

Προσομοίωση της κίνησης των νιτρικών στο εδαφικό προφίλ αγροτικών συστημάτων

P.B. Καραμέτου, Γ.Δ. Γκίκας και Β.Α. Τσιχριντζής

Εργαστήριο Οικολογικής Μηχανικής και Τεχνολογίας, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος,
Πολυτεχνική Σχολή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 67100 Ξάνθη,
e-mail: ggkikas@env.duth.gr

Περίληψη

Τα μοντέλα είναι σημαντικά εργαλεία για την αποτίμηση της επίδρασης των αγροτικών πρακτικών στην ποιότητα του επιφανειακού και υπόγειου νερού. Στην εργασία γίνεται χρήση του μοντέλου Root Zone Water Quality Model (RZWQM) για την εκτίμηση της συγκέντρωσης των νιτρικών στο εδαφικό προφίλ αγρού με καλλιέργεια καλαμπόκι, κάτω από διαφορετικές πρακτικές λίπανσης και άρδευσης. Το μοντέλο εφαρμόστηκε σε αγρό της περιοχής Κιμμερίων του Ν. Ξάνθης για το έτος 2008, με μετεωρολογικά δεδομένα από το σταθμό του Εργαστηρίου Οικολογικής Μηχανικής και Τεχνολογίας που βρίσκεται στην ίδια περιοχή. Αξιολογήθηκαν τρία σενάρια: το σενάριο της αρχικής κατάστασης, το σενάριο 1 στο οποίο εφαρμόστηκε διπλάσια λίπανση από αυτό της αρχικής κατάστασης και το σενάριο 2 στο οποίο εφαρμόστηκε διαφορετικό πρόγραμμα άρδευσης από αυτό του σεναρίου 1. Στο επιφανειακό εδαφικό στρώμα (βάθος 15cm) μεγαλύτερη συγκέντρωση νιτρικών παρατηρήθηκε με τα δεδομένα του σεναρίου 2. Σε βάθη 60 cm, 90 cm και 120 cm μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αζώτου νιτρικών 72 μg/g, 64 μg/g και 45 μg/g, αντίστοιχα, παρατηρήθηκαν με τα δεδομένα του σεναρίου 1. Το RZWQM είναι χρήσιμο μοντέλο στην εκτίμηση επιπτώσεων αγροτικών δραστηριοτήτων σε υπόγεια νερά.

Λέξεις κλειδιά: νιτρορύπανση, RZWQM, μαθηματικό μοντέλο

Εισαγωγή

Στα αγροτικά συστήματα τα φυτά προσλαμβάνουν τη μισή ή και μικρότερη ποσότητα αζώτου και φωσφόρου από αυτήν που προστίθεται σε αυτά με τα λιπάσματα. Επομένως, η επιπλέον ποσότητα λιπασμάτων ξεπλένεται και απομακρύνεται από τους αγρούς με την επιφανειακή απορροή ή διηθείται στον υπόγειο υδροφόρο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων νερών. Στις ΗΠΑ, οι αγροτικές μη σημειακές πηγές ρύπανσης αποτελούν τη σημαντικότερη αιτία της ρύπανσης των ποταμών και λιμνών (USEPA 2002).

Στην Ελλάδα, σύμφωνα με έκθεση του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ), η χρήση λιπασμάτων την περίοδο 1990 - 2004, μειώθηκε κατά 38% για το άζωτο και 41% για το φώσφορο (OECD 2008). Ιδιαίτερα για το άζωτο (N), η μείωση ήταν αρκετά μεγάλη σε σχέση τόσο με τις χώρες του ΟΟΣΑ όσο και με τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Παρά τη μείωση του N υπάρχουν πολλές ενδείξεις για συνέχιση της ρύπανσης με νιτρικά από αγροτική δραστηριότητα στα επιφανειακά και παράκτια νερά σε επίπεδα επιβλαβή για τα υδατικά οικοσυστήματα (Gikas et al. 2006a, 2006b). Επίσης, μετρήσεις νιτρικών σε υπόγεια νερά αγροτικών περιοχών έδειξαν ότι το 10% έως 20% των δειγμάτων ξεπερνούσαν το όριο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για πόσιμο νερό (50 mg NO₃/L) (OECD 2008).

