

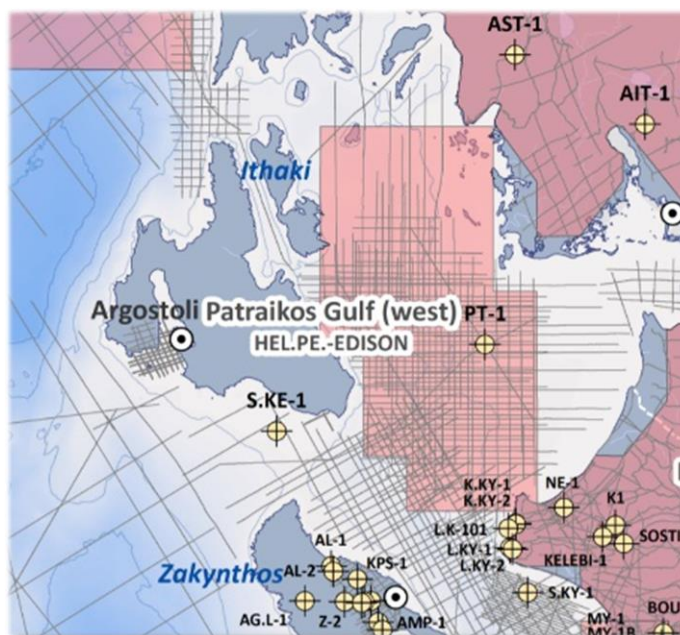


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

«ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ- ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ TELEMAC2D, MEDSLIK ΚΑΙ OSCAR»



ΣΠΥΡΟΣ ΑΥΓΟΥΣΤΙΑΝΟΣ

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Επιβλέπων: Αναστάσιος Στάμου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

Εικόνα Εξωφύλλου: (Ελληνική Διαχειριστική Εταιρεία Υδρογονανθράκων (ΕΔΕΥ), 2019)

**«ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ –
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ TELEMAC2D, MEDSLIK ΚΑΙ OSCAR»**

Λέξεις κλειδιά: Πετρελαιοκηλίδα, Πετρέλαιο, Πατραϊκός Κόλπος, Ατύχημα με διαρροή πετρελαίου, Προσομοίωση πετρελαιοκηλίδας, Σύγκριση μοντέλων, MEDSLIK, OSCAR, TELEMAC2D

**“MATHEMATICAL SIMULATION OF OIL SPILL BEHAVIOUR –A COMPARISON OF
TELEMAC2D, MEDSLIK AND OSCAR MODELS”**

Keywords: Oil spill, Oil, Gulf of Patras, Oil Spill Accident, Oil Spill Modeling, Models comparison, MEDSLIK, OSCAR, TELEMAC2D,

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.

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Μακατούνη καθώς ήταν αυτός που με παρακίνησε να ασχοληθώ με ένα τέτοιο θέμα, ενώ είχε την επίβλεψη και καθοδήγηση της μεταπτυχιακής εργασίας καθ' όλη τη διάρκεια της. Στη συνέχεια τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Στάμου για την ανάθεση του συγκεκριμένου πολύ ενδιαφέροντος θέματος. Επίσης καθοριστική ήταν η βοήθεια και η συμβολή του Ανδρέα Παπαδημητρίου στην διαδικασία μελέτης και διερεύνησης του υπολογιστικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε σε ένα τμήμα της εργασίας. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί η βοήθεια και υποστήριξη που μου παρείχε η οικογένεια και οι φίλοι μου σε όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ	1
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	4
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
EXTENDED ABSTRACT	6
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	16
1.2 ΠΡΩΤΟΤΥΠΑ ΣΗΜΕΙΑ.....	17
1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	17
2. ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΩΝ	18
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	18
2.2 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	21
2.3 ΑΙΤΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΩΝ.....	23
2.3.1 ΡΥΠΑΝΣΗ ΠΟΥ ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΑ ΝΑΥΤΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ.....	23
2.3.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΑ ΝΑΥΤΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ-ΙΣΤΟΡΙΚΟ (ΔΙΕΘΝΕΣ ΚΑΙ ΕΓΧΩΡΙΟ)	27
2.3.3 ΡΥΠΑΝΣΗ ΛΟΓΩ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ	29
2.4 ΠΛΑΤΦΟΡΜΕΣ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ	30
2.4.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	30
2.4.2 ΤΥΠΟΙ ΕΞΕΔΡΩΝ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ	30
2.5 ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΩΝ	35
2.6 ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΠΙΘΑΝΗΣ ΔΙΑΡΟΗΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΑ.....	36
2.6.1 ΦΡΑΓΜΑΤΑ (BOOMS)	36
2.6.2 ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ (SKIMMERS)	36
2.6.3 ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΚΑΥΣΗ (IN-SITU BURNING).....	37
2.6.4 ΔΙΑΣΚΟΡΠΙΣΤΙΚΑ (DISPERSANTS)	38
2.6.5 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΣΤΗΝ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗ	38
3. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	39
3.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	39
3.2 ΕΞΑΠΛΩΣΗ (SPREADING).....	40
3.3 ΕΞΑΤΜΙΣΗ (EVAPORATION)	41
3.4 ΔΙΑΣΠΟΡΑ (DISPERSION)	42
3.5 ΔΙΑΛΥΣΗ (DISSOLUTION).....	42
3.6 ΓΑΛΑΚΤΩΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ (EMULSIFICATION)	42
3.7 ΦΩΤΟΧΗΜΙΚΗ ΟΞΕΙΔΩΣΗ (PHOTO-OXIDATION).....	43
3.8 ΚΑΘΙΖΗΣΗ (SEDIMENTATION).....	44
3.9 ΒΙΟΑΠΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗ (BIODEGRADATION).....	44
3.10 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΑ	45
4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	52

4.1	ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ.....	53
4.2	ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΑ ΧΛΩΡΙΔΑ.....	54
4.3	ΑΛΙΕΥΤΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ	55
4.4	ΥΔΑΤΟΚΑΛΛΙΕΡΓΙΕΣ.....	55
4.5	ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΟΜΕΝΑ ΕΙΔΗ.....	55
4.6	ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΟΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	56
4.7	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ	57
4.8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ	58
5.	ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ OSCAR	59
5.1	ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	59
5.2	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ OSCAR	60
6.	ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ MEDSLIK.....	61
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	61
6.2	ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	63
6.2.1	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΥΣΗ ΤΗΣ ΚΗΛΙΔΑΣ (ADVECTION AND DIFFUSION OF THE SLICK) 63	
6.2.2	ΠΡΟΣΑΙΓΙΑΛΩΣΗ (BEACHING).....	64
6.2.3	ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΤΟ MEDSLIK (FATE MODELS)	66
6.2.4	ΕΞΑΤΜΙΣΗ (EVAPORATION)	66
6.2.5	ΓΑΛΑΚΤΩΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ (EMULSIFICATION)	68
6.2.6	ΔΙΑΣΠΟΡΑ (DISPERSION).....	69
6.2.7	ΕΞΑΠΛΩΣΗ (SPREADING).....	72
6.3	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	73
6.3.1	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΚΑΙ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ	73
6.3.2	ΧΑΡΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	75
6.3.3	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΡΕΥΜΑΤΩΝ.....	76
6.3.4	ΜΟΡΦΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	79
6.4	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ MEDSLIK ΚΑΙ OSCAR ΣΤΟΝ ΠΑΤΡΑΪΚΟ ΚΟΛΠΟ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.....	82
6.4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	82
6.4.2	ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ MEDSLIK	82
6.4.3	ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ MEDSLIK.....	82
6.4.4	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥΣ.....	82
6.4.5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΤΟ MEDSLIK.....	83
6.4.6	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΟ OSCAR	86
7.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ OPEN-TELEMAC MASCARET ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ-ΕΦΑΡΜΟΓΗ.....	92
7.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	92
7.2	ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ TELEMAC2D-ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ..	92
7.3	ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ (OIL_FLOT.f)	94

7.4	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ TELEMAC-2D	98
7.4.1	ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....	98
7.4.2	ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	101
7.4.3	ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	102
7.4.4	ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	102
7.4.5	ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	104
7.4.6	ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ	104
7.4.7	ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	106
7.5	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ MEDSLIK	106
7.6	ΣΥΓΚΡΙΣΗ TELEMAC2D-MEDSLIK	108
7.6.1	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ.....	108
7.6.2	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΡΟΧΙΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ.....	109
7.6.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΑΖΑΣ.....	110
7.7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ TELEMAC2D ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ (OIL_FLOT.f)	114
8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	116
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	117
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	120

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1 Δομή της πετρελαϊκής βιομηχανίας.....	18
Εικόνα 2.2 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά τύπο καυσίμου το 2017.....	20
Εικόνα 2.3 Δίκτυο διακίνησης πετρελαίου παγκοσμίως.....	20
Εικόνα 2.4 Δίκτυο θαλάσσιας μεταφοράς πετρελαίου και ατυχήματα διαρροής (1974-)	21
Εικόνα 2.5 Παραγωγή πετρελαίου στον Πρίνο στην Καβάλα	22
Εικόνα 2.6 Τα νέα θαλάσσια πεδία ερευνών για πετρέλαιο και φυσικό αέριο στην Ελλάδα.....	22
Εικόνα 2.7 Οι 10 χώρες με το μεγαλύτερο στόλο σε dwt με βάση τη σημαία.....	23
Εικόνα 2.8 Περιστατικά πετρελαιοκηλίδων λόγω ναυτικού ατυχήματος με βάση την αιτία τη χρονική περίοδο 1970-2018	24
Εικόνα 2.9 Βασικοί τύποι δεξαμενόπλοιων (tankers).....	25
Εικόνα 2.10 Συνολικό διακινούμενο υγρό φορτίο και οι θαλάσσιες μετακινήσεις δεξαμενόπλοιων ..	26
Εικόνα 2.11 Τοποθεσία των μεγαλύτερων πετρελαιοκηλίδων	27
Εικόνα 2.12 Αριθμός πετρελαιοκηλίδων>7 τόνους 1970-2018	27
Εικόνα 2.13 Αριθμός μεσαίου και μεγάλου μεγέθους πετρελαιοκηλίδων 1970-2018	28
Εικόνα 2.14 (1) (2) Συμβατικές πλατφόρμες πετρελαίου στερεωμένες στον πυθμένα	30
Εικόνα 2.15 Fixed platform στην Καλιφόρνια κοντά στην Σάντα Μπάρμπαρα	31
Εικόνα 2.16 Baldpate Compliant tower στον Κόλπο του Μεξικού.....	31
Εικόνα 2.17 Deepsea Delta ημι-βυθιζόμενη (semi-submersible) πλατφόρμα άντλησης πετρελαίου στη Βόρεια Θάλασσα	32
Εικόνα 2.18 Jack-up πλατφόρμα πετρελαίου.....	32
Εικόνα 2.19 Λειτουργία FPSO	32
Εικόνα 2.20 Drillship της Maersk.....	33
Εικόνα 2.21 Τρόπος αγκυροβόλησης πλατφόρμας TLP	33
Εικόνα 2.22 Ρυμούλκηση και τελική θέση της πλατφόρμας Troll A	34
Εικόνα 2.23 Perdido Royal Dutch Shell Platform στον κόλπο του Μεξικού	34
Εικόνα 2.24 Φουσκωτά booms που έχουν αναπτυχθεί σε σχήμα U μεταξύ δύο σκαφών για τον περιορισμό πετρελαιοκηλίδας αργού πετρελαίου.....	36
Εικόνα 2.25 Skimmer με ταινία προσαρμοσμένο σε ειδικό σκάφος. Η ταινία κατασκευασμένη από πλέγμα επιτρέπει στο νερό να διαφεύγει και στο πετρέλαιο να προσκολλάται σε αυτή. Το πετρέλαιο καταλήγει στο σκάφος και αποθηκεύεται στις δεξαμενές του	37
Εικόνα 2.26 Συνδυασμός δράσης booms και skimmers για τον περιορισμό και την απομάκρυνση πετρελαίου	37
Εικόνα 2.27 Η αμερικάνικη ακτοφυλακή εφαρμόζει την τακτική της επιτόπιας καύσης για την αντιμετώπιση της πετρελαιοκηλίδας στον Κόλπο του Μεξικού από την Mobile Offshore Drilling Unit Deepwater Horizon.....	37
Εικόνα 2.28 Στρατηγική αντιμετώπισης της πετρελαιοκηλίδας με συνδυασμό όλων των διαθέσιμων μεθόδων	38
Εικόνα 2.29 Διάφορες μέθοδοι καθαρισμού της ακτογραμμής	38
Εικόνα 3.1 Κύριες διεργασίες «γήρανσης» της Πετρελαιοκηλίδας.....	39
Εικόνα 3.2 Σχηματική απεικόνιση της εξέλιξης μιας πετρελαιοκηλίδας αργού πετρελαίου στην οποία διακρίνεται η μεταβολή της σχετικής σημασίας των διαδικασιών γήρανσης- το πλάτος κάθε χρώματος υποδεικνύει τη σημασία της διεργασίας	40
Εικόνα 3.3 Διαρροή πετρελαίου στη θάλασσα	40
Εικόνα 3.4 Σχηματισμός λεπτών λωρίδων παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου	41
Εικόνα 3.5 Εξάτμιση της πετρελαιοκηλίδας.....	41
Εικόνα 3.6 Διασκόρπιση πετρελαίου σε σταγονίδια λόγω της επίδρασης των κυματισμών.....	42
Εικόνα 3.7 Γαλακτωματοποίηση)	43
Εικόνα 3.8 Πίσσα (tar ball) στην ακτή.....	44
Εικόνα 3.9 Ιζήματα πετρελαίου στον πυθμένα της θάλασσας.....	44
Εικόνα 3.10 Επιπτώσεις πετρελαιοκηλίδας.....	45

Εικόνα 3.11	Τυπικές επιπτώσεις στους θαλάσσιους οργανισμούς ανάλογα με το είδος βλάβης	46
Εικόνα 3.12	Θαλασσοπούλι καλυμμένο με πετρέλαιο	47
Εικόνα 3.13	Οι πεταλίδες και τα υπόλοιπα είδη ζωής στις βραχώδεις ακτές μπορούν να επηρεαστούν από το πετρέλαιο και να αντικατασταθούν από άλγη. Με το πέρασμα του χρόνου αποκαθίσταται η ισορροπία	48
Εικόνα 3.14	Προσπάθεια καθαρισμού αμμώδους ακτής από διαρροή πετρελαίου	49
Εικόνα 3.15	Ενδεικτικό χρονικό διάστημα επαναφοράς διαφορετικών τύπων θαλάσσιου περιβάλλοντος.....	49
Εικόνα 3.16	Η αποτελεσματική ή όχι χρήση των booms σε αυτές τις περιπτώσεις εξαρτάται από την παύση της κυκλοφορίας των σκαφών στη μαρίνα	50
Εικόνα 3.17	Καθαρισμός πλοίου από ειδικό συνεργείο.....	50
Εικόνα 3.18	Η εισροή νερού πρέπει να προστατευθεί προκειμένου το πετρέλαιο να μην επηρεάσει τις διατάξεις ανταλλαγής θερμότητας κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε παύση της παραγωγής καθώς είναι δύσκολο να καθαριστεί	51
Εικόνα 3.19	Η παραγωγή αλατιού μπορεί να επηρεαστεί σε πολύ μεγάλο βαθμό αν το πετρέλαιο εισρεύσει στις αλυκές. Η άλμη παίρνει ένα ροζ χρώμα λόγω της ύπαρξης μικροάλγης	51
Εικόνα 4.1	Αναλυτική εικόνα της Περιοχής του Πατραϊκού κόλπου με σημειωμένες τις ερευνητικές γεωτρήσεις.....	52
Εικόνα 4.2	Περιοχή Μελέτης (Πατραϊκός κόλπος).....	52
Εικόνα 4.3	Δίκτυο Περιοχών NATURA 2000.....	53
Εικόνα 4.4	Βαθυμετρία του πυθμένα περιοχής μεταξύ του Πατραϊκού Κόλπου και Κεφαλονιάς. Μέγιστο βάθος που σημειώνεται με κόκκινο τα 546 m	54
Εικόνα 4.5	Εκτίμηση της κατανομή των λιβαδιών Ποσειδωνιάς στην περιοχή μελέτης	54
Εικόνα 4.6	Θέση και δυναμικότητα μονάδων ιχθυοκαλλιέργειας	55
Εικόνα 4.7	Δραστηριότητα θαλάσσιων χελωνών	56
Εικόνα 4.8	Προστατευόμενη Περιοχή Καλογριάς	56
Εικόνα 4.9	Προστατευόμενη περιοχή λιμνοθάλασσας Μεσολογγίου	57
Εικόνα 5.1	Η περιοχή μελέτης, το σημείο C ορίζεται ως το σημείο της διαρροής	60
Εικόνα 6.1	Μοντέλο μεταφοράς και διάχυσης του MEDSLIK	64
Εικόνα 6.2	Μοντέλο προσαιγιάλωσης στο MEDSLIK	65
Εικόνα 6.3	Μεταφορά όγκων από το πυκνό στο λεπτό στρώμα της κηλίδας	66
Εικόνα 6.4	Μοντέλο εξάτμισης MEDSLIK.....	68
Εικόνα 6.5	Μοντέλο γαλακτωματοποίησης του MEDSLIK.....	69
Εικόνα 6.6	Μηχανισμός της διασποράς	69
Εικόνα 6.7	Το μοντέλο της διασποράς	70
Εικόνα 6.8	Μοντέλο διασποράς του MEDSLIK.....	71
Εικόνα 6.9	Μοντέλο εξάπλωσης του MEDSLIK.....	72
Εικόνα 6.10:	Περιβάλλον εργασίας MEDSLIK.....	73
Εικόνα 6.11	Περιβάλλον εισαγωγής δεδομένων.....	73
Εικόνα 6.12	Αρχείο εισαγωγής δεδομένων	74
Εικόνα 6.13	Επιλογή περιοχής μελέτης	75
Εικόνα 6.14	Επιλογή μεθόδου εισαγωγής ρευμάτων στο MEDSLIK.....	76
Εικόνα 6.15	Εισαγωγή ρευμάτων σταθερά ως προς το χώρο και μεταβλητά ως προς το χρόνο ...	76
Εικόνα 6.16	Ορισμός διεύθυνσης ρευμάτων	77
Εικόνα 6.17	Επιλογή μεθόδου εισαγωγής ανέμων.....	77
Εικόνα 6.18	Εισαγωγή ανέμων μεταβλητούς ως προς τον χρόνο.....	78
Εικόνα 6.19	Ορισμός διεύθυνσης ανέμου.....	78
Εικόνα 6.20	Περιβάλλον εμφάνισης αποτελεσμάτων	79
Εικόνα 6.21	Προσομοίωση τροχιάς πετρελαιοκηλίδας	79
Εικόνα 6.22	Διάγραμμα επιρροής παραμέτρων	80
Εικόνα 6.23	Χρονική μεταβολή του ιξώδους του πετρελαίου	80
Εικόνα 6.24	Χρονική μεταβολή της πυκνότητας του πετρελαίου	81

Εικόνα 6.25 Χρονική μεταβολή του όγκου της κηλίδας.....	81
Εικόνα 6.26 Περιοχή Μελέτης όπως απεικονίζεται στο MEDSLIK.....	82
Εικόνα 6.27 Αριστερά ο άνεμος καθώς και η κατανομή του πετρελαίου (σε κυβικά μέτρα). Δεξιά η ποσότητα του πετρελαίου που έχει φτάσει στην ακτή 36 ώρες μετά την εκκίνηση της διαρροής (22/11 03:00).....	83
Εικόνα 6.28 Το ποσοστό του πετρελαίου που βρίσκεται στην επιφάνεια, που έχει εξατμιστεί, διασπαστεί και το ποσοστό που έχει καταλήξει στην ακτή.....	84
Εικόνα 6.29 Μεταβολή του ιξώδους του πετρελαίου.....	84
Εικόνα 6.30 Μεταβολή πυκνότητας πετρελαίου.....	85
Εικόνα 6.31 Όγκος κηλίδας πετρελαίου.....	85
Εικόνα 6.32 Η εξέλιξη της πετρελαιοκηλίδας 36 ώρες μετά την εκκίνηση της διαρροής.....	86
Εικόνα 6.33 Χρονική στιγμή άφιξης του πετρελαίου στην ακτή περίπου 24 ώρες μετά τη διαρροή (21/11/2015 15:00).....	87
Εικόνα 6.34 Η τελική εικόνα του πετρελαίου που έχει φτάσει στην ακτογραμμή την τελευταία μέρα της προσομοίωσης (30/11/2015 15:00).....	87
Εικόνα 6.35 Ενδεικτικά στιγμιότυπα που περιγράφουν την τροχιά της πετρελαιοκηλίδας σύμφωνα με τα αποτελέσματα του OSCAR.....	88
Εικόνα 6.36 Ενδεικτικά στιγμιότυπα που περιγράφουν την τροχιά της πετρελαιοκηλίδας σύμφωνα με τα αποτελέσματα του MEDSLIK.....	88
Εικόνα 7.1 Εξέλιξη και μεταφορά της πετρελαιοκηλίδας.....	95
Εικόνα 7.2 Γράφημα του στερεού σώματος στο νερό.....	96
Εικόνα 7.3 Σωματίδιο P μέσα στο τριγωνικό στοιχείο (a) και ανάμεσα σε κόμβους (b).....	98
Εικόνα 7.4 Το τελικό πλέγμα, απεικόνιση του μεγέθους σε χρωματική κλίμακα των τριγωνικών στοιχείων που δημιουργήθηκαν.....	99
Εικόνα 7.5 Ποιοτικά χαρακτηριστικά του πλέγματος που δημιουργήθηκε.....	99
Εικόνα 7.6 Τελική εικόνα της βαθυμετρίας της περιοχής.....	100
Εικόνα 7.7 Τελική εικόνα στην οποία αποτυπώνεται ο τύπος όλων των ορίων με διαφορετικό χρώμα κόκκινο για το open boundary conditions with prescribed U , V (466), καφέ για τα closed boundaries (walls) (222).....	100
Εικόνα 7.8 Προστατευόμενη περιοχή NATURA2000 Εθνικό Θαλάσσιο Πάρκο Ζακύνθου- Διακρίνεται το σημείο διαρροής πετρελαίου.....	101
Εικόνα 7.9 Τυπικό πλοίο ανεφοδιασμού καυσίμων (bunkering ship).....	101
Εικόνα 7.10 Χάρτης πυκνότητας κίνησης σκαφών στην ευρύτερη περιοχή της Ζακύνθου.....	102
Εικόνα 7.11 Ορισμός διεύθυνσης ανέμου.....	103
Εικόνα 7.12 Υδροδυναμικό πεδίο MEDSLIK τη στιγμή της διαρροής.....	108
Εικόνα 7.13 Υδροδυναμικό πεδίο TELEMAC2D 13 ώρες μετά τη διαρροή.....	108
Εικόνα 7.14 Τροχιά της πετρελαιοκηλίδας τις χρονικές στιγμές 0, 9 και 15 ώρες μετά τη διαρροή (MEDSLIK).....	109
Εικόνα 7.15 Τροχιά της πετρελαιοκηλίδας 4,9 και 15 ώρες μετά τη διαρροή (TELEMAC2D).....	109
Εικόνα 7.16 Υδροδυναμικό πεδίο αριστερά για το TELEMAC2D και δεξιά για το MEDSLIK (εστίαση στην περιοχή που το πετρέλαιο συναντά την ακτή).....	109
Εικόνα 7.17 Συνολική μετατόπιση πετρελαιοκηλίδας 48 ώρες μετά τη διαρροή (υπέρθυση των στιγμιότυπων ανά 3 ώρες) (MEDSLIK).....	110
Εικόνα 7.18 Συνολική μετατόπιση πετρελαιοκηλίδας 48 ώρες μετά τη διαρροή (TELEMAC2D)....	110
Εικόνα 7.19 Το τμήμα της ακτής που έχει προσβληθεί από το πετρέλαιο (κόκκινη γραμμή) (MEDSLIK).....	112
Εικόνα 7.20 Το τμήμα της ακτής που έχει προσβληθεί από το πετρέλαιο (κόκκινη γραμμή) (TELEMAC2D).....	112
Εικόνα 7.21 Πετρέλαιο στην ακτή 15 και 48 ώρες μετά τη διαρροή (MEDSLIK).....	113
Εικόνα 7.22 Συνολική πορεία πετρελαίου 15 και 48 ώρες μετά τη διαρροή (TELEMAC2D).....	113
Εικόνα 7.23 Σύγκριση μέγιστου πλάτους πετρελαιοκηλίδας (αριστερά MEDSLIK-δεξιά TELEMAC2D).....	113

Εικόνα 7.24 Εξέλιξη της συγκέντρωσης του component 1 σε kg/m^3 ανά 8 ώρες, ξεκινώντας 8 ώρες μετά τη διαρροή (8,16,24,32,40 και 48 ώρες μετά τη διαρροή) 114

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Περιστατικά πετρελαιοκηλίδας >700 τόνων ανάλογα με την τρέχουσα λειτουργική κατάσταση του πλοίου και την κύρια αιτία της 1970-2018	28
Πίνακας 2 Μεγαλύτερα ναυτικά ατυχήματα διαρροής πετρελαίου από το 1967	28
Πίνακας 3 Οι μεγαλύτερες πετρελαιοκηλίδες στην Ελλάδα τα τελευταία 40 χρόνια	29
Πίνακας 4 Περιστατικά με τη μεγαλύτερη διαρροή πετρελαίου στη θάλασσα παγκοσμίως	35
Πίνακας 5 Κατηγοριοποίηση τύπων πετρελαίου με βάση τον αριθμό API	75
Πίνακας 6 Στοιχεία Διαρροής και Υπολογισμών στο MEDSLIK	83
Πίνακας 7 Σύγκριση των διεργασιών που λαμβάνονται υπόψη στα δύο μοντέλα.....	91
Πίνακας 8 Δυνατότητα αποθήκευσης πετρελαίου στην ακτή.....	97
Πίνακας 9 Ιδιότητες πετρελαίου που χρησιμοποιήθηκε.....	101
Πίνακας 10 Στοιχεία για τον υπολογισμό στο TELEMAC2D	102
Πίνακας 11 Συγκριτικός πίνακας παρουσίασης δεδομένων εισόδου στα δύο μοντέλα	107
Πίνακας 12 Συγκεντρωτική σύγκριση των διεργασιών που λαμβάνονται υπόψη στα δύο μοντέλα	115

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1 Μεταβολή της μάζας του πετρελαίου συναρτήσει του χρόνου στο μοντέλο του OSCAR	89
Διάγραμμα 2 Μεταβολή της μάζας του πετρελαίου συναρτήσει του χρόνου στο μοντέλο του MEDSLIK	89
Διάγραμμα 3 Mass Balance (MEDSLIK)	111
Διάγραμμα 4 Mass Balance TELEMAC2D.....	111

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι αδειοδοτήσεις για έρευνα και εκμετάλλευση των υποθαλάσσιων υδρογονανθράκων προχωρούν σε όλο και περισσότερες περιοχές στην Ελλάδα (Ιόνιο, Πατραϊκός Κόλπος, Δυτικά της Κρήτης). Αυτό συνεπάγεται, στο άμεσο μέλλον, αύξηση του κινδύνου πρόκλησης ατυχήματος διαρροής πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον και για αυτόν ακριβώς το λόγο είναι επιτακτική η δημιουργία στρατηγικών σχεδίων αντιμετώπισης τέτοιων ατυχημάτων τόσο σε επίπεδο πρόληψης όσο και σε επίπεδο έγκαιρης απόκρισης. Μοντέλα συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδας έχουν αναπτυχθεί για να συμβάλλουν στην κατεύθυνση της πρόβλεψης της τροχιάς και της εξέλιξης της, δηλαδή της χρονικής μεταβολής των ιδιοτήτων της που αποτελεί βασικό στοιχείο για την αντιμετώπιση της. Στην παρούσα εργασία συγκρίνονται τρία μοντέλα συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδας (εμπορικά και open-source) (OSCAR, MEDSLIK, TELEMAC2D -oilspill) σε διαφορετικές εφαρμογές. Αρχικά στον Πατραϊκό Κόλπο με σύγκριση OSCAR-MEDSLIK σε σενάριο διαρροής λόγω άντλησης πετρελαίου και στη συνέχεια στην περιοχή νότια της Ζακύνθου σε σενάριο διαρροής λόγω ναυτικού ατυχήματος. Τα μοντέλα MEDSLIK και OSCAR, στην συγκεκριμένη εφαρμογή που εξετάστηκε, μπορούν εξίσου ικανοποιητικά να περιγράψουν την εξέλιξη και συμπεριφορά της πετρελαιοκηλίδας όσον αφορά την τροχιά, το χρόνο και τη θέση που θα καταλήξει το πετρέλαιο στην ακτή. Το TELEMAC2D παρουσιάζει σοβαρές αδυναμίες στην ορθή περιγραφή του φαινομένου συγκριτικά με το MEDSLIK, αλλά και δυσκολίες στη χρήση του, παρόλα αυτά προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά τη μετατόπιση της πετρελαιοκηλίδας χρονικά.

EXTENDED ABSTRACT

1. INTRODUCTION

Oil spill formation affect both the natural environment and human activity (economic, social, recreational) that develops in open and coastal waters. Recently, permits for research and exploitation of undersea hydrocarbons have been increasingly available in Greece (Ionian, Patraikos Gulf, West Crete). This implies, in the near future, an increased risk of causing an oil spill accident in the marine environment and it is for this reason that it is imperative to create strategic plans to deal with such accidents at both a preventive and early response level. Accidents can be caused by various factors and at different stages of the process of researching and exploiting the underwater hydrocarbon deposits.

- In the process of researching or exploiting drilling (on the oil rig, on the drilling rig)
- During the process of transshipment of oil to and from its storage tanks
- Due to a maritime accident involving one or more ships
- Due to war operations with drilling or oil tankers

For this reason, oil spill behavior models have been developed to help predict the trajectory and its evolution, that is, the temporal variation of its properties which is a key element in dealing with such incidents.

This paper compares three oil spill behavior models (commercial and open source) (OSCAR, MEDSLIK, TELEMAC2D-oilspill) in different applications. First in the Gulf of Patras by comparing OSCAR-MEDSLIK to a scenario of oil spill and then to the south of Zakynthos in a scenario of a marine accident. The selection of the above models as well as the specific areas of application is done in order to better compare them and draw conclusions about their potential for a more accurate description of the phenomenon.

For the application and comparison of the OSCAR and MEDSLIK models, the Gulf of Patras area is selected as it is an area of increased interest in research and exploitation of proven oil fields. Also, since OSCAR is a commercial program, it is only possible to compare it with existing simulation results made by MAKATONIS.

For the application and comparison of the TELEMAC2D-Oilspill and MEDSLIK results, an application area should be selected for which a qualitative hydrodynamic model could be built on which to base the oil spill behavior model. The formation of a qualitative hydrodynamic field in the Gulf of Patras was not possible during the postgraduate work, so the thought of comparing all 3 oil spill behavior models simultaneously was abandoned. For this reason, a different, simplified case was sought that could serve as a model for the application of this model, for which the creation of the hydrodynamic field would be easier, the computational time reduced and would be within the wider study area. This area is Laganas Bay in Zakynthos and the selection criteria of the area were its geometry, with the gulf coastline and the two small islands within it as well as the existence of the protected area of Zakynthos National Marine Park which makes the area particularly sensitive.

2. COMPARISON BETWEEN OSCAR AND MEDSLIK (APPLICATION IN THE GULF OF PATRAS)

2.1 MEDSLIK 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.

2.2 MEDSLIK OIL SPILL MODEL

In order to be able to compare the two models, the input data entered in MESLIK should be as similar as possible to those entered in OSCAR for the particular leakage scenario under consideration. The leak date was set 20/11/2015 at 15:00 hrs Greece (13:00 UTC) with a duration of 5 days until 25/11/2015 15:00 hrs Greece (13:00 UTC).

The simulation duration is 10 days in total. The oil leakage rate is 10000m³ / day with a total leakage of 50,000m³ / day. The location of the leak is the point C in the Gulf of Patras, as shown in the figure 2-1 with coordinates (Lat: 38.10, Long: 28.05). While the type of oil used is Oseberg Blend [a low viscosity (5 cP at 40 C), light paraffinic oil with API equal to 37.2 and specific gravity equal to 0.839.]

The wind is variable in time and constant throughout the field as only in this form is introduced into the model, while the point chosen to derive its values is the point of leakage. As for currents, they are variable in time but constant in space throughout the field, again with reference point the point of leakage. Finally, the anemological and hydrodynamic data were entered in a MEDSLIK 3-hour time step.



Figure 2-1 The point of leakage and the study area as presented in MEDLSIK

Date start oil leakage	20 November 2015
Time start oil leakage	15:00 (13:00 UTC)
Time start of model	15:00 (13:00 UTC)
Duration of model simulation (hours)	237
Time step of calculations	30min
Name of oil spill	Patraikos
Oil type	Generic Type : API: 37.2
Quantity of oil spill (cubic meters)	50.000
Oil spill location	Lat 38.10 , Long 21.05
Date finish oil leakage	25 November 2015
Time finish oil leakage	15:00
Number of particles	10000
Wind factor	0.031
Diffusion factor (cm ² /s)	20.000

Figure 2-2 Elements of leakage and calculations in MEDSLIK

2.3 RESULTS COMPARISON BETWEEN OSCAR AND MEDSLIK

The qualitative comparison is made on the following axes:

- When does the oil reach the shore and in what area?
- In what part of the coastline does the oil spread?
- What track does the oil spill follow?
- How does the oil spill evolve over time, that is, at each time point, what are the properties of the oil?

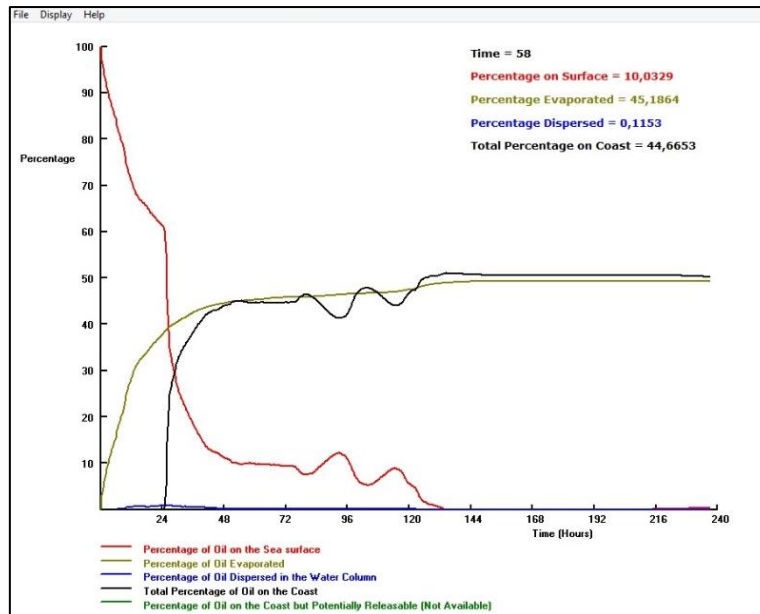


Figure 2-3 The percentage of oil on the surface, evaporated, dispersed and the percentage that has reached the shore

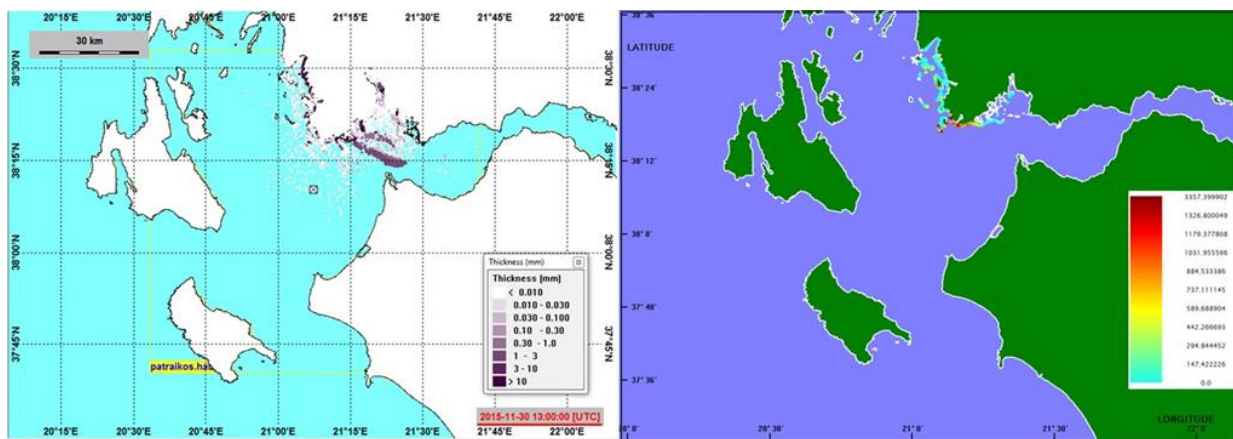


Figure 2-4 Time of oil arrival on shore approximately 24 hours after the leak (21/11/2015 15:00)

The results of the two models for the first three questions posed are almost completely identical, which are essential for timely treatment of the oil spill by developing an appropriate response plan. Arrival of oil in both models approximately 24 hours after the leak (figure 2-4), similar in trajectory as shown in the figures 2-5 and 2-6 but also in the same area where the oil was spread throughout.

Subsequently, the two models for mass balance differ in both the quantities and the information on the results of the simulated processes (figures 2-7 and 2-8). MEDSLIK does not take into account processes such as sedimentation, biodegradation and dissolution. They also have a major difference in the surface oil and the oil that ends up on the shore. While the maximum amount of oil on the surface in MEDSLIK is observed 24 hours after the leak (5000 tons), at OSCAR the corresponding maximum is 114 hours after the leak was initiated (19000 tons). This is mainly due to the difference between the two models in the corresponding amount that ends up on the shore (1/10 at OSCAR, 1/2 at MEDSLIK). This large discrepancy between the oil on the shore and the oil on the sea surface may be due to:

- the type of shore that is defined in each model, OSCAR is defined as shingle, while in MEDSLIK it is defined as sandy (by default)
- the density of the mesh used in both models

Whereas in terms of the amount of evaporation the two models show less variation as they reach their maximum value, at MEDSLIK about 1/2 of the total quantity (21000 tonnes), while at OSCAR about 2/5 (16000 tonnes) the same timing (120 hours after the leak).

Final conclusions from comparing OSCAR and MEDSLIK models

1. The two models have a similar identity in describing the development and behavior of an oil spill in terms of its trajectory, the time and position that the oil will end up on the coastline.
2. OSCAR excels in the quality characteristics of oil spill evolution and aging, both because it takes into account a large number of processes that MEDSLIK ignores and because it enables coupling with models describing various environmental impact indicators.
3. A major disadvantage is the fact that MEDSLIK is only supported by older software (windows XP and earlier)
4. However, MEDSLIK as a free distributed model (version used) is sufficient to describe the phenomenon, compared to OSCAR, in the key aspects that are qualitatively compared above.

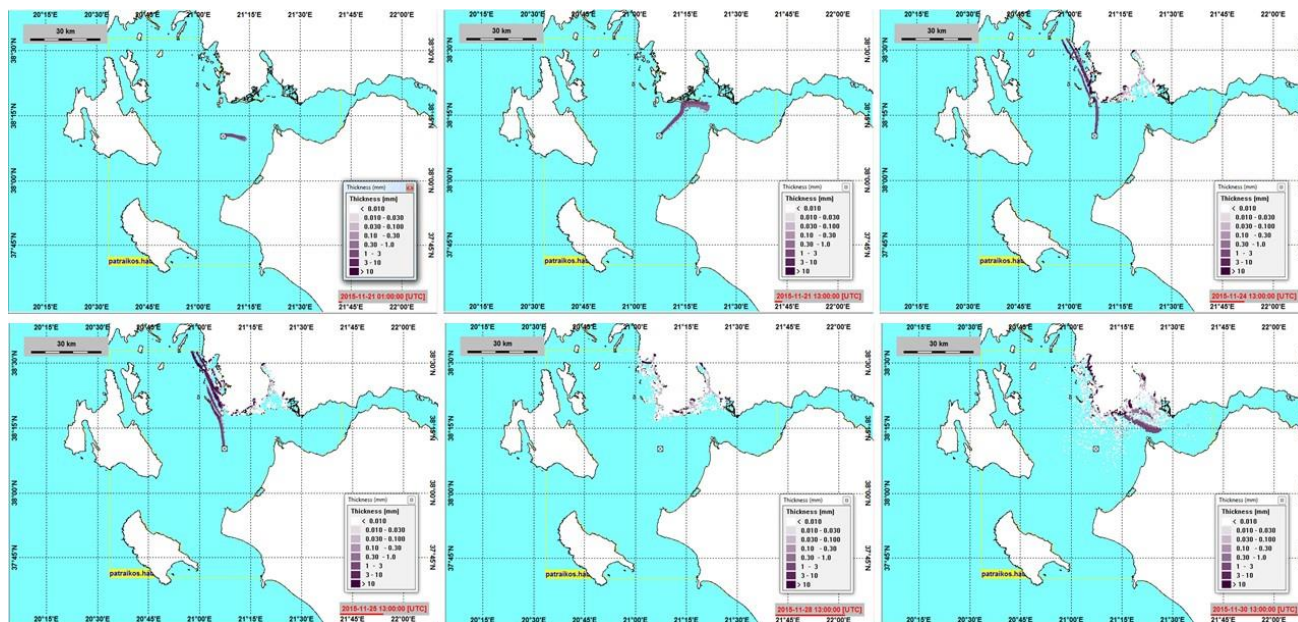


Figure 2-5 Indicative snapshots describing the oil spill track according to OSCAR results

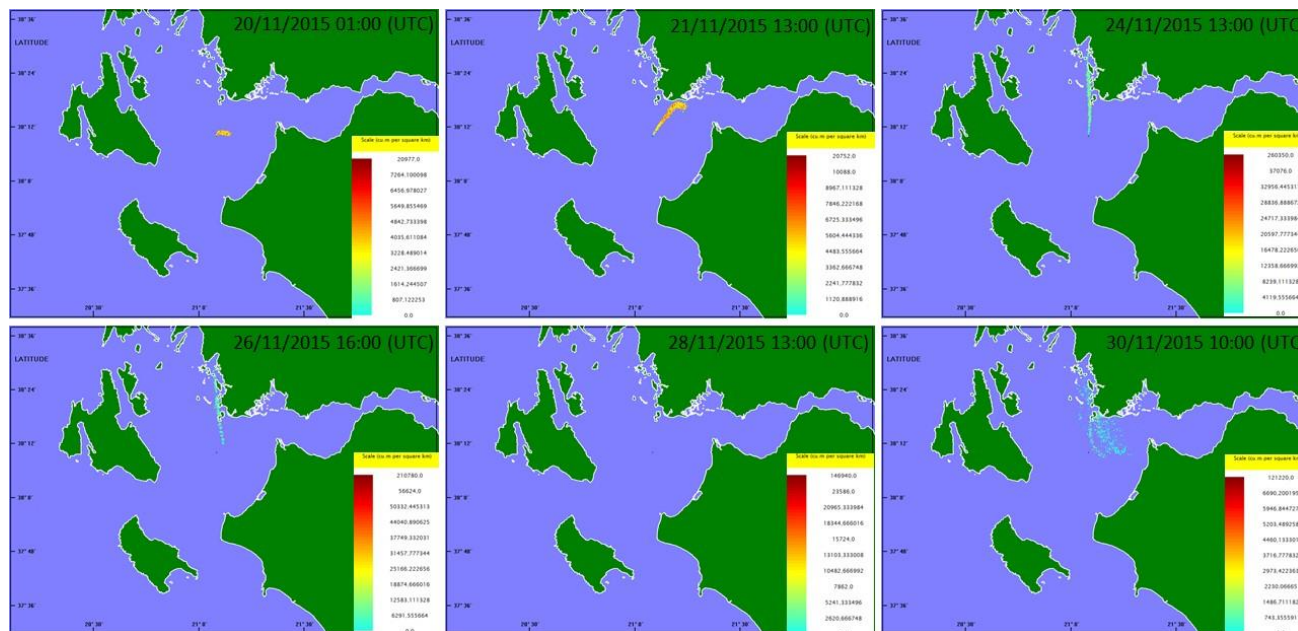


Figure 2-6 Indicative snapshots describing the oil spill track according to MEDSLIK results

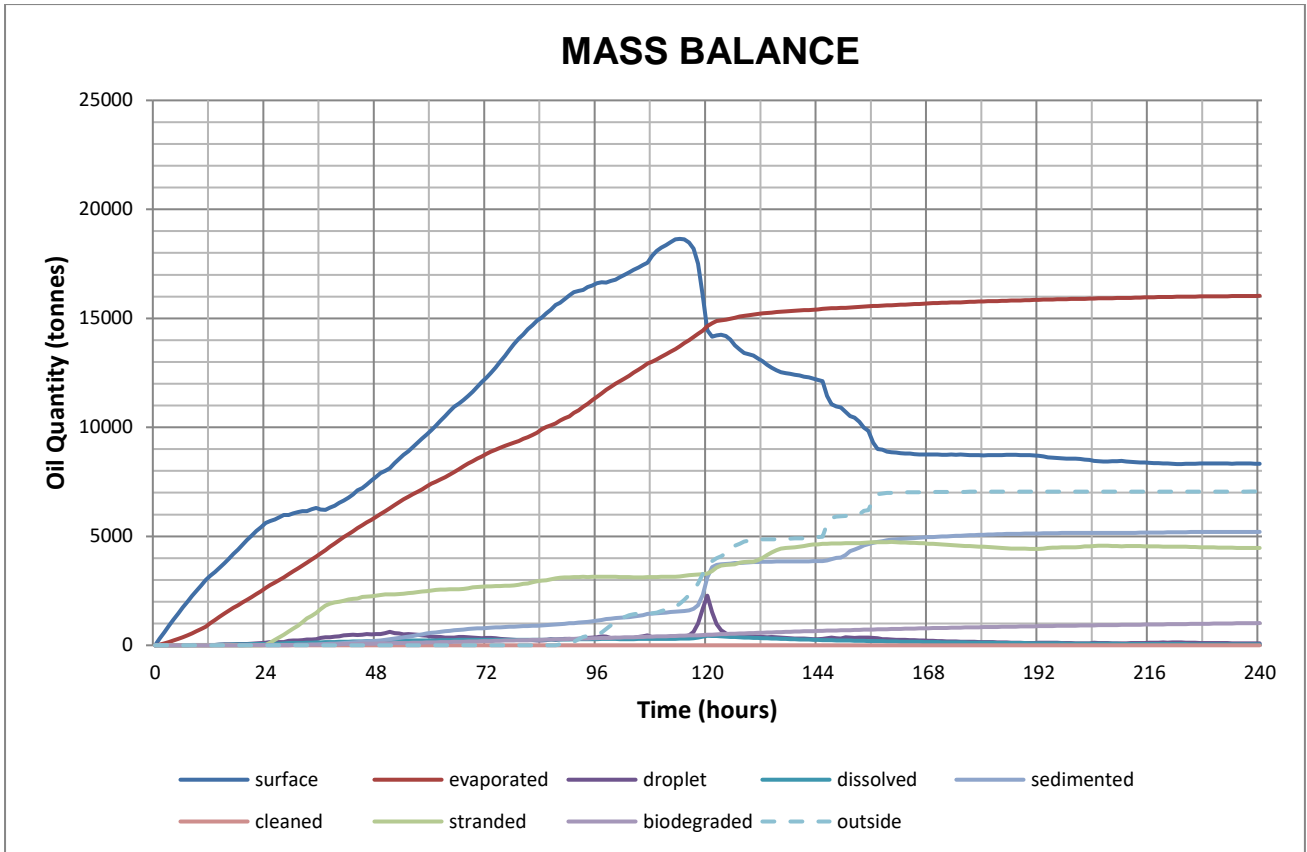


Figure 2-7 Oil mass change over time in OSCAR model

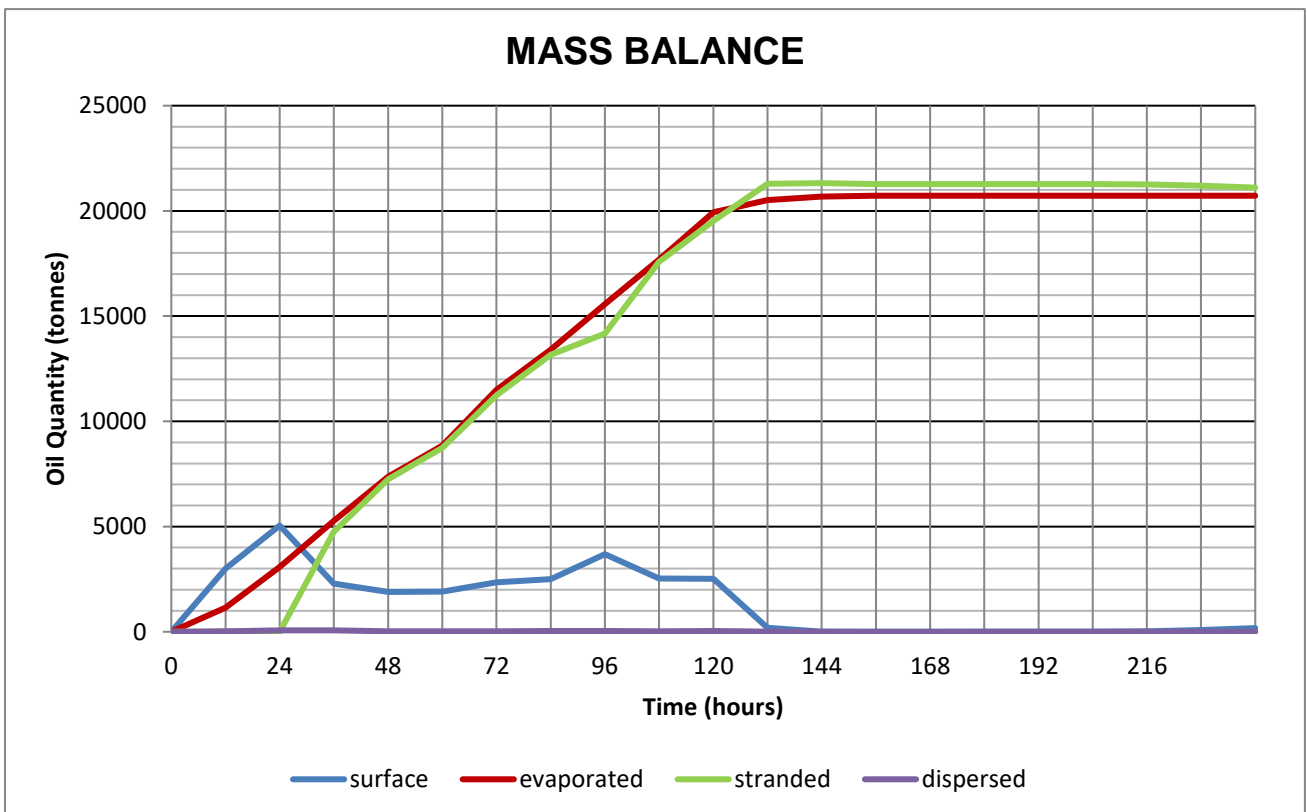


Figure 2-8 Oil mass change over time in the MEDSLIK model

3. COMPARISON BETWEEN OSCAR AND MEDSLIK (APPLICATION IN THE GULF OF PATRAS)

3.1 TELEM2D (OIL SPILL MODEL)

The Telemac-2D model is part of the Open-Telemac Mascaret software package and developed by the Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE), part of the R&D group of Electricité de France. Its basic function is to solve depth-averaged surface flow equations as first formulated by St.Venant in 1871 and their results at each point of the grid are the depth and velocity components in function over time.

Oil spill simulation is a relatively new feature that has been added to TELEMAC-2D and is based on the work of Goeury (Cédric Goeury Engineer-Researcher, 2014) In particular, a Lagrangian / Eulerian oil spill model has been incorporated into the TELEMAC system. A Lagrangian approach was used to predict the transport of oil spill to the sea surface and an Eulerian approach to simulate water quality, which must be coupled to the hydrodynamic model. This model aims to simulate the processes of horizontal advection, turbulent diffusion, evaporation, volatilization and dissolution.

3.2 INPUT DATA

The scenario of the leak is as follows: a marine accident occurs at a distance of 12.5 km or 6.75 nm southeast of Zakynthos, off the National Marine Park (Figure 3-1) resulting in an instantaneous leakage of 500 tonnes of heavy-duty fuel from a bunkering ship. The data entry and selection of the parameters of each model can be seen below (Figure 3-2).

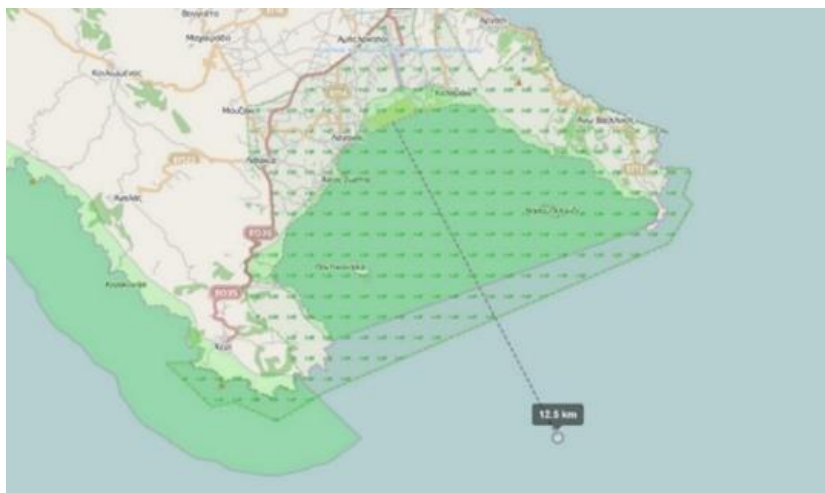


Figure 3-1 Protected area NATURA2000 National Maritime Park of Zakynthos- The point of the leakage is shown

	MEDSLIK	TELEM2D
Duration of leakage	Instant	
Accident location	12.5 km S. Lagana Coast Lat 37.38 Long 20.57	
Duration of oil spill simulation	48 hours	
Hydrodynamic field	Constant in space- Variable in time current	Based in boundary conditions / Variable in time and space
Wind field	Constant in space-Variable in time	
Oil (Quantity and type)	500 tonnes/ API 16 (heavy oil fuel)	500 tonnes /Fuel Oil #5 (heavy oil fuel)
Timestep/ Display timestep	30 mins/ 3 hours	1 sec/ 1 min
Number of particles	10000	500

Figure 3-2 A comparison between the input data of the two models

To form the hydrodynamic model of the application area, the finite element grid was created in the BLUE KENUE graphical environment. The mandatory files for TELEMAC are:

- Geometry File
- Boundary Conditions File

Visualized through the BLUE KENUE software as follows:

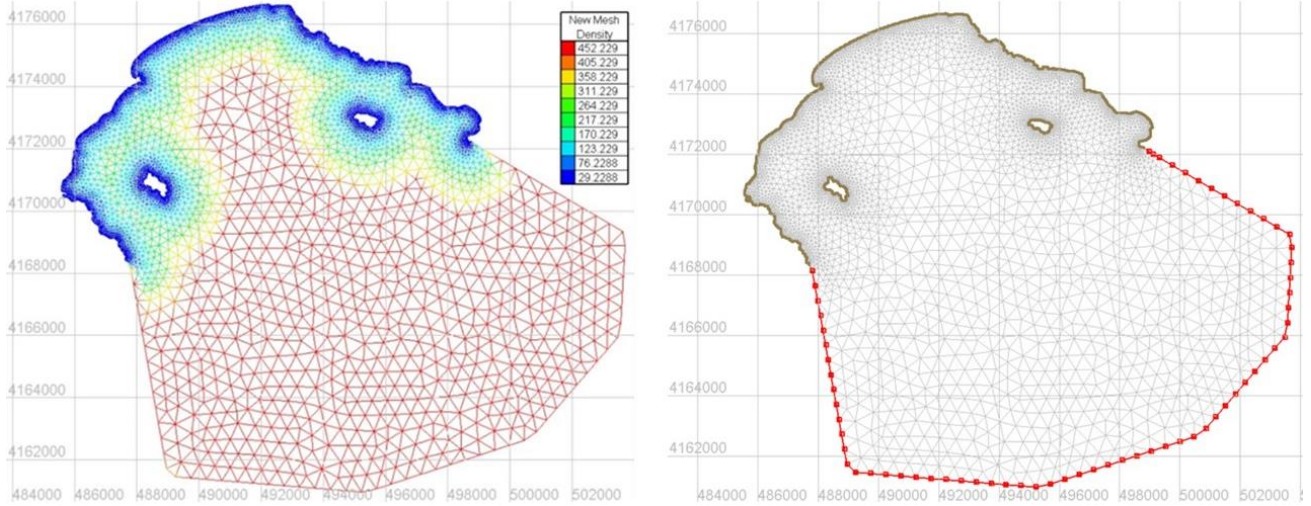


Figure 3-3 (Left) The final grid, the color represents the size of the triangular elements created (Right) Final image depicting the type of all boundaries in different colors, red for open boundary conditions with prescribed U, V, brown for closed boundaries (walls)

3.3 RESULTS COMPARISON BETWEEN OSCAR AND MEDSLIK

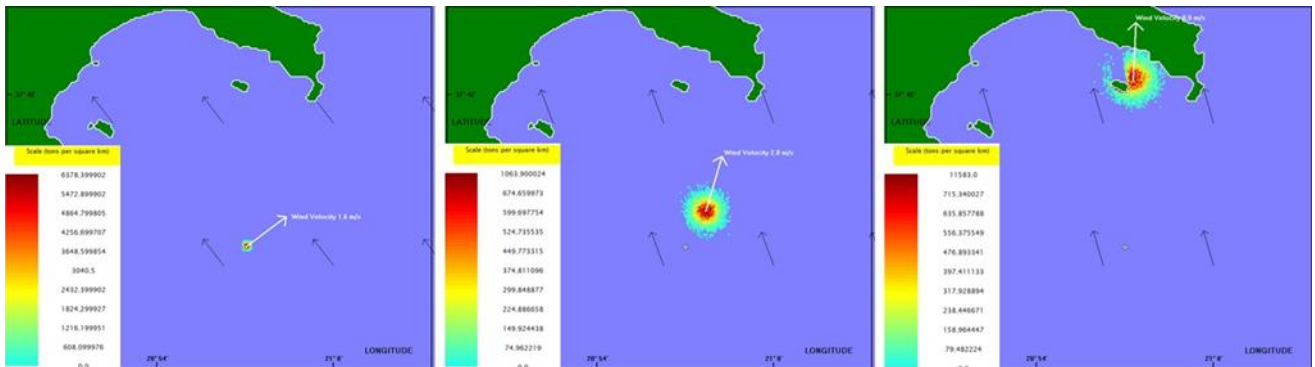


Figure 3-4 Oil spill track at times 0, 9 and 15 hours after the leak (MEDSLIK)



Figure 3-5 Oil spill track 4, 9 and 15 hours after the leak (TELEMAC2D)

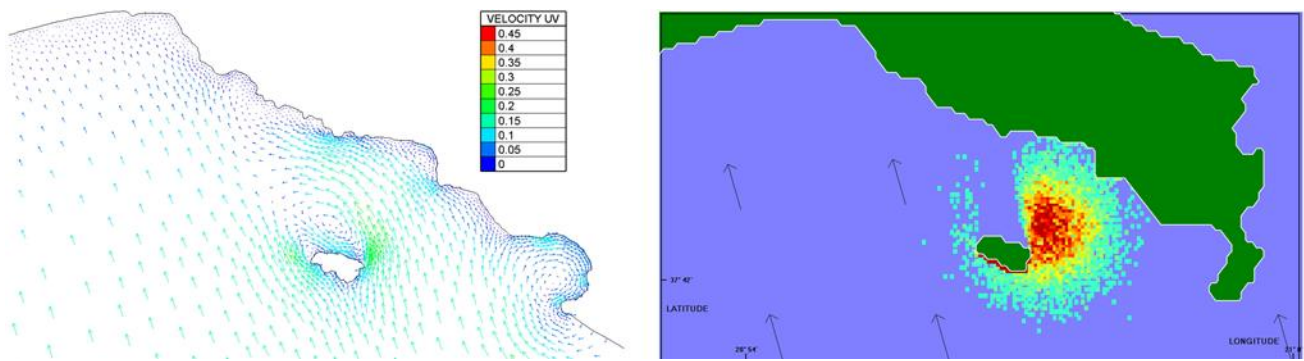


Figure 3-6 (Left) Hydrodynamic field for TELEMAC2D (Right) for MEDSLIK (focus on the area where oil meets the coast)

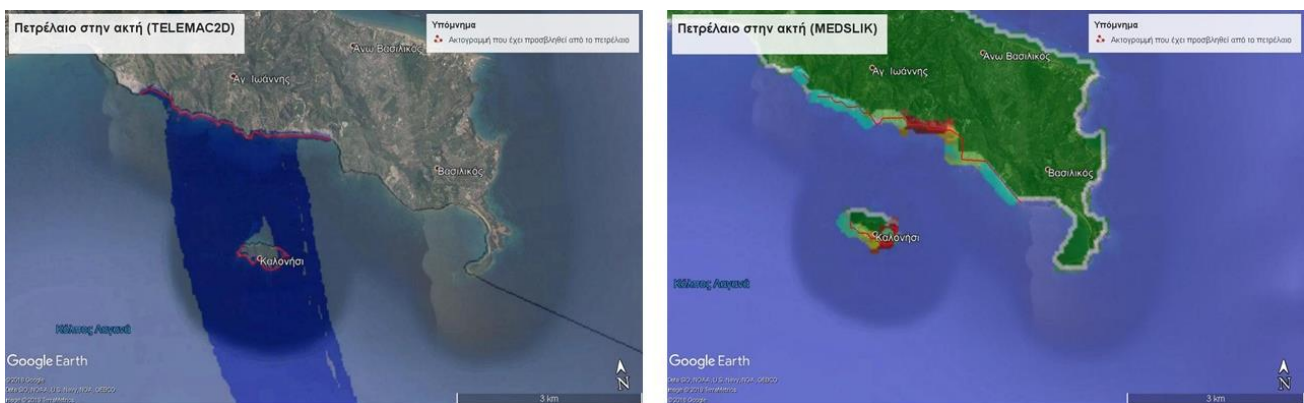


Figure 3-7 The oil-affected part of the coast (Left-TELEMAC2D, Right-MEDSLIK)

Conclusions on the use of the TELEMAC2D (oilspill) model for simulating oil spill behavior

The module OIL_FLOT.f (oilspill) embedded in the TELEMAC2D hydrodynamic model presents specific weaknesses in both its application and the results it can deliver. Analytically:

1. It offers satisfactory results, compared to MEDSLIK, in terms of overall oil displacement and oil spill displacement (similar time of oil arrival on shore) (figures 3-4 and 3-5)
2. It has the advantage over MEDSLIK that it can simulate the dissolution process of the individual oil components and record their concentration and evolution, which is extremely useful for studying the water quality characteristics (figure 3-8)
3. It is based on the TELEMAC2D hydrodynamic model that runs simultaneously and does not use current data that can be extracted from any available database. Therefore, its use requires a reliable and qualitative traffic model developed in TELEMAC2D (such as in figure 3-6 (Left)), resulting in both time-consuming field creation and increased computational time.
4. A continuous oil spill cannot be simulated without the intervention and modification of the code, only instant, in that it implies the ability to simulate leakage incidents.
5. There is a serious weakness in this application regarding the subroutine that controls the oil contact with the shore (subroutine oil_beaching) and the corresponding percentage of oil is not recorded. This is also the case with the application used to document the work (Cédric Goeury Engineer-Researcher, 2014) -Girondine Estuary, so there is a possibility that this part of the code may need improvement.
6. Also difficult is the configuration of the file with the characteristics of the oil (oil spill steering file) as it is not easy to obtain the data required for each soluble and insoluble component of a particular type of oil, free from the internet.

