

## ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΔΥΤΙΚΟΥ ΚΑΤΑΚΟΛΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ 3Δ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Δημήτριος-Περικλής Α. Γιαννούλης, Νικόλαος Α. Αυγερινός, Διονύσιος Π. Μάργαρης  
Εργαστήριο Μηχανικής των Ρευστών και Εφαρμογών Αυτής,  
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ελλάδα  
[d.p.a.giannoulis@gmail.com](mailto:d.p.a.giannoulis@gmail.com), [navgerinos@upatras.gr](mailto:navgerinos@upatras.gr), [margaris@upatras.gr](mailto:margaris@upatras.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, έχει αναπτυχθεί έντονο ενδιαφέρον για την εκμετάλλευση κοιτασμάτων υδρογονανθράκων εντός της Ελληνικής επικράτειας, στο Αιγαίο και το Ιόνιο, και ενδεχόμενα περιστατικά διαρροής πετρελαίου μπορεί να έχουν καταστρεπτικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, τη θαλάσσια ζωή και την οικονομική δραστηριότητα παράκτιων περιοχών της χώρας μας. Στο πλαίσιο αυτό, στην παρούσα εργασία γίνεται προσομοίωση της τροχιάς διαρρέουσας δέσμης πετρελαίου σε περίπτωση ατυχήματος στην περιοχή του Δυτικού Κατάκολου, με σκοπό την πρόβλεψη της διασποράς στην υποθαλάσσια περιοχή, τον προσδιορισμό της θέσης στην επιφάνεια της θάλασσας που αναμένεται να αναπτυχθεί αρχικά πετρελαιοκηλίδα και τον καθορισμό των ελάχιστων χρόνων απόκρισης. Οι αριθμητικοί υπολογισμοί γίνονται με χρήση του λογισμικού Fluent της εταιρίας ANSYS ενώ οι προβλέψεις των υπολογιστικών μεθόδων που ενσωματώνονται συγκρίθηκαν με εργαστηριακά πειραματικά αποτελέσματα. Εξετάζονται τέσσερις περιπτώσεις που περιλαμβάνουν διαρροή πετρελαίου στο μέσο και μέγιστο βάθος της περιοχής, με παρουσία εγκάρσιου θαλάσσιου ρεύματος, χωρίς και με χρήση χημικών διασκορπιστικών και παρουσιάζονται οι χρόνοι και οι ταχύτητες ανόδου του διαρρέοντος πετρελαίου καθώς και οι αποστάσεις που διανύει σε οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση.

**Λέξεις Κλειδιά:** διαρροή, Δυτικό Κατάκολο, πετρέλαιο, χημικά διασκορπιστικά, Fluent

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραγωγή πετρελαίου από υπεράκτιες εγκαταστάσεις εξόρυξης, με τη βοήθεια των σύγχρονων τεχνολογιών που επιτρέπουν την εκμετάλλευση κοιτασμάτων σε μεγαλύτερα βάθη, ακολουθεί αυξανόμενους ρυθμούς διεθνώς τις τελευταίες δεκαετίες, λόγω των μεγάλων ενεργειακών αναγκών. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το σύνθετο περιβάλλον στις περιοχές των εξορύξεων, αυξάνει τις πιθανότητες πρόκλησης ατυχήματος που να οδηγεί σε διαφυγή πετρελαίου στο θαλάσσιο χώρο, λόγω έκρηξης ή διαρροής σε δίκτυα αγωγών, με ανυπολόγιστες περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις (αλιευτικές, τουριστικές βιομηχανίες).

Η πρόκληση ατυχημάτων σε σημεία εξόρυξης σε μεγάλα βάθη απελευθερώνει πετρέλαιο και αέριο στο θαλάσσιο περιβάλλον. Λόγω της αλληλεπίδρασης του πετρελαίου και του αερίου με την κύρια μάζα του νερού, σχηματίζονται διαφορετικά μεγέθη φυσαλίδων σε διαφορετικά βάθη. Οι φυσαλίδες διαφορετικών μεγεθών έχουν διαφορετικές ταχύτητες ανόδου, λόγω της άνωσης. Ο χρόνος ανόδου των μεγαλύτερων φυσαλίδων στην επιφάνεια είναι της τάξης των λίγων ωρών, ενώ θα απαιτηθούν μερικές ημέρες ή εβδομάδες για να φθάσουν τα μικρότερα σωματίδια στην επιφάνεια (Ryerson et al. 2012). Επιπλέον, μικρότερες φυσαλίδες μπορούν να παραμείνουν στο νερό για μεγάλες χρονικές περιόδους λόγω κάθετων αναταράξεων, στρωματοποίησης της πυκνότητας του θαλάσσιου νερού ή

λόγω της παράσυρσης από θαλάσσια ρεύματα. Η διαδρομή που ακολουθούν τελικά οι φυσαλίδες διαρρέοντος πετρελαίου, καθορίζονται από φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες, ανάλογα με τις ιδιότητες του πετρελαίου, τις καιρικές, υποθαλάσσιες και περιβαλλοντικές συνθήκες.

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) για την προσομοίωση περιστατικών υποθαλάσσιας διαρροής είναι διαδεδομένη. Οι επιλογές ποικίλουν, ανάλογα με τη χρήση μοντέλων προσέγγισης Euler (Li et al. 2013), (Zhu, Lin and Pan 2014) ή Lagrange (Bakli 2014), (Li, Chen and Zhu 2017). Λόγω, όμως, της φύσης του φαινομένου και της διάσπασης της δέσμης του διαρρέοντος πετρελαίου σε μικρές φυσαλίδες, η προσέγγιση Euler απαιτεί υπολογιστικό πλέγμα του οποίου τα κελιά θα έχουν διαστάσεις μικρότερες από τη διάμετρο των δημιουργούμενων φυσαλίδων. Ως εκ τούτου, υπάρχουν περιορισμοί στην προσπάθεια χρήσης γεωμετρικών πραγματικών διαστάσεων, εξαιτίας των εκατομμυρίων κελιών που απαιτούνται και τα οποία αυξάνουν δραματικά την αναγκαία υπολογιστική ισχύ και το χρόνο των προσομοιώσεων.

Πρόσφατα, έχει αναπτυχθεί έντονο ενδιαφέρον για την εκμετάλλευση κοιτασμάτων υδρογονανθράκων εντός της Ελληνικής επικράτειας, στο Αιγαίο και το Ιόνιο. Ωστόσο ενώ ένα τέτοιο ενδεχόμενο μπορεί να αναβαθμίσει σημαντικά το ρόλο της χώρας μας στον ενεργειακό τομέα δεν θα πρέπει να παραβλέπουμε το γεγονός ότι ενδεχόμενα περιστατικά διαρροής πετρελαίου μπορεί να έχουν καταστρεπτικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, τη θαλάσσια ζωή και την οικονομική δραστηριότητα παράκτιων περιοχών. Σε αυτό το πλαίσιο είναι πρόδηλη η αναγκαιότητα για ένα εργαλείο που θα μπορεί να δρα επικουρικά σε τέτοιες καταστάσεις

Στην παρούσα εργασία, πρόθεση των συγγραφέων είναι να παρουσιάσουν την προσομοίωση της τροχιάς διαρρέουσας δέσμης πετρελαίου σε περίπτωση υποθαλάσσιου ατυχήματος με χρήση ενός αξιόπιστου και μη χρονοβόρου υπολογιστικού μοντέλου. Η περιοχή που επιλέχθηκε για τη μελέτη σεναρίων διαρροής πετρελαίου είναι το Δυτικό Κατάκολο, στις δυτικές ακτές της Πελοποννήσου. Η έκταση του αδειοδοτημένου οικοπέδου για πραγματοποίηση γεωτρήσεων είναι 545 km<sup>2</sup>, έχει μέσο βάθος 460 m και μέγιστο 1818 m ενώ το κοίτασμα βρίσκεται σε βάθος 2300-2600 m. Η πρωτοτυπία της εργασίας έγκειται στο γεγονός ότι για πρώτη φορά παρουσιάζονται αποτελέσματα για διαρροή πετρελαίου στην περιοχή του Δ. Κατάκολου κάνοντας ένα ακόμα βήμα στην κατανόηση των απαιτήσεων που θα προκύψουν στο μέλλον για την αντιμετώπιση των ανεπιθύμητων αποτελεσμάτων ενός ατυχήματος. Από την ανάλυση προκύπτουν ουσιαστικές πληροφορίες για την πρόβλεψη της διασποράς στην υποθαλάσσια περιοχή, τον προσδιορισμό της θέσης στην επιφάνεια της θάλασσας που αναμένεται να αναπτυχθεί αρχικά πετρελαιοκηλίδα και τον καθορισμό του ελάχιστου χρόνου απόκρισης για την αντιμετώπιση τέτοιων φαινομένων.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία μοντελοποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί, με τις κατάλληλες τροποποιήσεις, και σε άλλες περιπτώσεις διαρροών σε οποιοδήποτε σημείο εξόρυξης, αποτελώντας τμήμα της Στρατηγικής Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων και παρέχοντας άμεσα αποτελέσματα αναφορικά με την αναμενόμενη πορεία και κατάληξη της διαρρέουσας δέσμης, συμβάλλοντας στην εκτίμηση των επιπτώσεων αλλά και την οργάνωση της έγκαιρης αντιμετώπισης του περιστατικού.

