

Διαχείριση Νερού και Αζώτου στους Ορυζώνες των Αρδευτικών Δικτύων του Αξιού

B. Αντωνόπουλος, A. Παυλάτου-Βε

*Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής,
Γεωπονική Σχολή, ΑΠΘ, 54124 Θεσσαλονίκη*

Περίληψη

Η καλλιέργεια του ρυζιού είναι η πιο υδροβόρα και απαιτεί σημαντικές ποσότητες αζώτου και φυτοφαρμάκων. Η διαχείριση του νερού και του αζώτου στους ορυζώνες χρειάζεται πληροφορίες για τις ανάγκες της καλλιέργειας, του φυσικού συστήματος και τις πρακτικές εφαρμογές τους. Για τη διερεύνηση των συνθηκών άρδευσης και αζωτούχου λίπανσης των ορυζώνων αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο διαχείρισης νερού και αζώτου σε ορυζώνα με σκοπό την εξοικονόμηση νερού και την προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος. Τα δεδομένα από δύο ορυζώνες για το έτος 2005 χρησιμοποιήθηκαν για την ρύθμιση και την επιβεβαίωση του μαθηματικού μοντέλου. Τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά και δείχνουν ότι μπορεί να εφαρμοστούν διαδικασίες εξοικονόμησης νερού και μείωσης των απωλειών αζώτου με την επιφανειακή απορροή και τη βαθειά διήθηση.

Water and Nitrogen Management in the Rice Fields of Axios River Irrigation Networks

V. Antonopoulos, A. Paulatou-Ve

*Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering,
School of Agricultural, A.U.Th., 54124 Thessaloniki*

Abstract

Rice is the most consuming crop of water resources. It also requires significant amounts of nitrogen and pesticides. The water and nitrogen management in rice fields needs information about crop requirements and practicing of application. To derive the conditions of rice irrigation and nitrogen fertilization, a mathematical model of water and nitrogen management is developed with the purpose to water saving and to protect the water environment. Data from two rice fields collected during the year of 2005 were used for model calibration and verification. The simulation results were very satisfactory and show that the model can be used to design practices for water saving and decrease the nitrogen losses with the surface runoff and the deep percolation of water.

1. Εισαγωγή

Το ρύζι είναι μία από τις σημαντικότερες καλλιέργειες στον κόσμο. Η παγκόσμια καλλιεργούμενη έκταση είναι 150.7 εκατομμύρια εκτάρια, από τα οποία περισσότερα από το 90% βρίσκονται στην Ασία. Στις Μεσογειακές χώρες της Ευρώπης –Ελλάδα, Ιταλία, Ισπανία, Γαλλία και Πορτογαλία– καλλιεργείται σε έκταση που φτάνει τα 400 χιλιάδες εκτάρια (MED-Rice, 2003).

Η καλλιέργεια του ρυζιού στην Ελλάδα γίνεται βασικά στους νομούς Θεσσαλονίκης (56%) και Σερρών (36%), ενώ το υπόλοιπο 8% καλλιεργείται στους Νομούς Φθιώτιδας, Αιτωλοακαρνανίας, Μεσσηνίας, Πέλλας και Ξάνθης. Στην πεδιάδα της Θεσσαλονίκης η καλλιέργεια του ρυζιού είναι μία από τις κύριες καλλιέργειες (καταλαμβάνει περίπου το 15 έως 24% της αρδευόμενης έκτασης). Η άρδευση της πεδιάδας γίνεται από τα αρδευτικά δίκτυα του Αξιού και του Αλιάκμονα. Στις καλλιεργητικές φροντίδες του, συμπεριλαμβάνονται αρδεύσεις με την μορφή κατάκλυσης των λεκανών, αζωτούχος λίπανση από 20 έως 30 kg/στρέμμα και φυτοπροστασία.

Οι περισσότεροι ορυζώνες είναι υπό συνεχή κατάκλυση καθόλη τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου με ένα ύψος νερού 5-10 cm (Bouman and Tuong, 2001). Στην Ασία χρησιμοποιούνται περίπου 1400 mm νερού για την άρδευση της καλλιέργειας του ρυζιού (Jeon et al., 2005). Εντούτοις οι εισροές νερού κατά την βλαστική περίοδο μπορεί να κυμαίνονται από 500 μέχρι 800 mm έως και περισσότερα από 3000 mm. Η διαχείριση του νερού στους ορυζώνες υπό το πρίσμα της διαθεσιμότητας των υδατικών πόρων και της οδήγίας 2000/60 της ΕΕ, αποτελεί μία από τις προτεραιότητες στις περιοχές όπου καλλιεργείται ρύζι.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετά μαθηματικά μοντέλα για την μελέτη του ισοζυγίου του νερού και αζώτου σε ορυζώνες. Από αυτά άλλα περιγράφουν μόνο το ισοζύγιο νερού, άλλα την δυναμική νερού και αζώτου στην λεκάνη κατάκλυσης και άλλα τόσο στο νερό κατάκλυσης όσο και στο έδαφος (Bouman et al., 1994, Inao and Kitamura, 1999, Singh et al., 2001, Chung et al., 2003, Chowdary et al., 2004, Watanabe and Takagi, 2005, Antonopoulos, 2007, Αντωνόπουλος κ.α., 2007).