Overall it is considered that the oil spill behavior model OIL FLOT.f (oilspill) can be improved, so it is recommended that its further development be focused on the following:

- Ability to simulate continuous oil spill
- Creation of a database of representative oil types with a description of the properties of their components
- Correction and improvement of subroutine that takes into account the oil's contact with the coastline
- Ability to visualize the evolution of the oil spill at any time chosen by the user

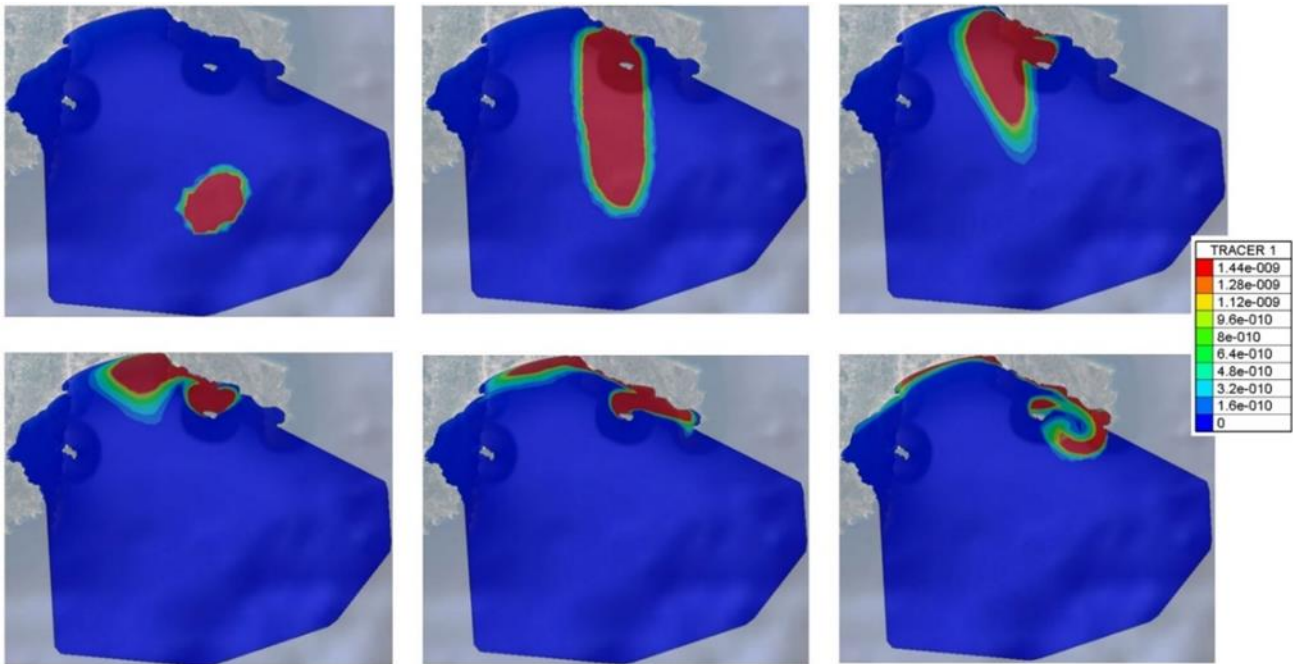


Figure 3-8 Evolution of component 1 concentration in kg / m³ every 8 hours, starting 8 hours after the leak (8,16,24,32,40 and 48 hours after the leak)

4. FINAL CONCLUSIONS

Initially, a comparison was made between the commercial model of the oil spill behavior OSCAR (based on his work (Panagiotis Makatounis, Jorgen Skancke, Evanthia Florou, Anastasios Stamou, Per Johan Brandnvik, 2017)) and the MEDSLIK model in the Gulf of Patras. An attempt was then made to simulate an oil leak accident using the open-source model TELEMAC2D and in particular the OIL_FLOT.f (oilspill) subroutine in a simple case (Laganas Bay, Zakynthos) and compare it with MEDSLIK. The conclusions from the model comparisons are given above, followed by the general conclusions regarding the use of the 3 models in the preceding applications:

1. The two OSCAR and MEDSLIK models can equally well describe the development and behavior of an oil spill in terms of its trajectory, the time and location of the oil on the coastline
2. OSCAR excels at quality characteristics of oil spill evolution and aging, both because it takes into account a large number of processes that MEDSLIK ignores and because it enables coupling with models describing various environmental impact indicators
3. The subroutine that simulates the behavior of the oil spill in TELEMAC2D, presents both difficulty in use and inability to properly describe the phenomenon, always compared to MEDSLIK. The difficulty in using it is that a quality hydrodynamic model of the area of interest created in TELEMAC2D is needed, as well as in other aspects related to the available oil data etc. Therefore, it is necessary to consider the suggestions in section 3.2 for improvement, in order to provide results that can be further exploited
4. It offers satisfactory results compared to MEDSLIK in terms of overall oil displacement and oil spill displacement. It also can take into account the process of dissolving the individual components of the oil and to record their concentration and evolution, which is extremely useful in studying the water quality characteristics. Finally, it has the potential to be coupled with the TOMAWAC wave model to take into account the interaction of currents and waves
5. Due to the use of the hydrodynamic field created through TELEMAC2D, the computational time is extremely increased both for its configuration and during the simulation. Of course, the use of this hydrodynamic field gives much more realistic results near the coast
6. The optimal model selection depends on the availability of resources by the user and the needs of each application. Obviously, the best option is the OSCAR commercial model and then MEDSLIK (though it has the disadvantage of running on old systems). Finally, with several improvements that need to be made to make it sufficient, TELEMAC2D can be applied mainly in cases involving the prediction of oil spill behavior and not during its development as it requires increased computational time.

	OSCAR	MEDSLIK	TELEMAC2D (OIL_FLOT.f)
Open Source Code			✓
Free Distributed		✓	✓
Advection	✓	✓	✓
Diffusion	✓	✓	✓
Wind Drift	✓	✓	✓
Stokes Drift	✓		✓
Backtracking		✓	
Beaching	✓	✓	✓
Spreading	✓	✓	✓
Evaporation	✓	✓	✓
Emulsification	✓	✓	
Natural Dispersion	✓	✓	
Vertical Movement	✓	✓	
Dissolution	✓		✓
Sedimentation	✓		
Biodegradation	✓		
Volatilization			✓

Figure 4-1 Comparison of the processes considered in the three models

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η εργασία αυτή εκπονείται σε μια περίοδο η οποία είναι πλούσια σε εξελίξεις όσον αφορά τη δυνατότητα εκμετάλλευσης των υποθαλάσσιων υδρογονανθράκων (πετρέλαιο, φυσικό αέριο) στην Ελλάδα. Το ενδιαφέρον τεράστιων μονοπωλιακών ομίλων στο συγκεκριμένο τομέα ενισχύεται από τις ερευνητικές δραστηριότητες των τελευταίων χρόνων που έδειξαν μεγάλα αποθέματα πετρελαίου και φυσικού αερίου, ενδεικτικά, Πατραϊκός Κόλπος, Ιόνιο και Δυτικά της Κρήτης. Η αντίστοιχη πρωτοβουλία από το ελληνικό κράτος να προχωρήσει σε ορισμό συγκεκριμένων οικοπέδων έρευνας και εκμετάλλευσης στις παραπάνω περιοχές δείχνει ότι η πιθανότητα μέσα στα επόμενα χρόνια να αρχίσει για τα καλά η άντληση υδρογονανθράκων, πρέπει πλέον να λαμβάνεται ως βεβαιότητα.

Για τον σκοπό αυτό είναι απαραίτητο να ληφθούν όλα εκείνα τα απαραίτητα μέτρα προκειμένου αυτή η εκμετάλλευση να γίνει με τη μέγιστη δυνατή προστασία του περιβάλλοντος, ιδιαίτερα στις περιοχές που θα επηρεαστούν από την παραπάνω εξέλιξη. Για την προστασία των ακτών και των υδάτων εξαιτίας της ρύπανσης που μπορεί να προκληθεί από πετρέλαιο είναι απαραίτητη η κατάστρωση ενός σχεδίου πρόληψης ατυχημάτων διαρροής και ενός χάρτη με ζώνες επικινδυνότητας σε περιοχές που κινδυνεύουν από ατυχήματα. Για να γίνουν τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι είναι απαραίτητη η γνώση της συμπεριφοράς του πετρελαίου εντός των υδάτων ή να μπορεί να προβλεφθεί με μεγάλη ακρίβεια. Για την όσο το δυνατόν ευρύτερη προστασία του θαλάσσιου και παράκτιου περιβάλλοντος, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα πρόβλεψης – εκτίμησης της συμπεριφοράς του πετρελαίου εντός του θαλασσίου περιβάλλοντος ύστερα από ένα ατύχημα διαρροής πετρελαίου. Στον όρο συμπεριφορά συμπεριλαμβάνονται και τα δύο επίπεδα τα οποία επηρεάζουν τις συνέπειες ενός ατυχήματος πετρελαίου, δηλαδή συμπεριλαμβάνεται τόσο η μετακίνηση – τροχιά του πετρελαίου όσο και η σύσταση του πετρελαίου όσον αφορά την αποσύνθεσή του λόγω των διάφορων χημικών, φυσικών και μηχανικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην περίπτωση διαρροής πετρελαίου στη θάλασσα σε συγκεκριμένο χρόνο. Οι προβλέψεις αυτές γίνονται μέσω μεθόδων που αναπτύχθηκαν από την επεξεργασία και μελέτη μεγάλου αριθμού πειραμάτων, ύστερα από χρόνια παρατηρήσεων από βάσεις δεδομένων προγενέστερων ατυχημάτων κι ύστερα από εκτεταμένες αριθμητικές προσομοιώσεις που πέρασαν από αλληπάλληλες διαδικασίες βελτιστοποίησης.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία γίνεται σύγκριση του εμπορικού μοντέλου συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδας OSCAR – Oil Spill Contingency and Response της εταιρείας SINTEF και του μοντέλου MEDSLIK το οποίο έχει αναπτυχθεί και εξελίσσεται από ιταλικά, ελληνικά και κυπριακά πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα. Η περιοχή εφαρμογής των μοντέλων είναι ο Πατραϊκός κόλπος.

Επίσης διερευνάται, μέσω ενός open-source λογισμικού ευρείας εφαρμογής σε υδροδυναμικά προβλήματα, η δυνατότητα να γίνει πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πετρελαιοκηλίδας. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται αποτελείται από το μοντέλο TELEMAC-2D που ανήκει στο open TELEMAC-MASCARET suite [EDF R&D's Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE)]. Το γραφικό περιβάλλον που χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση των δεδομένων εισαγωγής, των πλεγμάτων αλλά και της ανάλυσης και οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων είναι το BLUE KENUE™ [NATIONAL RESEARCH COUNCIL of CANADA]. Η περιοχή μελέτης που εφαρμόζεται το παραπάνω λογισμικό είναι ο κόλπος του Λαγανά στη Ζάκυνθο. Στο τέλος γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του TELEMAC2D με τα αποτελέσματα του MEDSLIK στην παραπάνω περιοχή καθώς και προτάσεις για την περεταίρω βελτίωσή του.

1.2 ΠΡΩΤΟΤΥΠΑ ΣΗΜΕΙΑ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει πρωτοτυπία στα εξής σημεία:

1. Συγκρίνεται ένα δωρεάν διαθέσιμο μοντέλο, το MEDSLIK (η έκδοση που χρησιμοποιείται) με ένα εμπορικό πρόγραμμα, το OSCAR όσον αφορά την περιγραφή της συμπεριφοράς και εξέλιξης της πετρελαιοκηλίδας.
2. Συγκρίνεται, επίσης, ένα μοντέλο περιγραφής συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδας με ένα υδροδυναμικό μοντέλο open-source, όπως το TELEMAC το οποίο απέκτησε πρόσφατα (2014) τη δυνατότητα προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδας. Η σύγκριση πραγματοποιείται σε ένα απλοποιημένο πρόβλημα και εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την ικανότητα του να περιγράψει επαρκώς το φαινόμενο που εξετάζεται

1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει 8 Κεφάλαια καθώς και Παράρτημα χωρισμένο σε 2 ενότητες, στη συνέχεια γίνεται παράθεση των αντικειμένων που εξετάζονται σε κάθε Κεφάλαιο.

Στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στο αντικείμενο της εργασίας καθώς και στα πρωτότυπα σημεία που αυτή πραγματεύεται.

Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η σημασία του πετρελαίου στην σημερινή οικονομική δραστηριότητα ως βασική πηγή ενέργειας και τα αντίστοιχα δίκτυα μεταφοράς του. Ενώ στη συνέχεια γίνεται αναφορά στη σημερινή και μελλοντική κατάσταση εκμετάλλευσης υποθαλάσσιων υδρογονανθράκων στην Ελλάδα. Παρακάτω, παρατίθενται τα αίτια δημιουργίας πετρελαιοκηλίδων τόσο λόγω ναυτικών ατυχημάτων όσο και λόγω άλλων αιτιών, καθώς γίνεται αναφορά και στις πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου. Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των τρόπων αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων τόσο στο θαλάσσιο περιβάλλον όσο και στην ακτή.

Στο 3^ο Κεφάλαιο περιγράφεται η συμπεριφορά της πετρελαιοκηλίδας στη θάλασσα στις διεργασίες στις οποίες υπόκειται το πετρέλαιο καθώς και στις επιπτώσεις που μπορεί να έχει μια διαρροή πετρελαίου στο θαλάσσιο και παράκτιο περιβάλλον.

Στο 4^ο Κεφάλαιο γίνεται μια ολοκληρωμένη περιγραφή της περιοχής μελέτης βασισμένη στην υπάρχουσα Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων που έχει ήδη εκπονηθεί για την εκμετάλλευση των κοιτασμάτων της περιοχής, συνοδευόμενη από κάποια συμπεράσματα που κατέληξε η μελέτη,

Στο 5^ο Κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη περιγραφή του μοντέλου πετρελαιοκηλίδας OSCAR καθώς και της εφαρμογής του στο συγκεκριμένο σενάριο για το οποίο θα γίνει η σύγκριση στη συνέχεια.

Στο 6^ο Κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του μοντέλου πετρελαιοκηλίδας MEDSLIK τόσο των διεργασιών που αυτό προσομοιώνει όσο και της μορφής των αποτελεσμάτων που αυτό επιστρέφει στο χρήστη. Στο ίδιο κεφάλαιο, προβάλλεται η εφαρμογή του μοντέλου στο συγκεκριμένο σενάριο καθώς και τα αποτελέσματα του. Τέλος γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής των δύο μοντέλων OSCAR και MEDSLIK με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων.

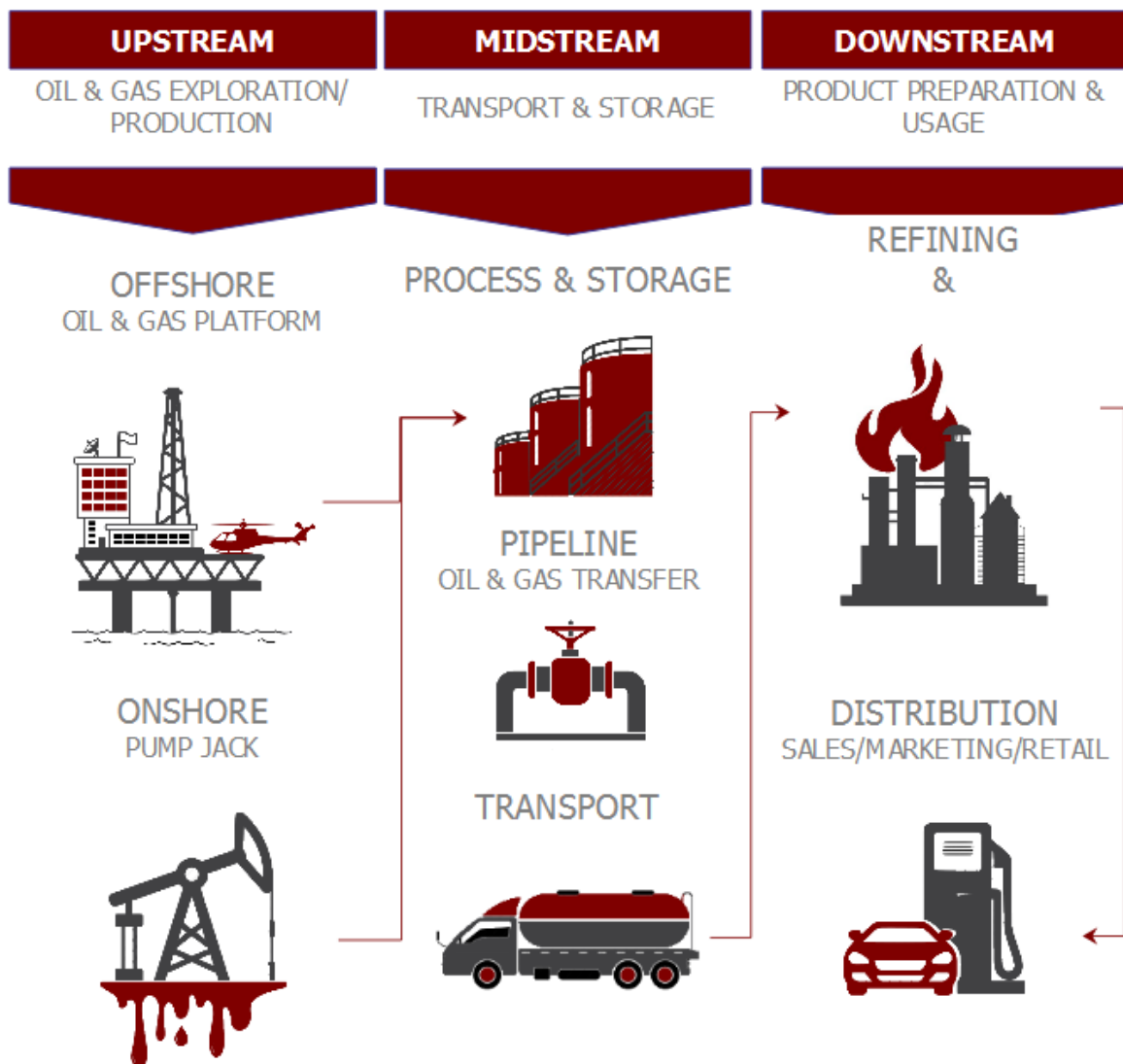
Στο 7^ο Κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή του μοντέλου υδροδυναμικής συμπεριφοράς TELEMAC2D καθώς και του μοντέλου εξέλιξης της πετρελαιοκηλίδας OIL_FLOT.f (oilspill). Ενώ στη συνέχεια γίνεται περιγραφή της εφαρμογής του μοντέλου στην περιοχή μελέτης καθώς και στοιχείων που αφορούν τη διαμόρφωση του πλέγματος, την εισαγωγή των οριακών συνθηκών και άλλων δεδομένων. Τέλος γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων TELEMAC2D και MEDSLIK για το συγκεκριμένο σενάριο με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στο 8^ο Κεφάλαιο εξάγονται τα γενικά συμπεράσματα σχετικά με τα τρία μοντέλα (OSCAR, MEDSLIK, TELEMAC2D) που χρησιμοποιήθηκαν στις εφαρμογές.

2. ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΩΝ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η πραγματοποίηση της εκμετάλλευσης των υποθαλάσσιων υδρογονανθράκων, πετρελαίου και φυσικού αερίου έχουν ως προϋπόθεση την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος εξόρυξης, μεταφοράς, επεξεργασίας και διανομής του παραγόμενου εμπορεύματος. Ένα τέτοιο ολοκληρωμένο σύστημα δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, στο οποίο διακρίνονται και τα τρία στάδια της διαδικασίας το πρώτο (upstream) το οποίο αφορά την εξόρυξη και την μεταφορά του μέσω δεξαμενόπλοιων (tankers) στις δεξαμενές αποθήκευσης (midstream) και στη συνέχεια τη διύλιση του στα διυλιστήρια και την τελική προώθηση του προϊόντος στην αγορά (downstream). (Wikipedia Petroleum Industry, 2019)



Εικόνα 2.1 Δομή της πετρελαϊκής βιομηχανίας

Η ανάπτυξη ενός τέτοιου δικτύου έχει ως συνέπεια την δημιουργία πιέσεων στο περιβάλλον και ειδικότερα στην περιοχή ενδιαφέροντος μας, δηλαδή στο θαλάσσιο και παράκτιο χώρο.

Το Σύνταγμα της Ελλάδας κατοχυρώνει ότι η προστασία του φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος αποτελεί υποχρέωση του κράτους. Σύμφωνα με το νόμο 1650/1986 (Για την προστασία του περιβάλλοντος (ΦΕΚ 160/A/16-10-86), 1986) μεταξύ άλλων προσβολών, δίνεται ο ορισμός της ρύπανσης :

«Με την έννοια «ρύπανση», εννοούμε την παρουσία στο περιβάλλον ρύπων (δηλαδή κάθε είδους ουσίας, θορύβου, ακτινοβολίας ή άλλων μορφών ενέργειας) σε τέτοια ποσότητα, συγκέντρωση ή διάρκεια που μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία, στους ζωντανούς οργανισμούς και στα οικοσυστήματα, ή υλικές ζημιές και γενικά να καταστήσουν το περιβάλλον ακατάλληλο για τις επιθυμητές χρήσεις του»

Η έννοια της θαλάσσιας ρύπανσης καθιερώθηκε για πρώτη φορά από τη Διακήρυξη της Στοκχόλμης το 1972 (Διακήρυξη για τη Σχέση του Ανθρώπου με το Φυσικό Περιβάλλον και την Προστασία, 1972). Ορίστηκε ως «η εισαγωγή από τον άνθρωπο, άμεσα ή έμμεσα, επιβλαβών ουσιών ή ενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένης και της εκβολής των ποταμών, που έχει ως αποτέλεσμα τη διαταραχή του θαλάσσιου οικοσυστήματος, κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία, παρεμπόδιση των θαλασσίων δραστηριοτήτων καθώς και ελάττωση των ανέσεων».

Υπάρχει συστηματική μελέτη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής («Impact assessment – Annex I accompanying the document 'Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on safety of offshore oil and gas prospection, exploration and production activities»), που βασίζεται στην βάση δεδομένων SINTEF (Offshore Blowout Database). Το συμπέρασμα αυτής της μελέτης είναι πως η πιθανότητα πρόκλησης πετρελαιοκηλίδων σε Ευρωπαϊκά ύδατα, κατά τα στάδια γεωτρήσεων, είναι της τάξης του 65% τον χρόνο. (European Commission, 2011)

Το συμπέρασμα που προκύπτει από τα παραπάνω στοιχεία, είναι ότι τα ατυχήματα είναι σύνηθες φαινόμενο ακόμα και σε ανεπτυγμένες χώρες με πολύ πιο ολοκληρωμένο και αυστηρό θεσμικό πλαίσιο από αυτό της Ελλάδας. Για την ακρίβεια, δεν είναι υπερβολή να πούμε ότι τα ατυχήματα είναι ουσιαστικά, αναπόσπαστο κομμάτι του επιχειρηματικού πλάνου μιας εταιρείας. Πολύ περισσότερο, όταν μιλάμε για εξορύξεις σε βάθος πολλών εκατοντάδων ή και χιλιάδων μέτρων, όπως στις περιπτώσεις των «οικοπέδων» της Κρήτης και του Ιονίου, όπου το ρίσκο πολλαπλασιάζεται.

Η ρύπανση από πετρέλαιο και άλλα υποπροϊόντα του είναι ίσως η πιο διαδεδομένη περίπτωση ρύπανσης θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Υπάρχουν έξι κύριες πηγές ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος (Αλεξόπουλος, 2005):

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

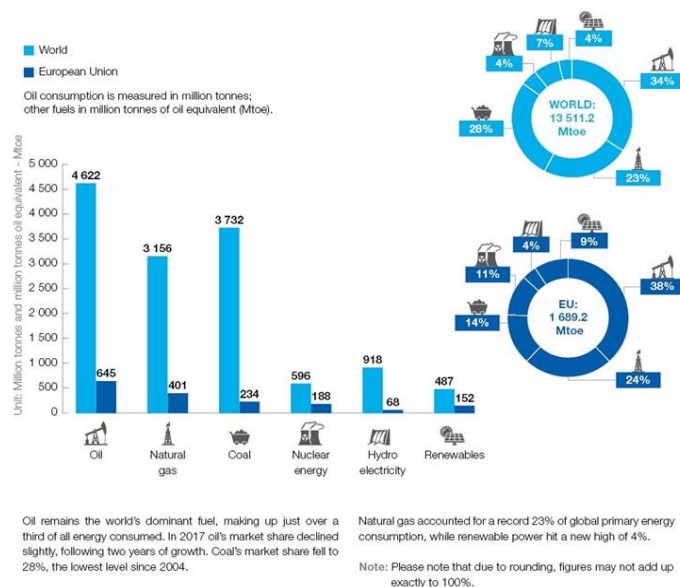
Πιο συγκεκριμένα, στην έκθεση που δημοσίευσε το Εθνικό Ερευνητικό Συμβούλιο (NRC) της Αμερικάνικης Εθνικής Ακαδημίας Επιστημών, ο μέσος όρος των συνολικών διαρροών πετρελαίου παγκοσμίως, από όλες τις γνωστές πηγές, στη θάλασσα εκτιμήθηκε περίπου στο 1.3 εκατομμύρια τόνους. Σύμφωνα με την παραπάνω έκθεση οι κατηγορίες των πηγών που συμβάλλουν στο παραπάνω συνολικό ποσό των διαρροών είναι οι εξής:

- από φυσικές πηγές (εννοούνται οι υποθαλάσσιες πηγές που αναβλύζουν αργό πετρέλαιο κατ' αντιστοιχία με τις πηγές νερού στην στεριά): 46%
- από απορρίψεις από την κατανάλωση πετρελαίου (λειτουργικές απορρίψεις από πλοία και απορρίψεις από χερσαίες πηγές) 37%
- από ατυχήματα με διαρροή πετρελαίου από πλοία 12%
- από την εξόρυξη πετρελαίου: 3%

Το πετρέλαιο πλέον ως η κύρια πηγή ενέργειας που τροφοδοτεί την παγκόσμια οικονομία αλλά και το φυσικό αέριο αποτελούν ρυθμιστικό παράγοντα της ισχύος κάθε χώρας τόσο για την ενεργειακή της αυτάρκεια όσο και για την θέση της στον διεθνή ανταγωνισμό. Τα μεγέθη όσον αφορά το παγκόσμιο επίπεδο αλλά και την Ευρωπαϊκή Ένωση παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.2.

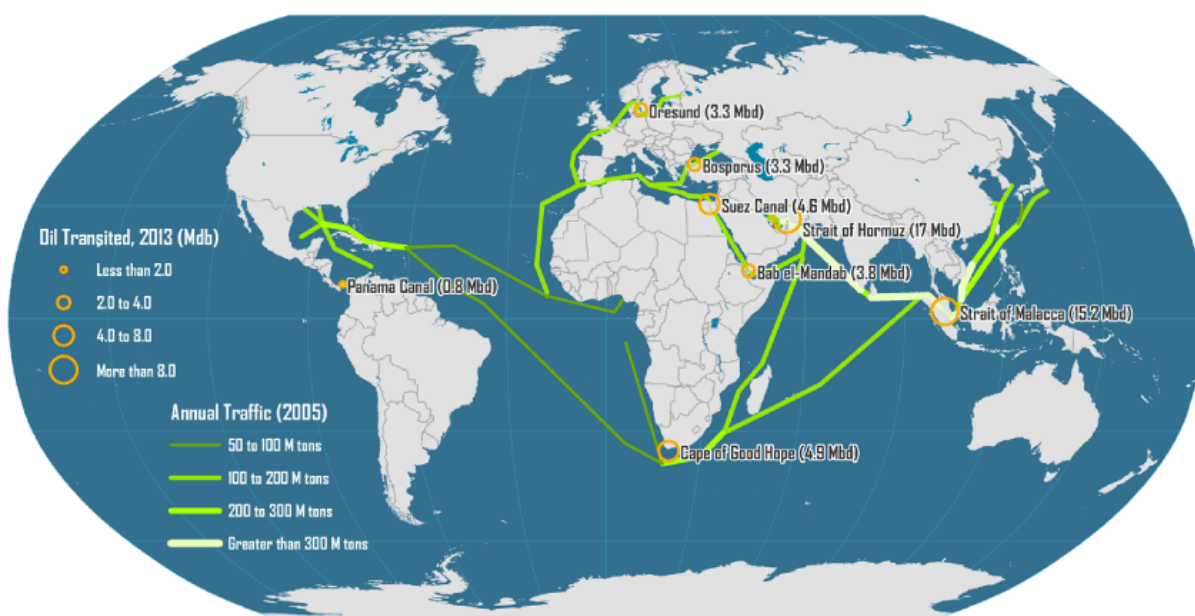
FIG.1 WORLDWIDE ENERGY CONSUMPTION BY FUEL TYPE IN 2017

Source: BP Statistical Review of World Energy 2018

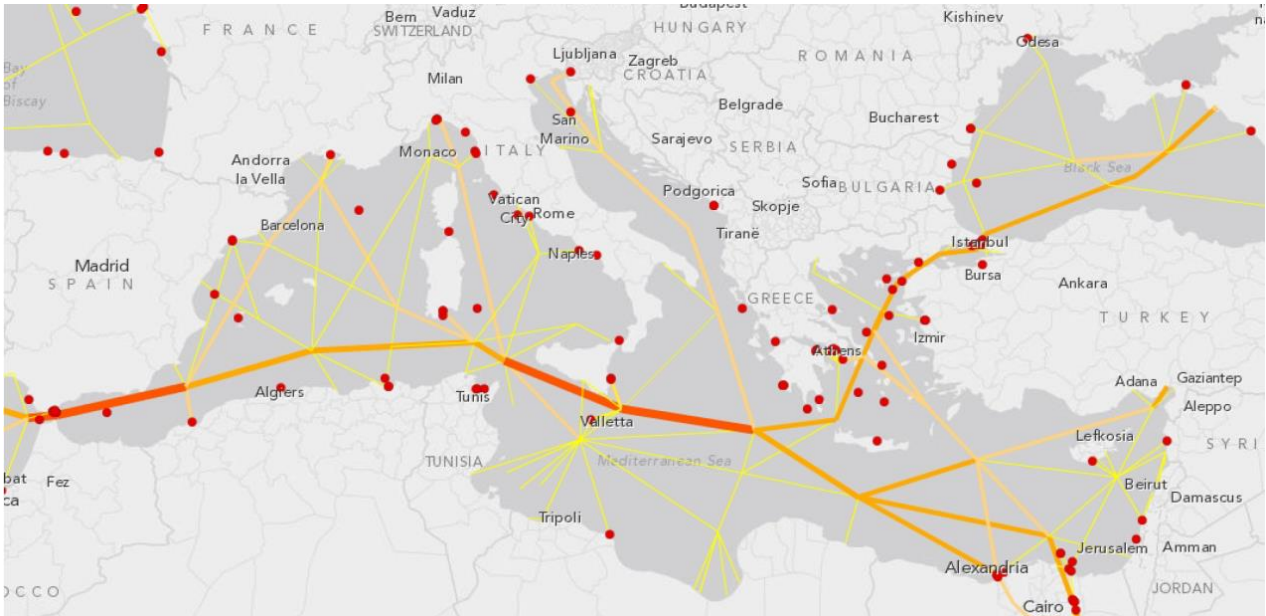


Εικόνα 2.2 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά τύπο καυσίμου το 2017 (British Petroleum (BP), 2018)

Σήμερα ο κυρίαρχος τρόπος μεταφοράς του πετρελαίου είναι μέσω των θαλασσίων μεταφορών, ο οποίος υπερέρχει σημαντικά της μεταφοράς μέσω του δικτύου αγωγών αλλά και μέσω του δικτύου οδικού και σιδηροδρομικού δικτύου. Συγκεκριμένα το 2015, 2.9 δις τόνοι πετρελαίου μεταφέρθηκαν μέσω θαλάσσης, μέγεθος το οποίο αντιστοιχεί στο 62% του συνολικού πετρελαίου που παράχθηκε σε παγκόσμια κλίμακα. Για το υπόλοιπο 38 % χρησιμοποιήθηκαν κυρίως αγωγοί μεταφοράς, τρένα και φορτηγά (Rodriguez, 2017). Η θαλάσσια κυκλοφορία του πετρελαίου ακολουθεί ένα σύνολο από διαδρομές μεταξύ των περιοχών που αυτό εξορύσσεται και των περιοχών που διυλίζεται και καταναλώνεται. Πάνω από 100 εκατομμύρια τόνοι πετρελαίου μεταφέρονται κάθε μέρα από δεξαμενόπλοια (tankers). Σχεδόν το μισό πετρέλαιο φορτώνεται στη Μέση Ανατολή και στη συνέχεια διοχετεύεται στην Ευρώπη, στις ΗΠΑ και στην Ιαπωνία. Μια εικόνα του παραπάνω δικτύου παρουσιάζεται στην συνέχεια (Εικόνα 2.3) στον οποίο απεικονίζονται οι κύριοι δρόμοι μεταφοράς πετρελαίου και τα βασικότερα σημεία transit σε παγκόσμια κλίμακα.



Εικόνα 2.3 Δίκτυο διακίνησης πετρελαίου παγκοσμίως (Rodriguez, 2017)



Εικόνα 2.4 Δίκτυο θαλάσσιας μεταφοράς πετρελαίου και ατυχήματα διαρροής (1974-) (International Tankers Owners Pollution Federation (ITOPF), 2019)

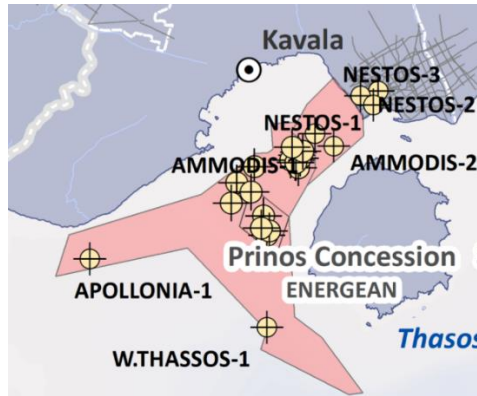
Η Μεσόγειος Θάλασσα συγκεντρώνει τις βασικές διαδρομές για τη μεταφορά αργού πετρελαίου από τις πετρελαιοπηγές της Μέσης Ανατολής και της Βόρειας Αφρικής, αλλά και τα λιμάνια της Μαύρης Θάλασσας προς τα κέντρα κατανάλωσης στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική.

Το γεγονός ότι ο κύριος όγκος μεταφοράς πετρελαίου στην Ευρώπη έχει συγκεντρωθεί στη Μεσόγειο Θάλασσα αυξάνει κατακόρυφα τις πιθανότητες πρόκλησης ατυχημάτων που θα έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πετρελαιοκηλίδας. Ως πετρελαιοκηλίδα ή αλλιώς πετρελαϊκό ρυπαντικό περιστατικό θεωρείται ένα συμβάν ή μια ακολουθία συμβάντων, που έχουν την ίδια αρχή, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε εκροή πετρελαίου στην επιφάνεια της θάλασσας και μπορούν να αποτελέσουν απειλή για το θαλάσσιο και παράκτιο περιβάλλον (Τριανταφύλλου Γ., 2004). Σύμφωνα με στοιχεία του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (ΕΕΑ) καταγράφονται απώλειες της τάξης των 250.000 τόνων πετρελαίου ετησίως λόγω λειτουργικών διαδικασιών των πλοίων. Επιπλέον, τα περιστατικά στους τερματικούς σταθμούς πετρελαίου, όπως είναι τα διυλιστήρια, σε συνδυασμό με τις συνήθεις απορρίψεις από χερσαίες εγκαταστάσεις εκτιμώνται σε 120.000 τόνους ανά έτος, με αποτέλεσμα την αυξημένη συγκέντρωση πετρελαίου στις περιοχές τους.

2.2 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Σήμερα η Ελλάδα βρίσκεται στο επίκεντρο των εξελίξεων στην Ανατολική Μεσόγειο όσον αφορά την δυνατότητα για εκμετάλλευση των υποθαλάσσιων κοιτασμάτων σε πετρέλαιο και φυσικό αέριο που πλέον αποδεδειγμένα διαθέτει αλλά και γιατί αποτελεί γεωγραφικό κόμβο μεταφοράς ενέργειας προς την Ευρώπη.

Αυτήν την στιγμή στην Ελλάδα γίνεται μόνο ερευνητική εργασία και όχι εργασία εξόρυξης, εκτός από τον Πρίνο όπου παράγεται το 1% των αναγκών της χώρας καθημερινά (2500 βαρέλια). Υπάρχουν περιοχές όπως δυτικά και νότια της Κρήτης αλλά και στο Νότιο Ιόνιο όπου η πιθανότητα ύπαρξης μεγάλων τελικά κοιτασμάτων, ιδιαίτερα φυσικού αερίου, είναι μεγάλη, για τον λόγο αυτό μεγάλες εταιρείες έχουν παρουσιάσει ενδιαφέρον να εμπλακούν. Η εμφάνιση σημαντικών γεωτρήσεων για εκμεταλλεύσιμες παραγωγές και εξορύξεις τοποθετείται σε πέντε περίπου χρόνια από σήμερα, ενώ οι παραχωρήσεις που έχουν γίνει μέχρι σήμερα ανέρχονται σε 13. Οι κύριοι λόγοι για τους οποίους υπάρχει τόσο μεγάλο ενδιαφέρον είναι οι πολλές ανακαλύψεις κοιτασμάτων φυσικού αερίου στην ευρύτερη περιοχή, το νέο γεωλογικό μοντέλο από το 2015 στη Μεσόγειο (κοιτάσματα σε ανθρακικά πετρώματα), η προοδευτική βελτίωση των γεωτρήσεων σε βαθιά και υπερβαθέ ύδατα (πάνω από 3.000 μέτρα) αλλά και η εξέλιξη της τεχνολογίας. (Ελληνική Διαχειριστική Εταιρεία Υδρογονανθράκων (ΕΔΕΥ), 2019)



Εικόνα 2.5 Παραγωγή πετρελαίου στον Πρίνο στην Καβάλα (Ελληνική Διαχειριστική Εταιρεία Υδρογονανθράκων (ΕΔΕΥ), 2019)

Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα στοιχεία που παρουσίασε η διοίκηση της Energean Oil & Gas τον Δεκέμβριο του 2016, η παραγωγή στον Πρίνο αυξήθηκε σε 5.000 βαρέλια την ημέρα. Η εταιρεία συνεχίζει το επενδυτικό της πρόγραμμα με την ανάπτυξη νέων πηγαδιών. Τα πρόσφατα δεδομένα οδηγούν την Energean σε εκτίμηση αποθεμάτων περίπου 40 εκατομμύριων βαρελιών, σε σχέση με προηγούμενες εκτιμήσεις που υπολόγιζαν τα αποθέματα να είναι έως 30 εκατομμύρια. Το 2007 τα πιστοποιημένα αποθέματα πετρελαίου ήταν μόλις 2 εκατομμύρια βαρέλια. Η Energean έχει υποβάλει τα δεδομένα σε ανεξάρτητο διεθνή εμπειρογνώμονα για την πιστοποίηση αυτής της αύξησης. Η επεξεργασία και ερμηνεία των σεισμικών δεδομένων που αποκτήθηκαν το 2015 συνέβαλε στη βελτίωση των εκτιμήσεων για το πεδίο Έψιλον. Ως μέρος της παραχώρησης του Πρίνου, η περιοχή αρχικά πιστοποιήθηκε με 15 εκατομμύρια βαρέλια. Τα νέα δεδομένα θα επιτρέψουν την αναθεώρηση του σχεδίου ανάπτυξης για το Έψιλον. Μέσα σε αυτό το έτος, για πρώτη φορά από το 2001, η παραγωγή ξεπέρασε το 1 εκατομμύριο βαρέλια. (Ελληνική Διαχειριστική Εταιρεία Υδρογονανθράκων (ΕΔΕΥ), 2019)



Εικόνα 2.6 Τα νέα θαλάσσια πεδία ερευνών για πετρέλαιο και φυσικό αέριο στην Ελλάδα (ΒΗΜΑ, 2019)

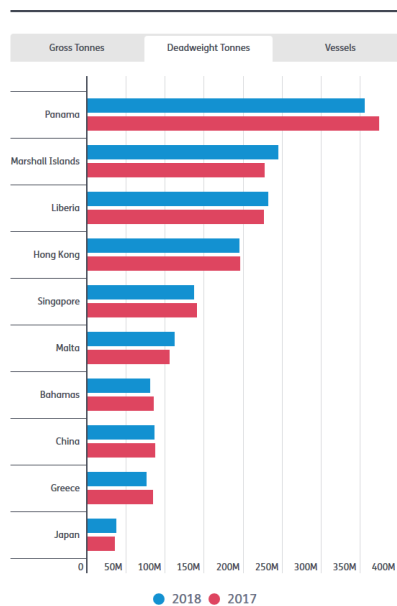
2.3 ΑΙΤΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΩΝ

Με βάση τα στοιχεία που παρουσιάστηκαν προηγουμένως η ρύπανση της θάλασσας από πετρέλαιο μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες την ανθρωπογενή και την φυσική. Για την φυσική δεν μπορούν να γίνουν πολλά πράγματα όσον αφορά τον περιορισμό της, σε αντίθεση με την ρύπανση που οφείλεται στην ανθρωπίνη δραστηριότητα. Κύριες πηγές της ρύπανσης των θαλασσών από τον άνθρωπο είναι οι λειτουργικές διαδικασίες τόσο σε στεριά όσο και σε θάλασσα, τα ναυτικά ατυχήματα αλλά και η εξόρυξη. Το μεγαλύτερο ποσοστό πετρελαιοκηλίδων από πλοία οφείλεται στις λειτουργικές διαδικασίες και όχι στα ναυτικά ατυχήματα. Τα ναυτικά ατυχήματα, ή τα ατυχήματα κατά τη διαδικασία της εξόρυξης (Deepwater Horizon, Κόλπος του Μεξικού) χαρακτηρίζονται από ταυτόχρονη εκροή μεγάλης ποσότητας πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον με αποτέλεσμα την άμεσα ορατή οικολογική καταστροφή. Για τον παραπάνω λόγο τυγχάνουν και μεγαλύτερης προβολής και ευαισθητοποίησης από την πλευρά της κοινής γνώμης σε σχέση με τις καθημερινές λειτουργικές απορρίψεις πετρελαίου που αποτελούν τον κύριο όγκο των διαρροών πετρελαιοειδών στη θάλασσα.

2.3.1 ΡΥΠΑΝΣΗ ΠΟΥ ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΑ ΝΑΥΤΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ

Τα δεξαμενόπλοια (Tankers) παίζουν κυρίαρχο ρόλο στην μεταφορά του πετρελαίου και των πετρελαιοειδών δια θαλάσσης καθώς συμμετέχουν τόσο στη μεταφορά αργού πετρελαίου για διύλιση, όσο και στην μεταφορά των τελικών προϊόντων για ανεφοδιασμό πλοίων κ.α. Λόγω αυτού καθίσταται πιθανό σενάριο η πρόκληση ναυτικού ατυχήματος που μπορεί να έχει επιβλαβείς συνέπειες στα θαλάσσια ύδατα και στην παράκτια περιοχή από όπου γίνεται συχνή διέλευση δεξαμενόπλοιων, μεταφόρτωση πετρελαίου ή άλλες δραστηριότητες που σχετίζονται με συχνή συγκοινωνία μέσω θαλάσσης, όπως τουριστικές περιοχές.

Top 10 Flag States



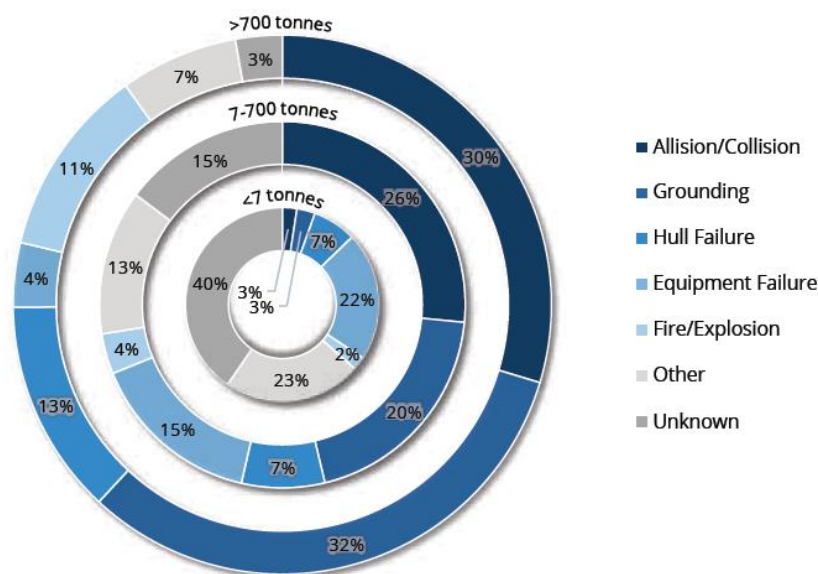
Εικόνα 2.7 Οι 10 χώρες με το μεγαλύτερο στόλο σε dwt με βάση τη σημαία (Lloyd's List, 2018)

Τα ατυχήματα των πλοίων μπορούν να οφείλονται σε παράγοντες του θαλάσσιου περιβάλλοντος, της κατάστασης του πλοίου και στον ανθρώπινο παράγοντα. Ως παράγοντες του θαλάσσιου περιβάλλοντος θεωρούνται οι έντονες καιρικές συνθήκες και η κίνηση των κυμάτων, τα παλιρροϊκά ρεύματα και οι ύφαλοι, ιδιαίτερα κοντά σε ακτές. Η κατάσταση του πλοίου περιλαμβάνει τη συντήρησή του, την ηλικία του και το κατά πόσο πληροί τους κανονισμούς ασφαλείας που επιβάλλει το κράτος του οποίου φέρει τη σημαία. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι ένα μεγάλο ποσοστό του παγκόσμιου στόλου ταξιδεύει με σημαίες ευκαιρίας ορισμένων χωρών, οι οποίες έχουν ελαστικούς κανόνες ασφαλείας και αντίστοιχες προδιαγραφές προστασίας του περιβάλλοντος. Αυτό γίνεται προφανώς για οικονομικούς λόγους καθώς έτσι εξασφαλίζεται η πλέον ευμενέστατη φορολογική μεταχείριση, ευκολότερη δανειοληψία με πλείστες επασφαλίσεις, λιγότερους κινδύνους από

πολεμικές εμπλοκές ή διεθνείς υποχρεώσεις των Χωρών τους, απαλλαγή από κρατικές αναμίξεις στην εκμετάλλευση των πλοίων τους (κάτι τέτοιο δεν συνέβαινε στην Ελλάδα), ελαστικότητα στην έκδοση αποδεικτικών ναυτικής ικανότητας των ναυτικών (πτυχία, διπλώματα) κ.ά. (Wikipedia, Σημαία ευκαιρίας, 2019).

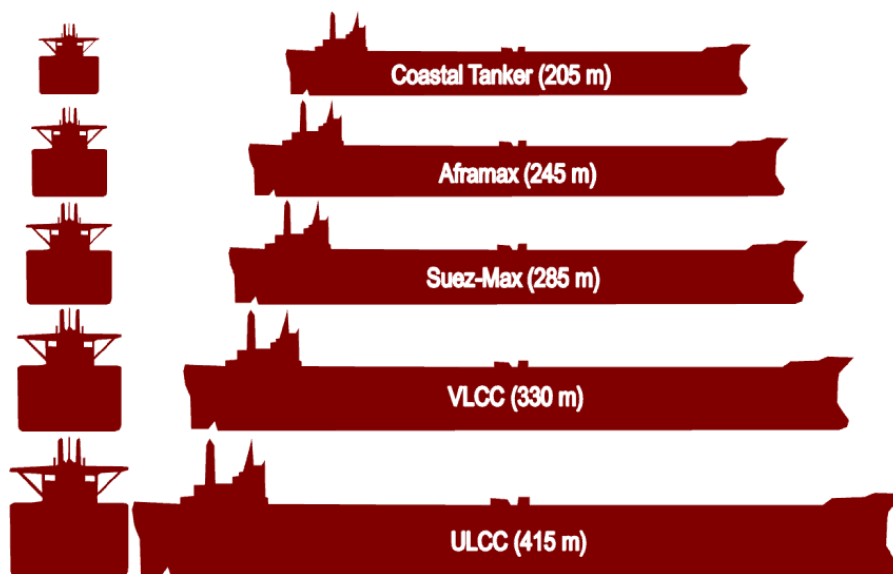
Ο ανθρώπινος παράγοντας περιλαμβάνει τις λανθασμένες ενέργειες και χειρισμούς κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, καθώς και την ελλιπή εκπαίδευση και ομοιογένεια του πληρώματος. Οι βασικότερες κατηγορίες ναυτικών ατυχημάτων που συνήθως οδηγούν στην ρύπανση του θαλάσσιου περιβάλλοντος μπορούν να συνοψιστούν στις εξής (Τριανταφύλλου Γ., 2004)

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



Εικόνα 2.8 Περιστατικά πετρελαιοκηλίδων λόγω ναυτικού ατυχήματος με βάση την αιτία τη χρονική περίοδο 1970-2018 (International Tankers Owners Pollution Federation (ITOPF), 2019)

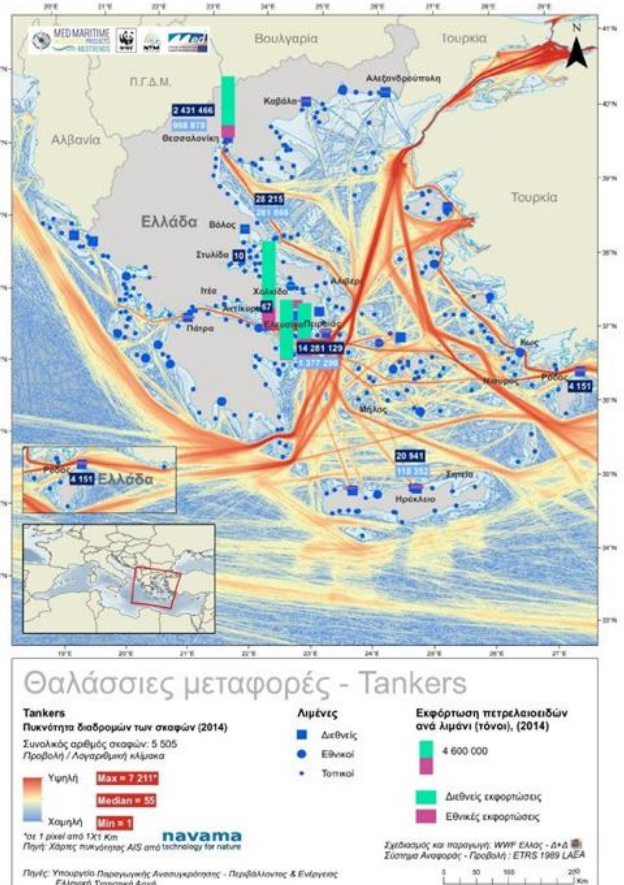
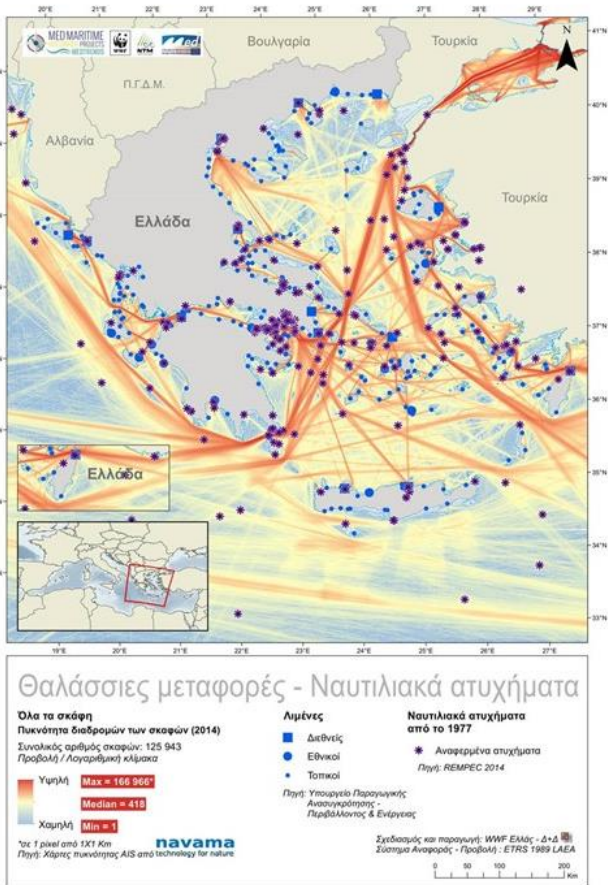
Στη συνέχεια (Εικόνα 2.9) παρουσιάζονται οι βασικοί τύποι δεξαμενόπλοιων:



Εικόνα 2.9 Βασικοί τύποι δεξαμενόπλοιων (tankers) (Rodriguez, 2017)

Η έμφαση που δίνεται στα δεξαμενόπλοια έχει να κάνει με τις τεράστιες ποσότητες πετρελαίου που αυτά μεταφέρουν οπότε ένα πιθανό ατύχημα που συμπεριλαμβάνει δεξαμενόπλοιο θα έχει και μεγαλύτερες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Ωστόσο δεν είναι μόνο τα ατυχήματα δεξαμενόπλοιων που προκαλούν θαλάσσια ρύπανση. Πολλά αλλά είδη πλοίων, όπως πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containers), πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου (bulk carriers) είναι πιθανό να μεταφέρουν μεγαλύτερες ποσότητες πετρελαίου στις αποθήκες καυσίμου σε σχέση με μικρά δεξαμενόπλοια που το μεταφέρουν ως φορτίο. Παρόλο που ατυχήματα και εκλύσεις πετρελαίου (bunker spills) από τέτοιου είδους πλοία είναι σχετικά μικρότερου μεγέθους, τελικά προκαλούν μεγαλύτερα προβλήματα, σε σχέση με ανάλογου μεγέθους πετρελαιοκηλίδων από δεξαμενόπλοια (tankers). Για παράδειγμα ένα ατύχημα σε παράκτια περιοχή έντονης δραστηριότητας όπως λιμάνι ή τουριστικό πόλο, που εμπλέκει πλοίο το οποίο δεν έχει ως φορτίο του το πετρέλαιο θα έχει πολλαπλάσιες συνέπειες από ότι ένα ατύχημα ενός μικρού δεξαμενόπλοιου στα ανοιχτά (βλέπε ναυάγιο του κρουαζιερόπλοιου Sea Diamond στην Σαντορίνη).

Ο κυριότερος παράγοντας, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την πρόκληση των ατυχημάτων στη θάλασσα είναι ο ανθρώπινος παράγοντας. Και αυτό διότι ένα πλοίο που πληροί τις κατάλληλες προϋποθέσεις (τακτικές/έκτακτες συντηρήσεις, επιθεωρήσεις) και διαθέτει σωστά εκπαιδευμένο πλήρωμα, μπορεί να λειτουργήσει εξίσου σαν μια νέα κατασκευή. Βέβαια έχουν παρατηρηθεί και φαινόμενα για ορισμένα πλοία, ιδίως υπό το καθεστώς χρονοναύλωσης, με προφανή σκοπό την εξοικονόμηση χρηματικών ωφελειών, να επιμηκύνεται ο μέγιστος χρόνος ζωής τους, ενώ θα έπρεπε να είχαν ήδη αποσυρθεί, με άμεση συνέπεια τη ρύπανση του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Μελέτες που αξιοποιούν την ελληνική και διεθνή εμπειρία τεκμηριώνουν πως τα υπερήλικα πλοία, τα οποία άλλωστε καταδικάζονται από το κυνήγι του εφοπλιστικού κέρδους σε υποσυντήρηση και «μπαλώματα», είναι υψηλού κινδύνου, ευάλωτα σε όλα τα είδη των ναυτικών ατυχημάτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα των παραπάνω είναι το ατύχημα της Αγίας Ζώνης II (45 ετών) στο Σαρωνικό το 2017 που ανέδειξε με τον πιο αποκαλυπτικό τρόπο συνολικά το υπαρκτό πρόβλημα του γερασμένου στόλου των περίπου 90 δεξαμενόπλοιων ανεφοδιασμού. Επί συνόλου 1.856 πλοίων ελληνικής σημαίας άνω των 100 κόρων ολικής χωρητικότητας (κοχ), εκ των οποίων τα 530 είναι δεξαμενόπλοια, τα 776 πλοία είναι ηλικίας άνω των 30 ετών. Ταξιδεύουν με οργανικές συνθέσεις (αριθμό και διάρθρωση πληρώματος) που δεν καλύπτουν τις πραγματικές ανάγκες για ασφαλή κίνηση του πλοίου και οδηγούν σε αβάσταχτη εντατικοποίηση του πληρώματος. Ο μέσος όρος ηλικίας των ανεφοδιαστικών πλοίων είναι άνω των 40 ετών. Ενδεικτικά αναφέρονται τα πλοία ΚΑΠΕΤΑΝ ΓΙΩΡΓΗΣ, έτος κατασκευής 1964, ΑΓ. ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ 1966, ΝΕΔΑ 1966, ADRIANA 1976. (Γιώργος Μαρίνος, 2017)



Εικόνα 2.10 Συνολικό διακινούμενο υγρό φορτίο και οι θαλάσσιες μετακινήσεις δεξαμενόπλοιων (WWF HELLAS, 2015)

2.3.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΑ ΝΑΥΤΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ-ΙΣΤΟΡΙΚΟ (ΔΙΕΘΝΕΣ ΚΑΙ ΕΓΧΩΡΙΟ)

Τα ναυτικά ατυχήματα μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το αντικείμενο που βρίσκεται κάθε φορά στο επίκεντρο με διαφορετικό τρόπο. Παραπάνω έγινε μια κατηγοριοποίηση των ναυτικών ατυχημάτων με βάση τα αίτια του. Στη συνέχεια γίνεται κατηγοριοποίηση των ατυχημάτων με βάση την ποσότητα πετρελαίου που διέρρευσε στο θαλάσσιο περιβάλλον. Λαμβάνοντας υπόψη αυτό το χαρακτηριστικό σύμφωνα με τον International Tanker Owner Pollution Federation (ITOPF) η κατάταξη έχει ως εξής:

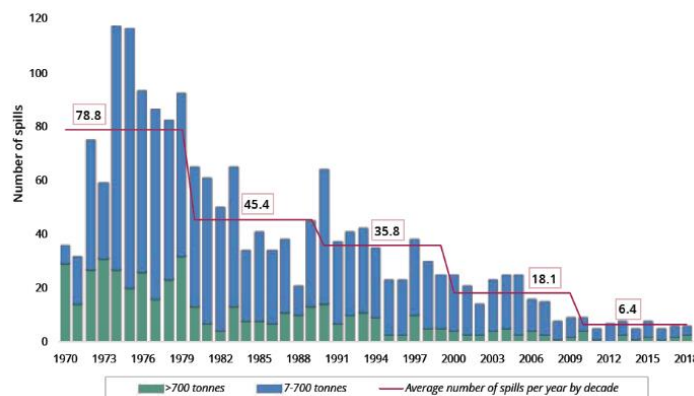
- Μικρού μεγέθους ατυχήματα με διαρροή <7 τόνων
- Μεσαίου μεγέθους ατυχήματα με διαρροή από 7 έως 700 τόνους
- Μεγάλου μεγέθους ατυχήματα με διαρροή > 700 τόνους

Τα δεδομένα για τα ατυχήματα εκτείνονται σε μια περίοδο από το 1970 μέχρι και το 2017 και οι πηγές τους είναι από ειδικές εκδόσεις, από τους πλοιοκτήτες, τις ασφαλιστικές εταιρείες και από την ίδια εμπειρία της ITOPF. Οι συνολικές ποσότητες των διαρροών αφορούν το σύνολο του πετρελαίου που διέρρευσε στο περιβάλλον συμπεριλαμβανομένου αυτού που μπορεί να κάηκε και αυτού που παρέμεινε στα αμπάρια του βυθισμένου πλοίου.



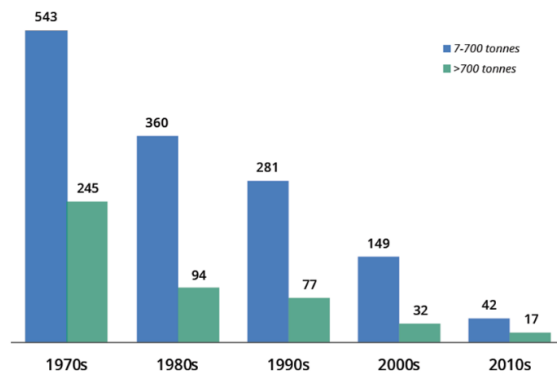
Εικόνα 2.11 Τοποθεσία των μεγαλύτερων πετρελαιοκηλίδων (International Tankers Owners Pollution Federation (ITOPF), 2019)

Με βάση την Εικόνα 2.11 παρατηρείται μια μεγάλη συγκέντρωση ατυχημάτων με διαρροή πετρελαίου στις ακτές της Ευρώπης.



Εικόνα 2.12 Αριθμός πετρελαιοκηλίδων >7 τόνους 1970-2018 (International Tankers Owners Pollution Federation (ITOPF), 2019)

Όπως φαίνεται παραπάνω (Εικόνα 2.12), ο αριθμός των ναυτικών ατυχημάτων τόσο των μεσαίων όσο και των μεγάλων παρουσιάζει σημαντική μείωση με το πέρασμα των χρόνων από 78.8 μ.ο τη δεκαετία του 1970 σε μόλις 6.4 μ.ο ανά χρόνο τη τρέχουσα δεκαετία.



Εικόνα 2.13 Αριθμός μεσαίου και μεγάλου μεγέθους πετρελαιοκηλίδων 1970-2018 (International Tankers Owners Pollution Federation (ITOPF), 2019)

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία βγαίνει το συμπέρασμα ότι η συντριπτική πλειοψηφία των ναυτικών ατυχημάτων που οδηγούν στη διαρροή μεγάλων ποσοτήτων πετρελαίου συμβαίνουν κατά την πλεύση στην ανοιχτή θάλασσα και ότι οι κύριες αιτίες τους είναι η προσάραξη και η σύγκρουση με άλλα πλοία. Στη συνέχεια ακολουθεί ο πίνακας με τα μεγαλύτερα ναυτικά ατυχήματα διαρροής πετρελαίου παγκοσμίως με βάση την ποσότητα του πετρελαίου που διέρρευσε:

Causes	Operations							Total
	At anchor (Inland/Restricted)	At anchor (Open Water)	Underway (Inland/Restricted)	Underway (Open Water)	Loading/ discharging	Bunkering	Other Operations/ Unknown	
Allision/Collision	7	5	34	67	2	0	23	138
Grounding	5	1	46	68	2	0	28	150
Hull Failure	2	1	0	49	0	0	8	60
Equipment Failure	0	0	0	6	11	0	1	18
Fire/Explosion	2	2	1	25	13	1	9	53
Other	2	0	0	16	8	0	7	33
Unknown	0	0	0	1	6	0	6	13
Total	18	9	81	232	42	1	82	465
Percentage (%)	4	2	17	50	9	0	18	

Πίνακας 1 Περιστατικά πετρελαιοκηλίδας >700 τόνων ανάλογα με την τρέχουσα λειτουργική κατάσταση του πλοίου και την κύρια αιτία της 1970-2018 (International Tankers Owners Pollution Federation (ITOPF), 2019)

Position	Shipname	Year	Location	Spill size (tonnes)
1	ATLANTIC EMPRESS	1979	Off Tobago, West Indies	287,000
2	ABT SUMMER	1991	700 nautical miles off Angola	260,000
3	CASTILLO DE BELLVER	1983	Off Saldanha Bay, South Africa	252,000
4	AMOCO CADIZ	1978	Off Brittany, France	223,000
5	HAVEN	1991	Genoa, Italy	144,000
6	ODYSSEY	1988	700 nautical miles off Nova Scotia, Canada	132,000
7	TORREY CANYON	1967	Scilly Isles, UK	119,000
8	SEA STAR	1972	Gulf of Oman	115,000
9	SANCHI*	2018	Off Shanghai, China	113,000
10	IRENES SERENADE	1980	Navarino Bay, Greece	100,000
11	URQUIOLA	1976	La Coruna, Spain	100,000
12	HAWAIIAN PATRIOT	1977	300 nautical miles off Honolulu	95,000
13	INDEPENDENTA	1979	Bosphorus, Turkey	95,000
14	JAKOB MAERSK	1975	Oporto, Portugal	88,000
15	BRAER	1993	Shetland Islands, UK	85,000
16	AEGEAN SEA	1992	La Coruna, Spain	74,000
17	SEA EMPRESS	1996	Milford Haven, UK	72,000
18	KHARK 5	1989	120 nautical miles off Atlantic coast of Morocco	70,000
19	NOVA	1985	Off Kharg Island, Gulf of Iran	70,000
20	KATINA P	1992	Off Maputo, Mozambique	67,000
21	PRESTIGE+	2002	Off Galicia, Spain	63,000
36	EXXON VALDEZ+	1989	Prince William Sound, Alaska, USA	37,000
132	HEBEI SPIRIT+	2007	South Korea	11,000

Πίνακας 2 Μεγαλύτερα ναυτικά ατυχήματα διαρροής πετρελαίου από το 1967 (International Tankers Owners Pollution Federation (ITOPF), 2019)

Στον Πίνακα 2 δεν περιλαμβάνονται ατυχήματα, τα οποία ήταν πράξεις πολέμου όπως στον πόλεμο του Κόλπου και σε ατυχήματα που συνέβησαν κατά τη διάρκεια εξόρυξης από εξέδρες άντλησης πετρελαίου για τα οποία γίνεται αναφορά στη συνέχεια.

