

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ  
ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΛΙΜΕΝΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**

**Χριστόφορος Γ. Κουτίτας\*, Αχιλλέας Γ. Σαμαράς\*\***

*\*Ο.Λ.Θ. Α.Ε. , Οργανισμός Λιμένος Θεσσαλονίκης,*

*Τ.Θ. 10467, Τ.Κ. 54110, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα*

*\*\*Ακροπόλεως 112Α, Άνω Πόλη, Τ.Κ. 54634, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα*

Στη συγκεκριμένη εργασία, παρουσιάζεται ένα υπολογιστικό μοντέλο που προσομοιώνει τη διάδοση μιας πετρελαιοκηλίδας συνδυαζόμενο με ένα υδροδυναμικό μοντέλο, με σκοπό την παρακολούθηση της επίδρασης της σε παράκτιες περιοχές. Για τη μελέτη της διάδοσης του πετρελαίου χρησιμοποιείται η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης περιλαμβάνοντας και τη διαδικασία της εξάτμισης. Το μοντέλο είναι χρήσιμο για βραχυπρόθεσμες προβλέψεις και χρησιμοποιείται για την προσομοίωση περιστατικών ρύπανσης στην περιοχή του λιμένα Θεσσαλονίκης.

**Λέξεις Κλειδιά:** πετρελαιοκηλίδα, μοντέλα, πρόβλεψη, προσομοίωση, εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης

**HYDRODYNAMIC AND OIL SPILL TRANSPORT COMPUTATIONAL MODELS  
IN THE THESSALONIKI PORT AREA**

**Christoforos G. Koutitas\*, Achilles G. Samaras\*\***

*\*Th.P.A. S.A., Thessaloniki Port Authority,*

*P.O. Box 10467, P.C. 54110, Thessaloniki, Greece*

*\*\*Akropoleos 112A, P.C. 54634, Thessaloniki, Greece*

In this paper, a numerical/computational model simulating the transport and spread of an oil spill is presented, combined with a hydrodynamic model, in order to monitor an oil spill's impact on coastal areas. The advection-diffusion equation is applied to describe the transport of the oil, also including the evaporation process. The model is useful for short-term predictions of the oil spilled dynamics and is used for pollution incidents simulation in the Thessaloniki Port area.

**Key Words:** oil spill, models, prediction, simulation, advection-diffusion equation

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σαν θαλάσσια ρύπανση ορίζεται η εισαγωγή ουσιών, άμεσα ή έμμεσα, από ανθρώπινες δραστηριότητες στο θαλάσσιο περιβάλλον, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα δυσμενείς και επικίνδυνες επιπτώσεις στους ζώντες οργανισμούς, παρεμποδίζουν ανθρώπινες δραστηριότητες, αλλοιώνουν την ποιότητα του θαλασσινού νερού και υποβιβάζουν τις δυνατότητες χρησιμοποίησής του για ψυχαγωγικούς σκοπούς [4]. Κάθε χρόνο, δισεκατομμύρια τόνοι πετρελαίου και προϊόντων του διακινούνται μέσω θαλάσσης. Οι λιμένες σε ολόκληρο τον κόσμο αποτελούν απαραίτητο κόμβο του δικτύου διακίνησης των παραπάνω αγαθών. Η πιθανότητα ατυχημάτων με αποτέλεσμα την εκροή στο θαλάσσιο περιβάλλον πετρελαίου και επικίνδυνων ουσιών είναι υπαρκτή, ως αποτέλεσμα φυσικών φαινομένων, ανθρώπινων λαθών και τεχνικών αστοχιών. Η δυνατότητα πρόβλεψης της εξέλιξης στο χώρο και στο χρόνο μιας πετρελαιοκηλίδας, είναι ένα πολύτιμο εργαλείο επιχειρησιακής έρευνας.

Για την εκτίμηση και τον έλεγχο της πετρελαϊκής ρύπανσης, αναπτύσσονται υπολογιστικά μοντέλα τα οποία αναπαριστούν, μαθηματικά, τους νόμους που καθορίζουν την θαλάσσια κυκλοφορία και τη διάδοση του πετρελαίου μετά την εκροή του.

## ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ

Οι πετρελαιοκηλίδες κατηγοριοποιούνται βάσει της ποσότητας πετρελαίου που έχει διαρρεύσει σε μικρές (ποσότητα <7ton), μεσαίες (ποσότητα 7<700ton) και μεγάλες (ποσότητα >700ton). Οι διαδικασίες που επιδρούν στη χωροχρονική εξέλιξη μιας πετρελαιοκηλίδας είναι (α) η μεταφορά, (β) η διάχυση, (γ) η εξάτμιση, (δ) η γαλακτωματοποίηση, (ε) η διάλυση, (στ) η οξείδωση, (ζ) η καθίζηση και (η) η βιοαποικοδόμηση [4,6,7,8,11]. Τα αίτια των περιστατικών δημιουργίας πετρελαιοκηλίδων χωρίζονται σε “εργασίες” και “ατυχήματα”. Στοιχεία για τα περιστατικά ανά αίτιο (έτη 1974-2001) παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 [8].

|  | <7 τόνους   | 7÷700 τόνους | >700 τόνους | Σύνολο      |
|--|-------------|--------------|-------------|-------------|
| <b>Εργασίες (Operations)</b>             |             |              |             |             |
| Φορτοεκφόρτωση (Loading/Discharging)     | 2767        | 299          | 17          | 3083        |
| Έρμα (Bunkering)                         | 541         | 25           | 0           | 566         |
| Άλλες εργασίες (Other operations)        | 1167        | 47           | 0           | 1214        |
| <b>Ατυχήματα (Accidents)</b>             |             |              |             |             |
| Συγκρούσεις (Collisions)                 | 123         | 254          | 87          | 504         |
| Προσαράξεις (Groundings)                 | 222         | 200          | 106         | 528         |
| Καταστροφές στο πλοίο (Hull failures)    | 562         | 77           | 43          | 682         |
| Φωτιές και εκρήξεις (Fires & explosions) | 150         | 16           | 19          | 185         |
| Άλλα Αίτια (Unknown)                     | 2221        | 165          | 37          | 2423        |
| <b>Σύνολο</b>                            | <b>7793</b> | <b>1083</b>  | <b>309</b>  | <b>9185</b> |

Πίνακας 1: Αίτια περιστατικών δημιουργία πετρελαιοκηλίδων

### ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

Για τη μελέτη της παράκτιας κυκλοφορίας στην περιοχή του λιμένα Θεσσαλονίκης, αναπτύχθηκαν δύο υπολογιστικά μοντέλα κωδικοποιημένα σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN: (α) το “2dhcircular.for” το οποίο εφαρμόζεται στο πεδίο του Όρμου Θεσσαλονίκης και (β) το “2dhcircularnested.for” το οποίο εφαρμόζεται στο πεδίο του Λιμένα Θεσσαλονίκης.

Τα μοντέλα αυτά, χρησιμοποιούν αλγόριθμους που επιλύουν τις εξισώσεις συνέχειας και ισορροπίας χρήσει της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών [2,3]. Οι εξισώσεις τροποποιούνται για να περιγράψουν τη βαροτροπική ροή (ανεμογενή και παλιρροιακή κυκλοφορία σε ομογενές πεδίο) [1].

$$\text{Εξίσωση Συνέχειας: } \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u \cdot \zeta) + \frac{\partial}{\partial y}(v \cdot \zeta) = 0$$

$$\text{Εξίσωση Ισορροπίας κατά x: } \frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + V \cdot \frac{\partial U}{\partial y} = -g \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} + f \cdot V + \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \cdot D_h - \frac{\tau_h}{\rho \cdot h} + \frac{\tau_x}{\rho \cdot h}$$

$$\text{Εξίσωση Ισορροπίας κατά y: } \frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = -g \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial y} - f \cdot u + \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \cdot D_h - \frac{\tau_v}{\rho \cdot h} + \frac{\tau_y}{\rho \cdot h}$$

### ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

Για τη μελέτη της διάδοσης της πετρελαϊκής ρύπανσης, αναπτύχθηκε ένα υπολογιστικό μοντέλο κωδικοποιημένο σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, το “2difupoil.for” το οποίο μπορεί

να εφαρμοστεί τόσο στο πεδίο του Όρμου, όσο και σε αυτό του Λιμένα Θεσσαλονίκης.

