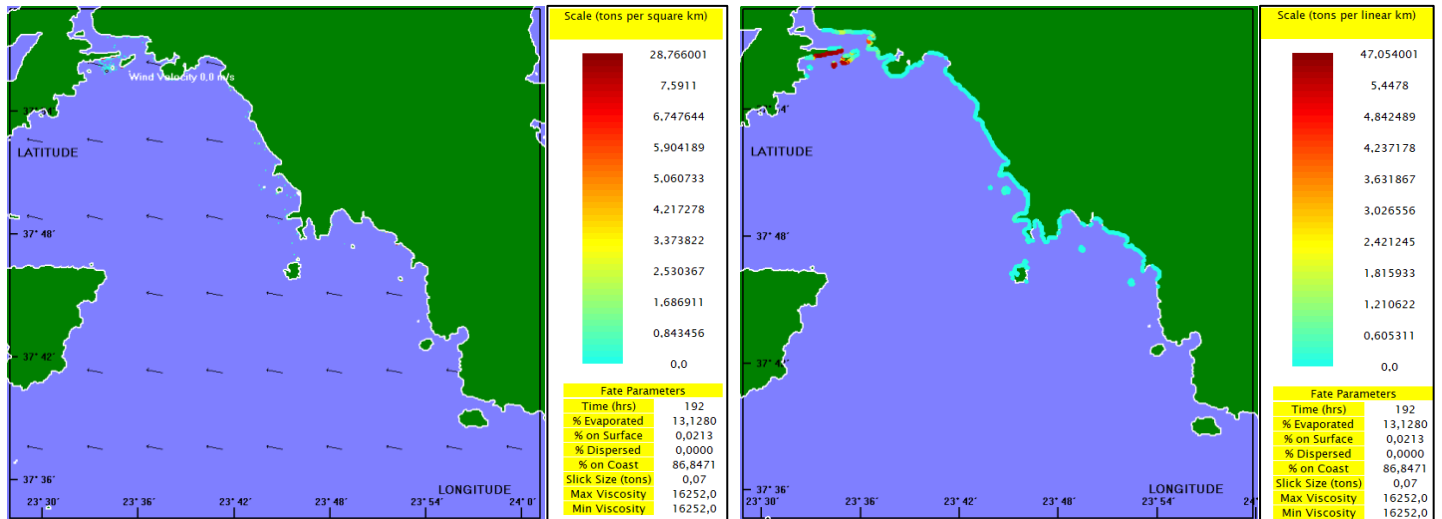
## 6.2 Αποτελέσματα Υπολογισμών

Με βάση τα δεδομένα και τα στοιχεία εισόδου που παρουσιάστηκαν παραπάνω έγινε η προσομοίωση του ατυχήματος τα αποτελέσματα της οποία παρουσιάζονται σε αυτό το υποκεφάλαιο. Στις εικόνες αριστερά είναι το επιφανειακό πετρέλαιο και δεξιά το πετρέλαιο που έχει προσκολληθεί στις ακτές. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για όλες τις ημέρες παρουσιάζονται στο Παράρτημα 3.

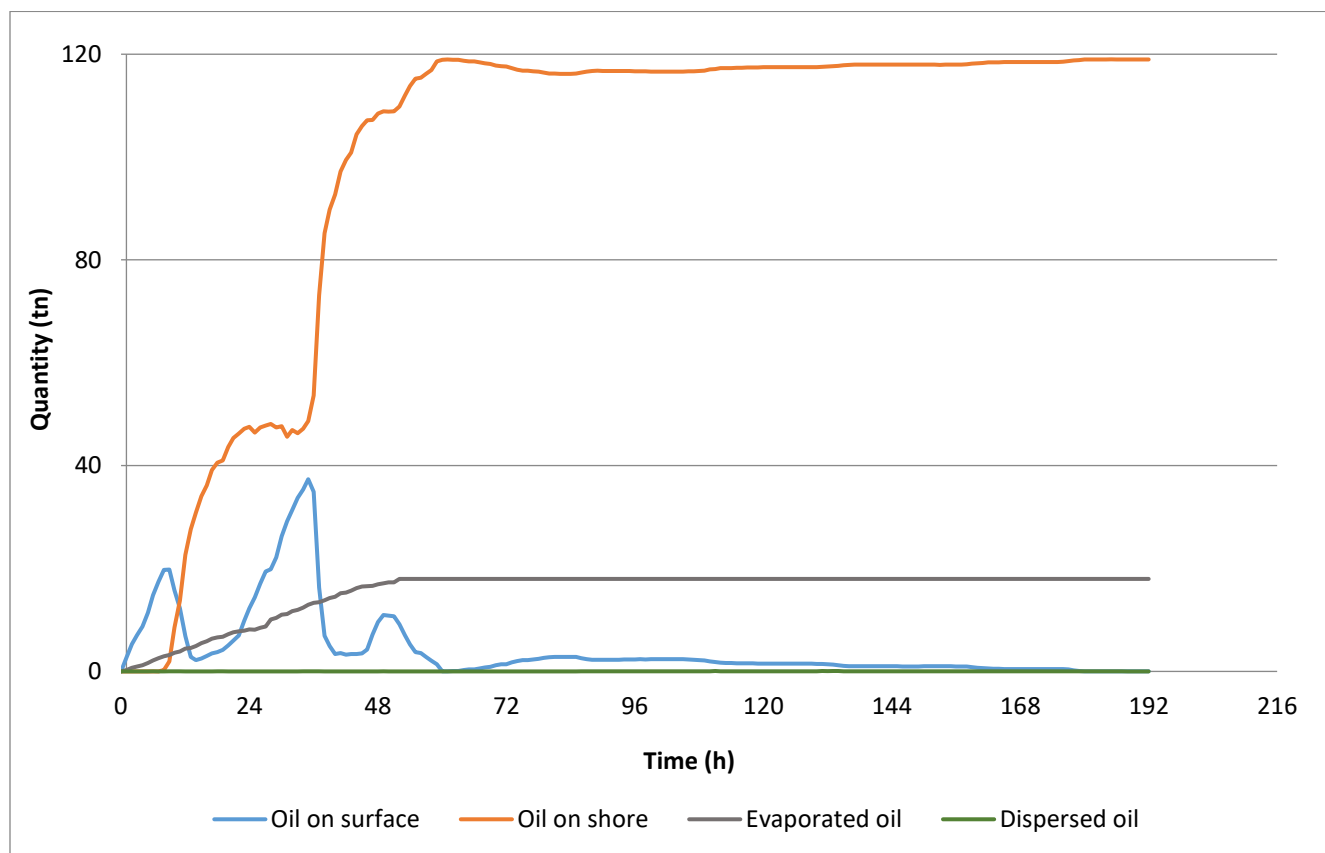
10/09/2017 Ώρα: 02:00



18/09/2017 Ώρα: 02:00



Εικόνα 6.1: Υπόδειγμα αποτελεσμάτων MEDSLIK

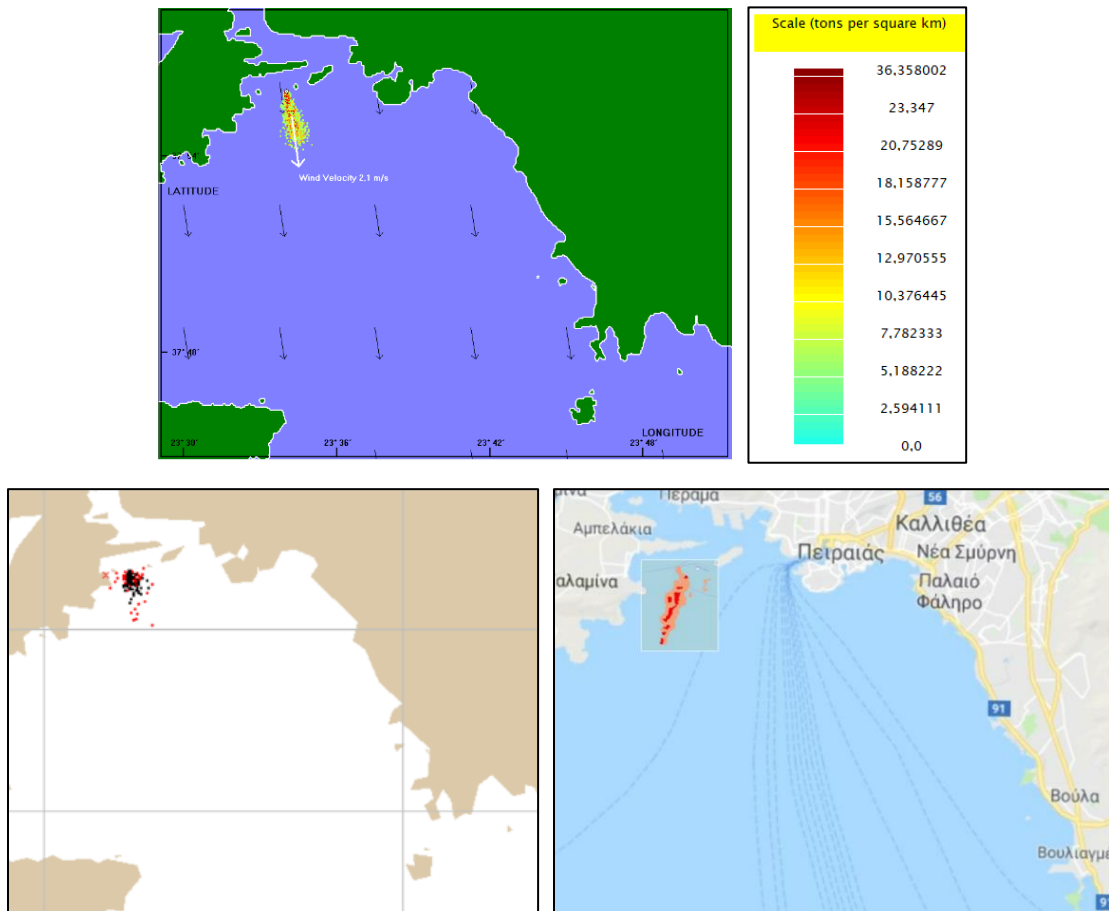


**Εικόνα 6.2:** Μεταβολή της μάζας του πετρελαίου συναρτήσει του χρόνου στο μοντέλο του MEDSLIK

Στην εικόνα 6.2 φαίνεται ότι η ποσότητα του πετρελαίου στην επιφάνεια της θάλασσας έχει διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της διαρροής (πρώτες 48 ώρες). Στην αρχή φαίνεται να αυξάνεται τις πρώτες 9 ώρες με την ποσότητα του πετρελαίου να φτάνει τους 19,8 τόνους. Παρατηρείται ότι μειώνεται για τις επόμενες ώρες καθώς οι καιρικές συνθήκες έχουν οδηγήσει μεγάλες ποσότητες πετρελαίου στην ακτή οι οποίες αυξάνονται με ραγδαίο ρυθμό μέχρι τη χρονική στιγμή  $t=23$  ώρες φτάνοντας σε τιμές έως και 47 τόνους. Στη συνέχεια παρατηρείται αύξηση της ποσότητας του πετρελαίου στην επιφάνεια μέχρι τη χρονική στιγμή  $t=36$  ώρες όπου μετά μειώνεται σταδιακά μέχρι έως ότου φτάσει σε αμελητέες τιμές. Ταυτόχρονα η ποσότητα του πετρελαίου στην ακτή μένει σταθερή ενώ ταυτόχρονα αυξάνονται οι ποσότητες του πετρελαίου που εξατμίζονται. Η διεργασία της εξατμίσης φαίνεται ότι μένει σταθερή μετά από το τέλος της διαρροής (48 ώρες). Μαζί με την μείωση του επιφανειακού πετρελαίου παρατηρείται ραγδαία αύξηση του πετρελαίου που πάει στην ακτή, φτάνοντας τιμές έως και 119 τόνους. Η διασπορά έχει αμελητέα επίδραση φτάνοντας ως μέγιστη ποσότητα τα 18 κιλά.

### 6.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

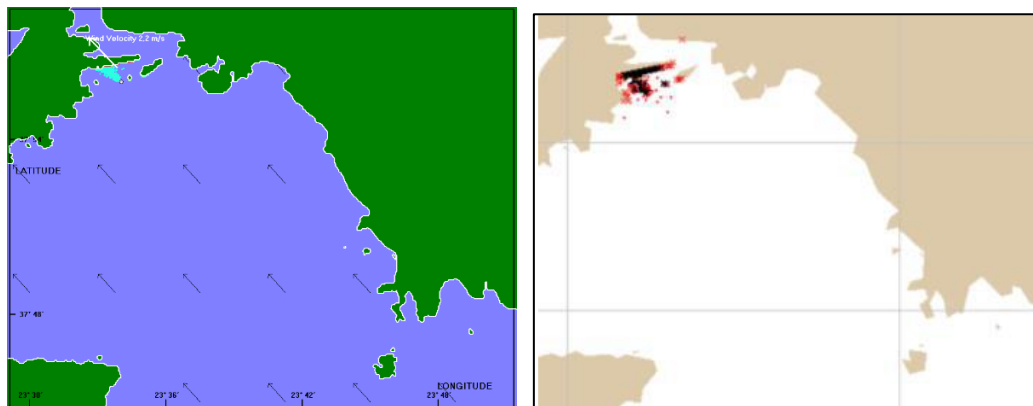
Στην παρούσα παράγραφο θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου MEDSLIK με τα αποτελέσματα του μοντέλου GNOME (Τσιάτσιου, 2018) καθώς και με την προσομοίωση της WWF (WWF Ελλάς, 2017) η οποία έχει προκύψει από τα στοιχεία από τις δορυφορικές εικόνες τις μέρες του ατυχήματος. Η σύγκριση με την WWF είναι και η πιο σημαντική καθώς αυτή είναι που παρουσιάζει την τροχιά της πετρελαιοκηλίδας όπως αυτή έγινε.



**Εικόνα 6.3** Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις 10/09/2017 στις 08:00 το πρωί. Πάνω αποτελέσματα MEDSLIK, κάτω αριστερά GNOME και κάτω δεξιά δορυφορικές από την WWF

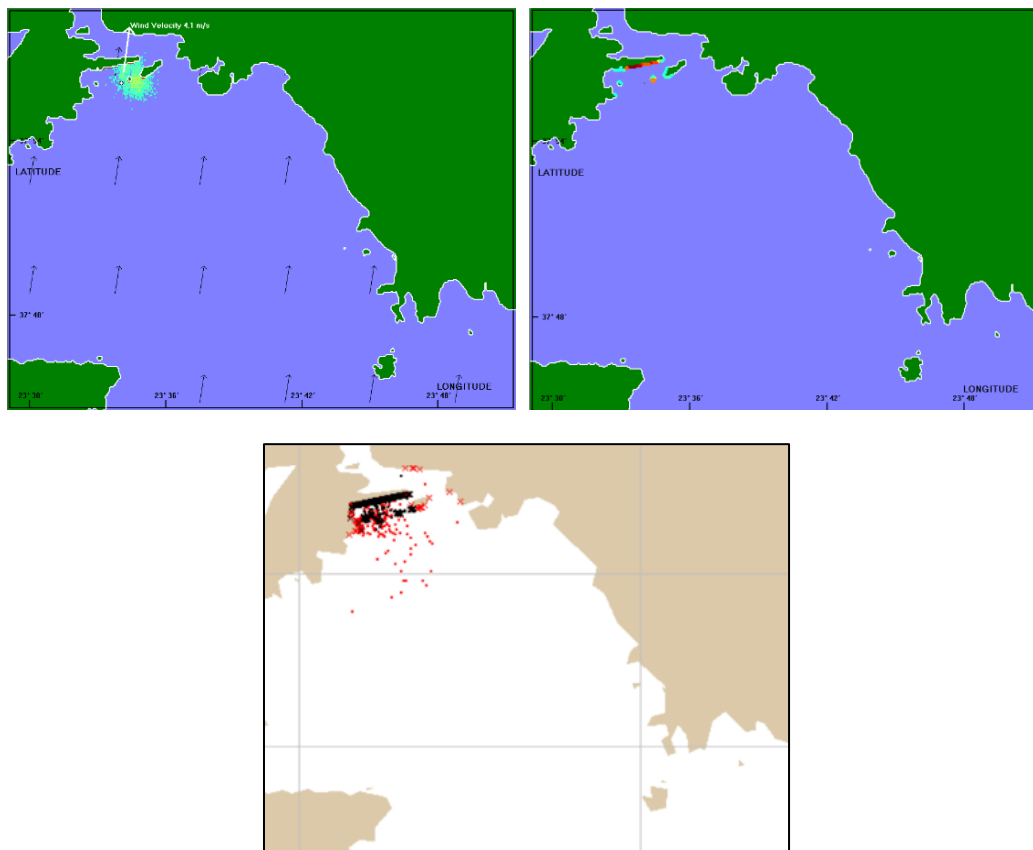
Στην Εικόνα 6.3 φαίνεται ότι και τα δύο μοντέλα δίνουν την ίδια εικόνα για την τροχιά της πετρελαιοκηλίδας τις πρώτες πρωινές ώρες μετά την διαρροή και είναι πολύ κοντά με την εικόνα που δίνει η WWF.

Η τροχιά της πετρελαιοκηλίδας που δείχνουν τα μοντέλα επιβεβαιώνεται και από την ανακοίνωση του Λιμενικού Σώματος εκείνη την ώρα (Ανακοίνωση Λιμενικού Σώματος, 10/09/2017, 13:40, <http://www.hcg.gr/node/15922>) όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω.



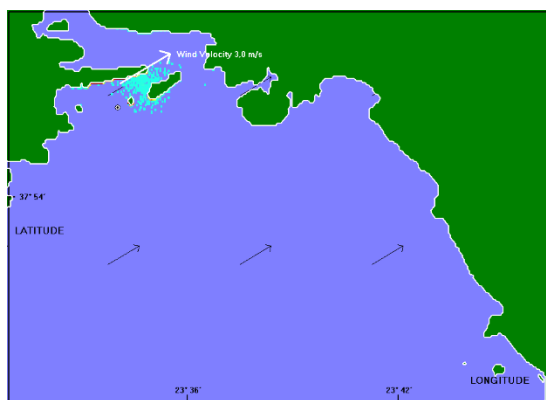
**Εικόνα 6.4** Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις 10/09/2017 αργά το απόγευμα. Αριστερά αποτελέσματα MEDSLIK, και δεξιά αποτελέσματα GNOME.

Στις 11/09/2017 παρατηρείται και στα δύο μοντέλα ότι η πετρελαιοκηλίδα έχει προσανατολιστεί προς το ακρωτήριο της Κυνοσούρας (Εικόνα 6.5), κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και από την περιπολία του αεροσκάφους του λιμενικού σώματος την ίδια μέρα. Στην περιπολία παρατηρήθηκε ρύπανση από πετρελαιοειδή, σε διάφορα σημεία από το ακρωτήριο Κυνοσούρας μέχρι τον όρμο Σεληνίων.