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα μεγαλύτερα ναυτικά ατυχήματα που συνέβησαν στην Ελλάδα:

A/A	Όνομα Πλοίου	Τοποθεσία	Ποσότητα (tonnes)	Χρονολογία Ατυχήματος
1	Irenes Serenade	Σφακτηρία, Πύλος	103.000	1980
2	Μεσσηνιακή Φροντίς	Καλοί Λιμένες, Κρήτη	7000	1979
3	Αγία Ζώνη II	Σαρωνικός	2570	2017
4	Geroi Chernomoya	Κεντρικό Αιγαίο	1700-8000	1992
5	Jupiter και Adige	Πειραιάς	500-1000	1988
6	La Guarda	Ελευσίνα	400-800	1994
7	Iliad	Πύλος	200-800	1993
8	Rabigh Bay II	Ασπρόπυργος	750	1987
9	Sea diamond	Σαντορίνη	516	2007
10	Kriti Sea	Άγιοι Θεόδωροι	300-500	1996
11	Alpha I	Ελευσίνα	310	2012
12	Eurobulker X	Ν.Ευβοϊκός	200	2000

Πίνακας 3 Οι μεγαλύτερες πετρελαιοκηλίδες στην Ελλάδα τα τελευταία 40 χρόνια (WWF HELLAS, 2015)

Η συνολική διαρροή για το ναυτικό ατύχημα του δεξαμενόπλοιου Αγία Ζώνη II ήταν 2200 τόνοι μεταφερόμενου καυσίμου και 370 τόνοι καυσίμου για ναυτιλιακή χρήση. (Υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας και Νησιωτικής Πολιτικής, 2017). Το Αγία Ζώνη II βρισκόταν 10 Σεπτεμβρίου 2017, στα νοτιοδυτικά της νησίδας Αταλάντης, όταν βυθίστηκε. Η πετρελαιοκηλίδα ρύπαινε τις ακτές της Αττικής από τη Σαλαμίνα μέχρι τη Γλυφάδα. Το Αγία Ζώνη II κατασκευάστηκε το 1972, είχε χωρητικότητα πάνω από 3.000 τόνους ενώ το μήκος του ήταν 95 μέτρα και το πλάτος του 13,7 μέτρα. Σύμφωνα με καταγγελία της Πανελληνίας Ένωσης Ναυτών Εμπορικού Ναυτικού, η κατασκευή είχε πολλά προβλήματα στο μηχανοστάσιο και οι επιδιορθώσεις τους ήταν πρόχειρες. Επιπλέον κατηγόρησε τους αρμόδιους που έδωσαν την πιστοποίηση στο πλοίο, χαρακτηρίζοντας πως την αναφορά τους «βεβιασμένη». (Wikipedia, Πετρελαιοκηλίδα στον Σαρωνικό Κόλπο (2017), 2019)

2.3.3 ΡΥΠΑΝΣΗ ΛΟΓΩ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

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

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

Δεν θα απασχολήσει περαιτέρω το συγκεκριμένο είδος ρύπανσης την παρούσα εργασία καθώς η διερεύνηση της επεκτείνεται πέραν του αντικειμένου της εργασίας.

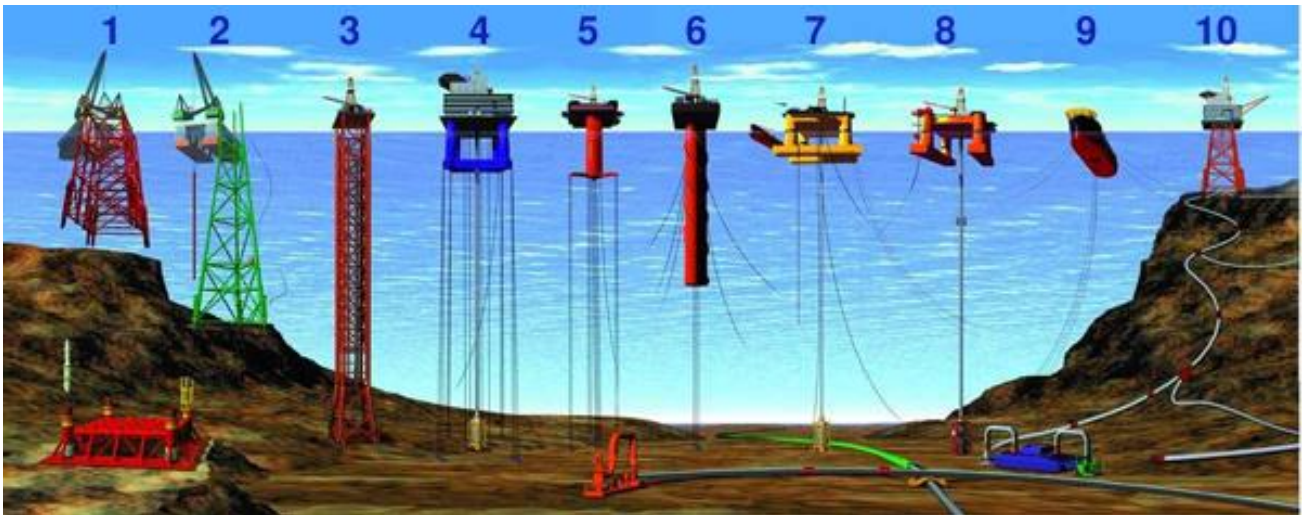
2.4 ΠΛΑΤΦΟΡΜΕΣ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

2.4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Μια πλατφόρμα άντλησης (εξόρυξης) πετρελαίου (oil platform), μια υπεράκτια πλατφόρμα (offshore platform) ή μια εξέδρα γεώτρησης ανοιχτής θάλασσας (offshore drilling rig) είναι μια μεγάλη κατασκευή με τις κατάλληλες εγκαταστάσεις για γεώτρηση, εξόρυξη, αποθήκευση και επεξεργασία του πετρελαίου που βρίσκεται σε βραχώδεις σχηματισμούς κάτω από τον θαλάσσιο πυθμένα. Πολλές πλατφόρμες πετρελαίου έχουν επίσης τη δυνατότητα διαμονής του εργατικού δυναμικού σε αυτές. Το πιο σύνηθες είναι οι πλατφόρμες να εμπλέκονται σε δραστηριότητες υπεράκτιες παρόλα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε λίμνες, εσωτερικά ύδατα και θάλασσες.

Ανάλογα με τις συνθήκες οι πλατφόρμες μπορούν είτε να είναι στερεωμένες στον βυθό του ωκεανού, είτε να βρίσκονται πάνω σε κάποιο τεχνητό νησί ή ακόμα και να επιπλέουν. Τα απομακρυσμένα φρέατα μπορούν να συνδέονται με την πλατφόρμα μέσω ενός συστήματος αγωγών, οδηγώντας έτσι στην σύνδεση της πλατφόρμας με παραπάνω από μια γεώτρηση. (Wikipedia, Oil Platform, 2019)

2.4.2 ΤΥΠΟΙ ΕΞΕΔΡΩΝ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ



Εικόνα 2.14 (1) (2) Συμβατικές πλατφόρμες πετρελαίου στερεωμένες στον πυθμένα
(3) Συμπαγής πύργος
(4) (5) Κάθετα αγκυροβολημένες πλατφόρμες με πυλώνες τάνυσης
(6) Πλατφόρμα με δοκό
(7) (8) Ημιβυθισμένες πλατφόρμες
(9) παραγωγή, αποθήκευση και εκφόρτωση εν πλω
(10) εγκατάσταση για την επεξεργασία και την επιστροφή στην μονάδα υποδοχής
(Office of Ocean Exploration and Research, 2008)

1. Πλατφόρμες στερεωμένες στον πυθμένα (Fixed Platforms)

Αυτού του τύπου οι πλατφόρμες είναι κατασκευασμένες με πόδια από σκυρόδεμα ή ασάλι ή με συνδυασμό και των δύο, αγκυρώνονται απευθείας στον πυθμένα και υποστηρίζουν την εξέδρα με χώρο για τα τρυπάνια της γεώτρησης, για την παραγωγή αλλά και με χώρο για τις εγκαταστάσεις που φιλοξενούν τους εργαζομένους. Τέτοιες πλατφόρμες λόγω της δυσκολίας στην μετακίνησή τους σχεδιάζονται για μακρόχρονη χρήση. Χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι στην κατασκευή τους όπως: χαλύβδινο περίβλημα, caissons σκυροδέματος, «επιπλέων» χάλυβας ακόμα και «πλωτό» σκυρόδεμα. Το χαλύβδινο περίβλημα αποτελείται από δομικά μέρη κατασκευασμένα από κυλινδρικά χαλύβδινα κομμάτια που συνήθως στοιβάζονται το ένα πάνω στο άλλο στον πυθμένα. Οι πλατφόρμες αυτού του είδους είναι οικονομικά βιώσιμες για εγκατάσταση μέχρι σε βάθος 520 μέτρων.



Εικόνα 2.15 Fixed platform στην Καλιφόρνια κοντά στην Σάντα Μπάρμπαρα

2. Συμπαγείς πύργοι (Compliant towers)

Αυτού του τύπου οι πλατφόρμες αποτελούνται από λεπτούς ευέλικτους πύργους, και μια βάση για θεμέλιο που υποστηρίζει ένα συμβατικό κατάστρωμα για εργασίες γεώτρησης και παραγωγής. Οι συμπαγείς πύργοι είναι σχεδιασμένοι για να αντέχουν σημαντικές εγκάρσιες εκτροπές και δυνάμεις και χρησιμοποιούνται κυρίως σε βάθη νερού που κυμαίνονται από τα 370 έως τα 910 μέτρα.



Εικόνα 2.16 Baldpate Compliant tower στον Κόλπο του Μεξικού (Wikipedia, Oil Platform, 2019)

3. Ημι-υποβρύχια πλατφόρμα (Semi-submersible platform)

Οι πλατφόρμες αυτού του τύπου έχουν κοίτη (πυλώνες και πλωτήρες) που εξασφαλίζουν αρκετή άνωση προκειμένου η κατασκευή να επιπλέει, αλλά και αρκετό βάρος για να την κάνουν να στέκεται όρθια. Οι ημι-βυθιζόμενες πλατφόρμες μπορούν να μεταφερθούν από μέρος σε μέρος και να ισορροπήσουν σε διαφορετικές στάθμες απλά αδειάζοντας ή γεμίζοντας αυτές τις δεξαμενές άνωσης (έρματος) που διαθέτουν. Γενικά είναι αγκυροβολημένες με διάφορους συνδυασμούς που περιλαμβάνουν αλυσίδες, συρματοσχοινα και πολυεστερικά σχοινιά κατά τη διάρκεια της γεώτρησης ή της φάσης λειτουργίας τους. Επίσης με τη χρήση της δυναμικής τοποθέτησης, ενός αυτόματου συστήματος που χρησιμοποιεί προπέλες και προωθητήρες, επεξεργαζόμενο δεδομένα από τους αισθητήρες θέσης, αέρα, κίνησης και γυροσκοπίων μπορεί να διατηρήσει τη θέση της πλατφόρμας σταθερή. (Wikipedia, Dynamic positioning, 2019). Οι πλατφόρμες αυτού του είδους μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βάθη από 60 μέχρι 6000 μέτρα.



Εικόνα 2.17 Deepsea Delta ημι-βυθιζόμενη (semi-submersible) πλατφόρμα άντλησης πετρελαίου στη Βόρεια Θάλασσα (Wikipedia, Oil Platform, 2019)

4. Πλατφόρμες πετρελαίου τύπου Jack-up

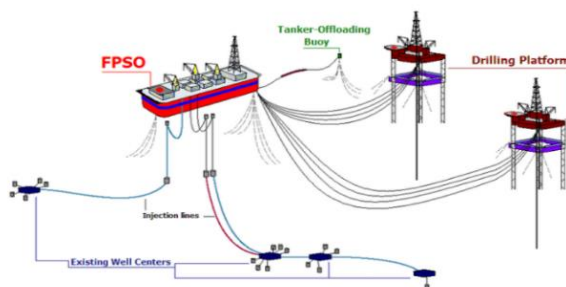
Οι πλατφόρμες αυτού του τύπου ανήκουν στην κατηγορία εξεδρών MODU (Mobile Offshore Drilling Unit) δηλαδή εξέδρες που έχουν της δυνατότητα μεταφοράς σε διάφορες περιοχές κατά την διάρκεια της δράσης τους. Διαθέτουν μεγάλη μεταφορική ικανότητα όμως μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε βάθη μόλις μέχρι 150 μέτρα. Οι εξέδρες jack up αποτελούνται από μια κατασκευή τύπου φορηγίδας και τρεις με πέντε πυλώνες (πόδια) οι οποίοι, όταν εκτείνονται, στηρίζουν το πλωτό μέρος. Η πλατφόρμα jackup ρυμουλκείται, με ανυψωμένους τους πυλώνες, στη θέση του έργου. Οι πυλώνες κατέρχονται, εδράζονται επί του πυθμένα και το πλωτό μέρος ανυψώνεται στον αέρα με σύστημα γρύλων. Μετά το πέρας της διάτρησης, οι πυλώνες ανυψώνονται εκ νέου και η εξέδρα ρυμουλκείται σε νέα θέση.



Εικόνα 2.18 Jack-up πλατφόρμα πετρελαίου (Wikipedia, Oil Platform, 2019)

5. Επιπλέοντα συστήματα παραγωγής (Floating Production Systems)

Οι κύριοι τύποι τέτοιων συστημάτων είναι τα FPSO (floating production, storage, and offloading system). Τα FPSO αποτελούνται από μεγάλες κατασκευές μονού κήτους, συνήθως με τη μορφή πλοίου, εξοπλισμένα με όλες τις υποδομές επεξεργασίας. Αυτές οι πλατφόρμες αγκυροβολούν σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία για μεγάλο χρονικό διάστημα και δεν εξορύσσουν στην πραγματικότητα πετρέλαιο ή φυσικό αέριο.



Εικόνα 2.19 Λειτουργία FPSO (Wikipedia, Floating production storage and offloading, 2019)

6. Πλοίο γεωτρήσεων (Drillship)

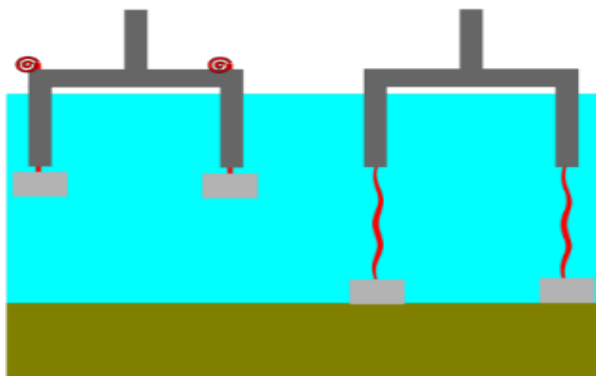
Ένα πλοίο γεωτρήσεων είναι ένα σκάφος στο οποίο έχει τοποθετηθεί όλος ο απαραίτητος εξοπλισμός για πραγματοποίηση γεωτρήσεων. Συνήθως χρησιμοποιείται για ερευνητικές γεωτρήσεις σε νέα φρέατα πετρελαίου ή φυσικού αερίου αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για επιστημονικού σκοπού γεωτρήσεις. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σε βαθιά και υπερβαθιά ύδατα και είναι εξοπλισμένα με τα πιο προηγμένα συστήματα δυναμικής τοποθέτησης. Μπορούν να πραγματοποιήσουν γεωτρήσεις μέχρι σε βάθος 3700 μέτρων.



Εικόνα 2.20 Drillship της Maersk (Maersk Drilling, 2019)

7. Πλατφόρμα πετρελαίου τύπου Tension-leg

Η tension leg platform (TLP) ή extended tension leg platform (ETLP) είναι μια κάθετα αγκυροβολούμενη κατασκευή που χρησιμοποιείται για την εξόρυξη πετρελαίου και φυσικού αερίου. Είναι κατάλληλη για βάθη από 300 έως 1500 μέτρα. Αποτελείται από ένα περίπλοκο σύστημα δόμησης της υπερκατασκευής και παρόλο που η μετακίνηση τους είναι εφικτή δεν θεωρούνται κινητές μονάδες γεώτρησης (MODU) γιατί είναι αναγκαία η αλλαγή όλης της βάσης στήριξης. Το κατάστρωμα τους έχει την ίδια δομή με τις άλλες κατασκευές ενώ η βάση στήριξης είναι εντελώς διαφορετική, η βασική διαφορά της εξέδρας αυτής είναι ότι δεν στηρίζει το βάρος της στον βυθό αλλά η σταθεροποίηση της βασίζεται στην άντωση του πάνω μέρους (καταστρώματος) ενώ τεράστια και μεγάλης αντοχής συρματόσχοινα ασκούν δύναμη προς τον βυθό.



Εικόνα 2.21 Τρόπος αγκυροβόλησης πλατφόρμας TLP (Wikipedia, Tension-leg platform, 2019)

8. Πλατφόρμες που βασίζονται σε κατασκευές βαρύτητας (Gravity-based structures)

Μια πλατφόρμα αυτού του τύπου (GBS) μπορεί να είναι κατασκευασμένη είτε από ασφάλι είτε από σκυρόδεμα και αγκυρώνεται κατευθείαν στον πυθμένα της θάλασσας. Συνήθως κατασκευάζονται στα φιόρδ καθώς η συγκεκριμένη τοποθεσία είναι προστατευμένη και έχει αρκετό βάθος. Μια πλατφόρμα GBS κατασκευάζεται από σπλισμένο σκυρόδεμα, συνήθως με δεξαμενές ή κυψέλες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της άνωσης της ολοκληρωμένης κατασκευής. Όταν κατασκευαστεί

η πλατφόρμα GBS ρυμουλκείται στον προορισμό της και στη συνέχεια βυθίζεται και αγκυρώνεται μέσω των συστημάτων ελέγχου που διαθέτει και τη διαχείριση των διαμερισμάτων έρματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας κατασκευής είναι η πλατφόρμα φυσικού αερίου Troll A ανοιχτά της δυτικής ακτής της Νορβηγίας, που αποτελεί την υψηλότερη και βαρύτερη κατασκευή που έχει ποτέ μετακινηθεί σε άλλη θέση, ένα από τα πιο σύνθετα μηχανικά project στην ιστορία. Έχει συνολικό ύψος 472 μέτρα και ζυγίζει 683.600 τόνους (1.2 εκατομμύρια μαζί με το έρμα), στην θέση που τοποθετήθηκε η βάση των 4 πυλώνων της βρίσκονται 303 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. (Wikipedia, Troll A platform, 2019)



Εικόνα 2.22 Ρυμούλκηση και τελική θέση της πλατφόρμας Troll A (TwistedSifter, 2015)

9. Πλατφόρμα τύπου Spar

Οι πλατφόρμες πετρελαίου αυτού του τύπου αγκυρώνονται στον πυθμένα όπως οι αντίστοιχες TLP, σε αντίθεση όμως με αυτές έχουν πιο συμβατικούς τρόπους αγκύρωσης. Έχουν σχεδιαστεί μέχρι σήμερα με τρεις διαφορετικούς τρόπους: τον συμβατικό μονοκόμματο κυλινδρικό κύτος, τον άξονα δοκού (beam shaft) στο οποίο το μεσαίο τμήμα περιλαμβάνει στοιχεία στερέωσης που συνδέουν το άνω κύτος (σκληρή δεξαμενή) με την κάτω δεξαμενή που περιέχει μόνιμο έρμα και το «κυψελωτό» (cell) το οποίο είναι κατασκευασμένο από πολλαπλούς κάθετους κυλίνδρους. Έχει μεγαλύτερη σταθερότητα από τα TLP καθώς έχει ένα ισχυρό αντίβαρο στον πυθμένα και δεν εξαρτάται από την αγκύρωση για να παραμείνει όρθια. Η πλατφόρμα πετρελαίου που πηγαίνει σε μεγαλύτερο βάθος παγκοσμίως είναι τέτοιου τύπου και βρίσκεται στον κόλπο του Μεξικού (Perdido Spar) και επιπλέει πάνω από τον πυθμένα στα 2438 μέτρα.



Εικόνα 2.23 Perdido Royal Dutch Shell Platform στον κόλπο του Μεξικού (Shell, 2019)

2.5 ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΩΝ

Σε προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκαν τα ναυτικά ατυχήματα τα οποία συνοδεύτηκαν με διαρροή ποσοτήτων πετρελαίου και τη δημιουργία πετρελαιοκηλίδας. Τα ναυτικά ατυχήματα όμως δεν αποτελούν τον κυριότερο παράγοντα διαρροής πετρελαίου στο περιβάλλον, καθώς όπως παρουσιάζεται και στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα με τις μεγαλύτερες πετρελαιοκηλίδες μόνο τα 4 από τα 9 οφείλονται σε ναυτικά ατυχήματα. Αντίθετα οι μεγαλύτερες διαρροές οφείλονται είτε σε ατυχήματα κατά την φάση της εξόρυξης του πετρελαίου (Deerwater Horizon, Ixtoc I, Taylor Energy) είτε σε σκόπιμες πολεμικές επιχειρήσεις (Gulf War Oil Spill, Nowruz Filed Platform).

A/A	Πετρελαιοκηλίδα	Τοποθεσία	Ημερομηνία	Τόνοι πετρελαίου
1	Gulf War Oil Spill	Kuwait, Iraq and Persian Gulf	Jan 19, 1991- Jan 28, 1991	818.000-1.091.000
2	Deepwater Horizon	USA, Gulf of Mexico	April 20, 2010- July 15, 2010	560.000-585.000
3	Ixtoc I	Mexico, Gulf of Mexico	June 3, 1979- March 23, 1980	454.000-480.000
4	Atlantic Empress	Trinidad & Tobago	July 19, 1979	287.000
5	Nowruz Field Platform	Iran, Persian Gulf	February 4, 1983	260.000
6	ABT Summer	Angola, offshore	May 28, 1991	260.000
7	Castillo de Beliver	South Africa	August 6, 1983	252.000
8	Amoco Cadiz	France, Brittany	March 16, 1978	223.000
9	Taylor Energy	United States, Gulf of Mexico	September 23, 2004 – Present	210.000–490.000

Πίνακας 4 Περιστατικά με τη μεγαλύτερη διαρροή πετρελαίου στη θάλασσα παγκοσμίως (Wikipedia, Oil spill, 2019)

2.6 ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΠΙΘΑΝΗΣ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΑ

2.6.1 ΦΡΑΓΜΑΤΑ (BOOMS)

Τα booms έχουν ως σκοπό να περιορίσουν την εξάπλωση του πετρελαίου και να το συγκεντρώσουν με σκοπό την ανάκτηση του. Υπάρχουν διάφοροι τύποι booms που ποικίλλουν από μικρά και ελαφρά μοντέλα κατάλληλα για μικρές διαρροές σε προστατευμένα νερά που μπορούν να αναπτυχθούν χειροκίνητα μέχρι μεγάλα που μπορούν να αναπτυχθούν με τη βοήθεια σκαφών στην ανοιχτή θάλασσα. Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των booms είναι η χωρητικότητα και η συμπεριφορά που μπορούν να έχουν κάτω από την επίδραση των κυμάτων και της κίνησης της θάλασσας. Πρέπει να είναι αρκετά ευέλικτα για να μπορούν να ακολουθούν την κίνηση των κυμάτων αλλά και επαρκώς άκαμπτα προκειμένου να παρέχουν ένα φράγμα για να περιορίσουν στο μέγιστο δυνατό βαθμό το πετρέλαιο που περιέχουν. Τα συνηθισμένα booms δεν μπορούν να διατηρήσουν το πετρέλαιο αν έρθουν αντιμέτωπα με ρεύμα πάνω από 0.7 κόμβων υπό συγκεκριμένη γωνία, ανεξάρτητα από το μέγεθος των boom και την κατασκευή τους. Πρόσφατα αναπτύχθηκαν booms τα οποία μπορούν να ανταπεξέλθουν επαρκώς αν δεθούν πίσω από σκάφη, ακόμα και σε νερά με σχετικά δυνατά θαλάσσια ρεύματα.



Εικόνα 2.24 Φουσκωτά booms που έχουν αναπτυχθεί σε σχήμα U μεταξύ δύο σκαφών για τον περιορισμό πετρελαιοκηλίδας αργού πετρελαίου (**International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2011**)

2.6.2 ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ (SKIMMERS)

Τα skimmers έχουν ως σκοπό την απομάκρυνση του πετρελαίου από την επιφάνεια της θάλασσας και να το διοχετεύσουν μέσω αντλιών ή αντίστοιχης συσκευής σε δεξαμενές που θα περιλαμβάνουν μείγμα νερού και ανακτημένου πετρελαίου. Ο ιδανικός σχεδιασμός τους εξαρτάται από το ιξώδες του πετρελαίου που πρέπει να ανακτηθεί και τις κυρίαρχες συνθήκες που επικρατούν στην θάλασσα. Επειδή τα skimmers επιπλέουν στην θάλασσα, αντιμετωπίζουν πολλές λειτουργικές δυσκολίες όπως αντίστοιχα και τα booms, ιδιαίτερα από τον άνεμο, τα κύματα και τα ρεύματα. Τα πιο απλά skimmers είναι συσκευές προσρόφησης που απομακρύνουν το πετρέλαιο από την επιφάνεια του νερού απευθείας ή μέσω δικτύου. Αυτές οι διατάξεις τείνουν να μαζεύουν και μεγάλη ποσότητα νερού ταυτόχρονα με το πετρέλαιο εκτός και αν λειτουργούν σε συνθήκες απόλυτης ηρεμίας. Πιο σύνθετες μονάδες βασίζονται στην προσκόλληση του πετρελαίου σε μέταλλο, πλαστικούς δίσκους ή σε ελαιοφιλείς ταινίες ή σχοινιά. Άλλα είναι σχεδιασμένα να δημιουργούν στροβίλους για τη συγκέντρωση και ανάκτηση του πετρελαίου. Συνήθως οι μηχανικές μέθοδοι περιορισμού και απομάκρυνσης πετρελαίου από το θαλάσσιο περιβάλλον εφαρμόζονται και σε συνδυασμό για την καλύτερη αντιμετώπιση της πετρελαιοκηλίδας.



Εικόνα 2.25 Skimmer με ταινία προσαρμοσμένο σε ειδικό σκάφος. Η ταινία κατασκευασμένη από πλέγμα επιτρέπει στο νερό να διαφεύγει και στο πετρέλαιο να προσκολλάται σε αυτή. Το πετρέλαιο καταλήγει στο σκάφος και αποθηκεύεται στις δεξαμενές του (**International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2012**)



Εικόνα 2.26 Συνδυασμός δράσης booms και skimmers για τον περιορισμό και την απομάκρυνση πετρελαίου (**International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2012**)

2.6.3 ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΚΑΥΣΗ (IN-SITU BURNING)

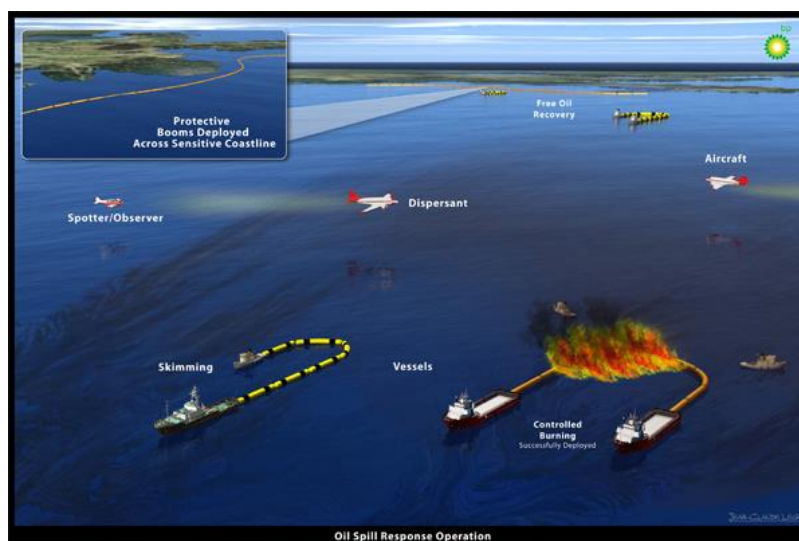
Η επιτόπια καύση είναι ο όρος που περιγράφει τη διαδικασία καύσης του επιπλέοντος πετρελαίου, κοντά ή ακριβώς πάνω από το σημείο της διαρροής. Για να γίνει η καύση, πρέπει το πετρέλαιο να συγκεντρωθεί και να υπάρξει ανάφλεξη. Η καύση πετρελαίου στη θάλασσα έχει σε ιδανικές συνθήκες, τη δυνατότητα απομάκρυνσης πολύ μεγάλων ποσοτήτων πετρελαίου από την επιφάνεια της θάλασσας. Η απόφαση για την καύση ή όχι του πετρελαίου στην θάλασσα είναι αρκετά σύνθετη. Η φωτιά που θα δημιουργηθεί και ο τοξικός καπνός μπορεί να έχουν σημαντική επίπτωση στην υγεία του ανθρώπου και για αυτό είναι μια τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα ανοιχτά ή μακριά από κατοικημένες περιοχές. Η κατάσταση του πετρελαίου επίσης παίζει σημαντικό ρόλο, με τη γήρανση του πετρελαίου μπορεί να χάσει τα ελαφρότερα κλάσματα του μέσω της εξάτμισης και να αρχίζει να γαλακτωματοποιείται. Και οι δύο αυτές διεργασίες καθιστούν πιο δύσκολη την ανάφλεξη και καύση του πετρελαίου.



Εικόνα 2.27 Η αμερικάνικη ακτοφυλακή εφαρμόζει την τακτική της επιτόπιας καύσης για την αντιμετώπιση της πετρελαιοκηλίδας στον Κόλπο του Μεξικού από την Mobile Offshore Drilling Unit Deepwater Horizon. (**Bergeron, 2010**)

2.6.4 ΔΙΑΣΚΟΡΠΙΣΤΙΚΑ (DISPERSANTS)

Αν χρησιμοποιηθούν ορθά τα διασκορπιστικά αποτελούν μια αποτελεσματική στρατηγική αντιμετώπισης. Μπορούν γρήγορα να απομακρύνουν σημαντικές ποσότητες πετρελαίου από την επιφάνεια της θάλασσας μεταφέροντας την στην στήλη νερού όπου διαλύεται λόγω των φυσικών διεργασιών. Σε περιπτώσεις όπου καμία άλλη μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί λόγω καιρικών συνθηκών ή διαθεσιμότητας των μέσων μπορούν με τη χρήση αυτής της μεθόδου να προκύψουν σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Παρόλα αυτά, όπως και οι άλλες τεχνικές αντιμετώπισης, έχουν και τα dispersants τους περιορισμούς τους που αφορούν το είδος του πετρελαίου, τις καιρικές συνθήκες και τη θάλασσα καθώς και τις περιβαλλοντικές ευαισθησίες. Τα dispersants μπορούν να διοχετευτούν στη θάλασσα είτε με ειδικά σκάφη, είτε με ελικόπτερα και σε περιπτώσεις μεγαλύτερων πετρελαιοκηλίδων ακόμα και με αεροπλάνα.



Εικόνα 2.28 Στρατηγική αντιμετώπισης της πετρελαιοκηλίδας με συνδυασμό όλων των διαθέσιμων μεθόδων (British Petroleum (BP), 2019)

2.6.5 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΣΤΗΝ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗ

Όταν το πετρέλαιο φτάσει στην ακτογραμμή, τότε απαιτείται μεγάλη προσπάθεια για τον καθαρισμό των περιοχών που έχουν επηρεαστεί. Είναι απαραίτητο να υπάρχει σχέδιο άμεσης αντίδρασης σε αυτήν την περίπτωση. Οι διαθέσιμες τεχνικές για τον καθαρισμό της ακτογραμμής είναι σχετικά απλές και δεν απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός. Παρόλα αυτά απαιτείται συγκεκριμένο σχέδιο και στρατηγική για τον αποτελεσματικό καθαρισμό της ακτής που περιλαμβάνει μια σειρά από διαδικασίες.

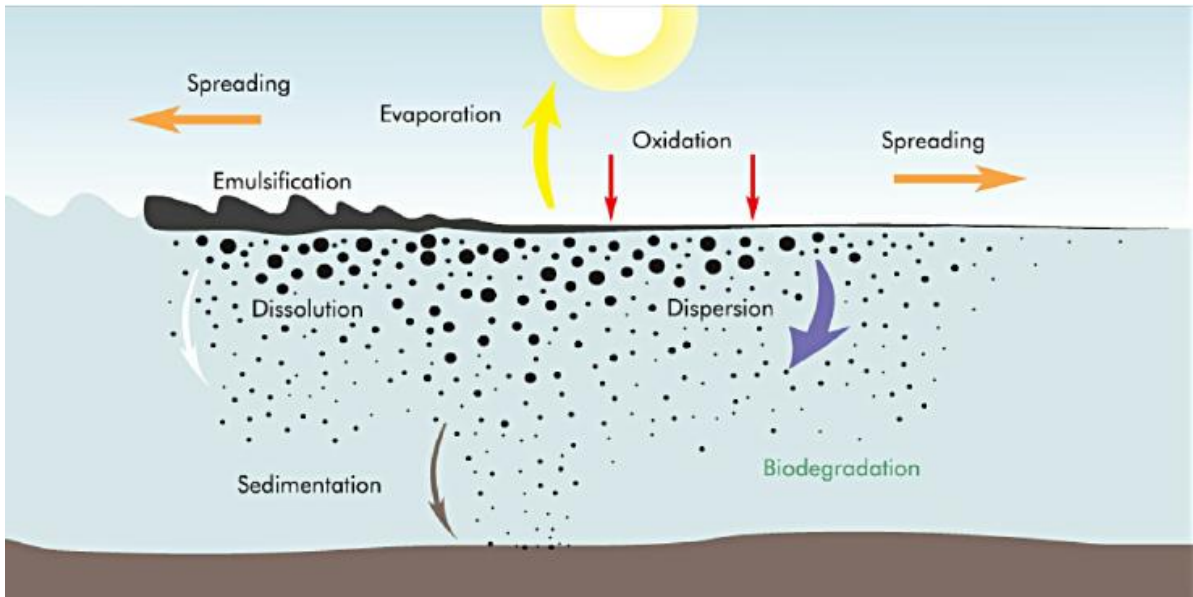


Εικόνα 2.29 Διάφορες μέθοδοι καθαρισμού της ακτογραμμής (International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2011)

3. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

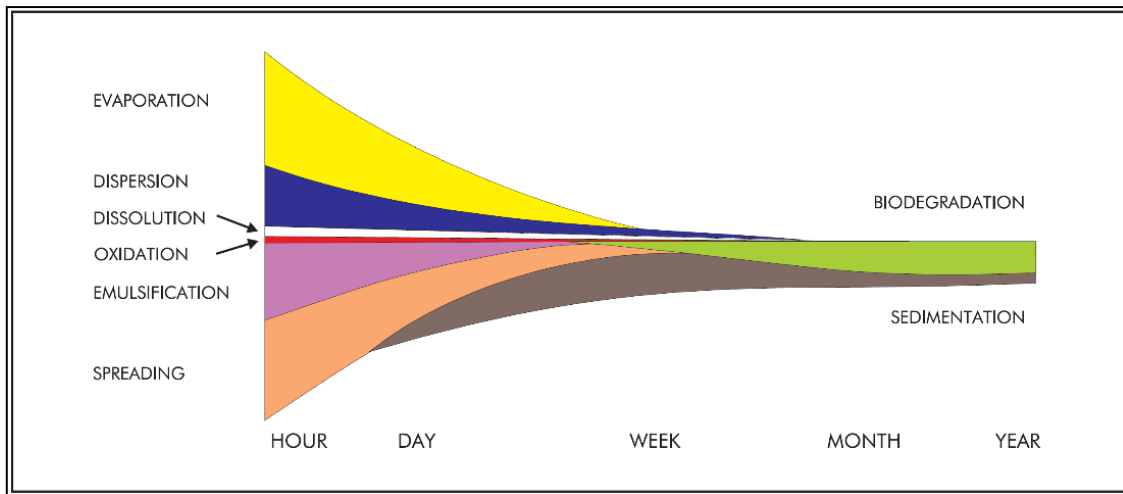
Κύριοι παράγοντες για την εξέλιξη μιας πετρελαιοκηλίδας είναι η (οριζόντια) μεταφορά, η οποία γίνεται λόγω της δράσης του ανέμου και της ροής του πεδίου, και λόγω της γήρανσης του πετρελαίου. Στην γήρανση του πετρελαίου περιλαμβάνονται οι φυσικές διεργασίες που συμβάλλουν στην μείωση του ή στην αύξηση της μάζας του, επηρεάζοντας την πυκνότητα και τον όγκο του. Οι σημαντικότερες διεργασίες «γήρανσης» που παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.1 είναι: η εξάπλωση, η εξάτμιση, η διασπορά, η γαλακτωματοποίηση, η διάλυση, η καθίζηση, η φωτοξείδωση και η βιοαποικοδόμηση, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια.



Εικόνα 3.1 Κύριες διεργασίες «γήρανσης» της Πετρελαιοκηλίδας (International Tanker Owners Pollution Federation (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 τα ρεύματα. 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 η «γήρανση» ή αλλιώς «αποχρωματισμός» (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 3.2.



Εικόνα 3.2 Σχηματική απεικόνιση της εξέλιξης μιας πετρελαιοκηλίδας αργού πετρελαίου στην οποία διακρίνεται η μεταβολή της σχετικής σημασίας των διαδικασιών γήρανσης- το πλάτος κάθε χρώματος υποδεικνύει τη σημασία της διεργασίας (International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2002)

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

3.2 ΕΞΑΠΛΩΣΗ (SPREADING)

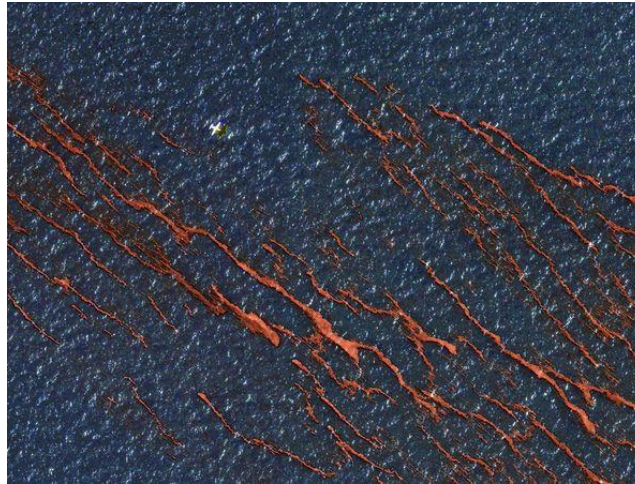
Η πρώτη εμφανής διεργασία που αρχίζει αμέσως με τη διαρροή του πετρελαίου στη θάλασσα, είναι η οριζόντια εξάπλωση του. Η ταχύτητα εξάπλωσης καθορίζεται κυρίως από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες της περιοχής (ταχύτητα ανέμου, υδάτινα ρεύματα, ύψος κύματος, θερμοκρασία επιφάνειας θάλασσας), καθώς και 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, 2015)



Εικόνα 3.3 Διαρροή πετρελαίου στη θάλασσα (Wikipedia, Ixtoc I oil spill, 2019)

Στην ανοιχτή θάλασσα ο αέρας δημιουργεί στενές ζώνες παράλληλες με την κατεύθυνση του ανέμου όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4. 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, 2015)



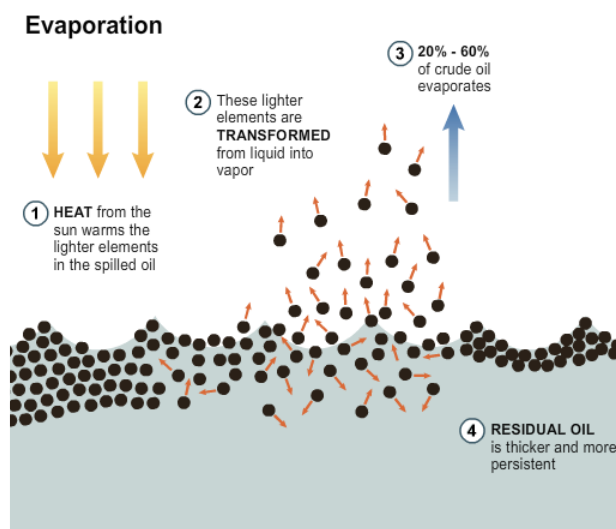
Εικόνα 3.4 Σχηματισμός λεπτών λωρίδων παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου. (Boyle, 2010)

3.3 ΕΞΑΤΜΙΣΗ (EVAPORATION)

Με τον όρο εξάτμιση, εννοείται η διαδικασία μεταφοράς μέρους της μάζας του πετρελαίου από την κηλίδα στην ατμόσφαιρα. Η διαδικασία της εξάτμισης ξεκινά λίγες ώρες μετά την διαρροή 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.

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 ακολουθεί 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 (International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2011). Όμως, όταν τόσο πτητικά πετρέλαια διαρρεύσουν σε περιορισμένες περιοχές υπάρχει κίνδυνος φωτιάς και έκρηξης.



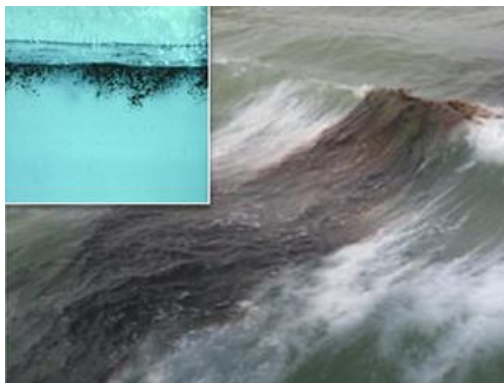
Εικόνα 3.5 Εξάτμιση της πετρελαιοκηλίδας (Kuang, 2010)

3.4 ΔΙΑΣΠΟΡΑ (DISPERSION)

Η πετρελαιοκηλίδα διασπάζεται 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, 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 διασπαρθεί τελείως μέσα σε λίγες μέρες. Η τάση αυτή του πετρελαίου ενισχύεται από χημικές ουσίες που ονομάζονται διασκορπιστικά (Κεφάλαιο 3.6.4). Αντιστρόφως, ιξώδη πετρέλαια τείνουν να σχηματίζουν κομμάτια μεγάλου πάχους στην επιφάνεια και δεν διασπείρονται ακόμα και με τη δράση διασκορπιστικών (International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2011)



Εικόνα 3.6 Διασκόρπιση πετρελαίου σε σταγονίδια λόγω της επίδρασης των κυματισμών. (International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2011)

3.5 ΔΙΑΛΥΣΗ (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.

3.6 ΓΑΛΑΚΤΩΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ (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, 2015)

Η ταχύτητα γαλακτωματοποίησης εξαρτάται από την κατάσταση θάλασσας στην οποία βρίσκεται το πετρέλαιο. Αν η θάλασσα είναι ταραγμένη, ευνοείται το φαινόμενο και επιταχύνεται η 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 3.7, τα γαλακτώματα νερού στο πετρέλαιο έχουν χρώμα καφέ/κόκκινο, πορτοκαλί ή κτρινωπό και είναι γνωστά ως «chocolate mousse». (Κοτρίκλα, 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 (International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2011)

Το πετρέλαιο μπορεί να πάρει μέχρι και το 80% του νερού, αλλάζοντας δραστικά την πυκνότητα του και να αυξήσει τον όγκο του έως και πέντε φορές συγκριτικά με τον αρχικό όγκο. Επίσης αυξάνεται δραστικά το ιξώδες (Hao Xie, 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 μετασχηματίζει 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 3.7 Γαλακτωματοποίηση (Introduction to Observing Oil from Helicopters and Planes- COMET Program, 2019)

3.7 ΦΩΤΟΧΗΜΙΚΗ ΟΞΕΙΔΩΣΗ (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 υπάρχει ταυτόχρονη παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας, τότε γίνεται λόγος για το φαινόμενο της φωτοχημικής οξείδωσης (φωτοξειδωση). 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 फिल्म (φωτοξειδωση) μπορεί να ανέλθει στο 0,1% ανά ημέρα (International Tanker Owners Pollution Federation (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 3.8 Πίσσα (tar ball) στην ακτή

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 απ' ό,τι 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.

3.8 ΚΑΘΙΖΗΣΗ (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 πηκτώδη 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)

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 πηκτώδη σφαιρίδια.



Εικόνα 3.9 Ιζήματα πετρελαίου στον πυθμένα της θάλασσας. (The GE3246nator- Recording Earth's pulse, 2015)

3.9 ΒΙΟΑΠΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗ (BIODEGRADATION)

Η βιοδιάσπαση (ή βιοαποικοδόμηση) του πετρελαίου γίνεται από βακτήρια, μικρόβια και άλλους μικροοργανισμούς που περιέχονται στο θαλασσινό νερό και μετασχηματίζουν την δομή του,

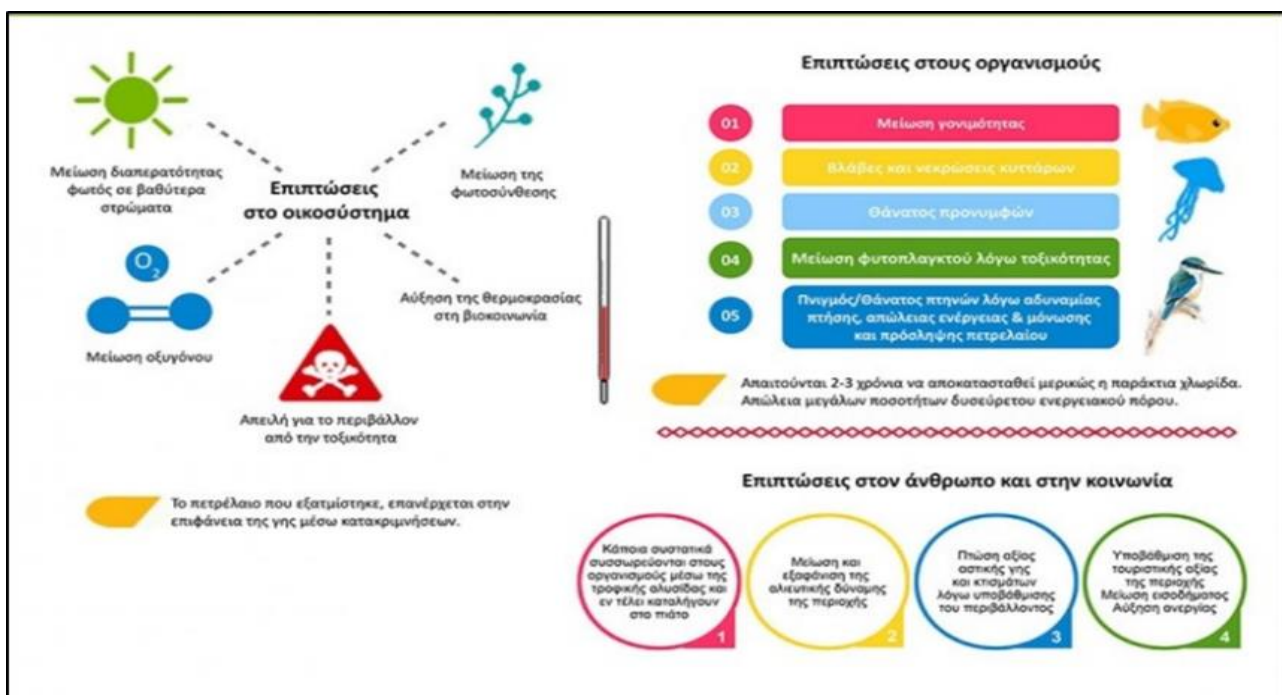
υποβιβάζοντας το τελικά, σε οξείδια του άνθρακα και νερό. Ο ρυθμός της διεργασίας εξαρτάται κυρίως από την θερμοκρασία, τον τύπο του πετρελαίου, τα επίπεδα αζώτου και φωσφόρου στο νερό και την διαθεσιμότητα του οξυγόνου, χωρίς την παρουσία του οποίου η βιοδιάσπαση είναι αδύνατη. Αυτή η διαδικασία εμφανίζεται στην διεπιφάνεια νερού – πετρελαίου, στη στήλη νερού, στα ιζήματα και στην ακτή (Atlas, R.M., 1981)

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/m³ και 70 mg/ m³ 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 Κωνσταντίνος, 2008)

Αξίζει να αναφερθεί ότι η μικροβιακή αποικοδόμηση των υδρογονανθράκων πετρελαίου είναι ταχύτερη όταν το πετρέλαιο είναι διασκορπισμένο στην υδάτινη μάζα με τη μορφή σταγονιδίων διαμέτρου 1 μm, παρά όταν επιπλέει 'ενιαίο' στην επιφάνεια. Εν γένει, η βιοδιάσπαση του πετρελαίου είναι ένας πολύπλοκος μηχανισμός. Τέλος η βιοαποικοδόμηση μπορεί να συνεχιστεί για χρόνια μετά τη διαρροή και επηρεάζεται από μια ποικιλία οργανισμών. Αυτοί οι μικροοργανισμοί υπάρχουν σε χαμηλές συγκεντρώσεις και βιοαποικοδομούν το πετρέλαιο στη θάλασσα που εμφανίζεται όταν η θαλάσσια χλωρίδα και πανίδα πεθαίνουν και αποσυντίθενται (Παπαδονικολάκη Γεωργία, 2013)

3.10 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΑ

Οι πετρελαιοκηλίδες μπορούν να προκαλέσουν ένα σύνολο αρνητικών επιπτώσεων στο θαλάσσιο περιβάλλον, τόσο στην χλωρίδα όσο και στην πανίδα του, δημιουργώντας πιέσεις στα οικοσυστήματα αλλά και στους ανθρώπους που κατοικούν και αναπτύσσουν τη δραστηριότητα τους στην ακτή και στο παράκτιο περιβάλλον, που προσβλήθηκε από την πετρελαιοκηλίδα. Η κλίμακα και η χρονική διάρκεια των συνεπειών λόγω της παρουσίας πετρελαίου στο θαλάσσιο και παράκτιο περιβάλλον εξαρτάται από τις συνθήκες του ατυχήματος (χρονική διάρκεια διαρροής, ποσότητα, συνθήκες περιβάλλοντος κλπ). Γενικά οι φυσικές διεργασίες μπορούν να επαναφέρουν το οικοσύστημα στην προηγούμενη του κατάσταση. Οι διεργασίες αυτές μπορούν να επιταχυνθούν προφανώς από τις κατάλληλες διαδικασίες καθαρισμού και απομάκρυνσης του πετρελαίου από το θαλάσσιο περιβάλλον. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων ακόμα και στις μεγαλύτερες πετρελαιοκηλίδες το οικοσύστημα επανέρχεται στην πρότερη του κατάσταση μετά από λίγο καιρό. (International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2011)



Εικόνα 3.10 Επιπτώσεις πετρελαιοκηλίδας (Emprosnet.gr, 2017)

Μηχανισμοί πρόκλησης αρνητικών επιπτώσεων λόγω πετρελαιοκηλίδας στο φυσικό περιβάλλον

Το πετρέλαιο μπορεί να επηρεάσει το περιβάλλον με έναν ή παραπάνω από τους ακόλουθους μηχανισμούς:

- Πρόκληση φυσικής ασφυξίας με επίπτωση στις φυσιολογικές λειτουργίες
- Χημική τοξικότητα που προκαλεί θανατηφόρες επιδράσεις ή προκαλεί βλάβη στις κυτταρικές λειτουργίες
- Αλλαγές στο οικοσύστημα, αρχικά με την απώλεια οργανισμών κλειδιά και αντίστοιχη κατάληψη των θέσεων τους από ευκαιριακά είδη
- Έμμεσες συνέπειες, όπως η απώλεια καταφυγίου και η συνεπαγόμενη εξαφάνιση σημαντικών οικολογικά ειδών

Η φύση και η διάρκεια των επιπτώσεων μια πετρελαιοκηλίδας εξαρτάται από μια πληθώρα παραγόντων. Όπως: η ποσότητα και ο τύπος του πετρελαίου που διέρρευσε, η συμπεριφορά του στο θαλάσσιο περιβάλλον, η θέση της πετρελαιοκηλίδας όσον αφορά τα χαρακτηριστικά και τις συνθήκες του αποδέκτη, το χρόνο ιδιαίτερα σε σχέση με την εποχή και τις κυρίαρχες καιρικές συνθήκες. Άλλοι σημαντικοί παράγοντες είναι η βιολογική σύσταση του οικοσυστήματος που προσβλήθηκε, η οικολογική σημασία των ειδών που κατοικούν εκεί και η ευαισθησία τους στην ρύπανση από πετρέλαιο. Η επιλογή κατάλληλων τεχνικών και η απόδοση τους ανάλογα με τις επιχειρήσεις που θα διεξαχθούν μπορούν να έχουν σημαντική επίδραση στις επιπτώσεις της πετρελαιοκηλίδας.

Οι πιθανές επιπτώσεις της διαρροής πετρελαίου στη θάλασσα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα που ο ρυπαντής διαλύεται λόγω φυσικών διεργασιών. Αυτό καθορίζει και τη γεωγραφική έκταση της περιοχής που θα επηρεαστεί και το εάν θα εκτεθούν ευαίσθητες περιβαλλοντικά περιοχές σε ανεβασμένες συγκεντρώσεις πετρελαίου ή στα τοξικά συστατικά τους για μια σημαντική χρονική περίοδο.



Εικόνα 3.11 Τυπικές επιπτώσεις στους θαλάσσιους οργανισμούς ανάλογα με το είδος βλάβης (**International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2011**)

Η δυνατότητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος να επανέρχεται ύστερα από σοβαρές διαταραχές είναι συνάρτηση της πολυπλοκότητας και της ανοχής που έχει στην όποια διαταραχή της ισορροπίας του.

Επιπτώσεις από διαρροή πετρελαίου στο φυσικό περιβάλλον

• Υπεράκτια και παράκτια νερά

Τα περισσότερα πετρελαιοειδή επιπλέουν στην επιφάνεια της θάλασσας και εξαπλώνονται σε μια μεγάλη περιοχή λόγω των κυμάτων, του αέρα και των ρευμάτων. Μερικοί τύποι πετρελαίου με μικρό ιξώδες μπορούν να διασκορπιστούν φυσικά στα πρώτα μέτρα της στήλης νερού, ιδιαίτερα με την παρουσία θραυόμενων κυματισμών, όπου διαλύονται με γρήγορο ρυθμό. Αν η διαρροή έχει διάρκεια, οι συγκεντρώσεις του διασκορπισμένου πετρελαίου μπορεί να διατηρηθούν κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας στο σημείο της διαρροής. Οι επιπτώσεις στη θαλάσσια ζωή βαθύτερα είναι μικρές.

- **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 το στρώμα των πετρελαιοειδών έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια της θάλασσας παρεμποδίζει την είσοδο του αέρα και μειώνει τη διαπερατότητα του φωτός, με αποτέλεσμα να μειώνεται η φωτοσυνθετική ικανότητα των υποθαλάσσιων φυτών, αφού μειώνεται στο ελάχιστο η ανανέωση του νερού με το οξυγόνο του αέρα. Τα μαλάκια και τα φυτά είναι ιδιαίτερα ευπαθή σε αυτή τη ρύπανση. (Χρηστάκης, 2014)

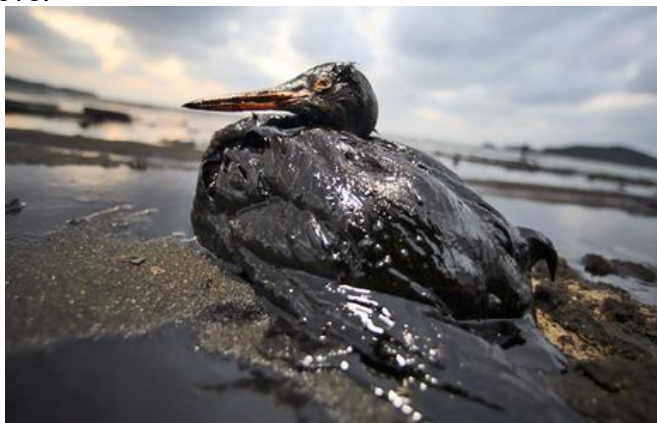
Από το πετρέλαιο που βυθίζεται, λόγω μεγαλύτερου ειδικού βάρους, καταστρέφονται τα φύκια που δίνουν τροφή και κάλυψη σε πολλούς οργανισμούς. Στο Αιγαίο βρίσκονται μεγάλες προστατευόμενες εκτάσεις από θαλάσσια λιβάδια Ποσειδωνίας, από τα οποία προέρχεται η μεγαλύτερη ποσότητα παραγωγής οξυγόνου στη θάλασσα, 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).

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

Όσον αφορά τα ψάρια, έχει αποδειχθεί πως οι υδρογονάνθρακες πετρελαίου επηρεάζουν τη δράση διαφόρων ενζυμικών συστημάτων, τη δομή των ιστών, και ελαττώνουν τη γονιμότητά τους. Η μεγάλη τοξικότητα του πετρελαίου για τους θαλάσσιους οργανισμούς, είναι αποτέλεσμα της άμεσης επίδρασης των υδρογονανθράκων σε βασικές κυτταρικές διεργασίες και ειδικότερα σε διεργασίες μεμβράνης. Σε γενικές γραμμές, στην ανοιχτή θάλασσα και τις παράκτιες περιοχές, τα ενήλικα ψάρια με εμπορική σημασία για τον άνθρωπο έχουν την ικανότητα να αποφεύγουν περιοχές στις οποίες επιπλέει πετρέλαιο και σπάνια πεθαίνουν (Κοτρίκλα, 2015).

- **Θαλασσοπούλια**

Τα θαλασσοπούλια είναι το πιο ευάλωτο είδος σε περίπτωση πετρελαϊκής ρύπανσης, σε μεγάλα περιστατικά διαρροής μεγάλοι πληθυσμοί από αυτά μπορούν να εξαφανιστούν. Διάφορα είδη που αναζητούν στην επιφάνεια της θάλασσας την τροφή σε σμήνη διατρέχουν τον μεγαλύτερο κίνδυνο.



Εικόνα 3.12 Θαλασσοπούλι καλυμμένο με πετρέλαιο (International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2011)

- **Θαλάσσια θηλαστικά και ερπετά**

Οι φάλαινες, τα δελφίνια και άλλα θηλαστικά μπορούν να βρεθούν σε κίνδυνο από το πετρέλαιο που επιπλέει στην επιφάνεια της θάλασσας κατά την ανάδυση τους για να αναπνεύσουν, προκαλώντας βλάβες τόσο στο αναπνευστικό όσο και στα μάτια τους. Επίσης το επιπλέον πετρέλαιο αποτελεί απειλή για θαλάσσια ερπετά όπως οι χελώνες κυρίως κατά την περίοδο της ωοτοκίας, λόγω της καταστροφής των φωλιών τους στην ακτή από το πετρέλαιο.

- **Ακτογραμμή**

Η ακτογραμμή είναι εκτεθειμένη στις επιπτώσεις του πετρελαίου περισσότερο από κάθε άλλο μέρος του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Συνεπώς, το μεγαλύτερο μέρος της πανίδας και της χλωρίδας είναι σχετικά ανθεκτικά, καθώς είναι εκτεθειμένα στην παλίρροια, στον έντονο κυματισμό, στους ξηρούς ανέμους, τις ακραίες θερμοκρασίες και σε άλλες σημαντικές πιέσεις. Αυτή η ανθεκτικότητα δίνει σε πολλούς οργανισμούς της ακτογραμμής τη δυνατότητα να αντέχουν αλλά και να επανέρχονται γρήγορα από την επίδραση του πετρελαίου.

- **Βραχώδεις ακτές**

Η έκθεση τους στην κυματική δράση και τα ρεύματα σημαίνει ότι οι βραχώδεις και οι αμμώδεις ακτές είναι οι πιο ανθεκτικές στην επίδραση της πετρελαιοκηλίδας. Αυτή η δράση συνήθως δίνει τη δυνατότητα γρήγορου αυτοκαθαρισμού της ακτής και μέσα σε χρονικό διάστημα κάποιων εβδομάδων η ακτή μπορεί να είναι πλήρως καθαρή.



