

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΑΝΑΔΥΟΜΕΝΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ

Παπαϊωάννου Βασίλειος<sup>(1)</sup>, Πρίνος Παναγιώτης<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Υποψήφιος διδάκτορας, Εργαστήριο Υδραυλικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124, Ελλάδα. E-mail: vaspapa@civil.auth.gr

<sup>(2)</sup>Καθηγητής, Εργαστήριο Υδραυλικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124, Ελλάδα. E-mail: prinosp@civil.auth.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο παρόν άρθρο διερευνώνται, μέσω ενός υπολογιστικού μοντέλου, τα οριζόντια ρεύματα συναγωγής (ΟΡΣ) σε ταμειυτήρα ορθογώνιας διατομής και οριζοντίου πυθμένα, παρουσία αναδύομενης βλάστησης. Τα ΟΡΣ δημιουργούνται λόγω διαφορετικής απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας από το νερό. Μελετούνται δύο διαφορετικά μοντέλα ηλιακής ακτινοβολίας, η επίδραση της οποίας, λαμβάνεται υπόψη μέσω ενός όρου πηγής στην εξίσωση της ενέργειας (θερμοκρασίας). Το πρώτο είναι ένα τριζωνικό μοντέλο ακτινοβολίας βασισμένο στο νόμο του Beer - Lambert για την εξασθένηση της ακτινοβολίας μέσα σε νερό και το δεύτερο είναι το διακριτό μοντέλο ακτινοβολίας (Discrete Model Radiation). Η επίδραση της βλάστησης λαμβάνεται υπόψη μέσω ενός επιπλέον όρου στις εξισώσεις ορμής. Μελετώνται τρεις περιπτώσεις με διαφορετικό πορώδες βλάστησης ( $\phi=0.97, 0.85, 0.75$ ). Από την ανάλυση εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα για τη θερμοκρασία και την ταχύτητα των ρευμάτων, τα οποία συγκρίνονται με αντίστοιχα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα. Ο αδιάστατος αριθμός Grasshof που χαρακτηρίζει τη ροή, είναι της τάξεως του  $10^6$  και ο αριθμός Prandtl ίσος με 6.96.

**Λέξεις Κλειδιά:** οριζόντια ρεύματα συναγωγής, ΟΡΣ, βλάστηση, ηλιακή ακτινοβολία, ταμειυτήρας, προσομοίωση, απορρόφηση.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η οριζόντια συναγωγή είναι αρκετά σημαντική σε διάφορα γεωφυσικά συστήματα. Τα ΟΡΣ έχουν μελετηθεί στο πεδίο σε λιμναία συστήματα από αρκετούς επιστήμονες λόγω της σπουδαιότητάς τους στη μεταφορά θρεπτικών ουσιών και άλλων χημικών συστατικών που καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό το οικοσύστημα της περιοχής. Σε λιμναία συστήματα το τμήμα της υδάτινης μάζας με την υδρόβια βλάστηση, κοντά στην όχθη, παρουσιάζει πολύ μικρή απορροφητικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας, σε σχέση με την καθαρή περιοχή του νερού [Lightbody et al., 2008; Zhang & Nepf, 2009] με αποτέλεσμα την εμφάνιση ΟΡΣ. Η μελέτη επιπλέον υδρόβιας βλάστησης στη δημιουργία ρευμάτων συναγωγής στο μισό του ταμειυτήρα σε χαμηλούς αριθμούς Rayleigh έδειξε ότι οι περιοχές γύρω από αυτή παρουσιάζουν χαμηλότερη θερμοκρασία, από ότι αυτή με το καθαρό νερό [Coates & Ferris, 1994]. Επίσης έχει χρησιμοποιηθεί αναδύομενη βλάστηση [Oldham & Sturman, 2001] και έχει γίνει χρήση του χαρακτηριστικού τύπου γρασιδιού των ελών (marshgrass) [Zhang & Nepf, 2009; Lin & Wu, 2014].

Στη παρούσα εργασία διερευνώνται μέσω ενός υπολογιστικού μοντέλου, ρεύματα οριζόντιας συναγωγής, σε υγροτόπους με βλάστηση. Τα ΟΡΣ δημιουργούνται σε μία δεξαμενή με νερό που χωρίζεται σε δύο ίσες περιοχές (μία με βλάστηση και μία χωρίς). Η επιφάνεια της περιοχής χωρίς

βλάστηση θερμαίνεται με σταθερό ρυθμό. Η βλάστηση αναπαρίσταται με άκαμπτους κυλίνδρους, σταθερής διαμέτρου  $d=0.006\text{m}$ . Μελετώνται τρεις περιπτώσεις με διαφορετικό πορώδες βλάστησης  $\phi=0.97, 0.85, 0.75$ . Η γεωμετρία του μοντέλου καθώς και οι οριακές συνθήκες βασίζονται στο πειραματικό μοντέλο των Zhang και Nepf [2009] για να είναι δυνατή, η απαραίτητη σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων με τα πειραματικά. Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, και γενικότερα της παροχής θερμότητας από το εξωτερικό περιβάλλον στον υδάτινο όγκο, λαμβάνεται υπόψη μέσω ενός όρου πηγής στην εξίσωση της ενέργειας (θερμοκρασίας). Ο αριθμητικός υπολογισμός της εξασθένησης της ακτινοβολίας στο νερό εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο μοντέλο, όπως το τριζωνικό μοντέλο ακτινοβολίας [Hattori et al., 2014] και το διακριτό μοντέλο ακτινοβολίας [Coelho & Carvalho, 1997].