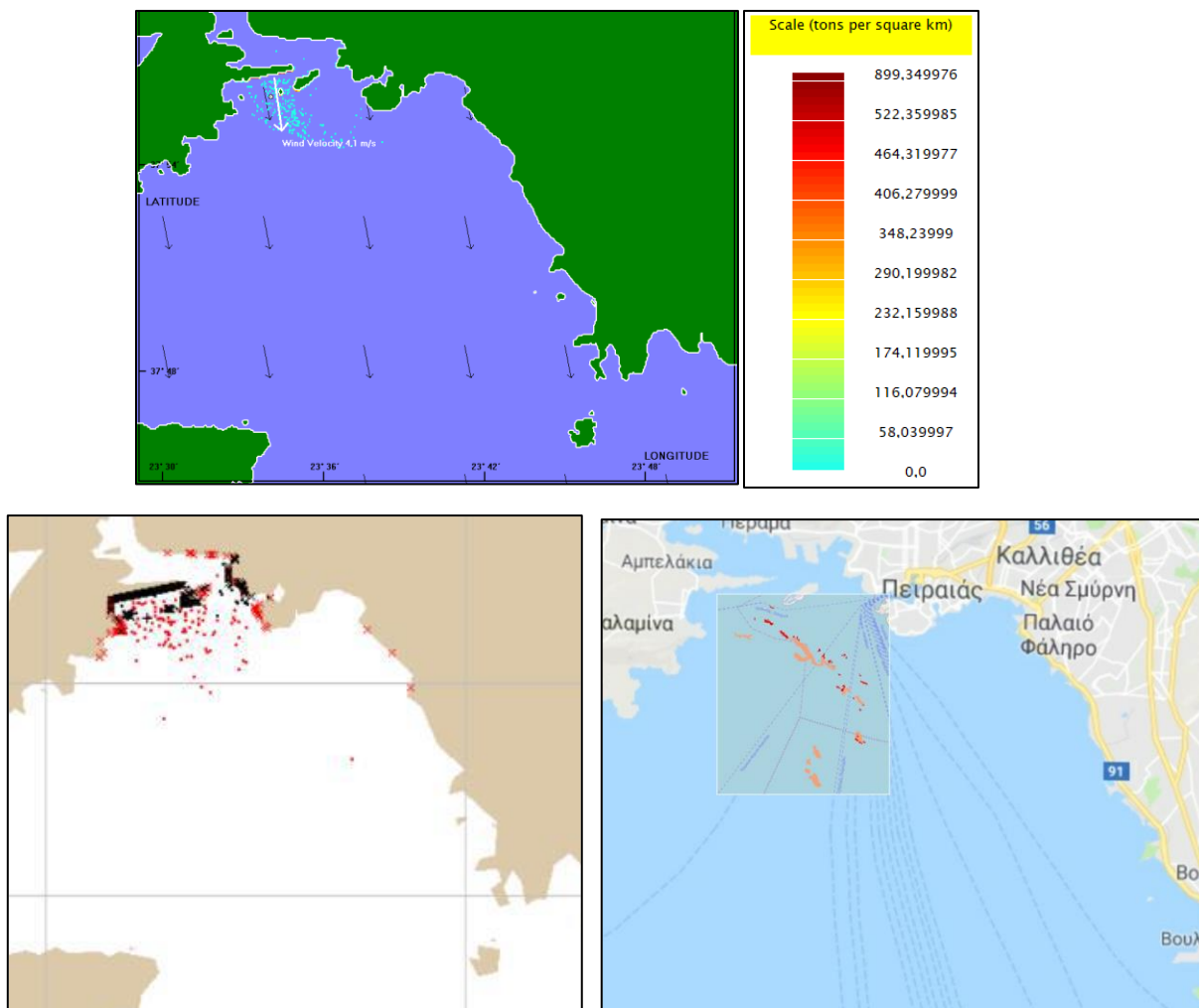
**Εικόνα 6.5** Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις 11/09/2017 το απόγευμα. Πάνω αριστερά το επιφανειακό και δεξιά το πετρέλαιο στην ακτή στο MEDSLIK, και κάτω τα αποτελέσματα του GNOME

Το μεσημέρι της Τρίτης 12/09, 5 αντιρρυπαντικά σκάφη ιδιωτικής εταιρείας, έσπευσαν να αντιμετωπίσουν τα μεγάλα κομμάτια της πετρελαιοκηλίδας που παρέσυραν οι άνεμοι προς την πλευρά της Πειραιϊκής (<http://www.documentonews.gr/article/sthn-peiraiikh-eftase-h-petrelaiokhlida-toy-agia-zwnh-2-yperanthrwpes-prospatheies-na-perioristei-h-rypansh-video>). Το παραπάνω επιβεβαιώνεται και από την προσομοίωση του μοντέλου MEDSLIK που φαίνεται στην Εικόνα 6.6.



**Εικόνα 6.6** Προσομοίωση MEDSLIK στις 12/09/2017 στις 11:00

Το απόγευμα της 12ης Σεπτεμβρίου παρουσιάστηκαν κομμάτια πετρελαιοκηλίδας κοντά στις ακτές της Φρεαττύδας με έντονη δυσοσμία (<http://www.iefimerida.gr/news/361959/stin-peiraiki-eftase-i-petrelaiokilida-apo-ti-salamina-anisyhoyn-oi-arhes-eikonesvinteo>). Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.7 το συγκεκριμένο συμβάν έχει προσομοιωθεί αρκετά ρεαλιστικά και από τα δύο μοντέλα με το GNOME να παρουσιάζει μεγαλύτερη εξάπλωση.

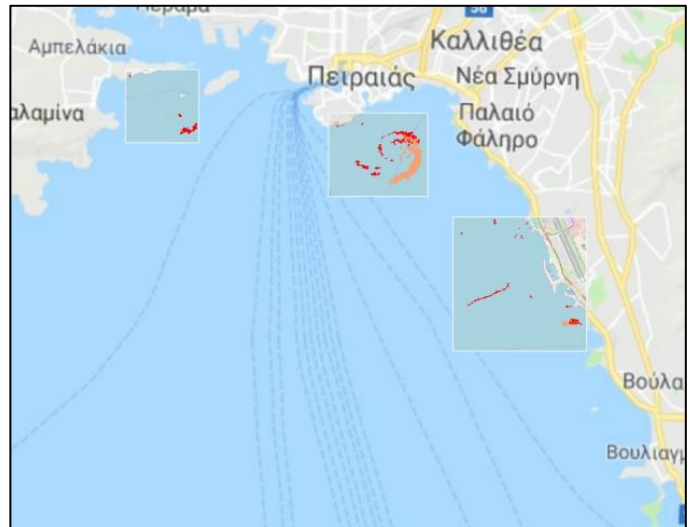
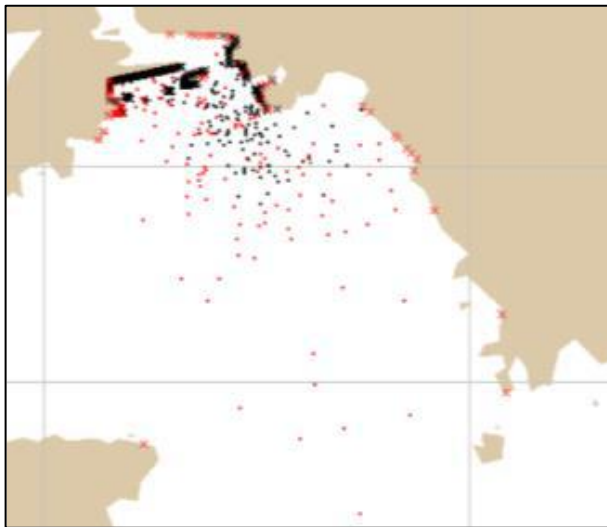
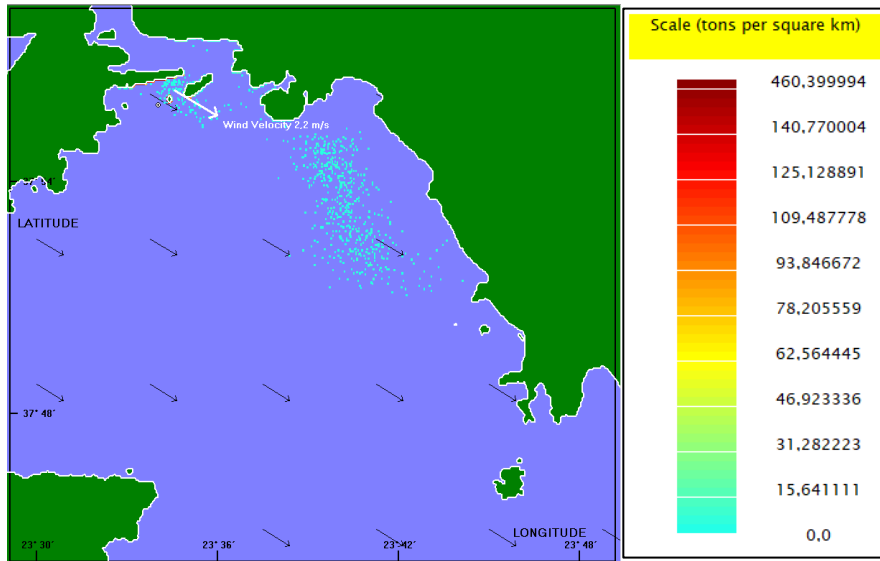


**Εικόνα 6.7** Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις 12/09/2017. Πάνω αποτελέσματα MEDSLIK, κάτω αριστερά GNOME και κάτω δεξιά δορυφορικές από την WWF

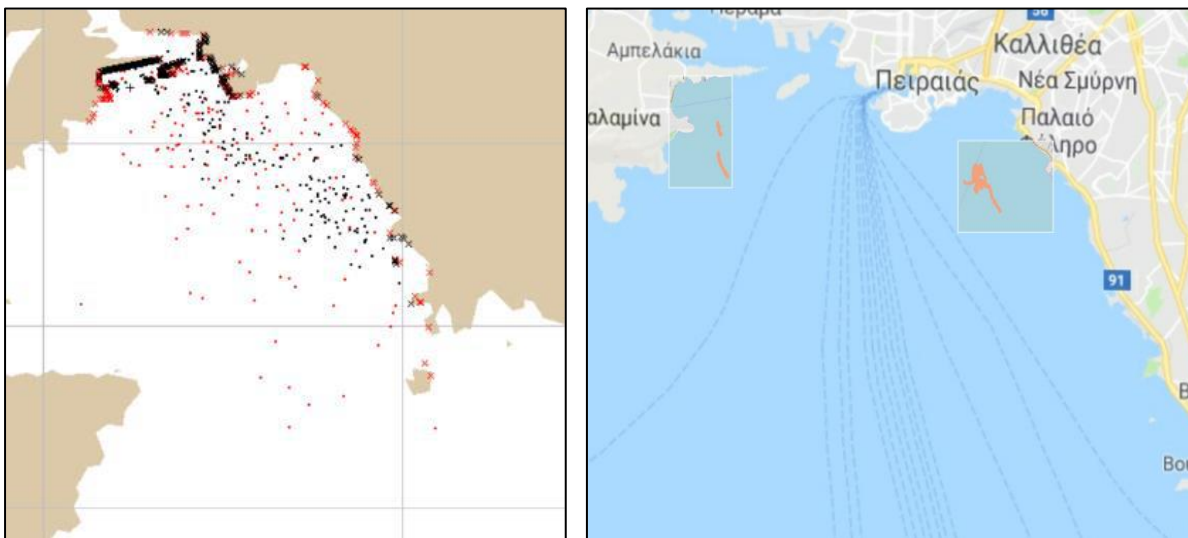
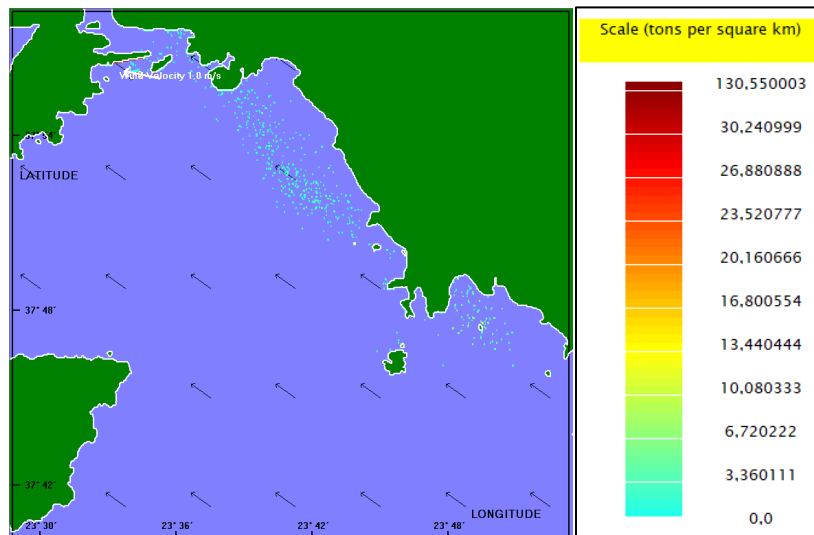
Στις 13/09/2017 ο δήμος Βάρης - Βούλας – Βουλιαγμένης έλαβε επείγον σήμα από το Λιμενικό. Η πετρελαιοκηλίδα απείχε μόλις 300-400 μέτρα από την Βούλα. (<http://www.thetoc.gr/koinwnia/article/apisteuto-300-m-apo-tis-aktes-tis-boulas-i-petrelaiokilida>). Επίσης σύμφωνα με το δήμαρχο του Παλαιού Φαλήρου, Διονύση Χατζηδάκη εκείνες τις μέρες ο άνεμος ήταν βορειοδυτικός (<https://www.cnn.gr/news/perivallon/story/110563/saronikos-kai-meta-tin-petrelaiokilida-ti>). Τέλος σύμφωνα με το notiarreport.gr το βράδυ της Τετάρτης εντοπίστηκε κηλίδα έκτασης περίπου 5 στρεμμάτων, 3,2 μίλια ανοιχτά της Χερσονήσου του ΠΙΚΠΑ στη Βούλα (<http://www.onalert.gr/stories/aperanto-mauro-h-paraliaki-ews-th-boula-kommatia-apo-thn-petraiochlida/59348>).

Τα παραπάνω γεγονότα προσομοιώνονται σωστά και από τα δύο μοντέλα ( Εικόνα 6.8). Το μοντέλο του MEDSLIK συγκεκριμένα αναπαριστά ρεαλιστικά και τον Βορειοδυτικό άνεμο ο οποίος μετακινεί την πετρελαιοκηλίδα προς τις ακτές της Βούλας.





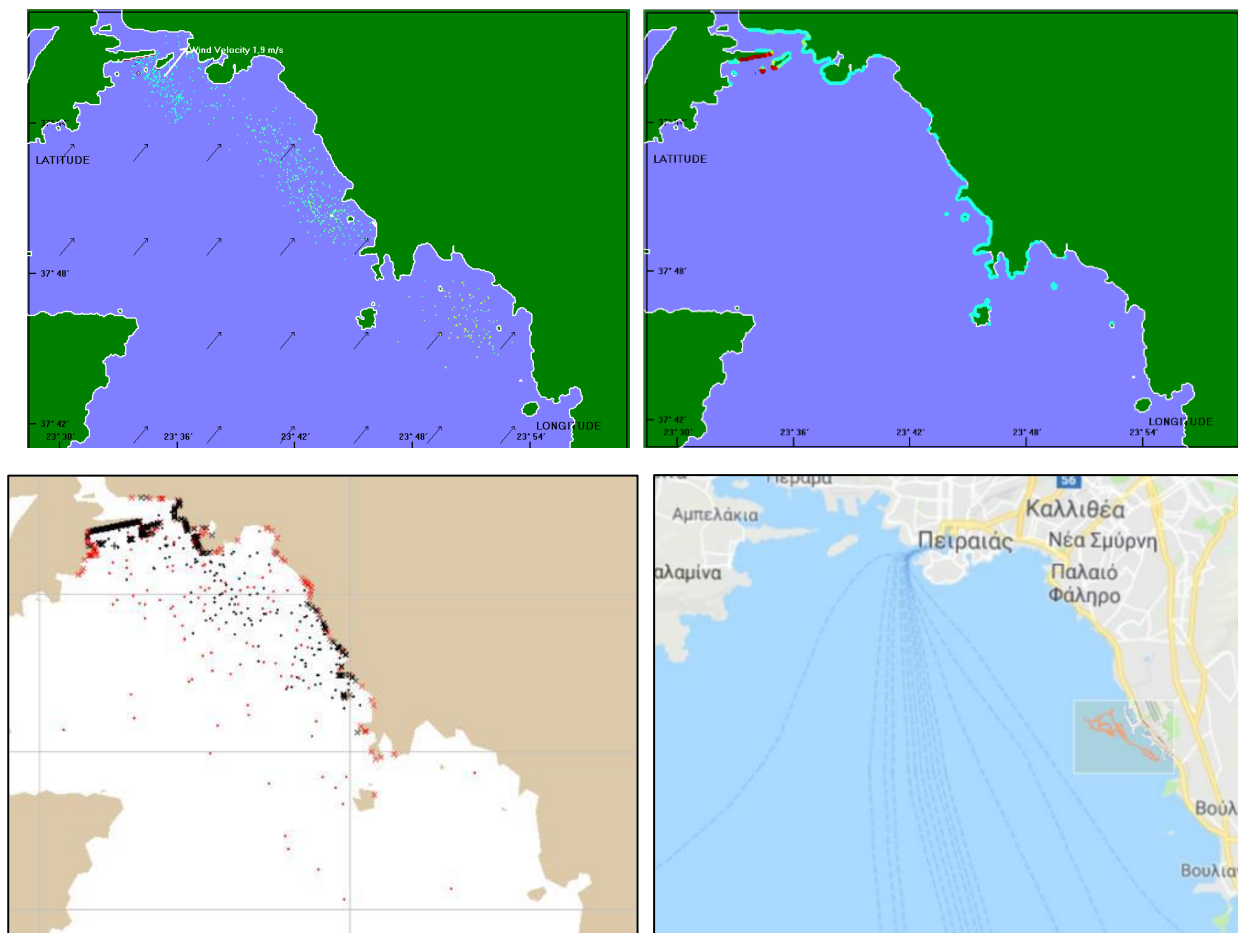
**Εικόνα 6.8** Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις 13/09/2017. Πάνω αποτελέσματα MEDSLIK, κάτω αριστερά GNOME και κάτω δεξιά δορυφορικές από την WWF



**Εικόνα 6.9** Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις 15/09/2017. Πάνω αποτελέσματα MEDSLIK, κάτω αριστερά GNOME και κάτω δεξιά δορυφορικές από την WWF

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.9 η προσομοίωση από τα μοντέλα για τις 15/09 δεν αναπαριστούν πιστά την εικόνα από την WWF (WWF Ελλάς, 2017). Παρατηρείται και στα δύο μοντέλα ότι η πετρελαιοκηλίδα έχει διασκορπιστεί. Συγκεκριμένα στο MEDSLIK ενώ φαίνεται ότι τα πιο πυκνά σημεία είναι εκεί που αναπαριστά και η WWF, παρόλα αυτά δείχνει ότι το πετρέλαιο έχει φτάσει στα ανοιχτά της Βάρκιζας. Βέβαια οι ποσότητες αυτές είναι πολύ μικρές και γι αυτό ίσως και δεν ήταν ανιχνεύσιμες από τον δορυφόρο.

Την επόμενη μέρα απογειώθηκε αεροσκάφος για την επιτήρηση της θαλάσσιας περιοχής του Σαρωνικού, μεταξύ όρμων Βουλιαγμένης και νήσου Σαλαμίνας. Στο παραλιακό μέτωπο από τη Γλυφάδα μέχρι τον επιβατηγό λιμένα Πειραιά παρατηρήθηκαν μεμονωμένες και μικρού μεγέθους ζώνες ιριδισμού, ενώ δεν εντοπίστηκαν βαρέα πετρελαιοειδή (<https://www.news247.gr/koinonia/rypansi-ston-saroniko-apantlisi-800-tonon-mazoyt-apo-to-ag-zoni-ii.6518660.html> ). Η επιθεώρηση του αεροσκάφους όπως και η προσομοίωση (Εικόνα 6.10) επιβεβαιώνει ότι όντως στην περιοχή υπήρχε διασκορπισμένο πετρέλαιο σε πολύ μικρές ποσότητες



**Εικόνα 6.10** Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις 16/09/2017. Πάνω αριστερά το επιφανειακό και δεξιά το πετρέλαιο στην ακτή στο MEDSLIK, κάτω αριστερά GNOME και κάτω δεξιά δορυφορικές από την WWF.

Τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, αν και το GNOME δείχνει την πετρελαιοκηλίδα πιο διάσπαρτη στα ανοιχτά. Ενώ το MEDSLIK την δείχνει λίγο πιο συγκεντρωμένη κοντά στην ακτή. Επίσης το MEDSLIK παρουσιάζει τα αποτελέσματα με υπόμνημα σε τόνους ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο, ενώ το GNOME δεν δίνει αυτή την δυνατότητα. Παρόλα αυτά τα δύο μοντέλα συμφωνούν ικανοποιητικά στις ακτές που έχουν προσβληθεί από πετρέλαιο. Τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά και σε σχέση με την πραγματικότητα, ιδιαίτερα αν λάβουμε υπόψη την επιθεώρηση του αεροσκάφους που έγινε την ίδια μέρα.

Σε γενικές γραμμές τα δύο μοντέλα MEDSLIK και GNOME παρουσιάζουν την ίδια εικόνα για την εξάπλωση της πετρελαιοκηλίδας. Όμως υπάρχουν κάποιες διαφορές στα δύο μοντέλα κυρίως ως προς τη μορφή. Αρχικά, ένας λόγος της διαφοροποίησης είναι το γεγονός ότι το MEDSLIK είναι πρόγραμμα τριών διαστάσεων ενώ το GNOME είναι δισδιάστατο πρόγραμμα. Επιπρόσθετα στα μοντέλα δεν λαμβάνουν χώρα οι ίδιες διεργασίες και δεν χρησιμοποιούν τις ίδιες εξισώσεις για την προσομοίωση.

Το MEDSLIK προσομοιάζει τις διεργασίες της μετακίνησης, της διάχυσης, της προσαιγιάλωσης, της εξάτμισης, της γαλακτωματοποίησης καθώς και της διασποράς. Το GNOME προσομοιάζει την μετακίνηση, την προσαιγιάλωση, τη διάχυση και την εξάτμιση. Συνεπώς δύο διεργασίες που λαμβάνονται υπόψη από το MEDSLIK δεν γίνονται στο GNOME και αυτές είναι η γαλακτωματοποίηση και η διασπορά. Όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα (υποκεφάλαιο 6.2) η διασπορά δεν έχει μεγάλη επιρροή στην εξάπλωση της πετρελαιοκηλίδας, καθώς τα ποσοστά είναι πάρα πολύ μικρά (Εικόνα 6.2). Όμως η

γαλακτωματοποίηση ιδιαίτερα τις ώρες της διαρροής του πετρελαίου έχει επιρροή στον όγκο της κηλίδας του πετρελαίου, κάτι το οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη στο GNOME, καθώς αποτελεί ένα επιχειρησιακό πρόγραμμα.

Πέρα όμως από τις διεργασίες, τα δύο αυτά μοντέλα χρησιμοποιούν και διαφορετικές εξισώσεις. Για παράδειγμα για την επίλυση της εξίσωσης της μετακίνησης το MEDSLIK χρησιμοποιεί τη μέθοδο Monte Carlo, η οποία χρησιμοποιεί μια ακολουθία τυχαίων αριθμών σε αντίθεση με το GNOME που λύνει την εξίσωση με τη μέθοδο Range Kutta, χωρίς λαμβάνει υπόψη την μετατόπιση στην κάθετη διεύθυνση (z).