Στην εργασία αναπτύσσεται ένα μαθηματικό μοντέλο με βάση τις απλοποιημένες εξισώσεις ισοζυγίου του νερού και του αζώτου στο επίπεδο του ορυζώνα. Παρουσιάζονται και συζητούνται αποτελέσματα από μετρήσεις και προσομοιώσεις σε δύο ορυζώνες των αρδευτικών δικτύων του Αξιού ποταμού.

2. Υλικά και μέθοδοι

2.1. Ισοζύγιο νερού και αζώτου

Το υδατικό ισοζύγιο σε κατακλυζόμενους αγρούς για την καλλιέργεια του ρυζιού

εκφράζεται από μια γενική σχέση, η οποία εξισώνει τις συνολικές εισροές στη λεκάνη με τις συνολικές εκροές και τη μεταβολή στον αποθηκευμένο όγκο νερού της λεκάνης για μία χρονική περίοδο (συνήθως το χρονικό βήμα είναι μίας ημέρας). Επειδή κατά τη διάρκεια της περιόδου των αρδεύσεων που συμπίπτει με την καλλιεργητική περίοδο στις χαμηλές περιοχές των αρδευτικών δικτύων του Αξιού η υπόγεια στάθμη φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους το ισοζύγιο νερού μπορεί να εξεταστεί ως ενιαίο από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού στην λεκάνη κατάκλυσης μέχρι το κάτω όριο του ριζοστρώματος (Σχήμα 1). Η σχέση του ισοζυγίου του νερού (Αντωνόπουλος και Γιαννιού, 1999) έχει ως εξής:

$$\frac{dV}{dt} = R_o + GW_i - R_{ro} - R_{inf} - C_{Wo} + A(R-E) \quad (1)$$

όπου V είναι ο όγκος της λεκάνης (m^3),

A είναι η έκταση της ελεύθερης επιφάνειάς της (m^2),

R είναι η βροχόπτωση στην επιφάνειά της ($m/ημέρα$),

E είναι η εξάτμιση από την επιφάνειά της ($m/ημέρα$),

R_o είναι οι επιφανειακές εισροές νερού από το αρδευτικό δίκτυο ($m^3/ημέρα$),

R_{inf} είναι η διήθηση νερού στο έδαφος ($m^3/ημέρα$),

GW_i και GW_o είναι οι εισροές και εκροές από τα υπόγεια νερά,

R_{ro} είναι η επιφανειακή απορροή ($m^3/ημέρα$).

Ο όρος dV/dt είναι η μεταβολή στον αποθηκευμένο όγκο της λεκάνης και του εδάφους. Το υδατικό ισοζύγιο συνήθως υπολογίζεται σε ημερήσια ή μηνιαία ή ετήσια βάση.

Οι συνθήκες κατάκλυσης δημιουργούν ιδιαίτερες συνθήκες που επηρεάζουν τις οξειδοαναγωγικές διαδικασίες των μετασχηματισμών του αζώτου. Στο σύστημα συνυπάρχουν αερόβιες και αναερόβιες συνθήκες που επηρεάζουν ανάλογα τις διαδικασίες αυτές. Στην ζώνη του νερού κατάκλυσης κυριαρχούν οι διαδικασίες της νιτροποίησης, της αεριοποίησης της αμμωνίας, της απονιτροποίησης των νιτρικών, της εισροής αζώτου με το αρδευτικό νερό, της επιφανειακής απορροής, της έκπλυσης με το νερό διήθησης και της πρόσληψης από τα φύκη που αναπτύσσονται στο υδρόβιο περιβάλλον. Στην αμέσως αποκάτω ζώνη του εδάφους κυριαρχούν οι αντίστοιχες διαδικασίες και επιπλέον η ανοργανοποίηση/ακινητοποίηση του αζώτου.