Για την υπολογιστική προσομοίωση επιλύονται οι εξισώσεις Navier-Stokes σε συνδυασμό με την εξίσωση ενέργειας (θερμοκρασίας). Η επίδραση της βλάστησης λαμβάνεται υπόψη μέσω ενός επιπλέον όρου στις εξισώσεις ορμής και η απορρόφηση της εισερχόμενης ακτινοβολίας, μέσω επιπλέον όρου στην εξίσωση ενέργειας. Αυτοί οι όροι συμπεριλαμβάνονται στο υπολογιστικό μοντέλο μέσω των User Define Functions (UDF). Ο όρος αντίστασης βασίζεται στη θεωρία για τη ροή μέσα σε πορώδη μέσα. Για τον υπολογισμό της διαφοράς πυκνότητας λόγω διαφοράς της θερμοκρασίας χρησιμοποιείται η προσέγγιση Boussinesq. Η προσομοίωση γίνεται με τη χρήση του εμπορικού λογισμικού Fluent 15.0.7 της ANSYS. Από τη μελέτη εξάγονται αποτελέσματα και συμπεράσματα για την ταχύτητα, τη θερμοκρασία του νερού και τη χρήση πορώδους μέσου σε ροές με βλάστηση. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με διαθέσιμα πειραματικά των Zhang και Nepf [2009].

## 2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

### 2.1 Βασικές εξισώσεις

Οι διδιάστατες εξισώσεις Navier-Stokes (1) και (2) επιλύονται μια μη μόνιμη και ασυμπιεστή ροή σε συνδυασμό με την εξίσωση ενέργειας (3). Για τον υπολογισμό της διαφοράς πυκνότητας, λόγω διαφοράς θερμοκρασίας χρησιμοποιείται η προσέγγιση Boussinesq. προσέγγιση αυτή χρησιμοποιεί μία σταθερή τιμή για την πυκνότητα σε όλες τις εξισώσεις, εκτός από τον όρο άνωσης στην εξίσωση της ορμής.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \langle U_i \rangle)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \langle U_i \rangle) + \langle U_j \rangle \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \langle U_i \rangle) = -\frac{\partial \langle P \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial x_i} \right) \right] + \rho \beta (\langle T \rangle - \langle T_o \rangle) \langle g_i \rangle + F \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p \langle T \rangle) + \langle U_j \rangle \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho C_p \langle T \rangle) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \kappa \left( \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_j} \right) \right] + S_h \quad (3)$$

όπου,  $\rho$  είναι η πυκνότητα του ρευστού,  $U_i$  είναι η ταχύτητα στη διεύθυνση  $i$ ,  $P$  είναι η πραγματική πίεση,  $\mu$  το δυναμικό ιξώδες του ρευστού και  $\beta = 0.00021 \text{ K}^{-1}$  είναι ο συντελεστής θερμικής διαστολής,  $T$  είναι η θερμοκρασία του ρευστού,  $T_o = 294.55 \text{ K}$  είναι η αρχική θερμοκρασία,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $C_p = 4182 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$  είναι η ειδική θερμότητα του ρευστού,  $\kappa = 0.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  είναι η θερμική αγωγιμότητα,  $F$  είναι ο όρος πηγής λόγω βλάστησης και τέλος  $S_h$  ο όρος πηγής λόγω ηλιακής ακτινοβολίας. Ο όρος πηγής  $F$  δίνεται από τη εξίσωση (4) και είναι ίσος με μηδέν στη περιοχή χωρίς βλάστηση.

$$F = -\varphi \frac{\nu}{k} \rho \langle U_i \rangle - \varphi^2 \frac{C_f}{\sqrt{k}} \rho \langle U_i \rangle |\langle U_i \rangle| \quad (4)$$

όπου,  $\varphi$  είναι το πορώδες της βλάστησης,  $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$  είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού,  $k$  είναι η διαπερατότητα ( $\text{m}^2$ ) και  $C_f$  είναι ένας αδιάστατος εμπειρικός συντελεστής. Η διαπερατότητα  $k$  και ο αδιάστατος συντελεστής  $C_f$  δίνονται από τις εξισώσεις (5) και (6) αντίστοιχα [Johnson et al, 2005].

$$k = \frac{d_{50}^2 \varphi^3}{\alpha(1-\varphi)^2} \quad (5)$$

$$C_f = b \frac{1-\varphi}{\varphi} \frac{\sqrt{k}}{d_{50}} \quad (6)$$

όπου,  $d_{50}$  είναι το μέσο μέγεθος του πορώδους υλικού και  $\alpha$  και  $b$  είναι εμπειρικοί συντελεστές. Όταν το πορώδες μέσο αποτελείται από κυλίνδρους τότε το  $d_{50}$  είναι ίσο με  $1.5d$  [Lowe et al., 2008]. Στο παρόν άρθρο οι εμπειρικοί συντελεστές  $\alpha$  και  $b$  προκύπτουν από την εργασία του van Gent [1995], όπου λαμβάνουν τις τιμές  $\alpha=1000$  και  $b=1.1$ . Οι τιμές των διαφόρων συντελεστών παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα 1.