Μια αποτελεσματική μεθοδολογία για την ανάπτυξη συστημάτων αγροτικής διαχείρισης που στοχεύουν στη μείωση της μη σημειακής ρύπανσης, είναι αυτή μέσω της προσομοίωσης με χρήση μοντέλων. Έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες από ερευνητές, αλλά και από

διαχειριστές φυσικών πόρων, για την προσομοίωση των μη-σημειακών πηγών ρύπανσης σε κλίμακα αγρού και λεκάνης απορροής και έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα. Παραδείγματα τέτοιων μοντέλων είναι το LEACHM (Hutson and Wagenet 1992), το CLEAMS (Leonard et al. 1987), το PRZM (USEPA 2003), το RZWQM (Ahuja et al. 2000) κ.α.

Σκοπός της εργασίας είναι η προσομοίωση της κίνησης και η εκτίμηση της απώλειας N από αγροτικές περιοχές κάτω από διαφορετικές συνθήκες λίπανσης και άρδευσης με χρήση του μοντέλου RZWQM.

Μέθοδος και υλικά

Περιγραφή του μοντέλου RZWQM

Το μοντέλο RZWQM (Ahuja et al. 2000) είναι ένα μοντέλο που συνδυάζει φυσικές, βιολογικές και χημικές διαδικασίες για την προσομοίωση της ανάπτυξης των φυτών, της κίνησης του νερού των θρεπτικών και των φυτοφαρμάκων πάνω και διαμέσου της ζώνης των ριζών αγροτικής περιοχής. Το βασικό χαρακτηριστικό του μοντέλου είναι η ικανότητά του να προσομοιώνει διάφορες καλλιεργητικές πρακτικές και τις επιδράσεις αυτών στην ποιότητα του νερού και την ανάπτυξη των φυτών. Έχει εφαρμοστεί σε πολλές περιπτώσεις στις ΗΠΑ, στον Καναδά, στην Πορτογαλία, στη Γερμανία και αλλού για την πρόβλεψη της ανάπτυξης των καλλιεργειών τους και της κίνησης των νιτρικών στην επιφανειακή απορροή και στον υπόγειο υδροφόρο. Το RZWQM είναι επομένως ένα εργαλείο για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των εναλλακτικών γεωργικών στρατηγικών διαχείρισης στο υπόγειο περιβάλλον. Δηλαδή το μοντέλο προβλέπει τις ενδεχόμενες φορτίσεις ρύπων στα υπόγεια ύδατα, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την αξιολόγηση των επιπτώσεών τους στην ποιότητα του εδάφους και των υπόγειων υδάτων.