Εικόνα 3.13 Οι πεταλίδες και τα υπόλοιπα είδη ζωής στις βραχώδεις ακτές μπορούν να επηρεαστούν από το πετρέλαιο και να αντικατασταθούν από άλγη. Με το πέρασμα του χρόνου αποκαθίσταται η ισορροπία (International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2011)

- **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 3.14 Προσπάθεια καθαρισμού αμμώδους ακτής από διαρροή πετρελαίου (International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2011)

Habitat	Recovery period
Plankton	Weeks/months
Sand beaches	1 – 2 years
Exposed rocky shores	1 – 3 years
Sheltered rocky shores	1 – 5 years
Saltmarsh	3 – 5 years
Mangroves	10 years and greater

Εικόνα 3.15 Ενδεικτικό χρονικό διάστημα επαναφοράς διαφορετικών τύπων θαλάσσιου περιβάλλοντος (International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2011)

Επιπτώσεις από διαρροή πετρελαίου στις οικονομικές και κοινωνικές δραστηριότητες

- **Τουρισμός**

Ο τουρισμός αποτελεί βασικό παράγοντα οικονομικής δραστηριότητας στις παράκτιες περιοχές και είναι η κύρια βιομηχανική δραστηριότητα η οποία διαταράσσεται από την παρουσία πετρελαίου στα παράκτια ύδατα και στην ακτή. Η διαταραχή παραδοσιακών δραστηριοτήτων σε παράκτιες τουριστικές περιοχές όπως το κολύμπι, τα θαλάσσια σπορ, οι καταδύσεις έχουν ως συνέπεια να επηρεαστούν τα ξενοδοχεία, τα εστιατόρια και γενικότερα το σύνολο των επιχειρήσεων που δραστηριοποιούνται στον κλάδο. Η δημιουργία μιας πετρελαιοκηλίδας θα είχε ως συνέπεια να υποβαθμιστεί η φυσική ομορφιά των περιοχών και να μειωθεί κατακόρυφα η τουριστική κίνηση. (International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2011)

- **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. Βέβαια, είναι σύνηθες να διακόπτονται για προληπτικούς λόγους όλες οι εργασίες για να διατηρείται η εμπιστοσύνη και η προστασία της αγοράς, αλλά και του εξοπλισμού. Ο πλωτός εξοπλισμός, που αποτελείται κυρίως από τα πλοία, τις μηχανές και τα δίχτυα είναι εξαιρετικά πιθανό να μολυνθεί και να φθαρεί λόγω επαφής με τοξικές ουσίες του πετρελαίου. Ο υποβρύχιος εξοπλισμός, όπως δίχτυα και τράτες βυθού, δεν αναμένεται να επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό, παρά μόνο από το πετρέλαιο που βυθίζεται. Όσον αφορά τις ιχθυοκαλλιέργειες, είναι ιδιαίτερα ευάλωτες στη διαρροή πετρελαίου, καθώς πολλές φορές τα ψάρια δεν έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν τους φυσικούς μηχανισμούς αποφυγής τους και η παρουσία του εξοπλισμού της καλλιέργειας παρέχει τη δυνατότητα παρατεταμένης εισόδου στα συστατικά του πετρελαίου. (International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2011)

- **Μαρίνες και αλιευτικά καταφύγια**

Συνήθως είναι περικλειστές περιοχές που περιβάλλονται από έργα όπως κυματοθραύστες για την προστασία τους από τις καιρικές και κυματικές συνθήκες. Οι θαλάσσιες οχυρώσεις συνήθως είναι κατασκευασμένες από tetrapods ή από βράχους. Αν αυτά έρθουν σε επαφή με το πετρέλαιο τότε είναι δύσκολο να καθαριστούν, καθώς αυτό εισχωρεί μέσα στην κατασκευή και μπορεί να λειτουργήσει πλέον ως δευτερογενής εστία ρύπανσης. Σε πολλές περιπτώσεις, τοποθετείται προστατευτικός φράχτης στην είσοδο της μαρίνας προκειμένου να μην προσβληθούν τα σκάφη που βρίσκονται σε αυτή από το πετρέλαιο. (International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2011)



Εικόνα 3.16 Η αποτελεσματική ή όχι χρήση των booms σε αυτές τις περιπτώσεις εξαρτάται από την παύση της κυκλοφορίας των σκαφών στη μαρίνα (International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2011)

- **Λιμάνια**

Τα λιμάνια υπόκεινται σε παρόμοια προβλήματα όπως και οι μαρίνες, σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα βέβαια, και οι αρχές του λιμανιού απαιτούν οι καρίνες των σκαφών να καθαριστούν πριν εισέλθουν στο λιμάνι. Οι διαδικασίες καθαρισμού των πλοίων μπορούν να διαταράξουν τη λειτουργία του λιμανιού, επίσης η χρήση απορροφητικών φρακτών δεν έχει την ίδια αποτελεσματικότητα όπως στις μαρίνες καθώς οι εισοδοί του λιμανιού είναι κατά πολύ μεγαλύτερες. Η δυνατότητα αποθήκευσης και διάθεσης εξοπλισμού εντός του λιμανιού για την αντιμετώπιση της πετρελαιοκηλίδας μαζί με ένα σχέδιο έκτακτης ανάγκης για την αντιμετώπιση μιας διαρροής πετρελαίου στη θάλασσα και αντίστοιχα εκπαιδευμένου προσωπικού μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην έκταση και την εξέλιξη της πετρελαιοκηλίδας. Ανάλογα με τη φύση του πετρελαίου που διέρρευσε, πρέπει να λαμβάνονται προληπτικά μέτρα εντός του λιμένα για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου ανάφλεξης ή έκρηξης μέσα σε αυτό. (International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2011)



Εικόνα 3.17 Καθαρισμός πλοίου από ειδικό συνεργείο (International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2011)

- **Παράκτια κατασκευαστικά έργα και ναυπηγικές βιομηχανίες**

- Βιομηχανικές εισροές θαλάσσιου νερού (όπως σε εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας)



Εικόνα 3.18 Η εισροή νερού πρέπει να προστατευθεί προκειμένου το πετρέλαιο να μην επηρεάσει τις διατάξεις ανταλλαγής θερμότητας κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε παύση της παραγωγής καθώς είναι δύσκολο να καθαριστεί (**International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2011**)

- Διατάξεις αφαλάτωσης
- Παραγωγή αλατιού-αλυκές

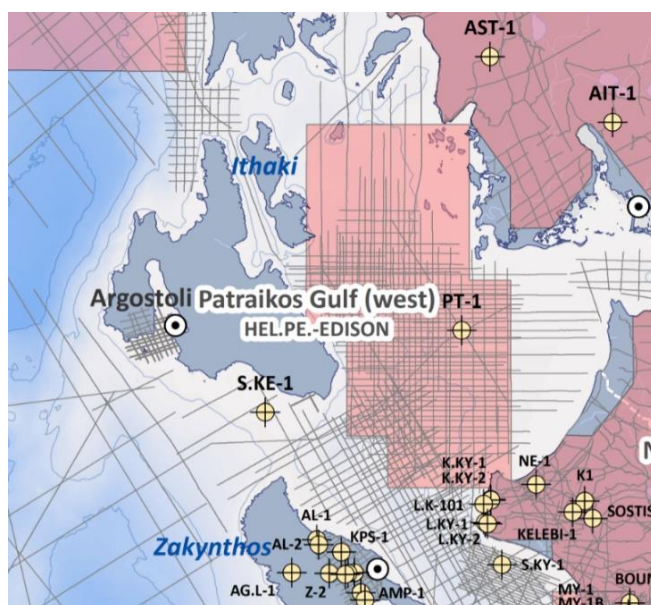


Εικόνα 3.19 Η παραγωγή αλατιού μπορεί να επηρεαστεί σε πολύ μεγάλο βαθμό αν το πετρέλαιο εισρεύσει στις αλυκές. Η άλμη παίρνει ένα ροζ χρώμα λόγω της ύπαρξης μικροάλγης (**International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2011**)

- Καλλιέργειες
- Παράκτιες κοινότητες, μνημεία πολιτισμού

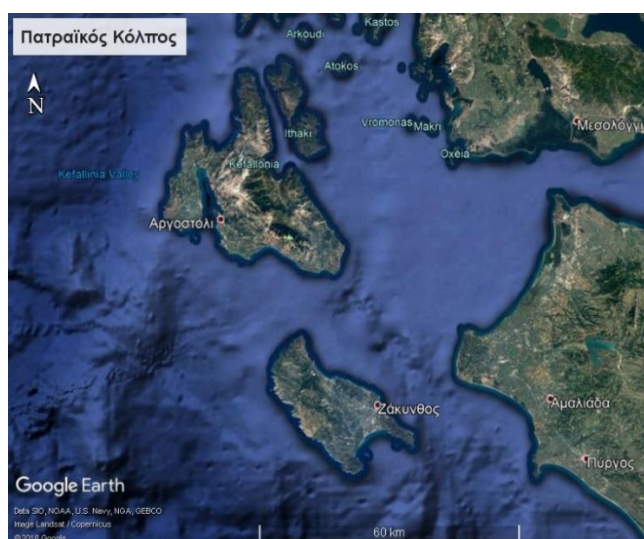
4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή που επιλέχθηκε για την προσομοίωση ατυχήματος διαρροής πετρελαίου στη θάλασσα και το σχηματισμό πετρελαιοκηλίδας είναι ο Πατραϊκός Κόλπος. Ο Πατραϊκός κόλπος, όπως το Ιόνιο και ο Κυπαρισσιακός Κόλπος βρίσκονται αυτή τη στιγμή στο επίκεντρο των ερευνητικών διαδικασιών για το ενδεχόμενο ανεύρεσης ικανών πετρελαϊκών κοιτασμάτων που θα δικαιολογούσαν την περαιτέρω αξιοποίησή τους.



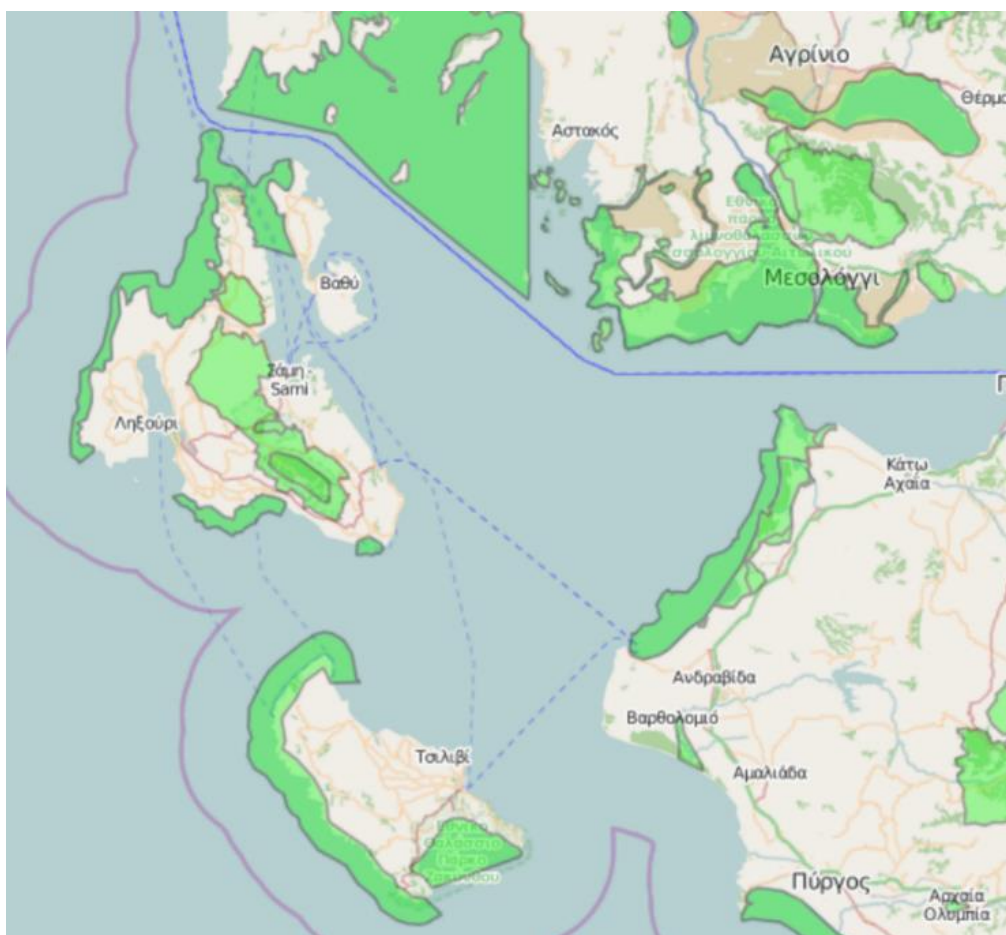
Εικόνα 4.1 Αναλυτική εικόνα της Περιοχής του Πατραϊκού κόλπου με σημειωμένες τις ερευνητικές γεωτρήσεις (Ελληνική Διαχειριστική Εταιρεία Υδρογονανθράκων (ΕΔΕΥ), 2019)

Η υπό εξέταση περιοχή καλύπτει το θαλάσσιο χώρο ανάμεσα στα νησιά Λευκάδα, Κεφαλληνία και Ζάκυνθο και τις δυτικές ακτές της Στερεάς Ελλάδας (Αιτωλοακαρνανία) και της Πελοποννήσου (Αχαΐα, Ηλεία). Η συνολική περιοχή ανήκει στον ευρύτερο χώρο του Ιονίου Πελάγους, το οποίο με τη σειρά του αποτελεί μια από τις μεγάλες λεκάνες της Ανατολικής Μεσογείου. Πλήθος τουριστικών περιοχών, τόπων αλιείας και προστατευόμενων περιοχών βρίσκονται εντός της περιοχής μελέτης. Σημαντικοί υδροβιότοποι όπως της Στροφυλίας (δυτική ακτή Πελοποννήσου), της παραλίας του Λαγανά που αποτελεί τόπο στον οποίο οι θαλάσσιες χελώνες καρέτα-καρέτα γεννούν τα αυγά τους το καλοκαίρι, του Πεταλά (δυτική ακτή Στερεάς Ελλάδας) και οι λιμνοθάλασσες του Μεσολογγίου και του Αιτωλικού.



Εικόνα 4.2 Περιοχή Μελέτης (Πατραϊκός κόλπος)

Η περίπτωση αξιοποίησης των πετρελαϊκών κοιτασμάτων του Πατραϊκού κόλπου αυξάνει το κίνδυνο πρόκλησης ατυχήματος διαρροής πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον. Τόσο στην φάση της έρευνας, όσο και στη φάση λειτουργίας μιας πλατφόρμας άντλησης πετρελαίου οι κίνδυνοι ενός ατυχήματος είναι υπαρκτοί. Σε συνδυασμό με την ύπαρξη σπάνιων και προστατευόμενων βιοτόπων (NATURA 2000) που περικλείουν την πιθανή περιοχή άντλησης πετρελαίου καθιστούν ένα τέτοιο ενδεχόμενο καταστροφικό συνολικά για το οικοσύστημα όλης της Δυτικής Ελλάδας και των Ιονίων νήσων. Επιβαρυντικό παράγοντα αποτελεί και η ύπαρξη ενός λιμανιού, όπως αυτό της Πάτρας, με μεγάλο φόρτο καθώς αποτελεί επιβατικό αλλά και εμπορικό κόμβο διασύνδεσης της Ελλάδας με την Ιταλία και την Κεντρική Ευρώπη δια θαλάσσης.

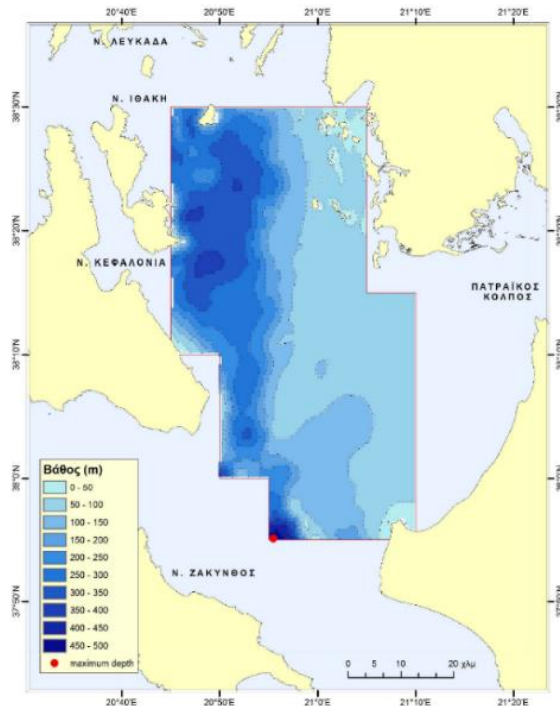


Εικόνα 4.3 Δίκτυο Περιοχών NATURA 2000 (GEODATA, 2019)

Τα κύρια χαρακτηριστικά της περιοχής τόσο του φυσικού και βιολογικού περιβάλλοντος όσο και των κοινωνικοοικονομικών δραστηριοτήτων που αναπτύσσονται σε αυτή παρουσιάζονται παρακάτω. Η παρουσίαση των χαρακτηριστικών αυτών βασίζεται στην Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΣΜΠΕ) που διενήργησε το ΕΛΚΕΘΕ το 2012. (ΕΛΚΕΘΕ-APC ADVANCED PLANNING CONSULTING, 2012)

4.1 ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ

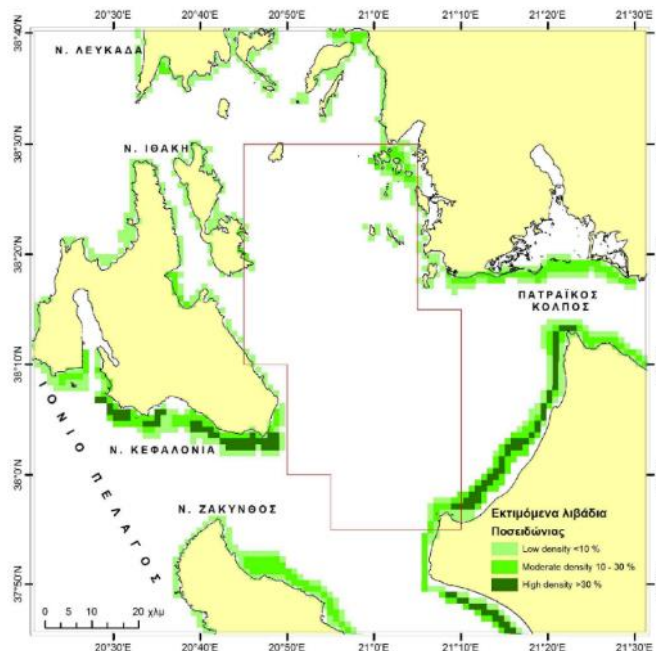
Η περιοχή μελέτης μεταξύ Πατραϊκού κόλπου και Κεφαλλονιάς καλύπτει μια επιφάνεια 2112 km² και χαρακτηρίζεται από ήπιο ανάγλυφο και βάθη <50 m, μέχρι περίπου το γεωγραφικό μήκος 21°. Το μέσο βάθος ανέρχεται σε 167 m. Δυτικότερα, στη θαλάσσια περιοχή της νήσου Ιθάκης εμφανίζεται μια λεκάνη βάθους >300 m με κύριο άξονα ανάπτυξης ΒΒΑ- ΝΝΔ. Προς το νότο, μεταξύ Κυλλήνης και βόρειας Ζακύνθου εμφανίζεται ένα μορφολογικό ύψωμα με βάθη <50 m. Στη συνέχεια, συναντάται η βαθύτερη λεκάνη που δημιουργείται μεταξύ Κυλλήνης και Ζακύνθου με μέγιστο βάθος 466 m. Και στις δύο λεκάνες οι κλίσεις των πρηνών είναι αυξημένες, ιδιαίτερα δε στη νότια λεκάνη του στενού Κυλλήνης-Ζακύνθου.



Εικόνα 4.4 Βαθυμετρία του πυθμένα περιοχής μεταξύ του Πατραϊκού Κόλπου και Κεφαλονιάς. Μέγιστο βάθος που σημειώνεται με κόκκινο τα 546 m (ΕΛΚΕΘΕ-APC ADVANCED PLANNING CONSULTING, 2012)

4.2 ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΑ ΧΛΩΡΙΔΑ

Η «Ποσειδώνια» (*Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile) είναι ενδημικό και κυρίαρχο φανερόγαμο της Μεσογείου. Χαρακτηρίζεται από υψηλή οικολογική αξία και επηρεάζει άμεσα ή έμμεσα μια πληθώρα οικονομικών δραστηριοτήτων (π.χ. αλιεία, τουρισμός, παράκτια ανάπτυξη). Η σημασία της στη δομή και λειτουργία των παραλιακών οικοσυστημάτων είναι τέτοιου βαθμού, ώστε να αναφέρεται ως «κατασκευαστής» οικοσυστημάτων και να προστατεύεται από την κοινοτική νομοθεσία (Οδηγία 92/43/ΕΚ) ως οικότοπος προτεραιότητας. Τα λιβάδια του *P. oceanica*, αποτελούν ενδιαίτημα και εκκολαπτήριο πολλών θαλάσσιων ζωικών και φυτικών οργανισμών.



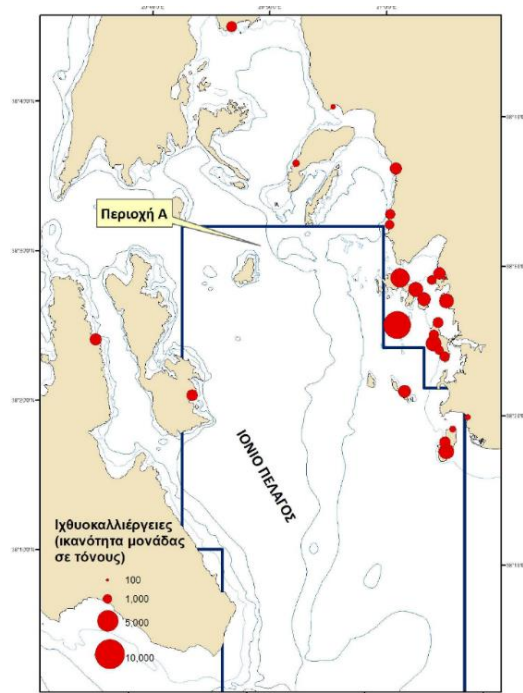
Εικόνα 4.5 Εκτίμηση της κατανομή των λιβαδιών Ποσειδωνίας στην περιοχή μελέτης (ΕΛΚΕΘΕ-APC ADVANCED PLANNING CONSULTING, 2012)

4.3 ΑΛΙΕΥΤΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης αποτελεί ένα από τα κύρια αλιευτικά πεδία της Ελλάδος, στο οποίο ασκούνται σχεδόν όλοι οι τύποι αλιείας. Τα βάθη, στην περιοχή η οποία εκτείνεται εξωτερικά του Πατραϊκού Κόλπου, είναι μικρότερα των 400 μέτρων. Στην περιοχή ανταγωνίζονται η παράκτια (δίχτυα, παραγάδια, παγίδες) με τη μέση αλιεία (μηχανότρατες, γριγρί). Καταγράφεται επίσης αλιευτική προσπάθεια από παράκτια σκάφη μεγάλου μήκους (>12 μ.) και χωρητικότητας, τα οποία στοχεύουν σε μεγάλα πελαγικά (τόνο, ξιφία) ή σε βενθικά είδη (μπακαλιάρο).

4.4 ΥΔΑΤΟΚΑΛΛΙΕΡΓΙΕΣ

Η μεγάλη σπουδαιότητα του τομέα της αλιείας και των υδατοκαλλιεργειών στην Ελλάδα είναι πολύ μεγαλύτερη από τη συνεισφορά της το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν της χώρας, διότι όχι μόνο παρέχει ένα σημαντικό μέρος των διατροφικών στοιχείων που απαιτούνται για κατανάλωση, αλλά συμβάλλει σημαντικά στον οικονομικό και κοινωνικό ιστό πολλών παράκτιων και νησιωτικών κοινοτήτων. Ο τομέας της αλιείας η οποία περιλαμβάνει την θαλάσσια αλιεία, την υδατοκαλλιέργεια και τη μεταποίηση και εμπορία προϊόντων αλιείας συμβάλλει στη διατήρηση της κοινωνικής και οικονομικής συνοχής μεγάλων παράκτιων περιοχών και νησιών, εξασφαλίζει την παραγωγή ζωικών πρωτεϊνών υψηλής βιολογικής αξίας, χρησιμοποιεί τους τοπικούς πόρους βιώσιμα και διασφαλίζει την απασχόληση.



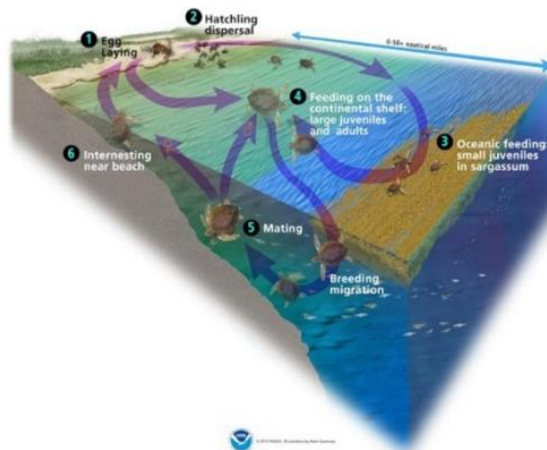
Εικόνα 4.6 Θέση και δυναμικότητα μονάδων ιχθυοκαλλιέργειας (ΕΛΚΕΘΕ-APC ADVANCED PLANNING CONSULTING, 2012)

4.5 ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΟΜΕΝΑ ΕΙΔΗ

Μια σειρά από σπάνια είδη τόσο πτηνών όσο και άλλων ζώων βρίσκουν καταφύγιο στην ευρύτερη περιοχή του Πατραϊκού κόλπου, είτε στην Λιμνοθάλασσα του Μεσολογγίου είτε στην προστατευόμενη περιοχή του Θαλασσιού Πάρκου της Ζακύνθου. Στην παρούσα εργασία δεν γίνεται εκτενής αναφορά σε αυτά αλλά προκειμένου να τονιστεί η σημασία τους και ο κίνδυνος που διατρέχουν από μια πιθανή διαρροή πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον, αναφέρονται ενδεικτικά τα πιο σημαντικά.

Η θαλάσσια χελώνα Καρέττα (*Caretta caretta*), σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα στοιχεία της IUCN αναφέρεται ως είδος υπό εξαφάνιση παγκοσμίως. Επίσης είναι το μοναδικό είδος που ωτοκεί στις ελληνικές παραλίες, ενώ παράλληλα η Ελλάδα αποτελεί την χώρα με τις περισσότερες φωλιές αυτού του είδους σε ολόκληρη τη Μεσόγειο.

Το 1999 ίδρυθηκε το Εθνικό Θαλάσσιο Πάρκο Ζακύνθου, το πρώτο Εθνικό Πάρκο που προστατεύει τις παραλίες ωτοκίας θαλάσσιων χελωνών στη Μεσόγειο. Ο στόχος του ΕΘΠΖ είναι να προστατεύσει τις ακτές του Κόλπου του Λαγανά και μια ζώνη γης που περιβάλλει τις παραλίες ωτοκίας, τον υγρότοπο της λίμνης Κεριού, τις δύο νησίδες (Μαραθωνήσι και Πελούζο), που βρίσκονται μέσα στον Κόλπο, όπως επίσης και τις Νήσους Στροφάδες, οι οποίες βρίσκονται 40 περίπου μίλια νότια της Ζακύνθου. Συνολικά η Προστατευόμενη περιοχή περιλαμβάνει 90χλμ² θαλάσσιας και 36χλμ² χερσαίας περιοχής. Υπάρχουν έξι παραλίες ωτοκίας στον Κόλπο του Λαγανά, συνολικού μήκους 5,5 χιλιομέτρων: το Μαραθωνήσι, ο Ανατολικός Λαγανάς, το Καλαμάκι, τα Σεκάνια, η Δάφνη, και ο Γέρακας. Μέχρι το 2003, Φορείς Διαχείρισης ιδρύθηκαν σε 26 προστατευόμενες περιοχές, τρεις εκ των οποίων συμπεριλαμβάνουν βιότοπους Καρέττα. Συγκεκριμένα, οι λιμνοθάλασσες του Κόλπου του Αμβρακικού και του Μεσολογγίου, στη Δυτική Ηπειρωτική Ελλάδα, έχουν σημαντικές περιοχές διατροφής της Καρέττα, ενώ οι υγρότοποι της Στροφιλιάς-Κοτυχίου στη Δ. Πελοπόννησο περιέχουν μια περιοχή μέτριας ωτοκίας.

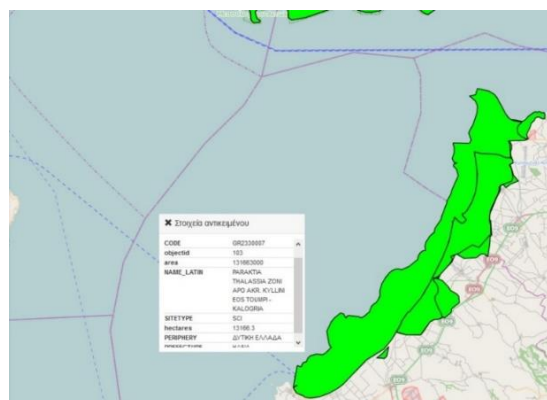


Εικόνα 4.7 Δραστηριότητα θαλάσσιων χελωνών (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2016)

4.6 ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΟΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

Στην περιοχή υπάρχουν πολλές τουριστικές, αλιευτικές και προστατευόμενες από το περιβάλλον περιοχές.

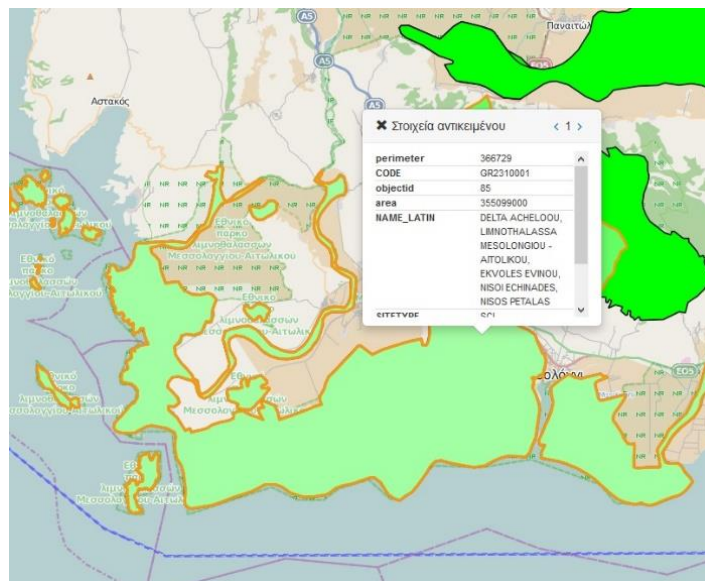
1. Βορειοδυτικά της Πελοποννήσου με υπουργική απόφαση έχουν κηρυχτεί προστατευόμενες οι χερσαίες υδάτινες και θαλάσσιες περιοχές της **λιμνοθάλασσας Κοτυχίου του δάσους Στροφιλιάς** και της ευρύτερης περιοχής τους όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα και χαρακτηρίστηκαν ως "Εθνικό πάρκο υγροτόπων Κοτυχίου - Στροφιλιάς". Το Εθνικό Πάρκο προστατεύεται ως Υγρότοπος Διεθνούς Σημασίας από τη σύμβαση RAMSAR και περιλαμβάνει τέσσερις περιοχές του δικτύου «NATURA 2000», με τις δύο πρώτες να έχουν χαρακτηριστεί Ζώνες Ειδικής Προστασίας



Εικόνα 4.8 Προστατευόμενη Περιοχή Καλογριάς (GEODATA, 2019)

2. Το Εθνικό Πάρκο βρίσκεται στο νοτιοδυτικό άκρο της Στερεάς Ελλάδας, εκεί όπου ο Πατραϊκός Κόλπος συναντά το Ιόνιο Πέλαγος και εκβάλλουν οι ποταμοί Εύηνος και Αχελώος. Σε αυτή τη περιοχή εντάσσονται λιμνοθάλασσες, χερσαίες και ποτάμιες περιοχές του νότιου τμήματος του Νομού Αιτωλοακαρνανίας και το νησιώτικο σύμπλεγμα των Εχινάδων του Νομού Κεφαλληνίας που διακρίνονται για τη μεγάλη βιολογική, οικολογική, αισθητική, επιστημονική, γεωμορφολογική και περιβαλλοντική τους αξία. Στο σύμπλεγμα αυτό διακρίνονται ποτάμιες και παραποτάμιες περιοχές, λιμνοθάλασσες, γλυκόβαλτοι, αλμυρόβαλτοι, λασποτόπια, υδροχαρή δάση.
3. Η **λιμνοθάλασσα Μεσολογγίου - Αιτωλικού** είναι η μεγαλύτερη της χώρας μας και από τις μεγαλύτερες της Μεσογείου, έχει έκταση 170 km² και όγκο περίπου 0.17 km³. Το διαμορφωμένο σύμπλεγμα λιμνοθαλασσών στο οποίο περιλαμβάνει έξι ενότητες:
 - Λιμνοθάλασσα Βορείου Διαύλου Κλείσοβας
 - Λιμνοθάλασσα Κλείσοβα
 - Κεντρική λιμνοθάλασσα, (όπου στο μέτωπο της υπάρχουν τα ιχθυοτροφεία: Τουρλίδα, Βασιλάδι, Σχοινιάς και Προκοπάνιστος)
 - Λιμνοθάλασσα Θολής
 - Λιμνοθάλασσα Παλαιοποτάμου
 - Λιμνοθάλασσα Αιτωλικού (Κανάλι Αιτωλικού)

Ολόκληρο το σύμπλεγμα των λιμνοθαλασσών προστατεύεται από τη διεθνή σύμβαση RAMSAR για τους υδροβιότοπους. Η περιοχή του Αιτωλικού βόρεια έχει μέσο βάθος τα 12m και μέγιστο τα 33m, ενώ η λιμνοθάλασσα του Μεσολογγίου έχει μέσο βάθος τα 0.5m και μέγιστο τα 2.5m. Οι ανθρώπινες παρεμβάσεις έχουν αλλάξει σημαντικά τα γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά, με πολλαπλές επιπτώσεις στους βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες της περιοχής.



Εικόνα 4.9 Προστατευόμενη περιοχή λιμνοθάλασσας Μεσολογγίου (GEODATA, 2019)

4.7 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

Για την παρούσα εκτίμηση επιπτώσεων, αναγνωρίζονται τρεις φάσεις των υπεράκτιων δραστηριοτήτων για τους υδρογονάνθρακες:

Αναζήτηση: αφορά στις δραστηριότητες για τον εντοπισμό ή/και την αξιολόγηση/εκτίμηση της δυνατότητας εξεύρεσης υδρογονάνθρακων με μεθόδους εκτός των γεωτρήσεων. Η εν λόγω έρευνα περιλαμβάνει σεισμικές έρευνες, γεωλογικές και γεωχημικές δειγματοληψίες, ηλεκτρομαγνητικές έρευνες και τηλεπισκόπηση.

Εξερεύνηση: αφορά σε διαδικασίες σε ένα ή περισσότερα διερευνητικά φρεάτια ανά αδειοδοτούμενο ερευνητικό τεμάχιο, ώστε να καθορισθεί αν υπάρχουν εμπορικά εκμεταλλεύσιμες ποσότητες υδρογονανθράκων.

Εκμετάλλευση (ανάπτυξη και παραγωγή): αφορά στην διαδικασία εμπορικής εκμετάλλευσης των υδρογονανθράκων. Οι κύριες δραστηριότητες περιλαμβάνουν την διάνοιξη των φρεατίων ανάπτυξης, την εγκαθίδρυση των εγκαταστάσεων παραγωγής, την εγκαθίδρυση εγκαταστάσεων εξαγωγής όπως το δίκτυο σωληνώσεων, την λειτουργία αυτών των εγκαταστάσεων και την τελική αποσυναρμολόγηση αυτών

4.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της πετρελαιοκηλίδας, τις ωκεανογραφικές και μετεωρολογικές συνθήκες, και την αποτελεσματικότητα των μέτρων αντιμετώπισης, μια διαρροή αργού πετρελαίου θα μπορούσε να έχει σημαντικές περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις, επηρεάζοντας δυσμενώς την ποιότητα του θαλασσινού νερού, την ποιότητα της ατμόσφαιρας, τις βενθικές βιοκοινωνίες, τα θαλάσσια θηλαστικά, τις θαλάσσιες χελώνες, τα θαλάσσια και παράκτια πτηνά, τους παράκτιους βιότοπους, τις προστατευόμενες περιοχές, την αναψυχή και τον τουρισμό, και τις παράκτιες κατοικημένες περιοχές. Οι δραστηριότητες αντιμετώπισης και καθαρισμού τόσο στην παράκτια ζώνη όσο και στην ανοιχτή θάλασσα θα μπορούσαν να παρεμποδίσουν τις αλιευτικές και ναυτιλιακές δραστηριότητες.

• **Υφιστάμενα μέτρα ελέγχου:** Σύμφωνα με τη διεθνή σύμβαση για την πρόληψη της ρύπανσης από πλοία του 1973 (MARPOL), τα πλοία καθώς οι εγκαταστάσεις γεώτρησης απαιτείται να έχουν σε ισχύ ένα σχέδιο έκτακτης ανάγκης για την αντιμετώπιση ρύπανσης από πετρέλαιο (Shipboard Oil Pollution and Emergency Plan, SOPEP). Το σχέδιο αυτό, θα πρέπει να περιέχει τις απαραίτητες διαδικασίες και τις ενέργειες που απαιτούνται για να ελέγξουν πιθανές διαρροές, και τα βήματα που απαιτούνται για την αποτελεσματική αντιμετώπισή τους. Πριν από την έναρξη οποιωνδήποτε ενεργειών για την διάνοιξη γεωτρήσεων, ο κάτοχος άδειας πρέπει να προετοιμάζει και υποβάλλει στο αναθέτον Υπουργείο προς αξιολόγηση και έγκριση το 'Σχέδιο έκτακτης ανάγκης' για τις πιθανές διαρροές υδρογονανθράκων, υπό μορφή έκθεσης Σε περίπτωση διαρροής, ο κάτοχος άδειας γεώτρησης πρέπει να εφαρμόσει αμέσως το 'Σχέδιο έκτακτης ανάγκης'.

• **Συνιστώμενα μέτρα περιορισμού των επιπτώσεων:** Δεν συστήνονται πρόσθετα μέτρα για μετρίασμό. Εντούτοις, συστήνεται ως πρόσθετο μέτρο η προσομοίωση της τροχιάς κίνησης πετρελαιοκηλίδων που θα βοηθήσει στην πρόβλεψη της διασποράς σε περίπτωση διαρροής πετρελαίου σε διάφορα σημεία της θέσης που έχει αδειοδοτηθεί για να λάβουν χώρα γεωτρήσεις, με σκοπό τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών πόρων που ενδεχομένως θα επιβαρυνθούν, και τον καθορισμό των ελάχιστων χρόνων απόκρισης για τον προγραμματισμό του 'Σχεδίου Έκτακτης Ανάγκης'.

Η περαιτέρω εφαρμογή του μοντέλου, για διαφορετικές μετεωρολογικές και ωκεανογραφικές συνθήκες και εποχές, όπως επίσης και διαφορετικές θέσεις διαρροών θα παράσχουν σημαντική βοήθεια στην πληρέστερη κατανόηση της χωρικής συμπεριφοράς των πιθανών διαρροών στην περιοχή αδειοδότησης, καθώς επίσης και στον καθορισμό των ελάχιστων χρόνων απόκρισης.

Η ΣΠΜΕ προτείνει την χρήση του μοντέλου ΠΟΣΕΙΔΩΝ για να προσδιοριστούν οι πιθανές κατευθύνσεις των διαρροών στην περιοχή αδειοδότησης, χρησιμοποιώντας εποχιακά μετεωρολογικά και ωκεανογραφικά στοιχεία. Τα αποτελέσματα να χρησιμοποιηθούν για να καθορισθεί η πιθανή επίπτωση των διαρροών στην περιοχή, ενδεχομένως και των επηρεαζόμενων περιβαλλοντικών πόρων, και η εκτίμηση του χρόνου που χρειάζεται να φθάσουν οι εν λόγω διαρροές στις ακτές της Δυτικής Πελοποννήσου, της Δυτικής Στερεάς Ελλάδας και των Ιονίων νήσων. (ΕΛΚΕΘΕ-APC ADVANCED PLANNING CONSULTING, 2012)

5. ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ OSCAR

5.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Το OSCAR προσομοιώνει την συμπεριφορά και την εξέλιξη μιας συνεχούς ή στιγμιαίας διαρροής πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον. Συνυπολογίζει τις διεργασίες γήρανσης της πετρελαιοκηλίδας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλεφθούν οι συνέπειες της διαρροής στο περιβάλλον, καθώς και την επιρροή των διαφόρων μεθόδων αντιμετώπισης στην ίδια την πετρελαιοκηλίδα. Οι ακόλουθες διεργασίες γήρανσης της λαμβάνονται υπόψη στο μαθηματικό μοντέλο του OSCAR:

- Ολίσθηση (Drifting)
- Εξάπλωση (Spreading)
- Εξάτμιση (Evaporation)
- Φωτο-οξειδωση (Photo-oxidation)
- Γαλακτωματοποίηση (Emulsification)
- Φυσική διασπορά (Natural Dispersion)
- Διάλυση (Dissolution)
- Αποικοδόμηση (Degradation)
- Αλληλεπιδράσεις με το ίζημα (Sediment interactions)
- Προσαγιάλωση (Stranding)

Το OSCAR ακολουθεί τη Lagrangian προσέγγιση, στην οποία μεμονωμένα σωματίδια πετρελαίου συνθέτουν την κινούμενη πετρελαιοκηλίδα. Στην περίπτωση που εξετάζεται, τα σωματίδια απελευθερώνονται λόγω υποθαλάσσιας έκρηξης δημιουργώντας ένα πλούμιο το οποίο οδηγείται μακριά λόγω του πεδίου ροής. Οι τροχιές των σωματιδίων καταγράφονται και οι ιδιότητες τους υπολογίζονται συναρτήσει του χρόνου, ο νόμος κίνησης του Νεύτωνα και της διατήρησης της μάζας εφαρμόζονται απευθείας σε κάθε σωματίδιο. Τα σωματίδια του πετρελαίου μετακινούνται από τις μέσες ταχύτητες της ροής (λόγω των ρευμάτων παλίρροιας και ανέμου), ταυτόχρονα διασπώνται λόγω του στροβιλισμού (τύρβης) της ροής. Στο μοντέλο, αυτή η τυχαία διεργασία διασποράς αναπαρίσταται με έναν αλγόριθμο που βασίζεται στα σωματίδια (particle-based algorithm) που χρησιμοποιεί τιμές διασποράς που υπολογίζονται σύμφωνα με τον (Reed M. et al, 2002) συνεπώς, δύο προσομοιώσεις με τα ίδια δεδομένα εισαγωγής δεν θα οδηγήσουν στα ακριβώς ίδια αποτελέσματα. Στην περιγραφή της μετακίνησης των σωματιδίων στην επιφάνεια της θάλασσας λόγω του ανέμου, ο συντελεστής ολίσθησης ισούται με το 3.5 % (Lange P. et al, 1978). Στην παρούσα εργασία, όπου η περιοχή μελέτης είναι επαρκώς προφυλαγμένη από κυματισμούς, αγνοήθηκε η επιρροή των κυμάτων, η οποία αναμενόταν να ήταν μικρή. Παρόλα αυτά, σε διαφορετικές περιπτώσεις η επιρροή των ρευμάτων Stokes μπορεί να είναι εξαιρετικά σημαντική. Σημειώνεται, ότι σε συγκεκριμένα σημεία των παράκτιων περιοχών εντός του πλέγματος υπολογισμού του OSCAR, που δεν καλύπτονταν από τα υδροδυναμικά δεδομένα που αντλήθηκαν από το SANI2 και συνεπώς δεν υπήρχαν δεδομένα ταχύτητας, η μετακίνηση αγνοείται και μόνο τα ρεύματα λόγω ανέμου και η τυχαία διασπορά λαμβάνονται υπόψη.

Σε κάθε χρονικό βήμα των υπολογισμών του OSCAR τα σωματίδια του πετρελαίου μετακινούνται λόγω μεταφοράς (advection) και διασποράς (dispersion) ενώ την ίδια στιγμή υφίστανται μια σειρά από διεργασίες γήρανσης. Αυτές οι διεργασίες συντελούν στην μεταφορά μάζας στα 5 μέρη του μοντέλου, τα οποία είναι η ατμόσφαιρα, η επιφάνεια του νερού, η υδάτινη στήλη, το ίζημα του πυθμένα και η ακτογραμμή (Reed M. et al, 1995). Σε κάθε χρονικό βήμα του αρχείου εξόδου παρακολουθείται το ισοζύγιο μάζας (mass balance) σε τόνους πετρελαίου σε κάθε ξεχωριστό μέρος που αναφέρθηκε παραπάνω.

Από τον χρήστη μπορεί να οριστεί ο αριθμός των σωματιδίων που θα αντιπροσωπεύουν τα υγρά σωματίδια στο μοντέλο, όπως επίσης και ο αριθμός τους που θα αντιπροσωπεύει τη διαλυμένη μάζα στην στήλη νερού. Επίσης ένα χαρακτηριστικό του OSCAR είναι ότι μπορεί να δημιουργηθεί από το χρήστη 3D πλέγμα με τον ορισμό ενός συγκεκριμένου αριθμού επιπέδων κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας με καθορισμένο πάχος, δηλαδή να γίνει εξαγωγή αποτελεσμάτων σε παραπάνω

επίπεδα από αυτό της επιφάνειας. Όσον αφορά την επιρροή του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας, ο συντελεστής ολίσθησης που θα οριστεί εξαρτάται από το αρχείο των ρευμάτων, αν αυτά είναι δοσμένα ως μέσα προς το βάθος τότε ο συντελεστής ορίζεται 3.5%. Τέλος, τα αποτελέσματα που δίνονται από το OSCAR μπορεί να είναι αρχεία της μορφής Netcdf όπως είναι και τα αρχεία των δεδομένων που μπορεί να δεχτεί (ανεμολογικά, ρεύματα).

5.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ OSCAR

Η σύγκριση του μοντέλου OSCAR με το MEDSLIK βασίστηκε στην εργασία του Παναγιώτη Μακατούνη που εξετάζει τη διαρροή πετρελαίου στον Πατραϊκό κόλπο και τις συνέπειες στο παράκτιο περιβάλλον (Panagiotis Makatounis, Jorgen Skancke, Evanthia Florou, Anastasios Stamou, Per Johan Brandnvik, 2017). Τα στοιχεία εισαγωγής στο μοντέλο είναι τα εξής:

Ανεμολογικά

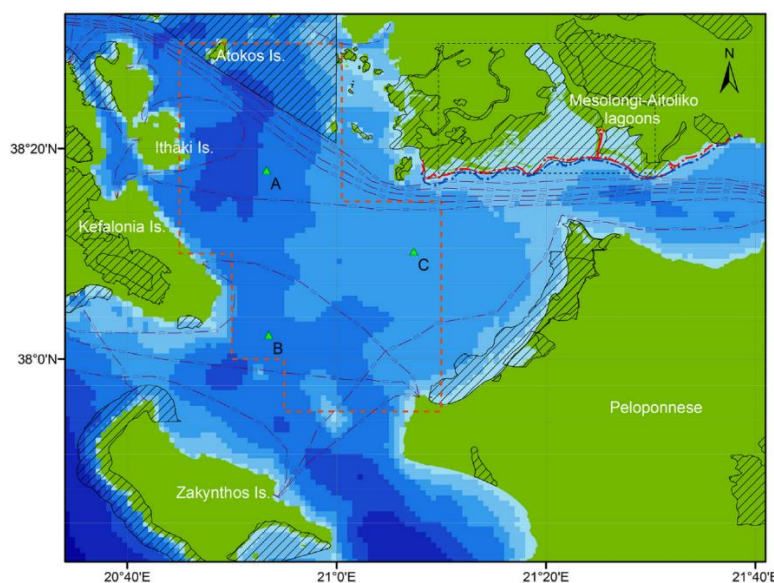
Τα δεδομένα αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων του ΕΚΠΑ (Σκίρων) (ΕΚΠΑ-openskiron, 2019) για την περίοδο 20-30 Νοέμβρη 2015 και εισήχθησαν στο OSCAR με χρονικό βήμα 1 ώρας. Τα δεδομένα είναι μεταβλητά ως προς τη θέση και το χρόνο, και δίνονται σε απόσταση 10m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Υδροδυναμικά

Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο OSCAR αντλήθηκαν, από το μοντέλο κυκλοφορίας SANI2 (Southern Adriatic-Northern Ionian) που αναπτύχθηκε από το ΕΛΚΕΘΕ, και αποτελούν δεδομένα πρόβλεψης μοντέλων (ΕΛΚΕΘΕ (HCMR), 2019) και εισήχθησαν στο OSCAR με χρονικό βήμα 1 ώρας. Τα δεδομένα είναι μεταβλητά ως προς τη θέση και το χρόνο και εισήχθησαν για 11 συνολικά επίπεδα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Στοιχεία διαρροής

Η ημερομηνία της διαρροής ορίστηκε 20/11/2015 στις 15:00 ώρα Ελλάδος (13:00 UTC) με διάρκεια 5 ημέρες μέχρι τις 25/11/2015 15:00 ώρα Ελλάδος (13:00 UTC). Η διάρκεια της προσομοίωσης είναι συνολικά 10 ημέρες. Ο ρυθμός διαρροής πετρελαίου είναι $10000\text{m}^3/\text{day}$ με συνολική ποσότητα που διέρρευσε τα $50000\text{m}^3/\text{day}$. Η διάμετρος της διαρροής είναι 0.3m σε βάθος 70m και 1m πάνω από τον πυθμένα της θάλασσας. Η θέση της διαρροής είναι το σημείο C όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1 με συντεταγμένες (Lat:38.10, Long:28.05). Ενώ ο τύπος πετρελαίου που χρησιμοποιήθηκε είναι Oseberg Blend [a low viscosity (5 cP at 40 C), light paraffinic oil with API equal to 37.2 and specific gravity equal to 0.839.]



Εικόνα 5.1 Η περιοχή μελέτης, το σημείο C ορίζεται ως το σημείο της διαρροής (Panagiotis Makatounis, Jorgen Skancke, Evanthia Florou, Anastasios Stamou, Per Johan Brandnvik, 2017)

6. ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ MEDSLIK

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το μαθηματικό μοντέλο MEDSLIK είναι ένα λογισμικό πρόβλεψης τροχιάς και μεταφοράς μιας πετρελαιοκηλίδας στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, βασικό του πλεονέκτημα είναι η ευκολία στη χρήση (R.W Lardner B.A, 2004,2011). Το λογισμικό αποτελείται από τρία μέρη

- Μια γραφική διεπαφή εισόδου (interface input), μέσω της οποίας ο χρήστης μπορεί να εισάγει τα δεδομένα σχετικά με τη διαρροή του πετρελαίου καθώς και τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον
- Το μέρος το οποίο επιλέγεται για την εκτέλεση των υπολογισμών (run) που προσομοιώνουν τη διαρροή και τη συμπεριφορά της με ταυτόχρονη εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχεία εξόδου
- Το γραφικό περιβάλλον στο οποίο προβάλλονται τα αποτελέσματα (output) προκειμένου ο χρήστης να εξάγει τα συμπεράσματα σχετικά με την προσομοίωση

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: το που θα φτάσει το πετρέλαιο (τοποθεσία), το πόσο χρόνο θα κάνει για να φτάσει στην περιοχή ενδιαφέροντος (χρονική διάρκεια) καθώς και την κατάσταση του όταν φτάσει εκεί (εξέλιξη-γήρανση). Τα δύο πρώτα ερωτήματα, τα οποία είναι και τα πιο κρίσιμα, εξαρτώνται από την αξιοπιστία και την πληρότητα των δεδομένων εισόδου των υδροδυναμικών στοιχείων. Για το τρίτο ερώτημα που αφορά την κατάσταση του πετρελαίου, σημαντική είναι η χρήση αξιόπιστων αλγορίθμων γήρανσης και εξέλιξης του ρυπαντή εντός του αποδέκτη.

Το MEDSLIK έχει τη δυνατότητα εισαγωγής δεδομένων από παλιότερες προβλέψεις αυτών των μεταβλητών που αναπτύσσονται στο πλαίσιο του προγράμματος MFS (Mediterranean Forecasting System) για όλη τη Μεσόγειο Θάλασσα και τη Λεβαντίνη θάλασσα και τις υπό-περιοχές τους. Σε περίπτωση που αυτά τα δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα, 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 για τα δεδομένα που αφορούν τον άνεμο μπορούν να ληφθούν από το πρόγραμμα SKIRON του Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, τα οποία είναι πιο αξιόπιστα για την ανατολική Μεσόγειο (R.W Lardner B.A, 2004,2011). Παρόλα αυτά ο χρήστης έχει την δυνατότητα να εισάγει δεδομένα χειροκίνητα.

Τα σωματίδια μιας πετρελαιοκηλίδας μεταφέρονται 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 όπως και άλλες μεταβλητές σαν τη θερμοκρασία του νερού και την αλατότητα του.

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 (δεξιόστροφη)

της διεύθυνσης της ταχύτητας του ανέμου. Πρακτικά, τα σωματίδια του πετρελαίου ολισθαίνουν σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας λόγω της επίδρασης του ανέμου.

Πέρα από την μεταφορά από το νερό και τον άνεμο, τα σωματίδια κινούνται λόγω άλλων δύο μηχανισμών. Αρχικά ένα πυκνό στρώμα πετρελαίου εξαπλώνεται στην επιφάνεια της θάλασσας λόγω της δράσης της βαρύτητας. Αυτός ο μηχανισμός αν και στην αρχική φάση της διαρροής είναι κυρίαρχος, δεν είναι τόσο σημαντικός ύστερα από μερικές ώρες. Στη συνέχεια 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 Lagrangian 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 να 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 τμήμα που αντιπροσωπεύει την ακτογραμμή. Αν έρθει σε επαφή με περισσότερα από ένα, το πλησιέστερο στο αρχικό σημείο δεσμεύεται, 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 επιστρέψει πίσω στο νερό. Ο υπολογισμός της πιθανότητας αυτής παρουσιάζεται στην παράγραφο 6.2.2. 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 υφίστανται αλλαγές οι οποίες έχουν να κάνουν με φυσικές διεργασίες οι οποίες επηρεάζουν το πετρέλαιο. Τα ελαφρύτερα κλάσματα πετρελαίου εξατμίζονται και τα εναπομείναντα αρχίζουν να απορροφούν νερό ή να γαλακτωματοποιούνται. Αυτές οι διεργασίες 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 αντίστοιχη πυκνότητα. 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 χρονικό βήμα, 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, αλλά κυρίως για τον εντοπισμό ανθρώπων που μπορεί να χάθηκαν στην θάλασσα. Ωστόσο, αυτή η δυνατότητα είναι επίσης χρήσιμη για τον εντοπισμό της διαδρομής του κέντρου της πετρελαιοκηλίδας.

6.2 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΕΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

6.2.1 ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΥΣΗ ΤΗΣ ΚΗΛΙΔΑΣ (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 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 α της ταχύτητας του ανέμου και σε μία διεύθυνση που σχηματίζει συγκεκριμένη δεξιόστροφη γωνία β με τη διεύθυνση του ανέμου. (R.W Lardner B.A, 2004,2011)

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

$$X'_i = X_i + \left\{ u(X_i, Y_i, Z_i) + a(W_x \cos \beta + W_y \sin \beta) \right\} \tau + \Delta X_i^{(d)} \quad (6.1)$$

$$Y'_i = Y_i + \left\{ v(X_i, Y_i, Z_i) + a(-W_x \sin \beta + W_y \cos \beta) \right\} \tau + \Delta Y_i^{(d)} \quad (6.2)$$

$$Z'_i = Z_i + \Delta Z_i^{(d)} \quad (6.3)$$

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:

$$\Delta X_i^{(d)} = [2\text{rand}(0,1) - 1] \sqrt{6K_h \tau} \quad (6.4)$$

$$\Delta Y_i^{(d)} = [2\text{rand}(0,1) - 1] \sqrt{6K_h \tau} \quad (6.5)$$

$$\Delta Z_i^{(d)} = [2\text{rand}(0,1) - 1] \sqrt{6K_v \tau} \quad (6.6)$$

Όπου:

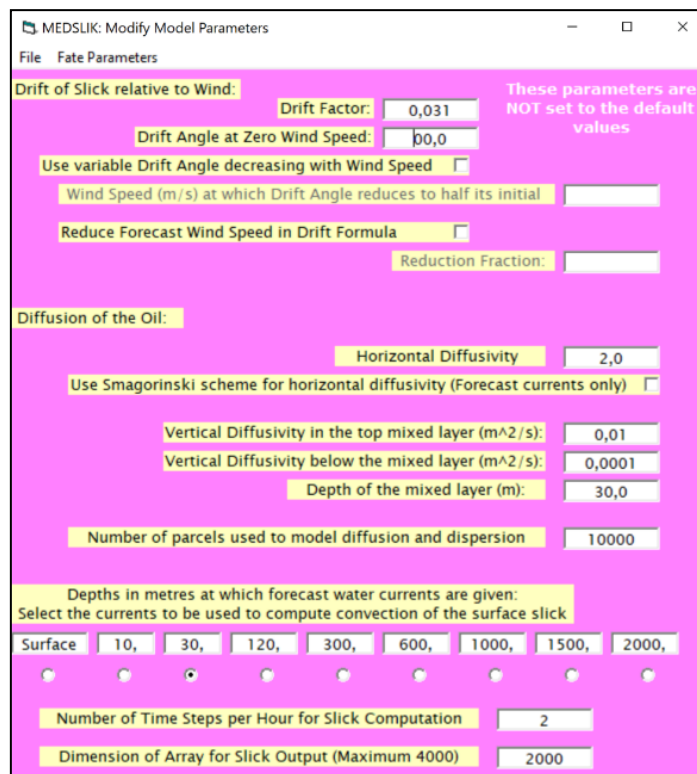
- K_h και K_v είναι οι συντελεστές της οριζόντιας και της κάθετης διάχυσης. Στους υπολογισμούς που έγιναν στην παρούσα θεωρήθηκε $K_h=2 \text{ m}^2/\text{sec}$ και $K_v=0.01 \text{ m}^2/\text{sec}$ στο στρώμα ανάμιξης και $K_v=0,0001 \text{ m}^2/\text{sec}$ κάτω από το στρώμα ανάμιξης.
- $\text{rand}(0,1)$ 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, 2004,2011)

$$\text{r.m.s.}\{\Delta X^{(d)}, \Delta Y^{(d)}, \Delta Z^{(d)}\} = \{\sqrt{2K_h\tau}, \sqrt{2K_h\tau}, \sqrt{2K_v\tau}\} \quad (6.6)$$

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, 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 β θεωρείται πολύ μεγάλη για την προσομοίωση μιας πετρελαιοκηλίδας, το μοντέλο χρησιμοποιεί ως προεπιλογή το $\beta=0^\circ$.



Εικόνα 6.1 Μοντέλο μεταφοράς και διάχυσης του MEDSLIK

6.2.2 ΠΡΟΣΑΙΓΙΑΛΩΣΗ (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, 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:

$$\text{Πιθανότητα επαναφοράς} = 1 - 0.5^{t/T_w} \quad (6.7)$$

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:

$$\text{rand}(0,1) < \text{Πιθανότητα επαναφοράς} \quad (6.8)$$

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:

$$\text{Ποσοστό προσκόλλησης} = 1 - 2^{-t/T_s} \quad (6.9)$$

T_s : ο χρόνος ημιζωής για την προσκόλληση στην ακτή

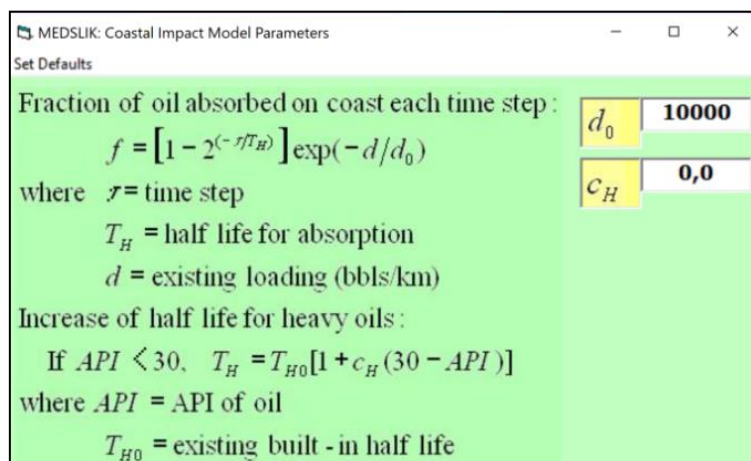
Η εμπειρία από την πετρελαιοκηλίδα του 2006 στο Λίβανο δείχνει ότι όταν η ποσότητα του πετρελαίου σε ένα τμήμα της ακτής είναι πολύ μεγάλη, ο ρυθμός προσκόλλησης για τα νέα υλικά στοιχεία είναι μειωμένος. Για το λόγο αυτό το MEDSLIK χρησιμοποιεί την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{Ποσοστό μόνιμης παραμονής στην ακτή} = \left[1 - 2^{-t/T_s} \right] \exp\left(-\frac{d}{d_0}\right) \quad (6.10)$$

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:

$$T_s = T_{s0} \left[1 + c_H (30 - API) \right] \quad \text{για } API < 30 \quad (6.11)$$

όπου T_s είναι ο προεπιλεγμένος χρόνος ημιζωής.



Εικόνα 6.2 Μοντέλο προσαιγιάλωσης στο MEDSLIK

6.2.3 ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ 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 μέρος της 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:

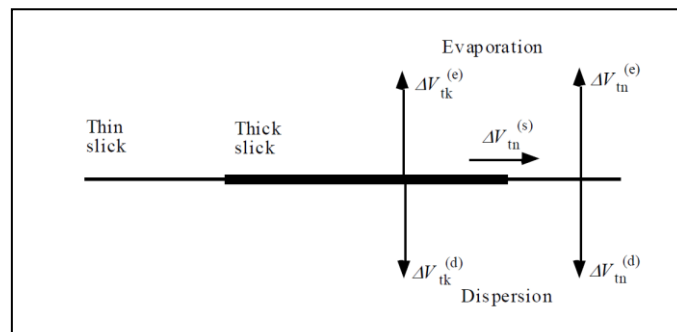
$$V'_{tk} = V_{tk} - \Delta V_{tk}^{(e)} - \Delta V_{tk}^{(d)} - \Delta V_{tn}^{(s)} \quad (6.12)$$

$$V'_{tn} = V_{tn} - \Delta V_{tn}^{(e)} - \Delta V_{tn}^{(d)} - \Delta V_{tn}^{(s)} \quad (6.13)$$

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 διαδικασία αυτή φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 6.3 Μεταφορά όγκων από το πυκνό στο λεπτό στρώμα της κηλίδας (R.W Lardner B.A, 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:

$$T_{tk} = \frac{V_{tk}}{A_{tk}} \quad (6.14)$$

6.2.4 ΕΞΑΤΜΙΣΗ (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.

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:

$$\Delta V_{\text{tn}}^{(e)} = V_{\text{tn}} \frac{f_{\text{max}} - f_{\text{tn}}}{1 - f_{\text{tn}}} \quad (6.15)$$

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 ΔE_{tk} .

$$\Delta f_{\text{tk}} = P_{\text{oil}} \Delta E_{\text{tk}} \quad (6.16)$$

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

$$P_{\text{oil}} = P_0 e^{-cf_{\text{tk}}} \quad (6.17)$$

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_{oil} , διαιρεμένα με την σταθερά αερίων R , την θερμοκρασία T σε βαθμούς Kelvin και τον αρχικό όγκο της υπό-κηλίδας $V^{(0)}$.

$$\Delta E_{\text{tk}} = \frac{K_m V_{\text{mol}} A_{\text{tk}} \tau}{RTV^{(0)}} = \frac{K_m V_{\text{mol}} A_{\text{tk}} (1 - f_{\text{tk}}) \tau}{RTV_{\text{tk}}} \quad (6.18)$$

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

$$K_m = C^{(e)} (W_{\text{kph}})^{\gamma} \quad (6.19)$$

Όπου

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

$$\Delta V_{\text{tk}}^{(e)} = \Delta f_{\text{tk}} V^{(0)} = \Delta f_{\text{tk}} V_{\text{tk}} / (1 - f_{\text{tk}}) \quad (6.20)$$

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:

$$V'_{tn} (1 - f_{tn}) = (V'_{tn} - \Delta V_{tn}^{(s)}) (1 - f_{max}) + \Delta V_{tn}^{(s)} (1 - f_{tk}) \quad (6.21)$$

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

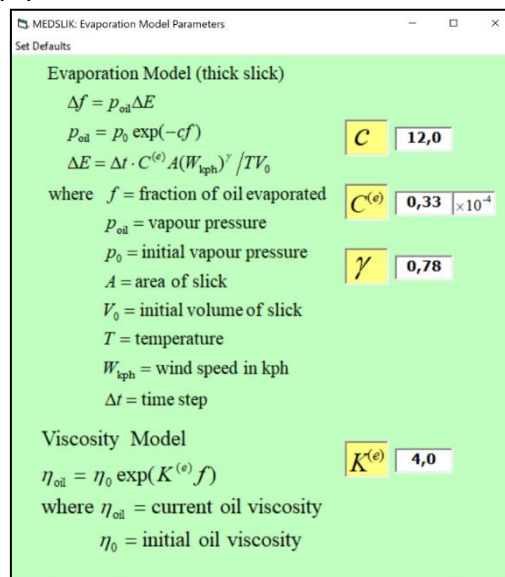
$$f_{tn} = f_{max} - \Delta V_{tn}^{(s)} (f_{max} - f_{tk}) / V'_{tn} \quad (6.22)$$

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 εξατμηση σταματάει όταν το μέρος του πετρελαίου που εξατμίστηκε φτάσει το μέγιστο f_{max} των ελαφριών συστατικών της αρχικής κηλίδας.

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

$$\eta_{oil} = \eta_0 \exp(K^{(e)} f_{tk}) \quad (6.23)$$

- η_0 είναι το αρχικό ιξώδες και
- $K^{(e)}$ είναι μία σταθερά η οποία καθορίζει την αύξηση του ιξώδους με την εξάτμηση. Προεπιλογή του μοντέλου είναι η τιμή 4.0.