Περίπτωση	$\varphi$	$k (\text{m}^2) \times 10^{-6}$	$\alpha$	$b$	$C_f$
1	0.97	73.13	1000	1.1	0.0323
2	0.85	5.04	1000	1.1	0.0484
3	0.75	1.56	1000	1.1	0.0510

**Πίνακας 1.** Χαρακτηριστικές τιμές παραμέτρων

## 2.2 Το μοντέλο ηλιακής ακτινοβολίας

Ο όρος πηγής  $S_h$  είναι μία εσωτερική πηγή θερμότητας, η οποία προσομοιώνει την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από το νερό και προστίθεται στην εξίσωση ενέργειας (3) μόνο στην ανοιχτή περιοχή του νερού, που είναι η περιοχή χωρίς βλάστηση. Θεωρούμε ότι ο όρος αυτός είναι μηδέν στη σκιασμένη από βλάστηση περιοχή, όπου δεν έχουμε διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας. Μελετώνται δύο διαφορετικά μοντέλα ακτινοβολίας, ένα βασισμένο στο νόμο απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας του Beer και το δεύτερο βασισμένο στην εξίσωση διάδοσης της ακτινοβολίας (Radiative Transfer Equation-RTE).

Σύμφωνα με το νόμο του Beer, η ένταση της ακτινοβολίας μειώνεται καθώς αυξάνεται το βάθος του νερού και ο όρος πηγής  $S_h$  παίρνει τη μορφή της εξίσωσης (7):

$$S_h = \frac{1}{\rho \cdot C_p} \sum_{i=1}^N n_i I_i e^{-n_i(h-y)} \quad (7)$$

όπου,  $N$  είναι ο αριθμός από τις μπάντες,  $I_i$  είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία κάθε μπάντας,  $n_i$  ο συντελεστής εξασθένισης κάθε μπάντας,  $h$  το συνολικό βάθος του νερού και  $y$  είναι η απόσταση από το πυθμένα του ταμιευτήρα.

Σύμφωνα με την εξίσωση διάδοσης της ακτινοβολίας σε ένα μέσο ο όρος πηγής  $S_h$  παίρνει τη μορφή της εξίσωσης (8).

$$S_h = -\nabla \cdot q_r = -a_\lambda \left( 4\pi I_{b\lambda} - \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, s) d\Omega \right) \frac{1}{\rho_o C_p} \quad (8)$$

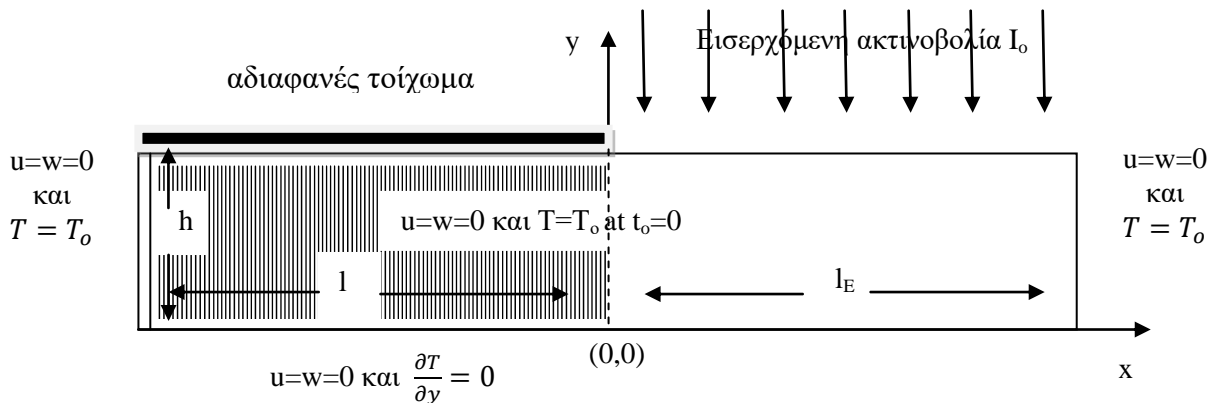
όπου,  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος,  $a_\lambda$  είναι ο φασματικός συντελεστής απορρόφησης,  $I_{b\lambda}$  είναι η ακτινοβολία του μέλανος σώματος βάσει Planck και  $I_\lambda$  είναι η ακτινοβολία στη θέση  $r$  κατά τη διεύθυνση  $s$ . Οι εξισώσεις (7) και (8) αναλύονται διεξοδικά στην εργασία των Παραϊοαννου και Prinos [2018].

### 2.3 Διαδικασία επίλυσης

Για την υπολογιστική προσομοίωση των ΟΡΣ χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό λογισμικό υπολογιστικής δυναμικής ρευστών Fluent 15.0.7 της εταιρίας ANSYS, το οποίο επιλύει τις εξισώσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Το υπολογιστικό πεδίο διαιρείται σε μεγάλο πλήθος κελιών (60,000 κελιά) και κάθε χρονική στιγμή  $t$  υπολογίζονται τα βασικά μεγέθη της ροής, όπως ταχύτητα, πίεση και θερμοκρασία. Το κάθε κελί έχει διάσταση 1mm x 1mm και το χρονικό βήμα επίλυσης των εξισώσεων είναι 0.5 sec. Η τεχνική των User Defined Functions (UDF) χρησιμοποιήθηκε, ώστε να εισαχθούν στις εξισώσεις (2) και (3) οι όροι πηγής. Επιλέχθηκε το μοντέλο της στρωτής ροής με αριθμό Reynolds ίσο με 100 και αδιαβατικά και μη ολισθηρά τοιχώματα για τη δεξαμενή.

### 2.4 Περιπτώσεις μελέτης

Η γεωμετρία του μοντέλου βασίζεται στο πειραματικό πρότυπο των Zhang και Nurf [2009], με σκοπό τη σύγκριση των υπολογιστικών προσομοιώσεων με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα. Μελετήθηκε ένα μοντέλο με οριζόντιο πυθμένα, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.



