

ΒΑΘΕΙΑ ΔΙΗΘΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΖΩΤΟΥ ΣΕ ΑΡΔΕΥΟΜΕΝΕΣ ΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΕΔΙΑΔΑΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Βασίλειος Ζ. Αντωνόπουλος

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής,
Τμήμα Γεωπονίας, Α.Π.Θ., 54006 Θεσσαλονίκη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή με τη βοήθεια του μοντέλου WANISIM (Water and Nitrogen Simulation) γίνεται προσομοίωση της κίνησης του νερού και της μεταφοράς του αζώτου κάτω από συνθήκες άρδευσης και λίπανσης της καλλιέργειας του βαμβακιού για τις συνθήκες της πεδιάδας της Θεσσαλίας. Το μοντέλο εφαρμόζεται σε δύο αντιπροσωπευτικά εδάφη της πεδιάδας της Θεσσαλίας για τις κλιματικές συνθήκες της πεδιάδας και το πρόγραμμα άρδευσης και αζωτούχου λίπανσης του βαμβακιού. Η εφαρμογή επεκτείνεται πέρα από τη βλαστική περίοδο για τις κλιματικές συνθήκες του φθινοπώρου και του χειμώνα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο διαχείρισης νερού και αζώτου σε επίπεδο αγροτεμαχίου, ώστε να γίνεται καλύτερη αξιοποίηση νερού και αζώτου και να ελαχιστοποιούνται οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

WATER AND NITROGEN PERCOLATION IN IRRIGATED AREAS OF THESSALIA PLAIN

VASSILIS Z. ANTONOPOULOS

School of Agriculture, Aristotle University of Thessaloniki, 54006 Thessaloniki, Greece

ABSTRACT

The WANISIM model (Water and Nitrogen Simulation) was used for simulation of water movement and nitrogen during plant growing period and the following period of the year. The WANISIM model is one-dimensional and incorporates the solution of water flow and mass transport of ammonia and nitrates nitrogen, the processes of plant uptake of water and nitrogen, the water evaporation and nitrogen transformations in soil profiles. The model was applied in two different soils of Thessalia plain for climate conditions of this plain and the irrigation and fertilization of cotton plants. The model results showed that it could be used to estimate the amounts of water and nitrogen applied on the soils to provide water and nitrogen for plants and minimize the detrimental environmental impacts.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η άρδευση και οι λιπάνσεις των καλλιεργειών έχουν σαν σκοπό την ανάπτυξη των καλλιεργειών και την μεγιστοποίηση των αποδόσεων τους. Ανάμεσα στα θρεπτικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τη λίπανση των φυτών, σημαντική θέση κατέχει το άζωτο. Η εφαρμογή της αζωτούχου λίπανσης παρουσιάζει συνεχή αύξηση τα τελευταία τριάντα χρόνια. Στη δεκαετία του 80, η κατανάλωση αζωτούχων λιπασμάτων αυξήθηκε στις αναπτυσσόμενες χώρες κατά 63%, 7% στις αναπτυγμένες και περίπου 30% παγκοσμίως (Bijay-Singh et al., 1995). Στην Ελλάδα την ίδια δεκαετία η αντίστοιχη αύξηση ήταν περίπου 36 %.

Ένα μέρος του αζώτου που εφαρμόζεται στο έδαφος χρησιμοποιείται από τα φυτά, ενώ ένα άλλο μεγάλο μέρος, που εξαρτάται από τις συνθήκες εφαρμογής και την διαχείριση νερού και αζώτου στο χωράφι, χάνεται είτε με τη βαθειά διήθηση του νερού είτε με τη μετατροπή του σε αέριες μορφές που απομακρύνονται στην ατμόσφαιρα. Η εκτεταμένη χρησιμοποίηση των αζωτούχων λιπασμάτων και η μη ορθολογική αξιοποίησή τους από τις καλλιέργειες, έχει οδηγήσει σε πολλές περιοχές του κόσμου, ιδιαίτερα στις αρδευόμενες, στη ρύπανση των υπογείων νερών λόγω της έκπλυσης των νιτρικών.

Στα υπόγεια νερά περιοχών με έντονη γεωργική ανάπτυξη έχουν καταγραφεί σημαντικά υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών σε βαθμό που συχνά υπερβαίνουν το ανώτερο επιτρεπόμενο για το πόσιμο νερό όριο των 50 mg/l. Το άζωτο επίσης ως ένα από τα κύρια θρεπτικά στοιχεία, συνεισφέρει στον ευτροφισμό των επιφανειακών νερών και στην ρύπανση τους με δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων και την ποιότητα επιφανειακών και υπόγειων νερών.

Η αύξηση των νιτρικών στα υπόγεια και επιφανειακά νερά οφείλεται εκτός από τις αυξημένες λιπάνσεις με άζωτο, στην αποικοδόμηση των φυτικών και ζωικών υπολειμμάτων και στη διάθεση και επαναχρησιμοποίηση της λάσπης και των υγρών αποβλήτων των συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Την τελευταία δεκαετία υπάρχει έντονη κινητικότητα γύρω από τη δυνατότητα χρησιμοποίησης των επεξεργασμένων λυμάτων για την άρδευση των γεωργικών και δασικών εκτάσεων. Επίσης το έδαφος και οι υπόγειοι υδροφορείς θεωρούνται φυσικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων. Οι λόγοι της ανάγκης επαναχρησιμοποίησης των λυμάτων είναι η μείωση των διαθέσιμων υδατικών πόρων καλής ποιότητας, οι αυξανόμενες ανάγκες σε νερό και οι μεγάλες ποσότητες παραγωμένων λυμάτων στα συστήματα επεξεργασίας των πόλεων. Οι λόγοι αυτοί οδήγησαν στο να θεωρούνται τα λύματα μέρος των υδατικών πόρων. Η διάθεση όμως των λυμάτων και της λάσπης στο έδαφος, είτε για άρδευση, είτε για εδάφια επεξεργασία, ενέχει τον κίνδυνο της ρύπανσης των υπογείων νερών.

