

Εφαρμογή των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών στη προσομοίωση συνδυασμένης λειτουργίας επιφανειακών και υπόγειων υδάτων σε λεκάνη απορροής. Η περίπτωση του Άνω Ανθεμούντα

Σ. Σεβαστάς και Ι. Υφαντής

Εργαστήριο Γεωδαισίας & Γεωματικής, Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής,
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,
ifadis@civil.auth.gr

Περίληψη: Η ταχεία ανάπτυξη της Πληροφορικής στην εποχή μας, έχει σαν αποτέλεσμα, μεταξύ άλλων τη δημιουργία και εξάπλωση νέων επιστημονικών τεχνολογιών. Ανάμεσα στις νέες αυτές τεχνολογίες είναι και τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών τα οποία αποτελούν πανάκεια σε ότι αφορά τη συλλογή, ανάλυση και επεξεργασία γεωχωρικών δεδομένων, που έχουν ως σκοπό τη λήψη αποφάσεων σε περιβαλλοντικά προβλήματα. Στόχος της εργασίας αυτής είναι η ανάδειξη της σπουδαιότητας των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, ως ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία για την μελέτη, παρακολούθηση και επεξεργασία όλων σχεδόν των πληροφοριών που σχετίζονται με τους υδατικούς πόρους, επιφανειακούς και υπόγειους.

1. Εισαγωγή

Είναι γεγονός αναμφισβήτητο πως οι υδατικοί πόροι αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση, τόσο για τη διατήρηση της ίδιας της ζωής, όσο και για την ανάπτυξη κάθε είδους δραστηριότητας. Τα νερό ως φυσικός πόρος συμμετέχει στις παραγωγικές διαδικασίες, αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της οικονομικής ανάπτυξης της κοινωνίας και συμβάλλει στην κάλυψη ευρύτερων ανθρώπινων αναγκών (γεωργία, κτηνοτροφία, Αλιεία-Ιχθυοκαλλιέργεια, βιομηχανία, ενέργεια, ψυχαγωγία κτλ). Τις τελευταίες δεκαετίες η αύξηση του πληθυσμού της γης, σε συνδυασμό με άλλους παράγοντες όπως η εντατικοποίηση της γεωργίας, η ανάπτυξη της βιομηχανίας, η ανεξέλεγκτη αστικοποίηση, έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της ζήτησης του νερού. Ταυτόχρονα οι κλιματικές αλλαγές, η μόλυνση των υδατικών πόρων από στερεά απόβλητα και οι επεμβάσεις του ανθρώπου στο φυσικό περιβάλλον οδηγούν στη συνεχή υποβάθμιση των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών των υδατικών αποθεμάτων. Αποτελεί πρόκληση μα και επιτακτική ανάγκη της κοινωνίας η ανάπτυξη μια αειφορικής, βιώσιμης υδατικής πολιτικής, η οποία θα έχει ως βασικό στόχο την αντιμετώπιση των υδατικών πόρων όχι μόνο ως παράγοντα ανάπτυξης αλλά και ως παράγοντα ποιότητας ζωής και περιβάλλοντος. Σε επίπεδο

Ευρώπης καθιερώνεται μια νέα υδατική πολιτική (Οδηγία Πλαίσιο 2000/60) που θέτει ως περιβαλλοντικό στόχο τον περιορισμό της κατανάλωσης στα όρια των ανανεώσιμων αποθεμάτων νερού. Οι κυριότερες αρχές αυτής της πολιτικής συνοψίζονται στα παρακάτω:

- το νερό δεν είναι εμπορικό προϊόν αλλά αποτελεί κληρονομιά που πρέπει να προστατεύεται και να τυγχάνει της κατάλληλης μεταχείρισης
- ορίζεται τη χρήση οικονομικών μέτρων για την επίτευξη περιβαλλοντικών στόχων, δηλαδή «ο ρυπαίνων πληρώνει»
- θεσμοθετείται ενεργός συμμετοχή όλων των φορέων και του κοινού
- προάγεται τη διασυνοριακή συνεργασία μεταξύ χωρών στην περίπτωση των διεθνών περιοχών λεκάνης απορροής ποταμού
- ορίζεται η δημιουργία δικτύου παρακολούθησης ποιοτικής και ποσοτικής κατάστασης των επιφανειακών και υπόγειων νερών
- προστατεύονται όλα τα επιφανειακά ύδατα (ποταμοί, λίμνες, παράκτια) και τα υπόγεια

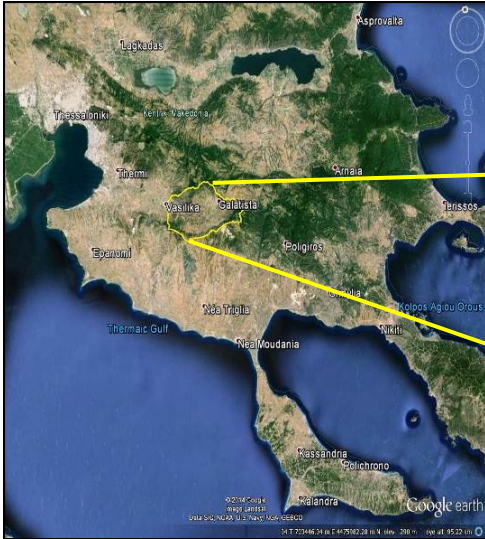
Το σημαντικότερο όμως σημείο είναι ότι καθιερώνει ως χωρική μονάδα διαχείρισης των υδατικών πόρων και επίτευξης των στόχων τη «Λεκάνη απορροής ποταμού».

Με βάση όλα τα παραπάνω στην εργασία αυτή γίνεται μια προσπάθεια εφαρμογής ενός ολοκληρωμένου υδρολογικού μοντέλου για τη προσομοίωση των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων, με τη βοήθεια ενός ευρύτατα διαδεδομένου λογισμικού Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, το ArcGIS, στη λεκάνη απορροής του Άνω Ανθεμούντα.

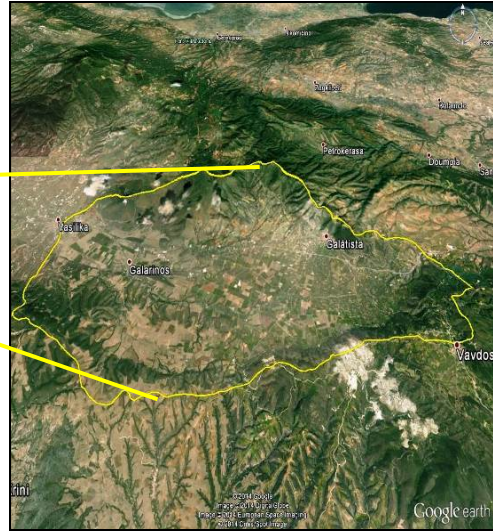
2. Περιοχή μελέτης – Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά

Η περιοχή αποτελεί το ανατολικό τμήμα της ευρύτερης λεκάνης απορροής του Ανθεμούντα, το οποίο ονομάζεται Άνω Ανθεμούντας. Στην περιοχή απαντώνται η δημοτική κοινότητα της Γαλατίστης και η τοπική κοινότητα του Γαλαρινού, οι οποίες περιλαμβάνουν τα χωριά Γαλάτιστα και Γαλαρινός καθώς και τους οικισμούς Κιουρκτσόγλου και Αγίας Αναστασίας. Τα όρια της λεκάνης εκτείνονται περίπου από το χωριό Βασιλικά (ανατολικά) ως το χωριό Βάβδος (δυτικά) (σχήματα 1,2).

Από γεωμορφολογική άποψη η λεκάνη είναι πεδινή στο μεγαλύτερο τμήμα της και μόνο στα όριά της περιφερειακά από βόρεια προς τα ανατολικά και νότια εμφανίζει υψώματα με ιδιαίτερα αξιόλογη κλίση (Latinopoulos et al. 2001a), ενώ η έκταση της υπολογίζεται περίπου στα 110 km². Επιπλέον, η λεκάνη διαρρέεται από τον ομώνυμο ποταμό, ο οποίος παρουσιάζει ένα καλά αναπτυγμένο σύστημα αποστράγγισης των επιφανειακών νερών της λεκάνης απορροής (υδρογραφικό δίκτυο) και εκβάλλει στον Θερμαϊκό Κόλπο (Latinopoulos et al. 2001a). Το ποτάμι ωστόσο



Σχήμα 1. Η λεκάνη του Άνω Ανθεμούντα (επεξεργασία εικόνας Google Earth)



Σχήμα 2. Όρια της λεκάνης (επεξεργασία εικόνας Google Earth)

σο παρουσιάζεται ξηρό και χωρίς μόνιμη ροή κατά το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου. Αυτό εκτιμάται πως οφείλεται κυρίως στην παρουσία εδαφών μέσης σύστασης με μέτρια ως μεγάλη υδατοπερατότητα αλλά και στις μέτριες ως χαμηλές βροχοπτώσεις (Mitsios et al. 2009).