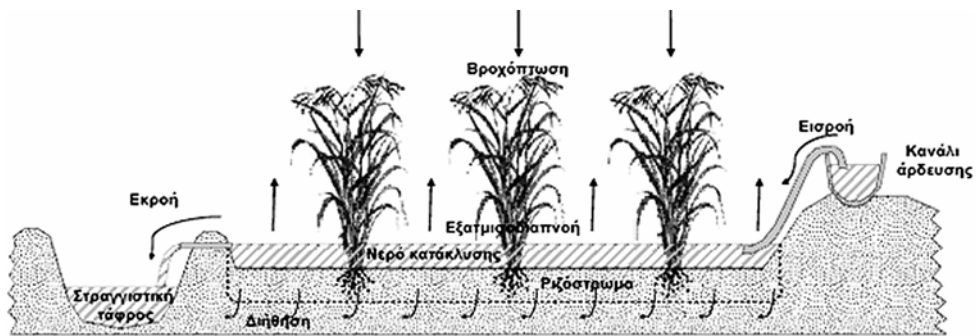
Στους κατακλυζόμενους αγρούς των ορυζώνων και σύμφωνα με τις παραδοχές του απλοποιημένου συστήματος (Σχήμα 1), το ισοζύγιο του αζώτου εφαρμόζεται ταυτόχρονα για τις δύο διακριτές ζώνες, του νερού στη λεκάνη κατάκλυσης και του εδάφους, και για κάθε μία από τις ανόργανες μορφές του αζώτου (το αμμωνιακό και νιτρικό άζωτο).

Για τη ζώνη κατάκλυσης, η εξίσωση ισοζυγίου του αζώτου έχει ως εξής

$$\frac{d(VC)}{dt} = R_o C_o + R_R C_R - R_{ro} C - R_{inf} C - \Sigma L_i \quad (2)$$

όπου C είναι η συγκέντρωση στο νερό (kg/m^3),
 C_o είναι η συγκέντρωση στο νερό άρδευσης (kg/m^3),
 C_R είναι η συγκέντρωση στο νερό της βροχής (kg/m^3) και
 ΣL_i είναι ο όρος των απωλειών με τους μετασχηματισμούς.

Ο όρος ΣL_i περιλαμβάνει την νιτροποίηση, την αεριοποίηση και την πρόσληψη από τα φύκια όταν χρησιμοποιείται για την εξίσωση του αμμωνιακού αζώτου και αντίστοιχα την απονιτροποίηση, την πρόσληψη και την προσθήκη με τη νιτροποίηση όταν χρησιμοποιείται για το νιτρικό άζωτο.



Σχήμα 1. Διαγραμματική αναπαράσταση του συστήματος των ορυζώνων.

Για τη ζώνη του εδάφους, η εξίσωση του ισοζυγίου έχει ως εξής

$$\frac{d(VC)}{dt} = R_{inf}C_{inf} + R_F + R_M - R_{inf}C - \Sigma L_i \quad (3)$$

όπου R_F είναι η προσθήκη με τη λίπανση (kg/day),
 R_M είναι η παραγωγή με την ανοργανοποίηση (kg/day), και
 ΣL_i είναι οι προσθήκες/αφαιρέσεις με τους μετασχηματισμούς και την πρόσληψη από τα φυτά (kg/day).

Οι διαδικασίες της ανοργανοποίησης, νιτροποίησης, της απονιτροποίησης, της αεριοποίησης, της ακινητοποίησης των μορφών του αζώτου θεωρούνται κινητικές αντιδράσεις πρώτης τάξης (Αντωνόπουλος, 1998), ενώ της πρόσληψης από τα φύκια μηδενικής τάξης.

2.2. Πειραματικά δεδομένα

Μετρήσεις που αφορούν τις συνιστώσες του ισοζυγίου του νερού και του αζώτου έγιναν σε δύο πειραματικούς αγρούς στην ευρύτερη περιοχή της Σίνδου, στο δυτικό

άκρο του Νομού Θεσσαλονίκης, κατά την καλλιεργητική περίοδο του έτους 2005. Η περιοχή αρδεύεται από την ανατολική προσαγωγό διώρυγα των αρδευτικών δικτύων του ποταμού Αξιού. Στην περιοχή κυριαρχεί η καλλιέργεια ρυζιού, που αρδεύεται με κατάκλυση. Το μέγεθος και οι διαστάσεις των πειραματικών αγρών είναι αντίστοιχα 5.5 στρέμματα ο αγρός Α, σε σχήμα ορθογωνίου 190×30 m και 6.2 στρέμματα ο αγρός Β σε σχήμα τραπεζίου με μήκος πλευρών 165 και 20 m και κάθετη πλευρά 20 m.

Η σπορά του ρυζιού πραγματοποιήθηκε τη 15^η Μαΐου 2005 με την ποικιλία ΤΥ-BONNET R1, σε ποσότητα 25 kg/στρέμμα. Εφαρμόστηκαν με ενσωμάτωση 50 kg/στρέμμα βασικού λιπάσματος, φωσφορικής αμμωνίας (20-10-0) και στους δύο αγρούς. Στον Αγρό Β εφαρμόστηκε επιφανειακή λίπανση θεικής αμμωνίας, σε ποσότητα 30 kg/στρέμμα, ενώ στον Αγρό Α, το ίδιο βασικό λίπασμα που χρησιμοποιήθηκε πριν τη σπορά, σε ποσότητα 25 kg/στρέμμα στις 2 Ιουλίου, όταν τα φυτά είχαν μέσο ύψος 37-43 cm.