Το νερό και το άζωτο στο έδαφος βρίσκονται σε μιά δυναμική κατάσταση. Το νερό που εισέρχεται στο ριζόστρωμα χρησιμοποιείται από τα φυτά καλύπτοντας τις ανάγκες της εξατμισοδιαπνοής, ικανοποιεί το έλλειμμα νερού της ακόρεστης ζώνης και κινείται βαθειά προς τους υπόγειους υδροφορείς και τα επιφανειακά νερά. Το οργανικό άζωτο των υπολειμμάτων και της λάσπης ανοργανοποιείται δημιουργώντας ανόργανες μορφές με τελικό προϊόν τα νιτρικά. Οι αναγωγικές συνθήκες και η έλλειψη οξυγόνου από την άλλη πλευρά οδηγούν στην απονιτροποίηση των νιτρικών δημιουργώντας αέριες μορφές του αζώτου.

Η μείωση των απωλειών του αζώτου που εφαρμόζεται στο έδαφος μπορεί να επιτευχθεί ως αποτέλεσμα της αποδοτικότερης εφαρμογής που εξαρτάται από το χρόνο εφαρμογής, τη μορφή της λίπανσης, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και του φυτού, τις κλιματολογικές συνθήκες και το νερό που εισέρχεται στο έδαφος λόγω της άρδευσης και της βροχόπτωσης. Η διαχείριση του νερού και του αζώτου στο χωράφι επιτυγχάνεται με τη βοήθεια μαθηματικών μοντέλων, που περιγράφουν όλες τις διαδικασίες που συμμετέχουν και επηρεάζουν την τύχη τους στο έδαφος. Η ανάγκη για την περιγραφή και κατανόηση των πολύπλοκων μηχανισμών και διαδικασιών στο έδαφος οδήγησε διεθνώς στην ανάπτυξη μεγάλου αριθμού μοντέλων. Τα μοντέλα

διαφέρουν στο τρόπο προσέγγισης του προβλήματος. Ανάμεσα στα μοντέλα που είναι αποδεκτά τα τελευταία χρόνια είναι το LEACHN (Hutson and Wagenet, 1991), SWATNIT (Vereecken *et al.*, 1991), SOILN (Bergstrom and Jarvis, 1991), MACRO (Jarvis, 1995), WAVE (Vanclooster *et al.*, 1995) και WHNSIM (Huwe and Totsch, 1995).

Ένα μοντέλο αυτής της μορφής είναι το μοντέλο WANISIM που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων του τμήματος Γεωπονίας του Α.Π.Θ. (Antonopoulos, 1993). Στο μοντέλο αυτό περιγράφεται η κίνηση του νερού σε εδάφη, όπου αναπτύσσονται φυτά, για τις μεταβαλλόμενες συνθήκες της άρδευσης, της βροχόπτωσης, της εξάτμισης και της διαπνοής των φυτών. Επίσης περιγράφεται η μεταφορά μάζας του αμμωνιακού και νιτρικού αζώτου, η ανοργανοποίηση του οργανικού αζώτου, η νιτροποίηση του, η απονιτροποίηση του νιτρικού αζώτου, η πρόσληψη του αμμωνιακού και νιτρικού ιόντος από τα φυτά για συνθήκες που διαμορφώνονται στο έδαφος κατά την διάρκεια της βλαστικής περιόδου από τις κλιματικές συνθήκες και από την οργανική και ανόργανη λίπανση.

Στην εργασία εφαρμόζεται το μοντέλο (WANISIM) για την προσομοίωση της κίνησης του νερού και της τύχης του αζώτου κάτω από συνθήκες άρδευσης και λίπανσης καλλιεργειών για τις συνθήκες της πεδιάδας της Θεσσαλίας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στο κλάσμα του νερού της βροχής και άρδευσης που κινείται βαθειά, και το κλάσμα του αζώτου της λίπανσης που μεταφέρεται προς τον υπόγειο υδροφόρο.

2. ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ WANISIM

Η μονοδιάστατη κατακόρυφη ροή του νερού σε ένα κορεσμένο-ακόρεστο έδαφος, με πρόσληψη νερού από τις ρίζες των φυτών, περιγράφεται από την εξίσωση του Richards:

$$C_h \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) \right) \pm S_w \quad (1)$$

όπου h είναι το ύψος πίεσης (cm), K είναι η υδραυλική αγωγιμότητα (cm/h), C_h είναι η υδραυλική χωρητικότητα του εδάφους, S_w είναι ο όρος για την πρόσληψη νερού από τις ρίζες (1/h), z είναι η κατακόρυφη απόσταση (θετική προς τα κάτω) και t ο χρόνος. Η πρόσληψη του νερού από τα φυτά, περιγράφεται από την εξίσωση των Belmans *et al.* (1983), με την τροποποίηση των Wyseure *et al.* (1994) στην παράμετρο $\alpha(h)$,

$$S_w(z, h) = \alpha(h) S_{\max}(z) \quad (2)$$

όπου $S_{\max}(z)$ είναι η κατανομή της μέγιστης πρόσληψης νερού από τα φυτά με το βάθος του ριζοστρώματος, $\alpha(h)$ είναι μια παράμετρος που εξαρτάται από το ύψος πίεσης και καθορίζει την δυσκολία πρόσληψης του νερού από το ριζικό σύστημα. Ο περιορισμός για την πρόσληψη του νερού είναι η δυναμική διαπνοή που εκφράζεται από τη σχέση

$$\int_0^d S(h, z) dz \leq T_p \quad (3)$$

όπου T_p είναι η δυναμική διαπνοή και d είναι το βάθος του ριζοστρώματος.