Εικόνα 6.4 Μοντέλο εξάτμησης MEDSLIK

6.2.5 ΓΑΛΑΚΤΩΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ (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 συναρτηίσει του χρόνου είναι (Mackay, D. Et al, 1979)

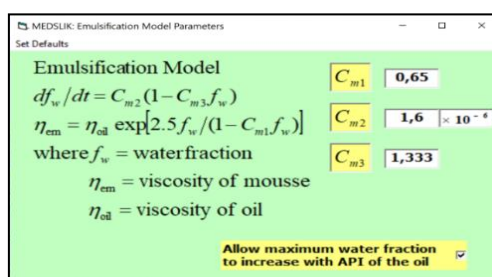
$$\Delta f_w = C_2^{(m)} (1 - C_3^{(m)} f_w) \tau \quad (6.24)$$

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 η_{em} για το γαλάκτωμα δίνεται από τον τύπο:

$$\eta_{em} = \eta_{oil} \exp \left[\frac{2.5f_w}{1 - C_1^{(m)}f_w} \right] \quad (6.25)$$

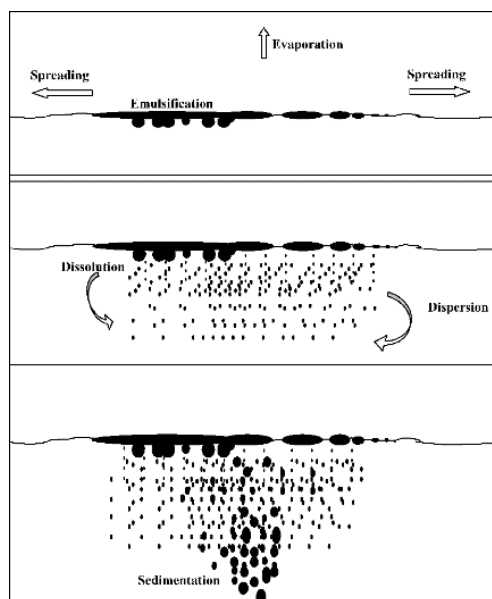
Όπου $C_1^{(m)}$ είναι μία σταθερά που καθορίζει την αύξηση του ιξώδους λόγω της γαλακτωματοποίησης, με προεπιλεγμένη τιμή 0.65.



Εικόνα 6.5 Μοντέλο γαλακτωματοποίησης του MEDSLIK

6.2.6 ΔΙΑΣΠΟΡΑ (DISPERSION)

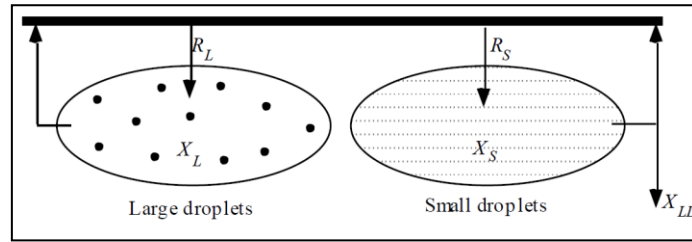
Το μοντέλο της διασποράς του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη βασίζεται στην εργασία των Buist (Ian A. Buist, 1979) και Mackay (Mackay D. B. I., 1979). Η δράση των κυματισμών οδηγεί το πετρέλαιο μέσα στο νερό, δημιουργώντας ένα σύννεφο από σταγόνες κάτω από την πετρελαιοκηλίδα όπως φαίνεται στην παρακάτω 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 6.6 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 6.7 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.

$$R_L = c_L v_L \quad (6.26)$$

$$R_S = \frac{1}{2} c_S (v_S + C_1^{(d)}) \quad (6.27)$$

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:

$$X_L = c_L u_m A_{tk} \quad (6.28)$$

$$X_S = c_S u_m A_{tk} = \frac{2R_S u_m A_{tk}}{C_1^{(d)} + v_S} \quad (6.29)$$

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:

$$\Delta X_{LL} = \frac{1}{2} c_S (C_1^{(d)} - v_S) A_{tk} \tau = \frac{R_S A_{tk} \tau (C_1^{(d)} - v_S)}{C_1^{(d)} + v_S} \quad (6.30)$$

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

$$\Delta V_{tk}^{(d)} = \Delta X_{LL} + (X'_S - X_S) \quad (6.31)$$

,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:

$$\Delta f_d = C_3^{(d)} (W_{m/s} + 1)^2 \tau \quad (6.32)$$

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:

$$f_s = \left\{ 1 + C_4^{(d)} \left(\frac{\eta_{em}}{10} \right)^{0.5} \left(\frac{T_{tk}}{0.001} \right) \left(\frac{\sigma}{24} \right) \right\}^{-1} \quad (6.33)$$

Όπου

σ : η επιφανειακή τάση στη διεπιφάνεια νερού-πετρελαίου

$C_4^{(d)}$: σταθερά με τιμή 50

η_{em} : το ιξώδες του γαλακτωματοποιημένου πετρελαίου

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

$$R_s = f_s \left(\frac{\Delta f_d}{\tau} \right) \quad (6.34)$$

$$R_L = (1 - f_s) \left(\frac{\Delta f_d}{\tau} \right) \quad (6.35)$$

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

$$f_s = \left\{ 1 + C_5^{(d)} \left(\frac{\sigma}{24} \right) \right\}^{-1} \quad (6.36)$$

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:

$$\Delta V_{tn}^{(d)} = f_s \Delta f_d V_{tn}^{(d)} \quad (6.37)$$

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

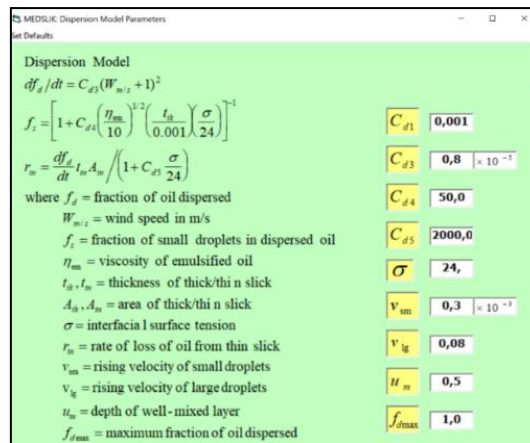
$$\Delta V^{(d)} = \Delta V_{tk}^{(d)} + \Delta V_{tn}^{(d)} \quad (6.38)$$

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

$$p^{(d)} = \frac{\Delta V^{(d)}}{V^{(0)}} \quad (6.39)$$

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 η_{em} φτάσει μια μέγιστη τιμή η_{max} .



Εικόνα 6.8 Μοντέλο διασποράς του MEDSLIK

6.2.7 ΕΞΑΠΛΩΣΗ (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. L. P., 1977) (Mackay D. P. S., 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, 1971). Επομένως, η αλλαγή της επιφάνειας της παχιάς κηλίδας ανά χρονικό βήμα είναι:

$$\Delta A_{tk}^{(s)} = -\frac{\Delta V_{tn}^{(s)}}{T_{tk}} + C_2^{(s)} A_{tk}^{1/3} T_{tk}^{4/3} \tau \quad (6.40)$$

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:

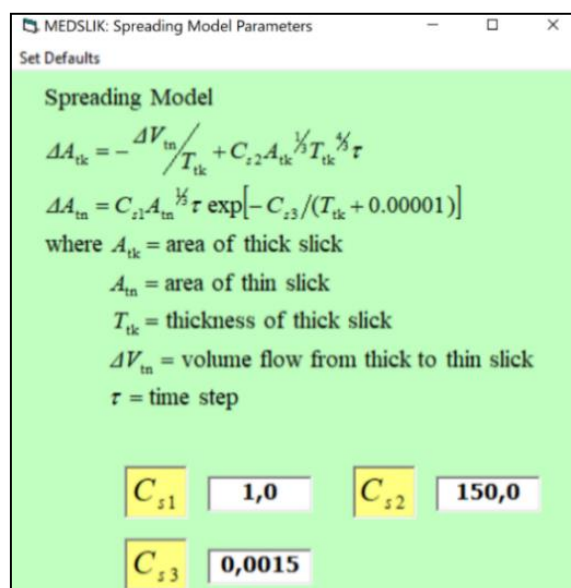
$$\Delta V_{tn}^{(s)} = \Delta A_{tn}^{(s)} T_{tn} \quad (6.41)$$

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:

$$\Delta A_{tn}^{(s)} = C_1^{(s)} A_{tn}^{1/3} \tau \exp\left(-\frac{C_3^{(s)}}{T_{tk} + 0.00001}\right) \quad (6.42)$$

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.



Εικόνα 6.9 Μοντέλο εξάπλωσης του MEDSLIK

6.3 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στο μοντέλο MEDSLIK κατά την εκκίνηση του, εμφανίζεται στην οθόνη το περιβάλλον που φαίνεται στην Εικόνα 6.10. 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 παραμέτρους παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.



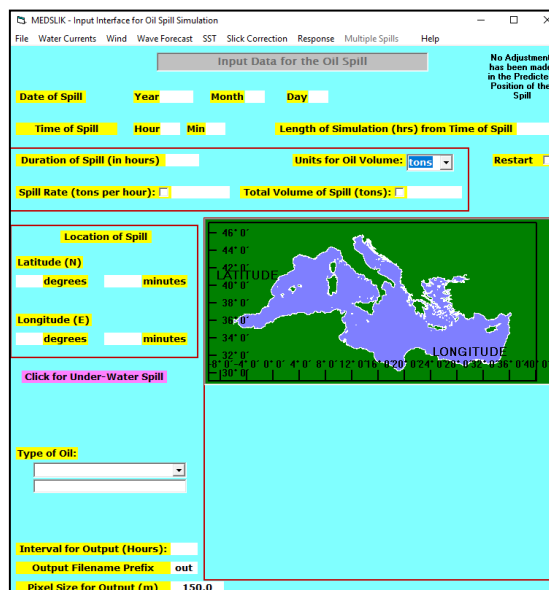
Εικόνα 6.10: Περιβάλλον εργασίας MEDSLIK

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

- Χαρακτηριστικά υπολογισμών και πετρελαιοκηλίδας.
- Χάρτης περιοχής
- Χαρακτηριστικά ανέμου και ρευμάτων

6.3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΚΑΙ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ

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 6.11) , είτε να δομηθούν σε ένα αρχείο εισαγωγής δεδομένων (input file- medslk5.inp) (Εικόνα 6.12).



Εικόνα 6.11 Περιβάλλον εισαγωγής δεδομένων

```

medslk5 - Σημειωματάριο
Αρχείο  Επέξεργασία  Μορφή  Προβολή  Βοήθεια
medf      Name of region of Mediterranean Sea in which spill is located
01 0      Mode (1 for oil spill, 3 for satellite observation; Forecast/hindcast index
01        Number of superimposed spills
0 0        (1/0) Indicates if simulation (is/is not) to restart at the given hour
10 09 2017 Date of Spill
0200      Hour of Spill
0048      Duration of Spill (hrs)
37 56,00  Latitude of Spill (degrees & minutes)
23 34,00  Longitude of Spill (degrees & minutes)
sar       Three-letter Prefix for Output Filenames
0213      Length of Simulation (hrs)
003       Interval for Printing Results to Output File
88        Indicates water current data from Climatology (0), Forecasts (1-80), User-defined uniform (88) or non-uniform currents (99)
00        Indicates wind from Climatology (0), MFS water-current Forecasts (1), SKIRON 3-hourly Forecasts (4), SKIRON Hourly Forecasts (5) or User-defined in file 'medslk.wnd' (8)
00        Indicates that the spill positions will/will not (1/0) be corrected in accordance with the file 'medslk.crn'
000002,00 Spill Rate (units/hr)
tons      Units for Oil Volume (tons, bbls or cu.m)
Generic 16,00
88        Indicates SST from Climatology (0), MFS water-current Forecasts (1) or User-defined (8)
19,0      Sea Surface Temperature in case preceding index = 8
00        0/1 if booms deployed + 0/2 if skimmers deployed
150,0     Pixel size (m) for counting up parcels
00        1 if wave forecasts are to be used, otherwise 0
00        0/1 for surface/sub-surface spill

```

Εικόνα 6.12 Αρχείο εισαγωγής δεδομένων

Συγκεκριμένα:

- i. 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.
- ii. 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 6.10). Στην παρούσα επιλέχθηκε η προσομοίωση πετρελαιοκηλίδας (oil spill prediction).
- iii. Αριθμός κηλίδων. Υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής του αριθμού των ταυτόχρονων κηλίδων που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή μελέτης. Η συγκεκριμένη επιλογή πρέπει να οριστεί στην τρίτη γραμμή του αρχείου εισαγωγής δεδομένων.
- iv. Επιλογή επανεκκίνησης πετρελαιοκηλίδας (Restart).
- v. Ημερομηνία εκκίνησης πετρελαιοκηλίδας (Date of Spill). Σε αυτό το σημείο εισάγεται ο χρόνος, ο μήνας και η μέρα που ξεκίνησε η διαρροή πετρελαίου. Αυτά γράφονται στην πέμπτη γραμμή του αρχείου.
- vi. 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*.
- vii. 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.
- viii. 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.
- ix. Διάρκεια προσομοίωσης (Length of Simulation). Οι ώρες που θα διαρκέσει η προσομοίωση της πετρελαιοκηλίδας. Το συγκεκριμένο εισάγεται στην δωδέκατη σειρά του αρχείου.
- x. 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.
- xi. 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.

- xii. 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).
- xiii. Συνολική ποσότητα διαρροής (Total Volume of Spill). Υπάρχει η δυνατότητα με την επιλογή 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.
- xiv. 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.
- xv. Ο τύπος του πετρελαίου (Type of oil). Το όνομα και ο τύπος του πετρελαίου μπορεί να επιλεγεί από μια λίστα με πάνω από 200 τύπους πετρελαίων. 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 αριθμού API για το πετρέλαιο. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται ενδεικτικά οι τύποι πετρελαίου και τα αντίστοιχα API.

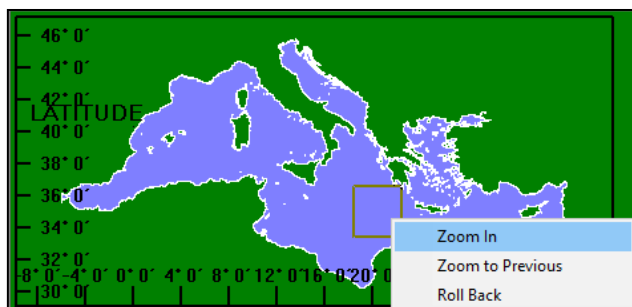
Κατάταξη πετρελαίου	° API
Ελαφρύ	° API ≥ 31
Μέτριο	22 ≤ ° API < 31
Βαρύ	10 ≤ ° API < 22
Πολύ βαρύ	° API ≤ 10

Πίνακας 5 Κατηγοριοποίηση τύπων πετρελαίου με βάση τον αριθμό API (Santos, Loh, Bannwart & Trevisan,2014)

1. 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 πρέπει να γραφτεί στην εικοστή τρίτη σειρά.

6.3.2 ΧΑΡΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

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 6.13, 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.

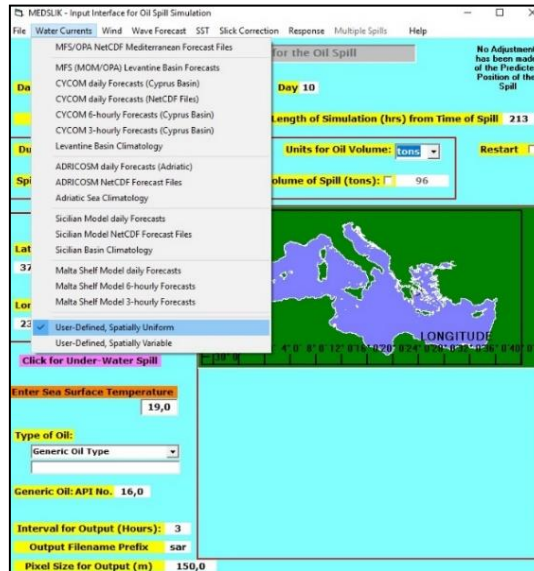


Εικόνα 6.13 Επιλογή περιοχής μελέτης

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

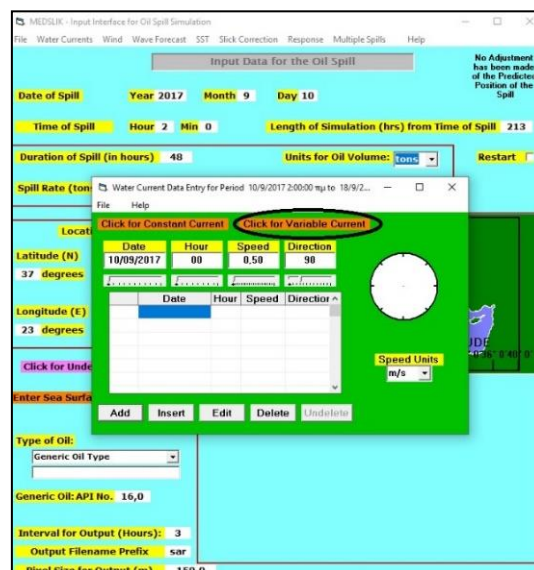
6.3.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΡΕΥΜΑΤΩΝ

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.

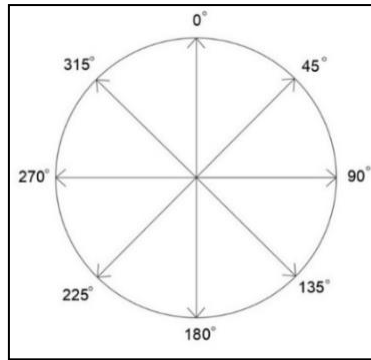


Εικόνα 6.14 Επιλογή μεθόδου εισαγωγής ρευμάτων στο MEDSLIK

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 6.16.

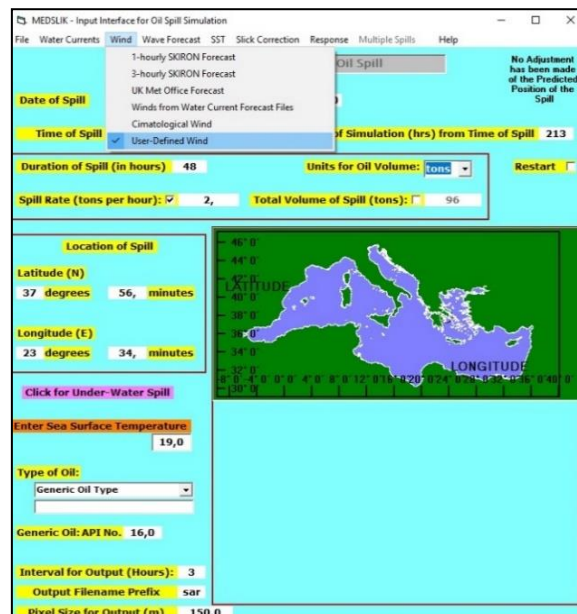


Εικόνα 6.15 Εισαγωγή ρευμάτων σταθερά ως προς το χώρο και μεταβλητά ως προς το χρόνο



Εικόνα 6.16 Ορισμός διεύθυνσης ρευμάτων

Για την εισαγωγή των ανέμων στην προσομοίωση υπάρχει μια αντίστοιχη διαδικασία. Το μοντέλο έχει τη δυνατότητα εισαγωγής ανέμων από προβλέψεις διάφορων υπηρεσιών, αναλυτικά αυτά φαίνονται στην Εικόνα 6.17 από το περιβάλλον του MEDSLIK.

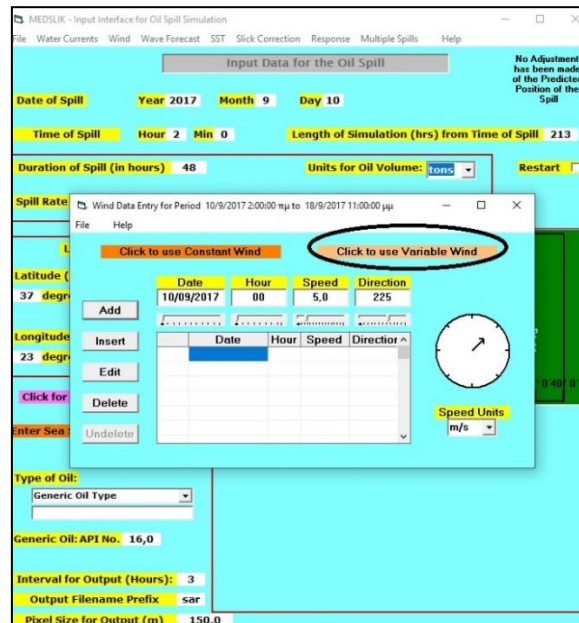


Εικόνα 6.17 Επιλογή μεθόδου εισαγωγής ανέμων

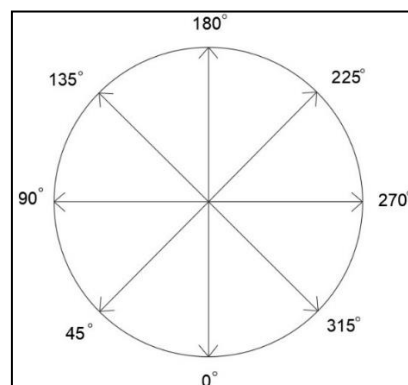
Όπως φαίνεται και στην εικόνα το MEDSLIK επεξεργάζεται:

- 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° και δυτικά του γεωγραφικού μήκους 34.36° .
- 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 5.18 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 6.19 και θέλει προσοχή καθώς είναι αντίθετη αυτής των ρευμάτων.



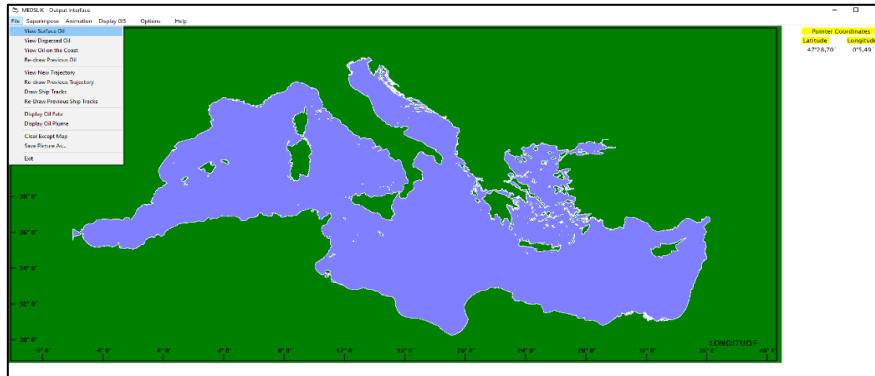
Εικόνα 6.18 Εισαγωγή ανέμων μεταβλητούς ως προς τον χρόνο



Εικόνα 6.19 Ορισμός διεύθυνσης ανέμου

6.3.4 ΜΟΡΦΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

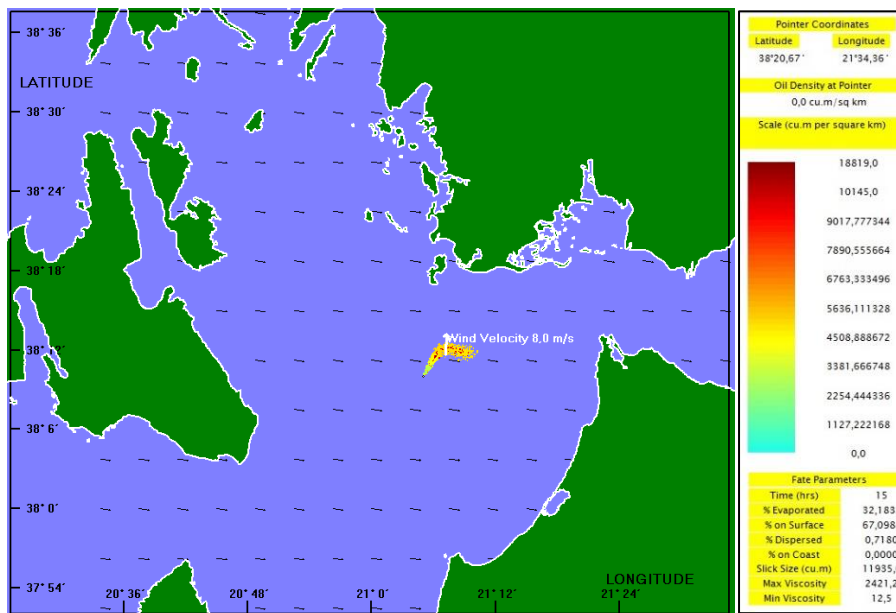
Αφού το MEDSLIK πραγματοποιήσει τους υπολογισμούς με τα δεδομένα που εισήχθησαν, στο τρίτο μέρος του μοντέλου υπάρχει η δυνατότητα εμφάνισης των αποτελεσμάτων αυτών (Output).



Εικόνα 6.20 Περιβάλλον εμφάνισης αποτελεσμάτων

Αρχικά από την επιλογή “File” μπορεί ο χρήστης να επιλέξει το αποτέλεσμα που επιθυμεί να δει. Για παράδειγμα μπορεί να επιλέξει να προβληθεί το πετρέλαιο που βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας (view surface oil) για το χρονικό βήμα που επιθυμεί.

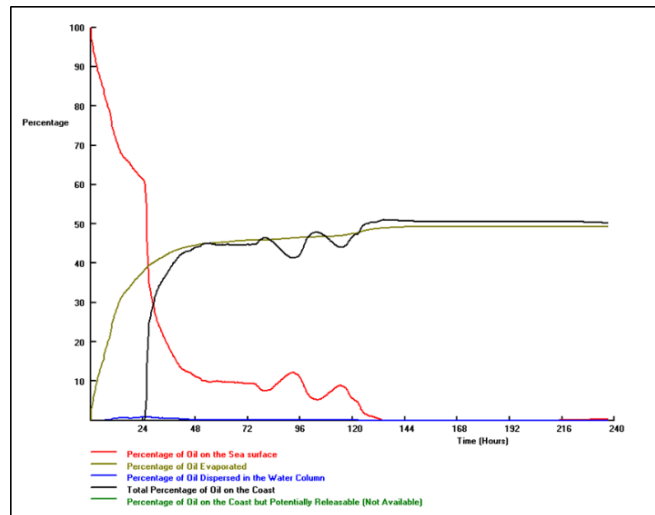
Τα αποτελέσματα εμφανίζονται ανάλογα με το χρονικό διάστημα εκτύπωσης αποτελεσμάτων (Time interval for Output) που έχει οριστεί στην εισαγωγή των δεδομένων. Το μοντέλο έχει την δυνατότητα να δώσει στον χρήστη γραφικά όπου αναπαρίσταται η πετρελαιοκηλίδα την συγκεκριμένη χρονική στιγμή που ζητάει ο χρήστης, επίσης διαγράμματα για τις παραμέτρους καθώς και animation για όλες τις χρονικές στιγμές, έτσι ώστε να είναι πιο κατανοητή η τροχιά της πετρελαιοκηλίδας.



Εικόνα 6.21 Προσομοίωση τροχιάς πετρελαιοκηλίδας

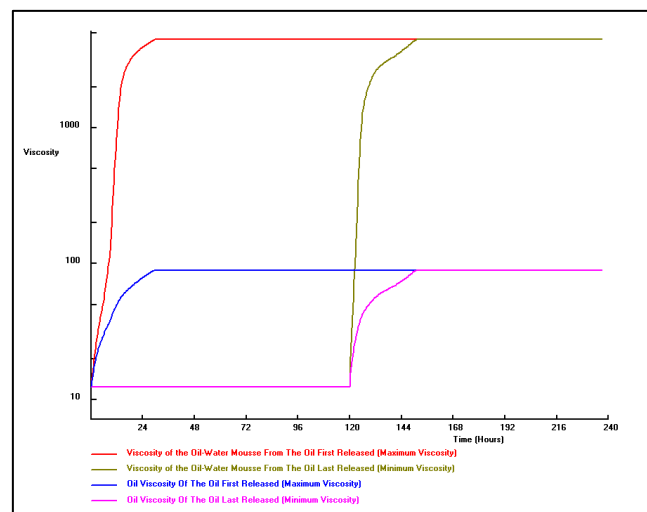
Ενδεικτικά, στην εικόνα φαίνεται αρχικά ο χάρτης της περιοχής μελέτης με την πετρελαιοκηλίδα την δεδομένη χρονική στιγμή. Επίσης φαίνεται το διάνυσμα της ταχύτητας του ανέμου καθώς και τα διανύσματα των θαλάσσιων ρευμάτων. Στα δεξιά το μοντέλο εμφανίζει ένα υπόμνημα σε κυβικά μέτρα ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο (cu.m/km²) σε χρωματική κλίμακα. Η μονάδα μέτρησης του όγκου είναι αυτή που επιλέγει ο χρήστης. Τέλος, δεξιά εμφανίζονται τα ποσοστά επιρροής των παραμέτρων στην πετρελαιοκηλίδα. Για παράδειγμα εμφανίζεται το ποσοστό του πετρελαίου που έχει διασπαστεί, το ποσοστό που έχει εξατμιστεί κ.ο.κ. τη δεδομένη χρονική στιγμή.

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 6.22)



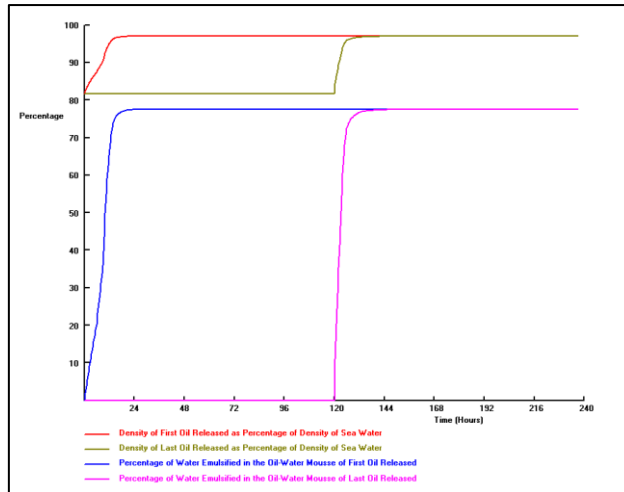
Εικόνα 6.22 Διάγραμμα επιρροής παραμέτρων

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 6.23)



Εικόνα 6.23 Χρονική μεταβολή του ιξώδους του πετρελαίου

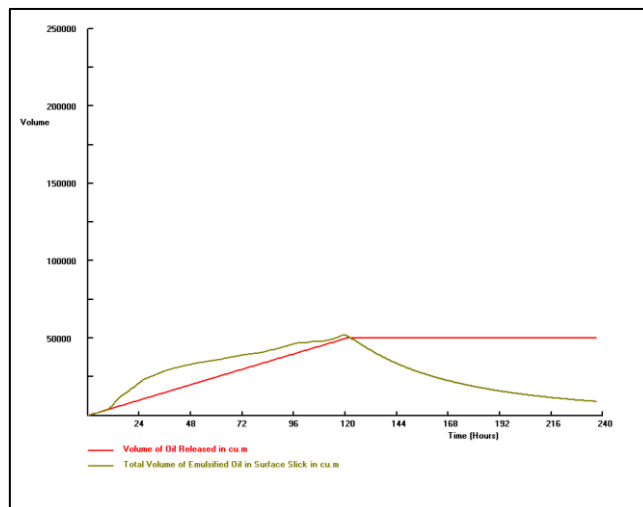
Η επόμενη επιλογή που έχει ο χρήστης είναι η «oil density», όπου φαίνεται η πυκνότητα του πετρελαίου συναρτήσει του χρόνου, καθώς λαμβάνουν χώρα η εξάτμιση και η γαλακτωματοποίηση. Το διάγραμμα δίνει τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές για την πυκνότητα της πετρελαιοκηλίδας αλλά και τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές για το κλάσμα του νερού που έχει γαλακτωματοποιηθεί. (Εικόνα 6.24)



Εικόνα 6.24 Χρονική μεταβολή της πυκνότητας του πετρελαίου

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 6.25)

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



Εικόνα 6.25 Χρονική μεταβολή του όγκου της κηλίδας

6.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ MEDSLIK ΚΑΙ OSCAR ΣΤΟΝ ΠΑΤΡΑΪΚΟ ΚΟΛΠΟ- ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

6.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση των δύο μοντέλων στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι απαραίτητο να παρατεθούν τα δεδομένα αλλά και ο τρόπος με τον οποίο τα ανεμολογικά, υδροδυναμικά και τα δεδομένα για το πετρέλαιο, εισάγονται σε αυτά. Στην συγκεκριμένη περίπτωση υπάρχουν κάποιες παραδοχές που έχουν γίνει που αφορούν τα δεδομένα και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη σύγκριση, προκειμένου να εξαχθούν σωστά συμπεράσματα σχετικά με τις δυνατότητες των δύο μοντέλων.

6.4.2 ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ MEDSLIK

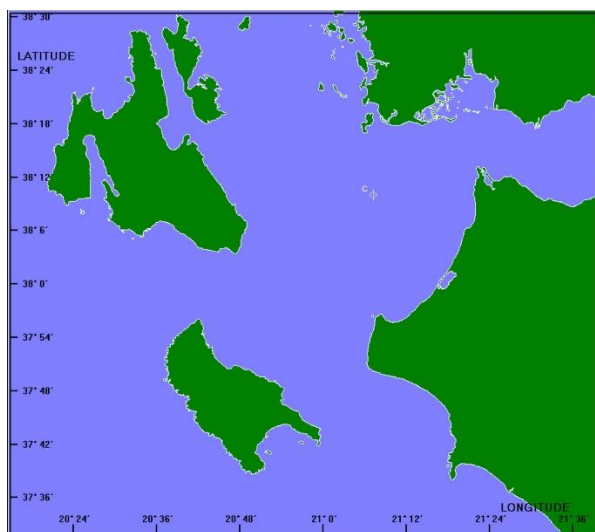
Το MEDSLIK όπως έχει παρουσιαστεί και νωρίτερα στην περιγραφή του μοντέλου, έχει την δυνατότητα εισαγωγής ταχυτήτων ρευμάτων σε ένα ή περισσότερα συγκεκριμένα σημεία του πεδίου που καθορίζει ο χρήστης. Αυτό έχει ως συνέπεια σε όλο το πεδίο, αν έχει δοθεί από το χρήστη η ταχύτητα του ρεύματος σε ένα μόνο σημείο, να εφαρμόζεται το ίδιο μέτρο και διεύθυνση της ταχύτητας του. Στην περίπτωση που εξετάζεται, δίνεται η διεύθυνση και η ταχύτητα του ρεύματος μόνο στο σημείο της διαρροής, ως χρονοσειρά η οποία έχει εξαχθεί με τη χρήση του προγράμματος επεξεργασίας γεωχωρικών δεδομένων QGIS και του εργαλείου valuetool. Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο MEDSLIK αντλήθηκαν, από το μοντέλο κυκλοφορίας SANI2 (Southern Adriatic-Northern Ionian) που αναπτύχθηκε από το ΕΛΚΕΘΕ, αποτελούν δεδομένα πρόβλεψης μοντέλων (ΕΛΚΕΘΕ (HCMR), 2019) και εισήχθησαν στο MEDSLIK με χρονικό βήμα 3 ωρών.

6.4.3 ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ MEDSLIK

Το MEDSLIK δέχεται μόνο την χρονική μεταβολή του ανέμου και όχι τη χωρική, με αποτέλεσμα ο άνεμος (διεύθυνση και ταχύτητα) που θα εισαχθεί να εφαρμόζεται στο σύνολο του πεδίου. Για την επιλογή των στοιχείων του ανέμου που εισήχθησαν στο MEDSLIK προτιμήθηκε ο άνεμος που πνέει στο σημείο διαρροής της πετρελαιοκηλίδας κάθε χρονική στιγμή ο οποίος έχει εξαχθεί με τη χρήση του προγράμματος επεξεργασίας γεωχωρικών δεδομένων QGIS και του εργαλείου valuetool. Τα δεδομένα αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων του ΕΚΠΑ (Σκίρων) (ΕΚΠΑ-openskiron, 2019) για την περίοδο 20-30 Νοέμβρη 2015 και εισήχθησαν στο MEDSLIK με χρονικό βήμα 3 ωρών.

6.4.4 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥΣ

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται συνοπτικά τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση που αφορούν τη χρονική διάρκεια της της διαρροής, τον τύπο του πετρελαίου που χρησιμοποιήθηκε καθώς και άλλα στοιχεία που αφορούν τους υπολογισμούς.



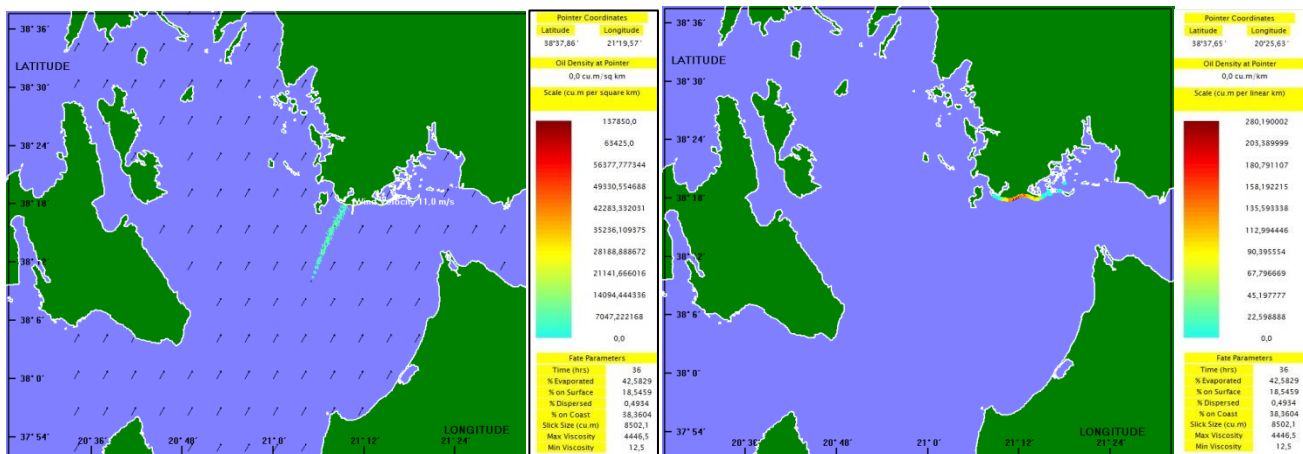
Εικόνα 6.26 Περιοχή Μελέτης όπως απεικονίζεται στο MEDSLIK

Ημερομηνία εκκίνησης υπολογισμών	20 Νοεμβρίου 2015
Ώρα έναρξης διαρροής	15:00
Ώρα έναρξης μοντέλου	15:00
Διάρκεια μοντέλου (ώρες)	237
Χρονικό βήμα υπολογισμών	30min
Όνομα πετρελαιοκηλίδας	Patraikos
Τύπος πετρελαίου	Generic Type : API: 37.2
Ποσότητα διαρροής (κυβικά μέτρα)	50.000
Τοποθεσία Διαρροής	Lat 38.10 , Long 21.05
Ημερομηνία λήξης διαρροής	25 Νοεμβρίου 2015
Ώρα λήξης διαρροής	15:00
Αριθμός σωματιδίων	10000
Συντελεστής ανέμου (wind factor)	0.031
Συντελεστής διάχυσης (cm ² /s)	20.000

Πίνακας 6 Στοιχεία Διαρροής και Υπολογισμών στο MEDSLIK

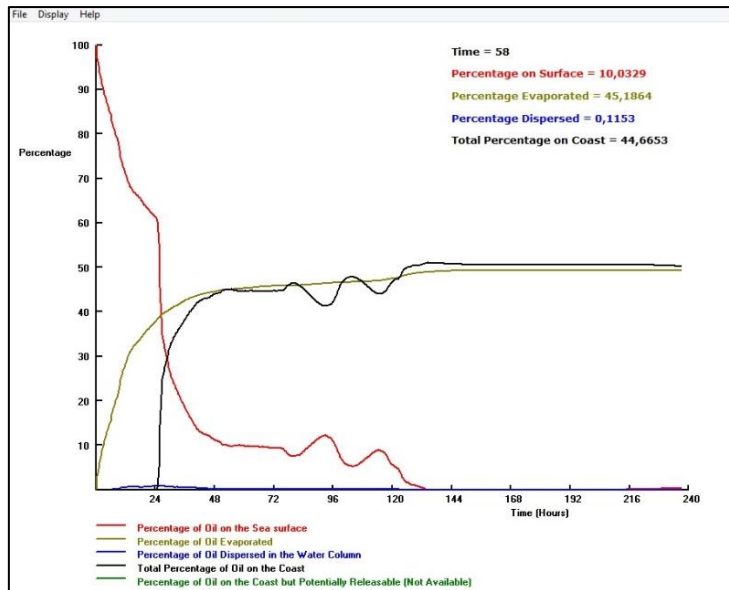
6.4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΤΟ MEDSLIK

Στο παράρτημα Α παρατίθενται τα αποτελέσματα που αφορούν την εξέλιξη της πετρελαιοκηλίδας ανά 12 ώρες καθώς και την ποσότητα του πετρελαίου που έχει φτάσει στην ακτή με τη μορφή που ενδεικτικά φαίνεται στην εικόνα 6.27.



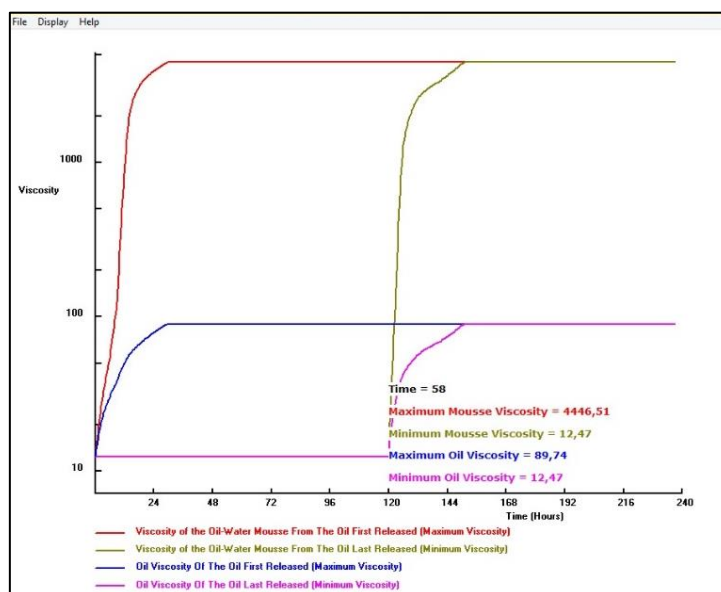
Εικόνα 6.27 Αριστερά ο άνεμος καθώς και η κατανομή του πετρελαίου (σε κυβικά μέτρα). Δεξιά η ποσότητα του πετρελαίου που έχει φτάσει στην ακτή 36 ώρες μετά την εκκίνηση της διαρροής (22/11 03:00)

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα που αφορούν συγκεκριμένα ποιοτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης. Έχει επιλεγθεί με τον κέρσορα ενδεικτικά η χρονική στιγμή των 58 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.



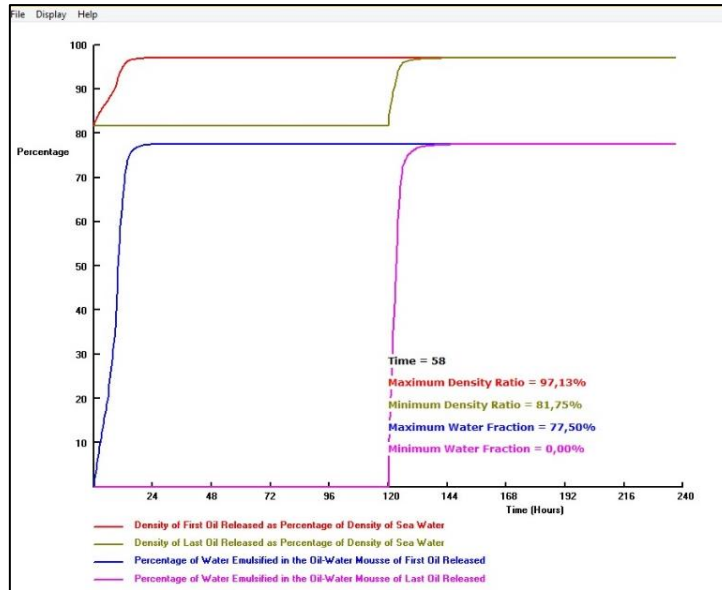
Εικόνα 6.28 Το ποσοστό του πετρελαίου που βρίσκεται στην επιφάνεια, που έχει εξατμιστεί, διασπαστεί και το ποσοστό που έχει καταλήξει στην ακτή

Αρχικά, το μεγαλύτερο μέρος του πετρελαίου που διαρρέει καταλήγει στην επιφάνεια ενώ η ποσότητα που εξατμίστηκε φτάνει κοντά στην μέγιστη τιμή της την 2^η μέρα όπου και σταθεροποιείται περίπου στο 50% της συνολικής ποσότητας του πετρελαίου που διαρρέει. Όσον αφορά το πετρέλαιο που διασκορπίζεται αυτό φτάνει σε μέγιστο κατά το τέλος της 1^{ης} μέρας από την εκκίνηση της διαρροής με τιμή λίγο κάτω από τη μονάδα ως ποσοστό του πετρελαίου που έχει διαρρεύσει μέχρι εκείνη τη στιγμή. Από το διάγραμμα είναι προφανές ότι την 2^η ημέρα της διαρροής (21/11/2015 στις 16:00) το πετρέλαιο φτάνει στην ακτογραμμή, καθώς παρατηρείται κατακόρυφη αύξηση του τις επόμενες χρονικές στιγμές. Το πετρέλαιο τελικά κατά το ήμισυ φτάνει στην ακτογραμμή και κατά το ήμισυ εξατμίζεται. Οι αυξομειώσεις που φαίνονται στα ποσοστά του πετρελαίου στην επιφάνεια της θάλασσας και στο ποσοστό που φτάνει στην ακτογραμμή οφείλονται στην αλλαγή του ανέμου, ο οποίος παίζει καθοριστικό ρόλο, με αποτέλεσμα την αλλαγή πορείας της πετρελαιοκηλίδας σε περιοχή που δεν συναντά ακτή, ταυτόχρονα με την συνέχιση της διαρροής την 4^η και 5^η μέρα.



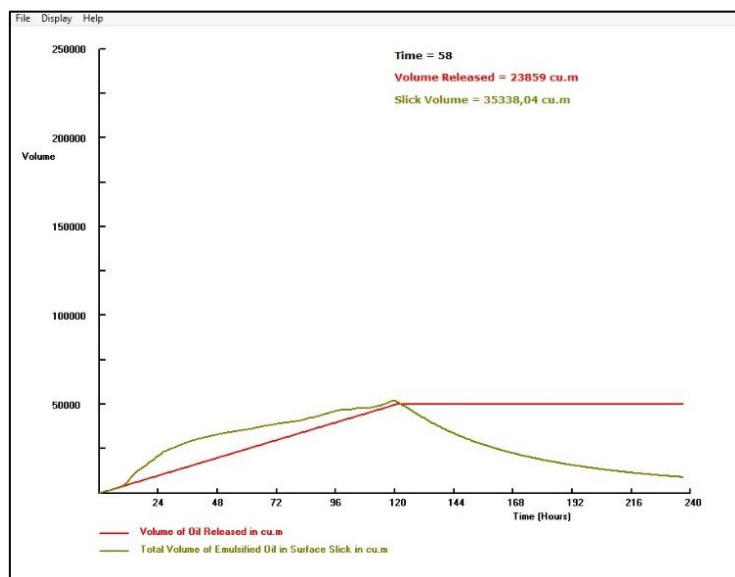
Εικόνα 6.29 Μεταβολή του ιξώδους του πετρελαίου

Η εξέλιξη του ιξώδους σχετίζεται άμεσα με την διεργασία της γαλακτωματοποίησης η οποία αρχίζει από τις πρώτες ώρες της διαρροής φτάνοντας σε μεγάλες τιμές για το γαλάκτωμα πετρελαίου-νερού, καθιστώντας δυσκολότερη και την απομάκρυνση του.



Εικόνα 6.30 Μεταβολή πυκνότητας πετρελαίου

Στην Εικόνα 6.30 φαίνεται η εξέλιξη του εύρους της πυκνότητας του πετρελαίου που έχει διαρρέυσει καθώς και η ποσότητα του νερού στο γαλάκτωμα νερού-πετρελαίου σε σχέση με το χρόνο. Έτσι για παράδειγμα 58 ώρες μετά τη διαρροή, η σχετική πυκνότητα του πετρελαίου είναι 0,9713 και το γαλάκτωμα νερού πετρελαίου αποτελείται κατά 3/4 από νερό και 1/4 από πετρέλαιο. Ενώ οι τιμές της πυκνότητας του πετρελαίου 126 ώρες μετά τη διαρροή είναι στο διάστημα 0,9592 και 0,9713 όπως αντίστοιχα και το ποσοστό του νερού στο γαλάκτωμα κυμαίνεται από 72,4% μέχρι 77,5% μέχρι να εξισωθούν στην μέγιστη τιμή τους 150 ώρες μετά τη διαρροή.

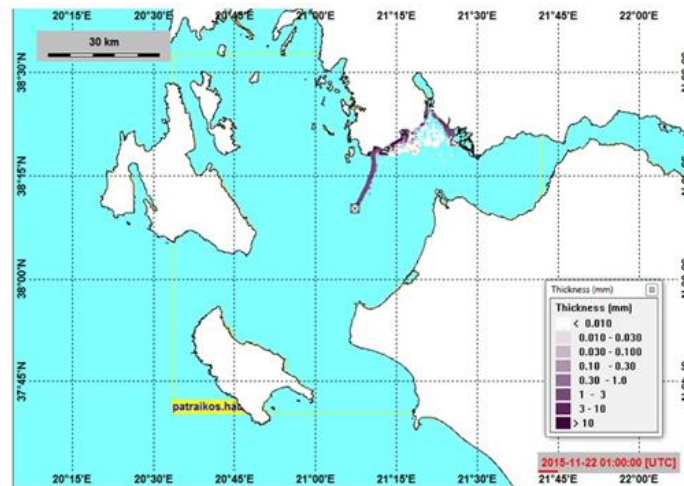


Εικόνα 6.31 Όγκος κηλίδας πετρελαίου

Στην Εικόνα 6.31 φαίνεται ο όγκος της κηλίδας σε σχέση με το χρόνο καθώς και ο συνολικός όγκος του γαλακτωματοποιημένου πετρελαίου σε κυβικά μέτρα. Ο όγκος αυξάνεται μέχρι να φτάσει τα 50000 κυβικά μέτρα την 5^η μέρα της διαρροής ενώ παρατηρείται εκθετική μείωση από την 5^η μέρα και μετά που σχετίζεται με την προσאיγιάλωση (beaching) μεγάλου μέρους του πετρελαίου, με την ταυτόχρονη παύση της διαρροής και της αδυναμίας πλέον, αύξησης του όγκου του πετρελαίου που μπορεί να γαλακτωματοποιηθεί.

6.4.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ ΣΤΟ OSCAR

Η σύγκριση πραγματοποιείται με τα αποτελέσματα υπάρχουσας δημοσίευσης που αφορά πετρελαιοκηλίδα στον Πατραϊκό Κόλπο η οποία προσομοιώθηκε με το υπολογιστικό μοντέλο OSCAR (Panagiotis Makatounis, Jorgen Skancke, Evanthia Florou, Anastasios Stamou, Per Johan Brandnvik, 2017). Αναλυτικά, παρουσιάζεται στο παράρτημα η εξέλιξη της πετρελαιοκηλίδας ανά 12 ώρες, όσον αφορά τη θέση και το πάχος της, ενώ στη συνέχεια παρατίθεται ενδεικτικά η εικόνα της πετρελαιοκηλίδας 36 ώρες μετά τη διαρροή (22/11/2015 03:00).

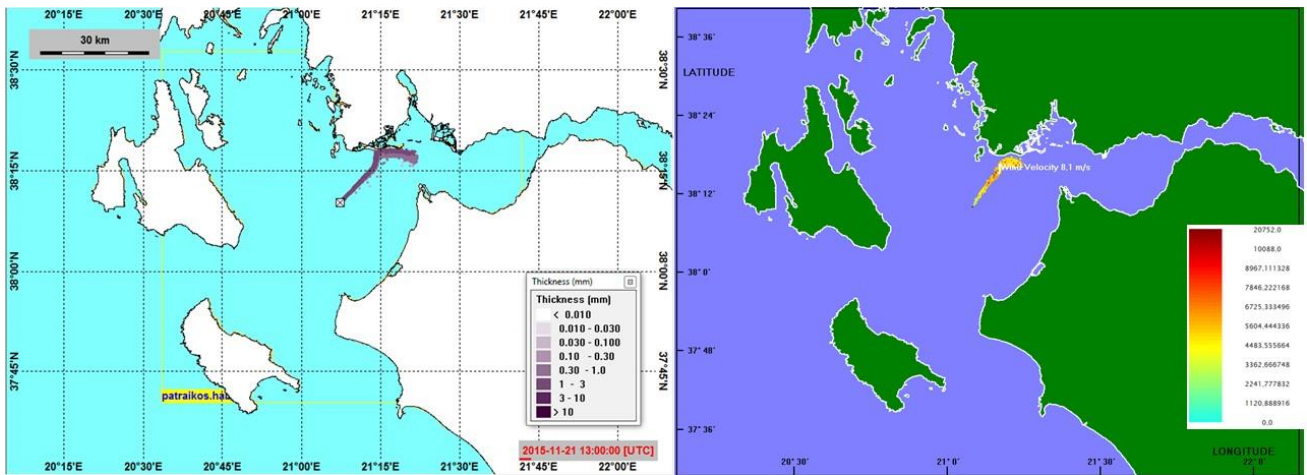


Εικόνα 6.32 Η εξέλιξη της πετρελαιοκηλίδας 36 ώρες μετά την εκκίνηση της διαρροής (Panagiotis Makatounis, Jorgen Skancke, Evanthia Florou, Anastasios Stamou, Per Johan Brandnvik, 2017)

Η ποιοτική σύγκριση που θα γίνει αφορά του εξής άξονες:

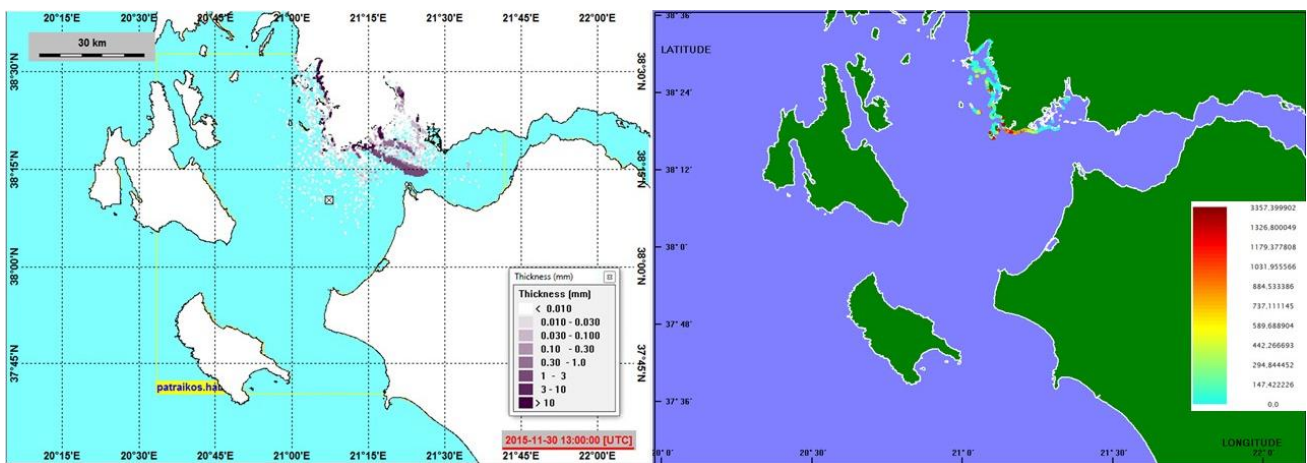
- Πότε φτάνει το πετρέλαιο στην ακτή και σε ποια περιοχή;
- Σε ποιο τμήμα της ακτογραμμής εξαπλώνεται το πετρέλαιο;
- Ποια τροχιά ακολουθεί η πετρελαιοκηλίδα;
- Πώς εξελίσσεται η πετρελαιοκηλίδα με την πάροδο του χρόνου, δηλαδή σε κάθε χρονική στιγμή ποιες είναι οι ιδιότητες του πετρελαίου;

Το πετρέλαιο και στις 2 προσομοιώσεις φτάνει στην ακτή λίγο μετά τις 15:00 στις 21/11/2015 (16:00 περίπου), ενώ η περιοχή που επηρεάζεται πρώτη είναι στο MEDSLIK η λιμνοθάλασσα Πόρτο δυτικά της λιμνοθάλασσας του Μεσολογγίου, δηλαδή εκεί που φαίνεται ότι επηρεάζεται πρώτα σύμφωνα με τα αποτελέσματα του OSCAR. Τα 2 μοντέλα παρουσιάζουν σχεδόν πλήρη ταύτιση τόσο στη χρονική στιγμή όσο και στην περιοχή στην οποία καταλήγει το πετρέλαιο στην ακτή για πρώτη φορά. (Εικόνα 6.33)



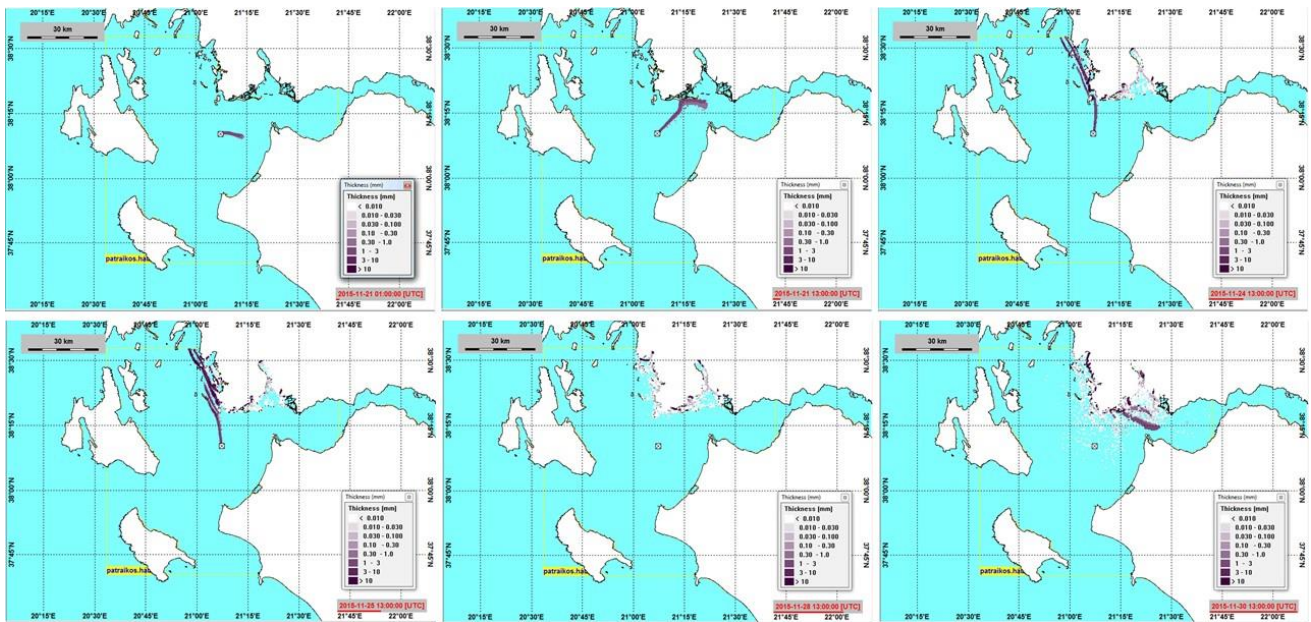
Εικόνα 6.33 Χρονική στιγμή άφιξης του πετρελαίου στην ακτή περίπου 24 ώρες μετά τη διαρροή (21/11/2015 15:00)

Το πετρέλαιο εξαπλώνεται, με βάση τα αποτελέσματα του MEDSLIK, στο δυτικό τμήμα της λιμνοθάλασσας του Μεσολογίου καθώς και σε όλη τη δυτική ακτή της Αιτωλοακαρνανίας μέχρι και τον Αστακό, συμπεριλαμβανομένων των νησιών Οξιιά, Μάκρη, Ποντικός, Καλόγηρος, Δρακόνερα και άλλων βραχονησίδων στην περιοχή. Με βάση τα αποτελέσματα του OSCAR το πετρέλαιο φτάνει στις παραπάνω ακτές, αλλά εξαπλώνεται και προς τα ανατολικά καλύπτοντας το σύνολο της ακτογραμμής της λιμνοθάλασσας του Μεσολογίου και της Κλείσοβας. Οι κύριες ποσότητες του πετρελαίου συγκεντρώνονται στο δυτικό άκρο της λιμνοθάλασσας του Μεσολογίου και στα δύο μοντέλα. Άρα και σε αυτό το σημείο υπάρχει σχετική ταύτιση των αποτελεσμάτων των δύο προσομοιώσεων. (Εικόνα 6.34)



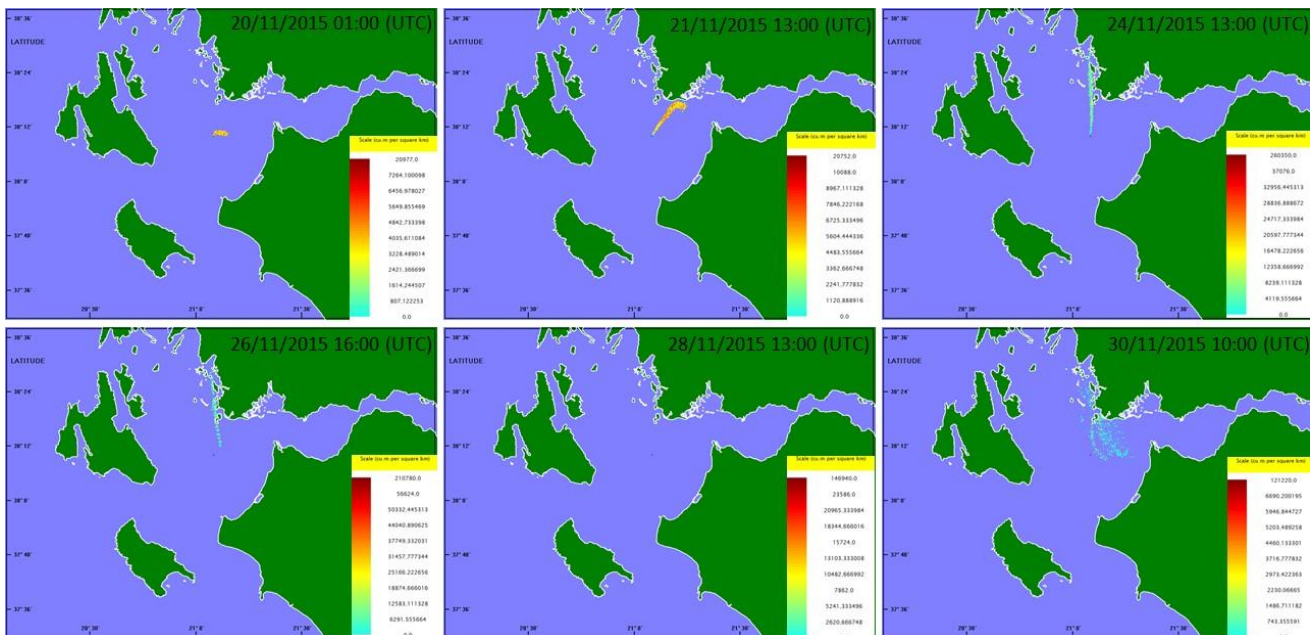
Εικόνα 6.34 Η τελική εικόνα του πετρελαίου που έχει φτάσει στην ακτογραμμή την τελευταία μέρα της προσομοίωσης (30/11/2015 15:00)

Στο OSCAR η πετρελαιοκηλίδα ακολουθεί την εξής τροχιά. Τις πρώτες 12 ώρες της διαρροής το πετρέλαιο κινείται προς τις βορειοδυτικές ακτές της Αχαΐας ενώ στην συνέχεια καταλήγει στη λιμνοθάλασσα του Μεσολογίου. Τις επόμενες μέρες μέχρι και το τέλος της διαρροής, το πετρέλαιο κινείται από το σημείο της διαρροής μέχρι και τον Αστακό, παράλληλα με τις δυτικές ακτές της Αιτωλοακαρνανίας επηρεάζοντας τα νησιά και τις ακτές που βρίσκονται εκεί ενώ με την παύση της διαρροής το σύνολο του πετρελαίου κινείται ανατολικά καταλήγοντας στις ακτές (26/11/2015 03:00). Τέλος στις 30/11/2015 φαίνεται ότι σχηματίζεται πετρελαιοκηλίδα έξω από τη λιμνοθάλασσα του Μεσολογίου με πάχος από 1 έως 10mm, λόγω του πετρελαίου που είχε εγκλωβιστεί εκεί. (Εικόνα 6.35)