Στην Ενότητα 2 παρουσιάζονται οι αριθμητικές μέθοδοι που εφαρμόζονται και η σύγκριση με πειραματικά δεδομένα για την επαλήθευση του υπολογιστικού μοντέλου. Στην Ενότητα 3 αναλύονται τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης για την περιοχή ενδιαφέροντος και στην Ενότητα 4 περιλαμβάνονται τα βασικότερα συμπεράσματα της ανάλυσης.

## 2. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

### 2.1 Αριθμητικό μοντέλο

#### 2.1.1 Εξισώσεις Κίνησης

Η εξίσωση συνέχειας εκφράζεται ως εξής:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

Όπου  $\rho$  η πυκνότητα και  $\mathbf{u} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k}$  το διάνυσμα της ταχύτητας.

Η εξίσωση της ορμής:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

Όπου  $p$  η στατική πίεση,  $\mathbf{g}$  η βαρύτητα,  $\mathbf{F}$  οι εξωτερικές δυνάμεις (στην παρούσα μελέτη είναι οι αλληλεπιδράσεις με τη διασκορπισμένη φάση του μοντέλου DPM) και  $\bar{\tau}$  ο τανυστής τάσεων:

$$\bar{\tau} = \mu [(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{I}] \quad (3)$$

Οι δύο εξισώσεις του τυρβώδους μοντέλου Realisable  $k$ - $\varepsilon$ , για την παραγωγή  $k$  και την απορρόφηση  $\varepsilon$  της τυρβώδους κινητικής ενέργειας είναι:

$$\rho \left( \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (k u_i) \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\varepsilon u_i) \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (5)$$

Όπου  $G_b$  η παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας λόγω άνωσης και  $G_k$  λόγω της βαθμίδας της ταχύτητας. Οι αριθμοί Prandtl για την παραγωγή και απορρόφηση της κινητικής ενέργειας είναι  $\sigma_k$  και  $\sigma_\varepsilon$ . Οι σταθεροί συντελεστές είναι οι ακόλουθοι:  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1.0$  και  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ .

### 2.2.2 Εξισώσεις Μοντέλου Discrete Phase Model

Η λειτουργία του μοντέλου Discrete Phase Model (DPM) βασίζεται στην προϋπόθεση ότι το κλάσμα όγκου της διεσπαρμένης φάσης στο υπολογιστικό κελί είναι 10-12%. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη χρήση μεγαλύτερων κελιών και συνεπώς, λιγότερο πυκνού πλέγματος από τα μοντέλα προσέγγισης Euler. Η ισορροπία των ασκούμενων δυνάμεων στα σωματίδια, εκφράζεται από το παρακάτω σύστημα εξισώσεων:

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_D (\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \mathbf{F} \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (5)$$

$$Re = \frac{\rho_l d_p |u_p - u_l|}{\mu_l} \quad (6)$$

Όπου  $\mathbf{F}$  είναι ο όρος επιτάχυνσης του σωματιδίου και περιλαμβάνει την βαρύτητα,  $u$  είναι η ταχύτητα του συνεχούς ρευστού,  $u_p$  η ταχύτητα του σωματιδίου,  $d_p$  η διάμετρος,  $Re$  ο αριθμός Reynolds και  $C_D$  ο συντελεστής οπισθέλκουσας.

### 2.2 Αριθμητική μέθοδος

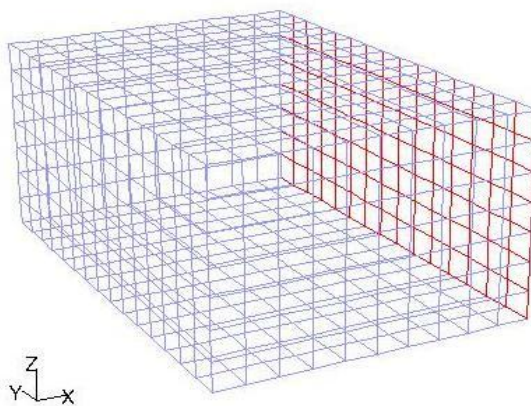
Οι αριθμητικοί υπολογισμοί γίνονται με χρήση του λογισμικού Fluent της εταιρίας ANSYS, σε τρισδιάστατη γεωμετρία που αντιστοιχεί σε περιοχή πέριξ του σημείου διαρροής και μέχρι την επιφάνεια της θάλασσας, στο μέσο και το μέγιστο βάθος. Γίνεται χρήση του μοντέλου Discrete Phase Model (DPM), προσέγγισης Lagrange για την επίλυση της ροής φυσαλίδων πετρελαίου και του μοντέλου τυρβώδους ροής RNG  $k$ - $\varepsilon$ . Η επιτάχυνση της βαρύτητας ορίστηκε  $9.81 \text{ m/s}^2$  στην αρνητική διεύθυνση του άξονα  $z$ , ο αλγόριθμος SIMPLE χρησιμοποιήθηκε για τη σύζευξη πίεσης-ταχύτητας, το σχήμα PRESTO για την πίεση, ακρίβεια δευτέρου βαθμού για τις εξισώσεις ορμής και πρώτου βαθμού για τις εξισώσεις παραγωγής και εκφύλισης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Το χρονικό βήμα των υπολογισμών είναι  $0.02 \text{ s}$ . Οι οριακές συνθήκες είναι wall για την κάτω οριζόντια επιφάνεια που αναπαριστά τον πυθμένα, με συνθήκη no-slip, pressure outlet για την κατάντη κάθετη επιφάνεια και velocity inlet για όλες τις υπόλοιπες, με διεύθυνση ταχύτητας στον οριζόντιο άξονα και προς την επιφάνεια pressure outlet. Με τον τρόπο αυτό επιτεύχθηκε η εφαρμογή ομοιόμορφης κατανομής της ταχύτητας του θαλάσσιου ρεύματος στο εσωτερικό της εξεταζόμενης γεωμετρίας.

### 2.3 Επαλήθευση Υπολογιστικού Μοντέλου

Προκειμένου να ελεγχθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων που μπορεί να δώσει το μοντέλο DPM που χρησιμοποιήθηκε πραγματοποιήθηκε σύγκριση με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα από τη βιβλιογραφία. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε η εργασία των Zhang και Zhu (2013), όπου μελετήθηκε η τροχιάς κάθετης εκροής φυσαλίδων αέρα σε συνθήκες οριζόντιου πλευρικού ρεύματος νερού.

Η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στην Εικόνα 1 και έχει τις διαστάσεις της πειραματικής δεξαμενής, 0.53 m x 1.0 m x 0.8 m. Οι οριακές συνθήκες είναι wall για την κάτω οριζόντια επιφάνεια που αναπαριστά τον πυθμένα, με συνθήκη no-slip, pressure outlet για την κατάντη κάθετη επιφάνεια και velocity inlet για όλες τις υπόλοιπες, με διεύθυνση ταχύτητας στον οριζόντιο άξονα και προς την επιφάνεια pressure outlet. Το εγκάρσιο ρεύμα νερού έχει διεύθυνση στον άξονα x, έντασης 0.2 m/s. Το δομημένο πλέγμα αποτελείται από εξάεδρα κελιά, πλευράς 6 cm.