Οι αντίστοιχες εξισώσεις μεταφοράς μάζας του $\text{NH}_4\text{-N}$ και $\text{NO}_3\text{-N}$, όταν οι κυριαρχούσες αντιδράσεις μετασχηματισμού τους στο έδαφος είναι η προσρόφηση και η νιτροποίηση του $\text{NH}_4\text{-N}$, η απονιτροποίηση του $\text{NO}_3\text{-N}$, η πρόσληψη του $\text{NH}_4\text{-N}$ και $\text{NO}_3\text{-N}$ από τα φυτά και η ανοργανοποίηση του οργανικού N, κάτω από ασταθείς συνθήκες ροής, έχουν ως εξής

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial \rho S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\Theta D \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial I C}{\partial z} - \Phi_1 - Q_a + \xi_1 \Theta \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Theta Y}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\Theta D \frac{\partial Y}{\partial z} \right) - \frac{\partial q C}{\partial z} + \Phi_2 - Q_n + \xi_2 \Theta \quad (5)$$

όπου C και Y είναι αντίστοιχα οι συγκεντρώσεις του NH₄-N και NO₃-N στο εδαφικό διάλυμα (mg/l), D είναι ο συντελεστής διασποράς (cm²/h), Θ είναι η περιεχόμενη εδαφική υγρασία (cm³/cm³), q είναι η ταχύτητα Darcy (cm/h), ρ είναι η πυκνότητα (gr/cm³), S είναι η ποσότητα NH₄-N στην προσροφητική φάση ανά μονάδα μάζας του εδάφους (gr/gr εδάφους), Φ_i είναι οι ρυθμοί μετασχηματισμού του NH₄-N (i=1) ή NO₃-N (i=2) ανά μονάδα όγκου του εδάφους, Q_a, Q_n είναι αντίστοιχα η πρόσληψη του NH₄-N και NO₃-N ανά μονάδα όγκου του εδάφους και ξ₁, ξ₂ είναι αντίστοιχα οι παραγόμενες ποσότητες NH₄-N και NO₃-N κατά την ανοργανοποίηση της οργανικής ουσίας.

Οι μετασχηματισμοί του αμμωνιακού και νιτρικού αζώτου, που εκφράζονται από τους όρους Φ₁ και Φ₂, περιγράφονται από κινητικές αντιδράσεις πρώτης τάξης. Η προσρόφηση των ιόντων NH₄⁺ θεωρείται στιγμιαία και αντιστρεπτή και ορίζεται από την γραμμική ισόθερμο ισορροπίας του Freundlich. Η πρόσληψη από τα φυτά, που εκφράζεται από τους όρους Q_a και Q_n, περιγράφεται από το μακροσκοπικό μοντέλο της προσέγγισης των Michaelis-Menten. Η ανοργανοποίηση του οργανικού αζώτου περιγράφεται στο μοντέλο με τις διαδικασίες των Johnsson *et al.* (1987).

Η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων (1), (4) και (5) γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Antonopoulos and Parazafiriou, 1990). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η εξαρτημένη μεταβλητή κάθε εξίσωσης (y=h,C,Y) προσεγγίζεται από μία πεπερασμένη σειρά της μορφής:

$$y(z,t) \approx \hat{y}(z,t) = \sum_{j=1}^n N_j(z) y_j(t) \quad (6)$$

όπου y_j(t) είναι οι κομβικές τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής στο χρόνο t, N_j(z) είναι οι συναρτήσεις μορφής και n είναι ο αριθμός των κόμβων.

Με τη βοήθεια του κριτηρίου Galerkin

$$\int_0^d L(\hat{y}) N_i(z) dz = 0, \quad (i=1,2,3,\dots,n) \quad (7)$$

μετά τις απαραίτητες αντικαταστάσεις και την ανακατάξη των όρων προκύπτουν συστήματα διαφορικών εξισώσεων της μορφής