Το μοντέλο χρησιμοποιεί αλγόριθμους που επιλύουν την εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης χρήσει της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών [2,3]. Η γενική εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης τροποποιείται για να περιγράψει τις διαδικασίες που θα έχουν ουσιαστική συμβολή στη διαμόρφωση της συγκέντρωσης μέσα στα χρονικά πλαίσια μελέτης του φαινομένου και είναι η μεταφορά, η διάχυση και η εξάτμιση [1,5].

### ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΛΙΜΕΝΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

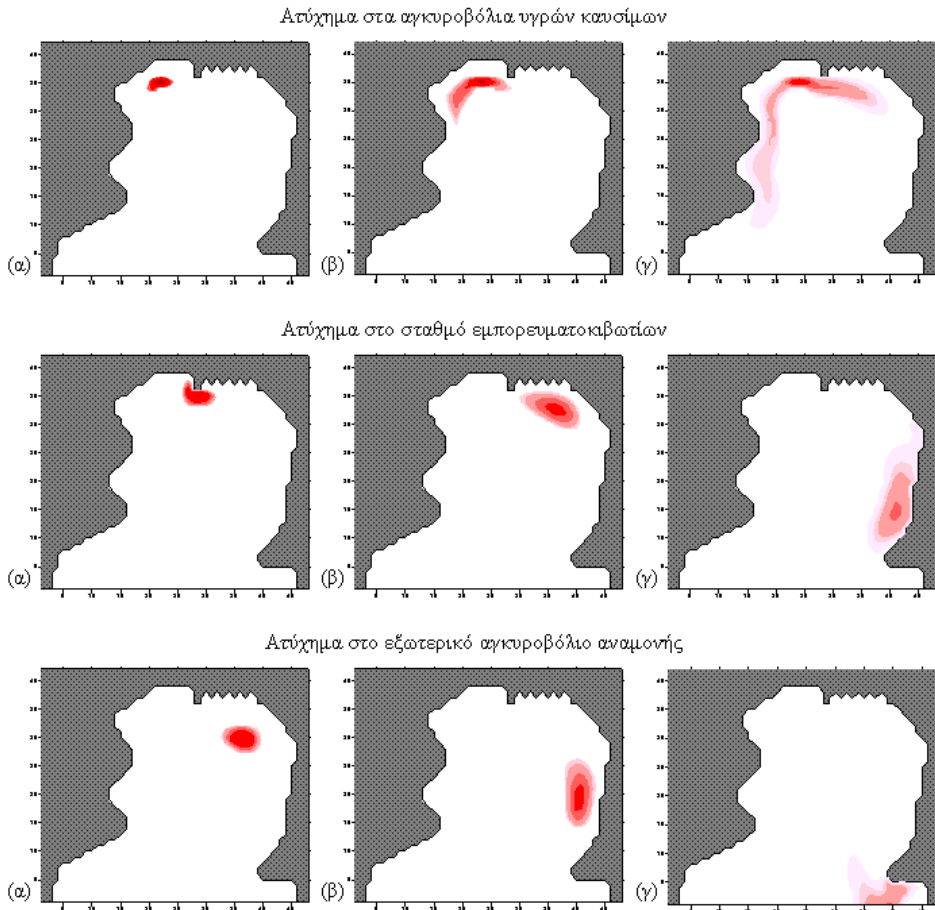
Οι άνεμοι (διευθύνσεις και ταχύτητες) που με-