Εξίσωση MEDSLIK ( Εξισώσεις 5.1-5.3)

$$\begin{aligned} X'_i &= X_i + \left\{ u(X_i, Y_i, Z_i) + a(W_x \cos \beta + W_y \sin \beta) \right\} \tau + \Delta X_i^{(d)} \\ Y'_i &= Y_i + \left\{ v(X_i, Y_i, Z_i) + a(-W_x \sin \beta + W_y \cos \beta) \right\} \tau + \Delta Y_i^{(d)} \\ Z'_i &= Z_i + \Delta Z_i^{(d)} \end{aligned}$$

Εξίσωση GNOME

$$\Delta x = \frac{u}{111,120.00024} \Delta t \cos(y) \quad (6.1)$$

$$\Delta y = \frac{v}{111,120.00024} \Delta t \quad (6.2)$$

$$\Delta z = 0 \quad (6.3)$$

Τα δύο μοντέλα χρησιμοποιούν την ίδια μέθοδο για τον υπολογισμό της πιθανότητας επανακυκλοφορίας ενός σωματιδίου από την ακτή προς το υδάτινο περιβάλλον. Επίσης το GNOME για την διάχυση χρησιμοποιεί τους κλασικούς τύπους (6.4-6.5) ενώ στο MEDSLIK υπολογίζονται με βάση τους τύπους (5.4-5.6) όπου εισάγονται και οι τυχαίοι αριθμοί.

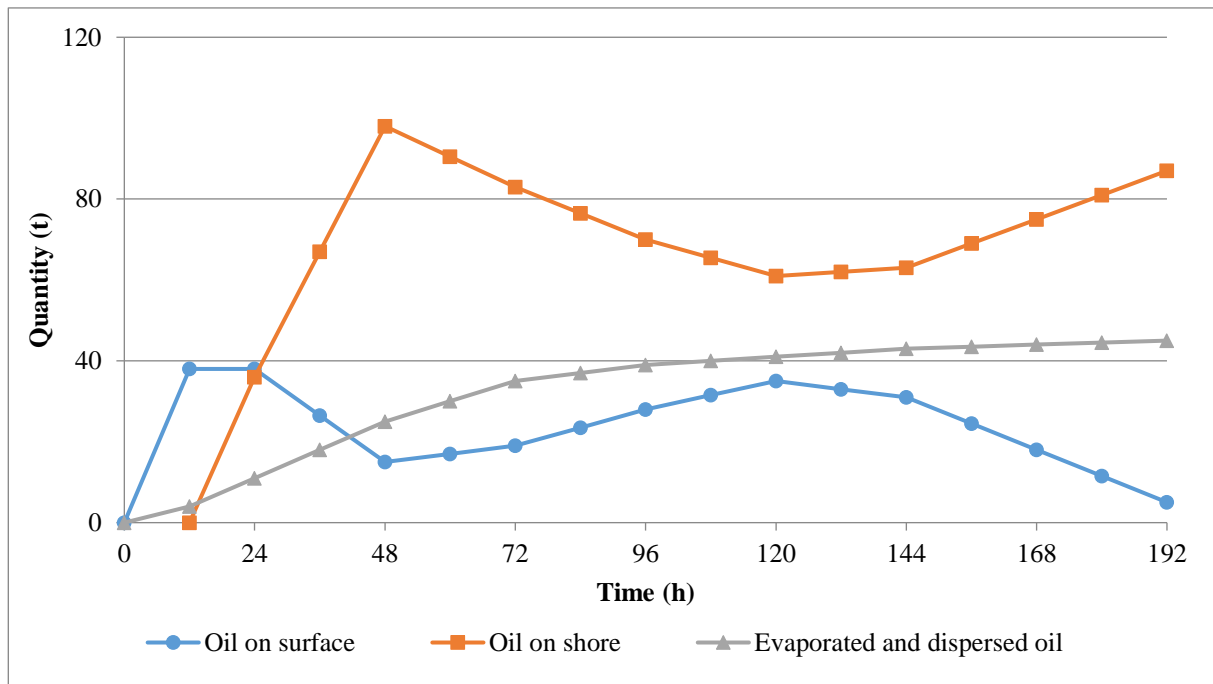
$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 C \quad (6.4)$$

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

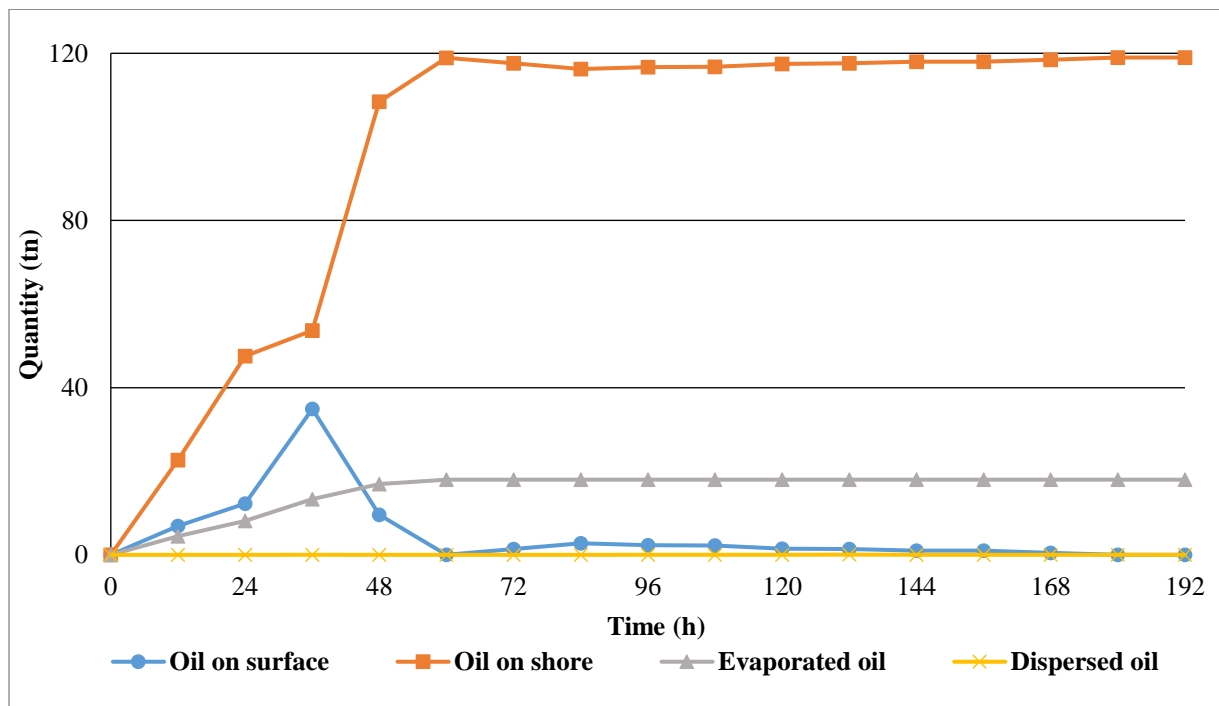
Στη συνέχεια για τον υπολογισμό της εξάτμισης το MEDSLIK κάνει διαχωρισμό με βάση τον όγκο της κηλίδας σε ελαφρύ και σε βαρύ όπως φαίνεται και από τις εξισώσεις 5.10-5.24, ενώ το GNOME κάνει διαχωρισμό του πετρελαίου ως τριμερές συστατικό με διαφορετικούς χρόνους ημιζωής. (NOAA, Office Response and Restoration, 2012)

$$X_{\text{prob}} = \frac{P_1 \left( 2^{\frac{-t_i}{H_1}} - 2^{\frac{t_{i-1}-2t_i}{H_1}} \right) + P_2 \left( 2^{\frac{-t_i}{H_2}} - 2^{\frac{t_{i-1}-2t_i}{H_2}} \right) + P_3 \left( 2^{\frac{-t_i}{H_3}} - 2^{\frac{t_{i-1}-2t_i}{H_3}} \right)}{P_1 2^{\frac{-t_i}{H_1}} + P_2 2^{\frac{-t_i}{H_2}} + P_3 2^{\frac{-t_i}{H_3}}} \quad (6.6)$$

Όλα τα παραπάνω δικαιολογούν τις μικρές διαφορές που εμφανίζονται στις προσομοιώσεις των μοντέλων. Παρακάτω φαίνονται σε διαγράμματα ίδιας κλίμακας οι διαφορές των δύο μοντέλων όσον αναφορά τα ποσοστά του πετρελαίου για κάθε διεργασία.



**Εικόνα 6.11:** Μεταβολή της μάζας του πετρελαίου συναρτήσει του χρόνου στο μοντέλο του GNOME (Τσιάτσου, 2018)



**6.12:** Μεταβολή της μάζας του πετρελαίου συναρτήσει του χρόνου στο μοντέλο του MEDSLIK

Αρχικά τα δύο μοντέλα φαίνεται να συμφωνούν στην εξέλιξη της εξάτμισης, η οποία αυξάνεται σταδιακά και στη συνέχεια παραμένει σταθερή, το μοντέλο του MEDSLIK όμως υπολογίζει ότι οι ποσότητες που

εξατμίστηκαν ήταν λιγότερες, το οποίο είναι λογικό καθώς το MEDSLIK για την εξατμίση λαμβάνει υπόψη το πάχος της κηλίδας. Επίσης το MEDSLIK προσομοιάζει και την γαλακτωματοποίηση η οποία δυσχεραίνει την διεργασία της εξατμίσης. Στη συνέχεια παρατηρείται ότι το MEDSLIK υπολογίζει μεγαλύτερες ποσότητες πετρελαίου στην ακτή σε σύγκριση με το GNOME, αλλά και τα δύο παρουσιάζουν τις μέγιστες ποσότητες στις 48 ώρες. Το MEDSLIK εφόσον παρουσιάζει μεγάλες ποσότητες στην ακτή, είναι λογικό να υπολογίζει μικρές ποσότητες του επιφανειακού πετρελαίου μετά τις 48 ώρες, όπου και σταματάει η διαρροή. Το GNOME υπολογίζει μικρότερες ποσότητες στην ακτή και λίγο μεγαλύτερες στην επιφάνεια και μετά το πέρας της διαρροής. Όμως αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι στο GNOME η πετρελαιοκηλίδα παρατηρείται ότι είναι πιο διάσπαρτη. Αυτό συμβαίνει διότι δεν υπολογίζεται η διεργασία της γαλακτωματοποίησης από το GNOME, η οποία επηρεάζει τον όγκο και το ιξώδες της κηλίδας. Είναι σημαντικό να παρατηρηθεί ότι και τα δύο μοντέλα έχουν ίδιας τάξης μεγέθους ποσότητες, για παράδειγμα το επιφανειακό πετρέλαιο και στις δύο περιπτώσεις δεν ξεπερνάει τους 40 τόνους.

#### 6.4 Ανάλυση Ευαισθησίας

Για την ολοκληρωμένη προσομοίωση της πετρελαιοκηλίδας, πρέπει να γίνει μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων που εισήχθησαν στους υπολογισμούς, γνωστή και ως ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα διαφορετικά σενάρια των υπολογισμών με τις διαφορετικές παραμέτρους.

Τα αποτελέσματα και οι σύγκριση τους με τη βασική προσομοίωση παρουσιάζονται στο Παράρτημα 4 για τις ημερομηνίες 11/9/2017 και 14/09/2017 στις 11:00.

**Πίνακας 6.4** Σενάρια παραμέτρων για την ανάλυση ευαισθησίας

Ανάλυση ευαισθησίας			
Σενάριο	Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Σ1	Συντελεστής διάχυσης	0,1	m <sup>2</sup> /s
Σ2	Συντελεστής διάχυσης	0,5	m <sup>2</sup> /s
Σ3	Συντελεστής διάχυσης	1	m <sup>2</sup> /s
Σ4	Συντελεστής διάχυσης	5	m <sup>2</sup> /s
Σ5	Συντελεστής διάχυσης	10	m <sup>2</sup> /s
Σ6	Αριθμός σωματιδίων	1000	-
Σ7	Αριθμός σωματιδίων	5000	-
Σ8	Αριθμός σωματιδίων	50000	-
Σ9	Αριθμός σωματιδίων	100000	-
Σ10	Χρονικό βήμα υπολογισμών	1	/ώρα
Σ11	Χρονικό βήμα υπολογισμών	3	/ώρα
Σ12	Χρονικό βήμα υπολογισμών	6	/ώρα

Στο Σενάριο 1 (Σ1) μειώνεται ο συντελεστής διάχυσης στο 0,1 m<sup>2</sup>/s. Παρατηρείται ότι η πετρελαιοκηλίδα έχει εξαπλωθεί πολύ λίγο με μεγάλες ποσότητες πετρελαίου στην επιφάνεια, σε τόνους ανά χιλιόμετρο σε σύγκριση με τα αποτελέσματα με τις προεπιλεγμένες τιμές.



Στο Σενάριο 2 (Σ2) ο συντελεστής διάχυσης είναι 0,5 m<sup>2</sup>/s. Παρατηρείται και σε αυτό το σενάριο ότι η πετρελαιοκηλίδα είναι πολύ περιορισμένη χωρίς όμως να υπάρχουν διαφορές στο ποσοστό του πετρελαίου που έχει εξατμιστεί, διασπαστεί και που βρίσκεται στην ακτή.

Στο Σενάριο 3 (Σ3) ο συντελεστής διάχυσης είναι 1 m<sup>2</sup>/s στο μισό της προεπιλογής του μοντέλου. Η πετρελαιοκηλίδα έχει περίπου ίδια μορφή με αυτή των αποτελεσμάτων.

Στο Σενάριο 4 (Σ4) ο συντελεστής διάχυσης είναι 5 m<sup>2</sup>/s. Παρατηρείται εμφανώς ότι η πετρελαιοκηλίδα είναι πιο μεγάλη επιφανειακά, καθώς λόγω της μεγαλύτερης οριζόντιας διάχυσης τα σωματίδια εξαπλώνονται πολύ περισσότερο.

Στο Σενάριο 5 (Σ5) ο συντελεστής διάχυσης είναι 10 m<sup>2</sup>/s. Η πετρελαιοκηλίδα έχει εξαπλωθεί σε πολύ μεγάλη επιφάνεια. Η συγκεκριμένη εικόνα δεν έχει καμία σχέση με την πραγματικότητα και ένας τόσο μεγάλος συντελεστής διάχυσης δεν είναι κατάλληλος για αυτόν τον τύπο πετρελαίου.

Στο Σενάριο 6 (Σ6) η πετρελαιοκηλίδα αποτελείται από αριθμό σωματιδίων μικρότερο από αυτό της προεπιλογής ίσο με 1000. Η μείωση των σωματιδίων προκάλεσε μείωση της πετρελαιοκηλίδας επιφανειακά και παρατηρείται ότι τα σωματίδια βρίσκονται διάσπαρτα σε μεγάλη επιφάνεια. Επίσης ο χρόνος τρεξίματος για αυτό το σενάριο είναι 42 δευτερόλεπτα.

Στο Σενάριο 7 (Σ7) η πετρελαιοκηλίδα αποτελείται από αριθμό σωματιδίων ίσο με 5000. Η πετρελαιοκηλίδα παρουσιάζεται αρκετά μειωμένη σε σύγκριση με τους υπολογισμούς, χωρίς όμως να υπάρχει κάποια επίδραση στα ποσοστά των διεργασιών. Όμως όσον αφορά τον χρόνο τρεξίματος παρατηρείται μια μικρή αύξηση στα 59 δευτερόλεπτα.

Στο Σενάριο 8 (Σ8) η πετρελαιοκηλίδα αποτελείται από αριθμό σωματιδίων ίσο με 50.000. Η πετρελαιοκηλίδα παρουσιάζεται πιο συμπαγής σε σύγκριση με τους υπολογισμούς και στις δύο ημερομηνίες. Επίσης ο χρόνος που χρειάστηκε για να τρέξει αυτό το σενάριο ήταν περίπου 4 λεπτά.

Στο Σενάριο 9 (Σ9) η πετρελαιοκηλίδα αποτελείται από τον μεγαλύτερο αριθμό σωματιδίων ίσο με 100.000. Η πετρελαιοκηλίδα παρουσιάζεται πολύ πιο συμπαγής σε όλη την επιφάνεια της. Αυτή η κατάσταση είναι ιδιαίτερα δυσμενής, καθώς έτσι παρατηρείται και μεγαλύτερη ρύπανση της περιοχής. Επίσης αυξάνεται ραγδαία ο χρόνος υπολογισμού στα 7 λεπτά και 14 δευτερόλεπτα.

Στο Σενάριο 10 (Σ10) η παράμετρος που έχει τροποποιηθεί είναι το πόσοι υπολογισμοί γίνονται ανά ώρα. Σε αυτό το σενάριο γίνεται ένας υπολογισμός την ώρα. Η πετρελαιοκηλίδα φαίνεται αμυδρά πιο διασκορπισμένη σε σύγκριση με τους υπολογισμούς και επιφανειακά ελάχιστα μικρότερη. Ο χρόνος που απαιτήθηκε για να τρέξει ήταν 55 δευτερόλεπτα.

Στο Σενάριο 11 (Σ11) γίνονται τρεις υπολογισμοί την ώρα. Η εικόνα των αποτελεσμάτων δεν διαφέρει πολύ. Παρατηρείται περισσότερη ποσότητα επιφανειακά και μικρότερη ποσότητα πετρελαίου στην ακτή χωρίς βέβαια αυτές οι διαφορές να είναι σημαντικές. Εδώ παρατηρείται αύξηση του χρόνου τρεξίματος στο 1 λεπτό και 40 δευτερόλεπτα.

Στο Σενάριο 12 (Σ12) γίνονται έξι υπολογισμοί την ώρα. Οι διαφορές με τους προηγούμενους υπολογισμούς είναι ελάχιστες, με μόνο ίσως ενδιαφέρον ότι σε αυτό το σενάριο είναι μεγαλύτερο το ποσοστό του πετρελαίου που έχει διασπαστεί. Υπάρχει μεγάλη διαφορά σε σύγκριση με τα προηγούμενα σενάρια στον χρόνο των υπολογισμών, καθώς το συγκεκριμένο σενάριο απαιτεί 3 λεπτά και 7 δευτερόλεπτα για να τρέξει.

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε με σκοπό την σύγκριση δύο μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης της πετρελαιοκηλίδας ενός πραγματικού ατυχήματος διαρροής πετρελαίου. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα είναι το τρισδιάστατο μοντέλο MEDSLIK, και συγκρίθηκε με το δισδιάστατο μοντέλο GNOME (Τσιάτσιου, 2018).

Το πραγματικό γεγονός που προσομοιώνεται είναι το ατύχημα του δεξαμενόπλοιου «Αγία Ζώνη II» που συνέβη στον Σαρωνικό Κόλπο στις 10 Σεπτεμβρίου του 2017. Η συνολική διαρροή του δεξαμενοπλοίου ήταν 137 τόνοι, και είχε επιπτώσεις κυρίως στην παράκτια περιοχή του βόρειου τμήματος του Σαρωνικού Κόλπου.

Οι υπολογισμοί της προσομοίωσης της παρούσας συγκρίθηκαν με την προσομοίωση με το μοντέλο GNOME (Τσιάτσιου, 2018) που πραγματοποιήθηκε για το πραγματικό γεγονός, με τα δεδομένα εισόδου και στα δύο μοντέλα να είναι τα ίδια. Από τη σύγκριση των δύο προγραμμάτων τα κύρια συμπεράσματα συνοψίζονται στα εξής:

1. Η σύγκριση με το πραγματικό γεγονός είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική και από τα δύο μοντέλα, καθώς προσομοιώνεται αρκετά ρεαλιστικά η τροχιά της πετρελαιοκηλίδας, έτσι όπως αυτή αποτυπώθηκε από τον δορυφόρο και από τις παρατηρήσεις.
2. Παρόλα αυτά, τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν αρκετές διαφορές. Βασική και κρίσιμη διαφορά τους είναι το ότι δεν προσομοιώνουν τις ίδιες διεργασίες, για παράδειγμα το MEDSLIK προσομοιώνει την γαλακτωματοποίηση και την διασπορά ενώ το GNOME όχι. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το GNOME να παρουσιάζει μεγαλύτερες ποσότητες εξάτμισης σε σύγκριση με το MEDSLIK.
3. Επίσης, το GNOME παρουσιάζει το πετρέλαιο με σταγονίδια (droplets), χωρίς να παρέχει καμία πληροφορία για την ποσότητα τους. Το MEDSLIK δίνει την απαραίτητη πληροφορία με ένα μωσαϊκό χρωμάτων, το οποίο αντιστοιχεί σε ποσότητα πετρελαίου ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο, πληροφορία ιδιαίτερα χρήσιμη στον χρήστη για την σωστή εκτίμηση της προσομοίωσης.
4. Το MEDSLIK είναι ένα φιλικό προς το χρήστη μοντέλο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε επιχειρησιακό επίπεδο, αλλά μόνο για τις επιλογές που δίνει το πρόγραμμα. Ένα αρνητικό του μοντέλου, είναι ότι η έκδοση αυτή υποστηρίζεται από παλιά λογισμικά (Windows 95,98,2000 ή XP) τα οποία με την εξέλιξη της τεχνολογίας είναι δύσκολο να βρεθούν.