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που δομούν την λεκάνη του Άνω Ανθεμούντα χωρίζονται σε προαλπικούς (παλαιζωϊκούς και μεσοζωϊκούς), και σε μεταλπικούς. Οι πρώτοι απαντούν κυρίως στα πρηνή της λεκάνης αλλά αποτελούν και το υπόβαθρό της, ενώ οι δεύτεροι καλύπτουν κυρίως το πεδινό τμήμα και αποτελούνται από νεογενείς και τεταρτογενείς σχηματισμούς. Τα πετρώματα που δομούν την περιοχή μελέτης χωρίζονται, σύμφωνα με την υδρογεωλογική τους συμπεριφορά, σε δύο κύριες ομάδες. Στην πρώτη ομάδα ανήκουν οι χαλαροί σχηματισμοί και στη δεύτερη ομάδα οι βραχώδεις σχηματισμοί. Οι δύο ομάδες παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ τους στον μηχανισμό κίνησης των υπόγειων νερών και στην ικανότητα αποθήκευσης και απόληψής τους. Η υδατοπερατότητα των χαλαρών σχηματισμών οφείλεται στους ανοικτούς πόρους που υπάρχουν στα μεταξύ των κόκκων διάκενα. Η υδατοπερατότητα των βραχωδών σχηματισμών οφείλεται στο δίκτυο των ασυνεχειών που υφίσταται μέσα στη μάζα τους, δηλαδή επιφανειών στρώσεως και σχιστότητας, διακλάσεων, ρηγματώσεων κτλ. Στην πρώτη ομάδα ανήκουν οι Νεογενείς και οι Τεταρτογενείς σχηματισμοί, ενώ στη δεύτερη ομάδα τα μάρμαρα οι σχιστόλιθοι, οι γνεύσιοι και οι οφιόλιθοι. Οι σχηματισμοί του Τεταρτογενούς, κυρίως του Πλειστοκαίνου, παρουσιάζουν το μεγαλύτερο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον, καθώς η υδροπερατότητά τους μπορεί να ποικίλλει έντονα από θέση σε θέση, τόσο κατά την κατακόρυφη όσο και κατά την οριζόντια έννοια. Οι Πλειστοκαινι-

κές αποθέσεις συνίστανται κυρίως από αργίλους, άμμους, χάλικες, κροκάλες, και προσχωσιγενή ριπίδια. Υδροφορία υπό πίεση αναπτύσσεται στα αδρομερή υλικά των σχηματισμών αυτών. Η υδροφορία αυτή είναι η πλέον αξιόλογη τόσο στην περιοχή του κάμπου της Γαλάτιστας όσο και στην πεδινή περιοχή του Γαλαρινού (Latinopoulos et al. 2001a).

Η γνώση των υδραυλικών χαρακτηριστικών των υδροφορέων έχει πρωταρχική σημασία στη μελέτη των υδρογεωλογικών συνθηκών μιας περιοχής, διότι με τον προσδιορισμό αυτών καθίσταται δυνατή η εκτίμηση των αποθεμάτων του υπόγειου νερού, η μελέτη της κίνησης των ρύπων στους υδροφορείς και γενικότερα η ορθολογική διαχείριση του υδατικού δυναμικού της υπό μελέτη περιοχής.

3. GIS και Υδρολογικά μοντέλα επιφανειακής απορροής

Τα τελευταία χρόνια τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (ΓΣΠ-GIS) χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στην υδρολογία και στην ανάπτυξη μοντέλων, κυρίως διότι δίνουν στο χρήστη την ευχέρεια ευρείας επεξεργασίας των δεδομένων εισόδου του εκάστοτε μοντέλου. Μερικά από τα πιο γνωστά μοντέλα συνεχούς χρόνου που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι τα:

- SWAT (Arnold et al., 1998; Arnold and Fohrer, 2005)
- MIKE SHE (Refsgaard and Storm 1995)
- KINEROS (Woolhiser et al. 1990)
- PRMS (Leavesley et al. 1983)
- ANSWERS (Beasley et al. 1980)
- HSPF (Bicknell et al. 1993)
- CASC2D (Ogden and Julien 2002)
- DWSM (Borah et al. 2002)

Από τα παραπάνω τα SWAT και MIKE SHE είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα καθώς θεωρούνται περισσότερο ολοκληρωμένα. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε το SWAT (σε σχέση με το MIKE SHE) για τους παρακάτω λόγους:

- μπορεί να παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα χωρίς να είναι ιδιαίτερα απαιτητικό ως προς τον όγκο δεδομένων εισόδου, καθότι στην περιοχή μελέτης τα διαθέσιμα δεδομένα είναι λίγα λόγω έλλειψης προϋπαρχόντων μελετών
- διατίθεται δωρεάν
- είναι πιο εύχρηστο
- μπορεί να τρέξει σε περιβάλλον GIS

Το όνομα SWAT αποτελεί ακρωνύμιο των λέξεων «Soil And Water Assesment Tool». Πρόκειται για ένα μοντέλο φυσικής βάσης, συνεχούς χρόνου, το οποίο δημιουργήθηκε να προσομοιώνει, για μεγάλες περιόδους, τον αντίκτυπο των πρακτικών διαχείρισης της γης πάνω στο νερό, στα φερτά υλικά και στα αγροτικά χημικά (Neitsch et al. 2005).

4. Ανάπτυξη του μοντέλου – GIS

4.1 Εισαγωγή δεδομένων

Η επεξεργασία και η είσοδος των δεδομένων (input) για το SWAT γίνεται αποκλειστικά σε περιβάλλον GIS και πιο συγκεκριμένα στο ArcGIS.

Τα δεδομένα εισόδου συνοψίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- ☞ Μετεωρολογικά δεδομένα
- ☞ Χωρικά δεδομένα, τα οποία αποτελούνται από
 - Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM)
 - Εδαφολογικός χάρτης
 - Χάρτης χρήσεων γης

Η εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων γίνεται με απλά βήματα σε ένα περιβάλλον λογισμικού ιδιαίτερα φιλικό προς το χρήστη. Στη συνέχεια αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της εισαγωγής όλων των απαραίτητων δεδομένων, ο χρήστης μπορεί να εφαρμόσει (τρέξει) το μοντέλο και να επιτευχθεί η προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου.

Με το πέρας στις εκτέλεσης του μοντέλου προκύπτει σωρεία αποτελεσμάτων με πιο σημαντικά να είναι η απορροή και κυρίως η κατείδυση (recharge), η οποία εν συνεχεία εισάγεται ως δεδομένο εισόδου στο MODFLOW για την προσομοίωση των υπόγειων υδάτων.

4.2 Μετεωρολογικά δεδομένα

Τα απαραίτητα μετεωρολογικά δεδομένα (με ημερήσιο βήμα) για τη λειτουργία του ArcSWAT είναι τα παρακάτω:

- Βροχόπτωση (rainfall data)
- θερμοκρασία (temperature data)
- Σχετική υγρασία (relative humidity data)
- Ταχύτητα ανέμου (wind speed data)
- Ηλιακή ακτινοβολία (solar radiation data)

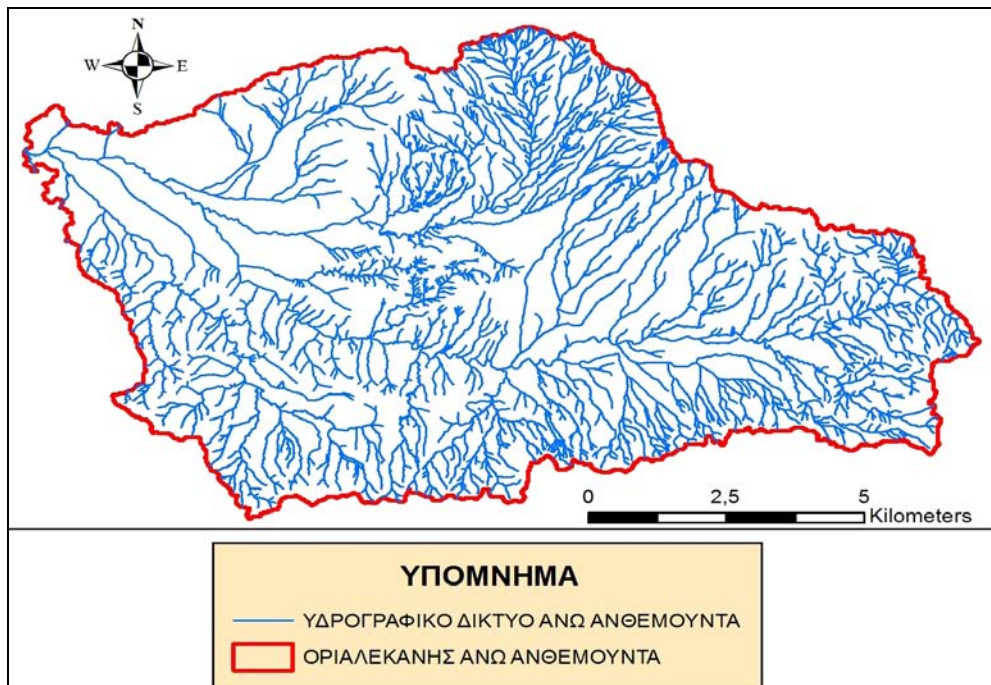
Για τη λεκάνη του Άνω Ανθεμούντα έχουν συλλεχθεί δεδομένα από πέντε σταθμούς. Οι σταθμοί αυτοί είναι οι παρακάτω:

- Μ.Σ. Αεροδρομίου (ιδιοκτησία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας).
- Μ.Σ. Γαλάτιστας (ιδιοκτησία του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης).
- Μ.Σ. Λουτρών Θέρμης (ιδιοκτησία του Εθνικού Ιδρύματος Αγροτικής Έρευνας)
- Μ.Σ. Σουρωτής (συνιδιοκτησία της ΣΟΥΡΩΤΗ Α.Ε. και της Ανατολικής Α.Ε.)
- Μ.Σ. Τριαδίου (ιδιοκτησία της Ανατολικής Α.Ε.)

Από τους παραπάνω πέντε σταθμούς, οι τέσσερεις βρίσκονται εκτός της λεκάνης (Αεροδρομίου, Λουτρών Θέρμης, Σουρωτής, Τριαδίου), σε μικρή όμως απόσταση από αυτή και μόλις ένας εντός αυτής (Γαλάτιστας).

4.3 Χωρικά δεδομένα – Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM)

Το πρώτο βήμα κατά την είσοδο των χωρικών δεδομένων είναι η σχηματοποίηση της λεκάνης απορροής, ο σχηματισμός του υδρογραφικού δικτύου και η δημιουργία υπολεκανών. Αυτό επιτυγχάνεται με την αυτοματοποιημένη διαδικασία που προσφέρει στο χρήστη το ArcSWAT, αφού πρώτα εισαχθεί ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM). Για την λεκάνη του Άνω Ανθεμούντα χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους «ASTER 30m» που αποκτήθηκε από την ιστοσελίδα της NASA (το ASTER GDEM είναι προϊόν των NASA και METI). Το υδρογραφικό δίκτυο και τα όρια της λεκάνης που προέκυψαν από την ανάλυση φαίνονται στο σχήμα 3.