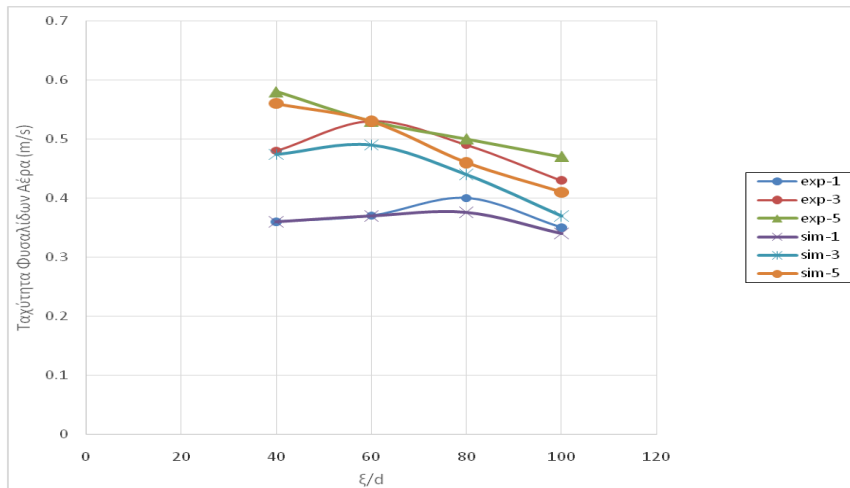
Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν αφορούν ροή αέρα με ρυθμό 1 lt/min, 3 lt/min και 5 lt/min και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται με βάση τις γωνίες που σχηματίζει η δέσμη αέρα σε σχέση με το κάτω επίπεδο της δεξαμενής και η κατανομή της ταχύτητας των φυσαλίδων κατά μήκος της ροής. Οι κατανομές των διαμέτρων των φυσαλίδων που εισήχθησαν στο μοντέλο DPM, προέκυψαν από τα διατιθέμενα διαγράμματα αποτελεσμάτων της εργασίας, καθώς δεν υπήρχε σαφής αναφορά σε αυτές και έγινε χρήση του μοντέλου Rosin-Rammler. Ο μέσος συντελεστής σχήματος που χρησιμοποιήθηκε είναι 0.9 και η επιλογή έγινε με βάση την επίδραση που αυτός είχε στην κλίση και την ταχύτητα της ροής του αέρα λαμβάνοντας υπόψη και από τις εικόνες της πειραματικής ροής ότι οι φυσαλίδες δεν έχουν απόλυτα σφαιρικό σχήμα. Στην εικόνα 3 παρουσιάζεται η μορφή της ροής των φυσαλίδων και ο χρωματισμός είναι με βάση τις διαμέτρους.



Εικόνα 1. Γεωμετρία και πλέγμα υπολογισμού αριθμητικής προσομοίωσης πειράματος Zhang και Zhu (2013).

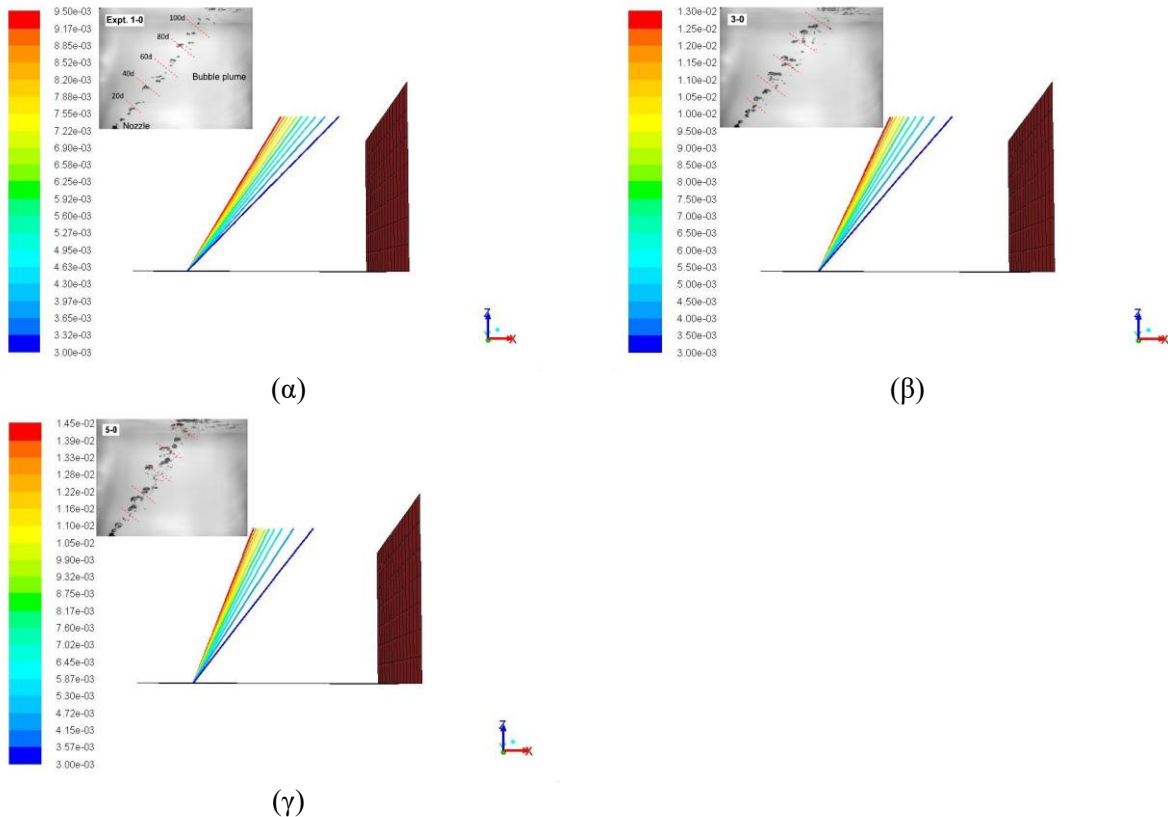
Περίπτωση	Παροχή (L/m)	Κατανομή Διαμέτρων (mm)	Μέση Διάμετρος (mm)	Ταχύτητα Ρεύματος (m/s)	Γωνία-Πείραμα	Γωνία-Προσομοίωση	Απόκλιση %
1-0	1	3 έως 9.5	8.31	0.2	47.5°	50.5°	6.3
3-0	3	3 έως 13	9.46	0.2	53.5°	57.5°	7.4
5-0	5	3 έως 14.5	10.93	0.2	57°	60°	5.2

Πίνακας 1. Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων τροχιάς κάθετης εκροής φυσαλίδων αέρα σε συνθήκες οριζόντιου πλευρικού ρεύματος νερού για τρεις περιπτώσεις προερχόμενες από την εργασία των Zhang και Zhu (2013).



Εικόνα 2. Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών προβλέψεων για τη μεταβολή της ταχύτητας των φυσαλίδων κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της ροής αέρα.

Εξετάζοντας τη γωνία της δέσμης, προκύπτει ότι η υπερεκτίμηση σε όλες τις περιπτώσεις είναι μεταξύ  $3^{\circ}$ - $4^{\circ}$  και σαν ποσοστό, κατά μέσο όρο 6.3%. Σε ότι αφορά τις ταχύτητες των φυσαλίδων στην κεντρική γραμμή της ροής, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 2, παρατηρείται μια μέση απόκλιση της τάξης του 5.5%. Οι μετρήσεις των ταχυτήτων ξεκινούν από απόσταση 40 διαμέτρων της διατομής εξόδου του αέρα,  $(\xi/d)=40$ , καθώς θεωρήθηκε ότι σε μικρότερη απόσταση, οι φυσαλίδες αέρα δεν έχουν προλάβει να διασπαστούν αρκετά, ώστε να έχει επιτευχθεί η τελική κατανομή διαμέτρων, η οποία και χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση της κάθε περίπτωσης. Από τα παραπάνω συνάγεται ότι υπάρχει ικανοποιητική συμφωνία, δεδομένης και της έλλειψης λεπτομερών στοιχείων που αφορούν το σχήμα και τις ακριβείς κατανομές των φυσαλίδων στο πείραμα.



Εικόνα 3. Τρισδιάστατη απεικόνιση με βάση τις διαμέτρους των φυσαλίδων αέρα για τις περιπτώσεις (α) 1-0, (β) 3-0, (γ) 5-0 με τις αντίστοιχες εικόνες της ροής στην πειραματική εγκατάσταση από την εργασία των Zhang και Zhu (2013).