Συμπληρωματικά, πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη ανάλυση ευαισθησίας με βάση 3 διαφορετικές παραμέτρους (συντελεστής διάχυσης, αριθμός σωματιδίων, χρονικό βήμα υπολογισμών) από την οποία προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα.

1. Για μικρές τιμές του συντελεστή διάχυσης η πετρελαιοκηλίδα περιορίζεται και διαχέεται όσο η τιμή αυτή αυξάνεται. Επίσης αυξάνοντας τον συντελεστή διάχυσης αυξάνεται σημαντικά και ο χρόνος τρεξίματος του μοντέλου.
2. Η παρουσίαση του επιφανειακού πετρελαίου βασίζεται στην τιμή του αριθμού των σωματιδίων. Όσο η τιμή αυτή αυξάνεται τόσο μεγαλύτερη φαίνεται η πετρελαιοκηλίδα. Για αυτό το λόγο θα πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή γιατί μπορεί να οδηγήσει σε μη ρεαλιστικά αποτελέσματα. Επίσης με την αύξηση του αριθμού των σωματιδίων υπάρχει μεγάλη επίδραση και στους χρόνους τρεξίματος του μοντέλου.
3. Η ανάλυση ευαισθησίας για το χρονικό βήμα επηρέασε μόνο τον χρόνο τρεξίματος του μοντέλου.

Συμπερασματικά, τα μοντέλα προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδας, επηρεάζονται σημαντικά από αλλαγές στις παραμέτρους με συνέπεια να υπάρχουν διαφορές και στα αποτελέσματα αλλά και στους χρόνους τρεξίματος.

## Βιβλιογραφία

- Al Rabeih, A.H. (1994). Estimating surface oil spill transport due to wind in the Arabian Gulf. *Ocean Engng* 21
- AMSA. (2017). *Australian Maritime Safety Authority*. Ανάκτηση από <https://www.amsa.gov.au/file/579?page=5>
- Archipelagos. (n.d.). Ανάκτηση από <http://archipelago.gr/ti-kanoume/thalassia-prostasia/kindinos-thalassiou-atichimatos/>
- Buist, I. . (1979). *An experimental study of the dispersion of oil slicks into the water column* . Dept Chem. Engng, Univ. of Toronto: M.A. Sc. thesis, .
- Clark R. B., Frid Ch & Attrill M. (2003). *Marine Pollution*. Oxford: Oxford University Press.
- Cohen, Y., MacKay, D., and Shiu, W.Y. (1980). Mass Transfer Rates Between Oil Slicks and Water. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 58 , pg. 569-574.
- Copernicus Marine Service. *Monitoring Oil spills in the Mediterranean sea, Uses cases*. Mercator Ocean International.
- EMSA. (n.d.). *Στοιχεία άδειας χρήσης: "Reproduction is authorised, provided the source is acknowledged, save where otherwise stated"*.
- Exxon Corporation. (1985, December). Fate and effects of oil in the Sea. *Exxon Background Series* .
- Fay, J.A. (1971). Physical processes in the spread of oil on a water surface. *Proc. Joint Conf. on Prevention and Control of oil spills, Amer. Petrol. Inst, Washington DC* , pg. 463-467.
- Greenpeace. (2007). *Οι σημαντικότερες πετρελαιοκηλίδες στην Ελλάδα*. Greenpeace.
- Greenpeace. (2006). *Όταν το πετρέλαιο χυθεί στη θάλασσα*. Greenpeace.
- Gundlach E.R. and Boehm P. (1981). *Fates of several oil spills in coastal and offshore waters*. Seattle: NOAA Grant No. NA80RAD00060,RPI/R/81/12/31-30.
- Harrison, W., Winnik, M.A., Kwong, P.T.Y and MacKay, D. (1975). Disappearance of aromatic and aliphatic components from small sea-surface slicks. *Environmental Science and Technology*, 9 , pg. 231-234.
- Huacan Fang & Meglan Duan. (2014). Tides, Currents and Current Force. Στο H. F. Duan, *Offshore Operation Facilities, Equipment and Procedures* (pg. 21). Beijing, China: Petroleum Industry Press.
- IOPC FUNDS. (2019). *Agia Zoni II*. IOPC FUNDS.
- IPIECA- IOGP. (2016). *Controlled in-situ burning of spilled oil*. London, UK: IPIECA- IOGP.
- ITOPF. (2011, July). Ανάκτηση από <https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/fate-of-oil-spills/weathering/>
- ITOPF. (2019). *Containment & Recovery*. Ανάκτηση από <https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/response-techniques/containment-recovery/>
- ITOPF. (2018). *ITOPF*. Ανάκτηση από Statistics: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/>
- ITOPF. (1987). *Response to Marine Oil Spills. International Tanker Owners*. London: Pollution Federation Ltd.
- ITOPF. (2010). The International Tanker Owners Pollution Federation Limited. *Handbook 2010/11* .

- Lacaze, J.C., and Villedon de Naide, O. (1976). Influence of illumination of phototoxicity of crude oil. *Marine Pollution Bulletin*, 7 , pg. 73-76.
- Lehr W.J, Cekirge H.M. ,Fraga R.J. and Belen M.S. (1984). Empirical Studies of the spreading of oil spills. Στο *Oil and Petrochemical Pollution* (pg. 7-11).
- Lehr, W. (2001). Review of modelling procedures for oil spill weathering behavior. Στο C. Brebbia, *Oil Spill Modelling and Processes* (pg. 5190). Southampton, UK: WIT Press.
- MacKay D. and Matsugu R.S. (1973). Evaporation rates of liquid hydrocarbon spills on land and water. *Canadian Journal of Chemical Engineering* , pg. 434-439.
- Mackay, D. and Leinonen, P.J. . (1977). *Mathematical model of the behaviour of oil spills on water with natural and chemical dispersion*. Fisheries and Environment Canada: Tech. Review Report no. EPS-3-EC-77-19.
- Mackay, D. and Paterson, S. (1980). *Calculation of the evaporation rate of volatile liquids*. Louisville, Ky: National Conf. on Control of Hazardous Material Spills.
- Mackay, D. Buist, I., Mascarenhas, R. and Paterson, S. . (1979). *Oil spill processes and models*. Canada: Arctic Marine Oilspill Program, Environmental Protection Service, Fisheries and Environmental Canada.
- MacKay, D. (1980). *Oil Spill Processes and Models*. Canada: Environment Protection Service.
- Mackay, D., Paterson, S. and Trudel, K. (1980). *A mathematical model of oil spill behaviour*. Environmental Canada: Research Report, Environmental Impact Control Directorate.
- Mohammad Hadi Riazi and Yousef A. Roomi. (2008). *A model to predict rate of dissolution of toxic compounds into seawater from an oil spill*. International Journal of Toxicology.
- National Research Council. (2005). Στο *Oil Spill Dispersants: Efficacy and Effects* (pg. 53). Washington DC: The National Academies Press, <https://doi.org/10.17226/11283>.
- Neff, J.M. (1990). Composition and Fate of Petroleum and Spill Treating Agents in the Marine Environment. Στο J. G. (eds), *Sea Mammals and Oil: Confronting the Risks* (pg. 1-33). New York, NY: Academic Press.
- NOAA, Office Response and Restoration. (2012). *General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) Technical Documentation*. Seattle, Washington USA: NOAA.
- Novelli, G. (2011). Numerical Simulation of oil spills in coastal areas using shallow water equations in generalised coordinates. Στο *Doctoral Thesis*. University Rovira I Virgili: Department of Mechanical Engineering.
- R.W. Lardner B.A., Ph.D., Sc.D. (2004,2011). *Medalik User Manual*. Cambridge: R.W. Lardner .
- Santos, Loh, Bannwart & Trevisan. (2014). *An overview of heavy oil properties and its recovery and transportation methods*. Sao Paulo: Brazilian Journal of Chemical Engineering vol 31.
- Tebeau, P. & Etkin, D. & French-McCay, Deborah. (2006). *Cost-Benefit Analysis for Using Laser Fluorosensor for Detecting Heavy Oil*.
- Tsiatsiou, L. (2018). *Mathematical simulation oil spill behavior in Saronikos Gulf due to the leakage from tanker "Agia Zoni II"*. Athens: National Technical University of Athens.
- UNCTAD. (2018). *Review of Maritime Transport* . New York and Geneva: United Nations.
- UNCTAD. (2017). *Structure, Ownership and Registration of the world fleet*. New York and Geneva: UNCTAD.

- WWF Ελλάς. (2017). *Ρύπανση στο Σαρωνικό Κόλπο*. Αθήνα.
- WWF HELLAS. (2015). *Γαλάζια Ανάπτυξη στη Μεσόγειο: Η πρόκληση της καλής περιβαλλοντικής Κατάστασης – Ελλάδα*. Αθήνα.
- Xie, H. , Yapa, P.D., and Nakata, K. . (2007). Modelling emulification after an oil spill in the sea. *Journal of Marine Systems*, 68 , pg. 489-506.
- Zadeh, E.S and Hejazi, K. (2012). Eulerian Oil Spills Model Using Finite-Volume Method with Moving Boundary and Wet-Dry Fronts. *Modeling and Simulation in Engineering*, Article ID 398387 , doi: 10.1155/2012/398387.
- ΕΛΚΕΘΕ. (2018). "Μελέτη του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. για τις επιπτώσεις της ρύπανσης που προκλήθηκε από το ναυάγιο του Δ/Ξ "ΑΓΙΑ ΖΩΝΗ ΙΙ" στο Σαρωνικό Κόλπο". Αθήνα: ΕΛΚΕΘΕ.
- ΕΛΣΤΑΤ. (2017). Έρευνα θαλάσσιας αλιείας με μηχανοκίνητα σκάφη έτους 2016. Αθήνα: Δελτίο Τύπου 28/09/2017.
- Καλογήρου Στ., D. Σ.-Φ. (2010). Ποσειδωνίες, τα υποθαλάσσια δάση μας. *Οικολογική Επιθεώρηση (oikologos.gr)*
- Κλωνάρης, Γ. (2009). *Μελέτη ατυχημάτων πετρελαιοκηλίδων στο βόρειο Αιγαίο*. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΑΠΘ: Διπλωματική Εργασία.
- Κόρρος, Κ. (2008). *Μοντέλο Τύχης/Γήρανσης Κηλίδων Πετρελαίου - Τεύχος Α*. Διπλωματική Εργασία: Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.
- Κοτρίκλα, Ά. Μ. (2015). *Ναυτιλία και Περιβάλλον*. Αθήνα: Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράματα και Βοηθήματα.
- Κοτρίκλα, Α. (2015). Ρύπανση από Υδρογονάνθρακες πετρελαίου. Στο Κ. Α., *Ναυτιλία και Περιβάλλον* (σ. Κεφ. 2). Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.
- Λ. Παπαδά, Γ. Παναγιωτόπουλος, Δ. Καλιαμπάκος. (2017). *Η επίδραση της απομόνωσης στην ενεργειακή φτώχεια: Η περίπτωση της Ελλάδας*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Παπαδονικολάκη, Γ. Σ. (2013). *Μαθηματική προσομοίωση της συμπεριφοράς των πετρελαιοκηλίδων*. Διπλωματική Εργασία: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Ποτουρίδης, Σ. (2013). *Σύγκριση των προγραμμάτων GNOME, MEDSLIK και FLOW3D-L για τον υπολογισμό τροχιάς πετρελαιοκηλίδας*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Τοπουζέλης, Κ., Καραθανάση, Β., Παυλάκης, Π., Ρόκος, Δ. (2005). *Ανάπτυξη τηλεσκοπικού συστήματος ραντάρ για τον εντοπισμό πετρελαιοκηλίδων στις ελληνικές θάλασσες*. Αθήνα: Εισήγηση στο συνέδριο Heleco'05, ΤΕΕ.
- Τριανταφύλλου Γ. (2004). *Καθηγητής ΕΜΠ, "Πετρελαιοκηλίδες, Περιβάλλον και ανάπτυξη"*. Αθήνα: Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.
- Τριανταφύλλου Γ., και Βεργέτης Μ. (2004). *Ενότητα: Πετρελαιοκηλίδες, σελ 6-7, σελ. 25-39*. Αθήνα: Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Τσιάτσιου, Λ. (2018). *Μαθηματική Προσομοίωση της Συμπεριφοράς Πετρελαιοκηλίδας από το Δεξαμενόπλοιο "ΑΓΙΑ ΖΩΝΗ ΙΙ" στο Σαρωνικό Κόλπο*. Διπλωματική Εργασία: Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ.
- Υπχος (Μ) Ι. Δήμου ΠΝ. (2015). *Διάλεξη 3: Βασική Ορολογία που χρησιμοποιείται στην περιγραφή πλοίων*. Αθήνα: Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Τομέας Ναυπηγικής & Ναυτ. Μηχανολογίας.



Χρηστάκης, Γ. Ι. (2014). *Σύγκριση δύο μαθηματικών μοντέλων διασποράς πετρελαιοκηλίδας στον Θερμαϊκό Κόλπο*. Διπλωματική Εργασία: Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ.

<http://www.oceanecology.ca/oil.htm>. (n.d.).

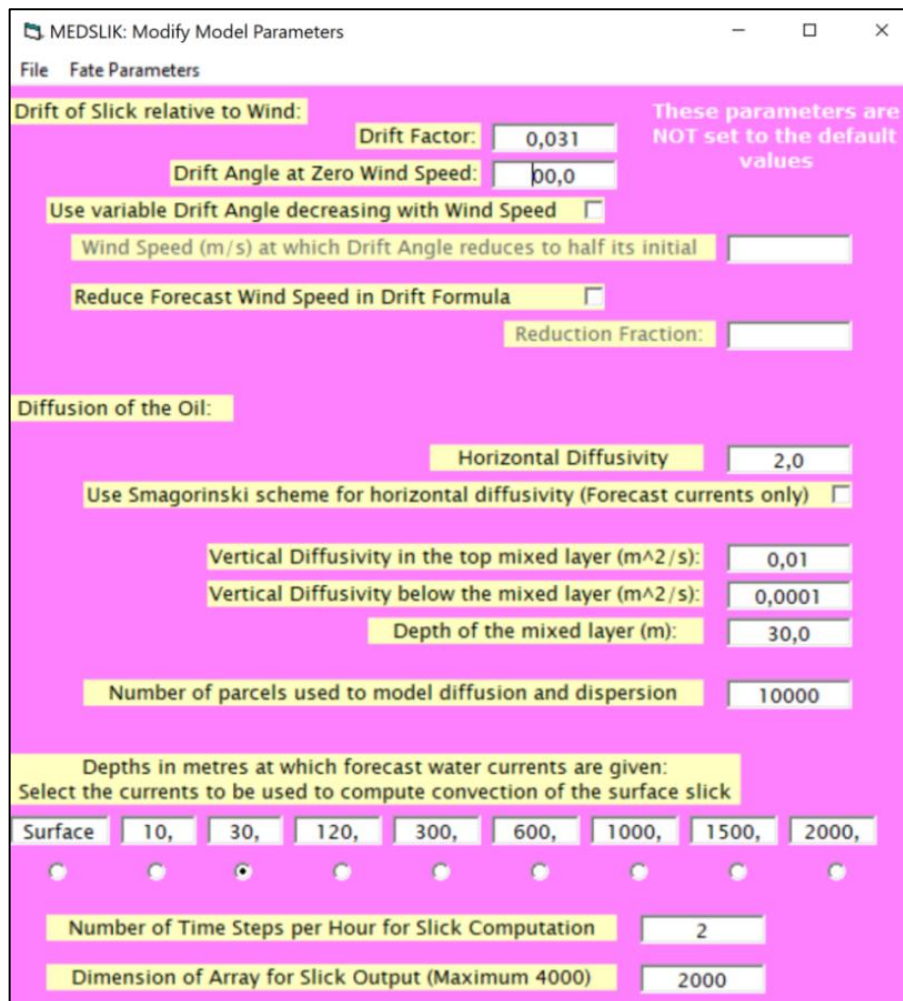
<https://www.csmonitor.com/USA/2010/0510/Gulf-oil-spill-s-environmental-impact-How-long-to-recover>. (2019).

<https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/response-tools/gnome.html>. (n.d.).

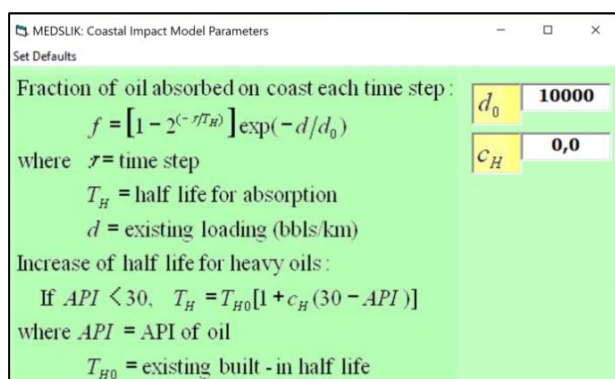
<http://www.oceanography.ucy.ac.cy/cycofos/medslik.php>

[https://www.marinetraffic.com/el/ais/details/ships/shipid:213750/mmsi:-7126152/imo:7126152/vessel:AGIA\\_ZONI\\_II](https://www.marinetraffic.com/el/ais/details/ships/shipid:213750/mmsi:-7126152/imo:7126152/vessel:AGIA_ZONI_II). (n.d.).

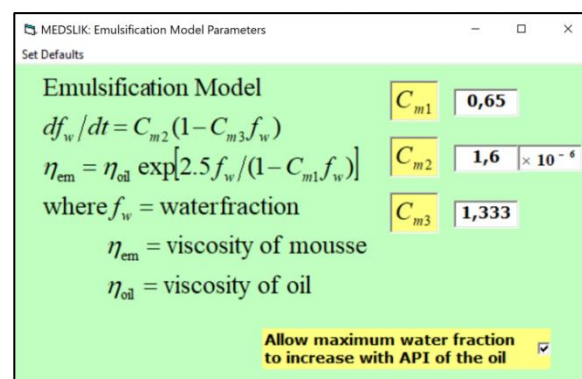
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: Εισαγωγή παραμέτρων στο μοντέλο MEDSLIK



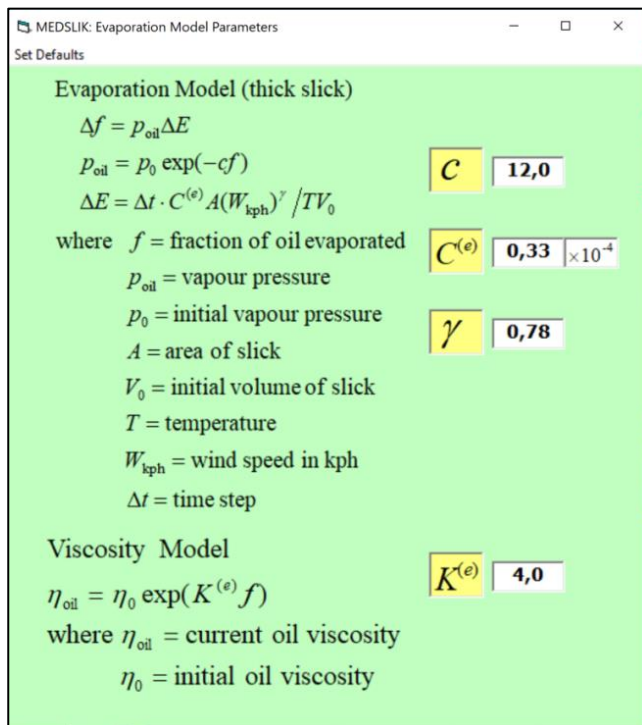
Εικόνα 1 Μοντέλο μεταφοράς και διάχυσης του MEDSLIK



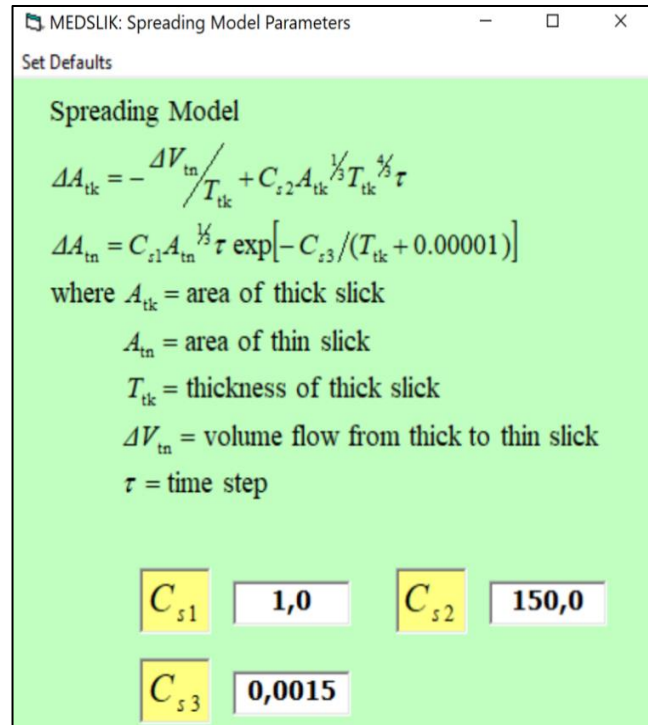
Εικόνα.2 Μοντέλο προσאיγιάλωσης στο MEDSLIK



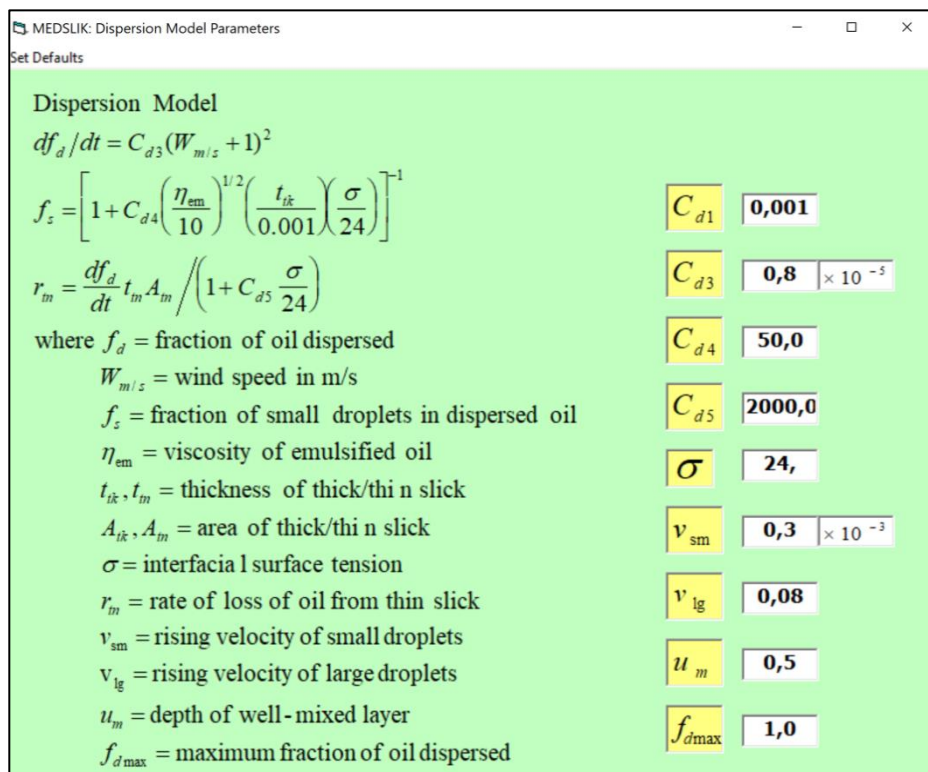
Εικόνα 3 Μοντέλο γαλακτωματοποίησης



Εικόνα 4 Μοντέλο εξάτμισης



Εικόνα 5 Μοντέλο εξάπλωσης του MEDSLIK



Εικόνα 6 Μοντέλο διασποράς του MEDSLIK

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: Υδροδυναμικά Δεδομένα Εισόδου

Τα δεδομένα εισόδου για τον άνεμο φαίνονται στον Πίνακα παρακάτω ανά τρεις ώρες.