Η κατάκλυση των αγρών ξεκίνησε πριν τη σπορά και τερματίστηκε 20 ημέρες πριν τη συγκομιδή (14 Οκτωβρίου). Εισροή νερού γινόταν συνεχώς, εκτός από μερικές μικρές περιόδους, όπως από 8 έως 21 Ιουνίου, και για ορισμένα εβδομαδιαία διαστήματα από 5 Ιουλίου μέχρι 15 Αυγούστου. Η παροχή του αρδευτικού νερού μέσω σιφωνίων από τις διώρυγες εφαρμογής ήταν περίπου από 2.8 έως 3 L/sec. Η επιφανειακή απορροή από το κατάντη άκρο του αγρού δεν ήταν συνεχής. Η απορροή όταν μετρήθηκε κυμάνθηκε από 0.75 έως 1.1 L/sec. Η υπόγεια στάθμη μετρήθηκε στα 105 cm πριν την κατάκλυση των αγρών και έφτασε στην επιφάνεια του εδάφους, όπου διατηρήθηκε καθόλη την περίοδο.

Το επιφανειακό στρώμα εδάφους χαρακτηρίζεται ως silty clay (0-60 cm). Η πυκνότητα και η υδραυλική αγωγιμότητα της ζώνης του ριζοστρώματος (0-30 cm) είναι $\rho_b = 1.36 \text{ g/cm}^3$ και 3.6 cm/day, αντίστοιχα.

Τα κλιματολογικά στοιχεία προέρχονται από τον μετεωρολογικό σταθμό του ΙΕΒ Σίνδου. Τα ημερήσια δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Penman-Monteith (Allen et al., 1998). Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας έγινε χρησιμοποιώντας μεταβαλλόμενο φυτικό συντελεστή καθόλη τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Η βλαστική περίοδος χωρίστηκε σε τέσσερες υποπεριόδους: αρχική, ανάπτυξης καλλιέργειας, μέση περίοδος και τελική περίοδος. Για τις Μεσογειακές χώρες η διάρκεια των σταδίων για το ρύζι είναι 30/30/60/30 ημέρες αντίστοιχα (Allen et al., 1998).

Οι σταθερές των ρυθμών των μετασχηματισμών του αζώτου για την ανοργανοποίηση, την αεριοποίηση, τη νιτροποίηση και την απονιτροποίηση προέρχονται από την βιβλιογραφία και διορθώθηκαν κατά τη φάση της ρύθμισης του μοντέλου (Johnson et al., 1987, Antonopoulos, 2001, Chowdary et al., 2004). Οι σταθερές για αυτές τις διαδικασίες κυμαίνονται στη βιβλιογραφία ως εξής: K_{\min} από 0.002 έως 0.02 per

day, K_{vol} από 0.03 έως 0.8 per day, K_{nit} από 0.02 έως 0.2 per day και K_{den} από 0.02 έως 0.2 per day.

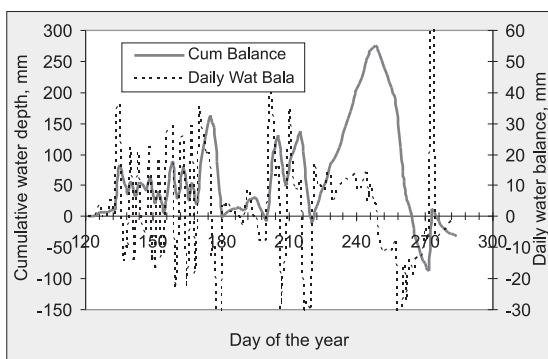
Το ισοζύγιο του νερού, NH_4-N and NO_3-N και οι μετασχηματισμοί τους υπολογίστηκαν τόσο στην ζώνη κατάκλυσης όσο και στο έδαφος σε ημερήσια βάση για όλη την βλαστική περίοδο του ρυζιού (1/5/2005 to 15/10/2005). Τα δεδομένα του αγρού Α χρησιμοποιήθηκαν για την ρύθμιση του μοντέλου, ενώ τα δεδομένα του αγρού Β για την επιβεβαίωση.

