10/2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ Διπλωματική Εργάσια Αναπτύξη εργαλείου για την τύχη πετρελαιοκηλίδας μελετή και παραδειγματά



Παρίσος Φώτιος επιβλέπων: Δρ. Βεντίκος Νικόλαος – Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π.

Copyright © Παρίσος Φώτιος, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

...στην μητέρα μου και στον χρόνο...

με ειλικρινείς ευχαριστίες στον καθηγητή μου

Αθήνα

Περίληψη

Τα τελευταία 40 χρόνια έχουν σημειωθεί χιλιάδες ατυχήματα διαρροής πετρελαίου, σε ολόκληρο τον κόσμο. Η μεταφορά πετρελαίου με πετρελαιοφόρα για εμπορικούς σκοπούς και η πληθώρα παράκτιων εγκαταστάσεων μεταφοράς και αποθήκευσής αυτού, οδηγούν στην απελευθέρωση σημαντικών ποσοτήτων πετρελαίου σε θάλασσες και ακτές. Από την άλλη, οι επιπτώσεις της διαρροής πετρελαίου στη θάλασσα είναι πολλαπλές, με το περιβαλλοντικό κόστος να εξαρτάται από το είδος του πετρελαίου και το οικοσύστημα το οποίο θα επηρεάσει. Εξάλλου, το πετρέλαιο στη θάλασσα υφίσταται πολλαπλές φυσικές, χημικές και βιολογικές τροποποιήσεις από τη στιγμή της εισόδου του και για όσο διάστημα παραμένει.

Στο πλαίσιο αυτό, αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής ήταν η αναβάθμιση του προϋπάρχοντος προγράμματος SpillSolver, το οποίο είναι ένα πρόγραμμα που εξάγει αποτελέσματα και γραφήματα για τις κύριες διεργασίες της γήρανσης μιας πετρελαιοκηλίδας. Έτσι, κύριος σκοπός ήταν η εύρεση νέων μοντέλων τύχης και παραμέτρων γήρανσης των πετρελαιοκηλίδων και η προσθήκη τους στον υπάρχοντα κώδικα ώστε να γίνει πιο ολοκληρωμένη η μελέτη του φαινομένου. Η σημασία των παραμέτρων αυτών έγκειται στο ότι παρόλο που μπορεί να μην έχουν άμεσο αντίκτυπο στην γήρανση, είναι πολύ σημαντικές, γιατί η επίδρασή τους στη μόλυνση του περιβάλλοντος είναι τεράστια. Τέλος, μέσα από την βιβλιογραφική έρευνα που διεξήχθη έγιναν προτάσεις για μεθόδους αντιμετώπισης της ατυχηματικής διαρροής πετρελαίου.

Λέξεις κλειδιά: Γήρανση πετρελαίου, πρόγραμμα SpillSolver, Τύχη πετρελαιοκηλίδων, Μέθοδοι αντιμετώπισης.

Abstract

The last 40 years the maritime world has seen thousands of oil spill accidents. The transport of oil by tankers for commercial purposes and the large number of coastal transport and storing facilities result in releasing significant quantities of oil into the seas and coasts. On the other hand, the impacts of oil spills at sea are multiple and their environmental costs depend on the type of oil and the ecosystem that will affect. Moreover, there are multiple physical, chemical and biological changes that take place from the time oil enters the sea and as long as it stays.

In this context, the subject of this thesis was to upgrade the preexisting SpillSolver program, which is a tool that extracts results and graphs results for the main aging processes of an oil spill. Thus, the aim was to find new fate and aging models and parameters of oil spills and include them in the existing code, in order to provide a more comprehensive study of the phenomenon. The importance of these aspects is that, although they may not have a direct impact on aging, are very important, because their impact on environmental contamination is enormous. Finally, through our literature survey, ways of response countermeasures with accidental oil spills were proposed.

Keywords: Oil weathering, SpillSolver program, Oil spill fate, Response countermeasures.

Περιεχόμενα

Περίληψη – 3 – Abstract – 4 –

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Βιβλιογραφική Επισκόπηση Πετρελαϊκής Ρύπανσης -8-

- 1.1 Εισαγωγή 8 -
- 1.2 Περιστατικά πετρελαιοκηλίδων -9-
- 1.3 Αιτίες ατυχηματικής διαρροής πετρελαίου στη θάλασσα 11 -
- 1.3.1 Μελέτη σχετικά με τα αίτια πρόκλησης ατυχημάτων 15 –
- 1.4 Διεθνή περιστατικά ατυχημάτων 17 –
- 1.5 Ατυχήματα Στον Ελληνικό χώρο 26 -
- 1.6 Φυσικοχημικές μεταβολές 28 -
- 1.7 Επιπτώσεις ρύπανσης -35-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Μέθοδοι αντιμετώπισης κηλίδων πετρελαίου - 36 -

- 2.1 $Eisagwy \eta 36 -$
 - 2.1.1 Ο Οργανισμός EMSA 36 –
 - 2.1.2 Χάρτες παρακολούθησης πετρελαϊκής ρύπανσης των θαλασσών 38 –
- 2.2 Βασικές αρχές δράσεων αντιμετώπισης θαλάσσιας ρύπανσης από πετρέλαιο-39-
- 2.3 Μηχανικές μέθοδοι 41 -
 - 2.3.1 Μηχανικός Καθαρισμός 41 -
 - 2.3.2 Πλωτά φράγματα 42 -
 - 2.3.3 Απορροφητικά υλικά 47 –
 - 2.3.4 Πετρελαιοσυλλέκτες 48 -
 - 2.3.5 Πλύση 53 -
 - 2.3.6 Μετακίνηση ιζήματος 53 –
 - 2.3.7 Σκάφη Περισυλλογής 53 -
- 2.4 Φυσική αποκατάσταση περιβάλλοντος 55 -
- 2.5 Φυσικές μέθοδοι 56 -
- 2.6 Επιτόπου Καύση (In situ burning) 60 -
- 2.7 Χημικές Μέθοδοι 61 -
 - 2.7.1 Χημικές διασκορπιστικές ουσίες 61 -
 - 2.7.2 Χημικές ενώσεις διασποράς 63 –
 - 2.7.3 Απογαλακτωματοποιητές (Demulsifiers) 64 -
 - 2.7.4 Στερεοποιητές (Solidifiers) 64 -
 - 2.7.5 Χημικές ουσίες επιφανειακού υμενίου (Surface film chemicals) 64 -
- 2.8 Άλλες μέθοδοι αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων 64 -
- 2.9 Σύγκριση αποδοτικότητας μεθόδων αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων 65 –

- 2.10 Περιοχές εφαρμογής μεθόδων 66 -
- 2.11 Επιπτώσεις μεθόδων αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων 67 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Νέα μαθηματικά μοντέλα διεργασιών πετρελαϊκής ρύπανσης - 69 -

- 3.1 Εισαγωγή 69 -
- 3.2 Εκβρασμός στην ακτή (Stranding) 70 -
 - 3.2.1 Μέγιστη χωρητικότητα της ακτής σε πετρέλαιο 70 -

3.2.2 Ρυθμός απομάκρυνσης πετρελαίου απ' την ακτή και παραμένων όγκος πετρελαίου – 72 –

- 3.3 Μεταβολή ταχύτητας ανέμου ανάλογα με το ύψος (Wind equation) 74 -
- 3.4 Μετατόπιση του κέντρου μάζας της κηλίδας οφειλόμενη σε άνεμο, ρεύματα-75-
- 3.5 Σενάρια διαρροής πετρελαίου (Leaking tankers) 76-
 - 3.5.1 Ρυθμός διαρροής πετρελαίου 76 -
 - 3.5.2 Ύψος ισορροπίας 77 -
 - 3.5.3 Κενό εντός της δεξαμενής 77 –
- 3.6 Εκτίμηση της μεταβολής του όγκου της κηλίδας με την πάροδο του χρόνου -78 -
- 3.7 Εξίσωση πρόβλεψης του αρχικού όγκου της πετρελαιοκηλίδας -79 -
- 3.8 Συνολικός χρόνος εξάτμισης (Total evaporation time) 80 –
- 3.9 Κατακόρυφη ανάμιξη (Vertical mixing) 82 –
- 3.10 Ρυθμός εξάπλωσης (Rate of spreading) 83 -
- 3.11 Ρυθμός παράσυρσης (Entrainment of oil to the water column) 84 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Περιγραφή και εγχειρίδιο χρήσης προγράμματος SpillSolver 2.0 - 86 -

- 4.1 Εισαγωγή 86 -
- 4.2 Το πρόγραμμα MATLAB 88 –
- 4.3 Το εγχειρίδιο χρήσης του SpillSolver 2.0 89 -
 - 4.3.1 Το εισαγωγικό παράθυρο 89 –
 - 4.3.2 Το παράθυρο εισαγωγής δεδομένων της εφαρμογής -90 -
- 4.4 Κομβία υπολογισμού 100 -
 - 4.4.1 Volume vs time 101–
 - 4.4.2 Evaporation time 102 –
 - 4.4.3 Shore 103 –
 - 4.4.4 Drift 104 –
 - 4.4.5 Leakage 106 –
 - 4.4.6 Volume estimation 107 –

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων - 109 -

- 5.1 Εισαγωγή 109 -
- 5.2 Εξοικείωση με το πρόγραμμα 110 -
 - 5.2.1 Δομή SpillSolver 2.0 110 –
 - 5.2.2 Εισαγωγή ενδεικτικού σεναρίου 110 -
 - 5.2.3 SpillSolver Output Παράθυρο εξαγωγής αποτελεσμάτων -113 -
 - 5.2.4 Εξαρτώμενα κόμβια 115 –
 - 5.2.5 Αυτοτελή κόμβια 118 –
 - 5.2.6 Διαγράμματα στο SpillSolver Output 120 –
- 5.3 Σενάρια και αποτελέσματα 140 --
 - 5.3.1 Σενάριο 1 142 -
 - 5.3.2 Σενάριο 1Α 169 -
 - 5.3.3 Σενάριο 2 190 -
 - 5.3.4 Σενάριο 2Α 212 -
 - 5.3.5 Σενάριο 3 222 -
 - 5.3.6 Σενάριο 3Α 238 -
 - 5.3.7 Σενάριο 4: Αλλαγή τύπου πετρελαίου 245 -
 - 5.3.8 Σενάριο 5: Στιγμιαία διαρροή πετρελαίου 266 -
 - 5.3.9 Σενάριο 6: Αύξηση της ταχύτητας του ανέμου 286 –
- 5.4 Επιμέρους υποσενάρια 302 -
 - 5.4.1 Ύψος ισορροπίας δεξαμενής και ρυθμός διαρροής πετρελαίου 303 –
 - 5.4.2 Εκβρασμός στην ακτή 303 –

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ - 307 -

$$\label{eq:source} \begin{split} \Sigma \upsilon \mu \pi \epsilon \rho \dot{\alpha} \sigma \mu \alpha \tau \alpha &= 307 - \\ M \epsilon \lambda \lambda o v \tau i \kappa \dot{\epsilon} \varsigma \; \pi \rho o o \pi \tau i \kappa \dot{\epsilon} \varsigma = 310 - \end{split}$$

Βιβλιογραφία - 312 -

Παράρτημα - 317 -

- Α Μοντέλα που προϋπάρχουν στο πρόγραμμα Spillsolver 2.0 318 –
- Β Αλλα μοντέλα, σχετικά με την γήρανση πετρελαίου 322 -
 - B.1. Νέα μοντέλα που βρέθηκαν αλλά δεν ενσωματώθηκαν στον κώδικα 322 –
 - Β.2. Δεδομένα μοντέλα που δεν ενσωματώθηκαν 333 –
- Γ Μετατροπή μονάδων 358 -

Κεφάλαιο 1

Βιβλιογραφική Επισκόπηση Πετρελαϊκής Ρύπανσης

1.1 - Εισαγωγή

Έχει υπολογισθεί ότι η μεταφορά του πετρελαίου δια της θαλάσσης, τα ατυχήματα και οι σχετικές με την επεξεργασία και διακίνηση του πετρελαίου δραστηριότητες στην παράκτια ζώνη (διυλιστήρια, αποθηκευτικοί χώροι, σταθμοί μεταφόρτωσης) ευθύνονται για περίπου το 50% του πετρελαίου που πέφτει στη θάλασσα ετησίως. Οι επιπτώσεις της έκχυσης αυτής είναι πολλαπλές, έχοντας κατά νου τις πολλαπλές χρήσεις της παράκτιας ζώνης, η οποία δέχεται μεγάλες πιέσεις από τον τουρισμό, την αναψυχή (περιοχές κολύμβησης, θαλασσίων σπορ, μαρίνες σκαφών αναψυχής) και την οικιστική αξιοποίηση. Η πετρελαϊκή ρύπανση επίσης, επιδρά αρνητικά στην οικολογική ισορροπία, στις παραγωγικές δραστηριότητες που σχετίζονται με την εκμετάλλευση των βιολογικών πόρων (οστρακοκαλλιέργειες, ιχθυοκαλλιέργειες) (Cushing, 1980) και στις βιομηχανικές δραστηριότητες (λήψη νερού ψύξης σταθμών παραγωγής ενέργειας). Τα συστατικά του πετρελαίου είναι τοξικά στους θαλάσσιους οργανισμούς σε όλα τα επίπεδα της τροφικής αλυσίδας. Το συνολικό περιβαλλοντικό, τώρα, κόστος κάθε πετρελαιοκηλίδας εξαρτάται από το είδος του πετρελαίου, την ποσότητα και το οικοσύστημα το οποίο θα επηρεάσει.

Το πετρέλαιο στη θάλασσα υφίσταται πολλαπλές φυσικές, χημικές και βιολογικές τροποποιήσεις από τη στιγμή της εισόδου του και για όσο διάστημα παραμένει: Η φυσική διασπορά της πετρελαιοκηλίδας και η οριζόντια μεταφορά που προκαλούν οι επιφανειακές ανεμογενείς κινήσεις αυξάνουν ταχύτατα την επιφάνεια της κηλίδας. Ταυτόχρονα διάφορα κλάσματα των υδρογονανθράκων υφίστανται εξάτμιση, διάλυση, γαλακτωματοποίηση, κάθετη ανάμειξη και ιζηματοποίηση. Παράλληλα η ηλιακή ενέργεια (φωτοοξείδωση) και θαλάσσιοι μικροοργανισμοί (βιοαποδόμηση) διασπούν τους υδρογονάνθρακες αλλάζοντας τη χημική σύνθεση της πετρελαιοκηλίδας και παράγοντας ενώσεις πιο διαλυτές και συνήθως πιο τοξικές.

Ο ρυθμός και η έκταση της διασποράς και αποικοδόμησης του πετρελαίου λόγω φυσικών διεργασιών, εξαρτάται από τη σύσταση του ακατέργαστου πετρελαίου, τις καιρικές συνθήκες και την ένταση των επιφανειακών ρευμάτων της θάλασσας (Van Oudenhoven, 1983). Για παράδειγμα τα ελαφρύτερα κλάσματα του πετρελαίου όπως το ντίζελ διασπείρονται ταχύτατα στην επιφάνεια της θάλασσας και εξατμίζονται. Τα υδατοδιαλυτά κλάσματα διαλύονται και αναμειγνύονται στη στήλη του νερού. Τα βαρύτερα κλάσματα του ακατέργαστου πετρελαίου (crude oil), που μετά βίας επιπλέουν, δημιουργούν γαλακτώματα. Αρκετά από τα συστατικά των γαλακτωμάτων μετατρέπονται σε κολλώδη «μους σοκολάτας» και στη συνέχεια σε μεγαλύτερα σφαιρίδια πίσσας, επιπλέοντα στην επιφάνεια της θάλασσας, τα οποία γίνονται πυκνότερα με την πάροδο του χρόνου και τελικά είτε βυθίζονται είτε εκβράζονται στην ακτή.

1.2 - Περιστατικά πετρελαιοκηλίδων

Η μεταφορά αργού πετρελαίου προς τα διυλιστήρια γίνεται συνήθως με δεξαμενόπλοια και αγωγούς, ενώ στη συνέχεια αυτό αποθηκεύεται σε δεξαμενές μέχρι τη στιγμή της επεξεργασίας του. Για το λόγο αυτό τα διυλιστήρια αυτά είναι συνήθως κατασκευασμένα πλησίον παράκτιων περιοχών. Πολλές φορές ατυχήματα ή διαρροές από τις εγκαταστάσεις μεταφοράς και αποθήκευσης οδηγούν στην απελευθέρωση σημαντικών ποσοτήτων πετρελαίου σε θάλασσες και ακτές. Επίσης η μεταφορά πετρελαίου με πετρελαιοφόρα για εμπορικούς σκοπούς, καθώς επίσης και η γενικότερη αύξηση της ναυτιλιακής δραστηριότητας (αλιεία, μεταφορές, πολεμικές επιχειρήσεις) σε παγκόσμιο επίπεδο, έχουν αυξήσει κατά πολύ τα επίπεδα της θαλάσσιας πετρελαϊκής ρύπανσης (NOAA, 2003). Τα τελευταία 40 χρόνια έχουν σημειωθεί χιλιάδες ατυχήματα, σε ολόκληρο τον κόσμο, ορισμένα εκ τον οποίων έχουν προκαλέσει τεράστια οικολογική καταστροφή στα υδάτινα οικοσυστήματα. (Liubartseva et al., 2015)

Αρκετά ατυχήματα έχουν σημειωθεί και στον ελλαδικό χώρο. Δεδομένου ότι η Ελλάδα αποτελεί γεωγραφικό «πέρασμα» των θαλάσσιων μεταφορών Ασίας και Ευρώπης, αλλά και λόγω της ναυτιλιακής δραστηριότητας της ίδιας της χώρας μας, η ναυτιλιακή κινητικότητα των ελληνικών θαλασσών (και γενικότερα της μεσογείου) είναι ιδιαιτέρως αυξημένη, γεγονός που με τη σειρά του αυξάνει τον κίνδυνο πετρελαϊκής ρύπανσης. (Ventikos, 2006)



Εικόνα 1.1: Προσάραξη δεξαμενόπλοιου (NOAA, 2006)



Εικόνα 1.2: Έκρηξη στην πλατφόρμα Deepwater Horizon στον Prince William, Αλάσκα (NOAA, 2006)

Σύμφωνα με τα παραπάνω και λόγω της αυξημένης δημοσιοποίησης και προβολής των σχετικών ατυχημάτων από τα MME, έχει δημιουργηθεί η αντίληψη στην κοινή γνώμη ότι τα ατυχήματα των δεξαμενόπλοιων αποτελούν την κυριότερη αιτία πετρελαϊκής ρύπανσης. Η αντίληψη αυτή διαψεύδεται από στατιστικά στοιχεία των Ηνωμένων Εθνών, σύμφωνα με τα οποία τα ατυχήματα αυτά καταλαμβάνουν περίπου το 26% του συνολικού πετρελαίου που διαρρέει στις θάλασσες. Ως κυριότερη αιτία ρύπανσης αναφέρεται η ρύπανση που προκαλείται από τις συνήθεις λειτουργικές εργασίες (επιχειρησιακή ρύπανση) και από λειτουργικές διαρροές. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε διαδικασίες ρουτίνας, οι απώλειες ενός δεξαμενόπλοιου υπολογίζονται περίπου ίσες με 0,53 εκατομμυρίων μετρικών τόνων ανά έτος! Επίσης αρκετοί πλοιοκτήτες για οικονομικούς λόγους δεν τηρούν τις προδιαγραφές λειτουργίας και πλεύσης (π.χ. καθαρισμός και έκπλυση δεξαμενών «εν πλω» και όχι σε ειδικούς χώρους στα λιμάνια όπως επιβάλλεται από τους διεθνής κανονισμούς), γεγονός που αυξάνει τις πετρελαϊκές διαρροές. (IPIECA, 2008)

1.3 - Αιτίες ατυχηματικής διαρροής πετρελαίου στη θάλασσα

Τα περισσότερα ατυχήματα των δεξαμενόπλοιων συμβαίνουν κοντά στις ακτές ή σε περιοχές πυκνής κυκλοφορίας, οι δε περιπτώσεις ολικών απωλειών πλοίων ή φορτίων (total losses or casualties) ανήκουν σε επτά επιμέρους κατηγορίες οι οποίες συνοψίζονται παρακάτω: (ITOPF, 2013, ITOPF, 2005, Ventikos, 2006)

1) Βύθιση (foundering ή sinking): Βύθιση μπορεί να προκληθεί, είτε λόγω δυσμενών κλιματολογικών συνθηκών είτε λόγω μετατόπισης του φορτίου με αποτέλεσμα να προκληθεί ζημιά στην άτρακτο του πλοίου. Μια περίπτωση βύθισης μπορεί να χαρακτηριστεί ως «ολική απώλεια» του πλοίου βάσει τριών παραγόντων: α) της πιθανότητας ανέλκυσης, β) του τόπου του συμβάντος, γ) των διαθέσιμων μέσων θαλάσσιας αρωγής.

2) Προσάραξη του πλοίου (grounding). Η προσάραξη ενός πλοίου συντελείται κυρίως λόγω κακών καιρικών συνθηκών, μηχανικής βλάβης ή/και λάθος χειρισμού. Ειδικότερα, μεγάλης χωρητικότητας δεξαμενόπλοια είναι ιδιαίτερα ευπαθή σε τέτοιου είδους ατυχήματα, καθώς διαθέτουν ελάχιστο χρόνο ελιγμού εξαιτίας του όγκου τους.

Μεγάλης κλίμακας τέτοιου είδους ατύχημα αποτέλεσε το δεξαμενόπλοιο Metula. Το συγκεκριμένο δεξαμενόπλοιο επέλεξε, λόγω κακών καιρικών συνθηκών, να διαγράψει πορεία διαμέσου των στενών του Μαγγελάνου, καθώς έπλεε προς Χιλή. Ένα λάθος ναυσιπλοΐας οδήγησε στην προσάραξη σε υφάλους με τη μέγιστη ταχύτητα του με αποτέλεσμα τη διαρροή 50.000 τόνων φορτίου στο θαλάσσιο περιβάλλον (47.000 tn αργού πετρελαίου και 3.000 tn μαζούτ) (Guzman, 1981).



Εικόνα 1.3: Το δεξαμενόπλοιο ΜΕΤULΑ (αριστερά) και τα αποτελέσματα της παράκτιας θαλάσσιας ρύπανσης από την προσάραξή του (δεξιά) (Guzman, 1981).

3) Σύγκρουση (collision) ή επαφή του πλοίου (contact). Η πρώτη περίπτωση αφορά τα ατυχήματα που συντελούνται είτε σε λιμένες είτε σε τερματικούς σταθμούς με συχνή κυκλοφορία. Η περίπτωση τώρα, της επαφής αφορά την επαφή του πλοίου με κάποια σταθερή και μόνιμη εγκατάσταση υποδομής, όπως οι προβλήτες λιμένων, οι πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου κλπ. Και στις δυο περιπτώσεις ο ανθρώπινος παράγοντας αποτελεί την γενεσιουργό αιτία των αποτελεσμάτων.

Μια ενδεικτική περίπτωση αυτής της κατηγορίας ατυχημάτων αποτελεί το δεξαμενόπλοιο Patmos το οποίο στις 21/3/1985 συγκρούστηκε με το Castillo de Montearagon στα στενά της Μεσσίνας στην Ιταλία. Το δεύτερο δεξαμενόπλοιο έπλεε χωρίς φορτίο ενώ το Patmos είχε φορτίο 828.300 βαρελιών αργού πετρελαίου το οποίο και εκτυλίχθηκε στις φλόγες. Αν και η ποσότητα πετρελαίου που χύθηκε στο θαλάσσιο περιβάλλον ήταν σχετικά μικρή (5.300 βαρέλια), η οικολογική καταστροφή ήταν μεγάλη εξαιτίας της σύστασης του φορτίου που μετέφερε.

Σπουδαίο ρόλο στη μείωση των ναυτικών ατυχημάτων από συγκρούσεις διαδραματίζει η σύμβαση του ΙΜΟ «Διεθνείς κανονισμοί για την αποφυγή των συγκρούσεων στη θάλασσα» (1972), η οποία καθιερώνει πλέον τις υποχρεωτικές πορείες πλοίων (traffic seperation schemes), ιδίως σε περιοχές που υπάρχει συχνή κυκλοφορία καθώς επίσης και τα νέα βελτιωμένα συστήματα ραντάρ (το λεγόμενο ARPA). (ITOPF, 2013, ITOPF, 2005)

4) Έκρηξη (explosion) ή/και πυρκαγιά (fire). Οι συγκεκριμένες περιπτώσεις ατυχήματος έχουν ως αποτέλεσμα την απώλεια ανθρώπινων ζωών, καθώς ως επί το πλείστον τα συγκεκριμένα ατυχήματα εκδηλώνονται στα ανοιχτά των ωκεανών όπου η από ξηράς βοήθεια είναι απομακρυσμένη.

Ενδεικτική περίπτωση τέτοιου ατυχήματος αποτελεί το δεξαμενόπλοιο Castillo de Bellver το οποίο καθώς μετέφερε 250.000 τόνους πετρελαίου, στις 6/8/1983 τυλίχθηκε στις φλόγες κοντά στο λιμάνι του Κέιπταουν της Νότιας Αφρικής, με χαρακτηριστική την Σχήμα 1.4. Ακολούθησαν μαζικές εκρήξεις και σαν αποτέλεσμα το πλοίο κόπηκε σε δύο κομμάτια. Ωστόσο, οι άνεμοι που έπνεαν στην περιοχή βοήθησαν στο να αποφευχθεί μεγάλη ζημιά στις ακτές από τη διαρροή πετρελαίου. Περίπου 50-60.000 τόνοι πετρελαίου υπολογίζονται ότι χύθηκαν στην θάλασσα ή κάηκαν. (NOAA, 2003)



Εικόνα 1.4: Το δεξαμενόπλοιο Castillo de Bellver ενώ φλέγεται (NOAA, 2003)

5) Ζημιές στη δομή του πλοίου (structural failure) που συνήθως εμφανίζονται είτε στο εξωτερικό περίβλημα του πλοίου (hull) είτε στα τοιχώματα των δεξαμενών (bulkheads) εξαιτίας κυρίως των καιρικών συνθηκών, της μετατόπισης φορτίου, της μηχανικής βλάβης και της κακής επίσης συντήρησης με προφανή συνέπεια την μη αντοχή – αστοχία των υλικών. (Σήμερα, τα περισσότερα δεξαμενόπλοια είναι εφοδιασμένα με ειδικό εξοπλισμό που παρακολουθεί τις ροπές κάμψης - bending moments).

Ως περίπτωση το δεξαμενόπλοιο *Wafra*: το έτος 1971 φορτωμένο με 40.000 τόνους αργό πετρέλαιο ζήτησε τη βοήθεια ρυμουλκών όταν ακινητοποιήθηκε λόγω μηχανικής βλάβης και πλημμύρισε το μηχανοστάσιο ενώ βρισκόταν κοντά στις ακτές της Νότιας Αφρικής, όμως η επιχείρηση διάσωσης απέτυχε και η πετρελαιοκηλίδα κατάστρεψε μεγάλες εκτάσεις της παράκτιας ζώνης και μεγάλο αριθμό της θαλάσσιας πανίδας.

Για αυτό το είδος ατυχήματος η σχετική ανθεκτικότητα της κατασκευή ενός πλοίου σχετίζεται άμεσα με την ηλικία του, στοιχείο που επιβεβαιώνεται από τον υψηλό μέσο όρο ηλικίας του παγκόσμιου στόλου δεξαμενόπλοιων, ιδίως των μεγάλων πλοίων. (NOAA, 2003)

6) Απώλειες λόγω πολεμικών εχθροπραξιών (war losses). Συμβαίνουν σε δύο περιπτώσεις. Πρώτη, όταν τα δεξαμενόπλοια έχουν επιταχθεί από την κυβέρνηση ενός κράτους για τη μεταφορά καυσίμων κατά τη διάρκεια εμπόλεμων καταστάσεων και δεύτερη, όταν απασχολούνται εξαιρετικά μεγάλης χωρητικότητας δεξαμενόπλοια (για οικονομικούς λόγους) ώστε να μεταφέρουν πετρέλαιο σε περιόδους πετρελαϊκών κρίσεων και εισέρχονται σε περιοχές που υπάρχουν εχθροπραξίες. (GESAMP)

7) Ετερόκλητα ατυχήματα τα οποία μπορούμε να τα διαχωρίσουμε σε τρεις υποκατηγορίες: (GESAMP)

- a) Μικτές μορφές των παραπάνω π.χ. πυρκαγιά και βύθιση, σύγκρουση και βύθιση, προσάραξη και πυρκαγιά, σύγκρουση και έκρηξη. Το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι αρκετά δύσκολο να κατηγοριοποιηθεί, καθώς εξαρτάται από ποιόν οργανισμό γίνεται η κατηγοριοποίηση και λαμβάνοντας υπόψη ποια κριτήρια.
- b) Εσκεμμένη βύθιση του πλοίου (scuttling). Το συγκεκριμένο «ατύχημα» γίνεται με την μέθοδο διάνοιξης οπών στα ύφαλα του πλοίου. Μια τέτοια ενέργεια γίνεται είτε σε περίοδο πολέμου για να μην περιέλθει το εκάστοτε πλοίο στην κυριότητα του εχθρού είτε σε περιπτώσεις που ο πλοιοκτήτης ως ηθικός αυτουργός, προβαίνει σε μια τέτοια ενέργεια για την είσπραξη της ασφάλειας.
- c) Εξαφάνιση του πλοίου χωρίς αιτιολόγηση (disappearance). Συντελείται σε εκείνες τις περιπτώσεις που γίνεται αντιληπτό ότι ένα πλοίο δεν μπορεί να εντοπιστεί με κάποιο ραντάρ ή δορυφόρο σε συνδυασμό με την παντελής έλλειψη αποδεικτικών στοιχείων ενδεχόμενου ατυχήματος.

Είναι ευνόητο ότι όσο μεγαλύτερες είναι οι ποσότητες φορτίου που μεταφέρονται, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η πρόκληση ζημιάς στο θαλάσσιο περιβάλλον με όλες τις σχετικές συνέπειες. Σαν αποτέλεσμα, τα γιγαντιαία πλοία απειλούν με σοβαρούς κινδύνους τις περιοχές μέσα στις οποίες κινούνται παρά την προσπάθεια της διεθνούς νομοθεσίας που στοχεύει να περιορίσει τους κινδύνους αυτούς. Εκτός όμως από τις απώλειες πλοίων ή φορτίου που προξένησαν σοβαρή ζημιά στο θαλάσσιο περιβάλλον, υπάρχουν και αυτές όπου αποφεύχθηκε η περιβαλλοντική καταστροφή (την τελευταία ίσως στιγμή) διότι δεν δημιουργήθηκε σοβαρή ρύπανση παρά το γεγονός ότι πολλά από αυτά τα πλοία ήταν φορτωμένα κυρίως με αργό πετρέλαιο κατά τη στιγμή της καταστροφής. Αυτό βέβαια σημαίνει ότι τα σωστικά μέσα κατόρθωσαν να θέσουν υπό έλεγχο την κατάσταση ή να διασώσουν μεγάλο μέρος του φορτίου πριν αυτό διαρρεύσει στη θάλασσα.

1.3.1 - Μελέτη σχετικά με τα αίτια πρόκλησης ατυχημάτων

Οι περισσότερες κηλίδες δημιουργούνται κατά τη διάρκεια επιχειρήσεων ρουτίνας όπως η φόρτωση/εκφόρτωση, το ξεφόρτωμα ή η αποθήκευση καυσίμου, οι οποίες συμβαίνουν συνήθως σε λιμάνια ή πετρελαϊκούς σταθμούς. Σύμφωνα με την μελέτη των Chang και Lin (2005), η πιο συχνή αιτία ατυχήματος σε δεξαμενές αποθήκευσης είναι οι κεραυνοί, ενώ ακολουθούν τα λάθη στην συντήρηση. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται όλες οι πιθανές αιτίες για μια περίοδο 40 χρόνων και ένα σύνολο ατυχημάτων 242.

Έτος/πιθανές αιτίες	1960- 1969	1970- 1979	1980- 1989	1990- 1999	2000- 2003	Σύνολο
Κεραυνοί	4	10	19	37	10	80
Συντήρηση	1	5	9	12	5	32
Λάθη χειρισμού	1	5	6	8	9	29
Ελαττωματικός εξοπλισμός	3	1	5	7	3	19
Υπονόμευση	2	5	2	6	3	18
Ρήξη στην δεξαμενή	0	3	3	3	8	17
Διαρροές	0	3	2	5	5	15
Στατικός ηλεκτρισμός	2	1	2	2	5	12
Φυσική καταστροφή	1	2	1	1	2	7
Ανεξέλεγκτη αντίδραση	2	1	0	2	0	5
Σύνολο	17	36	53	85	51	242

Πίνακας 1.1: Πιθανές αιτίες ατυχήματος σε δεξαμενές αποθήκευσης (Chang και Lin, 2005)

Η νούμερο ένα αιτία ατυχήματος σε δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων είναι οι κεραυνοί. 80 στα 242 ατυχήματα, ποσοστό 33% προκλήθηκαν από κεραυνούς, ενώ 32 στα 242 ατυχήματα, ποσοστό 13%, συνέβησαν κατά την διάρκεια συντήρησης των δεξαμενών. Καθαρισμοί δεξαμενών, προσθήκη μονωτικού υλικού, έργα συντήρησης αγωγών είναι μερικές από τις αιτίες των παραπάνω 32 ατυχημάτων, όπως περιγράφονται στην μελέτη των Chang και Lin (2005). Χαρακτηριστικό είναι μάλιστα το ατύχημα που συνέβη στην Θεσσαλονίκη το 1986, όταν μια σπίθα από κομμένο δαυλό πυροδότησε τα αναθυμιάματα του καυσίμου στην 30 πόδια διάμετρο επί 30 πόδια ύψος δεξαμενή και προκάλεσε φωτιά που εξαπλώθηκε γρήγορα στη γύρω περιοχή και έκαιγε για 7 συνεχείς ημέρες οδηγώντας στο θάνατο 5 ανθρώπων και στην καταστροφή 10 εκ των 12 δεξαμενών αργού πετρελαίου.

Τρίτη αιτία ατυχήματος σε δεξαμενές είναι οι λάθος χειρισμοί, κοινώς τα ανθρώπινα λάθη. 29 στα 242 ατυχήματα, ποσοστό 12%, συνέβησαν από λάθος χειρισμούς. Και όταν λέμε λάθους χειρισμούς εννοούμε συνήθως υπερφόρτωση των δεξαμενών. Και όταν μια δεξαμενή που περιέχει εύφλεκτα υγρά γεμίζει παραπάνω από τις προδιαγραφές της, τότε η έκρηξη ή η εκδήλωση πυρκαγιάς είναι συνήθως αναπόφευκτη. Τα αναθυμιάματα που εκπέμπονται καθώς το πετρέλαιο εξατμίζεται μπορούν να πυροδοτηθούν, ανά πάσα στιγμή, από οτιδήποτε μπορεί να προκαλέσει σπίθα. Έτσι αναφέρθηκαν περιπτώσεις όπου υπήρξε πυροδότηση από ηλεκτρικούς διακόπτες ή την μηχανή κάποιου αυτοκινήτου σε λειτουργία.

Το 1998 στην Ταϊβάν προκλήθηκε μεγάλο ατύχημα από απροσεξία των οδηγών, που μετέφεραν πετρέλαιο. Οι οδηγοί μετακίνησαν την δεξαμενή απρόσεκτα, η μάνικα αποσυνδέθηκε, απελευθερώθηκαν ατμοί, ξέσπασε φωτιά και έγινε έκρηξη. Το 1972 η βαλβίδα ενός σωλήνα σε ένα διυλιστήριο στην Βραζιλία ξεχάστηκε ανοιχτή, με αποτέλεσμα να καταστραφούν 21 δεξαμενές και ένα κτίριο με γραφεία. Όλα τα παραπάνω περιστατικά αποτελούν ατυχήματα που προήλθαν από την ανθρώπινη απροσεξία και θα μπορούσαν να είχαν αποφευχθεί.

Η τέταρτη αιτία ατυχήματος είναι ο ελαττωματικός εξοπλισμός. 19 στα 242 ατυχήματα προκλήθηκαν λόγω ελαττωματικού εξοπλισμού, δηλαδή ποσοστό 7,85%, όχι και τόσο ευκαταφρόνητο. Η δυσλειτουργία διαφόρων ηλεκτρονικών κυρίως οργάνων, που ελέγχουν μια δεξαμενή αποθήκευσης, έχει σαν αποτέλεσμα την πρόκληση ατυχήματος. Αν για παράδειγμα η μόνωση της οροφής της δεξαμενής δεν λειτουργεί, τότε είναι πολύ εύκολο ένας κεραυνός να προκαλέσει ανάφλεξη των εύφλεκτων ατμών του πετρελαίου. Το 1962 το κύριο σώμα μιας ιαπωνικής δεξαμενής πετρελαίου ''έπεσε'' λόγω αποτυχίας των βαλβίδων διεξόδου. Η εκκενωμένη βαλβίδα πάγωσε και αδυνατούσε να κλείσει, με αποτέλεσμα οι ατμοί του πετρελαίου που απελευθερώθηκαν να προκαλέσουν μια τεράστια πυρκαγιά, η οποία σκότωσε 19 άτομα και κατέστρεψε 5 αποθήκες (March and Mclennan, 1990). Παρόμοια παραδείγματα υπάρχουν πολλά στην παγκόσμια βιβλιογραφία, τα οποία μας τονίζουν την σημασία του καλού εξοπλισμού.

Η πέμπτη αιτία ατυχήματος, σύμφωνα πάντα με τον παραπάνω πίνακα, είναι η υπονόμευση. Υπονόμευση συνήθως συμβαίνει σε περίπτωση τρομοκρατικής επίθεσης ή σε στρατιωτικές επιχειρήσεις.

Τέλος, υπάρχουν πέντε ακόμα αιτίες οι οποίες έπονται των παραπάνω και αποτελούν το 23,1 % των ατυχημάτων, σύμφωνα με τον πίνακα.

Συνοψίζοντας ωστόσο, το συμπέρασμα που προκύπτει από την παραπάνω μελέτη είναι ότι αρκετά από τα 242 ατυχήματα θα είχαν αποφευχθεί αν υπήρχε σωστή

κατασκευή, συντήρηση και λειτουργία και αν εφαρμοζόταν κάποιο πρόγραμμα ασφαλούς διαχείρισης.

Παρόλα αυτά, 92% των περιπτώσεων ατυχήματος σε δεξαμενές καυσίμων αφορά μικρού μεγέθους κηλίδες. Αντίθετα, μεγάλες κηλίδες προκαλούνται από ατυχήματα που αφορούν συγκρούσεις ή προσαράξεις πλοίων στα ρηχά. Δημιουργούνται δηλαδή κατά την μεταφορά των καυσίμων. Οι λόγοι αυτών των ατυχημάτων ποικίλουν με πιο συνηθισμένες αιτίες τις εξής:

- > Δυσλειτουργία του εξοπλισμού, που μπορεί να προκαλέσει διαρροές του φορτίου.
- Ανθρώπινα λάθη, όπως η προσάραξη των τάνκερ σε αβαθή νερά και/ή η σύγκρουση αυτών με άλλα πλοία που μπορούν να προκαλέσουν φωτιές και εκρήξεις του φορτίου.
- Έντονα φυσικά φαινόμενα (σεισμική δραστηριότητα, τυφώνες κλπ), που περιλαμβάνουν όλες τις προηγούμενες συνέπειες.
- Ελλειψη ισχυρού νομικού πλαισίου, που επιτρέπει την μεταφορά καυσίμων χωρίς την λήψη μέτρων ισχυρών για την αποφυγή ατυχημάτων.

Χαρακτηριστικά αναφέρουμε το ατύχημα στο Shetland το 1978, όταν το τάνκερ *Esso Bernica* παρουσίασε ρήγμα στα ύφαλα κατά την αγκυροβόληση με αποτέλεσμα 1.100 τόνοι αργού πετρελαίου να κατακλείσουν την παραλιακή ζώνη, προκαλώντας σοβαρές καταστροφές στο φυσικό περιβάλλον και τον τοπικό πληθυσμό. Ακόμα πιο καταστροφικό ήταν το ατύχημα που συνέβη το 1989 στα αβαθή νερά του πορθμού του Prince Williams στην Αλάσκα. Το πετρελαιοφόρο *Exxon Valdez* προσάραξε δημιουργώντας πετρελαιοκηλίδα 37.000 τόνων. Καθώς το πετρέλαιο απλώθηκε κατά μήκος της ακτής, κάλυψε ψάρια, φυτά και πουλιά, μετατρέποντας χιλιάδες μίλια αυτής της περιοχής σε περιοχή βιολογικής καταστροφής. (Chang και Lin, 2005)

Ακόμα όμως και όταν συμβεί το ατύχημα, η έκταση που θα λάβει εξαρτάται τόσο από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή όσο και από την άμεση κινητοποίηση των αρχών.

1.4 - Διεθνή περιστατικά ατυχημάτων

Τα 4/5 του διεθνούς εμπορίου διεξάγονται μέσω της θάλασσας. Ανάμεσα στα προβλήματα που σχετίζονται με τις θαλάσσιες μεταφορές είναι τα ναυτικά ατυχήματα και κατ' επέκταση η ρύπανση του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Η ναυτιλία ευθύνεται για

την παγκόσμια θαλάσσια ρύπανση σε πολύ μικρότερο ποσοστό σε σχέση με τις άλλες πηγές, παρ' όλα αυτά όμως οι προβολείς της κοινής γνώμης πέφτουν πάνω της. Αυτό φυσικά οφείλεται στο γεγονός ότι οι συνέπειες από ένα σοβαρό ναυτικό ατύχημα έχουν μεγάλο αντίκτυπο και μπορεί να είναι εντυπωσιακές.



Σχήμα 1.1: Εκροές πετρελαίου από το 1970 έως σήμερα

Είναι αξιοσημείωτο ότι λίγες αλλά πολύ μεγάλες πετρελαιοκηλίδες είναι υπεύθυνες για ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό πετρελαίου που έχει χυθεί. Για παράδειγμα, στην δεκαετία 1990 με 1999 υπήρχαν 358 εκροές άνω των 7 τόνων, συνολικού ύψους 1.138 χιλιάδες τόνους, αλλά 830 χιλιάδες τόνοι (73%) διέρρευσαν σε μόλις 10 ατυχήματα (μόλις κάτω από 3%)! Τα στοιχεία για ένα συγκεκριμένο έτος μπορεί, επομένως, να στρεβλώνονται σοβαρά από ένα μεγάλο ατύχημα. Αυτό διακρίνεται από τα έτη: 1979 (*Atlantic Empress* - 287.000 τόνοι), 1983 (*Castillo de Bellver* - 252.000 τόνοι) και 1991 (*ABT Summer* - 260.000 τόνοι). Περίπου 5,65 εκατομμύρια τόνοι πετρελαίου χάθηκαν ως αποτέλεσμα των ατυχημάτων των δεξαμενοπλοίων από το 1970 έως το 2008, κάποια από τα οποία είχαν δραματικές συνέπειες στο θαλάσσιο περιβάλλον. Ωστόσο, η ανάλυση του όγκου των χυμένου πετρελαίου από τα δεξαμενόπλοια μέσα από τις δεκαετίες έχει επιδείξει σημαντική βελτίωση.

Την διατάραξη του θαλάσσιου οικοσυστήματος και την εξαφάνιση των ειδών που τείνουν προς εξαφάνιση, πρέπει να τα λάβουμε σοβαρά υπόψη. Τα πιο σημαντικά ναυτικά ατυχήματα με τις αρνητικότερες επιπτώσεις στο θαλάσσιο οικοσύστημα είναι τα κάτωθι :

"ATLANTIC EMPRESS", Ιούλιος του 1979: Η μεγαλύτερη ποσότητα πετρελαίου που έχει ποτέ διαρρεύσει στον θαλάσσιο χώρο είναι στο ατύχημα του δεξαμενόπλοιου αυτού, κλάσης VLCC, το οποίο ήταν φορτωμένο με 287.000 τόνους πετρελαίου. Κατά την διάρκεια σφοδρής κακοκαιρίας συγκρούστηκε με το Aegean captain, 10 μίλια μακριά από τις ακτές του Τομπάκο στην Καραϊβική θάλασσα. Η πετρελαιοκηλίδα αυτή ήταν η μεγαλύτερη που έχει αναφερθεί η οποία ωστόσο, προκάλεσε ελάχιστη ζημιά στις κοντινές ακτές. (Connell και Miller, 1981)



Εικόνα 1.5: Atlantic Empress (1979) (Connell και Miller, 1981)

"<u>AMOCO CADIZ</u>", <u>Μάρτιο του 1978</u>: Ένα από τα σημαντικότερα ατυχήματα που έχουν συμβεί είναι αυτό, με το υποφαινόμενο πλοίο να προσαράζει έξω από την Βρετάνη της Γαλλίας. Αποτέλεσμα να διαρρεύσουν 223.000 τόνοι βαρέως πετρελαίου. Μέχρι τα τέλη Απριλίου του ιδίου έτους είχαν ρυπανθεί 320χλμ. της ακτογραμμής της Βρετάνης, πράγμα το οποίο είχε σοβαρή επίπτωση στην αλιεία και στον τουρισμό. Εκατομμύρια μαλάκια, αχινοί και άλλα είδη πέθαναν, ενώ υπήρξε φοβερή μείωση της παραγωγής οστρακοειδών και ψαριών. Το ατύχημα αυτό είχε στο περιβάλλον και στην οικονομία της περιοχής. Έκτοτε, η κυβέρνηση της Γαλλίας δημιούργησε νομοθεσία η οποία απαγορεύει την είσοδο δεξαμενόπλοιων σε απόσταση 7 μιλίων από την ακτή, εκτός και αν υπάρχει άδεια για προσέγγιση σε γαλλικό λιμάνι.



Εικόνα 1.6: Amoco Cadiz (1978) (Connell και Miller, 1981)

"EXXON VALDEZ", Μάρτιος του 1989: Σημειώθηκε στο Prince William Sound, στην είσοδο του κόλπου της Αλάσκας, Νότια Αλάσκα και απελευθερώθηκαν 37.000 τόνοι ακατέργαστου πετρελαίου. Το δυστύχημα αυτό αποτελεί ένα από τα πιο διάσημα περιστατικά διαρροής πετρελαίου στην θάλασσα αν λάβουμε υπόψη τις επιπτώσεις της πετρελαιοκηλίδας στο θαλάσσιο περιβάλλον: 1100 μίλια ακτής ρυπάνθηκαν, 35.000 πουλιά πέθαναν τα οποία ήταν καλυμμένα από πετρέλαιο, σημειώθηκε μείωση ή και εξαφάνιση των αναμενόμενων αλιευμάτων του παρόντος κύκλου αναπαραγωγής. Η απάντηση στην φυσική αυτή καταστροφή ήταν ο αμερικάνικος νόμος ρύπανσης πετρελαίου OPA 1990, ο οποίος απαίτησε την κατασκευή πλοίων διπλού τοιχώματος (double hull). Ακόμη και σήμερα τα σημάδια της ανεπανόρθωτης εκείνης ζημιάς είναι εμφανή στις ακτές της Αλάσκας. (Bragg et al., 1994, Prince et al., 1994)



Εικόνα 1.7: Exxon Valdez (1989) (Prince et al., 1994)

"ERIKA", Δεκέμβριος του 1999: Ένα πιο πρόσφατο θαλάσσιο ατύχημα συνέβη στο δεξαμενόπλοιο αυτό λόγω των άσχημων καιρικών συνθηκών που επικρατούσαν στην περιοχή της Βρετάνης. Το Erika κόπηκε στα δύο με αποτέλεσμα να προκαλέσει πετρελαιοκηλίδα 20.000 τόνων. Στο ατύχημα αυτό ρυπάνθηκαν 400χλμ. ακτών, συλλέχθηκαν 65.000 θαλασσοπούλια καλυμμένα με πετρέλαιο εκ των οποίων τα 50.000 νεκρά, ενώ υπήρξε σημαντική επίπτωση στην αλίευση λόγω διακοπής του ψαρέματος καθώς και τουριστική απώλεια λόγω της ρύπανσης των ακτών. Οι απώλειες αυτές εκτιμήθηκαν γύρω στα 100 εκατομμύρια ευρώ.

Το ναυάγιο του πετρελαιοφόρου Erika αποτέλεσε την αφετηρία νέων εξελίξεων στην καθιέρωση της ευρωπαϊκής πολιτικής για την ασφάλεια στην θάλασσα. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε μια ανακοίνωση για την ασφάλεια των θαλάσσιων μεταφορών πετρελαίου, η οποία περιλάμβανε την πρώτη δέσμη μέτρων γνωστή ως "Erika I", την δεύτερη δέσμη μέτρων που ονομάζεται "Erika II" και τη νέα δέσμη μέτρων Erika III. Η δεύτερη δέσμη αποβλέπει στη βελτίωση της προστασίας των ευρωπαϊκών υδάτων έναντι των κινδύνων ατυχημάτων και θαλάσσιας ρύπανσης και η νέα δέσμη έχει στόχο την αποτελεσματικότερη λειτουργία των υπαρχόντων μέτρων ασφάλειας. (U.S. EPA, 1999)



Εικόνα 1.8: Erika (1999) (U.S. EPA, 1999)

"PRESTIGE", Νοέμβριος του 2002: Στις Βορειοδυτικές ακτές της Ισπανίας το πλοίο κόπηκε στη μέση, δημιουργώντας σοβαρή ρύπανση κι ενώ μετέφερε 77.000 τόνους πετρελαίου. Η ποσότητα αυτή δημιούργησε εκτεταμένη ζημιά στις ακτές της Ισπανίας και της Γαλλίας. Η πετρελαιοκηλίδα μήκους 200χλμ. απείλησε μια περιοχή μείζονος οικολογικής σημασίας και μια ιδιαίτερη ζώνη αλιείας. Οι ισχυροί άνεμοι και τα ρεύματα παρέσυραν την πετρελαιοκηλίδα προς το Εθνικό Θαλάσσιο Πάρκο των Ατλαντικών νήσων της Γαλικίας, που είναι το σημαντικότερο ισπανικό οικοσύστημα. Στην ευρύτερη περιοχή του ατυχήματος εμφανίστηκαν νεκρά ψάρια, θαλασσοπούλια,

κορμοράνοι, γλάροι κ.α. τα οποία παγιδεύτηκαν από την πετρελαιοκηλίδα. (Atlas, 2011)



Εικόνα 1.9: Prestige (2002) (Atlas, 2011)

Εξέδρα "DEEPWATER HORIZON", Απρίλιος του 2010: Στις 20 Απριλίου του 2010, μια από τις μεγαλύτερες οικολογικές καταστροφές διαδραματίστηκε στον Κόλπο του Μεξικού. Η διαρροή στην εξέδρα άντλησης πετρελαίου, Deepwater Horizon της British Petroleum (BP) ήθελε να γίνει η μεγαλύτερη πετρελαιοκηλίδα στην ιστορία. Η διαρροή διήρκησε 87 ημέρες κοστίζοντας τη ζωή σε 11 ανθρώπους. Συνολικά, χύθηκαν στον ωκεανό 4,9 εκατομμύρια βαρέλια πετρελαίου (780.000 m³). Οι άμεσες επιπτώσεις της ήταν τεράστιες. Όσες προσπάθειες και αν κατεβλήθησαν για την περισυλλογή του πετρελαίου από τη θάλασσα δεν είδαν αποτέλεσμα. Ήταν τόσο μεγάλος ο όγκος του πετρελαίου που κανείς δεν ήταν προετοιμασμένος. (Atlas, 2011)

Στη προσπάθεια αντιμετώπισης της εξαπλωμένης ρύπανσης, τα πλοία περισυλλογής και τα πλωτά φράγματα κατάφεραν να θέσουν υπό έλεγχο 1,84 εκατομμύρια γαλόνια (7.000 m³). Μετά από τις αποτυχημένες προσπάθειες για να τεθεί υπό έλεγχο η διαρροή, το σημείο άντλησης σφραγίστηκε.

Έπειτα από ένα μεγάλο αριθμό ερευνών που διεξήχθησαν για τα αίτια της έκρηξης και την περαιτέρω διαρροή η κυβέρνηση των ΗΠΑ αποφάνθηκε πως ήταν ελαττωματικό το τσιμέντο του πηγαδιού και κατηγόρησε την BP για τα ελλιπή μέτρα ασφάλειας. (ITOPF, 2013)

- ✓ 47.000 άνθρωποι + 7.000 πλοία ενεπλάκησαν στην καταπολέμησης της ρύπανσης.
- ✓ 1.300 km φραγμάτων αναπτύχθηκαν γύρω από κοραλλιογενή νησάκια κι υδροβιότοπους. Συνολικά αναπτύχθηκαν 4.100 km φραγμάτων.
- Έγινε ελεγχόμενη καύση μερικών κηλίδων.

Επιστρατεύτηκαν όλα τα δυνατά μέσα αλλά ακόμη και σήμερα δεν έχουν καταφέρει να καθαριστούν όλες οι περιοχές που προσβλήθηκαν από τη διαρροή. Οι επιπτώσεις θα συνεχίσουν για πολλές δεκαετίες ακόμα. Ακολούθως παρουσιάζεται ένα σχήμα από δορυφόρο το οποίο αποτυπώνει το μέγεθος της πετρελαιοκηλίδας στο Google.



Σχήμα 1.2: Η πετρελαιοκηλίδα Deepwater Horizon στο Google (<u>http://www.oilspillsolutions.org/maiorspills.htm</u>)

Πίνακας 1.2: Σημαντικές διαρροές πετρελαίου και αντίστοιχες αιτίες του ατυχήματος (<u>http://www.toptenz.net/</u>, ITOPF, 2005, <u>https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_oil_spills</u>)

Ημερομηνία	Όνομα πλοίου	Περιοχή	Ποσότητα πετρελαιου (tn)	Αιτία	Ηλικία πλοίου
18/03/1967	Torrey Canyon	Ακτές Κορνουάλης, Ηνωμένο Βασίλειο	121.000	προσάραξη	1959
19/12/1972	Sea Star, Horta Barbosa	Κόλπος του Ομάν	73.000	σύγκρουση	
12/05/1976	Urquiola	La Coruna, Ισπανία	101.000	προσάραξη	1973
25/02/1977	Hawaiian Patriot	Β. Ειρηνικός Ωκεανός	63.000	φωτιά	

16/03/1978	Amico Cadiz	Ακτές Βρετάνης, Γαλλία	227.000	προσάραξη λόγω βλάβης	1974
08/01/1979	Betelgeuse	Ιρλανδία	40.000	έκρηξη	1968
19/07/1979	Atlantic Empress, Aegean Captain	Τομπάγκο, Καραϊβική	280.000	σύγκρουση	
24/03/1989	Exxon Valdez	Αλάσκα	38.500	πρόσκρουση	1986
19/12/1989	Khark 5	Κανάριοι νήσοι, Ισπανία	70.000	έκρηζη	
07/02/1990	American Trader	Bosa Chica, Καλιφόρνια	1.082	διαρροή	
26/01/1991	Πετρελαϊκές εγκαταστάσεις	Περσικός Κόλπος	700.000-900.000	βομβαρδισμός	Х
11/04/1991	Haven	Ακτές Γένοβας, Ιταλία	144.000	έκρηξη	1973
03/12/1992	Aegean Sea	La Coruna, Ισπανία	67.000	προσάραξη και φωτιά	1973
05/01/1993	Braer	Νήσοι Shetlands, Σκωτία	84.500	προσάραξη	1975
13/04/1994	Nassia	Στενά Βοσπόρου	95.000	σύγκρουση	
15/02/1996	Sea Empress	Ηνωμένο Βασίλειο	73.000	προσάραξη	1993

12/12/1999	Erika	Βισκαϊκός Κόλπος, Γαλλία	19.000-20.000	βλάβη	1975
16/01/2001	Jessica	Νήσος San Cristobal, Νήσοι Galapagos, Εκουαδόρ	300+600=900	προσάραξη	
13/11/2002	Prestige	Ακρωτήριο Finisterre, Ακτές Γαλικίας, Ισπανία	77.000	μηχανική βλάβη	1976
27/07/2003	Tasman Spirit	Πακιστάν	27.000		
13-15/07/2006	Παράκτιος σταθμός παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος	Λίβανος	15.000	βομβαρδισμός	x
11/08/2006	Solar 1	Νήσος Guimaras, Φιλιππίνες	800	μηχανική βλάβη	
07/12/2007	Hebei Spirit	Ν. Κορέα	10.000	σύγκρουση	1993
25/7/2008	-	Νέα Ορλεάνη, Λουιζιάνα	8.800	σύγκρουση	
11/3/2009	MV Pacific Adventurer	Queensland, Αυστραλία	195.000	κυκλώνας	
24/4/2010	Deepwater Horizon	Κόλπος Μεξικό	780.000	έκρηξη	Εξέδρα εξόρυξης
21/12/2011	-	Bonga Field, Νιγηρία	5.500		
25/9/2013	-	Βόρεια Dakota, ΗΠΑ		διαρροή σωλήνωσης	
6/12/2014	Σωλήνωση μεταφοράς πετρελαίου	Eilat, Ισραήλ	4.300	ρήγμα στη σωλήνωση	

1.5 - Ατυχήματα Στον Ελληνικό χώρο

Λόγω της γεωγραφικής του θέσης το Αιγαίο αποτελεί πέρασμα και συνδετικός κρίκος τριών ηπείρων. Ετησίως, διακινούνται πάνω από 100 εκατομμύρια τόνοι και μετά την κατασκευή του αγωγού Μπουργκάς- Αλεξανδρούπολη ο όγκος αυτός πολλαπλασιάστηκε.

Τα πιο πιθανά σημεία να συμβεί ατύχημα είναι κατά την εξόρυξη ή κατά την μεταφορά ή κατά την αποθήκευση, όπως προαναφέρθηκε. Στην Ελλάδα, οι λιμενικές αρχές καταγράφουν ένα τουλάχιστον περιστατικό ρύπανσης κάθε ημέρα! Η ρύπανση αυτή δεν προέρχεται μόνο από ατυχήματα. Σύμφωνα με μελέτη της Greenpeace, αυτά αποτελούν μικρό μόνο μέρος του προβλήματος. Το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι η καθημερινή (λειτουργική) ρύπανση, που προκύπτει από το ξέπλυμα των πετρελαιοφόρων, από απορρίψεις από διυλιστήρια και από καμμένα ορυκτέλαια με αποτέλεσμα η Μεσόγειος να επιβαρύνεται το χρόνο με 635.000 τόνους πετρελαιοειδών, διεκδικώντας έτσι τον τίτλο της πιο ρυπασμένης θάλασσας στον κόσμο, την στιγμή που μόνο οι ελληνικές θάλασσες επιβαρύνονται με 100.000 τόνους πετρελαιοειδών ετησίως. (Triantafillou, 2005)

- Το 1972 από το δεξαμενόπλοιο Trader κατέληξαν 36.500 τόνοι πετρελαίου στο Αιγαίο. Στις 2 Μαρτίου 1979 από το δεξαμενόπλοιο Messiniaki Frontis διέρρευσαν 12.000 τόνοι πετρελαίου στους Καλούς Λιμένες της Κρήτης.
- Το ατύχημα του Irenes Serenade στην Πύλο, στον όρμο του Ναυαρίνου, στις 23 Φεβρουαρίου 1980 συνέβη λόγω έκρηξης, με αποτέλεσμα 40.000 τόνοι πετρελαίου να καταλήξουν στη θάλασσα. Σημειώνεται ότι στην περιοχή δεν γίνεται φορτοεκφόρτωση πετρελαιοειδών, αλλά μόνο ανεφοδιασμός των πλοίων.
- Στις 1 Οκτωβρίου 1994, συνέβη ατύχημα στο πετρελαιοφόρο La Guardia κατά τη φορτοεκφόρτωση στις εγκαταστάσεις του Ασπρόπυργου και 400-800 τόνοι πετρελαίου κατέληξαν στον Κόλπο της Ελευσίνας. Η πετρελαιοκηλίδα που σχηματίστηκε επιβάρυνε την ήδη βεβαρημένη κατάσταση του Κόλπου, καθώς η ρύπανση του κλειστού αυτού κόλπου από πετρελαιοειδή και τοξικά βαρέα μέταλλα είναι συνεχής.
- Ατύχημα συνέβη και στις 8 Αυγούστου 1996 στο πετρελαιοφόρο Kriti Sea, στα διυλιστήρια της Motor Oil στους Άγιους Θεοδώρους, κατά τη φορτοεκφόρτωση. Υπήρξε διαρροή 300-500 τόνων πετρελαίου στη θάλασσα. Η πετρελαιοκηλίδα, εκτός από τους Άγιους Θεοδώρους, έφτασε μέχρι τις ακτές της Αίγινας και του Αγκιστριού.