Σχήμα 14. Υδρογραφικό δίκτυο και όρια λεκάνης του Άνω Ανθεμούντα

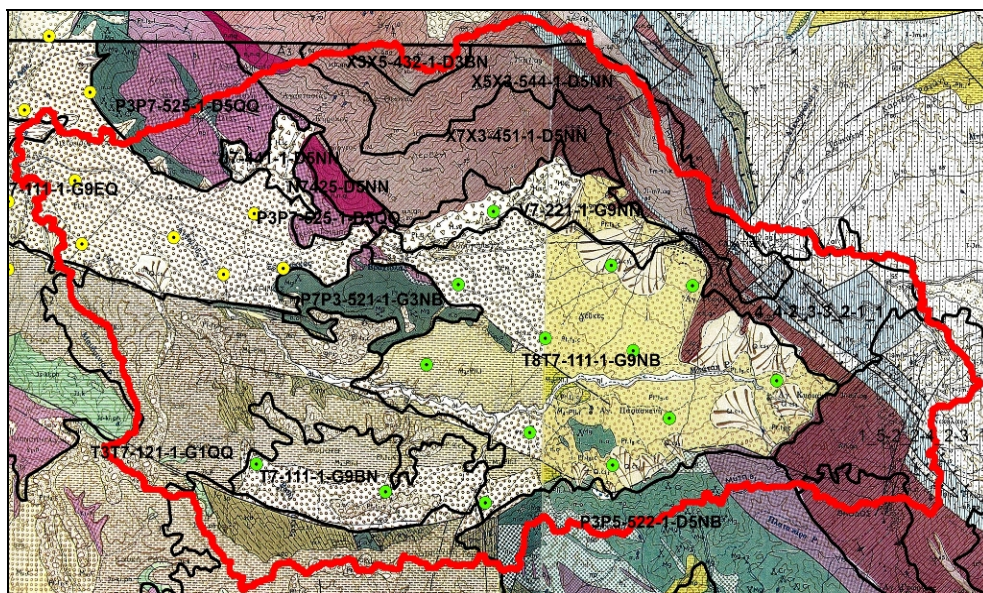
4.4 Χωρικά δεδομένα – Εδαφολογικός χάρτης

Για τις ανάγκες της παρούσης εργασίας κρίθηκε σκόπιμο να δημιουργηθεί ένας εδαφολογικός χάρτης της περιοχής διότι στην Ελλάδα δεν έχουν γίνει εκτεταμένες μελέτες για τη δημιουργία εδαφολογικών χαρτών. Για το σκοπό αυτό συλλέγονται δείγματα εδάφους και πραγματοποιούνται όλες οι απαραίτητες αναλύσεις στο εργαστήριο, για τον προσδιορισμό των βασικών παραμέτρων που χρειάζονται για τη λειτουργία του ArcSWAT. Οι κυριότερες εδαφικές παράμετροι είναι:

- Βάθος εδάφους

- Βάθος ριζών των φυτών
- Υδρολογική ομάδα
- Ξηρό φαινόμενο βάρος
- Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα
- Οργανική ύλη
- Ποσοστό αργίλου
- Ποσοστό ιλύος
- Ποσοστό άμμου
- Ποσοστό χαλικιών
- Εδαφική υγρασία στο σημείο μαρασμού των φυτών
- Εδαφική υγρασία στο σημείο εδαφικής ικανότητας
- Εδαφική υγρασία στο σημείο κορεσμού
- Αντανάκλαση εδάφους (albedo)
- Τρωτότητα εδάφους (σταθερά K_{USLE})

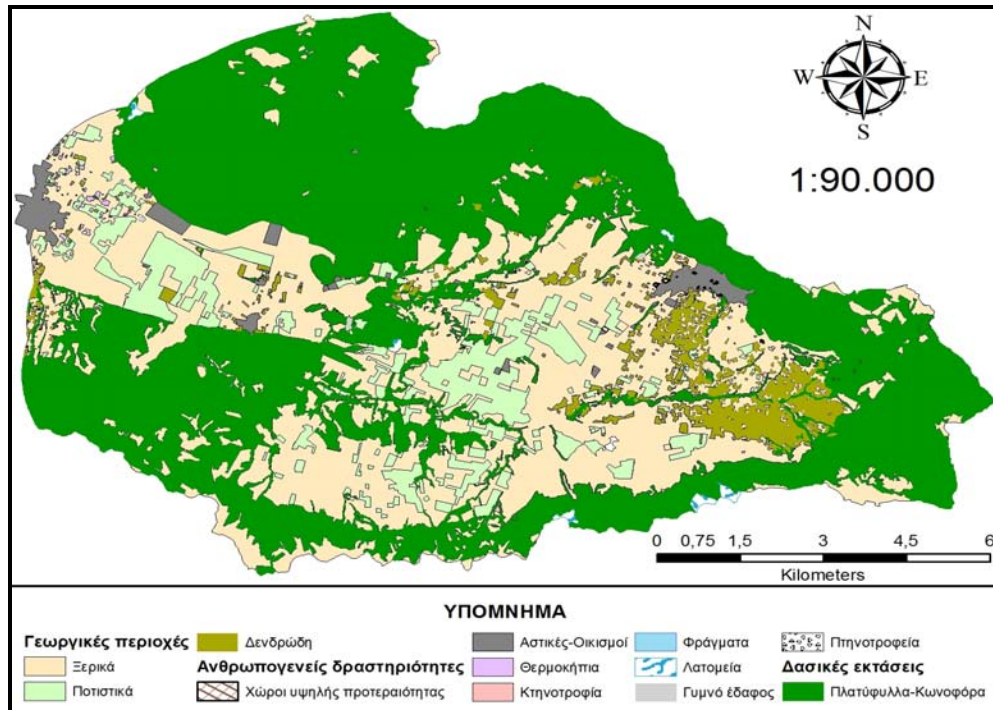
Για την καλύτερη επιλογή των θέσεων δειγματοληψίας, δημιουργήθηκε και μελετήθηκε στο ArcGIS ένας χάρτης που προέκυψε από την συνένωση δυο άλλων, ενός γεωλογικού (IGME, Φύλλο “Πολύγυρος”, 1978 και Φύλλο “Βασιλικά”, 1978) και ενός δασολογικού χάρτη γεωικανότητας (Φύλλο “Πολύγυρος” και Φύλλο “Βασιλικά”) (σχήμα 4). Επίσης χρησιμοποιούνται κάποιες εδαφολογικές αναλύσεις από τη μοναδική, σχετικά με ανάλυση εδαφών της λεκάνης, προϋπάρχουσα μελέτη (Καζάκης 2013).



Σχήμα 4. Ένωση γεωλογικού χάρτη και χάρτη γεωικανότητας. Τα μαύρα πολύγωνα προέκυψαν από την επεξεργασία του χάρτη γεωικανότητας.

4.5 Χωρικά δεδομένα – Χάρτης χρήσεων γης

Ο χάρτης χρήσεων γης προέκυψε από την επεξεργασία και επικαιροποίηση του αντίστοιχου χάρτη κάλυψης γης του προγράμματος CORINE Land Cover (CORINE 2000) για τη περιοχή μελέτης (σχήμα 5).



Σχήμα 5. Χρήσεις γης στη λεκάνη του Άνω Ανθεμούντα

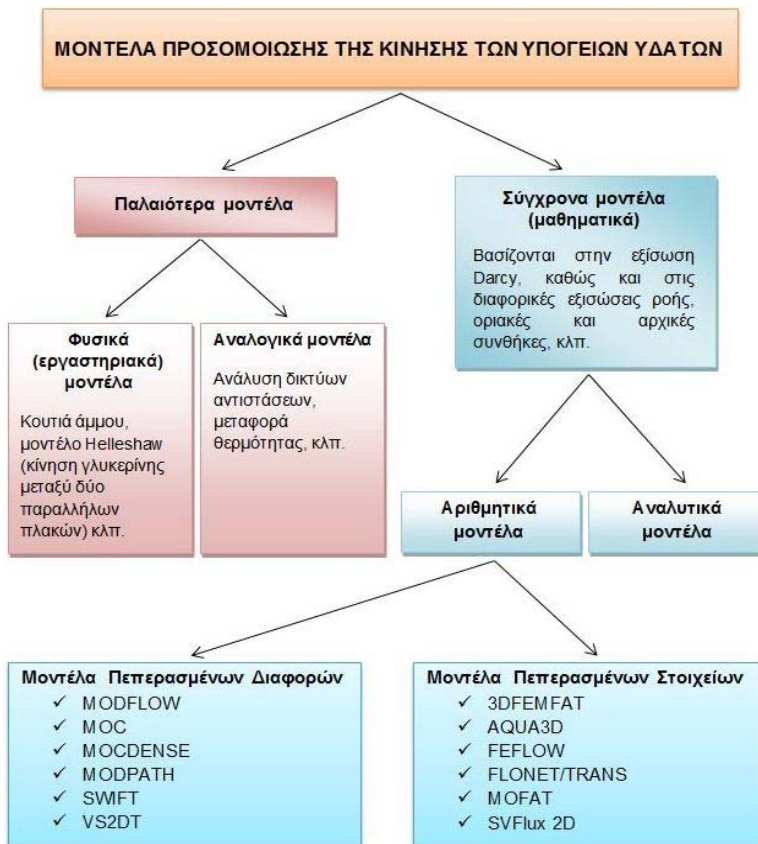
5. Υδρολογικά μοντέλα προσομοίωσης της υπόγειας ροής

Η ανάγκη για καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών ροής του υπόγειου νερού οδήγησαν στην ανάπτυξη διάφορων μοντέλων για καλύτερη δυνατότητα προσομοίωσης της ροής του υπόγειου νερού. Τα μοντέλα αυτά παρουσιάζονται παρακάτω αναλυτικά με τη μορφή δενδροδιαγράμματος (σχήμα 6).