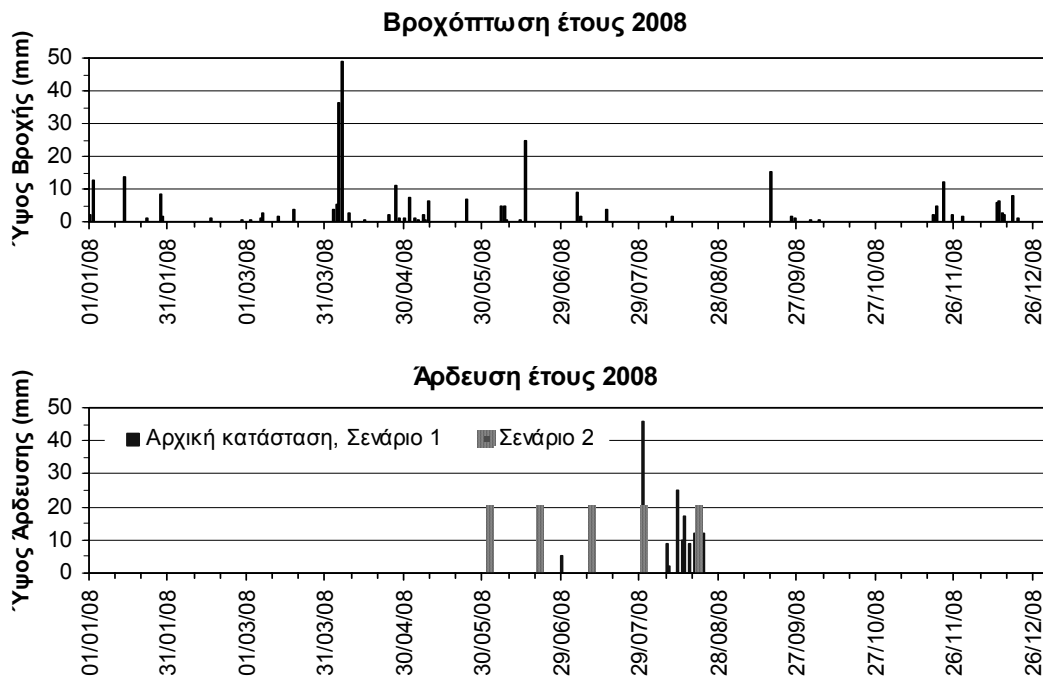
Για την εφαρμογή του μοντέλου απαιτούνται πληροφορίες σχετικές με: (1) τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής μελέτης (βροχόπτωση, θερμοκρασία και ταχύτητα αέρα, ηλιακή ακτινοβολία, σχετική υγρασία), (2) τα χαρακτηριστικά του εδάφους (κλίση, υψόμετρο, γεωγραφικό πλάτος, σύσταση εδάφους, αρχική κατάσταση του εδάφους σε θρεπτικά συστατικά κ.α.), (3) το καλλιεργούμενο φυτό, και (4) πληροφορίες για τις αγροτικές πρακτικές (όργωμα, άρδευση, λίπανση, εφαρμογή φυτοφαρμάκων).

Εφαρμογή του μοντέλου RZWQM

Το μοντέλο RZWQM2 εφαρμόστηκε σε αγρό που βρίσκεται στην περιοχή Κιμμερίων του Νομού Ξάνθης για το έτος 2008. Τα μετεωρολογικά δεδομένα (βροχόπτωση και θερμοκρασία) που εισήχθησαν στο μοντέλο λήφθηκαν από μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται στην περιοχή μελέτης και συγκεκριμένα στις εγκαταστάσεις του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος. Η κοκκομετρική σύσταση του εδάφους, όπου καλλιεργείται καλαμπόκι, είναι: 79,82% άμμος, 11,90% ιλύς και 8,28% άργιλος. Η συγκέντρωση του οργανικού άνθρακα και του φωσφόρου Olsen στο επιφανειακό εδαφικό στρώμα (0-25 cm) είναι 0,77% και 18,12 ppm, αντίστοιχα.

Αρχικά το μοντέλο «έτρεξε» για την αρχική κατάσταση θεωρώντας ότι το πρόγραμμα λίπανσης για την συγκεκριμένη καλλιέργεια ήταν 50 kg NO₃-N/ha και 50 kg NH₄-N/ha με εφαρμογή την 1/5/2008 και 100 kg NO₃-N/ha με εφαρμογή την 1/6/2008. Η τιμή του pH στους εδαφικούς ορίζοντες κυμαίνεται από 7,01 έως 7,67. Λόγω έλλειψης μετρήσεων πεδίου η υδραυλική αγωγιμότητα των εδαφικών οριζόντων υπολογίζεται από το μοντέλο (με βάση την κοκκομετρία) ενώ για τις άλλες παραμέτρους τέθηκαν οι εξ ορισμού (default) τιμές του μοντέλου. Παράγοντες που αφορούν στην κίνηση των νιτρικών στο έδαφος όπως είναι η αζωτοδέσμευση, η ανοργανοποίηση του οργανικού αζώτου, η απονιτροποίηση, η απώλεια υπό μορφή αερίου, η ποσότητα αζώτου που προσλαμβάνεται από τα φυτά, λαμβάνονται υπόψη και υπολογίζονται από το συγκεκριμένο μοντέλο. Για την άρδευση εφαρμόστηκε το ενσωματωμένο στο μοντέλο πρόγραμμα άρδευσης (συνολικό ύψος 150 mm) για τη