- Στις 1 Σεπτεμβρίου 2000 το εμπορικό πλοίο Eurobulker κόπηκε στα δύο στο Λευκαντί της Έυβοιας και στη συνέχεια βυθίστηκε, προκαλώντας μία τεράστια για τα ελληνικά δεδομένα οικολογική καταστροφή, καθώς 700 τόνοι πετρελαίου χύθηκαν στον Νότιο Ευβοϊκό Κόλπο.
- Το πιο πρόσφατο περιστατικό θαλάσσιας ρύπανσης στον ελλαδικό χώρο, ήταν η βύθιση του κρουαζιερόπλοιου Sea Diamond στην Καλδέρα της Σαντορίνης, στις 5 Απριλίου 2007. Σύμφωνα με δελτίο τύπου της περιβαλλοντικής οργάνωσης WWF Ελλάς, ένα χρόνο μετά τη βύθιση του πλοίου, η ποσότητα πετρελαιοειδών που είχε περισυλλεχθεί άγγιζε τους 300 τόνους, ενώ σύμφωνα με υπολογισμούς, στο πλοίο εξακολουθούσε να υπάρχει πολύ μεγαλύτερη ποσότητα πετρελαιοειδών και λιπαντικών. Οι δεξαμενές του πλοίου έχουν διαρραγεί, με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος τα τοξικά υγρά ανά πάσα στιγμή να διαρρεύσουν στη θάλασσα. (Τριανταφύλλου, 2005)



Εικόνα 1.10: Το κρουαζιερόπλοιο Sea Diamond έχοντας πάρει κλίση, πριν τη βύθισή του στην Καλδέρα της Σαντορίνης

Σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία της Greenpeace, οι σημαντικότερες ατυχηματικές διαρροές πετρελαίου στην Ελλάδα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Ημερομηνία	Όνομα πλοίου	Περιοχή	Ποσοτητα πετρελαιου (τόνοι)
1972	Trader	Αιγαίο	36.500
02/03/1979	Messiniaki Frontis	Καλοί Λιμένες, Κρήτη	12.000
23/02/1980	Irenes Serenade	Πύλος	40.000
04/05/1987	RabighBay III	Ασπρόπυργος	500-1.000
21/10/1988	Jupiter / Adige	Πειραιάς	500-1.000
04/05/1992	Geori Chernomorya	Κεντρικό Αιγαίο	1.700
09/10/1993	liad	Πύλος	800
01/10/1994	La Guardia	Ασπρόπυργος	400-800
08/08/1996	Kriti Sea	Άγιοι Θεόδωροι Κορινθίας	300-500
01/09/2000	Eurobulker X	Λευκαντί Ευβοίας	300
05/04/2007	Sea Diamond	Καλντέρα Σαντορίνης	450

Πίνακας 1.3: Καταγραφή κυριότερων ατυχημάτων και των αντίστοιχων εκχυθέντων ποσοτήτων πετρελαίου (Τριανταφύλλου, 2005, <u>http://www.greenpeace.org/greece</u>)

1.6 - Φυσικοχημικές μεταβολές

Τα πετρελαιοειδή καθώς και τα κλάσματά τους, γενικά διαχωρίζονται σε εμμένοντα (persistent) και μη εμμένοντα (non persistent), ανάλογα με τις φυσικές και. χημικές διεργασίες που καταγράφονται με την εισαγωγή τους στο θαλάσσιο περιβάλλον. Εμμένοντα θεωρούνται εκείνα τα οποία λόγω της χημικής τους σύστασης, όταν διαρρέουν στην θάλασσα αποικοδομούνται με αργούς ρυθμούς και παράλληλα εξαπλώνονται, με αποτέλεσμα την ανάγκη λήψης άμεσων μέτρων για την καταπολέμηση της επακόλουθης ρύπανσης. Αντιθέτως, τα μη εμμένοντα με την είσοδο τους στο θαλάσσιο περιβάλλον, υπόκεινται, σε φυσικό διασκορπισμό ή εξατμίζονται γρήγορα και δεν είναι πάντα απαραίτητο να ληφθούν μέτρα για την καταπολέμηση τους. (Wang et al., 2003, Atlas, 2011)

Οι κυριότερες φυσικοχημικές μεταβολές που υφίσταται μια πετρελαιοκηλίδα σε μια θαλάσσια περιοχή είναι οι εξής: (Wang et al., 2003, Atlas, 2011)

Εξάπλωση (Spreading):

Το πλέον προφανές χαρακτηριστικό του πετρελαίου που διαρρέει στην επιφάνεια της θάλασσας είναι η τάση του να διασκορπίζεται οριζόντια, αυξάνοντας την επιφάνεια κατάκλισης, κάτω από τη δράση των συνδυασμένων δυνάμεων της βαρύτητας, του

ιξώδους και της επιφανειακής τάσης. Κατά κανόνα, επικρατεί αρχικά η βαρύτητα, επηρεαζόμενη και από το ιξώδες του πετρελαίου. Ύστερα από λίγες ώρες το πάχος του πετρελαίου θα μειωθεί κατά πολύ και η επιφανειακή τάση διαδέχεται τη βαρύτητα σαν κύρια δύναμη εξάπλωσης. Τυπικά, το πετρέλαιο που διαρρέει σε νερό θα σχηματίσει ένα λεπτό φιλμ, του οποίου το εσωτερικό τμήμα έχει μεγαλύτερο πάχος απ' ότι τα ακραία σημεία (όρια). Τα περισσότερα είδη αργού πετρελαίου εξαπλώνονται σε στρώμα πάχους περίπου 0,3 mm εντός 12 ωρών. Όταν δεν υπάρχουν άλλες επιδράσεις, η εξάπλωση συνεχίζεται μέχρις ότου το πετρέλαιο σχηματίσει στρώμα πάχους κάτω του μισού μικρού (1 μικρό = 10^{-3} χιλιοστά).

Εξάτμιση (Evaporation):

Η διεργασία αυτή λαμβάνει χώρα μέσα σε λίγες ώρες ύστερα από τη διαρροή και τα πλέον πτητικά κλάσματα μίας πετρελαιοκηλίδας χάνονται στην ατμόσφαιρα με ρυθμό που καθορίζεται από την ταχύτητα του ανέμου, τη θερμοκρασία και τον τύπο του πετρελαίου. Όταν η θάλασσα είναι ταραγμένη ο ρυθμός εξάτμισης αυξάνεται, γιατί διευκολύνεται η απώλεια πετρελαίου από τις κορυφές των κυμάτων, υπό μορφή σταγονιδίων. Μεγάλες ταχύτητες ανέμου και υψηλές θερμοκρασίες αυξάνουν επίσης τους ρυθμούς εξάτμισης. Το υπόλοιπο πετρέλαιο που παραμένει στη θάλασσα έχει μεγαλύτερη πυκνότητα και ιξώδες απ' ότι το αρχικό. Στις περισσότερες κηλίδες αργού πετρέλαιο που περιέχει λίγες πτητικές ενώσεις θα παρουσιάσει λίγη εξάτμιση ακόμη και μετά από αρκετές ημέρες. Τα ελαφρά προϊόντα διύλισης, όπως η βενζίνη, η κηροζίνη και το πετρέλαιο ντίζελ θα εξατμισθούν σχεδόν τελείως σε διάστημα ωρών, δημιουργώντας κίνδυνο πυρκαϊάς σε κλειστές περιοχές, όπως τα λιμάνια.

<u>Διασπορά (Dispersion):</u>

Καθώς αναπτύσσονται κύματα καθώς και διάφοροι στροβιλισμοί στην επιφάνεια της θάλασσας όπου βρίσκεται η κηλίδα, δημιουργούνται σταγονίδια πετρελαίου διαφόρων μεγεθών. Οι μεγάλες σταγόνες έπειτα από βύθισή τους, επιστρέφουν στην επιφάνεια. Τότε ενώνονται με άλλες σταγόνες και ξαναδημιουργούν κηλίδα πετρελαίου ή εξαπλώνονται σε μικρή κλίμακα, δημιουργώντας λεπτά υμένια στην επιφάνεια. Οι μικρές σταγόνες από την άλλη, αιωρούνται και αναμιγνύονται με το νερό και με αυτόν τον τρόπο ξεκινά η βιοδιάσπαση καθώς και η καθίζηση τους.

<u>Διάλυση (Dissolution):</u>

Οι απώλειες από την διάλυση του πετρελαίου στην θάλασσα είναι σχετικά μικρές, αφού οι περισσότεροι υδρογονάνθρακες από τους οποίους αποτελείται έχουν μικρή διαλυτότητα στο θαλασσινό νερό, ενώ εκείνα τα συστατικά του πετρελαίου που μπορούν να διαλυθούν, απομακρύνονται μέσω της εξάτμισης, η οποία κατά κανόνα

προηγείται της διάλυσης. Στην πραγματικότητα, όσο αλμυρότερη είναι η θάλασσα (όπως συμβαίνει στη Μεσόγειο), τόσο ασθενέστερη είναι η διάλυση του πετρελαίου.

<u>Βιοαποικοδόμηση (Biodegradation)</u>:

Η βιοαποικοδόμηση του πετρελαίου από βακτηρίδια που ζουν στη θάλασσα, συμβάλλει σημαντικά στη μετατροπή του πετρελαίου σε οξειδωμένα προϊόντα. Ο ρυθμός αποικοδόμησης εξαρτάται από τη θερμοκρασία, τις θρεπτικές ουσίες, την ύπαρξη οξυγόνου και τον τύπο του πετρελαίου. Επειδή τα βακτηρίδια ενεργούν στη διαχωριστική επιφάνεια πετρελαίου/νερού, ο ρυθμός αποικοδόμησης αυξάνεται όταν σχηματίζονται λεπτές μεμβράνες ή σταγονίδια διασκορπισμένου πετρελαίου σε μεγάλη επιφάνεια. Τα ελαφρότερα κλάσματα αποικοδομούνται γρηγορότερα απ' ότι τα κλάσματα μεγαλύτερου μοριακού βάρους. Οι πλέον ευνοϊκές θερμοκρασίες για μικροβιακή ανάπτυξη είναι πάνω από 25° C. Κάτω των 5° C οποιαδήποτε ανάπτυξη σταματά. Η διαλυτότητα του οξυγόνου στο θαλασσινό νερό είναι χαμηλή (6 έως 8 mg ανά λίτρο) σε σύγκριση με τις ποσότητες που απαιτούνται για πλήρη οξείδωση των υδρογονανθράκων οι οποίες είναι 3 έως 4 mg οξυγόνου ανά mg υδρογονάνθρακα για μετατροπή σε CO₂ και H₂O.

<u>Γαλακτωματοποίηση (Emulsification):</u>

Πετρέλαιο στο νερό: Αν η ροή στην επιφάνεια του νερού είναι τυρβώδης, το πετρέλαιο είναι δυνατόν να διασπασθεί σε σταγονίδια που αιωρούνται στο νερό. Τότε η κηλίδα, διασπασμένη, δεν επηρεάζεται από τον άνεμο και μπορεί να ξανασχηματιστεί σε κάποια απόσταση από την περιοχή που έγινε η αρχική διαρροή. Νερό στο πετρέλαιο (''chocolate mousse''): Αυτός ο τύπος γαλακτώματος μπορεί να σχηματισθεί εντός ολίγων ωρών και περιέχει μέχρι 90% νερό. Η πυκνότητα και το ειδικό βάρος του μείγματος αυξάνουν καθώς επίσης και οι όγκοι που θα πρέπει να καταπολεμηθούν και να ανακτηθούν. Ο σχηματισμός των γαλακτωμάτων μεγαλώνει μέχρι και στο δεκαπλάσιο τον όγκο του ρύπου, επιβραδύνει δε τις υπόλοιπες διαδικασίες της γήρανσης και τον μετασχηματίζει σε μορφή που μοιάζει να είναι περισσότερο στερεή παρά υγρή. Πρόκειται λοιπόν για την πλέον δυσάρεστη εξέλιξη ρύπανσης από πετρελαιοειδή στη θάλασσα και αυτήν που δυσχεραίνει περισσότερο το έργο των μηχανισμών αντιμετώπισης.

<u>Φώτο-οξείδωση (Oxidation):</u>

Η χημική αντίδραση των υδρογονανθράκων με το οξυγόνο καλείται οξείδωση. Η αντίδραση αυτή γίνεται επιφανειακά και λαμβάνει χώρα ταχύτερα, όταν το πετρέλαιο εξαπλωθεί σε λεπτή μεμβράνη. Η υπεριώδης ακτινοβολία από το φως του ηλίου επιταχύνει την οξείδωση και κάτω από ιδανικές συνθήκες (καιρικές συνθήκες ηλιοφάνειας, απουσία ρευμάτων) ποσοστό μέχρι 1% του πετρελαίου που διέρρευσε.

Λόγω της ταχείας μείωσης της διείσδυσης του φωτός σε στρώματα πετρελαίου μεγάλου πάχους, οι επιπτώσεις της φωτο-οξείδωσης παρουσιάζονται σε κηλίδες μικρού πάχους ή στο επιφανειακό στρώμα κηλίδων μεγάλου πάχους. Οι επιπτώσεις αυτού του φαινομένου μπορεί είτε να ευνοούν είτε να εμποδίζουν την περαιτέρω ανάπτυξη της ρύπανσης, αναλόγως: Τα πετρέλαια που οξειδώνονται με τη δράση του φωτός είναι γενικά περισσότερο διαλυτά και διασκορπίζονται καλύτερα στο θαλασσινό νερό, επομένως είναι βιοαποικοδομήσιμα. Σε βαρέα πετρέλαια ή σε εκείνα που έχουν χάσει τα ελαφρά συστατικά τους, η φωτο-οξείδωση ευνοεί τις αντιδράσεις πολυμερισμού που εμποδίζει το χειρισμό αυτών των πετρελαίων και την τελική αποικοδόμησή τους.

Ιζηματοποίηση και βύθιση (Sedimentation and sinking):

Η εξάτμιση και γαλακτωματοποίηση καθώς και η αύξηση της πυκνότητας που θα προκύψει μπορούν να συντελέσουν στη βύθιση της κηλίδας. Συχνά, η αιτία της βύθισης είναι η προσκόλληση ιζημάτων και άλλων οργανικών ουσιών ή και άμμου σε ρηχές θάλασσες με αμμώδη βυθό. Η βύθιση είναι επίσης δυνατή όταν παρατηρείται σημαντική πτώση της πυκνότητας των επιφανειακών νερών, όπως π.χ. παρατηρείται στις εκβολές ποταμών.

<u>Μετατόπιση (Drifting):</u>

Ο μηχανισμός της επιφανειακής κίνησης του πετρελαίου υπό την επίδραση του ανέμου δεν είναι πλήρως γνωστός, αλλά έχει βρεθεί εμπειρικά ότι το πετρέλαιο κινείται κατά την κατεύθυνση του ανέμου με ταχύτητα που είναι περίπου το 3% της ταχύτητας του ανέμου. Όταν υπάρχουν επιφανειακά ρεύματα, θα προστεθεί στην πιο πάνω ταχύτητα και η ταχύτητα του ρεύματος.

Όλες οι παραπάνω φυσικοχημικές διεργασίες του πετρελαίου, όταν αυτό διαρρέει στο θαλασσινό νερό, απεικονίζονται στο πρώτο σχήμα παρακάτω (1.3) ενώ η χρονική επίδραση των παραπάνω φυσικοχημικών διεργασιών στο πετρέλαιο όταν βρεθεί στο νερό, παρουσιάζεται στο αμέσως επόμενο (1.4), για την περίπτωση μεγάλων κηλίδων. Στην περίπτωση μικρών κηλίδων, όλες οι φυσικοχημικές διεργασίες είναι μικρής διάρκειας, της τάξεως λεπτών ή ωρών.



Σχήμα 1.3: Σχηματική απεικόνιση φυσικοχημικών διεργασιών πετρελαίου ύστερα από διαρροή σε θαλασσινό νερό (IMO/UNEP, 2008)



Σχήμα 1.4: Η χρονική επίδραση των φυσικοχημικών διεργασιών σε μια πετρελαιοκηλίδα (IMO/UNEP, 2008)

Ανεξάρτητα από όλες τις διεργασίες που γίνονται παράλληλα, η κηλίδα εξακολουθεί να κινείται στην επιφάνεια σε όλη τη διάρκεια της ζωής της. Η κίνηση αυτή μπορεί να προβλεφθεί με κάποια ασφάλεια, από τις επιδράσεις των ανέμων και των επιφανειακών ρευμάτων που υπάρχουν στην περιοχή. Η διεθνής εμπειρία έχει δείξει ότι το ποσοστό του πετρελαίου που μπορεί να ανακτηθεί σε μια πετρελαιοκηλίδα δυστυχώς σπάνια ξεπερνά το 10-12% της ποσότητας που χύθηκε. Το ποσοστό αυτό συχνά απαιτεί επίμονες, επίπονες και πολυέξοδες προσπάθειες.

1.7 - Επιπτώσεις ρύπανσης

Τα διάφορα περιστατικά πετρελαιοκηλίδων έχουν προκαλέσει μεγάλες επιπτώσεις, τόσο στο περιβάλλον όσο και στον ίδιο τον άνθρωπο. Φυσικά δεν έχουν όλες οι πετρελαιοκηλίδες τις ίδιες καταστροφικές συνέπειες. Το μέγεθος της καταστροφής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, μερικοί από τους σημαντικότερους είναι οι εξής: (Hong et al., 2014, U.S. Department Of Commerce, 1983)

- Το σημείο εκδήλωσης και ο τύπος της ακτής. Υπάρχουν ορισμένα σημεία και περιοχές που παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία κατά την έκθεσή τους σε πετρελαιοειδή. Η ευαισθησία αυτή εξαρτάται τόσο από τον τύπο της ακτής όσον αφορά τη διεισδυτική ικανότητα του πετρελαίου στο υπόστρωμά της, όσο και από την ύπαρξη ευαίσθητων πληθυσμών χλωρίδας και πανίδας στην περιοχή. Στον πίνακα της επόμενης σελίδας φαίνεται η κατηγοριοποίηση των ακτών με βάση την ευαισθησία του ως προς το πετρέλαιο.
- ✓ Η ποσότητα του διαρρέοντος πετρελαίου και ο τρόπος σχηματισμού πετρελαιοκηλίδας. Το πρώτο είναι προφανές. Όσον αφορά το δεύτερο, η ξαφνική εμφάνιση μιας μικρής πετρελαιοκηλίδας θα προκαλέσει (πιθανώς) μικρότερο οικολογικό πρόβλημα (ακόμα και σε μια σχετικά ευαίσθητη περιοχή), σε σχέση με μια πετρελαιοκηλίδα που προκαλείται από χρόνια ρύπανση. Το γεγονός αυτό οφείλεται στους φυσικούς μηχανισμούς του περιβάλλοντος για σταδιακή φυσική αποκατάσταση.
- Ο τύπος του πετρελαίου. Γενικά τα ελαφρά κλάσματα του πετρελαίου είναι λιγότερο τοξικά σε σχέση με τα βαρύτερα. Επίσης υπάρχουν πετρέλαια τα οποία δεν απομακρύνονται εύκολα και παρόλο ότι έχουν σχετικά μικρή τοξικότητα είναι ιδιαιτέρως επικίνδυνα.

 Οι επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Έντονες καιρικές συνθήκες όπως ισχυροί άνεμοι, μεγάλα κύματα, εκτεταμένη ηλιοφάνεια κ.α. επηρεάζουν τις φυσικές διεργασίες γήρανσης του πετρελαίου και συνεπώς τις διαδικασίες βιοεξυγίανσης του.

Environmental Sensitivity Index (ESI)	Είδος Ακτής
1	Exposed rocky shores
	Sea walls and piers
2	Exposed wave-cut platforms
3	Fine-grained sand beaches
4	Coarse-grained sand beaches
5	Mixed sand and gravel beaches
6	Gravel beaches and riprap
7	Exposed tidal flats
8	Sheltered rocky shores
9	Sheltered tidal flats
10	Salt marshes and Mangroves

Πίνακας 1.4: Κατηγοριοποίηση ακτών με βάση τον βαθμό ευαισθησίας τους στο πετρέλαιο σε σειρά αύξουσας ευαισθησίας (Τριανταφύλλου, 2005)

Σημείωση: το 1 αντιστοιχεί στην πιο ανθεκτική, ενώ το 10 στην πιο ευαίσθητη κατηγορία ακτής

Ανεξάρτητα όμως από το μέγεθος της καταστροφής, η εμφάνιση πετρελαιοκηλίδων επιφέρει πολύπλευρες επιπτώσεις στην περιοχή στην οποία εμφανίζονται. Οι συνέπειες που έχει η έκχυση του πετρελαίου στο θαλάσσιο χώρο έχει άμεση σχέση από την ποσότητά και την τοξικότητά του με πιθανές επιπτώσεις τις ακόλουθες: (Spies, 1996)

- Επιβράδυνση της ικανότητας της φωτοσύνθεσης των θαλάσσιων φυτών, λόγω της μείωσης της διείσδυσης του φωτός και του οξυγόνου από το λεπτόστρώμα "φιλμ" που σχηματίζει το πετρέλαιο καθώς απλώνεται στην επιφάνεια του νερού.
- Ασφυξία και θάνατος των θαλάσσιων πουλιών. Η κάλυψη των πουλιών με πετρέλαιο κάνει αδύνατη την ικανότητα να πετάξουν ή να πλεύσουν και επίσης μειώνει τη θερμική μόνωση του σώματος τους από το ψυχρό νερό. Τα θαλάσσια

θηλαστικά παρόλα αυτά είναι σε μικρότερο βαθμό ευάλωτα σε αυτήν την μορφή ρύπανσης.

- Άμεση τοξική δράση στην κοινωνία των φυκιών και των υποθαλάσσιων φυτών, η οποία έχει σημαντικές επιπτώσεις στους φυτοφάγους οργανισμούς, μεταβάλλοντας έτσι την δομή των βιοκοινωνιών.
- Οι τοξικές ουσίες επηρεάζουν τους ζωικούς οργανισμούς της τροφικής αλυσίδας και κατά συνέπεια και τον άνθρωπο ως μέρος αυτής.
- Καταστροφή της αγοράς των αλιευμάτων. Οι μικρές συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων επηρεάζουν την γεύση των ψαριών και των άλλων αλιευμάτων, με άμεση συνέπεια την απαγόρευση της διάθεσής τους στην αγορά.
- Η ύπαρξη πίσσας στις ακτές συμβάλει στην υποβάθμιση της ευρύτερης περιοχής από άποψη οικονομική και τουριστική.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, μένει να ειπωθεί ότι η επαφή του πετρελαίου με το θαλασσινό νερό οδηγεί στην αλλοίωση των τοπικών φυσικών και βιολογικών συνθηκών, στην διατάραξη της τροφικής αλυσίδας και σε ενδεχόμενη καταστροφή του οικοσυστήματος.



Εικόνα 1.11: Συνέπειες πετρελαιοκηλίδων (<u>www.iea.org</u>)
Κεφάλαιο 2

Μέθοδοι αντιμετώπισης κηλίδων πετρελαίου

2.1 - Εισαγωγή

Καταστροφές από πετρελαϊκή ρύπανση μπορεί να συμβούν ξανά στο μέλλον προξενώντας σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον, στις τοπικές οικονομίες και την αλιεία. Η αύξηση της δραστηριότητας των δεξαμενόπλοιων – εν μέρει λόγω της αύξησης των εξαγωγών πετρελαίου – συμβάλλει στα μελλοντικά επίπεδα κινδύνου. Από οικονομικής πλευράς ωστόσο, δεν πρέπει να λησμονούμε ότι οι εργασίες καθαρισμού είναι δαπανηρές. Μόνο για την αντιμετώπιση των συνεπειών από τις καταστροφές των *Erika* και *Prestige* δαπανήθηκαν πολύ περισσότερα από 1 δισ. ευρώ.

Οι σοβαρές οικονομικές και οικολογικές επιπτώσεις μιας μεγάλης πετρελαιοκηλίδας μπορούν να περιοριστούν σε σημαντικό βαθμό εάν το πετρέλαιο περισυλλεχθεί από τη θάλασσα προτού εκβραστεί στις ακτές. Ωστόσο, από την καταστροφή του *Prestige* το 2002 κατέστη σαφές ότι η Ευρώπη δεν διαθέτει αρκετά πλοία απορρύπανσης που να έχουν τη δυνατότητα να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά, μεγάλες πετρελαιοκηλίδες. (IPIECA, 2008)

2.1.1 - Ο οργανισμός ΕΜSA

Με βάση τα δεδομένα αυτά, ανατέθηκε στον EMSA (European Maritime Safety Agency) να συστήσει ένα δίκτυο πλοίων, εξοπλισμού και άλλων πόρων ώστε να βοηθήσει τα κράτη μέλη στην αντιμετώπιση της ρύπανσης που προκαλείται από πλοία. Βάσει συντεταγμένου σχεδίου δράσης για την ετοιμότητα σε περίπτωση πετρελαϊκής ρύπανσης και για την αντιμετώπισή της, ο Οργανισμός συνάπτει συμβάσεις με εμπορικά πλοία τα οποία μπορούν σε σύντομο χρονικό διάστημα — κατά κανόνα εντός 24 ωρών — να μετατραπούν σε πλοία περισυλλογής πετρελαίου με

υπερσύγχρονο εξοπλισμό. Τα πλοία αυτά υπό φυσιολογικές συνθήκες χρησιμοποιούνται για άλλους σκοπούς, ωστόσο έχουν την ικανότητα φόρτωσης εξοπλισμού ως προς την ταχεία αντιμετώπιση πετρελαιοκηλίδων όταν παρίσταται ανάγκη. (http://www.emsa.europa.eu/)

Τα σκάφη με τα οποία έχει συνάψει σύμβαση ο EMSA είναι μεγάλα και λειτουργούν υποστηρικτικά στις ικανότητες απορρύπανσης των κρατών μελών και τα οποία τυπικά διαθέτουν χωρητικότητα δεξαμενής περίπου στα 500 m³, όταν παρουσιάζεται ένα σημαντικό περιστατικό.

Από το 2006 ο Οργανισμός έχει αναθέσει αυτή την υπηρεσία κατόπιν διαγωνισμού και από το 2009 ένας άρτιος στόλος εφεδρικών σκαφών αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων (Oil Spill Recovery Vessels OSRV) είναι διαθέσιμος σε όλες τις μεγάλες θαλάσσιες περιοχές της Ευρώπης, από τη Βαλτική μέχρι τον Εύξεινο Πόντο και περιλαμβάνει πλοία διαθέσιμα στα περισσότερα μέρη της Μεσογείου, του Ατλαντικού και της Βόρειας Θάλασσας. Ο Οργανισμός θα διατηρήσει αυτή την υπηρεσία ενώ θα βελτιστοποιήσει τη διάταξη και τη θέση των σκαφών όπως αυτό κριθεί σκόπιμο κατά τα επόμενα έτη. (http://www.emsa.europa.eu/)



Σχήμα 2.1: (άνω μέρος) Θέση αποθεμάτων και σκαφών – (κάτω μέρος) Εφεδρικά σκάφη αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων του EMSA (<u>http://www.emsa.europa.eu/</u>)

2.1.2 - Χάρτες παρακολούθησης πετρελαϊκής ρύπανσης των θαλασσών

Πέρα από την ατυχηματική ρύπανση των θαλασσών από διαρροή πετρελαίου, υπάρχει και η ρύπανση λόγω των διεργασιών κανονικής λειτουργίας του εκάστοτε πλοίου. Για παράδειγμα, απελευθέρωση του περιεχόμενου νερού – πετρελαίου στη σεντίνα του πλοίου, το νερό του έρματος που μπορεί να περιέχει πετρέλαιο, καθώς και πετρελαϊκή ιλύ. Προς την κατεύθυνση αυτή μπορούν να κατασκευαστούν χάρτες επικινδυνότητας, οι οποίοι θα δείχνουν την εξάπλωση του πετρελαίου ώστε να βοηθούν στη γενική διαχείριση και στη διατήρηση ενός υγιούς θαλάσσιου περιβάλλοντος. (Liubartseva S. et al., 2015)

Η παραπάνω μέθοδος χαρτογράφησης αναπτύχθηκε από τους Liubartseva S. et al. (2015) το 2015 με τη μελέτη τους να εστιάζεται στις λειτουργικές απορρίψεις της νότιας Αδριατικής θάλασσας και του βόρειου Ιόνιου πελάγους. Οι ίδιοι ερευνητές υποστήριξαν ότι η μέθοδός τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί παντού και σε όλες τις θάλασσες, ενώ τη χρησιμοποίησαν για την κατασκευή χαρτών πετρελαϊκής ρύπανσης στην επιφάνεια της θάλασσας και στις ακτογραμμές για την περίοδο 2009-2012, για κάθε εποχή και μήνα κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου.

Για την κατασκευή αυτών των χαρτών, συνέλεξαν δεδομένα για τα πλοία από τις Ιταλικές Λιμενικές Αρχές. Έτσι είχαν τον αριθμό των πλοίων σε κάθε γεωγραφική περιοχή ανά μήνα. Στη συνέχεια, συνδύασαν τα δεδομένα κυκλοφορίας με εκτιμήσεις σχετικά με τις απορρίψεις των πλοίων, και προσομοίωσαν την εξάπλωση του πετρελαίου στην εκάστοτε περιοχή, χρησιμοποιώντας το MEDSLIK – ΙΙ. Το συγκεκριμένο μοντέλο προβλέπει την κίνηση των σωματιδίων του πετρελαίου με βάση τα ρεύματα της θάλασσας, τον άνεμο, τα κύματα και την θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας. Επίσης, οι ερευνητές συνέλεξαν δεδομένα σχετικά με αυτούς τους παράγοντες από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Πρόγνωσης Καιρού και το Σύστημα Πρόγνωσης Καιρού της Μεσογείου.

Οι χάρτες δείχνουν τα κύρια και πιο πιθανά σημεία που μπορεί να εμφανιστεί σημαντική πετρελαϊκή ρύπανση, τα οποία έχουν και υψηλά επίπεδα κυκλοφορίας και ασθενή κύματα, όπως είναι η ημίκλειστη περιοχή μεταξύ της Κέρκυρας και της ακτογραμμής της Ελλάδας. Αντιθέτως, η περιοχή του λιμανιού του Μπάρι (Ιταλία) δεν εμφάνισε υψηλές συγκεντρώσεις πετρελαίου, παρά τα υψηλά επίπεδα κυκλοφορίας πλοίων, λόγω των ισχυρών ρευμάτων τα οποία μετατοπίζουν το πετρέλαιο. Κατά την περίοδο 2009-2012, οι περιοχές που εμφάνισαν συνεχή και σοβαρή ρύπανση ήταν υπεράκτιες, στην περιοχή της νοτιοδυτικής Αδριατικής και στη διαδρομή του Δυτικού ρεύματος Αδριατικής θάλασσας. Επίσης, μέτρια αλλά συνεχή επίπεδα πετρελαίου εμφανίστηκαν στην ευρύτερη περιοχή της υπό μελέτη ακτογραμμής.

Οι χάρτες που κατασκευάστηκαν καταδεικνύουν ότι οι επιφανειακές συγκεντρώσεις κυμαίνονταν κατά τη διάρκεια μιας περιόδου, με τα χαμηλότερα της επίπεδα να εμφανίζονται το χειμώνα και τα υψηλότερα το καλοκαίρι. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το χειμώνα κυριαρχούν ισχυροί άνεμοι, οι οποίοι δημιουργούν κύματα τα οποία διασπείρουν το πετρέλαιο στην υδάτινη στήλη. Επίσης, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι λειτουργικές απορρίψεις πετρελαίου από τα πλοία, μπορούν να επηρεάσουν προστατευόμενες θαλάσσιες περιοχές και οικοσυστήματα, όπως το Torre Guaceto στην Ιταλία και το Δέλτα του Καλαμά στην Ελλάδα.

Οι Liubartseva S. et al. (2015) θεωρούν ότι η ανάπτυξη αυτών των χαρτών μπορεί να βοηθήσει στην πρόβλεψη μελλοντικής πετρελαϊκής ρύπανσης, με την υπόθεση ότι τα επίπεδα κυκλοφορίας και απορρίψεων δε θα μεταβληθούν σημαντικά. Επίσης για ακόμη καλύτερη αξιοπιστία μπορούν να συνδυαστούν με εναέριες και δορυφορικές εικόνες που έχουν δημιουργηθεί από άλλες μελέτες.

2.2 - Βασικές αρχές δράσεων αντιμετώπισης θαλάσσιας ρύπανσης από πετρέλαιο

Λόγω των δυσμενών επιπτώσεων στα οικοσυστήματα και την οικονομία από τη διασπορά πετρελαιοειδών ουσιών στα παράκτια ύδατα είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός τόσο για την πρόληψη όσο και για τον καθαρισμό των πετρελαιοκηλίδων. Λαμβάνοντας υπ'όψιν την ποσότητα του εκχυθέντος πετρελαίου, τον τύπο του, τα χαρακτηριστικά της περιοχής διασποράς, τις καιρικές και υδρογραφικές συνθήκες καθώς και τα διατιθέμενα μέσα και την ισχύουσα νομοθεσία, η χρήση Συστημάτων Λήψεως Αποφάσεων αποτελεί ισχυρό εργαλείο για τη διαχείριση του περιστατικού. Η ταχύτητα, η αποτελεσματικότητα και η ποιότητα του Συστήματος Λήψης Αποφάσεων είναι καθοριστικής σημασίας για την επιτυχία της όλης προσπάθειας σε περίπτωση επεισοδίου πετρελαϊκής ρύπανσης. (Dave et al., 2011)

Κοινωνικοί, οικονομικοί, πολιτικοί παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό του Συστήματος. Οι προτεραιότητες που θα δοθούν εξαρτώνται από τα επιθυμητά αποτελέσματα σε ότι αφορά τις χρήσεις της ακτής και παράκτιας περιοχής (αναψυχή, οικονομικές δραστηριότητες). Το Σύστημα Λήψης Αποφάσεων πρέπει να προϋπάρχει του ατυχήματος και να διαθέτει καθορισμένη δομή και καταμερισμό των βασικών αρμοδιοτήτων ΄ αναλόγως του περιστατικού να προσαρμόζεται και εξειδικεύεται.

Μολονότι οι αναγκαίες αποφάσεις λαμβάνονται από τις αρμόδιες Αρχές, η λήψη αποφάσεων επιταχύνεται και καθίσταται πιο αποτελεσματική όταν ορισμένα υποστηρικτικά εργαλεία (όπως χάρτες ευάλωτων περιοχών, χρήση ηλεκτρονικών μοντέλων πρόβλεψης διασποράς ρύπων, βάσεις δεδομένων) έχουν προετοιμαστεί και βρίσκονται στη διάθεση του αρμόδιου προσωπικού. Υψηλής σημασίας είναι επίσης η εκ των προτέρων εκπαίδευση προσωπικού που κατέχει κομβικής σημασίας διοικητικές θέσεις σε τεχνικές και πρακτικές διαχείρισης περιστατικών πετρελαϊκής ρύπανσης. (Kafkoulas, 2001)

Επίσης, επιβάλλεται η εκπόνηση επιχειρησιακών σχεδίων δράσης, προκειμένου να τίθενται σε εφαρμογή εντός 24ώρου από την εκδήλωση του περιστατικού. Η εκπόνηση τέτοιων σχεδίων προϋποθέτει ότι είναι γνωστή η ποσότητα που εκχύνεται στο περιβάλλον, είναι δυνατή η εκτίμηση της εξάπλωσης της πετρελαιοκηλίδας και υφίστανται μέσα καταπολέμησής της τόσο μηχανικά όσο και χημικά, σε τοπικό αλλά και εθνικό επίπεδο. Επίσης η δυνατότητα κινητοποίησης ιδιωτικών μέσων και ανθρώπινου δυναμικού. Τα σχέδια τώρα, διαιρούνται ανάλογα με: (http://gesamp.net/)

(α) την ποσότητα του πετρελαίου που διέφυγε στο περιβάλλον

(β) αν πρόκειται για περιστατικό που αφορά την παράκτια ζώνη ή για περιστατικό offshore

(γ) τις καιρικές συνθήκες

(δ) την απόσταση πρόσβασης από τα υπάρχοντα μέσα και

(ε) παράλληλα συμβάντα όπως εκρήξεις, πυρκαγιές, καταστάσεις διάσωσης ανθρώπων, σκαφών.

Ο κρίσιμος παράγοντας για τις άμεσες ενέργειες είναι η δυνατότητα πρόβλεψης της διασποράς της πετρελαιοκηλίδας, ενώ η περαιτέρω αντιμετώπισή της, που σημειωτέον έχει οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις, θα διευκολυνθεί με την εφαρμογή Συστημάτων Λήψης Αποφάσεων.

Αποτελεσματικό εργαλείο σε αυτά μπορεί να είναι η εφαρμογή μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης δεδομένου ότι:

i. είναι απλές στην εφαρμογή

ii. δέχονται ποσοτικά και ημιποσοτικά δεδομένα και

iii. ενσωματώνουν περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές παραμέτρους.

Λόγω των πολύπλοκων μηχανισμών διασποράς της πετρελαιοκηλίδας όπως είναι η εξάτμιση, η διάλυση, η γαλακτωματοποίηση, η προσρόφηση σε αιωρούμενα σωματίδια στη θάλασσα και η καθίζηση σε ίζημα, επιβάλλεται χρήση συνδυασμένων φυσικών και χημικών μεθόδων για τον περιορισμό της διασποράς (Tramier, 1987). Οι μέθοδοι είναι μηχανικές, φυσικές και χημικές. Η απόφαση για την επιλογή της

κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από σειρά παραγόντων που θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπ΄ όψιν κατά τον σχεδιασμό δράσης. Ακολούθως γίνεται η παρουσίαση και η ανάλυση των κυριότερων μεθόδων αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων ανάλογα με την κατηγορία στην οποία υπάγονται, αναλύοντας τη λειτουργία τους και παρουσιάζοντας χαρακτηριστικές εικόνες από την εφαρμογή τους.

2.3 - Μηχανικές μέθοδοι

2.3.1 - Μηχανικός Καθαρισμός

Ο μηχανικός καθαρισμός απαντά στη συλλογή και την απομάκρυνση των ρυπασμένων επιφανειών με πετρέλαιο και των ιζημάτων χρησιμοποιώντας μηχανικό εξοπλισμό, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στην Εικόνα 2.1, παρακάτω. Αυτή η μέθοδος πρέπει να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν είναι απαραίτητο να αφαιρεθούν μικρά ποσά υλικών με πετρέλαιο. Δεν πρέπει να ληφθεί υπόψη στον καθαρισμό των ευαίσθητων βιότοπων ή όπου η διάβρωση είναι ζήτημα. (Office of Technology Assessment, 1990)



Εικόνα 2.1: Χειρονακτική συλλογή πετρελαίου με μηχανικά μέσα (ITOPF, 2005)

Πρόκειται για την πλέον γνωστή αλλά και πολύπλοκη μέθοδο. Πρακτικά είναι ο μηχανικός διαχωρισμός του μίγματος ύδωρ-πετρέλαιο από την επιφάνεια με απομάκρυνση του ύδατος και επαναχρησιμοποίηση του πετρελαίου. Περιλαμβάνει τις περισσότερες δυνατότητες επέμβασης σ' ένα παρόμοιο περιστατικό, δίνοντας - υπό

προϋποθέσεις - τις καλύτερες λύσεις. Η διαδικασία επέμβασης συνίσταται στον περιορισμό της πετρελαιοκηλίδας με κατάλληλα πλωτά φράγματα και στην επεξεργασία του επιφανειακού θαλάσσιου νερού, με σκοπό το διαχωρισμό του πετρελαίου από αυτό. Συχνά, τα χρησιμοποιούμενα φράγματα έχουν την ικανότητα απορρόφησης σημαντικών ποσοτήτων πετρελαίου, συντελώντας στον περαιτέρω καθαρισμό της περιοχής.

Αν και η εν λόγω μέθοδος θεωρείται η καθαρότερη και πλέον περιβαλλοντικά φιλική, απαιτεί σημαντικό κόστος εξοπλισμού, σοβαρή και έμπειρη διαχείριση, καθώς και χώρο αποθήκευσης και πρόσθετης επεξεργασίας του αντλούμενου πετρελαίου. Επιπλέον η μέθοδος αυτή επηρεάζεται σημαντικά από τις καιρικές συνθήκες παρουσιάζοντας περιορισμένη αποδοτικότητα για ανέμους εντάσεως μεγαλύτερης των 4 °B καθώς και για περιπτώσεις λεπτών πετρελαιοκηλίδων. Βέβαια, η εφαρμογή της μεθόδου μπορεί να γίνει ακόμα και αν το πετρέλαιο έχει υποστεί μερική γήρανση, όμως ένα σοβαρό μειονέκτημα είναι ο σημαντικός χρόνος που μεσολαβεί για την οργάνωση και την προσέγγιση της ομάδος δράσης στο σημείο του ατυχήματος. (White, 2010)

2.3.2 - Πλωτά φράγματα

Όταν το πετρέλαιο διαρρεύσει στην επιφάνεια της θάλασσας δεν θα παραμείνει στάσιμο στην περιοχή που διέρρευσε. Η βαρύτητα θα προκαλέσει το διασκορπισμό με την ταυτόχρονη δράση ρεύματα κι ανέμων να προκαλούν τη μετατόπισή του. Και οι δύο αυτές δυνάμεις δημιουργούν προβλήματα σε κάθε προσπάθεια που καταβάλλεται για την απομάκρυνση του πετρελαίου από την επιφάνεια της θάλασσας, ο οποίος είναι και ο τελικός σκοπός όλων των προσπαθειών αντιμετώπισης ενός περιστατικού διαρροής πετρελαίου στη θάλασσα.

Τα φράγματα είναι συσκευές που έχουν κατασκευαστεί για τον έλεγχο της κίνησης του πετρελαίου στην επιφάνεια της θάλασσας. Αποτελούνται από τέσσερα βασικά μέρη: το μέρος που επιπλέει (πλωτήρας), το μέρος που συγκρατεί το πετρέλαιο (ποδιά), το έρμα και τέλος, τους διαμήκης εντατήρες που προσφέρουν επαρκή εφελκυστική τάση στο σύστημα και φέρουν το μέγιστο του φορτίου από τα φαινόμενα της φύσης. (White, 2010)

Τα φράγματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εγκλωβισμό, τη συγκέντρωση και την κατεύθυνση των κηλίδων πετρελαίου. Υπάρχουν δύο τύποι φραγμάτων, τύπου φράκτη και κουρτίνας, ενώ ανάλογα με τη συμπεριφορά του υλικού κατασκευής τους τα χωρίζουμε σε εύκαμπτα, σε ημι-εύκαμπτα και σε δύσκαμπτα φράγματα.



Σχήμα 2.2: Φράγμα τύπου κουρτίνας (Dave et al. .2011)



Σχήμα 2.3: Τομή φράγματος και επισκόπηση των κύριων μερών του

<u>Ανάλυση κύριων δομικών μερών πλωτών φραγμάτων (booms):</u> (Kafkoulas, 2001)

- Το μέρος που επιπλέει (πλωτήρας), εξασφαλίζει την πλευστότητα του όλου συστήματος (φράγματος), αλλά συχνά λειτουργεί σαν πρόσθετο μέσο για να μειωθεί η διαρροή πάνω από το φράγμα. Οποιοδήποτε στερεό υλικό (διογκούμενος πλαστικός αφρός π.χ. πολυαιθυλένιο, πολυουρεθάνη, πολυστυρένιο ή φυσικά πλωτά υλικά π.χ. φελλός, ξύλο) ή αέριο (αέρας, διοξείδιο του άνθρακα) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν υλικό του πλωτήρα.
- 2. Η ποδιά ενεργεί σαν φράγμα για να εμποδίσει την εξάπλωση του πετρελαίου κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το ύψος της επηρεάζει την απόδοση του φράγματος και σε μεγάλο βαθμό το συνολικό φορτίο που ασκείται σε όλο το σύστημα.
- 3. Το έρμα, το οποίο προσαρμόζεται στο κάτω μέρος της ποδιάς και τείνει να κρατά το φράγμα κάθετο προς την επιφάνεια της Θάλασσας. Στις περισσότερες περιπτώσεις το έρμα είναι αλυσίδα (από ειδικό ή γαλβανισμένο χάλυβα ή και μόλυβδο) ή από ειδικά κατασκευασμένα μεταλλικά βάρη (μόλυβδος, γαλβανισμένος χάλυβας).
- 4. Οι διαμήκεις εντατήρες, παρέχουν επαρκή εφελκυστική αντοχή στο σύστημα και φέρουν το μέγιστο του φορτίου που δημιουργείται από ανέμους, κύματα και ρεύματα. Μπορεί να είναι ενσωματωμένοι στο φράγμα (σχοινί από νάιλον, υφαντή ταινία, συρματόσχοινο) ή να προσαρμόζονται στο φράγμα σαν ξεχωριστό μέλος (συρματόσχοινο από ανοξείδωτο χάλυβα, σχοινί).
- 5. Στα περισσότερα φράγματα υπάρχουν επίσης:
 - Σύνδεσμοι
 - Σημεία αγκυροβολίας

Ο τρόπος κατά τον οποίο θα χρησιμοποιηθεί ένα φράγμα και (σε ορισμένες περιπτώσεις) ο τύπος φράγματος που θα επιλεγεί εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες όπως: Η θέση και μέγεθος της πετρελαιοκηλίδας, η κίνησή της, οι μετεωρολογικές συνθήκες καθώς και υδρολογικές συνθήκες, η μορφολογία ξηράς και το σχήμα υδάτινης μάζας.

Τα φράγματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για: (Dave et al. .2011)

<u>Εγκλωβισμό</u>: τα φράγματα αναπτύσσονται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να εμποδίζεται η εξάπλωση του πετρελαίου στην επιφάνεια της θάλασσας προκειμένου να περιορισθούν οι επιπτώσεις από τη διαρροή του πετρελαίου κοντά στη πηγή, με ένα

χαρακτηριστικό παράδειγμα να φαίνεται στην Εικόνα 2.2. Είναι απολύτως αναγκαίο να απομακρυνθεί το εγκλωβισμένο πετρέλαιο με επιτυχία. γιατί το φράγμα είναι σε θέση να εμποδίσει την κίνηση και διαφυγή του πετρελαίου από την περιοχή στην οποία εγκλωβίστηκε, μόνο για ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα.



Εικόνα 2.2: Τοποθέτηση πλωτού φράγματος γύρω από δεξαμενόπλοιο για τον εγκλωβισμό του πετρελαίου (ITOPF, 2005)

<u>Εκτροπή</u>: η μέθοδος αυτή, που καλείται επίσης και «απόκλιση» εφαρμόζεται όταν πρέπει να γίνει εκτροπή της εξάπλωσης του πετρελαίου από μια ευαίσθητη περιοχή (κόλπος, εσοχή, είσοδος λιμανιού, μαρίνα θαλαμηγών, παραλία κλπ.) προς μια λιγότερο ευαίσθητη και πλέον κατάλληλη περιοχή (ρεύματα, μορφολογία ξηράς) για περισυλλογή (απομάκρυνση, ανάκτηση) του πετρελαίου. Για να είναι η μέθοδος αυτή πλέον αποδοτική, το φράγμα πρέπει να τίθεται υπό γωνία προς την διεύθυνση του πετρελαίου.

<u>Προστασία</u>: Όταν μια ιδιαίτερη ευαίσθητη περιοχή (περιβαλλοντικά, οικονομικά, τεχνολογικά) πρέπει να προστατευθεί από το πετρέλαιο, τότε εφαρμόζεται προστατευτική περίφραξη. Και στην περίπτωση αυτή, είναι αναγκαίο να συνδυαστεί η περίφραξη με την ανάκτηση του πετρελαίου προκειμένου να προστατευτεί αποτελεσματικά η περιοχή.



Εικόνα 2.3: Τοποθέτηση φράγματος για την προστασία παράκτιας περιοχής από πετρελαιοκηλίδα (ITOPF, 2005)

<u>Περισυλλογή</u>: η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τη συγκέντρωση του πετρελαίου που επιπλέει στην επιφάνεια της θάλασσας, τη διευκόλυνση της απομάκρυνσής του και την ελαχιστοποίηση της εξάπλωσής του. Για να γίνει η περισυλλογή με φράγματα, πρέπει να χρησιμοποιηθούν ένα, δύο ή τρία σκάφη και το φράγμα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.4. Η επιλογή των κατάλληλων σκαφών είναι βασικής σημασίας, αφού πολύ λίγοι τύποι σκαφών είναι σε θέση να πλεύσουν ικανοποιητικά με τις πολύ μικρές ταχύτητες που απαιτούνται κατά τη διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου αυτής.



Εικόνα 2.4: Διαδικασία περισυλλογής εκχυθέντος πετρελαίου στη θάλασσα με τη βοήθεια πλωτού φράγματος (ITOPF, 2013)

2.3.3 - Απορροφητικά υλικά

Έτσι ονομάζουμε τα υλικά εκείνα που χρησιμοποιούν τις απορροφητικές ή προσκολλητικές τους ιδιότητες προκειμένου να περισυλλέξουν ρευστά. Τα απορροφητικά υλικά είναι ειδικά σχεδιασμένα για να περισυλλέγουν πετρέλαιο από την επιφάνεια του νερού.

Οι ουσίες αυτές απορροφούν ή προσροφούν πετρέλαιο και εξ αιτίας της χαμηλής πυκνότητάς τους εξακολουθούν να επιπλέουν, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.5. Αυτό επιτρέπει στη συνέχεια τη μηχανική συλλογή τους. Σαν απορροφητές μπορεί να χρησιμοποιηθούν φυσικά προϊόντα όπως άχυρο, πριονίδι, ή συνθετικά προϊόντα όπως πολυπροπυλένιο, αφρός πολυουρεθάνης. Γενικότερα, γίνεται χρήση υδροφοβικών υλικών για την απομάκρυνση του πετρελαίου επάνω από τη μολυσμένη επιφάνεια. Αν και η διάθεση των ρυπασμένων απορριμμάτων είναι ζήτημα, η περιβαλλοντική επίπτωση αυτής της μεθόδου είναι επίσης περιορισμένη εάν η κυκλοφορία των πληρωμάτων καθαρισμού και η παραγωγή αποβλήτων ελέγχεται. (Triantafillou, 2005)

Ανάλογα με την πρώτη ύλη κατασκευής τους, τα απορροφητικά υλικά μπορούν να διακριθούν στις εξής βασικές κατηγορίες: κατεργασμένα φυτικά, κατεργασμένα ορυκτά συνθετικά- πολυμερή. Διασκορπίζονται (με εξαίρεση τα απορροφητικά φράγματα) στην κηλίδα όπου αφήνονται να κρουστούν από το πετρέλαιο και στη συνέχεια περισυλλέγονται. Τέλος χρησιμοποιούνται συνήθως σε συνδυασμό και με άλλα μέσα απορρύπανσης. Λόγω της μεγάλης ποσότητας που απαιτείται για την καταπολέμηση της κηλίδας δεν είναι δυνατή η χρήση τους σε μεγάλες κηλίδες. Πρακτικά μόνο σε μικρές και μεσαίου μεγέθους κηλίδες (λίγοι τόνοι μέχρι μερικές δεκάδες τόνοι) (Ventikos, 2006)



Εικόνα 2.5: Απορροφητικά υλικά ως μέθοδος αντιμετώπισης εκχυθέντος πετρελαίου

Απόδοση Απορροφητικών ουσιών και ικανότητα Ανάκτησης

Τα σημαντικότερα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν την απόδοση των απορροφητικών υλικών είναι: (Efstratiou, 2007)

- Απορροφητική Ικανότητα (Recovery Capacity): Είναι ο λόγος της συνολικής ποσότητας πετρελαίου που ανακτάται προς το βάρος του απορροφητικού.
- Απορροφητικότητα (Recovery Efficiency): Είναι ο λόγος της ποσότητας ρύπου προς τη συνολική ποσότητα μίγματος νερού- πετρελαίου που ανακτάται. Χαρακτηρίζει το κατά πόσο το υλικό είναι ελαιοφιλικό.
- Χρόνος Κορεσμού (Recovery Rate): Χαρακτηρίζει την ποσότητα που ανακτάται στη μονάδα του χρόνου.



Εικόνα 2.6: Απορροφητικό υλικό περιορισμού πετρελαιοκηλίδας (Efstratiou, 2007)

2.3.4 - Πετρελαιοσυλλέκτες

Είναι κάθε μηχανική συσκευή που έχει κατασκευαστεί για να συλλέγει το πετρέλαιο (ή το μίγμα νερού-πετρελαίου) από την επιφάνεια της θάλασσας, <u>χωρίς ωστόσο να</u> <u>αλλάξουν</u> τα φυσικά ή και τα χημικά χαρακτηριστικά της.

Οι αρχές λειτουργίας των συσκευών περισυλλογής παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία. Μπορούμε να διακρίνουμε δύο βασικές κατηγορίες: τους μηχανικούς και τους ελαιόφιλους πετρελαιοσυλλέκτες. (Efstratiou, 2007) Οι μηχανικοί βασίζονται στις ιδιότητες των πετρελαίων και των μιγμάτων πετρελαίουνερού, καθώς και στη διαφορά πυκνότητας μεταξύ ρύπου και του νερού. Χωρίζονται σε τέσσερις βασικές υποκατηγορίες:

- ο πετρελαιοσυλλέκτες άμεσης αναρρόφησης
- ο πετρελαιοσυλλέκτες τύπου WEIR
- ο φυγοκεντρικοί (δίνης) πετρελαιοσυλλέκτες
- ο πετρελαιοσυλλέκτες με κυλιόμενο ιμάντα.



Εικόνα 2.7: Μηχανικοί πετρελαιοσυλλέκτες τύπου WEIR (Atlas, 2011)

Οι ελαιόφιλοι βασίζονται στα χαρακτηριστικά ορισμένων υλικών που έχουν μεγαλύτερη συγγένεια στο πετρέλαιο από ότι στο νερό. Τα υλικά αυτά είναι γνωστά ως ελαιόφιλα και ανάλογα με την ιδιομορφία της κινούμενης επιφάνειας στην οποία προσκολλάται το πετρέλαιο, διακρίνονται τέσσερις υποκατηγορίες αυτού του είδους των πετρελαιοσυλλεκτών:

- Πετρελαιοσυλλέκτες Τύπου Τυμπάνου: το πετρέλαιο προσκολλάται σε τύμπανο το οποίο είναι ημιβυθισμένο σε οριζόντια θέση και έχει επίστρωση από ελαιόφιλο υλικό.
- Πετρελαιοσυλλέκτες Δίσκου: αποτελούνται από ένα μεταβλητό αριθμό περιστρεφόμενων δίσκων που είναι κατασκευασμένοι από ελαιόφιλο υλικό. Το πετρέλαιο που προσκολλάται στην επιφάνεια των δίσκων αφαιρείται με ξύστρες οι οποίες το οδηγούν σε περιοχή (δεξαμενή) άντλησης. (Εικόνα 2.8)

- Ελαιόφιλοι Πετρελαιοσυλλέκτες Ιμάντα: το πετρέλαιο προσκολλάται σε ένα ημιβυθισμένο ιμάντα που έχει κατασκευασθεί από ελαιόφιλο υλικό και με την κίνηση του ιμάντα μεταφέρεται στο ανώτερο μέρος αυτού όπου αφαιρείται.
- Ελαιόφιλοι Πετρελαιοσυλλέκτες Σχοινιού: διαθέτουν ελαιόφιλο σχοινί που επιπλέει και είτε περιστρέφεται μεταξύ δύο τροχαλιών είτε σύρεται στην επιφάνεια.
- Ελαιόφιλοι Πετρελαιοσυλλέκτες Βούρτσας



Εικόνα 2.8: Ελαίοφιλος πετρελαιοσυλλέκτης (skimmer) δίσκου (disk) (Atlas, 2011)

Απόδοση Πετρελαιοσυλλεκτών

Η απόδοση των πετρελαιοσυλλεκτών εξαρτάται άμεσα από την κατάσταση της θάλασσας, το ύψος κύματος και την ταχύτητα των ρευμάτων. Τα σκουπίδια μπορεί να μπουν ως εμπόδιο στην απόδοση ορισμένων τύπων συσκευών ανάκτησης και να της προκαλέσουν ζημιά στη. (Ventikos, 2006)

Οι ακόλουθοι πίνακες παρουσιάζουν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά διαφόρων ειδών πετρελαιοσυλλεκτών.

Πίνακας 2.1: Δεδομένα λειτουργίας για τα διάφορα είδη πετρελαιοσυλλεκτών (Ventikos, 2006)

Varmuoola	Τύπος	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΘΑΛΑΣΣΑΣ					
Κατηγορία Πετρελαιοσυλλέκτη		Ταχύτητα Ανέμου (κόμβοι)	Ταχύτητα ρευμάτων (κόμβοι)	Ύψος κυμάτων (m)	Κατάσταση θάλασσας		
ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ	Κενού	3	0.7	0.4	2		
	Weir	6	0.7	0.4	2		
	Δίνης	6	0.7	0.4	2		
	DIP	6	0.7	0.4	2		
ΕΛΑΙΟΦΙΛΟΣ	Τυμπάνου	10	1.0	1.2	3		
	Δίσκου	10	1.0	1.2	3		
	Ιμάντα	6	1.0	1.2	2		
	Σχοινιού	10	1.0	1.2	3		
	Βούρτσας	16	1.0	1.5	3-4		
Κατηγορία Πετρελαιοσυλλέκτη	Τύπος	Ιξώδες (cSt)	Ευαισθησία σε θραύσματα	Απόδοση συλλογής (% πετρελαίου)	Ονομαστικός ρυθμός συλλογής (m ³ /h)		
ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ	Κενού	50000	Υψηλή	0-60	5-200		
	Weir	30000	Υψηλή	0-60	1-50		
	Vortex	1000	Μέτρια	40-60	5-700		
	DIP	50000	Χαμηλή	40-60	1-300		
ΕΛΑΙΟΦΙΛΟΣ	Τυμπάνου	30000	Μέτρια	50-90	1-60		
	Δίσκου	3300	Μέτρια	50-90	1-400		
	Ιμάντα	1000	Μέτρια	50-90	10-400		
	Σχοινιού	20000	Μέτρια	50-90	1-50		
	Βούρτσας	20000-	Μέτρια	50-90	1-120		

Πίνακας 2.2: Δεδομένα λειτουργίας για τα διάφορα είδη πετρελαιοσυλλεκτών (Ventikos, 2006)

	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΘΑΛΑΣΣΑΣ					
Τύπος πετρελαιοσυλλέκτη	Ταχύτητα Ανέμου (κόμβοι)	Ταχύτητα Ταχύτητα Ανέμου ρευμάτων (κόμβοι) (κόμβοι)		Κατάσταση θάλασσας		
Περιστρεφόμενου τυμπάνου	16	1.0	1.5	3-4		
Ιμάντα	6	1.0	0.4	2		
Κεκλιμένου ιμάντα	10	1.0	1.2	3		
Υδροδυναμικού ιμάντα	3	1.0	0.1	1		
Κεκλιμένου ιμάντα	6	1.0	0.4	2		
Περιστρεφόμενου τυμπάνου	10	1.0	1.2	3		
Περιστρεφόμενου τυμπάνου	6	1.0	0.4	2		
Περιστρεφόμενου δίσκου	6	1.0	0.4	2		
Τύπος	Ιξώδες (cSt)	Ευαισθησία σε θραύσματα	Απόδοση συλλογής (% πετρελαίου)	Ονομαστικός ρυθμός συλλογής (m³/h)		
Περιστρεφόμενου τυμπάνου	50000- 100000	Χαμηλή	50-90	1-80		
Ιμάντα	50000- 300000	Χαμηλή	40-60	1-300		
Κεκλιμένου ιμάντα	150000- 2000000	Μέτρια	50-90	10-300		
Υδροδυναμικού ιμάντα	150000- 2000000	Χαμηλή	50-90	10-300		
Κεκλιμένου ιμάντα	100000- 200000	Χαμηλή	40-60	10-300		
Περιστρεφόμενου τυμπάνου	>1000000	Μέτρια	50-90	1-60		
Περιστρεφόμενου τυμπάνου	2000000	Μέτρια	50-90	1-60		
Περιστρεφόμενου δίσκου	1000000	Χαμηλή	50-90	1-60		

2.3.5 - Πλύση

Πρόκειται για έκπλυση του πετρελαίου που εμμένει κατά μήκος των ακτών στο νερό για συλλογή. Οι στρατηγικές έκπλυσης κυμαίνονται από χαμηλής πιέσεως έκπλυση με κρύο νερό σε έκπλυση υψηλής πίεσης με καυτό νερό. Αυτή η μέθοδος, όταν χρησιμοποιείται ειδικά με υψηλή πίεση ή καυτό νερό, πρέπει να αποφεύγεται σε υγρότοπους ή άλλους ευαίσθητους βιότοπους. (White, 2010)



Εικόνα 2.9: Έκπλυση πετρελαιοκηλίδας με νερό υπό πίεση (White, 2010)

2.3.6 - Μετακίνηση ιζήματος

Πρόκειται για τη μετακίνηση του ρυπασμένου με πετρέλαιο ιζήματος από το ένα τμήμα της παραλίας σε κάποιο άλλο σημείο (sediment relocation) ή αφορά την επιφανειακή κατεργασία του εδάφους (tilling) και την ανάμιξη του ρυπασμένου ιζήματος ώστε να ενισχυθεί ο φυσικός καθαρισμός μέσω της διασποράς του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη και την προώθηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ του πετρελαίου και των ανόργανων σωματιδίων. Η επιφανειακή κατεργασία του εδάφους μπορεί να προκαλέσει διείσδυση του πετρελαίου βαθιά στα ιζήματα των ακτών. Οι πιθανές περιβαλλοντικές επιδράσεις από την απελευθέρωση του πετρελαίου και τα ρυπασμένα υδάτινα στρώματα πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη.

2.3.7 - Σκάφη Περισυλλογής

Υπάρχουν πολλά είδη και μεγέθη τέτοιων σκαφών. Οι κύριοι τύποι αυτών που χρησιμοποιούνται, έχουν ενσωματωμένη ανάλογη συσκευή, μηχανική ή ελαιόφιλη, για τη συλλογή του πετρελαίου. Οι μεγαλύτεροι τύποι σκαφών διαθέτουν και δεξαμενές απόθεσης του πετρελαίου ενώ είναι ικανά για μεγαλύτερους ρυθμούς ανάκτησης και καλύτερη απόδοση, ενώ σημαντικό, μπορούν να λειτουργήσουν και σε ταραγμένη θάλασσα.



Εικόνα 2.10: Το μεγαλύτερο πλοίο περισυλλογής πετρελαίου με το όνομα «A Whale» (http://www.cleanupoil.com/images/rodisc15.jpg)

Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των σκαφών είναι η χρήση τους στην ανοιχτή θάλασσα. Η απόδοσή τους είναι αρκετά καλύτερη από αυτή των συσκευών περισυλλογής. Η αξιοποίηση τους περιορίζεται στην ανοιχτή θάλασσα αλλά και σε κλειστούς κόλπους με μεγάλο βάθος.

Ο πίνακας 2.3 παρουσιάζει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των κυριότερων σκαφών περισυλλογής πετρελαίου.

Τύπος πετρελαιο- συλλέκτη	Τύπος σκάφους	ΚΑΤΑΣΤ Ταχύτητα ανέμου (knots)	ΓΑΣΗ ΘΑΛ Ύψος κύματος (m)	ΛΑΣΣΑΣ Κατάσταση θάλασσας	Ταχύτητα συλλογής (κόμβοι)	Χωρητικότητα δεξαμενής (m ³)
	Valdez Star	50	4.6	7	3	208
DIP	Shearwater	50	4.6	7	3	208
	Sea Truck	50	4.6	7	3	0

Πίνακας 2.3: Δεδομένα λειτουργίας για τα σκάφη περισυλλογής πετρελαίου (Ventikos N. 2006)

	Oil Skimmer	50	1.5	3-4	4	12
Κενού	Piranha III	50	1.5	3-4	4	10
	Oil Jet	50	1.5	3-4	4	4
Πολυσδιάστατος	Multi-Use Vessel I	26	4.0	5	3	6
προσαρμογέας	Multi-Use Vessel II	26	4.0	5	3	10
	Cosens	26	4.0	5	3	27
Αυτοπροωθούμε- νο	Egmopol	3	0.1	1	1.5	100
Τύπος πετρελαιο- συλλέκτη	Τύπος σκάφους	Ευαισθησία σε θραύσματα	Ιξώδες πετρελαίοι (cSt)	Απόδοση) (% πετρ	συλλογής οελαίου)	Ονομαστικός ρυθμός συλλογής (m ³ /h)
	Valdez Star	Χαμηλή	50000	9	9	207
DIP	Shearwater	Χαμηλή	50000	9	9	207
	Sea Truck	Χαμηλή	50000	9	9	207
	Oil Skimmer	Μέτρια	50000	9	0	3
Κενού	Piranha III	Μέτρια	50000	9	0	5
	Oil Jet	Μέτρια	50000	9	0	1
	Multi-Use Vessel I	Μέτρια	50000	9	0	12
Πολυσδιάστατος προσαρμογέας	Multi-Use Vessel II	Μέτρια	50000	9	0	15
	Cosens	Μέτρια	50000	9	0	50

2.4 - Φυσική αποκατάσταση περιβάλλοντος

Αμέσως μετά την εισαγωγή πετρελαίου στο περιβάλλον, λαμβάνουν χώρα διάφορες φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που οδηγούν στη σταδιακή εξασθένηση

των συστατικών του. Ανάλογα με την αντίδρασή τους σε αυτές τις διεργασίες, τα πετρελαιοειδή μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες: (Nikolopoulou, 2011)

- στα εμμένοντα (persistent) και
- στα μη εμμένοντα (non persistent)

Εμμένοντα πετρελαιοειδή ονομάζονται εκείνα τα οποία εξαιτίας της χημικής τους σύστασης, μετά τη διαρροή τους στη θάλασσα, αποικοδομούνται και εξαπλώνονται με πολύ αργούς ρυθμούς.