Από τα παραπάνω μοντέλα για την προσομοίωση των υπόγειων υδάτων του Άνω Ανθεμούντα επιλέχθηκε το αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών MODFLOW διότι (Winston, 1999; Ghosh & Sharma, 2006):

- διαχειρίζεται μια πληθώρα δεδομένων τα οποία απαιτούνται για τη μελέτη πολύπλοκων συστημάτων
- τροποποιείται εύκολα και εξελίσσεται συνεχώς
- ενσωμάτωση του σε μια μεγάλη ποικιλία πακέτων λογισμικού (GMS, Ground-

- water Vistas, Processing Modflow, Visual Modflow)
- είναι ιδιαίτερα λειτουργικό και προνομιούχο σε σχέση με άλλους κώδικες προσομοίωσης.



Σχήμα 6. Υδρολογικά μοντέλα υπόγειας ροής

6. Μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής MODFLOW

Βασικός σκοπός της κατάστρωσης του μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας ροής του υπό μελέτη υδροφόρου συστήματος αποτελεί αφενός η αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης του (με βάση το έτος αναφοράς από το οποίο ξεκινάει η προσομοίωση) και αφετέρου η πρόβλεψη της μελλοντικής του κατάστασης, καθώς και ο αντίκτυπος συγκεκριμένων πιέσεων που ασκούνται σε αυτό (π.χ. αντλήσεις) (Ghosh & Sharma, 2006; Baalousha, 2009; Bear & Cheng, 2010). Προκειμένου αυτό να καταστεί εφικτό πραγματοποιείται η κατάστρωση ενός μόνιμου μοντέλου ροής (συνθήκες δυναμικά εξισορροπημένου ισοζυγίου),

γεγονός που αποσκοπεί στο να ρυθμιστούν συγκεκριμένες παράμετροι του υπό μελέτη υδροφορέα, όπως η υδραυλική αγωγιμότητα και η παράμετρος που αναφέρεται ως «conductance», η οποία αφορά τις οριακές συνθήκες (Μάλλιος και Σιάρκος, 2014).

6.1 Δημιουργία του εννοιολογικού μοντέλου του υδροφορέα

Το εννοιολογικό μοντέλο αποτελεί απλοποιημένη αναπαράσταση του πραγματικού υδροφόρου συστήματος, καθώς βασικός του ρόλος είναι η ομαδοποίηση τοπικών και ευρύτερων υδρολογικών και υδρογεωλογικών δεδομένων σε ένα σύνολο παραδοχών και ιδεών που μπορούν να επεξεργαστούν ποσοτικά (Baalousha, 2009; Kushwaha et al., 2009). Περιγράφει βασικές πτυχές του φυσικού υδρογεωλογικού συστήματος, όπως τη γεωλογική και στρωματογραφική δομή, το είδος του υδροφόρου μέσου (πορώδες ή ρωγμώδες), φυσικοχημικές διεργασίες, υδραυλικές ιδιότητες καθώς και τις συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου (Ahmed & Umar, 2009). Στη συγκεκριμένη μελέτη, το εννοιολογικό μοντέλο του υδροφορέα του Άνω Ανθεμούντα καθώς και όλα τα δεδομένα εισόδου, λόγω έλλειψης δεδομένων για την περιοχή, βασίζονται αποκλειστικά στα στοιχεία του ερευνητικού έργου (Latinopoulos et al. 2001a) τα οποία σχετίζονται με τις υδρογεωλογικές συνθήκες του υδροφορέα και είναι τα παρακάτω (Sevastas et al. 2014):

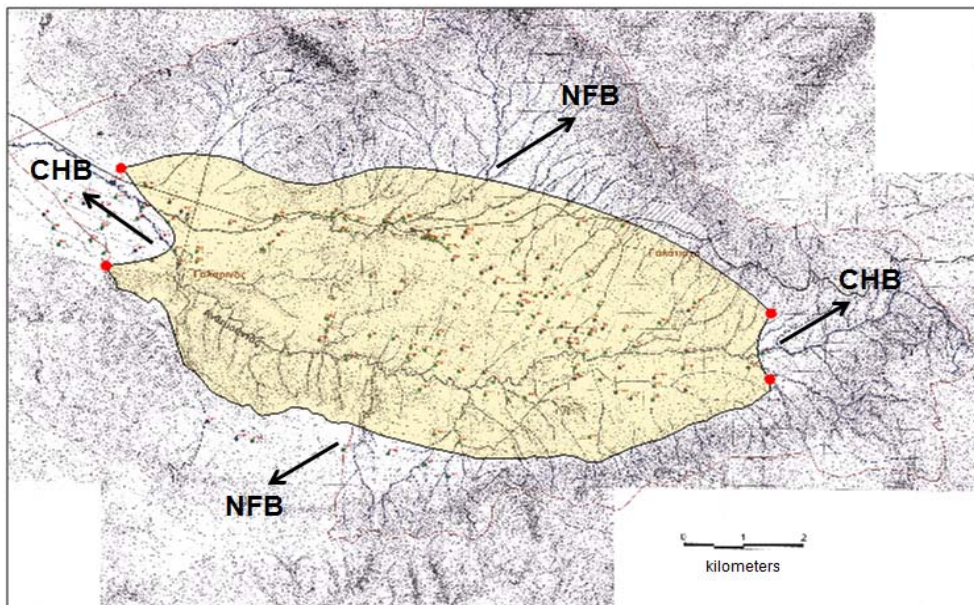
- Γεωμετρία υδροφορέα και χωρική διακριτοποίηση
- Οριακές συνθήκες
- Αρχικές συνθήκες
- Υδραυλικές παράμετροι υδροφορέα
- Εμπλουτισμός υδροφορέα
- Εκμετάλλευση υδροφορέα και κατανάλωση νερού

6.2 Γεωμετρία υδροφορέα και χωρική διακριτοποίηση

Η μόρφωση του υδροφόρου συστήματος και ο καθορισμός της γεωμετρίας του αποτελούν το πρωταρχικό στάδιο της δημιουργίας του εννοιολογικού μοντέλου. Η διαδικασία αυτή συνίσταται στον προσδιορισμό της μορφής (σχήμα) του υδροφορέα, του άνω και κάτω ορίου του καθώς και του πάχους του (Μάλλιος και Σιάρκος, 2014).

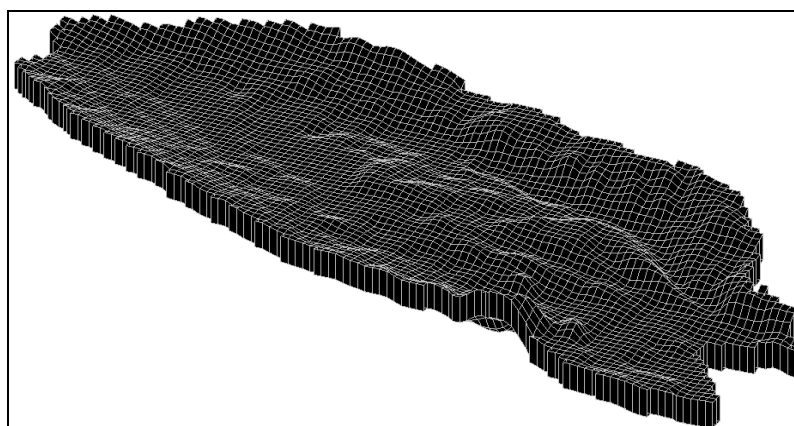
Έτσι, το σχήμα του υδροφορέα προέκυψε με βάση το τοπογραφικό χάρτη της λεκάνης (ο οποίος δημιουργήθηκε από τη συνένωση 8 διαφορετικών φύλλων χάρτη της Ελληνικής Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού της περιοχής), σε συνδυασμό με τις ισοπιεζομετρικές καμπύλες που προήλθαν από τον πειζομετρικό χάρτη του ερευνητικού έργου (Latinopoulos et al. 2001a) και τις τομές των γεωτρήσεων της περιοχής. (Sevastas et al. 2014) (σχήμα 7).

Σε ότι αφορά τη γεωμετρία του υδροφορέα το άνω όριο του υδροφορέα ορίστηκε στο βάθος στο οποίο καταλήγει η αργιλική επικάλυψη κάτω από την επιφάνεια του



Σχήμα 7. Όρια του υδροφορέα (Sevastas et al. 2014)

εδάφους (θεωρήθηκε μια μέση τιμή της τάξης των 20m με βάση τις τομές των γεωτρήσεων της περιοχής), ενώ το κάτω όριο πρόεκυψε από το άνω με αφαίρεση του θεωρητικού πάχους του υδροφορέα (μια μέση τιμή της τάξης των 80m, όπως καθορίστηκε από τις τομές των γεωτρήσεων και από τις τομές του γεωλογικού χάρτη) (Sevastas et al. 2014). Η συγκεκριμένη τιμή του πάχους αντιστοιχεί στα επιμέρους διαδοχικά στρώματα του υδροφορέα. (σχήμα 8) (Siarkos and Latino-poulos, 2013; Latino-poulos and Siarkos, 2014).



Σχήμα 8. Τρισδιάστατη απεικόνιση του υπό πίεση υδροφορέα (Sevastas et al. 2014)

Όπως είναι γνωστό, προκειμένου να αναπτυχθεί ένα μοντέλο προσομοίωσης βασισμένο στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, όπως είναι το MODFLOW, απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η διαμόρφωση ενός κανάβου (Μάλλιος και Σιάρκος, 2014). Στο συγκεκριμένο μοντέλο ροής ο κανάβος αποτελείται από 65 γραμμές (rows) και 120 στήλες (columns), ενώ κατά την κατακόρυφη διεύθυνση συνίστατο από 1 στρώμα (layer) πάχους 60m. Ο συνολικός αριθμός των κελιών του κανάβου, διαστάσεων 100m x 100m το καθένα, είναι 7.800 εκ των οποίων τα 4.880 είναι ενεργά και τα 2.920 ανενεργά (Sevastas et al. 2014).