συγκεκριμένη καλλιέργεια πέρα από τη βροχόπτωση (Εικόνα 1). Στη συνέχεια εξετάστηκαν άλλα δύο σενάρια (σενάριο 1 και σενάριο 2) τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίνονται με αυτά της αρχικής κατάστασης. Στο «σενάριο 1», θεωρήθηκε ότι εφαρμόστηκε διπλάσια ποσότητα λίπανσης και στο «σενάριο 2» εκτός από διπλάσια ποσότητα λίπανσης εφαρμόστηκε και διαφορετικό πρόγραμμα άρδευσης σύμφωνα με το οποίο η άρδευση του αγρού γίνεται κάθε 20 ημέρες με ύψος άρδευσης 20 mm (Εικόνα 1).



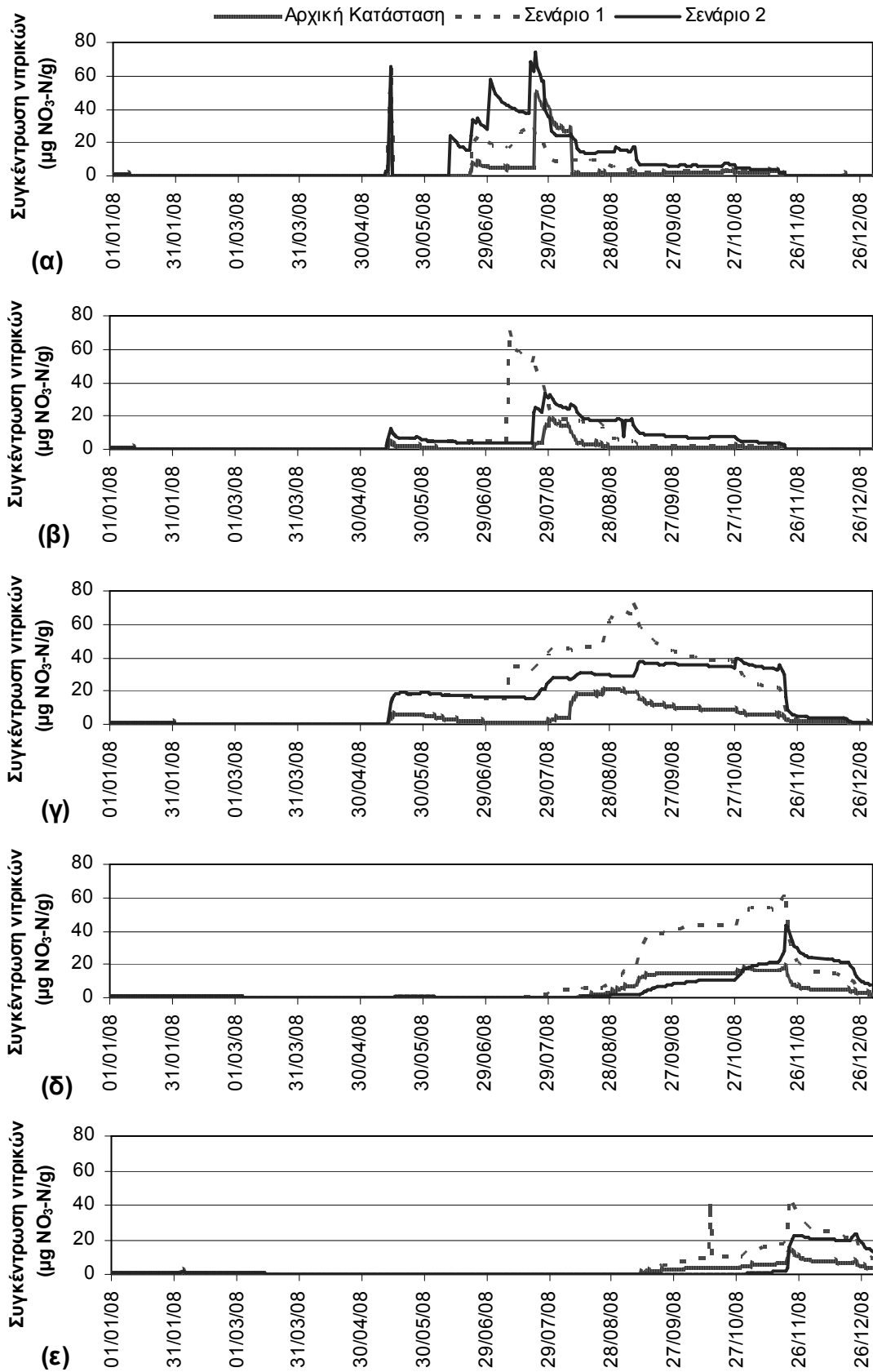
Εικόνα 1. Ύψος βροχής και ύψος άρδευσης έτους 2008 στην περιοχή μελέτης.

