



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΗΣ
ΗΛΙΟΠΟΥΛΟΥ ΦΩΤΕΙΝΗΣ**

ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ, 2023

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΗΣ
ΗΛΙΟΠΟΥΛΟΥ ΦΩΤΕΙΝΗΣ**

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΑΡΑΝΥΧΙΑΝΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract	6
Πρόλογος.....	7
Εισαγωγή.....	8
1. Εισαγωγή στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών.....	9
1.1 Γενικά.....	9
1.2 Μορφές Δεδομένων.....	9
1.3 Βασικές Λειτουργίες ενός ΓΣΠ.....	12
1.4 Συστατικά Στοιχεία ενός ΓΣΠ.....	13
1.5 Πλεονεκτήματα των ΓΣΠ.....	15
1.6 Εφαρμογές GIS.....	16
2. Διαχείριση Υδατικών Πόρων (ΔΥΠ)	17
2.1 Βασικοί Ορισμοί.....	17
2.2 Τι είναι η Διαχείριση των Υδατικών Πόρων (Δ.Υ.Π);.....	18
2.3 Ολοκληρωμένη και Βιώσιμη διαχείριση υδατικών πόρων (Integrated and Sustainable Water Resources Management IWRM, SWRM)	19
2.4 Σχέδια Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών (ΛΑΠ)	20
2.5 Θεσμικό Πλαίσιο ΔΥΠ.....	20
2.6 Η αναγκαιότητα της ΔΥΠ	21
3. Η χρήση των GIS στη Διαχείριση Υδατικών Πόρων.....	24
3.1 Επιφανειακά ύδατα.....	25
3.1.1 Εργαλεία του ArcGIS για ανάλυση επιφανειακών υδάτων.....	25
3.1.2 Εφαρμογές των GIS στην μοντελοποίηση των επιφανειακών υδάτων	29
3.1.3 Εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας	31
3.1.4 Αξιολόγηση ποιότητας επιφανειακών υδάτων	32
3.2 Υπόγεια Ύδατα.....	33
3.2.1 Εργαλεία του ArcGIS για την διαχείριση των υπογείων υδατικών πόρων	34
3.2.2 Συνδυασμός των GIS με μοντέλα υπογείων υδάτων	39
3.2.3 Άρδευση	42
3.2.4 Ανοιχτού κώδικα ΓΣΠ στην διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων	44
3.3 Ποσοτική διαχείριση υδατικών πόρων.....	45
3.4 Συστήματα “Υδρευσης και Αποχέτευσης”	48
3.4.1 Διαχείριση αστικών ομβρίων	51
3.5 Επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων	53

3.5.1 Αγροτική Άρδευση.....	54
3.5.2 Τεχνητός εμπλουτισμός υπογείων υδροφορέων.....	55
3.6 Επιλογή Λογισμικού ΓΣΠ.....	56
4. Συμπεράσματα.....	58
Βιβλιογραφία.....	61
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία	61
Ελληνική Βιβλιογραφία.....	67

Περίληψη

Παρά την επικρατούσα γνώμη ότι σ' έναν κόσμο που η τεχνολογία «ανθίζει» αδιάκοπα, η φύση «μαραζώνει», τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών παρέχουν χρήσιμα εργαλεία τόσο για την κατανόηση του φυσικού περιβάλλοντος όσο και για την αναβάθμισή του. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται αναλυτικά οι εφαρμογές των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών στην διαχείριση των υδατικών πόρων. Με την κλιματική αλλαγή να προκαλεί επιτακτικά ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως είναι οι πλημμύρες και η ξηρασία, είναι αναγκαίες οι σύγχρονοι μέθοδοι τόσο για την αποφυγή τέτοιων προβλημάτων όσο και για την ορθολογική διαχείρισή τους. Σήμερα, οι πιέσεις που δέχονται οι υδατικοί πόροι αυξάνονται με γρήγορο ρυθμό καθιστώντας την βιώσιμη και ολοκληρωμένη διαχείρισή τους μείζονος σημασίας για την προστασία και την διατήρηση του υδάτινου περιβάλλοντος. Η συμβολή των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών στην ολοκληρωμένη διαχείριση ενός υδάτινου πόρου είναι αδιαμφισβήτητο γεγονός. Παρέχουν γεωχωρικά και περιγραφικά ψηφιακά δεδομένα, τα οποία μπορούν να τα ομογενοποιήσουν, αφού συχνά προέρχονται από διαφορετικές πηγές, αλλά και επισπεύδουν τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων με την δυνατότητά τους να συνδυάζονται με υδρολογικά και υδραυλικά μοντέλα. Εκτός των πλεονεκτημάτων τους όσο αφορά την απόκτηση πληροφοριών, τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών πρωταγωνιστούν και στην λήψη αποφάσεων καθώς σε ένα περιβάλλον Geographic Information System (GIS) μπορεί να γίνει πολυκριτηριακή ανάλυση η οποία επιφέρει έναν κατανοητικό τελικό χάρτη που καθορίζει στην περιοχή μελέτης ποιες περιοχές είναι επιρρεπείς σε περιβαλλοντικούς κινδύνους, είτε αυτοί αφορούν τα επιφανειακά ύδατα (πλημμυρική επικινδυνότητα, τρωτότητα στη ρύπανση) είτε τα υπόγεια (κίνδυνος μόλυνσης, τρωτότητα υπόγειου υδροφορέα). Εφαρμογές των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών έχουν σημειωθεί και σε τομείς όπως συστήματα ύδρευσης και αποχέτευσης και την επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων για αγροτική άρδευση και τεχνητό εμπλουτισμό. Η χρήση τους ως αναλυτικά εργαλεία εξοικονομεί χρόνο και κόστος στους φορείς διαχείρισης και ενισχύουν την ικανότητα των ερευνητών και των επαγγελματιών που είναι υπεύθυνοι για την διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων διαχείρισης των υδάτων.

Abstract

Despite the prevailing opinion that in a world where technology is constantly "flourishing ", nature is " withering away ", Geographical Information Systems provide useful tools both for understanding the natural environment and for enhancing it. In this thesis, the applications of Geographical Information Systems in water resources management are presented in detail. With climate change urgently causing extreme weather phenomena, such as floods and droughts, modern methods are necessary both to avoid such problems and to manage them rationally. Today, the pressures on water resources are increasing rapidly, making their sustainable and integrated management of major importance for the protection and conservation of the water environment. The contribution of Geographical Information Systems to the integrated management of a water resource is undeniable. They provide geospatial and non-spatial digital data, which can be homogenized, since they often come from different sources, and also speed up the calculation of results by their ability to be combined with hydrological and hydraulic models. Apart from their advantages in terms of information acquisition, Geographical Information Systems also play a key role in decision making, since in a GIS environment a multi-criteria analysis can be carried out which results in a comprehensible final map that determines which areas in the study area are prone to environmental risks, whether these concern surface water (flood risk, vulnerability to pollution) or groundwater (risk of contamination, vulnerability of groundwater aquifers). Applications of Geographical Information Systems have also been noted in areas such as water supply and sanitation systems and the reuse of treated wastewater for agricultural irrigation and artificial recharge. Their implementation as analytical tools saves time and costs for management agencies and enhances the ability of researchers and practitioners responsible for exploring water management alternatives.

Πρόλογος

Το νερό είναι αναμφίβολα ένας από τους σημαντικότερους φυσικούς πόρους καθώς καλύπτει βασικές ανθρώπινες ανάγκες όπως πόση, τροφή (αλιεία και άρδευση καλλιεργειών), αναψυχή και συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου. Εξαιτίας, όμως, του υπερπληθυσμού της γης, της αλλαγής των τρόπων κατανάλωσης, της αυξημένης ρύπανσης και μόλυνσης, της κλιματικής αλλαγής καθώς και άλλων αιτιών, η παγκόσμια ζήτηση για νερό αυξάνεται με γοργούς ρυθμούς ενώ παράλληλα η διαθεσιμότητά του μειώνεται σταθερά απειλώντας έτσι τα οικοσυστήματα και το βιοπορισμό των ανθρώπων παντού. Η Διεθνής Επιτροπή Πόρων των Ηνωμένων Εθνών δηλώνει ότι ο πιο οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμος τρόπος για την ορθή αξιοποίηση και διατήρηση των υδατικών πόρων είναι η δημιουργία ολοκληρωμένων σχεδίων διαχείρισης του νερού που λαμβάνουν υπόψη ολόκληρο τον κύκλο του νερού: από την πηγή στη διανομή, την ορθολογική χρήση, την επεξεργασία, την επαναχρησιμοποίηση και την επιστροφή στο περιβάλλον. Γι αυτόν τον λόγο τα δεδομένα γύρω από το νερό, είτε αυτά είναι υδρολογικά, μετεωρολογικά ή υδρογεωλογικά, αποτελούν σημαντικό πλούτο, κάτι που εξηγεί και το υψηλό κόστος της απόκτησης, παραγωγής και ενημέρωσής τους. Δυστυχώς όμως, δεν διαχειρίζονται πάντα με τον βέλτιστο τρόπο. Από την μια μεριά, αυτό συνδέεται με την ετερογένεια των τεχνολογιών και των εργαλείων που χρησιμοποιούνται, γεγονός που καθιστά την ανταλλαγή, την έρευνα, την πρόσβαση, την ερμηνεία και την χρήση αυτών των δεδομένων δύσκολη. Από την άλλη μεριά, αυτό συνδέεται με την ύπαρξη των πολλών “παικτών” που εμπλέκονται στη συλλογή και στη διαχείριση δεδομένων. Αυτοί οι λόγοι θέτουν προβλήματα τόσο στην πρόσβαση όσο και στην χρήση των δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικούς οργανισμούς, περιορίζοντας έτσι τον προγραμματισμό και τη διαχείριση αυτών των δεδομένων που απαιτούνται για τη λήψη αποφάσεων, η οποία ποικίλλει ανάλογα με το χρόνο, τη κλίμακα, τη δομή και τους συμμετέχοντες οι οποίοι μπορεί να διαμορφώνουν πολιτικές, να είναι επαγγελματίες ή ερευνητές (Oulidi, 2019).

Με την τεχνολογική πρόοδο που διακατέχει την σημερινή κοινωνία, η τεχνολογία της πληροφορίας παρέχει εύκολες λύσεις στα παραπάνω προβλήματα, συμβάλλοντας στην λήψη αποφάσεων περιβαλλοντικών θεμάτων. Συγκεκριμένα, τα τελευταία χρόνια, στον ορθό, ταχύ και οικονομικό προγραμματισμό της ολοκληρωμένης και βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων, έχουν παίξει σημαντικό ρόλο τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών. Η τεχνολογία των GIS με την ικανότητα τους να συνδυάζουν την χωρική με την περιγραφική πληροφορία καθώς και η χαρτογραφική αναπαράσταση που παρέχουν, τα έχουν καταστήσει χρήσιμα εργαλεία για την προστασία και την ενίσχυση του υδάτινου περιβάλλοντος. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλεία ανάλυσης και να ενισχύσουν σημαντικά την ικανότητα των ερευνητών και των επαγγελματιών που είναι υπεύθυνοι για την διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων διαχείρισης νερού (Mohammadi, 2019).

Εισαγωγή

Η υψηλή έλλειψη νερού, δηλαδή η άντληση υπερβολικής ποσότητας γλυκού νερού από τις φυσικές πηγές σε σύγκριση με το διαθέσιμο γλυκό νερό, είναι ένα όλο και πιο διαδεδομένο φαινόμενο το οποίο μπορεί να προκαλέσει καταστροφικές συνέπειες για το περιβάλλον και τον άνθρωπο και να περιορίσει ή να αντιστρέψει την βιώσιμη ανάπτυξη. Αν δεν αντιμετωπιστεί, η έλλειψη νερού μπορεί να οδηγήσει σε λειψυδρία, η οποία θα μπορούσε στα επόμενα 6 χρόνια να επιφέρει σοβαρούς κινδύνους σε περίπου 700 εκατομμύρια ανθρώπους (UN, 2020). Μια εκτίμηση τοποθετεί το χάσμα μεταξύ ζήτησης και προσφοράς νερού στο 40% έως το 2030, με δραματική και άνιση αύξηση της ζήτησης μεταξύ των χωρών (UNEP, 2015). Στο πλαίσιο αυτής της προοπτικής, η αποτελεσματική διαχείριση των υδατικών πόρων που βασίζεται σε αξιόπιστες πληροφορίες είναι πλέον επιτακτική ανάγκη. Η έγκαιρη και αξιόπιστη αξιολόγηση και παρακολούθηση των υδατινών πόρων και η συστηματική εξερεύνηση και η ανάπτυξη νέων είναι υψίστης σημασίας (Mohammadi, 2019). Με τα παραπάνω είναι σύμφωνη και η Ε.Ε, η οποία ήδη από το 2000, με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων, γνωστή ως «Οδηγία-Πλαίσιο για τα Νερά» είχε θέσει ως κεντρική ιδέα την ολοκληρωμένη διαχείριση των υδάτων σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού (Οδηγία 2000/60/ΕΚ). Η ΔΥΠ δεν αφορά μόνο αυτούς που παίρνουν αποφάσεις (πολιτικούς, κυβέρνηση, κ.α.), αλλά και τους μελετητές, ερευνητές, τεχνοκράτες (Ζουρούδη, 2009). Αναπόσπαστο κομμάτι της είναι η υδρολογική και η υδραυλική μοντελοποίηση, κάτι το οποίο απαιτεί την ορθολογική συλλογή και αποθήκευση υδρολογικών, μετεωρολογικών, υδραυλικών και μορφολογικών-τοπογραφικών δεδομένων.

Η έκρηξη της τεχνολογίας των υπολογιστών κατέστησε όχι μόνο δυνατή, αλλά και ευκολότερη την ανάπτυξη εφαρμογών υπολογιστών για την αντιμετώπιση του προβλήματος της αποθήκευσης, χειρισμού και ανάλυσης μεγάλου όγκου γεωγραφικών (χωρικών) δεδομένων που αφορούν τους υδατικούς πόρους. Τα ΓΣΠ επιτρέπουν την συλλογή και την αναπαράσταση τέτοιων δεδομένων ακόμα και αν αυτά προέρχονται από διαφορετικές πηγές, συμβάλλοντας στην επίτευξη του στόχου του ΟΗΕ (The Sustainable Development Goals Report 2020) έως το 2030 να είναι δυνατή η εφαρμογή της ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδατικών πόρων, σε όλα τα επίπεδα, συμπεριλαμβανομένου μέσω της διασυνοριακής συνεργασίας, ως ενδείκνυται (UN, 2020). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλα τα στάδια μιας διαχείρισης: α) στην προεπεξεργασία δεδομένων καθώς διαθέτουν γεωγραφική βάση δεδομένων, β) στον υπολογισμό αποτελεσμάτων διότι κατέχουν κατάλληλα προγράμματα που εκτελούν έναν αρκετά μεγάλο αριθμό επεξεργασιών και αναλύσεων χωρικών δεδομένων και τέλος γ) στην απεικόνιση των αποτελεσμάτων λόγω της θεμελιώδους λειτουργίας τους να χαρτογραφούν τα δεδομένα εξόδου, δίνοντας στον χρήστη την δυνατότητα να προσθέσει ό,τι επιθυμεί για την δημιουργία του χάρτη (σύμβολα, χρώματα, υπόμνημα, κ.α.). Επίσης, έχουν αναπτυχθεί Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών για την μοντελοποίηση βροχόπτωσης-απορροής των επιφανειακών υδάτων, για την εκτίμηση κινδύνου μόλυνσης υπόγειων υδάτων, την ορθολογική λειτουργία συστημάτων ύδρευσης και αποχέτευσης, την διαχείριση αστικών ομβρίων αλλά και για την αξιολόγηση καταλληλότητας χρήσης εναλλακτικών υδατικών πόρων, όπως τα επεξεργασμένα λύματα, για αρδευτικούς σκοπούς και για τεχνητό εμπλουτισμό υπόγειου υδροφόρου.

1. Εισαγωγή στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών

1.1 Γενικά

Ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (ΓΣΠ) ή κατά την ξένη ορολογία Geographic Information System (GIS) είναι ένα σύστημα που βασίζεται στη χαρτογράφηση των οντοτήτων που υπάρχουν στην επιφάνεια της γης και των γεγονότων που συμβαίνουν χρονικά σε έναν δεδομένο γεωγραφικό χώρο. Σε αντίθεση με άλλα υπολογιστικά συστήματα που υπάρχουν, τα ΓΣΠ διαθέτουν ειδικά εργαλεία και αλγόριθμους που καθιστούν δυνατή την αυτόματη ανακάλυψη των σχέσεων/συσχετίσεων μεταξύ των εν λόγω οντοτήτων στην επιφάνεια της γης και των χρονικών γεγονότων (Burrough P.A 1986, Demers M. 2000, Κουτσόπουλος 2002). Η ικανότητα των ΓΣΠ να συνδυάζουν τα οφέλη των βάσεων δεδομένων με την ρεαλιστική απεικόνιση "χαρτών" (αναλογικών ή ψηφιακών) διακρίνει τα ΓΣΠ από άλλα συστήματα διαχείρισης πληροφοριών (CAD,Databases κλπ). Τα χαρακτηριστικά αυτά τα καθιστούν ιδιαίτερα χρήσιμα κατά τη διεξαγωγή έρευνας και την ανάλυση χωρικών προβλημάτων (Burrough 1986, Longley κ.α., 2005).

1.2 Μορφές Δεδομένων

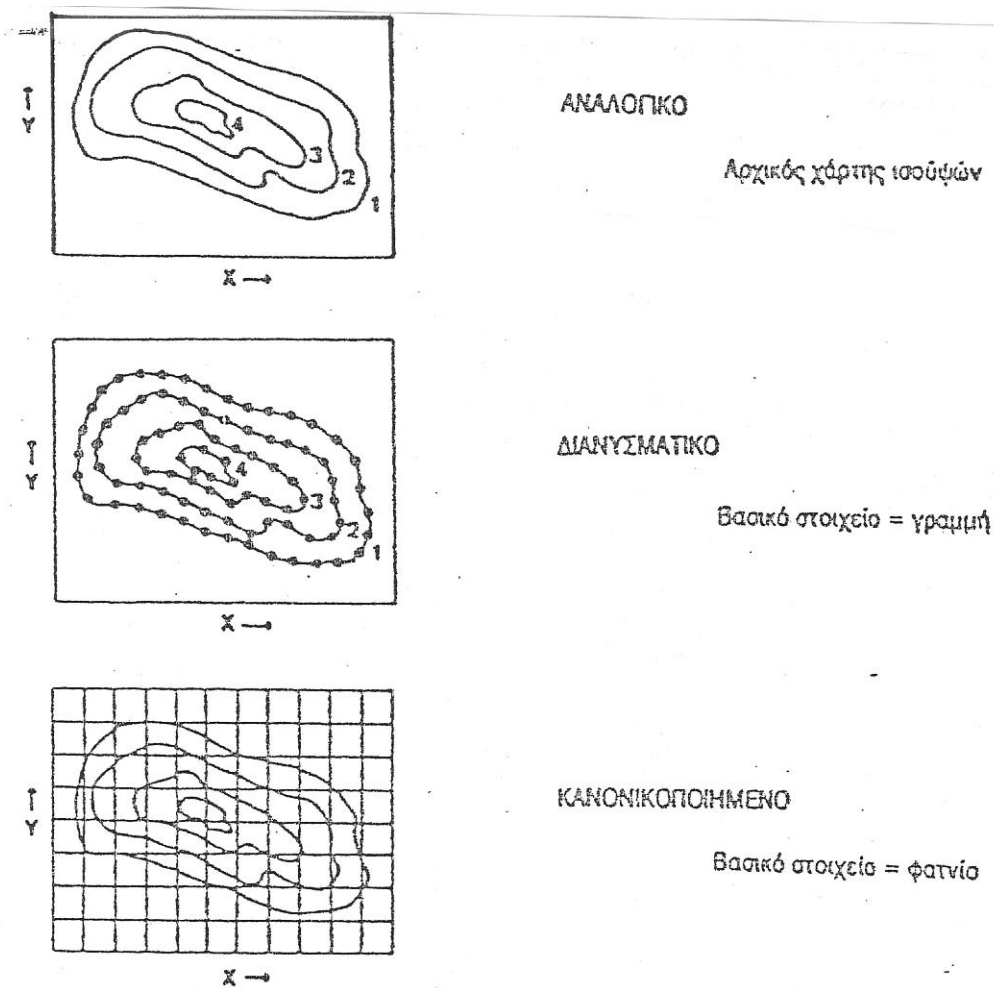
Βασικό χαρακτηριστικό ενός ΓΣΠ είναι η συλλογή, αποθήκευση, διαχείριση, ανάλυση και παρουσίαση γεωγραφικών δεδομένων με κοινή γεωαναφορά. Γεωγραφικό στοιχείο/δεδομένο είναι το χωρικό εκείνο στοιχείο ή οντότητα που υποπίπτει στην ανθρώπινη αντίληψη και αναφέρεται σε φαινόμενα που σχετίζονται με τη γη. Αυτά τα δεδομένα διακρίνονται σε χωρικά και περιγραφικά.

- **Χωρικά ή ποσοτικά ή γεωμετρικά δεδομένα**

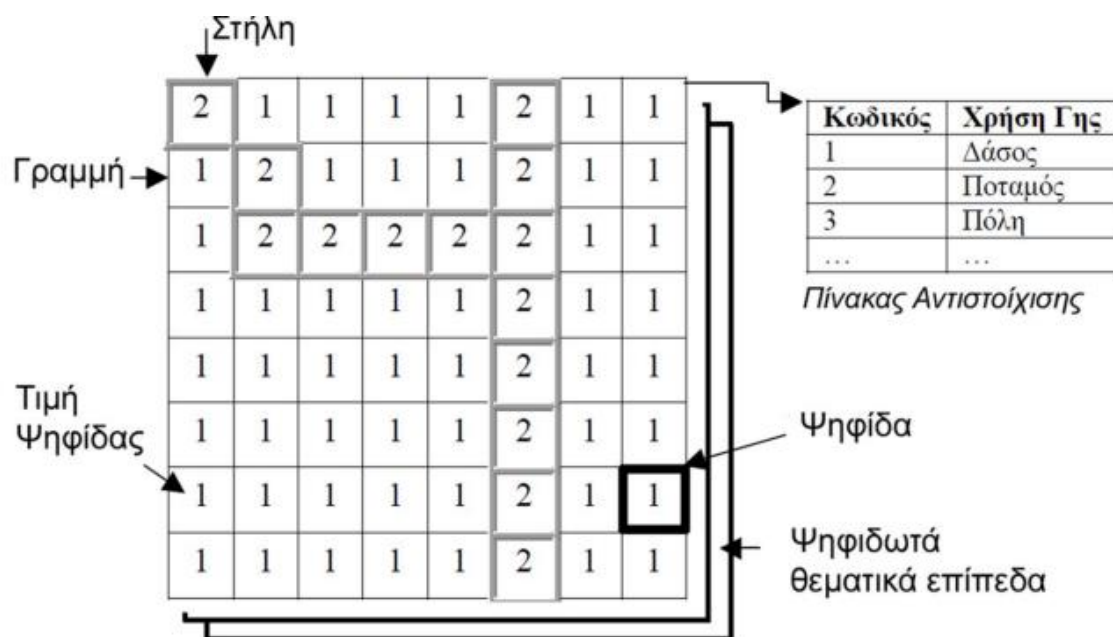
Είναι τα δεδομένα που αφορούν τη θέση του γεωγραφικού στοιχείου στο χώρο και απεικονίζονται με σημεία, γραμμές και επιφάνειες. Για παράδειγμα η θέση μιας πόλης σε ένα χάρτη αναπαριστάται με ένα σημείο, οι δρόμοι και τα ποτάμια με γραμμές και τα οικοπέδα ή διοικητικά όρια με πολύγωνα (επιφάνεια). Βέβαια, όταν ένα ποσοτικό δεδομένο αφορά την ποιοτική περιγραφή του στοιχείου και όχι τη θέση του, τότε αυτό μπορεί να είναι και περιγραφικό.

Το ΓΣΠ είναι ένα πρόγραμμα που ενσωματώνει τη χωρική πληροφορία είτε σε Διανυσματικά (vector) αρχεία είτε σε Μωσαϊκού (raster ή grid) τύπου αρχεία. Το διανυσματικό μοντέλο χωρικών δεδομένων (vector spatial model) είναι μια αναπαράσταση γεωγραφικών δεδομένων με τη χρήση αντικειμένων σημειακής, γραμμικής ή πολυγωνικής μορφής (Χαλκιάς, 2006). Αυτός ο τρόπος αναπαράστασης είναι ιδιαίτερα αποδοτικός για την αποθήκευση δεδομένων τα οποία παρουσιάζουν διακριτά όρια, όπως είναι για παράδειγμα τα οικοδομικά τετράγωνα, τα όρια διοικητικών μονάδων (π.χ. δήμων) ή οι δρόμοι (Burrough, 2000). Συνήθως, τα δεδομένα αυτού του τύπου οργανώνονται σε επίπεδα (layers) ομοειδών αντικειμένων τα οποία έχουν κοινή χωρική αναφορά (Chang, 2003).

Στα μωσαϊκά μοντέλα, ο γεωγραφικός χώρος έχει χωριστεί σε χωρία κανονικού σχήματος (φατνία ή κυψέλες ή ψηφίδες), το καθένα από τα οποία αποτελεί βασική λογική μονάδα (Τσουχλαράκη, 2001). Τα ψηφιδωτά δεδομένα γενικώς χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στα θεματικά και στις εικόνες. Ορισμένες μετρούμενες ποσότητες ή η κατηγοριοποίηση ενός φαινομένου όπως υψόμετρο, πληθυσμός κλπ αναπαρίστανται με τις τιμές σε ένα θεματικό ψηφιδωτό. Για παράδειγμα μία τιμή 1 σε ένα φατνίο μπορεί να αναπαριστά Δάσος σε ένα χάρτη κάλυψης γης (Σχήμα 2). Αντιστοίχως, οι τιμές ενός φατνίου σε μια εικόνα αναπαριστά το ανακλώμενο ή το εκπεμπόμενο φως ή ενέργεια όπως κάποια δορυφορική εικόνα ή σαρωμένη φωτογραφία (Δημοπούλου, 2005). Αυτός ο τρόπος αναπαράστασης είναι ιδιαίτερα αποδοτικός – μεταξύ των άλλων – και για την αποθήκευση δεδομένων τα οποία προέρχονται από αισθητήρες Τηλεπισκόπησης (Χαλκιάς και Γκούσια, 2015). Τα σύγχρονα ΓΣΠ παρέχουν την δυνατότητα χρήσης και των δύο παραπάνω χωρικών μοντέλων (διανυσματικών και ψηφιδωτών).



Σχήμα 1: Βασικοί τύποι χωρικών μοντέλων (Τσουχλαράκη, 2001)



Σχήμα 2: Θεματικό ψηφιδωτό μοντέλο χωρικών δεδομένων (Χαλκιάς και Γκούσια, 2015)

Πηγές Χωρικών Δεδομένων

Οι βασικές πηγές δεδομένων είναι η τηλεπισκόπηση ή τηλεανίχνευση (remote sensing) και το Παγκόσμιο Σύστημα Στιγματοθέτησης ή Θεσιθεσίας (Global Positioning System, GPS). Η τηλεπισκόπηση είναι η διαδικασία ανίχνευσης και παρακολούθησης των φυσικών χαρακτηριστικών μιας περιοχής μέσω της μέτρησης της ανακλώμενης και εκπεμπόμενης ακτινοβολίας της από απόσταση, συνήθως από δορυφόρο ή αεροπλάνο (Mather και Koch, 2011). Βασικά πλεονεκτήματα αυτών των δεδομένων είναι η συχνή τους ενημέρωση και λόγω της τωρινής διακριτικής ικανότητας των δορυφόρων οι εικόνες είναι καλής ποιότητας (Χαλκιάς X, 2022). Το GPS καταγράφει τη γεωγραφικής θέσης ακίνητων ή κινούμενων αντικειμένων χρησιμοποιώντας ένα δίκτυο δορυφόρων εφοδιασμένων ειδικές ηλεκτρονικές συσκευές (δέκτες GPS). Οι πομποδέκτες παρέχουν ακριβείς πληροφορίες σχετικά με τη θέση ενός σημείου, το υψόμετρό του, την ταχύτητα και την κατεύθυνση της κίνησης του, είναι φθηνοί και εύχρηστοι (Χαλκιάς X., 2022).

Περιγραφικά ή ποιοτικά ή θεματικά δεδομένα

Πρόκειται για δεδομένα τα οποία αφορούν τα χαρακτηριστικά ποιότητας ενός γεωγραφικού στοιχείου. Ανάλογα με τον τρόπο και την κλίμακα καταγραφής τους διακρίνονται σε: ονομαστικά, τακτικά, ποσοτικά και αναλογικά. Ονομαστικά είναι τα δεδομένα που χρησιμοποιούν μια ποιοτική, μη αριθμητική και μη γραμμική κλίμακα, πχ η ιδιότητα «χρήσεις γης» μπορεί να πάρει τιμές αστική, αγροτική κ.λπ. Τακτικά είναι τα χαρακτηριστικά που καταγράφονται σύμφωνα με κάποια διάταξη, όπως πχ είναι οι τιμές μικρή, μεσαία, μεγάλη για την ιδιότητα «μέγεθος». Ποσοτικά είναι εκείνα που χρησιμοποιούν μια τακτική κλίμακα με αριθμούς με αυθαίρετο μηδέν (πχ η θερμοκρασία σε °C) και αναλογικά που χρησιμοποιούν μια ποσοτική κλίμακα με απόλυτο μηδενικό σημείο εκκίνησης όπως πχ το «Υψόμετρο» (απόσταση από την επιφάνεια της θάλασσας) μετριέται σε μέτρα.