$$[A_{ij}]\{y_j\} + [B_{ij}]\left\{\frac{dy_j}{dt}\right\} = \{F_i\} \quad (8)$$

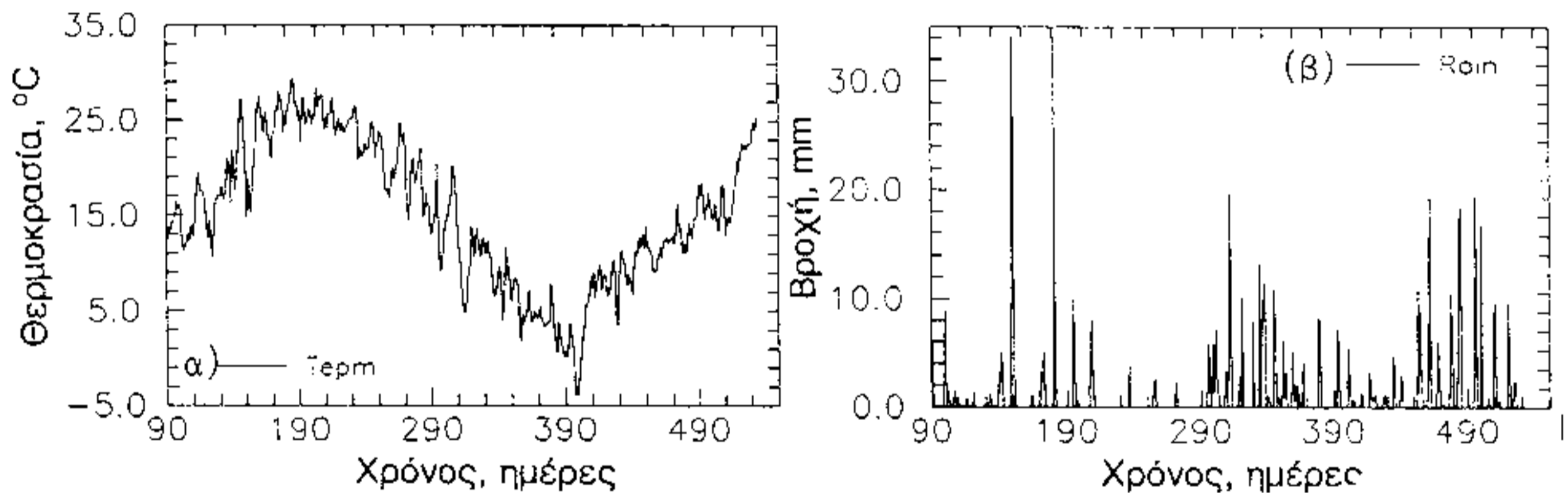
τα οποία μετά την προσέγγιση των χρονικών παραγώγων με μιας δεύτερης τάξης προσέγγιση στο χρόνο (τύπου Crank-Nicolson) οδηγούν σε αλγεβρικά συστήματα με τριδιαγωνικά μητρώα των αγνώστων, που μπορούν να λυθούν με τις μεθόδους της αριθμητικής ανάλυσης (Antonopoulos, 1993).

3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

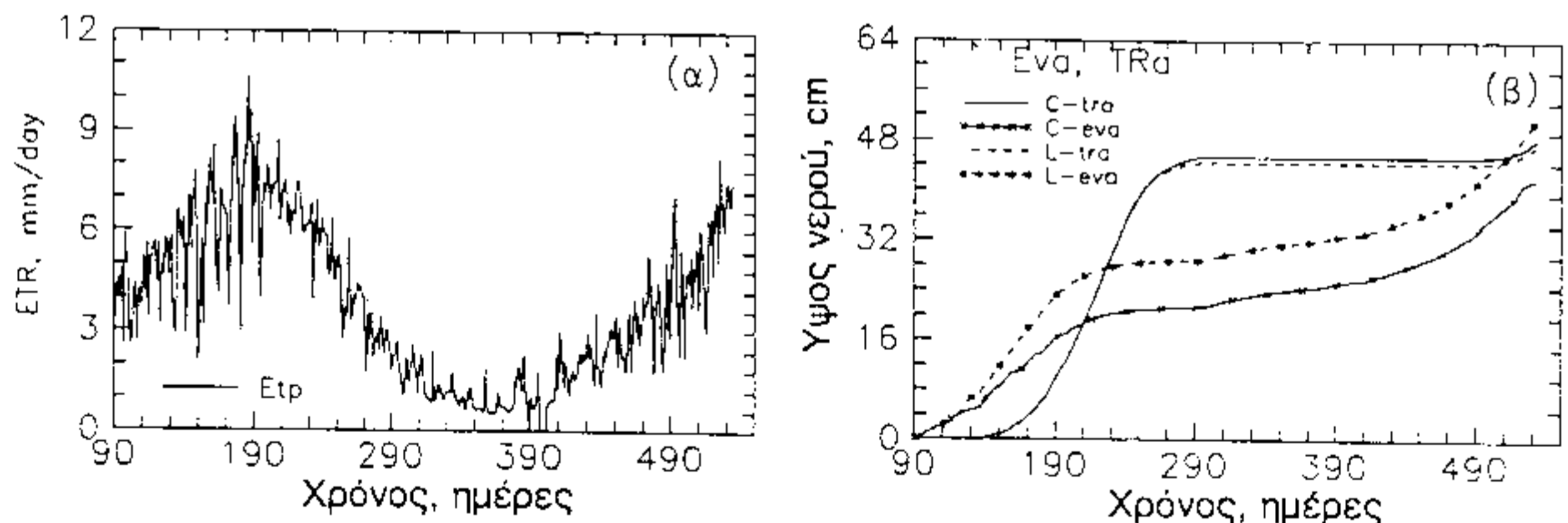
Μιά από τις σημαντικότερες καλλιέργειες της πεδιάδας Θεσσαλίας είναι το βαμβάκι. Οι ξηροθερμικές συνθήκες του καλοκαιριού, που συμπίπτουν με την ανάπτυξη των καλλιεργειών, έχουν σαν συνέπεια τις απαιτήσεις σε σημαντικές ποσότητες νερού. Το μεγαλύτερο μέρος των αναγκών σε νερό της πεδιάδας, καλύπτεται από τα υπόγεια νερά. Αυτό έχει ως συνέπεια την υπερεκμετάλλευση των υπογείων νερών και την ανάγκη άντλησης του συνεχώς από βαθύτερα στρώματα. Αυτή η στενότητα διαθέσιμου νερού και τα προβλήματα ρύπανσης των υπόγειων νερών με νιτρικά σε ορισμένες περιοχές, κάνει επιτακτική την ανάγκη καλύτερης αξιοποίησης του νερού των αρδεύσεων και την σωστή διαχείριση εφαρμογής των αζωτούχων λιπασμάτων.