Χρονική Στιγμή Προσομοίωσης (hr)	Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Διεύθυνση Ανέμου (°)
0	2.06	340
3	2.06	350
6	2.57	210
9	5.18	151
12	4.70	140
15	3.33	133
18	2.20	130
21	0.00	0
24	0.00	0
27	1.68	340
30	1.68	340
33	4.12	190
36	3.60	180
39	3.82	135
42	3.82	135
45	0.00	0
48	0.00	0
51	3.02	245
54	3.02	245
57	4.63	240
60	4.63	250
63	3.60	290
66	4.12	350
69	2.57	340
72	2.57	340
75	3.76	340
78	3.76	340
81	3.89	225
84	3.89	225
87	2.24	295
90	2.24	295
93	1.47	307
96	2.62	308
99	4.63	330
102	4.12	330
105	3.58	315

Χρονική Στιγμή Προσομοίωσης (hr)	Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Διεύθυνση Ανέμου (°)
108	3.58	315
111	0.00	0
114	2.57	350
117	3.09	320
120	1.09	297
123	0.94	312
126	1.30	177
129	3.09	210
132	4.12	190
135	1.03	99
138	2.06	330
141	1.19	314
144	1.53	302
147	1.12	360
150	1.12	360
153	1.94	225
156	1.94	225
159	2.57	200
162	2.06	340
165	0.00	0
168	0.00	0
171	0.00	0
174	2.57	180
177	5.14	210
180	4.12	190
183	0.00	0
186	1.03	99
189	0.00	0
192	1.54	99
195	0.00	0
198	2.57	170
201	5.14	200
204	4.63	190
207	1.54	99
210	4.12	330
213	4.12	330

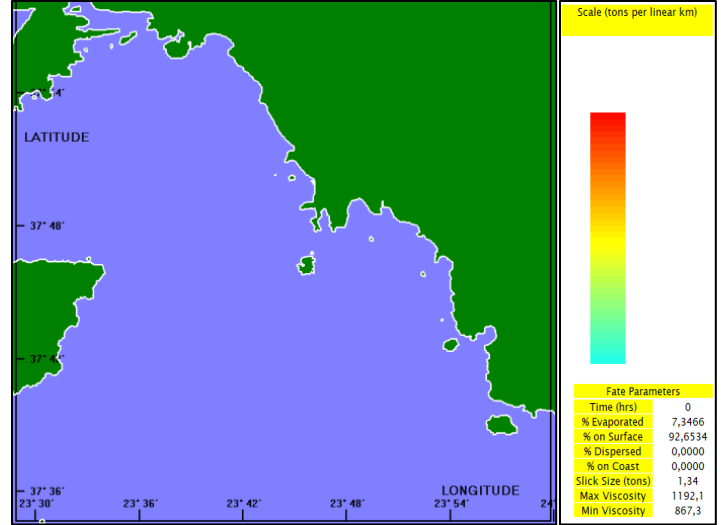
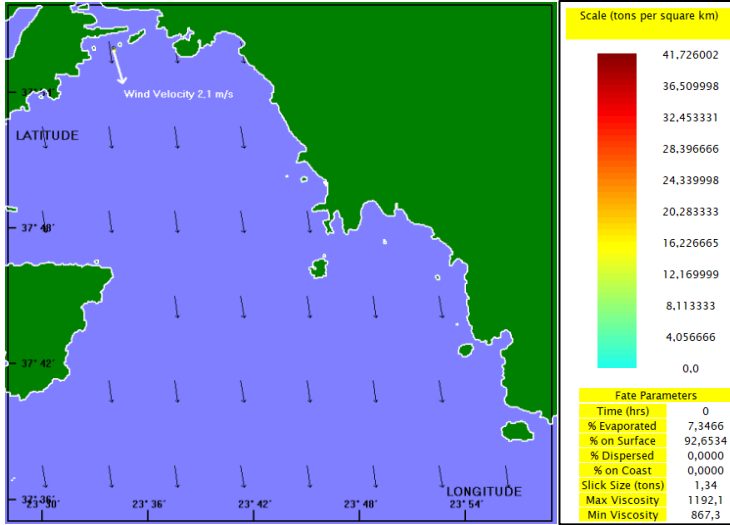
Τα δεδομένα εισόδου για τα ρεύματα φαίνονται στον Πίνακα παρακάτω ανά τρεις ώρες.

Χρονική Στιγμή Προσομοίωσης (hr)	Ταχύτητα Ρεύματος (m/s)	Διεύθυνση Ρεύματος (°)
0	0.062	170
3	0.062	160
6	0.062	170
9	0.077	30
12	0.155	331
15	0.141	320
18	0.100	313
21	0.066	310
24	0.000	180
27	0.000	180
30	0.050	160
33	0.050	160
36	0.124	10
39	0.108	0
42	0.115	315
45	0.115	315
48	0.000	180
51	0.000	180
54	0.091	65
57	0.091	65
60	0.139	60
63	0.139	70
66	0.108	110
69	0.124	170
72	0.077	160
75	0.077	160
78	0.113	160
81	0.113	160
84	0.117	45
87	0.117	45
90	0.067	115
93	0.067	115
96	0.044	127
99	0.079	128
102	0.139	150
105	3.58	315

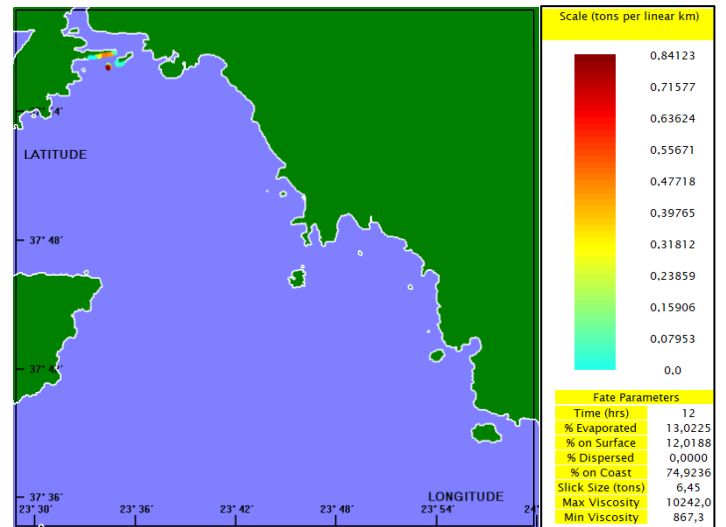
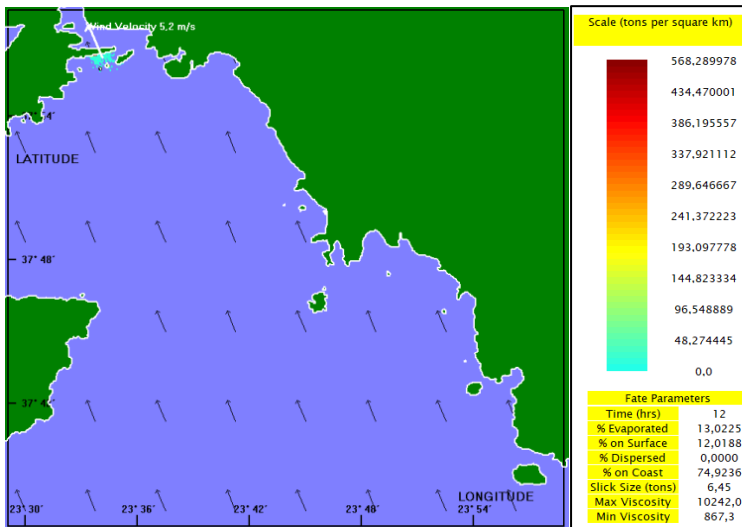
Χρονική Στιγμή Προσομοίωσης (hr)	Ταχύτητα Ρεύματος (m/s)	Διεύθυνση Ρεύματος (°)
108	0.107	135
111	0.107	135
114	0.000	180
117	0.077	170
120	0.093	140
123	0.033	117
126	0.028	132
129	0.039	357
132	0.093	30
135	0.124	10
138	0.031	279
141	0.062	150
144	0.036	134
147	0.046	122
150	0.034	180
153	0.034	180
156	0.058	45
159	0.058	45
162	0.077	20
165	0.062	160
168	0.000	180
171	0.000	180
174	0.000	180
177	0.077	0
180	0.154	30
183	0.124	10
186	0.000	180
189	0.031	279
192	0.000	180
195	0.046	279
198	0.000	180
201	0.077	350
204	0.154	20
207	0.139	10
210	0.046	279
213	0.124	150

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3: Αποτελέσματα προσομοίωσης MEDSLIK

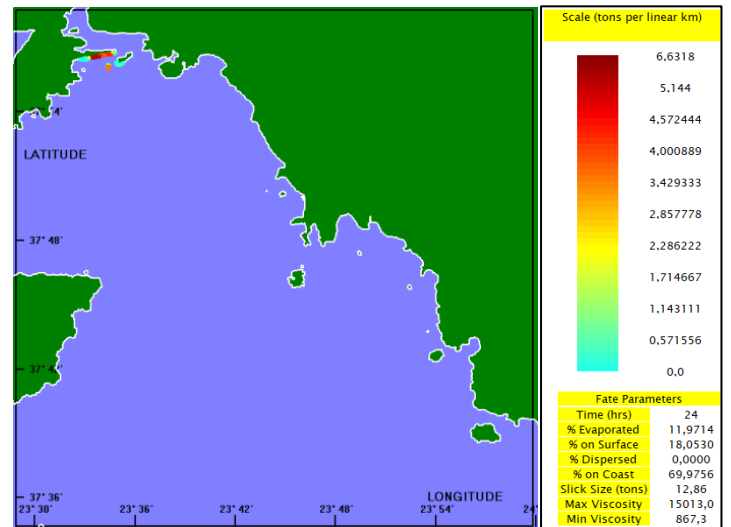
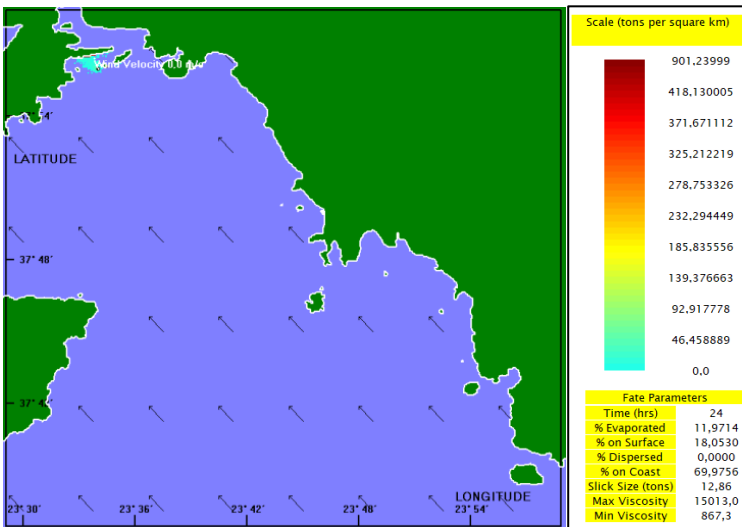
10/09/2017 Ώρα: 02:00



Ώρα: 14:00

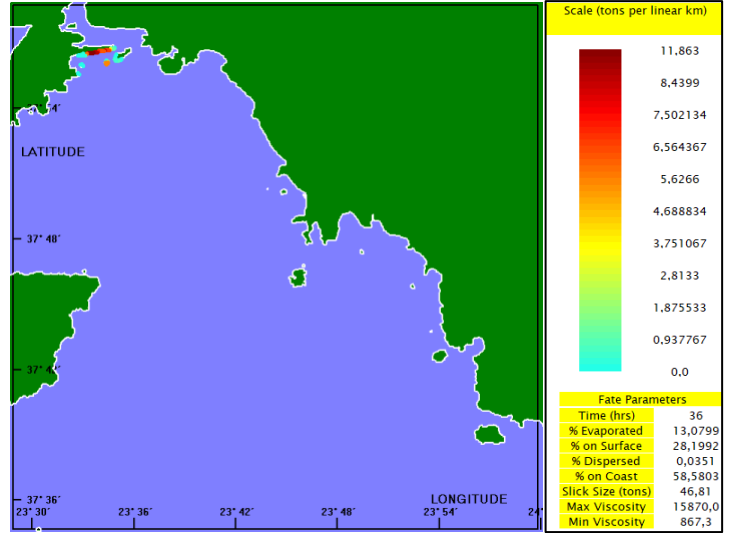
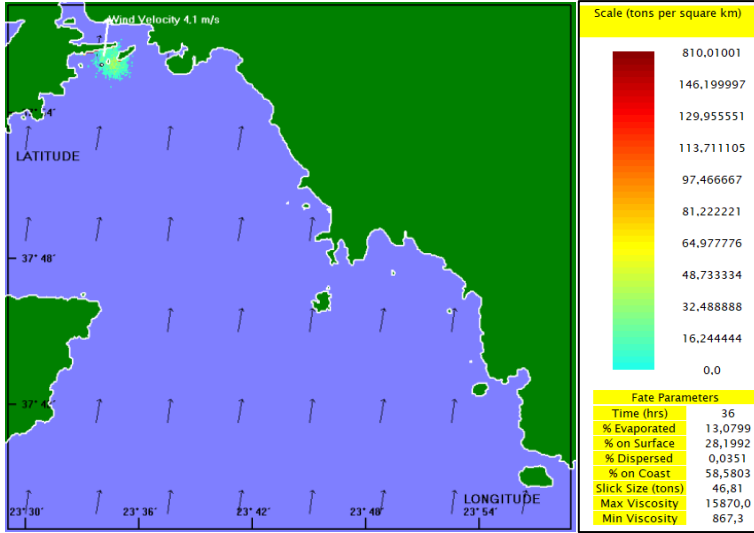


11/09/2017 Ώρα: 02:00

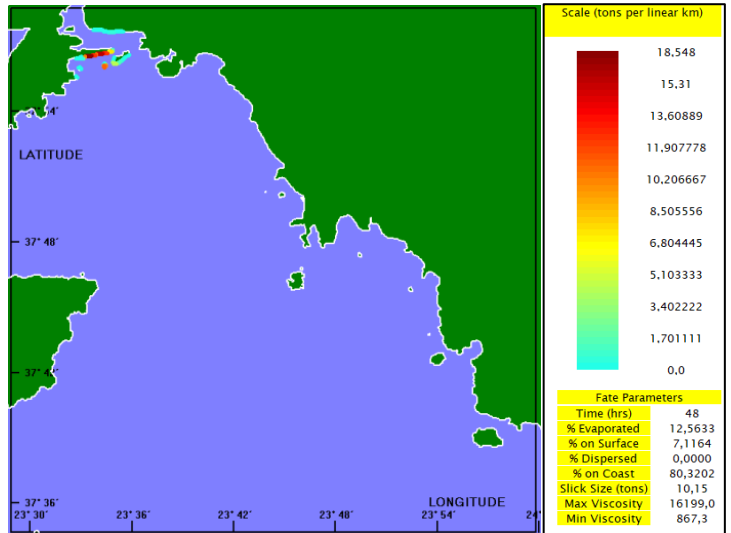
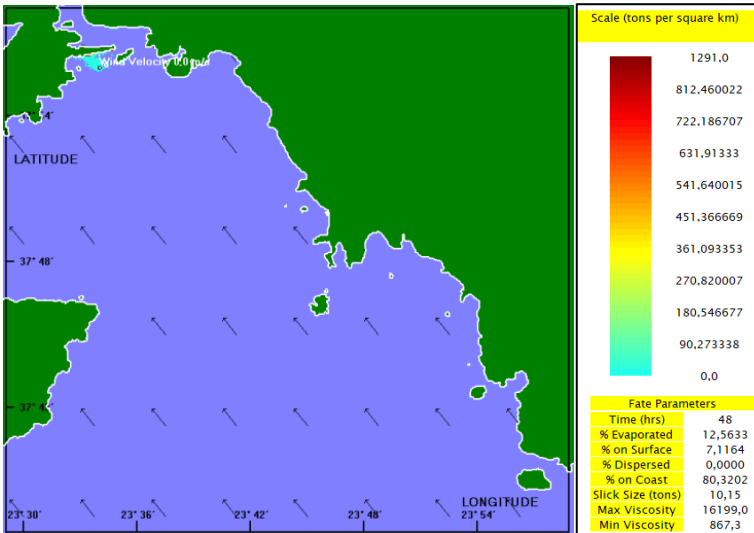




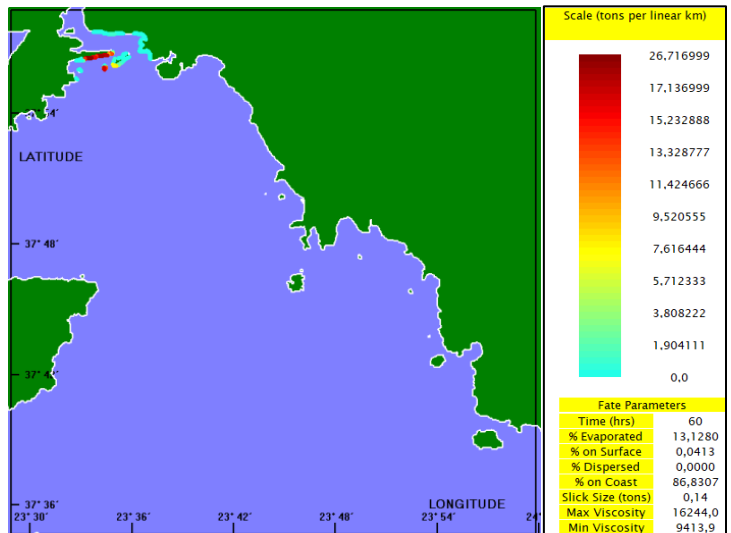
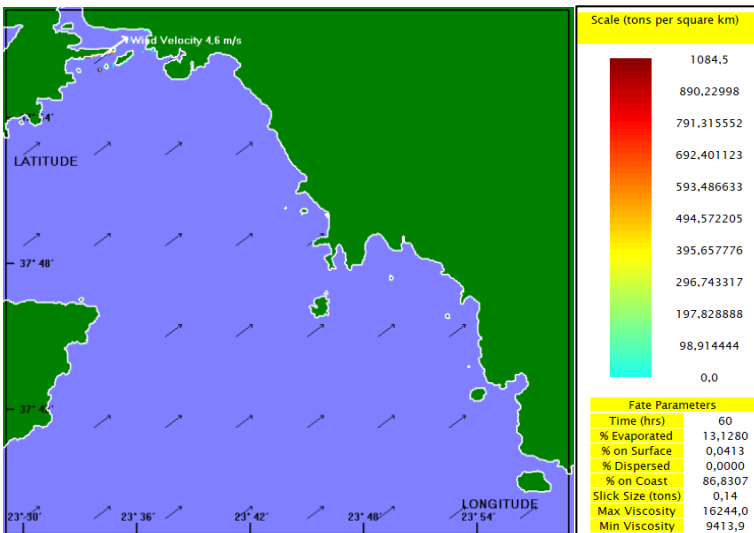
Όρα: 14:00