Αντίστοιχα, τα μη εμμένοντα πετρελαιοειδή μπορούν να διασκορπιστούν και να εξατμιστούν με φυσικό τρόπο, σε γρήγορους ρυθμούς, οδηγώντας σταδιακά στην σχεδόν ολική αποκατάσταση του περιβάλλοντος.

Έτσι σε ορισμένες περιπτώσεις (όπως πετρελαιοκηλίδες σε απόμακρες ή απρόσιτες περιοχές ή σε περιπτώσεις όπου υπάρχει κίνδυνος οι ενέργειες καθαρισμού – cleanup action - να προκαλέσουν μεγαλύτερη ζημία) και εφόσον η σύσταση του πετρελαίου είναι τέτοια ώστε να ευνοείται η φυσική αποκατάσταση, κρίνεται αποδεκτό, να μην εφαρμοστεί καμία τεχνική αντιμετώπισης (*leave alone action*) πετρελαιοκηλίδων. Φυσικά στην περίπτωση που ως μέθοδος εξυγίανσης επιλέγεται η φυσική αποκατάσταση, είναι απαραίτητη η εφαρμογή κατάλληλου προγράμματος παρακολούθησης, από ειδικά καταρτισμένο προσωπικό, έτσι ώστε να αξιολογείται η απόδοση της μεθόδου.

2.5 - Φυσικές μέθοδοι

Η μέθοδος της βιοεξυγίανσης αποτελεί μια από τις υπό ανάπτυξη μεθόδους για την αντιμετώπιση της πετρελαϊκής ρύπανσης σε θαλάσσια περιβάλλοντα.

Αν και οι συμβατικές μέθοδοι, όπως η φυσική απομάκρυνση (physical removal), είναι ο πρώτος τρόπος αντιμετώπισης, σπάνια επιτυγχάνουν τον πλήρη καθαρισμό των πετρελαιοκηλίδων. Σύμφωνα με το Office of Technology Assessment, οι τρέχουσες μηχανικές μέθοδοι ανακτούν χαρακτηριστικά λιγότερο από 10-15 τοις εκατό του πετρελαίου μετά από μία μεγάλης έκτασης πετρελαιοκηλίδα. Η βιοεξυγίανση έχει προκύψει ως μια από τις πιο ελπιδοφόρες δευτεροβάθμιες επιλογές επεξεργασίας (secondary treatment options) για την απομάκρυνση πετρελαίου και ειδικά μετά από την επιτυχή εφαρμογή της στο ατύχημα του *Exxon Valdez* του 1989. (Nikolopoulou, 2005) Η βιοεξυγίανση έχει οριστεί ως "η διενέργεια προσθήκης υλικών στα ρυπασμένα περιβάλλοντα ούτως ώστε να προκληθεί επιτάχυνση των φυσικών διαδικασιών βιοδιάσπασης". Αυτή η τεχνολογία βασίζεται στην προϋπόθεση ότι ένα μεγάλο ποσοστό του πετρελαίου είναι εύκολα βιοδιασπάσιμο στη φύση. Η επιτυχία της βιοεξυγίανσης των πετρελαιοκηλίδων εξαρτάται από τη δυνατότητά να καθιερωθούν και να διατηρηθούν οι συνθήκες που ευνοούν τους ρυθμούς ενισχυμένης βιοδιάσπασης του πετρελαίου στο ρυπασμένο περιβάλλον (Atlas, 1995). Υπάρχουν δύο κύριες προσεγγίσεις στη βιοεξυγίανση των πετρελαιοκηλίδων:

- Βιοενίσχυση (bioaugmentation): Πρόκειται για την προσθήκη εξειδικευμένων γηγενών (ABA- Autochthonous Bio-Augmentation) ή μη μικροοργανισμών, με σκοπό την ενίσχυση της ήδη υπάρχουσας μικροβιακής κοινότητας, οι οποίοι έχουν την ικανότητα να διασπούν τα περισσότερα από τα συστατικά των πετρελαιοειδών. Αυτή η αύξηση του μικροβιακού πληθυσμού επιτυγχάνει έναν υψηλό ρυθμό βιοδιάσπασης. Για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου είναι απαραίτητη η εξασφάλιση των κατάλληλων συνθηκών για την επιβίωση και την εκτέλεση των μεταβολικών λειτουργιών των μικροοργανισμών. (Prince, 1993)
- Βιοδιέγερση (biostimulation): Πρόκειται για την προσθήκη ειδικών θρεπτικών ουσιών (N,P,O₂), οι οποίες συνήθως αποτελούν περιοριστικό παράγοντα της επιβίωσης των μικροοργανισμών. Η προσθήκη των ουσιών αυτών γίνεται κυρίως μέσω οργανικών η ανόργανων λιπασμάτων, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η αναλογία άνθρακα, αζώτου και φωσφόρου (C:N:P = 120:10:1 mol), που απαιτείται για την επιβίωση, την ανάπτυξη και την εκτέλεση των βασικών μεταβολικών λειτουργιών των καταναλωτών. Οι πιο ευρέως διαδεδομένες μορφές λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται είναι τα βραδείας αποδέσμευσης και τα ελαιοφιλικά (slow-release and oleophilic fertilizers). (Prince, 1993)

Τόσο οι εργαστηριακές μελέτες όσο και οι μελέτες πεδίου έχουν δείξει ότι η βιοεξυγίανση κι ειδικότερα η βιοδιέγερση μπορούν να ενισχύσουν τη βιοδιάσπαση πετρελαίου στις ρυπασμένες ακτές. Οι πρόσφατες μελέτες στο πεδίο επίσης έχουν καταδείξει ότι η βιοδιέγερση είναι αποτελεσματικότερη προσέγγιση επειδή η προσθήκη μικροοργανισμών που αποικοδομούν υδρογονάνθρακες δεν θα ενισχύσει την διάσπαση πετρελαίου περισσότερο από την απλή προσθήκη θρεπτικών. (Nikolopoulou, 2005)

Η βιοεξυγίανση έχει διάφορα πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών τεχνολογιών. Κατ' αρχάς, η εφαρμογή της βιοεξυγίανσης είναι σχετικά ανέξοδη. Παραδείγματος χάριν, κατά τη διάρκεια του καθαρισμού της πετρελαιοκηλίδας του *Exxon Valdez*, το κόστος βιοεξυγίανσης 120 χλμ ακτής ήταν λιγότερο από τις δαπάνες μιας ημέρας για φυσική εκπλύση (physical washing). Η βιοεξυγίανση είναι επίσης μια περιβαλλοντικά φιλική τεχνολογία δεδομένου ότι περιλαμβάνει την τελική αποικοδόμηση του πετρελαίου σε ανόργανα προϊόντα (όπως το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό), ενώ οι άλλες μέθοδοι μεταφέρουν χαρακτηριστικά το ρυπαντή από το ένα περιβαλλοντικό διαμέρισμα σε άλλο. Δεδομένου τώρα, ότι είναι βασισμένη σε φυσικές διεργασίες όντας επίσης λιγότερο παρεισφρητική και αποσυνδετική για τη ρυπασμένη περιοχή, αυτή η "πράσινη τεχνολογία" μπορεί να είναι πιο αποδεκτή στο ευρύ κοινό. (Office of Technology Assessment, 1991)

Η βιοεξυγίανση όπως άλλες τεγνολογίες έγει επίσης τους περιορισμούς της. Η βιοεξυγίανση περιλαμβάνει ιδιαίτερα ετερογενείς και σύνθετες διεργασίες. Η επιτυχία της βιοεξυγίανσης πετρελαίου εξαρτάται από την κατοχή των κατάλληλων μικροοργανισμών στο πεδίο και τις κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες. Η λειτουργική χρήση της μπορεί να περιοριστεί από τη σύνθεση του πετρελαίου. Η βιοεξυγίανση είναι επίσης μια σχετικά αργή διαδικασία, που απαιτεί εβδομάδες έως μήνες για να εφαρμοστεί, άρα μη ενδεδειγμένη όταν απαιτείται άμεσος καθαρισμός. Ανησυχίες προκύπτουν ακόμη από τα πιθανά δυσμενή αποτελέσματα τα οποία συνδέονται με την εφαρμογή των παραγόντων βιοεξυγίανσης (bioremediation agents). Αυτά περιλαμβάνουν την τοξικότητα των ιδίων των παραγόντων βιοεξυγίανσης και των μεταβολικών παραπροϊόντων της αποικοδόμησης του πετρελαίου καθώς και τον πιθανό ευτροφισμό που συνδέεται με τον θρεπτικό εμπλουτισμό. Παρ' όλα αυτά όμως, η βιοεξυγίανση έχει αποδειχθεί ότι είναι ένα οικονομικό εργαλείο επεξεργασίας, εάν χρησιμοποιείται κατάλληλα, στον καθαρισμό ορισμένων ρυπασμένων με πετρέλαιο περιβαλλόντων. Πρακτικά, έχουν παρατηρηθεί λίγα καταστρεπτικά αποτελέσματα κατά την εφαρμογή της στο πεδίο.

Αυτήν την περίοδο, μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις στην εφαρμογή της τεχνολογίας της βιοεξυγίανσης πετρελαίου είναι η έλλειψη κα η λήψη οδηγιών σχετικά με το πότε και πώς να χρησιμοποιηθεί. Αν και έχει πραγματοποιηθεί εκτενής έρευνα για τη βιοεξυγίανση πετρελαίου κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, οι περισσότερες υπάρχουσες μελέτες έχουν επικεντρωθεί είτε στην αξιολόγηση της δυνατότητας πραγματοποίησης της βιοεξυγίανσης για την αντιμετώπιση της ρύπανσης πετρελαίου, είτε στη δοκιμή προϊόντων και μεθόδων. Έχει πραγματοποιηθεί περιορισμένος αριθμός δοκιμών πιλοτικής κλίμακας και δοκιμών πεδίου, που μπορούν να παρέχουν πιο πειστικές επιδείξεις αυτής της τεχνολογίας. Πολλές δοκιμές πεδίου δεν έχουν σχεδιαστεί κατάλληλα, δεν έχουν ελεγχθεί καλά ή δεν έχουν αναλυθεί σωστά, οδηγώντας σε σκεπτικισμό και σύγχυση την κοινότητα χρηστών. Υπάρχει άμεση ανάγκη για ένα λεπτομερές και εφαρμόσιμο σύνολο οδηγιών για την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας από τους αποκριτές των πετρελαιοκηλίδων που να απαντά σε καίριες ερωτήσεις όπως πότε να χρησιμοποιηθεί η βιοεξυγίανση, ποιοι παραγόντες

ελέγχθουν και να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα. Επιστημονικά δεδομένα για την υποστήριξη ενός λειτουργικού εγγράφου οδηγιών έχουν παρασχεθεί πρόσφατα από εργαστηριακές μελέτες και δοκιμές πεδίου που πραγματοποιούνται από την U.S. Environmental Protection Agency (EPA), το πανεπιστήμιο του Cincinnati, και από τον οργανισμό Fisheries and Oceans Canada. (U.S. EPA, 1999)

Όπως κάθε μέθοδος, έτσι και η βιοεξυγίανση παρουσιάζει εξίσου πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία πρέπει να εκτιμώνται και να αξιολογούνται τόσο πριν όσο και κατά την εφαρμογή της, καθώς οι παράγοντες αυτοί μπορεί να είναι καθοριστικοί για την καταλληλότητα της ή τη μη καταλληλότητα, ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες. Παρακάτω, τα συνοψίζουμε: (Swannell, 1996)

Πλεονεκτήματα της μεθόδου

- Αποτελεί φυσική διεργασία, γεγονός που την καθίστα ευκολότερα αποδεκτή από το ευρύ κοινό καθώς δεν προκαλεί περαιτέρω ρύπανση (όπως προαναφέρθηκε δίνει ως τελικά προϊόντα CO₂, H₂O και βιομάζα). Η ενίσχυση των μικροοργανισμών που χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση του περιβάλλοντος, λαμβάνει χώρα μόνο κατά τη διάρκεια εμφάνισης της ρύπανσης.
- Προκαλεί ελάχιστη φυσική διάσπαση της περιοχής, με σχεδόν μηδενικές επιπτώσεις, εάν εφαρμοστεί σωστά.
- Εμφανίζεται αρκετά αποδοτική στην αποδόμηση μεγάλου αριθμού οργανικών ενώσεων, μετατρέποντας ένα μεγάλο αριθμό επικίνδυνων και τοξικών συστατικών του πετρελαίου σε ακίνδυνα, επιλύοντας έτσι και το πρόβλημα της μελλοντικής διάθεσης και διαχείρισης του ρύπου.
- Η εφαρμογή της μεθόδου γίνεται επιτόπου στο σημείο της ρύπανσης (on site), έτσι αποφεύγεται η συλλογή και η μεταφορά του ρύπου από ένα μέσο σε ένα άλλο, γεγονός που καθιστά τη μέθοδο αρκετά απλή αλλά και σημαντικά οικονομικότερη στην εφαρμογή της σε σχέση με άλλες τεχνικές.

<u>Μειονεκτήματα της μεθόδου</u>

- × Αποτελεί μια σχετικά αργή μέθοδο. Παρά το γεγονός ότι μπορεί να λειτουργήσει πιο γρήγορα από τη φυσική βιοδιάσπαση, δεν εμφανίζει σύντομα σημαντικά αποτελέσματα, ειδικά σε σχέση με άλλες μεθόδους, έτσι η εφαρμογή της δεν ενδείκνυται για περιπτώσεις όπου απαιτείται άμεση αποκατάσταση.
- × Είναι αναποτελεσματική για ρύπανση σε ανοιχτή θάλασσα λόγω της αυξημένης διάχυσης.
- × Επίσης σε περιπτώσεις «βαριάς» ρύπανσης εφαρμόζεται ως δευτερεύουσα και συμπληρωματική μέθοδος καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική.

× Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πετρελαίου, τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς επίσης και από το σημείο της ρύπανσης. (Mearns, 1997)

2.6 - Επιτόπου Καύση (In situ burning)

Αφορά τόσο πετρελαιοκηλίδες στη θαλάσσια επιφάνεια όσο και πετρέλαιο που έχει προσαράξει. Το πετρέλαιο στην ακτή καίγεται συνήθως όταν βρίσκεται πάνω σε καύσιμο υπόστρωμα όπως η βλάστηση, τα κούτσουρα και άλλα συντρίμμια. Αυτή η μέθοδος μπορεί να προκαλέσει σημαντική ατμοσφαιρική ρύπανση και καταστροφή των φυτών και των ζώων. (Etkin, 2000)

Η επί τόπου καύση των πετρελαιοκηλίδων είναι η πιο σύγχρονη μέθοδος αντιμετώπισης των εκτεταμένων κυρίως περιστατικών ρύπανσης. Σημαντικό στοιχείο για την επιτυχία της μεθόδου είναι η ύπαρξη πυρίμαχων φραγμάτων, ώστε να περιορίζεται η έκταση του ρυπαντή και να αυξάνεται το πάχος της κηλίδας, που δεν πρέπει να είναι μικρότερο από μερικά χιλιοστά. Παράλληλα, η μέθοδος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική (έως και 99%) στην πρώτη φάση του ατυχήματος, προτού δηλαδή εξατμισθούν τα εύφλεκτα συστατικά του πετρελαίου ή εξελιχθεί το φαινόμενο της γήρανσης της κηλίδας. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της εφαρμογής in situ burning μιας πετρελαιοκηλίδας φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.11: Επιτόπου καύση εκχυθέντος πετρελαίου στη θάλασσα

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την αποδοτικότητα της μεθόδου είναι οι επικρατούσες καιρικές συνθήκες, καθώς οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και οι ισχυροί άνεμοι καθιστούν αδύνατη τη διαδικασία εξωτερικής ανάφλεξης. Αντιθέτως, εάν η καύση αρχίσει, οι καιρικές συνθήκες δεν επηρεάζουν σημαντικά την εξέλιξή της. Τέλος, απαιτείται άριστος συντονισμός της επιχείρησης με ισχυρά και κατάλληλα εξοπλισμένα σκάφη.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η καύση του πετρελαίου επιβαρύνει την ατμόσφαιρα με αέριους ρυπαντές. Η όλη διαδικασία ολοκληρώνεται με τη μηχανική περισυλλογή των καταλοίπων της καύσης.

2.7 - Χημικές Μέθοδοι

Είναι οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν χημικές ενώσεις οι οποίες με την σειρά τους ρίπτονται στους πετρελαιορυπαντές και τους αλλάζουν την χημική σύσταση προς όφελος των διαδικασιών καθαρισμού. Οι πρώτες χημικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν τη δεκαετία του '60 ήταν χημικά διασκορπιστικά. Αυτά αποτελούμενα από αρωματικούς υδρογονάνθρακες, οι οποίοι ήταν ιδιαίτερα τοξικοί, προκάλεσαν μολυσματικές και ανεπιθύμητες έτσι, επιπτώσεις στο θαλάσσιο οικοσύστημα. Μάλιστα η επικινδυνότητά τους ανάγκασε τις αρχές να θεσπίσουν κατάλληλο νομικό πλαίσιο, με το οποίο απέκλειαν ευαίσθητες περιοχές από τη χρήση τους. Βέβαια τα σημερινά χημικά, αποκαλούμενα "τρίτης γενιάς", δεν είναι τόσο τοξικά, εφαρμόζονται δε τόσο από πλωτά μέσα όσο και από αεροσκάφη. (Efstratiou, 2008)

2.7.1 - Χημικές διασκορπιστικές ουσίες

Ο διασκορπισμός του πετρελαίου είναι μια φυσική διαδικασία που ακολουθεί την είσοδό του στο θαλασσινό νερό. Το γεγονός αυτό έδωσε την πρώτη ιδέα για τη δημιουργία ουσιών που θα επιτάχυναν τη φυσική διαδικασία του διασκορπισμού του πετρελαίου, δηλαδή τα χημικά διασκορπιστικά. Τα διασκορπιστικά είναι μίγματα από οργανικούς διαλύτες, που δρουν μεταξύ νερού και πετρελαιοειδών και μειώνουν τη μεταξύ τους επιφανειακή τάση.

Επιπλέον, η απόδοσή τους ευνοείται από τον κυματισμό της θάλασσας, δηλαδή εμφανίζουν αυξημένη αποδοτικότητα εκεί που οι υπόλοιπες μέθοδοι αδυνατούν να αντεπεξέλθουν. Παράλληλα, εφόσον υπάρχει το απαραίτητο νομικό πλαίσιο, αποτελούν την ταχύτερη μέθοδο απορρύπανσης. Εντούτοις, τα χημικά διασκορπιστικά δεν καταστρέφουν το πετρέλαιο, με αποτέλεσμα μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, να επανεμφανίζονται τμήματα της κηλίδας, ενώ επιβαρύνουν και τα ίδια με την παρουσία τους το τοπικό οικοσύστημα. Επιπλέον η δραστικότητά τους μειώνεται με την πάροδο του χρόνου παραμονής (π.χ. μετά από δύο ημέρες) του πετρελαίου στη θάλασσα (γήρανση), ενώ καθίστανται αδρανή σε χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω από 5°C) και όσον αφορά επίσης παχύρρευστα κλάσματα του πετρελαίου με ιξώδες μεγαλύτερο των 2000 cSt. (Etkin, 1999, Efstratiou, 2008)

Ειδική κατηγορία των διασκορπιστικών αποτελούν τα βιογενή επιφανειακά διασκορπιστικά, τα οποία βρίσκονται βέβαια σε πειραματικό στάδιο. Η αρχή δράσης τους βασίζεται στην τροφοδοσία των σαπροφυτικών και ετεροτροφικών βακτηριδίων, τα οποία υλοποιούν τη βιοαποικοδόμηση του πετρελαίου, με ρίζες φωσφορικών αλάτων και οξυγόνο ώστε να επιταχύνεται ο πολλαπλασιασμός τους και να ενισχύεται η δραστικότητά τους.



Εικόνα 2.12: Δράση χημικών διασκορπιστικών ουσιών (Etkin, 1999)

Γενικά, η δράση τους καθιστά δυνατή τη διάσπαση μιας πετρελαιοκηλίδας σε πολύ μικρά σταγονίδια (μικρότερα από 100 μικρά σε διάμετρο) που διασκορπίζονται γρήγορα στην υδάτινη στήλη λόγω της φυσικής κίνησης του νερού.

Έτσι επιταχύνεται η διάσπαση του πετρελαίου σε μικρά σταγονίδια στην επιφάνεια και στη στήλη του νερού. Αποτρέπεται η δημιουργία συσσωματωμάτων σταγονιδίων. Διασκορπίζουν ταχέως το πετρέλαιο, ελαττώνοντας την συγκέντρωσή του. Επιτείνουν

τις διαδικασίες βιοαποικοδόμησης. Οι διασκορπιστές χρησιμοποιούνται και στο νερό και στην ακτή (Gillot, 1988, Mercer et al., 1973).

Ο όγκος του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί υπολογίζεται από τον τύπο:

$Q = d x V x L x E x C \qquad (l/min)$

 ${\it Q}$: η ποσότητα της ουσίας που θα πρέπει να ψεκαστεί, σε λίτρα ανά λεπτό

d: η απόσταση (m/min) που καλύπτεται από το σκάφος από το οποίο γίνεται ο ψεκασμός

V: Η ταχύτητα του σκάφους σε knots

L: το εύρος της επιφάνειας ψεκασμού, σε metres

Ε: το μέσο πάχος της πετρελαιοκηλίδας, σε mm

C: ο όγκος της διασκορπιστικής ουσίας που απαιτείται για τη διάσπαση ενός lt πετρελαίου, σε lt

Πλεονεκτήματα χρήσης:

- Απομάκρυνση του πετρελαίου από την επιφάνεια του νερού
- Μείωση του κινδύνου προσβολής ακτών
- Μείωση του κινδύνου προσβολής πτηνών
- Αποφυγή δημιουργίας γαλακτώματος
- Μείωση κινδύνου πυρκαγιάς
- Αύξηση βιοαποικοδόμησης

<u>Μειονεκτήματα χρήσης</u>:

- × Το πετρέλαιο παραμένει στο θαλάσσιο περιβάλλον
- × Αύξηση κινδύνου μόλυνσης υποθαλάσσιων οργανισμών
- × Προσθήκη στο θαλάσσιο περιβάλλον επιπλέον χημικών ουσιών
- × Η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες

2.7.2 - Χημικές ενώσεις διασποράς

Χημικές ενώσεις διασποράς (dispersing agents), που περιέχουν επιφανειοδραστικά ενεργές ουσίες, χρησιμοποιούνται για να αφαιρέσουν το επιπλέον πετρέλαιο από την υδάτινη επιφάνεια και να το διασκορπίσουν στην υδάτινη στήλη προτού το πετρέλαιο φθάσει και μολύνει την ακτή.

Αυτή η πρακτική χρησιμοποιείται για να μειωθούν οι τοξικές επιδράσεις του πετρελαίου με τη διάλυση του σε κατώτατες συγκεντρώσεις και να επιταχυνθεί ο ρυθμός βιοδιάσπασής του με την αύξηση της αποτελεσματικής περιοχής επιφάνειάς του. (Etkin, 1999)

2.7.3 - Απογαλακτωματοποιητές (Demulsifiers)

Μια άλλη κατηγορία χημικών μεθόδων είναι οι απογαλακτωματοποιητές. Αυτοί χρησιμοποιούνται για να διασπάσουν τα γαλακτώματα πετρελαίου σε νερό (oil – in - water) και για να ενισχυθεί η φυσική διασπορά. (ITOPF, 2005)

2.7.4 - Στερεοποιητές (Solidifiers)

Οι στερεοποιητές είναι και αυτοί με την σειρά τους, χημικές ουσίες που ενισχύουν τον πολυμερισμό του πετρελαίου. Έτσι, χρησιμοποιούνται για να σταθεροποιήσουν το πετρέλαιο ώστε να ελαχιστοποιήσουν τη διάδοση του, με αποτέλεσμα να αυξήσουν την αποτελεσματικότητα των φυσικών διεργασιών αποκατάστασης. (ITOPF, 2005)

2.7.5 - Χημικές ουσίες επιφανειακού υμενίου (Surface film chemicals)

Άλλες χημικές ουσίες είναι αυτές που σχηματίζουν επφανειακό υμένιο ώστε να αποτρέψουν το πετρέλαιο από το να προσκολληθεί στα υποστρώματα των ακτών και για να ενισχύσουν την αφαίρεση του πετρελαίου που εμμένει στις επιφάνειες με διαδικασίες έκπλυσης με πίεση. (ITOPF, 2005)

2.8 - Άλλες μέθοδοι αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων

Ενδεικτικά αναφέρονται: (U.S. EPA, 1999)

Χημικοί φραγμοί, που εφαρμόζονται γύρω από την κηλίδα. Παράγοντες βυθίσεως, που δρουν όπως οι απορροφητές, αλλά προκαλούν βύθιση των ρύπων, προξενώντας

εντούτοις προβλήματα στον πυθμένα. Παράγοντες ζελατινοποίησης, που δημιουργούν ημιστερεά σύμπλοκα. Μέθοδος του ψεκασμού με θρεπτικές ουσίες που επιταχύνουν την ανάπτυξη βακτηρίων που αποικοδομούν τους πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες.

2.9 - Σύγκριση αποδοτικότητας μεθόδων αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων

Ο ορισμός της αποδοτικότητας μιας μεθόδου απορρύπανσης, όσο και οι εκάστοτε επικρατούσες συνθήκες, δεν επιτρέπουν αυστηρό καθορισμό του βαθμού απόδοσης μιας χρησιμοποιούμενης μεθοδολογίας.

Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται η αποδοτικότητα των κυριότερων μεθόδων απορρύπανσης συναρτήσει του πάχους της πετρελαιοκηλίδας. Όπως είναι λογικό τα αποτελέσματα δίνονται σε ζώνες μεταβολής με αξιόλογο εύρος τιμών, εξαρτώμενο από τις χρησιμοποιούμενες επιμέρους τεχνικές, το διαθέσιμο εξοπλισμό, το είδος του πετρελαίου, αλλά και την ένταση των φυσικών φαινομένων. Σε κάθε περίπτωση τα χημικά διασκορπιστικά εμφανίζουν τη χειρότερη αποδοτικότητα (70%) σε αντίθεση με την επί τόπου καύση (80%). Η απόδοση του μηχανικού καθαρισμού αυξάνεται με το πάχος της πετρελαιοκηλίδας, και παραμένει αξιόλογη για όλο το εύρος τιμών του πάχους μιας πετρελαιοκηλίδας.

Παράλληλα με την αποδοτικότητα μιας μεθόδου απορρύπανσης, σημαντικό ρόλο για την επιλογή της ή όχι, διαδραματίζει το κόστος της επέμβασης (αναγόμενο π.χ. σε €/βαρέλι ανακτώμενου πετρελαίου, €/bbl), η απαιτούμενη ποικιλία και η διαθεσιμότητα του αναγκαίου εξοπλισμού, καθώς και οι απαιτήσεις οργάνωσης και συντονισμού.

Επιπροσθέτως, τα τελευταία χρόνια καθοριστική βαρύτητα στην επιλογή ή μη μιας μεθόδου απορρύπανσης άρχισε να αποκτά και η φιλικότητα ως προς το περιβάλλον της υιοθετούμενης μεθοδολογίας (Etkin, 2010).



Σχήμα 2.4: Σύγκριση αποδοτικότητας μεθόδων απορρύπανσης (Τριανταφύλλου, 2005)

2.10 - Περιοχές εφαρμογής μεθόδων

Όπως είναι κατανοητό από όσα προαναφέρθηκαν, η μέθοδος της μηχανικής περισυλλογής αποτελεί την πλέον περιβαλλοντικά φιλική μέθοδο, δεδομένου ότι είναι η μόνη μέθοδος η οποία δεν επιβαρύνει σημαντικά το περιβάλλον, ενώ απομακρύνει σημαντικές ποσότητες πετρελαιοειδών από τους θαλάσσιους αποδέκτες. Παρόλα αυτά το υψηλό κόστος της μεθόδου, η ποικιλία του απαιτούμενου εξοπλισμού αλλά και η ευαισθησία της στις υφιστάμενες καιρικές συνθήκες, εμποδίζουν την καθολική της χρήση.

Αντίθετα, η μέθοδος των χημικών διασκορπιστικών επιβαρύνει σημαντικά το περιβάλλον για δύο κύριους λόγους: α) δεν εξαφανίζει το πετρέλαιο από τα θαλάσσια οικοσυστήματα β) λόγω της τοξικότητας (έστω και μικρής) των χρησιμοποιούμενων ουσιών. Παρ' όλα αυτά η μέθοδος είναι σαφώς φθηνότερη του μηχανικού καθαρισμού, απαιτώντας επίσης μικρότερο χρόνο εφαρμογής και το κυριότερο: είναι αποδοτική ακόμα και υπό αντίξοες καιρικές συνθήκες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5.

Τέλος, η μέθοδος της επί τόπου καύσης έχει μεν υψηλό βαθμό απόδοσης, εάν χρησιμοποιηθεί έγκαιρα και εμφανίζει επίσης περιορισμένο οικονομικό κόστος. Απ' την άλλη μεριά όμως, απαιτεί αποδεκτές καιρικές συνθήκες και μεγάλο πάχος πετρελαιοκηλίδας (παραπάνω Σχήμα 2.4), προϋπόθεση που σημαίνει έγκαιρη διάγνωση και άμεση εφαρμογή της μεθόδου υπό ελεγχόμενες καιρικές συνθήκες. Ταυτόχρονα, επιβαρύνει το περιβάλλον με την παραγωγή των καυσαερίων.



Σχήμα 2.5: Περιοχές εφαρμογής μεθόδων απορρύπανσης (Τριανταφύλλου, 2005)

2.11 - Επιπτώσεις μεθόδων αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων

Η ολοκλήρωση της διαδικασίας καθαρισμού από το πετρέλαιο πρέπει να συνοδεύεται από ειδική οικολογική μελέτη επιπτώσεων στους οργανισμούς καθώς και από την

ανάπτυξη προγράμματος παρακολούθησης (monitoring) προκειμένου έτσι να εκτιμηθούν οι μεσοπρόθεσμοι κίνδυνοι και επιπτώσεις από τους βιομετασχηματισμούς του εναπομείναντος πετρελαίου. Ο σχεδιασμός ενός προγράμματος εκτίμησης επιπτώσεων πρέπει να γίνεται συνεκτιμώντας τις προτεραιότητες που επικράτησαν κατά τον σχεδιασμό των ενεργειών καθαρισμού (οικονομικές, βιολογικές, αναψυχής, άλλες). Επισης, πρωτόκολλα δειγματοληψιών πρέπει να καθορίζονται και να ακολουθούνται για συγκεκριμένα γρονικά διαστήματα που εξαρτώνται από τη γρήση and (Efstratiou Karydis, 2007). H διάρκεια τώρα, ενός προγράμματος παρακολούθησης θα πρέπει να καλύπτει και τη χρονική περίοδο αποκατάστασης του ρυπανθέντος οικοσυστήματος. Η συνήθης διάρκεια καλύπτει δυο χρόνια μετά την ρύπανση (Brattegard, 1980, Connell and Miller, 1981). Σε περιογές ωστόσο, με ιδιαίτερο οικολογικό ή οικονομικό ενδιαφέρον επιβάλλεται μακρογρόνια παρακολούθηση, η διάρκεια της οποίας μπορεί να ποικίλει από 15 έως 20 χρόνια, εξαρτώμενη από την βαρύτητα της κατ'αρχήν ρύπανσης, τον τύπο του πετρελαίου και την καταστροφή που προκλήθηκε στα αρχικά στάδια και από την αποκατάσταση του ρυπανθέντος οικοσυστήματος. (Spies, 1996)

Κεφάλαιο 3

Νέα μαθηματικά μοντέλα διεργασιών πετρελαϊκής ρύπανσης

3.1 - Εισαγωγή

Μια πετρελαιοκηλίδα, υφίσταται κάποιες πολύπλοκες φυσικοχημικές μεταβολές από την στιγμή που θα βρεθεί στην θάλασσα, τις οποίες στο σύνολό τους τις καλούμε και ως γήρανση πετρελαίου. Η κάθε μία αυτές τις διεργασίες, εφόσον οριστεί σωστά και συγκεκριμένα, μπορεί να μελετηθεί ξεχωριστά. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να συσχετισθεί με διάφορες χαρακτηριστικές ποσότητες και μέσω θεωρητικών ή/και πειραματικών προσεγγίσεων, να μοντελοποιηθεί, δηλαδή να εκφραστεί με εξισώσεις ή αλγορίθμους που προβλέπουν ευστόχως το μέλλον της.

Τοποθετώντας κάποια από τα ανεπτυγμένα αυτά μοντέλα, που αφορούν τις βασικότερες διαδικασίες γήρανσης, σε ένα προγραμματιστικό περιβάλλον, είναι εφικτό να δημιουργηθούν εργαλεία για την πρόβλεψη της τύχης πετρελαιοκηλίδας. Ένα χαρακτηριστικό τέτοιο εργαλείο είναι το ADIOS, που συνεχώς ανανεώνεται.

Στην κατεύθυνση αυτή και με πρότυπο το ADIOS, δημιουργήθηκε ένα ακόμα εργαλείο, το Spillsolver. Το πρόγραμμα αυτό, δομήθηκε στα πλαίσια των διπλωματικών εργασιών «Movτέλο Tύχης/Γήρανσης Κηλίδων Πετρελαίου», των Korros & Chatzikonstantinou (2008). Για την κατασκευή του, χρησιμοποιήθηκαν εμπειρικά και μαθηματικά μοντέλα από διάφορους ερευνητές που έχουν ασχοληθεί με τη μοντελοποίηση των διαφόρων φυσικοχημικών μεταβολών που υφίσταται μια πετρελαιοκηλίδα. Η επιλογή τους έγινε με βάση την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, την χρηστικότητά τους και τη διαθεσιμότητα στοιχείων και συντελεστών.

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, ανανεώθηκε το παρόν πρόγραμμα, δηλαδή προήχθη σε SpillSolver 2.0. Για την πραγματοποίηση του "update", πραγματοποιήθηκε έλεγχος στην προϋπάρχουσα δομή του SpillSolver. Επίσης σημειώθηκαν σημαντικές γραφιστικές αλλαγές. Το σημαντικότερο όμως ήταν η έρευνα νέων, υπάρχοντων στην βιβλιογραφία, μαθηματικών μοντέλων και η επιλογή κάποιων εξ αυτών με κριτήριο το παραπάνω, δηλαδή την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, την διαθεσιμότητα στοιχείων και συντελεστών και τελικά τη δυνατότητα ενσωμάτωσής τους στον κώδικα του προγράμματος. Τέλος, σημαντική προσθήκη, που θα δειχθεί στα επόμενα κεφάλαια, ήταν αυτή της αβεβαιότητας και των skimmers και πως αυτά επηρεάζουν τα αποτελέσματα του προγράμματος

Τα νέα μοντέλα που προστέθηκαν, αφορούν διεργασίες και χαρακτηριστικά τα οποία περιγράφονται στο παρόν κεφάλαιο και αφορούν ορισμένες σημαντικές παραμέτρους που επηρεάζουν τη γήρανση μιας πετρελαιοκηλίδας ενώ ορισμένα είναι συμπληρωματικά μοντέλα/εξισώσεις της αρχικής έκδοσης του προγράμματος SpillSolver. Τέλος, στο νέο ενημερωμένο πρόγραμμα λαμβάνονται υπόψη καιρικά στοιχεία, όπως η ταχύτητα του ανέμου σε διάφορα ύψη από την επιφάνεια της θάλασσας, καθώς και η ταχύτητα των θαλάσσιων ρευμάτων.

Τα παλαιά μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιεί το SpillSolver 2.0 και ανήκουν στις προσωπικές εργασίες των Korros & Chatzikonstantinou, περιγράφονται στο Παράρτημα Α για χάρη μιας συνολικής επισκόπησης, ενώ στο Παράρτημα Β, ενδεικτικά αναφέρονται μερικά από τα μοντέλα που εντοπίστηκαν στην βιβλιογραφία που όμως δεν προστέθηκαν στη νέα ανανεωμένη έκδοση.

3.2 - Εκβρασμός στην ακτή (Stranding)

3.2.1 – Μέγιστη χωρητικότητα της ακτής σε πετρέλαιο

Όταν συμβαίνουν ατυχήματα πετρελαιοκηλίδων ενώ οι άνεμοι πνέουν προς την ακτή, το πετρέλαιο μπορεί να εκβραστεί στις γειτονικές ακτές. Όμως, η παρατήρηση μεγάλων πετρελαιοκηλίδων δείχνει ότι η δυνατότητα της ακτής να συγκρατήσει πετρέλαιο είναι περιορισμένη. Μόλις το πετρέλαιο φτάσεις στην ακτή, εκτίθεται στις διεργασίες μεταφοράς μακριά από την ακτή. Η μέγιστη χωρητικότητα της ακτής σε πετρέλαιο μπορεί να εκφραστεί ως: (Zhi-Wei et al., 2000)

$$\mathbf{C}_{\max} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{n}_{eff}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
C _{max}	Μέγιστος όγκος πετρελαίου στην ακτή - (m^3)
L	Μήκος του εδάφους της ακτής (ιζήματα) - (m)
W (m)	Πλάτος του εδάφους της ακτής (ιζήματα) - (m)
D (m)	Βάθος του εδάφους της ακτής (ιζήματα) - (m)
η_{eff}	Ενεργό πορώδες των ιζημάτων της ακτής (0,12-0,46)

Μια πετρελαιοκηλίδα μπορεί να εισέλθει ξανά στη θάλασσα, αφού προσεγγίσει την ακτή. Το αποτέλεσμα αυτό επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως οι ιδιότητες του πετρελαίου, ο τύπος της ακτής, τα παράκτια ρεύματα λόγω του ανέμου και τα ρεύματα των κυμάτων. Είναι σχεδόν αδύνατη η δημιουργία ενός μοντέλου που να περιλαμβάνει όλους τους παράγοντες, λόγω των περιορισμένων διαθέσιμων δεδομένων.

Όπως προαναφέρθηκε, το πετρέλαιο μπορεί να φτάσει στην ακτή και να εισέλθει ξανά στο νερό. Ως τώρα, η αλληλεπίδραση πετρελαίου-ακτής μελετάται μέσω εμπειρικών διατυπώσεων λόγω των σύνθετων διεργασιών και των περιορισμένων διαθέσιμων δεδομένων. Η παράμετρος της ικανότητας συγκράτησης πετρελαίου, η οποία δείχνει πόσο πετρέλαιο ανά μονάδα εμβαδού θα κρατήσει η ακτή για δεδομένο τύπο ακτής, ορίζεται ώστε να ποσοτικοποιήσει την αλληλεπίδραση του πετρελαίου με την ακτή. Όταν προσεγγίζεται η σταθερά συγκράτησης πετρελαίου, το πετρέλαιο ξεκινά να υφίσταται διαδικασίες μεταφοράς μακριά από την ακτή.

Η τύχη των πετρελαιοκηλίδων που πλησιάζουν την ακτή εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πετρελαίου, τον τύπο της ακτής και το ενεργειακό περιβάλλον. Ο αλγόριθμος εκβρασμού βασίζεται στα δεδομένα και στην ανάλυση των Reed και Grundlach. Η απόθεση πετρελαίου ξεκινά όταν μια κηλίδα πετρελαίου διασχίζει την επιφάνεια της ακτής και σταματά όταν προσεγγίζεται η σταθερά συγκράτησης όγκου για την επιφάνεια ακτής. Λόγω του ότι το επιπλέον πετρέλαιο δε μπορεί να παραμείνει στην επιφάνεια της ακτής, επιπλέει και μεταφέρεται ξανά στη θάλασσα από τα ρεύματα των κυμάτων και την μετατόπιση από τον άνεμο. Το πετρέλαιο απομακρύνεται εκθετικά με το χρόνο. Η σταθερά συγκράτησης και ο ρυθμός απομάκρυνσης είναι συναρτήσεις του ιξώδους του πετρελαίου και του τύπου της ακτής.
3.2.2 - Ρυθμός απομάκρυνσης πετρελαίου από την ακτή και παραμένων όγκος πετρελαίου

Ο ρυθμός αλληλεπίδρασης μεταξύ ακτογραμμής/ πετρελαίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το προφίλ των κυμάτων της περιοχής, την κατάσταση γήρανσης του εισερχόμενου πετρελαίου, το τοπικό παλιρροιακό μοτίβο και την έντασή του, και από τη σύσταση και τη φυσική δομή της ακτογραμμής. Το πετρέλαιο διεισδύει στο υπόστρωμα των διαφορετικών τύπων ακτογραμμής ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων και την απόσταση μεταξύ των σωματιδίων. Ένας τύπος ακτής που είναι πολύ δύσκολο να καθαριστεί είναι οι ακτές με βότσαλο ή χαλίκι, διότι το πετρέλαιο διεισδύει σε μεγάλο βάθος μέσω των κενών μεταξύ των χαλικιών. Επίσης, διαφορετικοί τύποι πετρελαίου διεισδύουν και προσροφώνται το καθένα με διακριτό τρόπο. Συνεπώς ο βαθμός διείσδυσης και προσρόφησης μεταφράζεται σε βαθμό δυσκολίας απομάκρυνσης του πετρελαίου. (Ventikos, 2006)

Γενικά, το βάθος στο οποίο διεισδύει το πετρέλαιο εξαρτάται από το ιξώδες του πετρελαίου και το μέγεθος σωματιδίων του ιζήματος. Τα μεγαλύτερα σωματίδια επιτρέπουν στο πετρέλαιο να διεισδύσει ευκολότερα. Η συγκράτηση του πετρελαίου μέσω της προσρόφησης στα σωματίδια είναι χαμηλότερη σε «χοντρή» άμμο επιτρέποντας στο πετρέλαιο να εκπλένεται ταχέως μέσω της δράσης των κυμάτων και των ρευμάτων. Ο ρυθμός φυσικού καθαρισμού μιας ακτής είναι συνάρτηση κυρίως του προφίλ των κυμάτων και του βαθμού στον οποίο ο ακτή είναι εκτεθειμένη στο κύμα. Όσο δυνατότερο το κύμα, τόσο μεγαλύτερη η διάλυση της πετρελαιοκηλίδας.

Μετά την μεταφορά λόγω των ρευμάτων, η εναπόθεση του πετρελαίου στην ακτή συμβαίνει μέχρι να προσεγγιστεί μια δεδομένη ικανότητα συγκράτησης της ακτογραμμής, βάσει του μεγέθους των κόκκων, της κλίσης της ακτής και των χαρακτηριστικών του πετρελαίου. Κατά τη διάρκεια της άμπωτης, το πετρέλαιο είναι δυνατό να εναποτεθεί στην ακτή. Κατά τη διάρκεια της παλίρροιας, το νέο πετρέλαιο που έχει μόλις εναποτεθεί επιπλέει ξανά, ανάλογα με τη δράση των κυμάτων, το βαθμό ανάμειξης με το ίζημα και τον τύπο της παραλίας. Παρόλο που το φαινόμενο αυτό έχει επιβεβαιωθεί οπτικά πολλές φορές, είναι λίγες οι μετρήσεις που υπολογίζουν το ποσό του πετρελαίου που απομακρύνεται ανά μέρα.

Η μεγαλύτερη επίπλευση προκύπτει σε περιπτώσεις κατά τις οποίες ένα λεπτό στρώμα νερού αποτίθεται μεταξύ του πετρελαίου και του ιζήματος και η πραγματική επαφή του πετρελαίου με το ίζημα είναι ελάχιστη. Καθώς η επαφή αυτή αυξάνεται όταν η ακτή είναι στεγνή (ανώτερα τμήματα) και με πιο χονδροειδείς κόκκους, το στρώμα του πετρελαίου σπάει και το πετρέλαιο μπορεί να προσροφηθεί ή να αναμιχθεί με το ίζημα, μειώνοντας σημαντικά την επίπλευση (Grundlach & Reed, 1986). Για τη διαδικασία της επίπλευσης υπάρχουν μόνο περιορισμένα δεδομένα από τα οποία μπορεί να προσδιοριστεί ο ρυθμός της. Το φαινόμενο γίνεται πιο πολύπλοκο λόγω ασυνήθιστων κλιματικών συνθηκών ή γεωγραφικών συνθηκών. Το συντελεστής απομάκρυνσης (K_f) βασίζεται στην εφαρμογή μιας απλής εξίσωσης πρώτης τάξης που προσδιορίζει τον εκτιμώμενο ημερήσιο ρυθμό με τον οποίο το πετρέλαιο απομακρύνεται από την ακτογραμμή, υπό την προϋπόθεση ότι βρίσκεται εντός της περιοχής που βρέχεται από την παλίρροια και τα κύματα. Δηλαδή θεωρείται ότι το πετρέλαιο αν εναποτεθεί ψηλά από την ακτογραμμή όπως γίνεται κατά τη διάρκεια ισχυρής θύελλας, θα υποστεί μόνο χημικές και όχι φυσικές διεργασίες. Ο τύπος υπολογισμού είναι ο ακόλουθος: (Ventikos, 2006)

$M_i = M_{io} \cdot e^{-K_f \cdot t}$

Μεγέθη Ερμηνεία

Μ_i Η μάζα (ή όγκος) του πετρελαίου στο i τμήμα της ακτής
 Η μάζα (ή όγκος αντίστοιχα) του πετρελαίου που αρχικά εναποτίθεται
 M_{io} στο i τμήμα της ακτής, το οποίο έχει ήδη υπολογιστεί από το μοντέλο εκβρασμού στην ακτή
 t Ο χρόνος σε μέρες, από την αρχική απόθεση
 Ο ανθμός απομάκουνσης που βασίζεται στην εκθετική μείωση που

 K_{f} Ο ρυθμός απομάκρυνσης που βασίζεται στην εκθετική μείωση που χαρακτηρίζει το ρυθμό απώλειας πετρελαίου για κάθε τύπο ακτής

Ειδικά το K_f , εξαρτάται από τον τύπο της ακτής και την κυματική δραστηριότητα και επιλέγεται από το χρήστη σύμφωνα με τις ακόλουθες επιλογές:

Τύπος παραλίας	$\mathbf{K_{f}}$
Βραχώδης εκτεθειμένη	0,94
Βραχώδης προστατευμένη	0,03
Αμμώδης με χαμηλό κύμα (<1 m)	0,20
Αμμώδης με μεγάλο ύψος κύματος (>1 m)	0,55
Με βότσαλο και χαμηλό ύψος κύματος (<1 m)	0,10
Με βότσαλο και μεγάλος ύψος κύματος (>1 m)	0,45
Με βότσαλο και παλίρροια	0,96

3.3 - Μεταβολή ταχύτητας ανέμου ανάλογα με το ύψος (Wind equation)

Γενικά τα θεωρητικά μοντέλα υποθέτουν ότι το πετρέλαιο διασπείρεται και εξαπλώνεται προς σχηματισμό κηλίδας κυκλικής μορφής και ομοιόμορφου πάχους. Στην πραγματικότητα, η κηλίδα του πετρελαίου δέγεται την επίδραση του ανέμου καθώς και της κίνησης του νερού. Ο άνεμος τείνει να επιμηκύνει την κηλίδα και με τη συνδυασμένη επίδραση ανέμου και κίνησης του νερού διαμορφώνει παγύτερα στρώματα πετρελαίου που ευθυγραμμίζονται με την κατεύθυνση του επικρατούντος ανέμου. Αυτό οδηγεί σε κηλίδες οι οποίες εκτείνονται σε μήκη χιλιομέτρων με πλάτη εκατοντάδες μέτρα. Παρόλα μερικές αυτά η συνολική επιφάνεια της πετρελαιοκηλίδας προσεγγίζει τη θεωρητική κηλίδα. Επίσης εντός της κηλίδας, το πετρέλαιο είναι ανομοιόμορφα διασπαρμένο ενώ και το πάχος της μεταβάλλεται σημαντικά.

Τα περισσότερα μοντέλα γήρανσης βασίζονται σε ταχύτητες ανέμου σε ύψος αναφοράς 10m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Τα δεδομένα ανέμου που έχουν μετρηθεί σε διαφορετικό ύψος πρέπει να προσαρμόζονται με βάση τη ύψος αναφοράς. Ο ακόλουθος τύπος παρέχει λογικά αποτελέσματα, με την προϋπόθεση ότι το ύψος μέτρησης του ανέμου είναι λιγότερο από 20m. (McNutt et al. 2010)

$$\mathbf{U_{z}} = \frac{\mathbf{U_{10}}}{(\frac{\mathbf{10}}{\mathbf{z}})^{1/7}}$$

Μεγέθη Ερμηνεία
 U₁₀ Ταχύτητα ανέμου σε ύψος 10 m
 U_z Ταχύτητα στο ύψος που θέλουμε να υπολογίσουμε
 Υψος μέτρησης ανέμου (μέχρι 20m) - (m)

3.4 - Μετατόπιση του κέντρου μάζας της πετρελαιοκηλίδας οφειλόμενη στον άνεμο και σε ρεύματα (Drift due to Winds and Currents)

Η επίδραση των ανέμων και των ρευμάτων μπορεί να διαχωριστεί από την εξάπλωση. Στην πραγματικότητα, τα δύο φαινόμενα υπερτίθενται, καθώς οι διεργασίες εξάπλωσης σε ήρεμα θάλασσα αποτελούν αναπότρεπτες διεργασίες που συμβαίνουν και όταν τα ρεύματα οδηγούν τη ροή σε συγκεκριμένη κατεύθυνση. (Weaver et al., 2004)

Η μετατόπιση του κέντρου μάζας της πετρελαιοκηλίδας δίνεται από τον ακόλουθο τύπο (νόμος 3%):

$$\frac{\mathrm{dx}}{\mathrm{dt}} = \mathrm{U_c} + \mathrm{0.03} \cdot \mathrm{U_a} = \mathrm{U_c} + \mathrm{U_w}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
dx/dt	Μετατόπιση κέντρου μάζας της πετρελαιοκηλίδας (διανυσματικό μέγεθος)
Uc	Ταχύτητα ρεύματος (διανυσματικό μέγεθος) 0,6 kn → μέση ταχύτητα ρευμάτων βόρειου ισημερινού, 2,0 kn → μέγιστη ταχύτητα ρευμάτων βόρειου ισημερινού, 0,7 kn → μέση ταχύτητα ρευμάτων νότιου ισημερινού 2,5 kn → μέγιστη ταχύτητα ρευμάτων νότιου ισημερινού
U _w	Ταχύτητα μετατόπισης λόγω του ανέμου (διανυσματικό μέγεθος) Ισχύει ότι U _w = 0.03U _a
U_{α}	Ταχύτητα ανέμου (διανυσματικό μέγεθος)

Ο συντελεστής 0,03 οφείλεται στις διαφορετικές πυκνότητες αέρα – νερού.

3.5 - Σενάρια διαρροής πετρελαίου (Leaking tankers)

Σε μια διαρροή πετρελαίου από δεξαμενόπλοιο, η δεξαμενή αντιμετωπίζεται ως ιδανική κυλινδρική δεξαμενή. Μπορούν να αναγνωριστούν τρία διαφορετικά σενάρια διαρροής. (McNutt et al., 2010)

3.5.1 - Ρυθμός διαρροής πετρελαίου

<u>Σενάριο 1:</u>

Η απλούστερη περίπτωση είναι η εκροή πετρελαίου λόγω ανοίγματος που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του νερού, με την δεξαμενή να είναι έτσι ανοικτή στην ατμόσφαιρα. Τότε, ο ρυθμός διαρροής προσδιορίζεται αυστηρά από την εξίσωση του Bernoulli. Το άνοιγμα της δεξαμενής είναι πάνω από τη στάθμη του νερού και η διαρροή γίνεται στον αέρα προτού καταλήξει στο νερό.

Ο ρυθμός τότε, της διαρροής του πετρελαίου είναι:

$$\mathbf{Q}_{oil} = \mathbf{A}_{hole} \cdot \mathbf{C}_{D} \cdot \sqrt{2 \cdot \mathbf{g} \cdot (\mathbf{Z}_{oil} - \mathbf{Z}_{hole})}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
Q_{oil}	Ρυθμός διαρροής πετρελαίου - (m ³ /s)
A _{hole}	Επιφάνειας ανοίγματος - (m ²)
C _D	Συντελεστής οπισθέλκουσας (0,1)
Z_{oil}	Ύψος επιπέδου πετρελαίου στη δεξαμενή - (m)
Z _{hole}	Ύψος ανοίγματος στη δεξαμενή (θέση) - (m)

 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

3.5.2 - Ύψος ισορροπίας

Σενάριο 2:

Αν το άνοιγμα βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του νερού, έχουμε και εισροή νερού στη δεξαμενή και διαρροή πετρελαίου στη θάλασσα. Ο καθοριστικός παράγοντας είναι το ύψος ισορροπίας:

$$\mathbf{Z}_{eq} = \frac{\mathbf{\rho}_{w} \cdot \mathbf{Z}_{w} - \mathbf{\rho}_{oil} \cdot \mathbf{Z}_{oil}}{\mathbf{\rho}_{w} - \mathbf{\rho}_{oil}}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
Z _{oil}	Ύψος επιπέδου πετρελαίου στη δεξαμενή - (m)
Z _{hole}	Ύψος ανοίγματος στη δεξαμενή (θέση) - (m)
Z_{eq}	Επίπεδο ισορροπίας - (m)
Z_{w}	Ύψος στάθμης νερού σε σχέση με το άνοιγμα της δεξαμενής - (m)
p_{oil}	Πυκνότητα πετρελαίου – (kg/m^3)
$p_{\rm w}$	Πυκνότητα νερού (999kg/m ³)

Αυτό μας δείχνει ότι αν το ύψος ισορροπίας είναι πάνω από το ύψος του ανοίγματος, θα εισρεύσει μόνο νερό στη δεξαμενή, διαμορφώνοντας ένα πυθμένα νερού. Αν το ύψος ισορροπίας είναι κάτω από το ύψος του ανοίγματος θα διαρρεύσει μόνο πετρέλαιο, έως ότου το ύψος ισορροπίας φθάσει το ύψος του ανοίγματος, οπότε θα συμβαίνει και εισροή νερού και εκροή πετρελαίου.

3.5.3 - Κενό εντός της δεξαμενής

Σενάριο 3:

Το τρίτο σενάριο διαρροής είναι η περίπτωση όπου η δεξαμενή δεν είναι ανοικτή στην ατμόσφαιρα και σχηματίζεται κενό εντός της δεξαμενής, επιβραδύνοντας την

απελευθέρωση του πετρελαίου και προκαλώντας αναρρόφηση αέρα, ώστε να εξισορροπηθεί η πίεση. Η περίπτωση αυτή συμβαίνει αν η ανακουφιστική βαλβίδα κενού της δεξαμενής έχει καταστραφεί ή έχει σκόπιμα κλειστεί από το πλήρωμα ώστε να επιβραδυνθεί η απελευθέρωση του πετρελαίου.

3.6 - Εκτίμηση της μεταβολής του όγκου της πετρελαιοκηλίδας με την πάροδο του χρόνου

Η συμπεριφορά μιας πετρελαιοκηλίδας εξαρτάται όχι μόνο από τι επικρατούσες συνθήκες της περιοχής, αλλά και από τις φυσικοχημικές ιδιότητες του ίδιου του πετρελαίου – καυσίμου. Και ενώ οι συνθήκες εξαρτώνται σημαντικά από την τοποθεσία και το χρόνο, οι ιδιότητες μεταβάλλονται σημαντικά με την αλληλεπίδρασή τους και την κίνηση του πετρελαίου. Ένα επαρκές και αντιπροσωπευτικό μοντέλο γήρανσης – τύχης μιας πετρελαιοκηλίδας πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές στη σύνθεσή του πετρελαίου λόγω απωλειών των πτητικών και διαλυτών κλασμάτων του, καθώς και σχηματισμού γαλακτώματος πετρελαίου – ύδατος.

Η διαδικασία της εξάτμισης, σε συνδυασμό με τη διαλυτοποίηση και το σχηματισμό μους (πετρελαίου), οδηγεί σε αύξηση του όγκου της πετρελαιοκηλίδας σύμφωνα με τον τύπο: (Guo et al., 2009)

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{V_o} \cdot [\mathbf{1} - (\mathbf{F_E} + \mathbf{F_D})]}{\mathbf{1} - \mathbf{Y_W}}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
V	Όγκος του πετρελαίου
Vo	Αρχικός όγκος του πετρελαίου
F _D	Κλάσμα του διαλυτοποιημένου πετρελαίου
F _E	Απώλειες πετρελαίου λόγω εξάτμισης
Y _W	Περιεχόμενο νερό στο γαλάκτωμα

3.7 - Εξίσωση πρόβλεψης του αρχικού όγκου της πετρελαιοκηλίδας

Το συγκεκριμένο μοντέλο αφορά μια εξίσωση πρόβλεψης με βάση την πυκνότητα του πετρελαίου, την ταχύτητα του ανέμου, το χρόνο της κηλίδας και την επιφάνειά της. Η συγκεκριμένη εξίσωση είναι η ακόλουθη και είναι μοντέλο των Lehr et al. (1983). Σύμφωνα με αυτήν, είναι εφικτό, σε κάποια φάση της κηλίδας μας, να υπολογίσουμε τον όγκο της πριν από ορισμένο χρόνο.

$$V_{o} = \left[\frac{\rho_{o}}{\rho_{w} - \rho_{o}}\right] \cdot \{(1/2 \cdot b_{2}) \cdot [-b_{1} + (b_{1}^{2} + 4 \cdot A \cdot b_{2})^{\frac{1}{2}}]\}^{3}$$

Όπου

$$b_1 = 0.04 \cdot W^{4/3} \cdot t$$

 $b_2 = 2.27 \cdot t^{1/2}$

Μεγέθη	Ερμηνεία
V _o	Αρχικός όγκος του πετρελαίου (barrels)
ρ_{o}	Πυκνότητα των σταγονιδίων πετρελαίου - (kg/m^3)
$ ho_{w}$	Πυκνότητα του θαλασσινού νερού - (1025 kg/m ³)
А	Αρχική επιφάνεια που καταλαμβάνει η πετρελαιοκηλίδα ($10^3~{\rm m}^2)$
W	Ταχύτητα ανέμου στην περιοχή – (knots)
t	Χρόνος - (min)

3.8 - Συνολικός χρόνος εξάτμισης (Total evaporation time)

Το συγκεκριμένο μοντέλο εξίσωσης (Fingas et al., 1995) δημιουργήθηκε με τη βοήθεια μιας μικρής αεροσύρραγγας και εξέτασε την εξάτμιση της βενζίνης καθώς και μεσαίων κλασμάτων του πετρελαίου. Ο παρατηρούμενος ρυθμός εξάτμισης της βενζίνης ήταν αρκετά υψηλότερος από τις προβλέψεις, ενώ για το αργό πετρέλαιο ήταν αρκετά χαμηλότερος από ότι αναμενόταν. Από τη άλλη βέβαια ο ρυθμός εξάτμισης ήταν αρκετά κοντά οπότε ή εξίσωση έγινε αποδεκτή για περαιτέρω χρήση στο μοντέλο. Αυτή συσχετίζει τη μείωση του πάχους της πετρελαιοκηλίδας με το χρονικό διάστημα που θα συμβεί αυτό.

Η εξίσωση του Pasquill's για τον υπολογισμό του συνολικού χρόνου εξάτμισης είναι η εξής:

 $t = \frac{\Delta h \cdot D^B}{K_{ev} \cdot u^a} \cdot \sum \frac{1}{p \cdot M}$

Μεγέθη	Ερμηνεία
t	Συνολικός χρόνος εξάτμισης - (hours)
Δh	Μείωση του πάχους της πετρελαιοκηλίδας - (m)
D	Διάμετρος της πετρελαιοκηλίδας – (m)
В	Μετεωρολογική σταθερά (0,11)
K _{ev}	Suntelesthz staberóthtaz thz atmósquiraz (1,2 \cdot 10 ⁻⁸)
u	Ταχύτητα ανέμου - (m/s)
a	Μετεωρολογική σταθερά (0,78)
Μ	Μοριακό βάρος των ενώσεων του πετρελαίου
р	Πίεση ατμών στην απόλυτη θερμοκρασία Τ

Όπου το p υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση: (Fingas et al., 1995)

$$\frac{\log p_s}{p} = 5[\frac{T_b - T}{T}]$$

με

Τ = απόλυτη θερμοκρασία

 $T_b = θ$ ερμοκρασία βρασμού σε K

 $p_s = τ$ άση ατμών στο σημείο βρασμού

To logps υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\log p_{s} = 3,204 \cdot \left(1 - 4 \cdot \frac{T_{b} - 41}{1393 - T_{b}}\right)$$

Δεδομένα για τα μοριακά βάρη και τις θερμοκρασίες βρασμου T_b (K) των διαφόρων τύπων και των κλασμάτων πετρελαίου, βρέθηκαν και δίνονται στον παρακάτω πίνακα: (Enbridge Pipelines Inc, 2013, National Oil Spill Contingency Plan, 2013)

	Μοριακά βάρη (Μ)				
Τύπος πετρελαίου	total	LPG	Βενζίνη	Κηροζίνη	Μαζούτ
Kuwait	417,7	0,9	28	52,8	336
Qatar	386,35	0,81	24,4	73,44	287,7
Ekofisk	330,075	1,575	31	84	213,5
Iranian	416,05	0,81	15	78,24	322
Arabian	415,375	0,675	20,5	79,2	315
Sarir	433,48	0,9	16,4	80,88	335,3
Nigerian	331,15	1,35	26	100,8	203
Statfjord	330,075	1,575	31	84	213,5
Θερμοκρασία βρασμού Τ _b (K)		236,65	377,15	487,15	657,15

Πίνακας 3.1: Μοριακά βάρη και θερμοκρασίες βρασμού των διαφόρων τύπων πετρελαίου

3.9 - Κατακόρυφη ανάμιξη (Vertical mixing)

Το μοντέλο αυτό (Wang et al., 2008) προσδιορίζει τις ταχύτητες άνωσης των σταγονιδίων του πετρελαίου στο νερό, έπειτα από το φαινόμενο της διασποράς. Η ταχύτητα αυτή προσδιορίζεται από το μέγεθος τους, το ιξώδες του θαλασσινού νερού και τη διαφορά πυκνότητας μεταξύ του θαλασσινού νερού και του πετρελαίου. Η κρίσιμη διάμετρος των σταγονιδίων πετρελαίου προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$d_{c} = \frac{9,52 \cdot \nu^{2/3}}{g^{\frac{1}{3}} \cdot (1 - \frac{\rho_{o}}{\rho_{w}})^{1/3}}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
d _c	κρίσιμη διάμετρος των σταγονιδίων πετρελαίου – (m)
ρ _o	πυκνότητα των σταγονιδίων πετρελαίου - (kg/m^3)
$ ho_{ m w}$	πυκνότητα του θαλασσινού νερού (1025 kg/m ³)
V	ιξώδες θαλασσινού νερού (1,05 \cdot 10 ⁻⁶ m ² s ⁻¹)
g	επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/s ²)

Για σταγόνες διαμέτρους $d_i \!\!< d_c$, προκύπτει από το νόμο του Stokes η σταθερή ταχύτητα άνωσης:

$$u_{LS} = \frac{g \cdot d_i^2 \left(1 - \frac{\rho_o}{\rho_w}\right)}{18 \cdot \nu}$$

Για σταγόνες διαμέτρους $d_i > d_c$ ο νόμος του Reynolds δίνει σταθερή ταχύτητα άνωσης ίση με:

$$u_{LR} = \sqrt{\frac{8}{3} \cdot g \cdot d_i \cdot \left(1 - \frac{\rho_o}{\rho_w}\right)}$$

Ύστερα από εργαστηριακές έρευνες, η κατανομή της κατακόρυφης διάχυσης της διαμέτρου των σταγόνων πετρελαίου είναι τυχαία κατανομή με μέση τιμή 250μm και απόκλιση 75μm.