6.4 Οριακές συνθήκες

Ο καθορισμός των οριακών συνθηκών συνιστά εξίσου σημαντικό βήμα της διαδικασίας κατάστρωσης του εννοιολογικού μοντέλου του υδροφορέα και στη συγκεκριμένη περίπτωση βασίζεται σε δεδομένα που σχετίζονται με τη γεωλογία αλλά και την πιεζομετρία της περιοχής (Μάλλιος και Σιάρκος, 2014). Σύμφωνα με τα δεδομένα αυτά, το βόρειο και το νότιο όριο της περιοχής μελέτης αποτελούν όρια μηδενικής ροής (No Flow Boundaries, NFB), καθώς δεν υφίσταται υδραυλική επικοινωνία μεταξύ του υδροφορέα του Άνω Ανθεμούντα και των γειτονικών περιοχών. Επίσης τα όρια αυτά είναι σχεδόν κάθετα στις ισουψείς καμπύλες, συνεπώς η ροή των υπόγειων υδάτων είναι παράλληλα σε αυτά (Sevastas et al. 2014).

Σε ότι αφορά το ανατολικό και το δυτικό όριο της περιοχής μελέτης και τα δύο λαμβάνονται ως όρια σταθερού φορτίου (constant head boundaries, CHB – σχήμα 7), προσομοιώνοντας τις πλευρικές εισροές ή εκροές που λαμβάνουν χώρα από αυτά. Τόσο το ανατολικό όσο και το δυτικό όριο δεν συμπίπτουν με τα φυσικά όρια της λεκάνης απορροής και αυτό προκύπτει με βάση στοιχεία που αφορούν τα επίπεδα στάθμης του υδροφορέα στην περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, το ανατολικό όριο συμπίπτει με την ισοπιεζομετρική καμπύλη των 280m, ενώ το δυτικό όριο συμπίπτει με την ισοπιεζομετρική καμπύλη των 50m. Οι καμπύλες αυτές πρόεκυψαν με βάση στοιχεία που αφορούν τα επίπεδα στάθμης του υδροφορέα στην περιοχή (Latinopoulos et al. 2001a) (ισοπιεζομετρικός χάρτης για το έτος αναφοράς 2000 που πρόεκυψε με εφαρμογή της μεθόδου Kriging και ο οποίος απεικονίζει τη χωρική κατανομή του υδραυλικού φορτίου στον υδροφορέα κατά τις περιόδους των σταθμημετρήσεων) (Sevastas et al. 2014). Οι λόγοι που οδήγησαν στον καθορισμό των παραπάνω ορίων είναι δυο. Πρώτον διότι δεν υπάρχουν εκτεταμένες μελέτες που να αφορούν τον ακριβή προσδιορισμό των οριακών συνθηκών του υδροφορέα (Sevastas et al. 2014) και δεύτερον διότι με βάση τα γεωλογικά στοιχεία, στην περιοχή μεταξύ των Βασιλικών και του Γαλαρινού παρατηρείται μία τοπική αναθόλωση των πετρωμάτων του υποβάθρου με συνέπεια να δημιουργείται ένα μερικώς ανεξάρτητο υδροφόρο σύστημα η υδραυλική επικοινωνία του οποίου με το υδροφόρο σύστημα του Κάτω Ανθεμούντα να παραμένει ένα ανοικτό ερευνητικό αντικείμενο (Fikos et al., 2005).

6.5 Αρχικές συνθήκες

Στις αρχικές συνθήκες καθορίζεται η τιμή που λαμβάνει η υπο μελέτη παράμετρος (σε αυτή την περίπτωση το υδραυλικό φορτίο) στα επιμέρους κελιά του κανάβου κατά την αρχή της προσομοίωσης.

6.6 Υδραυλικές παράμετροι υδροφορέα

Οι τιμές των διαφόρων υδραυλικών παραμέτρων του υδροφορέα, όπως π.χ. η υδραυλική αγωγιμότητα, η αποθηκευτικότητα και η μεταφορικότητα αυτές προήλθαν από προηγούμενες μελέτες και παρατίθενται παρακάτω: (πίνακας 1)

Πίνακας 1. Υδραυλικές παράμετροι του υδροφορέα (Latinopoulos et al., 2001a)

Υδραυλικές παράμετροι	τιμές
υδραυλική αγωγιμότητα (K)	$3,4 \times 10^{-6}$ m/s μέχρι $2,9 \times 10^{-5}$ m/s
Αποθηκευτικότητα (S)	$4,3 \times 10^{-4}$ μέχρι $6,2 \times 10^{-2}$
Μεταφορικότητα (T)	$1,3 \times 10^{-4}$ m ² /s μέχρι $1,3 \times 10^{-3}$ m ² /s

Οι παραπάνω τιμές προέκυψαν από 3 γεωτρήσεις στις οποίες πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές αντλήσεις. Το γεγονός όμως, ότι και οι τρεις βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση μεταξύ τους, δεν ευνοεί το διαχωρισμό της υπό μελέτης περιοχής σε επιμέρους ζώνες με βάση την υδραυλική αγωγιμότητα. Για αυτό το λόγο αποφασίστηκε να δοθεί μια σταθερή τιμή για όλο τον υδροφορέα. Επιπλέον εξαιτίας της μεγάλης αβεβαιότητας της συγκεκριμένης παραμέτρου, πραγματοποιήθηκε προσαρμογή της τιμής της κατά τη διάρκεια ρύθμισης του μοντέλου, λαμβάνοντας ως αρχική τιμή την 1,3997 m/d και μεταβαλλόντας την ανάλογα με τα αποτελέσματα της ρύθμισης (Sevastas et al. 2014).

6.7 Εμπλουτισμός υδροφορέα

Λαμβάνοντας υπόψη τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, η τροφοδοσία του υδροφόρου συστήματος φαίνεται ότι πραγματοποιείται από την άμεση κατείσδυση του νερού των βροχοπτώσεων και τις επιστροφές των αρδεύσεων των αγροτικών περιοχών. Όσον αφορά την ποσότητα του νερού που προέρχεται από τις βροχοπτώσεις δόθηκε μια σταθερή ενιαία τιμή (0,213 mm/d) κατείσδυσης για όλο τον υδροφορέα. Αναφορικά με τις ποσότητες του νερού των αρδεύσεων που επιστρέφουν και εμπλουτίζουν τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα, αυτές εξαρτώνται από τη μέθοδο άρδευσης, το πρόγραμμα των αρδεύσεων και τη λιθοστρωματογραφική σύσταση των υδροφόρων στρωμάτων (Qahman & Larabi, 2006). Για την περιοχή έρευνας οι ποσότητες αυτές θεωρήθηκαν ίσες με το 15% του όγκου του νερού που χρησιμοποιήθηκε για την άρδευση (Λατινόπουλος κ.α., 2003). Έτσι η τελική τιμή της κατείσδυσης που προέκυψε σύμφωνα με τα παραπά-

νω είναι 0,239 mm/d. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι όπως και με την υδραυλική αγωγιμότητα, έτσι και ο εμπλουτισμός του υδροφορέα αποτελεί μια παράμετρο με σημαντική αβεβαιότητα. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε κατάλληλη προσαρμογή της εν λόγω παραμέτρου κατά τη διαδικασία ρύθμισης μοντέλου (Sevastas et al. 2014).

6.8 Εκμετάλλευση υδροφορέα και κατανάλωση νερού

Η εκμετάλλευση του υπόγειου υδατικού δυναμικού της περιοχής μελέτης γίνεται με σκοπό την κάλυψη των υδρευτικών, κτηνοτροφικών αλλά κυρίως των αρδευτικών αναγκών. Ο ακριβής προσδιορισμός της απολήψιμης ποσότητας του υπόγειου νερού παρουσιάζει δυσκολίες λόγω της έλλειψης υγρομέτρων και για το λόγο αυτό ακολουθήθηκε μια διαδικασία προσεγγιστικής εκτίμησης της ποσότητας αυτής. Για τον προσδιορισμό των υδρευτικών αναγκών χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία της απογραφής του πληθυσμού του 1991 και η μέση ημερήσια κατανάλωση νερού ανά κάτοικο. Με αυτό τον τρόπο υπολογίστηκε η μέση τιμή της ετήσιας κατανάλωσης νερού για κάθε οικισμό που ανήκει στην περιοχή μελέτης, η οποία στη συνέχεια διαιρέθηκε με το συνολικό αριθμό γεωτρήσεων που λειτουργούν στη περιοχή, ώστε να προσδιοριστεί ο ρυθμός άντλησης κάθε γεώτρησης (Sevastas et al. 2014).

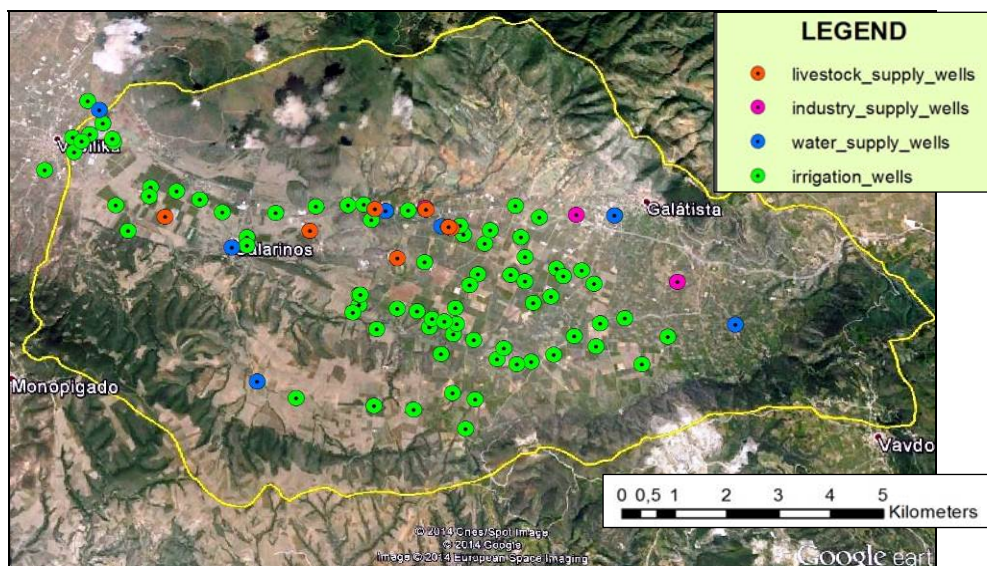
Όσο αφορά τις ανάγκες του νερού για κτηνοτροφική χρήση λήφθηκαν υπόψη οι δυναμικότητες των κτηνοτροφικών μονάδων, τα είδη των ζώων καθώς και η ποσότητα του νερού που χρειάζεται κάθε ζώο, σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία. (Latinopoulos et al, 2001a).