Το μοντέλο WANISIM χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της κίνησης του νερού και της τύχης του αζώτου των λιπασμάτων, σε δύο διαφορετικά εδάφη αντιπροσωπευτικά της πεδιάδας της Θεσσαλίας κατά την διάρκεια ενός πλήρους έτους στο οποίο περιλαμβάνεται η βλαστική περίοδος του βαμβακιού και η ακολουθούσα περίοδος του χειμώνα μέχρι την έναρξη της νέας βλαστικής περιόδου. Τα εδάφη που χρησιμοποιήθηκαν είναι ένα βαρύ αργιλώδες και ένα πηλώδες. Τα χαρακτηριστικά του αργιλώδους εδάφους και οι μετρήσεις της εδαφικής υγρασίας προέρχονται από τον Μπαμπατζιμόπουλο κ.α. (1995), ενώ τα χαρακτηριστικά του πηλώδους εδάφους από τη βιβλιογραφία.

Στα δύο αυτά εδάφη καλλιεργείται βαμβάκι με χρόνο σποράς αρχές του Μαΐου. Η χρονική περίοδος προσομοίωσης είναι από 1/4/1990 μέχρι 30/6/1991. Χρησιμοποιήθηκαν τα ημερήσια μετεωρολογικά δεδομένα, της ίδιας χρονικής περιόδου, του σταθμού της ΕΜΥ στο αεροδρόμιο Λάρισας. Η ημερήσια βροχόπτωση, η εξατμισοδιαπνοή και η θερμοκρασία αποτελούν μεταβλητές εισόδου του μοντέλου WANISIM (Σχήματα 1 και 2). Οι αρδεύσεις που εφαρμόστηκαν άρχισαν στις 17/5/1990 και επαναλαμβάνονταν σε τακτά χρονικά διαστήματα. Στο αργιλώδες έδαφος έγιναν 7 αρδεύσεις με δόσεις άρδευσης από 40 - 60 mm, ενώ στο πηλώδες έγιναν 9 αρδεύσεις με δόσεις από 40 - 50 mm. Το αργιλώδες έδαφος είναι στρωματωμένο, ενώ το πηλώδες θεωρήθηκε ομογενές.



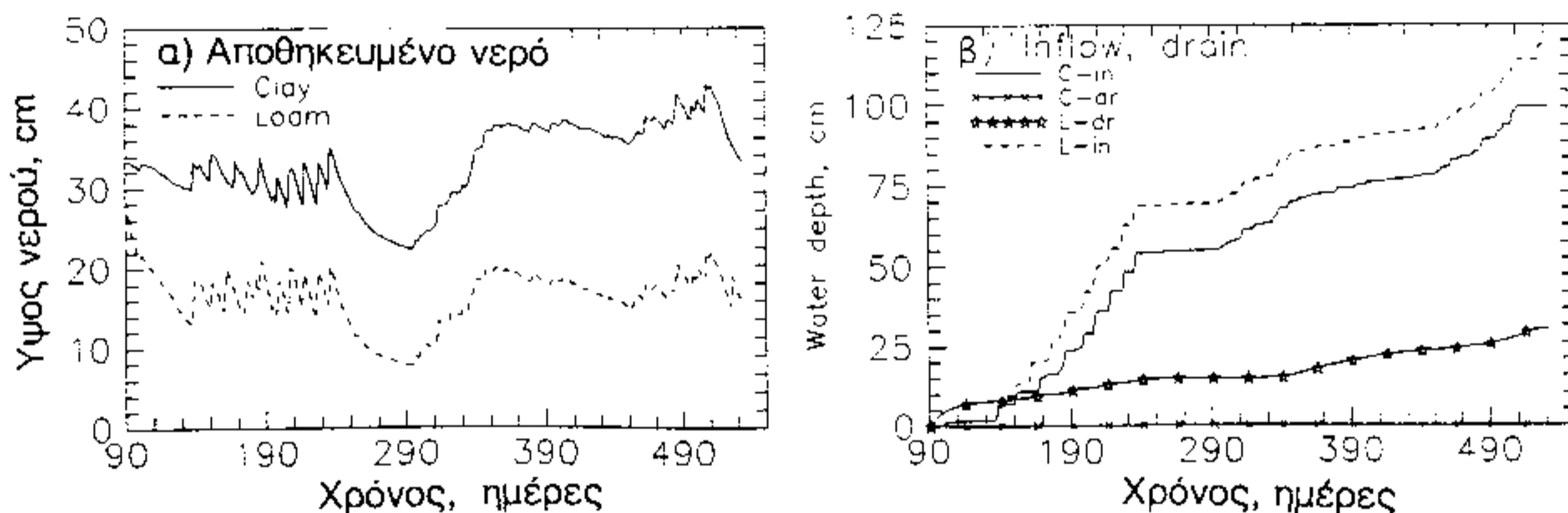
Σχήμα 1. Ημερήσια θερμοκρασία (α) και βροχόπτωση (β) κατά την περίοδο 1/4/90 έως 30/6/91 στη Λάρισα.



Σχήμα 2. Ημερήσια δυναμική εξατμισοδιαπνοή (α) και αθροιστική πραγματική εξάτμιση και διαπνοή (β) κατά την περίοδο 1/4/90 έως 30/6/91 στη Λάρισα (C-eva και C-tra εξάτμιση και διαπνοή στο αργιλώδες έδαφος).