3.10 - Ρυθμός εξάπλωσης (Rate of spreading)

Το συγκεκριμένο μοντέλο (Sebastiao et al., 1995) δείχνει το ρυθμό μεταβολής της επιφάνεια της πετρελαιοκηλίδας. Χρησιμοποιείται για μοντέλα πετρελαιοκηλίδων στα οποία οι μεταβλητές τους μεταβάλλονται ταυτόχρονα.

$$\frac{\mathrm{dA}}{\mathrm{dt}} = \mathrm{K}_1 \cdot \mathrm{A}^{1/3} \cdot [\frac{\mathrm{V}_{\mathrm{m}}}{\mathrm{A}}]^{4/3}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
A	Επιφάνεια πετρελαιοκηλίδας - (m^2)
K_1	Σ ταθερά = 150 s ⁻¹
\mathbf{V}_{m}	Όγκος πετρελαιοκηλίδας - (m 3)
t	Χρόνος - (s)

3.11 - Ρυθμός παράσυρσης (Entrainment of oil to the water column)

Φυσική διασπορά του αργού πετρελαίου και των διυλισμένων προϊόντων μετά τη διαρροή στη θάλασσα είναι η διαδικασία σχηματισμού μικρών σταγόνων, οι οποίες ενσωματώνονται στην υδάτινη στήλη. Πέραν της εξάτμισης, ο ρυθμός της φυσικής συναγωγής προσδιορίζει σε μεγάλο βαθμό τη ζωή της πετρελαιοκηλίδας στην επιφάνεια της θάλασσας. Στην πράξη, η φυσική συναγωγή μπορεί να είναι σημαντική και είναι υπεύθυνη για ένα μεγάλο μέρος της απομάκρυνσης πετρελαίου από την επιφάνεια της θάλασσας.

Η φυσική διασπορά μειώνει τον όγκο της πετρελαιοκηλίδας στην επιφάνεια και μειώνει τις εξατμιστικές απώλειες, αλλά δεν οδηγεί σε αλλαγές στις φυσικοχημικές ιδιότητες του υλικού που έχει διαρρεύσει με τον τρόπο που προκαλεί η εξάτμιση. Γενικά, τα γαλακτώματα πετρελαίου σε νερό δεν είναι σταθερά και οι σταγόνες πετρελαίου μπορούν να συγχωνεύονται ξανά και να επιστρέφουν στην επιφάνεια ως αναμορφωμένη κηλίδα, ιδιαίτερα σε συνθήκες πολύ ήρεμης θάλασσας, όπου η διασπορά των σταγόνων πετρελαίου στη θάλασσα, δεν ευνοείται.

Η φυσική διασπορά έχει μόνο μερικώς εξηγηθεί και η μαθηματική της περιγραφή είναι ακόμα σε φάση ανάπτυξης. Οι μελέτες δείχνουν ότι η φυσική διασπορά είναι το καθαρό αποτέλεσμα τριών διαφορετικών διεργασιών. Οι διαδικασίες αυτές είναι: η αρχική διαδικασία της δημιουργίας σταγόνων πετρελαίου από την κηλίδα υπό την επίδραση των κυμάτων θραύσης, η διαδικασία της μεταφοράς των σταγόνων πετρελαίου στην υδάτινη στήλη ως καθαρό αποτέλεσμα της δυνάμεις άνωσης και τέλος η διαδικασία της συγχώνευσης των σταγόνων πετρελαίου με την κηλίδα.

Μια ακόμα πολύ σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την φυσική διασπορά είναι η επιφανειακή τάση πετρελαίου-νερού, η οποία επηρεάζει όμως μόνο τη δημιουργία σταγόνων και την συγχώνευση και όχι τη μεταφορά (διασπορά) των σταγόνων πετρελαίου στην υδάτινη στήλη. Η πυκνότητα και το ιξώδες του υλικού που έχει διαρρεύσει επηρεάζουν επίσης τη φυσική διασπορά. Όσο μεγαλύτερο ιξώδες έχει το πετρέλαιο, τόσο χαμηλότερη είναι η δυνατότητά του να σχηματίζει σταγόνες πετρελαίου.

Ο Reed (1989) χρησιμοποιεί μια προσέγγιση η οποία βασίζεται στη διατύπωση του Mackay (1980) για τον υπολογισμό της παράσυρσης ή της διασποράς του εμβαδού πετρελαίου μέσα στην υδάτινη στήλη. Το τμήμα του πετρελαίου στην επιφάνεια της θάλασσας που παρασύρεται από την υδάτινη στήλη υπολογίζεται ως το τμήμα που χάνεται από το πετρέλαιο της επιφάνειας της θάλασσας ανά ώρα και δίνεται από τη σχέση: (Sebastiao et al. 1995)

 $\mathbf{D} = \mathbf{D}_{\mathbf{a}} \cdot \mathbf{D}_{\mathbf{b}}$

όπου

 D_a : το τμήμα της επιφάνειας της θάλασσας που διασπείρεται ανά ώρα D_b : το τμήμα του παρασυρόμενου πετρελαίου που δεν επιστρέφει στην κηλίδα και εκφράζονται ως:

$$D_{a} = 0.11 \cdot (W+1)^{2}$$
$$D_{b} = (1+50 \cdot \mu^{1/2} \cdot \delta \cdot s_{t})^{-1}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
W	ταχύτητα ανέμου (m/s)
μ	ιξώδες (cP)
δ	πάχος πετρελαιοκηλίδας (cm)
s _t	διεπιφανειακή τάση πετρελαίου-νερού (cm $^{-1}$)

Μια νέα εξέλιξη στη μοντελοποίηση πετρελαιοκηλίδων συνίσταται ο χαρακτηρισμός του πετρελαίου σε μια κατανομή σταγόνων, οι οποίες διεισδύουν στο σώμα του νερού λόγω των κυμάτων. Τα αναδυόμενα «πακέτα» πετρελαίου ανοίγουν σε σταγόνες λόγω της τύρβης του περιβάλλοντος νερού. Σε πολλές πετρελαιοκηλίδες (πετρελαιοκηλίδα του Braer) ένας σημαντικός τρόπος μεταφοράς πετρελαίου είναι το κάτω από την επιφάνεια διαχεόμενο πετρέλαιο, το οποίο λόγω αλληλεπίδρασης με τα ιζήματα, προκάλεσε απόθεση 15% στον πυθμένα της θάλασσας.

Κεφάλαιο 4

Περιγραφή και εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος SpillSolver 2.0

4.1 - Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία περιγραφή του προγράμματος και των βημάτων που πρέπει να ακολουθήσει κάποιος, ώστε να χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα SpillSolver 2.0, νεότερη έκδοση του SpillSolver. Το SpillSolver αποτελεί ένα υπολογιστικό πρόγραμμα γραμμένο σε MATLAB, το οποίο δέχεται σαν είσοδο διάφορες φυσικοχημικές και μετεωρολογικές παραμέτρους και εξάγει αποτελέσματα και γραφήματα για τις διάφορες διεργασίες της γήρανσης πετρελαιοκηλίδας. Έγινε αρκετή προσπάθεια έτσι ώστε το συγκεκριμένο μοντέλο προσομοίωσης, να είναι όσο το δυνατόν πιο πλήρες αλλά και ταυτόχρονα χρηστικό. Η παρούσα έκδοση του προγράμματος αυτού αποτελεί αναβαθμισμένη έκδοση του προηγούμενου μοντέλου που δημιουργήθηκε από τους φοιτητές Χατζηκωνσταντίνο και Κόρρο το 2008.

Η βασική έκδοση του SpillSolver περιλαμβάνει τις ακόλουθες διεργασίες της γήρανσης:

- εξάπλωση (spreading)
- εξάτμιση (evaporation)
- διασπορά (dispersion)
- γαλακτωματοποίηση (emulsification)
- φωτοοξείδωση (photooxidation)
- ιζηματοποίηση (sedimentation)

Επίσης το πρόγραμμα υπολογίζει την αύξηση της πυκνότητας και του ιξώδους της κηλίδας.

Σημαντική προσθήκης στην παρούσα εφαρμογή είναι η δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων λαμβάνοντας υπόψη αβεβαιότητα σε ορισμένες από τις παραμέτρους εισόδου. Η αβεβαιότητα υπάρχει σε κάθε μοντέλο πρόβλεψης γήρανσης. Οι τιμές οι οποίες συνήθως εμπεριέχουν τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα είναι:

- Ο όγκος του πετρελαίου που έχει διαρρεύσει. Αν δεν υπάρχει πλήρης διαρροή όλης της ποσότητας του πετρελαίου που υπάρχει στη δεξαμενή, είναι δύσκολος ο προσδιορισμός της ποσότητας
- 2. Η ταχύτητα του ανέμου, διότι συνήθως δίνεται εύρος τιμών.

Όταν επιλέγεται αβεβαιότητα σε μια από τις μεταβλητές αυτές, το μοντέλο εκτελεί επαναλαμβανόμενα τρεξίματα για να προσδιορίσει τα όρια των τελικών αποτελεσμάτων. Η τιμή της αβεβαιότητας που έχει εισαχθεί είναι αυτή του ± 5% της τιμής που εισάγεται. Η δυνατότητα του υπολογισμού τώρα, των μεγεθών υπό αβεβαιότητα γίνεται ύστερα από επιλογή του χρήστη.

Επίσης, στον προϋπάρχοντα κώδικα προστέθηκαν και τα ακόλουθα μοντέλα και υπολογισμοί:

- Εκβρασμός στην ακτή (Stranding)
- Μεταβολή ταχύτητας ανέμου ανάλογα με το ύψος (Wind equation)
- Μετατόπιση του κέντρου μάζας της πετρελαιοκηλίδας οφειλόμενη στον άνεμο και σε ρεύματα (Drift due to winds and currents)
- Σενάρια διαρροής πετρελαίου (Leaking tankers)
- Εκτίμηση της μεταβολής του όγκου της πετρελαιοκηλίδας με την πάροδο του χρόνου
- Μοντέλο πρόβλεψης του αρχικού όγκου της πετρελαιοκηλίδας
- Υπολογισμός του συνολικού χρόνος εξάτμισης (Total evaporation time)
- Κατακόρυφη ανάμιξη (Vertical mixing)
- Ρυθμός εξάπλωσης (Rate of spreading)
- Pυθμός παράσυρσης (Entrainment of oil to the water column)

Όπως θα παρουσιαστούν και σε ακόλουθα κεφάλαια, τα προαναφερθέντα μοντέλα υπολογίζονται με βάση τον αναβαθμισμένο κώδικα προσομοιώσεων και παρουσιάζονται υπό μορφή καμπυλών ή υπό μορφή κομβίων υπολογισμού.

4.2 - Το πρόγραμμα ΜΑΤLAΒ

Το πρόγραμμα MATLAB ουσιαστικά αποτελεί ένα πακέτο λογισμικού για πολύ μεγάλης ακρίβειας μαθηματικούς υπολογισμούς και οπτικοποίηση υψηλής ποιότητας. Πήρε το όνομά του από το MATrix LABoratory και περιλαμβάνει ένα περιβάλλον με εκατοντάδες έτοιμες συναρτήσεις για τεχνικούς υπολογισμούς και γραφικά. Το μεγάλο του πλεονέκτημα όμως, είναι ότι διαθέτει μεγάλη επεκτασιμότητα, κάνοντας χρήση, της δικιάς του υψηλής ποιότητας γλώσσας προγραμματισμού.

Οι έτοιμες συναρτήσεις του ΜΑΤLAB διαθέτουν εξαιρετικά εργαλεία για υπολογισμούς γραμμικής άλγεβρας, ανάλυσης δεδομένων, σημάτων, βελτιστοποίησης, συνήθων διαφορικών εξισώσεων και για πολλούς ακόμα τύπους επιστημονικών υπολογισμών. Οι περισσότερες από αυτές τις συναρτήσεις χρησιμοποιούν τους ιδανικότερους αλγόριθμους. Υπάρχουν επίσης συναρτήσεις για τη δημιουργία διδιάστατων και τρισδιάστατων γραφικών. Επίσης, το ΜΑΤLAB προσφέρει τη δυνατότητα να τρέξουν κώδικες σε γλώσσες προγραμματισμού Fortran και C, μέσα από το δικό του περιβάλλον.

Ο χρήστης ωστόσο, δεν περιορίζεται στις έτοιμες συναρτήσεις που περιέχονται στο πρόγραμμα, καθώς του δίνεται η δυνατότητα να γράψει τις δικές του συναρτήσεις στη γλώσσα του MATLAB. Αυτές οι συναρτήσεις με το που γραφτούν μία φορά, προσφέρονται στον χρήστη σαν έτοιμες συναρτήσεις. Η γλώσσα του MATLAB είναι πολύ εύκολη ως προς την εκμάθηση και τη χρησιμοποίησή της. Το MATLAB διαθέτει ποικιλία από βιβλιοθήκες (toolboxes), οι οποίες αποτελούν συλλογή συναρτήσεων γραμμένων για ειδικές απαιτήσεις, όπως είναι η επεξεργασία εικόνας και οι στατιστικές αναλύσεις. Η λίστα των βιβλιοθηκών αυξάνεται διαρκώς. Σήμερα υπάρχουν περισσότερες από πενήντα τέτοιες βιβλιοθήκες.

Τα κύρια μέρη ενός παραθύρου του MATLAB είναι το Command Window στο οποίο γράφονται και εκτελούνται οι εντολές καθώς και τυπώνονται τα αποτελέσματα και το Command History όπου υπάρχουν οι εντολές που έχουν χρησιμοποιηθεί χωρισμένες ανά κατηγορία.



Σχήμα 4.1: Το προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB

4.3 - Το εγχειρίδιο χρήσης του SpillSolver 2.0

4.3.1 - Το εισαγωγικό παράθυρο

Αρχικά ο χρήστης ανοίγει το πρόγραμμα MATLAB και στο Command Window δίπλα στο Command Prompt, εισάγει το όνομα **Spillsolver** και πατάει **Enter** (Σχήμα 4.1). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ανοίξει το εισαγωγικό παράθυρο (Σχήμα 4.2), στο οποίο αναγράφονται το όνομα του προγράμματος, καθώς επίσης και τα ονόματα των δημιουργών του. Πατώντας το κομβίο **OK**, ο χρήστης ανοίγει το πρόγραμμα SpillSolver 2.0 και του εμφανίζεται το κεντρικό παράθυρο της εφαρμογής.



Σχήμα 4.2: Εισαγωγικό παράθυρο Spillsolver v2.0

4.3.2 - Το Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων της εφαρμογής

Στο κεντρικό παράθυρο της εφαρμογής (Σχήμα 4.3) γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια, πατώντας το κομβίο **Solve** δημιουργούνται οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις. Το περιβάλλον εργασίας επιτρέπει στο χρήστη να πραγματοποιεί όλες τις λειτουργίες μετακινώντας το ποντίκι του υπολογιστή.

Οι ζητούμενες παράμετροι που απαιτούνται από το χρήστη είναι:

- 1. Ο τύπος του πετρελαίου (Oil Type)
- 2. Η επιλογή του τρόπου έκχυσης του πετρελαίου στη θάλασσα (Release).
- 3. Η επιλογή των περιβαλλοντικών συνθηκών (Environmental Conditions).
- 4. Δίνεται επίσης η δυνατότητα επιλογής πετρελαιοσυλλεκτών δηλαδή skimmers (Skimmers Cleanup) για την απομάκρυνση του πετρελαίου.

SpillSolver	
File	۲ ۲
School of Naval Architecture and Marine Engineering National Technical University of Athens Laboratory of Maritime Transport Spiilsolver 2.0	and Marine Engineering :al University of Athens y of Maritime Transport
1. Oil Type	
Choose oil type	
2. Environmental Conditions	
Wind Water Sky	
Wind Velocity : beaufort 💌	
Measuring Height :	
Enable Uncertainty (+/-5%) : 🔲	
Wind Direction : North	
3. Release	
Instant Release Setup ○ Continuous Release Setup	
4. Skimmers Cleanup Skimmer Selection	solve

Σχήμα 4.3: Το κεντρικό παράθυρο της εφαρμογής

<u>1. Oil Type</u>

Η πρώτη παράμετρος που εισάγει ο χρήστης είναι ο τύπος του πετρελαίου που εκχύνεται στην θάλασσα. Για να το κάνει αυτό διαλέγει από μια αναδιπλούμενη λίστα (Drop Down Menu), η οποία βρίσκεται κάτω από την επιλογή Oil Type και δίπλα στη φράση «Choose oil type», μία από τις τιμές που υπάρχουν στη βάση δεδομένων του SpillSolver. Οι επιλογές που μπορεί να κάνει είναι μεταξύ 8 διαφορετικών τύπων πετρελαίων τα οποία είναι τα εξής :

Nigerian Light Sarir Arabian Light Iranian Light Kuwait Ecofisc QatarMarine Statfjord.



Σχήμα 4.4: Επιλογή τύπου πετρελαίου από αναδιπλούμενη λίστα

Η βάση δεδομένων του προγράμματος βρίσκεται στο αρχείο Oillib.dat και ο κάθε χρήστης μπορεί να την ενημερώσει οποιαδήποτε στιγμή με κάποιο πετρέλαιο που τον ενδιαφέρει και που θέλει να μελετήσει τη συμπεριφορά της γήρανσης της πετρελαιοκηλίδας του, απλώς προσθέτοντας το όνομα και τις ιδιότητες του.

Επιλέγοντας τώρα, έναν από τους τύπους πετρελαίου, υπολογίζεται αυτόματα η πυκνότητά του σε (kg/l) και το ιξώδες του (cSt) (Σχήμα 4.5).

		Density	0.833	kg/l
Choose oil type	Sarir	Viscosity	3.62	cSt

Σχήμα 4.5: Υπολογισμός πυκνότητας και ιξώδους επιλεγμένου πετρελαίου

2. Environmental Conditions

Τα επόμενα δεδομένα που θα χρειαστεί να εισάγει ο χρήστης αφορούν τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια της διαρροής του πετρελαίου. Ο χρήστης χρειάζεται να εισάγει πληροφορίες για τους ανέμους, το νερό και την ηλιοφάνεια.

* Wind

Η πρώτη καρτέλα που πρέπει να συμπληρωθεί αφορά τον άνεμο (Wind). Σε αυτήν, ο χρήστης εισάγει την ταχύτητα του ανέμου στο πλαίσιο κειμένου που βρίσκεται δίπλα από το Velocity και διαλέγει τη μονάδα μέτρησης από την αναδιπλούμενη λίστα . Η ταχύτητα του ανέμου είναι by default σε Beaufort, αλλά ο χρήσης μπορεί να επιλέξει μεταξύ των knots, km/h και m/sec. Στη συνέχεια εισάγει το ύψος (σε μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας) στο οποίο επιθυμεί να εισαχθεί το μέτρο της ταχύτητας του ανέμου και στο Wind Direction μπορεί είτε να διαλέξει την κατεύθυνση του ανέμου μεταξύ των 8 βασικών διευθύνσεων είτε με την επιλογή other να προσδιορίσει την ακριβή, σε μοίρες, κατεύθυνση που επιθυμεί και δεν υπάρχει στις επιλογές. Οι 0° αντιστοιχούν στο Βορρά και αυξάνονται ωρολογιακά. Ο χρήστης τέλος, έχει τη δυνατότητα εισαγωγής αβεβαιότητας στην τιμή που έχει εισάγει για την ταχύτητα του ανέμου ενεργοποιώντας την επιλογή «Enable Uncertainty (+/-5%). (Σχήμα 4.6)



Σχήμα 4.6: Επιλογή συνθηκών ανέμου κατά τη διαρροή πετρελαίου

✤ <u>Water</u>

Στη συνέχεια, ο χρήστης επιλέγει με το ποντίκι, την καρτέλα που αφορά το νερό (Water). Σε αυτό αρκεί να επιλεχθεί η θερμοκρασία του νερού, και αυτόματα συμπληρώνεται από τη βάση δεδομένων η τιμή της πυκνότητας «Density». Απαιτούνται επίσης η τιμή της αλατότητας του νερού «Salinity» και το φορτίο ιζήματος «Sediment Load». Οι παράμετροι αυτές έχουν προκαθορισμένες τιμές αλλά ο χρήστης μπορεί να επιλέξει «other» στην αναδιπλούμενη λίστα κάθε παραμέτρου και να εισάγει διαφορετικές τιμές, όπως πριν. Για την παράμετρο Sediment Load η τιμή 5 mg/l αντιστοιχεί σε ωκεανούς ενώ η τιμή 50 mg/l αντιστοιχεί σε εκβολές ποταμών.

		Wind	Water	Sky	
Temperature :	12 🔻	Celcius			
Density :	1026.6	kg/m3			
Salinity :	3.5%	-			
Sediment Load :	5 mg/l	-			

Σχήμα 4.7: Επιλογή συνθηκών νερού κατά τη διαρροή πετρελαίου

* <u>Sky</u>

Η τελευταία καρτέλα που πρέπει να συμπληρωθεί αφορά τις συνθήκες ηλιοφάνειας που επικρατούν κατά τη διάρκεια της μελέτης του φαινομένου της γήρανσης. Ο χρήστης, αν έχει πληροφορίες για κάποιες από τις 5 μέρες μελέτης του φαινομένου της γήρανσης, μπορεί να διαλέξει μεταξύ 5 διαφορετικών επιλογών, ανάλογα με τη ποσόστωση συννεφιάς (Σχήμα 4.8):

- Cloudy
- Mostly Cloudy
- Partly Cloudy
- Mostly Clear
- Clear

Οι τιμές είναι σε φθίνουσα διάταξη, από τον πλήρως συννεφιασμένο ουρανό έως και τον απόλυτα καθαρό ουρανό. Αν ο χρήστης δεν έχει δεδομένα για να συμπληρώσει τη

νέφωση κάποιας ημέρας, το πρόγραμμα λαμβάνει για την ημέρα αυτή, την τιμή της προηγούμενης. Αν καμία από τις επιλογές δεν επιλεχθεί, τότε λαμβάνεται η τιμή της πρώτης μέρας για όλες τις μέρες.

		W	ind Wa	ater S	ky	
	Day 1	2 🔽	3 🔽	4 🗹	5 🔽	
Cloudy	۲	0	0	\odot	0	
Mostly cloudy	\bigcirc	۲	0	0	0	
Partly cloudy	\bigcirc	0	۲	\bigcirc	0	
Mostly clear	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	۲	\bigcirc	
Clear	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	۲	

Σχήμα 4.8: Επιλογή συνθηκών ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια μελέτης της διαρροής πετρελαίου

3. Release

Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή του τρόπου με τον οποίο το πετρέλαιο χύνεται στη θάλασσα, μέσω της επιλογής Release. Ο χρήστης έχει δύο επιλογές: Την στιγμιαία έκλυση (Instant Release) ή την συνεχή έκλυση (Continuous Release), η επιλογή των οποίων γίνεται μέσω radio button.

3. R	elease			
	Instant Release	Setup	Continuous Release	Setup

Σχήμα 4.9: Επιλογή τρόπου έκχυσης πετρελαίου

Η επιλογή του Instant Release γίνεται όταν όλος ο όγκος του πετρελαίου έχει χυθεί μονομιάς στη θάλασσα, ενώ η επιλογή του Continuous Release γίνεται όταν το πετρέλαιο χύνεται στη θάλασσα σταδιακά. Ο ρυθμός με τον οποίο χύνεται το πετρέλαιο στη θάλασσα, μπορεί να είναι σταθερός ή μεταβλητός. Αφού ο χρήστης έχει επιλέξει ένα από τα Instant Release ή Continuous Release, το επόμενο που πρέπει να κάνει είναι να ορίσει τις παραμέτρους της εκάστοτε έκλυσης. Αυτό γίνεται πατώντας το κομβίο **Setup...** το οποίο βρίσκεται δίπλα από την κάθε επιλογή.

✤ Instant Release

Για την επιλογή Instant Release, θα εμφανιστεί στο χρήστη ένα παράθυρο στο οποίο πρέπει να εισάγει την ημερομηνία και την ποσότητα του πετρελαίου που χύθηκε.

Για την ημερομηνία θα πρέπει να διαλέξει από τις αναδιπλούμενες λίστες (Drop Down Menu) που βρίσκονται κάτω από τις επιλογές Day, Month, Hour, τα αντίστοιχα δεδομένα.

Για την ποσότητα του πετρελαίου θα πρέπει ο χρήστης να διαλέξει την μονάδα μέτρησης από την αναδιπλούμενη λίστα που βρίσκεται δίπλα από το Amount Spilled (ποσότητα που έχει εκχυθεί) και να εισάγει στο πλαίσιο κειμένου την αντίστοιχη ποσότητα.

Το πρόγραμμα SpillSolver έχει ως προεπιλεγμένη μονάδα μέτρησης για την ποσότητα, τους μετρικούς τόνους ,αλλά ο χρήστης μπορεί να εισάγει την ποσότητα σε barrels ή m^3 . Ο χρήστης έχει επίσης, τη δυνατότητα εισαγωγής αβεβαιότητας στην τιμή που έχει εισάγει ενεργοποιώντας την επιλογή «uncertainty +/-5% of amount», όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Αφού εισάγει ο χρήστης τις απαραίτητες τιμές πατάει το κομβίο **OK** και το παράθυρο κλείνει. Σε περίπτωση που θέλει να κλείσει το παράθυρο χωρίς να εισάγει τιμές ή αν δε θέλει να κρατηθούν οι τιμές που εισήγαγε και να χρησιμοποιηθούν από το πρόγραμμα, πατάει το κομβίο **Cancel**.

SpillSolver - Instant Release	X					
Spillsolver 2.0 – Instant Release						
Time of Release Day Month 02 03 03	•					
Amount spilled 200 tons						
OK Cancel						

Σχήμα 4.10: Εισαγωγή παραμέτρων για στιγμιαία διαρροή πετρελαίου

* Continuous Release

Για την επιλογή τώρα του Continuous Release, θα εμφανιστεί στο χρήστη ένα παράθυρο, το οποίο μοιάζει με αυτό του Instant Release αλλά συμπληρώνεται με διαφορετικά δεδομένα. Στο πάνελ Duration of Release, κάτω από τις επιλογές Start Date και End Date ο χρήστης συμπληρώνει την ημερομηνία που ξεκίνησε και την ημερομηνία που σταμάτησε η διαρροή πετρελαίου, αντίστοιχα. Η εισαγωγή του Day, Month, Hour γίνεται από αναδιπλούμενη λίστα όπως και στο Instant Release. Αν η διαρροή διήρκησε μόνο κάποιες ώρες τότε ο χρήστης συμπληρώνει μόνο το πεδίο Hour στο End Date, εισάγοντας τις ώρες αυτές.

Το επόμενο που πρέπει να συμπληρωθεί είναι ο ρυθμός με τον οποίο γίνεται η διαρροή. Εδώ ο χρήστης έχει δύο επιλογές. Είτε να επιλέξει σταθερό ρυθμό, είτε να επιλέξει μεταβλητό ρυθμό. Στο σταθερό ρυθμό (Constant Spill Rate) ο χρήστης εισάγει απλώς τον ρυθμό διαρροής, ενώ στο μεταβλητό ρυθμό (Changing Spill Rate) εισάγει τον αρχικό και τον τελικό ρυθμό διαρροής. Οι ρυθμοί διαρροής έχουν προεπιλεγμένη μονάδα (by default) τους μετρικούς τόνους ανά ώρα (tons/hr), αλλά ο χρήστης έχει τη δυνατότητα της επιπλέον επιλογής, μεταξύ barrels ανά ώρα (bl/hr) και κυβικών μέτρων ανά ώρα (m³/hr). Για το συνεχή ρυθμό διαρροής, τέλος, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα εισαγωγής αβεβαιότητας στην τιμή που έχει εισάγει ενεργοποιώντας την επιλογή «Uncertainty +/-5%».

Αφού εισάγει ο χρήστης όλες τις απαραίτητες τιμές, πατάει το κομβίο **OK** και το παράθυρο κλείνει. Στην περίπτωση όμως που θέλει να κλείσει το παράθυρο χωρίς να εισάγει τιμές ή οι τιμές που εισήγαγε δεν θέλει να κρατηθούν για χρήση, πατάει το κομβίο **Cancel.**

SpillSolver - Continuous	Release				×
Spillsolver	2.0 - 0	Contir	uous	Release	
- Duration of Release	Day	M	onth	Hour	
Start Date :	01	• 01	-	0000 👻	
End Date :	01	• 01	-	2300 👻	
Occupie Constant Spill R Constant Spill	ate	Rate :	542	tons/hr 💌	
🔊 Changing Spill I	Rate	Start Rate : Final Rate :		tons/hr 👻]
In case of unce please tick 👿	ertainty +/-5]	5% of spill r	ate measure	ement,	
				OK	
				Cancel	

Σχήμα 4.11: Επιλογή παραμέτρων για συνεχή διαρροή πετρελαίου

4. Skimmers selection

Σημαντική προσθήκη στην ανανεωμένη έκδοση του κώδικα αποτελεί η δυνατότητα εισαγωγής πετρελαιοσυλλεκτών (oil-skimmers), οι οποίοι μπορούν να δεσμεύσουν συγκεκριμένη ποσότητα από αυτή που έχει διαρρεύσει στη θάλασσα. Δίνεται η δυνατότητα να εφαρμοσθούν τέσσερις διαφορετικοί τύποι skimmers και να καθοριστεί το πλήθος τους καθώς και η χρονική διάρκεια της επίδρασής τους. Πρέπει όμως να ολοκληρωθεί ο καθορισμός παραμέτρων του πρώτου τύπου για να μπορέσει ο χρήστης να προχωρήσει σε επόμενο τύπο.

Η δράση του skimmer γίνεται με παρόμοιο τρόπο με αυτόν που γίνεται και ο καθορισμός της συνεχούς διαρροής του πετρελαίου. Επιλέγεται δηλαδή η διάρκεια της δράσης του skimmer, καθώς και ο ρυθμός συλλογής του πετρελαίου σε tn/h, bbl/h, m³/h. Επίσης, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα επιλογής είτε για σταθερό ρυθμό περισυλλογής, είτε για μεταβλητό, όπου ο χρήστης ορίζει το διάστημα λειτουργίας του skimmer.





Σχήμα 4.12: Επιλογή στοιχείων λειτουργίας skimmer

Στη συνέχεια ο χρήστης πατάει το πλήκτρο «Calculate», όπου ο χρήστης θα δει έναν αναλυτικό υπολογισμό της συνολικής λειτουργίας των skimmers και στη συνέχεια πατώντας το πλήκτρο «Apply» εφαρμόζονται οι παράμετροι που καθορίστηκαν για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων.

5. Solve

Το τελευταίο βήμα που πρέπει να κάνει ο χρήστης αφού συμπληρώσει όλα τα δεδομένα εισόδου είναι να πατήσει το κομβίο **solve**. Με το πάτημα του κομβίου θα οδηγηθεί στην καρτέλα των αποτελεσμάτων με τις γραφικές παραστάσεις των μοντέλων που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, καθώς και στα διάφορα κομβία υπολογισμού.



Σχήμα 4.13: Πλήκτρο πραγματοποίησης υπολογισμών

4.4 - Κομβία υπολογισμού

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν τα νέα κομβία υπολογισμών που προστέθηκαν στο υπολογιστικό περιβάλλον του SpillSolver 2.0 και τα οποια έπονται του Solve, δηλαδή βρίσκονται στο SpillSolver - Output. Έτσι θα περιγραφεί η λειτουργία τους, ο τρόπος εισαγωγής δεδομένων από το χρήστη και θα αναλυθεί το αποτέλεσμα που προκύπτει από το εκάστοτε κομβίο. Τα ονόματα που ακολουθούν αφορούν τα ονόματα των κομβίων όπως αυτά εμφανίζονται στο πρόγραμμα, με τυχαία σειρά (Σχήμα 4.14).

Drift	Volume vs Time	Shore	Volume Estimation	Leakage	Evaporation Time
Model Calculation Buttons Model Calcu					

Σχήμα 4.14: Τα κομβία υπολογισμού στο Spillsolver

4.4.1 - Volume vs time

Το συγκεκριμένο κομβίον αφορά τον υπολογισμό της εξέλιξης του όγκου της πετρελαιοκηλίδας με την πάροδο του χρόνου. Η εξίσωση του μοντέλου παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (3.6). Έτσι, ο χρήστης ορίζει την ώρα αναφοράς που θέλει να υπολογίσει τον όγκο της κηλίδας, στο κελί «Time reference». Οι τιμές που μπορούν να εισαχθούν στο κελί είναι από 0 (αρχή του φαινομένου) μέχρι τις 120 ώρες (5 ημέρες), όπου και μελετάται η εξέλιξη του φαινομένου της γήρανσης. Ο χρήστης στη συνέχεια πρέπει να πατήσει «Preset Parameters», έτσι ώστε να υπολογιστούν και να εισαχθούν αυτόματα οι τιμές από την γαλακτωματοποίηση, την διαλυτότητα και τις απώλειες της εξάτμισης, την ανάλογη χρονική στιγμή που θα έχει οριστεί προηγουμένως. Τέλος, ο χρήστης πρέπει να πατήσει το κομβίο «Calculate» έτσι ώστε να υπολογιστεί η τιμή του όγκου σε m³. Τα παρακάτω σχήματα παρουσιάζουν χαρακτηριστικά παραδείγματα υπολογισμών. Τέλος, όπως θα δειχθεί και στο επόμενο κεφάλαιο, υπάρχει διάγραμμα Remaining Oil βασισμένο στο μοντέλο αυτό.

📣 Remaining Oil Volume vs Time	2	
	Spillsolver 2.0 - ouput - button: Volu	me vs Time
To see the matching on	and place incost data click calculate class this tab and outp	ut click solve again and then chaose the graph
	apri, please insert data, click calculate, close trus tab and outp	ut, cick solve again and then choose the graph.
Initial Spill Volume.	55.2047 m^3	
Martin in Truchian		
Water in Emulsion:	0.029133	Oil Volume (time):
Time Reference.	0 Hours	52.3277 m^3
Preset Parameters		
Solubility (Fd):	3.28919e-006 m^3/s	
Evaporation Losses (Fe):	0.0797261 m^3/s	Calculate

Σχήμα 4.15: Παράθυρο υπολογισμού της εξέλιξης του όγκου με την πάροδο του χρόνου για t=0 (αρχή φαινομένου)

Remaining Oil Volume vs Tim	e		
	Spillsolver 2.0 - ouput -	button: Volume	vs Time
To see the matching gr	aph, please insert data, click calculate, close	this tab and output,	click solve again and then choose the graph.
Initial Spill Volume:	55.2047	m^3	
Water in Emulsion.	0.029133		Oil Volume (time)
			25.6781 m^3
Time Reference.	120	Hours	35.6781 11 5
Preset Parameters			
Solubility (Fd)	2.55681e-006 m	1^3/s	
Evaporation Losses (Fe):	0.372538 n	1^3/s	Coloulata
	0.072008	. 0,0	Calculate

Σχήμα 4.16: Παράθυρο υπολογισμού της εξέλιξης του όγκου με την πάροδο του χρόνου για t=120 hours (τέλος φαινομένου)

4.4.2 - Evaporation time

Το συγκεκριμένο κομβίον υπολογίζει το συνολικό χρόνο εξάτμισης που χρειάζονται τα συστατικά του πετρελαίου να εξατμιστούν. Το κομβίο λαμβάνει υπόψη του τα στοιχεία που παρουσιάζονται στο παράθυρο και αφορούν το εκάστοτε σενάριο που μελετάται. Ο χρήστης πατώντας «Calculate» υπολογίζει τον συνολικό χρόνο εξάτμισης σε hours, ενώ έχει τη δυνατότητα να επαναλάβει τον υπολογισμό πατώντας όμως πρώτα «Reset». Βασικά στοιχεία εισόδου είναι η παρούσα διάμετρος της κηλίδας, η μείωση του πάχους της και η ταχύτητα του ανέμου. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα από το παράθυρο του κομβίου δείχνει το ακόλουθο σχήμα.

Evaporation Process vs	Time								
	Spillsolver 2.0 - output - button: Evaporation Time								
		S	tandalone tab						
Oil Spill	Thickness Reduction.		0.0055922	m					
	Suill Diameter		767 727	m					
	spin Diameter.	l	101.121						
	Wind Velocity.		15.40768	m/s					
Meteo Const beta:		0.11							
Atm Const Coef:	1.2	e-008							
Meteo Const alpha:		0.78							
A A A A									
Calculate	Reset	Total	Evaporation Time.		1322.91 hours				

Σχήμα 4.17: Παράθυρο υπολογισμού του συνολικού όγκου σε hours

4.4.3 - Shore

Το εν λόγω κομβίο έχει διπλή λειτουργία, μιας και ο χρήστης σε πρώτη φάση μπορεί να υπολογίσει την μέγιστη ποσότητα πετρελαίου που μπορεί να εκβραστεί στην παραλία. Έτσι με βάση τις διαστάσεις που ορίζει ο χρήστης για την παραλία στα αντίστοιχα κελιά, υπολογίζεται το stranding (εκβρασμός) σε m³ πατώντας calculate. Σε περίπτωση που ο χρήστης έχει εισαγει λάθος δεδομένα, μπορεί να επαναλάβει τον υπολογισμό, πατώντας το κομβίο «Reset».

Επίσης, η δεύτερη λειτουργία του εν λόγω κομβίου είναι ότι ο χρήστης μετά μπορεί να επιλέξει από τη λίστα τον τύπο της παραλίας, όπως φαίνεται και στην ακόλουθη Σχήμα. Επιλέγοντας τον επιθυμητό τύπο και βγαίνοντας στη συνέχεια από το περιβάλλον του κώδικα και πατώντας ξανά Solve, κατασκευάζεται η καμπύλη Shore, που δείχνει το ρυθμό απομάκρυνσης του πετρελαίου σε ημερήσια βάση από την παραλία και αναλόγως με τον τύπο που εισήχθη στο προηγούμενο βήμα. Το μοντέλο αυτό στηρίζεται στο αντίστοιχο μοντέλο που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (3.2).

Shore Process		_	100	
	Spillsolver	2.0 -	output - button: shore	
To see dynamic graph, plea	use insert data, click calculate	, close t	his tab and output, click solve again	in and then choose the matching graph
Parameters			Results	
Length.	1000	m		
uri dth	100	m	Stranding.	116000 m^3
wian:	100	m		
Depth.	4	m		
Shore Type: I	Rocky Open	-	Calculate	Reset
l 1	Rocky Open			
1	Rocky Protected			
	Sandy - low waves			
	Sandy - high waves			
1	Pebbled - low waves			
1	Pebbled - high waves			
1	Pebbled – tide			

Σχήμα 4.18: Παράθυρο υπολογισμού του stranding σε m³ αλλά και του τύπου της παραλίας για τη δημιουργία της καμπύλης Ρυθμού απομάκρυνσης πετρελαίου

4.4.4 - Drift

Το κομβίον αυτό, υπολογίζει την μετατόπιση του κέντρου της πετρελαιοκηλίδας με βάση τα μετεωρολογικά στοιχεία, την ταχύτητας και την κατεύθυνση του ανέμου καθώς και βάσει της ταχύτητας και της κατεύθυνσης των ρευμάτων. Αυτά τα στοιχεία τα εισάγει ο χρήστης επιλέγοντας τα αντίστοιχα από τις λίστες παραμέτρων στα αριστερά του κομβίου. Επίσης, αναφορικά με την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου μπορεί να θεωρήσει τα στοιχεία που έχει ορίσει στην αρχικοποίηση του κώδικα επιλέγοντας το «Default». Σε διαφορετική περίπτωση μπορεί να ορίσει όποια τιμή επιθυμεί πληκτρολογώντας μια τιμή για την ταχύτητα του ανέμου και στη συνέχεια να επιλέξει την επιθυμητή κατεύθυνση από την αντίστοιχη λίστα. Όμοια, για τα ρεύματα, υπάρχει λίστα με τις συνήθεις τιμές τους ανάλογα με το ημισφαίριο, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.

Wind and Current Dri	ft		x			
Spillsolver 2.0 - output - button: Drift To see the relocation in a graph please insert data, click calculate, close this tab and output, click solve and then choose the matching graph.						
Wind Velocity.		15.43	m/s			
Wind Direction:		V 1	Default			
Current Velocity.	2.0	• kn				
Current Direction.	0.6	-				
North Eq. Max Veloc	ity 2.0					
Time for integration.	2.5		0 Hour			
Calculate		Reset				
Results Drift of Oil Spill Center:						
0.7	74094	m/s				
2	deg					
Total Integration Distance						
	0	Km				

Σχήμα 4.19: Παράθυρο επιλογής των απαραίτητων μετεωρολογικών συνθηκών για το κομβίο Drift

Στη συνέχεια ο χρήστης μπορεί να ορίσει στο κελί «time for integration» τη χρονική στιγμή που επιθυμεί να υπολογίσει τη συνολική μετατόπιση της κηλίδας, πατώντας στη συνέχεια «Calculate». Τα αποτελέσματα είναι το μέτρο της ταχύτητας του ανέμου σε m/s, η κατεύθυνση της σε μοίρες και η συνολική απόσταση που θα έχει διανύσει το κέντρο της κηλίδας σε km μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Επίσης με βάση τα αποτελέσματα αυτά κατασκευάζεται και η αντίστοιχη καμπύλη Drift Distance. Με την επιλογή του κομβίου «Reset», ο χρήστης έχει τη δυνατότητα επανάληψης του υπολογισμού.

Wind and Current Drift							
Spillsolver 2.0 - output - button: Drift							
To see the relocation in a graph please insert data, click calculate,							
and then choose the matching graph.							
Wind Velocity.	15.43 m/s			s			
Wind Direction.	⊘ Default				fault		
Current Velocity	-		_ 1-				
Current velocity:	2.0 • kn						
Current Direction	S	outhEast		•			
North Eq. Max Velocity							
Time for integration	on.			5	Hour		
5							
Calculate			Rese	et			
Results							
Drift of Oil Spill Center.							
0.565907		907	m/s				
225			deg				
Total Integration Distance							
10.1863		863	Km				

Σχήμα 4.20: Παράθυρο υπολογισμού της μετατόπισης της κηλίδας για το κομβίο Drift

4.4.5 - Leakage

Το συγκεκριμένο κομβίο υπολογισμού βασίζεται στα μοντέλα διαρροής δεξαμενών που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (3.5). Ο χρήστης πρέπει να εισάγει τις παραμέτρους που αφορούν την επιφάνεια του ανοίγματος της δεξαμενής, το ύψος του πετρελαίου στην δεξαμενή, το ύψος που βρίσκεται το άνοιγμα και το επίπεδο της

θάλασσας. Επίσης στο παράθυρο φαίνεται η πυκνότητα του πετρελαίου και του νερού στην θερμοκρασία που έχει επιλεγεί στην αρχικοποίηση του κώδικα. Στη συνέχεια ο χρήστης πατώντας Calculate, υπολογίζει τα αποτελέσματα σχετικά με το ρυθμό διαρροής του πετρελαίου σε m³/s, αλλά και το ύψος ισορροπίας σε m.

🚺 Tanker Leakage	For some half I						
Spillsolver 2.0 - output - button: Leakage							
Standalone tab							
Parameters		1					
Hole Surface.	1	m^2					
Tank Bottom.	0	m					
Oil Height in tank.	15	m					
Hole Height.	13	m					
Water Level.	11	m					
Oil Density:	924	Kgr/m^3					
Water Density.	1026.6	Kgr/m^3					
Calculate		Reset					
Results							
Leakage Rate (m ³ /s).							
0.626418							
If the opening of the tank is below the sea level, the critical size is							
Eqilibrium Height. m							
	>Hole Height: only water inflows <hole height:="" leaks<="" oil="" only="" td=""></hole>						

Σχήμα 4.21: Παράθυρο υπολογισμού των δεδομένων διαρροής από το κομβίο Leakage

4.4.6 - Volume estimation

Το εν λόγω κομβίον αφορά την πρόβλεψη του όγκου της πετρελαιοκηλίδας, από ένα εναλλακτικό μοντέλο (που παρουσιάστηκε στο 3.7) με βάση στοιχεία που αφορούν την επιφάνεια της κηλίδας, την ταχύτητα ανέμου, την πυκνότητα του πετρελαίου και του νερού για κάθε χρονική στιγμή. Έτσι ο χρήστης μπορεί να εισάγει ποια χρονική στιγμή (πριν) σε min θέλει να υπολογίσει τον όγκο. Στη συνέχεια πατώντας «Preset Parameters», ορίζονται οι τιμές των παραμέτρων για εκείνη τη χρονική στιγμή και στη
συνέχεια πατώντας «Calculate», υπολογίζεται ο όγκος που προβλέπεται να είχε καταλάβει η κηλίδα εκείνη τη χρονική στιγμή. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να οριστεί είναι 7199 min (5 ημέρες). Δυο χαρακτηριστικά παράδειγμα υπολογισμών παρουσιάζονται ακολούθως.

Spilled Oil Volume Estimator						
	Spillsolver 2.0 - output - button: Volume Estimation					
		Standalone Tab				
To see the initial oil valuure in	a ananh nlaga incent data aliah	a alaulata alaua this tah	and autout slick salue as air and shares the matching small			
	i a graph, please insert data, click	calculate, close this tab	and output, cuck solve again and choose the matching graph.			
Time		I min				
Time:						
	1		Initial Spill Volume:			
Preset Parameters			14656.3 m^3			
Oil Spill Surface.	20154.8	m^2				
Wind Velocity:	15.4321	m/s				
Oil Density:	833	Kgr/m^3				
Water Density:	1026.6	Kgr/m^3	Calculate			

Σχήμα 4.22: Παράθυρο υπολογισμού του όγκου για t=1 min

📕 Spilled Oil Volume Estimator					
	Spillsolver 2.0 - output - button: Volume Estimation				
Standalone Tab					
To see the initial oil volume in	a graph, please insert data, click	c calculate, close this tab	and output, click solve again and choose the matching graph.		
Time:		7199 min	Initial Spill Volume.		
Preset Parameters			393.426 m^3		
Oil Spill Surface.	463237	m^2			
Wind Velocity.	15.4321	m/s			
Oil Density.	833	Kgr/m^3			
Water Density.	1026.6	Kgr/m^3	Calculate		

Σχήμα 4.23: Παράθυρο υπολογισμού του όγκου για t=7199 min

Κεφάλαιο 5

Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

5.1 - Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται διάφορα σενάρια πετρελαιοκηλιδών για να δοθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα για το αναβαθμισμένο πρόγραμμα. Εισάγοντας συγκεκριμένες τιμές ως παραμέτρους στο πρόγραμμα όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 4, έχουμε την δημιουργία σεναρίων τα οποία καταλήγουν σε σχηματικά και αριθμητικά αποτελέσματα.

Στην ενότητα 5.2, παρουσιάζεται μέσω ενός απλού ενδεικτικού σεναρίου, το SpillSolver 2.0 όσον αφορά τα εξαγόμενα και τις ιδιαιτερότητές του, με κύριο στόχο την εξοικείωση με αυτό.

Στην ενότητα 5.3, παρουσιάζεται ένας σχετικά ογκώδης κορμός με αποτελέσματα και διαγράμματα που προέκυψαν από τα προγράμματα SpillSolver 2.0 και ADIOS 2 εκεί που ήταν δυνατό, ώστε να εξαχθούν κάποια βασικά και απαραίτητα συμπεράσματα.

Στην συνέχεια, στην ενότητα 5.4, εξετάζονται ξεχωριστά κάποια υποσενάρια που δε μπορούν να υπαχθούν στην παραπάνω κατηγοριοποίηση λόγω του ότι οι παραμέτροι τους εισάγονται εντός κομβίων και μόνο και αναδεικνύουν κάποιες επιπλέον δυνατότητες του SpillSolver 2.0.

5.2 - Εξοικείωση με το πρόγραμμα

5.2.1 Δομή SpillSolver 2.0

Καθώς το πρόγραμμα SpillSolver 2.0 ανοίξει, εμφανίζεται το εισαγωγικό παράθυρο. Στην συνέχεια, αφού πατήσει το πλήκτρο **OK**, ο χρήστης οδηγείται στο κεντρικό παράθυρο στο οποίο επιλέγει τις παράμετρους του σεναρίου διαρροής πετρελαίου που θέλει. Τέλος, πατάει το κόμβιον **Solve**.

Στην συνέχεια μεταφέρεται στο παράθυρο εξαγωγής δεδομένων, το SpillSolver Output. Εκεί υπάρχουν τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα που αφορούν τις διάφορες διεργασίες γήρανσης πετρελαίου στην θάλασσα καθώς και τα κόμβια υπολογισμού που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4.

Στο SpillSolver Output, τα έξι κόμβια χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στα εξαρτημένα κόμβια που πέρα από τιμές, προσφέρουν και ενημέρωση στα γραφήματα του προγράμματος και στα ανεξάρτημα κόμβια τα οποία δεν επηρεάζουν τα γραφήματα.

Όσον αφορά τα γραφήματα, αυτά μπορεί να τα βρει στην αναδιπλωμένη λίστα η οποία του προσφέρεται στο SpillSolver Output.

5.2.2 Εισαγωγή ενδεικτικού σεναρίου

Θέλοντας να εξηγήσουμε περιληπτικά τα διάφορα γραφήματα και αποτελέσματα του προγράμματος χωρίς να εξάγουμε επί της παρούσης συμπεράσματα, επιλέγεται το εξής σενάριο:

- Έκχυση βαρέως πετρελαίου (Qatar Marine). (Σχήμα 5.1)
- Ταχύτητα ανέμου στα 10 m/s (η μέτρηση της οποίας έγινε στα 5 m νέα δυνατότητα) με κατεύθυνση τον βορρά και αβεβαιότητα ως προς την ποσότητα ±5% (νέα δυνατότητα). (Σχήμα 5.1)
- Θερμοκρασία της θάλασσας 10°C, αλατότητα στο 4% και sediment load στο 5%. (Σχήμα 5.2)
- Καιρικές συνθήκες μεταξύ πλήρως ηλιοφανούς και σχεδόν ηλιοφανούς καιρού. (Σχήμα 5.2)
- Στιγμιαία έκχυση όλης της ποσότητας των 10000 tn με αβεβαιότητα ±5% (νέα δυνατότητα) ως προς τη μέτρηση αυτής. (Σχήμα 5.3)
- Χρήση πετρελαιοσυλλεκτών που συλλέγουν 50 tn/h από την έναρξη μέχρι και την λήξη της 2^{ης} ημέρας. (Σχήμα 5.4 και 5.5)

Αφού εισαχθούν τα παραπάνω, πατάμε το κόμβιον Solve.

🛃 SpillSolver	
File	۲
School of Naval Architecture and Marine Engineering National Technical University of Athens Laboratory of Maritime Transport SpiilSolver 2.0	nd Marine Engineering al University of Athens of Maritime Transport
1. Oil Type	
Choose oil type QatarMarine Ch	
2. Environmental Conditions	
Wind Water Wind Vater Sky Wind Velocity : 10 m/sec Measuring Height : 5 Enable Uncertainty (+/-5%) : Vind Direction : other 0 degrees	
3. Release	
Instant Release Setup Setup	solve
4. Skimmers Cleanup Skimmer Selection	

Σχήμα 5.1: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων σεναρίου

	Wind Water Sky
Temperature :	10 🔽 Celcius
Density :	1026.9 kg/m3
Salinity :	other value 🔹 4 %
Sediment Load :	other value - 5.5 mg/l
	Wind Water Sky
Day	/ 1 2 ☑ 3 ☑ 4 ☑ 5 🗖
Cloudy	
Mostly cloudy	
Partly cloudy	
Mostly clear	
Clear	

Σχήμα 5.2: Εισαγωγή περιβαλλοντικών συνθηκών

🛃 SpillSolver - Instant Release 📃 💷 💌					
Spillsolver 2.0 – Instant Release					
Time of Release					
Day	Month Hour				
01 💌	01 • 0000 •				
Amount spilled	10000 tons 🔻				
In case of uncertainty please tick 📝	In case of uncertainty +/−5% of amount, please tick 🔽				
	ОК				
	Cancel				

Σχήμα 5.3: Εισαγωγή διαρρέουσας ποσότητας

Skimmer Type#1		X
Duration of Cleanup		
Day Month Hour		
Start Date : 02 💌 01 💌 0000 💌		
End Date: 03 ▾ 01 ▾ 0000 ▾		
 Constant Cleanup Rate Rate : 50 tons/hr Changing Cleanup Rate 	Spillsolver 2.0 - Sk <i>Skimmer</i>	immer Selection Type#1
Start Rate :		
Final Rate :	ок	Cancel

Σχήμα 5.4: Εισαγωγή δεδομένων συλλογής πετρελαίου



Σχήμα 5.5: Ενημέρωση δεδομένων πετρελαιοσυλλεκτών

5.2.3 - SpillSolver Output - Παράθυρο εξαγωγής αποτελεσμάτων

Μετά το πάτημα του κομβίου **Solve**, οδηγούμαστε στο παράθυρο SpillSolver – Output. Σε αυτό το παράθυρο, η πρώτη εικόνα που βλέπουμε είναι αυτή της επιλογής του 3D Oil Budget (Σχήμα 5.6). Όπως φαίνεται, υψηλά βρίσκονται τα έξι νέα κομβία. Ακριβώς κάτωθι των κομβίων βρίσκονται δύο αναδιπλωμένες λίστες. Η μεν αριστερή δίνει τη δυνατότητα μετάβασης σε κάποιο άλλο γράφημα (Σχήμα 5.7) και η δε δεξία, την ημέρα εκείνη που στο τέλος της θέλουμε να δούμε τα διάφορα αριθμητικά αποτελέσματα του παραθύρου 3D Oil Budget (Σχήμα 5.8)



Σχήμα 5.6: SpillSolver 2.0 – Output – 3D Oil Budget

Αυτά τα αριθμητικά αποτελέσματα στο 3D Oil Budget αλλάζουν όταν αλλάξουμε την ημέρα στην αναδιπλωμένη λίστα και είναι: η ποσότητα και το ποσόστωση που υφίσταται φωτο-οξείδωση, εξάτμιση, διασπορά και ιζηματοποίηση. Παράλληλα, στο σχήμα δίνεται η ποσότητα του γαλακτώματος, η επιφάνεια που καταλαμβάνει η κηλίδα εφόσον θεωρηθεί κυκλική καθώς και το αρχικό και το τελικό πάχος. Όλες αυτές οι τιμές, δίνονται χωρίς αβεβαιότητα, κάτι που όμως δεν ισχύει και με τα αναλυτικά γραφήματά τους. Ακριβώς πάνω εμφανίζεται η συνολική ποσότητα που βρίσκεται στην θάλασσα και ο τύπος του πετρελαίου αυτής. Πέρα την εισαγωγή των κομβίων και μια αναπροσαρμογή σε κάποια γραφιστικά στοιχεία, το παράθυρο του 3D Oil Budget δεν έχει μεταβληθεί. Αυτό σημαίνει ότι οι τιμές που δίνονται στο SpillSolver Output – 3D Oil Budget, εξάγονται μέσω της χρήσης των μοντέλων που προϋπήρχαν στο πρόγραμμα (Παράρτημα Α).

3D Oil Budget	✓ on the end of	5th 🔻	day
		5th	
		4th	
		3rd	
		2nd	r 2.0
		1st	

Σχήμα 5.7: Αναδιπλωμένη λίστα ημερών – 3d Oil Budget

Συγκεκριμένα, για το παρακάτω σχήμα, τα γραφήματα που έπονται της επιλογής Density, είναι καινούρια και βασισμένα στα νέα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3.



Σχήμα 5.8: Αναδιπλωμένη λίστα γραφημάτων

5.2.4 - Εξαρτώμενα κόμβια

Όπως προαναφέρθηκε, σχετικά με την πλήρη επίδειξη των γραφημάτων, οφείλουμε να εισάγουμε αρχικά κάποιες νέες παραμέτρους στο πρόγραμμα, ώστε να εξάγουμε όλα τα γραφήματα. Αυτό μπορεί να γίνει οποιαδήποτε στιγμή και αφορά τα γραφήματα της μετατόπισης (Drift Distance - νέα δυνατότητα), του ρυθμού απομάκρυνσης από την ακτή (Shore Remove Rate – νέα δυνατότητα) και του εναπομείναντος όγκου βάσει ενός νέου μοντέλου (Remaining Volume - νέα δυνατότητα).

Οι νέες αυτές παράμετροι, εισάγονται στα παράθυρα που έπονται των κομβίων Drift, Shore και Volume vs Time: Αφού ο χρήστης ανοίξει το εκάστοτε παράθυρο και βάλει τις τιμές που επιθυμεί, το ενημερώνει πατώντας **Calculate**. Στην συνέχεια κλείνει το SpillSolver – Output και χωρίς να μεταβάλλει κάτι άλλο ξαναπατάει το κόμβιον **Solve**. Έτσι ενημερώνονται τα αντίστοιχα γραφήματα όντας πλέον και αυτά στην διάθεση του χρήστη. Αν ο χρήστης θέλει να αλλάξει κάποιες από τις παραμέτρους αυτές, απλά επαναλαμβάνει τη διαδικασία.

Ας δούμε εποπτικά, με την σειρά τα αντίστοιχα κομβία:

Στο κομβίο Drift, ο χρήστης πρέπει να εισάγει την ταχύτητα των ρευμάτων (Current Velocity) καθώς και την κατεύθυνση αυτών (Current Direction) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Επιλέχθηκε ενδεικτικά, ρεύμα των 2 kn που αντιστοιχεί στη μέγιστη ταχύτητα ρευμάτων του βορείου ημισφαιρίου της Γης, με κατεύθυνση δυτική. Έτσι και όπως φαίνεται, για την ταχύτητα του ανέμου όπως ορίστηκε προηγουμένως (στα 5 μέτρα) η οποία έχει αυτόματα υπολογιστεί (στα 10 μέτρα) ίση με 9.05724 m/s και για την χρονική στιγμή των 120 ωρών (5 ημέρες), δίνεται η μετατόπιση (μέτρο, κατεύθυνση) του κέντρου επιφανείας της κηλίδας, θεωρώντας την ως κυκλική επιφάνεια.

Wind and Current Drift				
Spillsolver 2.0 - a	output - button: Drift			
To see the relocation in a graph please insert data, click calculate, close this tab and output, click solve and then choose the matching graph.				
Wind Velocity.	9.05724 m/s			
Wind Direction.	🖉 Default			
Current Velocity.	2.0 • kn			
Current Direction.	West			
North Eq. Max Velocit	у			
Time for integration.	120 Hour			
Calculate	Reset			
Results Drift of Oil Spill Center.				
1.0	06408 m/s			
75.2055 deg				
Total Integration Distance				
45	9.684 Km			

Σχήμα 5.9: Κόμβιον Drift

Στο κομβίο Shore, ο χρήστης πρέπει να εισάγει τις διαστάσεις της εκάστοτε ακτής καθώς και τον τύπο της από την αναδιπλωμένη λίστα (Σχήμα 5.10). Οι διαστάσεις και ο τύπος της παραλίας, επίσης επιλέχθηκαν ενδεικτικά. Στο παράθυρο φαίνεται ως αποτέλεσμα η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να συγκρατήσει η ακτή, ενώ υπάρχει και σχετικό δυναμικό διάγραμμα με δεδομένες παραμέτρους τη μέγιστη αυτή ποσότητα και τον τύπο της ακτής που επιλέγεται.

Shore Process						
	Spillsolver	2.0 - output	- button: shore			
To see dynamic graph, please :	insert data, click calculate	e, close this tab a	nd output, click solve again and th	en choose the matching graph		
Parameters			Results			
Length.	100	m				
Width.	20	m	Stranding.	4640 m^3		
Depth.	8	m				
Shore Type. Sau	ndy - high waves	•	Calculate	Reset		

Σχήμα 5.10: Κομβίον Shore

Τέλος, στο κομβίον Volume vs Time, εισάγεται μόνο ο επιθυμητός χρόνος (120 ώρες στο σχήμα), ορίζονται οι παράμετροι εκείνη τη χρονική στιγμή πατώντας το κομβίον Preset Parameters και ύστερα του αντίστοιχου υπολογισμού, έχουμε την ενημέρωση του προγράμματος μαζί με την εμφάνιση του αποτελέσματος. Αυτό είναι ο εναπομένων όγκος του πετρελαίου στην θάλασσα το δεδομένο χρόνο.

Remaining Oil Volume vs Tim	e			×	
	Spillsolver 2.0 - ouput - button: Volume vs Time				
To see the matching g	raph, please insert data, click calculate, close t	this tab and output,	click solve again and then choose the graph.		
Initial Spill Volume.	9272.92	m^3			
Water in Emulsion.	0.77				
Water In Diffactori	0.11		Oli volume (time):		
Time Reference.	120	Hours	20518.2	m^3	
	·/				
Preset Parameters					
Solubility (Fd):	0.0736553 m	1^3/s			
Evaporation Losses (Fe):	0.417423 m	1^3/s	Calculate		

Σχήμα 5.11: Κομβίον Volume vs Time

5.2.5 – Αυτοτελή κόμβια

Ως τέτοια ορίζουμε τα κόμβια εκείνα που δεν επηρεάζουν τα διαγράμματα που θα ακολουθήσουν και προσφέρουν μονο αριθμητικές τιμές σχετικές με την γήρανση.