Σε ότι αφορά την αγροτική κατανάλωση λήφθηκαν υπόψη τα είδη των καλλιεργειών της περιοχής, οι εκτάσεις τους, η περίοδος άρδευσης ανά καλλιέργεια και η απαιτούμενη ποσότητα νερού κάθε καλλιέργειας ανά στρέμμα ετησίως (Latinopoulos et al, 2001a).

Στην περιοχή αναπτύσσεται μικρή βιοτεχνική κυρίως δραστηριότητα, στον τομέα της μεταποίησης αγροτικών - κτηνοτροφικών προϊόντων. Σύμφωνα με στοιχεία προηγούμενων ερευνών οι κυριότερες μονάδες της περιοχής έχουν άδεια κατανάλωσης νερού ίση με 44.800 κυβικά μέτρα ετησίως (Latinopoulos et al, 2001a).

Τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω αναλύσεων για τον προσδιορισμό των υδατικών αναγκών για άρδευση, ύδρευση και κτηνοτροφία δίνονται παρακάτω: (σχήμα 9), (πίνακας 2).

Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός πως οι ανάγκες νερού για άρδευση αντιστοιχούν στο 91,5% της συνολικής κατανάλωσης νερού για την περιοχή μελέτης. Εξαιτίας, όμως, της μεγάλης αβεβαιότητας της συγκεκριμένης παραμέτρου, πραγματοποιήθηκε προσαρμογή της τιμής της κατά τη διάρκεια ρύθμισης του μοντέλου (Sevastas et al. 2014).



Σχήμα 9. Γεωτρήσεις που λειτουργούν στη λεκάνη του Άνω Ανθεμιόντα (Sevastas et al. 2014)

Πίνακας 2. Υπολογισμός της ισοδύναμης παροχής άντλησης των γεωτρήσεων (Sevastas et al. 2014).

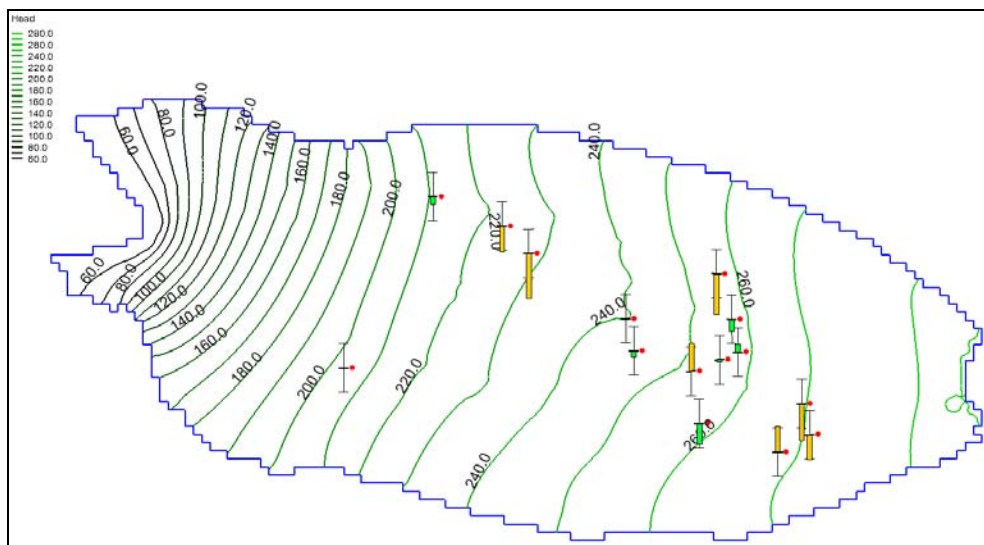
Water use	Number of operating wells	Total annual consumption (x10 ³ m ³ /year)	Average pumping rate per well (m ³ /d)
Domestic (Galarinos)	5 wells	14,29	81,33
Domestic (Galatista)	2 wells	148,43	19,57
Industrial	3 wells	44,80	40,91
Livestock	7 wells	156,92	61,42
Irrigation	160 wells	3.930,73	67,31

6.9 Ρύθμιση του μοντέλου

Η ρύθμιση του μόνιμου μοντέλου ροής είχε ως σκοπό την προσαρμογή συγκεκριμένων παραμέτρων του υδροφορέα, έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή σύγκλιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τις μετρήσεις στο πεδίο. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε ήταν αυτή του επαναληπτικού τύπου δοκιμής - λάθους, ενώ τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από μετρήσεις της στάθμης του υδροφορέα σε 15 γεωτρήσεις παρατήρησης το Οκτώβριο του 2000 (Sevastas et al. 2014).

Για την αξιολόγηση της ρύθμισης του μοντέλου και προκειμένου να προκύψουν οι τιμές εκείνες των παραμέτρων του μοντέλου που οδηγούν σε καλύτερα αποτελέσματα, υπολογίστηκαν ορισμένοι στατιστικοί όροι, οι οποίοι αποδίδουν με αποτελεσματικό τρόπο την ακρίβεια της διαδικασίας. Οι όροι αυτοί είναι το μέσο σφάλμα (ME), το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE), το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) και οι τιμές που προέκυψαν μετά το πέρας της διαδικασίας είναι 0,882, 1,564 και 1,959 για κάθε όρο αντίστοιχα, καταδεικνύοντας ότι η προσομοίωση είναι ιδιαίτε- ρως ικανοποιητική (Sevastas et al. 2014).

Στο Σχήμα 10, φαίνονται τα αποτελέσματα της ρύθμισης με τη μορφή ενός χάρτη στον οποίο υπάρχουν «χρωματιστοί στόχοι» δίπλα από τις γεωτρήσεις παρατήρησης καταδεικνύοντας το μέγεθος του σφάλματος σε κάθε μία από αυτές. Όσο πιο μεγάλο είναι το χρωματιστό μέρος του στόχου τόσο υψηλότερο είναι το σφάλμα στη συγκεκριμένη γεώτρηση (Sevastas et al. 2014).



Σχήμα 10. Αποτελέσματα της ρύθμισης με τη μορφή χάρτη με «χρωματιστούς στόχους» δίπλα από τις γεωτρήσεις παρατήρησης (Sevastas et al. 2014).

Οι τιμές των παραμέτρων μετά τη ρύθμιση του μοντέλου φαίνονται παρακάτω στον πίνακα 3.

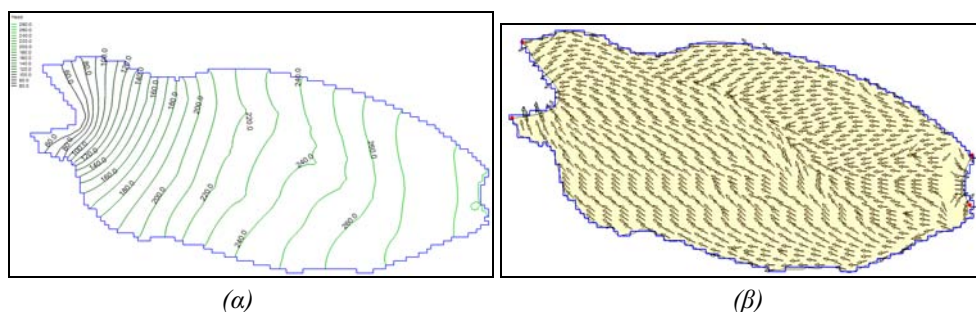
Πίνακας 3. Οι τιμές των παραμέτρων πριν και μετά τη ρύθμιση του μοντέλου (Sevastas et al. 2014)

Παράμετροι	Τιμές πριν τη ρύθμιση	Τιμές μετά τη ρύθμιση
υδραυλική αγωγιμότητα	1,3997 m/d	0,305 m/d
κατείδυση	0,239 mm/d	0,299 m/d
Παροχή γεωτρήσεων	67,31 m ³ /d	63,5 m ³ /d

Όπως είναι προφανές από τις 3 παραμέτρους αυτή που διαφοροποιείται περισσότερο μετά τη ρύθμιση του μοντέλου είναι η υδραυλική αγωγιμότητα σε ένα ποσοστό της τάξης του 78,2%, ωστόσο η τελική τιμή της παραμένει στα όρια βιβλιογραφικών εκτιμήσεων όπως αυτά φαίνονται στον πίνακα 3 (0,2938 - 2,5056 m/d) (Sevastas et al. 2014).

6.10 Αποτελέσματα μόνιμου μοντέλου υπόγειας ροής

Στα Σχήματα 11α και 11β απεικονίζονται αντιστοίχως η κατανομή του υδραυλικού φορτίου και η κατανομή του πεδίου ταχυτήτων της ροής, ενώ στο πίνακα 4 παρουσιάζεται υδατικό ισοζύγιο του υπό μελέτη υδροφόρου συστήματος.



Σχήμα 11. (α) Κατανομή του υδραυλικού φορτίου και (β) κατανομή του πεδίου ταχυτήτων (Sevastas et al. 2014).