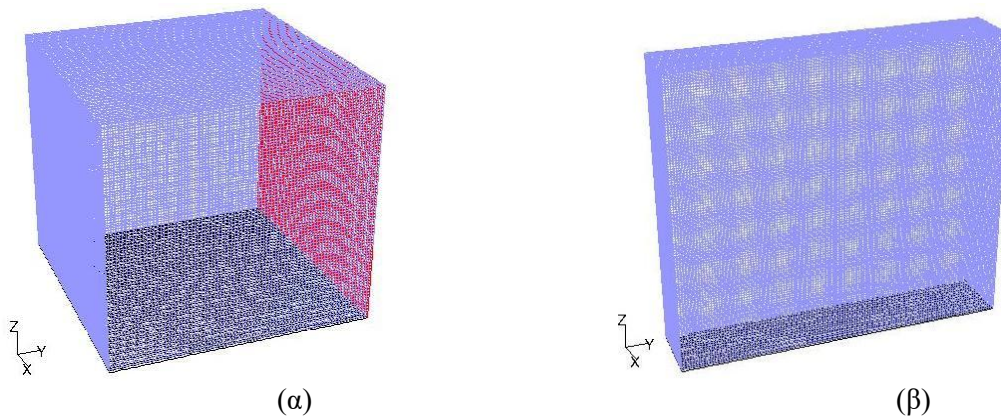
Παρά το γεγονός ότι η σύγκριση των αποτελεσμάτων είναι ικανοποιητική, η χρήση του μοντέλου σε μεγάλη κλίμακα αποτελεί πρόκληση καθώς δεν είναι διαθέσιμα αρκετά στοιχεία που αφορούν τις πραγματικές ιδιότητες του πετρελαίου στην εξεταζόμενη περιοχή και τις λεπτομερείς συνθήκες που επικρατούν και για τις οποίες είναι πιθανό να χρειασθεί η κατασκευή και ενσωμάτωση User Defined Functions. Επιπλέον, δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις από την περιοχή, καθώς δεν έχει προκύψει περιστατικό, ώστε να μπορεί να γίνει πιστοποίηση της προσέγγισης που παρουσιάζεται, με βάση πραγματικές συνθήκες σε πλήρη κλίμακα.

### 3. ΠΛΑΙΣΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να εξεταστούν συνολικά τέσσερις περιπτώσεις διαρροής πετρελαίου στο μέσο και μέγιστο βάθος της περιοχής του Δ. Κατάκολου, με παρουσία εγκάρσιου θαλάσσιου ρεύματος, χωρίς και με χρήση χημικών διασκορπιστικών, σε αναλογία DOR 1:100. Τα αποτελέσματα παρέχουν πληροφορίες σχετικά με

- το χρόνο ανόδου της διαρρέουσας δέσμης στην επιφάνεια της θάλασσας
- την ταχύτητα ανόδου των φυσαλίδων πετρελαίου
- την τελική οριζόντιας εκτροπή λόγω του θαλάσσιου ρεύματος μέσω της κλίσης της δέσμης.

Οι ιδιότητες των υλικών και οι τιμές των οριακών συνθηκών βασίζονται σε δημοσιευμένα δεδομένα εξασφαλίζοντας τη μέγιστη δυνατή αξιοπιστία του προτεινόμενου υπολογιστικού μοντέλου.



Εικόνα 4. Γεωμετρία και πλέγμα υπολογισμού αριθμητικής προσομοίωσης διαρροής (α) μέσο βάθος των 460m, (β) μέγιστο βάθος των 1818m.

Η δημιουργία των εξεταζόμενων γεωμετριών καθώς και των αντίστοιχων υπολογιστικών πλεγμάτων έγινε με χρήση του λογισμικού GAMBIT 2.3. Οι διαστάσεις των γεωμετριών είναι 500 m x 500 m x 460 m και 1000 m x 500 m x 1818 m (L x W x H), Εικόνα 4 (α) και (β) αντίστοιχα. Τα αρχικά πλέγματα είναι δομημένα και αριθμούν 550368 και 373464 εξάεδρα κελιά αντίστοιχα αλλά κατά την επίλυση εφαρμόστηκε η λειτουργία Dynamic Gradient Adaption, προκειμένου να γίνεται αυτόματα πύκνωση του πλέγματος στις περιοχές όπου παρατηρείται συγκέντρωση της φάσης του πετρελαίου με όριο την τιμή 0.001. Με τον τρόπο αυτό, οι διαστάσεις του πλέγματος στις περιοχές όπου υπάρχει μόνο η φάση του νερού παραμένουν στην αρχική ρύθμιση. Οι αρχικές διαστάσεις των κελιών στην 1<sup>η</sup> γεωμετρία του μέσου βάθους ήταν 6 m και στη 2<sup>η</sup> 16 m ενώ μετά την πύκνωση στις περιοχές ενδιαφέροντος έφτασαν τα 1.5 m και 4 m αντίστοιχα.

Ο ρυθμός διαρροής του πετρελαίου ορίστηκε στα 0.1 m<sup>3</sup>/s με βάση δημοσιευμένα στοιχεία των Camilli et al. (2012), Zhao et al., (2015), (2017) και αντιστοιχεί στην καταγραφείσα τιμή του ρυθμού διαρροής στον Κόλπο του Μεξικού, στο ατύχημα της πλατφόρμας εξόρυξης Deepwater Horizon, το 2010. Σε ό,τι αφορά το θαλάσσιο ρεύμα, ορίστηκε τιμή ταχύτητας 0.1 m/s, με βάση τη μελέτη των Παπαθανασίου et al. (2012). Η πυκνότητα του θαλασσινού νερού παρουσιάζει διαστρωμάτωση, με τιμές 1026 kg/m<sup>3</sup>-1028 kg/m<sup>3</sup> στο μέσο και 1026 kg/m<sup>3</sup>-1030 kg/m<sup>3</sup> στο μέγιστο βάθος.

Για την απεικόνιση της κίνησης των φυσαλίδων του πετρελαίου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Discrete Particle Model (DPM). Η έγχυση των φυσαλίδων, οι οποίες μοντελοποιούνται ως 'σωματίδια' πετρελαίου, γίνεται σε μια διάμετρο 0.2 m στην κάτω επιφάνεια της γεωμετρίας και η κατανομή των διαμέτρων τους ακολουθεί το μοντέλο Rosin-Rammler, το οποίο είναι διαθέσιμο με το DPM. Οι ιδιότητες του πετρελαίου και οι κατανομές των διαμέτρων των φυσαλίδων, παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 2 και προήλθαν από την εργασία των Murphy et al. (2016), ως χαρακτηριστικές τιμές για περιπτώσεις διαρροής πετρελαίου. Η επίδραση της θερμοκρασίας του πετρελαίου και του θαλασσινού νερού στην εξέλιξη του φαινομένου, θεωρήθηκε στο στάδιο αυτό, αμελητέα, με βάση τη μελέτη των Gao et al. (2017).

Περίπτωση	Κατανομή Διαμέτρων (mm)	Μέση Διάμετρος (mm)	Συντελεστής Σχήματος	Ταχύτητα Ρεύματος (m/s)	Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	Βάθος (m)
1	1 έως 11	4	1	0.1	864	460
2	1 έως 11	4	0.9	0.1	864	460
3	0.045 έως 1	0.4	1	0.1	855	460
4	1 έως 11	4	1	0.1	864	1818

Πίνακας 2. Ιδιότητες του πετρελαίου και τιμές άλλων παραμέτρων της μελέτης διαρροής στην περιοχή του Δ. Κατάκολου.

#### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Στις Εικόνες 5 έως 8 παρουσιάζεται για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, η κατανομή των φυσαλίδων πετρελαίου στο χώρο σε διάφορα στιγμιότυπα, καθώς κινούνται υπό την επίδραση του θαλάσσιου ρεύματος, με βάση τη διάμετρό τους. Όπως γίνεται άμεσα κατανοητό, η σφαιρικότητα των φυσαλίδων καθώς και η χρήση χημικών διασκορπιστικών, αυξάνει σημαντικά το χρόνο ανόδου. Ο αρχικός χρόνος (περίπτωση 1) είναι 1585 s, στην περίπτωση 2 2150 s, και στην περίπτωση 3 2700 s. Για το μέγιστο βάθος, περίπτωση 4, ο χρόνος ανόδου καταγράφηκε στα 7600 s. Με άλλα λόγια παρατηρείται αύξηση 35.6%, και 70.3%.