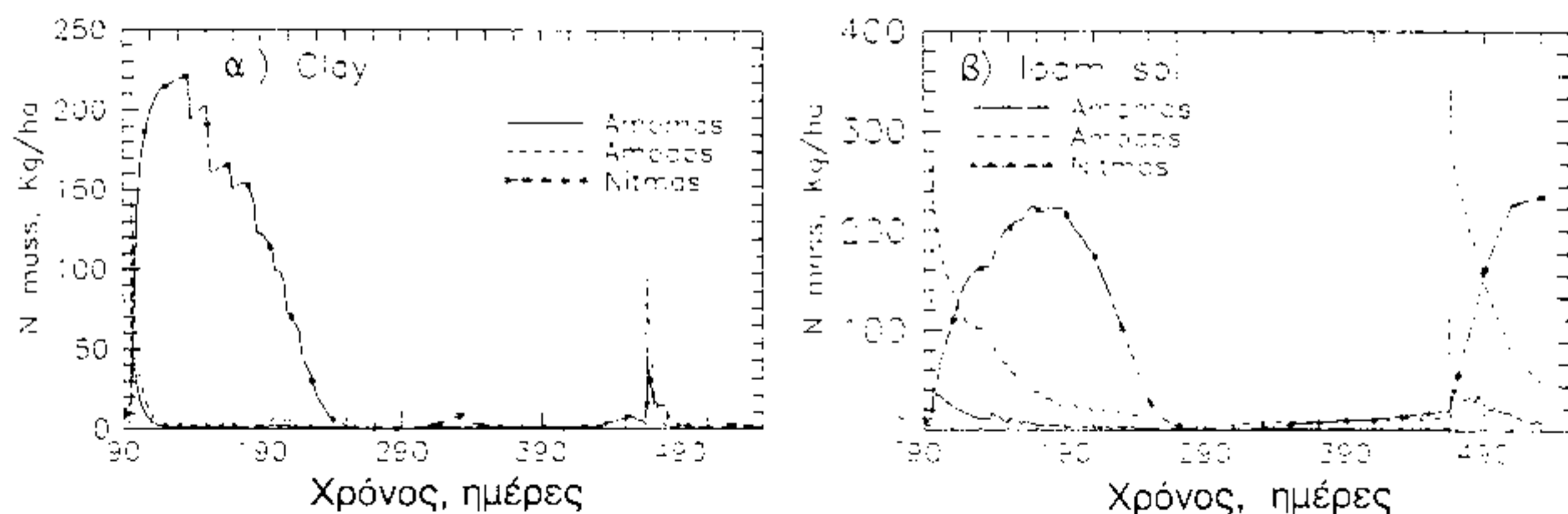
Τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας και η μεταβολή των παραμέτρων κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου πάρθηκαν από τη βιβλιογραφία και διορθώθηκαν κατά την διάρκεια των εκτελέσεων του μοντέλου. Η εφαρμογή της αζωτούχου λίπανσης γίνεται εφάπαξ στις αρχές Απριλίου με 20 kg αζώτου ανά στρέμμα.

Στο Σχήμα 3α παρουσιάζεται η διακύμανση της αποθηκευμένης εδαφικής υγρασίας σε πάχος εδάφους 1 m, κατά τη διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης στο αργιλώδες και το πηλώδες έδαφος. Η διακύμανση της αποθηκευμένης υγρασίας ακολουθεί τη ίδια μορφή αλλά είναι διαφορετική στα δύο εδάφη. Οι συνιστώσες του ισοζυγίου μάζας του νερού - εξάτμιση, διαπνοή, βροχή και άρδευση και στράγγιση - παρουσιάζονται στα Σχήματα 2β και 3β. Η εισροή νερού στο έδαφος διαφοροποιείται γιατί στο πηλώδες έδαφος εφαρμόζεται μεγαλύτερο ολικό ύψος άρδευσης για να διατηρηθεί ικανοποιητική η υγρασία στο ριζόστρωμα. Η διαπνοή νερού είναι ίδια στα δύο εδάφη, ενώ η εξάτμιση διαφοροποιείται γιατί λόγω των συχνότερων αρδεύσεων στο πηλώδες έδαφος, το επιφανειακό στρώμα είναι συνεχώς υγρό και έτσι ευνοείται η εξάτμιση. Τόσο στο αργιλώδες, όσο και στο πηλώδες έδαφος το νερό που εφαρμόστηκε με τις αρδεύσεις ικανοποίησε τις ανάγκες για διαπνοή και εξάτμιση. Σχετικά με το νερό που κινείται βαθύτερα από το ριζόστρωμα και συνεπώς αποτελεί και νερό που εμπλουτίζει τους υπόγειους υδροφορείς, είναι μηδενικό στο βαρύ έδαφος, αλλά σημαντικό στο πηλώδες (Σχήμα 3β).



Σχήμα 3. Διακύμανση α) της αποθηκευμένης εδαφικής υγρασίας στο έδαφος πάχους 1 m και β) της αθροιστικής εισροής και στράγγισης, στα δύο διαφορετικά εδάφη κατά τη διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης.