Πίνακας 4. Υδατικό ισοζύγιο του υπό μελέτη υδροφόρου συστήματος (Sevastas et al. 2014).

2000	Inputs (m ³ /d)	Outputs (m ³ /d)	Inputs (%)	Outputs (%)
Constant Heads	0,00	-5,014	0,00%	41,14%
Wells	0,00	-7,175	0,00%	58,86%
Recharge	12,189	0,00	100,00%	0,00%
Total Source/Sink	12,189	-12,189	100,00%	100,00%

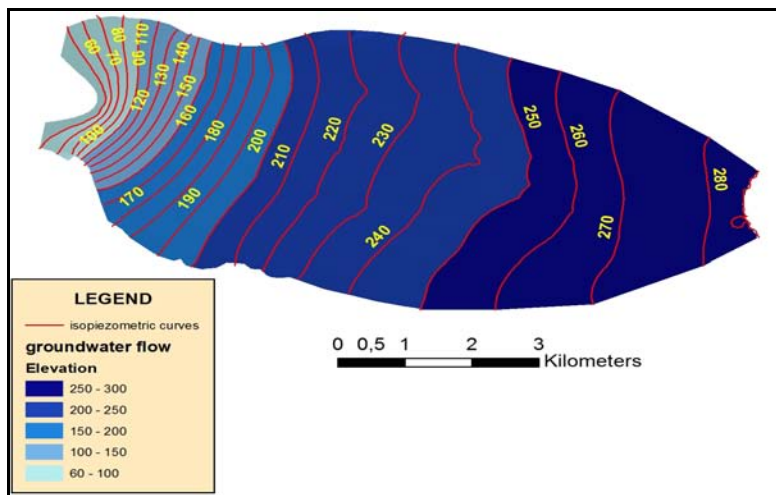
Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα αποτελέσματα του μοντέλου συνοψίζονται παρακάτω:

- Παρατηρείται πτώση στάθμης από το ανατολικό προς το δυτικό όριο του υδροφορέα σχήμα 11α, η οποία γίνεται πιο απότομη κοντά στην περιοχή του Γαλαρινού, ενώ χαρακτηριστική είναι και η κίνηση του υπόγειου νερού προς αυτή τη κατεύθυνση (σχήμα 11β).
- Η τροφοδοσία του υδροφόρου συστήματος πραγματοποιείται εξ ολοκλήρου (ποσοστό 100%) από την κατείδυση (βροχοπτώσεις).

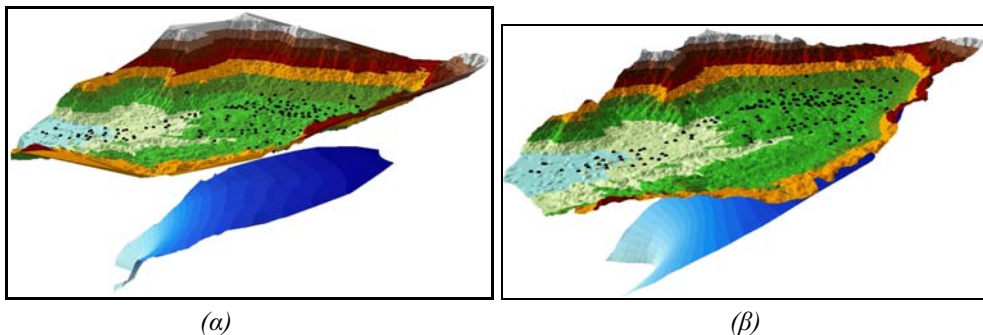
- Η απομάκρυνση του νερού από τον υδροφορέα, πραγματοποιείται στο μεγαλύτερο μέρος της από τις αντλήσεις για την κάλυψη των υδατικών αναγκών (κυρίως αρδευτικών) της περιοχής μελέτης (ποσοστό 58,86%).
- Η απότομη πτώση στάθμης του υδροφορέα στο δυτικό του τμήμα, δεν συνάδει με το πλήθος των γεωτρήσεων στη συγκεκριμένη περιοχή. Συνεπώς, η πτώση ίσως να μην σχετίζεται με τις αντλήσεις, αλλά πιθανόν να οφείλεται στην τοπική αναθόλωση των πετρωμάτων του υποβάθρου, όπως περιγράφηκε πιο πάνω στις οριακές συνθήκες.

6.11 Εφαρμογή GIS

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της υπόγειας ροής του νερού της λεκάνης του Άνω Ανθεμιούντα όπως αυτά προέκυψαν με τη βοήθεια του MODFLOW εισήχθησαν στο ArcGIS για την καλύτερη οπτικοποίησή τους. Για το σκοπό αυτό δη-



Σχήμα 12. Ισοπιεζομετρικές καμπύλες (Sevastas et al. 2014).



Σχήμα 13. Τρισδιάστατη απεικόνιση της λεκάνης σε συνδυασμό με τον υδροφορέα από δυο διαφορετικές οπτικές γωνίες (Sevastas et al. 2014).

μιουργήθηκαν 2 θεματικοί χάρτες (σχήματα 12 και 13). Στο σχήμα 12 απεικονίζονται ευκρινώς οι ισοπιεζομετρικές καμπύλες που μας δείχνουν τη σταδιακή πτώση στάθμης των υπόγειων υδάτων προς τα δυτικά. Στο σχήμα 13 παρουσιάζεται η συνολική τρισδιάστατη απεικόνιση της λεκάνης σε συνδυασμό με τον υδροφορέα. Οι μαύρες βούλες δείχνουν τις γεωτρήσεις που λειτουργούν στην περιοχή.

7. Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία πραγματοποιήθηκε η προσπάθεια ανάπτυξης μιας μεθοδολογίας για την εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων με βάση τεχνικές γεωπληροφορικής. Τα GIS αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο και συμβάλουν στη σύζευξη των περιγραφικών υδρολογικών και γεωχωρικών πληροφοριών με σκοπό την ανάδειξη αξιόπιστων αποτελεσμάτων και σύγχρονων πρακτικών που οδηγούν στη αιεφορική διαχείριση των υδατικών πόρων όπως επιτάσσει η Οδηγία Πλαίσιο 2000/60 της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Στα παραπάνω πλαίσια επιχειρείται η προσομοίωση τόσο των επιφανειακών όσο και των υπόγειων υδάτων της λεκάνης του Άνω Ανθεμούντα σε περιβάλλον GIS. Η πολυπλοκότητα τόσο του επιφανειακού συστήματος (γεωμορφολογία, γεωλογία, υδρολογία) της περιοχής, όσο και του υπόγειου (παράμετροι υδροφορέα κτλ) καθώς και η σαφής έλλειψη σε βάθος μελετών για την περιοχή, αποτέλεσαν και αποτελούν πρόκληση για την ολοκλήρωση της προσπάθειας, με σκοπό την ανάδειξη αξιόπιστων συμπερασμάτων.

Για την προσομοίωση της επιφανειακής απορροής χρησιμοποιείται το μοντέλο SWAT που λειτουργεί αποκλειστικά σε περιβάλλον GIS (ArcSWAT). Η πιο σημαντική παράμετρος που προκύπτει είναι αυτή της κατεΐσδυσης, η οποία χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου για την βελτιστοποίηση του ήδη υπάρχοντος μοντέλου υπόγειων νερών (Sevastas et al. 2014).

Όσον αφορά την προσομοίωση της υπόγειας ροής, αυτή πραγματοποιήθηκε με την ανάπτυξη ενός μοντέλου μόνιμης ροής με τη βοήθεια του αριθμητικού μοντέλου πεπερασμένων διαφορών MODFLOW και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μελετήθηκαν και επεξεργάστηκαν επίσης σε περιβάλλον GIS. Το μόνιμο μοντέλο ροής αποβλέπει αφενός στο να ρυθμιστούν συγκεκριμένες παράμετροι του υπό μελέτη υδροφορέα (π.χ. υδραυλική αγωγιμότητα, οριακές συνθήκες, κτλ) και αφετέρου στο να δημιουργηθούν οι αρχικές συνθήκες για τη μελλοντική δημιουργία ενός μη-μόνιμου μοντέλου ροής.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν μια απότομη πτώση στάθμης κοντά στη περιοχή του Γαλαρινού, η οποία, όμως, ίσως και να οφείλεται σε γεωλογικά αίτια και όχι λόγω υπεράντλησης των γεωτρήσεων. Οπωσδήποτε όμως χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση και επανεξέταση όλων των παραμέτρων του μοντέλου. Άλλωστε η μεγάλη διαφοροποίηση της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά τη ρύθμιση του μοντέλου της υπόγειας ροής συνάδει προς αυτή την κατεύθυνση, καθώς κατα-

δεικνύει την ανάγκη περαιτέρω έρευνας σε ότι αφορά κυρίως τις υδρογεωλογικές συνθήκες του υδροφορέα (γεωμετρία, σχηματοποίηση, οριακές συνθήκες κτλ). Τέλος, η εφαρμογή και του επιφανειακού μοντέλου θα δώσει μια σαφέστερη εικόνα για το υδρογεωλογικό - υδρολογικό καθεστώς της περιοχής.