Στη συνέχεια, εκτιμήθηκε η επίδραση της μη σφαιρικότητας των φυσαλίδων και της ύπαρξης χημικών διασκορπιστικών στην κλίση της διαρρέουσας δέσμης και βρέθηκε ότι η γωνία που σχηματίζεται μειώνεται από 77° σε 76° και 73.5°, μια πτώση περίπου 1.3 % και 4.55% αντίστοιχα. Στο μέγιστο βάθος η κλίση της δέσμης είναι 65° καθώς επιδρά και η εντονότερη διαστρωμάτωση της πυκνότητας σε μεγαλύτερο εύρος τιμών. Κατά συνέπεια, συμπεραίνεται ότι εκτός από την αύξηση του χρόνου ανόδου έχουμε και μια σαφή επίδραση στην οριζόντια κίνηση των φυσαλίδων, οι οποίες παρασύρονται περισσότερο από το θαλάσσιο ρεύμα καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντίσταση και στην περίπτωση των διασκορπιστικών, έχουν μικρότερες διαμέτρους άρα και μικρότερη άνωση.

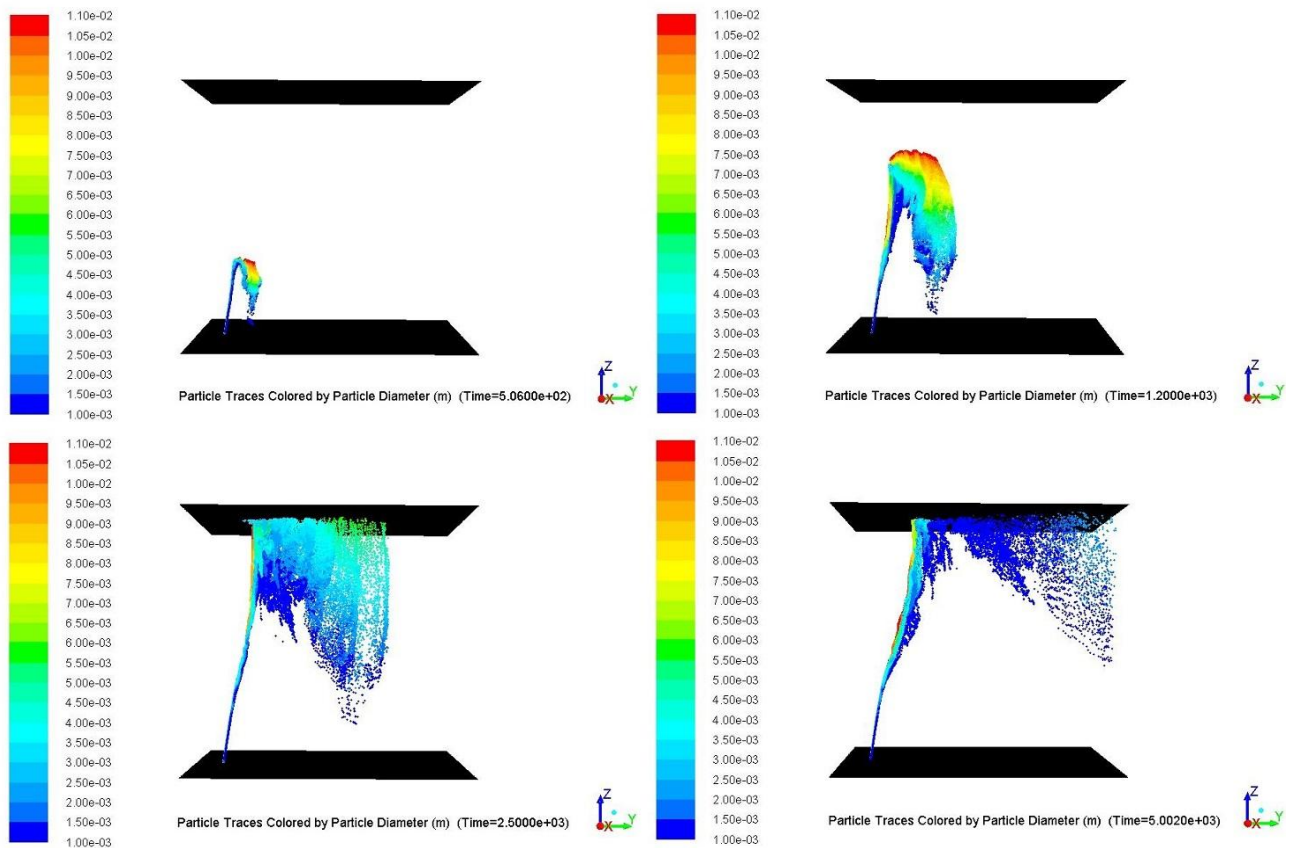
Έπειτα, αναλύθηκε η οριζόντια κίνηση των φυσαλίδων πετρελαίου, με τα αποτελέσματα να αποδίδουν την αύξηση της ταχύτητας σε αυτή την κατεύθυνση υπό την επίδραση της μειωμένης σφαιρικότητας και των χημικών διασκορπιστικών. Αυτό φαίνεται, αρχικά, από τους χρόνους που χρειάστηκε για να διανυθεί η διαθέσιμη οριζόντια απόσταση στις εξεταζόμενες γεωμετρίες, οι οποίοι ήταν 5000 s, 4000 s και 3600 s για τις περιπτώσεις 1-3, δηλ. μείωση 20% και 28% αντίστοιχα.

Τα διαγράμματα των Εικόνων 9 έως 12 δείχνουν τη μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διαρρέουσας δέσμης πετρελαίου, στις κατακόρυφες και τις οριζόντιες κατευθύνσεις. Το διάγραμμα της Εικόνας 9 καταδεικνύει τη σοβαρή επίπτωση των χημικών διασκορπιστικών στην κατακόρυφη απόσταση που καλύπτεται από τις φυσαλίδες πετρελαίου που κινούνται προς τα πάνω. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 11, η οριζόντια απόσταση που διανύεται από τις φυσαλίδες πετρελαίου που έχουν χαμηλότερο συντελεστή σχήματος αλλά και αυτών που υφίστανται επίδραση χημικών διασκορπιστικών στα πρώτα 1500 s της διαρροής είναι παρόμοια με αυτή του καθαρού πετρελαίου. Μετά από χρόνο  $t = 1500$  s, παρατηρείται απόκλιση που φθάνει έως τα 90-100 m για τις περιπτώσεις

2 και 3 αντίστοιχα. Στα 4000 s η απόσταση που έχει διανυθεί είναι μεταξύ 330 m και 430 m για τις τρεις περιπτώσεις του μέσου βάθους και σε παρόμοιο επίπεδο, λίγο κάτω από τα 400 m για το μέγιστο βάθος.