Αυτά τα μη χωρικά δεδομένα αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων ξεχωριστά από το γραφικό τμήμα του χάρτη και αξίζει να σημειωθεί ότι τα λογισμικά πακέτα του GIS

διατηρούν εσωτερικούς δεσμούς κάθε γραφικής οντότητας του χάρτη με τη γραφική πληροφορία.

Τα χωρικά και περιγραφικά δεδομένα για οργανωτικούς σκοπούς δεν τοποθετούνται όλα σε ένα θεματικό επίπεδο (layer) στον υπολογιστή, αλλά σε πολλά παράλληλα θεματικά επίπεδα, διαμορφώνοντας έτσι μια διαστρωματωμένη γεωγραφική βάση, δημιουργώντας μια πλήρη εικόνα μιας περιοχής. Έτσι, ομοειδή στοιχεία βρίσκονται μαζί σε ένα θεματικό επίπεδο, εισάγονται, διορθώνονται, επεξεργάζονται και παρουσιάζονται μαζί, αλλά δεν επηρεάζουν στοιχεία άλλου τύπου (Νικολακόπουλος, 2015).

Εκτός από τα γεωγραφικά, τα δεδομένα ενός ΓΣΠ διακρίνονται στα χρονικά και στα μεταδεδομένα.

- Χρονικά δεδομένα (Χρονοσειρές)

Με τον όρο χρονοσειρά νοείται μια σειρά από παρατηρήσεις που γίνονται σε καθορισμένες χρονικές στιγμές ή περιόδους που ισαπέχουν μεταξύ τους (π.χ. οι ημερήσιες τιμές θερμοκρασίας που μετράει ένας μετεωρολογικός σταθμός). Το GIS διαθέτει την ικανότητα της χωρικής κατανομής τέτοιων δεδομένων σε μια περιοχή και της συσχέτισής τους με τα γεωγραφικά δεδομένα της καθώς και της γραφικής τους αναπαράστασης των μεταβολών τους.

- Μεταδεδομένα

Τα μεταδεδομένα είναι πληροφορίες για τα δεδομένα, δηλαδή πληροφορίες που περιγράφουν το περιεχόμενο γεωχωρικών δεδομένων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός ψηφιακού υδρογραφικού δικτύου τα μεταδεδομένα είναι πληροφορίες που αφορούν το πότε και από ποιον δημιουργήθηκε, η κλίμακά του και τα σφάλματα του. Κυρίως για ερευνητικούς λόγους, στην ευρωπαϊκή ένωση δημιουργήθηκε η κοινοτική Οδηγία INSPIRE με σκοπό όλα τα γεωχωρικά δεδομένα που δημιουργούνται να συνοδεύονται απαραίτητως από μεταδεδομένα (ΕΕ, 2007).

1.3 Βασικές Λειτουργίες ενός ΓΣΠ

Ένα ΓΣΠ παρέχει ορισμένες βασικές λειτουργίες που αφορούν την συλλογή, επεξεργασία και ανάλυση της γεωγραφικής πληροφορίας (Τσουχλαράκη, 2001):

1. Γεωγραφική Βάση Δεδομένων

Το σύστημα αυτό διαθέτει μια γεωγραφική βάση δεδομένων όπου εκεί καταχωρούνται τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 1.2 σε ψηφιακή μορφή.

2. Ψηφιοποίηση

Ένα ΓΣΠ υποστηρίζει εργασίες ψηφιοποίησης για τη καταχώριση της πληροφορίας σε ψηφιακή μορφή. Ουσιαστικά, τα δεδομένα που διαθέτουν οι χάρτες και οι εικόνες μετατρέπονται από αναλογική σε ψηφιακή μορφή για να μπορεί να τις «διαβάσει» ο Η/Υ και να αποτελέσουν δεδομένα της γεωγραφικής βάσης.

3. Επεξεργασία εικόνας

Παρόλο που οι δορυφορικές εικόνες παρέχονται ήδη σε ψηφιακή μορφή, για την περαιτέρω ανάλυσή τους είναι απαραίτητος ο ραδιομετρικός και γεωμετρικός μετασχηματισμός τους, δηλαδή επεξεργασίες που αφορούν το χρώμα και τη γεωμετρική δομή της εικόνας. Σήμερα, τα περισσότερα ΓΣΠ μπορούν να αναλύσουν και να επεξεργαστούν δορυφορικές εικόνες (LANDSAT, SPOT κ.ά.) διασφαλίζοντας κατ' αυτό τον τρόπο άλλο ένα θεμελιώδες μέσο συλλογής δεδομένων για τη γεωγραφική βάση του ΓΣΠ.

4. Διαχείριση Βάσης Δεδομένων

Είναι αρκετά τα ΓΣΠ που διαθέτουν εργαλεία για εισαγωγή, επεξεργασία και ανάλυση περιγραφικών δεδομένων καθώς και την δυνατότητα επικοινωνίας με άλλες βάσεις δεδομένων εκτός ΓΣΠ, όπως Dbase, Access, κ.α. Μέσω της ανάλυσης των περιγραφικών δεδομένων επιτυγχάνεται η δημιουργία στατιστικών στοιχείων.

5. Γεωγραφική Ανάλυση

Η Γεωγραφική ανάλυση αποτελεί το πιο σημαντικό κομμάτι ενός ΓΣΠ. Όλα τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών κατέχουν κατάλληλα προγράμματα που εκτελούν έναν αρκετά μεγάλο αριθμό επεξεργασιών και αναλύσεων χωρικών δεδομένων. Η δημιουργία ενός νέου σύνθετου χάρτη από τον συνδυασμό χαρτών με την διαδικασία της επικάλυψης (overlay) αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές προσφορές των ΓΣΠ. Μερικές από τις πολλές γεωγραφικές αναλύσεις που αξίζει να σημειωθούν είναι επίσης η προσομοίωση και η μοντελοποίηση, οι μετατροπές κλιμάκων και η διερεύνηση χαρακτηριστικών κάποιου συγκεκριμένου μεγέθους.

6. Στατιστική Ανάλυση

Τα ΓΣΠ είναι επίσης είναι επίσης εξοπλισμένα με ειδικά προγράμματα τα οποία υποστηρίζουν στατιστικές αναλύσεις χωρικών δεδομένων οι οποίες είναι πιο αποτελεσματικές από τις κλασικές στατιστικές διαδικασίες για την επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων που θέτουν τα χωρικά δεδομένα.

7. Χαρτογραφική Σχεδίαση ή Απόδοση

Αποτελεί μια από τις θεμελιώδεις λειτουργίες των ΓΣΠ. Οι πληροφορίες που λαμβάνονται από την γεωγραφική ανάλυση αποτυπώνονται σε χάρτη. Δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να προσθέσει ότι χρειάζεται για την δημιουργία του χάρτη, όπως είναι τα σύμβολα, χρώματα, υπόμνημα κ.λπ.

1.4 Συστατικά Στοιχεία ενός ΓΣΠ

Ένα ΓΣΠ απαρτίζεται από τον τεχνολογικό εξοπλισμό (hardware) και το λογισμικό υποστήριξης των λειτουργιών (software) (Νικολακόπουλος, 2015).

Hardware

Τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών απαιτούν ένα υπολογιστικό σύστημα με όσο το δυνατόν μεγαλύτερες δυνατότητες επεξεργασίας (γρήγορο επεξεργαστή, πολύ μεγάλη μνήμη κ.λπ.). Αυτό μπορεί να είναι είτε ένας προσωπικός υπολογιστής (PC), είτε ένας σταθμός εργασίας (workstation), είτε ένα ακόμη ισχυρότερο σύστημα (π.χ., ένα mainframe σύστημα).

Συγκεκριμένα, η κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU) πρέπει να είναι συνδεδεμένη με περιφερειακές μονάδες οι οποίες είναι απαραίτητες για την λειτουργία ενός ΓΣΠ, όπως είναι:

Α) Ένα σύστημα αποθήκευσης με πολύ μεγάλη χωρητικότητα (μόνιμοι ή κινητοί σκληροί δίσκοι, οπτικοί και μαγνητοοπτικοί δίσκοι) και σύστημα αντιγράφων εφεδρείας (backup).

Β) Ένας ψηφιοποιητής (digitizer) για την μετατροπή των γεωγραφικών δεδομένων και των εικόνων σε ψηφιακή μορφή. Μια εναλλακτική λύση για την είσοδο χωρικών και μη χωρικών δεδομένων είναι η χρήση σαρωτών (scanners).

Γ) Σύστημα απεικόνισης που να επιτρέπει έγχρωμες γραφικές απεικονίσεις υψηλής ανάλυσης και απεικονίσεις κειμένου.

Δ) Ένας σχεδιογράφος (plotter) είτε ένας εκτυπωτής (printer) για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε έντυπη μορφή.

Software

Το απαραίτητο λογισμικό διακρίνεται σε δύο βασικές κατηγορίες: το εμπορικό και το ελεύθερο ή ανοιχτού κώδικα λογισμικό.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα εμπορικού λογισμικού αποτελούν οι ακόλουθες εταιρίες:

- ESRI: ArcGIS, ArcInfo, ArcView,
- Intergraph: Geomedia, MGE,
- Auto Desk: AutoCAD Map, MapGuide,
- MapInfo: MapInfo,
- Bentley: Microstation,
- PCI Geomatica (PANMAP, SPANS).

Τα τελευταία χρόνια, με την παράλληλη ανάπτυξη των ελεύθερων λειτουργικών συστημάτων (linux), εμφανίστηκε το λογισμικό ανοιχτού κώδικα για εφαρμογές GIS. Τέτοιου είδους λογισμικά που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα είναι τα: GRASS, Quantum GIS και ILWIS.

Απαραίτητο για την λειτουργία ενός ΓΣΠ είναι και το λογισμικό των Βάσεων Δεδομένων: Oracle, DB2, Informix, Sybase, Microsoft SQL και Access.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί και το λογισμικό που σχετίζεται με διάφορες γλώσσες προγραμματισμού καθώς οι ίδιες αποτελούν τώρα πια αναπόσπαστο μέρος των ΓΣΠ που αναπτύσσουν καινούργιες εφαρμογές.

1.5 Πλεονεκτήματα των ΓΣΠ

Σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθοδολογίες διαχείρισης δεδομένων, τα ΓΣΠ διακρίνονται για (Νικολακόπουλος, 2015):

-Την δυνατότητα που δίνουν στον χρήστη να εντάσσει δεδομένα σε αυτά από διαφορετικές πηγές αλλά και για την αποφυγή ασυμφωνίας που προέρχεται όταν η ίδια πληροφορία εισάγεται από δύο διαφορετικές υπηρεσίες.

-Την αναπαράσταση των αποτελεσμάτων σε διαγράμματα, χάρτες κλπ με μεγάλη ευκολία και ακρίβεια.

-Την διευκόλυνση του χρήστη να αναπτύσσει νέες τεχνικές και ιδέες, καθώς τον απαλλάσσουν από χρονοβόρες διαδικασίες οι οποίες εκτελούνται πλέον άμεσα και αξιόπιστα από τον Η/Υ.

-Την διαχείριση χαρτών υπό διαφορετικές κλίμακες.

-Την ψηφιακή μορφή δεδομένων η οποία είναι συμβατή με πολλά συστήματα και σε αντίθεση με την αναλογική, τα δεδομένα διατηρούνται στην αρχική τους ακρίβεια με την πάροδο του χρόνου.

-Το σχετικά χαμηλό κόστος για τις σύνθετες μορφές ανάλυσης χαρτών που παρέχουν (π.χ. συνδυασμός θεματικών χαρτών).

-Την εύχρηστη ενημέρωση της βάσης δεδομένων, την ενσωμάτωση και χρήση προηγμένων μεθοδολογιών επεξεργασίας (δυναμικά συστήματα).

-Τον αντικειμενικό και κοινό τρόπο αναλύσεων και απόδοσης αποτελεσμάτων.

-Την σύνδεση μεταξύ των χωρικών και περιγραφικών δεδομένων.

-Τον γρήγορο έλεγχο εναλλακτικών λύσεων.

1.6 Εφαρμογές GIS

Τα ΓΣΠ πλέον χρησιμοποιούνται ως εργαλείο διαχείρισης δεδομένων και λήψης αποφάσεων σε πολλαπλά πεδία εφαρμογών. Κάποιες βασικές εφαρμογές, οι οποίες υλοποιούνται είτε από μεγάλους οργανισμούς ή μικρότερους ανεξάρτητους φορείς και ερευνητές, αναφέρονται παρακάτω.

Γεωργικές Εφαρμογές:

Στον τομέα της γεωργίας μπορεί να γίνει εφικτός ο προσδιορισμός του περιορισμού των καλλιεργειών λόγω κλίματος, η διαθεσιμότητα, η εκτίμηση και ο προγραμματισμός των εδαφικών πόρων, η χαρτογράφηση κινδύνου καλλιέργειας και η εκτίμηση απώλειας σοδειάς και ο χαρακτηρισμός ενός αγρο-οικοσυστήματος (Mohammadi, 2019). Επιπλέον τα GIS μπορούν να συμβάλλουν στον προγραμματισμό της παραγωγής καλλιεργειών και κατά συνέπεια της αγροτικής ανάπτυξης.

Περιβαλλοντικές Εφαρμογές:

Με την δημιουργία και διαχείριση βάσεων περιβαλλοντικών δεδομένων σε τοπικό, εθνικό ή και διεθνές επίπεδο τα ΓΣΠ έχουν εφαρμογή στις γεωεπιστήμες, στον τομέα της δασολογίας, οικολογίας κ.λπ. Οι χάρτες μικρής και μεσαίας κλίμακας σε συνδυασμό με τις δορυφορικές εικόνες χρησιμοποιούνται για την διαχείριση φυσικών πόρων και για τις εκτιμήσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Χαλκιάς, 2022) . Επίσης τα ΓΣΠ αποτελούν εύχρηστα εργαλεία και την εκτίμηση φυσικών καταστροφών.

Διαχειριστικές Εφαρμογές:

Η χρήση τέτοιων συστημάτων συνηθίζεται στην τοπική αυτοδιοίκηση, στον χωροταξικό-πολεοδομικό σχεδιασμό και στις μεταφορές. Χάρτες μεγάλης ή μεσαίας κλίμακας και τεχνικές χωρικής ανάλυσης χρησιμοποιούνται και στον τομέα των οδικών δικτύων για τον καθορισμό βέλτιστης διαδρομής, τη χωροθέτηση υπηρεσιών κ.λπ. (Χαλκιάς, 2022).

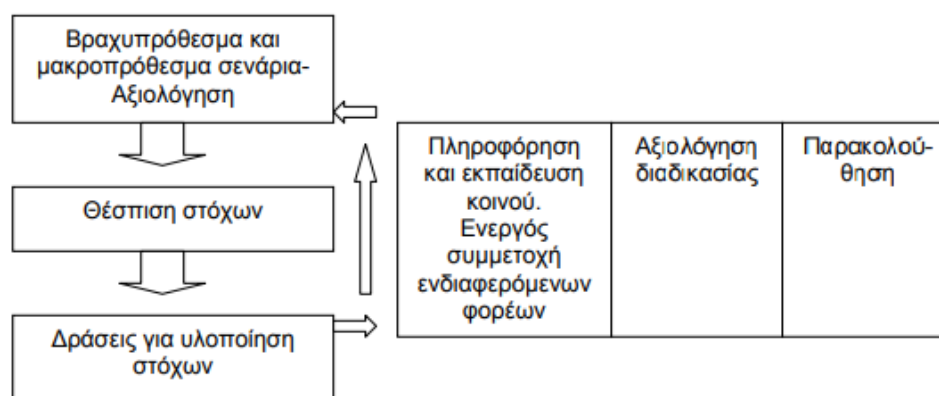
Κοινωνικές Εφαρμογές:

Μερικές εφαρμογές οι οποίες συντείνουν την κοινωνική και οικονομική ευημερία είναι: οι εφαρμογές κτηματολογίου, οι δημογραφικές έρευνες, εφαρμογές στην εγκληματολογία, στην αρχαιολογία, στις επιστήμες υγείας κ.λπ. (Χαλκιάς, 2022)

2. Διαχείριση Υδατικών Πόρων (ΔΥΠ)

Σήμερα, περισσότερο από ποτέ, η αυξημένη πίεση στο υδάτινο περιβάλλον απαιτεί την εφαρμογή πολιτικών βιώσιμης ανάπτυξης και διαχείρισης υδατικών πόρων μέσω του προγραμματισμού, υλοποίησης και βελτιστοποίησης των λειτουργιών έργων υποδομής και παρεμβάσεων για τη διαχείριση της προσφοράς και της ζήτησης, όπως μέσω μέτρων για τον περιορισμό χρήσης και για την επαναχρησιμοποίηση νερού (ΥΠΕΝ, 2015). Η διαχείριση της προσφοράς και ζήτησης είναι αναγκαία καθώς η χωρική και χρονική ανισοκατανομή του πόρου, η γενικότερη ποιοτική υποβάθμιση των διαθέσιμων υδατικών πόρων και η κλιματική αλλαγή περιορίζουν την προσφορά νερού, ενώ συγχρόνως η ζήτησή του αυξάνεται (Αλαμάνος, 2019). Η ΔΥΠ περιλαμβάνει μεθόδους και δραστηριότητες που συμβάλλουν στην ορθολογική και βέλτιστη αξιοποίηση του υδατικού δυναμικού για την αποφυγή λειψυδρίας και όλων των σοβαρών προβλημάτων που επιφέρει (Μυλόπουλος, 2006). Οι στόχοι της διαχείρισης των υδατικών πόρων είναι: η προστασία των υδάτων, η πρόσβαση σε καθαρό και πόσιμο νερό, η άμβλυνση της επίδρασης των φυσικών κινδύνων, η βελτίωση των υποδομών αποθήκευσης και διανομής νερού, η αύξηση της γεωργικής παραγωγής και η αναζωογόνηση των υδατικών πόρων (Stumptner, 2007). Γενικότερα, η διαχείριση των υδατικών πόρων επιδιώκει να αξιοποιήσει τα οφέλη του νερού διασφαλίζοντας ότι υπάρχει επαρκές νερό ικανοποιητικής ποιότητας για πόση, παραγωγή τροφίμων και ενέργειας, αναψυχή, διατηρώντας και προστατεύοντας τα υδάτινα οικοσυστήματα (World Bank, 2022).

Η ΔΥΠ αφορά τόσο την πληροφόρηση σχετικά με τον υδατικό πόρο όσο και τον ορθό προγραμματισμό των χρήσεων του (Χαριζόπουλος, 2017). Σύμφωνα με την Οδηγία-Πλαίσιο για το Νερό, η Διαχείριση των Υδατικών Πόρων είναι μια κυκλική διαδικασία η οποία συγκροτείται από σχεδιασμό, δράση και αξιολόγηση.



Σχήμα 3: Διαχείριση σύμφωνα με την Οδηγία-Πλαίσιο για το Νερό (2000/60/EK)

2.1 Βασικοί Ορισμοί

Για την πλήρη κατανόηση της διαχείρισης των υδατικών πόρων είναι αναγκαία η αναφορά σε στοιχειώδεις έννοιες που αφορούν το φυσικό περιβάλλον:

Υδατικοί πόροι:

Υδατικός πόρος είναι ο όγκος νερού, επιφανειακού και υπογείου, συγκεκριμένης ποιότητας που τον καθιστά τεχνικοοικονομικά αξιοποιήσιμο σε καθορισμένη χρονική περίοδο, χωρίς να προκαλούνται ανεπιθύμητες, ποιοτικά και ποσοτικά επιπτώσεις στο υδατικό δυναμικό μιας περιοχής ή των γειτονικών της περιοχών. Ως υδατικό δυναμικό νοείται το άθροισμα των επιφανειακών και υπογείων νερών μιας περιοχής σε καθορισμένο χρόνο που προέρχεται από τις διαδικασίες του υδρολογικού κύκλου και της αποθήκευσής του σε υπόγειους ταμιευτήρες (Χαριζόπουλος, 2017).

Λεκάνη απορροής:

Σημαντικό παράγοντα για τον προσδιορισμό των υδατικών πόρων αποτελεί η πλέον χαρακτηριστική χωρική τους κλίμακα, η λεκάνη απορροής (watershed, catchment, drainage basin, river basin). Η λεκάνη απορροής ή αλλιώς συλλεκτήρια λεκάνη, είναι μία τοπογραφικά ορισμένη περιοχή η οποία αποστραγγίζεται είτε από ένα ρέμα ή από ένα σύστημα συγκοινωνούντων ρεμάτων τα οποία καταλήγουν σε κάποιο μοναδικό σημείο απορροής (Καρατζάς, 2022). Τα εξωτερικά όρια της λεκάνης απορροής καθορίζονται από την υδροκριτική γραμμή η οποία ορίζεται με βάση το ανάγλυφο της περιοχής και επί της ουσίας διαχωρίζει φυσικά την επιφανειακή απορροή σε διάφορες κατευθύνσεις. Η λεκάνη απορροής ποταμού αποτελεί τη μονάδα διαχείρισης των υδάτων έτσι ώστε να επιτρέπεται η ολοκληρωμένη προστασία των υδάτων, λαμβάνοντας υπόψη όλων των κρίσιμων παραγόντων, από την πηγή έως την εκβολή.

Επιφανειακή Απορροή:

Με τον όρο επιφανειακή ροή εννοούμε τη ροή του νερού, υπό την επίδραση της βαρύτητας, κατά μήκος των φυσικών υδατορευμάτων. Οι όροι streamflow και runoff χρησιμοποιούνται στην αγγλική βιβλιογραφία κατά κανόνα ως ισοδύναμοι μεταξύ τους (Ward και Robinson, 1989). Ποσοτικά η επιφανειακή απορροή εκφράζεται με όρους παροχής, όγκου ή ισοδύναμου ύψους. Από τεχνικής απόψεως, η επιφανειακή απορροή είναι το σημαντικότερο στοιχείο του υδρολογικού κύκλου, τόσο επειδή παρέχει το μεγαλύτερο μέρος του εκμεταλλεύσιμου νερού όσο και επειδή προκαλεί φυσικούς κινδύνους σε περίπτωση πλημμύρας (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Υδροφορέας:

Υδροφορέας (aquifer) είναι ένας υπεδάφιος σχηματισμός που περιέχει σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών κορεσμένων με ύδωρ και τα οποία προμηθεύουν φρέατα και πηγές με υδατικές ποσότητες. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων σχηματισμών συνίστανται από άμμο και χάλικες (Καρατζάς, 2022).

2.2 Τι είναι η Διαχείριση των Υδατικών Πόρων (Δ.Υ.Π);

Είναι η εφαρμογή μέτρων, κατασκευαστικών και μη, για τον έλεγχο των φυσικών και τεχνητών συστημάτων υδατικών πόρων με απώτερο σκοπό την βέλτιστη δυνατή κάλυψη των σημερινών αλλά και των μελλοντικών αναγκών σε νερό. Βασίζεται στον ορθολογικό προγραμματισμό του οποίου αναπόσπαστα κομμάτια αποτελούν τα αντικειμενικά κριτήρια

και οι οργανωμένες δραστηριότητες που πρωταρχικό τους μέλημα είναι η περιβαλλοντική προστασία και κατ' επέκταση η ανθρώπινη ευημερία (Τσακίρης, 1995). Έτσι, περιλαμβάνει τόσο επιστημονικές μεθόδους και τεχνικές, όσο και επιχειρησιακές παρεμβάσεις και διοικητικά μέτρα. Αποσκοπεί στην αλλαγή της κατάστασης ενός υδατικού πόρου προκειμένου να αποκομισθεί το μεγαλύτερο δυνατό όφελος από την εκμετάλλευσή του σύμφωνα με προκαθορισμένα κριτήρια, προτεραιότητες και στόχους (Serageldin, 1995). Το γεγονός ότι αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει φυσικούς, οικονομικούς, περιβαλλοντικούς καθώς και άλλους παράγοντες την καθιστά μια πολύπλοκη και διεπιστημονική διαδικασία. Συγκεκριμένα, η ΔΥΠ εμπεριέχει κλάδους όπως η υδρολογία, η υδραυλική, η γεωλογία, η εδαφολογία, η μετεωρολογία, η πληροφορική, η κοινωνιολογία, η πολιτική επιστήμη, τα οικονομικά, η νομική, η στατιστική και η θεωρία των πιθανοτήτων, η επιχειρησιακή έρευνα και η ανάλυση συστημάτων (Βασιλειάδης, 2017).

Η ΔΥΠ βασίζεται στη συνδυασμένη διαχείριση επιφανειακών και υπογείων υδατικών πόρων και θεμελιώδες στοιχείο της είναι η επιλογή της βέλτιστης πολιτικής για την επίτευξη ενός εξειδικευμένου στόχου ή αριθμού στόχων ταυτοχρόνως. Είναι μια συνεχής διαδικασία που απαιτεί χρόνο και γνώσεις για την ετοιμασία σχεδίων σε εθνικό και περιφερειακό επίπεδο τα οποία εξασφαλίζουν την καλύτερη δυνατή χρήση νερού βραχυπρόθεσμα αλλά και μακροπρόθεσμα. Για να μπορεί να χαρακτηριστεί ορθολογική μια διαχείριση, πρέπει αυτή να είναι ενιαία και ολοκληρωμένη και όχι διαχωρισμένη κάτω από διάφορες διοικητικές διαιρέσεις και να υπάρχει ένα κέντρο διεύθυνσης υπεύθυνο της διαχείρισης (Χαριζόπουλος, 2017).

2.3 Ολοκληρωμένη και Βιώσιμη διαχείριση υδατικών πόρων (Integrated and Sustainable Water Resources Management IWRM, SWRM)

Με τον όρο ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων εννοείται η δυναμική διαδικασία που αποσκοπεί στην βιωσιμότητα των υδάτινων οικοσυστημάτων η οποία περιλαμβάνει διάφορες επιστημονικές, κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές προσεγγίσεις. Η έννοια βιωσιμότητα αφορά εξίσου το περιβάλλον και την οικονομική ανάπτυξη. Αντικειμενικός σκοπός της είναι η διαφύλαξη και βελτίωση του περιβάλλοντος, ώστε η οικονομική ανάπτυξη να είναι με τη σειρά της βιώσιμη (Σιούτη, 2018). Ουσιαστικά, προάγεται η βιώσιμη ανάπτυξη η οποία σύμφωνα με την Έκθεση Brundland (WCDE) είναι «η ανάπτυξη που καλύπτει τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να διακινδυνεύει τη δυνατότητα των μελλοντικών γενιών να καλύψουν τις δικές τους ανάγκες». Η αειφορική διαχείριση των υδατικών πόρων διασφαλίζεται μόνο αν ο ρυθμός κατανάλωσής τους δεν ξεπερνά τον ρυθμό ανανέωσης. Για την εξασφάλιση μιας σωστής ισορροπίας μεταξύ χρήσης και ανανέωσης είναι απαραίτητη η ολοκληρωμένη κατανόηση του υδρολογικού καθεστώτος. Η εφαρμογή αειφορικής διαχείρισης αποκτά ιδιαίτερο νόημα τα τελευταία χρόνια εφόσον οι υδατικοί πόροι παύουν να είναι απεριόριστοι.

2.4 Σχέδια Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών (ΛΑΠ)

Για μια ολοκληρωμένη διαχείριση των υδάτων εντός μιας λεκάνης απορροής ποταμού απαιτούνται πληροφορίες και λειτουργικές οδηγίες οι οποίες εμπεριέχονται σε ένα Σχέδιο Διαχείρισης (ΣΔ). Το Σχέδιο αποτελεί έγγραφο στρατηγικού σχεδιασμού, το οποίο αντιστοιχεί σε ένα Υδατικό Διαμέρισμα (ΥΔ) της χώρας και στο οποίο γίνεται μια γενική περιγραφή των χαρακτηριστικών των ποταμών, των λιμνών, των παράκτιων υδάτων, των υπόγειων υδάτων και των προστατευόμενων περιοχών που σχετίζονται με τα ύδατα (Μουζιούρας, 2020). Ένα υδατικό διαμέρισμα είναι μια περιοχή που οριοθετείται από λεκάνες απορροής ή νησιωτικές περιοχές και περιλαμβάνει ολοκληρωμένα υδρογραφικά δίκτυα με όσο το δυνατόν παρόμοιες υδρολογικές συνθήκες. Για την προστασία του περιβάλλοντος, το Σχέδιο Διαχείρισης κάθε Υδατικού Διαμερίσματος συνοδεύεται από μια Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΣΜΠΕ) στην οποία γίνεται εκτίμηση των επιπτώσεων που θα έχουν στο περιβάλλον τα μέτρα που προβλέπεται να ληφθούν (ΥΠΕΝ, 2015).

2.5 Θεσμικό Πλαίσιο ΔΥΠ

Η Ευρωπαϊκή Κοινότητα αναγνωρίζει την ανάγκη ανάληψης δράσης για την αποφυγή μακροπρόθεσμης υποβάθμισης της ποιότητας και της ποσότητας των γλυκών υδάτων και την ανάπτυξη μιας συνολικής πολιτικής, για την προστασία τους. Η υδατική πολιτική διαμορφώνεται με την Ευρωπαϊκή Οδηγία- Πλαίσιο για τη διαχείριση των Υδάτων (Οδηγία 2000/60/ΕΚ) η οποία βρίσκεται σε ισχύ ως σήμερα. Αποτελεί θεσμικό θεμέλιο που εισάγεται στον τομέα του νερού σε διεθνές επίπεδο, αντικατοπτρίζει την τάση προς ολοκληρωμένο περιβαλλοντικό σχεδιασμό και διαχείριση του συνόλου των υδάτων (ποτάμια, λίμνες, μεταβατικά, παράκτια και υπόγεια ύδατα) και αναφέρεται για πρώτη φορά η εκπόνηση των διαχειριστικών σχεδίων σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού και όχι διοικητικών ορίων, κάτι που απαιτεί συνεργασία των αρμόδιων φορέων και συμμετοχικό σχεδιασμό. Επιγραμματικά, οι βασικοί στόχοι της Οδηγίας είναι: η ανόρθωση και η βελτίωση της κατάστασης των υδατικών οικοσυστημάτων και η πρόληψη από την υποβάθμιση τους, η προώθηση της αειφόρου χρήσης του νερού, η ενίσχυση της προστασίας του υδατικού περιβάλλοντος με ειδικά μέτρα κατά της ρύπανσης (Άρθρο 16), η μείωση των επιπτώσεων από έντονα φαινόμενα όπως πλημμύρες και ξηρασίες (2007/60/ΕΚ).