Αυτά είναι:

Το κόμβιο Evaporation Time: Σε αυτό το παράθυρο, ο χρήστης μπορεί είτε να εισάγει τα δεδομένα του (διάμετρος θεωρητικής κυκλικής κηλίδας την στιγμή t=120h, μεταβολή πάχους σε διάστημα 120 ωρών της κηλίδας, ταχύτητα ανέμου στα 10 μέτρα, τρεις σταθερές ακόμη) είτε να πατήσει απευθείας calculate ώστε να εισαχθούν αυτόματα και εξάγεται ο αριθμός των ωρών όπου θα έχουν θεωρητικά εξατμιστεί όλα τα κλάσματα του πετρελαίου για το δεδομένο τύπο, χωρίς κάποια άλλη παρέμβαση.

Evaporation Process vs	Evaporation Process vs Time					
	Spillsolver 2.0 - output - button: Evaporation Time					
		Standalone tab				
Oil Spill	Thickness Reduction:	0.102855	5 m			
	Suill Dismotor	845 92	s m			
	Spill Diameter.					
Wind Velocity:		9.05724	4 m/s			
Meteo Const heta		011				
Atm Const Coef:	1.	2e-008				
Meteo Const alpha.		0.78				
[)()					
Calculate	Reset	Total Evaporation Time.	51976.9 hours			

Σχήμα 5.12: Evaporation Time

Το κόμβιο Volume Estimation: Τα δεδομένα που εισάγονται εδώ είναι ο αριθμός λεπτών της ώρας, η ταχύτητα του ανέμου στα 10 μέτρα, η πυκνότητες του νερού και του πετρελαίου που έχει εκχυθεί και το αποτέλεσμα είναι μια εκτίμηση του αρχικού όγκου ο οποίος διέρρευσε πριν τον χρόνο αυτό. Δηλαδή είναι η αντίστροφη ακριβώς διαδικασία και είναι σημαντική καθώς μπορεί να εκτιμηθεί η ποσότητα που είχε διαρρεύσει αρχικά, ΄΄συναντώντας΄΄ μια πετρελαιοκηλίδα. Ως εκ τούτου, θέσαμε τα παρακάτω και πήραμε μια εκτίμηση αυτής της ποσότητας.

Αν και το συγκεκριμένο μοντέλο, θα φανεί να αποκλίνει με σε σχέση με τα υπόλοιπα, έχει την αξία ότι βασίζεται μόνο σε συγκεκριμένες παραμέτρους καθώς και ότι δεν θεωρεί ισόμορφη την κηλίδα.

Spilled Oil Volume Estimator					
	Svillsolver 2.0 - output - button: Volume Estimation				
		Standalone Tab			
To see the initial oil volume ir	1 a graph, please insert data, click	c calculate, close this tab :	and output, click solve again and choose the matching graph.		
	0 1 1				
~		200 min			
Time.		300 mun			
			Initial Spill Volume.		
Preset Parameters					
oil suill suufaas	223925	m ^ 2	6736.24 m^3		
On Spin Surrace.	0.05704	III 'Z			
Wind Velocity:	9.05724	m/s			
Oil Density.	949	Kgr/m^3			
Water Density.	1026.9	Kgr/m^3	Calculate		

Σχήμα 5.13: Κομβίον Volume Estimation

Το κόμβιο Leakage: Ο χρήστης μπορεί να το χρησιμοποιήσει για δύο λόγους. Είτε να υπολογίσει τον ρυθμό εκροής πετρελαίου από μια κυλινδρική δεξαμενή που έχει διαρραγεί, στην περίπτωση που το άνοιγμα είναι πάνω από την στάθμη της θάλασσας, είτε να εξάγει έναν δείκτη (ύψος ισορροπίας) που τον πληροφορεί αν θα υπάρξει εισροή νερού ή εκροή πετρελαίου, στην περίπτωση που το άνοιγμα είναι κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Περισσότερα για αυτό, ως παράδειγμα, στην ενότητα 5.4.1.



Σχήμα 5.14: Κομβίον Leakage

5.2.6 - Διαγράμματα στο SpillSolver Output

Το αναβαθμισμένο πρόγραμμα προσφέρει 19 κύρια διαγράμματα, κάποια εκ των οποίων είναι διττά, δηλαδή έχουν 2 μορφές. Τα εννιά εξ αυτών βασίζονται στα νέα μοντέλα που δείχθηκαν σε άλλο κεφάλαιο ενώ τα υπόλοιπα ακολουθούν την παλαιά βάση και μορφή τους, με νέα ωστόσο προσθήκη σε αυτά, των καμπυλών απόκλισης λόγω της αβεβαιότητας στο μέτρο του ανέμου και στην ποσότητα του πετρελαίου που διέρρευσε.

Oil Budget

Πρώτο διάγραμμα που δείχνεται, είναι το Oil Budget (προϋπάρχον). Σε αυτό φαίνονται τα γραφήματα των κυριοτέρων διεργασιών της γήρανσης με τις αντίστοιχες ποσότητες αριστερά σε κυβικά μέτρα και τον χρόνο στα δεξιά σε ώρες. Το σημαντικό σε αυτό το γράφημα είναι ότι προσφέρει οπτικοποιημένη σύγκριση των διαφόρων διεργασιών.

Επίσης, σε αυτό το διάγραμμα, όπως και σε όλα τα υπόλοιπα, προσφέρεται η επιλογή "Extract Figure" (κάτω δεξιά) για την εξαγωγή του.



Σχήμα 5.15: Oil Budget

Spreading (εξάπλωση)

Επόμενο διάγραμμα είναι αυτό της εξάπλωσης (προϋπάρχον), το οποίο δείχνει την εξάπλωση της κηλίδας σε τετραγωνικά μέτρα, στην διάρκεια των πρώτων 120 ωρών. Ας δοθεί προσοχή στην τάξη μεγέθους σε αυτό το σημείο (10⁵).



Σχήμα 5.16: Διάγραμμα Spreading

Evaporation (Εξάτμιση)

Το σχήμα της εξάτμισης (προϋπάρχον), είναι διττό. Αρχικά, δείχνεται η ποσότητα του πετρελαίου που έχει εξατμιστει συνολικά, σε κυβικά μέτρα και στην συνέχεια σε ποσοστιαία (Σχήματα 5.17 – 5.19).



Σχήμα 5.17: Επιλογή μορφής διαγράμματος εξάτμισης









Dispersion (Διασπορά)

Όσον αφορά την διασπορά του πετρελαίου (προϋπάρχον μοντέλο), δηλαδή την ποσότητα που διαφεύγει από την κηλίδα όπως αυτή ορίστηκε στο κεφάλαιο 1, έχουμε επίσης δύο μορφές του ιδίου διαγράμματος. Η πρώτη (Σχήμα 5.20) ως η ποσότητα του πετρελαίου που διασπείρεται (σε κυβικά μέτρα) στο πλαίσιο των πρώτων 5 ημερών (120 ώρες) και η δεύτερη (Σχήμα 5.21) ως ρυθμός δηλαδή σε κυβικά μέτρα/λεπτό.



Σχήμα 5.20: Διάγραμμα διασποράς πετρελαίου



Σχήμα 5.21: Διάγραμμα Ρυθμού διασποράς πετρελαίου

Emulsification (Γαλακτωματοποίηση)

Προϋπάαρχον μοντέλο. Παρουσιάζεται σε δύο μορφές γραφημάτων και οι δύο στα πλαίσια των 120 ωρών. Η πρώτη αφορά την ποσότητα του υφιστάμενου γαλακτώματος (μείγμα – μους, νερό εντός πετρελαίου) σε κυβικά μέτρα (x10⁴), ενώ η δεύτερη αφορά το ποσοστό του νερού εντός του γαλακτώματος.



Σχήμα 5.22: Διάγραμμα γαλακτωματοποίησης – Ποσότητα γαλακτώματος



Σχήμα 5.23: Διάγραμμα γαλακτωματοποίησης – Ποσοστό νερού στο γαλάκτωμα

Thickness (Πάχος κηλίδας)

Επόμενη διαγραμματική παρουσίαση είναι αυτή του πάχους της κηλίδας. Αποτελεί προϋπάαρχον μοντέλο το οποίο βασίζεται στην παραδοχή ότι h=V/A (h: πάχος, V: ποσότητα που έχει εκρεύσει, A: επιφάνεια κηλίδας προκύπτουσα από το μοντέλο εξάπλωσης). Το πάχος μετράται σε μέτρα και φαίνεται η πορεία του εντός των 5 ημερών. Η γραμμή είναι πιο έντονη, λόγω του ότι έχουν συμπέσει μαζί με την κύρια καμπύλη και οι καμπύλες απόκλισης.



Σχήμα 5.24: Διάγραμμα πάχους κηλίδας

Sedimentation ($I\zeta\eta\mu\alpha\tau\sigma\pi$)

Αποτελεί επίσης προϋπάρχον στο πρόγραμμα και δείχνει σε κυβικά μέτρα και στο πλαίσιο των 120 πρώτων, την ποσότητα του όγκου που γίνεται ίζημα. Εκτός των άλλων, το sediment load είναι σημαντική παράμετρος της.

Όπως είναι αναμενόμενο, η διαδικασία λαμβάνει χώρα μετά τις πρώτες ώρες.



Σχήμα 5.25: Διάγραμμα ιζηματοποίησης

Photoxidation (Φωτο-οξείδωση)

Η φωτοξείδωση λαμβάνει χώρα σε μια πετρελαιοκηλίδα, μόνο στα πλαίσια ενός ηλιοφανούς καιρού και είναι η οξείδωση (δηλαδή αλλαγή της χημικής σύστασης) του πετρελαίου, λόγω της επίδρασης του φωτός. Παρακάτω, τα επόμενα διαγράμματα (προϋπάρχοντα) δείχνουν τη συνολική ποσότητα που οξειδώνεται στα πλαίσια των 5 πρώτων ημερών σε κυβικά μέτρα x 10⁻³, καθώς και τον ρυθμό αυτής (10⁻⁶ m³/min) στα πλαίσια της ημέρας, σε σχέση με την γωνία που βρίσκεται ο Ήλιος.



Σχήμα 5.26: Διάγραμμα Φωτο-οξείδωσης – Ποσότητα



Σχήμα 5.27: Διάγραμμα Φωτο-οξείδωσης – Ρυθμός

Viscocity (Ιζώδες)

Το ιξώδες της πετρελαιοκηλίδας, δηλαδή το πόσο ρευστό είναι με την παραδοχή ότι είναι παντού ομοιόμορφο, παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα και αποτελεί προϋπάρχον στο πρόγραμμα. Στον x-άξονα βρίσκονται οι μονάδες του ιξώδους (cSt) και στον y-άξονα οι ώρες (0-120).



Σχήμα 5.28: Διάγραμμα ιξώδους πετρελαίου

Density (Πυκνότητα)

Όσον αφορά την πυκνότητα του πετρελαίου συναρτήσει του χρόνου, βάσει προϋπάρχοντος μοντέλου, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.29, σε kg/m³.



Σχήμα 5.29: Διάγραμμα πυκνότητας πετρελαίου

Spread Rate (Ρυθμός εξάπλωσης)

Τα επόμενα διαγράμματα που θα παρουσιαστούν είναι νέα, αρχής γενομένης με τον ρυθμό εξάπλωσης. Οι μονάδες του ρυθμού αυτού στον Χ-αξονα είναι σε τετραγωνικά χιλιόμετρα ανά ώρα (σε τάξη μεγέθους 10⁻³) ενώ οι μονάδες του χρόνου στον Υ-άξονα είναι σε ώρες. Το γράφημα αυτό βασίστηκε στο μοντέλο του ρυθμού εξάπλωσης του κεφαλαίου 3 και είναι διαφορετικής βάσης και λογικής σε σχέση με αυτήν του διαγράμματος της εξάπλωσης (spreading).



Σχήμα 5.30: Διάγραμμα ρυθμού εξάπλωσης

Wash Rate (Ρυθμός παράσυρσης)

Κατά τη γήρανση μιας πετρελαιοκηλίδας, κάποιο μέρος του πετρελαίου, μέσω της φυσικής του διασποράς απομακρύνεται από την επιφάνεια της θάλασσας με τη μορφή μικρών σταγόνων οι οποίες ενσωματώνονται στην υδάτινη στήλη. Έτσι έχουμε απώλεια του εμβαδού της επιφανειακής κηλίδας με αποτέλεσμα την επίδραση αυτού του γεγονότος στις υπόλοιπες διεργασίες. Αυτό το μοντέλο, αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.11 (νέα μοντέλα) και το παρακάτω αποτελεί διάγραμμά του. Καθέτως, σε 10⁻⁴ τετραγωνικά χιλιόμετρα/ώρα φαίνεται η απώλεια της επιφάνειας λόγω της φυσικής διασποράς και οριζόντια το χρονικό δεδομένο πλαίσιο των 5 ημερών.



Σχήμα 5.31: Διάγραμμα ρυθμού παράσυρσης

Κατακόρυφη ανάμιξη

Έπειτα του φαινομένου της διασποράς του πετρελαίου, οι σταγόνες αναδύονται ξανά στην επιφάνεια της θάλασσας με συγκεκριμένες ταχύτητες αναλόγως του μεγέθους τους. Έτσι έχουμε τα τρία επόμενα διαγράμματα που δείχνουν τη διαδικασία τούτη.

Στο Σχήμα 5.32 προσδιορίζεται η κρίσιμη διάμετρος των σταγονιδίων διεσπαρμένου πετρελαίου, κάτω από την οποία οι σταγόνες αναδύονται με ταχύτητα άνωσης Stokes (Σχήμα 5.33) της τάξης των 10^{-9} m/s και πάνω από την οποία ανεβαίνουν με ταχύτητα άνωσης Reynolds (Σχήμα 5.34) της τάξης των 10^{-4} m/s. Τα τρία διαγράμματα είναι δυναμικά, με τον άξονα του χρόνου να κλείνει στις λίγες ώρες λόγω ευκρίνειας, επειδή τότε είναι πλήρως σταθεροποιημένα τα γραφήματα.



Σχήμα 5.32: Διάγραμμα κρίσιμης μάζας σταγονιδίων πετρελαίου







Σχήμα 5.34: Διάγραμμα ταχύτητας άνωσης Reynolds

Remaining Volume (εναπομένων όγκος)

Το δυναμικό αυτό γράφημα (Σχήμα 5.35), είναι προϊόν του νέου μοντελου που ευρέθη (κεφάλαιο 3.6) και παράγεται όπως είδαμε, αφού ενημερώσουμε το παράθυρο του κομβίου Volume vs Time. Αυτό μας δείχνει σε κυβικά μέτρα, τον όγκο του πετρελαίου που παραμένει στην θάλασσα σε κάθε χρονική στιγμή.



Σχήμα 5.35: Διάγραμμα εναπομένοντος όγκου πετρελαίου

Drift Distance (μετατόπιση)

Αφού εισάγαμε, στο κόμβιο Drift, τις παραμέτρους των ρευμάτων, μπορούμε να πάρουμε και σε γραφική παράσταση τη μετατόπιση του κέντρου της πετρελαιοκηλίδας (θεωρώντας τη κυκλική επιφάνεια). Αυτή δείχνεται σε χιλιόμετρα την κάθε χρονική στιγμή, ενώ ακριβώς πάνω του διαγράμματος, αναγράφεται και η κατεύθυνση αυτού.



Σχήμα 5.36: Διάγραμμα μετατόπισης

Shore Remove Rate (απομάκρυνση πετρελαίου από την ακτή)

Έχοντας επιλέξει συγκεκριμένο τύπο ακτής, στο παράθυρο του Shore, βλέπουμε το αντίστοιχο δυναμικό διάγραμμα. Σε αυτό, φαίνεται η μεταβολή της ποσότητας του πετρελαίου που παραμένει στην ακτή σε κυβικά μέτρα.



Σχήμα 5.37: Διάγραμμα εναπομένοντος όγκου πετρελαίου στην ακτή

Skimmers Volume (ποσότητα συλλογής πετρελαιοσυλλεκτών)

Στο παρακάτω σχήμα, σε μονάδες κυβικών μέτρων, φαίνεται δυναμικά η ποσότητα που έχει συνολικά συλλεχθεί από τα skimmers. Είναι ευδιάκριτο ότι λειτούργησαν ολόκληρη την δεύτερη ημέρα, όπως δόθηκε στο σενάριο.



Σχήμα 5.38: Διάγραμμα συλλογής όγκου πετρελαίου από skimmers

5.3 - Σενάρια και αποτελέσματα

Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει το σύνολο των κυρίων σεναρίων, που μελετήθηκαν στο SpillSover 2.0, με τον αντίστοιχο αύξοντα αριθμό δίπλα ο οποίος τα ονοματίζει. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι:

- ο τύπος της διαρροής του πετρελαίου, είτε συνεχής είτε στιγμιαία
- η χρήση ή όχι πετρελαιοσυλλέκτη
- ο τύπος πετρελαίου, ανάλογα με την πυκνότητά του
- η ταχύτητα του ανέμου, με τρία επίπεδα έντασης.

Διαρροή πετρελαίου	Πετρελαιο- συλλέκτης	Τύπος πετρελαίου	Ταχύτητα ανέμου (knots)	Κατεύθυνση ανέμου	Α/Α Σεναρίου
Συνεχής 13.000 tn σε 24h = 542 tn/h	OXI	Ελαφρύ (Sarir)	8	Ν	1
			30	S	2
			51	SE	3
		Βαρύ (Kuwait)	8	Ν	4
Συνεχής 13.000 tn σε 24h = 542 tn/h	NAI	Ελαφρύ (Sarir)	8	Ν	1A
	2 ^η , 3 ^η , 4 ^η ημέρα 12 ώρες/ημέρα Ρυθμός συλλογής 207 m ³ /h		30	S	2A
			51	SE	3A
Στιγμιαία 200 tn	OXI	Ελαφρύ (Sarir)	8	NW	5
			51	SW	6
Κοινές παράμετροι που επιλέχθηκαν στα σενάρια 1-6					
θερμοκρασία νερού: 12 °C, αλατότητα: 3,5 %, sediment load: 5% καιρός: συννεφιασμένος (cloudy) και τις 5 ημέρες					

Πίνακας 5.1: Παράμετροι των σεναρίων που μελετήθηκαν

Οι παράμετροι και η ονοματολογία των βασικών σεναρίων παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα με κύριο στόχο την κατάδειξη των δυνατοτήτων του ανανεωμένου προγράμματος, την αξιοπιστία του βάσει του διεθνώς αναγνωρισμένου προγράμματος ADIOS και την επίδειξη της επεκτασιμότητας του. Σε κάθε σενάριο παρουσιάζεται αρχικά η σύγκριση των υπαρχόντων μοντέλων με τα αντίστοιχα μοντέλα του ADIOS και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα νέα μοντέλα που προστέθηκαν στο SpillSolver καθώς και τα αντίστοιχα κομβία υπολογισμού.

Το σενάριο 1 εξετάζει τη συνεχή διαρροή πετρελαίου, ενώ το αντίστοιχο σενάριο 1Α αναφέρεται στην επίδραση των πετρελαιοσυλλεκτών στα διαγράμματα που προκύπτουν από το κάθε πρόγραμμα. Στα σενάρια 2 και 3 εξετάζεται η επίδραση της αύξησης της ταχύτητας του ανέμου στα διαγράμματα που προκύπτουν, ενώ στα αντίστοιχα σενάρια 2Α και 3Α' εξετάζεται ταυτόχρονα και η δράση των πετρελαιοσυλλεκτών. Από τα σενάρια αυτά προκύπτουν οι βασικές τάσεις και τα βασικά συμπεράσματα των μοντέλων. Στη συνέχεια, στο σενάριο 4, εξετάζεται η επίδραση της αλλαγής τύπου πετρελαίου στα διαγράμματα που προκύπτουν και τέλος στα σενάρια 5 και 6 διερευνάται η στιγμιαία διαρροή πετρελαίου, σε χαμηλή και μεγάλη ένταση ανέμου.

<u>5.3.1 - Σενάριο 1</u>



Σχήμα 5.39: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πετρελαιοκηλίδας στο τέλος της 5^{ης} μέρας (SpillSolver 2.0)

Από ότι δείχνεται, η συνολική ποσότητα του πετρελαίου που διαρρέει είναι 14965 m³. Η ποσότητα του πετρελαίου που εξατμίζεται είναι 4407 m³, ποσότητα η οποία αντιστοιχεί σε 29,45%. Το ποσοστό της διασποράς είναι χαμηλό, ίσο με 3,44% και άρα η ποσότητα του πετρελαίου που υφίσταται διασπορά είναι 515 m³. Το ποσοστό της ιζηματοποίησης είναι πολύ χαμηλό.



Σχήμα 5.40: Διάγραμμα της τύχης του συνόλου του πετρελαίου από το SpillSolver 2.0

Από το παραπάνω διάγραμμα είναι εμφανής η συνεχής διαρροή του πετρελαίου κατά την 1^{η} μέρα, όπως φαίνεται από τα ανοδικά τμήματα των καμπυλών.

- Η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στο εναπομένον πετρέλαιο
- Η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί στο πετρέλαιο που εξατμίζεται
- Η πράσινη καμπύλη αντιστοιχεί στο πετρέλαιο που υφίσταται διασπορά.

Σε κάθε καμπύλη παρουσιάζεται και το αντίστοιχο εύρος αβεβαιότητας. Καθένα από τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζεται και σχολιάζεται ξεχωριστά στη συνέχεια. Εδώ παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμμα ώστε να είναι εμφανής η αναλογία μεταξύ τους.


Σχήμα 5.41: Διάγραμμα της τύχης του συνόλου του πετρελαίου από το ADIOS 2

Αντίστοιχο είναι και το διάγραμμα που προκύπτει από το ADIOS το οποίο παρουσιάζει με ποσοστά την τύχη του πετρελαίου.

Το γκρι αντιστοιχεί στο πετρέλαιο που παραμένει στην πετρελαιοκηλίδα.

Το μπλε στο ποσοστό του πετρελαίου που εξατμίζεται.

Πολύ μικρό είναι το ποσοστό του πετρελαίου που υφίσταται διασπορά, το οποίο απεικονίζεται με πράσινο.

Εξάπλωση και ρυθμός εξάπλωσης



Σχήμα 5.42: Εξέλιξη της εξάπλωσης της πετρελαιοκηλίδας (SpillSolver 2.0)

Στο τέλος της $5^{\eta\varsigma}$ μέρας η πετρελαιοκηλίδα έχει έκταση 12×10^5 m². Από τη μορφή των καμπυλών παρατηρούμε ότι με την πάροδο του χρόνου η αβεβαιότητα ως προς την τελική επιφάνεια της πετρελαιοκηλίδας αυξάνεται.



Σχήμα 5.43: Ρυθμός εξάπλωσης πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται ο ρυθμός εξάπλωσης του πετρελαίου. Κατά τις πρώτες ώρες παρατηρούμε μια γραμμική αύξηση του ρυθμού εξάπλωσης, η οποία οφείλεται στο ότι κατά το χρονικό διάστημα αυτό συνεχίζει να διαρρέει πετρέλαιο. Μόλις ολοκληρωθεί η διαρροή του πετρελαίου, ο ρυθμός εξάπλωσης σταθεροποιείται στα 0,0005 km²/h.



Διασπορά

Σχήμα 5.44: Διασπορά πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η εξέλιξη της διασποράς του πετρελαίου όπως προκύπτει από το SpillSolver. Παρατηρούμε ότι η εξέλιξη της διασποράς του πετρελαίου είναι γραμμική ως προς το χρόνο, ενώ οι τιμές της διασποράς παρουσιάζουν ελάχιστη απόκλιση λόγω της αβεβαιότητας.



Σχήμα 5.45: Ρυθμός διασποράς (SpillSolver 2.0)

Από το διάγραμμα του SpillSolver για το ρυθμό διασποράς (δίνεται ως επιλογή στον τρόπο εμφάνισης του διαγράμματος της διασποράς) προκύπτει ότι είναι σχεδόν σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου, με εξαίρεση τις πρώτες ώρες από την έγχυση όπου εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με τις υπόλοιπες ώρες. Με βάση την αβεβαιότητα του μοντέλου ο ρυθμός διασποράς μπορεί να λάβει τιμές μεταξύ 0,07-0,16.



Παραπάνω παρουσιάζεται το διάγραμμα που προκύπτει από το ADIOS σχετικά με τη διασπορά της πετρελαιοκηλίδας. Η καμπύλη παρουσιάζει γραμμική συσχέτιση μεταξύ του χρόνου και της διασποράς της πετρελαιοκηλίδας. Το Adios παρουσιάζει το ποσοστό του πετρελαίου που διασπείρεται, εμφανίζοντας κατά τις πρώτες ώρες πολύ μεγάλο ρυθμό διασποράς, ο οποίος στη συνέχεια σταθεροποιείται και για το λόγο αυτό η καμπύλη είναι πιο οριζόντια.

> Εξάτμιση πετρελαίου



Σχήμα 5.47: Όγκος πετρελαίου που έχει εξατμιστεί με την πάροδο του χρόνου(SpillSolver 2.0)



Σχήμα 5.48: Ποσοστό εξάτμισης πετρελαίου (SpillSolver 2.0)



Σχήμα 5.49: Ποσοστό πετρελαίου που έχει εξατμιστεί με την πάροδο του χρόνου (ADIOS 2)

Το SpillSolver εξάγει γράφημα τόσο για την ποσότητα του πετρελαίου όσο και για το ποσοστό του πετρελαίου που έχει εξατμιστεί, ενώ το Adios παρέχει διάγραμμα μόνο για το ποσοστό της εξάτμισης. Η μορφή της καμπύλης που προκύπτει και από τα δύο προγράμματα είναι παρόμοιας μορφής, δείχνοντας ότι κατά τις πρώτες 24 ώρες, κατά τις οποίες διαρκεί και η έγχυση του πετρελαίου, ο ρυθμός εξάτμισης είναι μεγαλύτερος. Σύμφωνα με το Adios τις πρώτες 24 ώρες έχει εξατμιστεί σχεδόν το 18% του πετρελαίου ενώ συνολικά σε όλο το χρονικό διάστημα μελέτης το ποσοστό εξάτμισης φτάνει στο 36%. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν μέσω του Spillsolver δείχνουν ακόμη μεγαλύτερο ρυθμό εξάτμισης κατά τις πρώτες 24 ώρες, αφού το ποσοστό του πετρελαίου που έχει εξατμιστεί ξεπερνά το 20%, ενώ στη συνέχεια ο ρυθμός εξάτμισης μειώνεται σημαντικά και σε όλο το χρονικό διάστημα μελέτης του φαινομένου το ποσοστό του πετρελαίου που εξατμίζεται φτάνει στο 30%.

Πάχος πετρελαιοκηλίδας



Σχήμα 5.50: Εξέλιξη του πάχους της πετρελαιοκηλίδας (SpillSolver 2.0)

Στο διάγραμμα που προκύπτει από το Spillsolver παρουσιάζεται το διάγραμμα της εξέλιξης του πάχους της πετρελαιοκηλίδας κατά τη διάρκεια των πέντε ημερών όπου μελετάται το φαινόμενο. Παρατηρούμε ότι το πάχος της πετρελαιοκηλίδας αυξάνεται κατά τις πρώτες 24 ώρες, όσο δηλαδή διαρκεί η έγχυση του πετρελαίου, και στη συνέχεια μειώνεται εκθετικά, λόγω των διαφόρων διεργασιών όπως η εξάτμιση και η εξάπλωση, που οδηγούν σε μείωση του πάχους της πετρελαιοκηλίδας, φτάνοντας στα 0,011 m στο τέλος της 5^{ης} μέρας.

> Ιζηματοποίηση



Σχήμα 5.51: Εξέλιξη της ιζηματοποίησης (SpillSolver 2.0)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται το φαινόμενο της ιζηματοποίησης όπως εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου. Παρατηρούμε ότι το φαινόμενο εξελίσσεται γραμμικά με το χρόνο και στο τέλος της $5^{\eta_{\varsigma}}$ μέρας 0,01 m³ πετρελαίου έχουν εναποτεθεί ως ίζημα.

> Φωτο-οξείδωση



Σχήμα 5.52: Εξέλιξη της φωτο-οξείδωσης (SpillSolver 2.0)

Παρατηρούμε ότι δεν έχουμε φωτο-οξείδωση στο πετρέλαιο. Αυτό συμβαίνει λόγω των συνθηκών ηλιοφάνειας που έχουμε επιλέξει (cloudy και τις 5 ημέρες). Εάν επιλέξουμε κάτι διαφορετικό, οι εξαγόμενες τιμές δεν θα είναι μηδενικές. Επειδή σε όλα τα σενάρια που επιδεικνύονται, ο καιρός είναι συννεφιασμένος, δεν θα ασχοληθούμε περεταίρω με αυτήν την διαδικασία, λόγω του ότι το παρόν διάγραμμα εκπροσωπεί τη φωτο-οξείδωση και στα επόμενα σενάρια.

> Ιζώδες πετρελαίου



Σχήμα 5.53: Χρονική εξέλιξη ιξώδους πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η εξέλιξη του ιξώδους του πετρελαίου με το χρόνο. Παρατηρούμε ότι με την πάροδο του χρόνου το ιξώδες του πετρελαίου αυξάνεται, διότι εξατμίζονται τα ελαφρύτερα συστατικά του και στη συνέχεια σταθεροποιείται.



Το διάγραμμα που προκύπτει μέσω του ADIOS οδηγεί σε παρόμοια μορφή καμπύλης. Παρατηρούμε όμως ότι υπάρχει απόκλιση μεταξύ τις τιμής που προκύπτει από το ADIOS και της τιμής που υπολογίζει το SpillSolver . Το ADIOS υπολογίζει την τιμή του ιξώδους στα 100000 cSt ενώ το SpillSolver στα 290 cSt. Βέβαια και στα δύο διαγράμματα η τιμή του ιξώδους σταθεροποιείται για τον ίδιο αριθμό ωρών.

Πυκνότητα πετρελαίου



Σχήμα 5.55: Εξέλιξη πυκνότητας πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η εξέλιξη της πυκνότητας του πετρελαίου με την πάροδο του χρόνου. Παρατηρούμε ότι η μορφή της καμπύλης είναι αντίστοιχη με την καμπύλη που προκύπτει για το ιξώδες, παρουσιάζοντας αρχικά μια έντονη αύξηση της πυκνότητας και στη συνέχεια σταθεροποίησή της.



Σχήμα 5.56: Εξέλιξη πυκνότητας πετρελαίου (ADIOS 2)

Αντίστοιχης μορφής είναι και το διάγραμμα που προκύπτει από το ADIOS. Και στα δύο διαγράμματα η πυκνότητα αυξάνεται με τον ίδιο περίπου ρυθμό και ακολουθεί την ίδια συμπεριφορά. Το μέγιστο και στις δύο γραφικές παραστάσεις παρατηρείται στο τέλος της 1^{ης} μέρας. Οι τιμές είναι πολύ κοντά και μπορεί να θεωρηθεί ότι το μοντέλο προσομοίωσης του SpillSolver είναι αξιόπιστο.

Γαλακτωματοποίηση



Σχήμα 5.57: Εξέλιξη του ποσοστού γαλακτωματοποίησης (SpillSolver 2.0)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η εξέλιξη του ποσοστού γαλακτωματοποίησης με την πάροδο του χρόνου. Παρατηρούμε παρόμοια μορφή καμπύλης με αυτή της πυκνότητας και του ιξώδους. Έτσι φαίνεται αρχικά έντονη αύξηση του ποσοστού γαλακτωματοποίησης μέχρι και τη μέση της δεύτερης μέρας του φαινομένου και στη συνέχεια σταθεροποίησή του κοντά στο 80%. Επίσης η αβεβαιότητα είναι μικρή σε αυτή την περίπτωση.



Σχήμα 5.58: Εξέλιξη του ποσοστού γαλακτωματοποίησης (ADIOS 2.0)

Αντίστοιχης μορφής είναι και το διάγραμμα που προκύπτει από το ADIOS. Και στα δύο διαγράμματα η γαλακτωματοποίηση αυξάνεται με τον ίδιο περίπου ρυθμό και εμφανίζοντας παρόμοια συμπεριφορά. Το μέγιστο και στις δύο γραφικές παραστάσεις παρατηρείται στο τέλος της 2^{ης} μέρας. Οι τιμές είναι σχετικά κοντά και μπορεί να θεωρηθεί ότι το μοντέλο προσομοίωσης του SpillSolver είναι αξιόπιστο. Η διαφοροποίηση των ποσοστών είναι ίση με 10%.

Ρυθμός παράσυρσης του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη



Σχήμα 5.59: Ρυθμός παράσυρσης του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται ο ρυθμός παράσυρσης του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη. Παρατηρούμε ότι το διάγραμμα ξεκινά από τη μέγιστη τιμή του και στη συνέχεια μειώνεται εκθετικά.

Κρίσιμη διάμετρος σταγόνων πετρελαίου και ταχύτητα άνωσης



Σχήμα 5.60: Κρίσιμη διάμετρος σταγόνων πετρελαίου

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται εξέλιξη της κρίσιμης διαμέτρου των σταγόνων πετρελαίου με το χρόνο. Με βάση το μέγεθος αυτό γίνεται η σύγκριση για τον προσδιορισμό της ταχύτητας άνωσης των σωματιδίων. Τα σωματίδια που έχουν διάμετρο μικρότερη της κρίσιμης για κάθε χρονική στιγμή, υπακούουν στο νόμο του Stokes και βάσει αυτού προκύπτει η ταχύτητά τους, ενώ όσα έχουν μεγαλύτερη διάμετρο υπακούουν στο νόμο του Reynolds.

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα που ακολουθούν, τα δύο διαγράμματα που περιγράφουν την ταχύτητα άνωσης έχουν παρόμοια μορφή, παρουσιάζοντας αρχικά σημαντική αύξηση τις πρώτες 12 ώρες, ενώ σταθεροποιούνται μετά τη 16^η ώρα. Οι τιμές της ταχύτητας Reynolds είναι κατά 100.000 φορές μεγαλύτερες από τις τιμές της ταχύτητας Stokes. Οι τρεις καμπύλες που προκύπτουν λόγω της αβεβαιότητας που έχει εισαχθεί στο μοντέλο παρουσιάζουν σημαντική σύγκλιση μεταξύ τους.



Σχήμα 5.61: Ταχύτητα άνωσης κατά Stokes



Σχήμα 5.62: Ταχύτητα άνωσης κατά Reynolds

Εναπομένων όγκος πετρελαίου



Σχήμα 5.63: Εναπομένων όγκος πετρελαίου (SpillSolver 2.0)



Σχήμα 5.64: Εναπομένων όγκος πετρελαίου (ADIOS 2)

Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζεται ο εναπομένων όγκος πετρελαίου στην πετρελαιοκηλίδα συναρτήσει του χρόνου τόσο από το SpillSolver,όσο και από το ADIOS. Τα δύο διαγράμματα εμφανίζουν απόκλιση ως προς τις τιμές τους, η οποία εξηγείται λόγω της διαφοράς στο ποσοστό εξάτμισης που υπολογίζει το κάθε μοντέλο.

Remaining Oil Volume vs Time		Trans.		x			
Spillsolver 2.0 - ouput - button: Volume vs Time							
To see the matching grap	h, please insert data, click calculate, close	this tab and output,	click solve again and then choose the graph.				
Initial Spill Volume	14965.2	m∆2					
initial spin volume:	14965.2	III 'S					
Water in Emulsion.	0.127231		Oil Volume (time):				
Time Reference.	120	Hours	9866.75	m^3			
Preset Parameters							
	•						
Solubility (Fd):	0.149588 n	1^3/s					
Evaporation Losses (Fe):	0.274984 n	n^3/s	Calculate				
			U				

Σχήμα 5.65: Παράθυρο υπολογισμού εναπομένοντος όγκου πετρελαίου

Ο εναπομένων όγκος πετρελαίου μπορεί να υπολογιστεί κάθε χρονική στιγμή μέσω του παραθύρου υπολογισμού. Θέτοντας ως χρόνο υπολογισμού τις 120 ώρες, ο εναπομένων όγκος του πετρελαίου υπολογίζεται ίσος με 9867 m³, πράγμα το οποίο επιβεβαιώνεται και από το αντίστοιχο διάγραμμα.

Εκτίμηση αρχικού όγκου πετρελαίου

📣 Spilled Oil Volume Estimat	or					
Svillsolver 2.0 - output - button: Volume Estimation						
		Standalone Tab				
To see the initial oil volume	in a graph, please insert data, click	calculate, close this tab	and output, click solve again and choose the matching graph.			
Time.		7199 min	Initial Spill Volume			
Preset Parameters			7917.78 m^3			
Oil Spill Surface.	1.2714e+006	m^2				
Wind Velocity:	4.11523	m/s				
Oil Density.	833	Kgr/m^3				
Water Density.	1026.6	Kgr/m^3	Calculate			

Σχήμα 5.66: Παράθυρο υπολογισμού εκτιμώμενου όγκου πετρελαίου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές

Από τον παραπάνω υπολογισμό φαίνεται ότι θέτοντας στο μοντέλο ως χρόνο υπολογισμού 7199 min, λαμβάνοντας υπόψη την επιφάνεια της πετρελαιοκηλίδας, την ταχύτητα και την ένταση του ανέμου και το ιξώδες του πετρελαίου εκτιμάται ο όγκος του πετρελαίου. Στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται ίσος με 7918 m³. Σε αντιδιαστολή με το μοντέλο υπολογισμού του όγκου συναρτήσει του χρόνου, φαίνεται ότι το συγκεκριμένο μοντέλο εκτίμησης αποκλίνει, δίνοντας χαμηλότερη τιμή σε σχέση με την πραγματική.

Συνολικός χρόνος εξάτμισης

Εδώ παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του αντίστοιχου κομβίου υπολογισμού αναφορικά με το χρόνο που απαιτείται για να εξατμιστεί η συνολική ποσότητα του πετρελαίου. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο μιας και βοηθάει τον ερευνητή να προβλέψει πότε να εξαλειφθεί πλήρως η ποσότητα του πετρελαίου που έχει διαρρεύσει, αν δεν ληφθεί κανένα μέτρο αντιμετώπισης της πετρελαιοκηλίδας.

Spillsolver 2.0 - output - button: Evaporation Time							
Standalone tab							
almers Peduction		0.00858277	m				
On Spin Thickness Reduction:							
Spill Diameter.		1275.28	m				
Wind Velocity.		4.11523	m/s				
	_						
	0.11						
1.2e-008							
	0.78						
Depet	Tatal	Evanation Time		601211 hours			
Reset	Total	Evaporation Time.		6012.11 nours			
	ckness Reduction. Spill Diameter: Wind Velocity: 1.2 Reset	ckness Reduction. Spill Diameter: Wind Velocity: 0.11 1.2e-008 0.78 Reset Total	Standalone tab Standalone tab Ckness Reduction. Spill Diameter: 1275.28 Wind Velocity: 4.11523 0.11 1.2e-008 0.78 Reset Total Evaporation Time.	Standalone tab Standalone tab Standalone tab Spill Diameter: 0.00858277 m Spill Diameter: 1275.28 m Wind Velocity: 4.11523 m/s 0.11 1.2e-008 0.78 Reset Total Evaporation Time.			

Σχήμα 5.67: Παράθυρο υπολογισμού του συνολικού χρόνου εξάτμισης του πετρελαίου

Το αποτέλεσμα δείχνει ότι ο χρόνος που απαιτείται για να εξατμιστεί πλήρως η ποσότητα του πετρελαίου είναι 6012 ώρες. Το αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα δικαιολογείται από την μεγάλη ποσότητα του σεναρίου ίση με 13.000 tn αλλά και από τις ήπιες καιρικές συνθήκες (άνεμος χαμηλής έντασης).

Μετατόπιση της πετρελαιοκηλίδας



Σχήμα 5.68: Διανυόμενη απόσταση του κέντρου της πετρελαιοκηλίδας με το χρόνο

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η μετατόπιση του κέντρου της πετρελαιοκηλίδας λόγω του ανέμου και των ρευμάτων. Φαίνεται ότι η κίνηση του κέντρου της πετρελαιοκηλίδας είναι γραμμική ως προς το χρόνο. Αναλυτικά παρουσιάζονται οι υπολογισμοί μέσω του αντίστοιχου κομβίου υπολογισμού στο πρόγραμμα Spillsolver. Όπως φαίνεται βάσει των υπολογισμών, λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα του ανέμου ίση με 4,11 m/s κατά την προεπιλεγμένη κατεύθυνση (north), και θεωρώντας βορειοδυτικό ρεύμα ταχύτητας 0,6 kn, υπολογίζεται ότι σε 120 h, το κέντρο της πετρελαιοκηλίδας, κινούμενο με ταχύτητα 0,405 m/s σε κατεύθυνση 32,56° θα έχει διανύσει απόσταση 175 km.

Wind and Current	L		X			
Spillsolver 2.0 – output – button: Drift To see the relocation in a graph please insert data, click calculate, close this tab and output, click solve and then choose the matching graph.						
Wind Velocity:			4.115	23	m/s	
Wind Direction.				V I	Default	
Current Velocity.		0.6	•	kn		
Current Direction. NorthWest -						
North Eq. Ave Velocity						
Time for integrati	ion:			12	0 Hour	
Calculate			Re	eset		
Results Drift of Oil Spill Center:						
	0.405449		n	m/s		
32.5663 deg						
Total Integration Distance						
	175	5.154	K	m		

Σχήμα 5.69: Παράθυρο υπολογισμού μετατόπισης κέντρου πετρελαιοκηλίδας λόγω του ανέμου και των ρευμάτων

5.3.2 - Σενάριο 1Α

Στο σενάριο αυτό επιλέχθηκε η χρήση πετρελαιοσυλλεκτών (skimmers). Η λειτουργία τους είχε τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: εισαγωγή τους τη δεύτερη μέρα διαρροής του πετρελαίου, επί τρεις ημέρες για 12 ώρες κάθε μέρα. Ο ρυθμός συλλογής επιλέχθηκε από τον πίνακα 2.3, ίσος με 207 m³/h.



Σχήμα 5.70: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πετρελαιοκηλίδας στο τέλος της $5^{\eta\varsigma}$ μέρας

Συγκρίνοντας το σενάριο αυτό με το αντίστοιχο χωρίς τη χρήση skimmers φαίνεται ότι η ποσότητα του πετρελαίου που έχει εγχυθεί στη θάλασσα είναι περίπου η μισή, 7513 m³ έναντι 14965 m³, που ήταν χωρίς τη χρήση skimmers. Το εμβαδόν της πετρελαιοκηλίδας στην περίπτωση αυτή είναι 0,829km² ενώ στην περίπτωση χωρίς skimmers η έκταση της πετρελαιοκηλίδας φτάνει τα 1,271 km². Η ποσότητα του πετρελαίου που εξατμίζεται είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις (4407 m³). Όμως στην περίπτωση με τα skimmers, το ποσοστό του πετρελαίου που εξατμίζεται είναι σχεδόν το διπλάσιο, (58,67% έναντι 29,45% για την περίπτωση χωρίς skimmers). Το ποσοστό διασποράς παραμένει ίδιο και στις δύο περιπτώσεις. Στην περίπτωση χωρίς skimmers όμως, η ποσότητα του πετρελαίου που διασπείρεται είναι 515 m³, ενώ με τη χρήση skimmers, η αντίστοιχη ποσότητα είναι 254 m³.



Σχήμα 5.71: Διάγραμμα της τύχης του συνόλου του πετρελαίου από το SpillSolver 2.0

Η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στο εναπομένον πετρέλαιο

Η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί στο πετρέλαιο που εξατμίζεται

Η πράσινη καμπύλη αντιστοιχεί στο πετρέλαιο που υφίσταται διασπορά.



Σχήμα 5.72: Διάγραμμα της τύχης του συνόλου του πετρελαίου από το ADIOS 2

Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζεται συνοπτικά η μεταβολή του συνόλου του πετρελαίου, ενώ ξεχωριστά η κάθε καμπύλη παρουσιάζεται στη συνέχεια. Στην περίπτωση αυτή εισάγεται στο γράφημα αυτό και το ποσοστό του πετρελαίου που συλλέγεται μέσω των skimmers.

Το γκρι αντιστοιχεί στο πετρέλαιο που παραμένει στην πετρελαιοκηλίδα.

Το μπλε στο ποσοστό του πετρελαίου που εξατμίζεται.

Πολύ μικρό είναι το ποσοστό του πετρελαίου που υφίσταται διασπορά, το οποίο απεικονίζεται με πράσινο.

Τέλος, με μωβ χρώμα, απεικονίζεται το ποσοστό που συλλέγουν οι πετρελαιοσυλλέκτες.

Εξάπλωση και ρυθμός εξάπλωσης



Σχήμα 5.73: Εξέλιξη της εξάπλωσης της πετρελαιοκηλίδας (SpillSolver 2.0)

Η εξάπλωση του πετρελαίου μειώνεται, φτάνοντας στα $8*10^5 \text{ m}^2$, σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς skimmers όπου η εξάπλωση του πετρελαίου φτάνει στα $12*10^5 \text{ m}^2$ Αυτό οφείλεται στο ότι η ποσότητα του πετρελαίου που παραμένει στη θάλασσα είναι λιγότερη, λόγω της χρήσης των skimmers. Ο ρυθμός εξάπλωσης, όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα, δεν έχει μεταβληθεί.



Σχήμα 5.74: Ρυθμός εξάπλωσης πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

> Διασπορά



Σχήμα 5.75: Διασπορά πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

Η διασπορά του πετρελαίου παρουσιάζει παρόμοια μορφή σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς skimmers, με τη διαφορά ότι στο σενάριο με τα skimmers η ποσότητα του πετρελαίου που διασπείρεται έχει μειωθεί. Σε διάστημα πέντε ημερών, η διασπορά έχει φτάσει κοντά στα 250 m³ πετρελαίου, ενώ χωρίς τη χρήση skimmers η διασπορά του πετρελαίου φτάνει στα 550 m³ πετρελαίου.



Σχήμα 5.76: Διασπορά πετρελαίου (ADIOS 2)

Όσον αφορά το Adios, το ποσοστό διασποράς του πετρελαίου προκύπτει ίσο με 0,07%. Το ποσοστό αυτό είναι σημαντικά μικρότερο με το ποσοστό που προκύπτει μέσω του Spillsolver (3,44%).

Εξάτμιση πετρελαίου

Το διάγραμμα που απεικονίζει την ποσότητα του πετρελαίου που έχει εξατμιστεί δεν παρουσιάζει κάποια διαφορά σε σχέση με το σενάριο χωρίς τη χρήση των skimmers.

Το διάγραμμα που προκύπτει από το ADIOS είναι της ίδιας μορφής με το σενάριο 1 αλλά το ποσοστού του πετρελαίου που εξατμίζεται είναι μειωμένο κατά 5%, φτάνοντας στο 35%.



Σχήμα 5.77: Όγκος πετρελαίου που έχει εξατμιστεί με την πάροδο του χρόνου (SpillSolver 2.0)



Σχήμα 5.78: Ποσοστό πετρελαίου που έχει εξατμιστεί με την πάροδο του χρόνου (ADIOS 2)

Πάχος πετρελαιοκηλίδας



Σχήμα 5.79: Εξέλιξη του πάχους της πετρελαιοκηλίδας (SpillSolver 2.0)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή του πάχους της πετρελαιοκηλίδας με το χρόνο. Από το διάγραμμα είναι εμφανής η επίδραση των skimmers στην εξέλιξη του πάχους, καθώς στο χρονικό διάστημα κατά το οποίο δρουν τα skimmers η μείωση του πάχους είναι πιο απότομη, φτάνοντας στο τέλος της 5^{ης} μέρας σε πάχος 0,009 m.

176

> Ιζηματοποίηση



Σχήμα 5.80 Εξέλιξη της ιζηματοποίησης (SpillSolver 2.0)

Όσον αφορά την ιζηματοποίηση, παρατηρούμε ότι δεν επηρεάζεται από τη χρήση των skimmers.

> Ιζώδες πετρελαίου



Σχήμα 5.81: Χρονική εξέλιξη ιζώδους πετρελαίου (SpillSolver 2.0)



Σχήμα 5.82 Εξέλιξη ιξώδους πετρελαίου (ADIOS 2)

Τα διαγράμματα που αφορούν το ιξώδες του πετρελαίου δε μεταβάλλονται με τη χρήση των skimmers.

> Πυκνότητα πετρελαίου







Σχήμα 5.84: Εξέλιξη πυκνότητας πετρελαίου (ADIOS 2)

Τα διαγράμματα που αφορούν την πυκνότητα δε μεταβάλλονται λόγω της χρήσης των skimmers.
Γαλακτωματοποίηση



Σχήμα 5.85: Εξέλιξη του ποσοστού γαλακτωματοποίησης (SpillSolver 2.0)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η εξέλιξη του ποσοστού γαλακτωματοποίησης με την πάροδο του χρόνου. Παρατηρούμε παρόμοια μορφή καμπύλης με αυτή του αντίστοιχου σεναρίου χωρίς τη χρήση skimmers. Έτσι η σταθεροποίησή φθάνει κοντά στο 80%. Η χρήση λοιπόν των skimmers δεν επέφερε κάποια μεταβολή στη συγκεκριμένη καμπύλη.



Σχήμα 5.86: Εξέλιξη του ποσοστού γαλακτωματοποίησης (ADIOS 2.0)

Αντίστοιχης μορφής είναι και το διάγραμμα που προκύπτει από το ADIOS. Η διαφοροποίηση των ποσοστών δεν μεταβάλλεται με τη χρησιμοποίηση των skimmers.

Ρυθμός παράσυρσης του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη



Σχήμα 5.87: Ρυθμός παράσυρσης του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη

Τα διαγράμματα που αφορούν το ρυθμό παράσυρσης δε μεταβάλλονται με τη χρήση των skimmers.

Κρίσιμη διάμετρος σταγόνων πετρελαίου και ταχύτητα άνωσης



Σχήμα 5.88: Κρίσιμη διάμετρος σταγόνων πετρελαίου

Όμοια και τα διαγράμματα που αφορούν την κρίσιμη διάμετρο των σταγόνων της πετρελαιοκηλίδας δε μεταβάλλονται με τη χρήση των skimmers. Τα διαγράμματα που αφορούν την ταχύτητα άνωσης δε μεταβάλλονται με τη χρήση των skimmers.



Σχήμα 5.89: Ταχύτητα άνωσης κατά Stokes



Σχήμα 5.90: Ταχύτητα άνωσης κατά Reynolds

Εναπομένων όγκος πετρελαίου

Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζεται ο όγκος του εναπομένοντος πετρελαίου.



Σχήμα 5.91: Εναπομένων όγκος πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αυτή στο τέλος της $5^{\eta\varsigma}$ μέρας ο όγκος του πετρελαίου είναι 4745 m³, ενώ στο σενάριο όπου δε χρησιμοποιούνται skimmers ο όγκος του πετρελαίου που απομένει στην πετρελαιοκηλίδα είναι 9837 m³.



Σχήμα 5.92: Εναπομένων όγκος πετρελαίου (ADIOS 2)

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα του ADIOS, το ποσοστό του πετρελαίου που παραμένει στην πετρελαιοκηλίδα μειώνεται λόγω της χρήσης των skimmers, η οποία απεικονίζεται και στο διάγραμμα του ADIOS από τα τμήματα μεγαλύτερης κλίσης.

Spillsolver 2.0 - ouput - button. Volume vs Time To see the matching graph. please insert data, click calculate, close this tab and output, click solve again and then choose the graph. Initial Spill Volume. 7513.19 Water in Emulsion. 0.127231 Time Reference. 120 Hours 4745.34 Preset Farameters Solubility (Fd). 0.0371229 May 16 0.411635 May 2 Calculate	🚺 Remaining Oil Volume vs Tim	e								
To see the matching graph, please insert data, click calculate, close this tab and output, click solve again and then choose the graph. Initial Spill Volume. 7513.19 m^3 Water in Emulsion. 0.127231 Oil Volume (time). Time Reference. 120 Hours 4745.34 m^3 Preset Farameters Solubility (Fd). 0.0371229 m^3/s Evaporation Losses (Fe). 0.411635 m^3/s Calculate	Spillsolver 2.0 - ouput - button: Volume vs Time									
To see the matching graph, please insert data, click calculate, close this tab and output, click solve again and then choose the graph. Initial Spill Volume: 7513.19 m^3 Water in Emulsion: 0.127231 Oil Volume (time). Time Reference: 120 Hours 4745.34 m^3 Preset Parameters Solubility (Fd): 0.0371229 m^3/s Evaporation Losses (Fe): 0.411635 m^3/s Calculate										
To see the matching graph, please insert data, click calculate, close this tab and output, click solve again and then choose the graph. Initial Spill Volume: 7513.19 m^3 Water in Emulsion. 0.127231 Oil Volume (time): Time Reference: 120 Hours 4745.34 m^3 Preset Parameters Solubility (Fd). 0.0371229 m^3/s Calculate										
To see the matching graph, please insert data, click calculate, close this tab and output, click solve again and then choose the graph. Initial Spill Volume: 7513.19 m^3 Water in Emulsion: 0.127231 Oil Volume (time): Time Reference: 120 Hours 4745.34 m^3 Preset Parameters Solubility (Fd): 0.0371229 m^3/s Evaporation Losses (Fe): 0.411635 m^3/s Calculate										
Initial Spill Volume. 7513.19 m^3 Water in Emulsion. 0.127231 Oil Volume (time): Time Reference. 120 Hours Preset Parameters Solubility (Fd). 0.0371229 Solubility (Fd). 0.411635 m^3/s Evaporation Losses (Fe). 0.411635 m^3/s	To see the matching g	raph, please insert data, click calculate, close	this tab and output.	click solve again and then choose the graph.						
Initial Spill Volume. 7513.19 m^3 Water in Emulsion. 0.127231 Oil Volume (time): Time Reference. 120 Hours 4745.34 m^3 Freset Parameters Solubility (Fd). 0.0371229 m^3/s Evaporation Losses (Fe). 0.411635 m^3/s Calculate										
Water in Emulsion: 0.127231 Oil Volume (time): Time Reference: 120 Hours 4745.34 m^3 Freset Farameters Solubility (Fd): 0.0371229 m^3/s Evaporation Losses (Fe): 0.411635 m^3/s Calculate	Initial Spill Volume:	7513.19	m^3							
Time Reference. 120 Hours Oil Volume (nme): Freset Parameters 3 4745.34 m^3 Solubility (Fd): 0.0371229 m^3/s Calculate	Water in Emulsion.	0 127231]							
Time Reference. 120 Hours 4/45.34 m ^{-//} 3 Preset Parameters Solubility (Fd). 0.0371229 m ^{-///3/s} Evaporation Losses (Fe). 0.411635 m ^{-//3/s}	Water in Emailson	0.127201	_	Oli Volume (time):						
Preset Parameters Solubility (Fd): 0.0371229 Evaporation Losses (Fe): 0.411635 m^3/s Calculate	Time Reference.	120	Hours	4745.34 m ² .5						
Preset Parameters Solubility (Fd): 0.0371229 Evaporation Losses (Fe): 0.411635 m^3/s Calculate										
Solubility (Fd): 0.0371229 m^3/s Evaporation Losses (Fe): 0.411635 m^3/s Calculate	Preset Parameters									
Evaporation Losses (Fe): 0.411635 m^3/s Calculate	Salubility (Ed)	0.0271220	a∧2/a							
Evaporation Losses (re): 0.411635 m^3/s Calculate	Solubility (Fd):	0.0371229	11.0/2							
	Evaporation Losses (Fe):	0.411635 1	n^3/s	Calculate						

Σχήμα 5.93: Παράθυρο υπολογισμού εναπομένοντος όγκου πετρελαίου

> Skimmers

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η διαδικασία συλλογής του πετρελαίου από τα skimmers ως προς το χρόνο. Τα υπό κλίση τμήματα αντιστοιχούν στη χρονική διάρκεια λειτουργίας των skimmers ενώ τα οριζόντια τμήματα αντιστοιχούν στο χρονικό διάστημα όπου δε χρησιμοποιούνται skimmers και άρα δε συλλέγεται πετρέλαιο από την πετρελαιοκηλίδα. Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, ο συνολικός όγκος που συλλέγεται από την πετρελαιοκηλίδα αντιστοιχεί σε 7452 m³. Αυτό σημαίνει ότι σχεδόν η μισή ποσότητα του πετρελαίου που διέρρευσε συλλέχθηκε με την εφαρμογή των τριών skimmers.



Σχήμα 5.94: Ποσότητα πετρελαίου που συλλέχθηκε από τα skimmers (SpillSolver 2.0)



Σχήμα 5.95: Ποσοστό πετρελαίου από τα skimmers (ADIOS 2)

Σύμφωνα με το διάγραμμα που προκύπτει από το ADIOS το ποσοστό του συνολικό πετρελαίου που απομακρύνεται μέσω των skimmers είναι 16% στο τέλος της 5^{ης} μέρας.

Spilled Oil Volume Estimator							
Svillsolver 2.0 - output - button: Volume Estimation							
Standalone Tab							
To see the initial oil volume in a graph, please insert data, click calculate, close this tab and output, click solve again and choose the matching graph.							
Time.		7199 min					
			Initial Spill Volume.				
Preset Parameters	1		-				
			3995.26 m^3				
Oil Spill Surface.	829401	m^2					
Wind Velocity:	4.11523	m/s					
Oil Density.	833	Kgr/m^3					
Water Density:	1026.6	Kgr/m^3	Calculate				
			-uiculate				

Εκτίμηση όγκου πετρελαίου

Σχήμα 5.96: Παράθυρο υπολογισμού εκτιμώμενου όγκου πετρελαίου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές

Σύμφωνα με το μοντέλο εκτίμησης του όγκου, προκύπτει ότι στο τέλος των 5 ημερών, το πετρέλαιο που απομένει είναι 3995 m³ Όπως και στο σενάριο χωρίς skimmers, υπάρχει απόκλιση μεταξύ του όγκου που υπολογίζεται από το προηγούμενο μοντέλο και της εκτίμησης που παρέχει το μοντέλο αυτό.

	Evaporation Process vs	Time	i baly	· advantation - dat	-	_ D X		
Γ	Spillsolver 2.0 - output - button: Evaporation Time							
	Standalone tab							
L	Oil Spill	Thickness Reduction:		0.00408263	m			
		Spill Diameter.		1030.35	m			
	Wind Velocity.		4.11523	m/s				
	Meteo Const beta:		0.11					
	Atm Const Coef:	I	.2e-008					
L	Meteo Const alpha:		0.78					
		97						
	Calculate	Reset	Total	Evaporation Time.		2793.52 hours		

Συνολικός χρόνος εξάτμισης

Σχήμα 5.97: Παράθυρο υπολογισμού του συνολικού χρόνου εξάτμισης του πετρελαίου

Το αποτέλεσμα δείχνει ότι ο χρόνος που απαιτείται για να εξατμιστεί πλήρως η ποσότητα του πετρελαίου είναι 2794 ώρες. Το χρονικό διάστημα έχει μειωθεί σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο, σχεδόν στο μισό χρόνο. Παρατηρούμε ότι η χρήση των skimmers, μειώνει σημαντικά το χρόνο μιας και αφαιρείται σημαντική ποσότητα πετρελαίου από την κηλίδα που έχει δημιουργηθεί. Οι κλιματολογικές συνθήκες ήταν ίδιες μεταξύ των δυο σεναρίων.

5.3.3 - Σενάριο 2



Σχήμα 5.98: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πετρελαιοκηλίδας στο τέλος της $5^{\eta\varsigma}$ μέρας (SpillSolver 2.0)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η συνολική επιφάνεια της πετρελαιοκηλίδας στο τέλος της $5^{\eta\varsigma}$ μέρας, η οποία είναι ίση με 1,616 km². Η συνολική ποσότητα του πετρελαίου που διαρρέει είναι 14965 m³. Η ποσότητα του πετρελαίου που εξατμίζεται είναι 4407 m³, ποσότητα η οποία αντιστοιχεί σε 29,45%. Το ποσοστό της διασποράς είναι υψηλότερο σε σχέση με το σενάριο 1, ίσο με 6,25% και άρα η ποσότητα του πετρελαίου που υφίσταται διασπορά είναι 936 m³. Το ποσοστό της ιζηματοποίησης είναι και στην περίπτωση αυτή πολύ χαμηλό και δε θα μας απασχολήσει περαιτέρω.



Σχήμα 5.54: Διάγραμμα της τύχης του συνόλου του πετρελαίου από το SpillSolver 2.0

Από το παραπάνω διάγραμμα είναι εμφανής η συνεχής διαρροή του πετρελαίου κατά την 1^{η} μέρα, όπως φαίνεται από τα ανοδικά τμήματα των καμπυλών.

Η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στο εναπομένον πετρέλαιο.

Η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί στο πετρέλαιο που εξατμίζεται.

Η πράσινη καμπύλη τέλος, αντιστοιχεί στο πετρέλαιο που υφίσταται διασπορά.

Σε κάθε καμπύλη παρουσιάζεται και το αντίστοιχο εύρος αβεβαιότητας. Καθένα από τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζεται και σχολιάζεται ξεχωριστά στη συνέχεια. Εδώ παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμμα ώστε να είναι εμφανής η αναλογία μεταξύ τους.



Σχήμα 5.99: Διάγραμμα της τύχης του συνόλου του πετρελαίου από το ADIOS 2

Αντίστοιχο είναι και το διάγραμμα που προκύπτει από το ADIOS το οποίο παρουσιάζει με ποσοστά την τύχη του πετρελαίου.

Το γκρι αντιστοιχεί στο πετρέλαιο που παραμένει στην πετρελαιοκηλίδα.

Το μπλε στο ποσοστό του πετρελαίου που εξατμίζεται.

Το ποσοστό του πετρελαίου που υφίσταται διασπορά απεικονίζεται με πράσινο.

Εξάπλωση και ρυθμός εξάπλωσης



Σχήμα 5.100: Εξέλιξη της εξάπλωσης της πετρελαιοκηλίδας (SpillSolver)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η εξάπλωση του πετρελαίου. Παρατηρούμε ότι στο τέλος της $5^{\eta\varsigma}$ μέρας η επιφάνεια της πετρελαιοκηλίδας είναι $16*10^5$ m². Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου σε 30 knots σε σχέση με το σενάριο 1 όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι 8 knots, οδηγεί σε μεγαλύτερη εξάπλωση της πετρελαιοκηλίδας.

Στο παρακάτω διάγραμμα τώρα, βλέπουμε τον ρυθμό εξάπλωσης, σύμφωνα με το νέο μοντέλο. Παρατηρούμε ότι παρόλο που η εξάπλωση της πετρελαιοκηλίδας μεταβάλλεται με τη μεταβολή του ανέμου, ο ρυθμός εξάπλωσης παραμένει ίδιος σε σύγκριση με το σενάριο 1.



Σχήμα 5.101: Ρυθμός εξάπλωσης πετρελαίου (SpillSolver)

Διασπορά και ρυθμός διασποράς



Σχήμα 5.102: Διασπορά πετρελαίου (SpillSolver 2

Από το διάγραμμα της διασποράς του πετρελαίου παρατηρούμε ότι η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί σε αύξηση της διασποράς του πετρελαίου. Συγκεκριμένα, στο σενάριο 1, στο τέλος της $5^{\eta\varsigma}$ μέρας η διασπορά το πετρελαίου είχε φτάσει στα 600 m³, ενώ στο σενάριο 2 στο τέλος της $5^{\eta\varsigma}$ μέρας η διασπορά έχει φτάσει στα 900 m³.