Αποτελέσματα και συζήτηση

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του RZWQM για τα δεδομένα της αρχικής κατάστασης, του σεναρίου 1 και του σεναρίου 2 παρουσιάζονται στην Εικόνα 2. Η συγκέντρωση των νιτρικών στο εδαφικό προφίλ εξαρτάται τόσο από την ποσότητα λίπανσης όσο και από την συχνότητα και ποσότητα της άρδευσης. Συγκεκριμένα σε βάθος 15 cm μεγαλύτερη συγκέντρωση αζώτου νιτρικών (74,2 $\mu\text{g/g}$) παρατηρείται με τα δεδομένα του σεναρίου 2 και συμπίπτει με την ημέρα άρδευσης (Εικόνα 2α). Στα υπόλοιπα βάθη (30 cm, 60 cm, 90 cm και 120 cm) μεγαλύτερη συγκέντρωση αζώτου νιτρικών παρατηρείται με τα δεδομένα του σεναρίου 1 (Εικόνα 2β,γ,δ,ε) γεγονός που αποδίδεται στη διαφορετική κατανομή στο χρόνο εφαρμογής του νερού άρδευσης (Εικόνα 1).

Συγκεκριμένα, σε βάθη 60 cm, 90 cm και 120 cm η μέγιστη συγκέντρωση του αζώτου νιτρικών με τα δεδομένα του σεναρίου 1 είναι αρκετά υψηλή, 72 $\mu\text{g/g}$, 64 $\mu\text{g/g}$ και 45 $\mu\text{g/g}$, αντίστοιχα και εμφανίζεται χρονικά την 8/9/2008, την 20/11/2008 και 21/11/2008, αντίστοιχα. Με τα δεδομένα του σεναρίου 2 η συγκέντρωση του αζώτου νιτρικών σε βάθη 60 cm, 90 cm και 120 cm είναι 39 $\mu\text{g/g}$ (την 28/10/2008), 43 $\mu\text{g/g}$ (την 20/11/2008) και 23 $\mu\text{g/g}$ (την 22/12/2008), αντίστοιχα (Εικόνα 2).

Αυτό σημαίνει ότι οι ποσότητες αυτές των νιτρικών δεν είναι διαθέσιμες για την καλλιέργεια (καλαμπόκι) αφ' ενός διότι βρίσκονται κάτω από το ριζικό σύστημα των φυτών και αφ' ετέρου διότι είναι εκτός της περιόδου ανάπτυξης της συγκεκριμένης καλλιέργειας. Επομένως, αυτές οι ποσότητες των νιτρικών θα καταλήξουν στον υπόγειο υδροφόρο υποβαθμίζοντας την ποιότητα του υπόγειου νερού.



Εικόνα 2. Αποτελέσματα προσομοίωσης της κατανομής αζώτου νιτρικών στο εδαφικό προφίλ σε βάθος: (α) 15 cm, (β) 30cm, (γ) 60cm, (δ) 90cm, (ε) 120 cm.