λετήθηκαν, επιλέχθηκαν βάσει των στοιχείων για τη μέση ετήσια συχνότητα εμφάνισής τους από το μετεωρολογικό σταθμό Μεγάλου Εμβόλου. Οι θέσεις ατυχημάτων στα πεδία του Όρμου και του Λιμένα Θεσσαλονίκης οι οποίες μελετήθηκαν, επιλέχθηκαν βάσει της συχνότητας δημιουργίας πετρελαιοκηλίδων από διάφορες

$$\text{Εξίσωση Μεταφοράς - Διάχυσης: } \frac{\partial c}{\partial t} + U_s \frac{\partial c}{\partial x} + V_s \frac{\partial c}{\partial y} = D_h \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right) + D_h \left( \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) - S$$

$$\text{Επιφανειακές ταχύτητες: } u_s = \frac{3 \cdot U}{2} + \frac{1}{4} \alpha = \frac{3 \cdot U}{2} + \frac{1}{4} \cdot \frac{\zeta \cdot \tau_x}{\rho \cdot v_s}$$

$$v_s = \frac{3 \cdot V}{2} + \frac{1}{4} \alpha = \frac{3 \cdot V}{2} + \frac{1}{4} \cdot \frac{\zeta \cdot \tau_y}{\rho \cdot v_s}$$



Σχήμα 1: Εξέλιξη της πετρελαιοκηλίδας (α) 1 ώρα, (β) 3 ώρες και (γ) 6 ώρες μετά το ατύχημα για B-BΔ άνεμο ταχύτητας 15m/sec

δραστηριότητες (Πίνακας 1) η οποία καθορίζει και την επικινδυνότητα/επιδεκτικότητα σε ατύχημα κάθε θέσης.

Θεωρήθηκε σενάριο περιστατικού ρύπανσης που οδηγεί στη δημιουργία μικρής πετρελαιοκηλίδας (ποσότητα 7ton) με διάρκεια απορροής πετρελαίου 15min. Το χρονικό διάστημα μελέτης περιορίζεται σε λίγες ώρες από την εκδήλωση του ατυχήματος, θεωρώντας ότι μέσα σε αυτό θα ενεργοποιηθούν οι μηχανισμοί για την αντιμετώπισή του. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται

ενδεικτικά, τα αποτελέσματα του μοντέλου για 3 περιστατικά ρύπανσης.

## ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Από τη μελέτη των χαρτών κυκλοφορίας και διάδοσης των πετρελαιοκηλίδων οι οποίοι προκύπτουν από τα αποτελέσματα των μοντέλων, μπορούμε να εκτιμήσουμε την επίδραση των υδροδυναμικών συνθηκών στη διάδοση του πετρελαίου, καθώς και τον κίνδυνο που αντιμετωπίζουν οι εγκαταστάσεις του Λιμένα και οι

περιοχές πλησίον αυτού από τα συγκεκριμένα περιστατικά ρύπανσης.

Οι εφαρμογές που παρουσιάζονται έχουν σαν αποτέλεσμα μικρής έκτασης επιπτώσεις στις εγκαταστάσεις του Λιμένα Θεσσαλονίκης, αλλά σοβαρές συνέπειες για την ανατολική και δυτική ακτή του Όρμου της Θεσσαλονίκης αν οι κηλίδες δεν αντιμετωπιστούν έγκαιρα.