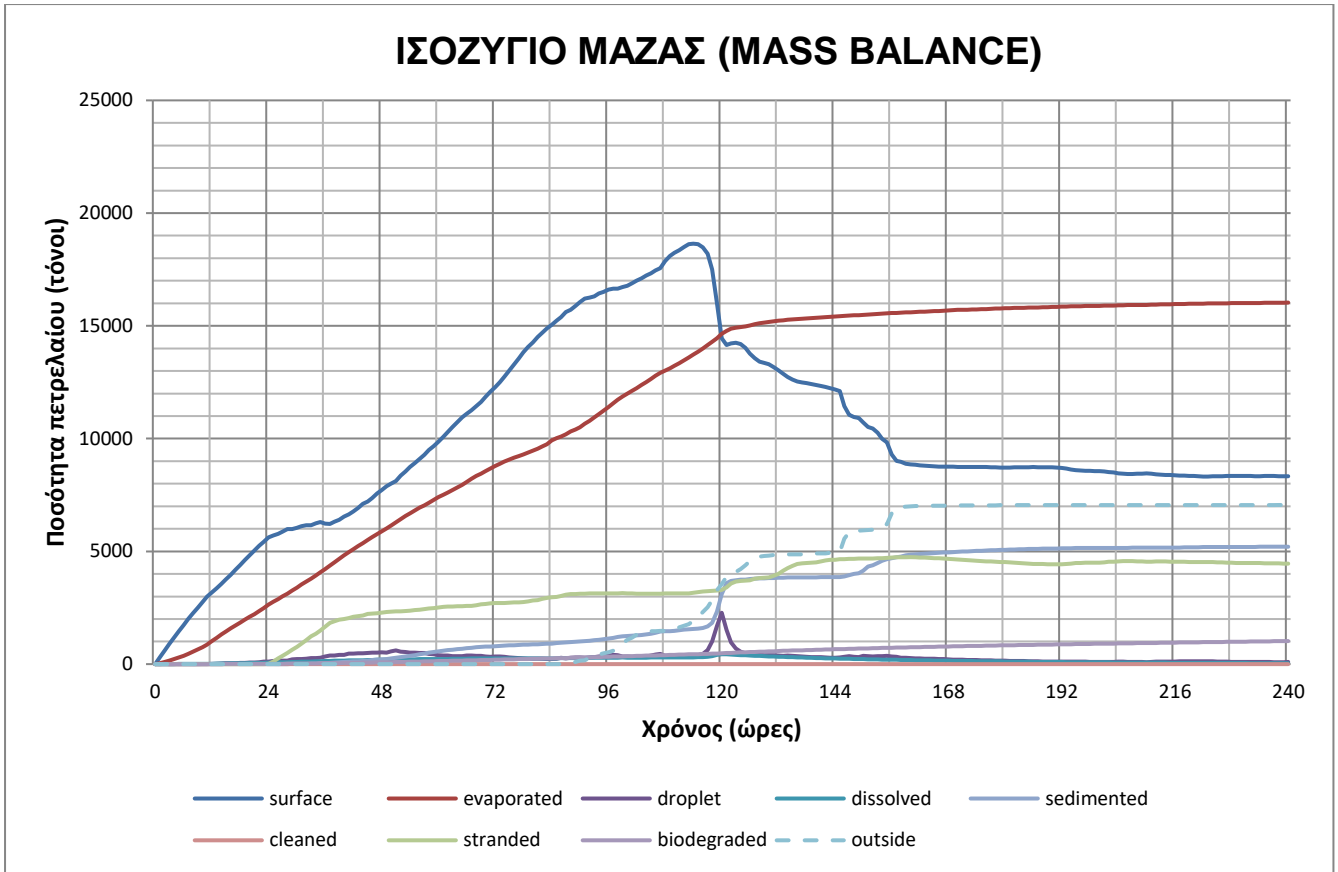


Εικόνα 6.35 Ενδεικτικά στιγμιότυπα που περιγράφουν την τροχιά της πετρελαιοκηλίδας σύμφωνα με τα αποτελέσματα του OSCAR

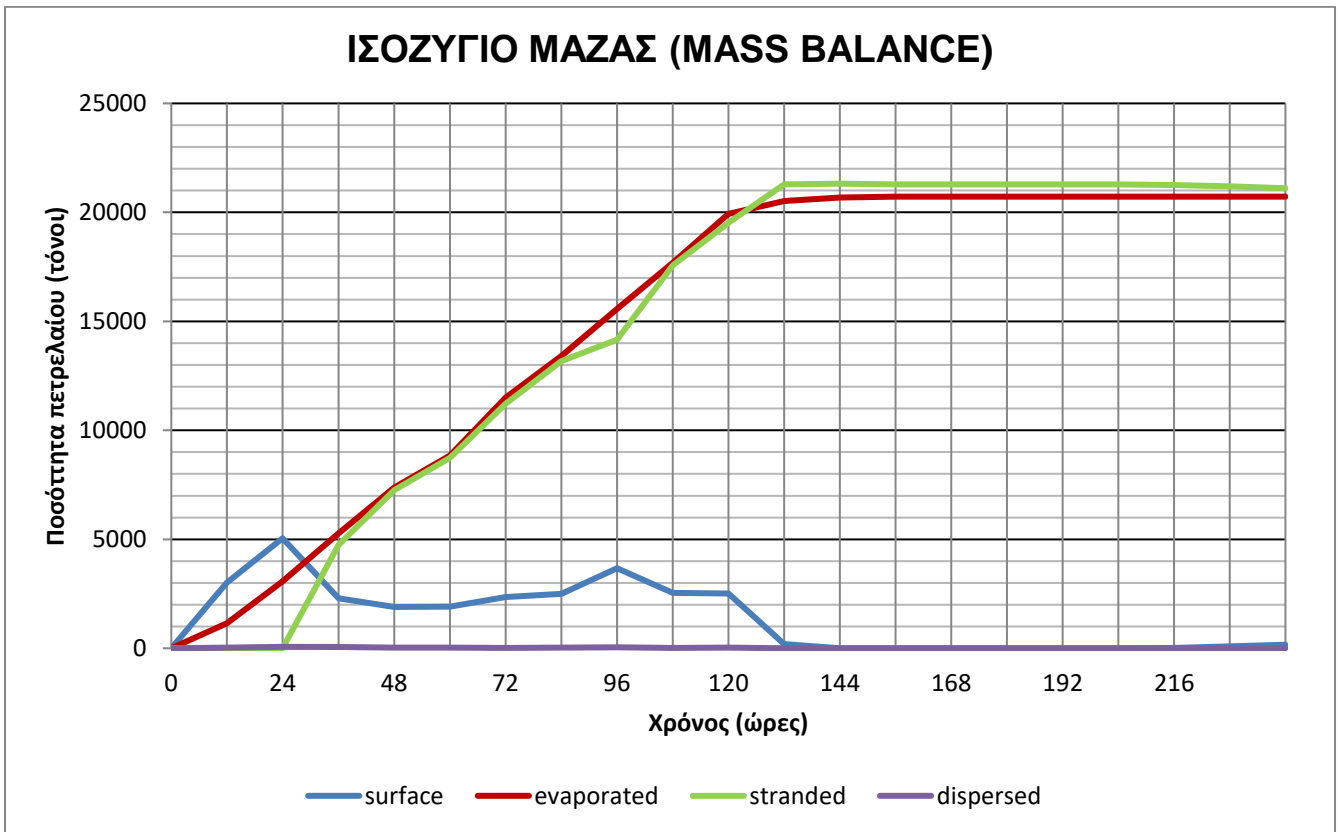
Στο MEDSLIK η πετρελαιοκηλίδα ακολουθεί την τροχιά όπως φαίνεται στη συνέχεια, με κύρια διαφορά την απουσία επιφανειακού πετρελαίου μετά τα μέσα της 5^{ης} μέρας της διαρροής, και με μικροδιαφορές όσον αφορά την κατεύθυνση του πετρελαίου στο ενδιάμεσο 2^{ης} με 5^{ης} μέρας της διαρροής. Επίσης επανεμφανίζεται πετρέλαιο στην επιφάνεια της θάλασσας την 10^η και τελευταία μέρα της διαρροής λόγω μεταβολής του ανέμου και απόπλυσης της ακτής. Γενικά προκύπτει και σε αυτό το σημείο σχετική ταύτιση των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων. (Εικόνα 6.36)



Εικόνα 6.36 Ενδεικτικά στιγμιότυπα που περιγράφουν την τροχιά της πετρελαιοκηλίδας σύμφωνα με τα αποτελέσματα του MEDSLIK



Διάγραμμα 1 Μεταβολή της μάζας του πετρελαίου συναρτήσει του χρόνου στο μοντέλο του OSCAR



Διάγραμμα 2 Μεταβολή της μάζας του πετρελαίου συναρτήσει του χρόνου στο μοντέλο του MEDSLIK

Σύμφωνα με το ισοζύγιο μάζας που προκύπτει από την προσομοίωση στο OSCAR (Διάγραμμα 1) προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα. Το πετρέλαιο στην επιφάνεια φτάνει την μέγιστη τιμή του την 5^η μέρα της διαρροής (≈ 19000 τόνοι). Ένα μεγάλο ποσοστό περίπου στα 2/5 του πετρελαίου που διέρρευσε εξατμίζεται, με την εξατμηση να έχει σταθερό ρυθμό μέχρι και την 5^η μέρα και από εκεί και έπειτα να σταθεροποιείται. Παρατηρείται ότι το πετρέλαιο που καταλήγει στην ακτή είναι περίπου το 1/10 της συνολικής ποσότητας που διέρρευσε το οποίο φτάνει στη μέγιστη τιμή του την 6^η μέρα της προσομοίωσης και μετά έχει μια ελαφρώς φθίνουσα πορεία μέχρι και την 10^η μέρα. Μεγάλο μέρος του πετρελαίου που διέρρευσε καταλήγει εκτός του κανάβου υπολογισμού του OSCAR με αποτέλεσμα να αφαιρείται αυτή η ποσότητα τελείως από τους υπολογισμούς. Η ποσότητα αυτή φτάνει τη μέγιστη τιμή της περίπου στους 7000 τόνους στα μέσα της 6^{ης} μέρας (156 ώρες μετά την εκκίνηση της διαρροής) και μένει σταθερή μέχρι το τέλος της προσομοίωσης. Επίσης η ποσότητα του πετρελαίου που βιοαποικοδομείται τείνει με το πέρασμα του χρόνου να αυξάνεται, φτάνοντας την 10^η μέρα της προσομοίωσης (30/11) λίγο πάνω από τους 1000 τόνους. Μεγάλη ποσότητα του πετρελαίου καταλήγει ως ίζημα στον πυθμένα με μέγιστη τιμή τους 5000 τόνους (184 ώρες μετά τη διαρροή), η κατακόρυφη αύξηση αυτής της ποσότητας έπεται της κατακόρυφης αύξησης των σταγονιδίων πετρελαίου στη στήλη νερού την 5^η μέρα.

Σύμφωνα με το ισοζύγιο μάζας του MEDSLIK (Διάγραμμα 2), το πετρέλαιο κατά το ήμισυ έχει φτάσει στην ακτή 132 ώρες (26/11/2015 03:00) μετά τη διαρροή και κατά το ήμισυ έχει εξατμιστεί με μια μικρή ποσότητα του να έχει διασκορπιστεί στην υδάτινη στήλη (μέγιστη ποσότητα 75 τόνοι 24 ώρες μετά τη διαρροή). Πρακτικά από εκείνη τη στιγμή και έπειτα οι ποσότητες παραμένουν σταθερές και υπάρχει ελάχιστη μόνο διακύμανση όσον αφορά το πετρέλαιο που αποκολλάται από την ακτή και καταλήγει πάλι στη θάλασσα την 10^η μέρα μετά τη διαρροή. (0.58% του πετρελαίου που διέρρευσε συνολικά, δηλαδή 290 κυβικά μέτρα πετρελαίου)

Σύγκριση

Αρχικά πρέπει να τονιστεί η σχεδόν πλήρης ταύτιση των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων για τα πρώτα τρία ερωτήματα που τέθηκαν, τα οποία είναι και βασικά για την έγκαιρη αντιμετώπιση της πετρελαιοκηλίδας με κατάρτιση κατάλληλου σχεδίου αντιμετώπισης. Στη συνέχεια, τα δύο μοντέλα όσον αφορά το ισοζύγιο μάζας παρουσιάζουν διαφορές τόσο σε επίπεδο επιμέρους ποσοτήτων όσο και σε επίπεδο πληροφοριών για τα αποτελέσματα των διεργασιών που προσομοιώνουν

Το MEDSLIK δεν λαμβάνει υπόψη του διεργασίες όπως είναι η ιζηματοποίηση, η βιοαποικοδόμηση και η διάλυση, ενώ τα σταγονίδια πετρελαίου (droplets) στη στήλη νερού στο OSCAR αντιστοιχούν στην ποσότητα πετρελαίου που έχει διασκορπιστεί (dispersed) στο MEDSLIK.

Επίσης βασική διαφοροποίηση παρουσιάζουν όσον αφορά το πετρέλαιο που βρίσκεται στην επιφάνεια και στο πετρέλαιο που καταλήγει στην ακτή. Ενώ η μέγιστη ποσότητα του πετρελαίου που βρίσκεται στην επιφάνεια στο MEDSLIK παρατηρείται 24 ώρες μετά τη διαρροή (5000 τόνοι), στο OSCAR το αντίστοιχο μέγιστο βρίσκεται 114 ώρες μετά την εκκίνηση της διαρροής (19000 τόνοι). Αυτό οφείλεται κυρίως στη διαφορά που παρουσιάζουν τα δύο μοντέλα στην αντίστοιχη ποσότητα που καταλήγει στην ακτή (1/10 στο OSCAR, 1/2 στο MEDSLIK). Αυτή η μεγάλη απόκλιση μεταξύ του πετρελαίου στην ακτή και του πετρελαίου στην επιφάνεια της θάλασσας μπορεί να οφείλεται:

- στον τύπο της ακτής που είναι ορισμένη στο κάθε μοντέλο, στο OSCAR έχει οριστεί ως ακτή με βότσαλο, ενώ στο MEDSLIK είναι ορισμένη ως αμμώδης (by default), αυτό έχει ως αποτέλεσμα την προσκόλληση της συνολικής ποσότητας πετρελαίου που καταλήγει στην ακτή, χωρίς τη δυνατότητα επαναφοράς πετρελαίου στην επιφάνεια της θάλασσας κατά την απόπλυση της ακτής.
- στην πυκνότητα του πλέγματος που χρησιμοποιείται στα δύο μοντέλα, καθώς μπορεί μια ακτή με μικρό μήκος να επηρεάζει το σύνολο του στοιχείου του πλέγματος και να οδηγεί στο να έχει μεγαλύτερο μήκος από το πραγματικό (πιθανό στο MEDSLIK- διερεύνηση πλέγματος υπολογισμού)

Ενώ όσον αφορά την ποσότητα που εξατμίζεται τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν μικρότερες διαφοροποιήσεις, καθώς πιάνουν τη μέγιστη τιμή τους, στο MEDSLIK περίπου στο 1/2 της συνολικής

ποσότητας (21000 τόνοι), ενώ στο OSCAR περίπου τα 2/5 (16000 τόνοι) την ίδια χρονική στιγμή (120 ώρες μετά τη διαρροή).

Τελικά συμπεράσματα από την σύγκριση των μοντέλων OSCAR και MEDSLIK

1. Τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν σχετική ταύτιση στην περιγραφή της εξέλιξης και συμπεριφοράς μιας πετρελαιοκηλίδας όσον αφορά την τροχιά της, το χρόνο και τη θέση που θα καταλήξει το πετρέλαιο στην ακτογραμμή.
2. Το OSCAR υπερέχει όσον αφορά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά κατά την εξέλιξη και γήρανση της πετρελαιοκηλίδας, τόσο γιατί συνυπολογίζει μεγάλο πλήθος διεργασιών που το MEDSLIK τις αγνοεί όσο και γιατί παρέχει τη δυνατότητα σύζευξης με μοντέλα που περιγράφουν διάφορους δείκτες επιρροής του περιβάλλοντος.
3. Βασικό μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι το MEDSLIK υποστηρίζεται μόνο από παλαιότερα λογισμικά (windows XP και παλαιότερα)
4. Παρόλα αυτά το MEDSLIK ως μοντέλο που είναι δωρεάν διαθέσιμο (η έκδοση που χρησιμοποιείται) στο χρήστη, επαρκεί για την περιγραφή του φαινομένου, σε σύγκριση με το OSCAR, στις βασικές πλευρές που συγκρίνονται ποιοτικά παραπάνω.

	MEDSLIK	OSCAR
Open Source Code		
Free distributed	✓	
Advection	✓	✓
Diffusion	✓	✓
Wind Drift	✓	✓
Stokes Drift		✓
Backtracking	✓	
Beaching	✓	✓
Spreading	✓	✓
Evaporation	✓	✓
Emulsification	✓	✓
Natural Dispersion	✓	✓
Vertical Movement	✓	✓
Dissolution		✓
Sedimentation		✓
Biodegradation		✓

Πίνακας 7 Σύγκριση των διεργασιών που λαμβάνονται υπόψη στα δύο μοντέλα

7. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ OPEN-TELEMAC MASCARET ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ-ΕΦΑΡΜΟΓΗ

7.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το μοντέλο της περιοχής του κόλπου του Λαγανά στη Ζάκυνθο δημιουργήθηκε στο πακέτο λογισμικού Open-Telemac Mascaret που αναπτύχθηκε και συντηρείται από Πανεπιστήμια και εταιρείες της Γαλλίας και της Γερμανίας, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE), part of the R&D group of Électricité de France. Μέσω του υδροδυναμικού προγράμματος TELEMAC2D λαμβάνει μέρος ο υπολογισμός των φαινομένων που αφορούν την τροχιά και εξέλιξη της πετρελαιοκηλίδας.

Τα μοντέλα της πλατφόρμας Telemac Mascaret πραγματοποιούν τους υπολογισμούς τους σε πλέγμα με στοιχεία ακανόνιστης γεωμετρίας (unstructured mesh) σε αντίθεση με την πλειοψηφία αντίστοιχων μοντέλων που χρησιμοποιούν πλέγμα με τετράπλευρα στοιχεία (συνήθως ορθογωνικά). Γι' αυτόν τον λόγο είναι απαραίτητη η δημιουργία του πλέγματος μέσω ενός γραφικού περιβάλλοντος όπως του BK, το οποίο δίνει τη δυνατότητα κατασκευής του με στοιχεία ακανόνιστης γεωμετρίας (βλέπε Κεφάλαιο 7.4.1)

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια ανάλυση των παραμέτρων εισόδου και των βασικών εξισώσεων υπολογισμού του υδροδυναμικού μοντέλου TELEMAC2D καθώς και των συγκεκριμένων υπορουτινών που χρησιμοποιούνται για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς της πετρελαιοκηλίδας (OIL_FLOT.f.)

Επίσης, στο TELEMAC δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να προγραμματίσει ο ίδιος συγκεκριμένες υπορουτίνες (user-subroutines) για την προσομοίωση οι οποίες δεν περιλαμβάνονται στον βασικό κορμό του TELEMAC. Τέτοιες υπορουτίνες χρησιμοποιούνται και στην περίπτωση που εξετάζεται και αφορούν την εξέλιξη της πετρελαιοκηλίδας (OIL_FLOT.f) και την ανάθεση τιμών στους κόμβους στο ανοιχτό όριο της περιοχής μεταβλητών ως προς το χρόνο, ως συνοριακές συνθήκες (BORD.f). Οι δυνατότητες που δίνονται μέσα από την επεξεργασία σε FORTRAN των υπορουτινών που βρίσκονται στην βιβλιοθήκη του προγράμματος μπορούν να δώσουν την κατάλληλη περιγραφή του προβλήματος που εξετάζεται κάθε φορά.

7.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ TELEMAC2D-ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Το μοντέλο Telemac-2D είναι μέρος του πακέτου λογισμικού Open-Telemac Mascaret και αναπτύχθηκε από το Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE), part of the R&D group of Électricité de France. Βασική του λειτουργία είναι η επίλυση εξισώσεων ελεύθερης επιφάνειας σε δύο διαστάσεις (depth-averaged surface flow equations), όπως διατυπώθηκαν πρώτα από τον St.Venant το 1871 και τα αποτελέσματά τους σε κάθε σημείο του υπολογιστικού πλέγματος είναι το βάθος και οι συνιστώσες της ταχύτητας σε συνάρτηση με το χρόνο.

Το λογισμικό έχει ευρύ πεδίο εφαρμογής. Συγκεκριμένα στο θαλάσσιο χώρο, χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές για την εκτίμηση του μεγέθους λιμένων, για να διαπιστωθεί η επίδραση βυθοκορήσεων καθώς και σε εφαρμογές περιβαλλοντικής ρευστομηχανικής (θερμές φλέβες νερού, πετρελαιοκηλίδες κ.α.). Έχει χρησιμοποιηθεί όμως και σε μελέτες σχετικές με ποτάμιες εφαρμογές, για να διαπιστωθεί πόσο επιδρούν στη ροή του ποταμού ανθρωπογενείς κατασκευές (γέφυρες, σωλήνες κ.α.), σε αστοχίες φραγμάτων (Malpasset), καθώς και σε ειδικές περιπτώσεις (π.χ. πτώση χιονοστιβάδων σε ταμιευτήρα). (Telemac Modelling System- User Manual, EDF-R&D, 2014)

Το Telemac-2D μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία και να λάβει υπ' όψη του τα παρακάτω φαινόμενα

- Μετάδοση κυμάτων με μεγάλο μήκος σε συνδυασμό με μη γραμμικά φαινόμενα
- Τριβή πυθμένα
- Την επίδραση της δύναμης Coriolis

- Την επίδραση μετεωρολογικών φαινομένων όπως ατμοσφαιρική πίεση, εξατμισοδιαπνοή, βροχή και πνοή ανέμου
- Τύρβη
- Υποκρίσιμες και υπερκρίσιμες ροές
- Επίδραση της θερμοκρασίας και της αλατότητας
- Χρήση κανάβων σε σφαιρικές η καρτεσιανές συντεταγμένες
- Επιλογή για περιοχές που παραμένουν στεγνές κατά τη διαδικασία υπολογισμού (tidal flats, flood-plains)
- Συρρίκνωση και διάχυση ιχνηθετών, υπό την επίδραση ρευμάτων
- Παρακολούθηση σωματιδίων και τροχιών της μορφής Lagrange
- Επίδραση ρωγμών σε αναχώματα
- Δυνάμεις αντιστάσεις από την ύπαρξη κατακόρυφων κατασκευών
- Φαινόμενα σχετικά με το πορώδες
- Ρεύματα παραγόμενα από κύματα (σε παράλληλη λειτουργία με TOMAWAC)
- Εύρεση στερεομεταφοράς (σε παράλληλη λειτουργία με το SISYPHE)
- Συνδυασμός με λογισμικά ποιότητας νερού (DELWAQ)

Θεωρητικές εξισώσεις του Telemac-2D

Ο κώδικας του TELEMAC-2D επιλύει τις ακόλουθες τέσσερις εξισώσεις υδροδυναμικής ταυτόχρονα:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla (h) + h \operatorname{div}(\mathbf{u}) = S_h \quad (\text{εξίσωση συνέχειας}) \quad (7.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla (u) = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h \mathbf{v}_t \nabla u) \quad (\text{διατήρηση της ορμής κατά } x) \quad (7.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla (v) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h \mathbf{v}_t \nabla v) \quad (\text{διατήρηση της ορμής κατά } y) \quad (7.3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla (T) = S_T + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h \mathbf{v}_t \nabla T) \quad (\text{διατήρηση ιχνηθετών}) \quad (7.4)$$

Όπου,

- h : το βάθος του νερού (m)
- u, v : συνιστώσες της ταχύτητας
- T : παθητικός ιχνηθέτης (ρύπος, στην προκειμένη περίπτωση πετρέλαιο)
- g : επιτάχυνση της βαρύτητας
- v_t, v_T : σταθερές διατήρησης της ορμής και διασποράς ιχνηθέτη αντίστοιχα
- Z : ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας
- x, y : συντεταγμένες στις δύο διαστάσεις
- S_h : όρος πηγής ή απώλειας του υγρού
- S_T : όρος πηγής ή απώλειας του ιχνηθέτη
- h, u, v, T : άγνωστοι των εξισώσεων
- S_x, S_y : όροι πηγής που αντιπροσωπεύουν την επίδραση του ανέμου, της δύναμης Coriolis και της τριβής του πυθμένα

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΙΣΟΔΟΥ ΣΤΟ TELEMAC-2D

Στο TELEMAC-2D απαιτείται η δημιουργία αρχείων, κάποια από τα οποία είναι υποχρεωτικά για την εκτέλεση της προσομοίωσης (mandatory files) ενώ κάποια όχι (optional files). Στη περίπτωση που γίνεται σύζευξη μεταξύ των μοντέλων TELEMAC-2D και TOMAWAC, απαιτείται το γεωμετρικό αρχείο να είναι το ίδιο και για τα δύο μοντέλα, άρα πρακτικά δημιουργείται ένα αρχείο γεωμετρίας με το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΞΟΔΟΥ ΑΠΟ ΤΟ TELEMAC-2D

Το αρχείο εξόδου είναι σε δι-διάστατη μορφή και περιλαμβάνει τις παραμέτρους που δίνονται με λέξεις κλειδιά μέσα από το αρχείο οδήγησης (steering file) του μοντέλου, για κάθε κόμβο του πλέγματος, ενδεικτικά:

- U : είναι η ταχύτητα ως προς το μέσο βάθος στον άξονα x
- V : είναι η ταχύτητα ως προς το μέσο βάθος στον άξονα y
- C : είναι ταχύτητα του κύματος
- H : το βάθος του νερού
- L : Ο αριθμός Courant
- X,Y : Οι συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου στις διευθύνσεις x,y αντίστοιχα

7.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ (OIL_FLOT.f)

Η προσομοίωση πετρελαιοκηλίδας είναι μια σχετικά νέα δυνατότητα η οποία προστέθηκε στο TELEMAC-2D και βασίζεται στην δουλειά του Goeury (Cédric Goeury Engineer-Researcher, 2014) Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε ένα Lagrangian/Eulerian μοντέλο πετρελαιοκηλίδας που ενσωματώθηκε στο σύστημα του TELEMAC. Μια Lagrangian προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε για να προβλεφθεί η μεταφορά της πετρελαιοκηλίδας στην επιφάνεια της θάλασσας και μια Eulerian προσέγγιση για να προσομοιωθεί η ποιότητα του νερού, που πρέπει να συζευχθεί με το υδροδυναμικό μοντέλο. Το μοντέλο αυτό στοχεύει στην προσομοίωση των διαδικασιών της οριζόντιας μεταφοράς (advection), της τυρβώδους διάχυσης (turbulent diffusion), της εξάτμισης (evaporation), της εξαέρωσης (volatilization) και της διάλυσης (dissolution).

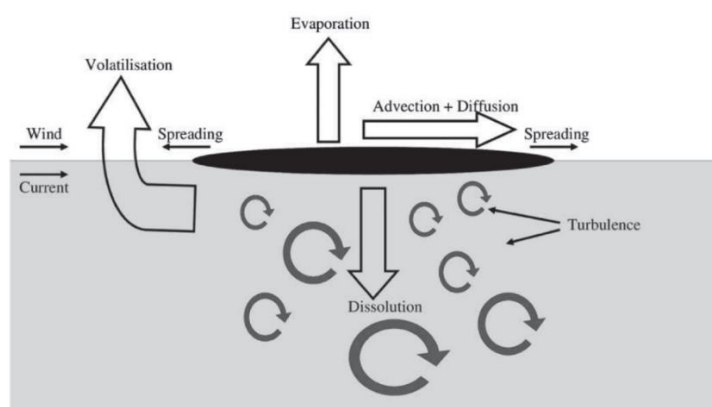
Όπως τονίστηκε και παραπάνω το Lagrangian μοντέλο προσομοιώνει την μεταφορά της πετρελαιοκηλίδας κοντά στην επιφάνεια. Η πετρελαιοκηλίδα αναπαρίσταται σαν ένα σύνολο μεγάλων σωματιδίων υδρογονανθράκων. Κάθε ένα από τα σωματίδια αυτά λογίζεται σαν ένα μείγμα από διακριτά συστατικά του υδρογονάνθρακα χωρίς να υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Τα σωματίδια στη συνέχεια αναπαρίστανται από τις κατηγορίες των συστατικών τους (polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), ψευδοσυστατικά που χαρακτηρίζονται από καμπύλες διύλισης) και η τύχη του κάθε συστατικού καταγράφεται ξεχωριστά.

Κάθε σωματίδιο είναι συνδεδεμένο, μεταξύ των άλλων ιδιοτήτων που διαθέτει, με ένα εμβαδό, μια μάζα, τις βαρυκεντρικές του συντεταγμένες και τις ψευδο-χημικές ιδιότητες του κάθε συστατικού. Το μοντέλο αντιπροσωπεύει τις κύριες διεργασίες του καθενός συστατικού του πετρελαίου που διέρρευσε: της οριζόντιας μεταφοράς, της επίδρασης του ανέμου, της διάχυσης, της εξάτμισης και της διάλυσης (dissolution).

Για την διάλυση (dissolution) των PAHs στο νερό, χρησιμοποιείται ένα Eulerian μοντέλο οριζόντιας μεταφοράς-διάχυσης. Αυτή η προσέγγιση είναι περισσότερο χρήσιμη όταν απαιτείται η σύζευξη ενός μοντέλου ποιότητας νερού με ένα υδροδυναμικό μοντέλο (Tkalič, 2003). Τα υδροδυναμικά δεδομένα που απαιτούνται παρέχονται από το υδροδυναμικό μοντέλο TELEMAC-2D, το οποίο επιλύει τις εξισώσεις στα ρηχά βασισμένο στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Ο σκοπός του αριθμητικού μοντέλου είναι να παρέχει βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη σε σχετικά ήρεμα νερά. Συνεπώς, οι βιολογικές διεργασίες που επηρεάζουν την πετρελαιοκηλίδα μακρόχρονα, μπορούν να αγνοηθούν, όπως επίσης η διασπορά (dispersion) και η γαλακτωματοποίηση (emulsification) φαινόμενα που προκαλούνται κυρίως από τα θραυόμενα κύματα.

Όταν το πετρέλαιο διαρρέυσει στη θάλασσα, εξαπλώνεται λόγω της αδράνειας, του ιξώδους και των τάσεων επιφανείας (Fay, 1971) δημιουργώντας μια κηλίδα. Ταυτόχρονα, η επιφάνεια της πετρελαιοκηλίδας μεταφέρεται λόγω οριζόντιας μεταφοράς και τυρβώδους διάχυσης που προκαλούνται λόγω δράσης των ρευμάτων και του ανέμου. Η σύσταση της πετρελαιοκηλίδας αλλάζει λόγω της γήρανσης και των διαδικασιών που μεσολαβούν όπως η εξάτμιση και η διάλυση, όπου τα συστατικά του πετρελαίου που διαλύονται στο νερό, εξαερώνονται στην ατμόσφαιρα. Για την προσομοίωση των διαλυτών συστατικών του πετρελαίου, χρησιμοποιείται ένα Eulerian μοντέλο μεταφοράς-διάχυσης, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Το κλάσμα καθενός διαλυτού συστατικού αντιπροσωπεύεται από ένα ιχνηθέτη του οποίου η μάζα εξαρτάται απευθείας από τη μάζα των σωματιδίων πετρελαίου που έχει διαλυθεί. Οι διαδικασίες που προσομοιώνονται από το μοντέλο φαίνονται στην εικόνα 7.1.



Εικόνα 7.1 Εξέλιξη και μεταφορά της πετρελαιοκηλίδας (Cédric Goeurly Engineer-Researcher, 2014)

Διεργασίες οι οποίες προσομοιώνονται στο μοντέλο

Διεργασίες μεταφοράς:

1. Οριζόντια μεταφορά (advection)

Στην ελεύθερη επιφάνεια, η ολίσθηση της πετρελαιοκηλίδας προκαλείται από την ταχύτητα της ροής και από τη δράση του ανέμου. Η ταχύτητα ολίσθησης (drift velocity) της πετρελαιοκηλίδας που προκαλείται από τον άνεμο ισούται με το 3.6% του διανύσματος της ταχύτητας του ανέμου.

$$\vec{u}_{oil} = \vec{u}_c + \beta \times \vec{u}_w \quad (7.5)$$

\vec{u}_{oil} : η ταχύτητα της πετρελαιοκηλίδας

\vec{u}_c : η ταχύτητα του ρεύματος

\vec{u}_w : η ταχύτητα του ανέμου πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

β : αντιπροσωπεύει την ολίσθηση της επιφάνειας της πετρελαιοκηλίδας λόγω του ανέμου

Επιρροή του ανέμου στην ολίσθηση της πετρελαιοκηλίδας: Η δύναμη που δρα σε ένα στερεό σώμα που επιπλέει με μια σταθερή ταχύτητα ροής είναι:

$$\vec{F} = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times C_d |\vec{U}| \vec{U} \quad (7.6)$$

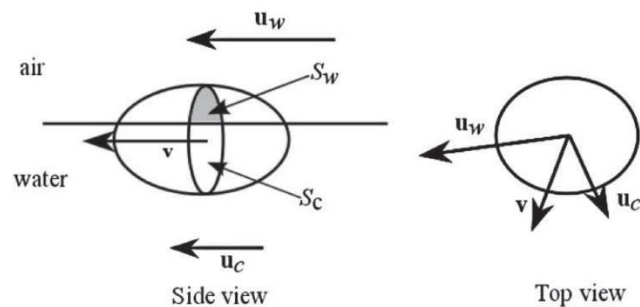
\vec{U} : διάνυσμα της ταχύτητας της ροής στην επιφάνεια

S : η επιφάνεια προβολής του στερεού σώματος

ρ : η πυκνότητα του ρευστού

C_d : ο συντελεστής τριβής ολίσθησης

Αν το στερεό κινείται με ταχύτητα \vec{v} τότε είναι αναγκαίο να αντικατασταθεί η ταχύτητα στην επιφάνεια του ρευστού \vec{U} από την σχετική ταχύτητα $\vec{u}_r = \vec{v} - \vec{U}$ στην παραπάνω εξίσωση



Εικόνα 7.2 Γράφημα του στερεού σώματος στο νερό (Cédric Goeurly Engineer-Researcher, 2014)

Ο 2^{ος} νόμος του Νεύτωνα εφαρμοσμένος στην μόνιμη κατάσταση στο σωματίδιο που μεταφέρθηκε λόγω του αέρα και του ρεύματος μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\rho_w S_c C_{d,c} |\vec{v} - \vec{u}_c| (\vec{v} - \vec{u}_c) + \rho_a S_w C_{d,w} |\vec{v} - \vec{u}_w| (\vec{v} - \vec{u}_w) = 0 \quad (7.7)$$

ρ_a : πυκνότητα αέρα

ρ_w : πυκνότητα νερού

$C_{d,c}$: συντελεστής ολίσθησης στο νερό

$C_{d,w}$: συντελεστής ολίσθησης στον αέρα

S_w : η μερική επιφάνεια της προβολής του στερεού σώματος που υπόκειται στον αέρα

S_c : η μερική επιφάνεια της προβολής του στερεού σώματος που υπόκειται στο ρεύμα

\vec{u}_c : το διάνυσμα της ταχύτητα του ρεύματος

\vec{u}_w : το διάνυσμα της ταχύτητα του ανέμου

Τελικά καταλήγει στην εξής εξίσωση για την ταχύτητα ολίσθησης του πετρελαίου

$$u_{oil} = u \left(1 + \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{C_f}{2}} \right) + 0.036 \vec{u}_w \quad (7.8)$$

2. Διάχυση (diffusion)

Οι στρόβιλοι που δημιουργούνται λόγω τύρβης επηρεάζουν την κίνηση των σωματιδίων της πετρελαιοκηλίδας και προστίθεται τυχαιότητα στην τροχιά τους. Συνεπώς μια στοχαστική προσέγγιση πρέπει να υιοθετηθεί για να ληφθεί υπόψη αυτό το φαινόμενο.

Διεργασίες μοντέλου σε σχέση με την ακτογραμμή:

1. Προσאיγιαλίωση (oil beaching)

Όταν ένα σωματίδιο φτάνει στην ακτογραμμή τότε μπορεί να αποθεθεί εκεί αν ικανοποιείται ένας από τους παρακάτω περιορισμούς

- Το πάχος της πετρελαιοκηλίδας να είναι μεγαλύτερο από το βάθος του νερού κάτω από αυτή
- Το μέγεθος της τραχύτητας του πυθμένα να είναι μεγαλύτερο από την στάθμη της θάλασσας

Τότε, το σωματίδιο του πετρελαίου αποθηκεύεται στην ακτή αν δεν υπερβαίνει το πετρέλαιο που ήδη υπάρχει εκεί την μέγιστη ποσότητα του πετρελαίου που μπορεί να αποθηκευτεί σε αυτή σύμφωνα με τον Cheng

$$M^* = \rho_o (Surf_{shore} \times T_m + C_v \times D_v \times L_s) \quad (7.9)$$

M^* : μέγιστη ποσότητα πετρελαίου που μπορεί να αποθηκευτεί στην ακτή

$Surf_{shore}$: η επιφάνεια της ακτής

ρ_o : η πυκνότητα του πετρελαίου

T_m : το μέγιστο πάχος του πετρελαίου

C_v : το περιεχόμενο του ιζήματος του πετρελαίου

D_v : το βάθος της διείσδυσης του πετρελαίου στην ακτή

L_s : το πλάτος της ακτής

Η «χωρητικότητα» της ακτής σε πετρέλαιο εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά του πετρελαίου όσο και από τις ιδιότητες της ακτής.

Shoreline type	Maximum Surface oil thickness (T_m) (mm) by oil viscosity			Oil capacity in subsurface		Oil loading capacity (C_v) estimated ($m^3 \text{ oil} / m^2 \text{ sediment}$)		
	Light	Medium	High	Depth of oil penetration (mm)	Oil percent by volume (%)	Light	Medium	High
	< 30 mm^2/s	30 – 2000 mm^2/s	> 2000 mm^2/s			< 30 mm^2/s	30 – 2000 mm^2/s	> 2000 mm^2/s
Sandy beach	4	17	25	50	9,8	0,0040	0,0170	0,0250
Gravel	2	9	15	180	8,3	0,0021	0,0091	0,0151
Rocky shore	1	5	10	0	0	0,0010	0,0050	0,0100

Πίνακας 8 Δυνατότητα αποθήκευσης πετρελαίου στην ακτή

2. Επαναιώρηση πετρελαίου

Ένα σωματίδιο πετρελαίου που προηγουμένως έχει προσκολληθεί στην ακτή μπορεί να επιστρέψει πίσω στην υδάτινη στήλη (πχ λόγω παλίρροιας). Αυτό το φαινόμενο λαμβάνεται υπόψη αν ισχύουν οι παρακάτω προϋποθέσεις

- Το νερό κάτω από την επιφάνεια της πετρελαιοκηλίδας έχει μεγαλύτερο πάχος από αυτήν
- Η στάθμη του νερού είναι μεγαλύτερη από την τραχύτητα του πυθμένα

$$P_{\text{refloat}} = 1 - \exp(-k_f \times t) \quad (7.10)$$

k_f : ο ρυθμός απομάκρυνσης πετρελαίου (days^{-1}) εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ακτής ($k_f = 0.25$ χαλίκι, $k_f = 0.15$ βράχος, $k_f = 0.8$ άμμος)

Διεργασίες γήρανσης:

1. Εξάπλωση (spreading)

Η εξάπλωση αποτελεί την πιο σημαντική διεργασία γήρανσης, στην πραγματικότητα όλες οι διεργασίες που συμβαίνουν κατά την γήρανση εξαρτώνται από την έκταση της επιφάνειας της πετρελαιοκηλίδας. Στο 90% της επιφάνειας της πετρελαιοκηλίδας επικρατεί η βαρύτητα σαν κύρια δύναμη, ενώ αυτή η επιφάνεια περιβάλλεται από ένα πιο λεπτό στρώμα στο οποίο κυριαρχούν οι τάσεις επιφάνειας.

2. Διεργασίες μεταφοράς μάζας (mass transfer processes)

3. Εξάτμιση (evaporation)

Η εξάτμιση αποτελεί την πιο σημαντική διεργασία μεταφορά μάζας που συμβαίνει στο πετρέλαιο αφού διαρρεύσει. Μέσα σε λίγες μόνο μέρες, το ελαφρύ αργό πετρέλαιο ή τα διυλισμένα προϊόντα μπορούν να χάσουν το 75% του αρχικού τους όγκου (ASCE 1996)

4. Διάλυση (dissolution)

Από περιβαλλοντικής άποψης είναι ένα εξαιρετικά σημαντικό φαινόμενο παρόλο που συντελεί σε ελάχιστο βαθμό στην μείωση της μάζας του πετρελαίου. Η ποσότητα του που επηρεάζεται από αυτή τη διεργασία αποτελεί περίπου το 1% της αρχικής του μάζας.

$$\frac{dC_i}{dt} = \alpha \times (S_i \times X_i - C_i) \quad (7.11)$$

$$\alpha = \frac{K_{\text{diss}} \times A_p}{V} \quad (7.12)$$

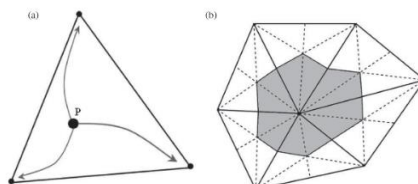
S_i : διαλυτότητα του στοιχείου i στο νερό

X_i : το μοριακό κλάσμα του στοιχείου i

K_{diss} : συντελεστής μεταφοράς μάζας

A_p : επιφάνεια σωματιδίου

V : όγκος του κόμβου



Εικόνα 7.3 Σωματίδιο P μέσα στο τριγωνικό στοιχείο (a) και ανάμεσα σε κόμβους (b) (Cédric Goeury Engineer-Researcher, 2014)

5. Εξαέρωση (volatilization)

Τα διαλυμένα συστατικά του πετρελαίου μπορούν να εξαερωθούν στην ατμόσφαιρα μόνο στις περιοχές που δεν καλύπτονται από την επιφάνεια της πετρελαιοκηλίδας.

7.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ TELEMACH-2D

Το αρχείο οδήγησης (steering file) της προσομοίωσης αποτελεί τον πίνακα ελέγχου της προσομοίωσης, η προσομοίωση ελέγχεται αποκλειστικά από το steering file του TELEMACH-2D. Αυτό το αρχείο περιέχει όλα τα key-words που έχει εισάγει ο χρήστης και τις τιμές τους που ενεργοποιούν τις επιλογές που δίνει το πακέτο λογισμικού, καθώς και τις υπορουτίνες που επιλέγει να χρησιμοποιήσει ο χρήστης. Η σειρά με την οποία δίνονται από το χρήστη τα key-words δεν παίζει κανένα ρόλο όσον αφορά τη σειρά με την οποία εκτελούνται. Ενώ αν κάποιο key-word το οποίο είναι απαραίτητο για την προσομοίωση δεν οριστεί από τον χρήστη τότε του εκχωρείται η default τιμή του προγράμματος, εκτός αν δεν έχει οριστεί τέτοια τιμή και τότε σταματάει η προσομοίωση, εμφανίζοντας μήνυμα σφάλματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία για την επιλογή και διαμόρφωση των αρχείων και δεδομένων εισόδου του μοντέλου. Περιγράφονται αναλυτικά οι υπορουτινές και οι επιλογές οι οποίες έγιναν, για την κατάλληλη περιγραφή της περίπτωσης που εξετάζεται στην συγκεκριμένη εργασία μαζί με μια σύντομη θεωρητική αναφορά που αντλείται από το εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού. Επίσης γίνεται αναφορά στα σημαντικότερα key-words που ενεργοποιούν κάθε επιλογή.

Η προετοιμασία των αρχείων εισόδου που αφορούν το πλέγμα τόσο τη γεωμετρία του (geometry file) όσο και τις οριακές συνθήκες (boundary conditions file) που ορίζονται, διαμορφώθηκαν στο γραφικό περιβάλλον του Blue Kenue, όπως φαίνεται στη συνέχεια.

7.4.1 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Τα αρχεία της γεωμετρίας και του πλέγματος διαμορφώθηκαν στο γραφικό περιβάλλον του Blue Kenue. Το Blue Kenue είναι ένα γραφικό περιβάλλον ελεύθερης πρόσβασης στο οποίο μπορεί να γίνει επεξεργασία των δεδομένων για την εισαγωγή τους στην πλατφόρμα του TELEMACH όπως επίσης μπορεί να γίνει επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων. Το Blue Kenue αναπτύχθηκε από το NRCC (National Research Center of Canada). Όσον αφορά την επεξεργασία των δεδομένων εισαγωγής μέσω του BK μπορεί να δημιουργηθεί ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων από το οποίο στη συνέχεια μπορούν να διαμορφωθούν τα απαραίτητα αρχεία εισαγωγής στο TELEMACH:

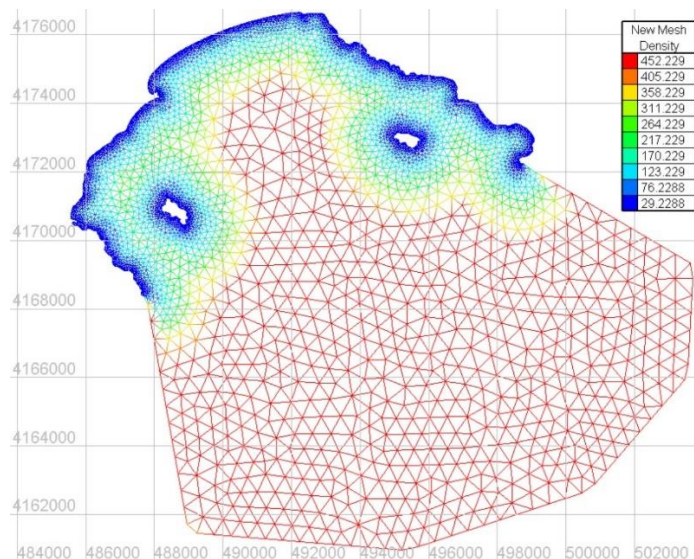
- Το αρχείο με την περιγραφή της γεωμετρίας του πλέγματος και του υψόμετρο των κόμβων (Geometry File)
- Το αρχείο των συνοριακών συνθηκών με τους τύπους των συνθηκών που ισχύουν στα όρια του πλέγματος (Boundary Conditions File)

Οι παραπάνω δύο τύποι αρχείων είναι απαραίτητοι υποχρεωτικά να εισαχθούν στο TELEMAC (Mandatory Files). Δύο βασικά αρχεία πρέπει να έχει ο χρήστης για την διαμόρφωση των δεδομένων εισαγωγής στο TELEMAC. Αυτά είναι:

1. Αρχείο βαθυμετρίας της περιοχής
2. Αρχείο που περιλαμβάνει την ακτογραμμή

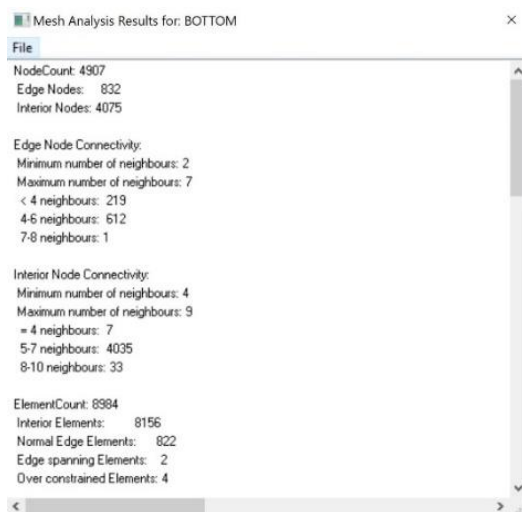
Τα αρχεία της βαθυμετρίας, αλλά και της ακτογραμμής που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη εφαρμογή αντλήθηκαν από την EMODNET-MEDDITERANEAN EU (EMODnet- The European Marine Observation and Data Network, 2019). Το αρχείο της ακτογραμμής δίνεται σε μορφή shapefile (*.shp) και το αρχείο της βαθυμετρίας σε μορφή ASCII (*.xyz).

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή για λόγους ευκολίας θα χρησιμοποιηθεί η αντίστροφη μερκατορική προβολή (Universal Transverse Mercator- UTM). Η μετατροπή από την προβολή WGS-84 σε UTM είναι κάτι που μπορεί να πραγματοποιηθεί από το BK. Η ακτογραμμή της Ζακύνθου ορίζεται από σημεία τα οποία απέχουν 50m το ένα από το άλλο ενώ το ανοιχτό όριο ορίζεται από σημεία με απόσταση 500m. Το πλέγμα που δημιουργείται αποτελείται από τριγωνικά στοιχεία ακανόνιστης γεωμετρίας (unstructured mesh) με μέγιστο μήκος πλευράς που ορίζεται από το χρήστη τα 500m.



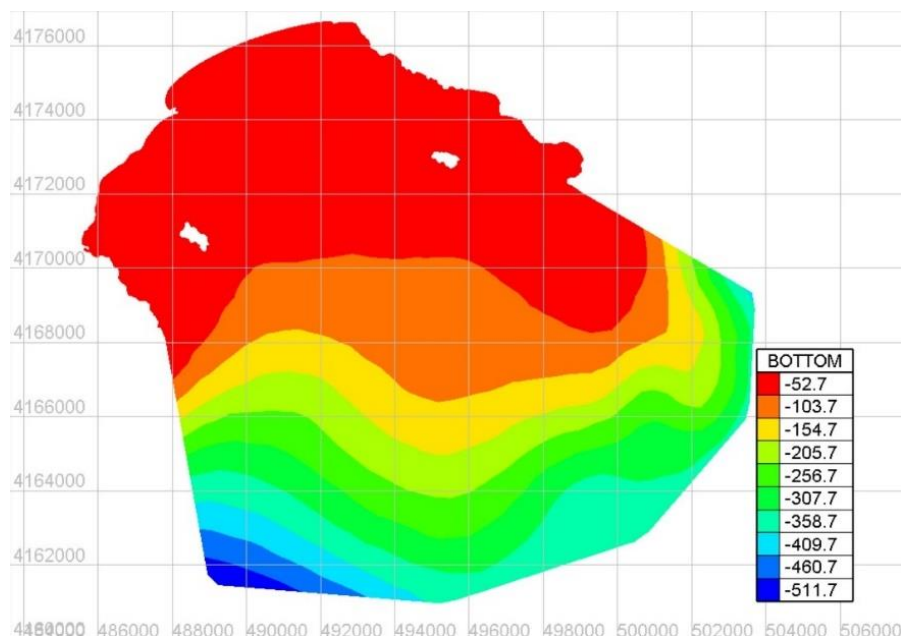
Εικόνα 7.4 Το τελικό πλέγμα, απεικόνιση του μεγέθους σε χρωματική κλίμακα των τριγωνικών στοιχείων που δημιουργήθηκαν

Τελικά, δημιουργείται το επιθυμητό πλέγμα με 4907 κόμβους και 8984 τριγωνικά στοιχεία.

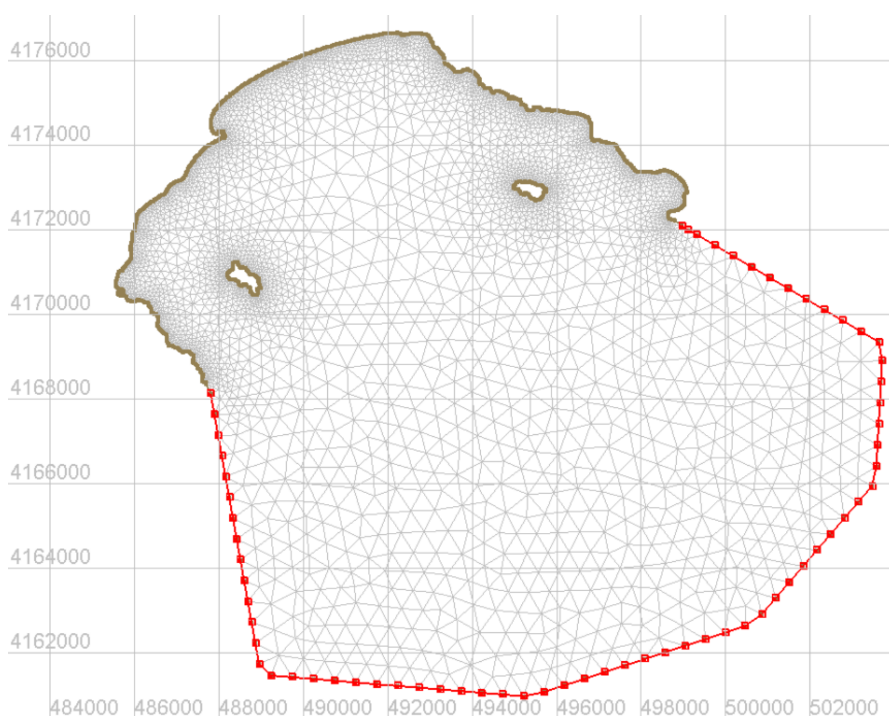


Εικόνα 7.5 Ποιοτικά χαρακτηριστικά του πλέγματος που δημιουργήθηκε

Η ακτογραμμή δεν συμπίπτει απόλυτα με την βαθυμετρία, αυτό έχει ως αποτέλεσμα κατά τη δημιουργία του πλέγματος την εμφάνιση κόμβων που ενώ βρίσκονται από τη μεριά της θάλασσας να έχουν θετικό βάθος. Για το λόγο αυτό έγινε χειροκίνητη διόρθωση των «λανθασμένων» στοιχείων του πλέγματος, είτε εκχωρώντας τιμή σύμφωνα με τις τιμές των διπλανών κόμβων, είτε με αντιπαραβολή κάποιας άλλης πηγής βαθυμετρίας. Ο χάρτης που χρησιμοποιήθηκε για αντιπαραβολή είναι ο διαδικτυακός ναυτικός χάρτης που διαθέτει η ιστοσελίδα NAVIONICS (NAVIONICS-GARMIN, 2019)



Εικόνα 7.6 Τελική εικόνα της βαθυμετρίας της περιοχής



Εικόνα 7.7 Τελική εικόνα στην οποία αποτυπώνεται ο τύπος όλων των ορίων με διαφορετικό χρώμα κόκκινο για το open boundary conditions with prescribed U , V (466), καφέ για τα closed boundaries (walls) (222)

Τα αρχεία που απαιτούνταν (mandatory files) για το TELEMAC είναι πλέον έτοιμα:

- Αρχείο γεωμετρίας (Geometry File) : zante_gulf_geo.slf
- Αρχείο συνοριακών συνθηκών (Boundary Conditions File) : zante_gulf_bound.cli

7.4.2 ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Για την εφαρμογή του μοντέλου TELEMACH2D και τη σύγκριση του με το υπολογιστικό μοντέλο MEDSLIK επιλέχθηκε η ευρύτερη περιοχή του κόλπου του Λαγανά στη Ζάκυνθο. Τα κριτήρια επιλογής της περιοχής ήταν η γεωμετρία της, με την ακτογραμμή του κόλπου και τις δύο μικρές βραχονησίδες εντός του (μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υπόδειγμα εφαρμογής) καθώς και η ύπαρξη της προστατευόμενης περιοχής του Εθνικού Θαλάσσιου Πάρκου της Ζακύνθου που καθιστά την περιοχή ιδιαίτερα ευαίσθητη. Το όριο της περιοχής που ανήκει στο δίκτυο των περιοχών NATURA2000 βρίσκεται 6.5 km από την ακτή του Λαγανά (Geodata, 2019).



Εικόνα 7.8 Προστατευόμενη περιοχή NATURA2000 Εθνικό Θαλάσσιο Πάρκο Ζακύνθου- Διακρίνεται το σημείο διαρροής πετρελαίου

Όπως φαίνεται στην εικόνα 7.10 η πυκνότητα διέλευσης πλοίων από την δυτική μεριά της Ζακύνθου είναι εξαιρετικά μεγάλη, εκεί συγκεντρώνονται και οι περισσότερες πιθανότητες πρόκλησης ατυχήματος που θα έχει ως αποτέλεσμα τη διαρροή πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον. Παρ' όλα αυτά η διαρροή πετρελαίου στην εφαρμογή που εξετάζεται συμβαίνει ανοιχτά του κόλπου σε απόσταση 12.5 km ή 6.75 ναυτικών μιλίων από την ακτογραμμή, σε μια περιοχή που κινούνται κυρίως σκάφη αναψυχής και κρουαζιερόπλοια και λιγότερο πλοία άλλου τύπου. Χάριν της εφαρμογής εξετάζεται η διαρροή πετρελαίου από μικρό πλοίο μεταφοράς πετρελαίου για τον ανεφοδιασμό εμπορικών ή επιβατικών πλοίων, χωρητικότητας 5000 τόνων πετρελαίου (εικόνα 7.9), από το οποίο διαρρέουν επιφανειακά 500 τόνοι πετρελαίου.

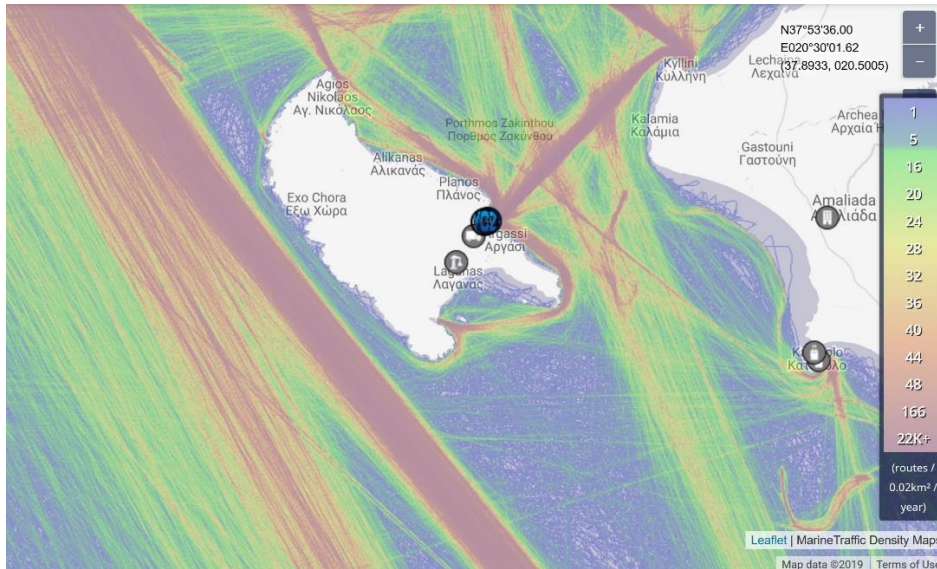
Το πετρέλαιο που διαρρέει είναι πετρέλαιο κίνησης ναυτιλίας (μαζούτ) και έχει τις εξής ιδιότητες:

FUEL OIL #5	
Πυκνότητα (density) 15° C	0.9883 g/ml
API GRAVITY	11.6
Δυναμικό Ιξώδες (dynamic viscosity) 15° C	9.3 cST ή $9,3 \times 10^{-6}$

Πίνακας 9 Ιδιότητες πετρελαίου που χρησιμοποιήθηκε (Zhendi Wang, 2003)



Εικόνα 7.9 Τυπικό πλοίο ανεφοδιασμού καυσίμων (bunkering ship)



Εικόνα 7.10 Χάρτης πυκνότητας κίνησης σκαφών στην ευρύτερη περιοχή της Ζακύνθου (MarineTraffic, 2019)

Συνοπτική παρουσίαση των δεδομένων εισόδου στο TELEMAC2D για την προσομοίωση του ατυχήματος της διαρροής πετρελαίου ακολουθούν στον πίνακα 6.

Θέση ατυχήματος	12.5 km N. Ακτής Λαγανά Lat 37.38 Long 20.57
Ημερομηνία και ώρα διαρροής	20/11/2015 13:00 (UTC)
Ποσότητα πετρελαίου	500 τόνοι
Χρονική διάρκεια διαρροής	Στιγμιαία
Τύπος πετρελαίου	Fuel Oil #5
Αριθμός σωματιδίων	500

Πίνακας 10 Στοιχεία για τον υπολογισμό στο TELEMAC2D

7.4.3 ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Η χρονική περίοδος για την οποία έγινε η προσομοίωση αφορά το χρονικό διάστημα 20 με 22 Νοέμβρη 2015 και επιλέχθηκε καθώς για εκείνη την χρονική περίοδο χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα και στην σύγκριση των μοντέλων MEDSLIK και OSCAR στον Πατραϊκό κόλπο. Πιο συγκεκριμένα η προσομοίωση ξεκινάει στις 20 Νοέμβρη στις 15:00 ώρα Ελλάδας (UTC 13:00) και ολοκληρώνεται 22 Νοέμβρη στις 14:00 (UTC 12:00).

Το αρχείο των αποτελεσμάτων μπορεί να περιλαμβάνει τις μεταβλητές που ζητούνται για εκτύπωση με το χρονικό βήμα που απαιτεί ο χρήστης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο χρόνος εκτύπωσης για τις μεταβλητές του υδροδυναμικού είναι το 1 λεπτό (60 sec), ενώ για τις μεταβλητές που αφορούν τα στοιχεία της πετρελαιοκηλίδας είναι τα 10 λεπτά (600 sec).

7.4.4 ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση αφορούν τον άνεμο αλλά και τη θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας που επικρατούσε στην περιοχή κατά την διάρκεια της χρονικής περιόδου που προσομοιώνεται. Όσον αφορά τον άνεμο αυτός λαμβάνεται σε δύο συνιστώσες της ταχύτητας $x(U)$ και $y(V)$, ανά ώρα. Το σημείο που επιλέχθηκε να ληφθούν τα δεδομένα του ανέμου είναι το σημείο της διαρροής όπως φαίνεται στην εικόνα 7.8 (Lat:20.57, Long 38.37). Τα δεδομένα για τον καιρό (άνεμος, θερμοκρασία) έχουν εξαχθεί με τη χρήση του προγράμματος επεξεργασίας γεωχωρικών δεδομένων QGIS και του εργαλείου valuetool. Τα δεδομένα αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων του ΕΚΠΑ (Σκίρων) (ΕΚΠΑ-openskiron, 2019) για την

περίοδο 20-22 Νοέμβρη 2015 και εισήχθησαν στο TELEMAC2D με χρονικό βήμα 1 ώρας (3600sec). Εφαρμόστηκαν τα δεδομένα για τον άνεμο που πνέει στο σημείο διαρροής για το σύνολο του πεδίου.