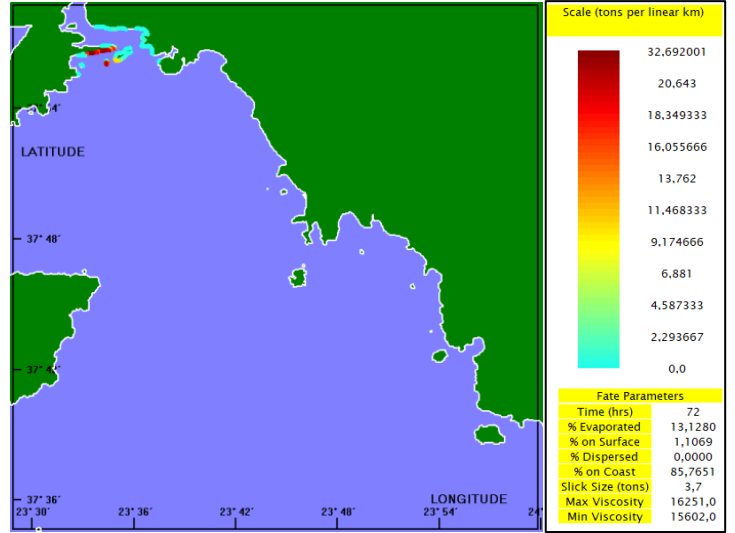
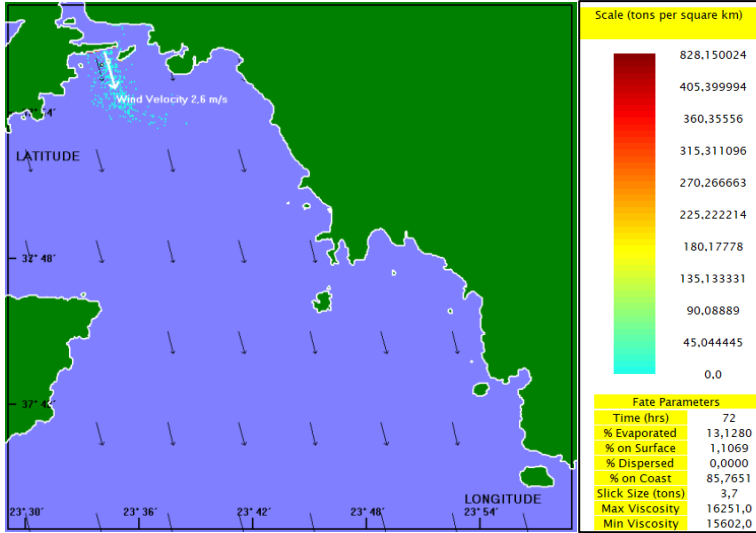
12/09/2017 Όρα: 02:00



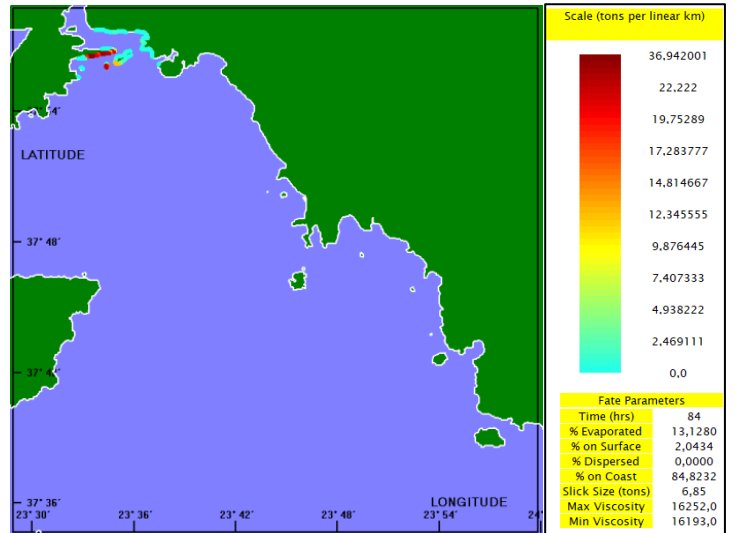
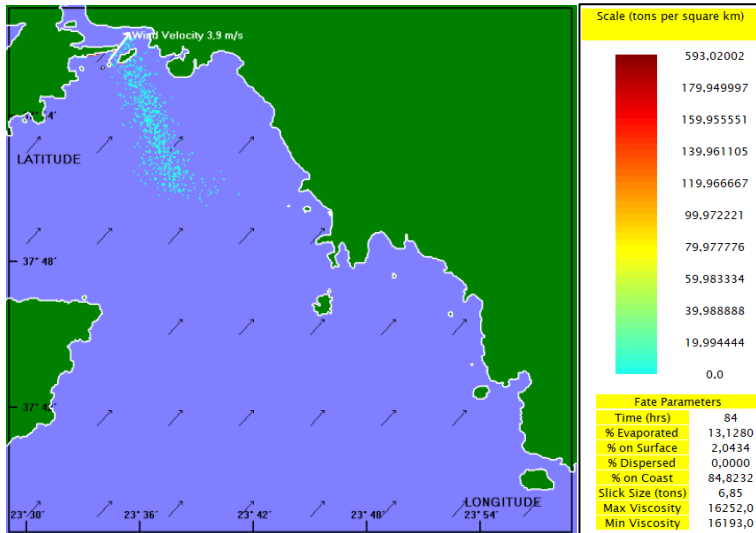
Όρα: 14:00



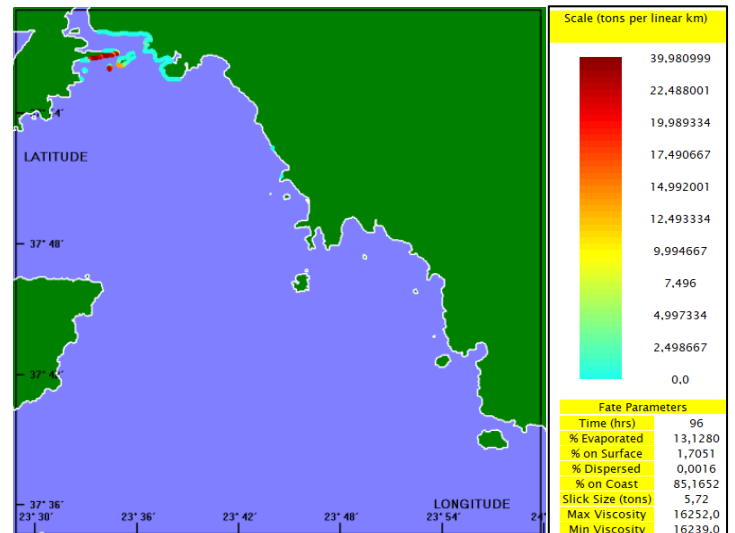
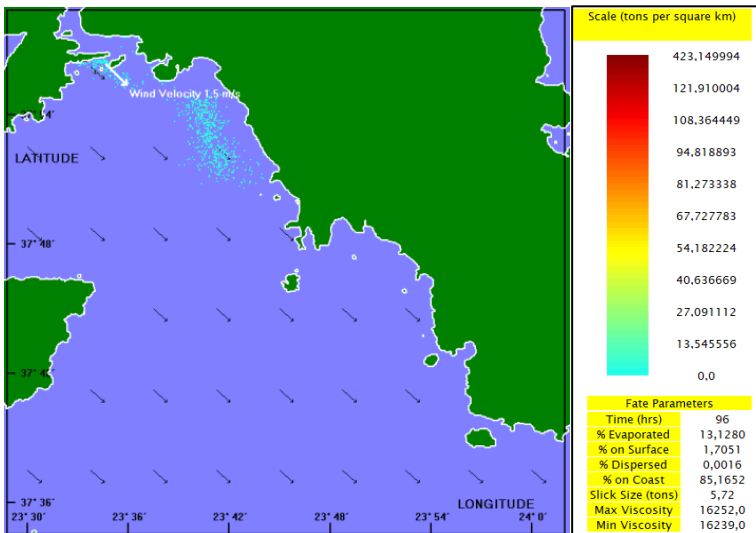
13/09/2017 "Ωρα: 02:00



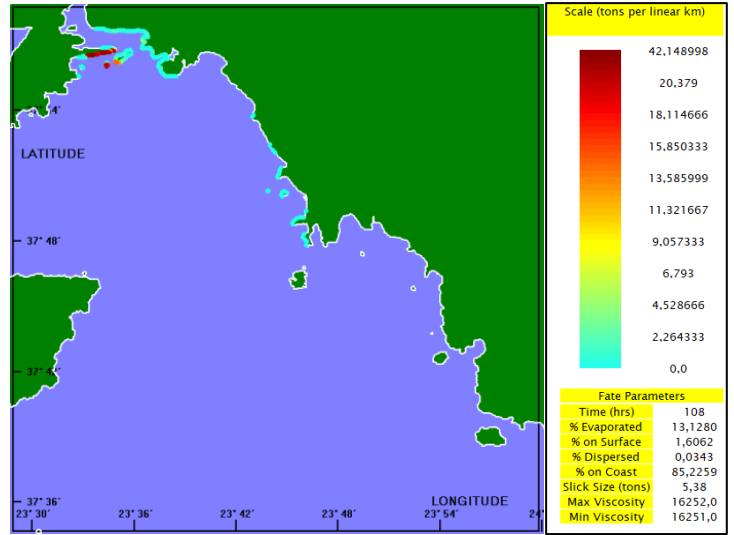
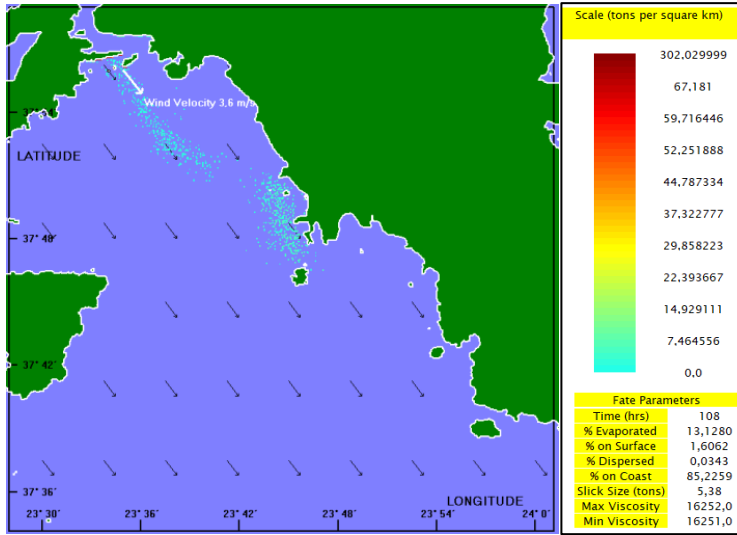
"Ωρα: 14:00



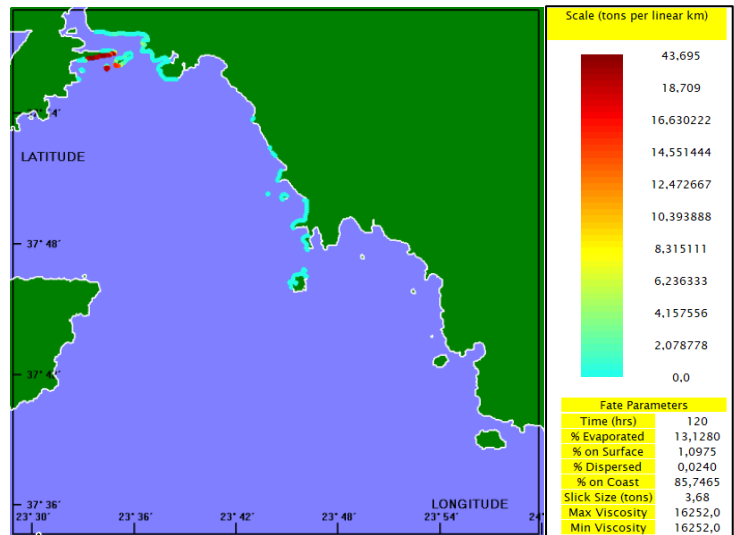
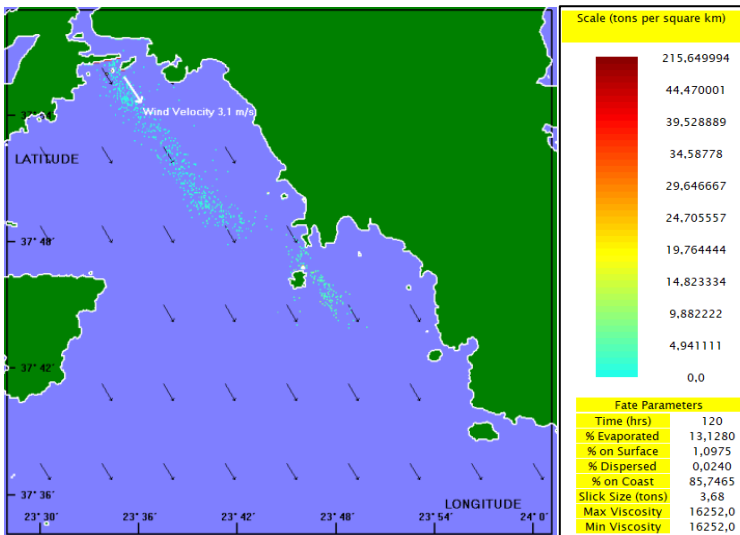
14/09/2017 "Ωρα: 02:00



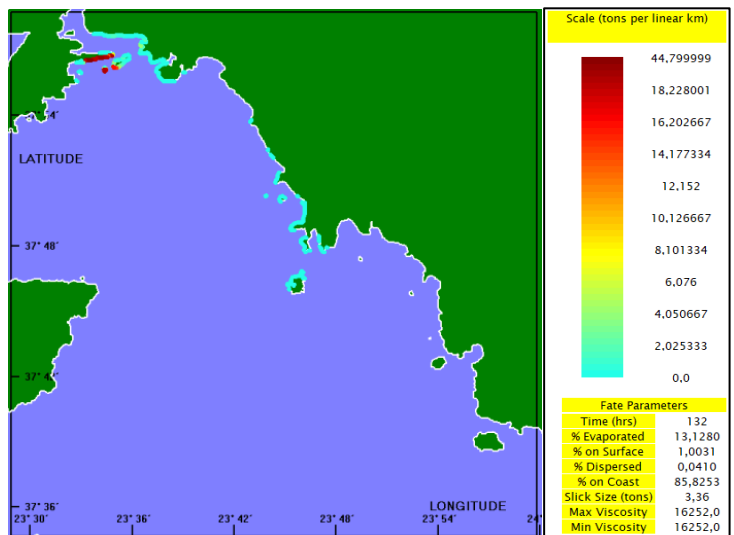
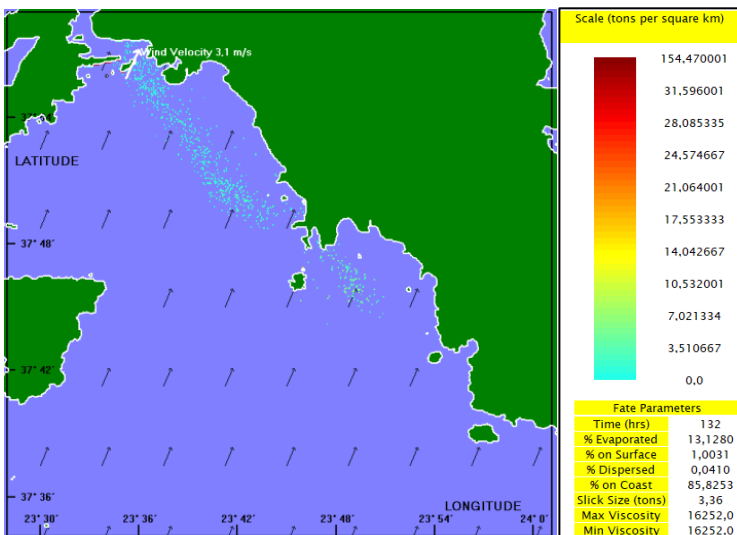
Όρα: 14:00



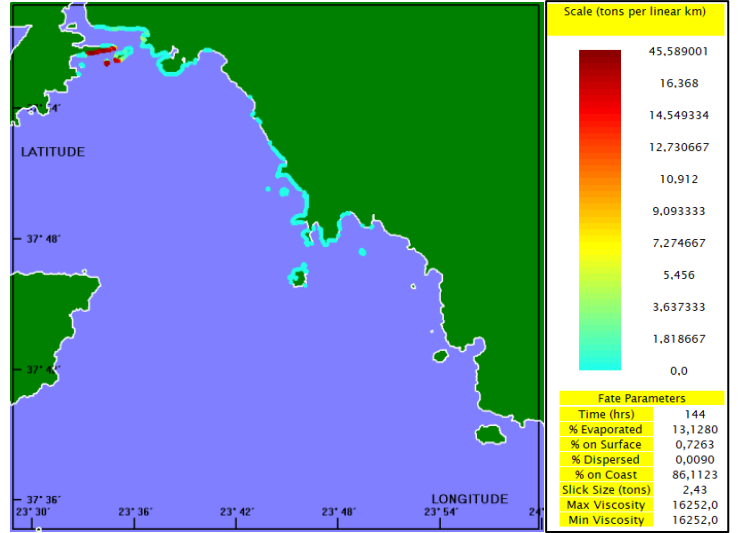
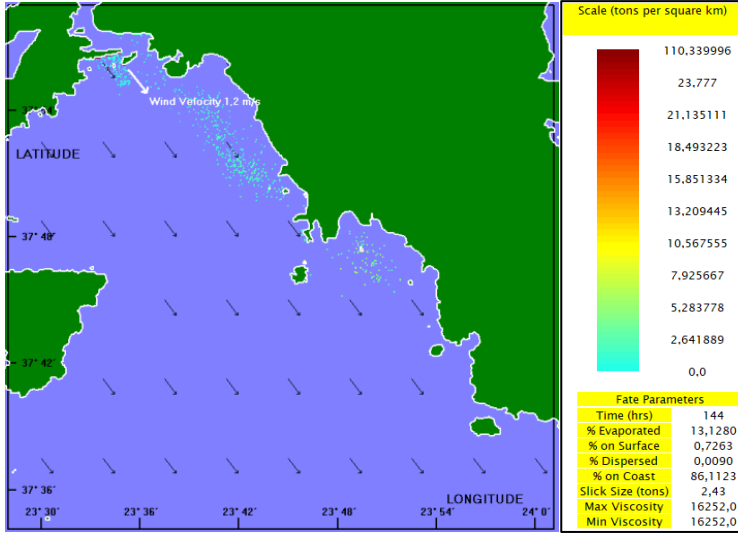
15/09/2017 Όρα: 02:00



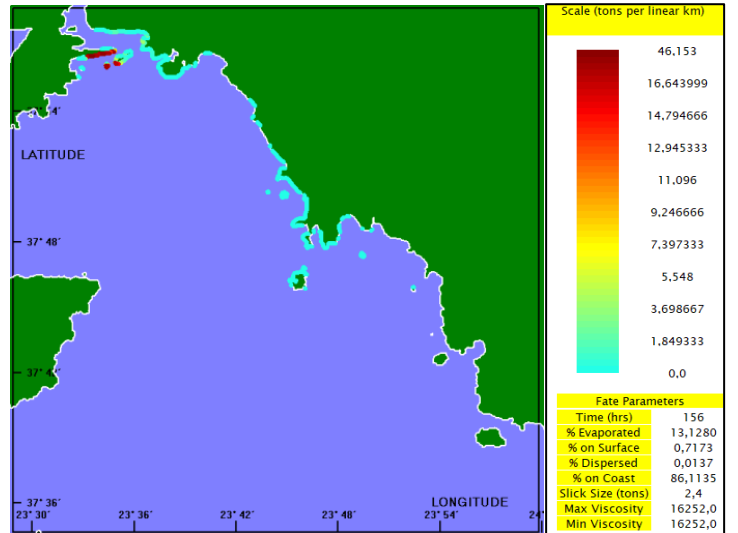
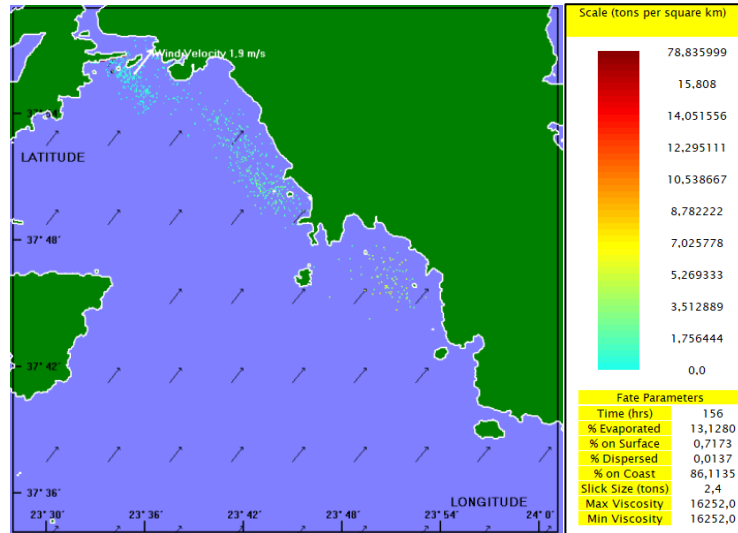
Όρα: 14:00