Βέβαια, αργότερα θεσπίστηκαν και νέες Οδηγίες που συμπληρώνουν την Οδηγία 2000/60/ΕΚ με τις οποίες εισάγονται κι άλλες υποχρεώσεις των Κρατών-Μελών για την προστασία των υδάτων από την υποβάθμιση και τη ρύπανση. Η Οδηγία 2000/60 μεταφέρθηκε πλήρως στην Ελληνική Εθνική νομοθεσία με το Ν.3199/2003: «Προστασία και διαχείριση των υδάτων – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23^{ης} Οκτωβρίου 2000» όπου έγκειται ο προσδιορισμός των υδατικών διαμερισμάτων και τα όρια δικαιοδοσίας των αρχών διαχείρισης, η περιβαλλοντική και οικονομική ανάλυση των χρήσεων ύδατος, τα μητρώα προστατευόμενων περιοχών και ο κατάλογος ουσιών προτεραιότητας. Με τον Ν.3199/2003 συνιστάται Εθνική Επιτροπή Υδάτων, η οποία χαράσσει την πολιτική για την προστασία και διαχείριση των υδάτων, παρακολουθεί και ελέγχει την εφαρμογή της και εγκρίνει, μετά από εισήγηση του Υπουργού Περιβάλλοντος και Ενέργειας και γνώμη του Εθνικού Συμβουλίου Υδάτων, τα

εθνικά προγράμματα προστασίας και διαχείρισης του υδατικού δυναμικού της χώρας (Χαριζόπουλος, 2017).

Στο Υπουργείο Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής συστάθηκε η Ειδική Γραμματεία Υδάτων (ΕΓΥ). Η ΕΓΥ συνεργαζόμενη με τις Περιφερειακές Διευθύνσεις Υδάτων καταρτίζει τα Εθνικά Προγράμματα προστασίας και διαχείρισης του υδάτινου δυναμικού της χώρας. Επιπρόσθετα, δραστηριοποιείται σχετικά με: την παρακολούθηση της ποσότητας και ποιότητας των υδάτων, την νιτρορύπανση που προέρχεται από την γεωργική δραστηριότητα, την διαχείριση και επαναχρησιμοποίηση λυμάτων, τις ακτές κολύμβησης και τις γαλάζιες σημαίες, το Εθνικό Μητρώο Σημείων Υδροληψίας (ΕΜΣΥ) καθώς και την αναθεώρηση τιμολόγησης και κοστολόγησης του νερού (ΥΠΕΝ).

Όσο αφορά την αιεφόρο διαχείριση, σύμφωνα με τη απόφαση του Συμβουλίου της Επικράτειας οι θεμελιώδεις αρχές της βιώσιμης διαχείρισης είναι: ο σχεδιασμός της πρέπει να είναι σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού, να λαμβάνεται υπόψη η σχέση ρεόντων και υπογείων υδάτων, η ποσότητα διαθέσιμων αποθεμάτων, η ολοκληρωμένη χρήση υδάτων, η αξιολόγηση των λαμβανομένων μέτρων σε σχέση με την ποιότητα και ποσότητα του υδατικού οικοσυστήματος που επηρεάζεται και ο προσανατολισμός της ζήτησης στις χρήσεις νερού, στις οποίες αποβλέπουν τα προγράμματα ανάπτυξης της χώρας (Σιούτη, 2018) .

Επομένως, η διαχείριση των υδατικών πόρων συνδέεται στενά με την πολιτική. Αυτό δεν σημαίνει ότι οι διαχειριστές πρέπει να είναι πολιτικοί, αλλά πρέπει να διαθέτουν την ικανότητα εργασίας σε άκρως πολιτικό περιβάλλον. Επίσης, προφανώς απαιτείται η κατάλληλη επιστημονική κατάρτιση καθώς πρόκειται για εξειδικευμένα προβλήματα όπως πλημμύρες, ταμειυτήρες, ποιότητα νερού κλπ.

2.6 Η αναγκαιότητα της ΔΥΠ

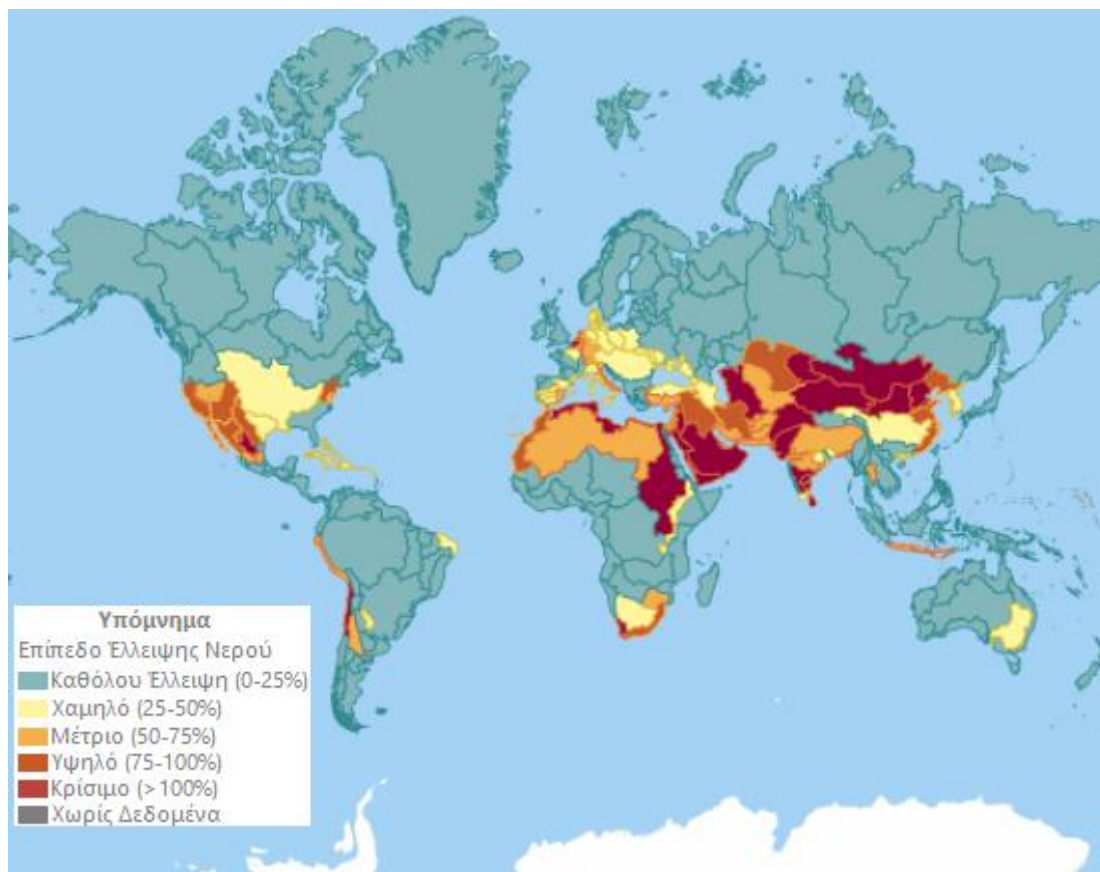
Σύμφωνα με την UNESCO τα υπόγεια ύδατα αποτελούν το 99% του γλυκού νερού της Γης, είναι η πηγή του $\frac{1}{4}$ του νερού που χρησιμοποιείται παγκοσμίως και συγκεκριμένα αποτελεί το 50% του πόσιμου νερού που καταναλώνεται. Το 69% των υπόγειων υδάτων εξάγεται για γεωργική χρήση, το 22% για αστική χρήση και το 9% για την βιομηχανία (UNESCO). Η World Water Development Report του 2022 της Εκπαιδευτικής Επιστημονικής και Πολιτιστικής Οργάνωσης των Ηνωμένων Εθνών αναφέρει πως η έλλειψη νερού αυξάνεται λόγω της κλιματικής αλλαγής και δεν μπορούμε τώρα πια να παραλείψουμε την τεράστια προοπτική των υπόγειων υδάτων (UNESCO WWAP, 2022). Όσο η παγκόσμια ζήτηση σε νερό εντείνεται και η ρύπανση των επιφανειακών υδάτων δεν ελαχιστοποιείται, τόσο μεγεθύνεται η εξάρτηση στο υπόγειο νερό (Borevsky και λοιποί 2004, Job 2010). Οι υπόγειοι υδατικοί πόροι όμως εξαντλούνται ταχεία και είναι επιρρεπής στην ρύπανση. Μόλις ρυπανθούν, οι υδροφόροι ορίζοντες τείνουν να μένουν μολυσμένοι, η εξυγίανσή τους έχει μεγάλο κόστος και η αποκατάστασή τους μπορεί να επέλθει ύστερα από μεγάλο χρονικό διάστημα (Kourgialas και Karatzas, 2015). Για την αποφυγή τέτοιων καταστάσεων πρέπει λαμβάνονται αποφάσεις σχετικά με το πόσο υπόγειο νερό μπορούμε να εξάγουμε, από πού και πότε, με άλλα λόγια να γίνεται σωστή διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων.

Η κλιματική αλλαγή ευθύνεται για την ακανόνιστη διαθεσιμότητα του νερού, δηλαδή το γεγονός ότι σε κάποιες περιοχές είναι λιγοστό και σε άλλες άφθονο, προσδίδοντας έτσι στην

ΔΥΠ ολοένα και περισσότερη σημασία. Με την διατήρηση των υδάτων δίνεται η δυνατότητα της μεταφοράς του νερού από τις περιοχές που διαθέτουν υπερβολικό σε αυτές που έχουν ξηρασία αρκεί να υπάρχει ένα δίκτυο διανομής το οποίο να ενώνει τις περιοχές, από την πηγή έως την ζήτηση. Σήμερα, καθώς η κλιματική αλλαγή συνεχίζει να διαταράσσει τα υπάρχοντα αποθέματα νερού ολοένα και περισσότερο, η σημασία της διατήρησης και διαχείρισης υδατικών πόρων είναι βασική για την επιβίωση και τη βιωσιμότητα (Adams, 2021).

Περιβαλλοντικές πιέσεις δημιουργεί και με την σειρά της η γεωργία. Η ποσότητα των υδατικών πόρων μειώνεται λόγω της υπεράντλησης για αρδευτικούς σκοπούς αλλά και η ποιότητα τόσο των επιφανειακών όσο και των υπογείων νερών υποβαθμίζεται λόγω των λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων. Επιπρόσθετα, η γεωργία αποτελεί πηγή διάχυτης (μη σημειακής) ρύπανσης και τοξικών ουσιών που επηρεάζει το νερό και το έδαφος (Αλαμάνος, 2019). Αυτές οι πιέσεις έχουν επιπτώσεις και κατ' επέκταση στην γεωργική ανάπτυξη. Με την γεωργία να είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής νερού διεθνώς, γίνεται προφανές ότι μια ορθολογική διαχείριση στο αρδευτικό νερό θα είχε γενικώς το μεγαλύτερο αντίκτυπο. Επιπλέον, η αυξανόμενη ζήτηση για τρόφιμα, αλλά η αδυναμία επέκτασης της γεωργικής γης, θα μεγιστοποιήσουν μελλοντικά τις αρδευτικές απαιτήσεις, καθιστώντας έτσι τη διαχείριση του αρδευτικού νερού μείζονος σημασίας (Latinopoulos, 2002).

Η Έκθεση Παγκόσμιων Κινδύνων του 2023 (Global Risks Report 2023) του Παγκόσμιου Οικονομικού Φόρουμ υπογράμμισε την «πολυκρίση» των φυσικών πόρων και τις καταστροφικές συνέπειες που μπορεί να επιφέρει (World Economic Forum, 2023). Αναφορικά με τους υδατικούς πόρους, έγινε λόγος για το επίπεδο έλλειψης νερού παγκοσμίως. Ο παρακάτω χάρτης δημιουργήθηκε από την Διεθνή Οργάνωση Τροφίμων και Γεωργίας και απεικονίζει το Επίπεδο Έλλειψης Νερού (SDG 6.4.2) ανά μεγάλη λεκάνη απορροή ποταμού (με έτος αναφοράς το 2018). Ο δείκτης 6.4.2 υπολογίζεται ως ο λόγος μεταξύ α) της ποσότητας των συνολικών πόρων γλυκού νερού που αντλούνται από τους τρεις οικονομικούς τομείς (γεωργία, υπηρεσίες και βιομηχανία) και β) των συνολικών ανανεώσιμων πόρων γλυκού νερού μετά την αφαίρεση της ποσότητας του νερού που απαιτείται για την υποστήριξη των υφιστάμενων περιβαλλοντικών υπηρεσιών, που αναφέρονται επίσης ως περιβαλλοντικές ροές.



Εικόνα 1: Επίπεδο Έλλειψης Νερού (FAO, 2022)

3. Η χρήση των GIS στη Διαχείριση Υδατικών Πόρων

Για την επίτευξη των στόχων της ΔΥΠ, όπως αναφέρθηκαν στο 2^ο κεφάλαιο, απαιτείται η συλλογή των απαραίτητων πληροφοριών, όπως υδρολογικά, μετεωρολογικά, υδραυλικά και μορφολογικά-τοπογραφικά δεδομένα για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Επειδή αυτά τα δεδομένα είναι χωρικά και χρονικά, τα ΓΣΠ έχουν συμβάλλει σημαντικά στην διαχείριση των υδατικών πόρων (Μεταξάς, 2004). Πριν την εφεύρεση των ΓΣΠ, η διαδικασία της μοντελοποίησης στην ΔΥΠ βασίζονταν σε μη ψηφιακούς χάρτες. Λόγω της πολυπλοκότητας του φυσικού περιβάλλοντος, η επεξεργασία των χωρικών δεδομένων ήταν μια ανιαρή διαδικασία που απαιτούσε αρκετή δουλειά και είχε σημαντικό περιθώριο σφάλματος. Ένα GIS, ως μια πλατφόρμα που παρέχει γεωχωρικά δεδομένα σε ψηφιακή μορφή, μειώνει την ανάγκη εργατικού δυναμικού για την προεπεξεργασία των δεδομένων, εξοικονομεί χρόνο και διαθέτει χαμηλό κόστος. Έτσι, οι μηχανικοί έχουν επωφεληθεί από την δυνατότητα των ΓΣΠ να αποθηκεύουν, διαχειρίζονται και απεικονίζουν χωρικά δεδομένα (Boroomandnia και λοιποί, 2021). Γενικά, η γοργή εξέλιξη των ψηφιακών χωρικών δεδομένων στις γεωεπιστήμες κάνουν τα GIS ένα αναγκαίο εργαλείο στην διαχείριση των υδάτων καθώς ένα ΓΣΠ: παρέχει εργαλείο ομογενοποίησης των δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικές πηγές, επιτρέπει την απεικόνιση των τρισδιάστατων (3D) δεδομένων και την εξαγωγή φωτογραφιών-εναέριων εικόνων, αξιοποιεί τους τεράστιους όγκους υδρολογικών δεδομένων τηλεπισκόπησης που συλλέγονται καθημερινά και είναι επιρρεπή στο να παραμείνουν άχρηστα χωρίς σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων, διαχειρίζεται και ενημερώνει στατιστικά, γεωστατιστικά και ψηφιακά μοντέλα, βελτιώνει την προσβασιμότητα στα δεδομένα με τη χρήση είτε ενός προγράμματος GIS είτε μέσω των διαδικτυακών εφαρμογών του, αυξάνει την αντίληψη για τις αλληλεπιδράσεις του νερού με το φυσικό περιβάλλον, βελτιώνει την ορθολογική συλλογή δεδομένων και διευκολύνει στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων μιας προσομοίωσης, παρέχει την δύναμη της ενσωμάτωσης δεδομένων μέσω της διαχείρισης και της ανάλυσης των επιπέδων (layers) και μοντελοποιεί τις σχέσεις μεταξύ των επιπέδων και τέλος προσφέρει ένα Πλαίσιο Υποστήριξης Αποφάσεων (Boroomandnia και λοιποί, 2021). Εφαρμογές των ΓΣΠ έχουν μέχρι τώρα σημειωθεί σε τομείς όπως υδρολογικά και υδραυλικά μοντέλα, πρόβλεψη και έλεγχο μόλυνσης, δίκτυα ύδρευσης, άρδευσης και αποχετευτικά (Μεταξάς, 2004).

Η ολοκληρωμένη ΔΥΠ σε επίπεδο λεκάνης απορροής μπορεί να ληφθεί ως μια διαδικασία που αποτελείται από τρία διαδοχικά στάδια: α) ο προσδιορισμός του συστήματος προς διαχείριση, β) ο σχεδιασμός του συστήματος αυτού και γ) η διαχείρισή του. Ένα ΓΠΣ συμβάλλει στο κάθε στάδιο ξεχωριστά, καθώς: α) είναι χρήσιμο στην περιγραφή στοιχείων (οικονομικών, κοινωνικών ή περιβαλλοντικών) μιας λεκάνης απορροής που αφορούν διάφορα προβλήματα διαχείρισης (π.χ. ένα ΓΣΠ χαρτογραφεί τους πόρους μιας λεκάνης), β) αποτελεί μέσο αποθήκευσης δεδομένων τα οποία χρειάζονται για την προσομοίωση μελλοντικών σεναρίων, οπότε μπορεί να συνεισφέρει στην ανάλυση της αντίδρασης ενός συστήματος μιας λεκάνης απορροής σε ανθρώπινες δραστηριότητες, γ) μπορεί να υποστηρίξει την επιλογή των καλύτερων εναλλακτικών λύσεων για την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων (Καμπράγκου, 2006).

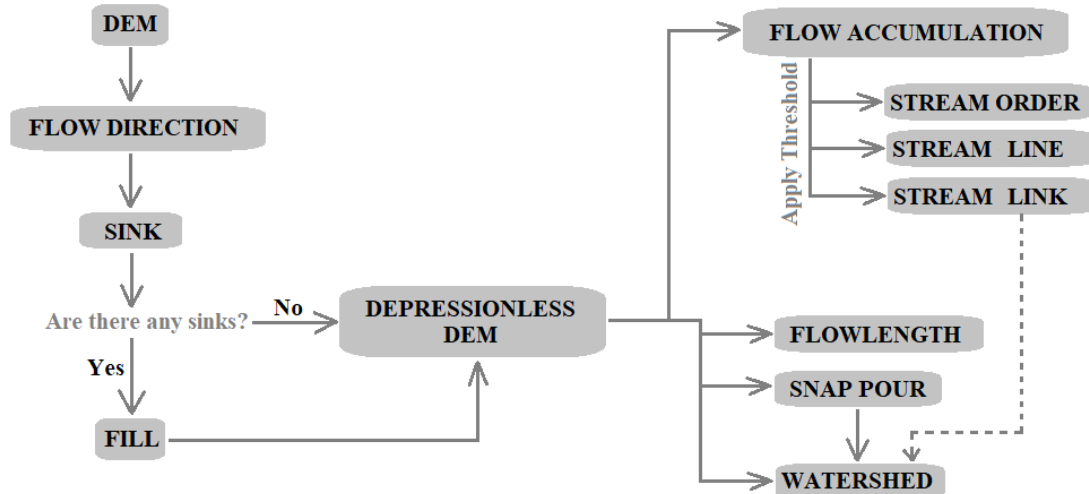
3.1 Επιφανειακά ύδατα

Για την απεικόνιση των επιδράσεων των βροχοπτώσεων και της απορροής στους επιφανειακούς υδατικούς πόρους όπως είναι οι λίμνες, τα ποτάμια και τα κανάλια, κυκλοφορούν ποικίλα προγράμματα προσομοίωσης για την υδρολογική μοντελοποίηση επιφανειακών υδάτων (Tsihrintzis και λοιποί, 1996). Αρκετοί παράμετροι που καθορίζουν την τοπογραφία της περιοχής, τα χαρακτηριστικά και τον τύπο του εδάφους, και την χρήση νερού, αποτελούν μέρος των απαιτούμενων δεδομένων εισόδου ενός υδρολογικού προγράμματος. Όμως, η ακριβής ανάλυση μιας πληθώρας δεδομένων, αφού πρώτα αυτά συλλεχθούν προσεκτικά, απαιτεί σημαντικό χρόνο και δεξιότητα για την προετοιμασία τους ως παράμετροι εισόδου. Αυτή η διαδικασία απλοποιείται με την χρήση ενός GIS, μέσα στο οποίο τα αναλυμένα δεδομένα είναι αυτόματα υπολογισμένα και αποθηκευμένα σε ξεχωριστούς πίνακες χαρακτηριστικών, όπως τα έχει καθορίσει αυτός που σχεδιάζει το μοντέλο (Bhaskar και Devulapalli, 1991).

Συγκεκριμένα, δύο είδη μοντέλων εστιάζουν σε θέματα που αφορούν την ποσότητα επιφανειακού νερού: τα υδρολογικά και τα υδραυλικά. Το υδρολογικό μοντέλο (μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής) καθορίζει για μια δεδομένη καταιγίδα σε ένα τοπίο, πόση θα είναι η επιφανειακή απορροή, ενώ το υδραυλικό παίρνει την ποσότητα νερού, το σχήμα του τοπίου και του καναλιού του ρέματος και καθορίζει πόσο βαθύ και γρήγορο θα είναι το νερό και ποια περιοχή θα καλύψει. Στα υδρολογικά μοντέλα το ArcGIS χρησιμοποιείται για να συνοψίσει τα εδαφικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής για την μετέπειτα εισαγωγή τους σε μοντέλο, ενώ στα υδραυλικά χρησιμοποιείται για να συνοψίσει τα εδαφικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά του καναλιού για την εισαγωγή τους σε ένα μοντέλο και για τα αποτελέσματα μετά την υδραυλική μοντελοποίηση (προσδιορισμός επιφάνειας νερού) (Djokic, 2015). Το ArcGIS παρέχει δεδομένα όπως: ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο και κάλυψη γης, όρια λεκανών απορροής, υδρογραφία, εδάφη, πρόσφατα και ιστορικά δεδομένα νερού, δεδομένα κλίματος και κατακρήμνισης, και γεωμετρία καναλιών (διατομές).

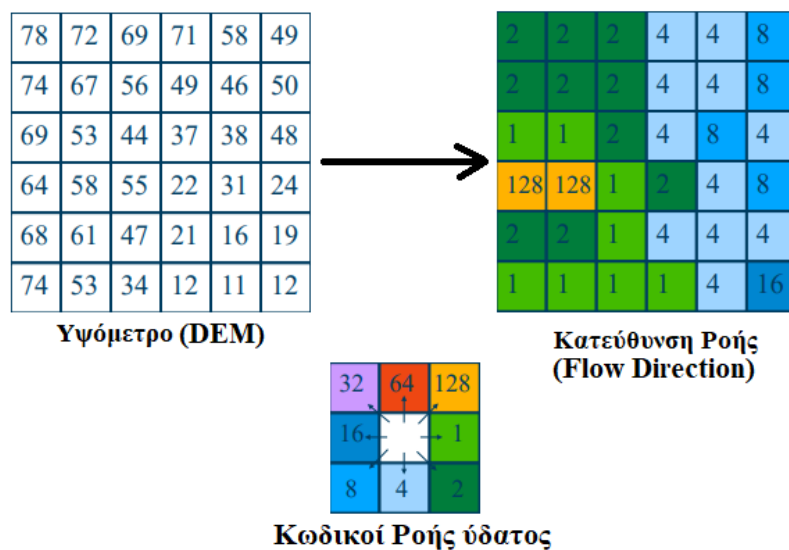
3.1.1 Εργαλεία του ArcGIS για ανάλυση επιφανειακών υδάτων

Όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο κεφάλαιο, η βιώσιμη διαχείριση ενός υδατικού πόρου πρέπει να γίνεται σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Μια απλή μέθοδος για την περιγραφή της ροής επιφανειακών υδάτων, άρα και την δημιουργία λεκάνης απορροής, σε περιβάλλον ΓΣΠ είναι αυτή της δενδριτικής μορφολογίας (dendritic morphology):



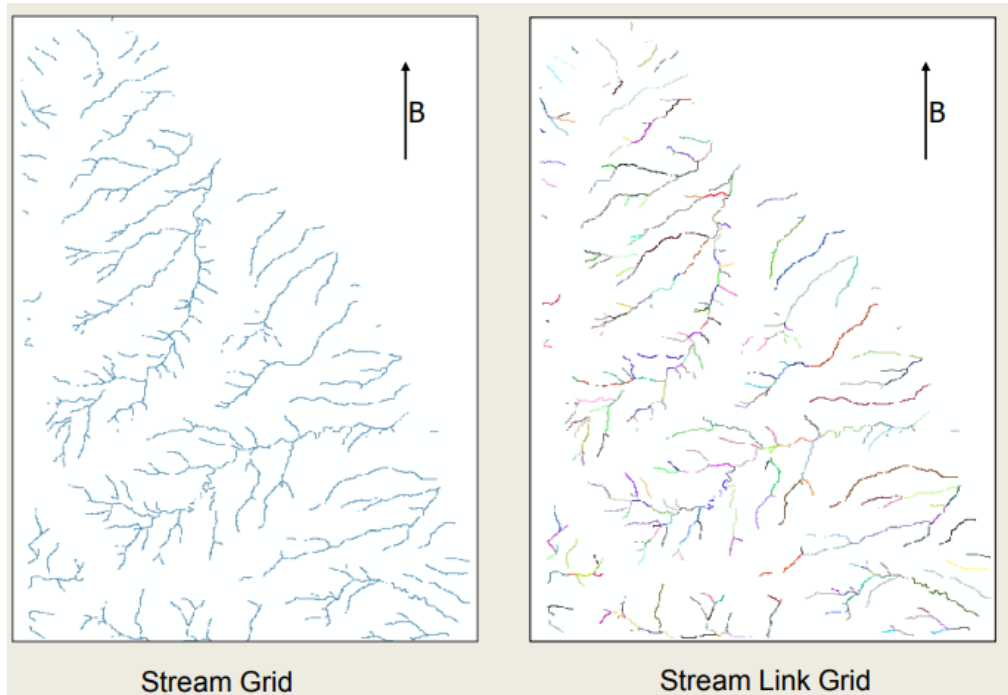
Σχήμα 4: Εργαλεία GIS για την περιγραφή ροής επιφανειακών υδάτων (Djokic, 2015)

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, για την οριοθέτηση μιας λεκάνης απορροής, χρησιμοποιείται ένα Ψηφιακό Υψομετρικό Μοντέλο (Digital Elevation Model, DEM), δηλαδή ένα είδος ψηφιδωτού (raster) θεματικού επιπέδου (layer) του ArcGIS όπου φαίνεται μόνο η φυσική επιφάνεια της Γης. Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα GIS διαθέτει επίσης: Ψηφιακά Μοντέλα Επιφάνειας (Digital Surface Models, DSMs) όπου σε αντίθεση με τα DEMs, απεικονίζουν και ανθρωπογενή κατασκευάσματα (όπως κτήρια και καλλιέργειες), και Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (Digital Terrain Models, DTMs) όπου η διαφορά τους με τα DEMs έγκειται στο ότι τα DEMs γενικά λαμβάνουν υπόψη όλα τα αντικείμενα που είναι διαρκώς στο έδαφος ενώ τα DTMs δείχνουν την ανάπτυξη της γεωδαιτικής επιφάνειας (Marwaha και Duffy, 2021). Ύστερα, ανάλογα με τα υψόμετρα είναι δυνατή η δημιουργία του πλέγματος κατεύθυνσης ροής (που εκφράζει την κατεύθυνση της πιο απότομης καθόδου από οποιοδήποτε κελί) μέσω του εργαλείου Flow Direction.



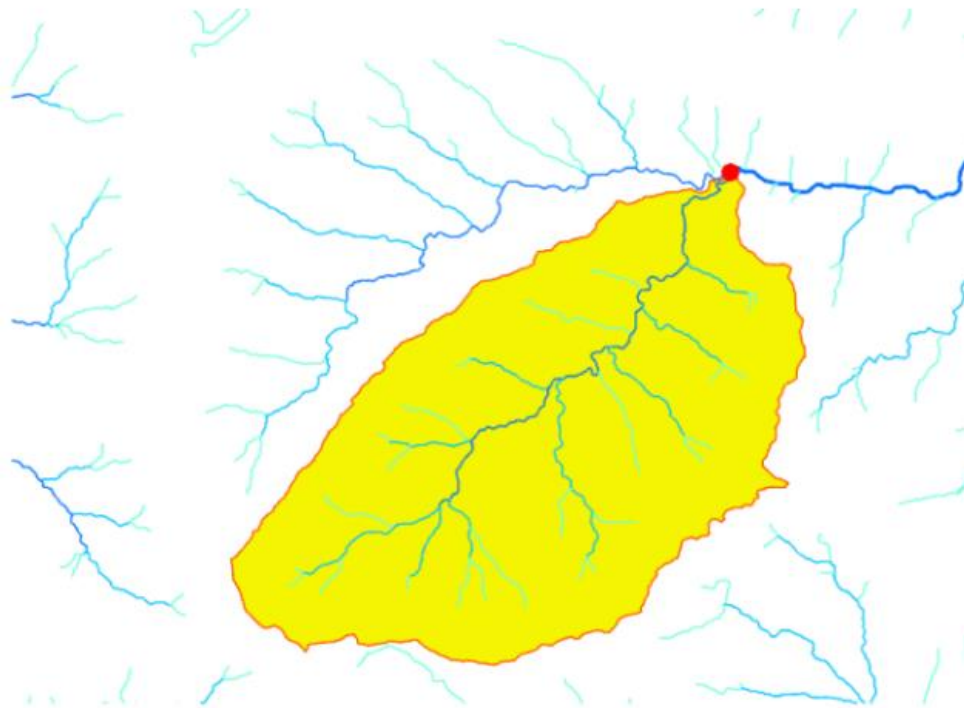
Σχήμα 5: Απεικόνιση εντολής Flow Direction (Djokic, 2015)

Σε περίπτωση όπου ένα κελί ή ένα σύνολο από χωρικά συνδεδεμένα κελιά των οποίων η κατεύθυνση ροής δεν μπορεί να εκχωρηθεί ως μια από τις οκτώ έγκυρες τιμές του πλέγματος κατεύθυνσης ροής (βλ. Κωδικοί Ροής ύδατος), λέμε ότι έχουμε λακκούβα (sink), όπου ο χρήστης έχει την ικανότητα να την «γεμίσει» με την εντολή Fill. Ύστερα με το εργαλείο Flow Accumulation δημιουργείται το πλέγμα συσσωρευμένης ροής (flow accumulation grid) και στη συνέχεια καθίσταται ικανός ο καθορισμός και η τμηματοποίηση των ρεμάτων μέσω των εργαλείων stream order, stream line και stream link (Djokic, 2015).