Σχήμα 5.103: Διασπορά πετρελαίου (ADIOS 2)

Παραπάνω παρουσιάζεται το διάγραμμα που προκύπτει από το ADIOS σχετικά με τη διασπορά της πετρελαιοκηλίδας. Η καμπύλη παρουσιάζει γραμμική συσχέτιση μεταξύ του χρόνου και της διασποράς της πετρελαιοκηλίδας. Το Adios παρουσιάζει το ποσοστό του πετρελαίου που διασπείρεται, εμφανίζοντας κατά τις πρώτες ώρες αύξηση του ποσοστού διασποράς, ο οποίος στη συνέχεια σταθεροποιείται και για το λόγο αυτό η καμπύλη είναι οριζόντια. Παρατηρούμε ότι το εύρος της αβεβαιότητας είναι αρκετά μεγάλο για το συγκεκριμένο μέγεθος.

Εξάτμιση πετρελαίου



Volume of evaporated oil

Σχήμα 5.104: Όγκος πετρελαίου που έχει εξατμιστεί με την πάροδο του χρόνου(SpillSolver 2.0)

Όσον αφορά το διάγραμμα του όγκου του πετρελαίου που έχει εξατμιστεί παρατηρούμε ότι δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου.



Σχήμα 5.105: Ποσοστό πετρελαίου που έχει εξατμιστεί με την πάροδο του χρόνου (ADIOS 2)

Το διάγραμμα του ADIOS είναι παρόμοιας μορφής με το διάγραμμα του SpillSolver. Κατά τις πρώτες 24 ώρες, κατά τις οποίες διαρκεί η έγχυση του πετρελαίου, το ποσοστό εξάτμισης αυξάνεται, ενώ στη συνέχεια σταθεροποιείται στο τέλος της 5^{ης} μέρας σε ποσοστό 40%.

Πάχος πετρελαιοκηλίδας



Σχήμα 5.106: Εξέλιξη του πάχους της πετρελαιοκηλίδας (SpillSolver 2.0)

Όσον αφορά το πάχος της πετρελαιοκηλίδας παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη ταχύτητα του ανέμου οδηγεί σε μικρότερο πάχος της πετρελαιοκηλίδας. Αυτό είναι λογικό καθώς όπως αναφέρθηκε ήδη η μεγαλύτερη ταχύτητα του ανέμου βοηθά στην εξάπλωση της πετρελαιοκηλίδας, η οποία οδηγεί στη μείωση του πάχους της, φτάνοντας στο τέλος της 5^{ης} μέρας στα 0,008 m.

> Ιζηματοποίηση



Σχήμα 5.107: Εξέλιξη της ιζηματοποίησης (SpillSolver 2.0)

Παρατηρούμε ότι το διάγραμμα της ιζηματοποίησης δε μεταβάλλεται με τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου.

Ιζώδες πετρελαίου



Σχήμα 5.108: Χρονική εξέλιξη ιξώδους πετρελαίου (SpillSolver 2.0)



Σχήμα 5.109: Χρονική εξέλιξη ιξώδους πετρελαίου (ADIOS 2)

Παρατηρούμε ότι το διάγραμμα μεταβολής του ιξώδους μεταβάλλεται ελαφρώς λόγω της μεταβολής του ανέμου. Συγκεκριμένα, κατά της πρώτες ώρες μετά την έγχυση του πετρελαίου η μεταβολή είναι πιο απότομη. Στη συνέχεια η καμπύλη του ιξώδους γίνεται οριζόντια και συνεπώς η τιμή του ιξώδους σταθεροποιείται. Η τάση αυτή παρατηρείται τόσο στο SpillSolver όσο και στο ADIOS.



Πυκνότητα πετρελαίου

Σχήμα 5.110: Εξέλιξη πυκνότητας πετρελαίου (SpillSolver 2.0)



Όσον αφορά το διάγραμμα μεταβολής της πυκνότητας με το χρόνο, παρατηρούμε ότι μεταβάλλεται ελαφρώς με την ταχύτητα του ανέμου. Η τελική τιμή της πυκνότητας δε μεταβάλλεται, αλλά αλλάζει η κλίση της καμπύλης κατά τις πρώτες ώρες από την έγχυση του πετρελαίου. Αυτό ισχύει τόσο για την καμπύλη που προκύπτει από το SpillSolver όσο και για την καμπύλη που προκύπτει από το Adios.

Γαλακτωματοποίηση



Σχήμα 5.112: Εξέλιξη του ποσοστού γαλακτωματοποίησης (SpillSolver 2.0)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η εξέλιξη του ποσοστού γαλακτωματοποίησης με την πάροδο του χρόνου. Η μορφή καμπύλης είναι διαφορετική με την αύξηση της έντασης του ανέμου. Έτσι ραγδαία αύξηση του ποσοστού γαλακτωματοποίησης και σταθεροποίηση του ποσοστού από τις πρώτες κιόλας ώρες του φαινομένου, κοντά στο 80%. Επίσης η αβεβαιότητα σε αυτή την περίπτωση είναι αμετάβλητη σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια και ίση με 10%.



Σχήμα 5.113: Εξέλιξη του ποσοστού γαλακτωματοποίησης (ADIOS 2.0)

Αντίστοιχης μορφής με αυτό του SpillSolver είναι και το διάγραμμα που προκύπτει από το ADIOS. Και στα δύο διαγράμματα η γαλακτωματοποίηση αυξάνεται ραγδαία από τις πρώτες ώρες του φαινομένου και σταθεροποίηση σε σύντομο χρονικό διάστημα (στο μέσο της 1^η μέρας). Η διαφοροποίηση των ποσοστών δεν μεταβάλλεται με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και είναι ίση με 10%. Έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι το μοντέλο προσομοίωσης του SpillSolver είναι αξιόπιστο και σε αυτή την περίπτωση.

Ρυθμός παράσυρσης του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη



Σχήμα 5.114: Ρυθμός παράσυρσης του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη

Ο ρυθμός παράσυρσης του πετρελαίου αυξάνεται κατά μια τάξη μεγέθους με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Η μορφή της καμπύλης παραμένει ίδια.

Κρίσιμη διάμετρος σταγόνων πετρελαίου και ταχύτητα άνωσης



Σχήμα 5.115: Κρίσιμη διάμετρος σταγόνων πετρελαίου

Το διάγραμμα μεταβολής της κρίσιμης διαμέτρου σταγόνας της πετρελαιοκηλίδας δεν αλλάζει σημαντικά σε σχέση με τη μεταβολή του ανέμου.

Το διάγραμμα που παρουσιάζει την ταχύτητα άνωσης κατά Stokes μεταβάλλεται ελαφρώς με τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου και παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα. Συγκεκριμένα αυξάνεται η κλίση της καμπύλης κατά τις πρώτες ώρες και στη συνέχεια σταθεροποιείται στην ίδια τιμή με το σενάριο 1.

Τέλος, για την ταχύτητα Reynolds, παρατηρούμε ότι η ταχύτητα άνωσης αυξάνεται με ταχύτερο ρυθμό σε σχέση με το σενάριο 1 και στη συνέχεια σταθεροποιείται στην ίδια τιμή και για τα δύο σενάρια.



Σχήμα 5.116: Ταχύτητα άνωσης κατά Stokes





Εναπομένων όγκος πετρελαίου



Σχήμα 5.118: Εναπομένων όγκος πετρελαίου και παράθυρο υπολογισμού (SpillSolver)





208

Το ποσοστό του πετρελαίου που παραμένει μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, ενώ παρουσιάζεται και ταχύτερη μείωση σε σχέση με το σενάριο 1.

Remaining Oil Volume vs Time							
Spillsolver 2.0 - ouput - button. Volume vs Time							
To see the matching gro	sph, please insert data, click calculate, close	this tab and output	click solve again and then choose the graph.				
Initial Spill Volume,	14965.2	m^3					
	11000.0						
Water in Emulsion.	0.717613		Oil Volume (time).				
Time Reference.	120	Hours	24417 m^				
L							
Preset Parameters							
Solubility (Fd)	0.264277 m	1^3/s					
Evaporation Losses (Fe).	0.274984 n	a^3/s	Calculate				

Σχήμα 5.120: Παράθυρο υπολογισμού εναπομένοντος όγκου πετρελαίου

Ο εναπομένων όγκος πετρελαίου μπορεί να υπολογιστεί κάθε χρονική στιγμή μέσω του παραθύρου υπολογισμού. Θέτοντας ως χρόνο υπολογισμού τις 120 ώρες, ο εναπομένων όγκος του πετρελαίου υπολογίζεται ίσος με 2417 m³, πράγμα το οποίο επιβεβαιώνεται και από το αντίστοιχο διάγραμμα.

Μετατόπιση της πετρελαιοκηλίδας

Σχετικά με τη μετατόπιση του κέντρου επιφανείας της κηλίδας, αναφέρεται πως εξ ορισμού της εξίσωσης του νόμου του 3%, για αντίστοιχα με προηγουμένως θαλάσσια ρεύματα, αυτή αλλάζει και αυξάνεται με τον άνεμο, πράγμα που συμβαίνει και με την ταχύτητα του, ενώ για χάριν οικονομίας και απλότητας του μοντέλου, δεν θα δειχθεί ξανά (εκτός του σεναρίου 5).

Επίσης το διάγραμμα στο Spillsolver 2.0, παρουσιάζει αβεβαιότητα, λόγω της αβεβαιότητας στον άνεμο με την γραφική παράσταση να είναι γραμμική.

Εκτίμηση αρχικού όγκου πετρελαίου

Soillsolver 2.0 - outout - button: Volume Estimati Standalone Tab To see the initial oil volume in a graph, please insert data, click calculate, close this tab and output, click Time: 7199 Time: 7199	n solve again and choose the matching graph.
Standalone Tab To see the initial oil volume in a graph, please insert data, click calculate, close this tab and output, click Time: 7199 min	solve again and choose the matching graph.
Time. 7199 min	5 55 1
Time. 7199 min	
Durant Devenue term	Initial Spill Volume.
Preset Parameters	5200.05 m/s2
Oil Spill Surface: 1.61583e+006 m^2	5550.65 M^3
Wind Velocity: 15.4321 m/s	
Oil Density: 833 Kgr/m^3	
Water Density. 1026.6 Kgr/m^3	Coloulate

Σχήμα 5.121: Παράθυρο υπολογισμού εκτιμώμενου όγκου πετρελαίου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές

Από τον παραπάνω υπολογισμό φαίνεται ότι θέτοντας στο μοντέλο ως χρόνο υπολογισμού 7199 min, λαμβάνοντας υπόψη την επιφάνεια της πετρελαιοκηλίδας, την ταχύτητα και την ένταση του ανέμου και το ιξώδες του πετρελαίου εκτιμάται ο όγκος του πετρελαίου. Στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται ίσος με 5390m³. Σε αντιδιαστολή με το μοντέλο υπολογισμού του όγκου συναρτήσει του χρόνου, φαίνεται ότι το συγκεκριμένο μοντέλο εκτίμησης αποκλίνει από την πραγματική τιμή.

Συνολικός χρόνος εξάτμισης

Ακολούθως παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του κομβίου υπολογισμού αναφορικά με το χρόνο που απαιτείται για να εξατμιστεί η συνολική ποσότητα του πετρελαίου.

Evaporation Process vs	Time	_	termine the second seco	_			
Spillsolver 2.0 - output - button: Evaporation Time							
Standalone tab							
Oil Spill	Thickness Reduction.		0.00625027	m			
	Spill Diameter.		1434.15	m			
	Wind Velocity.		15.4321	m/s			
			1				
Meteo Const beta:		0.11					
Meteo Const alpha:	I	0.78			"Chickman.		
Calculate	Reset	Total	Evaporation Time.		1581.84 hours		

Σχήμα 5.122: Παράθυρο υπολογισμού του συνολικού χρόνου εξάτμισης του πετρελαίου

Το αποτέλεσμα δείχνει ότι ο χρόνος που απαιτείται για να εξατμιστεί πλήρως η ποσότητα του πετρελαίου είναι 1582 ώρες. Το χρονικό διάστημα έχει μειωθεί σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο, σχεδόν στο 1/4 της τιμής του σεναρίου 1. Παρατηρούμε ότι η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, μειώνει ακόμη περισσότερο το χρόνο μιας και η πετρελαιοκηλίδα εμφανίζει μεγαλύτερη εξάπλωση, έτσι έχει μικρότερο πάχος και μεγαλύτερη επιφάνεια, ευνοώντας έτσι το φαινόμενο της εξάτμισης σε μικρότερο χρονικό διάστημα, παρόλο που έχουμε την ίδια ποσότητα που εκχύνεται στη θάλασσα. Οι υπόλοιπες κλιματολογικές συνθήκες ήταν ίδιες.

<u>5.3.4 - Σενάριο 2Α</u>

Υπενθυμίζουμε ότι έχουμε πετρελαιοσυλλέκτες που συλλέγουν συνολικά 207 m³/h με την εισαγωγή τους τη δεύτερη μέρα διαρροής του πετρελαίου, επί τρεις ημέρες για 12 ώρες κάθε μέρα.



Σχήμα 5.123: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πετρελαιοκηλίδας στο τέλος της $5^{\eta\varsigma}$ μέρας (SpillSolver 2.0)

Συγκρίνοντας το σενάριο αυτό με το αντίστοιχο χωρίς τη χρήση skimmers φαίνεται ότι η ποσότητα του πετρελαίου που έχει εγχυθεί στη θάλασσα είναι περίπου η μισή, 7513 m³ έναντι 14965 m³, που ήταν χωρίς τη χρήση skimmers. Το εμβαδόν της πετρελαιοκηλίδας στην περίπτωση αυτή είναι 1,174 km² ενώ στην περίπτωση χωρίς skimmers η έκταση της πετρελαιοκηλίδας φτάνει τα 1,616 km². Η ποσότητα του πετρελαίου που εξατμίζεται είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις (4407 m³). Όμως στην περίπτωση με τα skimmers, το ποσοστό του πετρελαίου που εξατμίζεται είναι σχεδόν το διπλάσιο (58,67% έναντι 29,45% για την περίπτωση χωρίς skimmers). Το ποσοστό διασποράς παραμένει σχεδόν ίδιο και στις δύο περιπτώσεις. Στην περίπτωση χωρίς skimmers η ποσότητα του πετρελαίου που διασπείρεται είναι 936m³, ενώ με τη χρήση skimmers, η αντίστοιχη ποσότητα είναι 472m³.

Παρακάτω φαίνεται το oil budget όπως και πριν.



Σχήμα 5.124: Διάγραμμα της τύχης του συνόλου του πετρελαίου από το SpillSolver 2.0



Σχήμα 5.125: Διάγραμμα της τύχης του συνόλου του πετρελαίου από το ADIOS 2

Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζεται συνοπτικά η μεταβολή του συνόλου του πετρελαίου, ενώ ξεχωριστά η κάθε καμπύλη παρουσιάζεται στη συνέχεια. Στην περίπτωση αυτή εισάγεται στο γράφημα αυτό και το ποσοστό του πετρελαίου που συλλέγεται μέσω των skimmers.

Στην περίπτωση αυτή θα παρουσιαστούν μόνο τα διαγράμματα για τα οποία παρατηρήθηκε μεταβολή με την εισαγωγή των skimmers. Τα skimmers δεν επηρεάζουν αρκετά διαγράμματα, όπως: την ιζηματοποίηση, το ιξώδες και την πυκνότητα του πετρελαίου, το ρυθμό διασποράς, το ρυθμό παράσυρσης του πετρελαίου από την υδάτινη στήλη, την κρίσιμη διάμετρο των σταγόνων πετρελαίου, καθώς και την ταχύτητα άνωσης.



Εξάπλωση πετρελαιοκηλίδας

Σχήμα 5.126: Εξέλιξη της εξάπλωσης της πετρελαιοκηλίδας (SpillSolver 2.0)

Παρατηρούμε ότι με την εισαγωγή των skimmers η εξάπλωση της πετρελαιοκηλίδας μειώθηκε λόγω της μείωσης του πετρελαίου που παραμένει στην πετρελαιοκηλίδα.

Διασπορά πετρελαίου



Σχήμα 5.127: Ρυθμός διασποράς πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

Η διασπορά της πετρελαιοκηλίδας μειώνεται επίσης στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται skimmers. Παρατηρούμε επίσης από τη μορφή των τριών καμπυλών του διαγράμματος ότι η εισαγωγή της αβεβαιότητας στο μοντέλο για την περίπτωση μεταβάλλει σημαντικά την ποσότητα του πετρελαίου που υφίσταται διασπορά.

Όσον αφορά το πρόγραμμα Adios, δίνει παρόμοιο διάγραμμα για το ποσοστό του πετρελαίου διασποράς.


Σχήμα 5.128: Διασπορά πετρελαίου (SpillSolver 2.0)



Πάχος πετρελαιοκηλίδας

Σχήμα 5.129: Εξέλιξη του πάχους της πετρελαιοκηλίδας (SpillSolver 2.0)

Παρατηρούμε στην περίπτωση αυτή το πάχος της πετρελαιοκηλίδας αυξάνεται και στη συνέχεια μέσω της εισαγωγής των skimmers μειώνεται, φτάνοντας σε πάχος 0,006 m στο τέλος της 5^{ης} μέρας. Η χρονική διάρκεια λειτουργίας των skimmers απεικονίζεται από τα τμήματα μεγαλύτερης κλίσης στην καμπύλη.

Γαλακτωματοποίηση

Στο συγκεκριμένο σενάριο 2A δεν είχε καμία διαφοροποίηση η χρήση των skimmers στα αποτελέσματα της γαλακτωματοποίησης και στο SpillSolver και στο ADIOS.

Εναπομένων όγκος πετρελαίου



Σχήμα 5.130: Εναπομένων όγκος πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

Παρατηρούμε ότι ο όγκος που απομένει προφανώς μειώνεται σε σχέση με το σενάριο 2, λόγω της εισαγωγής των skimmers, τα οποία αναπαρίστανται από τα τμήματα μεγαλύτερης κλίσης στο διάγραμμα.



Σχήμα 5.131: Εναπομένων όγκος πετρελαίου (ADIOS 2)

Το διάγραμμα του Adios έχει την ίδια μορφή με το διάγραμμα που προκύπτει από το SpillSolver. Η χρήση των skimmers δεν αποτυπώνεται τόσο έντονα όσο στο SpillSolver, πράγμα το οποίο σημαίνει και ότι ο ρυθμός αφαίρεσης πετρελαίου από τα skimmers δεν είναι τόσο μεγάλος.

Εκτίμηση αρχικού όγκου πετρελαίου

Spilled Oil Volume Estimato	r						
Svillsolver 2.0 - output - button: Volume Estimation							
Standalone Tab							
To see the initial oil volume ir	ı a graph, please insert data, click	c calculate, close this tab	and output, click solve again and choose the matching graph.				
Time.		7199 min					
			Initial Spill Volume.				
Preset Parameters							
Oil Spill Surface.	1.17382e+006	m^2.	2860.56 m^3				
Wind Velocity.	15.4321	m/s					
Oil Density	833	Ker/m^3					
Water Density	1026.6	Kor/m^3					
water Density:	1020.0	131/III 0	Calculate				

Σχήμα 5.132: Παράθυρο υπολογισμού εναπομένοντος όγκου πετρελαίου

> Skimmers

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η διαδικασία συλλογής του πετρελαίου από τα skimmers ως προς το χρόνο. Τα υπό κλίση τμήματα αντιστοιχούν στη χρονική διάρκεια λειτουργίας των skimmers ενώ τα οριζόντια τμήματα αντιστοιχούν στο χρονικό διάστημα όπου δε χρησιμοποιούνται skimmers και άρα δε συλλέγεται πετρέλαιο από την πετρελαιοκηλίδα. Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, ο συνολικός όγκος που συλλέγεται από την πετρελαιοκηλίδα αντιστοιχεί σε 7452 m³. Αυτό σημαίνει ότι σχεδόν η μισή ποσότητα του πετρελαίου που διέρρευσε συλλέχθηκε με την εφαρμογή των τριών skimmers.



Σχήμα 5.133: Ποσότητα πετρελαίου που συλλέχθηκε από τα skimmers (SpillSolver 2.0)

Συνολικός χρόνος εξάτμισης

Ακολούθως παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του κομβίου υπολογισμού αναφορικά με το χρόνο που απαιτείται για να εξατμιστεί η συνολική ποσότητα του πετρελαίου.

Evaporation Process vs	Time	Second Second					
Spillsolver 2.0 - output - button: Evaporation Time							
Standalone tab							
Oil Spill	Oil Spill Thickness Reduction. 0.00178741						
	Spill Diameter.	1225.11	m				
	Wind Velocity	154321	m/s				
	while vereenig:						
Meteo Const beta.		0.11					
Atm Const Coef:	1.2	2e-008					
Meteo Const alpha.		0.78					
Calculate	Recet	Total Evanoration Time	444 593 hours				
Calculate	Reset	Total Draporation Time:	111.000 nours				

Σχήμα 5.134: Παράθυρο υπολογισμού του συνολικού χρόνου εξάτμισης του πετρελαίου

Το αποτέλεσμα δείχνει ότι ο χρόνος που απαιτείται για να εξατμιστεί πλήρως η ποσότητα του πετρελαίου είναι 445 ώρες. Το χρονικό διάστημα έχει μειωθεί σε σημαντικό βαθμό. Παρατηρούμε ότι η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου σε συνδυασμό με τη χρήση των skimmers, μειώνει ακόμη περισσότερο το χρόνο μιας και η πετρελαιοκηλίδα εμφανίζει μεγαλύτερη εξάπλωση (μεγαλύτερη επιφάνεια και μικρότερο πάχος πετρελαιοκηλίδας) αλλά παράλληλα αφαιρείται και ποσότητα πετρελαίου από την κηλίδα. Οι υπόλοιπες κλιματολογικές συνθήκες ήταν ίδιες.

5.3.5 - Σενάριο 3



Σχήμα 5.135: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πετρελαιοκηλίδας στο τέλος της $5^{\eta\varsigma}$ μέρας (SpillSolver 2.0)

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί σε αύξηση της εξάπλωσης της πετρελαιοκηλίδας φτάνοντας στα 2,044 km². Η ποσότητα του πετρελαίου που εξατμίζεται παραμένει ίδια ενώ η διασπορά του πετρελαίου αυξάνεται, φτάνοντας στα 1088,4 m³, ποσότητα που αντιστοιχεί στο 7,27% του πετρελαίου που εγχύεται.

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα που επηρεάζονται τελικά από τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου. Όπως είδαμε με βάση τα προηγούμενα σενάρια, τα διαγράμματα της εξάτμισης πετρελαίου, της ιζηματοποίησης και του ρυθμού διασποράς δε μεταβλήθηκαν λόγω του ανέμου.



εναπομένον πετρέλαιο εξάτμιση διασπορά.

Σχήμα 5.136: Διάγραμμα της τύχης του συνόλου του πετρελαίου από το SpillSolver 2.0



εναπομείνων πετρέλαιο εξάτμιση διασπορά Σχήμα 5.137: Διάγραμμα της τύχης του συνόλου του πετρελαίου από το ADIOS 2

Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζεται συνοπτικά η μεταβολή του συνόλου του πετρελαίου, ενώ ξεχωριστά η κάθε καμπύλη παρουσιάζεται στη συνέχεια. Όπως παρατηρούμε από το γράφημα που εξάγεται από το Adios, η διασπορά του πετρελαίου αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας του πετρελαίου.



Εξάπλωση πετρελαιοκηλίδας

Σχήμα 5.138: Εξέλιξη της εξάπλωσης της πετρελαιοκηλίδας (SpillSolver 2.0)

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου αυξάνεται η εξάπλωση της πετρελαιοκηλίδας, φτάνοντας στα 2*10⁶ km². Η μορφή της καμπύλης παραμένει ίδια.

> Διασπορά



Σχήμα 5.139: Διασπορά πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι η διασπορά του πετρελαίου αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, φτάνοντας στα 1200 m³ πετρελαίου.

Αντίστοιχο αποτέλεσμα προκύπτει και από το γράφημα του Adios, από όπου φαίνεται ότι το ποσοστό του πετρελαίου που υφίσταται διασπορά κυμαίνεται από 4-5,5%, ενώ στην περίπτωση με τη χαμηλότερη ταχύτητα ανέμου (σενάριο 2), το ποσοστό αυτό έφτανε στο 1,22% κατά μέγιστη τιμή.



Σχήμα 5.140: Διασπορά πετρελαίου (ADIOS 2)

Πάχος πετρελαιοκηλίδας



Σχήμα 5.141: Εξέλιξη του πάχους της πετρελαιοκηλίδας (SpillSolver 2.0)

Το πάχος της πετρελαιοκηλίδας φαίνεται να μειώνεται ελαφρώς σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια 1 και 2, λόγω της αύξησης της επιφάνειας της πετρελαιοκηλίδας.

> Ιζώδες πετρελαίου



Σχήμα 5.142: Χρονική εξέλιξη ιξώδους πετρελαίου (SpillSolver 2.0)



Σχήμα 5.143: Εξέλιξη ιζώδους πετρελαίου (ADIOS 2)

Τα διαγράμματα του ιξώδους δε μεταβλήθηκαν με την περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, όπως προέκυψε τόσο από το SpillSolver όσο και από το Adios.

Πυκνότητα πετρελαίου

Όπως και με το ιξώδες, η περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας του ανέμου σε σχέση με το σενάριο 2 δεν οδήγησε σε μεταβολή της πυκνότητας του πετρελαίου, όπως προέκυψε τόσο από το SpillSolver όσο και από το Adios.



Σχήμα 5.144: Εξέλιξη πυκνότητας πετρελαίου (SpillSolver 2.0)





Γαλακτωματοποίηση



Σχήμα 5.146: Εξέλιξη του ποσοστού γαλακτωματοποίησης (SpillSolver 2.0)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η εξέλιξη του ποσοστού γαλακτωματοποίησης με την πάροδο του χρόνου. Η μορφή καμπύλης είναι ακόμη πιο απότομη με την περαιτέρω αύξηση της έντασης του ανέμου. Έτσι έχουμε σχεδόν κατακόρυφη αύξηση του ποσοστού γαλακτωματοποίησης και άμεση σταθεροποίησή του ποσοστού στο 80%. Επίσης η αβεβαιότητα και σε αυτή την περίπτωση είναι αμετάβλητη σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια και ίση με 10%.



Αντίστοιχης μορφής με αυτό του SpillSolver είναι και το διάγραμμα που προκύπτει από το ADIOS, με μικρότερη όμως κλίση της καμπύλης. Έτσι σε αυτό το διάγραμμα η επίδραση αύξησης της ταχύτητας του ανέμου έχει άμεση επίδραση στο ποσοστό γαλακτωματοποίησης, όχι όμως όπως στο SpillSolver. Επίσης η καμπύλη είναι σχεδόν ίδια με αυτή του προηγούμενου σεναρίου με μικρότερη ένταση ανέμου (30 έναντι 51 kn). Η διαφοροποίηση των ποσοστών δεν μεταβάλλεται με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και είναι ίση με 10%. Έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι το μοντέλο προσομοίωσης του SpillSolver.

Ρυθμός παράσυρσης του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη



Σχήμα 5.148: Ρυθμός παράσυρσης του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη

Ο ρυθμός παράσυρσης αυξάνεται κατά μια τάξη μεγέθους με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου από 30 knots σε 51 knots, ενώ η μορφή της καμπύλης παραμένει ίδια.

Κρίσιμη διάμετρος σταγόνων πετρελαίου και ταχύτητα άνωσης



Σχήμα 5.149: Κρίσιμη διάμετρος σταγόνων πετρελαίου

Παρατηρούμε ότι το διάγραμμα μεταβολής της κρίσιμης διαμέτρου σταγόνας πετρελαίου δε μεταβάλλεται με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου.

Παρακάτω τα διαγράμματα για Stokes και Reynolds. Αυτό που δείχνει τη μεταβολή της ταχύτητας άνωσης κατά Stokes παρουσιάζει μια πολύ μικρή μεταβολή όσον αφορά την κλίση της καμπύλης του διαγράμματος, η οποία γίνεται ακόμη πιο απότομη και άρα η τιμή της άνωσης σταθεροποιείται γρηγορότερα στα 2,4*10⁻⁹ m/s. Το ίδιο ισχύει και για την ταχύτητα άνωσης κατά Reynolds. Παρατηρούμε ότι η τιμή σταθεροποιείται ακόμη πιο γρήγορα με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου.



Σχήμα 5.150: Ταχύτητα άνωσης κατά Stokes



Σχήμα 5.151: Ταχύτητα άνωσης κατά Reynold



Σχήμα 5.152: Εναπομένων όγκος πετρελαίου (SpillSolver 2.0)



Σχήμα 5.153: Εναπομένων όγκος πετρελαίου (ADIOS 2)

Το πετρέλαιο που απομένει στην πετρελαιοκηλίδα δε φαίνεται να μεταβάλλεται με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου στους 51 knots.

Εκτίμηση αρχικού όγκου πετρελαίου

🚺 Spilled Oil Volume Estimato	r	100		_ O X			
Svillsolver 2.0 - output - button: Volume Estimation							
Standalone Tab							
To see the initial oil volume in a cravh please insert data, click calculate, close this tab and output, click solve again and choose the matching gravh.							
Time.		7199 min					
			Initial Spill Volume				
Preset Parameters							
Oil Spill Surface.	2.04364e+006	m^2	3839.43	m^3			
Wind Velocity.	26.2346	m/s					
Oil Density.	833	Kgr/m^3					
Water Density.	1026.6	Kgr/m^3	Calculate				

Σχήμα 5.154: Παράθυρο υπολογισμού εκτιμώμενου όγκου πετρελαίου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές

> Συνολικός χρόνος εξάτμισης

Ακολούθως παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του κομβίου υπολογισμού αναφορικά με το χρόνο που απαιτείται για να εξατμιστεί η συνολική ποσότητα του πετρελαίου.

Το αποτέλεσμα δείχνει ότι ο χρόνος που απαιτείται για να εξατμιστεί πλήρως η ποσότητα του πετρελαίου είναι 76 ώρες. Το χρονικό διάστημα είναι σχεδόν 3 μέρες που σημαίνει ότι η συνολική ποσότητα του πετρελαίου δείχνει να μπορεί να εξατμιστεί, σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, στο διάστημα των 5 ημερών του φαινομένου. Είναι εμφανές λοιπόν πόσο σημαντική επίδραση έχει η ένταση της ταχύτητας του ανέμου στο χρόνο εξάτμισης.

🖉 Evaporation Process vs Time							
Spillsolver 2.0 - output - button: Evaporation Time							
Standalone tab							
Oil snill	Thickness Reduction	0.000453963	m				
Ch Spin	THICKNESS ROUGHON:						
	Spill Diameter.	1430.57	m				
Wind Velocity.		26.2346	m/s				
Atm Const Coef	1.2e	0.11					
Meteo Const alpha	1.20	0.78					
-							
Calculate	Reset 1	Total Evaporation Time.	75.9302 hours				

Σχήμα 5.155: Παράθυρο υπολογισμού του συνολικού χρόνου εξάτμισης του πετρελαίου

5.3.6 - Σενάριο 3Α



Σχήμα 5.156: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πετρελαιοκηλίδας στο τέλος της $5^{\eta\varsigma}$ μέρας (SpillSolver 2.0)

Παρατηρούμε ότι η εισαγωγή των skimmers εμποδίζει την εξάπλωση της πετρελαιοκηλίδας, αφού στο σενάριο αυτό η τελική επιφάνειά της στο τέλος της 5^{ης} μέρας είναι 1,602 km². Η ποσότητα του πετρελαίου που εξατμίζεται παραμένει η ίδια ενώ το ποσοστό του πετρελαίου που διασπείρεται ή καταβυθίζεται αυξάνεται ελαφρώς.



εναπομένον πετρέλαιο εξάτμιση διασπορά. Σχήμα 5.157: Διάγραμμα της τύχης του συνόλου του πετρελαίου από το SpillSolver 2.0



εναπομείνων πετρέλαιο εξάτμιση διασπορά Σχήμα 5.158: Διάγραμμα της τύχης του συνόλου του πετρελαίου από το ADIOS 2

Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζεται συνοπτικά η μεταβολή του συνόλου του πετρελαίου, ενώ ξεχωριστά η κάθε καμπύλη παρουσιάζεται στη συνέχεια. Στην περίπτωση αυτή εισάγεται στο γράφημα αυτό και το ποσοστό του πετρελαίου που συλλέγεται μέσω των skimmers.



Εξάπλωση πετρελαιοκηλίδας

Σχήμα 5.159: Εξέλιξη της εξάπλωσης της πετρελαιοκηλίδας (SpillSolver 2.0)

Παρατηρούμε ότι με την εισαγωγή των skimmers η εξάπλωση της πετρελαιοκηλίδας είναι μικρότερη, διότι είναι μικρότερη η ποσότητα του πετρελαίου που παραμένει στη θάλασσα.

> Διασπορά









Παρατηρούμε ότι για το SpillSolver, με την εισαγωγή των skimmers η διασπορά του πετρελαίου είναι μικρότερη, αλλά παρουσιάζεται αρκετά μεγάλη επίδραση της αβεβαιότητας στη μορφή της καμπύλης, ενώ για το ADIOS, το ποσοστό του πετρελαίου που υφίσταται διασπορά δε μεταβάλλεται λόγω της εισαγωγής των skimmers.

Πάχος πετρελαιοκηλίδας



Σχήμα 5.162: Εξέλιξη του πάχους της πετρελαιοκηλίδας (SpillSolver 2.0)

Παρατηρούμε ότι το πάχος της πετρελαιοκηλίδας μειώνεται με την εισαγωγή των skimmers λόγω της αφαίρεσης πετρελαίου μέσω των skimmers.

Εναπομένων όγκος πετρελαίου



Σχήμα 5.163: Εναπομένων όγκος πετρελαίου (ADIOS 2.0)

Όπως προκύπτει από το παραπάνω διάγραμμα, το ποσοστό του πετρελαίου που παραμένει στην πετρελαιοκηλίδα μειώνεται λόγω της εισαγωγής των skimmers.

> Γαλακτωματοποίηση

Στο συγκεκριμένο σενάριο 3A δεν είχε καμία διαφοροποίηση η χρήση των skimmers στα αποτελέσματα της γαλακτωματοποίησης και στο SpillSolver και στο ADIOS.

> Skimmers



Σχήμα 5.164: Ποσότητα πετρελαίου που συλλέχθηκε από τα skimmers (SpillSolver 2.0)

Ο όγκος του πετρελαίου που αφαιρείται μέσω των skimmers παρουσιάζεται στο παραπάνω γράφημα μέσω των υπό κλίση τμημάτων. Μετά τη δράση των skimmers η ποσότητα του πετρελαίου που παραμένει στην πετρελαιοκηλίδα είναι 7500 m³.

5.3.7 - Σενάριο 4: Αλλαγή τύπου πετρελαίου



Σχήμα 5.165: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πετρελαιοκηλίδας στο τέλος της 5^{ης} μέρας (SpillSolver 2.0)

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση όπου διαρρέει βαρύτερο πετρέλαιο, όπως του Kuwait, ο όγκος του πετρελαίου που εγχέεται είναι μικρότερος και η τελική επιφάνεια της πετρελαιοκηλίδας στο τέλος της $5^{\eta\varsigma}$ μέρας είναι κατά πολύ μικρότερη σε σχέση με το σενάριο 1. Συγκεκριμένα στην περίπτωση αυτή η τελική επιφάνεια της πετρελαιοκηλίδας είναι 0,440 km², ενώ στην περίπτωση του ελαφρού πετρελαίου ήταν 1,271 km².



εναπομένον πετρέλαιο εξάτμιση διασπορά. Σχήμα 5.166: Διάγραμμα της τύχης του συνόλου του πετρελαίου από το SpillSolver 2.0



Σχήμα 5.167: Διάγραμμα της τύχης του συνόλου του πετρελαίου από το ADIOS 2

Παρατηρούμε ότι η εξάτμιση του πετρελαίου στην περίπτωση αυτή μειώνεται σε σχέση με το σενάριο 1 όπου το πετρέλαιο είναι ελαφρύ, ενώ αυξάνεται η διασπορά του.



> Εξάπλωση και ρυθμός εξάπλωσης

Σχήμα 5.168: Εξέλιξη της εξάπλωσης της πετρελαιοκηλίδας (SpillSolver 2.0)

Όπως ήταν αναμενόμενο, η εξάπλωση της πετρελαιοκηλίδας μειώθηκε, φτάνοντας στα $4*10^5~m^2$ στο τέλος της $5^{\eta\varsigma}$ μέρας.



Σχήμα 5.169: Ρυθμός εξάπλωσης πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

Παρατηρούμε ότι ο ρυθμός εξάπλωσης παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές σε σχέση με το σενάριο 1, με τις περισσότερες τιμές της καμπύλης να είναι μικρότερες από 0,0005 km²/h.

> Διασπορά και ρυθμός διασποράς

Σε σύγκριση με το σενάριο 1 παρατηρούμε ότι η διασπορά μειώνεται ελαφρώς.

Ενώ για το ADIOS, παρατηρούμε ότι η μορφή της καμπύλης στην περίπτωση αυτή είναι διαφορετική. Η διασπορά παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές φτάνοντας στο 3% κατά μέγιστη τιμή στο τέλος της 5^{ης} μέρας. Η αύξηση της διασποράς είναι πολύ πιο αργή σε σχέση με το σενάριο 1 που αφορούσε το ελαφρύ πετρέλαιο.



Σχήμα 5.170: Διασπορά πετρελαίου (SpillSolver 2.0)





Εξάτμιση πετρελαίου



Σχήμα 5.172: Όγκος πετρελαίου που έχει εξατμιστεί με την πάροδο του χρόνου(SpillSolver 2.0)

Η αλλαγή στον τύπο του πετρελαίου επιδρά ελάχιστα στην συνολική ποσότητα του πετρελαίου που εξατμίζεται.



Σχήμα 5.173: Ποσοστό πετρελαίου που έχει εξατμιστεί με την πάροδο του χρόνου (ADIOS 2)

Το ποσοστό του πετρελαίου που εξατμίζεται όπως προκύπτει από το γράφημα του Adios μειώνεται ως ποσοστό του συνολικού πετρελαίου.

Πάχος πετρελαιοκηλίδας



Σχήμα 5.174: Εξέλιξη του πάχους της πετρελαιοκηλίδας (SpillSolver 2.0)

Το πάχος της πετρελαιοκηλίδας αυξάνεται στην περίπτωση όπου το πετρέλαιο που διαρρέει στη θάλασσα είναι μεγαλύτερης πυκνότητας. Όσο διαρκεί η διαρροή το πάχος της πετρελαιοκηλίδας αυξάνεται, φτάνοντας κατά μέγιστο στην τιμή 0,045 m ενώ στη συνέχεια μειώνεται καταλήγοντας στο τέλος της 5^{ης} μέρας στα 0,03 m. Στη περίπτωση αυτή το πάχος της πετρελαιοκηλίδας είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το σενάριο 1, ενώ όπως αναφέρθηκε ήδη, η έκταση της πετρελαιοκηλίδας είναι μικρότερη.
> Ιζηματοποίηση



Σχήμα 5.175: Εξέλιξη της ιζηματοποίησης (SpillSolver 2.0)

Η ιζηματοποίηση δεν επηρεάστηκε από την αλλαγή στον τύπο του πετρελαίου σε σχέση με το σενάριο 1.

> Ιζώδες πετρελαίου



Σχήμα 5.176: Χρονική εξέλιξη ιξώδους πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

Παρατηρούμε ότι η καμπύλη μεταβολής του ιξώδους επηρεάζεται πολύ από την αβεβαιότητα του μοντέλου, καθώς οι δύο από τις καμπύλες παρουσιάζουν σημαντική σύγκλιση μεταξύ τους ενώ η καμπύλη που παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές που μπορεί να λάβει το ιξώδες αποκλίνει σημαντικά από τις προηγούμενες. Όπως ήταν αναμενόμενο παρατηρείται σημαντική απόκλιση και ως προς τις τιμές ιξώδους του πετρελαίου του σεναρίου 1.



Σχήμα 5.177: Εξέλιξη ιξώδους πετρελαίου (ADIOS 2)

Στο διάγραμμα του ιξώδους παρατηρείται ασυμφωνία μεταξύ του SpillSolver και του Adios. Οι τιμές πάντως που δίνει το Adios βρίσκονται μέσα στο εύρος τιμών που δίνει το SpillSolver, λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα.

Πυκνότητα πετρελαίου



Σχήμα 5.178: Εξέλιξη πυκνότητας πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

Όπως ήταν αναμενόμενο η πυκνότητα του πετρελαίου είναι μεγαλύτερη σε σχέση με του πετρελαίου του σεναρίου 1. Παρατηρούμε ότι και στην περίπτωση αυτή η αβεβαιότητα επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα του μοντέλου.



Σε σύγκριση με το σενάριο 1, παρατηρούμε ότι η πυκνότητα του πετρελαίου που εγχύεται στη θάλασσα είναι μεγαλύτερη, όπως ήταν αναμενόμενο αφού το πετρέλαιο του σεναρίου 4 είναι βαρύτερο. Όμως παρατηρούμε ότι η πυκνότητα του πετρελαίου επηρεάζεται από τα υπόλοιπα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην πετρελαιοκηλίδα, όπως το μεγαλύτερο ποσοστό εξάτμισης του ελαφρύτερου πετρελαίου και τελικά στο τέλος της $5^{\eta_{\rm S}}$ μέρας η πυκνότητα του ελαφρύτερου πετρελαίου φτάνει στις ίδιες τιμές με του βαρύτερου.

Γαλακτωματοποίηση



Σχήμα 5.180: Εξέλιξη του ποσοστού γαλακτωματοποίησης (SpillSolver 2.0)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται εξέλιξη ποσοστού η του γαλακτωματοποίησης με την πάροδο του χρόνου. Παρατηρούμε παρόμοια μορφή καμπύλης με αυτή της πυκνότητας και του ιξώδους, αλλά και με αυτή των σεναρίων με μικρότερη πυκνότητα πετρελαίου. Έτσι φαίνεται αρχικά έντονη αύξηση του ποσοστού γαλακτωματοποίησης μέχρι και τη μέση της δεύτερης μέρας του φαινομένου και στη συνέχεια σταθεροποίησή του κοντά στο 90%. Είναι εμφανές ότι η πετρελαίου, αύξηση της πυκνότητας του αυξάνει και το ποσοστό γαλακτωματοποίησης του πετρελαίου. Επίσης η αβεβαιότητα είναι μικρή σε αυτή την περίπτωση.



Σχήμα 5.181: Εξέλιξη του ποσοστού γαλακτωματοποίησης (ADIOS 2.0)

Αντίστοιχης μορφής είναι και το διάγραμμα που προκύπτει από το ADIOS. Και στα δύο διαγράμματα η γαλακτωματοποίηση αυξάνεται με τον ίδιο περίπου ρυθμό και εμφανίζοντας παρόμοια συμπεριφορά. Το μέγιστο και στις δύο γραφικές παραστάσεις παρατηρείται στο τέλος της 2^{ης} μέρας. Οι τιμές είναι σχεδόν ίδιες και μπορεί να θεωρηθεί ότι το μοντέλο προσομοίωσης του SpillSolver είναι αξιόπιστο. Και τα δυο ποσοστά γαλακτωματοποίησης σταθεροποιούνται στο 90%, απλώς στο SpillSolver, το φαινόμενο εξελίσσεται ταχύτερα.

Ρυθμός παράσυρσης του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη



Σχήμα 5.182: Ρυθμός παράσυρσης του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη

Παρατηρούμε ότι το διάγραμμα του ρυθμού παράσυρσης του βαρύτερου πετρελαίου παρουσιάζει ίδια μορφή και ίδια τάξη μεγέθους σε σχέση με το ελαφρύτερο πετρέλαιο. Η διαφορά που μπορεί να επισημανθεί είναι ότι στο βαρύτερο πετρέλαιο, η μείωση του ρυθμού παράσυρσης του είναι ταχύτερη.

Κρίσιμη διάμετρος σταγόνων πετρελαίου και ταχύτητα άνωσης



Σχήμα 5.183: Κρίσιμη διάμετρος σταγόνων πετρελαίου

Η κρίσιμη διάμετρος των σταγόνων του πετρελαίου μειώνεται ταχύτερα σε σχέση με το σενάριο 1.

Όσον αφορά τις ταχύτητες των σταγονιδίων, σύμφωνα και με την επόμενη σελίδα, έχουμε:

Η ταχύτητα άνωσης κατά Stokes παρουσιάζει έντονη αύξηση και φτάνει στην τελική τιμή της γρηγορότερα σε σύγκριση με το σενάριο 1 που αφορά το ελαφρύτερο πετρέλαιο. Παρατηρούμε ότι σε σύγκριση με το σενάριο 1, η τελική ταχύτητα άνωσης κατά Stokes είναι μικρότερη, φτάνοντας στην τιμή 1,5 *10⁻⁹ m/s.

Η ίδια τάση ισχύει και για την ταχύτητα άνωσης κατά Reynolds. Η αύξηση είναι απότομη και η τελική τιμή που επιτυγχάνεται είναι χαμηλότερη σε σχέση με το σενάριο 1 που αφορά το ελαφρύτερο πετρέλαιο. Στην περίπτωση του ελαφρύτερου πετρελαίου η ταχύτητα άνωσης φτάνει στα 8 10^{-4} m/s ενώ στην περίπτωση του βαρύτερου πετρελαίου η ταχύτητα άνωσης είναι λίγο μεγαλύτερη από 5 * 10^{-4} m/s.









Εναπομένων όγκος πετρελαίου



Σχήμα 5.186: Εναπομένων όγκος πετρελαίου (SpillSolver 2.0)





Το ποσοστό του πετρελαίου που παραμένει στην πετρελαιοκηλίδα μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, φτάνοντας στο 60% της αρχικής ποσότητας. Η μορφή της καμπύλης σε σύγκριση με το σενάριο 1 δεν παρουσιάζει διαφοροποίηση.

📣 Remaining Oil Volume vs Tim	e	200				
Spillsolver 2.0 - ouput - button: Volume vs Time						
To see the matching g	raph, please insert data, click calculate, close	this tab and output,	click solve again and then choose the graph.			
Initial Spill Volume:	12772.5	m^3				
Water in Emulsion	0142125					
water in Entersion:	0.145155		Oil Volume (time):			
Time Reference.	120	Hours	8165.04 111-5			
	_					
Preset Parameters						
Solubility (Fd):	0.121773 n	1^3/s				
Evaporation Losses (Fe):	0.330463 n	n^3/s	Calculate			

Σχήμα 5.188: Παράθυρο υπολογισμού εναπομένοντος όγκου πετρελαίου

Θέτοντας ως χρόνο υπολογισμού τις 120 ώρες, ο εναπομένων όγκος του πετρελαίου υπολογίζεται ίσος με 8165 m³.

Εκτίμηση αρχικού όγκου πετρελαίου

🛃 Spilled Oil Volume Estimator						
Svillsolver 2.0 - output - button: Volume Estimation						
		Standalone Tab				
To see the initial oil volume in	n a graph, please insert data, click	calculate, close this tab	and output, click solve again and choose the matching graph.			
Time:		7199 min				
			Initial Spill Volume.			
Preset Parameters						
Oil Spill Surface.	440429	m^2				
Wind Velocity.	4.11523	m/s				
Oil Density.	976	Kgr/m^3				
Water Density.	1026.6	Kgr/m^3	Calculate			

Σχήμα 5.189: Παράθυρο υπολογισμού εκτιμώμενου όγκου πετρελαίου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές

Από τον παραπάνω υπολογισμό φαίνεται ότι θέτοντας στο μοντέλο ως χρόνο υπολογισμού 7199 min, λαμβάνοντας υπόψη την επιφάνεια της πετρελαιοκηλίδας, την ταχύτητα και την ένταση του ανέμου και το ιξώδες του πετρελαίου εκτιμάται ο όγκος του πετρελαίου. Στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται ίσος με 1409 m³. Σε αντιδιαστολή με το μοντέλο υπολογισμού του όγκου συναρτήσει του χρόνου, φαίνεται ότι το συγκεκριμένο μοντέλο εκτίμησης αποκλίνει, δίνοντας χαμηλότερη τιμή σε σχέση με την πραγματική.

Συνολικός χρόνος εξάτμισης

Ακολούθως παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του κομβίου υπολογισμού αναφορικά με το χρόνο που απαιτείται για να εξατμιστεί η συνολική ποσότητα του πετρελαίου, για την περίπτωση στιγμιαίας διαρροής πετρελαίου.

Evaporation Process vs	Time	il baipr	· indential in . Inc				
	Spillsolver 2.0 - output - button: Evaporation Time						
	Standalone tab						
Oil Spill	Thickness Reduction.		0.00581675	m			
	Spill Diameter.		580.577	m			
	Wind Velocity.		4.11523	m/s			
Meteo Const beta:		0.11					
Atm Const Coef:	Atm Const Coef: 1.2e-008						
Meteo Const alpha:		0.78					
		1					
Calculate	Reset	Total	Evanoration Time.		37367 hours		
Odiculate	noot		braporation ratio.		oroo.r nour		

Σχήμα 5.190: Παράθυρο υπολογισμού του συνολικού χρόνου εξάτμισης του πετρελαίου

Το αποτέλεσμα δείχνει ότι ο χρόνος που απαιτείται για να εξατμιστεί πλήρως η ποσότητα του πετρελαίου είναι 3738 ώρες. Το χρονικό διάστημα αυτό αφορά στιγμιαία διαρροή πετρελαίου, αλλά χαμηλή ένταση ανέμου.

5.3.8 - Σενάριο 5: Στιγμιαία διαρροή πετρελαίου



Σχήμα 5.191: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πετρελαιοκηλίδας στο τέλος της $5^{\eta\varsigma}$ μέρας (SpillSolver 2.0)

Στην περίπτωση της στιγμιαίας διαρροής πετρελαίου η τελική επιφάνεια της πετρελαιοκηλίδας είναι 0,148 m². Η συνολική ποσότητα του πετρελαίου που διαρρέει είναι 240 m³. Η ποσότητα αυτή είναι πολύ μικρότερη από την περίπτωση της συνεχούς διαρροής, όπου η ποσότητα που διαρρέει στη θάλασσα είναι 14965 m³. Με τον τρόπο αυτό δικαιολογείται και η μικρότερη εξάπλωση της πετρελαιοκηλίδας. Το ποσοστό του πετρελαίου που εξατμίζεται είναι σχεδόν 30% και άρα η ποσότητα που εξατμίζεται είναι 71,5 m³.Το ποσοστό του πετρελαίου που εξατμίζεται παραμένει ίδιο, ενώ το ποσοστό της διασποράς αυξάνεται από 3,46% σε 5,02% στην περίπτωση της συνεχούς διαρροής.



εναπομένον πετρέλαιο εξάτμιση διασπορά.

Σχήμα 5.192: Διάγραμμα της τύχης του συνόλου του πετρελαίου από το SpillSolver 2.0



εναπομείνων πετρέλαιο εξάτμιση διασπορά Σχήμα 5.193: Διάγραμμα της τύχης του συνόλου του πετρελαίου από το ADIOS 2

Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζεται συνοπτικά η μεταβολή του συνόλου του πετρελαίου, ενώ ξεχωριστά η κάθε καμπύλη παρουσιάζεται στη συνέχεια.



Εξάπλωση και ρυθμός εξάπλωσης

Σχήμα 5.194: Εξέλιξη της εξάπλωσης της πετρελαιοκηλίδας (SpillSolver 2.0)

Σύμφωνα με το SpillSolver η εξάπλωση της πετρελαιοκηλίδας μειώνεται κατά μια τάξη μεγέθους σε σχέση με την περίπτωση της συνεχούς διαρροής, φτάνοντας στα 14*10⁴ m², όση δηλαδή και η επιφάνεια της πετρελαιοκηλίδας. Από τη μορφή των καμπυλών παρατηρούμε ότι με την πάροδο του χρόνου η αβεβαιότητα ως προς την τελική επιφάνεια της πετρελαιοκηλίδας αυξάνεται.



Σχήμα 5.195: Ρυθμός εξάπλωσης πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

Το διάγραμμα που αφορά το ρυθμό εξάπλωσης της πετρελαιοκηλίδας παρουσιάζει μια μικρή αύξηση της στιγμή της διαρροής, αλλά στη συνέχεια εμφανίζει σχεδόν μηδενικές τιμές.

Διασπορά πετρελαίου



Σχήμα 5.196: Διασπορά πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

Η διασπορά του πετρελαίου αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, φτάνοντας στα 13 m³ στο τέλος της $5^{\eta\varsigma}$ μέρας. Προφανώς η τιμή αυτή είναι πολύ μικρότερη από την περίπτωση της συνεχούς διαρροής, καθώς και η συνολική ποσότητα του πετρελαίου που διαρρέει είναι πολύ μικρότερη.

Από το ADIOS τώρα, προκύπτει το διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού διασποράς. Όπως παρατηρούμε, το ποσοστό της διασποράς παρουσιάζει έντονη αύξηση κατά τις πρώτες ώρες και στη συνέχεια σταθεροποιείται γύρω στο 0,3%. Στην περίπτωση της συνεχούς διαρροής, το ποσοστό διασποράς κατά τις πρώτες ώρες παρουσίαζε πιο έντονη διακύμανση και στη συνέχεια σταθεροποιήθηκε σε μια τιμή λίγο χαμηλότερη, περίπου ίση με 0,15%. Η τιμή που δίνει το ADIOS για τη διασπορά αποκλίνει σημαντικά από την τιμή που προκύπτει από το SpillSolver, το οποίο υπολογίζει το ποσοστό της διασποράς γύρω στο 5%.



Σχήμα 5.197: Διασπορά πετρελαίου (ADIOS 2.0)

> Εξάτμιση πετρελαίου



Σχήμα 5.198: Όγκος πετρελαίου που έχει εξατμιστεί με την πάροδο του χρόνου (SpillSolver 2.0)

Όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα του SpillSolver, η ποσότητα του πετρελαίου που εξατμίζεται σε διάστημα πέντε ημερών φτάνει στα 70 m³. Η μορφή της καμπύλης παρουσιάζει στην αρχή του φαινομένου έντονη αύξηση και στη συνέχεια η καμπύλη σταθεροποιείται. Σε σύγκριση με την περίπτωση της συνεχούς διαρροής, διαφορές παρατηρούνται κατά τις πρώτες ώρες μελέτης του φαινομένου, όπως είναι αναμενόμενο. Στην περίπτωση της συνεχούς διαρροής, η αύξηση της ποσότητας του πετρελαίου δεν είναι τόσο έντονη, αλλά παρατηρείται μια γραμμική συσχέτιση μεταξύ της ποσότητας του διαρρέει και της ποσότητας που εξατμίζεται.



Σχήμα 5.199: Ποσοστό πετρελαίου που έχει εξατμιστεί με την πάροδο του χρόνου (ADIOS 2)

Από το διάγραμμα του ADIOS παρατηρούμε επίσης ότι στην περίπτωση της στιγμιαίας διαρροής, το ποσοστό εξάτμισης του πετρελαίου αυξάνεται έντονα κατά τις πρώτες ώρες και σταθεροποιείται πολύ πιο γρήγορα σε σχέση με την περίπτωση της συνεχούς διαρροής, όπου η αύξηση του ποσοστού του πετρελαίου που εξατμίζεται είναι πιο σταδιακή.

Πάχος πετρελαιοκηλίδας



Thickness of oil spill

Σχήμα 5.200: Εξέλιξη του πάχους της πετρελαιοκηλίδας (SpillSolver 2.0)

Από το διάγραμμα μεταβολής του πάχους της πετρελαιοκηλίδας παρατηρούμε ότι το πάχος ξεκινά από τη μέγιστη τιμή του, καθώς στην έναρξη της διαρροής έχει εγχυθεί όλη η ποσότητα του πετρελαίου. Στη συνέχεια το πάχος της πετρελαιοκηλίδας μειώνεται εκθετικά, καθώς αυξάνεται η εξάπλωση, φτάνοντας στην τιμή των 0,0017 m. Αντιθέτως, το αντίστοιχο διάγραμμα για την περίπτωση της συνεχούς διαρροής, παρουσιάζει γραμμική αύξηση του πάχους κατά τις πρώτες ώρες, όσο η ποσότητα του πετρελαίου που εγχέεται αυξάνεται και στη συνέχεια παρατηρείται η ίδια εκθετική μείωση όπως και στην περίπτωση της στιγμιαίας διαρροής, φτάνοντας στα 0,011 m στο τέλος της $5^{η_{\varsigma}}$ μέρας.

> Ιζηματοποίηση



Σχήμα 5.201: Εξέλιξη της ιζηματοποίησης (SpillSolver 2.0)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται το φαινόμενο της ιζηματοποίησης όπως εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου. Παρατηρούμε ότι το φαινόμενο εξελίσσεται γραμμικά και στο τέλος της 5^{ης} μέρας 0,01 m³ πετρελαίου έχει εναποτεθεί ως ίζημα. Σε σχέση με την περίπτωση της συνεχούς διαρροής, το διάγραμμα δεν παρουσιάζει καμιά μεταβολή.

Ιζώδες πετρελαίου



Σχήμα 5.202: Χρονική εξέλιξη ιζώδους πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

Παρατηρούμε ότι η εξέλιξη του ιξώδους του πετρελαίου δεν παρουσιάζει καμία διαφοροποίηση σε σχέση με την περίπτωση της συνεχούς διαρροής.



Σχήμα 5.203: Εξέλιξη ιξώδους πετρελαίου (ADIOS 2)

Παρατηρούμε ότι υπάρχει απόκλιση μεταξύ τις τιμής που βγάζει το ADIOS και της τιμής που υπολογίζει το SpillSolver . Το ADIOS υπολογίζει τη τιμή του ιξώδους στα 100000 cSt ενώ το SpillSolver στα 290 cSt. Βέβαια και στα δύο διαγράμματα η τιμή του ιξώδους σταθεροποιείται για τον ίδιο αριθμό ωρών. Από το διάγραμμα του ADIOS παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της στιγμιαίας διαρροής πετρελαίου η αβεβαιότητα στην τιμή του ιξώδους είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την περίπτωση της συνεχούς διαρροής.

Πυκνότητα πετρελαίου

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του SpillSolver η εξέλιξη της πυκνότητας του πετρελαίου στην περίπτωση που η διαρροή του πετρελαίου είναι στιγμιαία είναι ίδια με την περίπτωση όπου η διαρροή του πετρελαίου είναι συνεχής. Όπως είναι αναμενόμενο η τιμή της πυκνότητας αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, καθώς τα διάφορα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην πετρελαιοκηλίδα, όπως η εξάτμιση, οδηγούν στην απομάκρυνση των ελαφρύτερων συστατικών του πετρελαίου, φτάνοντας στα 990 kg/m3.



Σχήμα 5.204: Εξέλιξη πυκνότητας πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

Όσον αφορά τα αποτελέσματα του ADIOS παρατηρούμε ότι οι τιμές της πυκνότητας συμφωνούν με το SpillSolver, αφού η τιμή της πυκνότητας σταθεροποιείται γύρω στα 1000 kg/m³. Συμφωνία παρατηρείται επίσης και με τις αντίστοιχες τιμές της πυκνότητας του σεναρίου συνεχούς διαρροής. Η μόνη διαφορά όπως και στην περίπτωση του ιξώδους είναι το εύρος της αβεβαιότητας, το οποίο στο συγκεκριμένο σενάριο είναι κατά πολύ μικρότερο.



Σχήμα 5.205: Εξέλιξη πυκνότητας πετρελαίου (ADIOS 2)

Γαλακτωματοποίηση

Η μεταβολή της πυκνότητας του πετρελαίου δεν είχε κάποια επίδραση στο ποσοστό γαλακτωματοποίησης και στην αντίστοιχη καμπύλη και στο SpillSolver και στο ADIOS.

Ρυθμός παράσυρσης του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται ο ρυθμός παράσυρσης του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη στην περίπτωση της στιγμιαίας διαρροής. Οι τιμές που λαμβάνει είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την περίπτωση της συνεχούς διαρροής, καθώς κυμαίνονται μεταξύ (0,5-4)*10⁻³ km²/h. Η μορφή της καμπύλης είναι διαφορετική, αφού παρατηρείται έντονη αύξηση του ρυθμού παράσυρσης με το χρόνο, ενώ στην περίπτωση της συνεχούς διαρροής η καμπύλη φθίνει εκθετικά. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί, καθώς στην περίπτωση της συνεχούς διαρροής η παράσυρση των σταγόνων του πετρελαίου γίνεται σταδιακά.



Σχήμα 5.206: Ρυθμός παράσυρσης του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη

Κρίσιμη διάμετρος σταγόνων πετρελαίου και ταχύτητα άνωσης

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται εξέλιξη της κρίσιμης διαμέτρου των σταγόνων πετρελαίου με το χρόνο, η οποία φαίνεται να μειώνεται ταχύτερα σε σχέση με την περίπτωση της συνεχούς διαρροής. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα που ακολουθούν, τα δύο διαγράμματα που περιγράφουν την ταχύτητα άνωσης έχουν παρόμοια μορφή. Σε σχέση με την περίπτωση συνεχούς διαρροής, οι καμπύλες παρουσιάζουν ταχύτερη σταθεροποίηση εντός των πρώτων 5 ωρών. Οι τιμές της ταχύτητας Reynolds είναι κατά 100.000 φορές μεγαλύτερες από τις τιμές της ταχύτητας Stokes.



Σχήμα 5.207: Κρίσιμη διάμετρος σταγόνων πετρελαίου



Σχήμα 5.208: Ταχύτητα άνωσης κατά Stokes





Εναπομένων όγκος πετρελαίου



Σχήμα 5.210: Εναπομένων όγκος πετρελαίου (SpillSolver 2.0)



Σχήμα 5.211: Εναπομένων όγκος πετρελαίου (ADIOS 2)

Από τα παραπάνω διαγράμματα η ποσότητα του πετρελαίου που παραμένει στο τέλος της $5^{\eta\varsigma}$ μέρας είναι 190 m³, ενώ υπολογίζοντας την αντίστοιχη ποσότητα από το ADIOS, προκύπτει ίση με 150 m³.

Στο αντίστοιχο παράθυρο τώρα, θέτοντας ως χρόνο υπολογισμού τις 120 ώρες, ο εναπομένων όγκος του πετρελαίου υπολογίζεται ίσος με 197 m³, πράγμα το οποίο επιβεβαιώνεται και από το αντίστοιχο διάγραμμα.