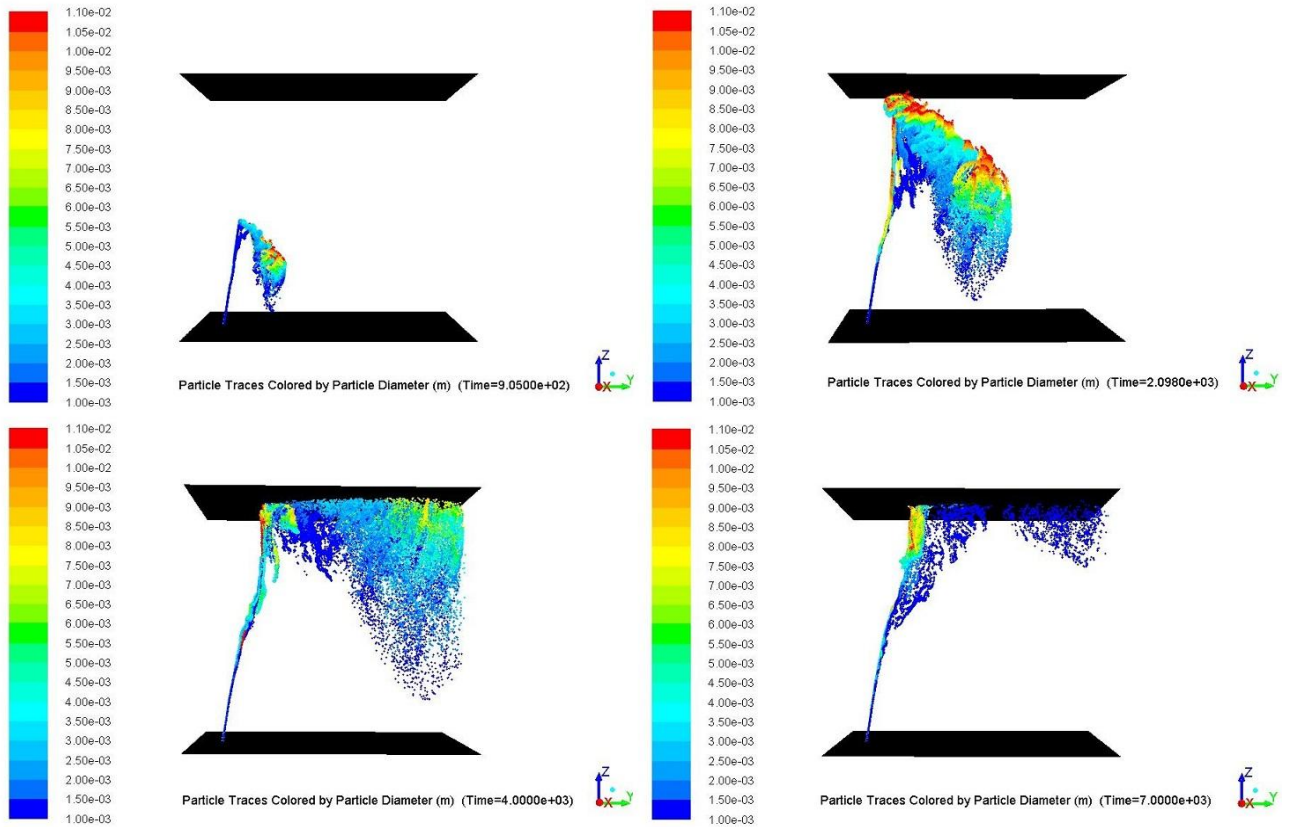
Τα διαγράμματα της Εικόνας 13 δείχνει τη μεταβολή της κατακόρυφης ταχύτητας. Στο αρχικό στάδιο της ροής, η ταχύτητα αυξάνεται απότομα μέχρι ένα όριο και έπειτα παρουσιάζει μια ελαφρώς ταλαντευόμενη συμπεριφορά. Παρατηρείται επίσης ότι οι φυσαλίδες πετρελαίου είναι λιγότερο επιρρεπείς σε έντονες μεταβολές της ταχύτητας, με τελική μέση τιμή ίση με 0.63 m/s. Οι μέσες τιμές της ταχύτητας ανόδου για τις περιπτώσεις 2-3 είναι 0.5 m/s και 0.072 m/s αντίστοιχα, με την επίδραση των διασκορπιστικών να είναι και εδώ καθοριστική, καθώς η μείωση της διαμέτρου των φυσαλίδων έχει ως επακόλουθο και τη μείωση της παραγόμενης άνωσης. Στην περίπτωση του μέγιστου βάθους, οι φυσαλίδες ξεκινούν με μια ταχύτητα της τάξης των 0.5 m/s στα πρώτα μέτρα της ροής αλλά στη συνέχεια μειώνεται σταδιακά και σταθεροποιείται στα 0.27 m/s.

Η επίδραση του βάθους, της ύπαρξης διασκορπιστικών όπως και της σφαιρικότητας των φυσαλίδων είναι προφανής. Τα δεδομένα αυτά είναι χαρακτηριστικά της υποθαλάσσιας υδροδυναμικής συμπεριφοράς του διαρρέοντος πετρελαίου και αποτελούν χρήσιμα στοιχεία για την οργάνωση και εφαρμογή οποιουδήποτε σχεδίου άμεσης επέμβασης στην περιοχή της διαρροής.

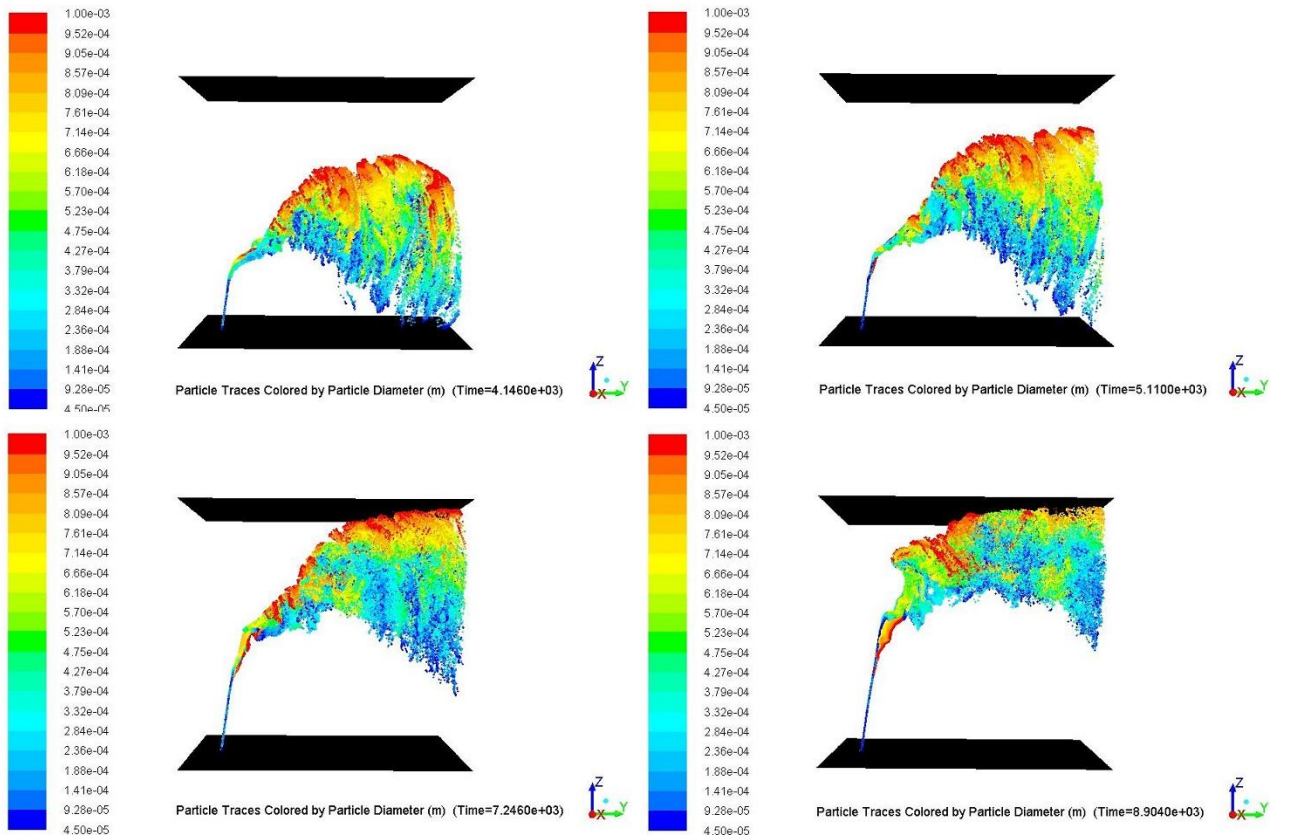


Εικόνα 5. Εξέλιξη ροής διαρρέοντος πετρελαίου σε βάθος 460 m με φυσαλίδες σφαιρικού σχήματος.