Εικόνα 2: Απεικόνιση καναλιών ροής σε περιβάλλον GIS μέσω του εργαλείου Stream Link (Γκιτάκου και Καραφύλλης, 2015)

Με το εργαλείο Stream Link του ArcGIS είναι δυνατή η αντιστοίχιση μιας μοναδικής τιμής σε κάθε τμήμα ροής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δεδομένο εισαγωγής στο εργαλείο Watershed. Με το Watershed λοιπόν, μπορούν να δημιουργηθούν και να οριοθετηθούν αυτόματα οι λεκάνες απορροής στην περιοχή μελέτης. Αυτή η λειτουργικότητα υπάρχει στο περιβάλλον ArcGIS με την εφαρμογή των σχετικών αλγόριθμων του Hydrology της επέκτασης του Spatial Analyst και σε περιβάλλον ArcHydro (Djokic, 2015).

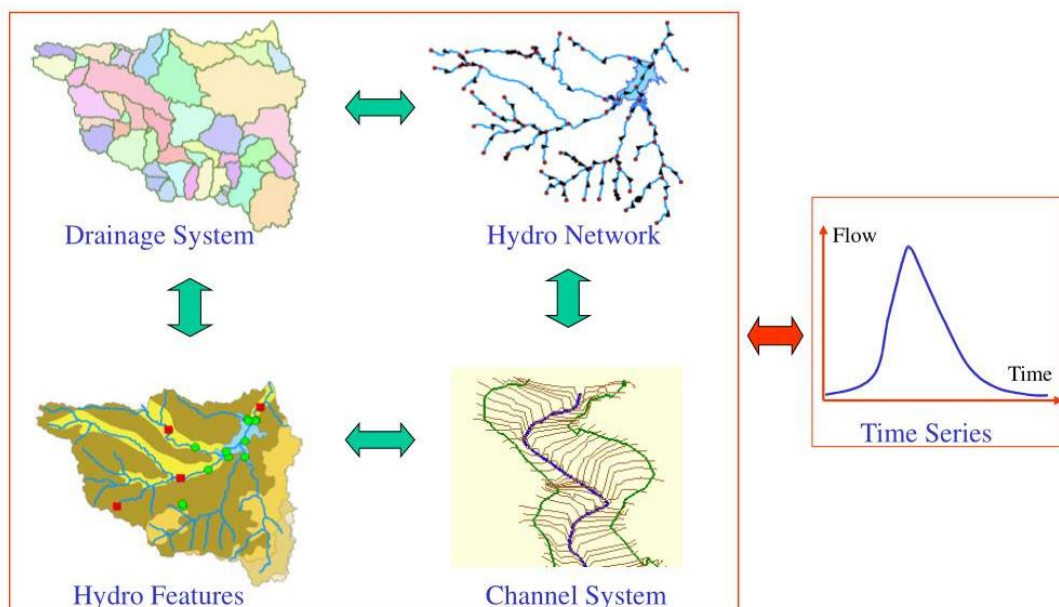


Εικόνα 3: Το αποτέλεσμα της οριοθέτησης μιας μικρο-λεκάνης απορροής στο ArcGIS Pro (Franz, 2020)

Σημαντικό προσόν του ArcGIS είναι το ArcHydro, ένα χωρικό και χρονικό μοντέλο δεδομένων το οποίο αναπτύχθηκε από το GIS Water Resources Consortium, όπου βασικός σκοπός του είναι να αποτελέσει βασικό τμήμα λειτουργικότητας στις εφαρμογές υδατικών πόρων. Το μοντέλο δεδομένων είναι διαφορετικό από το μοντέλο προσομοίωσης, ένα μοντέλο δεδομένων παρέχει ένα τυποποιημένο πλαίσιο για την αποθήκευση πληροφοριών, αλλά δεν περιέχει ιδιότητες για την προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών. Ένα μοντέλο δεδομένων τυπικά συνδυάζεται με ένα ή περισσότερα μοντέλα προσομοίωσης, όπου τα δεδομένα και η πληροφορία μεταφέρονται από το ArcHydro στο μοντέλο και τα αποτελέσματα επιστρέφονται στο ArcHydro. Επομένως, το ArcHydro παρέχει το μέσον για την ένωση μοντέλων προσομοίωσης μέσω του κοινού συστήματος αποθήκευσης δεδομένων (Chester Engineers και Shamsi, 2008). Περιλαμβάνει ένα ελεύθερης πρόσβασης σετ εργαλείων ArcGIS, το ArcHydro tools, το οποίο συμπληρώνει διάφορα πεδία μέσα σε μία ArcHydro γεωγραφική βάση δεδομένων για μια λεκάνη απορροής ποταμού που ξεκινά από ένα Ψηφιακό Υψομετρικό Μοντέλο (DEM). Συγκεκριμένα προσφέρει λειτουργίες κοινές στις αναλύσεις υδατικών πόρων όπως: ανάλυση εδάφους, οριοθέτηση και χαρακτηρισμός λεκάνης απορροής, καταγραφή και απόκτηση δεδομένων μέσω δικτύων, ανάπτυξη σχεδιαγράμματος (node-link), ειδικά δεδομένα I/O (XML, Excel, κ.λπ.) τα οποία μπορούν να εξατομικευτούν (Djokic, 2015).

Στον πυρήνα του, το ArcHydro υποστηρίζει τη διαχείριση πληροφοριών για τους υδατικούς πόρους από φυσικά συστήματα και παρέχει μια πλατφόρμα για πρόσθετη επεξεργασία για την επίτευξη ενός συγκεκριμένου στόχου. Κάτι τέτοιο ολοκληρώνεται με την προσθήκη συμπληρωματικών κλάσεων χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων στο πλαίσιο εργασίας του μοντέλου δεδομένων (Δημοπούλου, 2005). Με λίγα λόγια, το ArcHydro είναι ένα εξαιρετικό

δωρεάν εργαλείο του ArcGIS που διευκολύνει την υδρολογική μοντελοποίηση των λεκανών απορροής και εν συνέχεια την ανάπτυξη εφαρμογών στους υδατικούς πόρους.



Εικόνα 4: ArcGIS Hydro Data Model (Djokic, 2015)

3.1.2 Εφαρμογές των GIS στην μοντελοποίηση των επιφανειακών υδάτων

Οι πρώτες συνδέσεις των ΓΣΠ με τα υδρολογικά μοντέλα

Ήδη από τις αρχές του '90 τα GIS χρησιμοποιούνταν από ειδικούς στον τομέα των υδατικών πόρων. Το 1994, οι Wanvick και Hanessex δοκίμασαν το εμπορικό πακέτο Arc/Info GIS για την παροχή χωρικών δεδομένων εισόδου στο υδρολογικό μοντέλο HEC-1 (Hydrological Engineering Center-1). Οι μονότονες και χρονοβόρες διαδικασίες της εξαγωγής του χωρικού μέσου όρου (λεκάνη απορροής, μέση καμπύλη απορροής κλπ), εκτελέστηκαν αποδοτικά από το GIS. Σε παρόμοια εφαρμογή, ο Moeller (1991) χρησιμοποίησε το GIS για την εξαγωγή σταθμισμένων υδρολογικών παραμέτρων για είσοδο στο υδρολογικό μοντέλο HEC-1. Λόγω της αναγκαιότητας να μετρηθούν οι περιοχές όλων των τομών των υπο-λεκανών, οι χρήσεις νερού και τα εδάφη μιας περιοχής 600 τετραγωνικών μιλίων, αποφασίστηκε να γίνει χρήση του GIS (Tsihrantzis κ.α, 1996). Μια βάση δεδομένων στα ΓΣΠ δημιουργήθηκε το 1992 από τον Bhaskar και λοιπούς, χρησιμοποιώντας το ARC/INFO GIS, η οποία συνίσταται από όλα τα υδρολογικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την μοντελοποίηση της βροχόπτωσης-απορροής σε μια λεκάνη απορροής. Όλες οι καλύψεις (εδάφη, χρήσεις γης, όρια λεκανών και υπο-λεκανών, κ.λπ) αποθηκεύτηκαν σε διαφορετικά επίπεδα (layers) στο ArcGIS. Μια επικάλυψη οποιουδήποτε ή μερικών από τα επίπεδα μπορεί εύκολα να χαρτογραφηθεί χρησιμοποιώντας το ArcGIS. Η Διοίκηση Κρατικών Αυτοκινητόδρομων του Maryland εγκατέστησε ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών δομημένο για υδρολογικές αναλύσεις με στόχο τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της ποιότητας του υδραυλικού σχεδιασμού, παρέχοντας στους μηχανικούς τη δυνατότητα γρήγορης συγκέντρωσης δεδομένων κάλυψης, κλίσης και

εδάφους για οποιαδήποτε λεκάνη απορροής της πολιτείας. Αυτές οι παράμετροι εισόδου χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση του υδρολογικού μοντέλου SCS-TR-20 για υπάρχουσες και προτεινόμενες συνθήκες λεκάνης απορροής (Ragan και Kosicki, 1993). Αυτό το σύστημα έχει ονομαστεί GISHydro (GIS for Hydrologic Analysis).

Όταν αναφερόμαστε στην ολοκληρωμένη υδρολογική μοντελοποίηση, εννοούμε την υδρολογική μοντελοποίηση ενός επιφανειακού νερού σε συνδυασμό με το σύστημα υπόγειων υδάτων χρησιμοποιώντας ολοκληρωμένα μοντέλα υπολογιστών για το κάθε σύστημα. Το HSPF (Hydrological Simulation Program- Fortran) , ένα μοντέλο επιφανειακών υδάτων, και το MODFLOW, ένα μοντέλο υπόγειων υδάτων, χρησιμοποιήθηκαν με έναν κώδικα εξατμισοδιαπνοής (ET) που αναπτύχθηκε για τις συνθήκες της περιοχής μελέτης (Ross και Tara, 1993). Αυτά τα τρία μοντέλα μετά συνδέθηκαν μέσω του GIS. Το GIS πραγματοποίησε σύνθετες επιστρώσεις χαρτών και χωρική ανάλυση για την ανάπτυξη δεδομένων εισόδου για τα υδρολογικά δεδομένα, παρείχε τους μηχανισμούς σύνδεσης μεταξύ των μοντέλων, μετέτρεψε τις ψηφιακές μορφές εδάφους διαφορετικών προβολών και κλιμάκων σε μια τυποποιημένη μορφή (αναφέρεται ως γεωαναφορά), και τέλος παρείχε την απεικόνιση των γραφικών εξόδου μετά την προσομοίωση και την χωρική ανάλυση για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της υδρολογικής προσομοίωσης.

Στις αρχές του 21^{ου} αιώνα το μοντέλο απορροής επιφανειακών υδάτων HEC-1 και το μοντέλο προφίλ επιφάνειας νερού HEC-2 αναβαθμίστηκαν σε HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) και σε HEC-RAS (River Analysis System) αντίστοιχα. Αυτή η αναβάθμιση επικεντρώθηκε σε τρία στοιχεία: στην βελτίωση και επέκταση των δυνατοτήτων του μοντέλου, στην εισαγωγή του γραφικού περιβάλλοντος χρήστη (Graphical User Interface, GUI) για την πλοήγηση στο μοντέλο και στην επέκταση των δυνατοτήτων για να συμπεριληφθεί η διεπαφή με το GIS ArcView (ArcInfo) (Martin και λοιποί, 2005). Τώρα πια, τα ελεύθερα μοντέλα προσομοίωσης HEC-HMS, HEC-RAS και ArcGIS είναι αρκετά δημοφιλή και χρησιμοποιούνται ευρέως για την προσομοίωση των πλημμυρικών περιοχών, την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης καθώς και την δημιουργία χάρτη των ευάλωτων στις πλημμύρες περιοχών (Karthik και λοιποί, 2022). Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται μερικοί διαδεδομένοι συνδυασμοί των GIS με υδρολογικά μοντέλα.

	Μοντέλο	Επιτεύγματα
20 ^{ος} αιώνας	GRASS	Δημιουργία χάρτη κάλυψης εδάφους για τη μοντελοποίηση της απορροής όμβριων υδάτων
	GIS MIKE-11	Δημιουργία χαρτών πλημμύρας και ισοβαθών καμπυλών πλημμύρας με προτιμώμενα ενδιάμεσα τοιχώματα
	ArcInfo HEC-1	Εξαγωγή σταθμισμένης επιφάνειας υδρολογικής παραμέτρου
	RS ERDAS ArcInfo	Εξαγωγή του ποσοστού στεγανότητας για διάφορες κατηγορίες κάλυψης γης
	ArcView SWMM	Εκτίμηση μήκους των ορίων υπολεκάνης και μοντελοποίηση απορροής
	GRASS SMoRMOD	Προσομοίωση βροχοπτώσεων-απορροών
	ArcView HEC-1 HEC-2	Πρόβλεψη υδρογραφημάτων πλημμύρας και εκτέλεση ανάλυσης αποστράγγισης

	Flood Hydrograph Package	
	GISHYDRO	Εξοικονόμηση χρόνου και βελτίωση της ακρίβειας της διαδικασίας του υδραυλικού σχεδιασμού, χάρη στη γρήγορη συγκέντρωση των δεδομένων κλίσης, χρήσης γης και εδάφους
	ArcView HSPF MODFLOW	Παροχή μηχανισμών σύνδεσης μεταξύ των μοντέλων και του υπολογισμού ρυπαντικού φορτίου μη σημειακών πηγών
	ArcInfo HEC-1	Δημιουργία βάσης δεδομένων που περιλαμβάνει τα απαιτούμενα υδρολογικά χαρακτηριστικά για το μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής μιας λεκάνης απορροής. Υπολογισμός του εμβαδού της λεκάνης απορροής και των αριθμών της καμπύλης μέσης απορροής
	ArcInfo CMLS	Ανάλυση της κίνησης των χημικών διαμέσου των πολυστρωματικών εδαφών
21 ^{ος} αιώνας	ArcView/ArcInfo HEC-HMS HEC-RAS	Προετοιμασία γεωγραφικών δεδομένων. Επεξεργασία αποτελεσμάτων προσομοίωσης, συμπεριλαμβανομένων των δεδομένων προφίλ της επιφάνειας του νερού και της ταχύτητας για την δημιουργία χάρτη πλημμυρικής περιοχής και τον υπολογισμό ζημιών από πλημμύρες, αποκατάστασης οικοσυστήματος, ανταπόκρισης και ετοιμότητας στην προειδοποίηση πλημμύρας
	ArcInfo HAZUS-MH	Εκτίμηση πιθανών ζημιών από ανέμους τυφώνων, σεισμούς και πλημμύρες σε όλες τις Ηνωμένες Πολιτείες
	ArcView PDTank	Προσομοίωση διαχείρισης λεκάνης απορροής
	ArcView MIKE 21	Μοντελοποίηση κόλπων και εκβολών ποταμών
	WMS TR-20	Μοντελοποίηση της διαδικασίας βροχόπτωσης-απορροής

Πίνακας 1: Ιστορία της διασύνδεσης GIS με υδρολογικά λογισμικά (Boroomandnia και λοιποί, 2021)

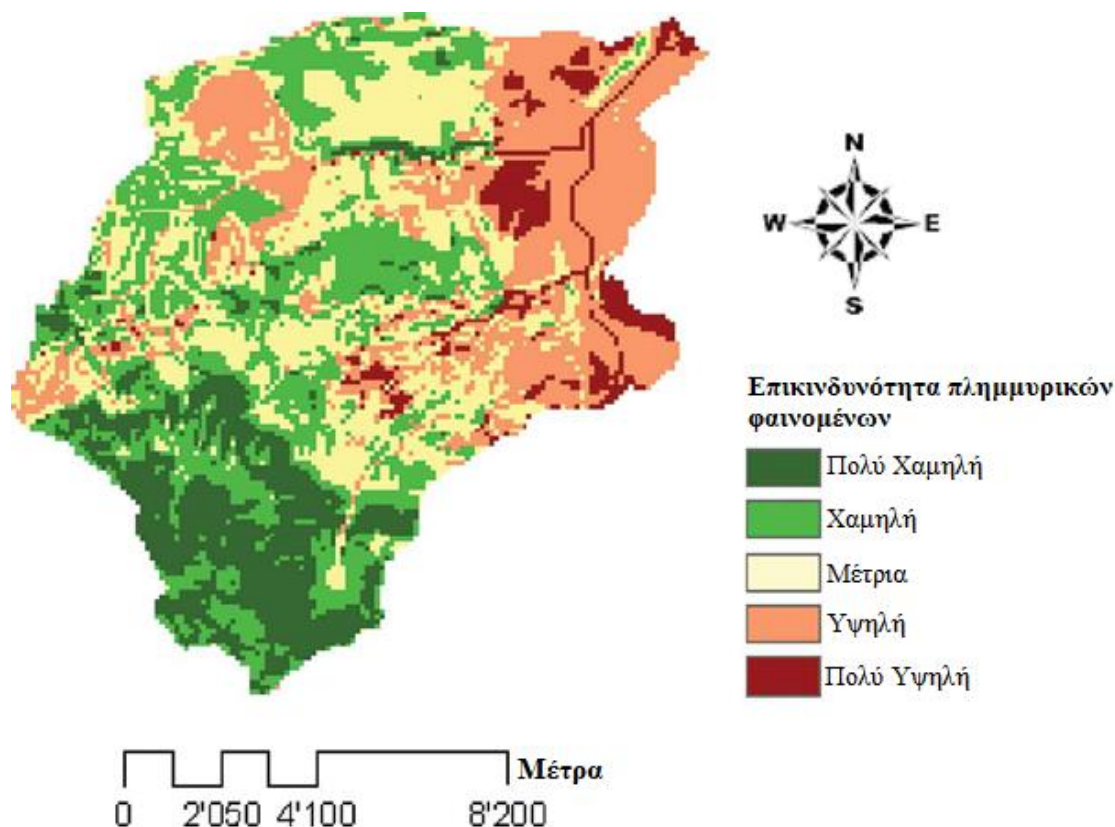
Ακόμα και σήμερα, η συμβολή των ΓΣΠ στην διαχείριση των επιφανειακών υδατικών πόρων είναι ιδιαίτερα αισθητή, όπως αναλύεται παρακάτω.

3.1.3 Εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας

Η ορθολογική διαχείριση υδατικών πόρων οφείλει να λαμβάνει υπόψη της και την διαχείριση ακραίων φαινομένων όπως είναι οι πλημμύρες (ΥΠΠΕΝ, 2015). Πιο πρόσφατα, τα GIS σε συνδυασμό με την τηλεπισκόπηση (remote sensing) έχουν συνεισφέρει στην εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας και στον καθορισμό ζωνών που είναι επιρρεπείς σε αυτό το φυσικό φαινόμενο, τόσο διεθνώς (Elkhrachy 2015, Asare-Kyei και λοιποί 2015, Franci και λοιποί 2016, Hossein και λοιποί 2017, Wand και Xie 2018, Saha και Agrawal 2020, Upadhyay και Patel 2022), όσο και στον ελλαδικό χώρο (Kourgialas και Karatzas 2011, Γιαμαλάκη 2015, Σταθόπουλος 2018, Domakinis 2020).

Πιο συγκεκριμένα, ο χωρικός χάρτης επικινδυνότητας πλημμυρικών φαινομένων που προκύπτει περιλαμβάνει τη χωρική ανάλυση παραγόντων όπως είναι το υψόμετρο, η κλίση, η συγκέντρωση ροής, η ένταση βροχόπτωσης, οι χρήσεις γης και η γεωλογία. Αυτό συμβαίνει πρώτα με την ψηφιοποίηση των δεδομένων αυτών (τοπογραφικοί χάρτες, τιμές βροχόπτωσης από μετεωρολογικούς σταθμούς, χάρτες χρήσεων γης και γεωολογικοί χάρτες) και την μετατροπή τους σε διανυσματικά αρχεία και ύστερα σε μωσαϊκού τύπου αρχεία. Έτσι, σε

περιβάλλον ΓΣΠ δημιουργείται για κάθε ένα παράγοντα και ένας χάρτης επικινδυνότητας πλημμυρικών φαινομένων. Ο κάθε θεματικός χάρτης (παράγοντας) πολλαπλασιάζεται με το ποσοστό επίδρασής του στην εκτίμηση του κινδύνου, και τέλος όλοι οι χάρτες αθροίζονται αποδίδοντας το τελικό χάρτη πλημμυρικής επικινδυνότητας. Τα επίπεδα επικινδυνότητας που απεικονίζονται στον χάρτη είναι η πιθανότητα να υπάρξει πλημμυρικό γεγονός μέσα σε ένα υδρολογικό έτος: Πολύ Υψηλή, Υψηλή, Μέτρια, Χαμηλή και πολύ Χαμηλή (Kourgialas και Karatzas, 2011).

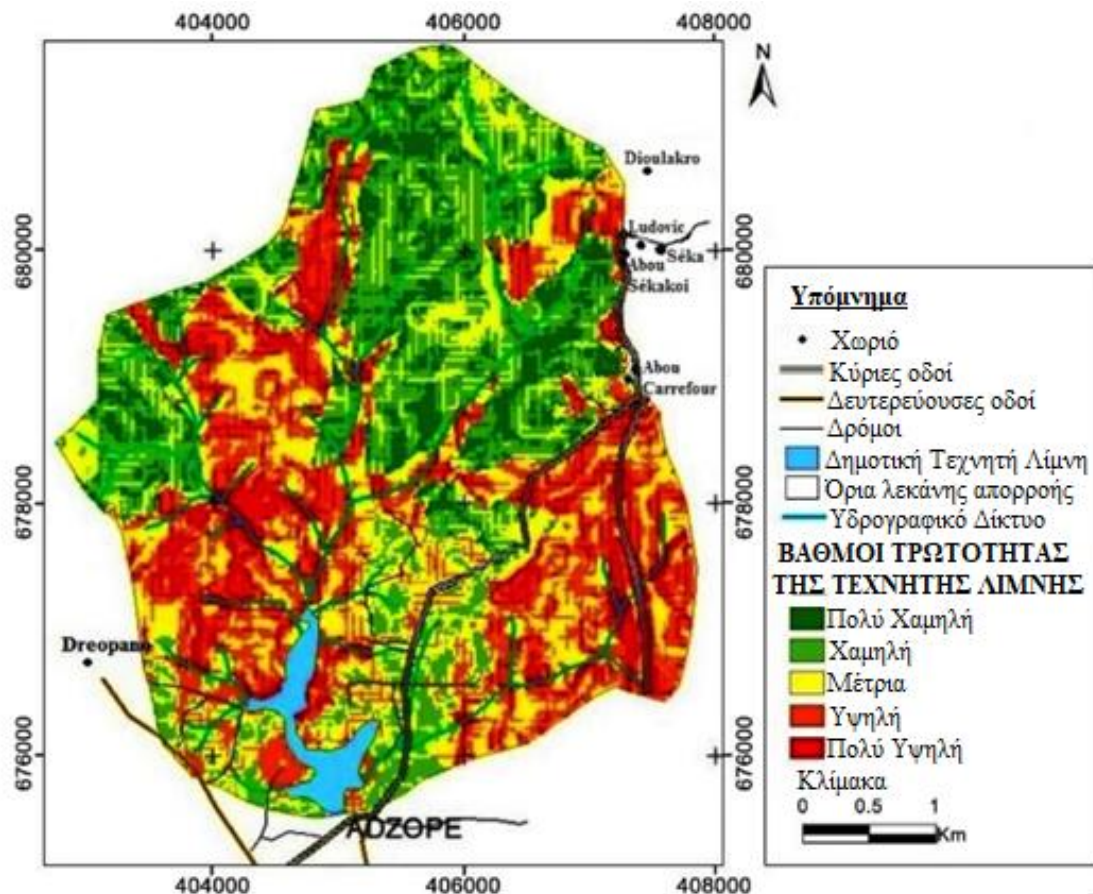


Εικόνα 5: Τελικός χάρτης επικινδυνότητας πλημμυρικών φαινομένων σε περιβάλλον GIS (Kourgialas και Karatzas, 2011)

3.1.4 Αξιολόγηση ποιότητας επιφανειακών υδάτων

Επιπρόσθετα, τα ΓΣΠ έχουν συμβάλει στον προσδιορισμό προστατευόμενων περιοχών όσο αφορά τα επιφανειακά ύδατα. Για παράδειγμα, μέθοδοι των GIS χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό 3 προστατευόμενων περιοχών γύρω από μια τεχνητή λίμνη στην Ακτή Ελεφαντοστού, η οποία παρέχει νερό στους κατοίκους της περιοχής. Αυτές οι ζώνες προστασίας οριοθετήθηκαν μετά από εκτίμηση της τρωτότητας της δεξαμενής νερού στη ρύπανση μέσω της δημιουργίας ενός χάρτη τρωτότητας. Αυτή η μελέτη υπέδειξε ότι η γεωματική προσέγγιση από το GIS είναι η βέλτιστη μέθοδος για την εκτίμηση της ευπάθειας των επιφανειακών υδάτων στη ρύπανση και οι χάρτες που δημιουργήθηκαν αποτελούν εργαλεία τα οποία θα βοηθήσουν στην λήψη αποφάσεων για την βιώσιμη προστασία της ποιότητας της λίμνης (Deh και λοιποί, 2017). Παρόμοια ήταν η χρήση του προγράμματος

ArcGIS για την αξιολόγηση της ποιότητας του ποταμού Wadi El Bey στην Τυνησία, στο οποίο εισήχθηκαν, αναλύθηκαν και χαρτογραφήθηκαν τα δεδομένα. Η βάση δεδομένων των δεικτών ποιότητας νερού και το δίκτυο του ποταμού δημιουργήθηκαν με τη χρήση του ArcCatalog. Στη συνέχεια, η χρονική-χωρική κατανομή των ρύπων που μελετήθηκαν υιοθετώντας την μέθοδο του GIS και της Distance Weighted Interpolation (DWI) υπέδειξε ότι η περιοχή μελέτης ήταν πολλή ρυπασμένη και δεν πρέπει το νερό να επαναχρησιμοποιηθεί απευθείας χωρίς την κατάλληλη επεξεργασία (Khouni, Louhichi and Ghrabi, 2021).



Εικόνα 6: Χάρτης τρωτότητας στη ρύπανση της περιοχής μελέτης σε περιβάλλον GIS (Deh και λοιποί, 2017)

3.2 Υπόγεια Ύδατα

Τα υπόγεια ύδατα χρησιμοποιούνται για οικιακή και βιομηχανική ύδρευση και άρδευση παγκοσμίως. Τώρα, τουλάχιστον το 1/4 του παγκόσμιου πληθυσμού βασίζεται στους υπόγειους υδατικούς πόρους, οι οποίοι είναι σε περιορισμένη ποσότητα (Boretti και Rosa, 2019). Ειδικότερα, πάνω από το 30% των μεγαλύτερων συστημάτων υπόγειων υδάτων στον κόσμο βρίσκονται επί του παρόντος σε κατάσταση κινδύνου και οι μεγαλύτερες λεκάνες υπογείων υδάτων εξαντλούνται γρήγορα (Richey και λοιποί, 2015). Η εκμετάλλευση υπερβολικής ποσότητας γλυκού νερού από φυσικές πηγές σε σύγκριση με την ποσότητα που

είναι διαθέσιμη, μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές συνέπειες για το περιβάλλον και να υπονομεύσει την βιώσιμη ανάπτυξη (UN, 2020). Σύμφωνα με τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης (Sustainable Development Goals), ειδικότερα τον Έκτο Στόχο «Καθαρό νερό και Αποχέτευση», αν αυτή η κατάσταση δεν περιοριστεί, θα οδηγήσει σε λειψυδρία, η οποία θα έχει ολέθριες επιπτώσεις σε περίπου 700 εκατομμύρια ανθρώπους μέχρι το 2030. Ως εκ τούτου, απαιτείται η ανάπτυξη και η ευρεία χρήση νέων τεχνολογιών για την επίτευξη αποτελεσματικής και οικονομικότερης διαχείρισης του γλυκού νερού για την παροχή αποδοτικών υποδομών και υπηρεσιών για περισσότερους κατοίκους.

Η τεχνολογία των ΓΣΠ παρέχει μηχανισμούς για τη συλλογή, τη διατήρηση και τη διάθεση δεδομένων υπεδάφους που είναι απαραίτητα για την προστασία των υπογείων υδάτων, τις μελέτες σχετικά με τους υδατικούς πόρους και για τους μηχανικούς σχεδιασμούς (Tsihrintzis και λοιποί, 1996). Η εφαρμογή των ΓΣΠ στην μοντελοποίηση των υπογείων υδάτων, περιλαμβάνοντας την εκτίμηση της ποιότητας και της ποσότητας τους, είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στον τομέα διαχείρισης υδατικών πόρων. Η πιο βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική προσέγγιση για τη διαχείριση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων είναι να εξασφαλιστεί η επαρκής προστασία τους, αποφεύγοντας έτσι τη μόλυνση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της χαρτογράφησης της τρωτότητας των υπογείων νερών ή του υδροφορέα, της ανάπτυξης ζωνών προστασίας των υπόγειων υδάτων και του ελέγχου της χρήσης γης (UNESCO WWAP, 2022), στα οποία έχουν διαδραματίσει σπουδαίο ρόλο ΓΣΠ όπως αναλύεται περαιτέρω παρακάτω.