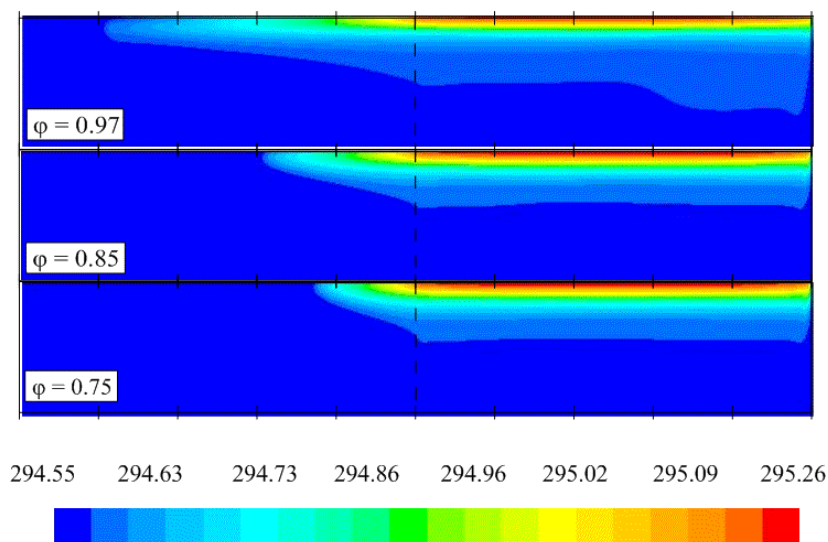
**Εικόνα 1.** Γεωμετρία μοντέλου

Το μοντέλο αποτελείται από μία δεξαμενή με συνολικό μήκος 0.6m και ύψος  $h=0.1m$  και χωρίζεται σε δύο ίσα τμήματα, το αριστερό τμήμα με βλάστηση και το δεξί ανοιχτό και με απουσία βλάστησης. Στη δεξαμενή υπάρχει νερό πυκνότητας  $\rho=998.2 \text{ kg/m}^3$  και αρχικής θερμοκρασία  $T_o=294.55K$ . Τη χρονική στιγμή  $t_o=0$  επιβάλλεται στο ανοιχτό κομμάτι πηγή συνολικής εσωτερικής θερμότητας  $I_o=157W/m^2$ . Τόσο ο συντελεστής απορρόφησης  $n_i$ , όσο και η εισερχόμενη ακτινοβολία  $I_i$  αναλύονται σε τρεις ζώνες ανάλογα με το μήκος κύματος της εισερχόμενης ακτινοβολίας, όπως αναλύεται διεξοδικά στους Παραϊοαννου και Prinos [2018]. Η ένταση της εισερχόμενης ακτινοβολίας παραμένει σταθερή καθόλη τη διάρκεια της υπολογιστικής προσομοίωσης. Η αναδυόμενη βλάστηση προσομοιώνεται με τον όρο πηγής  $F$  (εξίσωση (4)) και θεωρείται ως ένα σύνολο από άκαμπτους κατακόρυφους κυλίνδρους διαμέτρου  $d=0.006m$ . Μελετήθηκαν τρεις περιπτώσεις με διαφορετικό πορώδες βλάστησης  $\phi=0.97, 0.85, 0.75$  με σκοπό την επίδραση της βλάστησης στα ΟΡΣ.

Ο αδιάστατος αριθμός Grashof  $\left( Gr = \frac{g\beta I_0 h^4}{\rho_0 C_p v^3} \right)$  καθορίζει τη φύση των ΟΡΣ σε στρωτή ή τυρβώδη, η χαρακτηριστική χρονική κλίμακα  $t_c \left( t_c \propto \left( \frac{\kappa h^4}{\rho_0 C_p Gr v^3} \right)^{1/2} \right)$  καθορίζει τη μετάβαση της ροής σε αδρανειακή κατάσταση (inertial regime), η χρονική κλίμακα  $t_E \left( t_E \sim \left( \frac{h^4 L_2^2}{Gr v^3} \right)^{1/3} \right)$  καθορίζει την έναρξη της περιορισμένης ενέργειας (energy-limited regime) όπως επίσης η  $u_E \left( u_E \propto \left( \frac{Gr v^3 L_2}{h^4} \right)^{1/3} \right)$  την αντίστοιχη ταχύτητα σε αυτή τη χρονική κλίμακα (energy-limited velocity). Παρουσία πορώδους βλάστησης η αντίσταση λόγω βλάστησης κυριαρχεί έναντι της αδρανειακής συμπεριφοράς και η χαρακτηριστική χρονική κλίμακα είναι η  $t_V \left( t_V \propto \left( \frac{\phi v}{k} \right)^{-1} \right)$ , με σταθερή ταχύτητα  $u_V \left( u_V \propto \left( \frac{g\beta I_0 k}{\rho_0 C_p \phi v} \right)^{1/2} \right)$ . Η χρονική κλίμακα  $t_V$  είναι μικρότερη της  $t_E$ . Η αδιαστοποίηση της θερμοκρασίας γίνεται μέσω του τύπου  $\Delta T_E = \frac{v^2 (Gr A_E)^{2/3}}{g\beta h^3}$ .