3. Αποτελέσματα - συζήτηση

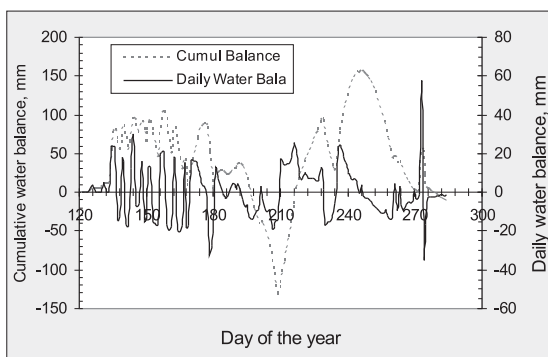
3.1 Αποτελέσματα για τον αγρό Α

Η διακύμανση του ημερήσιου και του αθροιστικού ισοζυγίου του νερού στη λεκάνη κατάκλυσης δίνονται στο Σχήμα 2α. Το αθροιστικό ισοζύγιο εκφράζει το μέσο ύψος νερού στην λεκάνη. Το ισοζύγιο του νερού εκφράζεται από τις συνολικές εισροές (άρδευση και βροχή) και τις συνολικές εκροές (επιφανειακή απορροή, εξατμισοδιαπνοή και διήθηση) (Πίνακας 1). Η επιφανειακή εφαρμογή του αρδευτικού νερού και η επιφανειακή απορροή από το κατάντη άκρο του αγρού ήταν 3647 mm και 1118 mm αντίστοιχα. Η βροχή συνεισέφερε στο ισοζύγιο με 248.6 mm, ενώ οι απώλειες με την εξατμισοδιαπνοή και την διήθηση στο έδαφος ήταν 930 και 1867 mm, αντίστοιχα.

Οι κυριότερες διαδικασίες απωλειών νερού είναι με την επιφανειακή απορροή και την διήθηση/στράγγιση, οι οποίες απο-



α) Αγρός Α



β) Αγρός Β

Σχήμα 2. Διακύμανση του ύψους νερού στη λεκάνη κατάκλυσης και ημερήσιο ισοζύγιο νερού για τους αγρούς Α και Β.

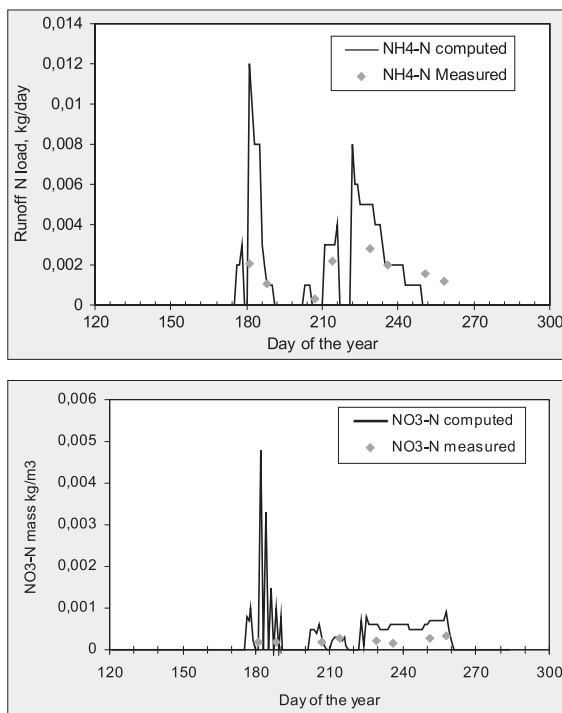
τελούν αντίστοιχα το 29.6 και 46.4% του ολικά εφαρμοζόμενου νερού. Η εξατμισοδιαπνοή αποτελεί το 24% του εφαρμοζόμενου νερού.

Πίνακας 1. Ισοζύγιο νερού στους αγρούς A (5.5 στρεμμάτων) και B (6.6 στρεμμάτων) στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου (163 ημέρες).

Εισροή, mm	Εκροή, mm	Βροχή mm	ETr, mm	Διήθηση, mm	Ισοζύγιο, mm
Αγρός A					
3647.0	1118	248.60	928.16	1867.0	-6.68
Αγρός B					
2238.80	404.25	248.60	952.03	1141.00	-10.49

Το ισοζύγιο μάζας του $\text{NH}_4\text{-N}$ και $\text{NO}_3\text{-N}$ υπολογίστηκε χωριστά σε ημερήσια βάση στην λεκάνη κατάκλυσης. Το υπολογισμένο ημερήσιο φορτίο $\text{NH}_4\text{-N}$ που απομακρύνεται με το νερό της απορροής σε σύγκριση με τις μετρημένες τιμές του δίνεται στο Σχήμα 3α. Παρατηρούμε ότι οι εκτιμημένες τιμές βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις μετρημένες τιμές. Ικανοποιητική συμφωνία υπάρχει επίσης για τα αποτελέσματα των ημερήσιων φορτίων απορροής για το $\text{NO}_3\text{-N}$ σε σχέση με τις μετρημένες τιμές (Σχήμα 3β).