3.2.1 Εργαλεία του ArcGIS για την διαχείριση των υπογείων υδατικών πόρων

Εκτίμηση κινδύνου μόλυνσης υπόγειων υδάτων

Η μόλυνση των υπογείων υδάτων μπορεί να τα καταστήσει ακατάλληλα για ανθρώπινη κατανάλωση και δυστυχώς είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να αφαιρεθεί. Επιπλέον, η παρακολούθηση των υπογείων υδάτων είναι χρονοβόρα και πολύ δαπανηρή για να προσδιοριστεί επαρκώς η γεωγραφική έκταση της μόλυνσης σε περιφερειακή κλίμακα. Συνεπώς, ο κατάλληλος τρόπος διαχείρισης της μόλυνσής τους είναι ο προσδιορισμός της χωρικής κατανομής των περιοχών που κινδυνεύουν να μολυνθούν και των περιοχών που είναι ευπαθείς στην μόλυνση (Kourgialas και Karatzas, 2014).

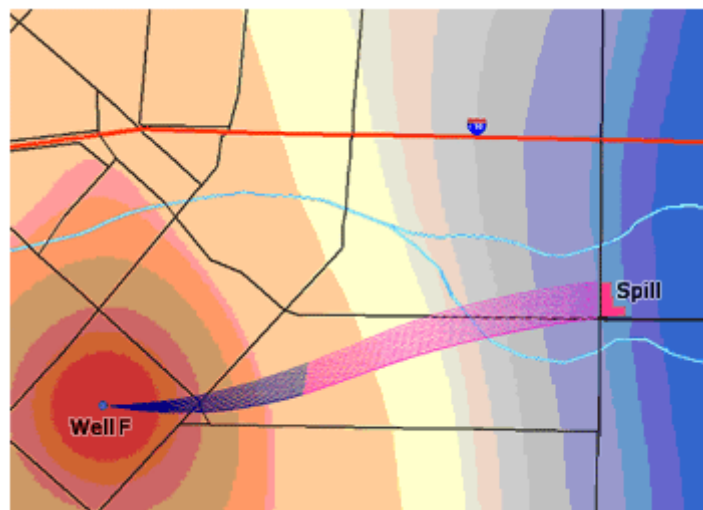
Με την επέκταση Spatial Analyst του ArcGIS Pro, ο χρήστης έχει πρόσβαση σε μια σειρά εργαλείων και δυνατοτήτων για την εκτέλεση ολοκληρωμένης χωρικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα, τα Groundwater tools μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτέλεση στοιχειώδους μοντελοποίησης της συμμεταφοράς-διασποράς των συστατικών στην υπόγεια ροή (ESRI, 2021). Παρακάτω παρουσιάζονται οι δυνατότητες των εργαλείων αυτών.

Εργαλείο	Περιγραφή
Darcy Flow	Υπολογίζει τον υπολειπόμενο όγκο του ισοζυγίου των υπογείων υδάτων και άλλα δεδομένα εξόδου για σταθερή ροή σε έναν υδροφορέα.
Darcy Velocity	Υπολογίζει το διάνυσμα ταχύτητας διήθησης υπογείων υδάτων (κατεύθυνση και μέγεθος) για σταθερή ροή σε έναν υδροφορέα

Particle Track	Υπολογίζει την διαδρομή ενός σωματιδίου μέσα από ένα πεδίο ροής, επιστρέφοντας ένα αρχείο ASCII δεδομένων παρακολούθησης σωματιδίων
Porous Puff	Υπολογίζει την εξαρτώμενη από το χρόνο, δισδιάστατη κατανομή συγκέντρωσης σε μάζα ανά όγκο μιας διαλυμένης ουσίας που εισάγεται ακαριαία και σε ένα διακριτό σημείο σε έναν κατακόρυφα αναμεμιγμένο υδροφορέα.

Πίνακας 2: Εργαλεία ArcGIS για ανάλυση υπογείων υδάτων (ESRI, 2021)

Παρακάτω απεικονίζεται η παρακολούθηση σωματιδίων από μια διαρροή ρύπων σε ένα φρεάτιο άντλησης χρησιμοποιώντας το εργαλείο Particle Track. Από αυτή την ανάλυση μπορεί να προσδιοριστεί εάν ο ρύπος εισέρχεται στο πόσιμο νερό για μια κοντινή πόλη.

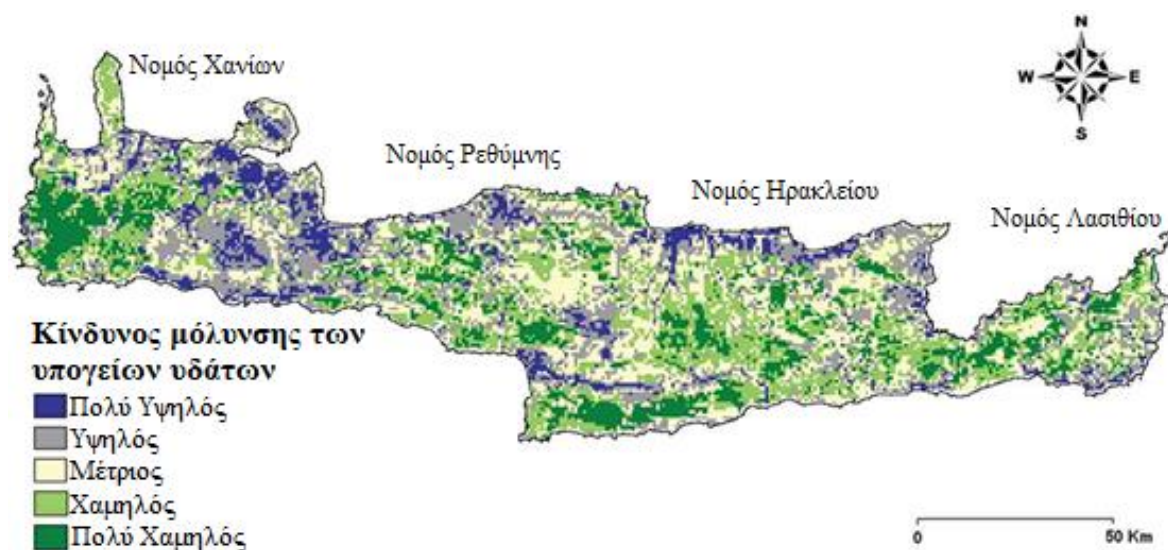


Εικόνα 7: Παρακολούθηση σωματιδίων ρύπου από την διαρροή προς το πηγάδι άντλησης (ESRI, 2021)

Επίσης, με τον συνδυασμό των εργαλείων Darcy Flow και Darcy Velocity προσδιορίζεται η κατεύθυνση ροής των υπογείων υδάτων, άρα και πως μπορεί ένας ρύπος να μετακινηθεί στα υπόγεια ύδατα (ESRI, 2021). Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εκτιμηθεί ο χρόνος που χρειάζεται ο ρύπος για να φτάσει σε μια συγκεκριμένη γεώτρηση που βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη απόσταση από την πηγή ρύπανσης.

Ο βασικός κανόνας για την εκτίμηση του χωρικού κινδύνου μόλυνσης των υπόγειων υδάτων είναι η ταξινόμηση της περιοχής σε κατηγορίες με βάση τον βαθμό επικινδυνότητας (πολύ υψηλός, υψηλός, μέτριος, χαμηλός και πολύ χαμηλός). Αυτή η ταξινόμηση πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τους παράγοντες που επηρεάζουν τη μόλυνση των υπόγειων υδάτων και αποδίδοντας τα σχετικά βάρη σε αυτούς. Αυτή η διαδικασία εκτελείται σε περιβάλλον συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) στο οποίο παράγονται θεματικοί χάρτες για κάθε παράγοντα. Ο γραμμικός συνδυασμός των θεματικών χαρτών και η επιλογή των βαρών δίνουν τον τελικό χάρτη κινδύνου μόλυνσης των υπόγειων υδάτων (Kourgialas και Karatzas, 2015). Η χαρτογράφηση του κινδύνου μόλυνσης των υπογείων υδάτων που μπορούν να εκτελεστούν σε λογισμικό Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, είναι ένα εξαιρετικό

εργαλείο λήψης αποφάσεων για τον προγραμματισμό χρήσης γης και για την διαχείριση των υδατικών πόρων (Kourgialas και Karatzas, 2015).



Εικόνα 8: Τελικός χάρτης κινδύνου μόλυνσης των υπογείων υδάτων για το νησί της Κρήτης σε περιβάλλον ArcGIS (Kourgialas και Karatzas, 2015)

Καθίζηση εδάφους

Λόγω της υπερεκμετάλλευσης του υπογείου νερού, αρκετά συχνά είναι τα φαινόμενα της πτώσης στάθμης του νερού και της καθίζησης της γης. Οι μέθοδοι GIS έχουν εισαχθεί σε έρευνες που αφορούν την καλύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών της χωροχρονικής κατανομής της καθίζησης του εδάφους, της πτώσης στάθμης των υπογείων υδάτων και του πάχους συμπιέσιμου στρώματος. Αυτή η προσέγγιση εμπλούτισε τις μεθοδολογίες για την μελέτη της καθίζησης και επέφερε αποτελέσματα που χαρακτηρίστηκαν χρήσιμα για την εκτίμηση της κατανομής της ανάπτυξης καθιζήσεων και την διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων (Li και λοιποί, 2017).

Προσομοίωση μεταφοράς νιτρικών από σηπτικά συστήματα

Χρήσιμο εργαλείο στην διαχείριση υπογείων υδάτων αποτελεί το ArcNLET (Nitrate Load Estimation Toolkit) του ArcGIS που αναπτύχθηκε από τους (Rios κ.α., 2013) με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους συλλογής και προετοιμασίας δεδομένων για την προσομοίωση της μεταφοράς νιτρικών στα υπόγεια ύδατα από σηπτικά συστήματα και για τον υπολογισμό των νιτρικών φορτίων από τα υπόγεια προς τα επιφανειακά ύδατα σε μακροπρόθεσμο χρονικό διάστημα. Το ArcNLET παρέχει μια ευέλικτη ροή εργασιών καθώς διαχωρίζει την διαδικασία σε λειτουργικές μονάδες, όπου η κάθε μονάδα αντιπροσωπεύει ένα συγκεκριμένο μέρος της προσομοίωσης: ροή υπογείων υδάτων/παρακολούθηση σωματιδίων, μεταφορά και εκτίμηση φορτίου.

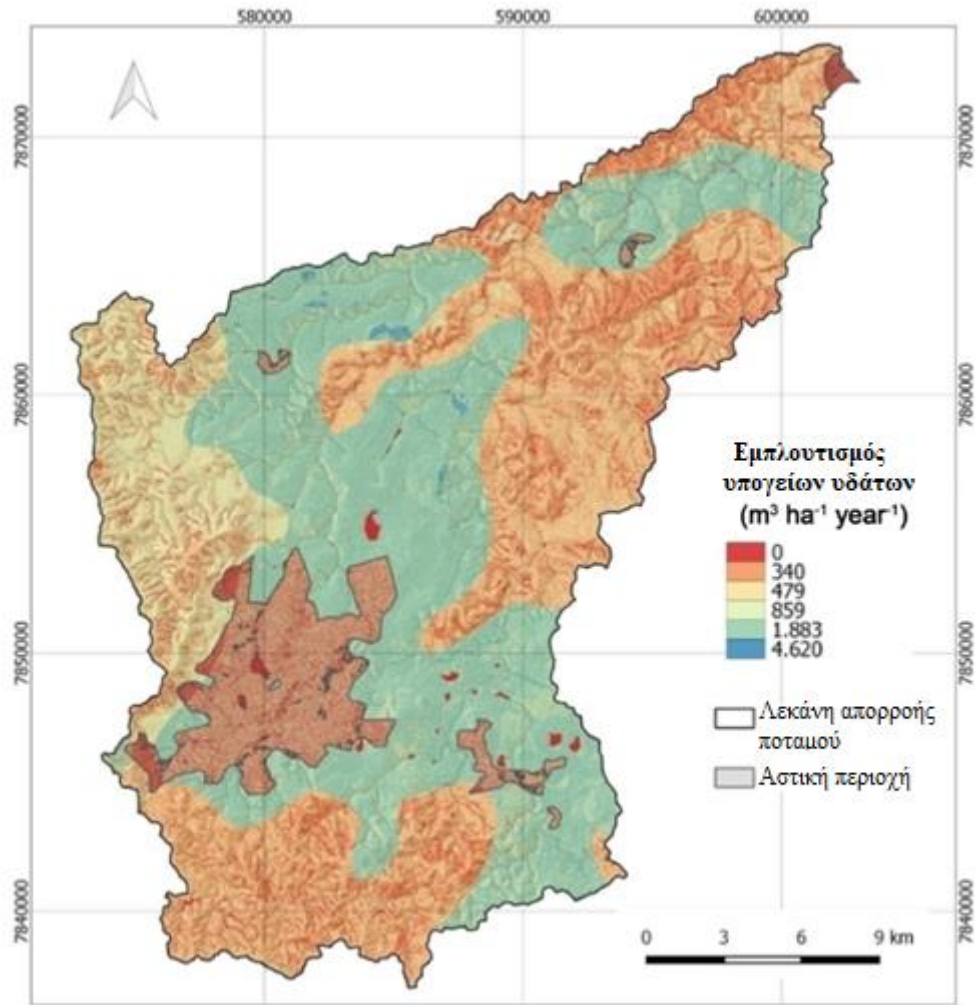
Εμπλουτισμός υπογείων υδάτων

Ο τεχνητός εμπλουτισμός κερδίζει ολοένα και περισσότερο έδαφος στην διαχείριση των υπογείων υδάτων. Στην ουσία, πρόκειται για μια μέθοδο ενίσχυσης της εισροής των πλεοναζόντων ποσοτήτων ύδατος στα υδροφόρα στρώματα για την αποθήκευση ύδατος, η οποία αποσκοπεί στην χρήση του ύδατος σε περιόδους λειψυδρίας (Καρατζάς, 2022). Η

αξιολόγηση των προσδοκώμενων ζωνών εμπλουτισμού των υπογείων υδάτων είναι εξαιρετικά σημαντική για την προστασία της ποιότητάς τους και για τη διαχείριση των συστημάτων υπογείων υδάτων. Οι ζώνες εμπλουτισμού των υπογείων υδάτων είναι οι περιοχές όπου η επιφάνεια του εδάφους επιτρέπει την διήθηση του νερού μέσα από το έδαφος (Yeh κ.α., 2009). Η εκτίμηση των χαρακτηριστικών των υπογείων υδάτων, όπως ο εμπλουτισμός, είναι δυνατή με άμεσες και έμμεσες μεθόδους. Οι γεωλογικές και γεωφυσικές έρευνες, οι γεωτρήσεις και οι βαρυμετρικές και μαγνητικές μέθοδοι θεωρούνται άμεσες μέθοδοι. Οι έμμεσες μέθοδοι, ωστόσο, κυριαρχούνται από τη υδρολογική μοντελοποίηση με την χρήση υπολογιστών και ΓΣΠ σε συνδυασμό με την έρευνα πεδίου, γεωχημικούς ιχνηθέτες κ.λπ. (Costa κ.α., 2019). Προφανώς οι έμμεσες μέθοδοι έχουν μικρότερο κόστος και είναι πιο γρήγορες.

Η ψηφιακή χαρτογράφηση και η χωροθέτηση τέτοιων περιοχών απαιτεί συχνά μεγάλο όγκο χωρικών πληροφοριών και κριτηρίων. Τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών είναι ικανά να διαχειρίζονται ένα μεγάλο όγκο χωρικών πληροφοριών, παρέχοντας τη δυνατότητα ενσωμάτωσης πολλαπλών επιπέδων πληροφοριών για πολυκριτηριακή ανάλυση (MCDA). Για την ανάδειξη των δυνατοτήτων των τεχνικών GIS για την χαρτογράφηση ζώνης εμπλουτισμού υπογείων υδάτων, πραγματοποιήθηκε μια μελέτη στη λεκάνη απορροής της Maknassy που βρίσκεται στην κεντρική Τυνησία, της οποίας τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μεθοδολογία των ΓΣΠ ήταν ιδιαίτερα πρακτική (Chenini κ.α., 2010). Η μελέτη υπόδειξε τους κύριους περιοριστικούς παράγοντες για την υλοποίηση τεχνικού εμπλουτισμού στην περιοχή μελέτης και κατά τους Chenini και λοιπούς τα ΓΣΠ είναι χρήσιμα εργαλεία για την διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων εφόσον είναι ικανά να αποθηκεύουν και να διαχειρίζονται μια μεγάλη σειρά από δεδομένα που μπορεί να είναι διαθέσιμα σε διάφορες μορφές.

Πιο πρόσφατα, στην εκτίμηση της πιθανότητας εμπλουτισμού των υπογείων υδάτων εντός της λεκάνης απορροής του ποταμού Jequitiba στην Βραζιλία έλαβαν μέρος τα ΓΠΣ, τόσο για την ενσωμάτωση των δεδομένων όσο και για την παραγωγή του τελικού χάρτη. Ο χάρτης για δυνατότητας εμπλουτισμού των υπόγειων υδάτων είναι πολύτιμος και ως εκ τούτου προτείνεται ως εργαλείο για τους διαχειριστές για την αειφόρο χρήση των υπόγειων υδάτων και την προστασία της περιοχής εμπλουτισμού (Costa κ.α., 2019). Ο σκοπός της μελέτης ήταν ο εντοπισμός και η οριοθέτηση των προτιμητέων περιοχών για αποκατάσταση, ανάκαμψη και προστασία. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, έπρεπε να επιτευχθούν οι ακόλουθοι συγκεκριμένοι στόχοι: α) η ανάπτυξη ενός χωρικά κατανομημένου μοντέλου για την εκτίμηση της δυνατότητας εμπλουτισμού των υπόγειων υδάτων σε κλίμακα λεκάνης απορροής, β) η συλλογή ενός συνόλου διαφορετικών γεωχωρικών πληροφοριών (μετεωρολογικών, γεωλογικών, χρήσεων γης, εδαφικών κ.α. δεδομένων), γ) εκτέλεση του μοντέλου χρησιμοποιώντας τα συγκεντρωμένα δεδομένα και παραγωγή του τελικού χάρτη δυνητικού εμπλουτισμού των υπόγειων υδάτων, δ) την επαλήθευση του μοντέλου. Μετά την συγκέντρωση των δεδομένων, ο υπολογισμός του συντελεστή LS (μήκος κλίσης L, απότομη κλίση S) πραγματοποιήθηκε από τα εργαλεία που είναι ενσωματωμένα στην πλατφόρμα του QGIS και ο εμπλουτισμός υπολογίστηκε από το GIS τόσο για μεμονωμένα σημεία της λεκάνης απορροής όσο και για το μέσο όρο ολόκληρης της λεκάνης. Τέλος, ο τελικός χάρτης δημιουργήθηκε από έναν συνδυασμό χαρτών (χωρικές κατανομές βροχοπτώσεων, εξατμισοδιαπνοή, συντελεστής επιφανειακής ροής RF, συντελεστής διήθησης νερού PF) χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα εργαλεία του QGIS (Costa κ.α., 2019).



Εικόνα 9: Δυνατότητα εμπλουτισμού υπογείων υδάτων (Costa κ.α., 2019)

Με την πολυκριτηριακή ανάλυση σε ΓΣΠ επιτυγχάνεται και ο καθορισμός των ζωνών του δυναμικού των υπογείων υδάτων. Μετά την προετοιμασία των Θεματικών Επίπεδων Πληροφορίας για κάθε παράγοντα (κάλυψη γης, πυκνότητα αποστράγγισης, πυκνότητα δομικών στοιχείων, έδαφος, γεωλογία, κλίση και γεωμορφολογία), αναθέτοντας στο καθένα τον ανάλογο συντελεστή βαρύτητας, τα Θ.Ε.Π. αυτά ενσωματώθηκαν για την ανάπτυξη του τελικού χάρτη της προοπτικής των υπογείων υδάτων μιας περιοχής (Andualem και Demeke., 2019). Οι τιμές του δείκτη GWPI (GroundWater Potential Index) υπολογίστηκαν με το “weighted overlay analysis” εργαλείο του ArcGIS Pro και χρησιμοποιήθηκαν για να ταξινομηθεί εάν η κάποια περιοχή είναι εξαιρετική, πολύ καλή, μέτρια, φτωχή ή πολύ φτωχή σε σχέση με την προοπτική των υπόγειων υδάτων της. Η κατηγοριοποίηση έγινε με την μέθοδο βελτιστοποίησης Jenks σε περιβάλλον ArcGIS.

3.2.2 Συνδυασμός των GIS με μοντέλα υπογείων υδάτων

Οι πρώτες συνδέσεις των ΓΣΠ με τα υδρολογικά μοντέλα υπόγειων υδάτων

Οι Evans και Myers (1990), χρησιμοποίησαν το μοντέλο DRASTIC σε περιβάλλον ΓΣΠ και συγκεκριμένα το ERDAS για την εκτίμηση της πιθανότητας ρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων στο Delaware των ΗΠΑ. Σε περιπτώσεις, όπως αυτή, όπου υπάρχουν πολύπλοκες περιβαλλοντικές σχέσεις, είναι πιο αποδοτικό τα δεδομένα που αφορούν διαφορετικές πτυχές του περιβάλλοντος να συνδυάζονται παρά να χρησιμοποιούνται χωριστά. Έτσι, το ERDAS βοήθησε στην εκτίμηση της ρύπανσης, εφόσον μια από τις κύριες λειτουργίες ενός ΓΣΠ είναι ο συνδυασμός των διαφορετικών επιπέδων δεδομένων. Ένα χρόνο αργότερα, το ίδιο γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών συνδυαστικά με το DRASTIC απέδωσε τον τελικό χάρτη επικινδυνότητας ρύπανσης των υπογείων υδάτων στην πολιτεία της Nebraska (Rundquist και λοιποί, 1991).

Το 1991, το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών GRASS 3.1 (Geographical Resources Analysis Support System) χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της ευπάθειας των υπόγειων υδάτων στη ρύπανση από αζωτούχο λίπασμα που εφαρμόζεται σε καλλιέργειες στο Τέξας (Halliday και Wolfe, 1991). Ο συνδυασμός δεδομένων σχετικά με τη διαθεσιμότητα ενός ρύπου και την τρωτότητα των υπόγειων νερών στην γεωργική χημική μόλυνση οδήγησε σε καλύτερη εκτίμηση των πιθανών προβλημάτων ρύπανσης των υπόγειων υδάτων από ό,τι θα ήταν δυνατό μόνο με τη χρήση του DRASTIC. Το GIS διευκόλυνε την διαδικασία με την ικανότητά του να αποθηκεύει το χωρικό πλαίσιο των δεδομένων στη βάση δεδομένων. Αυτό συνέβαλλε στον εντοπισμό των περιοχών προτεραιότητας για μελλοντικές δειγματοληψίες στο πεδίο και ποσοτικοποίηση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων (Halliday και Wolfe, 1991).

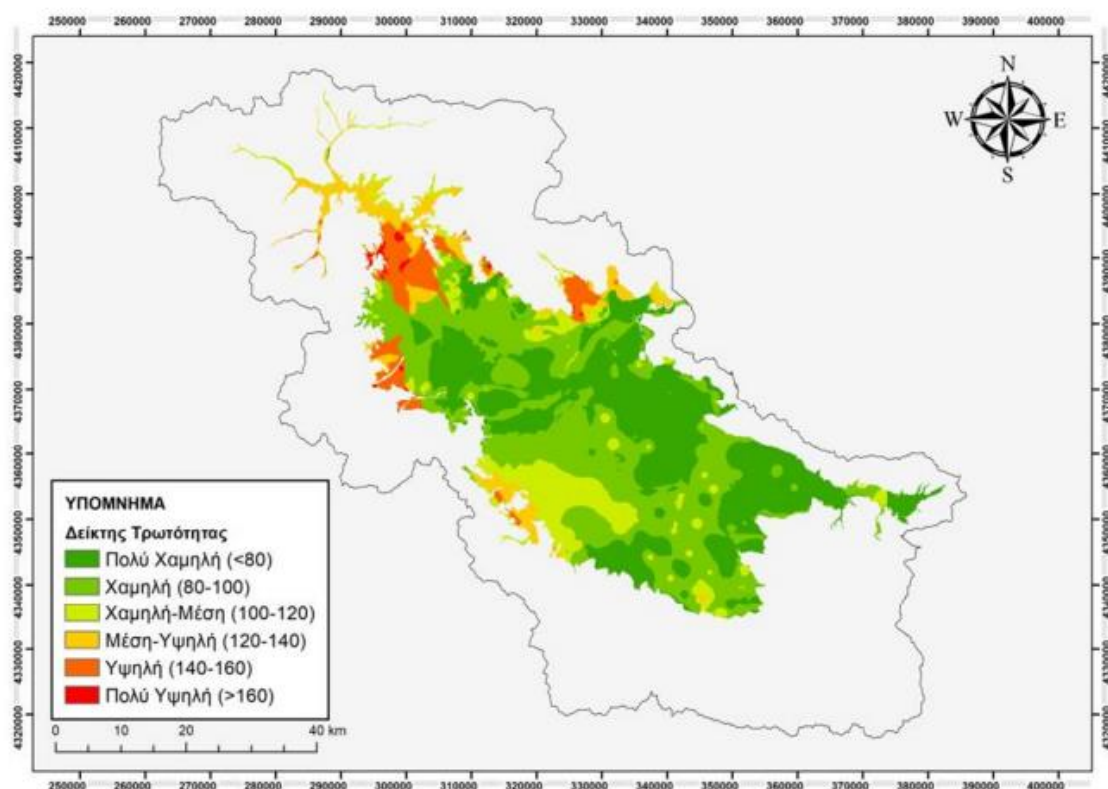
Το 1993 δημιουργήθηκε το RIGIS, μια περιβαλλοντική βάση δεδομένων πολιτειακού μεγέθους για το Rhode Island των ΗΠΑ, η οποία χρησιμοποιεί το λογισμικό Arc/Info και το μοντέλο WHPA (Wellhead Protection Area) (Baker και λοιποί, 1993). Το WHPA είναι ένα ημι-αναλυτικό πρόγραμμα προσομοίωσης ροής υπογείων υδάτων που χρησιμοποιείται για την οριοθέτηση των ζωνών που προσφέρουν νερό σε πηγάδι παροχής πόσιμου νερού, σε μια περιοχή προστασίας φρεατίων (EPA, 2022). Η βάση δεδομένων RIGIS παρέχει τα όρια των στρωματοποιημένων υδροφορέων (αυτών δηλαδή που αποτελούνται από ιζήματα που εναποτέθηκαν σε στρώματα από τα ρεύματα λιωμένου νερού), την επιφανειακή υδρογραφία, θέσεις φρεατίων, ισοδυναμικές γραμμές¹ και καμπύλες μεταβιβασιμότητας². Τα δεδομένα από το RIGIS εκτελούνται μέσω του μοντέλου WHPA το οποίο αναλύει τις πληροφορίες και στέλνει πίσω τα αποτελέσματα στο RIGIS. Στη συνέχεια, το RIGIS μετατρέπει γρήγορα και με ακρίβεια τα δεδομένα εξόδου του μοντέλου σε ένα επίπεδο δεδομένων γεωγραφικής αναφοράς και παράγει επικαλύψεις χαρτών με τις απαραίτητες πληροφορίες.

¹Οι ισοδυναμικές γραμμές προκύπτουν από την σύνδεση των σημείων με το ίδιο υδραυλικό ύψος. Ένας χάρτης ισοδυναμικών γραμμών μοιάζει με τοπογραφικό χάρτη όπου οι ισοδυναμικές γραμμές είναι οι αντίστοιχες των ισοϋψών καμπύλων (Καρατζάς, 2022).

²Μεταβιβασιμότητα είναι ο ρυθμός με τον οποίο ύδωρ δεδομένου κινητικού ιξώδους μεταβιβάζεται δια μέσου μοναδιαίου πλάτους ενός υδροφορέα με μοναδιαία υδραυλική κλίση (Καρατζάς, 2022).

Εκτίμηση κινδύνου ρύπανσης υπόγειου υδροφορέα με την μέθοδο DRASTIC σε συνδυασμό με την χρήση ΓΣΠ

Για την εκτίμηση της τρωτότητας, δηλαδή του κινδύνου ρύπανσης, των υπόγειων υδάτων με τη μέθοδο DRASTIC, λαμβάνονται υπόψη οι επτά παράμετροί της: το βάθος του υπόγειου νερού (D), ο εμπλουτισμός του υδροφορέα (R), το μέσο του υδροφορέα (A), το έδαφος (S), η κλίση του ανάγλυφου (T), η επίδραση της ακόρεστης (I) και η υδραυλική αγωγιμότητα του Υδροφορέα (C). Στην περίπτωση της Δυτικής Θεσσαλίας, αυτοί οι παράγοντες βαθμονομήθηκαν σε μία κοινή κλίμακα και δημιουργήθηκε για τον καθένα ένα Θεματικό Επίπεδο Πληροφορίας (Θ.Ε.Π.) (Γκαβαλέκα, 2019). Η χαρτογράφηση της τρωτότητας του υπόγειου υδροφορέα της περιοχής μελέτης έγινε στο λογισμικό του ArcMAP με τη χρήση της υπορουτίνας Raster Calculator, που βρίσκεται εντός της λειτουργίας Map Algebra του εργαλείου Spatial Analyst Tools όπου προστέθηκαν αλγεβρικά τα επτά Θ.Ε.Π. (raster). Στη συνέχεια έγινε η ταξινόμηση σε έξι κατηγορίες (Πολύ Χαμηλή, Χαμηλή, Χαμηλή-Μέση, Μέση-Υψηλή, Υψηλή και Πολύ Υψηλή) με τη χρήση της υπορουτίνας Reclassify, της λειτουργίας Reclass του Spatial Analyst Tools, επιλέγοντας τη μέθοδο κατηγοριοποίησης Natural Breaks. Τα ΓΣΠ χαρακτηρίστηκαν ως ιδανικό εργαλείο χωρικής ανάλυσης και διαχείρισης υδατικών πόρων για τον υπολογισμό της τρωτότητας των υπογείων υδάτων καθώς κατέστησε την μεθοδολογία εύχρηστη και αξιόπιστη (Γκαβαλέκα, 2019).