Με τα δεδομένα της αρχικής κατάστασης παρατηρούνται μικρότερες συγκεντρώσεις αζώτου νιτρικών (περίπου 20 µg/g) σε βάθη μεγαλύτερα από 30 cm. Αυτό δείχνει ότι οι απώλειες των νιτρικών είναι μικρότερες συγκρινόμενες με αυτές των άλλων σεναρίων. Επομένως, η σωστή λίπανση μπορεί να αποτρέψει την υποβάθμιση της ποιότητας του υπόγειου νερού. Συνήθως, η πρακτική που ακολουθείται από τους αγρότες είναι αυτή της υπερλίπανσης, με επακόλουθο τις μεγάλες απώλειες θρεπτικών, τα οποία δεν χρησιμοποιούνται από τις καλλιέργειες, με την επιφανειακή απορροή και με την διήθηση. Η χρήση του μοντέλου, μετά από κατάλληλη βαθμονόμηση, δίνει τη δυνατότητα να εκτιμηθούν οι ποσότητες των θρεπτικών που καταλήγουν στον υδροφόρο αλλά και να προσδιοριστούν οι συνθήκες που επιταχύνουν, επιβραδύνουν ή εκμηδενίζουν τη διαδικασία αυτή με την εξέταση εναλλακτικών σεναρίων.

Λύση στο πρόβλημα της απώλειας των θρεπτικών από τις καλλιέργειες προς τον υδροφόρο μπορούν να δώσουν και τα δένδρα των αγροδοασικών συστημάτων, τα οποία είναι η σκόπιμη συγκαλλιέργεια δένδρων και ποωδών φυτών (Παπαναστάσης 2005, Jose 2009). Το βαθύ και πιο εκτεταμένο ριζικό σύστημα των δένδρων, λειτουργεί σαν δίκτυο προστασίας μέσω του οποίου τα θρεπτικά, τα οποία διηθούνται κάτω από τη ζώνη των ριζών των αγροτικών καλλιεργειών, προσλαμβάνονται από τις ρίζες των. Έτσι, λόγω αυτής της δέσμευσης, μειώνεται η κίνηση των θρεπτικών προς τα υπόγεια νερά. Με τον τρόπο αυτό τα θρεπτικά (N και P) μέσω των ριζών επανέρχονται πίσω στο σύστημα αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα και την απόδοση του συστήματος. Επιπλέον, επειδή τα δένδρα έχουν μεγαλύτερη περίοδο ανάπτυξης σε σχέση με τις αγροτικές καλλιέργειες, χρησιμοποιούν περισσότερο αποτελεσματικά τα θρεπτικά άλατα του εδάφους και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα, οι Allen et al. (2004) μέτρησαν μείωση 72% του NO₃-N σε σύστημα καρυδιά - βαμβάκι και σε βάθος 90 cm σε σχέση με άλλο το οποίο ήταν μονοκαλλιέργεια βαμβακιού.

Συμπεράσματα

Το RZWQM είναι ένα μοντέλο που συνδυάζει φυσικές, βιολογικές και χημικές διαδικασίες για την προσομοίωση της κίνησης του εδαφικού νερού, της ανάπτυξης των φυτών, της τύχης των φυτοφαρμάκων και της δυναμικής του αζώτου και του άνθρακα στο έδαφος. Αξιολογώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το τρέξιμο του μοντέλου για τρία διαφορετικά σεναρία, προκύπτει ότι υπάρχει αρκετά μεγάλη διαφοροποίηση της συγκέντρωσης των νιτρικών στο εδαφικό προφίλ αγρού με καλλιέργεια καλαμπόκι.

Η συγκέντρωση νιτρικών στο υπέδαφος εξαρτάται τόσο από την ποσότητα των χρησιμοποιούμενων λιπασμάτων όσο και από τη συχνότητα και την ποσότητα της άρδευσης. Όταν η λίπανση συμπίπτει χρονικά με βροχόπτωση ή με εφαρμογή νερού άρδευσης, τότε μεγάλες ποσότητες νιτρικών διηθούνται στα βαθύτερα στρώματα του εδάφους. Η διαρκής ενημέρωση των καλλιεργητών σχετικά με σύγχρονες καλλιεργητικές πρακτικές (άρδευσης και λίπανσης), οι οποίες αυξάνουν την οικονομική απόδοση με τη ελάχιστη δυνατή επιβάρυνση του περιβάλλοντος είναι αναγκαία.