Οι συνολικές ποσότητες των συνιστωσών του ισοζυγίου του αζώτου στο τέλος της βλαστικής περιόδου παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.



Σχήμα 3. Σύγκριση μεταξύ υπολογισμένων και μετρημένων φορτίων $\text{NH}_4\text{-N}$ και $\text{NO}_3\text{-N}$ με το νερό της επιφανειακής απορροής.

Πίνακας 2. Ολικό ισοζύγιο μάζας αζώτου στην λεκάνη κατάκλυσης στους αγρούς A και B στο τέλος της βλαστικής περιόδου του ρυζιού.

Διαδικασία NH ₄ -N	Αγρός A (kg/ha)	Αγρός B (kg/ha)
Εισροή με το νερό άρδευσης	2.34	1.46
<i>Εκροές</i>		
Απορροή	0.314 (12.4 %)	0.08 (5.2 %)
Νιτροποίηση	0.401 (15.8 %)	0.24 (16.5 %)
Αεριοποίηση	0.870 (34.4 %)	0.52 (35.5 %)
Εκπλυση	0.324 (12.8 %)	0.33 (27.7 %)
Πρόσληψη φυκών	0.623 (24.6 %)	0.58 (39.8 %)
Διαδικασία NO ₃ -N	Αγρός A (kg/ha)	Αγρός B (kg/ha)
Εισροή με το νερό άρδευσης	42.548	24.87
<i>Εκροές</i>		
Απορροή	7.12 (15.2 %)	1.78 (7.1 %)
Νιτροποίηση	0.40	0.24
Απονιτροποίηση	13.76 (29.3 %)	7.46 (30.0 %)
Εκπλυση	9.55 (20.4 %)	5.21 (20.9 %)
Πρόσληψη φυκών	16.47 (35.1 %)	11.60 (46.7 %)

Η κυριότερη πηγή φόρτισης της λεκάνης με N είναι το αρδευτικό νερό. Οι απώλειες NH₄-N ανέρχονται στο 27.3 % του συνολικού φορτίου που εισέρχεται στο νερό κατάκλυσης του ορυζώνα. Οι απώλειες NO₃-N με την επιφανειακή απορροή και την διήθηση είναι το 39.2% του ολικού εισερχόμενου φορτίου στον ορυζώνα. Οι απώλειες με τη μορφή των αέριων μορφών (αεριοποίηση αμμωνία και απονιτροποίηση νιτρικών) είναι το 34.4% και 29.3% για την αεριοποίηση του NH₄-N και την απονιτροποίηση του NO₃-N αντίστοιχα. Ένα σημαντικό μέρος του N χάνεται/αφομοιώνεται με την πρόσληψη του από τα φύκη που αναπτύσσονται στην λεκάνη κατάκλυσης, το οποίο ανέρχεται στα 24.6 % για το NH₄-N και 35.1% για το NO₃-N, αντίστοιχα.

Για τη ζώνη του εδάφους από την επιφάνεια μέχρι το κάτω όριο του ριζοστρώματος που βρίσκεται στα 30 cm, το ισοζύγιο του αζώτου υπολογίστηκε παράλληλα σε ημερήσια βάση και για την ίδια περίοδο. Στον Πίνακα 3 δίνονται οι συνιστώσεις του ισοζυγίου του αζώτου στο έδαφος του αγρού A.

Οι κυριότερες εισροές N στο έδαφος του ορυζώνα είναι η λίπανση (150 kg/ha), η ανοργανοποίηση της οργανικής ουσίας (201.3 kg/ha) και μια μικρή ποσότητα που μεταφέρεται με το διηθούμενο νερό από τη λεκάνη κατάκλυσης (9.9 kg/ha). Οι απώλειες αζώτου οφείλονται στην έκπλυση με το νερό στράγγισης και βαθειάς διήθησης (218.7 kg/ha), στην απονιτροποίηση του νιτρικού αζώτου (59.5 kg/ha) και στην

πρόσληψη αζώτου από τα φυτά που ανέρχεται στα 125.3 kg/ha. Το ισοζύγιο αζώτου για την περίοδο της προσομοίωσης (Μάιος έως Οκτώβρης 2005) είναι αρνητικό δημιουργώντας μία μείωση του ανόργανου αζώτου των 42.3 kg/ha.

Πίνακας 3. Ολικό ισοζύγιο μάζας αζώτου στο έδαφος στο τέλος της βλαστικής περιόδου του ρυζιού.