Βιβλιογραφία

- Ahmed, I. and Umar, R. (2009). Groundwater flow modelling of Yamuna–Krishni inter-stream, a part of central Ganga Plain Uttar Pradesh. *Journal of Earth System Science*, 118: 507-523.
- Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah and J.R. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment. Part 1: Model development. *J. Am. Water Resources Association* 34(1), 73-89.
- Arnold, J.G. and N. Fohrer. 2005. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrol. Process.* 19(3): 563-572.
- Arnold J.G., D.N. Moriasi, P.W. Gassman, K.C. Abbaspour, M.J. White, R. Srinivasan, C. Santhi, R .D. Harmel, A. van Griensven, N.W. Van Liew, N. Kannan, and M.K. Jha. 2012b. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Trans. ASABE* 55(4): 1491-1508.doi:10.13031/2013.42256
- Baalousha H. (2009) Fundamentals of groundwater modeling, In: Konig, L. and Weiss, J. (eds), *Groundwater: Modeling, management and contamination*, New York: Nova Science Publishers, pp. 149-166.
- Bear, J. and Cheng, A. (2010) *Modeling groundwater flow and contaminant transport*, Dordrecht: Springer publications.
- Beasley, D.B., Huggins, L.F. dan Monke, E.J. (1980), ANSWERS: A model for watershed planning. *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*, 23, 938-944
- Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L., Donigian, A.S.Jr. and Johanson, R.C. (1993). Hydrologic Simulation Program-FORTRAN (HSPF), User's Manual for Release 10, EPA/600/R-93 /174, USEPA Environmental Research Lab, Athens, GA.
- Borah, D. K., Xia, R., Bera, M. (2002) DWSM-a dynamic watershed simulation model. *Mathematical models of small watershed hydrology and applications*, in *Mathematical models of small watershed hydrology and applications*, edited by V. P. Singh and D. Frevert, Water Resources Publications, LLC., Highlands Ranch, Colorado, 113-166.
- Bradford, R.B. and Acreman, M.C. (2003). Applying MODFLOW to wet grassland in-field habitats: a case study from the Pevensy Levels, UK. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7: 43-55.
- Elango, L. and Sivakumar, C. (2008). Regional simulation of a groundwater flow in coastal aquifer, Tamil Nadu, India. in: Shakeel, A., Ramaswarny, J. & Abdin, S. (eds). *Groundwater dynamics in hard rock aquifers*. Capital Publishing Company, New Delhi, India, pp. 234-242.
- Fikos, I., Ziankas, G., Pavlidou, E. and Famellos, S. (2005). Water balance estimation in Anthemountas river basin and correlation with underground water level. *Global Nest*

- Journal, 7: 354-359.
- Ghosh, N.C. and Sharma, K.D. (2006) Groundwater modeling and management, New Delhi: Capital Publications.
- Guzman, J.A., Moriasi, D.N., Gowda, P.H., Steiner, J.L., Arnold, J.G., Srinivasan, R., Starks, P.J., (2012). An integrated hydrological modeling framework for coupling SWAT with MODFLOW. In: SWAT Conference Proceedings, New Delhi, India
- Kaluarachchi, J.J. and Almasri, M.N. (2002). Conceptual model of fate and transport of nitrate in the extended Sumas-Blaine aquifer, Whatcom County, Washington. Project Report, Version 1.2, Utah State University, USA.
- Karcher, S., VanBriesen, J., and Nietch, C. (2013). "Alternative Land-Use Method for Spatially Informed Watershed Management Decision Making Using SWAT." J. Environ. Eng., 139(12), 1413-1423.
- Kim W.N., Chung M. II, Won S.Y., Arnold G.J, (2008). Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model. Journal of Hydrology - J HYDROL , vol. 356, pp. 1-16
- Latinopoulos, D. and Siarkos, I. (2014). Modelling the groundwater flow to assess the long-term economic cost of irrigation water: Application in the Moudania Basin, Greece. in: Giannino, M. (ed). Drinking water and water management: New research. Nova Science Publishers, New York, USA, pp. 249-274.
- Latinopoulos, P., Theodossiou, N., Mallios, Z., Fotopoulou, E. and Xeferis, A., (2000). Water resources investigation in the upper Anthemountas basin in Chalkidiki. Protection and Restoration of the Environment V, Thassos Island, Greece, 1 - 4 July.
- Latinopoulos, P., Theodossiou, N., Xeferis, A., Mallios, Z., Fotopoulou, E. and Vafiadis, M. (2001a). Investigation and exploitation of the water resources in the basin of Upper Anthemountas. Final Research Project, Report prepared for: Municipality of Anthemountas.
- Latinopoulos, P., Theodossiou, N., Xeferis, A., Mallios, Z. and Fotopoulou, E. (2001b). Water resources management in the upper Anthemountas basin in Chalkidiki. 1st International Conference on Ecological Protection of the Planet Earth, Xanthi, Greece, 5 – 8 June.
- Leavesley, G.H., Lichty, R.W., Troutman, B.M., and Saindon, L.G., (1983), Precipitation-runoff modeling system-User's manual: U.S. Geol. Surv. WaterResour. Invest. Rep. 83-4238.
- McDonald, M. and Harbaugh, A. (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: Techniques of Water- Resources Investigations. U.S. Geological Survey, Book 6, Chapter A1.
- Mitasova H. and Mitas L. (1998) Process Modeling and Simulations, *NCGIA Core Curriculum in GIScience*, <http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/units/u130/u130.html>
- Mitsios, P., Tsilonis, G. and Theodossiou, N. (2009). Use of simulation models in the protection of groundwater aquifer systems: Application at the Upper Anthemountas basin in Chalkidiki, Greece.
- Protection and Restoration of the Environment IX, Kefalonia Island, Greece, June 29 - July 3.

- NASA - Casa - Project. (2015). Watershed Simulation with the SWAT Model [Image]. Retrieved from <http://geo.arc.nasa.gov/sgc/casa/hydrologic/swat.html>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R.: Soil and Water Assessment Tool – Theoretical Documentation, Version 2005. Texas, USA, 2005.
- Ogden, F.L., and P.Y. Julien, 2002, Distributed model CASC2D, in Mathematical Models of Small Watershed Hydrology, Vol 2, V.P. Singh, R. Frevert, and D. Meyers eds., Water Resources Publications, ISBN 1-887201-35-1, 972 pp.
- Pisinaras, V., Petalas, C., Boskidis, I., Moutsopoulos, K., Gemitzi, A. and Tsihrintzis, V.A. (2009). Groundwater modeling of two alluvial aquifers within Nestos river basin, North Greece. Protection and Restoration of the Environment IX, Kefalonia Island, Greece, June 29 – July 3.
- Priyabrata S. And Bhabani S. D. (2013). Modeling runoff from an agricultural watershed of western catchment of Chilika lake through ArcSWAT. Journal of Hydro-environment Research, 7: 261-269
- Qahman K. and Labari A. (2006) Evaluation and numerical modelling of seawater intrusion in Gaza aquifer (Palestine), Hydrogeology Journal, 55, pp. 713-728.
- Refsgaard, J.C., and B. Storm. 1995. MIKE-SHE. In V.J. Singh, ed, Computer Models of Watershed Hydrology, pp. 809-846. Water Resources Publication, Highlands Ranch, CO.
- Siarkos, I. and Latinopoulos, P. (2013). Delineation of wellhead protection zones for the control of point pollution sources in the aquifer of N. Moudania. European Water Journal, 40: 3-17.
- Varni, M.R. and Usunoff, E.J. (1999). Simulation of regional-scale groundwater flow in the Azul River basin, Buenos Aires Province, Argentina. Hydrogeology Journal, 7: 180-187.
- Wang, H. and Anderson, M. (1982). Protecting groundwater for health: managing the quality of drinking-water sources. International Water Association Publishing, London, UK.
- Winston R.B. (1999) MODFLOW-related freeware and shareware resources on the internet, Computers & Geosciences, 25, pp. 377-382.
- Woolhiser, D.A., Smith, R.E. and Goodrich, D.C., 1990. KINEROS, Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. USDA-ARS, No. 77.
- Αγοραστάκης Γ. (2001, 23 Απριλίου). *Η διαχείριση των υδατικών πόρων*. Εισήγηση που παρουσιάστηκε στην ημερίδα «Η προστασία του περιβάλλοντος στην Ευρώπη μέσα από την εφαρμογή της Local Agenda 21». Χανιά
- Αντωνάκος Α. (2012). Χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων πληροφοριών (GIS) για επίλυση προβλημάτων περιβαλλοντικής υδρογεωλογίας στο Νομό Κορινθίας, Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας. Πανεπιστήμιο Πατρών. Πάτρα
- Βουδούρης Κ. (2006). *Θέματα υδρογεωλογίας περιβάλλοντος* [πανεπιστημιακές σημειώσεις]. Τμήμα Γεωλογίας, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας. Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη.
- Καλογερόπουλος Κ. (2011). *Αξιοποίηση του υδρολογικού μοντέλου SWAT στη διερεύνηση*

- δημιουργίας λιμνοδεξαμενών, Μεταπτυχιακή εργασία, ΠΜΣ «Εφαρμοσμένη Γεωγραφία και Διαχείριση Χώρου», Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο. Αθήνα
- Καμπεράι Β. (2007). *Διερεύνηση της ευαισθησίας του ομοιώματος SWAT στην πυκνότητα της βροχομετρικής πληροφορίας για την προσομοίωση της απορροής υδρολογικής λεκάνης*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Ε.Μ.Π.. Αθήνα
- Καζάκης Ν. (2013). *Εκτίμηση της διακινδύνευσης του υπόγειου νερού στην εξωτερική ρύπανση στη Λεκάνη του Ανθεμούντα*. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας. Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη
- Λατινόπουλος Π., Θεοδοσίου Ν., Ξεφτέρης Α., Μάλλιος Ζ., Παπαγεωργίου Α., Φωτοπούλου Ε. (2003). Εκπόνηση σχεδίου διαχείρισης υδατικού δυναμικού για ύδρευση - άρδευση, Τελική Έκθεση Ερευνητικού Έργου, Φορέας Ανάθεσης: Δήμος Μουδανίων.
- Μάλλιος Ζ. και Σιάρκος Η. (2014). Νιτρορύπανση υπόγειων νερών: Κατάσχεση σχεδίου διαχείρισης με το συνδυασμό μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης και γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, Τελική Έκθεση Ερευνητικού Έργου, Φορέας Ανάθεσης: Επιτροπή Ερευνών Α.Π.Θ.
- Μαντόγλου Α. (2002). *Διαχείριση υδατικών πόρων*. [πανεπιστημιακές σημειώσεις]. ΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Ε.Μ.Π.. Αθήνα