A Remaining Oil Volume vs Tim	e	100				
Spillsolver 2.0 - ouput - button: Volume vs Time						
To see the matching gr	aph, please insert data, click calculate, close	this tab and output,	click solve again and then choose the graph.			
		_				
Initial Spill Volume.	240.096	5 m^3				
Water in Emulsion.	0.127231	L	Oil Volume (time)			
			197.4 m^3			
Time Reference.	120	Hours				
	_					
Preset Parameters						
Solubility (Fd).	0.00170001	m^3/s				
Evaporation Losses (Fe):	0.280735	m^3/s	Calculate			
- ()	0.200100		Calculate			

Σχήμα 5.212: Παράθυρο υπολογισμού εναπομένοντος όγκου πετρελαίου

Εκτίμηση όγκου πετρελαίου

🚺 Sp	pilled Oil Volume Estimator	r					
	Spillsolver 2.0 - output - button. Volume Estimation						
	Standalone Tab						
Т	To see the initial oil volume in a graph, please insert data, click calculate, close this tab and output, click solve again and choose the matching graph.						
	Time.		7199 min	Initial Spill Volume			
1	Preset Parameters			221.075 m^3			
1	Oil Spill Surface.	147703	m^2				
	Wind Velocity,	4.11523	m/s				
	Oil Density.	833	Kgr/m^3				
	Water Density.	1026.6	Kgr/m^3	Calculate			

Σχήμα 5.213: Παράθυρο υπολογισμού εκτιμώμενου όγκου πετρελαίου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές

Από τον παραπάνω υπολογισμό φαίνεται ότι θέτοντας στο μοντέλο ως χρόνο υπολογισμού 7199 min, λαμβάνοντας υπόψη την επιφάνεια της πετρελαιοκηλίδας, την ταχύτητα και την ένταση του ανέμου και το ιξώδες του πετρελαίου εκτιμάται ο όγκος του πετρελαίου. Στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται ίσος με 221 m³.

Evaporation Process vs	Time	C Tradiger	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	100			
Spillsolver 2.0 - output - button: Evaporation Time							
		S	tandalone tab				
Oil Spill	Oil Spill Thickness Reduction.		0.0209266	m			
Spill Diameter.			748.761	m			
Wind Velocity		4.11523	m/s				
Meteo Const heta		011					
Atm Const Coef:	Atm Const Coef: 0.11						
Meteo Const alpha:		0.78			Chieferten		
	1	-					
Calculate	Reset	Total	Evaporation Time.		13824.8 hours		
Galculate	Reset	10041	zerepetation miles		10021.0 10013		

Συνολικός χρόνος εξάτμισης

•

Σχήμα 5.214: Παράθυρο υπολογισμού του συνολικού χρόνου εξάτμισης του πετρελαίου

Ο χρόνος εξάτμισης της συνολικής ποσότητας του πετρελαίου είναι 13.825 ώρες. Το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο, δεδομένης της μεγαλύτερης πυκνότητας του πετρελαίου αλλά και των ήπιων κλιματολογικών συνθηκών που θεωρήθηκαν στο συγκεκριμένο σενάριο.

Μετατόπιση της κηλίδας



Σχήμα 5.215: Διάγραμμα και παράθυρο υπολογισμού μετατόπισης κέντρου πετρελαιοκηλίδας λόγω του ανέμου και των ρευμάτων

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η κίνηση του κέντρου της πετρελαιοκηλίδας είναι γραμμική ως προς το χρόνο. Αναλυτικά παρουσιάζονται οι υπολογισμοί μέσω του αντίστοιχου κομβίου υπολογισμού στο πρόγραμμα Spillsolver. Όπως φαίνεται βάσει των υπολογισμών, λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα του ανέμου ίση με 4 m/s κατά την κατεύθυνση west, και θεωρώντας δυτικό ρεύμα ταχύτητας 2,5 kn, υπολογίζεται ότι σε 120 h, το κέντρο της πετρελαιοκηλίδας, κινούμενο με ταχύτητα 1,376 m/s σε κατεύθυνση 86,36° θα έχει διανύσει απόσταση 594 km.

5.3.9 - Σενάριο 6: Αύξηση της ταχύτητας του ανέμου



Σχήμα 5.216: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πετρελαιοκηλίδας στο τέλος της $5^{\eta\varsigma}$ μέρας (SpillSolver 2.0)

Στην περίπτωση όπου η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται από 8 knots σε 51 knots η τελική επιφάνεια της πετρελαιοκηλίδας αυξάνεται, φτάνοντας στα 0,920 km². Η συνολική ποσότητα του πετρελαίου που διαρρέει είναι πάλι 240 m³. Η ποσότητα που εξατμίζεται δεν επηρεάστηκε από τη μεταβολή του ανέμου, ενώ από την άλλη η διασπορά αυξήθηκε φτάνοντας σε ποσοστό 7,31%.



εναπομένον πετρέλαιο εξάτμιση διασπορά. Σχήμα 5.217: Διάγραμμα της τύχης του συνόλου του πετρελαίου από το SpillSolver 2.0



Σχήμα 5.218: Διάγραμμα της τύχης του συνόλου του πετρελαίου από το ADIOS 2
Εξάπλωση και ρυθμός εξάπλωσης



Σχήμα 5.219: Εξέλιξη της εξάπλωσης της πετρελαιοκηλίδας (SpillSolver 2.0)

Όπως αναφέρθηκε, η έκταση της πετρελαιοκηλίδας αυξάνεται στην περίπτωση όπου αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου.



Σχήμα 5.220: Ρυθμός εξάπλωσης πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

Το διάγραμμα που αφορά το ρυθμό εξάπλωσης της πετρελαιοκηλίδας παρουσιάζει μια μικρή αύξηση της στιγμή της διαρροής, αλλά στη συνέχεια εμφανίζει σχεδόν μηδενικές τιμές.

> Διασπορά πετρελαίου



Σχήμα 5.221: Διασπορά πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

Η διασπορά του πετρελαίου αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, φτάνοντας στα 17 m^3 στο τέλος της $5^{\eta\varsigma}$ μέρας.

Από το ADIOS παρακάτω, προκύπτει το διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού διασποράς. Όπως παρατηρούμε, το ποσοστό της διασποράς σταθεροποιείται γύρω στο 8,5%.



Σχήμα 5.222: Διασπορά πετρελαίου (ADIOS 2)

Εξάτμιση πετρελαίου



Σχήμα 5.223: Όγκος πετρελαίου που έχει εξατμιστεί με την πάροδο του χρόνου(SpillSolver 2.0)

Όπως έχει προκύψει και από την τρισδιάστατη απεικόνιση της πετρελαιοκηλίδας, η ποσότητα του πετρελαίου που εξατμίστηκε δεν μεταβάλλεται. και σε διάστημα πέντε ημερών φτάνει στα 70 m³. Η μορφή της καμπύλης παρουσιάζει στην αρχή του φαινομένου έντονη αύξηση και στη συνέχεια η καμπύλη σταθεροποιείται.



Σχήμα 5.224: Ποσοστό πετρελαίου που έχει εξατμιστεί με την πάροδο του χρόνου (ADIOS 2)

Από το διάγραμμα του ADIOS που παρουσιάζει το ποσοστό του πετρελαίου που εξατμίζεται παρατηρούμε μια ελαφρά μείωση σε σχέση με την περίπτωση όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι χαμηλότερη, φτάνοντας στο τέλος της 5^{ης} μέρας στο 41%.



Πάχος πετρελαιοκηλίδας

Σχήμα 5.225: Εξέλιξη του πάχους της πετρελαιοκηλίδας (SpillSolver 2.0)

Από το διάγραμμα μεταβολής του πάχους της πετρελαιοκηλίδας παρατηρούμε ότι το πάχος ξεκινά από τη μέγιστη τιμή του, καθώς στην έναρξη της διαρροής έχει εγχυθεί όλη η ποσότητα του πετρελαίου. Στη συνέχεια το πάχος της πετρελαιοκηλίδας μειώνεται εκθετικά, καθώς αυξάνεται η εξάπλωση, φτάνοντας στην τιμή των 0,001 m. Παρατηρούμε ότι το πάχος της πετρελαιοκηλίδας είναι μικρότερο σε σχέση με το σενάριο όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη.

> Ιζηματοποίηση



Σχήμα 5.226: Εξέλιξη της ιζηματοποίησης (SpillSolver 2.0)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται το φαινόμενο της ιζηματοποίησης όπως εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου. Παρατηρούμε ότι το φαινόμενο εξελίσσεται γραμμικά και στο τέλος της 5^{ης} μέρας 0,01 m³ πετρελαίου έχει εναποτεθεί ως ίζημα, χωρίς να παρατηρείται καμιά μεταβολή σε σχέση με την περίπτωση χαμηλότερης ταχύτητας ανέμου.

> Ιζώδες πετρελαίου



Σχήμα 5.227: Χρονική εξέλιξη του ιξώδους του πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

Η μεταβολή του ιξώδους είναι πιο έντονη σε σχέση με το σενάριο χαμηλότερης ταχύτητας ανέμου, πράγμα το οποίο είχε παρατηρηθεί και στην περίπτωση της συνεχούς διαρροής.



Σχήμα 5.228: Εξέλιξη του ιξώδους του πετρελαίου (ADIOS 2)

Παρατηρούμε ότι υπάρχει απόκλιση μεταξύ τις τιμής που βγάζει το ADIOS και της τιμής που υπολογίζει το SpillSolver . Το ADIOS υπολογίζει τη τιμή του ιξώδους στα 100000 cSt ενώ το SpillSolver στα 290 cSt. Βέβαια και στα δύο διαγράμματα η τιμή του ιξώδους σταθεροποιείται για τον ίδιο αριθμό ωρών.



> Πυκνότητα πετρελαίου

Σχήμα 5.229: Εξέλιξη πυκνότητας πετρελαίου (SpillSolver 2.0)

Η μεταβολή της πυκνότητας είναι πιο έντονη κατά τις πρώτες ώρες στην περίπτωση αυτή, όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη, πράγμα το οποίο είχε παρατηρηθεί και στην περίπτωση της συνεχούς διαρροής.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα του ADIOS παρατηρούμε ότι οι τιμές της πυκνότητας συμφωνούν με το SpillSolver, αφού η τιμή της πυκνότητας σταθεροποιείται γύρω στα 1000 kg/m³



Σχήμα 5.230: Εξέλιξη πυκνότητας πετρελαίου (ADIOS 2)

> Γαλακτωματοποίηση



Σχήμα 5.231: Εξέλιξη του ποσοστού γαλακτωματοποίησης (SpillSolver 2.0)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η εξέλιξη του ποσοστού γαλακτωματοποίησης με την πάροδο του χρόνου. Παρατηρούμε παρόμοια μορφή καμπύλης με την αντίστοιχη καμπύλη για τον ίδιο άνεμο και συνεχή τρόπο διαρροής Έτσι φαίνεται σχεδόν κατακόρυφη αύξηση πετρελαίου. του ποσοστού γαλακτωματοποίησης στο 80%. Επίσης η αβεβαιότητα είναι μικρή σε αυτή την περίπτωση.



Σχήμα 5.232: Εξέλιξη του ποσοστού γαλακτωματοποίησης (ADIOS 2.0)

Αντίστοιχης μορφής είναι και το διάγραμμα που προκύπτει από το ADIOS. Και στα δύο διαγράμματα η γαλακτωματοποίηση αυξάνεται σχεδόν κατακόρυφα με τον ίδιο περίπου ρυθμό και εμφανίζοντας παρόμοια συμπεριφορά. Το μέγιστο και στις δύο γραφικές παραστάσεις παρατηρείται σχεδόν από τις πρώτες ώρες διαρροής. Οι τιμές είναι σχετικά κοντά και μπορεί να θεωρηθεί ότι το μοντέλο προσομοίωσης του SpillSolver είναι αξιόπιστο. Η διαφοροποίηση των ποσοστών είναι ίση με 10%.

Ρυθμός παράσυρσης του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη



Σχήμα 5.233: Ρυθμός παράσυρσης του πετρελαίου στην υδάτινη στήλη

Κρίσιμη διάμετρος σταγόνων πετρελαίου



Σχήμα 5.234: Κρίσιμη διάμετρος σταγόνων πετρελαίου

Οι ταχύτητες άνωσης φαίνονται παρακάτω.







Σχήμα 5.236 Ταχύτητα άνωσης κατά Reynolds

Εναπομένων όγκος πετρελαίου



Σχήμα 5.237: Εναπομένων όγκος πετρελαίου (SpillSolver 2.0)



Σχήμα 5.238: Εναπομένων όγκος πετρελαίου (ADIOS 2)

Συνολικός χρόνος εξάτμισης

Ακολούθως παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του κομβίου υπολογισμού αναφορικά με το χρόνο που απαιτείται για να εξατμιστεί η συνολική ποσότητα του πετρελαίου.

	Evaporation Process vs	Time 🛛	i Budge	· · indensity in · ite	100	_ D X
		Spillsolver	2.0 - 01	utput - button: Evaporation Time		
			S	tandalone tab		
L						
	Oil Spill	Thickness Reduction:		0.00000997666	m	
	-		[1027 22	m	
		Spill Diameter.	l	1057.55		
		Wind Velocity.		26.2346	m/s	
	Meteo Const beta:		0.11			
	Atm Const Coef:	1.	2e-008			
	Meteo Const alpha:		0.78			
	Calculate	Reset	Total	Evaporation Time		1.61074 hours
	Galdade			r		

Σχήμα 5.239: Παράθυρο υπολογισμού του συνολικού χρόνου εξάτμισης του πετρελαίου

Το αποτέλεσμα δείχνει ότι ο χρόνος που απαιτείται για να εξατμιστεί πλήρως η ποσότητα του πετρελαίου είναι 2 ώρες. Το χρονικό διάστημα είναι ελάχιστο. Παρατηρούμε ότι η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και η στιγμιαία διαρροή πετρελαίου μικρής ποσότητας, εμφανίζει αμελητέο χρονικό διάστημα. Οι υπόλοιπες κλιματολογικές συνθήκες ήταν ίδιες.

5.4 - Επιμέρους υποσενάρια

5.4.1 - Ύψος ισορροπίας δεξαμενής και ρυθμός διαρροής πετρελαίου

Το ακόλουθο υποσενάριο αφορά το ύψος ισορροπίας που θα έχει η συγκεκριμένη περίπτωση παραμέτρων αλλά και ο ρυθμός που θα διαρρέει το πετρέλαιο από το άνοιγμα της δεξαμενής. Έτσι στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται ο παράμετροι που εισήχθησαν στο παράθυρο υπολογισμού και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

🛃 Tanker Leakage	support support And			
Spills	olver 2.0 - output - button: Leal	age		
	Standalone tab			
- Parameters				
Hole Surface.	1	m^2		
Tank Bottom.	0	m		
Oil Height in tank.	15	m		
Hole Height.	11	m		
Water Level.	10	m		
Oil Density.	976	Kgr/m^3		
Water Density.	1026.6	Kgr/m^3		
Calculate		Reset		
Results				
	Leakage Rate (m^3/s).			
0.885889				
If the opening of the tank is below the sea level, the critical size is				
Eqilibrium Height. m				
>Hole Height: only water inflows15.2709 <hole height:="" leaks<="" oil="" only="" td=""></hole>				

Σχήμα 5.240: Παράθυρο υπολογισμού του ύψους ισορροπίας και ρυθμού διαρροής πετρελαίου

Εδώ, το άνοιγμα της δεξαμενής είναι πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, οπότε μας ενδιαφέρει μόνο ο ρυθμός της διαρροής που βάσει των χαρακτηριστικών, υπολογίζεται ίσος με 0,89 m³/s.

Παρακάτω όμως, το άνοιγμα της δεξαμενής βρίσκεται εντός υδάτων, οπότε το κρίσιμο μέγεθος είναι το ύψος ισορροπίας.

🚺 Tanker Leakage	Interne Enternation Londo				
Spillsolver 2.0 - output - button: Leakage					
	Standalone tab				
- Parameters					
Hole Surface.	1	m^2			
Tank Bottom.	0	m			
Oil Height in tank.	15	m			
Hole Height.	7	m			
Water Level.	10	m			
Oil Density:	976	Kgr/m^3			
Water Density.	1026.6	Kgr/m^3			
Calculate		Reset			
- Results	of the tank is above the sea level, the cri	tical size is			
	Leakage Rate (m^3/s):				
1.25284					
If the opening of the tank is below the sea level, the critical size is					
Eqilibrium Height. m					
	15.2709	>Hole Height: only water inflows <hole height:="" leaks<="" oil="" only="" td=""></hole>			

Σχήμα 5.241: Παράθυρο υπολογισμού του ύψους ισορροπίας και ρυθμού διαρροής πετρελαίου

Επειδή αυτό είναι ίσο με 15,3 μέτρα που είναι μεγαλύτερο του 7 που εισήχθη, έχουμε εισροή υδάτων εντός της δεξαμενής και όχι εκροή πετρελαίου.

5.4.2 - Εκβρασμός στην ακτή

Στο συγκεκριμένο υποσενάριο αρχικά υπολογίζεται η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να εκβραστεί και να απορροφήσει μια έκταση παραλίας. Η ποσότητα αυτή εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της παραλίας, όπως φαίνεται και από τα στοιχεία που επιλέχθηκαν στο ακόλουθο σχήμα. Έτσι η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να εκβραστεί σύμφωνα με αυτά τα στοιχεία είναι 17.400 m³.

Shore Process			100	
	Spillsolver	2.0 - output	- button: shore	
To see dynamic graph, please	insert data, click calculate,	, close this tab as	nd output, click solve again and th	en choose the matching graph
Parameters			Results	
Length:	1000	m	Church Aline	17400
Width:	20	m	Stranding:	17400 m^3
Depth.	3	m		
	·			
Shore Type. Sa	ndy – high waves	•	Calculate	Reset

Σχήμα 5.242: Παράθυρο υπολογισμού εκβρασμού πετρελαίου στην ακτή

Το ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζει τη μεταβολή της μάζας του πετρελαίου που παραμένει στην παραλία με την πάροδο του χρόνου. Το συγκεκριμένο μοντέλο επηρεάζεται από τον τύπο της παραλίας που καταλήγει το πετρέλαιο, καθώς και από την ποσότητά του. Στο ακόλουθο παράδειγμα θεωρήσαμε στιγμιαία διαρροή 200 tn πετρελαίου και αμμώδη παραλία με μεγάλο ύψος κυμάτων.

Επίσης, το επόμενο διάγραμμα παρουσιάζει την αντίστοιχη μεταβολή αλλά για βραχώδη παραλία σε αυτή την περίπτωση.







Σχήμα 5.244: Εξέλιξη εναπομείναντος πετρελαίου για βραχώδη παραλία

Παρατηρούμε ότι η περίπτωση της απομάκρυνσης από την αμμώδη παραλία με μεγάλο ύψος κυμάτων εμφανίζει χαμηλότερη τιμή και ρυθμό σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση για βραχώδη ανοικτή παραλία. Είναι εμφανές ότι για την ίδια ποσότητα πετρελαίου, στο διάστημα των 5 ημερών, η ποσότητα πετρελαίου που απομακρύνεται από την βραχώδη παραλία είναι σαφώς μεγαλύτερη, όπου σχεδόν στο τέλος της 5^{ης} ημέρας μηδενίζεται η ποσότητα που παραμένει στην ακτή, σε αντίθεση με την αντίστοιχη της αμμώδους παραλίας που απομένουν περίπου 80 m³ πετρελαίου.

Καταδεικνύεται ότι ο τύπος της παραλίας ή της ακτής διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο συγκεκριμένο μοντέλο απομάκρυνσης του πετρελαίου από την ακτή.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έγινε βιβλιογραφική έρευνα για την εύρεση νέων μοντέλων γήρανσης και τύχης μιας πετρελαιοκηλίδας αλλά και των κυριότερων μεθόδων αντιμετώπισής τους. Έτσι, προστέθηκαν επιτυχώς νέα μοντέλα και παράμετροι γήρανσης στον υπάρχοντα κώδικα. Επίσης στην αρχικοποίηση του κώδικα, εισήχθη η παράμετρος των πετρελαιοσυλλεκτών (skimmers), ώστε να μελετηθεί η επίδραση που μπορεί να επιφέρουν αυτοί, στα μοντέλα τύχης και γήρανσης. Ακόμη σημειώθηκε η προσθήκη της αβεβαιότητας στην εκτιμώμενη ποσότητα διαρροής του πετρελαίου και στην ταχύτητα του ανέμου. Για την ολοκλήρωση του υπολογιστικού μέρους, μελετήθηκαν διάφορα σενάρια διαρροής πετρελαίου στο SpillSolver 2.0 και έγινε σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα αντίστοιχων σεναρίων από το πρόγραμμα ADIOS 2.

Το πρόγραμμα ADIOS 2 όπως και φάνηκε, περιλαμβάνει μοντέλα για τις διεργασίες της εξάτμισης, της διασποράς, του ιξώδους, της πυκνότητας, του εναπομείναντος πετρελαίου στην κηλίδα, καθώς επίσης και της χρήσης διαφόρων τύπων πετρελαιοσυλλεκτών κατά τη διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου. Σε αυτά τα μοντέλα και αυτό το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα προσθήκης αβεβαιότητας αναφορικά με την ποσότητα του πετρελαίου που διέρρευσε αλλά και την ταχύτητα του ανέμου που επικρατεί.

Από τα αποτελέσματα και τη σύγκριση που διενεργήθηκε μεταξύ των δύο προγραμμάτων ως προς τα μοντέλα που περιλαμβάνουν προέκυψε σχετική συμφωνία σε ορισμένα μοντέλα. Συγκεκριμένα αρχικά υπάρχει συμφωνία ως προς το σύνολο της ποσότητας που διαρρέει από τη δεξαμενή. Όσον αφορά τη διασπορά, υπάρχει συμφωνία ως προς το ποσοστό διασποράς. Υπάρχει όμως διαφορά ως προς το ρυθμό

διασποράς και τη μορφή της καμπύλης, δηλαδή είναι σταθερή και εν συνεχεία πτωτική στο SpillSolver, ενώ στο ADIOS είναι αυξητική και στη συνέχεια σταθεροποιείται. Όσον αφορά την αβεβαιότητα, το ADIOS παρουσιάζει τα αποτελέσματα με μεγαλύτερο εύρος αβεβαιότητας.

Το μοντέλο της εξάτμισης του πετρελαίου παρουσιάζει μια απόκλιση της τάξης του 5-6% μεταξύ των δύο προγραμμάτων, με το ADIOS να δίνει τις μεγαλύτερες τιμές. Η μορφή της καμπύλης είναι παρόμοια και στα δύο προγράμματα, η οποία είναι αρχικά αυξητική εν συνεχεία σταθεροποιείται, ενώ στο τέλος μειώνεται η κλίση της. Η διαφορά αυτή στο ποσοστό της εξάτμισης επηρεάζει και το μοντέλο του εναπομένοντος όγκου στο τέλος των πέντε ημερών, μεταξύ των οποίων υπάρχει σχετική απόκλιση στα δύο προγράμματα.

Από την άλλη, σημαντική απόκλιση υπήρξε στο μοντέλο ιζώδους, όπου το SpillSolver εξήγαγε αποτελέσματα με αρκετή απόκλιση, σε σχέση με αυτά του ADIOS. Η μορφή της καμπύλης του ιξώδους ήταν όμοια με αυτή του ADIOS και το ιξώδες γινόταν σταθερό για τον ίδιο χρόνο που γινόταν σταθερό και στο ADIOS. Το πρόβλημα έτσι, ήταν ποσοτικό και όχι ποιοτικό (όμοια μορφή καμπύλης). Αυτό είναι πολύ πιθανό να οφείλεται στην επιλογή διαφορετικών συντελεστών (σταθερές) στη σχέση της αύξησης του ιξώδους, ή γενικότερα το μοντέλο που περιγράφει το φαινόμενο αυτό. Στο ADIOS υπάρχει σημαντικό εύρος στην αβεβαιότητα, ενώ οι τιμές που προκύπτουν από το SpillSolver βρίσκονται σε πολύ μικρότερο εύρος αβεβαιότητας.

Από την άλλη, ως προς την πυκνότητα, υπήρχε σχετική συμφωνία ως προς τη μορφή των καμπυλών που εξήγαγαν τα δυο προγράμματα. Παρουσιάστηκε μικρή διαφορά ως προς τις τιμές της τελικής πυκνότητας. Και στο μοντέλο αυτό η επίδραση της αβεβαιότητας ήταν σαφώς μεγαλύτερη στο ADIOS από ότι στο SpillSolver.

Επίσης, ως προς το μοντέλο της γαλακτωματοποίησης υπήρξε σχετική συμφωνία των αποτελεσμάτων των δυο προγραμμάτων σε μεγάλο βαθμό. Η μορφή των καμπυλών τους ήταν παρόμοια και οι μέγιστες τιμές του ποσοστού γαλακτωματοποίησης κυμαίνονταν μεταξύ 80 και 90%. Σε γενικές γραμμές λοιπόν υπήρξε ταύτιση των δυο προγραμμάτων και ως προς αυτό το μοντέλο.

Τέλος η προσθήκη των *skimmers* οδήγησε σε μεγαλύτερη απομάκρυνση πετρελαίου στο SpilSolver, με βάση τα ίδια χαρακτηριστικά λειτουργίας, ενώ στο ADIOS το ποσοστό που φαινόταν να αφαιρούν κυμάνθηκε γύρω στο 20%.

Όσον αφορά την επίδραση των παραμέτρων που μελετήθηκαν, δηλαδή της ταχύτητας του ανέμου, της πυκνότητας του πετρελαίου, της εισαγωγής των πετρελαιοσυλλεκτών (skimmers) και του τρόπου διαρροής του πετρελαίου στα διαγράμματα που εξήχθησαν, τόσο από το SpillSolver όσο και από το ADIOS, προέκυψαν τα ακόλουθα

συμπεράσματα. Αρχικά, πρέπει να αναφερθεί ότι σε όλες τις περιπτώσεις η ιζηματοποίηση δεν παρουσίασε καμιά μεταβολή.

Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου από 8 kn σε 30 kn οδήγησε σε αύξηση της εξάπλωσης της πετρελαιοκηλίδας, χωρίς να μεταβληθεί ο ρυθμός εξάπλωσης. Αυξήθηκε επίσης η διασπορά του πετρελαίου, ενώ παρατηρήθηκε και αύξηση της αβεβαιότητας, ειδικά στο ADIOS. Η εξάτμιση δε μεταβλήθηκε στο SpillSolver σε σχέση με τη χαμηλότερη ένταση ανέμου, αλλά στο ADIOS αυξήθηκε το ποσοστό εξάτμισης. Ακόμη, το πάχος της πετρελαιοκηλίδας μειώθηκε, όπως ήταν αναμενόμενο, λόγω της μεγαλύτερης εξάπλωσης. Η μεταβολή του ιξώδους ήταν πιο έντονη στην αρχή του φαινομένου και στη συνέχεια σταθεροποιήθηκε γρηγορότερα στην τελική τιμή, πράγμα το οποίο προέκυψε και από τα δύο προγράμματα. Όμοια τάση παρατηρήθηκε και για την πυκνότητα. Επίσης, στο ποσοστό γαλακτωματοποίησης παρατηρήθηκε άμεση επίδραση της αύξησης της ταχύτητας του ανέμου στο ποσοστό. Όπου η μορφή της αντίστοιχης καμπύλης αποκτούσε όλο και πιο απότομη κλίση και άμεση σταθεροποίηση του ποσοστού. Ο συνολικός χρόνος εξάτμισης μειώθηκε σε σημαντικό βαθμό με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Ο ρυθμός παράσυρσης των σταγόνων στην υδάτινη στήλη αυξήθηκε κατά μια τάξη μεγέθους, ενώ η ταχύτητα άνωσης κατά Stokes και κατά Reynolds εμφάνισε παρόμοια αποτελέσματα, παρουσιάζοντας πιο απότομη αυξητική κλίση στην αρχή του φαινομένου.

Η επίδραση του ανέμου παρουσίασε τα ίδια αποτελέσματα τόσο στην περίπτωση της συνεχούς όσο και στην περίπτωση της στιγμιαίας διαρροής, εκτός από την ταχύτητα άνωσης όπου η καμπύλη είχε πιο ομαλή αύξηση με την αύξηση της αύξηση της ταχύτητας του ανέμου στο σενάριο της στιγμιαίας διαρροής. Στην περίπτωση αυτή παρατηρήθηκε επίσης αύξηση του ρυθμού παράσυρσης με την αύξηση της ταχύτητας.

Η αύξηση της πυκνότητας του πετρελαίου μέσω αλλαγής του τύπου από Sarir σε Kuwait οδήγησε σε μείωση της εξάπλωσης, καθώς και του ρυθμού εξάπλωσης. Ελαφρά μείωση παρατηρήθηκε και στη διασπορά του πετρελαίου, ενώ η μορφή της καμπύλης ήταν διαφορετική με ελαφρώς πιο αργή αύξηση. Η εξάτμιση του πετρελαίου παρέμεινε ανεπηρέαστη, ενώ το ποσοστό της, όπως προέκυψε από το ADIOS, μειώθηκε. Το πάχος της πετρελαιοκηλίδας, όπως και το ιξώδες και η πυκνότητα, αυξήθηκαν. Ο ρυθμός παράσυρσης και το ποσοστό γαλακτωματοποίησης παρέμειναν ίδια, ενώ εμφανίστηκε μικρότερη ταχύτητα άνωσης των σταγονιδίων του πετρελαίου, με πιο απότομη αύξηση στην αρχή του φαινομένου. Επίσης, όπως ήταν αναμενόμενο ο συνολικός χρόνος εξάτμισης του πετρελαίου σχεδόν διπλασιάστηκε σε σχέση με το πετρέλαιο μικρότερης πυκνότητας.

Η χρήση *skimmers* για τη συλλογή του πετρελαίου οδήγησε σε μείωση της εξάπλωσης, μιας και μειώθηκε η ποσότητα που παραμένει στην πετρελαιοκηλίδα και

υφίσταται τις διεργασίες γήρανσης. Ο συνολικός χρόνος εξάτμισης μειώθηκε σημαντικά, λόγω της αφαίρεσης ποσότητας πετρελαίου. Αντίστοιχα στην περίπτωση αυτή παρατηρήθηκε και μείωση του πάχους της πετρελαιοκηλίδας, ενώ αμετάβλητα παρέμειναν το ιξώδες, η πυκνότητα, το ποσοστό γαλακτωματοποίησης, ο ρυθμός παράσυρσης και η ταχύτητα άνωσης, μιας και πρόκειται για μεταβλητές οι οποίες δεν επηρεάζονται από την τελική ποσότητα του πετρελαίου.

Τέλος η μεταβολή του τρόπου διαρροής από συνεχή (24 ώρες) σε στιγμιαία οδήγησε μεν σε μείωση της εξάπλωσης της κηλίδας, αλλά δε, σε ελαφρώς μεγαλύτερη διασπορά. Γενικότερα, τα αποτελέσματα των μοντέλων είχαν μικρότερη αβεβαιότητα, λόγω και της μικρότερης ποσότητας διαρροής. Συνοπτικά μπορεί να αναφερθεί ότι η μεταβολή του τρόπου διαρροής οδήγησε στη μεταβολή της καμπύλης των περισσότερων διαγραμμάτων. Συγκεκριμένα, τα διαγράμματα που αφορούν τη συνεχή διαρροή παρουσίαζαν στην αρχή μια γραμμική μεταβολή των περισσότερων μεγεθών με το χρόνο, όσο δηλαδή διαρκούσε η έγχυση του πετρελαίου, ενώ τα διαγράμματα της στιγμιαίας διαρροής ξεκινούσαν από τη μέγιστη τιμή τους και στην συνέχεια μειώνονταν.

Αυτό για παράδειγμα ισχύει για την εξάτμιση του πετρελαίου, όπου κατά τη στιγμιαία διαρροή παρατηρείται έντονη αύξηση κατά τις πρώτες ώρες και ταχύτερη σταθεροποίηση, ενώ στη συνεχή διαρροή παρατηρείται γραμμική αύξηση και πιο σταδιακή σταθεροποίηση. Αντίστοιχα το πάχος της πετρελαιοκηλίδας, στη στιγμιαία διαρροή ξεκινά από τη μέγιστη τιμή του και φθίνει εκθετικά, ενώ στην περίπτωση της συνεχούς διαρροής παρουσιάζεται αρχικά μια γραμμική αύξηση, όσο διαρκεί η διαρροή, και στη συνέχεια εμφανίζεται η εκθετική μείωση που παρατηρήθηκε και στη στιγμιαία διαρροή. Ο ρυθμός παράσυρσης αυξήθηκε ενώ η ταχύτητα άνωσης σταθεροποιήθηκε ταχύτερα. Τέλος, το ιξώδες και το ποσοστό γαλακτωματοποίησης δε μεταβλήθηκε, καθώς και η πυκνότητα, αν και το εύρος της αβεβαιότητας μειώθηκε.

Μελλοντικές προοπτικές

Το πρόγραμμα SpillSolver 2.0 αναβαθμίστηκε σημαντικά σε σχέση με τον προηγούμενο κώδικα, μιας και προστέθηκαν πιο εξειδικευμένες εξισώσεις σε σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα. Παρόλα αυτά ορισμένες επεκτάσεις και αναβαθμίσεις θα μπορούσαν να αποτελέσουν χαρακτηριστικά που θα βοηθούσαν την εφαρμογή του προγράμματος σε περιπτώσεις διαρροών στην ανοικτή θάλασσα. Οι παράμετροι αυτοί θα μπορούσαν να είναι η μεταβλητότητα του ανέμου, ώστε να έχει διαφορετική

ταχύτητα ή/και κατεύθυνση σε κάθε διαφορετική μέρα μελέτης του φαινομένου, ή μεταβολή αν είναι εφικτό ακόμη και εντός της ίδιας ημέρας.

Λόγω της πολυπαραγοντικότητας του φαινομένου της γήρανσης μιας πετρελαιοκηλίδας, θα μπορούσαν να προστεθούν μετεωρολογικά στοιχεία στην αρχικοποίηση του κώδικα, όπως το ύψος και η μέση ταχύτητα των κυμάτων, αλλά και η ταχύτητα και η κατεύθυνση των ρευμάτων της θάλασσας. Πρόκειται για παράγοντες που μεταβάλλονται διαρκώς και χωρίς συγκεκριμένο τρόπο, ακόμη και για μία συγκεκριμένη περιοχή. Επομένως, αποτελεί σημαντικό βήμα εξέλιξης του προγράμματος ώστε να επιτρέπει μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς, αλλά και να κάνει πιο ρεαλιστική την προσομοίωση σε σχέση με τις πραγματικές συνθήκες.

Ακόμη όπως προέκυψε από την βιβλιογραφική ανασκόπηση υπάρχουν αρκετά μοντέλα που αφορούν τη γήρανση του πετρελαίου κάτω από πάγο, συνεπώς θα μπορούσε να υπάρχει μια τέτοια συνθήκη που να ενεργοποιείται στην αρχικοποίηση του κώδικα για την συγκεκριμένη θαλάσσια περιοχή.

Τέλος, για μια ακόμη ρεαλιστικότερη αναπαράσταση του εκάστοτε σεναρίου θα μπορούσε η διαρροή του πετρελαίου να γίνεται με βάση στοιχεία που θα εισάγει ο χρήστης και θα αφορούν και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δεξαμενής πετρελαίου και του ανοίγματος που θα έχει δημιουργηθεί. Έτσι θα είναι ακόμη πιο ακριβής ο υπολογισμός του ρυθμού διαρροής του πετρελαίου και των συνεπειών του στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Βιβλιογραφία

Atlas, M.R. and Hazzen, T.C., (2011). Oil Bioremediation And Biodegradation: A Tale of the Two Worst Spills in U.S. History. Environ Sci. Technol., 45, p 6709-6715.

Atlas, R. M. (1984). Petroleum Microbiology. Macmillan Publishing Company, New York.

Atlas, R. M., and Cerniglia, C. E. (1995). Bioremediation of Petroleum Pollutants. Bioscience, 45, 332-338.

Atlas, R.M. (1981). Microbial degradation of petroleum hydrocarbons: An environmental perspective. Microbiol. Rev. 45, 180-209.

Bragg J.R., Prince R.C., Harner E.J. and Atlas R.M. (1994). Effectiveness of bioremediation for the Exxon Valdez oil spill. Nature, 368, 413-418.

Brattegard, T. (1980). Norwegian ecological action plan for oil spills (NEAP), Norwegian Ministry of Environment, FOH preprint.

Clark, R. C. and Brown, D. W. (1977). Petroleum: properties and analysis in biotic and abiotic systems. In Malins (Ed) Effects of Petroleum on Arctic and Subartic Environments and Organisms Vol. 1. Nature and Fate of Petroleum. Academic Press, Inc., New York, 1-89.

Connell, D,W. and G.J. Miller. (1981). Petroleum hydrocarbons in aquatic ecosystems. In: Behaviour and Effects of Sublethal Concentrations. Part 1; Critical Reviews in Environmental Control. Ed. Straub, C.P. CRC Press, Florida Vol. 11, 1, 37-104.

Craft B.C., Hawkins M., Terry R.E., (1991). Applied Petroleum Reservoir Engineering, Prentice Hall, 2nd edition.

Cushing, D.H. (1980). European fisheries. Marine Pollution Bulletin 11, 311-315.

Dagmar Schmidt Etkin, "Cleanup costs for oil spills in Ports".

Dave, D. and Ghaly, A. E., (2011). Remediation Tecnologies for Marine Oil Spills: A Critical Review and Comparative Analysis. Am. J. Environ. Sci., 7: 423-440.

Efstratiou M.A. and Karydis M. (2007). Development of Tools and Methodologies for Response and Management Actions, in Prevention and management of sea originated risks to the coastal zone, T.Karambas (coord.), Interreg IIIb, Archimed.

Efstratiou M.A., Karydis M. (2008). Oil Spill Management In Coastal Waters: Techniques And Practices, Department of Marine Sciences, School of Environment, University of the Aegean, University Hill, Mytilene.

Enbridge Pipelines Inc., Crude Characteristics, 2013.

Etkin D.S. (2000). 'Worldwide Analysis of Marine Oil Spill Cleanup Cost Factors', Presented at: Arctic and Marine Oilspill Program Technical Seminar.

Etkin D.S., (1999). ''Oil Spill Dispersants : From Technology to Policy'', Cutter Information Corp., Arlington, Massachusetts, USA, pp. 306.

European Maritime Safety Agency: http://www.emsa.europa.eu/.

Fingas et al. (1995). A literature review of the physics and predictive modeling of oil spill evaporation, Journal of Hazardous Materials 42 157-175, pp. 2.

Guo et al. (2009). A numerical oil spill model based on a hybrid method, Marine Pollution Bulletin 58 726–734, pp.6

IMO/UNEP: Regional Information System / Part C: Databanks and Information Services / Section 2: Statistical Analysis for Alerts and Accidents Database, REMPEC, 2008

International Environmental Agency (www.iea.org)

IPIECA. A guide to contingency planning for oil spills on water. Report Series, vol. 2, 2nd edition, 2008.

ITOPF- International Tanker Owners Pollution Federation, 2013. http://www.itopf.com/knowledge-resources/data-statistics/statistics/

ITOPF, (2005). Technical Information Paper: 'The Use Of Chemical Dispersants To Treat Oil Spills'.

ITOPF, Oil Tanker Spill Statistics:2005

James I.Chang και Cheng-Chung Lin (2005). "A Study of Storage tank accidents", Science Direct, Vol 19, pp 51-59, Elsevier Science

Joint Group Of Experts On The Scientific Aspects Of Marine Environmental Protection – GESAMP (<u>http://gesamp.net/</u>)

Lee, K., Lunel, T., Wood, P., Swannell, R., and Stoffyn-Egli, P. (1997). Shoreline cleanup by acceleration of clay-oil flocculation processes. Proceedings of 1997 International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute, Washington DC, 235-240.

Lehr et al. (1984), A New Technique to Estimate Initial Spill Size Using a Modified Fay-type Spreading Formula, Marme Pollutton Bulletin Vol 1~; No 9 pp ~;26-329, pp.3.

Liubartseva, S., De Dominicis, M., Oddo, P., et al. (2015). Oil spill hazard from dispersal of oil along shipping lanes in the Southern Adriatic and Northern Ionian Seas. Marine Pollution Bulletin 90(1-2): 259–72.

Mackay D., Paterson S., Trudel K., Fisheries and Environment [M], Canada, University of Toronto.

Mackay, D & Buist, I., Mascarenhas, R. & Petersen, S. (1980). Oil Spill Processes and Models. Environmental Protection Service, Canada, Report EE-8.

McNutt et al. (2010). Oil spill background, HAZMAT Division, NOAA. USA, pp. 10

Mearns, A. J. (1997). Cleaning oiled shores: putting bioremediation to the test. Spill Science & Technology Bulletin, 4(4), 209-217.

National Oil Spill Contingency Plan, Chapter 4 – Oil Types and Characteristics in New Zealand, Issue 8, December 2013.

Nikolopoulou M. and Kalogerakis N., (2011). Petroleum Spill Control with Biological Means, Elsevier B. V. p 263-272.

NOAA – Office of Response and Restoration. How do spills happen. (2003).

NOAA (1992). Shoreline Countermeasure Manual, National Oceanic & Atmospheric Administration, Seattle, Washington.

Office of Technology Assessment (1990). Coping With An Oiled Sea: An Analysis of Oil Spill Response Technologies, OTA-BP-O-63, Washington, DC.

Office of Technology Assessment (1991). Bioremediation of Marine Oil Spills: An Analysis of Oil Spill Response Technologies, OTA-BP-O-70, Washington, DC.

Prince, R.C. (1993). Petroleum spill bioremediation in marine environments. Critical Rev. Microbiol. 19, 217-242.

Prince, R. C., Clark, J.R., Lindstrom, J.E., Butler, E.L., Brown, E.J., Winter, G., Grossman, M.J., Parrish, P.R., Bare, R.E., Braddock, J.F., Steinhauer, W.G., Douglas, G.S., Kennedy, J.M., Barter, P.J., Bragg, J.R., Harner, E.J., and Atlas, R. M. (1994). Bioremediation of the Exxon Valdez oil spill: monitoring safety and efficacy. In: R.E. Hinchee et al.(Eds.), Hydrocarbon Bioremediation. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, pp107-124.

Project FP6-516360 'DIFIS', (2006). Report on Requirements Specification, D2.1

Reed, M. (1989). The physical fates component of the natural resource damage assessment model system. Oil Chem. Pollut. 5(2-3), 99-123.

Sebastiao et al. (1995). Modeling the fate of oil spills at sea, Spill Science & Technologr Bdelin, Vol. 2, No. 213, pp. 121431, pp. 3.

Seongjin Hong, Jong Seong Khim, Jongseong Ryu, Seong-Gil Kang, Won Joon Shim, Un Hyuk Yim, Environmental and ecological effects and recoveries after five years of the Hebei Spirit oil spill, Taean, Korea, Ocean & Coastal Management xxx (2014) 1-11.

Spies R.B., Rice S.D., Wolfe D.A and Wright B.A. (1996). The effect of the Exxon Valdez oil spill on Alaskan coastal environment, Proceeding of the 1993 Exxon Valdez Oil Spill Symposium, American Fisheries Society, Bethesda, MD, pp1-16.

Swannell, R.P.J., Lee, K., and Mcdonagh, M. (1996). Field evaluations of marine oil spill bioremediation. Microbiological Reviews, 60(2), 342-365.

U.S. Department Of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, 'Assessing the Social Costs of Oil Spills: The Amoco Cadiz Case Study', July 1983.

U.S. EPA (1999). Understanding oil spills and oil spill response, EPA 540-K-99-007, Office of Emergency and Remedial Response, U.S. Environmental Protection Agency.

U.Venkata Ramana, Presentation On Crude Oil Characteristics And Refinery Products, Workshop On "Refining & Petrochemicals", 25th–28 AUG 2010.

Van Oudenhoven, J.A.C.M. (1983). Characteristics of petroleum and behaviour at sea. Concawe report no 8/83.

Venosa, A. D., Suidan, M. T., Wrenn, B. A., Strohmeier, K. L., Haines, J. R., Eberhart, B. L, King, D.W., and Holder, E. (1996). Bioremediation of experimental oil spill on the shoreline of Delaware Bay. Environmental Science and Technology, 30, 1764-1775.

Venosa, A.D. (1998). Oil spill bioremediation on coastal shorelines: a critique. In: S.K. Sikdar & R.I. Irvine(Eds.), Bioremediation: Principles and Practice. Vol. III. Bioremediation Technologies. Technomic, Lancaster, PA, 259-301.

Ventikos Nikolaos, Ship Source Oil Pollution – The problem, the synthesis and the environment, NTUA, 2006.

Wang et al. (2008), Three dimensional numerical simulation for transport of oil spills in seas, Ocean Engineering 35, 503–510, pp. 4.

Weaver et al. (2004), Characteristics of Spilled Oils, Fuels, and Petroleum Products: 3a. Simulation of Oil Spills and Dispersants Under Conditions of Uncertainty, Ecosystems Research Division National Exposure Research Laboratory Athens, Georgia, pp. 23.

White I.C., (2010). Oil Spill Response-Experience, Trends and Challenges.

Zhendi Wang, B.P. Hollebone, M. Fingas, B. Fieldhouse, L. Sigouin, M. Landriault, P. Smith, J. Noonan, and G. Thouin, Characteristics of Spilled Oils, Fuels, and Petroleum Products: 1. Composition and Properties of Selected Oils, EPA/600/R-03/072 July 2003.

Zhi-Wei et al. (2000), modeling of the behavior of marine oil spills, Journal of Environmental Sciences, Vol. 12, No.1, pp. 3.

Καλδέλλης Ι., Κονδύλη Α., "Περιβάλλον και Βιομηχανική Ανάπτυξη", Τόμος Β', Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα 2005, ISBN: 960-351-601-5.

Καυκούλας Α., ΄΄Αντιμετώπιση Ρύπανσης της Θάλασσας΄΄, Διεύθυνση Προστασίας Θαλασσίου Περιβάλλοντος, Πειραιάς 2001.

Νικολοπούλου Μ., (2005) Ενισχυμένη Βιοδιέγερση Εγγενών Θαλάσσιων Μικροοργανισμών με τη Χρήση Λιπόφιλων Λιπασμάτων σε Συνδυασμό με Επιφανειοδραστικές Βιολογικές Ουσίες για Αποικοδόμηση Πετρελαιοειδών. Π.Κ Τμήμα ΜΗ.ΠΕΡ.

Τριανταφύλλου Γ., Βεργέτης Μ., "Ενότητα: Πετρελαιοκηλίδες', Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2004.

Πρόσθετες διαδικτυακές πηγές:

http://patentimages.storage.googleapis.com/WO2013102916A1/imgf000008_0001.png

http://www.c4tx.orq/ctx/iob/cdb/cas

http://www.cleanupoil.com/images/rodisc15.jpg

http://www.greenpeace.org/greece

http://www.infoplease.com/ipa/A0001451.html

http://www.oilspillsolutions.org/maiorspills.htm

http://www.toptenz.net/top-10-worst-oil-spills.php/castillo-de-bellver-worst-oil-spillsin-history

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_oil_spills#cite_note-12

https://keywestcharters.wordpress.com/2012/09/06/the-weathering-process-of-oil/

https://www.sof.or.jp/en/activities/index6.php

www.stevespanglerscience.com/lab/experiments/oil-spill-absorbing-polymer

Παράρτημα

Α. Μοντέλα που προϋπάρχουν στο πρόγραμμα Spillsolver 2.0

Τα μοντέλα που παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α, αφορούν τις εξισώσεις που προϋπήρχαν στο πρόγραμμα SpillSolver, πριν την ανανέωσή του από την παρούσα εργασία. Αυτές χρησιμοποιούνται κανονικά και στη νέα Version. Η διερεύνησή τους έγινε από τον Κόρρο, ενώ η επιλογή τους για το SpillSolver, από τον Χατζηκωνσταντίνου, στα πλαίσια των διπλωματικών τους εργασιών, το 2008.

<u>Πάχος κηλίδας</u>

Το πάχος της πετρελαιοκηλίδας με την απλούστευση της ισοκατανομής, θεωρείται ως

$$h = \frac{V}{A}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
h	Πάχος πετρελαιοκηλίδας (m)
V	Όγκος πετρελαίου που απομένει στην θάλασσα (m ³)
Α	Επιφάνεια πετρελαιοκηλίδας που προκύπτει κυρίως από τα μοντέλα εξάπλωσης (m ²)

Μοντέλο εξάπλωσης

Μοντέλο Fay:

$$A = 2270 \cdot \left(\frac{\Delta p}{p_0}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot V^{\frac{2}{3}} \cdot t^{0,5} + 40 \cdot \left(\frac{\Delta p}{p_0}\right) \cdot V^{\frac{1}{3}} \cdot W^{\frac{4}{3}} \cdot t$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
Α	Τελική επιφάνεια (m ³)
p ₀	Πυκνότητα πετρελαίου (kg/m³)
$\mathbf{p}_{\mathbf{w}}$	Πυκνότητα θαλασσινού νερού (kg/m ³)
Δp	$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{p}_{\mathrm{w}}$ - \mathbf{p}_{0}
V	Όγκος εξάπλωσης πετρελαίου (barrel, 1 barell=158,9873 L)
W	Ταχύτητα ανέμου (knots)

Μοντέλο εξάτμισης

Από τους Fingas, et al., 2003, το μοντέλο αυτό της διευκολύνει καθώς συναρτά την εξάτμιση μόνο με τον χρόνο και την θερμοκρασία.

$$P_{ev} = [0,165 \cdot (\%D) + 0,045 \cdot (T-15)] \cdot \ln(t)$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
P _{ev}	Το ποσοστό πετρελαίου που εξατμίζεται
%D	Το ποσοστό κατά βάρος το οποίο διυλίζεται στους 180 °C
t	Ο χρόνος (min)
Т	Η θερμοκρασία της θάλασσας (°C)

Μοντέλο διασποράς

Για τον υπολογισμό του ρυθμού διασποράς του όγκου πετρελαίου, έχει προταθεί η σχέση:

$$\frac{dV_{disp}}{dt} = N \cdot V_{rem} = N \cdot (V_0 - V_{ev})$$

ανά μονάδα χρόνου
χύει $N = 2 \cdot 10^{-8} \cdot U^2$
ι στην επιφάνεια (m^3)
κε στη θάλασσα (m³)
ται (m ³)

Μοντέλο γαλακτωματοποίσης

Σύμφωνα με τον Rasmussen για το ποσοστό νερού στο πετρέλαιο έχουμε

$$Y_{w} = \frac{1 - \exp(-k_{A} \cdot k_{B} \cdot (1 + V_{w})^{2} \cdot t)}{k_{B}}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
$\mathbf{Y}_{\mathbf{w}}$	Το ποσοστό νερού στο πετρέλαιο
k _A , k _B	$k_A = 4,5 \cdot 10^{-6}, k_B = 1,25$
$\mathbf{V}_{\mathbf{w}}$	Η ταχύτητα ανέμου (m/s)
t	Ο χρόνος

Μοντέλο Φωτοοξείδωσης

Η χημική αντίδραση του οξυγόνου με τους υδρογονάνθρακες πετρελαίου ονομάζεται οξείδωση. Αυτή συμβαίνει στην επιφάνεια της θάλασσας και επιταχύνεται μετά την εξάπλωση του πετρελαίου και την δημιουργία λεπτών στρωμάτων (films) κηλίδων. Όταν έχουμε ταυτόχρονη παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας, τότε γίνεται λόγος για το φαινόμενο της φωτοχημικής οξείδωσης (φωτοοξείδωση). Από τους Huang et al., 1982 προέκυψε ότι:

$$\frac{\mathrm{dP}}{\mathrm{dt}} = \left(\frac{\mathrm{B}}{70}\right) \cdot (1 - \mathrm{C}) \cdot \mathrm{Y}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
dP/dt	Ρυθμός φωτοοξείδωσης
В	Γωνία ηλιακής ακτινοβολίας
С	Το ποσοστό νέφωσης
Y	Συντελεστής που ποικίλει ανάλογα με πάχος της πετρελαιοκηλίδας

Μοντέλο ιζηματοποίησς

Ο ρυθμός της απώλειας πετρελαίου, διαμέσου της ιζηματοποίησης, εκφράζεται από την παρακάτω σχέση (η οποία περιλαμβάνεται στο USC model) :

$$\frac{d(A_d)}{dt} = 1.4 \cdot 10^{-12} \cdot S_L \cdot (1 - 0.023 \cdot S_a)$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
$\mathbf{A}_{\mathbf{d}}$	Ο όγκος πετρελαίου που γίνεται ίζημα (m³)
t	Ο χρόνος (sec)
SL	Sediment load (gm/m ³)
S _a	Η αλατότητα ($^{o}/_{oo}$)

Μοντέλο πυκνότητας πετρελαίου

Μία σχέση που δίνει την πυκνότητα γαλακτώματος, είναι η

$$p_e = Y \cdot p_w + (1 - Y) \cdot (p_c - C_3 \cdot F_e)$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
Pe	Η πυκνότητα του γαλακτώματος (kg/m³)
$\mathbf{p}_{\mathbf{w}}$	Η πυκνότητα του θαλασσινού νερού (kg/m ³)
р _с	Η πυκνότητα του πετρελαίου (kg/m³)
C ₃	Σταθερά από καμπύλη διύλισης
Y	Το ποσοστό του νερού στο πετρέλαιο
F _e	Το ποσοστό εξάτμισης του πετρελαίου

Μοντέλο υπολογισμού ιξώδους της πετρελαιοκηλίδας

Αυτό το μοντέλο εμπεριέχει και το νερό από την γαλακτωματοποίηση και χρησιμοποιεί την εξίσωση των Hossain & Mackay:

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \exp\left(\frac{2.5\cdot F_w}{1-0.654\cdot F_w}\right)$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
μ	Ιξώδες γαλακτώματος
μ ₀	Ιξώδες της κηλίδας
Fw	Το κλάσμα νερού (κατ'όγκον) στο πετρέλαιο

Β. Άλλα μοντέλα, σχετικά με την γήρανση πετρελαίου

Σε αυτό το τμήμα του παραρτήματος, αναφέρονται εξισώσεις και μοντέλα που βρέθηκαν στην βιβλιογραφία, αλλά δεν συμπεριλήφθηκαν στον κώδικα. Στο Β.1, αναφέρονται νέα μοντέλα, ενώ στο Β.2 επιδεικνύονται τα μοντέλα που δεν αναφέρονται στο Παράρτημα Α και περιέχονται στην διπλωματική εργασία του Κόρρου (2008), για μια συνολικότερη επισκόπηση.

Β.1. Νέα μοντέλα που βρέθηκαν αλλά δεν ενσωματώθηκαν στον κώδικα

Εξισώσεις κυμάτων

McNutt et al. (2010), Oil spill background. Η κατάσταση της θάλασσας και των κυμάτων είναι σημαντική για τη εξάπλωση, τη διασπορά και τη γαλακτωματοποίηση. Για την περίπτωση πλήρως αναπτυγμένης θάλασσας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθοι τύποι:

 $\frac{Y ψος κυμάτων}{H_s = 0.0248 U_n^2}$ $\frac{Περίοδος κυματομορφής}{t_p = 0.83 U_n}$ $\frac{Διάνυσμα έντασης ανέμου}{U_n = 0.71 U_{10}^{1.23}}$

Μεγέθη	Ερμηνεία
H _s	Ύψος κύματος
U _n	Διάνυσμα έντασης ανέμου
t _p	Περίοδος κυματομορφής

<u>Διαλυτοποίηση</u>

McNutt et al. (2010), Oil spill background. Για τη διαλυτοποίηση υπάρχουν λίγα μοντέλα με τους Mackay και Shiu να έχουν μετρήσει την διαλυτότητα στο νερό του νέου και του γηρασμένου αργού πετρελαίου. Οι Payne et al και οι Mackay και Leinonen έχουν κατασκευάσει μοντέλα ψευδοσυνιστωσών παρόμοια με εκείνα που χρησιμοποιούνται για την εξάτμιση.