### 3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

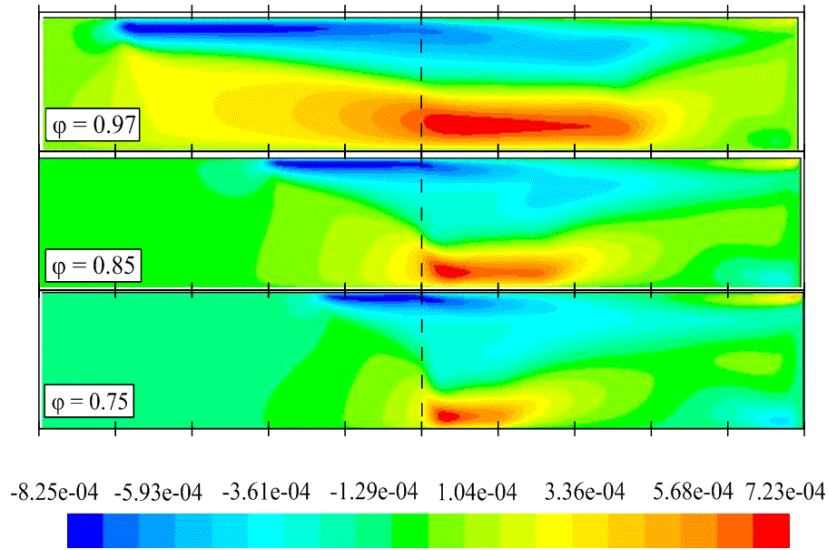
Στη παρούσα εργασία δημιουργήθηκαν ΟΡΣ λόγω διαφορετικής απορρόφησης της ακτινοβολίας από το νερό δύο περιοχών μίας δεξαμενής. Η διαφορά θερμοκρασίας δημιουργείται από τη θέρμανση της ανοιχτής περιοχής με σταθερή ροή θερμότητας. Στην εικόνα 2 φαίνονται οι ισοϋψείς της θερμοκρασίας του νερού σε όλο το πεδίο, για όλες τις περιπτώσεις τη χρονική στιγμή  $t=450\text{sec}$ .



**Εικόνα 2.** Ισοϋψείς της θερμοκρασίας τη χρονική στιγμή  $t=450\text{sec}$  με το μοντέλο ακτινοβολίας Beer.

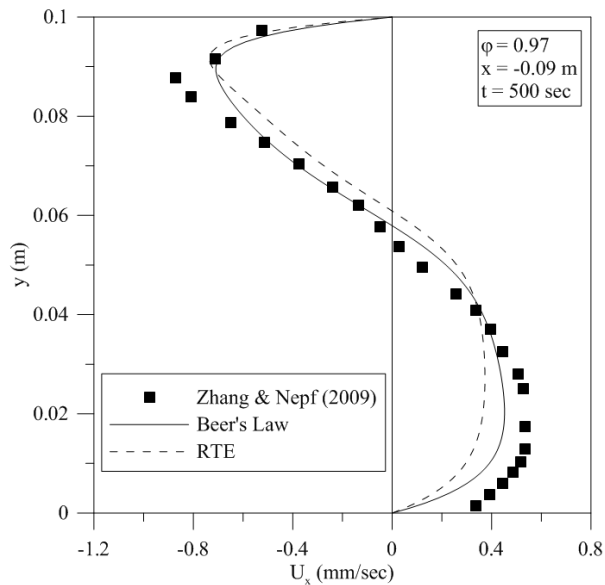
Καθώς το νερό στην ανοιχτή περιοχή θερμαίνεται, δημιουργείται ένα θερμό ρεύμα (ΟΡΣ) που κινείται προς τη περιοχή της βλάστησης. Αντίθετα στον πυθμένα το κρύο ρεύμα κινείται απομακρυνόμενο από τη περιοχή της βλάστησης όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 3. Η ταχύτητα των ρευμάτων

μειώνεται με τη μείωση του πορώδους βλάστησης, όπως επίσης τα ρεύματα έχουν διανύσει μεγαλύτερη απόσταση στην περίπτωση  $\phi=0.97$ , από ότι σε αυτή με  $\phi=0.75$ .



**Εικόνα 3.** Ισοϋψείς της οριζόντιας ταχύτητας  $u_x$  τη χρονική στιγμή  $t=450\text{sec}$  με το μοντέλο ακτινοβολίας Beer.

Το προφίλ της οριζόντιας ταχύτητας, όπως φαίνεται στην εικόνα 4 για  $\phi=0.97$  είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα των Zhang και Nepf [2009].