Εικόνα 10: Βαθμονομημένος Χάρτης τρωτότητας υπόγειου υδροφορέα με την μέθοδο DRASTIC στο ArcMAP (Γκαβαλέκα, 2019)

Συνδυασμός μοντέλου MODFLOW με ΓΣΠ

Το RIPGIS-NET, μια εφαρμογή του ArcGIS 9.2/9.3 της ESRI, αναπτύχθηκε για την εξαγωγή παραμέτρων και την απεικόνιση των αποτελεσμάτων της εξατμισοδιαπνοής (ETg) των παραποτάμιων υπόγειων υδάτων και της εξατμισοδιαπνοής από κορεσμένη ζώνη, σε μοντέλα ροής υπογείων υδάτων για την διαχείριση παρόχθιων οικοσυστημάτων και την αποκατάσταση ρεμάτων. Συγκεκριμένα, το RIP-GIS μπορεί να συνδυαστεί με το πακέτο μοντελοποίησης RIP-ET (RIParian –EvapoTranspiration) το οποίο λειτουργεί με το μοντέλο ροής υπογείων υδάτων MODFLOW. Λειτουργώντας ως προ- και μετ'- επεξεργαστής για το RIP-ET, το RIPGIS-NET ενσωματώνει τη χωρική μεταβλητότητα της παρόχθιας βλάστησης και το υψόμετρο της επιφάνειας του εδάφους, βελτιώνοντας έτσι την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής (ETg) στα μοντέλα υπογείων υδάτων MODFLOW. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι οι αυτοματοποιημένες διαδικασίες στο RIPGIS-NET μειώνουν το χρόνο που απαιτείται για τη δημιουργία δεδομένων εισόδου και την απεικόνιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου MODFLOW (Ajami κ.α., 2012).

Συστήματα που βασίζονται σε ΓΣΠ (GIS-based modeling systems)

Το ArcPRZM-3, ένα σύστημα μοντελοποίησης βασισμένο σε GIS, δημιουργήθηκε για την χωρική μοντελοποίηση της δυνατότητας έκπλυσης των φυτοφαρμάκων από το έδαφος προς τα υπόγεια ύδατα από τους Akbar και λοιπούς, 2011. Στην δικιά τους περίπτωση, τα αποτελέσματα προσομοίωσης για την υπόθεση παρουσίας της χημικής ένωσης bentazon στο πόσιμο νερό χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη ενός χάρτη πρόβλεψης κινδύνου για την υγεία για την κομητεία Woodruff του Αρκάνσας. Το ArcPRZM-3 αξιολογήθηκε συγκρίνοντας τα δεδομένα ανίχνευσης bentazon από φρεάτια παρακολούθησης από την ίδια περιοχή με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το 100% των φρεατίων όπου ανιχνεύθηκε η bentazon ήταν εντός της κατηγορίας υψηλού κινδύνου με βάση τις προβλέψεις του ArcPRZM-3, αποδεικνύοντας ότι έκανε καλή δουλειά στην πρόβλεψη διαλυμένης bentazon στα υπόγεια ύδατα. Το ArcPRZM-3 αναγνωρίστηκε ως ένα σύστημα που παράγει εύχρηστα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις του PRZM-3 με τη μορφή πινάκων, διαγραμμάτων και χαρτών καθιστώντας έτσι την ερμηνεία τους και εφαρμογή τους πιο εύκολη για τους διαχειριστές και τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων. Επίσης, ενώ το αρχικό PRZM-3 μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μόνο για μια μελέτη συγκεκριμένης τοποθεσίας, το ArcPRZM-3 επέκτεινε την δυνατότητα για χωρικά κατανομημένη μοντελοποίηση σε επίπεδο λεκάνης απορροής ή περιοχής (Akbar και λοιποί, 2011).

Το QUIMET είναι μια πλατφόρμα λογισμικού που αναπτύχθηκε για υδροχημική ανάλυση σε περιβάλλον GIS, η οποία αποτελείται από μια γεωχωρική βάση δεδομένων και ένα σύνολο εργαλείων ειδικά σχεδιασμένων για γραφική και στατιστική ανάλυση υδρογεωχημικών δεδομένων. Η γεωχωρική βάση δεδομένων έχει σχεδιαστεί ώστε να περιλαμβάνει αρχεία οργανικών και ανόργανων χημικών, καθώς και σχετικές φυσικές παραμέτρους (θερμοκρασία, Eh, ηλεκτρική αγωγιμότητα). Τα όργανα για ανάλυση καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα μεθοδολογιών για την αναζήτηση, την ερμηνεία και τη σύγκριση δεδομένων ποιότητας των υπόγειων υδάτων (Velasco κ.α., 2014). Επίσης σημειώθηκε ότι τα εργαλεία, ενσωματωμένα στο ArcGIS, βελτιώνουν την ερμηνεία των υδροχημικών δεδομένων.

Χρονική Περίοδος	Εργαλείο GIS/υδρολογικό Μοντέλο	Επίτευγμα
20 ^{ος} αιώνας	ArcInfo WHPA	Παραγωγή ισοδυναμικών γραμμών και καμπυλών μεταβιβασιμότητας (transmissivity)
	GRASS DRASTIC	Προσδιορισμός του ποσοστού συσχέτισης μεταξύ της ευπάθειας των υπόγειων υδάτων στη ρύπανση και της διαθεσιμότητας αζωτούχου λιπάσματος
	ArcInfo GLEAMS	Αξιολόγηση της επίδρασης των χαρακτηριστικών του εδάφους στην κατανομή της ρύπανσης
	ArcInfo MODFLOW	Αξιολόγηση αλλαγών στις υδρολογικές διαδικασίες των σύνθετων συστημάτων υπόγειου νερού (π.χ. διήθηση νερού και υδραυλική αγωγιμότητα)
	IDRISI AgriFlux	Προσομοίωση της μεταφοράς των νιτρικών στα υπόγεια ύδατα
	FREEWAT LuKARS	Προσομοίωση των υδρολογικών επιπτώσεων των αλλαγών της χρήσης γης στα καρστικά συστήματα
21 ^{ος} αιώνας	ArcGIS DRASTIC	Εύρεση ευπαθών ζωνών υπόγειων υδάτων
	ArcPRZM-3	Μοντελοποίηση της δυνατότητας έκπλυσης παρασιτοκτόνων από την επιφάνεια του εδάφους προς τα υπόγεια ύδατα
	ArcGIS MODFLOW	Πρόβλεψη βάθους υπογείου υδροφόρου ορίζοντα από την επιφάνεια του εδάφους και των αλλαγών στα συστήματα υπογείων υδάτων

Πίνακας 3: Ιστορία της διασύνδεσης GIS με μοντέλα υπογείων νερών (Boroomandnia κ.α., 2021)

3.2.3 Άρδευση

Όπως προαναφέρθηκε, τα 2/3 των υπόγειων υδατικών πόρων εξάγονται για αρδευτικούς σκοπούς. Με την γεωργία να είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής νερού γίνεται ξεκάθαρο ότι η ορθολογική διαχείριση του αρδευτικού νερού επιφέρει τον μεγαλύτερο θετικό αντίκτυπο διεθνώς. Για την βελτίωση της αποδοτικότητας της χρήσης νερού για αρδευτικούς λόγους απαιτείται η χρήση τεχνολογίας που θα μειώσει τις απώλειες νερού, θα εξισορροπήσει την ποσότητα των διαθέσιμων πόρων με την ζήτηση και θα παρακολουθεί την όλη διαδικασία άρδευσης (Bwambale κ.α., 2022).

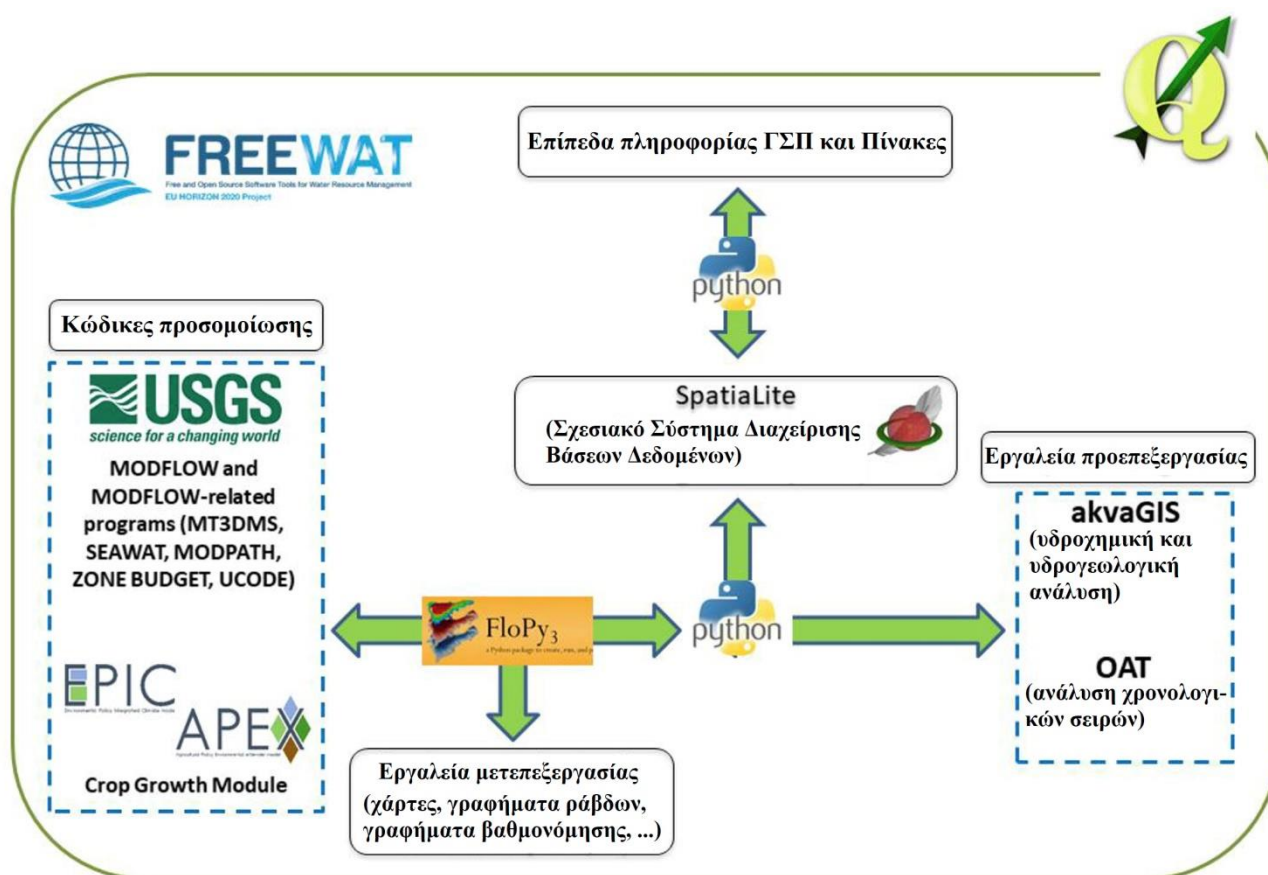
Ο Gebeyehu αναγνώρισε τα ΓΣΠ και την Τηλεπισκόπηση ως αποτελεσματικά και ισχυρά εργαλεία για τον προσδιορισμό της κάλυψης γης και της αλλαγής χρήσης γης. Σε συνδυασμό με άλλα εργαλεία, τα ΓΣΠ έχουν εφαρμοσθεί για την κατανόηση: της κατάστασης υγείας των φυτών, της προσβολής από παράσιτα, της προοπτικής για σοδειά, των συνθηκών του εδάφους, του προσδιορισμού της καλλιέργειας, την εκτίμηση της καλλιεργούμενης περιοχής και της διαχείρισης του αρδευτικού νερού (Gebeyehu, 2019). Τα ΓΣΠ έχουν χρησιμοποιηθεί στην άρδευση για διαφορετικούς σκοπούς, μεταξύ των οποίων είναι η αξιολόγηση της καταλληλότητας των υπόγειων υδάτων για αρδευτική χρήση (Megahed 2020, Bhunia κ.α. 2018), η παρακολούθηση της διανομής του αρδευτικού νερού (Rowshon κ.α., 2003), η εκτίμηση της CWP (Crop Water Productivity), δηλαδή της αναλογίας της σοδειάς προς το νερό που καταναλώθηκε (Liu, 2009), και τον προσδιορισμό των απαιτήσεων μιας καλλιέργειας σε νερό (Ramírez-Cuesta κ.α., 2018).

Η ποσότητα του νερού που χρειάζεται μια καλλιέργεια για να αναπτυχθεί σε μεγάλα χωράφια κάτω από μη περιοριστικές εδαφικές συνθήκες, όπως είναι η απορροφητικότητα και η γονιμότητα του εδάφους, έτσι ώστε αυτή να φτάσει στην βέλτιστη παραγωγικότητα στο δεδομένο περιβάλλον, είναι γνωστή ως απαιτήσεις της καλλιέργειας σε νερό (Pereira and Allen, 1999). Οι Ramírez-Cuesta κ.α. ανέπτυξαν μια καινοτόμα εργαλειοθήκη στο ArcGIS για τον προσδιορισμό των απαιτήσεων των καλλιεργειών σε νερό, χρησιμοποιώντας την προσέγγιση διπλού συντελεστή καλλιέργειας και τις εικόνες τηλεπισκόπησης. Επιπλέον, η συμπερίληψη του εργαλείου αυτού σε ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) επιτρέπει την αυτοματοποίηση εργασιών, η οποία μειώνει τον υπολογιστικό χρόνο και επιτρέπει τη μοντελοποίηση μεγάλων περιοχών ταυτόχρονα, κάτι που αποτελεί σημαντικό περιορισμό σε άλλα μοντέλα. Ιδιαίτερα, αν το προτεινόμενο εργαλείο ενσωματωθεί σε ένα Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων μπορεί να δώσει πραγματικές λύσεις για τον αγροτικό τομέα όσον αφορά τον προγραμματισμό άρδευσης, κάτι το οποίο προάγει τη συνετή χρήση των υδατικών πόρων για γεωργικούς σκοπούς (Ramírez-Cuesta κ.α., 2018).

Ο συνδυασμός των GIS με τα υπάρχοντα συστήματα διαχείρισης άρδευσης είναι πιο ισχυρός και αποτελεσματικός όταν υπάρχουν σημαντικές ποσότητες γεωγραφικών και χρονικών δεδομένων. Χρησιμοποιούνται για την οργάνωση, την ανάκτηση και την εμφάνιση γεωγραφικών δεδομένων είτε σε επίπεδο αγρού είτε σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Καθώς τα αποθέματα νερού γίνονται σπάνια, απαιτούνται εξελιγμένες τεχνικές διαχείρισης του νερού και άρδευσης για τη διατήρηση αυτού του πολύτιμου πόρου. Η αντιμετώπιση ζητημάτων υπο- ή υπεράρδευσης, έκπλυσης ή ξήρανσης του εδάφους, μπορεί να πραγματοποιηθεί με τον συνδυασμό γεωχωρικών τεχνολογιών, συστημάτων πληροφοριών και συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων. Τέλος, οι αναβαθμίσεις της τεχνολογίας των GIS και των εφαρμογών στο GIS θα καθορίσουν τη μελλοντική χρήση αυτών των γεωχωρικών εργαλείων στα συστήματα άρδευσης. Η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών όπως τα: cloud computing, Internet of Things Big Data και Machine Learning, 3D GIS, Mobile GIS, Augmented and Virtual Reality, και Unmanned Aerial Vehicles, με τα ΓΣΠ και την Τηλεπισκόπηση φέρνουν αλλαγές στον γεωργικό τομέα και θα συνεχίσουν να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διαχείριση της άρδευσης (Bwambale κ.α., 2022).

3.2.4 Ανοιχτού κώδικα ΓΣΠ στην διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων

Η ενσωμάτωση προηγμένων τεχνικών προσομοίωσης και εργαλείων ανάλυσης δεδομένων σε ένα δωρεάν λογισμικό Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (GIS) παρέχει πολύτιμη συμβολή στη διαχείριση των υδατικών πόρων. Ειδικά, το FREEWAT (FREE and open source software tools for WATer resource management) είναι ένα δωρεάν πρόσθετο για το γνωστό λογισμικό ανοιχτού κώδικα QGIS με σκοπό την Δ.Υ.Π., με ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα υπόγεια ύδατα. Το FREEWAT σχεδιάστηκε έτσι ώστε τα δεδομένα που προέρχονται από τον χαρακτηρισμό των υπόγειων υδάτινων σωμάτων και τις σχέσεις τους με τα επιφανειακά υδατικά συστήματα, τις ανθρώπινες δραστηριότητες και τα δίκτυα παρακολούθησης να μπορούν να αποθηκευτούν, να αναλυθούν με ειδικά εργαλεία, να υποβληθούν σε επεξεργασία μέσω μοντέλων προσομοίωσης και τελικά, τα αποτελέσματα να αξιολογηθούν και να απεικονιστούν στο QGIS. Ο στόχος της δημιουργίας του δωρεάν λογισμικού FREEWAT είναι να διευρύνει τις δυνατότητες των αρχών και των εταιρειών στη διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων χρησιμοποιώντας ένα ενημερωμένο, ισχυρό, καλά τεκμηριωμένο και αξιόπιστο λογισμικό χωρίς να συνεπάγεται η ανάγκη δαπανηρής αδειοδότησης (Rossetto κ.α., 2018).



Σχήμα 6: Απλοποιημένο σχήμα της αρχιτεκτονικής FREEWAT (Rossetto κ.α., 2018)

Το AkvaGIS είναι μια λειτουργική μονάδα προεπεξεργασίας ενσωματωμένη στο FREEWAT που παρέχει την δυνατότητα σε οργανισμούς ύδρευσης, ενδιαφερόμενους φορείς, δημόσιες αρχές και επαγγελματίες του τομέα του νερού να αντιμετωπίσουν, μεταξύ άλλων, τα ακόλουθα ζητήματα: α) τον προσδιορισμό των κύριων διαδικασιών που επηρεάζουν τη

χημική σύνθεση των υπόγειων υδάτων και την αντίστοιχη χωρική και χρονική κατανομή, β) την αξιολόγηση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων και της επίτευξης καλής χημικής κατάστασης με βάση τα όρια που εκδίδονται, π.χ., από την Οδηγία -Πλαίσιο για τα Νερά (Οδηγία 2000/60/EK), γ) την διαχείριση και ενσωμάτωση μεγάλου όγκου δεδομένων που εξαρτώνται από το χρόνο και το χώρο (π.χ. υδρογεωλογικά, υδροχημικά κ.λπ.), δ) την ομογενοποίηση και την εναρμόνιση μεγάλων συνόλων δεδομένων που συλλέγονται από διαφορετικές πηγές και συγκεντρώθηκαν με διαφορετικές τεχνικές και μορφές που υποστηρίζονται από την OGS (Open Geospatial Consortium) και την Οδηγία 2007/2/EK (ΕΕ, 2007), ώστε να μοιράζονται εύκολα σε διαφορετικά λειτουργικά συστήματα, ε) την διεξαγωγή ολοκληρωμένης ανάλυσης των διαθέσιμων δεδομένων για τη δημιουργία αρχείων εισόδου για υδρογεωλογικά μοντέλα (Rossetto κ.α., 2018).

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6, το πλαίσιο μοντελοποίησης του FREEWAT βασίζεται στον δημοφιλή κώδικα για την ροή υπογείων υδάτων MODFLOW, ο οποίος είναι γραμμένος στην FORTRAN, είναι ανοιχτός, καλά τεκμηριωμένος και ελεύθερα διαθέσιμος στο διαδίκτυο. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο FREEWAT οποιοδήποτε μοντέλο υπόγειων υδάτων μπορεί να συνδυαστεί με ένα ή περισσότερα μοντέλα μεταφοράς διαλυμένων ουσιών, με στόχο την προσομοίωση πολλαπλών ειδών συµμεταφοράς-διασποράς, τόσο σε ακόρεστη όσο και σε κορεσμένη ζώνη.

Συµπερασματικά, το FREEWAT είναι μια πλατφόρµα στο QGIS στην οποία ο χρήστης μπορεί να αρχειοθετήσει, να προεπεξεργαστεί και να αναλύσει δεδομένα, να δημιουργήσει ένα σύνολο μοντέλων είτε υπόγειας ροής είτε μεταφοράς διαλυμένων ουσιών και τέλος να παρουσιάσει τα αποτελέσµατα αυτά σε µορφή χάρτη, γραφήµατος κ.λπ. Σήµερα, ένα ισχυρό και ανοιχτού κώδικα λογισµικό είναι αναγκαίο για την βελτίωση της διαχείρισης των υπογείων υδάτων στις κοινότητες/ χώρες µε περιορισµένους πόρους.

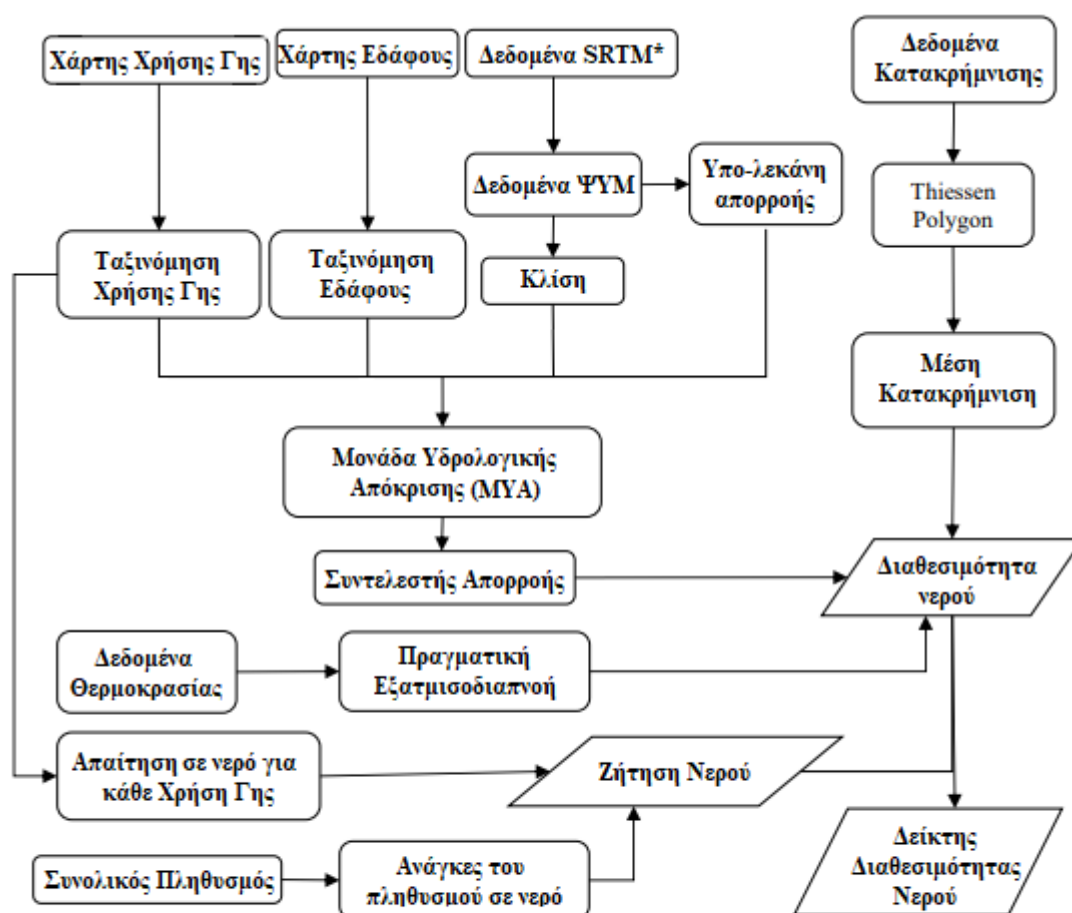
3.3 Ποσοτική διαχείριση υδατικών πόρων

Στα προηγούμενα υποκεφάλαια έγινε λόγος κυρίως για την συμβολή των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών στην ποιοτική διαχείριση των υδατικών πόρων. Με άλλα λόγια, συνήθως τα ΓΣΠ εφαρμόζονται για τα χαρακτηρισμό τόσο των υπογείων όσο και των επιφανειακών νερών όσον αφορά την ποιότητά τους, δηλαδή αν είναι επιρρεπή στην μόλυνση, αν είναι σε καλή κατάσταση ποιοτικά, ποιοι παράγοντες επηρεάζουν αρνητικά την ποιότητά τους κ.λπ. Προφανώς, είναι εξίσου σημαντικό να γνωρίζουμε την ποσότητα του νερού που υπάρχει σε μια περιοχή και πόσο θα μειωθεί ή αυξηθεί με την πάροδο του χρόνου για την εφαρμογή ορθών και βιώσιμων στρατηγικών διαχείρισης. Παρακάτω αναφέρονται κάποιες εφαρμογές των GIS στην ποσοτική διαχείριση των υδατικών πόρων.

Εκτίμηση της διαθεσιμότητας υδατικών πόρων εντός λεκάνης απορροής

Οι χωρικές πληροφορίες διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων. Τα ΓΣΠ επιτρέπουν την αξιολόγηση και την παρακολούθηση με την πάροδο του χρόνου των χωρικών πληροφοριών σχετικά με την διαθεσιμότητα νερού στις λεκάνες απορροής. Η εφαρμογή του ArcGIS στην εκτίμηση της διαθεσιμότητας των υδατικών πόρων και της ζήτησης σε νερό έχει λάβει μέρος στην Ινδονησία για την λεκάνη απορροής του ποταμού Cianten. Οι Mirrah και Kusratmoko διαχώρισαν την λεκάνη

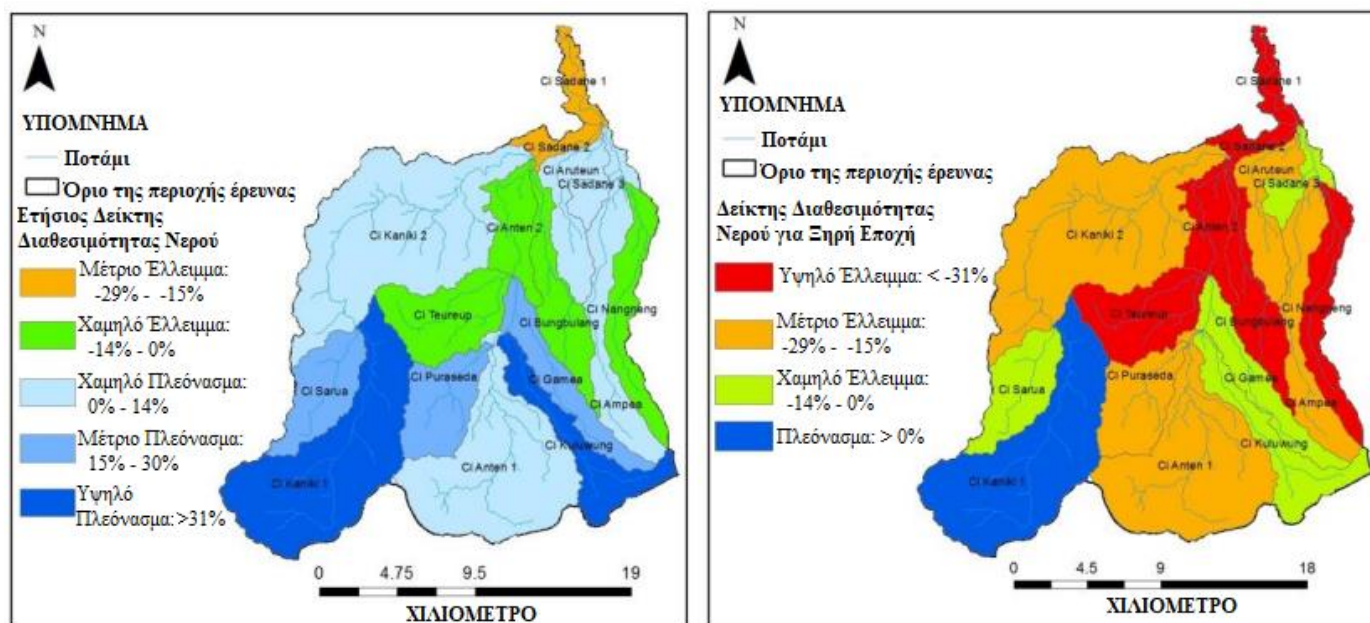
απορροής σε υπολεκάνες με το ArcSWAT (προέκταση του ArcGIS και διεπαφή με το μοντέλο SWAT) και εκτίμησαν την διαθεσιμότητα νερού για κάθε υπολεκάνη εφαρμόζοντας το υδατικό ισοζύγιο. Το Soil and Water Assessment Tool (SWAT) είναι ένα μοντέλο κλίμακας μικρής λεκάνης απορροής ποταμού το οποίο εφαρμόζεται για την προσομοίωση της ποιότητας και ποσότητας του επιφανειακού και υπόγειου νερού και για την πρόβλεψη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των χρήσεων γης, των πρακτικών διαχείρισης της γης και της κλιματικής αλλαγής. Το διάγραμμα ροής εργασιών που εκτελέστηκαν στο GIS παρουσιάζεται παρακάτω.



*Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) : Σύστημα ραντάρ για την απόκτηση τοπογραφικών δεδομένων

Σχήμα 7: Διάγραμμα ροής εργασιών βασισμένη σε τεχνολογία ΓΣΠ για τον υπολογισμό του δείκτη διαθεσιμότητας νερού (Mirrah και Kusratmoko, 2017)

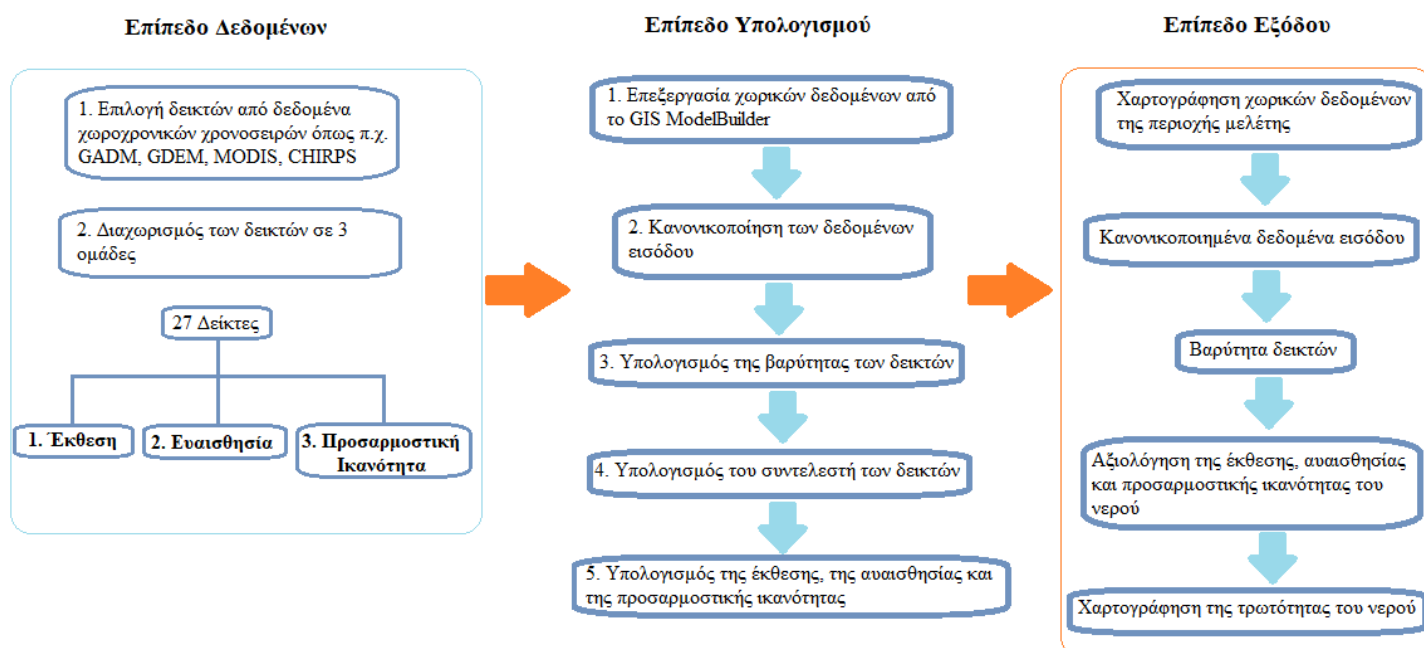
Ο δείκτης διαθεσιμότητας νερού όπου είναι η επί τοις εκατό σύγκριση της διαθεσιμότητας νερού με τη ζήτηση νερού και υπολογίστηκε για κάθε υπολεκάνη μια φορά για ολόκληρο το έτος και μία μόνο για την ξηρή περίοδο. Ανάλογα με την τιμή του δείκτη φαίνεται αν η κάθε υπολεκάνη παρουσιάζει πλεόνασμα σε νερό (θετική τιμή δείκτη) ή έλλειμμα (αρνητική τιμή δείκτη).



Εικόνα 11: Δείκτης Διαθεσιμότητας Νερού για όλο το έτος και για την ξηρή εποχή (Mirrah και Kusratmoko, 2017)

Εκτίμηση της τρωτότητας της ποσότητας του νερού

Η εκτίμηση της τρωτότητας της ποσότητας του νερού είναι ο εντοπισμός των περιοχών και των κοινοτήτων οι οποίες πρέπει να δώσουν προτεραιότητα στον σχεδιασμό και την εφαρμογή στρατηγικών διαχείρισης του νερού. Λόγω της έλλειψης ενός ειδικού πλαισίου με επαρκείς δείκτες για την εκτίμηση της ποσοτικής τρωτότητας των υδάτων, οι Nguyen κ.α. πρότειναν μια νέα προσέγγιση με βάση τα δορυφορικά δεδομένα και το GIS ModelBuilder. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι στο Σχήμα 8, όπου φαίνεται η συμβολή του GISBuilder στο ArcGIS, τόσο στο υπολογιστικό κομμάτι όσο και στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα και για άλλες μελέτες και περιοχές που διαθέτουν ελεύθερα προσβάσιμες πηγές χωρικών δεδομένων. Τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για έρευνα άμβλυνσης της τρωτότητας της ποσότητας νερού και βοηθούν τους επαγγελματίες και τους διαχειριστές να εντοπίσουν τους παράγοντες που επηρεάζουν την τρωτότητα προκειμένου να κατανοήσουν καλύτερα το υδατικό σύστημα. Τέλος, αναδείχθηκε ότι η χρήση ενημερωμένων συνόλων χωρικών δεδομένων είναι μια απαραίτητη προσέγγιση ιδιαίτερα για χώρες που έχουν έλλειψη αποδοτικών δεδομένων για τη διεξαγωγή αναλύσεων τρωτότητας και επιπτώσεων (Nguyen κ.α., 2020).



Σχήμα 8: Το πλαίσιο εκτίμησης τρωτότητας της ποσότητας νερού (Nguyen κ.α., 2020)

3.4 Συστήματα Ύδρευσης και Αποχέτευσης

Οι εταιρείες ύδρευσης και αποχέτευσης αναζητούν συνεχώς τεχνολογίες που βοηθούν στην ομαλή και αποτελεσματική λειτουργία και οι οποίες θα παρέχουν υψηλότερα επίπεδα υπηρεσιών (Tsihrintzis κ.α., 1996). Λόγω της χωρικής φύσης των δεδομένων που απαιτούνται στον προγραμματισμό, στον σχεδιασμό, στην ανάλυση, στην λειτουργία και στην συντήρηση των συστημάτων ύδρευσης και αποχέτευσης στις πόλεις, οι ειδικοί ύδρευσης και αποχέτευσης πρέπει να χρησιμοποιούν τεχνολογίες όπως τα ΓΣΠ. Ο βασικός ρόλος ενός GIS στην διαχείριση της ύδρευσης είναι η ικανότητά του να διαχειρίζεται τα μοναδικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τους καταναλωτές, γεγονός που οδηγεί σε ακριβή και ενημερωμένη πρόβλεψη της ζήτησης νερού (Boroomandnia κ.α., 2021). Ένα τέτοιο σύστημα αυτοματοποιεί τη διαδικασία επίλυσης περιφερειακών προβλημάτων νερού και βοηθά στην επιλογή εναλλακτικής λύσης ελάχιστου κόστους (Tsihrintzis κ.α., 1996). Η σύνδεση των GIS και τα μοντέλα δικτύου ύδρευσης και αποχέτευσης συνοψίζονται στον Πίνακα 4.

Το 2014, οι Wang και λοιποί σχεδίασαν και ανέπτυξαν ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών για το αστικό δίκτυο αγωγών ύδρευσης. Οι ίδιοι ανέφεραν ότι οι παραδοσιακές μέθοδοι διαχείρισης με σχέδια και διαγράμματα δεν ήταν ικανές να αξιοποιήσουν αποτελεσματικά την πληθώρα των πληροφοριών του αστικού δικτύου ύδρευσης, οι οποίες άλλαζαν διαρκώς. Ένα όμως ΓΣΠ με τη συγκεκριμένη λειτουργία Visualization και συγκεκριμένη χωρική ανάλυση μπορεί να ανταποκριθεί στις παραπάνω απαιτήσεις, ως μια προηγμένη τεχνολογία που χρησιμοποιείται στον τομέα της αστικής ύδρευσης. Αυτό το σύστημα αναπτύχθηκε για μια πόλη στη Βόρεια Κίνα από τη γλώσσα C# και τα SuperMap Objects ως δευτερεύοντα στοιχεία της ανάπτυξης, προκειμένου να παρέχουν καλύτερες τεχνικές υπηρεσίες για την διαχείριση και την μεταφορά των υδατικών πόρων της πόλης. Το σύστημα θέτει σε εφαρμογή λειτουργίες όπως: εμπειρισταωμένη ανάλυση, ανάλυση συντήρησης, χαρτογράφηση και ορισμένες βασικές λειτουργίες όπως η γραμμή μενού και η γραμμή εργαλείων, η λειτουργία μενού με δεξί κλικ, και τα λοιπά (Wang κ.α., 2014).

Παρομοίως, εταιρίες ύδρευσης και αποχέτευσης από πέντε μητροπολιτικές περιοχές: Σάο Πάολο και Φορταλέζα (Βραζιλία), Ρώμη (Ιταλία), Βουδαπέστη (Ουγγαρία) και Ναϊρόμπι (Κένυα), χρησιμοποίησαν ΓΣΠ για την αντιμετώπιση πολύ διαφορετικών τεχνολογικών και αστικών προκλήσεων και χαρακτήρισαν την εξέλιξη των συστημάτων ευεργετική για την αειφόρο ανάπτυξη των πόλεων αυτών (Aquino και Ribeiro, 2021). Συγκεκριμένα, τα ΓΣΠ εφαρμόστηκαν για τον έλεγχο διαρροών σε αγωγούς, για την διατήρηση της ύδρευσης των περιοχών κοντά σε φράγματα και πηγάδια και την παροχή πληροφοριών σε αρκετούς ενδιαφερόμενους φορείς. Στόχος της μελέτης ήταν η επαλήθευση του εάν και πώς τα ΓΣΠ βοήθησαν τις εταιρίες οι οποίες βρίσκονται σε πόλεις με διαφορετικά περιβαλλοντικά και κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά. Κατά τους Aquino και Ribeiro, εφαρμόστηκαν τόσο δωρεάν όσο και υψηλού κόστους τεχνολογίες ΓΣΠ και παρά την ποικιλομορφία, οι εταιρίες ανέπτυξαν γεωγραφικές βάσεις δεδομένων επιτυγχάνοντας: α) χαρτογράφηση για διαγνώσεις και πολιτικές χρήσης γης, για τοπικές εναλλακτικές λύσεις και προστασία πηγών νερού, β) δημιουργία γεωχωρικών μοντέλων για την αποδοτικότητα χρήσης νερού και ενέργειας για

άντληση και ύδρευση, γ) ακριβής γεωχωρική και δημογραφική διάγνωση για άτυπους οικισμούς σε αστικές περιοχές και δ) κοινή χρήση γεωγραφικών πληροφοριών μεταξύ των υπηρεσιών.

Όσο αφορά τα μοντέλα αποχέτευσης, στην ανάλυση ευαισθησίας τους έχουν εφαρμοσθεί τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών. Με την ανάλυση ευαισθησίας εκτιμάται το αντίκτυπο που έχουν οι αλλαγές στις παραμέτρους ενός μοντέλου (δεδομένα εισόδου) στις προβλέψεις (δεδομένα εξόδου) του. Στην καινοτόμα περιπτωσιολογική μελέτη των Mair και λοιπών, αυτό που επιτεύχθηκε ήταν η γεωγραφική απεικόνιση των δεικτών ευαισθησίας για τις παραμέτρους ενός μοντέλου παντορροϊκού δικτύου αποχέτευση χρησιμοποιώντας λογισμικό ΓΣΠ. Τα συμπεράσματα της μελέτης έδειξαν ότι για όλες τις εφαρμογές που αναλύθηκαν, η ανάλυση ευαισθησίας που βασίζεται σε ΓΣΠ είναι χρήσιμη για την ανάλυση, την συζήτηση και την ερμηνεία της ευαισθησίας των παραμέτρων ενός μοντέλου αποχέτευσης και της χωρικής του διάστασης. Η μέθοδος αυτή μπορεί να οδηγήσει σε μία ολοκληρωμένη «εικόνα» ενός αποχετευτικού συστήματος (Mair κ.α., 2012).

Χρονική Περίοδος	Εργαλείο GIS/υδρολογικό Μοντέλο	Επίτευγμα
20 ^{ος} αιώνας	ArcInfo WADSOP	Εξισορρόπηση κυκλικών συστημάτων παροχής νερού
	ArcCad KYPE	Μοντελοποίηση συστήματος διανομής νερού
	ArcView EPANET	Προσομοίωση των μακροπρόθεσμων αλλαγών της υδραυλικής συμπεριφοράς και της ποιότητας του νερού σε δίκτυα σωληνώσεων υπό πίεση (γνωστά ως AVNET)
	AutoCAD H ₂ ONET	Υδραυλική μοντελοποίηση, βελτιστοποίηση σχεδιασμού δικτύου, γραφική επεξεργασία, παρουσίαση αποτελεσμάτων, διαχείριση βάσεων δεδομένων και κοινή χρήση και ανταλλαγή δεδομένων σε επίπεδο επιχείρησης
	H ₂ OMAP	Συνδυασμός λειτουργιών χαρτογράφησης και εργαλείων χωρικής ανάλυσης με την μοντελοποίηση δικτύου για την οργάνωση του σχεδιασμού επιχείρησης
	InfoWater	Ενσωμάτωση της μοντελοποίησης του δικτύου νερού και της λειτουργικότητας βελτιστοποίησης με το ArcGIS
	ArcInfo/ArcFM, ArcView/MapInfo	Δημιουργία σύνδεσης με δομή βάσης δεδομένων GIS, επωφελούνται η χαρτογράφηση των χαρακτηριστικών και η γεωκωδικοποίηση, προσομοίωση σταθερής ροής, κατανομή πίεσης, και εκτίμηση ποιότητας νερού του δικτύου διανομής

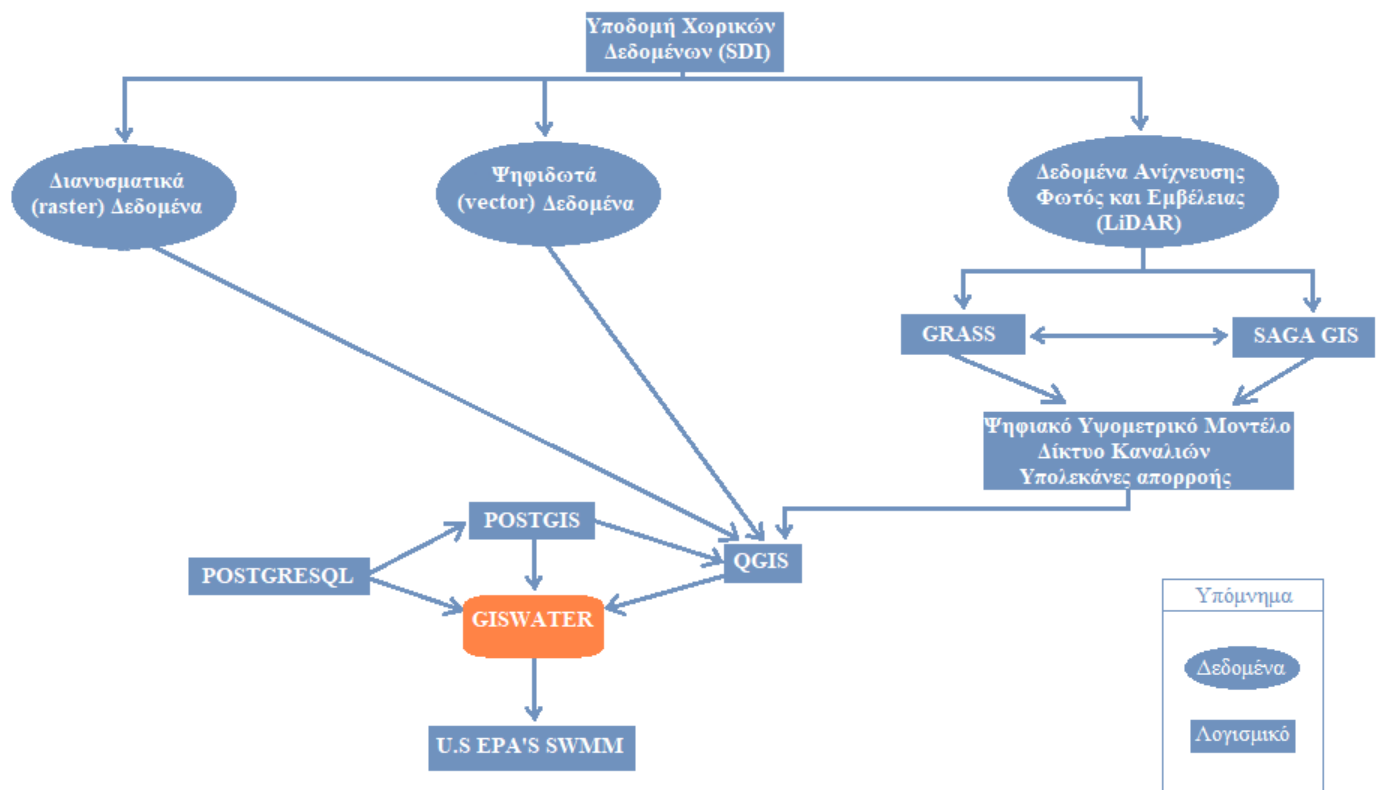
	MIKE NET	πόσιμου νερού μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα
	ArcView Runoff Model	Προσομοίωση αστικής απορροής
	ArcView SWMM	Προσομοίωση ροών ξηρού και υγρού κλίματος με βάση τη χρήση γης, τις δημογραφικές καταστάσεις, τα μετεωρολογικά δεδομένα, τα υδραυλικά/υδρολογικά χαρακτηριστικά και τα χαρακτηριστικά επεξεργασίας της αποχέτευσης και του αποχετευτικού δικτύου
	SWMMDUET	Παροχή διεπαφών για την δημιουργία αρχείου εισόδου για το SWMM και για την σχεδίαση του αρχείου εξόδου του SWMM
21 ^{ος} αιώνας	ArcView MIKE BASIN	Ανάλυση των ικανοτήτων παροχής νερού λαμβάνοντας υπόψη τα δικαιώματα νερού για οικιακή, βιομηχανική και αγροτική χρήση. Αξιολόγηση λειτουργιών των ταμιευτήρων νερού πολλαπλών χρήσεων.
	Sewer-CAD StormCAD	Αξιολόγηση των σημερινών συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων και των εγκαταστάσεων δικτύων συλλογής, και των μελλοντικών προοπτικών για την επέκταση των εγκαταστάσεων προετοιμάζοντας ένα σταδιακό σχέδιο για την εφαρμογή και την χρηματοδότηση της απαραίτητης βελτίωσης
	ArcView MIKE 11	Αναλυτική μοντελοποίηση της υδροδυναμικής και της ποιότητας του νερού των ρεμάτων.
	H ₂ OVIEW Water	Διευκόλυνση της ανάπτυξης και της διερεύνησης των row data και των μοντελοποιημένων αποτελεσμάτων του GIS μέσω του διαδικτύου
	AGSWMM	Σύνδεση του SWMM5 με το ArcGIS ενώ εκτελεί τις ίδιες λειτουργίες ως SWMM
	ArcGIS WaterGEMS	Χρήση γεωγραφικής βάσης δεδομένων για την ολοκληρωμένη μοντελοποίηση WaterCAD εντός της πλατφόρμας του ArcGIS
	SynerGEE Water	Ενσωμάτωση της ικανότητας της υδραυλικής προσομοίωσης σε ένα ΓΣΠ
	ArcView WaterCAD	Άμεση κατασκευή και συντήρηση των δικτύων ύδρευσης και αποχέτευσης εντός ενός ΓΣΠ
	MOUSE GIS	Προσομοίωση επιφανειακής ροής, ποιότητας νερού, και μεταφοράς ιζημάτων εντός των αστικών λεκανών απορροής και δικτύων αποχέτευσης

Πίνακας 4: Ιστορία της διασύνδεσης GIS με μοντέλα δικτύων ύδρευσης και αποχέτευσης (Boroomandnia κ.α., 2021)

3.4.1 Διαχείριση αστικών ομβρίων

Πρακτικά παραδείγματα εφαρμογής των ΓΣΠ

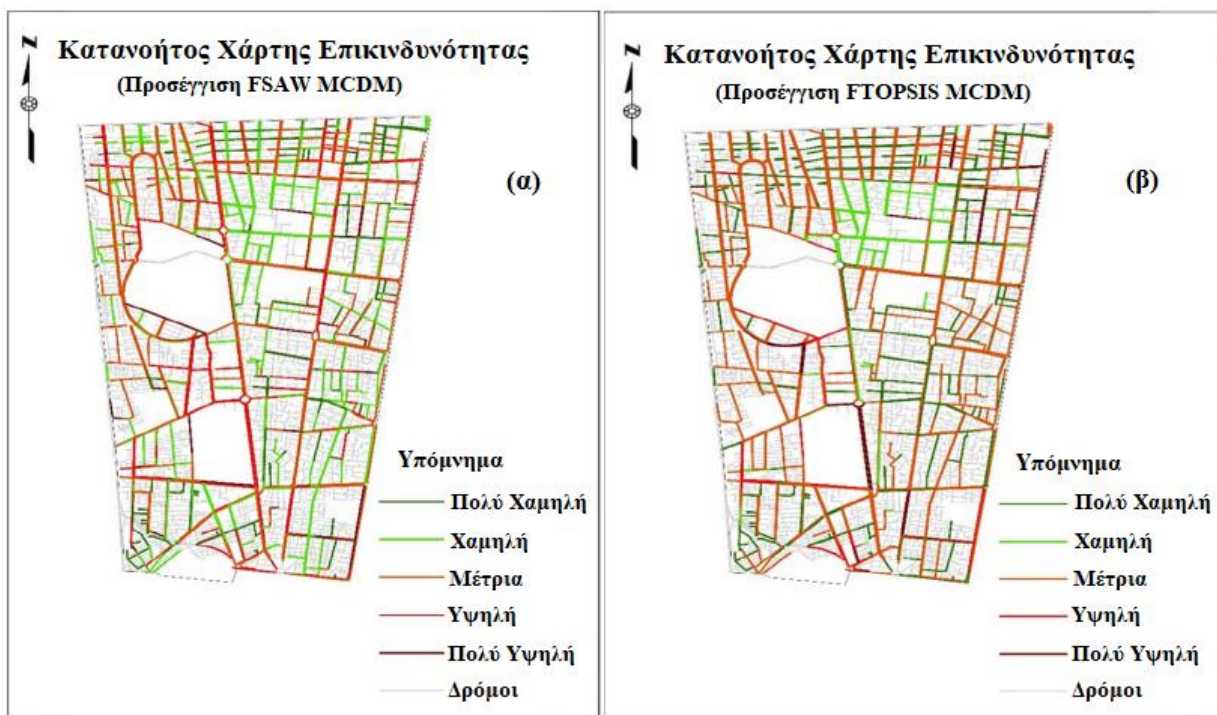
Η έντονη αστικοποίηση, σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, όπως η αυξημένη ένταση βροχοπτώσεων, υπερφορτώνει τα συμβατικά συστήματα αποχέτευσης, αυξάνει τον αριθμό των περιστατικών υπερχειλίσις των παντορροϊκών δικτύων αποχέτευσης και καθιστά τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας ξεπερασμένες. Η διαχείριση των ομβρίων και πλημμύρας είναι αναγκαία για τον ορθολογικό σχεδιασμό των αστικών δικτύων αποχέτευσης. Τα εργαλεία των ΓΣΠ είναι ικανά να εντοπίζουν και να χωροθετούν την κατεύθυνση της απορροής, καθώς και να προσδιορίζουν με ακρίβεια μικρού μεγέθους αστικές λεκάνες απορροής χρησιμοποιώντας γεωχωρικά δεδομένα (Allende-Prieto κ.α., 2018). Οι Allende-Prieto και λοιποί από την συλλογή δεδομένων έως τα τελικά αποτελέσματα χρησιμοποίησαν μόνο τα ελεύθερα διαθέσιμα λογισμικά και τις ανοιχτές πλατφόρμες: Storm Water Management Model (SWMM) της Environmental Protection Agency των Η.Π.Α, QGIS, PostgreSQL, PostGIS, SagaGIS και GrassGIS. Το GRASS, το PostgreSQL (η πιο αναπτυγμένη αντικειμενική σχεσιακή βάση δεδομένων), το PostGIS (μια επέκταση χωρικής βάσης δεδομένων για την PostgreSQL) και το QGIS (το οποίο ενσωματώνει τα PostGIS, SagaGIS και MapServer) διατίθενται δωρεάν από το Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Καθένα από αυτά τα εργαλεία από μόνο του δεν μπορεί να παρέχει όλες τις απαραίτητες λειτουργίες για έργα μεγάλης κλίμακας, έτσι για την σύνδεση των υδατικών μοντέλων (SWMM και QGIS) με τα συστήματα βάσεων δεδομένων (PostgreSQL και PostGIS) χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ανοιχτού κώδικα GISWATER. Αυτή η μεθοδολογία εφαρμόστηκε για μια πρόσφατα αστικοποιημένη περιοχή στην βόρεια Ισπανία.



Σχήμα 9: Διάγραμμα ροής της έρευνας στην βόρεια Ισπανία που απεικονίζει την διασύνδεση των λογισμικών με το GISWATER (Allende-Prieto κ.α., 2018)

Οι υδραυλικοί και οι υδρολογικοί υπολογισμοί που αναπτύχθηκαν στο SWMM αναλύθηκαν με δυο διαφορετικούς τρόπους με στόχο την ανάδειξη της επίδρασης των γειτονικών αστικών υπολεκανών απορροής στην αστικοποιημένη περιοχή. Στην ουσία, υπολογίστηκε και απεικονίστηκε η απορροή από την έναρξη έως το τέλος μιας καταιγίδας για δύο σενάρια, στο πρώτο λήφθηκε υπόψη η αστικοποιημένη περιοχή χωρίς τις αστικές υπολεκάνες που συνορεύουν με αυτή και στο δεύτερο λήφθηκε υπόψη η λεκάνη απορροής στο σύνολό της, συμπεριλαμβανομένων των γειτονικών αστικών περιοχών. Κατ' αυτόν τον τρόπο διαπιστώθηκε η επίδραση των γειτονικών αστικών υπολεκανών στην αστικοποιημένη περιοχή και το πώς αυξάνουν τον αριθμό των περιοχών που κινδυνεύουν να πλημμυρίσουν. Το πόρισμα αυτής της έρευνας αναδεικνύει το πόσο σημαντικός είναι ο συνδυασμός των ΓΣΠ με τα εργαλεία σχεδιασμού της διαχείρισης ομβρίων προκειμένου να συγκριθούν οι διαφορετικές στρατηγικές διαχείρισης όσο αφορά την αποτελεσματικότητά τους και να εξυπηρετηθούν οι μηχανικοί για έναν αποδοτικότερο σχεδιασμό και μια καλύτερη αξιολόγηση της διαχείρισης των αστικών ομβρίων (Allende-Prieto κ.α., 2018).

Επιπρόσθετα, τα ΓΣΠ και η μέθοδος της Πολυκριτηριακής Λήψης Αποφάσεων (Multiple Criteria Decision Making, MCDM) έχουν συμβάλει στην ανάλυση επικινδυνότητας των συστημάτων υποδομής αστικών ομβρίων υδάτων. Τα «προϊόντα» του ασαφούς χωρικού πολυκριτηριακού πλαισίου λήψης αποφάσεων (fuzzy MCDM) ήταν οι χάρτες οι οποίοι απεικονίζουν το επίπεδο της πλημμυρικής επικινδυνότητας του κάθε στοιχείου (καναλιού) του συστήματος αποχέτευσης ομβρίων. Ο ένας ήταν με την μέθοδο Fuzzy SAW (Simple Additive Weighting) και ο άλλος με την Fuzzy TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarities to Ideal Solution) (Shariat κ.α., 2019).



Εικόνα 12: Τελικός χάρτης επικινδυνότητας των αστικών δικτύων ομβρίων: (α) με την FSAW προσέγγιση και (β) την FTOPSIS προσέγγιση (Shariat κ.α., 2019)

3.5 Επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι πόροι του γλυκού νερού είναι περιορισμένοι και είναι αναγκαίο να προστατεύονται για την παροχή πόσιμου νερού τόσο για τώρα όσο και για τις μελλοντικές γενιές. Παρόλο που το γλυκό νερό δεν είναι άφθονο, μόνο το 3% χρησιμοποιείται για την παραγωγή πόσιμου νερού και το υπόλοιπο χρησιμοποιείται για άλλους σκοπούς, κυρίως γεωργικούς (European Investment Bank, 2022). Γι αυτόν τον λόγο, η στροφή προς βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις είναι απαραίτητη στις μέρες μας. Σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας: «η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων μπορεί να αποτελέσει ένα εργαλείο ορθολογικής διαχείρισης των υδατικών πόρων». Η κατάλληλη επεξεργασία αστικών και βιομηχανικών λυμάτων οδηγεί στην εξοικονόμηση υδατικών πόρων, στην προστασία του περιβάλλοντος και σε οικονομική ανάπτυξη (ΥΠΕΝ, 2020). “Υστερα από πολύχρονες διεθνείς έρευνες, το συμπέρασμα που έχει προκύψει είναι ότι δεν συνίσταται η άμεση επαναχρησιμοποίηση του νερού για σκοπούς ύδρευσης προς πόση, όμως η επαναχρησιμοποίηση για άρδευση, αστικές (πλην πόσης) χρήσεις, το περιαστικό πράσινο, τη δημιουργία ή τον εμπλουτισμό υδάτινων σωμάτων για αναψυχή και συγκεκριμένες βιομηχανικές δραστηριότητες, επειδή δεν απαιτείται η συμμόρφωση με αυστηρά πρότυπα ποιότητας νερού, εφαρμόζεται ευρέως (European Investment Bank, 2022 και ΥΠΕΝ, 2020).