Διαλυτοποίηση πετρελαίου

$$\varphi_d = [K_d \cdot (\chi \cdot c_{do} - c_{dw})]$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
Φd	Ρυθμός διαλυτοποίησης πετρελαίου (kg/(m 2 s))
K _d	Συντελεστής μεταφοράς μάζας διαλυτοποίησης (m/s)
χ	Μοριακό κλάσμα
C _{do}	Συντελεστής διαλυτότητας συστατικού (kg/m ³)
C _{dw}	Συγκέντρωση υγρής φάσης (kg/m ³)

Ρυθμός παράσυρσης των σταγονιδίων πετρελαίου

$$Q_r(d_0) = C(o) \cdot D_{ba}^{0.57} \cdot S \cdot F \cdot d_0^{0.7} \cdot \Delta d$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
$Q_t(d_o)$	Ρυθμός παράσυρσης των σταγονιδίων πετρελαίου (kg/(m ² s))
C(0)	Εμπειρική σταθερά παράσυρσης βάσει του τύπου πετρελαίου
	και της κατάστασης γήρανσης
D _{ba}	Δ ιάχυση ενέργειας των κυμάτων ανά μονάδα επιφάνειας (J/m ²)
S	Κλάσμα επιφάνειας της θάλασσας που καλύπτεται από το
	πετρέλαιο (0-1)
F	Κλάσμα επιφάνειας της θάλασσας που δέχεται κύματα (s ⁻¹)
d ₀	Διάμετρος σωματιδίων πετρελαίου
	(ο μεγαλύτερος όγκος του πετρελαίου έχει μέγεθος 50-300 μm)
Δd	Διάστημα διαμέτρων σταγονιδίων πετρελαίου (m)

Η διάχυση ενέργειας των κυμάτων ανά μονάδα επιφάνειας (J/m²) D_{ba} υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$D_{ba} = 0.0034 \cdot \rho_w \cdot g \cdot H_{rms}^2$$
Μεγέθη	Ερμηνεία
H _{rms}	rms τιμή του ύψους των κυμάτων (m)
$ ho_{w}$	πυκνότητα θαλασσινού νερού (kg/m^3)
g	επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s²)

<u>Γαλακτωματοποίηση</u>

Zhi-Wei et al. (2000). Με τον ακόλουθο τύπο μπορεί να γίνει εκτίμηση της γήρανσης του πετρελαίου ανάλογα τη γαλακτωματοποίησή του.

$$\mu = \mu_0 \cdot \exp(C_4 \cdot F) \cdot \exp(\frac{2.5 \cdot Y_w}{1 - C_3 \cdot Y_W})$$

$$\rho = Y_w \cdot \rho_w + (1 + Y_w) \cdot (\rho_{crude} + C_{dn} \cdot F)$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
μ	Ιξώδες γαλακτώματος (mPa s)
μ ₀	Ιξώδες ορυκτού πετρελαίου (mPa s)
C ₄	Σταθερά εξαρτώμενη από το καύσιμο
C ₃	Σταθερά ιξώδους της μους (0,65)
ρ	Πυκνότητα του γαλακτωματοποιημένου πετρελαίου (kg/m³)
Pcrude	Πυκνότητα του ορυκτού πετρελαίου (kg/m³)
$ ho_{w}$	Πυκνότητα του θαλασσινού νερού (kg/m³)
C _{dn}	Σταθερά βάσει της πυκνότητας

<u>Διαφορετικός ρυθμός εξάτμισης κλασμάτων πετρελαίου</u>

Μοντέλο του Reed (1989) για τον υπολογισμό του διαφορετικού ρυθμού εξάτμισης κάθε κλάσματος του πετρελαίου.

$$\frac{dm_i}{dt} = \frac{K \cdot m_i \cdot P_i \cdot A \cdot M_i \cdot f_i}{R \cdot T}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
m _i	Μάζα της i συνιστώσας του πετρελαίου
k _{mi}	Συντελεστής μεταφοράς μάζας
P _i	Τάση ατμών (atm)
Α	Επιφάνεια κηλίδας (m²)
R	Παγκόσμια σταθερά των αερίων
f i	Κλάσμα της κηλίδας που αποτελεί την συνιστώσα i
$\mathbf{M}_{\mathbf{i}}$	Μοριακό βάρος (g/mol)
Т	Θερμοκρασία (K)

Συντελεστής μεταφοράς μάζας

Μοντέλο από τους Mackay και Matsugu για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς μάζας για κάθε ένωση που περιέχεται στο πετρέλαιο.

$$k_{mi} = 16,07 \cdot U^{0,78} \cdot R^{-0,11} \cdot Sc_i^{-0,67}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
k _{mi}	Συντελεστής μεταφοράς μάζας
U	Ταχύτητα ανέμου (m/s)
Sci	Αριθμός Schmidt
R	Παγκόσμια σταθερά των αερίων

<u>Εξάτμιση πετρελαίου κάτω από πάγο</u>

Πρόκειται για ένα μοντέλο των Ross and Dickins που το σχεδίασαν για τις θάλασσες της Δανίας και υπολογίζει την εξάτμιση πετρελαίου της κηλίδας κάτω από πάγο.

$$F_{\nu} = \frac{T}{10,3 \cdot T_G} \cdot \ln\left(l + \frac{10,3 \cdot T_G}{T}\right) \cdot 8 \cdot \exp(6,3 - \frac{10,3 \cdot T_o}{T})$$

με τον συντελεστή εξατμιστικής έκθεσης να ειναι

$$\theta = \frac{k \cdot A \cdot t}{V} = \frac{k \cdot t}{x}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
F _v	Κλάσμα όγκου που εξατμίστηκε
Т	Θερμοκρασία περιβάλλοντος (Κ)
T _G	Κλίση από την τροποποιημένη καμπύλη απόσταξης του
	πετρελαίου (Κ)
T ₀	Τομή από την τροποποιημένη καμπύλη απόσταξης του
	πετρελαίου (Κ)
θ	Συντελεστής εξατμιστικής έκθεσης
Α	Επιφάνεια πετρελαιοκηλίδας (m²)
k	Συντελεστής μεταφοράς μάζας
V	Όγκος πετρελαιοκηλίδας (m ³)
X	Πάχος πετρελαιοκηλίδας (m)
t	Χρόνος (s)

<u>Εξάπλωση σε μορφή έλλειψης</u>

Μοντέλο των Lehr et al. (1984) για μη συμμετρική εξάπλωση της πετρελαιοκηλίδας υπό μορφή έλλειψης που επεκτείνεται κατά μήκος της κατεύθυνσης του ανέμου.

$$Q = 1,13 \cdot \left(\frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_o}\right)^{1/3} \cdot V_o^{1/3} \cdot t^{1/4}$$
$$R = Q + 0,0034 \cdot W^{4/3} \cdot t^{3/4}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
Q	Μήκος του ελλειπτικού άξονα
ρ_{w}	Πυκνότητα νερού
$ ho_{ m w}$	Πυκνότητα πετρελαίου
V ₀	Όγκος αρχικής κηλίδας
W	Ταχύτητα ανέμου
Т	Χρόνος

Κατακόρυφη ανάμιξη

Μοντέλο των Tkalich and Chan (2002) που υπολογίζει το ρυθμό παράσυρσης του πετρελαίου από την κηλίδα στη στήλη ύδατος.

$$\lambda_{ow} = \frac{k_e \cdot \omega \cdot \gamma \cdot H}{16 \cdot a \cdot L_{ow}}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
λ_{ow}	Ρυθμός παράσυρσης του πετρελαίου
k _e	Πειραματικός συντελεστής
ω	Συχνότητα κυμάτων
γ	Αδιάστατος συντελεστής
Η	Ύψος κύματος
α	Συντελεστής του βάθους ανάμιξης των ανεξάρτητων σωματιδίων
L _{ow}	Παράμετρος κατακόρυφου μήκους

Εκτίμηση όγκου

Μοντέλο εκτίμησης του μεγέθους της πετρελαιοκηλίδας βάσει της βαρύτητας, του ιξώδους και της εξάπλωσης.

$$A = k \cdot \left[g \cdot V^2 \cdot t^{3/2} \cdot v_w^{-1/2} \cdot (\rho_w - \rho_0) \right]^{1/3}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
Α	Μήκος του ελλειπτικού άξονα
$\rho_{\rm w}$	Πυκνότητα νερού
$\rho_{\rm w}$	Πυκνότητα πετρελαίου
V	Όγκος αρχικής κηλίδας
k	σταθερά
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας
V _w	Κινηματικό ιξώδες
t	Χρόνος (s)

Κριτήριο ενέργειας για την εμφάνιση γαλακτωματοποίησης

Μοντέλο των Fingas et al., 1999, για τον υπολογισμό του ελάχιστου επιπέδου τυρβώδους ενέργειας που πρέπει να υπάρχει για την εμφάνιση γαλακτωματοποίησης.

$$E = \rho_w \cdot e = 0.5 \cdot \rho \cdot V^2$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
Ε	Τυρβώδης ενέργεια ανά μονάδα όγκου του νερού (J/m ³)
$ ho_{ m w}$	Πυκνότητα νερού (kg/m ³)
Ε	Τυρβώδης ενέργεια ανά μονάδα βάρους του νερού (kg/m³)
V	Ταχύτητα δίνης (m/s)

Σταθερότητα γαλακτώματος

Μοντέλο των Mackay and Zagorski (1982) που πρότειναν τη δημιουργία βάσης δεδομένων αναφορικά με τη σταθερότητα του γαλακτώματος, που υπολογίζεται από τα ασφαλτένια και τη θερμοκρασία.

$$S_{\alpha} = X_{\alpha} \cdot A_{\alpha} \cdot exp[K_{ao} \cdot (1 - X_{\alpha} - X_{w})^{2} + K_{aw} \cdot X_{w}^{2}] \cdot exp[-0.04 \cdot (T - 293)]$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
Δείκτης α	Ασφλατένια
Δείκτης w	Παραφίνη
Δείκτης ο	Άλλες χημικές ενώσεις
Λ_{a}	Ενεργότητα των ασφαλτενίων
	(δείχνει δυνατότητά να δημιουργούν γαλακτώματα)
Т	Θερμοκρασία (Κ)
Χ _α	Κλάσμα ασφαλτενίων
Xw	Κλάσμα παραφινών

<u>Ιξώδες γαλακτώματος</u>

Mοντέλο του Mooney (1951) για τον υπολογισμό του ιξώδους του γαλακτώματος σε σχέση με το περιεχόμενο νερό.

$$\mu_E = \mu_0 \cdot exp(\frac{2.5 \cdot W}{1 - K_1 \cdot W})$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
$\mu_{\rm E}$	Ιξώδες γαλακτώματος
μο	Αρχικό ιξώδες πετρελαίου
K ₁	Σταθερά ρυθμού ενσωμάτωσης νερού
W	Ταχύτητα ανέμου

Συντελεστής κατακόρυφης διάχυσης

Wang et al. 2014

$$K_v = 0.028 \cdot \frac{H_s^2}{T} \cdot e^{-2 \cdot k \cdot z} + C$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
K _v	Κατακόρυφη τυρβώδης διάχυση
H _s	Ενεργό κύμα
k	Αριθμός κύματος
Т	Περίοδος κύματος
Z	Βάθος
С	Σταθερά

Συσχέτιση διαρροή πετρελαίου με το νερό και τον άνεμο

Πρόκειται για το μοντέλο των Riemsdijk Van Eldik που συσχετίζει αυτά τα στοιχεία.

$$\frac{V_e}{V_0} = 1 - \exp(\frac{C_2 \cdot t \cdot H_d^2}{L})$$

Όπου

$$C_2 = \frac{-2.53 \cdot 10^{-3}}{V_0^{0.62}}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
$\mathbf{H}_{\mathbf{d}}$	Ύψος ενεργού κύματος
L	Μήκος κύματος
t	Χρόνος
V _e	Όγκος νερού
V ₀	Αρχικός όγκος

<u>Ταχύτητα ρευμάτων λόγω των κυμάτων – κυμάτων Stokes</u>

O Stokes έδειξε τη συσχέτιση που υπάρχει στη μέση ταχύτητα ενός κύματος με την κίνηση της ελεύθερης επιφάνειας ενός κύματος.

$$u_{wave} = \frac{k \cdot \omega \cdot H_s^2}{8 \cdot [\sin(k \cdot h)]^2} \cdot \cosh(2 \cdot k \cdot z_0)$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
u _{wave}	Ταχύτητα ρεύματος κύματος σε βάθος z
ω	Γωνιακή συχνότητα
k	Αριθμός κύματος
Η	Ύψος κύματος
Z ₀	Κατακόρυφη συνιστώσα των σταγονιδίων πετρελαίου
H _s	Βάθος νερού

<u>Μεταβολή επιφανειακής τάσης πετρελαίου</u>

Moντέλο Wanga et al. 2005 που υπολογίζει με μια ασυμπτωτική καμπύλη την εξέλιξη της επιφανειακής τάση του πετρελαίου.

$$\sigma = \sigma(0) \cdot \frac{V_r}{(V_r + V_{em})}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
σ	Επιφανειακή τάση
σ(0)	Αρχική τιμή επιφανειακής τάσης
V _r	Όγκος του υπολοιπόμενου πετρελαίου
V _{em}	Όγκος πετρελαίου στο γαλάκτωμα

<u>Ρυθμός διαλυτοποίησης</u>

Μοντέλο των Cohen et al. (1980) αναφορικά με το ρυθμό διαλυτοποίησης.

$$S_d = K_d \cdot A \cdot S$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
Sd	Συνολικός ρυθμός διαλυτοποίησης της πετρελαιοκηλίδας (g/h)
K _d	Συντελεστής μεταφοράς μάζας διαλυτοποίησης
Α	Επιφάνεια πετρελαιοκηλίδας (m²)
S	Διαλυτότητα πετρελαίου στο νερό

<u>Διαλυτότητα πετρελαίου</u>

Υπολογισμός της διαλυτότητας τυπικού πετρελαίου από την εξίσωση των Huang and Monastero (1982).

$$S = S_0 \cdot e^{-a \cdot t}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
S	Διαλυτότητα πετρελαίου στο νερό τη χρονική στιγμη t
S ₀	Διαλυτότητα πετρελαίου στο νερό
α	Σταθερά αποσύνθεσης
t	Χρόνος (h)

<u>Ρυθμός εξάτμισης</u>

Μοντέλο των Mackay et al. που υπολογίζει τον ρυθμό εξάτμισης του πετρελαίου από το παχύ στρώμα της κηλίδας.

$$F = \frac{l}{C} \cdot \left[\ln P_o + \ln \left(\frac{K_m \cdot A \cdot v \cdot t \cdot C}{R \cdot T \cdot V} + \frac{l}{P_o} \right) \right]$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
F	Κλάσμα που έχει εξατμιστεί
V	Όγκος που έχει διαρρεύσει
Α	Επιφάνεια πετρελαιοκηλίδας (m ²)
R	Σταθερά αερίων
Т	Θερμοκρασία περιβάλλοντος
υ	Μοριακός όγκος
t	Χρόνος
K _m	Συντελεστής μεταφοράς μάζας
Po	Τάση ατμών
To	Σημείο βρασμού

Λογαριθμική συνάρτηση γήρανσης πετρελαίου

$$N_{1/2} = 10,66 + 2,17 \cdot \log \frac{k \cdot t}{x_0}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
N _{1/2}	Μισό του κλάσματος όγκου πετρελαίου
X ₀	Πειραματική σταθερά κλάσματος πετρελαίου
k	Σταθερά

Β.2. Δεδομένα μοντέλα που δεν ενσωματώθηκαν

Επικρατών άνεμος στην περιοχή της πετρελαιοκηλίδας

Η τιμή και η κατευθύνσεις του ανέμου είναι καθοριστική ως προς τη μετατόπιση της κηλίδας. Αν και τα περισσότερα μοντέλα λόγω δυσκολιών και ελλείψει επαρκών πληροφοριών προϋποθέτουν σταθερό άνεμο, αυτό δεν είναι σωστό, ειδικά στην ανοιχτή θάλασσα. Έτσι, αναπτύχθηκαν τρία αναλυτικά εργαλεία τα οποία παράγουν χωρικά δεδομένα και στιγμιαίες πληροφορίες σχετικά με τον άνεμο. Αυτά είναι τα: (1) random walk analogy, (2) Markov chain technique και (3) numerically solved meteorological models.

Η κεντρική ιδέα του random walk analogy ως απλουστέρας εκ των τριών τεχνικής είναι ότι αλλεπάλληλες ταχύτητες ή διευθύνσεις ανέμων είναι τυχαία κατανεμημένες, δηλαδή δεν σχετίζονται μεταξύ τους. Η τεχνική Markov chain, δέχεται ότι η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή έχει σχέση με προηγούμενες ταχύτητες και διευθύνσεις του ανέμου, αντίστοιχα. Τέλος, η τεχνική των numerically solved meteorological models, περιγράφει τη δυναμική του ανέμου μέσα από πολύπλοκους μαθηματικούς τύπους, οι οποίοι μπορούν να επιλυθούν και να δώσουν λεπτομερή ντετερμινιστικά δεδομένα για τον άνεμο σε σχέση με το χώρο και το χρόνο.

Όσον αφορά την random walk analogy, ιστορικές καταγραφές του ανέμου αναλύονται σε μια ντετερμινιστική και σε μια στοχαστική συνιστώσα:

$$W_S(t) = A_1 + e_1(t)$$
$$W_d(t) = A_2 + e_2(t)$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
$W_s(t) \& W_d(t)$	Ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, αντίστοιχα, σε χρόνο t
$A_1 \& A_2$	Μέτρα ταχύτητας, διεύθυνσης ανέμου, αντίστοιχα
$e_1(t) \& e_2(t)$	Τυχαίες συνιστώσες ταχύτητας και διεύθυνσης, αντίστοιχα
Т	Χρόνος

<u>Εξάπλωση των τριών φάσεων</u>

Fay's three regime-spreading theory (1969). Το μακράν χρησιμοποιούμενο μοντέλο εξάπλωσης όπου θεωρεί ότι το πετρέλαιο εξαπλώνεται στιγμιαία εξαιτίας της δύναμης της βαρύτητας, στη συνέχεια η εξάπλωσή του οφείλεται στις αδρανειακές δυνάμεις και τέλος, επιδρούν οι συνεκτικές δυνάμεις. Έτσι διακρίνονται τρεις φάσεις εξάπλωσης.

Ο συνδυασμός βαρυτικών-αδρανειακών δυνάμεων, επιδρά κατά την πρώτη ώρα της εξάπλωσης, ενώ ο συνδυασμός βαρυτικών-συνεκτικών δυνάμεων, επιδρά από το τέλος της πρώτης ώρας της εξάπλωσης και μπορεί να διαρκέσει έως και μία εβδομάδα. Μετά το πέρας της μιας εβδομάδας, πρωτεύοντα ρόλο στο φαινόμενο της εξάπλωσης αναλαμβάνει ο συνδυασμός συνεκτικών δυνάμεων-επιφανειακών τάσεων. Όταν η κηλίδα γίνει αρκετά λεπτή (κατά την έννοια του πάχους), οι επιφανειακές τάσεις στις διεπιφάνειες πετρελαίου-αέρα και πετρελαίου-νερού, γίνονται οι κύριες δυνάμεις 'οδήγησης' της κηλίδας, οι οποίες υπερνικούν την τριβή (αντίσταση) των συνεκτικών δυνάμεων. Αυτό συμβαίνει μέχρι η εξάπλωση να σταματήσει. Η αξιοπιστία του μοντέλου είναι μεγάλη, μόνο όμως σε συνθήκες ήρεμου νερού.

$$A_{1} = \pi \cdot 1,14^{2} \cdot \left[\frac{(p_{w} - p_{0}) \cdot g \cdot V}{p_{w}}\right]^{0,5} \cdot t = K_{21} \cdot t^{1,0}$$

$$A_{2} = \pi \cdot 0,98^{2} \cdot \left[\frac{(p_{w} - p_{0}) \cdot g \cdot V^{2}}{p_{w} \cdot v_{w}^{0,5}}\right]^{\frac{1}{3}} \cdot t^{0,5} = K_{22} \cdot t^{0,5}$$

$$A_{3} = \pi \cdot 1,6^{2} \cdot \left(\frac{\sigma^{2}}{p_{w}^{2} \cdot v_{w}}\right)^{0,5} \cdot t = K_{23} \cdot t^{1,5}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
A_1, A_2, A_3	Επιφάνειες εξάπλωσης (m ²) που αντιστοιχούν στις 3 φάσεις
	αντίστοιχα, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω
$\mathbf{p}_{\mathbf{w}}$	Πυκνότητα θαλασσινού νερού (kg/m³)
\mathbf{p}_0	Πυκνότητα πετρελαίου (kg/m ³)
V _w	Κινηματικό ιξώδες νερού (m ² /sec)
V	Ο όγκος πετρελαίου που χύνεται στην θάλασσα (m ³)
g	Επιτάχυνση βαρύτητας = 9,81 m/s ²
	<u>Υπερανάλυση:</u>
	$g = 9.78049 (1 + 0.0052884 \sin^2 \varphi - 0.0000059 \sin^2 2\varphi)$
	$[m/s^2]$
	όπου φ το αντίστοιχο γεωγραφικό πλάτος σε μοίρες
σ	Συντελεστής spreading (miliNewton/m)
t	Χρόνος (sec)
K_{21}, K_{22}, K_{23}	Γινόμενα που αντιστοιχούν στα A1, A2, A3

Τέλος, σύμφωνα με Fay (1971) η τελική επιφάνεια της εξάπλωσης μιας πετρελαιοκηλίδας είναι ανεξάρτητη του χρόνου και είναι:

$$A_{max} = 10^5 \cdot V^{0,75} \cdot t^0 = K_{24} \cdot t^0$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
A _{max}	Τελική επιφάνεια εξάπλωσης (m ²)
K ₂₄	Αντίστοιχο γινόμενο

Η διορθωμένη εκδοχή της τελευταίας εξίσωσης, καθώς αυτή υποεκτιμά ποσοτικά την επιφάνεια εξάπλωσης είναι η:

$$A = 2270 \cdot \left(\frac{\Delta p}{p_0}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot V^{\frac{2}{3}} \cdot t^{0,5} + 40 \cdot \left(\frac{\Delta p}{p_0}\right) \cdot V^{\frac{1}{3}} \cdot W^{\frac{4}{3}} \cdot t$$

που ερμηνεύεται στο παράρτημα Α.

Εξάπλωση ως διεργασίας διάχυσης/διασποράς

Fay's spreading with horizontal turbulent diffusion/dispersion. Εδώ η εξάπλωση λογίζεται σαν μία διεργασία διάχυσης/διασποράς, η οποία αποτελείται από την "ατάραχη" (ήρεμο νερό) εξάπλωση σύμφωνα με τη θεωρία του Fay, και από τη διασπορά, εξαιτίας της τυρβώδους δίνης.

Αυτή λοιπόν η διεργασία διάχυσης/διασποράς, συνήθως ενσωματώνεται σε έναν συντελεστή διάχυσης/διασποράς D_i , ο οποίος χρησιμοποιείται σε μία γενική εξίσωση μεταφοράς μάζας με τύπο :

$$\frac{\partial C^{k}}{\partial t} = -U_{i}\left(\frac{\partial C^{k}}{\partial X_{i}}\right) + \frac{\partial}{\partial X_{i}}\left(D_{i}\frac{\partial C^{k}}{\partial X_{i}}\right) + \varphi^{k}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
C ^k	Συγκέντρωση για το k-οστό κλάσμα πετρελαίου
φ ^k	Χρονικές περίοδοι για το k-οστό κλάσμα πετρελαίου
i	Χωρικές συντεταγμένες
$\mathbf{U}_{\mathbf{i}}$	Συντελεστές ταχύτητας για την i χωρική συντεταγμένη
Xi	Συντελεστές απόστασης για την i χωρική συντεταγμένη
D _i	Συντελεστές διασποράς/διάχυσης για την i χωρική συντεταγμένη

<u>Εξάπλωση – μοντέλο UOT</u>

Στο μοντέλο αυτό (Mackay et al.,1980) η αρχική διεργασία της εξάπλωσης θεωρήθηκε ως φαινόμενο εξάπλωσης, όπου η παχιά κηλίδα τείνει να γίνει λεπτή. Η διεργασία εκφράζεται, αυθαίρετα, σαν μία δυναμική συνάρτηση της έκτασης της κηλίδας και του πάχους αυτής :

Λεπτές ως προς το πάχος κηλίδες:
$$\frac{dA_t}{dt} = C_1 \cdot A_t^{\frac{1}{3}} \cdot exp\left[\frac{-C_3}{h_k + 0,00001}\right]$$

Παχιές ως προς το πάχος κηλίδες:
$$\frac{dA_k}{dt} = C_2 \cdot A_k^{\frac{1}{3}} \cdot h_k^{\frac{1}{3}}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
A_t, A_k	Περιοχές (επιφάνειες) λεπτής και παχιάς κηλίδας αντίστοιχα (m^2)
h _k	Πάχος κηλίδας (m)
t	Χρόνος (sec)
C_1, C_2, C_3	Σταθερές

<u>Εξάτμιση – Μοντέλο Mackay</u>

:

Μοντέλο του Mackay et al., 1980. Είναι το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο μοντέλο εξάτμισης. Περιλαμβάνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$F(t) = \frac{1}{C} \cdot \left[ln(P_o) + ln\left(C \cdot E + \frac{1}{P_0}\right) \right]$$

Η σχέση από αυτό το μοντέλο, μετασχηματισμένη από τη σχέση του Fay για την εξάπλωση της κηλίδας που αναφέρθηκε προηγουμένως μας δίνουν την επόμενη σχέση

$$F(t) = \frac{1}{C} \cdot \left[ln(P_o) + ln\left(\frac{C \cdot K_m \cdot K_{2i} \cdot t^{1+n_i} \cdot v}{(1+n_i) \cdot R \cdot T_e \cdot V_0} + \frac{1}{P_0}\right) \right]$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
F (t)	Ποσοστό πετρελαίου που εξατμίζεται μετα από χρόνο t (sec)
С	Σταθερά για δοσμένο πετρέλαιο όπου
	$10.6 \cdot (T_2 - T_1)$
	$C = \frac{1}{T_e \cdot (F_2 - F_1)}$
T _e	Θερμοκρασία περιβάλλοντος (Kelvin)
T_1, T_2	Θερμοκρασίες (Kelvin)
$\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2$	Κλάσματα πετρελαίου που αντιστοιχούν σε θερμοκρασίες Τ ₁ ,
	T_2 αντίστοιχα
P ₀	Αρχική πίεση των ατμών του υγρού σε θερμοκρασία
	περιβάλλοντος
	$\mathbf{P} = \operatorname{curr} \left(10 \epsilon_{\mathrm{c}} \left(1 - \frac{\mathbf{T}_{0}}{\mathbf{T}_{0}} \right) \right)$
	$P_0 = \exp\left(\frac{10.0 \cdot \left(1 - \frac{1}{T_e}\right)}{T_e}\right)$

T ₀	$T_{0} = \frac{F_{1} \cdot T_{2} - F_{2} \cdot T_{1}}{F_{1} - F_{2}}$
Ε	"Evaporative exposure" (1/atm)
K _m	Συντελεστής μεταφοράς μάζας όπου
	$K_{\rm m} = \frac{\dot{n}_{\rm A}}{{\rm A} \cdot \Delta c_{\rm A}}$
ၨn _Α	Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας (mol/sec)
Α	Η ''δραστική'' περιοχή μεταφοράς μάζας (m ²)
Δc_A	Driving force concentration difference (mol/m ³)
$\mathbf{K}_{2\mathbf{i}}$	Συντελεστής που λαμβάνουμε από το μοντέλο εξάπλωσης του
	Fay
n _i	Εκθέτης χρόνου t από το μοντέλο εξάπλωσης του Fay
V ₀	Ο αρχικός όγκος πετρελαίου που έχει χυθεί την στιγμή που
	ξεκινά η εξάτμιση (m³)
v	Ο ειδικός όγκος
R	$R = 8.2 \cdot 10^5 \text{ atm} \cdot \text{m}^3 / \text{mol} \cdot \text{Kelvin}$

Αλλες εκφράσεις του ίδιου μοντέλου εξάτμισης του Mackay είναι:

$$F(t) = \frac{1}{C} \cdot \left[ln(P_o) + ln\left(\frac{K_m \cdot A \cdot U \cdot t \cdot C}{R \cdot T \cdot V} + \frac{1}{P_0}\right) \right]$$

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{0,0025 \cdot U^{0,78} \cdot A \cdot M}{R \cdot T \cdot V/(1-F)}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
Ε	Η ροή εξάτμισης
t	Ο χρόνος
U	Η ταχύτητα του ανέμου
Α	Η επιφάνεια της κηλίδας
Μ	Το μοριακό βάρος
R	Η σταθερά του αερίου
Т	Η θερμοκρασία
V	Ο όγκος
F	Το κλάσμα της κηλίδας που εξατμίζεται
P ₀	Η τάση ατμών

$$F(t+1) = F(t) - [E(t+1) - E(t)] \cdot P_0 \cdot \exp(-c \cdot F)$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
F	Το ποσοστό της κηλίδας που εξατμίζεται
t	Ο χρόνος
Ε	Η ροή εξάτμισης
P ₀	Η τάση ατμών
С	Συντελεστής

ενώ τέλος, μαζί με τον Matsugu (1973) ο Mackay εξέφρασε και την επόμενη έκφραση του μοντέλου του.

$$N_{i} = K_{mi} \cdot \frac{P_{i}^{SAT} - P_{i,air}}{R \cdot T} \cdot X_{i}^{surface}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
N _i	Το κλάσμα του υδρογονάνθρακα το οποίο εξατμίζεται
	$(mol / m^2 sec)$
K _{mi}	Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας του συστατικού I (m/sec)
	$K_{mi} = 16,076 \cdot U^{0,78} \cdot R^{-0,11} \cdot S_{ci}$
U	Η ταχύτητα του ανέμου (m/sec)
S _{ci}	O αριθμός Schmidt = 2,7
R	Σταθερά του αερίου
P _i ^{SAT}	Η πίεση των ατμών του συστατικού i σε θερμοκρασία
	περιβάλλοντος Τ
P _{i,air}	Η μερική πίεση του συστατικού i στον αέρα (=0)
X ^{surface}	Το μοριακό κλάσμα του συστατικού Ι στην επιφάνεια

<u>Εξάτμιση – Μοντέλο Williams</u>

Από τους William, et al., 1975 προέκυψε:

$$\frac{dC_i}{dt} = -K_{ei} \cdot C_i$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
Ci	Η συγκέντρωση του συστατικού i που εξατμίζεται
t	Ο χρόνος
K _{ei}	Σταθερά εξάτμισης του συστατικού i

<u>Εξάτμιση – Μοντέλο Wang</u>

Από τους Wang, et al., 1976 προέκυψε ότι

$$\frac{dC_i}{dt} = -\frac{a \cdot A^b \cdot exp(c \cdot U) \cdot P_i}{R \cdot T}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
Ci	Η συγκέντρωση του συστατικού i που εξατμίζεται
t	Ο χρόνος
a, b, c	Συντελεστές
Α	Έκταση κηλίδας
U	Η ταχύτητα του ανέμου
P _i	Η τάση ατμών του συστατικού i
R	Σταθερά αερίου
Т	Θερμοκρασία

Εξάτμιση – Μοντέλο Kolpack

Οι Kolpack, et al., 1977 κατέληξαν στην σχέση:

$$\frac{dE_i}{dt} = \frac{5,21388 \cdot 10^{-6} \cdot M_i \cdot U_6 \cdot (e_6 - e_{oi})}{(M_i + 28,966) \cdot P_i \cdot \left(\frac{ln6}{Z_0}\right)^2}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
Ei	Η ροή εξάτμισης του συστατικού i
t	Ο χρόνος
$\mathbf{M}_{\mathbf{i}}$	Το μοριακό βάρος του συστατικού i
U ₆	Η ταχύτητα του ανέμου στα 6 m πάνω από την επιφάνεια της
	θάλασσας
e ₆	Η τάση ατμών στα 6 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
e _{oi}	Η τάση ατμών στα 0 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
P _i	Η τάση ατμών του συστατικού i
Z ₀	Η τραχύτητα στην επιφάνεια της θάλασσας

<u>Εξάτμιση – Μοντέλο Audunson</u>

Οι Audunson, et al., 1980 έδωσαν τον παρακάτω τύπο:

$$\frac{dQ_i}{dt} = -\frac{(7,4 \cdot 10^{-3} + 1,87 \cdot 10^{-3} \cdot U) \cdot P_i \cdot Q_i \cdot M_i}{R \cdot T \cdot h \cdot \rho}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
$\mathbf{Q}_{\mathbf{i}}$	Η μάζα του συστατικού i που εξατμίζεται
t	Ο χρόνος
P _i	Η τάση ατμών του συστατικού i
$\mathbf{M}_{\mathbf{i}}$	Το μοριακό βάρος του συστατικού i
R	Η σταθερά αερίου
Т	Θερμοκρασία
h	Το πάχος της κηλίδας
ρ	Πυκνότητα

<u>Εξάτμιση – Μοντέλο Aravamudan</u>

Το μοντέλο αυτό (Aravamudan, et al., 1982) προβλέπει ότι

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{K_e \cdot U \cdot P \cdot A_{(t)}}{\rho}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
V	Ο όγκος του πετρελαίου που εξατμίζεται
t	Ο χρόνος
K _e	Σταθερά εξάτμισης
U	Η ταχύτητα του ανέμου
$\mathbf{A}_{(t)}$	Η έκταση της κηλίδας
Р	Τάση ατμών
ρ	Πυκνότητα

<u>Εξάτμιση – Μοντέλο Buchanan</u>

Οι Buchanan, et al., 1987 έδωσαν την παρακάτω σχέση:

$$F_{E} = \frac{15}{C_{2}} \cdot ln \left[\frac{C_{2} \cdot U^{0,78} \cdot t}{6000 \cdot h} \cdot exp \left(16,6 - \frac{C_{1}}{15} \right) + 1 \right]$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
F _E	Το ποσοστό του πετρελαίου που εξατμίζεται
Т	Ο χρόνος (sec)
Н	Το πάχος της πετρελαιοκηλίδας (m)
U	Η ταχύτητα του ανέμου (m/s)
C ₁ , C ₂	Σταθερές που προκύπτουν από την καμπύλη διύλισης
	πετρελαίου

<u>Εξάτμιση – Μοντέλο Stiver</u>

Οι Stiver & Mackay, 1984 κατέληξαν ότι

$$F_E = \frac{15}{C_2} \cdot ln \left[\frac{C_2 \cdot \Theta}{15} \cdot exp \left(16, 6 - \frac{C_1}{15} \right) + 1 \right]$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
$\mathbf{F}_{\mathbf{E}}$	Το ποσοστό του πετρελαίου που εξατμίζεται
C ₁ , C ₂	Σταθερές που προκύπτουν από την καμπύλη διύλισης πετρελαίου
Θ	Evaporation exposure (αδιάστατο μέγεθος) $\Theta = \frac{K \cdot t}{h}$
К	Συντελεστής μεταφοράς μάζας για την εξάτμιση (m/s) Aπό Buchanan & Hurford, 1988: $K = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot U^{0,78}$
U	Η ταχύτητα του ανέμου

Ενεργειακό κριτήριο για την πραγματοποίηση της γαλακτωματοποίησης

Σύμφωνα με πολλές μελέτες, για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η διεργασία της γαλακτωματοποίησης, απαιτείται ένα ελάχιστο επίπεδο τυρβώδους ενέργειας (Fingas et al., 1999). Σύμφωνα με τα πειράματα τους, εκτιμήθηκε ότι για να σχηματίσουν γαλάκτωμα 630ml μίγματος πετρελαίου-νερού, απαιτείται ελάχιστη τυρβώδης ενέργεια 0,05-0,24 J/m³. Ωστόσο, η αποσύνθεση και διασπορά του πετρελαίου πραγματοποιείται ταχύτατα, όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί τα 12m/s και τότε το γαλάκτωμα παύει να υφίσταται (Zeidan et al., 1997). Η ενέργεια αυτή, για μία δοσμένη κατάσταση θάλασσας, υπολογίζεται από τη σχέση (Zuang & Cui, 1999) :

$$E = p_w \cdot e = 0.5 \cdot p_w \cdot V'^2 = \sqrt{\frac{p_w \cdot \mu_T \cdot \varepsilon}{C_\mu}}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
Ε	Η τυρβώδης ενέργεια ανά μονάδα όγκου του νερού (J/m³)
e	Η τυρβώδης ενέργεια ανά μονάδα μάζας του νερού (J/kg)
$\mathbf{p}_{\mathbf{w}}$	Η πυκνότητα του νερού
V '	Η ταχύτητα δίνης (m/s)
Е	Το ποσοστό διασκεδασμού της τυρβώδους ενέργειας ανά μονάδα βάρους του νερού (m^2/s^3)
$\mathbf{p}_{\mathbf{w}} \cdot \mathbf{\epsilon}$	Το ποσοστό διασκεδασμού της τυρβώδους ενέργειας ανά μονάδα όγκου νερού

C _µ	$C_{\mu} = 0.09$ (για νερό)
μτ	Ιξώδες της δίνης (kg/m·sec) όπου για δεδομένη ταχύτητα ανέμου W_s (cm/sec) από Neumann - Pierson, 1966 ισχύει εμπειρικά: $\mu_T = 0,1825 \cdot 10^{-3} \cdot W_s^{2,5}$
3	Συντελεστής

Για το ε, οι Terray et al., 1996 το προσέγγισαν ως:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{u_{*w}^3}{\kappa \cdot z} & \alpha \pi 6 \ \tau o \nu \ \pi \upsilon \theta \mu \acute{\epsilon} \nu \alpha \ \acute{\epsilon} \omega \varsigma \ z_t \\ \frac{0,3 \cdot u_{*w}^2 \cdot \bar{C} \cdot H_s}{z^2} & \alpha \pi 6 \ z_t \ \acute{\epsilon} \omega \varsigma \ z_b \\ e_b & \alpha \pi 6 \ z_b \ \acute{\epsilon} \omega \varsigma \ \tau \eta \nu \ \epsilon \pi \iota \varphi \acute{\alpha} \nu \epsilon \iota \alpha \end{cases}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
κ	Η σταθερά Von Karman = $0,4$
Z	z = 0,2 στον ωκεανό, (Gemmrich, 1997)
$\mathbf{H}_{\mathbf{s}}$	Το σημαντικό ύψος κύματος (m)
	Για την εύρεσή του, από σχέση Neumann & Pierson (1966):
	$H_s = 2,12 \cdot 10^{-2} \cdot W_s^2$
W _s	Η ταχύτητα του ανέμου (m/s)
e _b	Το ποσοστό διασκεδασμού σε βάθος $z_b (m^2/s^3)$
Zb	Bάθος (m) όπου $z_b = 0.6 \cdot H_S$
Zt	Βάθος (m) όπου $z_b = 6 \cdot \frac{\overline{c}}{u_{*a}} \cdot H_S$
Ē	Η αποτελεσματική φασική ταχύτητα (m/s)
u _{*a}	Η ταχύτητα τριβής στον αέρα (m/s)
$\mathbf{u}_{*\mathbf{w}}$	Η ταχύτητα τριβής στον νερό (m/s). Ισχύει ότι
	$W_{s} = (p_{w}, p_{s})^{0,5}$
	$u_{*a} = \kappa \left(\frac{1}{\ln(10/z_0)} - \left(\frac{1}{p_a} + u_{*w} \right) \right)$
p _a , p _w	Πυκνότητες αέρα και νερού αντίστοιχα (kg/m³)
Z ₀	Μήκος τραχύτητας (m): $z_0 = 1.38 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{W_s}{C_p}\right)^{2.66} \cdot H_s$
$\bar{\mathbf{C}}/\mathbf{C}_{\mathbf{p}}$	u_{*a} u_{*a}
	$\bar{C} = \left(-10 \cdot \frac{\pi}{C_{\rm m}} - 0.25 \right), \frac{\pi}{C_{\rm m}} < 0.075$
	$\frac{d}{C} = \begin{cases} u_{rg} \\ u_{rg} \end{cases}$
	$C_p = \left[0,5, \frac{\alpha_{*a}}{C} \ge 0,075 \right]$
C	Η φασική ταχύτητα κύματος. Στον βαθύ ωκεανό σχετίζεται με
~h	την περίοδο κύματος με την σχέση $C_p = gT/2\pi$
T	$\overline{T} = 0.81 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot W_S}{2}$, η μέση περίοδος των καθοδηγούμενων
	από τον άνεμο κυμάτων από Neumann & Dierson 1066
	and for arous Kopulior and Neumann & Fielson, 1900

<u>Λήψη Νερού από το Πετρέλαιο (Water Uptake)</u>

Από Mackay et al., 1980 προτάθηκε ότι η ''λήψη'' νερού από το πετρέλαιο κατά τη διάρκεια της γαλακτωματοποίησης, μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση:

$$ln[(1-K_2 \cdot W) \cdot exp(-2.5 \cdot W/(1-K_1 \cdot W))] = \frac{-K_1 \cdot S \cdot t}{D \cdot \mu_0} = -K_3 \cdot t$$

Ενώ μια άλλη εκδοχή της ίδιας εξίσωσης είναι η εξής:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{-K_3(1 - K_2W)exp(-2.5W/(1 - K_1W))}{-K_2exp\left(-\frac{2.5W}{1 - K_1W}\right) + (1 - K_2W)exp\left(-\frac{2.5W}{1 - K_1W}\right)\left(-\frac{2.5}{1 - K_1W}\right) - \frac{2.5K_1W}{(1 - K_1W)^2}}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
W	Το κλάσμα νερού στο γαλάκτωμα
t	Ο χρόνος
K ₁	Ποσοστιαία σταθερά που σχετίζεται με την αναμιξιμότητα του
	νερού
K ₂	Ποσοστιαία σταθερά που εξαρτάται από την τάση για ανάμειξη
K ₃	$K_3 = 3.43 \cdot 10^{-5} \cdot W_S^2$
W _s	Η ταχύτητα του ανέμου (km/h)

Σταθερότητα Γαλακτώματος

Η σταθερότητα αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την απογαλακτωματοποίηση (de-emulsification), δηλαδή το διαχωρισμό του γαλακτώματος σε νερό και πετρέλαιο. Οι Mackay & Zagorski (1982) πρότειναν ένα συντελεστή σταθερότητας, ο οποίος υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση

$$S_a = X_a \cdot A_a \cdot exp[K_{ao} \cdot (1 - X_a - X_w)^2 + K_{aw} \cdot X_w^2] \cdot exp[-0.04 \cdot (T - 293)]$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
Sα	Συντελεστής σταθερότητας
δείκτης α	Εκφράζει τα ασφαλτένια
δείκτης w	Εκφράζει την παραφίνη
δείκτης ο	Εκφράζει άλλα χημικά συστατικά
Λ_{a}	Δραστικότητα ασφαλτίνης
K _{αo} , K _{wo}	$K_{\alpha 0} = 3,3$ και $K_{w 0} = 200$ στους 293 °K
Т	Θερμοκρασία (Kelvin)
$\mathbf{X}_{\boldsymbol{\alpha}}$	Το κλάσμα ασφαλτίνης
Xw	Το κλάσμα παραφίνης

Τα γαλακτώματα του νερού στο πετρέλαιο από Fingas et al., 1997, 2001, 2002 κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες): σταθερά, ασταθή και μετασταθή.

Σύμφωνα με τις έρευνες τους σε ένα σταθερό γαλάκτωμα πάνω από το 7% του βάρους του είναι ασφαλτίνη. Όταν ο συνδυασμός ασφαλτενίων και ρητίνης ξεπερνά το 3% του βάρους του γαλακτώματος, τότε σχηματίζεται μετασταθές γαλάκτωμα. Αν δεν επιτυγχάνονται οι παραπάνω ποσοτικές συνθήκες, τότε γίνεται λόγος για ασταθή γαλακτώματα. Αυτές οι ποσοτικές συνθήκες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό τιμών του συντελεστή σταθερότητας, έτσι ώστε αυτός με τη σειρά του να αντιστοιχίζεται σε σταθερά, μετασταθή και ασταθή γαλακτώματα.

Εισάγοντας τις παραμέτρους S₁ όπου $S_1 = \frac{S_a}{A_a}$,

 S_2 (η οποία προέκυψε από την εργασία του Zeidan et al., 1987)

$$S_{2} = \begin{cases} \frac{0.04CCI + W_{s}}{5.6}, & 5.24CCI - 9Ws \ge 0\\ CCI/9, & 5.24CCI - 9Ws < 0 \end{cases}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
CCI	Δείκτης χημικής σύστασης
	$CCI = A + R + 0,04W_{\alpha}$
Α	Ποσοστό (%) ασφαλτίνης
R	Ποσοστό (%) ρητίνης
$\mathbf{W}_{\boldsymbol{\alpha}}$	Ποσοστό (%) παραφίνης
$\mathbf{W}_{\mathbf{s}}$	Ταχύτητες ανέμου
	Βρίσκονται σε εξάρτηση με CCI από σχετικό φυσικοχημικό
	διάγραμμα Zeidan et al., 1987

και S = (S₁ + S₂) / 2, η σταθερότητα του γαλακτώματος εκτιμάται ως εξής:

- Μετασταθές γαλάκτωμα, όταν $0,67 \le S < 1,22$
- Ασταθές γαλάκτωμα, όταν S < 0.67

<u>Απογαλακτωματοποίηση (De - emulsification)</u>

Το φαινόμενο της απογαλακτωματοποίησης συμβαίνει στα μετασταθή και ασταθή γαλακτώματα, επιφέροντας την απελευθέρωση του νερού που υπάρχει στο γαλάκτωμα. Ωστόσο οι πληροφορίες που υπάρχουν για την απογαλακτωματοποίηση είναι πολύ περιορισμένες. Προκειμένου όμως να μοντελοποιηθεί, έχει προταθεί η παρακάτω σχέση:

$$\Delta W = -a \cdot W \cdot \Delta t \Rightarrow \alpha = -W \cdot \frac{dW}{dt} \Rightarrow \alpha = \frac{\ln \frac{W_1}{W_2}}{\Delta t}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
α	α=0 για σταθερά γαλακτώματα (δεν έχουμε αποσύνθεση)
	γαλακτώματα (αποσύνθεση σε λίγες ώρες).
\mathbf{W}_1	Η μέγιστη ποσοστιαία περιεκτικότητα νερού στο γαλάκτωμα
W ₂	Η ποσοστιαία περιεκτικότητα του νερού μετά την αποσύνθεση του γαλακτώματος
Δt	Ο χρόνος έως ότου το γαλάκτωμα να καταλήξει από W_1 σε W_2

Γαλακτωματοποίηση – Μοντέλο Mackay

Από τους Mackay et al., 1980, ο ρυθμός της γαλακτωματοποίησης δίνεται ως:

$$\frac{dF_{wc}}{dt} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot (W+1)^2 \cdot \left(1 - \frac{F_w}{C_3}\right)$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
dF _{wc} /dt	Ο ρυθμός γαλακτωματοποίησης του νερού στο πετρέλαιο
W	Η ταχύτητα του ανέμου (m/s)
$\mathbf{F}_{\mathbf{w}}$	Το κλάσμα νερού στο πετρέλαιο
C ₃	0,7 (για τύπους αργών πετρελαίων και καυσίμων)

Μια νέα εκδοχή του μοντέλου του Mackay είναι:

$$\Delta W = K_2 \cdot \frac{\Delta t}{\mu_e} = K_3 \cdot \Delta t \cdot (1 - W)/0.8$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
$\Delta \mathbf{W}$	Η ποσότητα του νερού που περιέχεται στο γαλάκτωμα τη
	χρονική στιγμή Δt
K ₂	Τιμή που εξαρτάται από την τάση για την ανάμειξη
K ₃	$K_3 = 3.43 \cdot 10^{-5} \cdot W_S^2$
	Τιμή σχετιζόμενη με την ανάμειξη του νερού
W _s	Η ταχύτητα ανέμου (km/h)

<u>Γαλακτωματοποίση – Μοντέλο Buchanan</u>

Σύμφωνα με εργασία του Buchanan παίρνουμε την σχέση:

$$Y = Y^F \cdot \left(1 - exp\left(-\frac{4,5 \cdot 10^{-6}}{Y^F} \cdot (1+U)^2 \cdot t \right) \right)$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
Y	Το ποσοστό νερού στο πετρέλαιο
Y ^F	Το τελικό ποσοστό νερού στο πετρελαίο
t	Ο χρόνος

<u>Ιξώδες πετρελαίου</u>

Το ιξώδες του πετρελαίου θα αυξηθεί κατά τη διάρκεια της γήρανσης, εξαιτίας κυρίως της εξάτμισης και της γαλακτωματοποίησης. Επιπροσθέτως, το ιξώδες εξαρτάται σημαντικά από τη θερμοκρασία της κηλίδας και υπολογίζεται σε τρία στάδια.

1) Υπολογισμός ιξώδους χωρίς να υπάρχει εντός της πετρελαιοκηλίδας νερό (water-free oil slick), σε θερμοκρασία αναφοράς $T_{ref} = 100$ °F, χρησιμοποιώντας την εξίσωση των Kendall - Monroe:

$$v_{Tref}^{oil} = \left(\sum_{i}^{6} X_i \cdot v_i^{1/3}\right)^3$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
X _i	Το μοριακό κλάσμα του κλάσματος i
υ ^{oil} Tref	Το ιξώδες πετρελαίου στην θερμοκρασία αναφοράς
<i>v</i> _i	Το ιξώδες του κλάσματος i

2) Υπολογισμός ιξώδους κηλίδας στην πραγματική θερμοκρασία

$$log[log(v_T^{oil} + 0,7)] = log[log(v_{Tref}^{oil} + 0,7)] - B \cdot log\left(\frac{T}{T_{ref}}\right)$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
Т	Θερμοκρασία (Κ)
υ	Το κινηματικό ιξώδες (cS) στην θερμοκρασία Τ
В	B = 3,98

<u>Πυκνότητα πετρελαίου</u>

Η πυκνότητα του πετρελαίου αυξάνεται όταν αυτό βρεθεί στην θάλασσα εξαιτίας των διεργασιών της εξάτμισης και της γαλακτωματοποίησης. Η νέα πυκνότητα του πετρελαίου, θεωρώντας αυτό σαν ιδανικό μείγμα, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\rho = \sum_{i=1}^{6} (y_i \cdot \rho_i) + y_w \cdot \rho_w$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
ρ	Η πυκνότητα του γαλακτώματος
Уi	Το κατά όγκο κλάσμα του κλάσματος i
ρ _i	Η πυκνότητα του κλάσματος i
$\mathbf{y}_{\mathbf{w}}$	Το κατά όγκο κλάσμα του νερού
$ ho_{w}$	Η πυκνότητα του νερού

<u>Επιφανειακή τάση πετρελαίου</u>

Η επιφανειακή τάση του πετρελαίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T = \sum_{i=1}^{6} (X_i \cdot T_i)$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
Т	Η επιφανειακή τάση του πετρελαίου
X _i	Το μοριακό κλάσμα του κλάσματος i
T _i	Η επιφανειακή τάση του κλάσματος i

Διεργασία διάλυσης και εκτίμηση ελάχιστης και μέγιστης διάμετρος σταγονιδίων

Η διάλυση είναι μια διεργασία η οποία για τους ελαφρούς υδρογονάνθρακες ανταγωνίζεται την εξάτμιση. Τα αποτελέσματα της διάλυσης είναι εντελώς διαφορετικά από εκείνα της εξάτμισης, διότι οι υδρογονάνθρακες πετρελαίου που εισέρχονται στην υδάτινη φάση, είναι δυνατό να προσληφθούν από διάφορους θαλάσσιους οργανισμούς, σε αντίθεση με εκείνους που εξατμίζονται, με αποτέλεσμα να απομακρύνονται από το θαλάσσιο περιβάλλον. Οι απώλειες σε όγκο του πετρελαίου λόγω της διάλυσης, είναι ελάχιστες καθώς οι περισσότεροι τύποι του παρουσιάζουν χαμηλή διαλυτότητα στο νερό. Εκείνα τα συστατικά του πετρελαίου (ελαφριά) που μπορούν να διαλυθούν στο νερό, απομακρύνονται μέσω της εξάτμισης, η οποία κατά κανόνα προηγείται της διάλυσης.

Για τα σταγονίδια πετρελαίου που δημιουργούνται, η ελάχιστη και η μέγιστη διάμετρος αυτών, μπορεί να εκτιμηθεί από τις παρακάτω σχέσεις:

$$d_{max} = \sqrt{\frac{12 \cdot T}{g \cdot (\zeta_w - \zeta)}}$$

$$d_{min} = \begin{cases} & \quad d_0 = 0,12 \cdot \left(\frac{T^3 \cdot \omega^2}{\zeta_w^3 \cdot g^4}\right)^{1/5}, \quad d_0 > h \\ & \quad d_0^{2/3} \cdot h^{\frac{1}{3}}, \quad d_0 < h \end{cases}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
d _{max}	Μέγιστη διάμετρος σταγονιδίου
\mathbf{d}_{\min}	Ελάχιστη διάμετρος σταγονιδίου
\mathbf{d}_{0}	Η αρχική διάμετρος σταγονιδίου
Τ	Η επιφανειακή τάση του πετρελαίου
g	Η επιτάχυνση της βαρύτητας
ζ_{w}	Η πυκνότητα του νερού
ζ	Η πυκνότητα του πετρελαίου
ω	Συχνότητα κύματος \cong g / $V_{\tau \alpha \chi \nu \tau \eta \tau \alpha}$
h	Το πάχος κηλίδας

Εξίσωση μεταφοράς μάζας κατά την διεργασία της διάλυσης

Η εξίσωση αυτή είναι η

$$\frac{dV_{drop}}{dt} = -\sum_{i}^{\pi\lambda\dot{\eta}\theta o\varsigma \,\sigma\upsilon\sigma\tau\alpha\tau\iota\kappa\dot{\omega}\nu} K_{si} \cdot A_{drop} \cdot X_{i} \cdot (C_{i}^{SAT} - C_{i}^{\infty})$$

ενώ αν υποθέσουμε ότι το πετρέλαιο αποτελείται από ένα μόνο συστατικό, λύνοντας την παραπάνω διαφορική εξίσωση, προκύπτει ότι η διάμετρος του σταγονιδίου πετρελαίου θα μειώνεται γραμμικά με το χρόνο, σύμφωνα με τη σχέση:

$$d = d_0 - 2 \cdot K_s \cdot C^{SAT} \cdot t$$

Μεγέθη	Ερμηνεία		
K _{si}	Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας για τη διάλυση του		
	συστατικού i. Για ομοιογενές μείγμα, γίνεται K _s		
V _{drop}	Ο όγκος του σταγονιδίου		
t	Ο χρόνος		
A _{drop}	Η επιφάνεια του σταγονιδίου		
Xi	Το μοριακό κλάσμα του συστατικού i		
C ^{SAT}	Η διαλυτότητα του συστατικού i στο θαλασσινό νερό		
-	Για ομοιογενές μείγμα, γίνεται CI ^{SAT}		
C_i^{∞}	Η συγκέντρωση του συστατικού i στο θαλασσινό νερό (≅0)		
d	Η διάμετρος του σταγονιδίου πετρελαίου τη χρονική στιγμή t		
d ₀	Η αρχική διάμετρος του σταγονιδίου πετρελαίου		

Οριζόντια διασπορά

Η εξάπλωση μιας πετρελαιοκηλίδας στον θαλάσσιο χώρο, οφείλεται σε δύο μηχανισμούς. Ο βασικός μηχανισμός συνοψίζεται στη θεωρία των τριών φάσεων του Fay. Ο δεύτερος μηχανισμός, ο οποίος συμβάλλει στην εξάπλωση της κηλίδας είναι η οριζόντια διασπορά (horizontal dispersion) του πετρελαίου.

Όταν η κηλίδα διαχωριστεί σε σταγονίδια με σταθερές επιφάνειες, τότε μόνο λόγω της οριζόντιας διασποράς, τα στοιχεία του πετρελαίου θα αρχίσουν να εξαπλώνονται

μακριά από το κέντρο μάζας της κηλίδας. Ο Stolzenbach και οι συνεργάτες του, ανέπτυξαν ένα μοντέλο για το μέγεθος της περιοχής της κηλίδας, βασιζόμενοι στις ακόλουθες παραδοχές:

- Το πετρέλαιο θεωρείται σαν μία ομοιογενής μάζα.
- Η κηλίδα θεωρείται ότι εξαπλώνεται σαν ένα λεπτό, συνεχές στρώμα με κυκλικό σχήμα.
- Στην κηλίδα θεωρείται ότι δεν υπάρχει απώλεια μάζας.

Αν και οι παραπάνω παραδοχές δεν ανταποκρίνονται πλήρως σε πραγματικές συνθήκες, συντέλεσαν στην έκφραση της παρακάτω σχέσης που δίνει την αλλαγή της ακτίνας της πετρελαιοκηλίδας:

$$\left(\frac{dR}{dt}\right) = \left(\frac{dR}{dt}\right)_{spreading} + \left(\frac{dR}{dt}\right)_{dispersion}$$

όπου (με βάση και την θεωρία του Fay για το spreading)

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)_{spreading} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ -\beta_3 \cdot \frac{R}{h} \cdot \frac{\sqrt{\nu_w}}{t} + \sqrt{\beta_3^2 \cdot \left(\frac{R}{h}\right)^2 \cdot \frac{\nu_w}{t}} + 4 \cdot \left[\beta_1 \cdot \left(\frac{\zeta_w - \zeta}{\zeta}\right) \cdot g \cdot h + \beta_2 \cdot \frac{S}{\zeta_w \cdot h}\right] \right\}$$

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)_{dispersion} = 2,81 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{t^{1,34}}{R}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
β1	$\beta_1 = 0,32$
β ₂	$\beta_2 = 3,66$
β ₃	$\beta_3 = 1,91$
R	Η ακτίνα της κηλίδας
h	Το πάχος της κηλίδας
$v_{ m w}$	Κινηματική συνεκτικότητα νερού
ζ_{w}	Πυκνότητα νερού
ζ	Πυκνότητα πετρελαίου
S	Συντελεστής εξάπλωσης (spreading) πετρελαίου
t	Ο χρόνος

<u>Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ κηλίδας και περιβάλλοντος</u>

Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ μίας πετρελαιοκηλίδας και της ατμόσφαιρας, εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$H_T^{OIL,AIR} = A \cdot k_H^{OIL,AIR} \cdot (T_{air} - T_{oil})$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
Α	Η επιφάνεια της κηλίδας
\mathbf{T}_{air}	Η θερμοκρασία του αέρα
T _{oil}	Η θερμοκρασία του πετρελαίου
k _H ^{OIL,AIR}	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας πετρελαίου – αέρα
	$k_{\rm H}^{\rm OIL,AIR} = k_{\rm m} \cdot \zeta_{\rm v} \cdot C_{\rm pv} \cdot (S_{\rm c}/P_{\rm r})^{0,67}$
	Εάν δεν υπάρχει εξάτμιση, τότε: $k_{\rm H}^{\rm OIL,AIR} = 5,7 + 3,8 \cdot V$
ζv	Η πυκνότητα του ατμού
C _{pv}	Η θερμοχωρητικότητα του ατμού
S _c	Ο αριθμός Schmidt
P _r	Ο αριθμός Prandtl
k _m	Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας

Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ μίας πετρελαιοκηλίδας και του θαλασσινού νερού, δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$H_T^{OIL,WATER} = A \cdot k_H^{OIL,WATER} \cdot (T_{water} - T_{oil})$$

Μεγέθη	Ερμηνεία		
Α	Η επιφάνεια της κηλίδας		
T _{water}	Η θερμοκρασία του νερού		
T _{oil}	Η θερμοκρασία του πετρελαίου		
k ^{oil,water}	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας πετρελαίου – νερού		
	$k_{\rm H}^{\rm OIL,WATER} = 0.33 \cdot U_{\rm REL} \cdot \zeta_{\rm w} \cdot C_{\rm pw} \cdot \left(\frac{v_{\rm w}}{U_{\rm REL} \cdot \zeta_{\rm w} \cdot D}\right)^{1/2} \cdot P_{\rm r}^{-2/3}$		
ζw	Η πυκνότητα του νερού		
C _{pw}	Η θερμοχωρητικότητα του νερού		
V _w	Το ιξώδες του νερού		
Pr	Ο αριθμός Prandtl		

Ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνει η κηλίδα

Η ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνεται από την πετρελαιοκηλίδα, εξαρτάται από έναν αριθμό παραμέτρων. Οι ποιο σημαντικές από αυτές τις παραμέτρους, είναι οι εξής: η τοποθεσία της κηλίδας, η ημερομηνία και η ώρα της ημέρας, η συννεφιά, η περιεκτικότητα σε νερό και το όζον στον αέρα.

Η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας, θεωρείται ημιτονοειδής:

$$H(t) = \begin{cases} K_t \cdot H_o^{max} \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{t - t^{sunrise}}{t^{sunset} - t^{sunrise}}\right), t^{sunrise} < t < t^{sunset} \\ 0, \qquad 0 \le t < t^{sunrise} \ \eta \ t > t^{sunset} \end{cases}$$

όπου η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία το μεσημέρι ${\rm H_o}^{\rm max}$ είναι ίση με

$$\frac{12K_t}{t^{sunset} - t^{sunrise}} I_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365}\right) (\cos \varphi \cos \zeta \sin \omega_s + \omega_s \sin \varphi \sin \zeta)$$

Μεγέθη	Ερμηνεία			
I _{sc}	Ηλιακή σταθερά με $I_{sc} = 1,353 \text{ W/m}$			
K _t	$K_t = H/H_o = H\lambda$ ιακή ακτινοβολία που φθάνει στην			
	επιφάνεια/μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία			
	Για καθαρό ουρανό, K _t = 0,75 (ειδάλλως μειώνεται)			
t ^{sunrise}	Ο χρόνος ανατολής του ηλίου (σε sec μετά τα μεσάνυχτα) με			
	$t^{\text{sunrise}} = \left(12 - \frac{\omega_{\text{s}}}{15^{\text{o}}}\right) \cdot 3600 (\text{sec})$			
t ^{sunset}	Ο χρόνος δύσης του ηλίου (σε sec μετά τα μεσάνυχτα) με			
	$t^{sunset} = t^{sunrise} + T_d$ (sec)			
T _d	To μέγεθος της ημέρας με $T_d = \frac{2}{15} \cdot \arccos(\tan \varphi \cdot \tan \zeta)$			
Φ	το γεωγραφικό πλάτος (north positive)			
ζ	Η γωνιακή θέση του ηλίου το μεσημέρι όπου			
	$\zeta \cong 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right)$			
n	Ο αύξων αριθμός της συγκεκριμένης ημέρας του χρόνου			
ω	sunrise hour angle, solar noon being zero, and each hour			
	equaling 15° of longitude (mornings being positive)			

Ένα μεγάλο κλάσμα α της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην περιοχή της κηλίδας, αντανακλάται. Η τελική θερμότητα που μεταφέρεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας συνεπώς, θα είναι

$$(1-\alpha)\cdot H(t)$$
 , $(\frac{W}{m^2})$

Η πετρελαιοκηλίδα χάνει, αλλά και λαμβάνει ταυτόχρονα θερμότητα, κατά τη διάρκεια ύπαρξης μεγάλων μηκών κύματος ακτινοβολίας. Το ποσό της θερμότητας που λαμβάνεται και χάνεται μέσω της ακτινοβολίας, μπορεί να προσδιοριστεί από το νόμο των Stefan-Boltzmann. Το τελικό ποσό θερμότητας που λαμβάνεται από την πετρελαιοκηλίδα, υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$H_{total}^{rad} = \sigma \cdot (I_{air} \cdot T_{air}^{4} + I_{water} \cdot T_{water}^{4} - 2 \cdot I_{oil} \cdot T_{oil}^{4})$$

Μεγέθη	Ερμηνεία		
H ^{rad} total	Το τελικό ποσό θερμότητας που λαμβάνεται από την πετρελαιοκηλίδα		
σ	Η σταθερά του Boltzmann με $\sigma = 5,72 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$		
I _{air} , I _{water} , I _{oil}	Οι αντίστοιχες ικανότητες εκπομπής ακτινοβολίας για τον αέρα, το νερό και το πετρέλαιο		
T _{air} , T _{water} , T _{oil}	Οι αντίστοιχες θερμοκρασίες για τον αέρα, το νερό και το πετρέλαιο		

Λόγω της εξάτμισης ορισμένων υδρογονανθράκων του πετρελαίου, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να χάνεται κάποιο ποσό θερμότητας. Αυτή η θερμότητα, ουσιαστικά αποτελεί την ενέργεια που δαπανάται, έτσι ώστε να επέλθει η εξάτμιση των υδρογονανθράκων. Η θερμότητα λοιπόν που χάνεται, λόγω του φαινομένου της εξάτμισης, δίδεται από την επόμενη σχέση:

$$H^{vapor} = \sum_{i}^{\pi\lambda\dot{\eta}\theta o\varsigma \ \sigma \upsilon \sigma \tau \alpha \tau \iota \kappa \dot{\omega} \nu} N_i \cdot \Delta H_i \qquad , (\frac{W}{m^2})$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
N _i	Τα moles του συστατικού i
ΔH_i	Η θερμότητα ατμοποίησης του συστατικού i

Ταχύτητα καταβύθισης ιζήματος πετρελαίου

Η ταχύτητα καταβύθισης του ιζήματος πετρελαίου δίδεται από την παρακάτω σχέση (περιλαμβάνεται στο USC model):

$$\nu = \frac{-3\mu + \left[9 \cdot \mu^2 + g \cdot r^2 \cdot \rho_f \cdot \left(\rho_s - \rho_f\right) \cdot (0.015976 + 0.19841 \cdot r)\right]^{-1/2}}{10^2 \cdot \rho_f (0.011607 + 0.14881 \cdot r)}$$

Μεγέθη	Ερμηνεία
v	Η ταχύτητα καταβύθισης του ιζήματος
μ	Το δυναμικό ιξώδες του υγρού
ρ _f	Η πυκνότητα του υγρού
r	Η ακτίνα του ιζήματος (cm)
ρ _s	Η πυκνότητα του ιζήματος

Η παραπάνω σχέση, ουσιαστικά αποτελεί αντίγραφο της σχέσης που παρουσιάζεται σε μία εργασία του Gibbs (Gibbs, et al., 1971), με δύο σημαντικές όμως διαφορές:

Η σχέση του Gibbs, περιέχει στον εκθέτη του αριθμητή το 1/2 αντί του -1/2, καθώς επίσης και ο πολλαπλασιαστής 100 που υπάρχει στον παρονομαστή, στη σχέση του Gibbs δεν υπάρχει. Οι λόγοι για τους οποίους υπάρχουν αυτές οι διαφορές, δεν είναι γνωστοί.

Γ. Μετατροπή μοναδών

Beaufort	description	Wind speed to (m/s) Limits	Wind speed to (m/s) SpillSolver 2.0
0	Calm	< 0,3	0
1	Light air	0,3–1,5	0,97222
2	Light breeze	1,5–3,3	2,5
3	Gentle breeze	3,3–5,5	4,30556
4	Moderate breeze	5,5–8	6,80556
5	Fresh breeze	8–10,8	9,58333
6	Strong breeze	10,8–13,9	12,5
7	High wind, moderate gale, near	13,9–17,2	15,6944
	gale		
8	Gale, fresh gale	17,2–20,7	19,1667
9	Strong/severe gale	20,7–24,5	22,6389
10	Storm, whole gale	24,5–28,4	26,3889
11	Violent storm	28,4–32,6	30,8333
12	Hurricane force	≥ 32.6	33,3333

<u>Ταχύτητα ανέμου</u>

ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΣ	m/sec	knots	km/hour
1 m/sec		1,94384449	3,6
1 knot	0,51444444		1,852
1 km/hour	0,277777778	0.5399569	

<u>Θερμοκρασία</u>

$$T_{KELVIN} = T_{CELS} + 273,16$$
$$T_{CELS} = \frac{5}{9} \cdot (T_{FAR} - 32)$$

<u>Όγκος</u>

1 (oil) barrel = $0,1589873$ cubic meters = $158,9873$ lt
1 cubic meter = 6,28981077 (oil) barrels = 1000 lt
1 μετρικός τόνος = όγκος που καταλαμβάνει, πετρέλαιο 1000 kg

<u>Παροχή</u>

Παροχή μάζας	Παροχή όγκου
1 kg/sec = 3600 kg/hour = 3,6 tn/h	$1 \text{ lt/sec} = 0,001 \text{ m}^3/\text{sec} = 3,6 \text{ m}^3/\text{hour} = 22,643318772 \text{ bbl/h}$
1 tn/h = 0,0002777777778 kg/sec	1 (oil) barrel/hour = 0,044163139 lt/s = 0,000044163134 m^3/s

<u>Ιξώδες</u>

$1 \text{ m}^2/\text{sec} = 10^4 \text{ Stokes} = 10^6 \text{ cStokes}$	
$1 \text{ cSt} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$	

<u>Πυκνότητα</u>

 $1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ kg/lt}$

Άλλες μονάδες

$1 kg = 0.101972 \frac{kp \cdot s^2}{m}$
$1 N = 10^{5} dyn = 0,101972 kp = 1 \frac{m}{S^{2}}$
$1 Pa = 1 \frac{N}{m^2} = \frac{1}{9,80665} \frac{kp}{m^2}$
$1 bar = 10^5 Pa = 10^5 N/_{m^2} = 750,062 Torr = 0,986924 atm$
1 <i>atm</i> = 760 <i>Torr</i>
1 kp = 9,80665 N
$1 \frac{kg}{m^3} = 0.10197 \frac{kp \cdot s^2}{m^4}$
$1J = 1N\cdot m = 1W\cdot s = 0,101972kp\cdot m = 3,77673\cdot 10^{-7}PSh$
$1 J = 2,77778 \cdot 10^{-7} kWh = 2,38846 \cdot 10^{-4} kcal$
$1 W = 1 J/s = 1 N \cdot m/s = 1,35962 \cdot 10^{-3} PS$
$1 W = 0.101972 \frac{kp \cdot m}{s} = 0.859845 kcal/h$