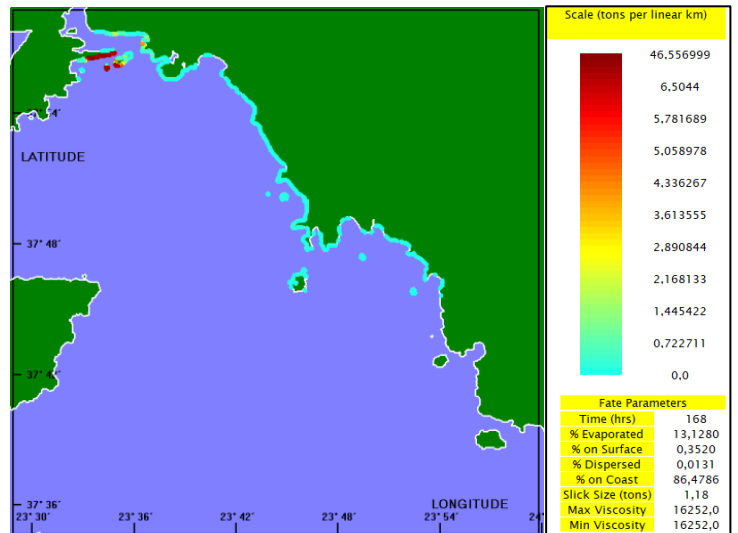
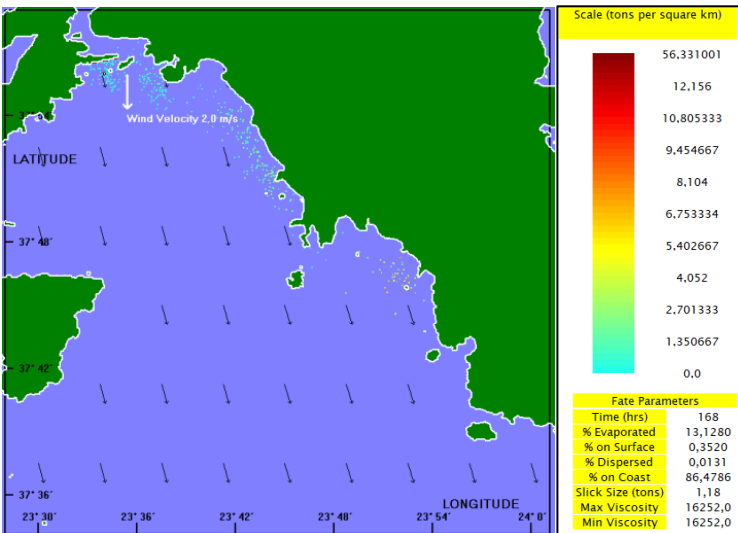
16/09/2017 "Ωρα: 02:00



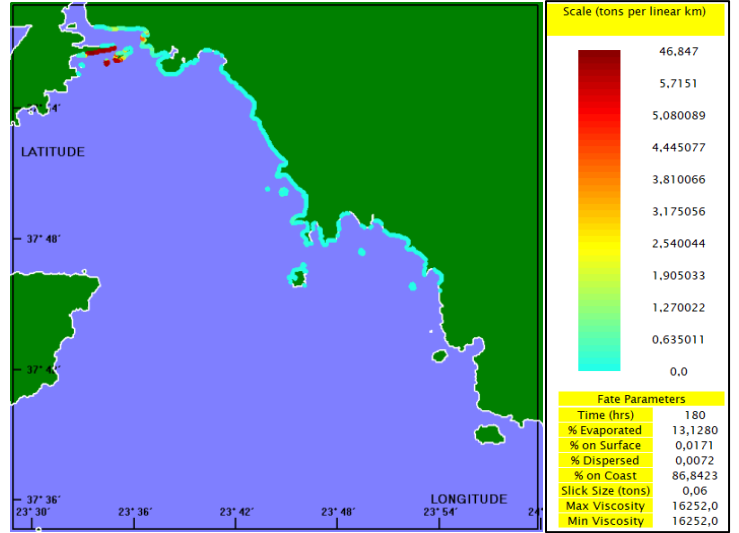
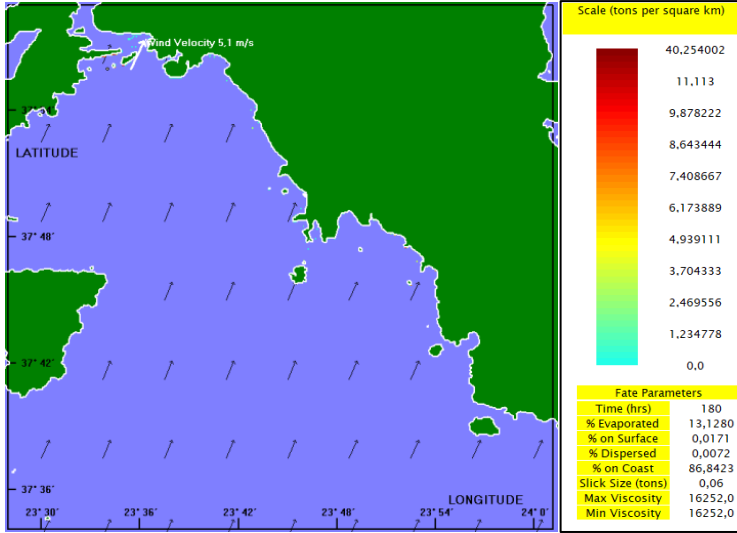
"Ωρα: 14:00



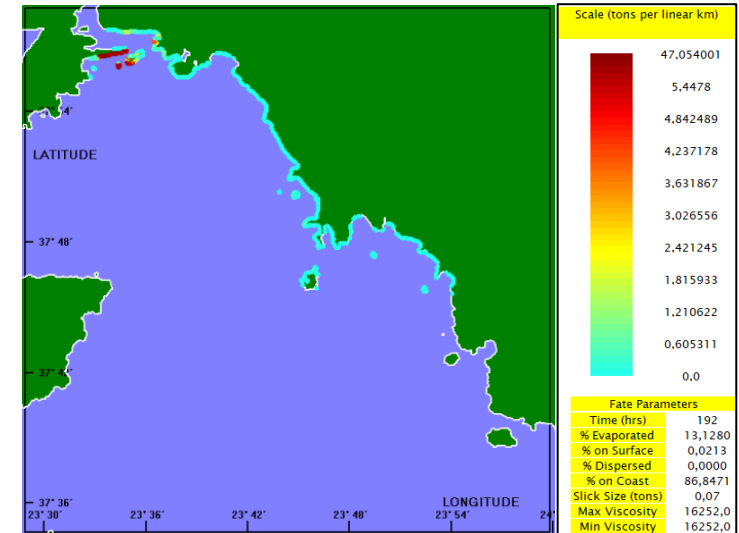
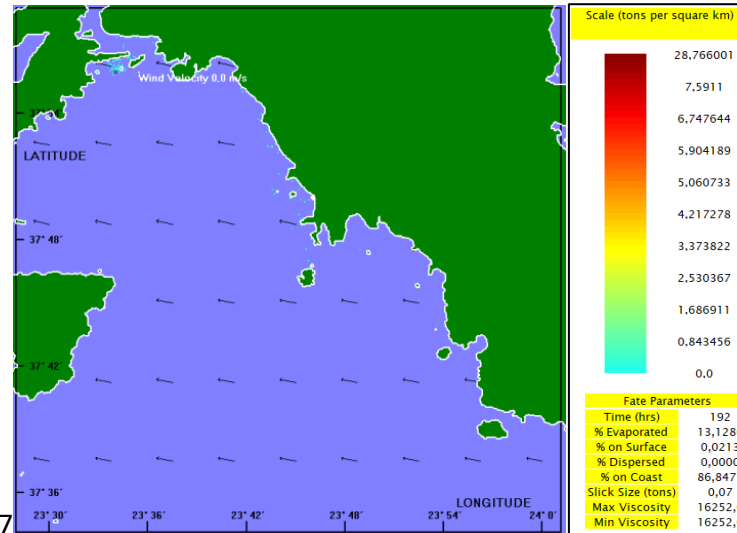
17/09/2017 "Ωρα: 02:00



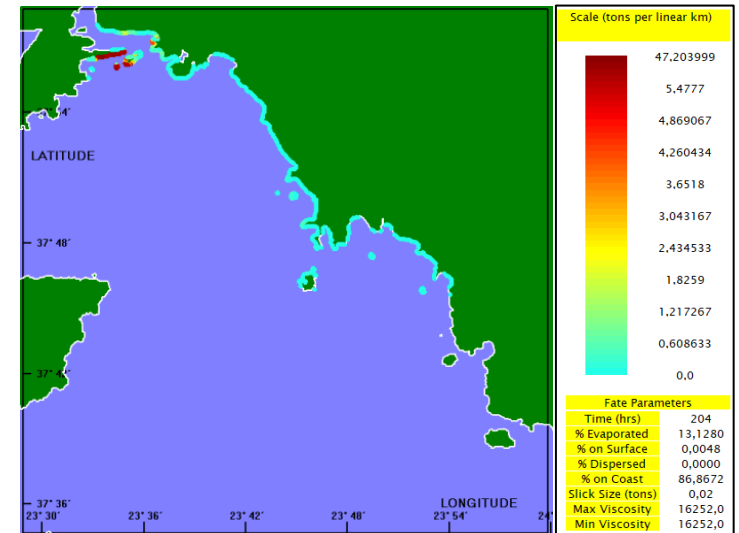
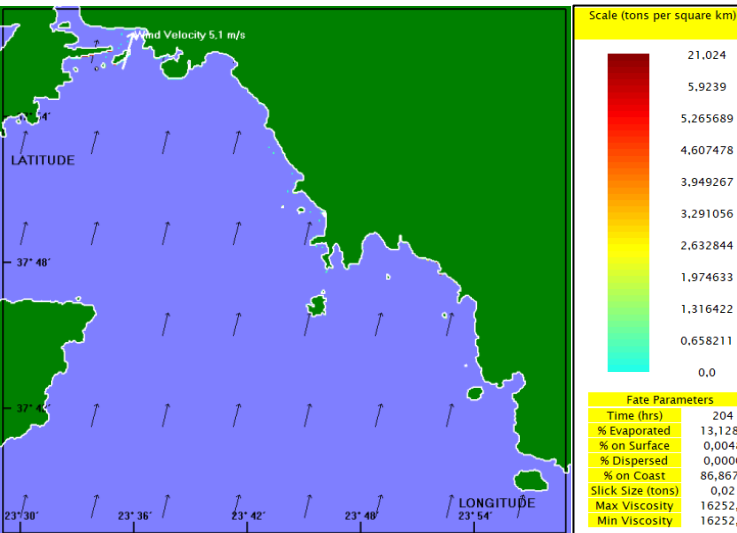
Όρα: 14:00



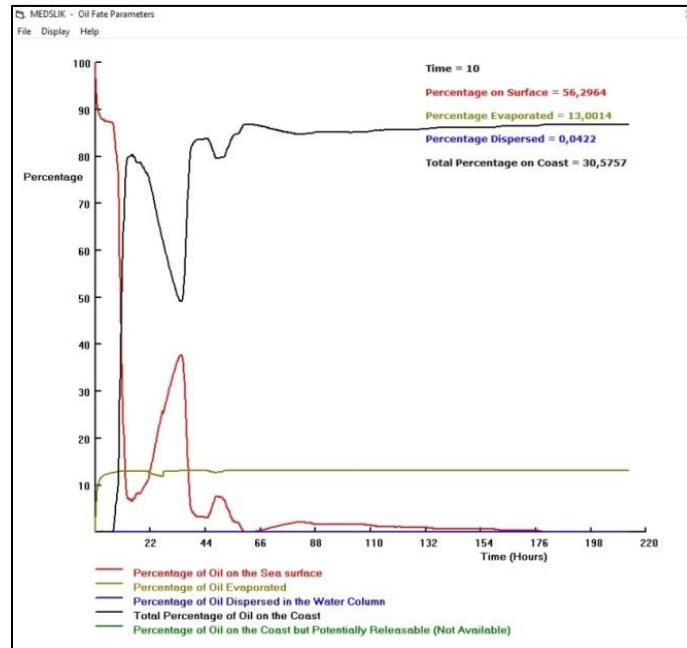
18/09/2017 Όρα: 02:00



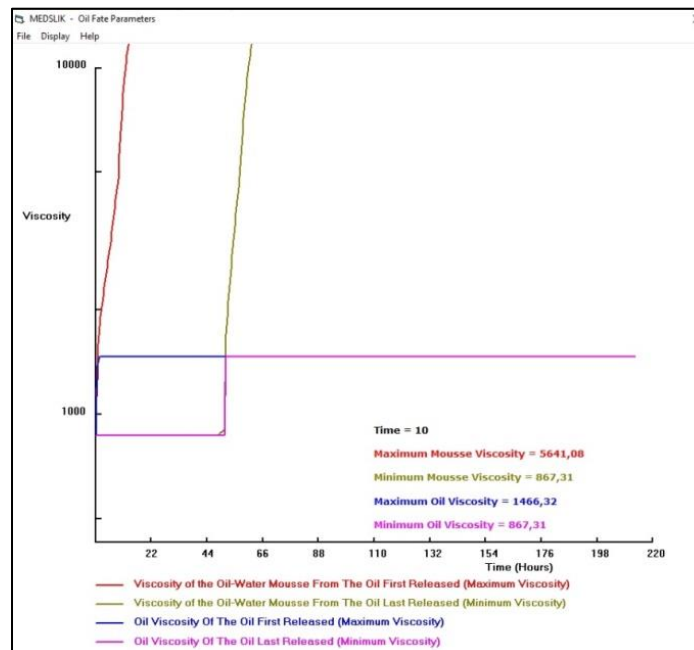
Όρα: 14:00



Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα από την προσομοίωση των διεργασιών. Έχει επιλεχθεί με τον κέρσορα ενδεικτικά η χρονική στιγμή των 10 ωρών. Το πρώτο διάγραμμα παρουσιάζει το ποσοστό του πετρελαίου που βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας, το ποσοστό που έχει εξατμιστεί, διασπαστεί αλλά και αυτό που είναι στην ακτή. Παρατηρείται μείωση του ποσοστού της επιφάνειας της πετρελαιοκηλίδας όσο περνάει ο χρόνος ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται το ποσοστό του στην ακτή. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μεταβολή του ιξώδους και της πυκνότητας του πετρελαίου, τα οποία αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου. Τέλος φαίνεται η μεταβολή του όγκου της κηλίδας η οποία αυξάνεται μέχρι τις 48 ώρες, όπου και σταματάει η διαρροή, και στη συνέχεια μειώνεται με συνάρτηση με τον χρόνο.

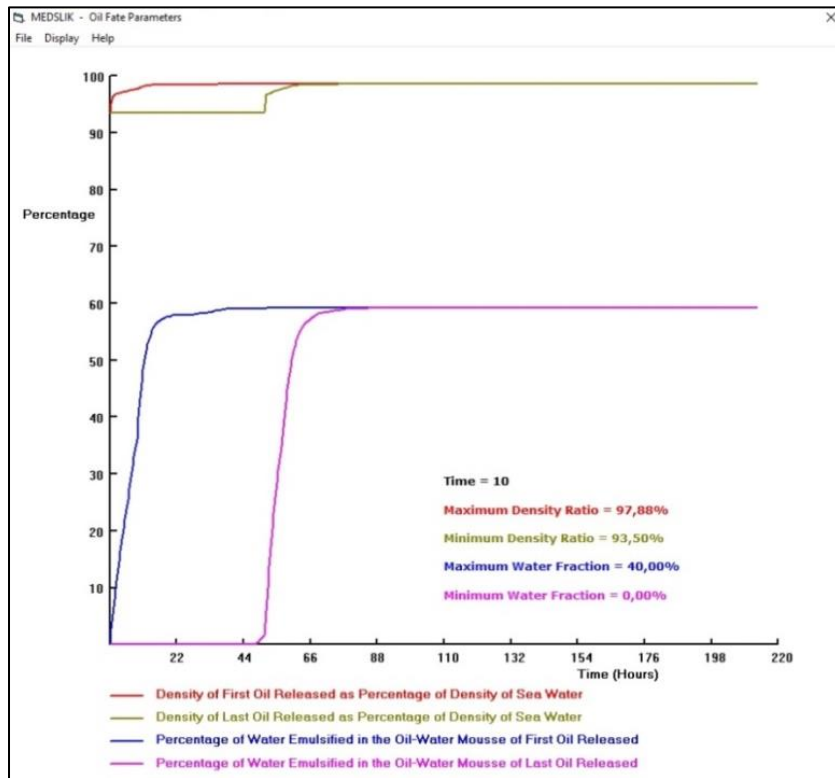


**Εικόνα 1** Διάγραμμα για το ποσοστό του πετρελαίου που βρίσκεται στην επιφάνεια, που έχει εξατμιστεί, διασπαστεί και το ποσοστό που έχει πάει στην ακτή.

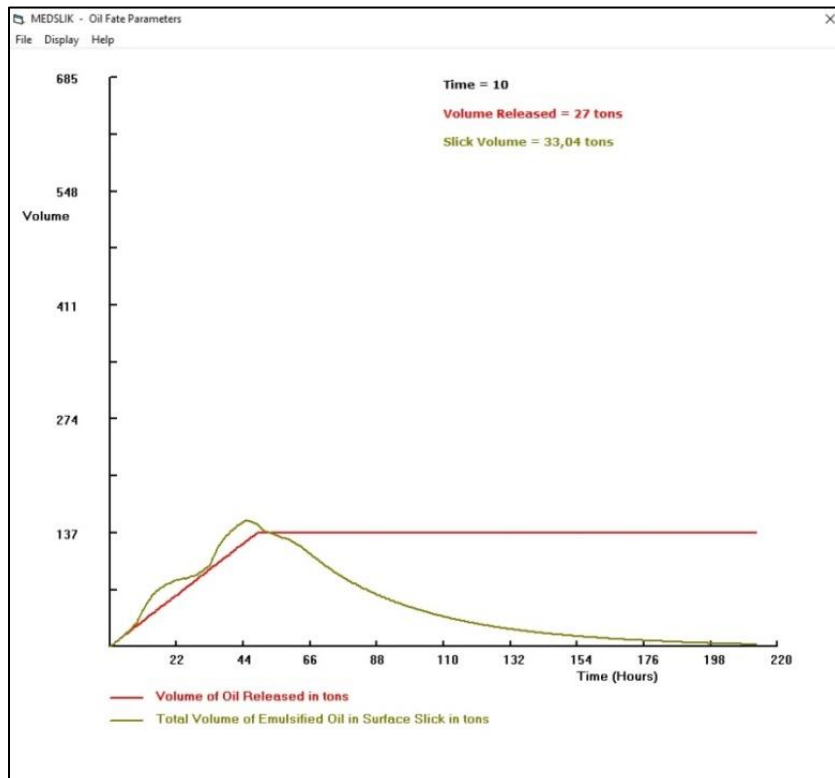


**Εικόνα 2** Μεταβολή του ιξώδους του πετρελαίου





**Εικόνα 3** Μεταβολή πυκνότητας πετρελαίου

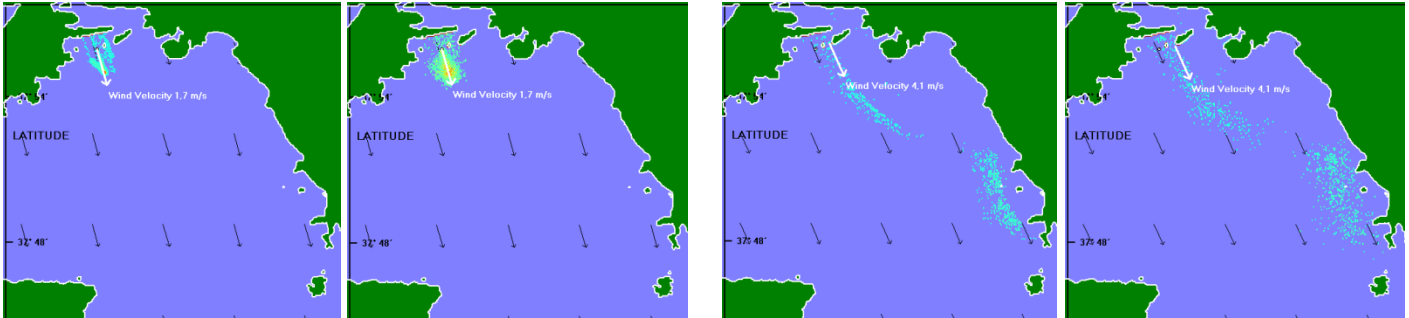


**Εικόνα 4** Όγκος κηλίδας πετρελαίου

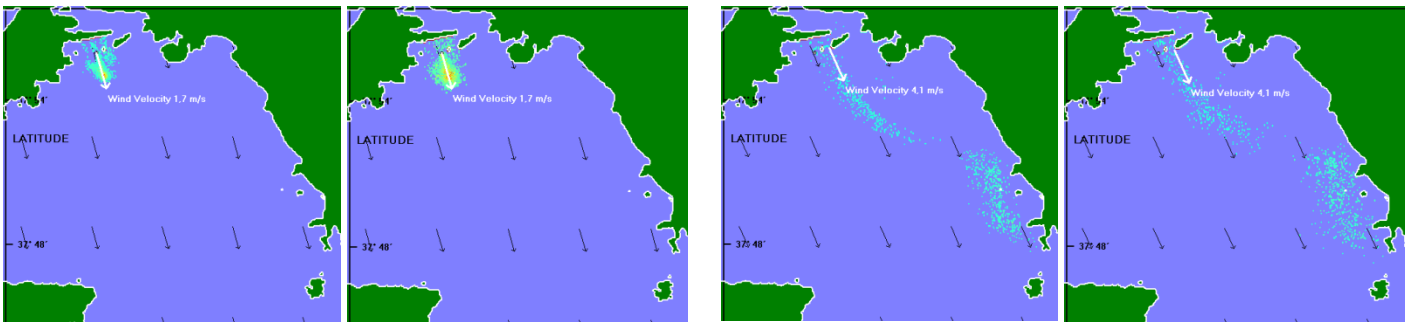
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4: Ανάλυση ευαισθησίας