Τα αγροδοασικά συστήματα μπορούν να διαδραματίσουν ένα σημαντικό ρόλο στην βελτίωση της ποιότητας του επιφανειακού και υπόγειου νερού, το οποίο επιβαρύνεται από την εντατική καλλιέργεια και να συντελέσουν σημαντικά στην αποτροπή της νιτρορρύπανσης.

Βιβλιογραφία

Ahuja L.R., J.D. Hanson, K.W. Rojas and M.J. Shaffer. 2000. Model overview. p. 1–12. In L.R. Ahuja, K.W. Rojas, J.D. Hanson, M.J. Shafer, and L.Ma (ed.) Root Zone Water Quality Model. Modeling management effects on water quality and crop production. Water Resour. Publ., LLC, Highlands Ranch, CO.

- Allen S., S. Jose, P.K.R. Nair, B.J. Brecke, P. Nkedi-Kizza and C.L. Ramsey. 2004. Safety net role of tree roots: experimental evidence from an alley cropping system. *For Ecol Manage*, 192:395–407.
- Gikas, G.D., T. Yiannakopoulou and V.A. Tsihrintzis. 2006a. Modeling of non-point source pollution in a Mediterranean drainage basin. *Environmental Modeling and Assessment*, 11: 219-233.
- Gikas, G.D., T. Yiannakopoulou and V.A. Tsihrintzis. 2006b. Water quality trends in a lagoon impacted by non-point source pollution after implementation of protective measures, *Hydrobiologia*, 563:385-406.
- Hutson, J.L. and R.J. Wagenet. 1992. LEACHM: Leaching estimation and chemistry model: A process-based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone. Version 3.0. Res. Ser. 93-3. Dep. of Soil, Crop and Atmospheric Sci., Cornell Univ., Ithaca, NY.
- Jose S. 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agrofor Syst* 76:1-10.
- Leonard, R.A., W.G. Knisel and D.A. Still. 1987. GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. *Trans. ASAE* 30:1403–1418.
- OECD. 2008. Environmental Performance of Agriculture in OECD Countries since 1990: Main Report, Paris, France.
- Παπαναστάσης Β.Π. 2005. Δασογεωργικά Συστήματα και το Ευρωπαϊκό Ερευνητικό Πρόγραμμα SAFE, σελ. 5-12. Δασογεωργικά Συστήματα Χρήσης Γης (Τεχνικές και Κοινωνικοπολιτικές Απόψεις). Πρακτικά Επιστημονικής Ημερίδας Helexpo (Zootechnia). Θεσσαλονίκη, 4 Φεβρουαρίου 2005, Εργαστήριο Λιβαδικής Οικολογίας. Δημ. Νο 2.
- USEPA. 2003. PRZM3. Available at www.epa.gov/ceampubl/gwater/przm3/index.htm (accessed 7 Sept. 2005; verified 10 Feb. 2006). USEPA, Washington, DC.

Simulation of nitrate movement in the subsoil profile of agricultural systems

R.B. Karametou, G.D. Gikas and V.A. Tsihrintzis

Laboratory of Ecological Engineering and Technology, Department of Environmental Engineering, School of Engineering, Democritus University of Thrace, 67100 Xanthi, Greece, e-mail: ggkikas@env.duth.gr

Summary

Models are important tools in assessing the effect of agricultural practices on the quality of surface and ground waters. In this work, the model RZWQM (Root Zone Water Quality Model) is used in estimating nitrate concentration in the subsoil profile of an agricultural field cultivated with corn, under different fertilization and irrigation practices. The model was applied in a field near Kimmeria Village in Xanthi for year 2008. Meteorological data from the station of the Laboratory of Ecological Engineering and Technology, located in the area, were used. Three scenarios were evaluated with the model: the scenario of current condition, scenario 1 with double fertilization applied compared to the current condition, and scenario 2 where a different irrigation program was applied compared to scenario 1. In the top subsoil layer (depth 15cm), increased nitrate concentrations were predicted under scenario 2. In depths 60 cm, 90 cm, and 120 cm increased nitrate nitrogen concentrations 72 µg/g, 64 µg/g and 45 µg/g, respectively, were observed under scenario 1. RZWQM is a useful model for the estimation of impact of agricultural activities on ground water.

Key words: Nitrate pollution, RZWQM, mathematical model