Διαδικασία NH ₄ -N	Αγρός Α (kg/ha)	Αγρός Β (kg/ha)
Εισροή		
Λίπανση	75.0	113.00
Ανοργανοποίηση	201.3	128.74
Φόρτιση με διήθηση	0.3	0.33
Εισροές Σύνολο	276.6	242.07
Εκροές		
Εκπλυση	105.5	105.24
Νιτροποίηση	83.9	23.58
Πρόσληψη φυτών	80.5	102.35
Εκροές Σύνολο	269.9	231.17
Ισοζύγιο	6.7	+10.9
Διαδικασία NO ₃ -N	Αγρός Α (kg/ha)	Αγρός Β (kg/ha)
Εισροή		
Λίπανση	75.0	50.00
Νιτροποίηση	83.9	23.58
Φόρτιση με διήθηση	9.6	5.21
Εισροές Σύνολο	168.5	78.79
Εκροές		
Εκπλυση	113.2	70.87
Απονιτροποίηση	59.5	39.34
Πρόσληψη φυτών	44.8	11.91
Εκροές Σύνολο	217.5	122.12
Ισοζύγιο	-49.0	-43.33

Οι ποσοστιαίες απώλειες αζώτου στο σύνολο τους κατανέμονται σε 54.2 % με την έκπλυση, 14.7 % με την απονιτροποίηση και με 31.1 % με την πρόσληψη από τα φυτά. Η πιο σημαντική απώλεια αζώτου είναι με την διαδικασία της έκπλυσης. Οι μεγάλες ποσότητες νερού που απομακρύνονται από τον αγρό με την στράγγιση είναι και υπεύθυνες για την απομάκρυνση του αζώτου από το σύστημα του ορυζώνα.

3.2. Αποτελέσματα για τον αγρό Β

Η εισροή νερού από τα αρδευτικό δίκτυο και η επιφανειακή απορροή από το τέλος του αγρού στον αγρό Β είναι 2238 mm και 404 mm, αντίστοιχα (Πίνακας 2). Οι απώλειες με την εξατμισοδιαπνοή και την διήθηση είναι 952 και 1141 mm, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 2β δίνεται η διακύμανση του ημερήσιου ισοζυγίου και η στάθμη του νερού στη λεκάνη κατάκλυσης (αθροιστικό ισοζύγιο).

Οι συνολικές ποσότητες των μετασχηματισμών του αζώτου και οι αθροιστικές εισροές και εκροές στη λεκάνη κατάκλυσης στο τέλος της βλαστικής περιόδου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Λόγω της μικρότερης εισροής νερού και της επιφανειακής απορροής στον αγρό Β και οι ποσότητες αζώτου που αντιστοιχούν στις συνιστώσεις του ισοζυγίου μάζας είναι μικρότερες.

Στον Αγρό Β οι κυριότερες εισροές Ν στο έδαφος είναι η λίπανση (163 kg/ha), η ανοργανοποίηση (128.74 kg/ha) και με το διηθούμενο νερό (5.54 kg/ha). Οι απώλειες αζώτου οφείλονται στην έκπλυση με τη βαθειά διήθηση (176.11 kg/ha), στην απονιτροποίηση (39.34 kg/ha) και στην πρόσληψη από τα φυτά 114.26 kg/ha. Το ισοζύγιο αζώτου (Μάιος έως Οκτώβρης 2005) είναι αρνητικό δημιουργώντας μία μείωση του ανόργανου αζώτου των 32.43 kg/ha. Οι ποσοστιαίες απώλειες αζώτου στο σύνολο τους κατανέμονται σε 59.3 % με την έκπλυση, 13.2 % με την απονιτροποίηση και με 38.44 % με την πρόσληψη από τα φυτά. Η πιο σημαντική απώλεια αζώτου είναι με την διαδικασία της έκπλυσης.

4. Συμπεράσματα

Το μαθηματικό μοντέλο ισοζυγίου του νερού και του αζώτου σε ορυζώνες μπορεί να προβλέψει το ημερήσιο ύψος νερού στην λεκάνη κατάκλυσης και τις ημερήσιες απώλειες και χρήσεις των ανόργανων μορφών του αζώτου ($\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$) υπό τις διαφορετικές διαδικασίες των μετασχηματισμών του αζώτου στο αερόβιο και αναερόβιο περιβάλλον των ορυζώνων υπό κατάκλυση.

Από τις μετρήσεις που έγιναν στους πειραματικούς αγρούς και τις εκτιμήσεις με το μοντέλο προκύπτει ότι χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες νερού για την άρδευση των ορυζώνων. Οι χρησιμοποιηθείσες ποσότητες νερού στους δύο αγρούς διαφέρουν σημαντικά. Στον αγρό Α εφαρμόστηκαν 3650 mm, ενώ στο αγρό Β 2240 mm νερού. Ένα σημαντικό μέρος του εφαρμοζόμενου νερού (70 to 76 %) χάνεται με την επιφανειακή απορροή και συνεισφέρει στην βαθειά διήθηση προς τα υπόγεια νερά. Η χρησιμοποίηση λιγότερου νερού στον αγρό Β (61 % του νερού στον αγρό Α) δείχνει ότι η άρδευση του ρυζιού μπορεί να γίνει με λιγότερο νερό από αυτό που χρησιμοποιείται συνήθως στην περιοχή.