Για να ληφθεί υπόψη ο άνεμος στην προσομοίωση στο TELEMAC διαμορφώνεται αρχικά το αρχείο σε μορφή κειμένου (*.txt) που περιλαμβάνει το χρόνο και τις δυο κάθετες συνιστώσες της ταχύτητας του (wind_data.txt)

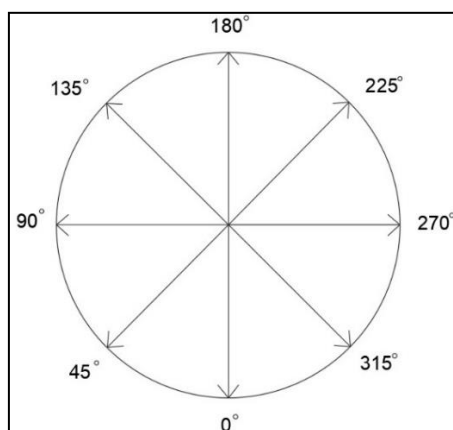
Ο συντελεστής επιρροής του ανέμου κρύβει πολύπλοκα φαινόμενα. Στην πραγματικότητα, η επιρροή του ανέμου εξαρτάται από την ομαλότητα (ή την απουσία της) της ελεύθερης επιφάνειας πάνω στην οποία δρα. Η τιμή του συντελεστή μπορεί να προκύψει από διάφορους τύπους. Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται η εξής φόρμουλα από το Ινστιτούτο Ωκεανογραφικών επιστημών της Μεγάλης Βρετανίας.

$$\begin{aligned} |\vec{U}_{WIND}| < 5\text{m/s} &\Rightarrow a_{wind} = 0.565 \times 10^{-3} \\ 5 < |\vec{U}_{WIND}| < 19.22\text{m/s} &\Rightarrow a_{wind} = (-0.12 + 0.137|\vec{U}_{WIND}|) \times 10^{-3} \\ |\vec{U}_{WIND}| > 19.22\text{m/s} &\Rightarrow a_{wind} = 2.513 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (7.11)$$

Η παράμετρος COEFFICIENT OF WIND INFLUENCE που ζητείται από το TELEMAC-2D είναι $\rho_{air} / \rho_{a_{wind}}$ και όχι $a_{wind} \cdot \rho_{air}$ είναι περίπου 1.2 kg/m^3 και ρ είναι 1000 kg/m^3 . Είναι απαραίτητο να διαιρεθεί η τιμή του a_{wind} με το 1000 για να προκύψει η τιμή του key-word του TELEMAC-2D.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η επιρροή του ανέμου στο υδροδυναμικό που δίνεται μέσω της παραπάνω μεταβλητής είναι:

- COEFFICIENT OF WIND INFLUENCE = 0.565×10^{-6}
- WIND =YES
Λαμβάνεται υπόψη ο άνεμος στη δημιουργία του υδροδυναμικού πεδίου
- OPTION FOR WIND =2
Μορφή των δεδομένων που εισάγονται στο μοντέλο (άνεμος μεταβλητός στο χρόνο και σταθερός ως προς τη θέση)
- ASCII ATMOSPHERIC DATA FILE=wind_data.txt
Ορίζεται το αρχείο που περιλαμβάνει τα ανεμολογικά δεδομένα της προσομοίωσης



Εικόνα 7.11 Ορισμός διεύθυνσης ανέμου

7.4.5 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Οι συνοριακές συνθήκες που εισάγονται στο TELEMAC2D ορίζονται για κάθε σημείο του ορίου. Αφορούν τις κύριες μεταβλητές του προγράμματος ή τις τιμές που απορρέουν από αυτές όπως το βάθος της θάλασσας, οι δύο συνιστώσες της ταχύτητας και η τιμή του κάθε ιχνηθέτη (tracer).

Σε σχέση με τον ορισμό των οριακών συνθηκών στο υδροδυναμικό μοντέλο του TELEMAC2D, οι τρόποι για να οριστούν οι οριακές συνθήκες στο ανοιχτό όριο που μπορεί να είναι κατάλληλοι για περιπτώσεις παρόμοιες με αυτή που μελετάται είναι οι εξής:

1. Ορισμός των ταχυτήτων στο ανοιχτό όριο
2. Ορισμός της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας

Στην παρούσα εργασία οι συνοριακές συνθήκες ορίζονται δίνοντας τις ταχύτητες στο όριο. Δηλαδή, ίδιες ταχύτητες σε κάθε κόμβο του ορίου, μεταβλητές ως προς το χρόνο και κάθετες στο όριο. Το αρχείο που περιγράφει το μέτρο των ταχυτήτων που εισάγεται ως δεδομένο για την συνοριακή συνθήκη ακολουθεί στο παράρτημα.

LIQUID BOUNDARIES FILE: liquid_bound.txt

Εφαρμόζεται σε όλο το όριο ανά χρονικό βήμα η τιμή της ταχύτητας που έχει οριστεί μέσα από το κατάλληλα διαμορφωμένο αρχείο μορφής κειμένου (*.txt), με διεύθυνση κάθετη στο όριο, υπόδειγμα τέτοιου αρχείου ακολουθεί στο παράρτημα.

7.4.6 ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ

Επιπρόσθετα στα αρχεία εισόδου που είναι απαραίτητα για το τρέξιμο του TELEMAC για τον υπολογισμό μιας πετρελαιοκηλίδας πρέπει να προστεθεί ένα αρχείο οδήγησης για αυτή (oil spill steering file). Επίσης για να γίνει δυνατό κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο να διαμορφωθεί κατάλληλα η υπορουτίνα OIL_FLOT σε FORTRAN. Η επεξεργασμένη OIL_FLOT πρέπει να τοποθετηθεί στον φάκελο που περιέχει τις υπορουτίνες, "user_fortran", μέσα στον φάκελο της προσομοίωσης.

Ο χρήστης πρέπει να ορίσει τις εξής παραμέτρους της OIL_FLOT.F για να την προσαρμόσει στις ανάγκες της προσομοίωσης:

1. Τη χρονική στιγμή (χρονικό βήμα) που ξεκινάει η διαρροή
2. Το χρόνο μέχρι τη λήξη των υπολογισμών για τη διαρροή
3. Το σημείο της διαρροής

Αν το σημείο διαρροής οριστεί εκτός του πλέγματος, τότε εμφανίζεται κατάλληλο μήνυμα στο χρήστη και σταματάει η προσομοίωση. Επιπρόσθετα, αν ένα σωματίδιο βρεθεί εκτός του πεδίου εφαρμογής κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, δεν συνεχίζεται προφανώς η καταγραφή της θέσης του αλλά αποθηκεύεται στο σύνολο της η τροχιά την οποία είχε μέχρι εκείνο το σημείο, στο αρχείο των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Το τροποποιημένο τμήμα της υπορουτίνας OIL_FLOT.f παρουσιάζεται στο παράρτημα της εργασίας.

Ενώ τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση είναι:

- Έναρξη της διαρροής στις 15:00 ώρα Ελλάδας (13:00 UTC)
- Το συνολικό χρονικό διάστημα της προσομοίωσης ισούται με 2 24ώρα
- Το σημείο της διαρροής όπως έχει οριστεί (**Lat 38.37 Long 20.57**) και φαίνεται στην εικόνα 7.8

Η διαμόρφωση του oil spill steering file θα πρέπει να τοποθετηθεί στον ίδιο φάκελο με το αρχείο οδήγησης (.cas) του TELEMAC-2D για να συμπεριληφθεί η υπορουτίνα που διαχειρίζεται την εξέλιξη της πετρελαιοκηλίδας γίνεται με τα ακόλουθα key-words:

- OIL SPILL MODEL= YES
ενεργοποιεί το μοντέλο oilspill ολοκληρωμένο στο TELEMAC-2D

- OIL SPILL STEERING FILE= oilspill.txt
ορίζεται το αρχείο που περιλαμβάνει τις παραμέτρους του πετρελαίου που είναι απαραίτητες για την προσομοίωση, δηλαδή ένα αρχείο κειμένου (*.txt) όπως αυτό παρουσιάζεται στο παράρτημα

Το είδος του πετρελαίου που χρησιμοποιήθηκε είναι το πετρέλαιο κίνησης που χρησιμοποιείται στην ναυτιλία (fuel oil #5) και είναι το ίδιο με το πετρέλαιο της προσομοίωσης που έγινε στο MEDSLIK για την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων. Το αρχείο με τις παραμέτρους που περιγράφουν το πετρέλαιο (oil spill steering file) πρέπει να περιλαμβάνει τα εξής:

- Τον αριθμό των μη διαλυτών συστατικών του πετρελαίου, το κλάσμα της μάζας (%) και τη θερμοκρασία βρασμού (σε Κ) του κάθε συστατικού
- Τον αριθμό των διαλυτών συστατικών του πετρελαίου, το κλάσμα της μάζας (%), τη θερμοκρασία βρασμού (Κ), τη διαλυτότητα ($\text{kg} \times \text{m}^{-3}$) και το συντελεστή μεταφοράς μάζας των φαινομένων διάλυσης και εξαέρωσης ($\text{m} \times \text{s}^{-1}$)
- Την πυκνότητα του πετρελαίου
- Το ιξώδες του πετρελαίου ($\text{m}^2 \times \text{s}^{-1}$)
- Τον όγκο του πετρελαίου που διέρρευσε (m^3)
- Την θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας (Κ)
- Το μοντέλο εξάπλωσης που επιλέγεται από τον χρήστη:
 1. Fay's model
 2. Migr' Hycar model
 3. Constant area model

Το άθροισμα των κλασμάτων της μάζας του πετρελαίου του κάθε συστατικού πρέπει να ισούται με το 1 διαφορετικά το πρόγραμμα θα εμφανίσει το εξής μήνυμα:

“WARNING:: THE SUM OF EACH COMPONENT MASS FRACTION IS NOT EQUAL TO 1”
“PLEASE MODIFY THE INPUT STEERING FILE”

- NUMBER OF DROGUES = 500
ο αριθμός των σωματιδίων που θα αφηθεί κατά την διαρροή του πετρελαίου
- PRINTOUT PERIOD FOR DROGUES = 600
η συχνότητα με την οποία θα εκτυπώνονται τα σωματίδια
- DROGUES FILE = oil_displacement.dat
ορίζεται το όνομα του αρχείου σε Tecplot μορφή που θα περιέχει τη μετατόπιση των σωματιδίων

Με το μοντέλο της πετρελαιοκηλίδας είναι δυνατό να ληφθεί υπόψη η μετατόπιση των διαλυτών συστατικών του πετρελαίου στο νερό, των οποίων η παρουσία δεν έχει καμία επιρροή στην υδροδυναμική. Αυτά μπορεί να διαχυθούν ή όχι στη ροή, αλλά τα χαρακτηριστικά τους πρέπει να οριστούν στο oil spill steering file. Αν αυτά τα συστατικά στοιχεία επιτρέπεται να διαχυθούν στη ροή τότε αντιμετωπίζονται από το TELEMAC-2D σαν να πρόκειται για τον υπολογισμό της μετακίνησης των ιχνηθετών (tracer transport). Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να ενεργοποιηθεί η επιλογή στο steering file του TELEMAC-2D για τους ιχνηθέτες μέσω των παρακάτω key-words:

- TRACER = YES
ενεργοποιεί τους ιχνηθέτες
- NUMBER OF TRACERS = 4
πλήθος των ιχνηθετών, πρέπει να οριστεί με αριθμό ίσο με το πλήθος των διαλυτών συστατικών του πετρελαίου στο νερό

Αν παραπάνω από ένα από τα συστατικά του πετρελαίου διαλύονται στο νερό τότε το αρχείο με τα αποτελέσματα μπορεί να περιέχει το σύνολο των συγκεντρώσεων του διαλυμένου στο νερό

πετρελαίου. Ο χρήστης πρέπει να προσθέσει την μεταβλητή N στην λίστα των γραφικών εκτυπώσεων.

- VARIABLES OF GRAPHIC PRINTOUTS= '.....,N'

Πιο συγκεκριμένα για τη λειτουργία των ιχνηθετών (tracers). Με το TELEMAC-2D δίνεται η δυνατότητα όπως τονίστηκε και παραπάνω να ληφθεί υπόψη η μεταφορά πλήθους μη-πλωτών ιχνηθετών, που δεν επηρεάζουν δηλαδή την υδροδυναμική, ανεξάρτητα αν θα διαχυθούν ή όχι. Υπάρχει η δυνατότητα να δοθεί η ονομασία και οι μονάδες του κάθε ιχνηθέτη μέσω του key-word:

- NAMES OF THE TRACERS= 'OIL-COMPONENT-1--KG/M3-----'
Με την παύλα - υποδηλώνονται τα κενά, 16 χαρακτήρες το όνομα και 16 η μονάδα μέτρησης του ιχνηθέτη
- INITIAL VALUES OF TRACERS= 0;0;0;0
ορίζονται οι αρχικές τιμές των ιχνηθετών- των 4 διαλυτών συστατικών του πετρελαίου, στη συγκεκριμένη περίπτωση μηδενικές
- COEFFICIENT FOR DIFFUSION OF TRACERS= 0.000001
ορίζεται ο συντελεστής διάχυσης των ιχνηθετών, στη συγκεκριμένη περίπτωση διατηρείται η default τιμή του, η παράμετρος αυτή έχει πολύ μεγάλη επίδραση στην διάχυση των tracers ως προς το χρόνο
- IMPLICITATION COEFFICIENT OF TRACERS = 1
για τη ρύθμιση των τιμών στις περιπτώσεις που έχω σχήματα όπως το SUPG
- SOLVER FOR DIFFUSION OF TRACERS = 4
η μέθοδος με την οποία επιλύονται οι tracers, τώρα η μέθοδος του μικρότερου λάθους- minimum error method
- MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR DIFFUSION OF TRACERS = 60000
ορίζεται ο μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων που είναι αποδεκτό να γίνουν για την διάχυση των ιχνηθετών
- ACCURACY FOR DIFFUSION OF TRACERS = 1.E-20
ακρίβεια με την οποία υπολογίζεται η διάχυση των ιχνηθετών, default value 10^{-6}
- OPTION FOR THE DIFFUSION OF TRACERS = 2
επιλογή της μεθόδου με την οποία διαχέονται οι tracers, 2- καλή διατήρηση της μάζας του ιχνηθέτη αλλά κρίσιμη στην περίπτωση tidal flats, $\frac{1}{h} \operatorname{div}(\overline{\operatorname{grad}(T)})$
- MASS-LUMPING ON TRACERS = 1

7.4.7 ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Οι αρχικές συνθήκες περιγράφουν την κατάσταση που επικρατεί στο μοντέλο τη χρονική στιγμή $t=0s$.

- ZERO ELEVATION = Αρχικοποίηση της ελεύθερης επιφάνειας από την αρχική στάθμη 0. Τα αρχικά βάθη υπολογίζονται από την επιφάνεια του πυθμένα

7.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ MEDSLIK

Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο MEDSLIK προκειμένου να γίνει σύγκριση με το TELEMAC2D είναι τα εξής:

- Ανεμολογικά- εφαρμογή μεταβλητού ανέμου ως προς το χρόνο σταθερού σε όλο το πεδίο όπως ακριβώς εισάγεται και στο TELEMAC2D
- Υδροδυναμικά- εισαγωγή της τιμής του ρεύματος που δημιουργείται στο σημείο της διαρροής μεταβλητού στο χρόνο σταθερού σε όλο το πεδίο, η τιμή του ρεύματος λαμβάνεται από το πεδίο ροής του TELEMAC2D (βλέπε παράρτημα)
- Πετρέλαιου- καθώς ο τύπος πετρελαίου που επιλέγει για την προσομοίωση στο TELEMAC δεν είναι ακριβώς ίδιος με κάποιον από αυτούς που έχει στη βιβλιοθήκη του το MEDSLIK

επιλέγεται στο MEDSLIK generic πετρέλαιο με API 16, έχοντας παρόμοια χαρακτηριστικά με το πετρέλαιο που εισήχθη στο TELEMAC2D

- Αριθμός σωματιδίων: 10000
- Συντελεστής διάχυσης 20000 cm²/s
- Συντελεστής ολίσθησης 0.031
- Χρονικό βήμα: 30 λεπτά

Η συνοπτική παρουσίαση των δεδομένων εισόδου και του τρόπου που αυτά εισάγονται στα δύο μοντέλα φαίνονται στον παρακάτω συγκριτικό πίνακα (Πίνακας 11)

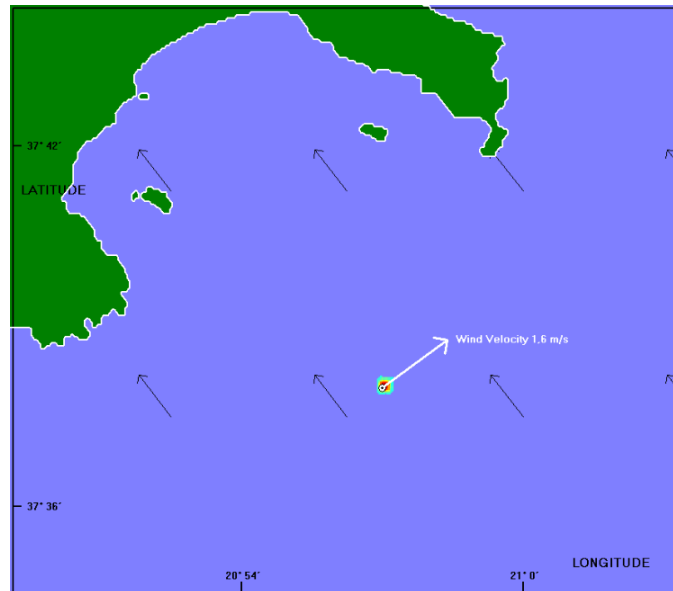
	MEDSLIK	TELEMAC2D
Διάρκεια διαρροής	Στιγμιαία	
Θέση ατυχήματος	12.5 km N. Ακτής Λαγανά Lat 37.38 Long 20.57	
Χρονική διάρκεια υπολογισμού	48 ώρες	
Υδροδυναμικό πεδίο	Σταθερό ρεύμα ως προς τη θέση Μεταβλητό ως προς χρόνο	Δημιουργία βάσει συνοριακών συνθηκών/ Μεταβλητό ως προς χρόνο και θέση
Άνεμος	Σταθερός ως προς τη θέση Μεταβλητός ως προς το χρόνο	
Πετρέλαιο	500 τόνοι/ API 16 (βαρύ πετρέλαιο)	500 τόνοι /Fuel Oil #5 (βαρύ πετρέλαιο)
Χρονικό βήμα/ Εμφάνιση ανά	30 λεπτά/ 3 ώρες	1 δευτερόλεπτο/ 1 λεπτό
Αριθμός σωματιδίων	10000	500

Πίνακας 11 Συγκριτικός πίνακας παρουσίασης δεδομένων εισόδου στα δύο μοντέλα

7.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ TELEMAC2D-MEDSLIK

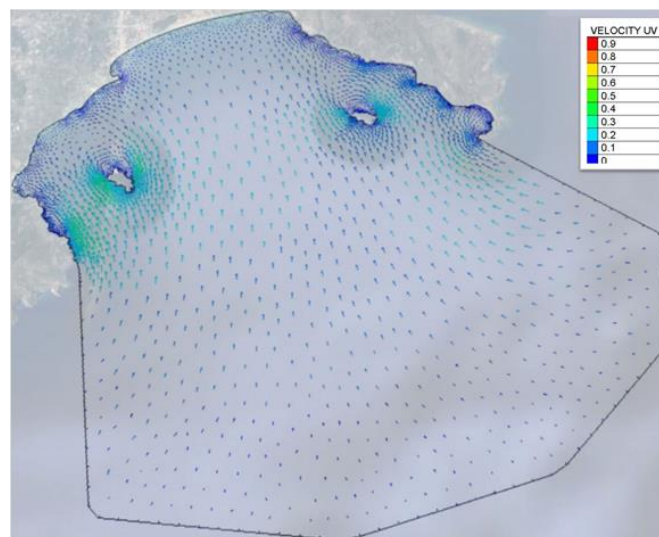
7.6.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ

Όπως τονίστηκε και προηγουμένως (βλ. Κεφάλαιο 6.3.3), το υδροδυναμικό πεδίο το οποίο λαμβάνει το MEDSLIK, για να επιλύσει τις εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά της πετρελαιοκηλίδας, δημιουργείται θεωρώντας σταθερή τιμή του ρεύματος ανά χρονικό βήμα για το σύνολο του πεδίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παρακάτω ενδεικτική εικόνα για το υδροδυναμικό πεδίο την στιγμή της διαρροής.



Εικόνα 7.12 Υδροδυναμικό πεδίο MEDSLIK τη στιγμή της διαρροής

Αντίθετα το TELEMAC2D δημιουργεί το πεδίο ροής με βάση τις συνοριακές συνθήκες που έχουν δοθεί (βλ. Κεφάλαιο 7.4.5), το οποίο παρουσιάζει την εξής εικόνα 13 ώρες μετά τη διαρροή (Εικόνα 7.13):

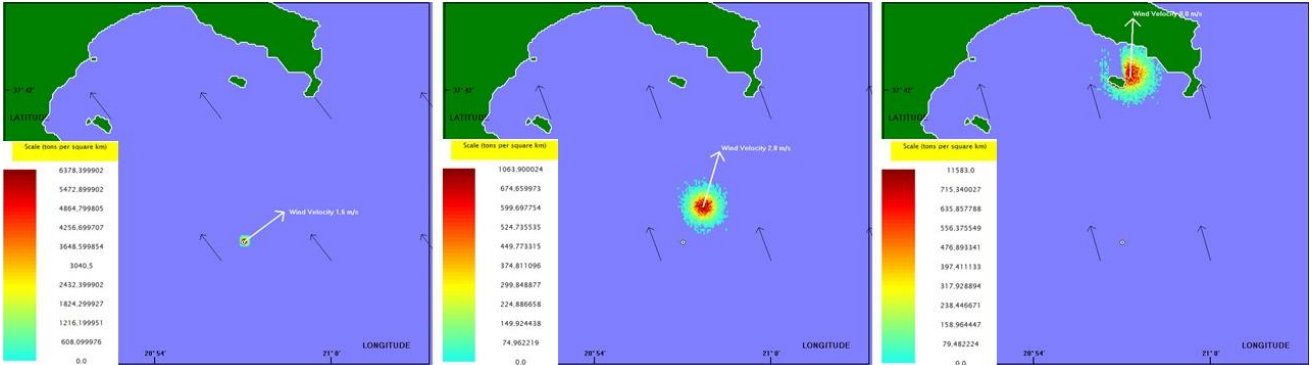


Εικόνα 7.13 Υδροδυναμικό πεδίο TELEMAC2D 13 ώρες μετά τη διαρροή

Ο παράγοντας που έχει καθοριστική συμβολή στη μετακίνηση της πετρελαιοκηλίδας είναι ο άνεμος, όπως φαίνεται και στη συνέχεια, τα ρεύματα ασκούν μικρότερη επιρροή στην τροχιά της πετρελαιοκηλίδας.

7.6.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΡΟΧΙΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ

Από το MEDSLIK προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα όσον αφορά την εξέλιξη της πετρελαιοκηλίδας. Το πετρέλαιο φτάνει στην ακτή 15 ώρες μετά τη διαρροή στο δυτικό άκρο του κόλπου επηρεάζοντας νωρίτερα την βραχονησίδα (Καλονήσι) που βρίσκεται εκεί (14 ώρες).



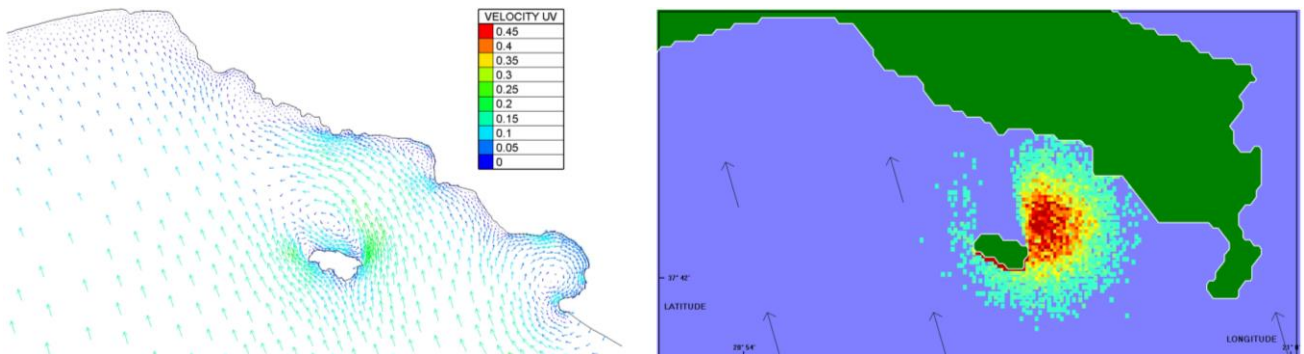
Εικόνα 7.14 Τροχιά της πετρελαιοκηλίδας τις χρονικές στιγμές 0, 9 και 15 ώρες μετά τη διαρροή (MEDSLIK)

Η αντίστοιχη εικόνα που προκύπτει για την τροχιά της πετρελαιοκηλίδας από το TELEMAC2D είναι η ακόλουθη (Εικόνα 7.15)



Εικόνα 7.15 Τροχιά της πετρελαιοκηλίδας 4,9 και 15 ώρες μετά τη διαρροή(TELEMAC2D)

Στην εικόνα που δίνεται από το MEDSLIK (Εικόνα 7.14) περιλαμβάνονται τα σωματίδια με κατάλληλο χρωματισμό σε κλίμακα τόνων ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο, ενώ στην εικόνα του TELEMAC2D (Εικόνα 7.15) παρουσιάζεται η συνολική μετατόπιση των σωματιδίων που αντιπροσωπεύουν την πετρελαιοκηλίδα. Όπως φαίνεται από τη σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων η τροχιά την οποία διαγράφει το πετρέλαιο είναι παρόμοια, καθώς όπως τονίστηκε και προηγουμένως το μεγαλύτερο ρόλο σε αυτό τον έχει ο άνεμος, ο οποίος έχει δοθεί με τον ίδιο τρόπο και στα δύο μοντέλα. Διαφοροποίηση παρατηρείται κοντά στην ακτογραμμή που οφείλεται στο υδροδυναμικό πεδίο που δημιουργήθηκε στο TELEMAC2D και είναι διαφορετικής μορφής από το αντίστοιχο πεδίο στο MEDSLIK όπως φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 7.16)



Εικόνα 7.16 Υδροδυναμικό πεδίο αριστερά για το TELEMAC2D και δεξιά για το MEDSLIK (εστίαση στην περιοχή που το πετρέλαιο συναντά την ακτή)

Η συνολική εξέλιξη της πετρελαιοκηλίδας ως προς τη θέση φαίνεται και για τα δύο μοντέλα στην συνέχεια. Επίσης λόγω του υδροδυναμικού πεδίου του TELEMAC2D και της ανακυκλοφορίας που δημιουργείται βόρεια της βραχονησίδας Καλονήσι και της ακτής της Ζακύνθου (Εικόνα 7.16), τα σωματίδια που αντιπροσωπεύουν το πετρέλαιο φαίνεται ότι πλήττουν τη βόρεια ακτή της βραχονησίδας κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στο MEDSLIK (Εικόνες 7.17 και 7.18)



Εικόνα 7.17 Συνολική μετατόπιση πετρελαιοκηλίδας 48 ώρες μετά τη διαρροή (υπέρθεση των στιγμιότυπων ανά 3 ώρες) (MEDSLIK)



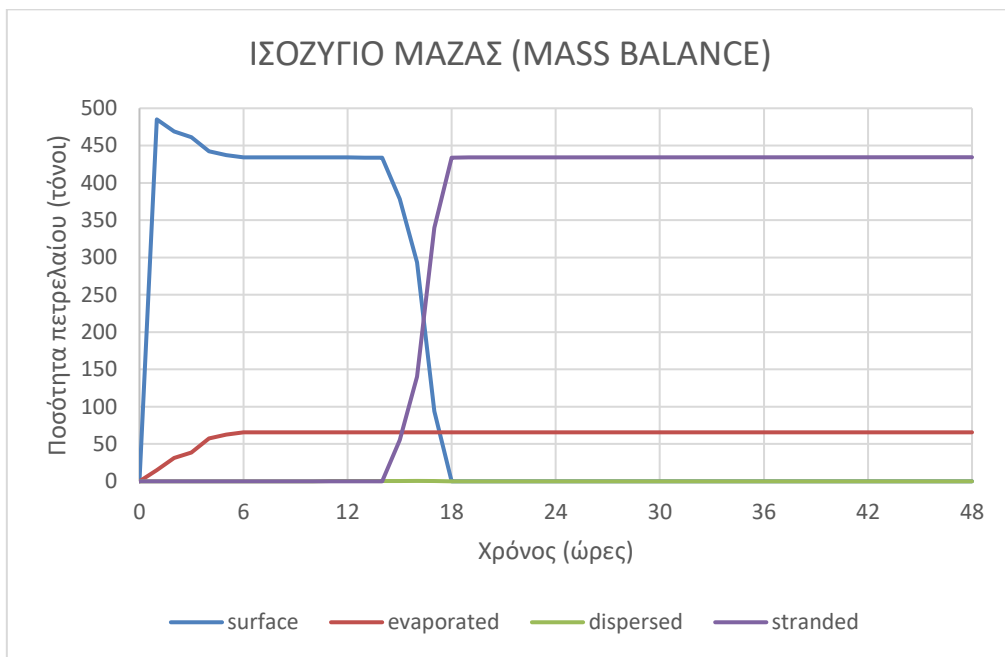
Εικόνα 7.18 Συνολική μετατόπιση πετρελαιοκηλίδας 48 ώρες μετά τη διαρροή (TELEMAC2D)

7.6.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΑΖΑΣ

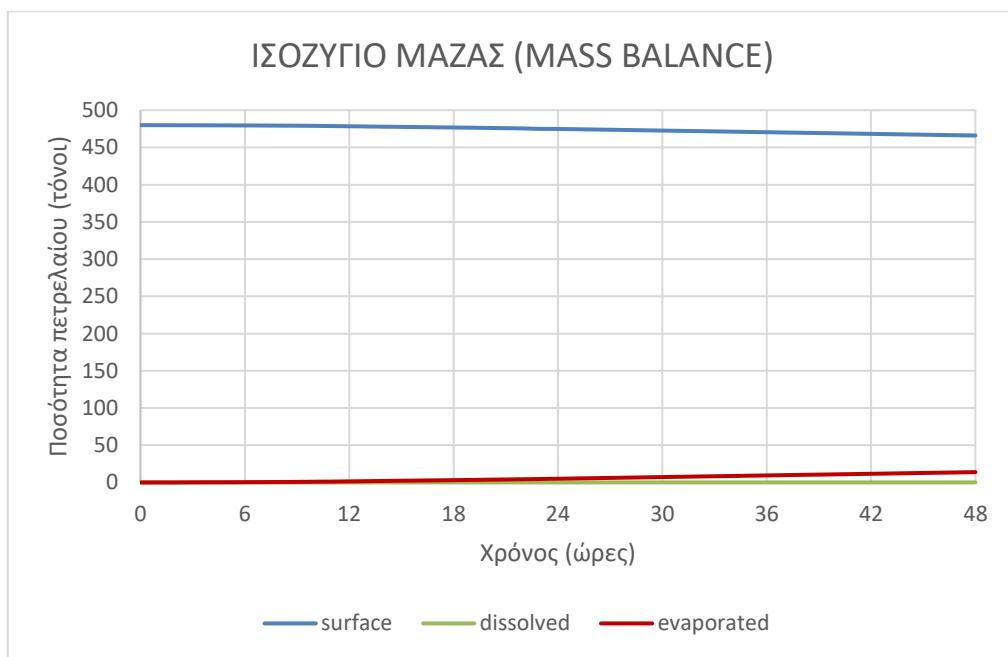
Το ισοζύγιο μάζας που προκύπτει από την προσομοίωση στο MEDSLIK φαίνεται στο διάγραμμα 11, ενώ το ισοζύγιο μάζας που προκύπτει από το TELEMAC2D στο διάγραμμα 12.

Στο ισοζύγιο μάζας του MEDSLIK φαίνεται καθαρά ότι 14 ώρες μετά τη διαρροή το πετρέλαιο φτάνει στην ακτή και ένα μέρος του πετρελαίου στην επιφάνεια μετατρέπεται σε πετρέλαιο στην ακτή ενώ η εξάτμιση φτάνει στο μέγιστο 6 ώρες μετά τη διαρροή και σταματά να επιδρά σαν διεργασία. Επίσης δεν φαίνεται ποσότητα πετρελαίου που βγήκε στην ακτή να επανέρχεται στη θάλασσα λόγω απόπλυσης της ακτής.

Το TELEMAC2D δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού και εξαγωγής του ισοζυγίου μάζας διαιρώντας το πετρέλαιο στις εξής κατηγορίες, πετρέλαιο στην επιφάνεια, πετρέλαιο που εξατμίστηκε, πετρέλαιο που διαλύθηκε και πετρέλαιο που κατέληξε στην ακτή. Στο ισοζύγιο μάζας του TELEMAC2D διακρίνεται το εξής πρόβλημα: Όπως εύκολα μπορεί να γίνει αντιληπτό, ενώ σύμφωνα με την εικόνα της μετατόπισης των σωματιδίων (Εικόνα 7.18, 7.20) που αντιπροσωπεύουν την πετρελαιοκηλίδα φαίνεται πως αυτή έχει φτάσει στην ακτογραμμή και της βραχονησίδας αλλά και του ανατολικού άκρου του κόλπου, η ποσότητα του πετρελαίου που έχει φτάσει στην ακτή φαίνεται μηδενική στο mass balance. Αυτό μπορεί να συμβαίνει είτε λόγω μηδενικής απορροφητικότητας της ακτής, άρα ότι ποσότητα πετρελαίου φτάνει στην ακτή δεν προσκολλάται σε αυτή, είτε λόγω μη ικανοποίησης των συνθηκών για την προσκόλληση του πετρελαίου σε αυτή, όπως καταγράφονται στο Κεφάλαιο 7.3. Αυτό έχει ως συνέπεια το σύνολο του πετρελαίου να θεωρείται επιφανειακό εκτός από την ποσότητα που εξατμίστηκε ή διαλύθηκε στο νερό.



Διάγραμμα 3 Mass Balance (MEDSLIK)



Διάγραμμα 4 Mass Balance TELEMAC2D

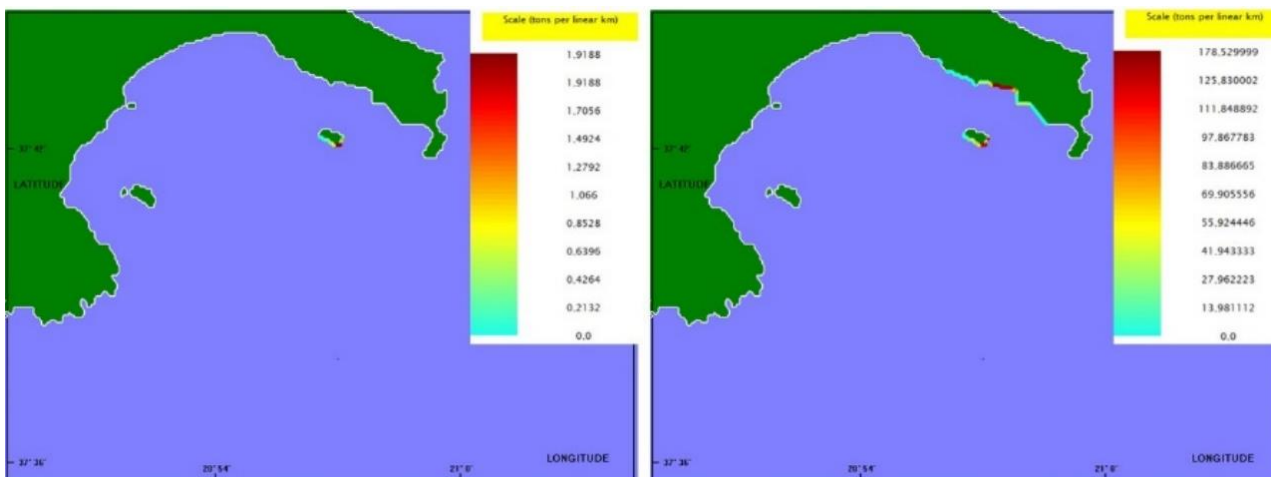
Στη συνέχεια επισημαίνεται η έκταση της ακτογραμμής που έχει επηρεαστεί από το πετρέλαιο 48 ώρες μετά τη διαρροή. Το μήκος της ακτογραμμής που επηρεάζεται είναι για το MEDSLIK 6.26 χιλιόμετρα (1.26 χιλιόμετρα στη βραχονησίδα και 5 χιλιόμετρα στην ακτή-Εικόνα 7.19), ενώ για το TELEMAC2D είναι συνολικά 5.4 χιλιόμετρα (1.67 χιλιόμετρα στη βραχονησίδα και 3.73 χιλιόμετρα στην ακτή-Εικόνα 7.20)



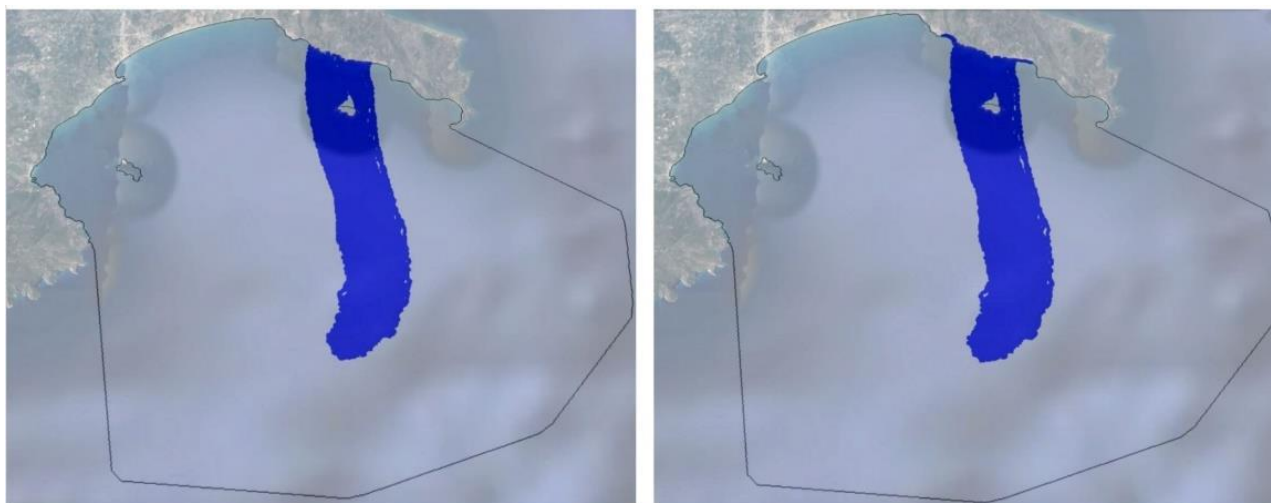
Εικόνα 7.19 Το τμήμα της ακτής που έχει προσβληθεί από το πετρέλαιο (κόκκινη γραμμή) (MEDSLIK)



Εικόνα 7.20 Το τμήμα της ακτής που έχει προσβληθεί από το πετρέλαιο (κόκκινη γραμμή) (TELEMAC2D)



Εικόνα 7.21 Πετρέλαιο στην ακτή 15 και 48 ώρες μετά τη διαρροή (MEDSLIK)



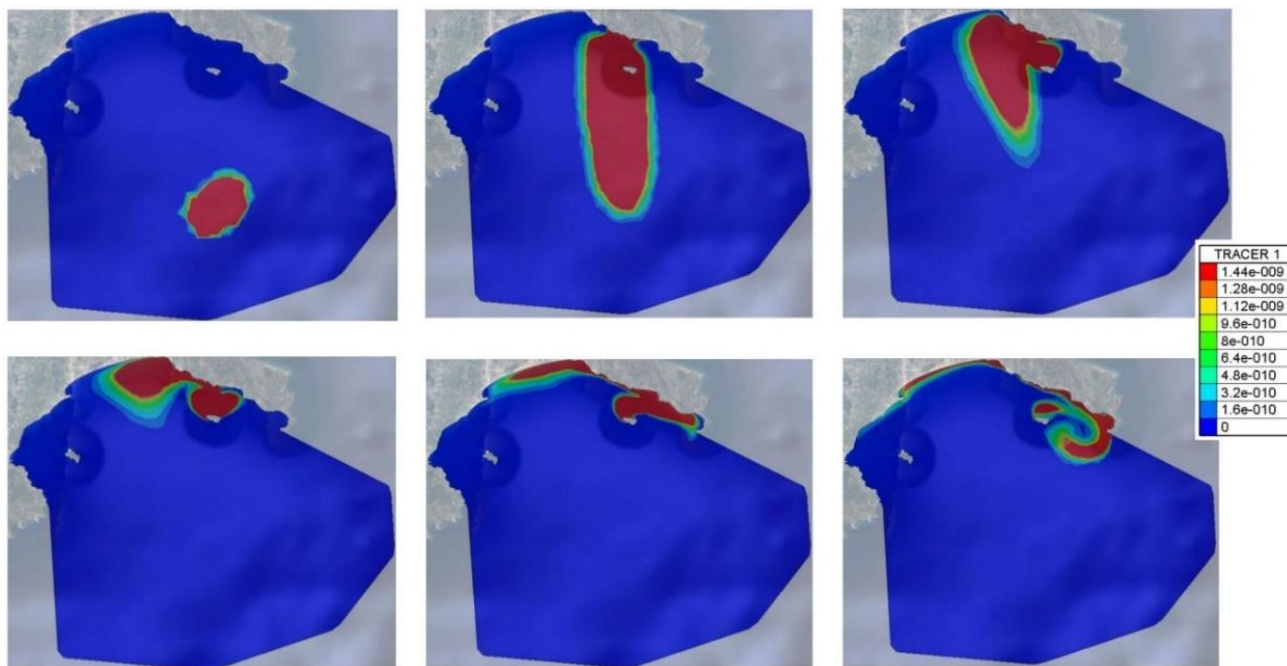
Εικόνα 7.22 Συνολική πορεία πετρελαίου 15 και 48 ώρες μετά τη διαρροή (TELEMAC2D)

Ενώ η μέγιστη εξάπλωση της πετρελαιοκηλίδας από ανατολικά προς δυτικά στην περίπτωση της προσομοίωσης του MEDSLIK είναι περίπου 3 χιλιόμετρα ενώ στο TELEMAC2D προκύπτει 2.2 χιλιόμετρα κοντά στην βραχονησίδα Καλονήσι (Πελοούζο) όπως φαίνεται και στη σύγκριση στην Εικόνα 7.23.



Εικόνα 7.23 Σύγκριση μέγιστου πλάτους πετρελαιοκηλίδας (αριστερά MEDSLIK-δεξιά TELEMAC2D)

Το TELEMAC2D διαθέτει την επιπλέον δυνατότητα να ληφθούν υπόψη τα διαλυτά στοιχεία (soluble components) του πετρελαίου και σε καθένα από αυτά, ορίζοντας έναν ιχνηθέτη, να γίνει καταγραφή της συγκέντρωσής τους (σε κιλά ανά κυβικό μέτρο) (Εικόνα 7.24). Αυτή η δυνατότητα μπορεί να έχει εφαρμογή σε περιπτώσεις που το κύριο ενδιαφέρον εστιάζεται στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού που μπορούν να επηρεάσουν την ζωή στο θαλάσσιο και παράκτιο περιβάλλον. Επίσης το TELEMAC2D μπορεί να συζευχθεί με το μοντέλο πρόβλεψης κυματικού κλίματος TOMAWAC, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση ρευμάτων-κυμάτων και κατά πόσο επηρεάζονται οι διεργασίες αλλά και η συνολική μεταφορά της πετρελαιοκηλίδας.



Εικόνα 7.24 Εξέλιξη της συγκέντρωσης του component 1 σε kg/m^3 ανά 8 ώρες, ξεκινώντας 8 ώρες μετά τη διαρροή (8,16,24,32,40 και 48 ώρες μετά τη διαρροή)

7.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ TELEMAC2D ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΑΣ (OIL_FLOT.f)

Το module OIL_FLOT.f που είναι ενσωματωμένο στο υδροδυναμικό μοντέλο TELEMAC2D παρουσιάζει συγκεκριμένες αδυναμίες τόσο στην εφαρμογή του, όσο και στα αποτελέσματα που μπορεί να προσφέρει. Αναλυτικά:

1. Προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα, σε σύγκριση με το MEDSLIK, όσον αφορά τη συνολική μετατόπιση του πετρελαίου και τη χρονική μετατόπιση της πετρελαιοκηλίδας (παρόμοια χρονική στιγμή άφιξης πετρελαίου στην ακτή).
2. Διαθέτει το πλεονέκτημα σε σχέση με το MEDSLIK ότι μπορεί να προσομοιώσει τη διεργασία της διάλυσης των ξεχωριστών συστατικών μερών του πετρελαίου και να καταγράψει τη συγκέντρωση αλλά και την εξέλιξη τους, γεγονός εξαιρετικά χρήσιμο για τη μελέτη των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού.
3. Βασίζεται στο υδροδυναμικό μοντέλο TELEMAC2D που τρέχει ταυτόχρονα και δεν χρησιμοποιεί δεδομένα ρευμάτων που μπορούν να αντληθούν από κάποια διαθέσιμη βάση δεδομένων. Άρα, για τη χρήση του απαιτείται ένα αξιόπιστο και ποιοτικό μοντέλο κυκλοφορίας που έχει δημιουργηθεί στο TELEMAC2D, με αποτέλεσμα την απαίτηση χρόνου τόσο για τη δημιουργία του πεδίου όσο και αυξημένου υπολογιστικού χρόνου στο τρέξιμο του.
4. Δεν μπορεί να προσομοιωθεί συνεχής διαρροή πετρελαίου χωρίς επέμβαση και τροποποίηση του κώδικα, παρά μόνο στιγμιαία, με ότι συνεπάγεται αυτό για τη δυνατότητα προσομοίωσης πραγματικών περιστατικών διαρροών.

5. Παρουσιάζει σοβαρή αδυναμία στη συγκεκριμένη εφαρμογή όσον αφορά την υπορουτίνα που ελέγχει την επαφή του πετρελαίου με την ακτή (subroutine oil_beaching) με αποτέλεσμα να μην καταγράφεται το αντίστοιχο ποσοστό του πετρελαίου. Κάτι το οποίο συμβαίνει και στην εφαρμογή που χρησιμοποιήθηκε για την τεκμηρίωση της εργασίας (Cédric Goeury Engineer-Researcher, 2014) -Girondine Estuary, συνεπώς υπάρχει η πιθανότητα το συγκεκριμένο τμήμα του κώδικα να χρειάζεται βελτίωση.
6. Επίσης δυσκολία παρουσιάζει και η διαμόρφωση του αρχείου με τα χαρακτηριστικά του πετρελαίου (oil spill steering file) καθώς δεν είναι εύκολο να αντληθούν τα δεδομένα που απαιτούνται για κάθε διαλυτό και μη διαλυτό στοιχείο συγκεκριμένου τύπου πετρελαίου, ελεύθερα από το διαδίκτυο.

Συνολικά κρίνεται ότι το μοντέλο συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδας OIL_FLOT.f επιδέχεται βελτιώσεων, οπότε προτείνεται η περεταίρω ανάπτυξη του να επικεντρωθεί στα παρακάτω:

- Δυνατότητα προσομοίωσης συνεχούς διαρροής πετρελαίου
- Δημιουργία βάσης δεδομένων για αντιπροσωπευτικούς τύπους πετρελαίου με περιγραφή των ιδιοτήτων των συστατικών τους
- Διόρθωση και βελτίωση της υπορουτίνας που λαμβάνει υπόψη την επαφή του πετρελαίου με την ακτογραμμή
- Δυνατότητα απεικόνισης της εξέλιξης της πετρελαιοκηλίδας σε κάθε χρονική στιγμή που επιλέγεται από το χρήστη

	MEDSLIK	TELEMAC2D (OIL_FLOT.f)
Open Source Code		✓
Free Distributed	✓	✓
Advection	✓	✓
Diffusion	✓	✓
Wind Drift	✓	✓
Stokes Drift		✓
Backtracking	✓	
Beaching	✓	✓
Spreading	✓	✓
Evaporation	✓	✓
Emulsification	✓	
Natural Dispersion	✓	
Vertical Movement	✓	
Dissolution		✓
Sedimentation		
Biodegradation		
Volatilization		✓

Πίνακας 12 Συγκριτική σύγκριση των διεργασιών που λαμβάνονται υπόψη στα δύο μοντέλα

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αρχικά πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ του εμπορικού μοντέλου συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδας OSCAR (με βάση την εργασία του (Panagiotis Makatounis, Jorgen Skancke, Evanthia Florou, Anastasios Stamou, Per Johan Brandnvik, 2017)) και του μοντέλου MEDSLIK στον Πατραϊκό Κόλπο για το σενάριο διαρροής που αναλύεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 6). Ενώ στη συνέχεια έγινε προσπάθεια προσομοίωσης ατυχήματος διαρροής πετρελαίου με χρήση του open-source μοντέλου TELEMAC2D και ειδικότερα της υπορουτίνας OIL_FLOT.f σε μια απλή περίπτωση (κόλπος Λαγανά, Ζάκυνθος) η οποία αναλύεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 7) και σύγκριση του με το MEDSLIK. Τα συμπεράσματα από τις συγκρίσεις των μοντέλων δίνονται αναλυτικά στις αντίστοιχες ενότητες, ενώ παρακάτω ακολουθούν τα γενικότερα συμπεράσματα όσον αφορά τη χρήση των 3 μοντέλων στις εφαρμογές που προηγήθηκαν:

1. Τα δύο μοντέλα (OSCAR και MEDSLIK) μπορούν εξίσου ικανοποιητικά να περιγράψουν την εξέλιξη και συμπεριφορά μιας πετρελαιοκηλίδας όσον αφορά την τροχιά της, το χρόνο και τη θέση που θα καταλήξει το πετρέλαιο στην ακτογραμμή.
2. Το OSCAR υπερέχει όσον αφορά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά κατά την εξέλιξη και γήρανση της πετρελαιοκηλίδας, τόσο γιατί συνυπολογίζει μεγάλο πλήθος διεργασιών που το MEDSLIK τις αγνοεί όσο και γιατί παρέχει τη δυνατότητα σύζευξης με μοντέλα που περιγράφουν διάφορους δείκτες επιρροής του περιβάλλοντος.
3. Το TELEMAC2D και ειδικότερα η υπορουτίνα που προσομοιώνει τη συμπεριφορά του πετρελαίου παρουσιάζει τόσο δυσκολία στην χρήση όσο και αδυναμία στην ορθή περιγραφή του φαινομένου, πάντα σε σύγκριση με το MEDSLIK. Η δυσκολία στην χρήση έγκειται στο ότι είναι απαραίτητο ένα ποιοτικό υδροδυναμικό μοντέλο της περιοχής ενδιαφέροντος που θα έχει δημιουργηθεί στο TELEMAC2D, όσο και σε άλλες πλευρές που αφορούν τα διαθέσιμα στοιχεία για το πετρέλαιο κλπ. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι παρατηρήσεις του Κεφαλαίου 7.7 για την βελτίωση του προκειμένου να παρέχει αποτελέσματα τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω.
4. Προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα, σε σύγκριση με το MEDSLIK, όσον αφορά τη συνολική μετατόπιση του πετρελαίου και τη χρονική μετατόπιση της πετρελαιοκηλίδας. Επίσης, έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει υπόψη τη διεργασία της διάλυσης των ξεχωριστών συστατικών μερών του πετρελαίου και να καταγράφει τη συγκέντρωση αλλά και την εξέλιξη τους, γεγονός που είναι εξαιρετικά χρήσιμο για τη μελέτη των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού. Διαθέτει, τέλος, τη δυνατότητα σύζευξης με το κυματικό μοντέλο TOMAWAC προκειμένου να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση ρευμάτων και κυμάτων.
5. Λόγω της χρήσης του υδροδυναμικού πεδίου που δημιουργήθηκε μέσω του TELEMAC2D, ο υπολογιστικός χρόνος είναι εξαιρετικά αυξημένος τόσο για τη διαμόρφωση του όσο και κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Βέβαια, η χρήση του υδροδυναμικού πεδίου αυτού δίνει πολύ πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα κοντά στην ακτή.
6. Η βέλτιστη επιλογή μοντέλου εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα πόρων από το χρήστη αλλά και από τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Προφανώς η βέλτιστη επιλογή είναι το εμπορικό μοντέλο OSCAR και στη συνέχεια το MEDSLIK (αν και έχει το μειονέκτημα ότι λειτουργεί σε παλιά συστήματα). Τέλος με αρκετές βελτιώσεις που είναι απαραίτητο να γίνουν για να καταστεί επαρκές, το TELEMAC2D μπορεί να εφαρμοστεί κυρίως σε περιπτώσεις που αφορούν την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πετρελαιοκηλίδας και όχι κατά τη διάρκεια εξέλιξης της καθώς απαιτεί αυξημένο υπολογιστικό χρόνο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2016, 06 16). Ανάκτηση από Office of Response and Restoration: <https://response.restoration.noaa.gov/about/media/how-do-oil-spills-affect-sea-turtles.html>
- Office of Ocean Exploration and Research. (2008, 12 15). *Types of offshore oil and gas structures*. Ανάκτηση 08 24, 2019, από NOAA Ocean Explorer: Expedition to the Deep Slope. National Oceanic and Atmospheric Administration: https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/06mexico/background/oil/media/types_600.html
- Bergeron, L. (2010, 11 29). *Stanford News*. Ανάκτηση από The great Gulf oil spill: Stanford experts explain what went wrong: <https://news.stanford.edu/news/2010/november/zoback-deepwater-horizon-112910.html>
- Boyle, R. (2010, 4 30). *Popular Science*. Ανάκτηση από DigitalGlobe Satellite Returns High-Resolution Photos of Oil Slick: (<https://www.popsci.com/environment/article/2010-04/oil-slick-seen-space/>, 2010)
- British Petroleum (BP). (2018). *BP Statistical Review of World Energy 2018*. London: BP.
- British Petroleum (BP). (2019, 11 06). Ανάκτηση από Oil spill response operation: <https://www.flickr.com/photos/deepwaterhorizonresponse/4582145096>
- Cédric Goeury Engineer-Researcher, J.-M. H.-B. (2014). *A Lagrangian/Eulerian oil spill model for continental waters*. Journal of Hydraulic Research.
- COPERNICUS-MARINE ENVIRONMENT MONITORING SERVICE (EUROPEAN COMMISSION). (2019, 09 07). Ανάκτηση από COPERNICUS-MARINE ENVIRONMENT MONITORING SERVICE providing products and services for all marine applications: <http://marine.copernicus.eu/>
- EMODnet- The European Marine Observation and Data Network. (2019). Ανάκτηση από EMODnet Bathymetry: www.emodnet-bathymetry.eu
- Emprosnet.gr. (2017, 10 04). *Emprosnet.gr*. Ανάκτηση από Περιβαλλοντική καταστροφή από την πετρελαιοκηλίδα: επιπτώσεις, χρόνος ανάκαμψης και προτάσεις για την επόμενη ημέρα : <https://www.emprosnet.gr/perivallon/perivallontiki-katastrofi-apo-tin-petrelaiokilida-epiptoseis-xronos-anakampsis-kai-protaseis-gia-tin-epomeni-imera>
- European Commission. (2011). Ανάκτηση από Impact assessment – Annex I accompanying the document ‘Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on safety of offshore oil and gas prospection, exploration and production activities: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/ia_annexes_20122-1292.pdf
- Fay, J. (1971). *Physical processes in the spread of oil on a water surface*. Washington D.C.: The joint conference on prevention.
- Geodata. (2019). Ανάκτηση από <http://geodata.gov.gr/maps/?locale=en>
- Geodata. (2019, 10 11). *Geodata.gov.gr*. Ανάκτηση από <http://geodata.gov.gr/maps/?package=289263ce-04be-4e88-941c-81ea79da7169&resource=4e523e93-70b2-4297-a470-278cb708913e&locale=el>
- Hao Xle, P. D. (2007). *Modelling emulsification after an oil spill in the sea*. Journal of Marine Systems.
- Ian A. Buist. (1979). *An experimental study of the dispersion of oil slicks into the water column*. Toronto: Dept Chem. Engineering, University of Toronto.
- International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF). (2002). *Fate of Marine Oil Spills*. London: ITOPF Ltd.
- International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF). (2011). *Clean-Up of Oil from Shorelines*. London: ITOPF Ltd.
- International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF). (2011). *Effects of Oil Pollution on Social and Economic Activities*. London: ITOPF Ltd.
- International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF). (2011). *Effects of Oil Pollution on the Marine Environment*. London: ITOPF Ltd.
- International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF). (2011). *Fate of Marine Oil Spills*. London: ITOPF Ltd.
- International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF). (2011). *Use of Booms in Oil Pollution Response*. London: ITOPF Ltd.
- International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF). (2012). *Use of Skimmers in Oil Pollution Response*. London: International Tanker Owners Pollution Federation.

- International Tankers Owners Pollution Federation (ITOPF). (2019). *Oil Tanker Spill Statistics*. International Tankers Owners Pollution Federation (ITOPF) Limited.
- Introduction to Observing Oil from Helicopters and Planes- COMET Program. (2019, 10 21). Ανάκτηση από Introduction to Observing Oil from Helicopters and Planes- COMET Program: http://kejian1.cmatc.cn/vod/comet/emgmt/oil_aerial_surv/print.php.htm
- Kuang, C. (2010, 06 14). *Fast Company*. Ανάκτηση από Infographic of the Day: The physics of oil spills: <https://www.fastcompany.com/1659822/infographic-day-physics-oil-spills>
- Lange P. et al. (1978). *Drift Response of monomolecular slicks to wave and wind action*. Journal Physics Oceanography.
- Lloyd's List. (2018). *Maritime Intelligence Lloyd's List Informa*. London: Lloyd's List.
- Mackay D., B. I. (1979). *Oil spill processes and models*. Toronto: Canada: Arctic Marine Oilspill Program, Environmental Protection Service, Fisheries and Environmental Canada.
- Mackay D., L. P. (1977). *Mathematical model of the behaviour of oil spills on water with natural and chemical dispersion*. Toronto: Fisheries and Environment Canada .
- Mackay D., P. S. (1980). *Calculation of evaporation rate of volatile liquids*. Louisville: National Conference on control of hazardous material spills.
- Maersk Drilling. (2019, 10 18). *Maersk Drilling*. Ανάκτηση από maerskdirilling.com
- MarineTraffic. (2019, 10 20). *MarineTraffic*. Ανάκτηση από <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:20.8/centery:37.8/zoom:10>
- NAVIONICS-GARMIN. (2019, 09 12). *NAVIONICS-chart viewer*. Ανάκτηση από <https://webapp.navionics.com/>
- Panagiotis Makatounis, Jorgen Skancke, Evanthia Florou, Anastasios Stamou, Per Johan Brandnvik. (2017). *Management of oil spill contamination in the Gulf of Patras caused by an accidental subsea blowout*. Athens: Environmental Pollution.
- R.W Lardner B.A, P. S. (2004,2011). *Medalik Version 5.3.6 User Manual*.
- Reed M. et al. (1995). *A three dimensional oil and chemical spill model for environmental impact assessment*. Proceedings of the International Oil Spill Conference.
- Reed M. et al. (2002). *DREAM: A Dose-related exposure assessment model technical description physical-chemical fates components*.
- Rodriguez, J.-P. (2017). *The geography of transport systems*.
- Shell. (2019, 11 06). *Perdido Overview*. Ανάκτηση από <https://www.shell.com/about-us/major-projects/perdido/perdido-an-overview.html>
- Telemac Modelling System- User Manual, EDF-R&D. (2014). *Telemac Modelling System- User Manual* .
- The GE3246nator- Recording Earth's pulse. (2015, 03 05). Ανάκτηση από Analysis: BP oil spill "missing oil": <http://blog.nus.edu.sg/lucastange3246/2015/03/05/analysis-bp-oil-spill-missing-oil/>
- Tkalich, P. H. (2003). *A multiphase oil spill model* . J. Hydraulic Res.
- TwistedSifter. (2015, 09 15). Ανάκτηση από Troll A – The Tallest Structure Ever Moved by Mankind: <https://twistedifter.com/2015/09/troll-a-tallest-structure-ever-moved-by-mankind/>
- Wikipedia. (2019, 07 31). Ανάκτηση 08 24, 2019, από Dynamic positioning: https://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic_positioning
- Wikipedia. (2019, 08 12). Ανάκτηση 08 2019, 24, από Oil Platform: https://en.wikipedia.org/wiki/Oil_platform
- Wikipedia. (2019, 08 22). Ανάκτηση 08 2019, 24, από Floating production storage and offloading: https://en.wikipedia.org/wiki/Floating_production_storage_and_offloading
- Wikipedia. (2019, 08 23). Ανάκτηση 08 24, 2019, από Oil spill: https://en.wikipedia.org/wiki/Oil_spill
- Wikipedia. (2019, 10 02). Ανάκτηση από Ixtoc I oil spill: https://en.wikipedia.org/wiki/Ixtoc_I_oil_spill
- Wikipedia. (2019, 07 17). Ανάκτηση από Tension-leg platform: https://en.wikipedia.org/wiki/Tension-leg_platform
- Wikipedia. (2019). Ανάκτηση από Troll A platform: https://en.wikipedia.org/wiki/Troll_A_platform
- Wikipedia. (2019, 11 13). *Πετρελαιοκηλίδα στον Σαρωνικό Κόλπο (2017)*. Ανάκτηση από https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%B5%CF%84%CF%81%CE%B5%CE%BB%CE%B1%CE%B9%CE%BF%CE%BA%CE%B7%CE%BB%CE%AF%CE%B4%CE%B1_%CF%83%CF%84%CE%BF%CE%BD_%CE

%BA%CF%8C%CE%BB%CF%80%CE%BF_%CF%84%CE%BF%CF%85_%CE%A3%CE%B1%CF%81%CF%89
%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CF%8D_(201

Wikipedia. (2019, 02 10). Σημαία ευκαιρίας.

Wikipedia Petroleum Industry. (2019, 09 23). Wikipedia Petroleum Industry Structure.

WWF HELLAS. (2015). *Ρύπανση στο Σαρωνικό Κόλπο*. Αθήνα.

Zhendi Wang, H. F. (2003). *Characteristics of Spilled Oils, Fuels and Petroleum Products: 1. Composition and Properties of Selected Oils*. Research Triangle Park, North Carolina: National Exposure Research Laboratory Office of R&D US Environmental Protection Agency.

Αλεξόπουλος, Α. (2005). *Διεθνές θαλάσσιο περιβαλλοντικό δίκαιο*. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Πανεπιστημίου Πειραιώς.

ΒΗΜΑ, Τ. (2019, 06 19). Πόσο πετρέλαιο και φυσικό αέριο κρύβουν τα κοιτάσματα σε Ιόνιο και Κρήτη. Για την προστασία του περιβάλλοντος (ΦΕΚ 160/Α/16-10-86). (1986). ΑΘΗΝΑ.

Γιώργος Μαρίνος. (2017, 09 24). Ναυτεργάτης Ασυρματιστής, Μέλος του ΠΓ του ΚΚΕ. *Ριζοσπάστης*, 10.

Διακήρυξη για τη Σχέση του Ανθρώπου με το Φυσικό Περιβάλλον και την Προστασία. (1972): ΟΗΕ.

ΕΚΠΑ-openskiron. (2019, 10 01). *OpenWRF*. Ανάκτηση από <https://openskiron.org/en/openwrf>

ΕΛΚΕΘΕ (HCMR). (2019, 10 9). *Ionian Forecasting System (IFS)*. Ανάκτηση από Southern Adriatic-Northern Ionian Sea circulation model (SANI2): ionionproject.hcmr.gr/pages/index.php?model=IFS

ΕΛΚΕΘΕ-APC ADVANCED PLANNING CONSULTING. (2012). *Στρατηγική μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων για την έρευνα και εκμετάλλευση υδρογονανθράκων για το ΥΠΕΚΑ- ΤΟΜΟΣ Α ΔΥΤΙΚΟΣ ΠΑΤΡΑΙΚΟΣ ΚΟΛΠΟΣ*. ΑΘΗΝΑ: ΕΛΚΕΘΕ.

Ελληνική Διαχειριστική Εταιρεία Υδρογονανθράκων (ΕΔΕΥ). (2019).

Καλογήρου Στ., Δ. 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 Κωνσταντίνος. (2008). *Μοντέλο Τύχης/ Γήρανσης Κηλίδων Πετρελαίου*. Αθήνα: ΕΜΠ.

Κοτρίκλα, Α. (2015). Ρύπανση από Υδρογονάνθρακες πετρελαίου. Στο Κ. Α., *Ναυτιλία και Περιβάλλον* (σ. Κεφ. 2). Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.

Παπαδονικολάκη Γεωργία. (2013). *Μαθηματική Προσομοίωση Συμπεριφοράς Πετρελαιοκηλίδων*. Αθήνα: ΕΜΠ.

Τριανταφύλλου Γ. (2004). *Πετρελαιοκήλιδες-Περιβάλλον και Ανάπτυξη*. Αθήνα: Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.