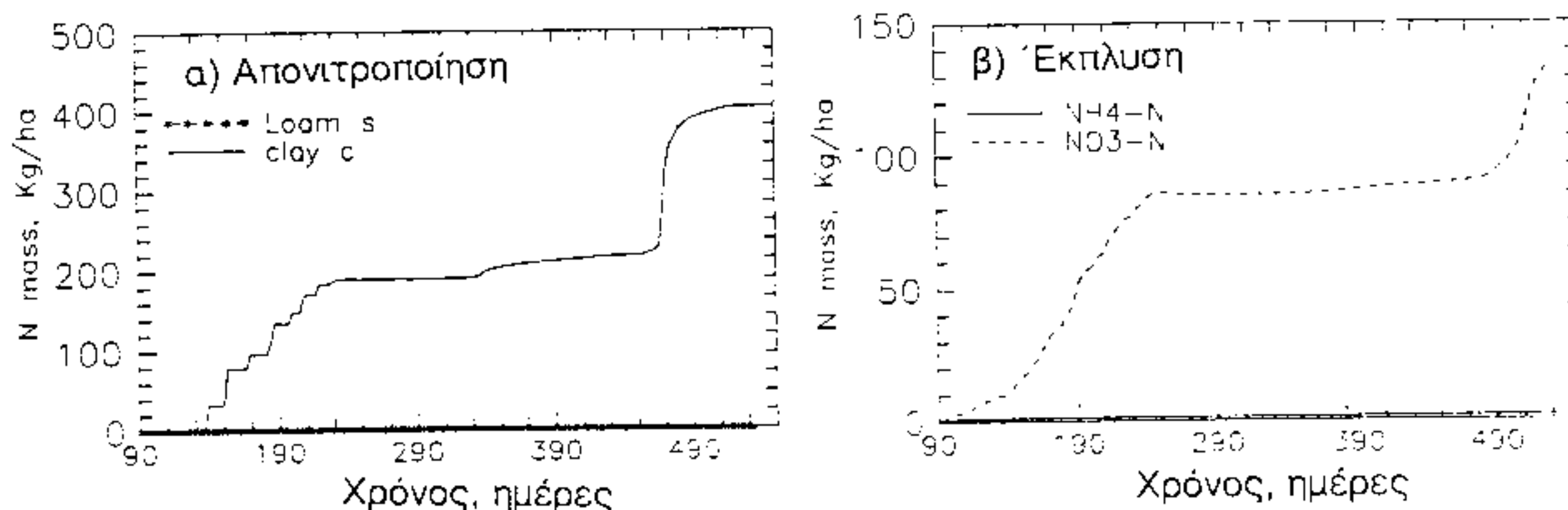
Η προσομοίωση του αζώτου γίνεται με σημαντικές επιφυλάξεις λόγω της έλλειψης δεδομένων για την ρύθμιση και επιβεβαίωση του μοντέλου κάτω από τις συνθήκες εφαρμογής άρδευσης και N λίπανσης για τις συνθήκες της Θεσσαλίας (Αντωνόπουλος, 1996). Παρόλα αυτά γίνεται προσπάθεια προσομοίωσης της δυναμικής του αζώτου στα δύο εδάφη. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις του ολικού αμμωνιακού αζώτου στην υγρά και τη στερεά φάση του εδάφους και του νιτρικού αζώτου στα δύο εδάφη κατά την διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης.



Σχήμα 4. Διακύμανση της ολικής ποσότητας του αμμωνιακού αζώτου στην υγρά (Amomas) και τη στερεά (Amoabs) φάση του εδάφους και του νιτρικού αζώτου (Nitmas) στα δύο εδάφη κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Σχετικά με το αμμωνιακό άζωτο παρατηρείται μία αύξηση αμέσως μετά την λίπανση που μειώνεται ταχύτατα στις πρώτες 15 ημέρες στο αργιλώδες έδαφος και μετά από ένα μήνα στο πηλώδες. Η ολική ποσότητα αμμωνιακού αζώτου διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα καθόλη την υπόλοιπη περίοδο. Το νιτρικό άζωτο παρουσιάζει αύξηση λίγο μετά την λίπανση, που είναι ο χρόνος που απαιτείται για τη νιτροποίηση της αμμωνίας. Μετά τον Αύγουστο η ολική ποσότητα των νιτρικών μειώνεται δραστικά στο έδαφος ως αποτέλεσμα της πρόσληψης τους από τα φυτά, της έκπλυσης των νιτρικών από το επιφανειακό στρώμα του εδάφους και της απονιτροποίησης.

Δύο είναι οι σημαντικότερες απώλειες αζώτου από το έδαφος. Οι ποσότητες του αζώτου που απονιτροποιούνται και λόγω της αέριας μορφής διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα και αυτές που κινούνται βαθιά προς τα υπόγεια νερά λόγω της στραγγίσισης των εδαφών. Για τα δύο διαφορετικά εδάφη οι δύο αυτές διαδικασίες απωλειών αζώτου συμπεριφέρονται εντελώς διαφορετικά. Στο αργιλώδες έδαφος σημαντική ποσότητα νιτρικών απονιτροποιείται (Σχήμα 5α), ενώ αυτό δεν συμβαίνει στο πηλώδες έδαφος, όπου είναι σχεδόν ασήμαντη. Το αντίθετο συμβαίνει με τις ποσότητες αμμωνιακού και νιτρικού αζώτου που εκπλύνονται προς τα βαθύτερα στρώματα του εδάφους. Η έκπλυση είναι σηματική μόνο στο πηλώδες έδαφος (Σχήμα 5β). Οι λόγοι της διαφοροποίησης αυτής είναι η υγρασία που συγκρατείται στο έδαφος. Στο αργιλώδες έδαφος η περιεχόμενη υγρασία είναι αρκετά υψηλή λόγω της μηδενικής βαθειάς διήθησης και της υψής του εδάφους που ευνοεί την απονιτροποίηση ενώ δεν υπάρχει έκπλυση αζώτου. Ενώ στο πηλώδες έδαφος η υγρασία είναι χαμηλή και έτσι δεν ευνοείται η απονιτροποίηση. Λόγω της μεγαλύτερης υδραυλικής αγωγιμότητας των πηλωδών εδαφών η βαθειά διήθηση νερού είτε λόγω βροχής, είτε λόγω άρδευσης είναι σημαντική και κατά συνέπεια και η έκπλυση νιτρικών είναι μεγαλύτερη. Από τα Σχήματα 3β και 5β προκύπτει ότι από τα δύο εδάφη βαθειά διήθηση και έκπλυση νιτρικών υπάρχει στο πηλώδες έδαφος σε ποσότητες που αντιστοιχούν κατά τη διάρκεια ενός πλήρους έτους σε 25 cm νερού και 90 kg/ha.