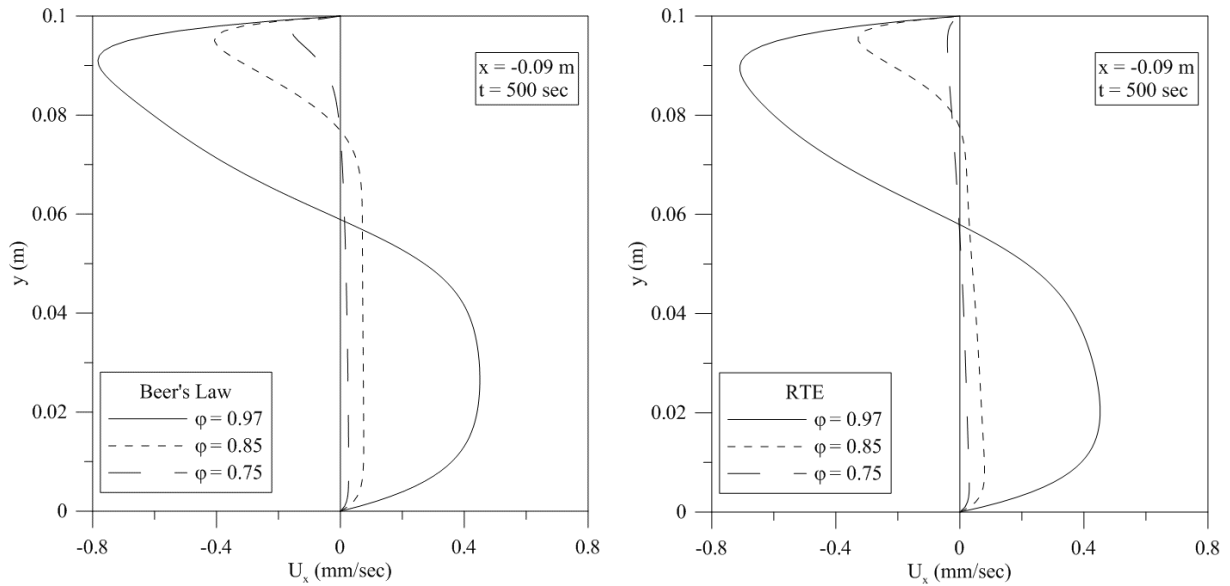


**Εικόνα 4.** Πειραματικό και υπολογιστικό προφίλ οριζόντιας ταχύτητας.

Η επίδραση του πορώδους βλάστησης  $\phi$  φαίνεται στη παρακάτω εικόνα 5. Το ύψος του οριζόντιου ρεύματος μειώνεται καθώς μειώνεται το πορώδες της βλάστησης, λόγω της αύξησης της δύναμης αντίστασης. Τα δύο μοντέλα ακτινοβολία παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά με το διακριτό μοντέλο ακτινοβολίας RTE να δίνει γενικά μικρότερες ταχύτητες.

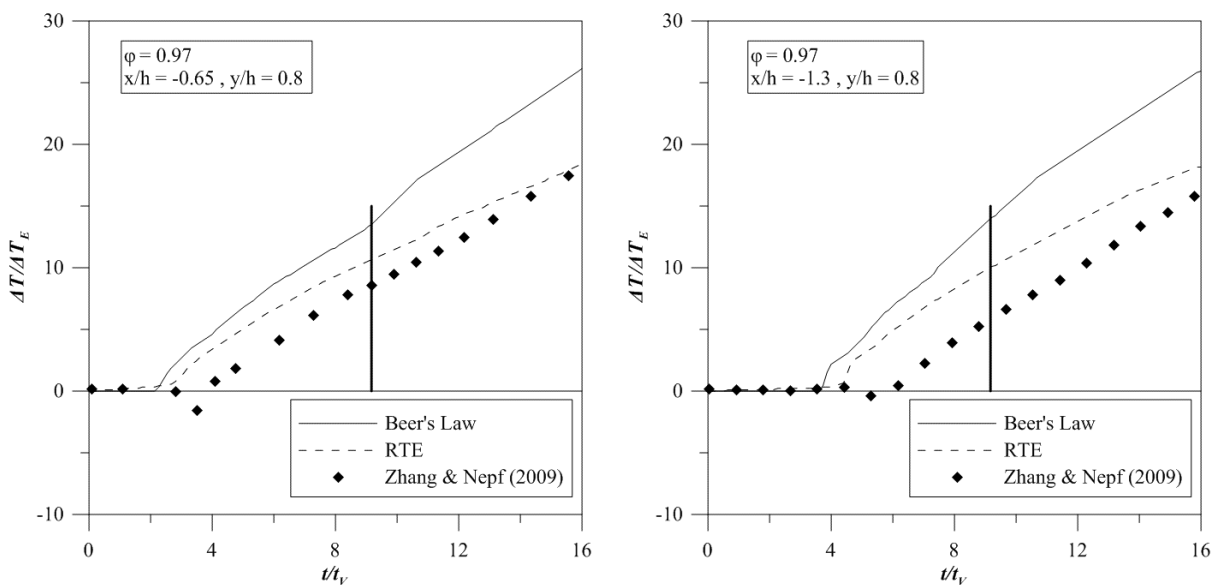
α)

β)



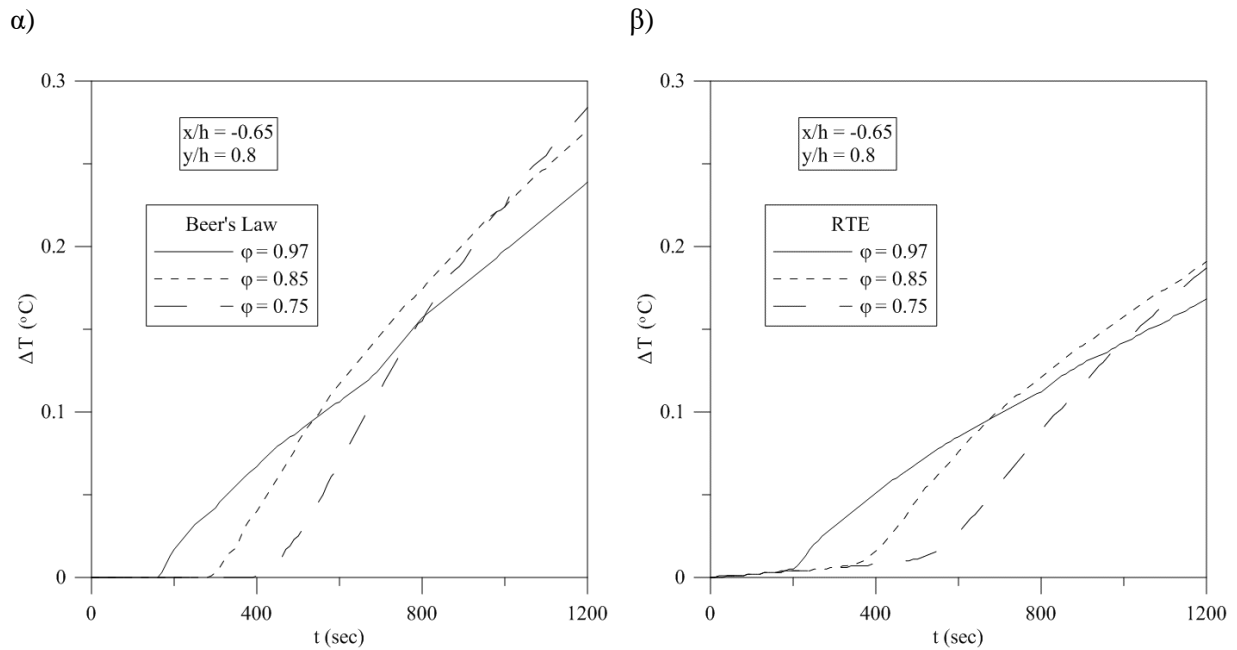
**Εικόνα 5.** Επίδραση της βλάστησης στη οριζόντια ταχύτητα τη χρονική στιγμή  $t=500\text{sec}$  για α) Beer's Law και β) RTE.