Η λεκάνη κατάκλυσης λειτουργεί ως φυσικός υγρότοπος αφομοιώνοντας σημαντικό μέρος του εισερχόμενου με το νερό άρδευσης αζώτου. Το 41.5 έως 54.8 % του ανόργανου αζώτου που είναι διαθέσιμο στο έδαφος των ορυζώνων Α και Β προέρχεται από τη λίπανση, ενώ το 43.3 έως 55.7 % προέρχεται από την ανοργανοποίηση του οργανικού αζώτου. Οι απώλειες ή αξιοποίηση του εδαφικού αζώτου κατανομούνται ως εξής, 54.2 με 59.3 % χάνεται με την έκπλυση, 13.2 με 14.7 % χάνεται με την απονιτροποίηση του νιτρικού αζώτου και 31.2 με 38.5 % αξιοποιείται από τα φυτά. Οι μεγάλες ποσότητες νερού που απομακρύνονται από τον αγρό με την στράγγιση είναι και υπεύθυνες για την απομάκρυνση του αζώτου από το σύστημα του ορυζώνα. Η μείωση του στραγγιστικού νερού θα μειώσει και τις απώλειες αζώτου και εμπλουτισμού των επιφανειακών αποδεκτών και υπόγειων νερών με άζωτο.

Βιβλιογραφία

1. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes D. and Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.
2. Antonopoulos, V., 2007. *Evaluation of Water and Nitrogen Balance in the Pondered water of Rice Fields*. Proceedings of Water Resources Management: New Approaches and Technologies, E.W.R.A., Chania, Crete - Greece, pp 345-354.
3. Antonopoulos, V.Z., 2001. *Simulation of water and nitrogen balances of irrigated and fertilized corn-crop soil*. J. Irrig. Drain. Eng. 127: 77-83.
4. Antonopoulos, V., 1998. *WANISIM-One dimensional model of water and nitrogen dynamics in the soil*, School of Agriculture, A.U.Th., Thessaloniki, pp. 80.
5. Αντωνόπουλος, Β. και Γιαννιού, Σ., 1999. *Ισοζύγιο νερού και αλάτων στη λίμνη Κορώνεια της βόρειας Ελλάδος*. Διαχείριση υδατικών πόρων στις ευαίσθητες περιοχές του ελλαδικού χώρου. Πρακτικά 4ου Συνεδρίου ΕΕΔΥΠ, Βόλος: 67-75.
6. Αντωνόπουλος, Β., Ασχονίτης, Β. και Λίτσкас, Β., 2007. *Προσομοίωση του ισοζυγίου νερού σε ορυζώνα με το μοντέλο GLEAMS*. Πρακτικά 6^{ου} Εθνικού Συνεδρίου ΕΕΔΥΠ Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων με Βάση τη Λεκάνη Απορροής, Χανιά: 325-334.
7. Bouman, B.A.M., Wopereis, M.C.S., Kropff, M.J., ten Berge H.F.M. and Tuong, T.P., 1994. *Water use efficiency of flooded rice fields. (II) Percolation and seepage losses*. Agric. Water. Manage, 26: 291-304.
8. Chowdary, V.M., Rao, N.H. and Sarma, P.B.S., 2004. *A coupled soil water and nitrogen balance model for flooded rice fields in India*, Agric. Ecosystems and Enviro, 103: 425-441.
9. Chung, S.O., Kim H.S., Kim J.S. and 2003. *Model development for nutrient loading from paddy rice fields*. Agric Water Manage: 62: 1-17.

10. Inao K. and Kitamura Y., 1999. *Pesticide paddy field model (PADDY) for predicting pesticide concentrations in water and soil in paddy fields*. Pestic. Sci: 55: 38-46.
11. Johnsson, H., Bergstrom, L. and Jansson, P-E., 1987. *Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil*. Agric., Ecosystems and Enviro, 18: 333-356.
12. MED-Rice, 2003. *Guidance document for environmental risk assessments of active substances used on rice in the EU for Annex I Inclusion*. Document prepared by Working Group on MED-Rice, EU Document Reference SANCO/1090/2000-rev.1, Brussels, 108 pp.
13. Singh, KB, Gajri, PR and Arora, V.K., 2001. *Modelling the effects of soil and water management practices on the water balance and performance of rice*. Agric Water Manage, 49:77-95
14. Watanabe, H., Takagi K. and Vu SH, 2005. *Simulation of mefenacet concentrations in paddy field by improved PCPF-1 model*. Pest Manage Sci: 62: 20-29.