11/9/2017 11:00

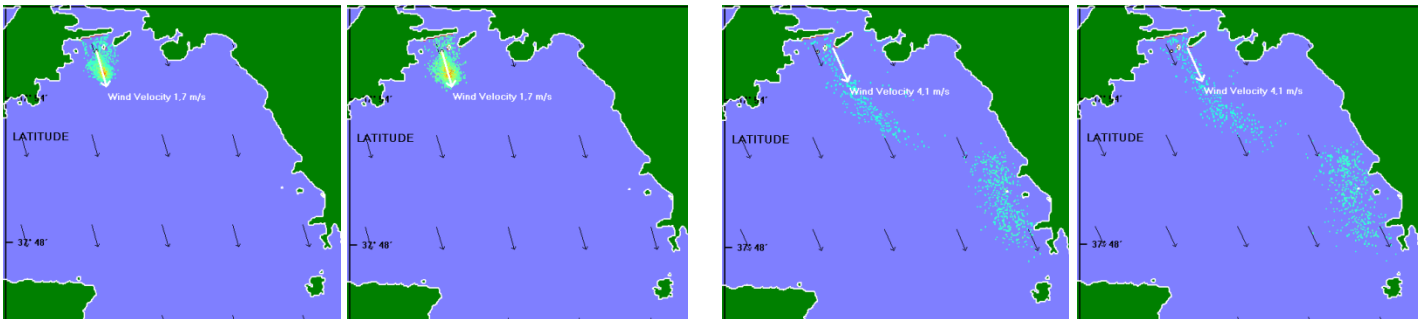
14/09/2017 11:00



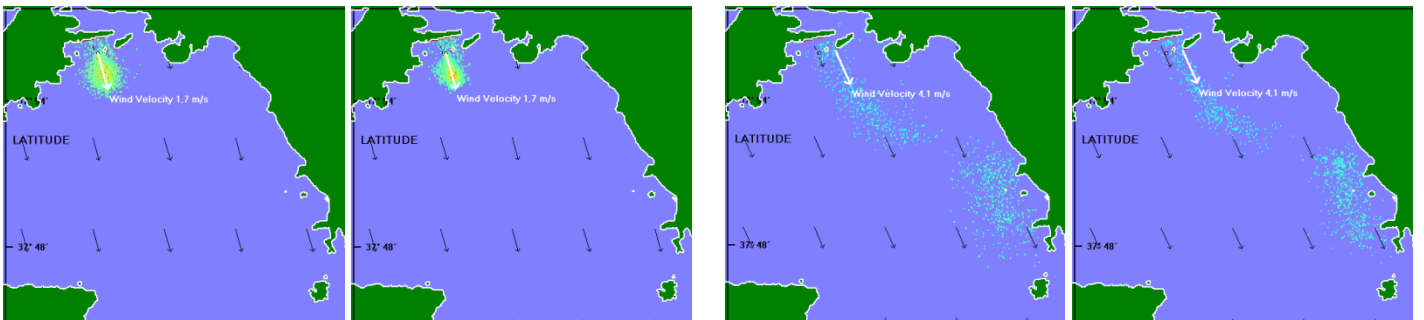
Εικόνα 1 Σενάριο 1 (Σ1). (αριστερά είναι οι υπολογισμοί του σεναρίου και δεξιά οι τελικοί υπολογισμοί)



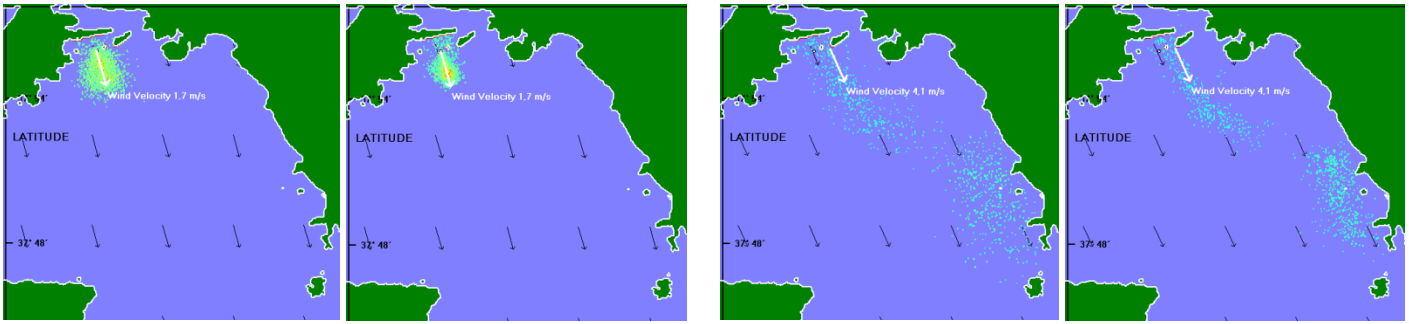
Εικόνα 2 Σενάριο 2 (Σ2). (αριστερά είναι οι υπολογισμοί του σεναρίου και δεξιά οι τελικοί υπολογισμοί)



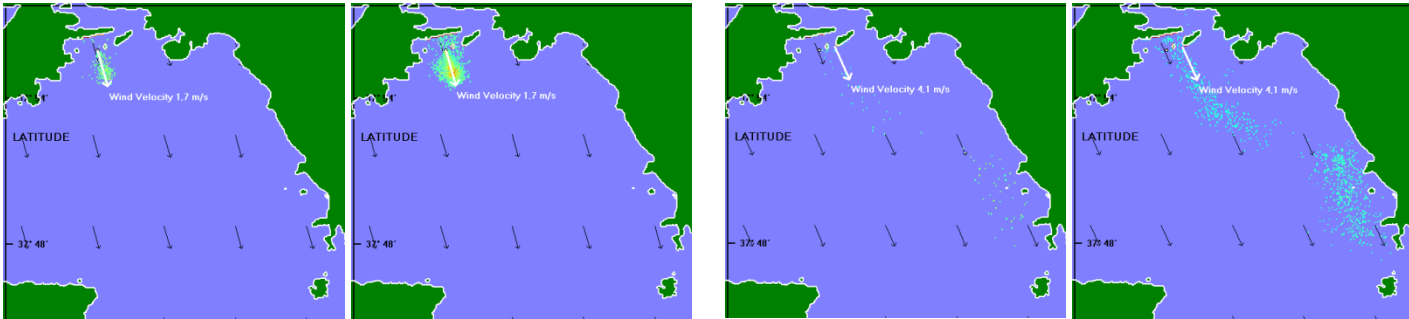
Εικόνα 3 Σενάριο 3 (Σ3). (αριστερά είναι οι υπολογισμοί του σεναρίου και δεξιά οι τελικοί υπολογισμοί)



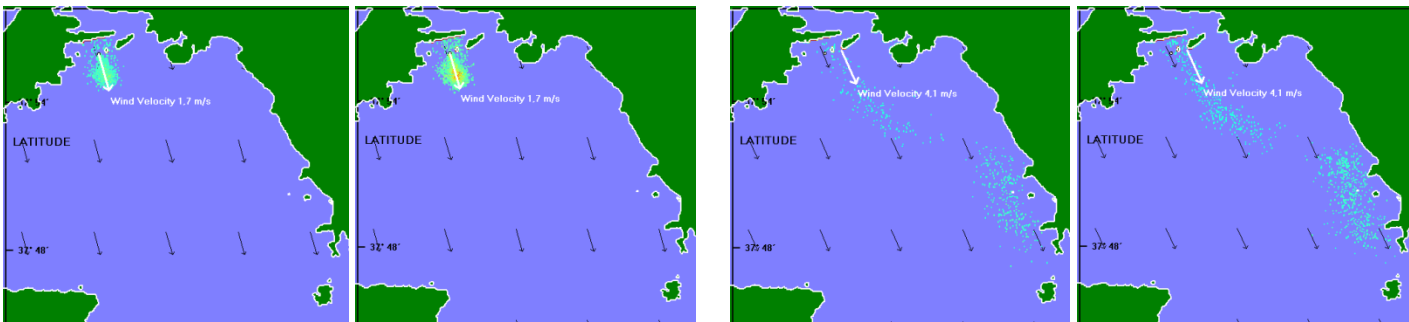
Εικόνα 4 Σενάριο 4 (Σ4). (αριστερά είναι οι υπολογισμοί του σεναρίου και δεξιά οι τελικοί υπολογισμοί)



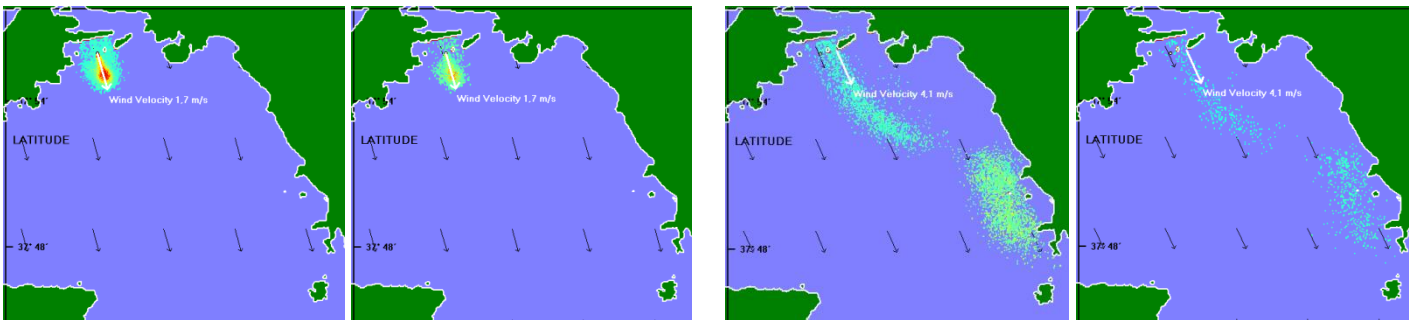
**Εικόνα 5** Σενάριο 5 (Σ5). (αριστερά είναι οι υπολογισμοί του σεναρίου και δεξιά οι τελικοί υπολογισμοί)



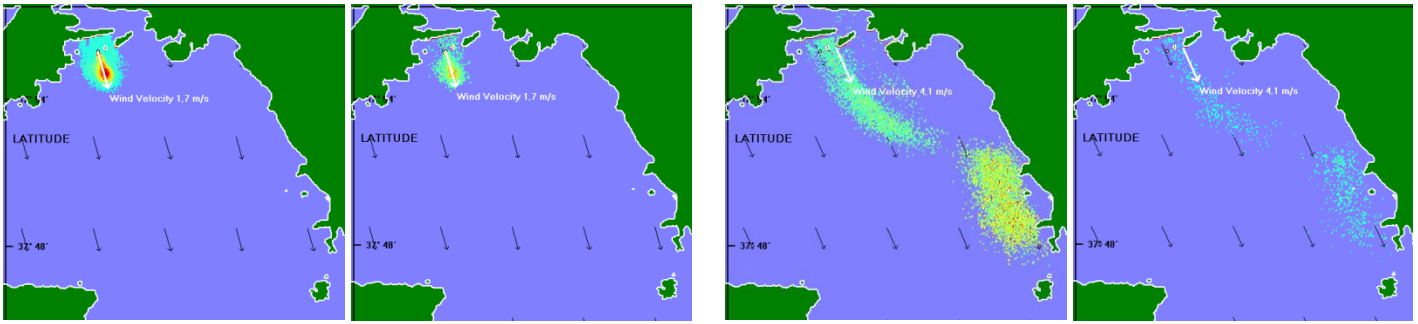
**Εικόνα 6** Σενάριο 6 (Σ6). (αριστερά είναι οι υπολογισμοί του σεναρίου και δεξιά οι τελικοί υπολογισμοί)



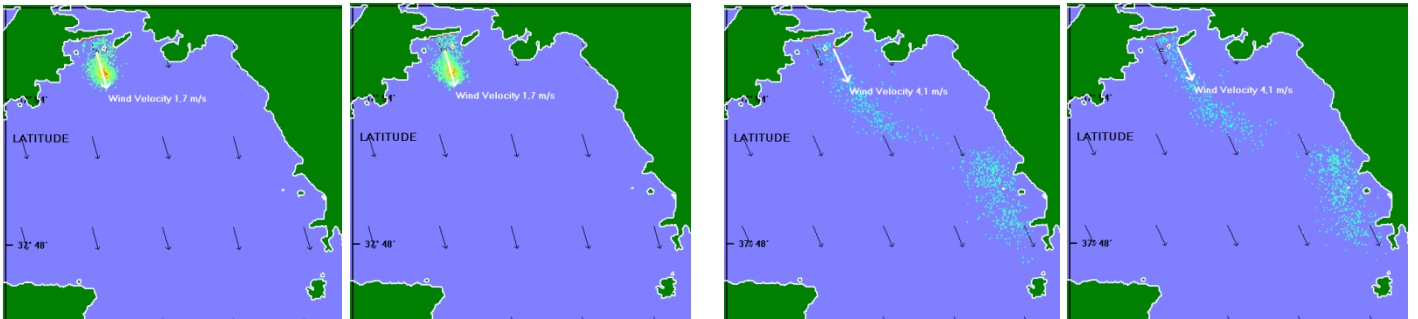
**Εικόνα 7** Σενάριο 7 (Σ7). (αριστερά είναι οι υπολογισμοί του σεναρίου και δεξιά οι τελικοί υπολογισμοί)



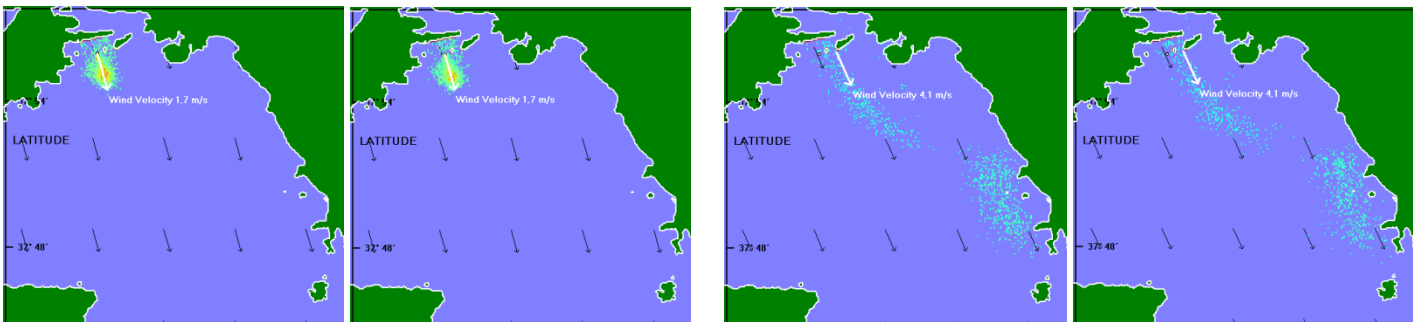
**Εικόνα 8** Σενάριο 8 (Σ8). (αριστερά είναι οι υπολογισμοί του σεναρίου και δεξιά οι τελικοί υπολογισμοί)



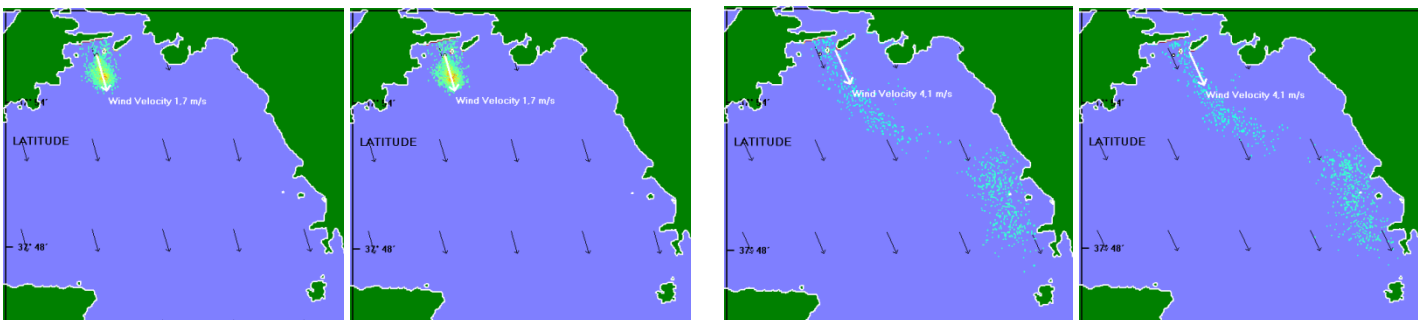
**Εικόνα 9** Σενάριο 9 (Σ9). (αριστερά είναι οι υπολογισμοί του σεναρίου και δεξιά οι τελικοί υπολογισμοί)



**Εικόνα 10** Σενάριο 10 (Σ10). (αριστερά είναι οι υπολογισμοί του σεναρίου και δεξιά οι τελικοί υπολογισμοί)



**Εικόνα 11** Σενάριο 11 (Σ11). (αριστερά είναι οι υπολογισμοί του σεναρίου και δεξιά οι τελικοί υπολογισμοί)



**Εικόνα 12** Σενάριο 12 (Σ12). (αριστερά είναι οι υπολογισμοί του σεναρίου και δεξιά οι τελικοί υπολογισμοί)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5: Προβολή αποτελεσμάτων στην εφαρμογή Google Earth

Από την διαδικτυακή πλατφόρμα του CYCOFOS (<http://www.oceanography.ucy.ac.cy/cycofos/medslik.php>) υπάρχει η δυνατότητα μετατροπής των αρχείων του MEDSLIK (srf) σε μορφή kml, μορφή η οποία μπορεί να εισαχθεί στο περιβάλλον του Google Earth. Παρακάτω φαίνονται κάποιες ενδεικτικές εικόνες από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Google Earth .



**Εικόνα 1** 10/11/2017 και ώρα 02:00



**Εικόνα 2** 10/11/2017 και ώρα 08:00

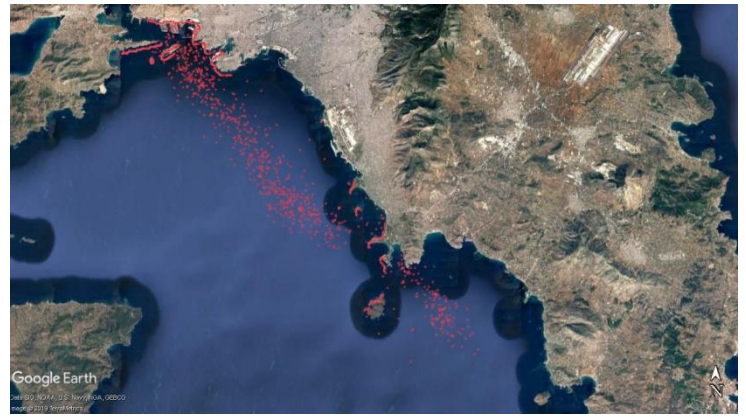


**Εικόνα 3** 11/11/2017 και ώρα 08:00





**Εικόνα 4** 12/11/2017 και ώρα 23:00



**Εικόνα 7** 15/11/2017 και ώρα 14:00



**Εικόνα 5** 13/11/2017 και ώρα 14:00



**Εικόνα 8** 16/11/2017 και ώρα 17:00



**Εικόνα 6** 14/11/2017 και ώρα 05:00



**Εικόνα 9** 17/11/2017 και ώρα 17:00



**Εικόνα 10** 18/11/2017 και ώρα 11:00