Η εικόνα 6 παρουσιάζει τη μεταβολή της θερμοκρασίας  $\Delta T (= T - T_0)$ , σε δύο διαφορετικές θέσεις μέσα στη περιοχή της βλάστησης για την περίπτωση  $\phi=0.97$  σε αδιαστατοποιημένη μορφή. Η μεταβολή της θερμοκρασίας και ο χρόνος έχουν αδιαστατοποιηθεί με τα  $\Delta T_E$  και  $t_v$  αντίστοιχα. Η διαφορά θερμοκρασίας αρχικά είναι ίση με μηδέν (0) και αρχίζει να αυξάνεται μόλις το θερμό ρεύμα φτάσει τη συγκεκριμένη θέση. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα, είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, όσον αφορά τα δύο διαφορετικά μοντέλα της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν αύξηση της θερμοκρασίας περίπου 100sec αργότερα σε σχέση με τα αντίστοιχα υπολογιστικά. Η διαφορά μεταξύ αυτών μπορεί να οφείλεται στη δυσκολία ανάκτησης των πειραματικών αποτελεσμάτων, καθώς επίσης και στην απώλεια θερμότητας στην επιφάνεια της δεξαμενής (αρνητική διαφορά θερμοκρασίας στα 250 sec). Όμως το ποσοστό αύξησης της θερμοκρασίας είναι σύμφωνο με αυτό των πειραματικών αποτελεσμάτων.



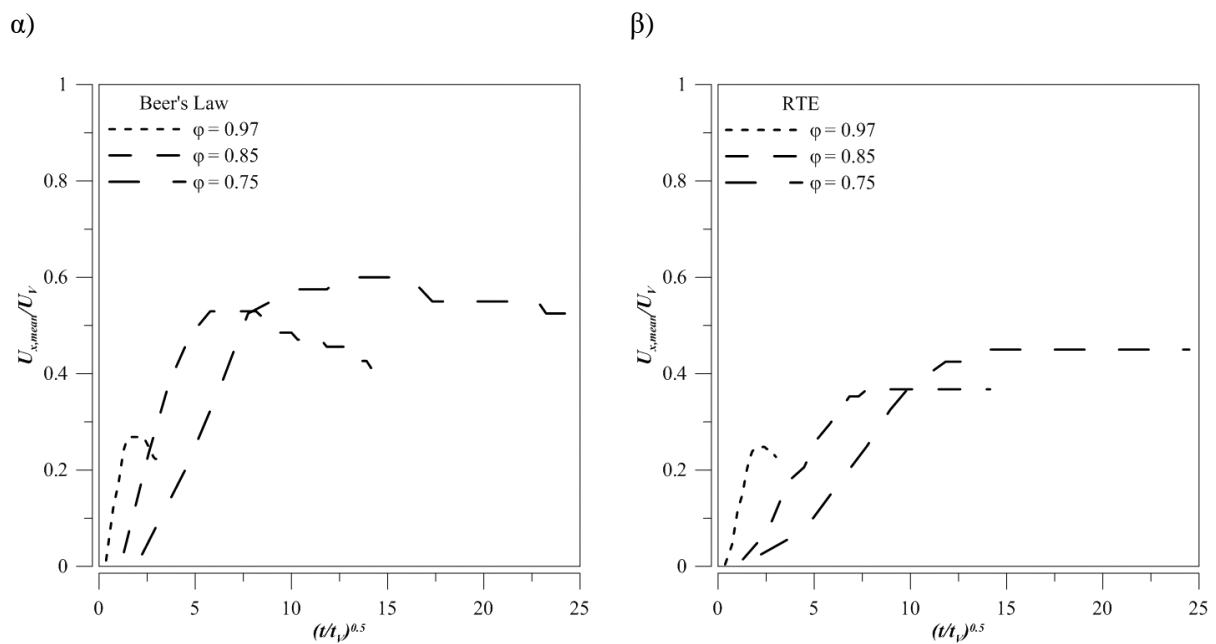
**Εικόνα 6.** Επίδραση της βλάστησης στη μεταβολή της θερμοκρασίας σε δύο διαφορετικά σημεία εντός ζώνης βλάστησης για τη περίπτωση  $\phi=0.97$ . Η κατακόρυφη μαύρη γραμμή αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή που το ρεύμα χτυπά το αριστερό τοίχωμα.

Η εικόνα 7 δείχνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας  $\Delta T (= T - T_0)$  σε μία συγκεκριμένη θέση μέσα στη περιοχή με βλάστηση για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις βλάστησης  $\phi=0.97, 0.85$  και  $0.75$ . Έχουμε αύξηση της  $\Delta T$  καθώς μειώνεται το πορώδες.