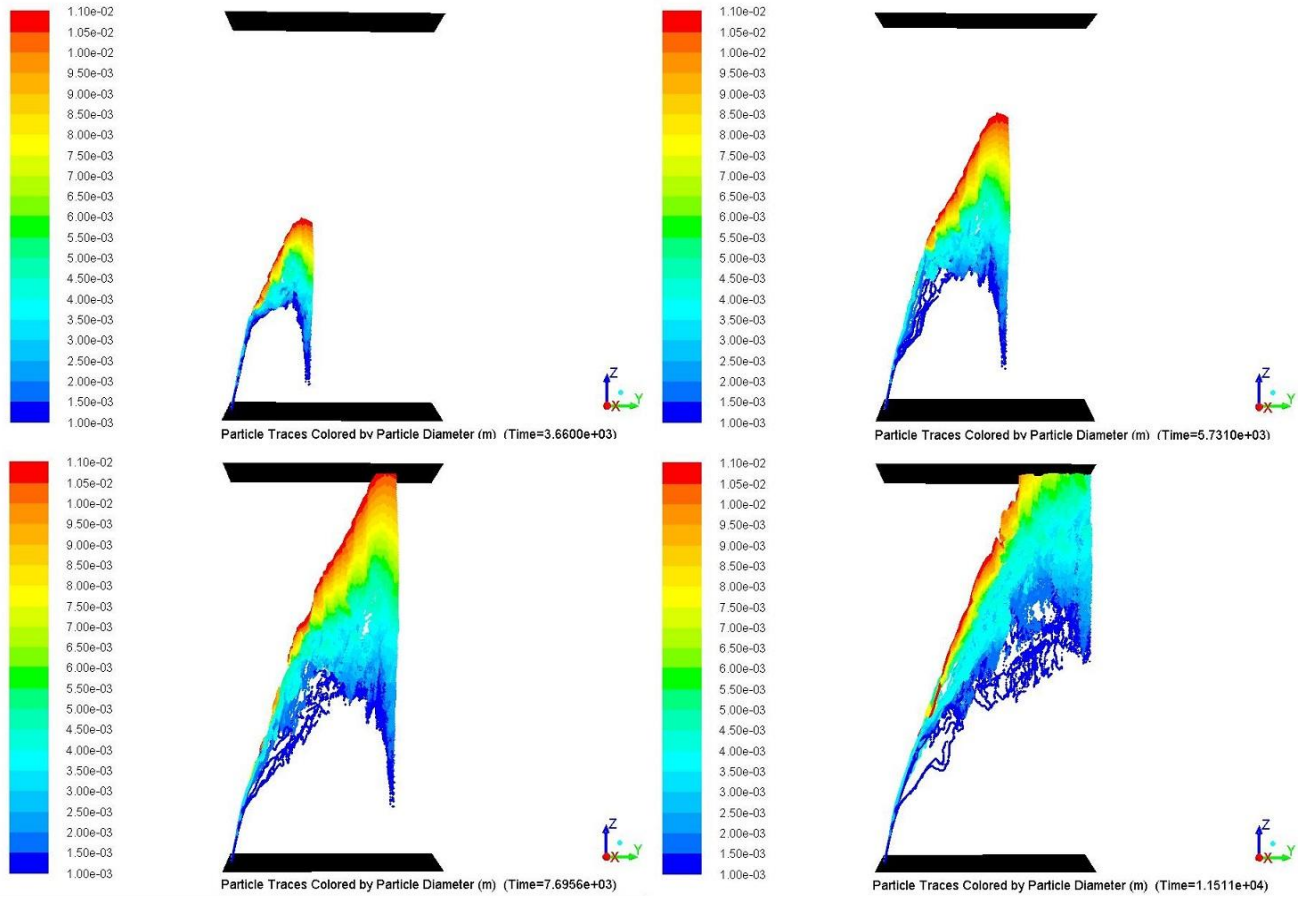




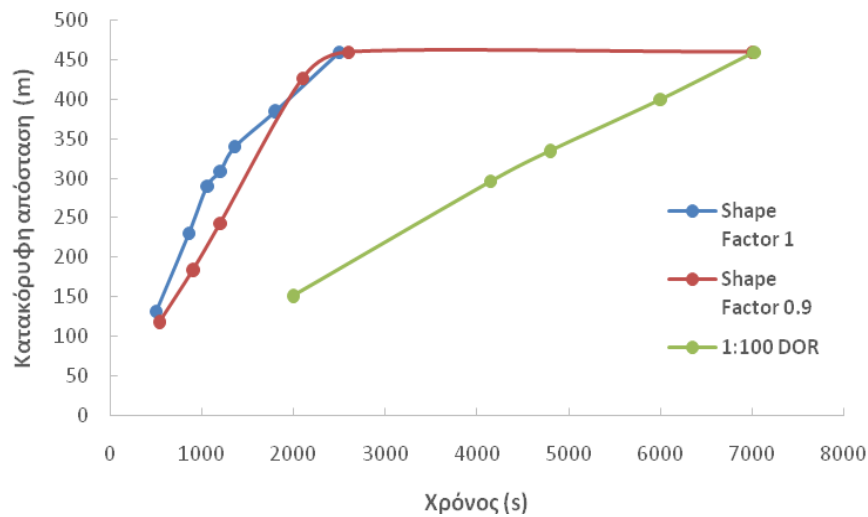
Εικόνα 6. Εξέλιξη ροής διαρρέοντος πετρελαίου σε βάθος 460 m με συντελεστή σχήματος 0.9.



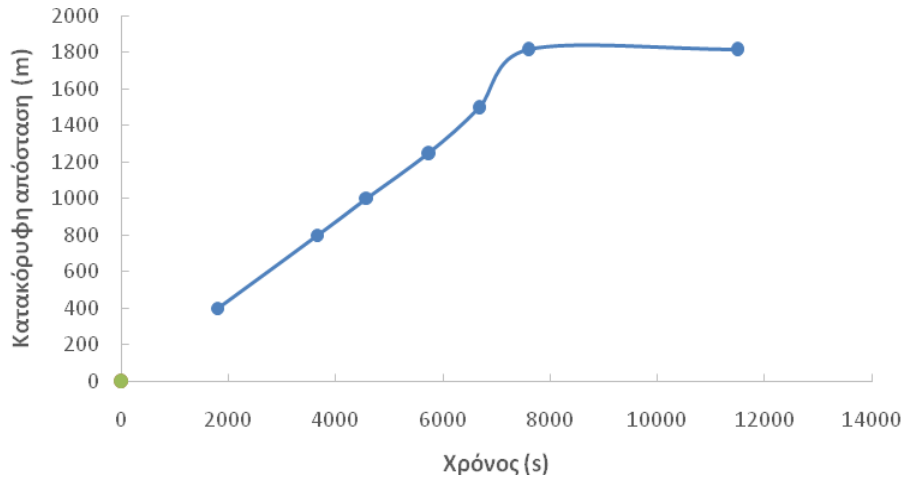
Εικόνα 7. Εξέλιξη ροής διαρρέοντος πετρελαίου σε βάθος 460 m με χρήση χημικών διασκορπιστικών.



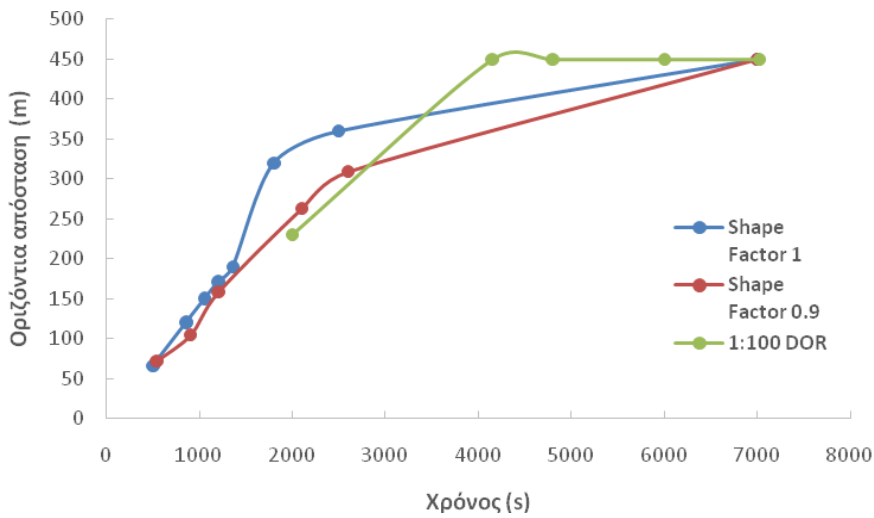
Εικόνα 8. Εξέλιξη ροής διαρρέοντος πετρελαίου σε βάθος 1818 m.