Οι προσομοιώσεις που έγιναν για θέσεις ατυχημάτων εντός των λιμενικών εγκαταστάσεων, κατέδειξαν -όπως αναμενόταν- σοβαρότατο κίνδυνο για τις εγκαταστάσεις και το προσωπικό, κυρίως λόγω της παγίδευσης του πετρελαίου μεταξύ των προβλητών. Τέτοια περιστατικά απαιτούν άμεση απόκριση εντός της πρώτης ώρας. Τα βασικότερα περιστατικά τα οποία επίσης κατέδειξαν πιθανή επίπτωση στις εγκαταστάσεις του Λιμένα, αφορούσαν ατυχήματα στα αγκυροβόλια υγρών καυσίμων σχεδόν για κάθε ανεμολογικό σενάριο. Κάθε άλλη εφαρμογή στο πεδίο του Όρμου, είχε σαν αποτέλεσμα μικρή ή καθόλου προσβολή της περιοχής του Λιμένα, αλλά σημαντικές επιπτώσεις στην ανατολική και τη δυτική παράκτια περιοχή. Ο κίνδυνος για όλες τις δραστηριότητες που αναπτύσσονται εκεί είναι προφανής και κρίνεται απαραίτητο να αποτραπεί η επέκταση της πετρελαιοκηλίδας εντός των τριών πρώτων ωρών από την δημιουργία της.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι πετρελαιοκηλίδες αποτελούν σοβαρότατη απειλή για το θαλάσσιο περιβάλλον και τις παράκτιες δραστηριότητες. Λόγω της συγκέντρωσης δραστηριοτήτων που σχετίζονται με χρήση και διακίνηση πετρελαίου στους λιμένες [10], η δυνατότητα πρόβλεψης της εξέλιξης ενός πιθανού ατυχήματος που θα οδηγήσει στη δημιουργία μιας πετρελαιοκηλίδας εντός ή πλησίον της περιοχής του λιμένα, αξιολογείται ως ένα πολύ σημαντικό βήμα στη διαδικασία αποτελεσματικής αντιμετώπισης του.

Βάσει της Διεθνούς Σύμβασης του 1990 «για την ετοιμότητα, συνεργασία και αντιμετώπιση

της ρύπανσης της θάλασσας από πετρέλαιο» (OPRC Convention) από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) [7], η αντιμετώπιση των περιστατικών πετρελαϊκής ρύπανσης, γίνεται βάσει των “Σχεδίων Έκτακτης Ανάγκης” [7,10,11] που είναι υποχρεωμένοι να έχουν διαμορφώσει οι οργανισμοί λιμένων, οι λιμενικές αρχές και οι διάφορες παράκτιες εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται πετρέλαιο.

Τα υπολογιστικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία, είναι δυνατόν: (α) να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη, με ικανοποιητική προσέγγιση, της χωροχρονικής διάδοσης μιας πετρελαιοκηλίδας στα πλαίσια κατάρτισης ενός “Σχεδίου Έκτακτης Ανάγκης”, (β) να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε θαλάσσιο πεδίο γνωστών χαρακτηριστικών, (γ) να περιγράψουν διαφορετικές περιπτώσεις ατυχημάτων με μεταβολή των χαρακτηριστικών του πεδίου και του περιστατικού ρύπανσης και (δ) να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη διάδοσης οποιασδήποτε άλλης ουσίας, καθώς τα μοντέλα κυκλοφορίας είναι ανεξάρτητα από το μοντέλο διάδοσης πετρελαϊκής ρύπανσης.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Κουτίτας Χ.Γ., 1998. Εισαγωγή Στην Παράκτια Τεχνική Και Τα Λιμενικά Έργα. Θεσσαλονίκη.
- Κουτίτας Χ.Γ., 1985. Μαθηματικά Ομοιώματα Στην Παράκτια Μηχανική. Θεσσαλονίκη.
- Κουτίτας Χ.Γ., 1998. Υπολογιστική Υδραυλική. Ξάνθη.
- Φυτιάνος Κ., 1996. Η Ρύπανση Των Θαλασσών. Θεσσαλονίκη.
- Koutitas C.G. and Gousidou Koutita M., 1986. A comparative study of three mathematical models for wind generated circulation in coastal areas. Coastal Engineering, 10, 127-138.
- Petihakis G.I. and Triantafyllou G.N. and Koutitas C.G., 2001. Prediction and prevention of oil contamination and monitoring of the benthic structure and related fisheries in con-

nection with the pollution impact. SAMS, Vol.41, 169-197.  
International Maritime Organization, www.imo.org  
International Tanker Owners Pollution Federation, www.itopf.com

Ministry Of Mercantile Marine, www.yen.gr  
Thessaloniki Port Authority S.A., www.olth.gr  
US Environmental Protection Agency, www.epa.gov