**Εικόνα 7.** Επίδραση της βλάστησης στη μεταβολή της θερμοκρασίας σε ένα συγκεκριμένο σημείο εντός ζώνης βλάστησης και για τις τρεις περιπτώσεις.

Για τον υπολογισμό του χρόνου στον οποίο η ροή είναι αδρανειακή, καθώς και τη μετάβαση στο χρόνο όπου επικρατεί η αντίσταση λόγω βλάστησης, παρουσιάζουμε στην εικόνα 8 τη μέση οριζόντια ταχύτητα σε σχέση με τη τετραγωνική ρίζα του χρόνου ( $t^{1/2}$ ). Τα δύο αυτά μεγέθη έχουν αδιαστατοποιηθεί.





**Εικόνα 8.** Μεταβολή της αδιαστατοποιημένης μέσης οριζόντιας ταχύτητας στο όριο της ελεύθερης περιοχής και αυτής με βλάστηση ( $x=0.0$ ) για όλες τις περιπτώσεις με βλάστηση για τα δύο διαφορετικά μοντέλα ακτινοβολίας.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκαν υπολογιστικά οριζόντια ρεύματα συναγωγής παρουσία αναδυόμενης βλάστησης. Μελετήθηκαν τόσο η επίδραση της βλάστησης, όσο και διαφορετικά μοντέλα ηλιακής ακτινοβολίας. Αποδείχθηκε ότι η ροή μέσα σε βλάστηση μπορεί να προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις από τη θεωρία της ροής μέσα σε πορώδες μέσο. Συνοψίζοντας τα συμπεράσματά μας αναφέρουμε τα εξής:

- Η ταχύτητα τόσο του θερμού όσο και του ψυχρού ρεύματος μειώνεται καθώς μειώνεται το πορώδες της βλάστησης.
- Τα δύο μοντέλα της ηλιακής ακτινοβολίας αναπαράγουν αποτελεσματικά τα πειραματικά δεδομένα. Το μοντέλο της ακτινοβολίας που βασίζεται στην εξίσωση RTE παρουσιάζει χαμηλότερη αύξηση θερμοκρασίας και χαμηλότερη μέγιστη και μέση ταχύτητα. Αυτό οφείλεται στον όρο εκπομπής της εξίσωσης RTE.
- Το μοντέλο ακτινοβολίας RTE προσομοιώνει καλύτερα τις συνθήκες πεδίου, αφού η εξίσωση που το περιγράφει ενσωματώνει όλες τις διαδικασίες της ακτινοβολίας που είναι η απορρόφηση, η εκπομπή και η σκέδαση. Αρνητικός παράγοντας του μοντέλου αυτού είναι ότι απαιτεί υψηλή υπολογιστική ισχύ.
- Αρχικά τα ΟΡΣ παρουσιάζουν αδρανειακή συμπεριφορά και η ταχύτητά τους αυξάνεται γραμμικά με τη τετραγωνική ρίζα του χρόνου. Στη συνέχεια στα ΟΡΣ επικρατεί η αντίσταση λόγω βλάστησης και η ταχύτητά τους παραμένει σταθερή με το χρόνο.

#### 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Coates, M., and Ferris, J., The radiatively driven natural convection beneath a floating plant layer, *Limnol. Oceanogr.*, vol. 39(5), pp. 1186–1194, 1994.
- Coelho, P. J., and Carvalho, M. G., A Conservative Formulation of the Discrete Transfer Method, *Journal of Heat Transfer*, vol. 119, pp 118-128, 1997.
- Hattori, T., Patterson, J. C., Lei C., Study of unsteady natural convection induced by absorption of radiation based on a three-waveband attenuation model, *Journal of Physics: Conference Series 530 012036*, doi:10.1088/1742-6596/530/1/012036, 2014.
- Lightbody, A., Avenier, M., and Nepf, H. M., Observations of short-circuiting flow paths within a constructed treatment wetland in Augusta, Georgia, USA, *Limnol. Oceanogr.*, vol. 53(3), pp. 1040–1053, 2008.
- Lin, Y.T., and Wu, H. C., The role of rooted emergent vegetation on periodically thermal-driven flow over a sloping bottom, *Environ. Fluid Mech.*, vol. 14, pp. 1303-1334, 2014.
- Oldham, C. E., and Sturman, J. J., The effect of emergent vegetation on convective flushing in shallow wetlands: scaling and experiment, *Limnol. Oceanogr.* 46(6), 1486–1493, 2001.
- Zhang, X., and Nepf, H. M., Thermally driven exchange flow between open water and aquatic canopy, *J. Fluid Mech.*, vol. 632, pp. 227-243, 2009.
- Johnson, H. K., Karambas, T. V., Avgeris, I., Zanuttigh, B., Gonzalez-Marco, D., and Caceres, I., Modelling of waves and currents around submerged breakwaters, *Coast. Eng.*, vol. 52, pp. 949-969, 2005.
- Lowe, R. J., Shavit, U., Falter, J. L., Koseff, J. R., and Monismith, G., Modeling flow in coral communities with and without waves: A synthesis of porous media and canopy flow approaches, *Limnol. Oceanogr.*, vol. 53(6), pp. 2668-2680, 2008.
- van Gent M. R. A., Wave interaction with permeable coastal structures. *PhD Thesis, Delft University, Delft, The Netherlands*, 1995.

Papayioannou V., and Prinos P., HORIZONTAL CONVECTION INDUCED BY ABSORPTION OF SOLAR RADIATION, conference: Protection and Restoration of the Environment XIV, ISBN number (978-960-99922-4-4), Thessaloniki, Greece, 2018.