Σχήμα 5. Αθροιστική α) ποσότητα απονιτροποιημένου νιτρικού αζώτου στο αργιλώδες έδαφος και β) ποσότητα αζώτου που εκπλύνεται στο πηλώδες έδαφος.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ένα σύνθετο μαθηματικό μοντέλο, όπως το WANISIM, μπορεί να δώσει χρήσιμες πληροφορίες για την διακύμανση της εδαφικής υγρασίας και της μάζας του αμμωνιακού και του νιτρικού αζώτου στο έδαφος. Ο συνεχής υπολογισμός της εδαφικής υγρασίας και των μορφών του αζώτου για διαφορετικά σενάρια αζωτούχου λίπανσης και προγράμματος άρδευσης έχει ως σκοπό την σωστή διαχείριση νερού και αζώτου σε επίπεδο αγροτεμαχίου, ώστε να γίνεται η καλύτερη αξιοποίηση υδατικών πόρων, αποδοτικής λίπανσης και προστασίας των υπογείων νερών από την ρύπανση με νιτρικά, αλλά και την ρύπανση των επιφανειακών αποδεκτών με το στραγγιστικό νερό.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο WANISIM για την προσομοίωση της δυναμικής του νερού και του αζώτου σε δύο διαφορετικής υψής εδάφη και για τις

κλιματικές συνθήκες της πεδιάδας της Θεσσαλίας. Η προσομοίωση της δυναμικής του αζώτου έδειξε ότι παρόλο που εφαρμόστηκε η ίδια ποσότητα αζωτούχου λίπανσης, οι απονιτροποιημένες ποσότητες και η έκπλυση νιτρικού αζώτου ήταν διαφορετικά στα δύο εδάφη λόγω της διαφορετικής υδατικής διαίτας των εδαφών. Επίσης ότι για την συγκεκριμένη ποσότητα αζώτου που εφαρμόστηκε εμφανίστηκε έκπλυση κατά την διάρκεια της βλαστικής περιόδου μόνο στο πηλώδες έδαφος, που εμφανίζει και βαθειά διήθηση νερού.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μοντέλο μπορεί να περιγράψει την δυναμική του νερού και του αζώτου στο έδαφος κάτω από συνθήκες άρδευσης και λίπανσης. Μπορεί δηλαδή να χρησιμοποιηθεί ως μέσο διαχείρισης νερού και αζώτου ώστε να επιτυγχάνονται οι μέγιστες αποδόσεις των καλλιεργειών, να γίνεται εξοικονόμηση υδατικών πόρων, άριστη χρήση των λιπασμάτων και να μη προκαλούνται δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις με την έκπλυση νιτρικών στα υπόγεια νερά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αντωνόπουλος, Β. (1996) Προσομοίωση της δυναμικής του νερού και του αζώτου υπο συνθήκες άρδευσης και λίπανσης καλλιεργούμενων εδαφών, Πρακτικά 2ου Συνεδρίου Έγγειοβελτιωτικά Έργα - Διαχείριση Υδατικών Πόρων - Εκμηχάνιση Καλλιεργειών', ΓΕΩΤΕΕ, Λάρισα.

Αντωνόπουλος, Β. (1993) Ποιότητα και ρύπανση των υπογείων νερών. Υπηρεσία Δημοσιευμάτων του Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 175.

Antonopoulos, V. (1993) Simulation of water and nitrogen dynamics in soils during wastewater applications by using a finite element model. *Water Resources Management*, 7: 237-251.

Antonopoulos, V. and Z. Papazafiriou (1990) Solutions of one-dimensional water flow and mass transport equations in variably saturated porous media by the finite element method. *J. Hydrol.*, 119: 151-167.

Belmans, C., J.G. Wesseling and R.A. Feddes (1983) Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE, *J. Hydrol.*, 63: 271-286.

Bergstrom, L. and N.J. Jarvis (1991) Prediction of nitrate leaching losses from arable and under different fertilization intensities using the SOIL-SOILN models. *Soil Use and Management*, 7: 79-85.

Bijay-Singh, Y. Singh, and G.S. Sekhon (1995) Fertilizer-N use efficiency and nitrate pollution of groundwater in developing countries. *J. of Contaminant Hydrol.*, 20: 167-184.

Hutson, J.L. and R.J. Wagenet (1991) Simulating nitrogen dynamics in soils using a deterministic model. *Soil Use and Management*, 7: 74-94.

Huwe, B. and K.U. Totsch (1995) Deterministic and stochastic modelling of water, heat and nitrogen dynamics on different scales with WHNSIM, *J. of Contaminant Hydrol.*, 20:265-284.

Jarvis, N.J. (1995) Simulation of soil water dynamics and herbicide persistence in a silt loam soil using the MACRO model, *Ecological Modelling*, 81: 97-109.

Johnsson, H., Bergstrom, H.L., Jansson, P.E. and K. Paustian (1987) Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 18: 333-356.

Μπαμπατζιμόπουλος, Χ., Α.Βudina, και Δ.Καλφούντζος (1995) Αριθμητικός υπολογισμός του υδατικού ισοζυγίου ενός καλλιεργούμενου με βαμβάκι εδάφους. Πρακτικά 6ου Συνεδρίου της ΕΥΕ, Θεσσαλονίκη, σελ. 490-498.

Vandclooster, M., P.Viaene, J.Diels, J.Feyen (1995) A deterministic evaluation analysis applied to an integrated soil-crop model, *Ecological Modelling*, 81: 183-195.

Vereecken, H., M.Vandclooster, M. Swerts and J.Diels (1991) Simulating water and nitrogen behaviour in soils cropped with winter wheat. *Fertilizer Research*, 27:233-243.

Van Genuchten, M.Th. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci.Soc. Am. J.*, 44: 892-898.

Wyseure, G.C.L., K.Sanmuganathan, and J.R.O'Callaghan (1994) Use of simulation for combining rainfed and irrigated sugarcane production in the dry zone of Sri Lanka. *Computers and Electronics in Agriculture*, 11: 323-335