Υδρογραφική Υπηρεσία Πολεμικού Ναυτικού. (2018, 10 22). Ανάκτηση από Υπηρεσίες για το κοινό/ Ελεύθερα Γεωχωρικά Δεδομένα: <https://www.hnhs.gr/el/online/2015-05-16-18-51-17>

Υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας και Νησιωτικής Πολιτικής. (2017). *Βύθιση Δ/Ξ πλοίου στη θαλάσσια περιοχή νότια-νοτιοδυτικά της ν. Αταλάντης και πρόκληση θαλάσσιας ρύπανσης*. Υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας και Νησιωτικής Πολιτικής.

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

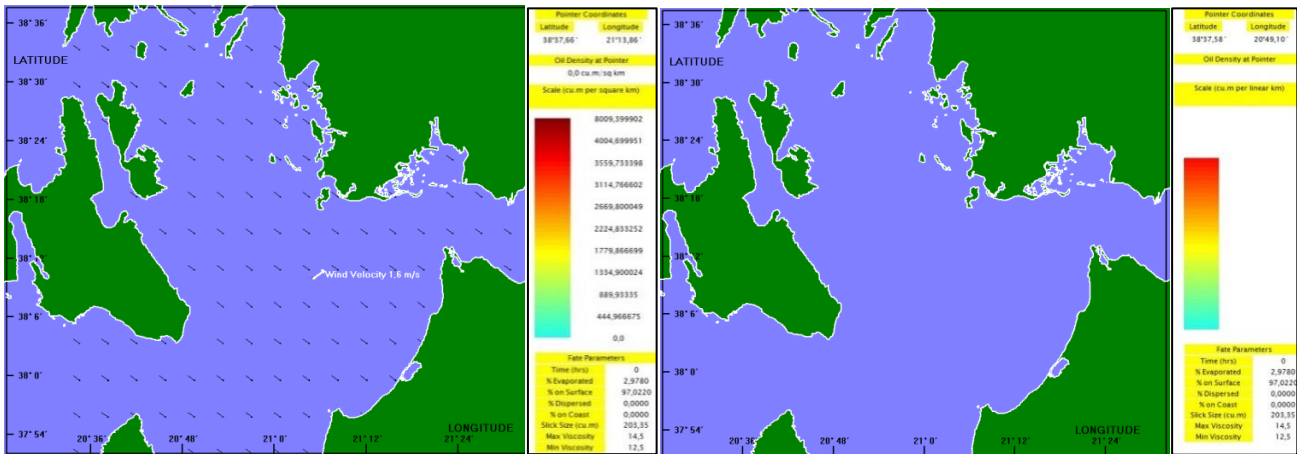
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

A

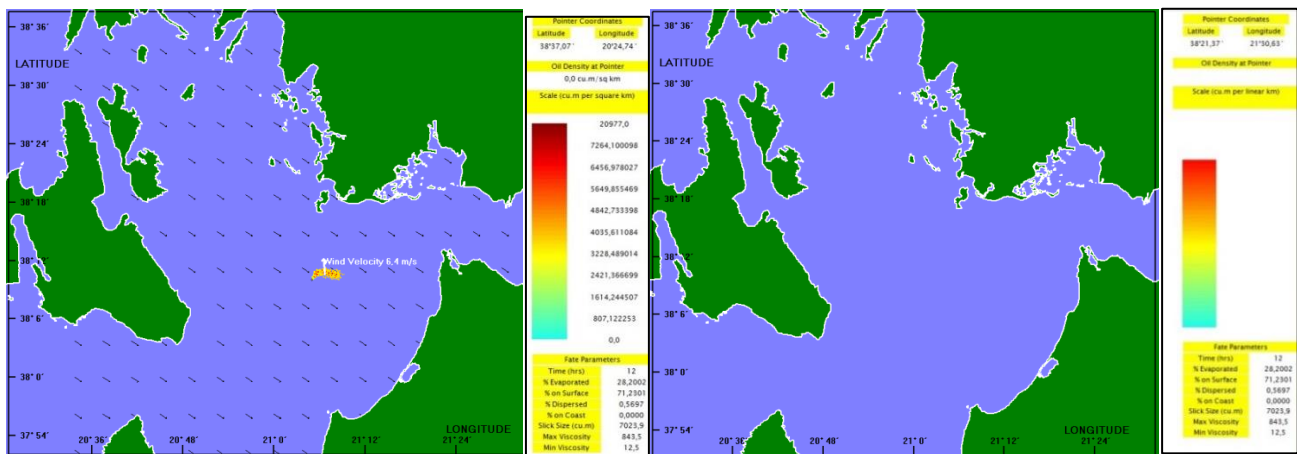
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MEDSLIK ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΑΤΡΑΪΚΟ ΚΟΛΠΟ

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται αναλυτικά ανά 12 ώρες. Παρουσιάζεται για κάθε χρονικό βήμα 12 ωρών, η εικόνα των ρευμάτων και του ανέμου στην περιοχή καθώς και του πετρελαίου που βρίσκεται στην επιφάνεια, του πετρελαίου που έχει συσσωρευτεί στην ακτή καθώς και στατιστικά στοιχεία για το σύνολο της προσομοίωσης.

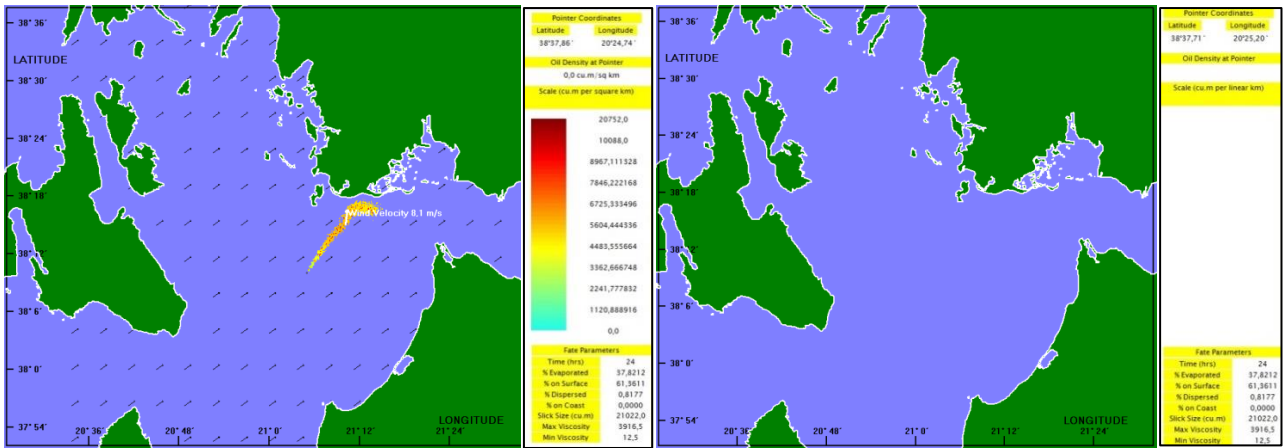
20/11/2015 Ωρα: 15:00



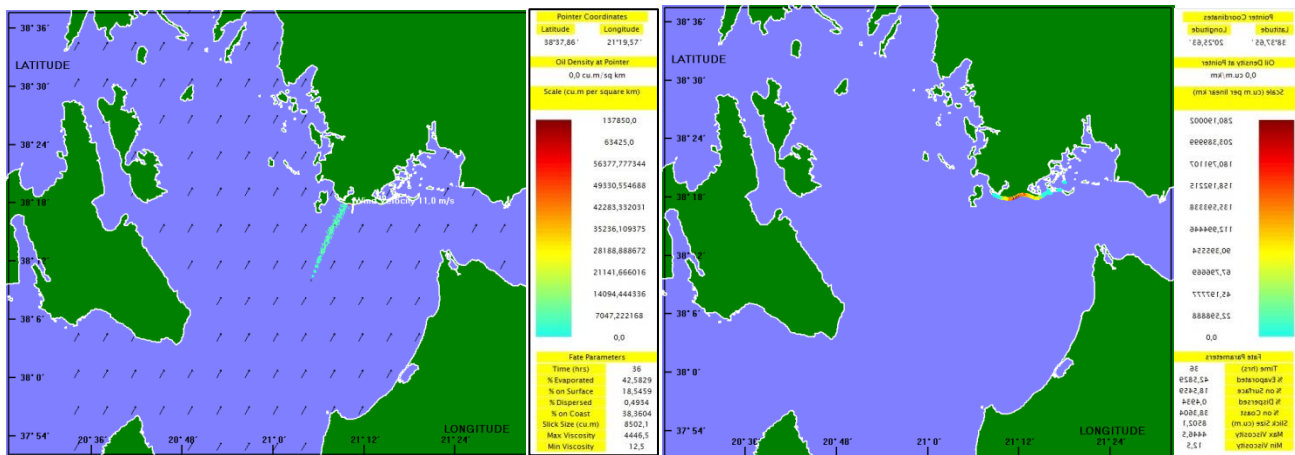
21/11/2015 Ωρα: 03:00



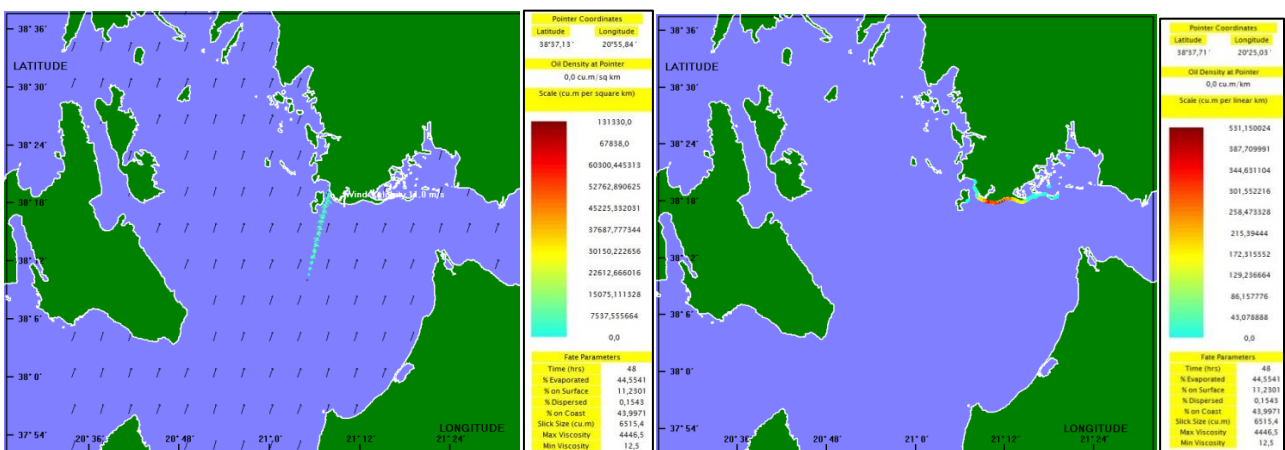
Ωρα: 15:00



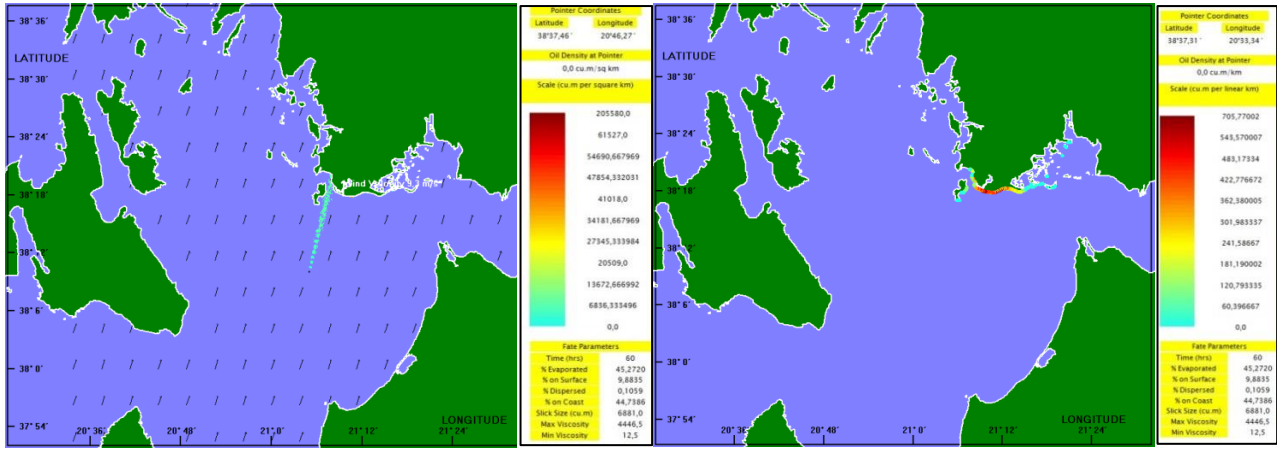
22/11/2015 Ωρα: 03:00



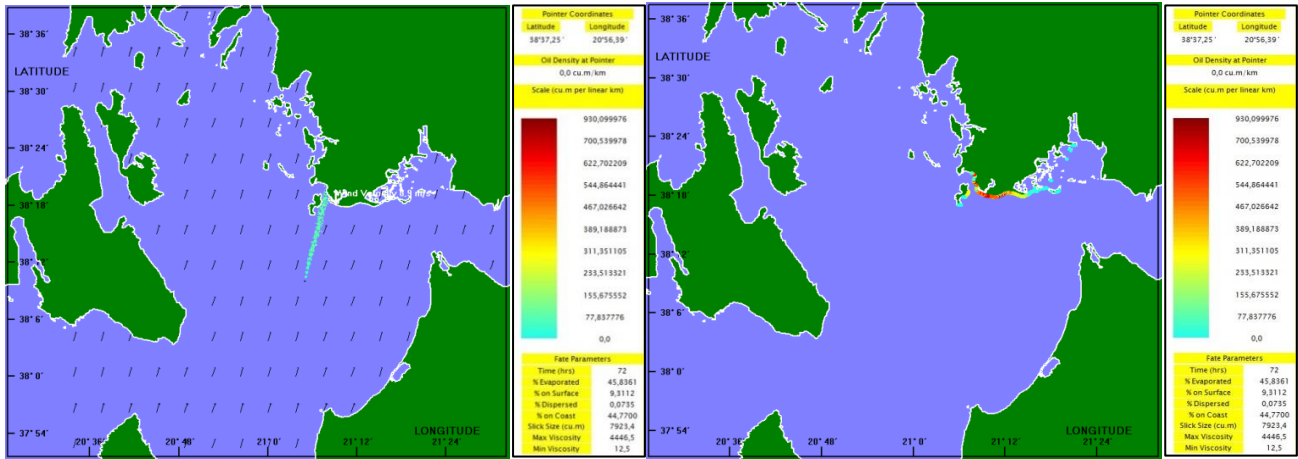
Ωρα: 15:00



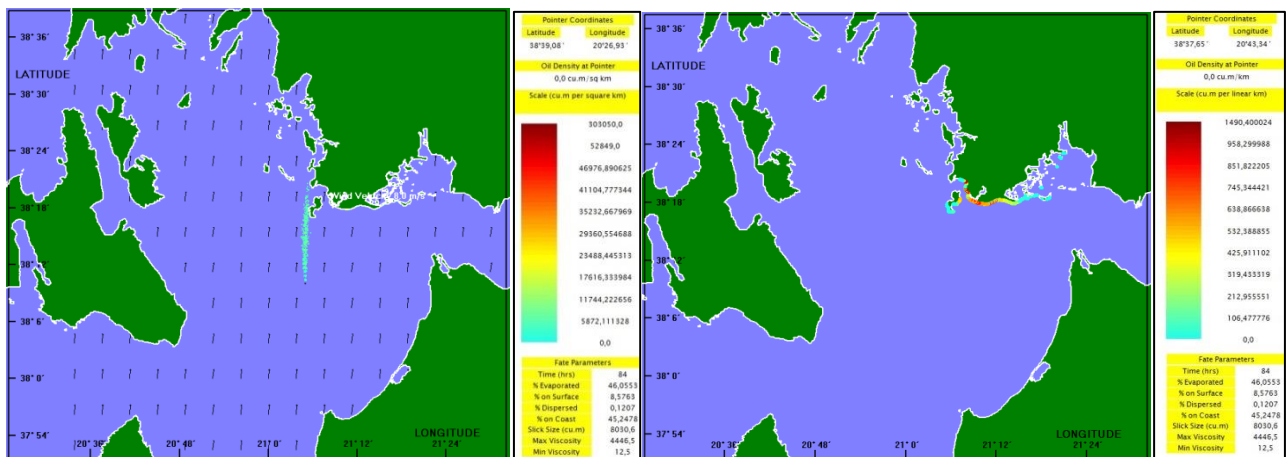
23/11/2015 Ωρα: 03:00



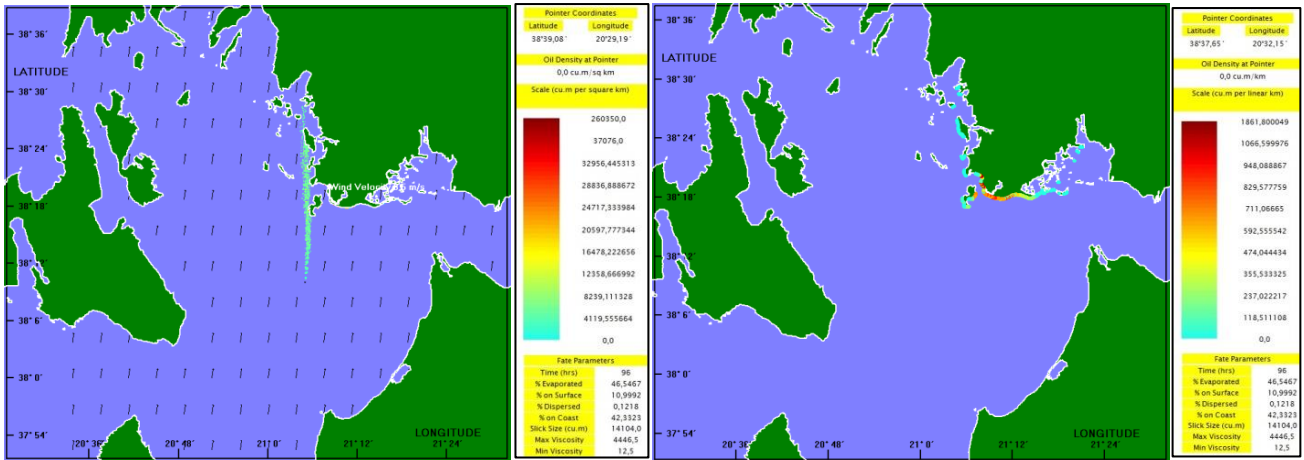
Ωρα: 15:00



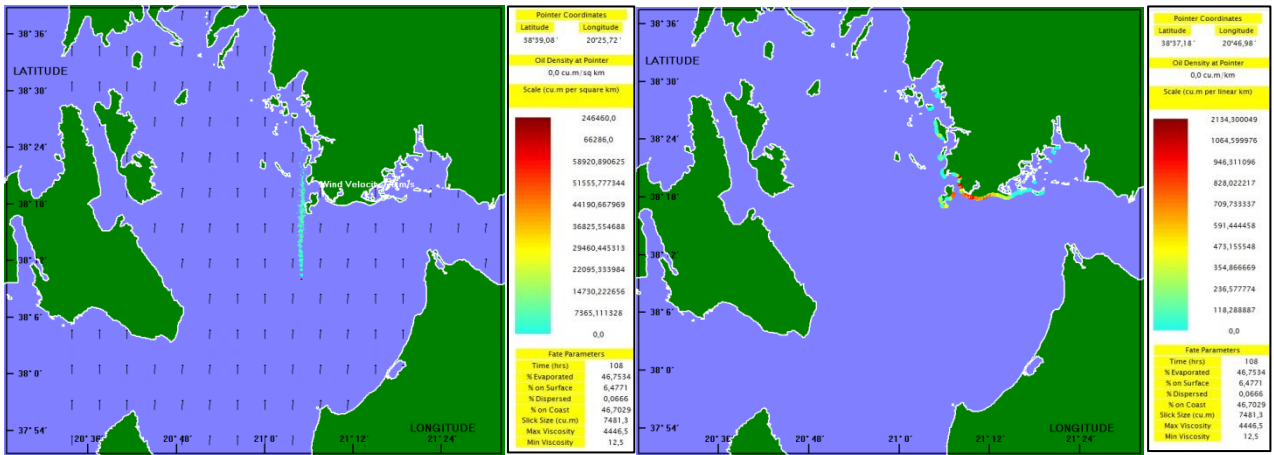
24/11/2015 Ωρα: 03:00



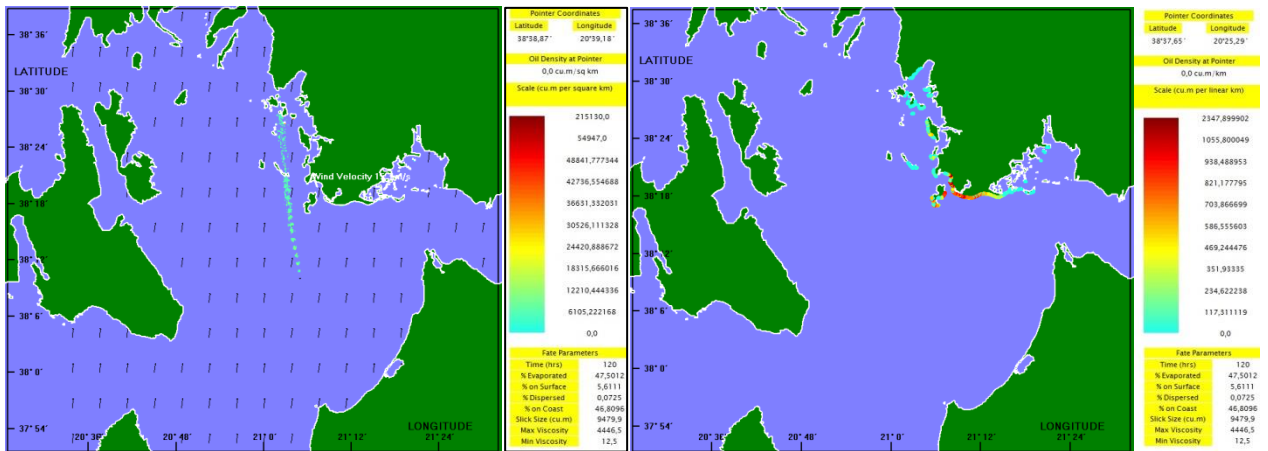
Ωρα: 15:00



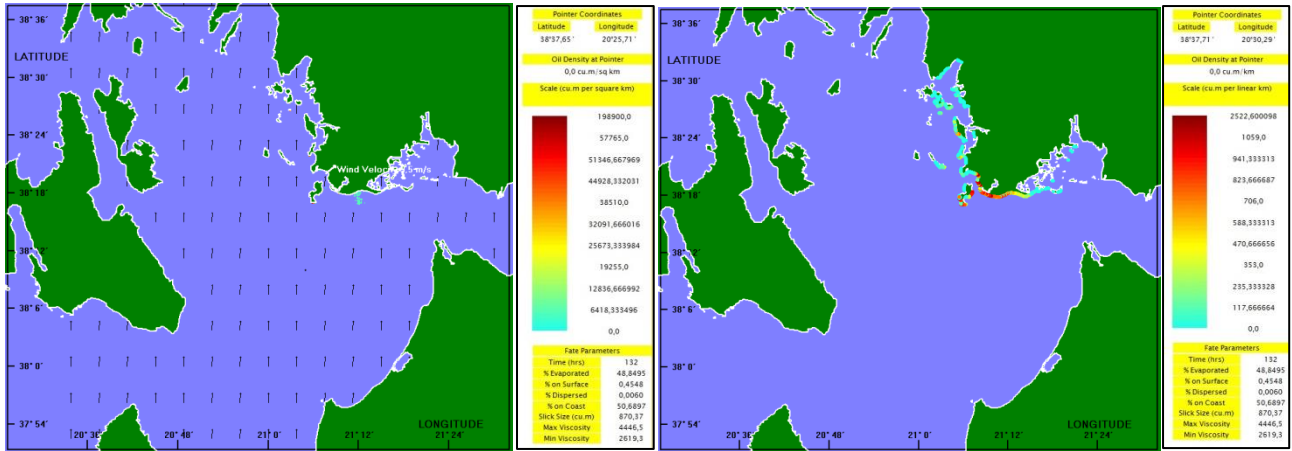
25/11/2015 Ωρα: 03:00



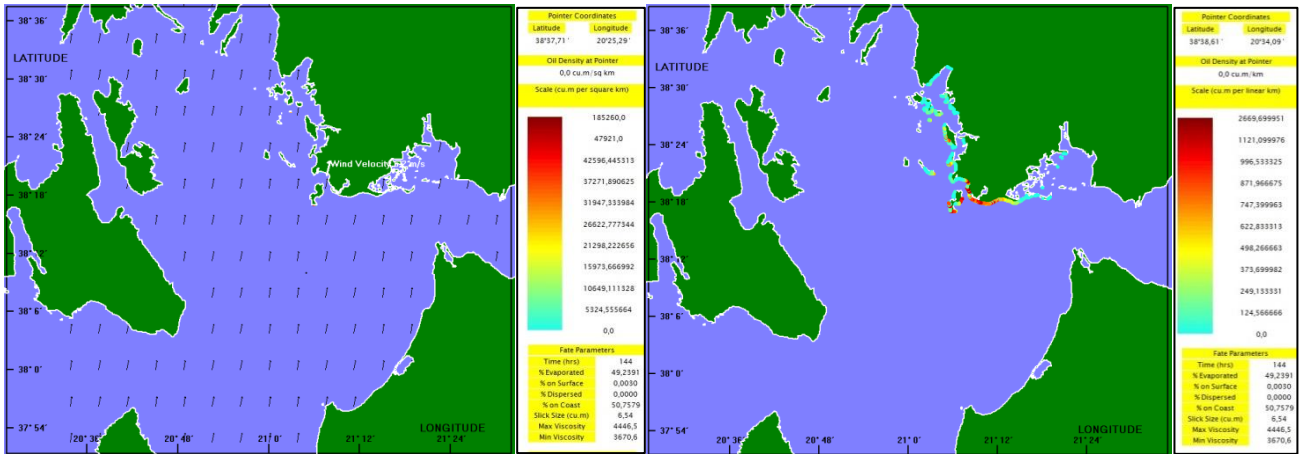
Ωρα: 15:00



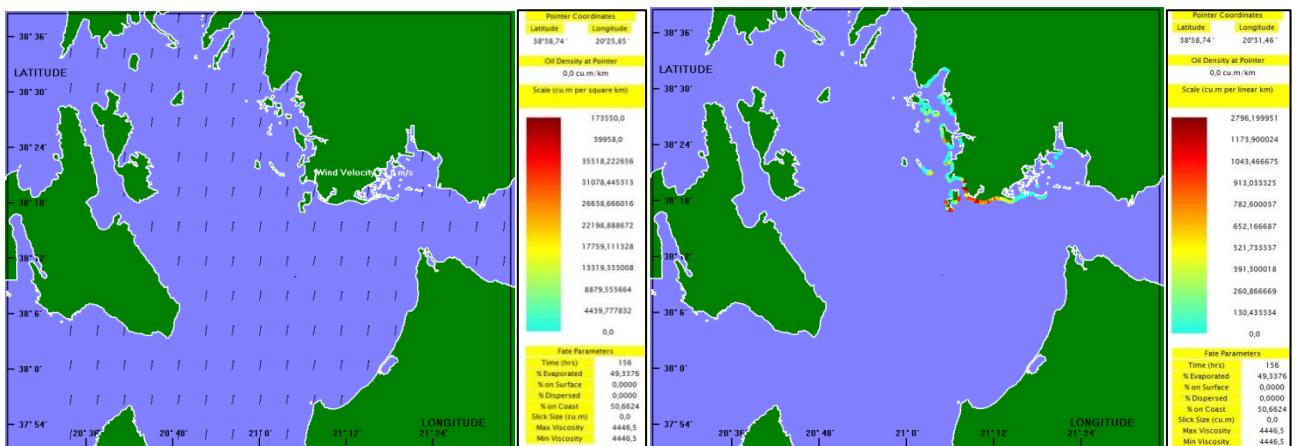
26/11/2015 Ωρα: 03:00



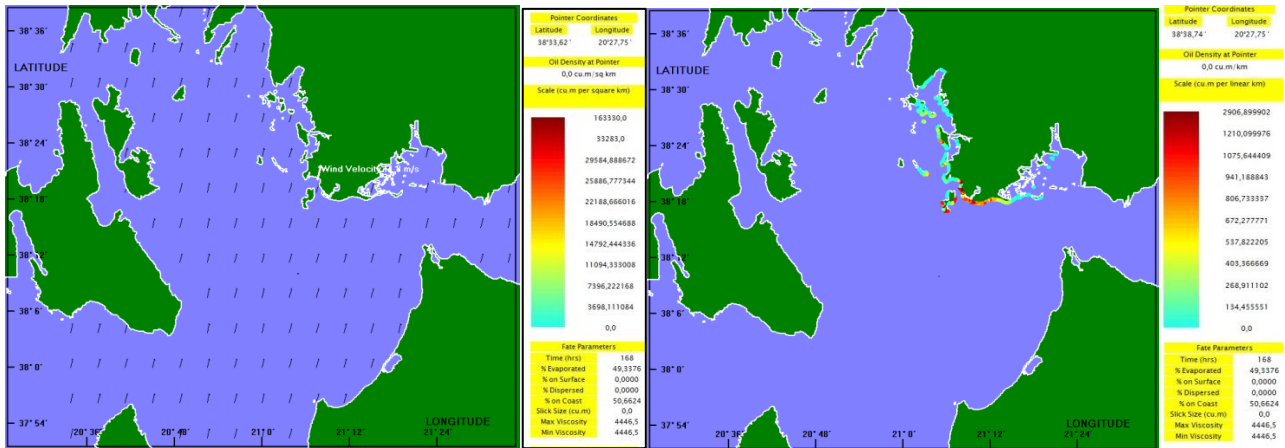
Ωρα: 15:00



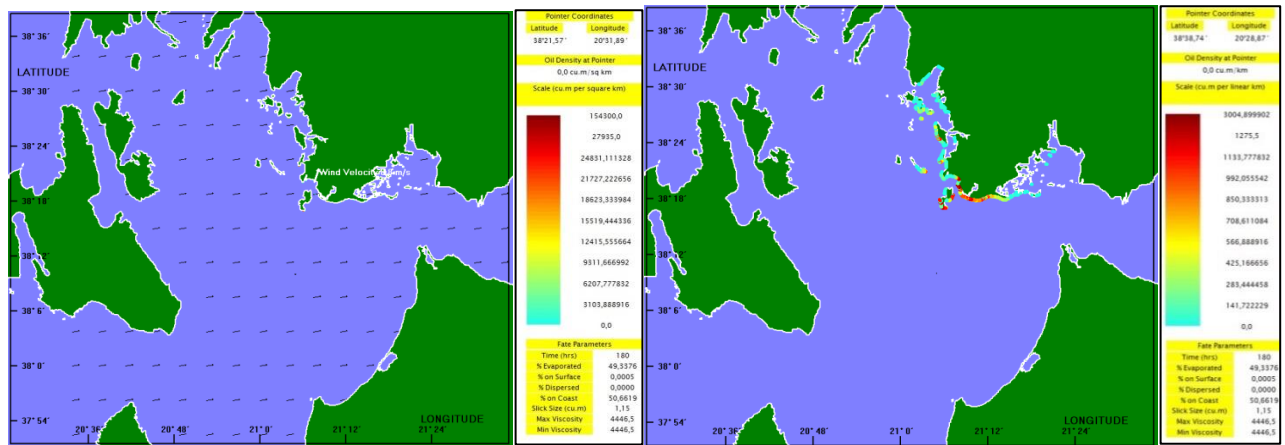
27/11/2015 Ωρα: 03:00



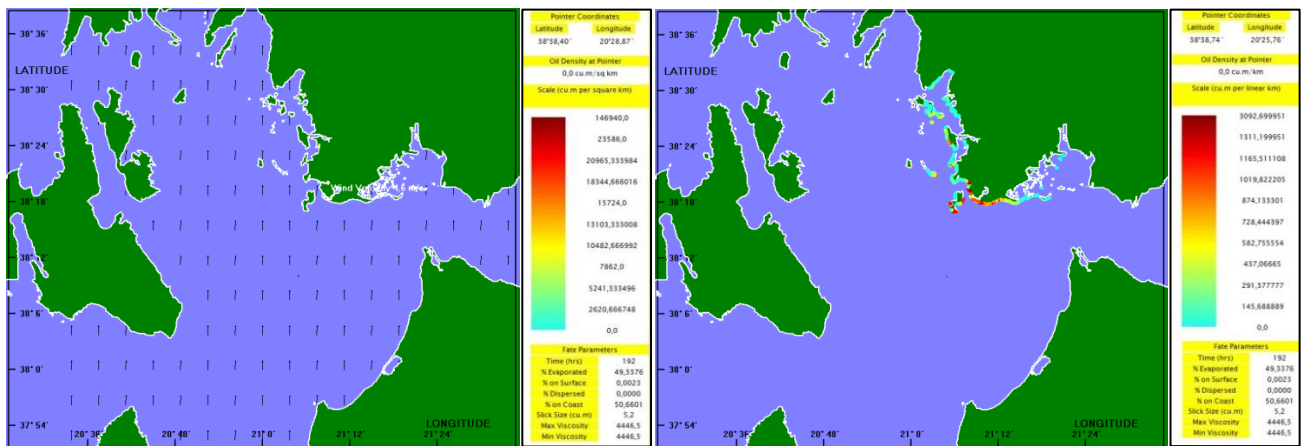
Ωρα: 15:00



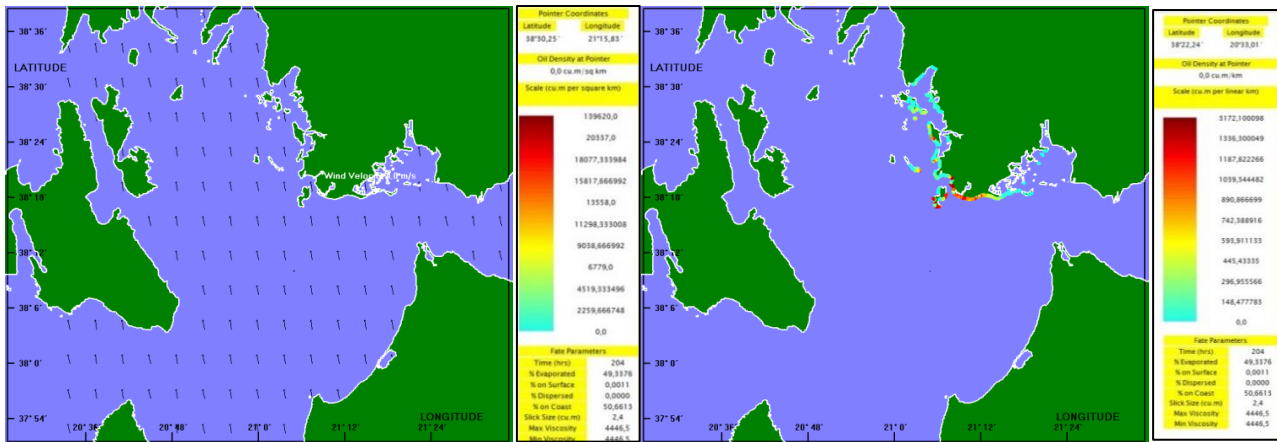
28/11/2015 Ωρα: 03:00



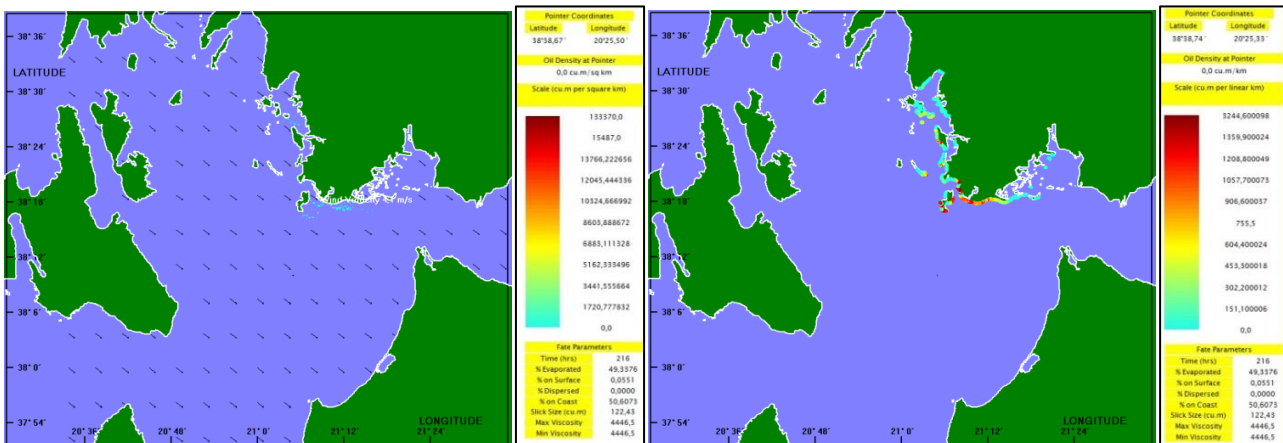
Ωρα: 15:00



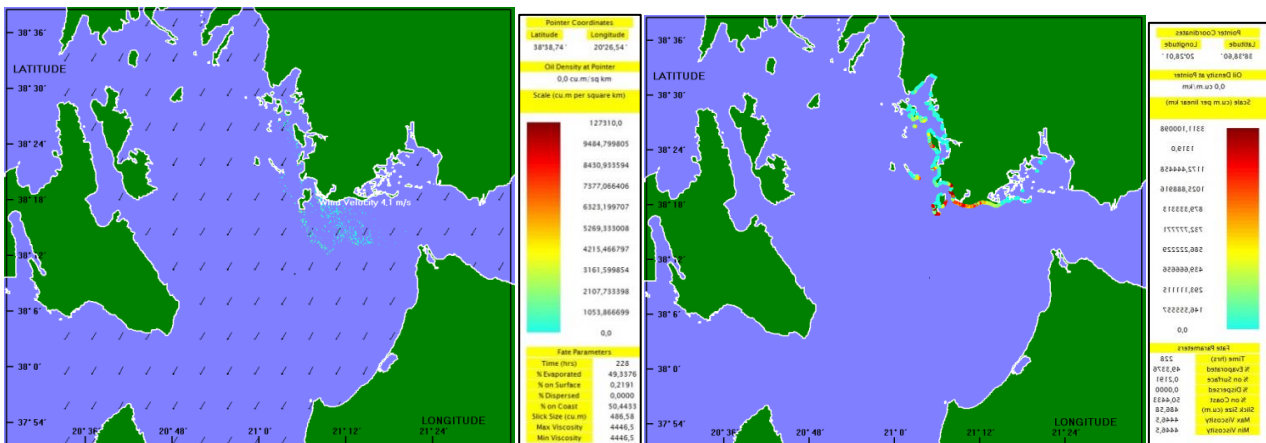
29/11/2015 Ωρα: 03:00



Ωρα: 15:00

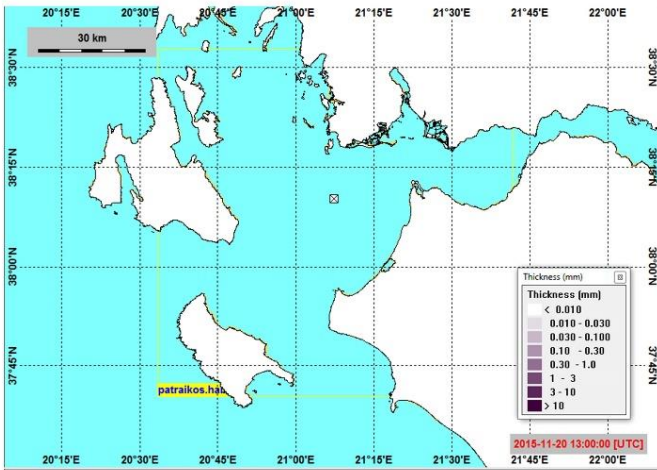


30/11/2015 Ωρα: 03:00

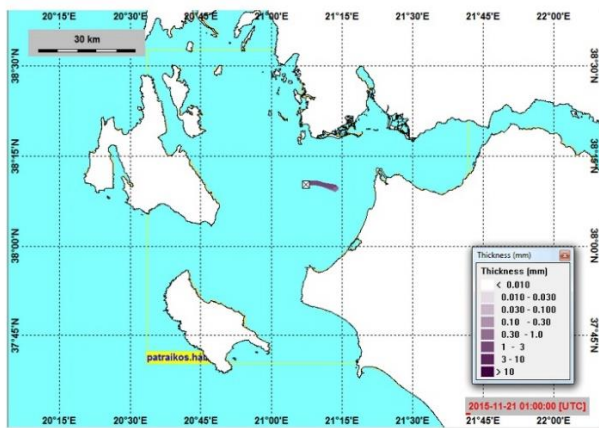


ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ OSCAR (ΤΟ ΣΥΝΟΛΟ ΤΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΠΡΟΕΡΧΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΡΓΑΣΙΑ: (Panagiotis Makatounis, Jorgen Skancke, Evanthia Florou, Anastasios Stamou, Per Johan Brandnvik, 2017)

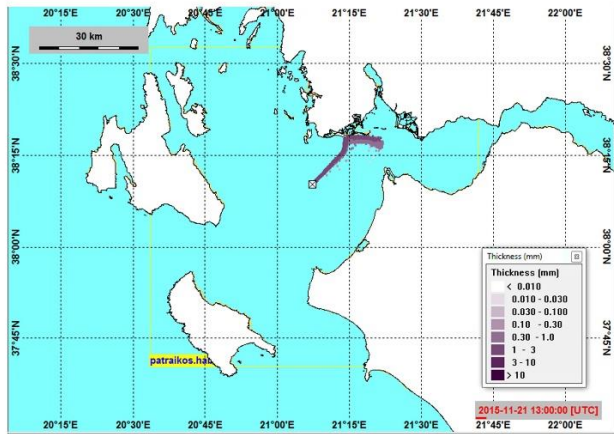
20/11/2015 15:00



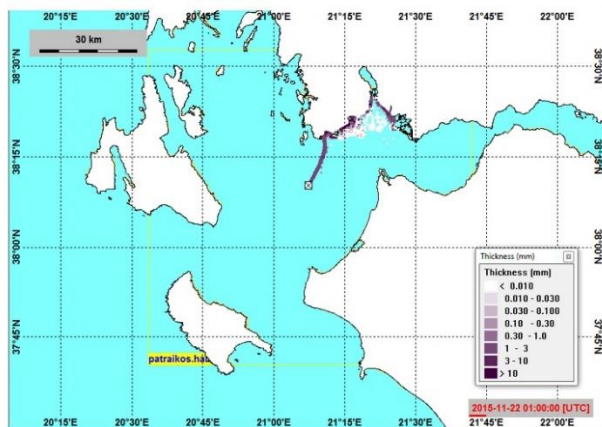
21/11/2015 03:00



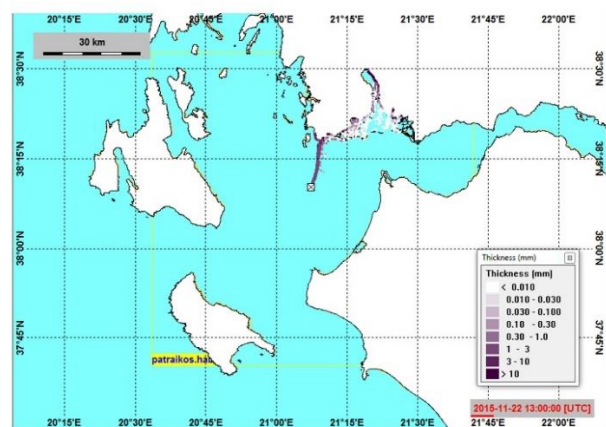
15:00



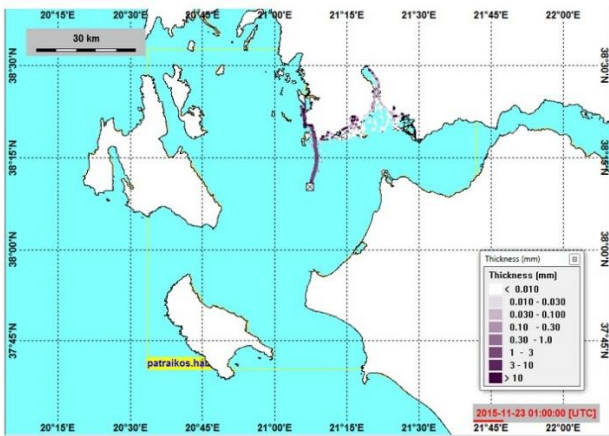
22/11/2015 03:00



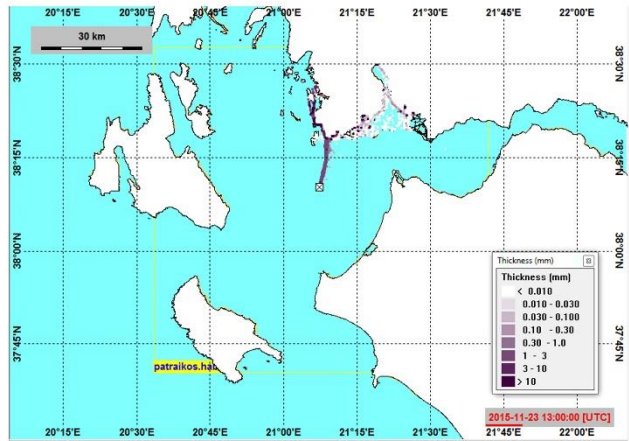
15:00



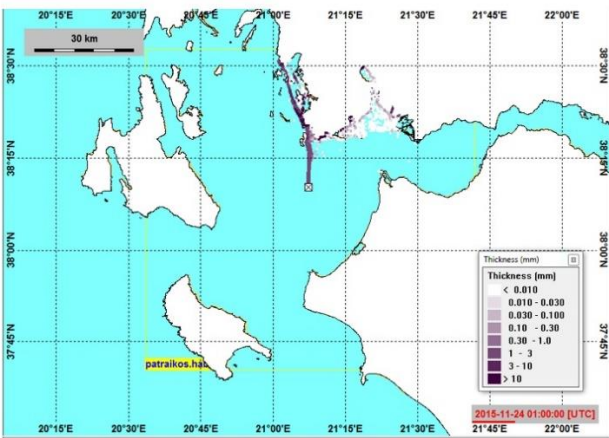
23/11/2015 03:00



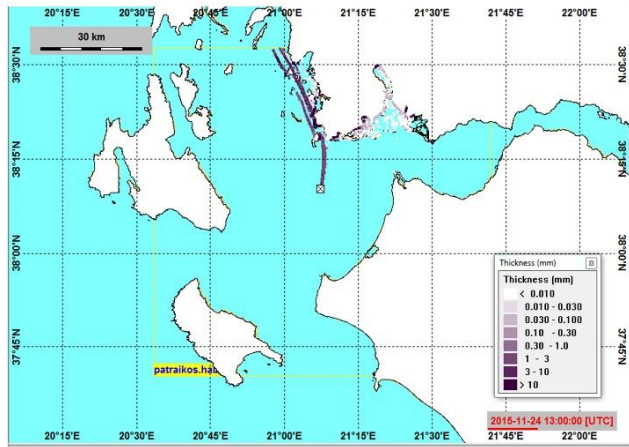
15:00



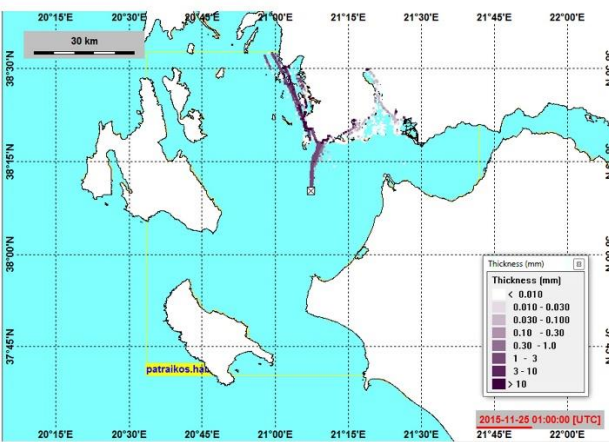
24/11/2015 03:00



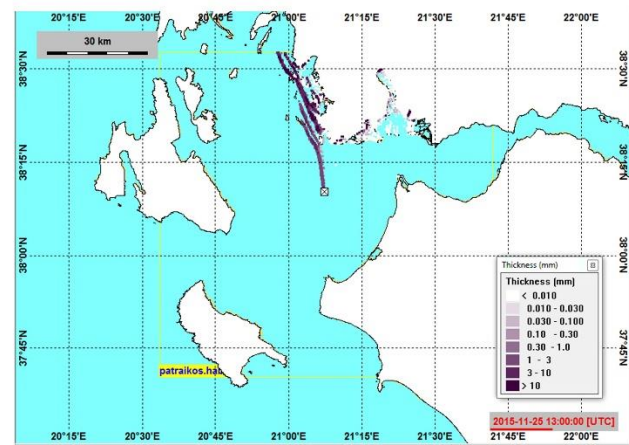
15:00



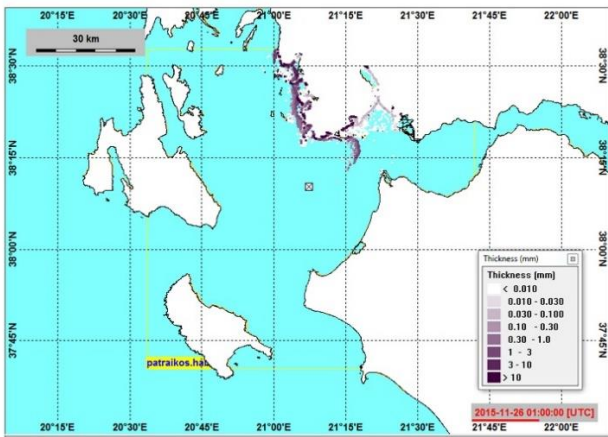
25/11/2015 03:00



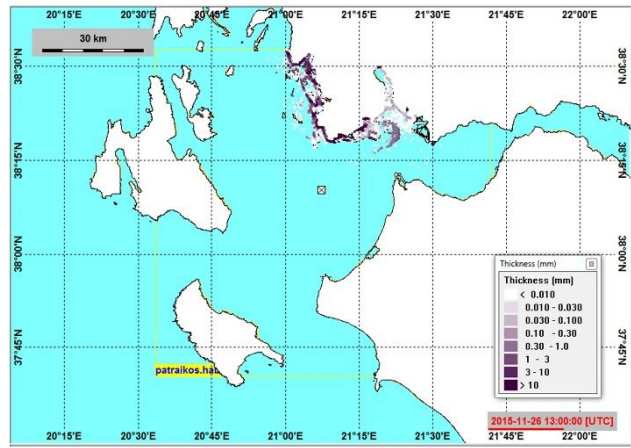
15:00



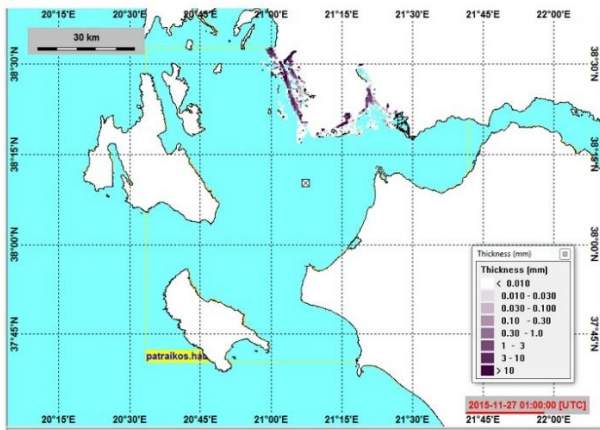
26/11/2015 03:00



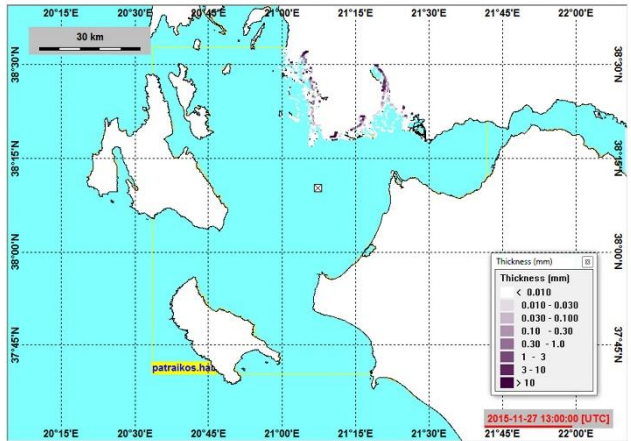
15:00



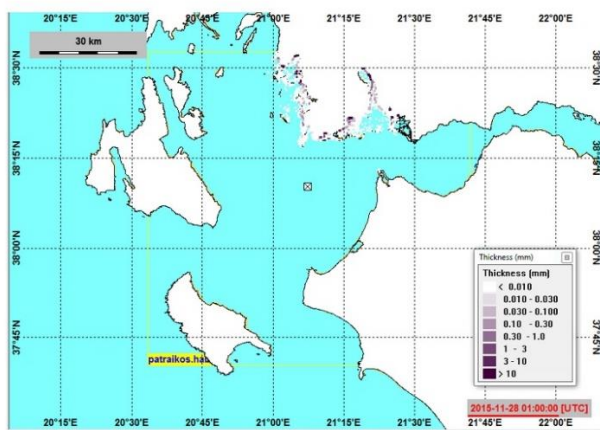
27/11/2015 03:00



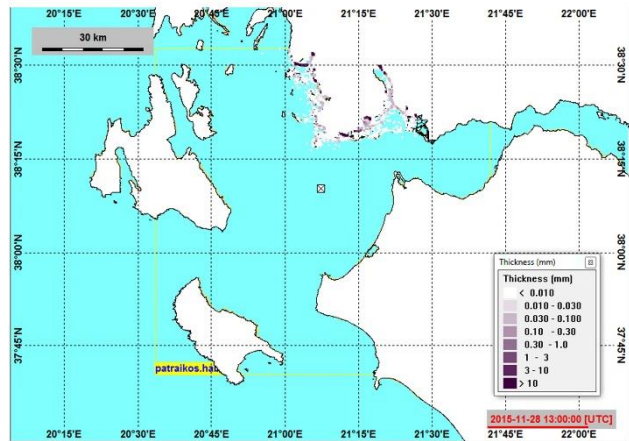
15:00



28/11/2015 03:00

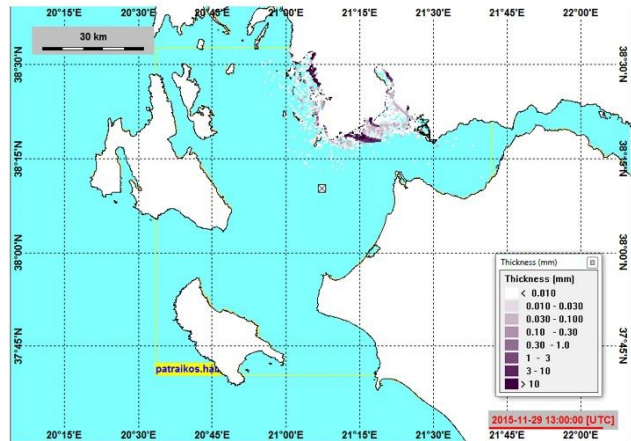
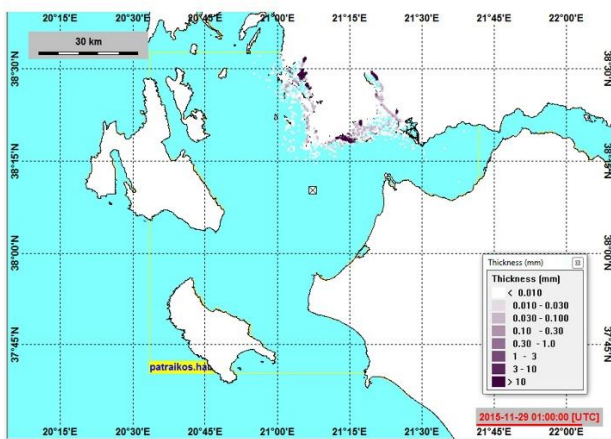


15:00



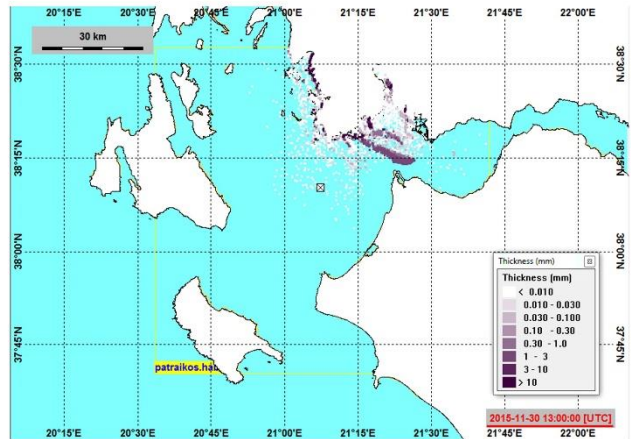
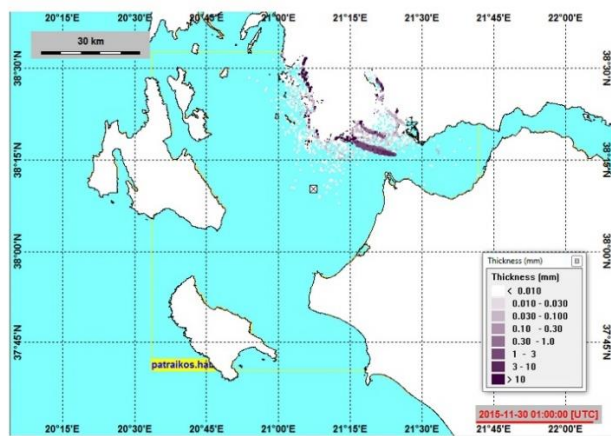
29/11/2015 03:00

15:00



30/11/2015 03:00

15:00



B

B1

Πίνακας ρευμάτων που εισάγονται ως συνοριακές συνθήκες στο TELEMAC2D, στην εφαρμογή του Κόλπου της Ζακύνθου για την δημιουργία του υδροδυναμικού πεδίου:

T	VIT(1)	T	VIT(1)	T	VIT(1)	T	VIT(1)	T	VIT(1)
s	m/s	s	m/s	s	m/s	s	m/s	s	m/s
0	0.01	36000	0.03	72000	0.08	108000	0.13	144000	0.16
3600	0.01	39600	0.04	75600	0.08	111600	0.13	147600	0.16
7200	0	43200	0.05	79200	0.09	115200	0.13	151200	0.16
10800	0	46800	0.06	82800	0.1	118800	0.13	154800	0.15
14400	0	50400	0.07	86400	0.11	122400	0.14	158400	0.15
18000	0	54000	0.07	90000	0.12	126000	0.14	162000	0.14
21600	0	57600	0.07	93600	0.12	129600	0.15	165600	0.13
25200	0	61200	0.08	97200	0.13	133200	0.16	169200	0.12
28800	0	64800	0.08	100800	0.13	136800	0.16	172800	0.11
32400	0.02	68400	0.08	104400	0.13	140400	0.16	180000	0.1

B2

Πίνακας ανέμου που εισάγεται στο TELEMAC2D και στο MEDSLIK, στην εφαρμογή του Κόλπου της Ζακύνθου

TIME	FUAIR	FVAIR	TIME	FUAIR	FVAIR	TIME	FUAIR	FVAIR	TIME	FUAIR	FVAIR
s	m/s	m/s	s	m/s	m/s	s	m/s	m/s	s	m/s	m/s
0	1.4	0.8	54000	2.1	6.1	108000	1.7	8.9	162000	0.8	11.5
3600	1.4	0.8	57600	1.9	6	111600	1.2	9.1	165600	0.8	11
7200	1.4	1	61200	1.5	6.4	115200	1.5	9.4	169200	0.4	11.2
10800	1.2	1.2	64800	1	6.9	118800	1.9	9.4	172800	-0.3	11.6
14400	1.2	1.1	68400	1	7.4	122400	1.9	10.8	180000	0.6	11.1
18000	1.1	1.3	72000	1.6	7.8	126000	2	11.1			
21600	0.6	2.2	75600	1.8	7.8	129600	1.5	11.1			
25200	1	2.6	79200	1.2	8	133200	1.4	11.2			
28800	1	2.5	82800	0.6	8.7	136800	1.3	11.4			
32400	0.7	2.9	86400	-0.2	9.3	140400	1.6	11.6			
36000	-0.3	6.4	90000	-1.4	9	144000	2.1	11.5			
39600	-0.8	7.3	93600	-1.7	8.5	147600	2.2	11.1			
43200	-1.2	7.6	97200	3.8	10.1	151200	1.4	11			
46800	0.4	8	100800	2	8.6	154800	0.3	11.4			
50400	1.8	7	104400	1.8	8.8	158400	0.5	11.8			

B3

Τροποποιημένο σημείο της υπορουτίνας (subrutine OIL_FLOT.f) συμπεριφοράς πετρελαιοκηλίδας του μοντέλου TELEMAC2D

```
IF (LT.EQ.1) THEN
  NUM_GLO=0
  NUM_MAX=0
  NUM_LOC=0
  COORD_X=0.D0
  COORD_Y=0.D0
  NUM_MAX=INT (SQRT (REAL (NFLOT_MAX)))
  DO K=0, NUM_MAX-1
    DO J=0, NUM_MAX-1
      COORD_X=495000.0D0+REAL (J)
      COORD_Y=4165000.0D0+REAL (K)
      NUM_GLO=NUM_GLO+1
      NFLOT_OIL = 0
      IF (MESH%DIM1.EQ.3) THEN
        CALL ADD_PARTICLE (COORD_X,COORD_Y,COORD_Y,NUM_GLO,
          NFLOT_OIL,1,XFLOT,YFLOT,ZFLOT,TAGFLO,SHPFLO,SHZFLO,
          ELTFLO,ETAFLO,MESH,NPLAN,0.D0,0.D0,0.D0,0.D0,0,0)
      ELSEIF (MESH%DIM1.EQ.2) THEN
        CALL ADD_PARTICLE (COORD_X,COORD_Y,0.D0,NUM_GLO,
          NFLOT_OIL,1,XFLOT,YFLOT,YFLOT,TAGFLO,SHPFLO,SHPFLO,
          ELTFLO,ELTFLO,MESH,NPLAN,0.D0,0.D0,0.D0,0.D0,0,0)
      END IF
      IF (NFLOT_OIL.EQ.1) THEN
        NUM_LOC = NUM_LOC+1
      END IF
    END DO
  END DO
```

Ορισμός του χρονικού βήματος στο TELEMAC2D στο οποίο θα συμβεί η στιγμιαία διαρροή πετρελαίου

Ορισμός των συντεταγμένων του σημείου διαρροής (σε UTM34 WGS84)

B4

Αρχείο οδήγησης που περιλαμβάνει τις ιδιότητες του πετρελαίου (oil spill steering file) Oilspill.txt

```
NUMBER OF UNSOLUBLE COMPONENT IN OIL
6
UNSOLUBLE COMPONENT PARAMETERS(FRAC MASS,TEB)
0.03456 , 525.09
0.0649 , 527.65
0.193054, 702.704
0.1773 , 823.16
0.1814 , 967.48
0.3129 , 1123.16
NUMBER OF SOLUBLE COMPONENT IN OIL
4
SOLUBLE COMPONENT PARAMETERS(FRAC MASS,TEB,SOLU,KDISS,KVOL)
0.01964 , 491.11 , 0.032 , 5.56D-06, 1.2D-05
0.0069 , 609.15 , 0.0005 , 5.56D-06, 1.2D-05
0.008646, 611.454, 0.0012 , 5.56D-06, 1.2D-05
0.0007 , 734.65 , 0.00000255, 5.56D-06, 1.2D-05
OIL DENSITY
959.D0
OIL VISCOSITY
93.D-7
VOLUME OF OIL SPILL
522.D0
WATER TEMPERATURE
292
SPREADING MODEL(1=FAY'S MODEL, 2=MIGRHYCAR'S MODEL, 3=CONSTANT AREA)
2
```