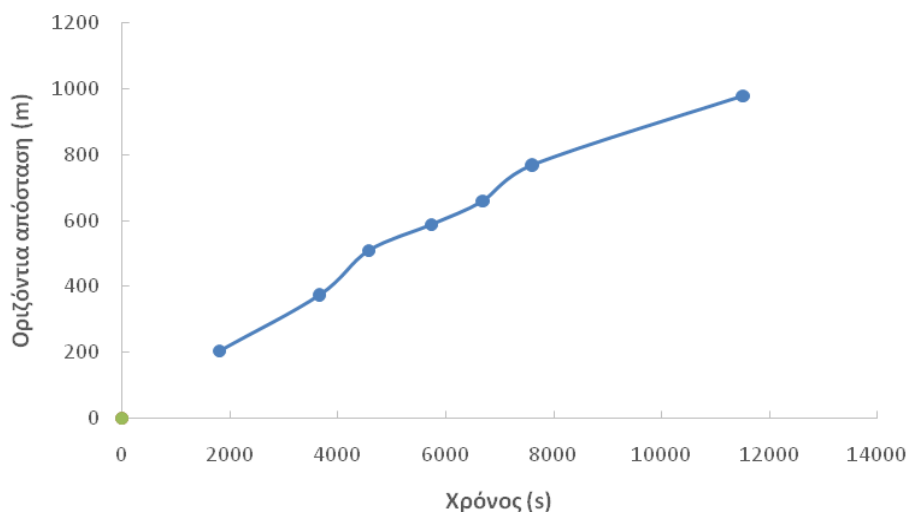
Εικόνα 9. Κατακόρυφη διανυόμενη απόσταση από τις φυσαλίδες πετρελαίου για το μέσο βάθος.



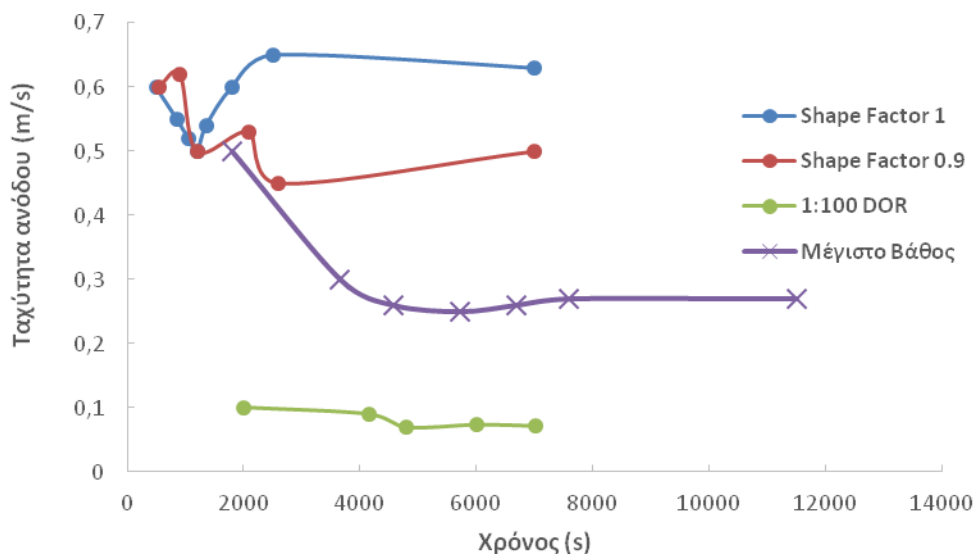
Εικόνα 10. Κατακόρυφη διανυόμενη απόσταση από τις φυσαλίδες πετρελαίου για το μέγιστο βάθος.



Εικόνα 11. Οριζόντια διανυόμενη απόσταση από τις φυσαλίδες πετρελαίου για το μέσο βάθος.



Εικόνα 12. Οριζόντια διανυόμενη απόσταση από τις φυσαλίδες πετρελαίου για το μέγιστο βάθος.



Εικόνα 13. Ταχύτητα ανόδου των φυσαλίδων πετρελαίου για το μέσο και μέγιστο βάθος.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της μελέτης είναι να παρουσιάσει μια εύκολη και αποτελεσματική μέθοδος, που να μπορεί να αναπαραστήσει με ικανοποιητική ακρίβεια και το κυριότερο, σε σύντομο χρονικό διάστημα, την εικόνα που διαμορφώνεται σε περίπτωση περιστατικού διαρροής πετρελαίου, ώστε να καταστεί δυνατή η άμεση επέμβαση σε περιορισμένη περιοχή, χωρίς μεγάλη διασπορά των δυνάμεων σε ευρύτερη έκταση και παρέχοντας τη δυνατότητα καλύτερης διαχείρισης. Παρατηρείται ότι:

- το σχήμα των φυσαλίδων καθώς και η χρήση χημικών διασκορπιστικών, αυξάνουν σημαντικά το χρόνο ανόδου
- παρατηρείται σημαντική επίδραση στην οριζόντια κίνηση, με αύξηση της ταχύτητας σε αυτή την κατεύθυνση υπό την επίδραση της μειωμένης σφαιρικότητας και των χημικών διασκορπιστικών, με τις φυσαλίδες να εκτρέπονται εντονότερα από το θαλάσσιο ρεύμα
- η κίνηση των φυσαλίδων πετρελαίου φαίνεται να μη χαρακτηρίζεται από έντονες μεταβολές της ταχύτητας.

Οι εκτιμήσεις αυτές είναι δυνατόν να συμβάλλουν στην ανάπτυξη περιβαλλοντικών μελετών που περιλαμβάνουν διάφορα σενάρια ατυχημάτων αλλά και στην ιεράρχηση των ενεργειών μετά από ένα πραγματικό περιστατικό διαρροής, για την ορθή κατανομή και αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων για την αντιμετώπισή του.

#### Βιβλιογραφία

Bakli M., Evaluation of Gas and Oil Dispersion during Subsea Blowouts, Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2014.

Bellas S., "New Tenders : Prospectivity of Ionian , South and Southwestern Crete Offshore Blocks , Greece", in AAPG/ICE Annual Meeting, London, October 2017.

Camilli R., Di Iorio D., Bowen A., Reddy C. M., Tchet A. H., Yoerger D. R., Whitcomb L. L., Seewald J. S., Sylva S. P. and Fenwick J., "Acoustic Measurement of the Deepwater Horizon Macondo Well Flow Rate", in Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012.

CFD Pre-processor, Gambit 2.3 Documentation, 2004.

Fluent Inc., Fluent 15 Documentation-User's Guide, 2013.

- Gao F., Zhao L., Boufadel M. C., King T., Robinson B., Conmy R. and Miller R. (2017), "Hydrodynamics of Oil Jets without and with Dispersant: Experimental and Numerical Characterization", *Applied Ocean Research* 68, p. 77.
- Li W., Pang Y., Lin J. and Liang X. (2013), "Computational Modeling of Submarine Oil Spill with Current and Wave by FLUENT", *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 5, p. 5077.
- Li X., Chen G. and Zhu H. (2017), "Modeling and Assessment of Accidental Oil Release from Damaged Subsea Pipelines", *Marine Pollution Bulletin* 123, p. 133.
- Makatounis P.E., Skancke J., Florou E., Stamou A., and Brandvik P.J. (2017), "Management of Oil Spill Contamination in the Gulf of Patras Caused by an Accidental Subsea Blowout", *Environmental Pollution* 231, p.578.
- Murphy D., Xue X., Sampath K. and Katz J. (2016), "Crude Oil Jets in Crossflow: Effects of Dispersant Concentration on Plume Behavior", *Journal of Geophysical Research: Oceans Research* 121, p. 4264.
- Ryerson T. B., Camilli R., Kessler J. D., Kujawinski E. B., Reddy C. M., Valentine D. L., Atlas E., et al., "Chemical Data Quantify Deepwater Horizon Hydrocarbon Flow Rate and Environmental Distribution", in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012.
- Zhang W. and Zhu D.Z. (2013), "Bubble Characteristics of Air-Water Bubbly Jets in Crossflow", *International Journal of Multiphase Flow* 55, p.156.
- Zhao L., Boufadel M. C., Socolofsky S. A., Adams E., King T. and Lee K. (2014), "Evolution of Droplets in Subsea Oil and Gas Blowouts: Development and Validation of the Numerical Model VDROF-J", *Marine Pollution Bulletin* 83, p. 58.
- Zhu H., Lin P. and Pan Q. (2014), "A CFD (Computational Fluid Dynamic) Simulation for Oil Leakage from Damaged Submarine Pipeline", *Energy* 64, p. 887.
- Παπαθανασίου Ε., Πάγκου Κ., Κρασακοπούλου Ε., Ρεϊζοπούλου Σ., and A. Pancucci, ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ ΤΟΜΟΣ Β: ΔΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΚΟΛΟ, 2012.