3.5.1 Αγροτική Άρδευση

Η γεωργία έχει μακρά ιστορία στη χρήση του επεξεργασμένου νερού για την άρδευση των καλλιεργειών, με το επίπεδο και τον τύπο επεξεργασίας και τις μεθόδους εφαρμογής να ποικίλουν ανά τον κόσμο. Η επαναχρησιμοποίηση του νερού είναι ολοένα και πιο κοινή στη γεωργία, καθώς προσφέρει μια αξιόπιστη εναλλακτική λύση ενόψει της αύξησης του φαινομένου της λειψυδρίας και των επιπτώσεων των ακραίων κλιματικών φαινομένων. Όμως, η απρογραμμάτιστη χρήση μη επεξεργασμένων ή μερικώς επεξεργασμένων λυμάτων μπορεί να επιφέρει επιπτώσεις στο περιβάλλον και στον άνθρωπο.

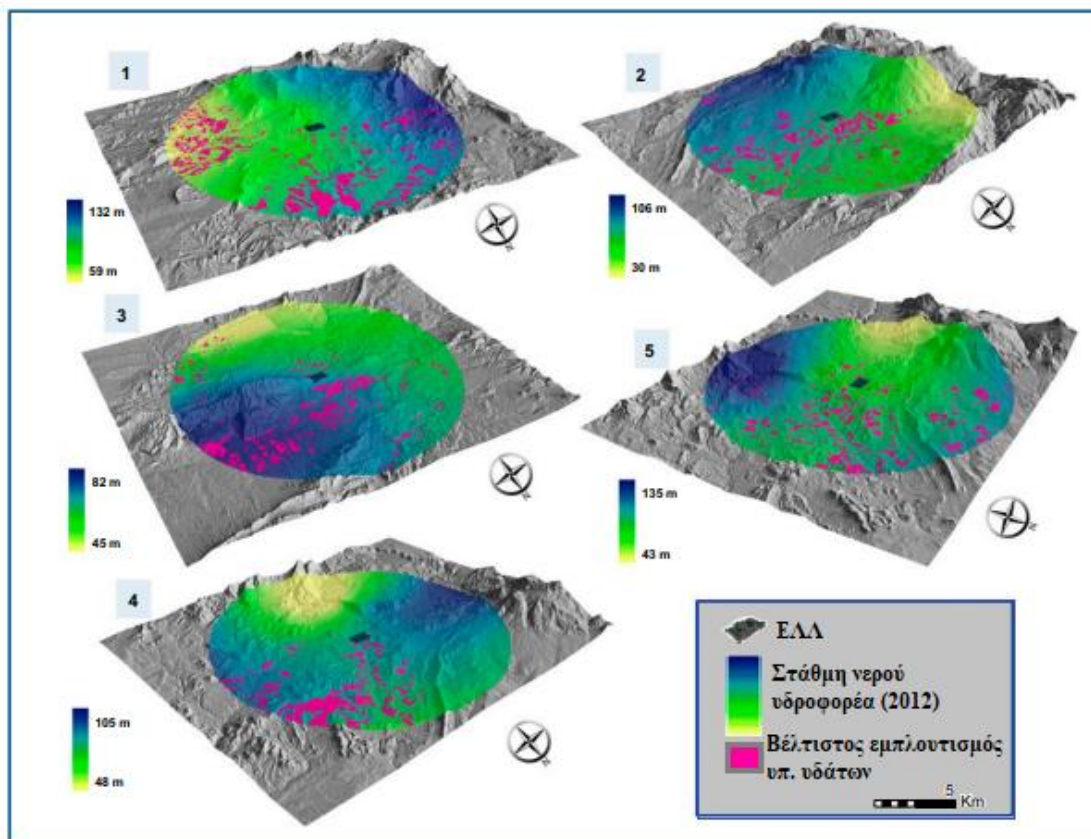
Στην αξιολόγηση της δυνατότητας των επεξεργασμένων λυμάτων για επαναχρησιμοποίηση για αρδευτικούς σκοπούς έχουν διαδραματίσει ρόλο τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών. Για παράδειγμα, οι Barbagallo κ.α. έφτιαξαν ένα ΓΣΠ σε περιφερειακό επίπεδο για την ποσοτικοποίηση και τον εντοπισμό των διαθέσιμων όγκων επεξεργασμένων λυμάτων. Ειδικότερα, τα χαρακτηριστικά των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) ενσωματώθηκαν, μέσω του GIS, με τα δεδομένα για τις αρδευτικές περιοχές. Κατ' αυτό τον τρόπο αποδείχθηκε ότι τα επεξεργασμένα λύματα της περιοχής θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία, κάτω από συγκεκριμένες πειραματικές συνθήκες, για την άρδευση και την καλλιέργεια συγκεκριμένων καλλιεργειών (Barbagallo κ.α., 2012). Σε πιο πρόσφατη μελέτη, η αξιολόγηση για την προοπτική του ανακτημένου νερού για τους ίδιους στόχους, βασίστηκε σε ΓΣΠ και έδειξε ότι για την συγκεκριμένη περιοχή μελέτης τα επεξεργασμένα λύματα θα μπορούσαν να ικανοποιήσουν έως και το 316% των ετήσιων και 210% των αναγκών σε νερό των καλλιεργειών για την περίοδο άρδευσης. Ειδικότερα, τα αποτελέσματα του GIS έδειξαν ότι, για τις πραγματικά αρδευόμενες περιοχές, οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών θα μπορούσαν να καλυφθούν σε μεγάλο βαθμό από επεξεργασμένα λύματα, λαμβάνοντας επίσης υπόψη τις απώλειες νερού λόγω της διήθησης και της εξάτμισης του νερού. Επιπλέον, τα αποτελέσματα του GIS επιβεβαίωσαν τη δυνατότητα επέκτασης του δικτύου διανομής νερού πέρα από τις πραγματικά αρδευόμενες εκτάσεις, δημιουργώντας νέες αρδευόμενες εκτάσεις (αρδευσιμες εκτάσεις). Επιπλέον, σε αυτή την περίπτωση, οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών θα μπορούσαν να ικανοποιηθούν σε μεγάλο βαθμό από επεξεργασμένα λύματα, επιβεβαιώνοντας ότι είναι ένας πολύτιμος και εναλλακτικός υδάτινος πόρος που μπορεί να συμβάλει στην αύξηση της παραγωγής τροφίμων και ως εκ τούτου να καλύψει την αυξανόμενη ζήτηση τροφίμων (Mancuso κ.α., 2022).

Όμως, για την ορθολογική χρήση του συγκεκριμένου υδατικού πόρου απαιτείται η εξέταση των επιπτώσεων του στο νερό, στο έδαφος, στον άνθρωπο και στο περιβάλλον. Οι βασικοί λόγοι που αναστέλλουν την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων στην γεωργία είναι η μικροβιολογική μόλυνση, η αλατότητα, η τρωτότητα του υδροφορέα και η συγκέντρωση των νιτρικών. Αυτά τα περιβαλλοντικά κριτήρια λήφθηκαν υπόψη στη μέθοδο της Πολυκριτηριακής Λήψης Αποφάσεων (MCDM) με χρήση ΓΣΠ για την εξέταση της καταλληλότητας των αστικών επεξεργασμένων λυμάτων που προέρχονται από δύο διαφορετικές ΕΕΛ, ως αρδευτικό νερό διαφόρων καλλιεργειών. Οι χάρτες που σχετίζονται με τα κριτήρια και δημιουργήθηκαν σε περιβάλλον λογισμικού ΓΣΠ στη συνέχεια ταξινομήθηκαν σύμφωνα με τα διαθέσιμα πρότυπα. Μετά τον υπολογισμό της βαρύτητας των κριτηρίων με την διαδικασία της αναλυτικής ιεραρχίας (Analytic Hierarchy Process), εξάχθηκε το συμπέρασμα η μια ΕΕΛ είχε καλύτερη απόδοση σε ορισμένα κριτήρια όπως η τρωτότητα του υδροφορέα, η επιβάρυνση της μόλυνσης από νιτρικά άλατα και η

καταλληλότητα για την καλλιέργεια καλλιεργειών. Όμως, η αποστράγγιση και η αλάτωση του εδάφους λόγω της υψηλής στάθμης των υπογείων υδάτων και τη χαμηλής ποιότητάς τους και στις δύο περιοχές μελέτης, περιόρισε τη δυνατότητα των λυμάτων να επαναχρησιμοποιηθούν για αρδευτικούς λόγους (Zolfaghary, Zakerinia και Kazemi, 2021).

3.5.2 Τεχνητός εμπλουτισμός υπογείων υδροφορέων

Μια μέθοδος τεχνητού εμπλουτισμού είναι η σκόπιμη έγχυση επεξεργασμένων λυμάτων σε υπόγειους υδροφορείς για την αποκατάστασή τους, την βελτίωση των οικοσυστημάτων και για την αντιμετώπιση της υφαλμύρινσης των παράκτιων υδροφορέων (European Investment Bank, 2022). Η ολοκληρωμένη ΔΥΠ με την χρήση ΓΣΠ για την βελτιστοποίηση της χρήσης επεξεργασμένου νερού μελετήθηκε σε ημίξηρη περιοχή της Ισπανίας για κάθε μια από τις πέντε ΕΕΛ της περιοχής μελέτης. Οι βέλτιστες περιοχές για τον εμπλουτισμό υπογείων υδάτων με επεξεργασμένα λύματα εντοπίστηκαν στα βορειοδυτικά της περιοχής μελέτης εφαρμόζοντας πολυκριτηριακή ανάλυση βασισμένη σε ΓΣΠ, με αποτέλεσμα την επίδειξη ενός καινοτόμου συστήματος διαχείρισης για την βελτιστοποίηση της χρήσης των επεξεργασμένων υδάτων. Συγκεκριμένα, διευθετήθηκαν τεχνικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά κριτήρια τα οποία επέτρεψαν την κατασκευή θεματικών χαρτών. Η πολυκριτηριακή ανάλυση του GIS έδωσε τον τελικό και βέλτιστο χάρτη απεικονίζοντας τις κατάλληλες περιοχές για την διήθηση επεξεργασμένων λυμάτων. Η ανάλυση μέσω ενός ΓΣΠ αποδείχθηκε ως μια πολύτιμη μέθοδος για την ολοκληρωμένη διαχείριση των «υπό εξαφάνιση» υδατικών πόρων σε ημίξηρες περιοχές οι οποίες επηρεάζονται ιδιαίτερα κατά τις περιόδους ξηρασίας και είναι ευάλωτες στην μείωση των βροχοπτώσεων που προβλέπουν τα σενάρια της κλιματικής αλλαγής (Pedrero κ.α., 2015).



Εικόνα 13: Βέλτιστη περιοχή εμπλουτισμού με το βάθος του υδροφορέα για κάθε ΕΕΛ:
(1)Bullas, (2)Moratalla, (3)Calasparra, (4)Cehegín (Pedrero κ.α., 2015).

3.6 Επιλογή Λογισμικού ΓΣΠ

Με βάση όσα έχουν αναφερθεί στο 3^ο κεφάλαιο σχετικά με την χρήση των ΓΣΠ στην ΔΥΠ, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι ο πιο συχνός τρόπος εφαρμογής των ΓΣΠ σε ζητήματα που σχετίζονται με το νερό είναι ο συνδυασμός τους με μοντέλα διαχείρισης υδατικών πόρων μέσω τεχνικών ανταλλαγής, διεπαφής ή ενσωμάτωσης. Με την μέθοδο της ανταλλαγής, ένα ΓΣΠ χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των αρχείων εισόδου ενός μοντέλου και στη συνέχεια αυτά αντιγράφονται στο μοντέλο με το χέρι. Για παράδειγμα, τα αρχεία εξόδου ενός υδραυλικού μοντέλου αντιγράφονται με το χέρι σε ένα λογισμικό ΓΣΠ προκειμένου αυτό να τα απεικονίσει. Επειδή τα ΓΣΠ επιτρέπουν την κοινή χρήση των γεωγραφικών δεδομένων, όλα τα λογισμικά ΓΣΠ μπορούν να εφαρμοστούν στην μέθοδο ανταλλαγής. Στη μέθοδο διεπαφής, η διαδικασία ανταλλαγής δεδομένων είναι στην ουσία αυτοματοποιημένη. Σε αυτή την μέθοδο, τα προστιθέμενα μενού κάποιου μοντέλου ή τα καινούργια κουμπιά στο λογισμικό ενός ΓΣΠ αυτοματοποιούν την μεταφορά δεδομένων. Η αυτόματη δημιουργία του αρχείου των δεδομένων που εισάγονται στο μοντέλο είναι αυτό που κάνει τις μεθόδους διεπαφής προτιμότερες από τις μεθόδους ανταλλαγής. Σε αντίθεση με τις δύο προαναφερθείσες μεθόδους οι οποίες δεν επιτρέπουν την επεξεργασία δεδομένων και την εκκίνηση του μοντέλου μέσα από το λογισμικό GIS, η ενσωμάτωση προσφέρει λειτουργίες ΓΣΠ και λειτουργίες μοντελοποίησης μέσω ενός συνδυασμού μοντέλου και ΓΣΠ. Αυτή η μέθοδος εκφράζει τη στενότερη σχέση μεταξύ ενός GIS και ενός μοντέλου (Boroomandnia κ.α., 2021).

Για μια αποδοτική και γρήγορη ΔΥΠ είναι σημαντικό ο χρήστης να επιλέξει το κατάλληλο λογισμικό ΓΣΠ. Η επιλογή του κατάλληλου λογισμικού GIS εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η ικανότητα και το ενδιαφέρον του χρήστη, η τιμή του λογισμικού, η μέθοδος του συνδυασμού GIS και μοντέλου, η κλίμακα του έργου κ.λπ. Στον Πίνακα 5 συγκρίνονται σύμφωνα με τις ανάγκες του χρήστη τα λογισμικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια πλατφόρμα GIS της ESRI.

Τομέας Εφαρμογής	ArcView	Spatial Analyst	Network Analyst	3D Analyst	ArcInfo	Spatial Database Engine	ArcObjects
Σχεδιασμός και Μηχανική	✓			✓	✓	✓	✓
Λειτουργίες και Συντήρηση	✓		✓		✓	✓	✓
Οικοδομή	✓		✓		✓	✓	✓
Διαχείριση υποδομών	✓		✓		✓	✓	✓
Υδατικοί πόροι και υδρολογία	✓	✓			✓	✓	
Οικονομία και Διοίκηση	✓				✓	✓	

Πίνακας 5: Παράδειγμα επιλογής λογισμικού ΓΣΠ (Boroomandnia κ.α., 2021)

Όντως, τα ArcView, ArcInfo, η επέκταση Spatial Analyst και η χωρική βάση δεδομένων είναι αυτά τα οποία έχουν αναφερθεί περισσότερο όσο αφορά τις εφαρμογές των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών στην διαχείριση υδατικών πόρων.

4. Συμπεράσματα

Τα τελευταία χρόνια, το επιστημονικό πεδίο της διαχείρισης υδατικών πόρων (ΔΥΠ) με τη χρήση οικονομικών μέσων έχει γίνει βασικό εργαλείο για την προστασία, διατήρηση και βελτίωση του περιβάλλοντος. Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ), συμμετέχουν τόσο στην ποιοτική όσο και στην ποσοτική διαχείριση των υδάτων.

Αναφορικά με τα επιφανειακά ύδατα, τα υδρολογικά (μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής) και τα υδραυλικά μοντέλα είναι αυτά που μπορούν να καθορίσουν πόση θα είναι η επιφανειακή απορροή, το βάθος και την ταχύτητα του νερού. Το ArcGIS συνοψίζει τα υδρολογικά και εδαφικά δεδομένα που απαιτούνται για τα μοντέλα. Πλατφόρμες Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, όπως ArcView/Info, έχουν συνδυαστεί με μοντέλα όπως: GRASS, HEC-1, HEC-2, HEC-HMS, HEC-RAS κ.α. Ένα ΓΣΠ μπορεί να αναλύσει την ροή των επιφανειακών υδάτων και χωρίς να συνδυαστεί με κάποιο μοντέλο. Επίσης, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να δημιουργήσει-οριοθετήσει μια λεκάνη απορροής στο περιβάλλον του ArcGIS καθώς ένα GIS παρέχει σε μορφή θεματικών επιπέδων: Ψηφιακά Υψομετρικά Μοντέλα (DEM), Ψηφιακά Μοντέλα Επιφάνειας (DSM), Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (DTM) και διαθέτει τις κατάλληλες εντολές για την περιγραφή της ροής. Επίσης, εδώ αξίζει να αναφερθεί και το ArcHydro, το δωρεάν μοντέλο δεδομένων του ArcGIS που εστιάζει την υδρολογική μοντελοποίηση και επιτρέπει πρόσθετες ενέργειες ανάλογα με τους στόχους του χρήστη. Επίσης, τα GIS έχουν συνεισφέρει και στην εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας με την ικανότητα τους να ψηφιοποιούν τα δεδομένα εισόδου και να παράγουν τον τελικό χάρτη επικινδυνότητας πλημμυρικών φαινομένων. Αδιάψευστη είναι και η συμβολή τους στην αξιολόγηση της ποιότητας των επιφανειακών υδάτων και στον προσδιορισμό των περιοχών που είναι ευάλωτες στην ρύπανση.

Τα υπόγεια νερά είναι η κύρια πηγή ύδρευσης και άρδευσης σε παγκόσμιο επίπεδο. Η πρόβλεψη τυχών ρύπανσης και ο προσδιορισμός των περιοχών που κινδυνεύουν από αυτή είναι ο ορθότερος τρόπος διαχείρισής τους καθώς οι υδροφορείς αφού ρυπανθούν τείνουν να μένουν σε αυτή την κατάσταση, η εξυγίανση τους είναι κοστοβόρα και ο χρόνος αποκατάστασής τους μεγάλος. Η επέκταση Spatial Analyst του ArcGIS Pro παρέχει εργαλεία για την μοντελοποίηση της μεταφοράς-διασποράς ενός ρύπου, προσδιορίζοντας ένα ο ρύπος μπορεί να εισέρθει σε πόσιμο νερό. Επιπλέον, η χρήση των ΓΣΠ είναι διαδεδομένη ιδιαίτερα στην χαρτογράφηση του κινδύνου μόλυνσης υπογείων υδάτων, δηλαδή στην ταξινόμηση μιας περιοχής σε κατηγορίες ανάλογα με τον βαθμό επικινδυνότητας, καθιστώντας τα κορυφαία εργαλεία λήψης αποφάσεων για την επίτευξη ορθής διαχείρισης των υπόγειων υδάτων και τον σωστό προγραμματισμό των χρήσεων γης. Τα ΓΣΠ μπορούν να φανούν εξυπηρετικά και σε έρευνες που αφορούν: την καθίζηση εδάφους, την προσομοίωση μεταφοράς νιτρικών από σηπτικά συστήματα και στην αξιολόγηση καταλληλότητας μιας περιοχής για τεχνητό εμπλουτισμό. Σημαντικό ρόλο έχουν λάβει και στην εκτίμηση της τρωτότητας, δηλαδή του κινδύνου ρύπανσης, των υπογείων υδάτων με την γνωστή μέθοδο DRASTIC, καθιστώντας την μεθοδολογία αξιόπιστη. Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί εφαρμογές του ArcGIS, όπως το RIPGIS-NET που λειτουργεί ως ιδανικός προεπεξεργαστής και μετεπεξεργαστής μοντέλων εξατμισοδιαπνοής, οι οποίες επισπεύδουν την δημιουργία δεδομένων εισόδου για μοντέλα υπογείων υδάτων όπως το MODFLOW. Επίσης, τα συστήματα που βασίζονται σε ΓΣΠ, όπως το ArcPRZM-3 και το QUIMET, έχουν συνεισφέρει στην μοντελοποίηση έκπλυσης φυτοφαρμάκων από το έδαφος προς τα υπόγεια

ύδατα και στην ερμηνεία υδροχημικών δεδομένων διευκολύνοντας τους διαχειριστές και τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων.

Η αύξηση της παραγωγικότητας του γεωργικού νερού αποτελεί βασική παρέμβαση για τη βελτίωση της αποδοτικότητας της χρήσης του νερού (UN, 2020). Η χρήση των ΓΣΠ στην διαχείριση του αρδευτικού νερού έχει αποτρέψει προβλήματα όπως η υποάρδευση και υπεράρδευση, προάγοντας την βέλτιστη παραγωγικότητα του γεωργικού νερού. Όταν τα εργαλεία που υπολογίζουν τις απαιτήσεις των καλλιεργειών σε νερό προστίθενται σε περιβάλλον GIS ελαχιστοποιείται ο υπολογιστικός χρόνος και είναι δυνατή η μοντελοποίηση μεγάλων περιοχών ταυτόχρονα. Έτσι, μπορεί να διεξαχθεί το συμπέρασμα ότι τα συστήματα διαχείρισης άρδευσης είναι πιο αποτελεσματικά όταν συνδυάζονται με ΓΣΠ.

Επιπλέον, υπάρχουν στην αγορά δωρεάν πρόσθετα για συγκεκριμένα ανοιχτού κώδικα λογισμικά GIS, όπως το FREEWAT στο QGIS, που προωθούν την οικονομική διαχείριση των υδάτινων πόρων. Τέτοιου είδους αξιόπιστα και σύγχρονα εργαλεία έχουν βοηθήσει σε ζητήματα που αφορούν την αξιολόγηση της ποιότητας των υπογείων υδάτων και την επίτευξη της καλής τους χημικής κατάστασης μεριμνώντας για τις χώρες/ κοινότητες με περιορισμένους οικονομικούς πόρους. Επίσης, συνδυάζοντας συγκεκριμένα υδρολογικά και υδραυλικά μοντέλα μόνο με δωρεάν και ελεύθερα διαθέσιμα λογισμικά (QGIS, POSTGIS) είναι εφικτή η διαχείριση των αστικών ομβρίων για την αποφυγή πλημμύρας.

Η ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων λαμβάνει υπόψη και την ορθή διανομή του νερού. Με βάση όσα έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο σχετικά με την χρήση των ΓΣΠ στα συστήματα ύδρευσης και αποχέτευσης, συνεπάγεται ότι τα ΓΣΠ είναι αξιοποιήσιμα εργαλεία για εταιρίες ύδρευσης και αποχέτευσης εφόσον ανταποκρίνονται στις δυσκολίες που αντιμετωπίζουν. Η εφαρμογή δωρεάν και υψηλού κόστους τεχνολογιών ΓΣΠ έχει αποδειχθεί ευεργετική στον τομέα της διανομής νερού και των δικτύων αποχέτευσης προωθώντας την αποδοτική χρήση του νερού.

Η συνεργασία των ΓΣΠ με την μέθοδο της Πολυκριτηριακή Λήψης Αποφάσεων έχει συνεισφέρει στην ανάλυση επικινδυνότητας των συστημάτων υποδομής αστικών ομβρίων υδάτων και στην αξιολόγηση της καταλληλότητας των αστικών επεξεργασμένων λυμάτων ως αρδευτικό νερό διαφόρων καλλιεργειών. Το τελευταίο αποδεικνύει πως τα ΓΣΠ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση βιώσιμων εναλλακτικών λύσεων όπως είναι η ορθή χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων στην αγροτική άρδευση. Επίσης, σχετικά με τις εναλλακτικές λύσεις, η πολυκριτηριακή ανάλυση βασισμένη σε ΓΣΠ μπορεί να προσδιορίσει τις βέλτιστες περιοχές σε μια περιοχή μελέτης για τον τεχνητό εμπλουτισμό υπογείων υδάτων με επεξεργασμένα λύματα. Οι καινοτόμες αυτές μέθοδοι μπορούν να είναι «σωτήριες» για τις ημίξηρες και ξηρές περιοχές οι οποίες κινδυνεύουν από το φαινόμενο της ερημοποίησης.

Το φυσικό περιβάλλον είναι πολύπλοκο και υπάρχουν πολλά είδη καλύψεις Γης. Τα ΓΣΠ από κατασκευής τους βοηθούν τον χρήστη να οργανώσει τα χωρικά και περιγραφικά δεδομένα μιας περιοχής με την βασική τους λειτουργία να τα ομαδοποιούν σε πολλά παράλληλα θεματικά επίπεδα, διαμορφώνοντας έτσι μια διαστρωματωμένη γεωγραφική βάση. Επιπλέον, η δημιουργία ενός τελικού χάρτη από τον συνδυασμό χαρτών, η προσομοίωση και η μοντελοποίηση αποτελούν τις πιο σημαντικές γεωγραφικές αναλύσεις των ΓΣΠ. Οι βασικές τους λοιπόν λειτουργίες είναι αυτές που τα ξεχωρίζουν και η αιτία που οι φορείς διαχείρισης υδατικών πόρων τα χρησιμοποιούν σε μεγάλο βαθμό.

Τέλος, η ίδια η ESRI (Environmental Systems Research Institute), η εταιρεία λογισμικών Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών περισσότερο γνωστή για τα προϊόντα ArcGIS, έχει δείξει την υποστήριξή της για την διαχείριση υδατικών πόρων. Το ArcGIS παρέχει επιστημονικές πληροφορίες σε φορείς διαχείρισης υδάτινων πόρων, μελετητές και ενδιαφερόμενους και επιτρέπει στην κοινότητα να συμμετέχει, να συνεργάζεται και να μοιράζεται με εύχρηστους χάρτες και εφαρμογές (ESRI). Κλείνοντας, αξίζει να αναφερθεί η δήλωση του Sean Breyer, διαχειριστή του προγράμματος Living Atlas of the World της ESRI, η οποία συνοψίζει την γεωγραφική προσέγγιση στον τομέα του νερού: “ Για την καλύτερη κατανόηση και επίλυση της παγκόσμιας κρίσης του νερού είναι απαραίτητο να ποσοτικοποιήσουμε και να πλαισιώσουμε την προσφορά και τη ζήτηση νερού, και η χωρική νοημοσύνη είναι θεμελιώδης σε αυτή την προσέγγιση” , όπου με την έννοια χωρική νοημοσύνη (location intelligence) νοείται η διορατικότητα που αποκτάται από την οπτικοποίηση και την ανάλυση γεωχωρικών δεδομένων (National Geographic 2023, ESRI 2023).

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Adams Troy (2021) 'Water Resource Management: Importance, Challenges & Techniques'. Available at: <https://globalroadtechnology.com/water-resource-management-importance-challenges-techniques/>.

Ajami, H., Maddock, T., Meixer, T., Hogan, J.F. and Guertin, D.P. (2012) 'RIPGIS-NET: A GIS Tool for Riparian Groundwater Evapotranspiration in MODFLOW', Ground Water, 50(1), pp. 154–158.

Akbar, T.A., Lin, H. and DeGroote, J. (2011) 'Development and evaluation of GIS-based ArcPRZM-3 system for spatial modeling of groundwater vulnerability to pesticide contamination', Computers & Geosciences, 37(7), pp. 822–830.

Allende-Prieto, C., Méndez-Fernández, B., Sañudo-Fontaneda, L., and Charlesworth, S. (2018) 'Development of a Geospatial Data-Based Methodology for Stormwater Management in Urban Areas Using Freely-Available Software', International Journal of Environmental Research and Public Health, 15(8), 1703.

Andualem, T. G., and Demeke, G. G. (2019) 'Groundwater potential assessment using GIS and remote sensing: A case study of Guna tana landscape, upper blue Nile Basin, Ethiopia', Journal of Hydrology: Regional Studies, 24, 100610.

Aquino Ficarelli, T.R., Ribeiro, H. (2021). 'The Contribution of Geographical Information Systems—GIS in Water and Sewage Companies for Water Sustainability'. In: Leal Filho, W., Azeiteiro, U.M., Setti, A.F.F. (eds) Sustainability in Natural Resources Management and Land Planning. World Sustainability Series. Springer, Cham.

Asare-Kyei, D., Forkuor, G. and Venus, V. (2015) 'Modeling Flood Hazard Zones at the Sub-District Level with the Rational Model Integrated with GIS and Remote Sensing Approaches', Water, 7(12), pp. 3531–3564.

Baker, C. P., Bradley, M. D., and Bobiak, M. K. (1993) 'Wellhead protection area delineation: linking flow models with GIS', Journal of Water Resources Planning and Management. ASCE 119 (2), pp. 275-287.

Barbagallo, S., Cirelli, G. L., Consoli, S., Licciardello, F., Marzo, A., and Toscano, A. (2012) 'Analysis of treated wastewater reuse potential for irrigation in Sicily', Water Science and Technology, 65(11), 2024–2033.

Bhaskar N.R., Devulapalli R.K (1991) 'Runoff modeling using the geomorphological instantaneous unit hydrograph and ARC/INFO geographic system', Proc. ASCEN at. Conf. Civil Eng. Appl. Remote Sensing and GIS, Washington D.C., 14-16 May, pp. 258-268.

Bhunja, G.S., Keshavarzi, A., Shit, P.K. et al. (2018) 'Evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking and irrigation using GIS and geostatistics techniques in semiarid region of Neyshabur, Iran', Applied Water Science 8, 168.

Boretti, A., Rosa, L. (2019) 'Reassessing the projections of the World Water Development Report'. npj Clean Water, 2, 15.

Borevsky B., Yazvin L., Margat L. (2004) '*Importance of groundwater for water supply*'. In: Zektser IS and Everett, LG (eds) Groundwater resources of the world and their use. IHP-VI, Series on Groundwater, UNESCO, Paris, No. 6, pp. 20–24.

Boroomandnia, A. et al. (2021) '*GIS Application in Water Resource Management*', in O. Bozorg-Haddad (ed.) Essential Tools for Water Resources Analysis, Planning, and Management. Singapore: Springer Singapore (Springer Water), pp. 125–152.

Burrough, P. A. and MacDonnell, R. A. (2000) '*Principles of geographical information systems*', Oxford: Oxford Univ. Press.

Bwambale et al. (2022) '*Towards precision irrigation management: A review of GIS, remote sensing and emerging technologies*', Cogent Engineering, 9(1).

Chang, K.T. (2003) '*Introduction to geographic information systems*'. Boston, MA: McGraw-Hill.

Chenini, I., Mammou, A.B. & El May, M. (2010) '*Groundwater Recharge Zone Mapping Using GIS-Based Multi-criteria Analysis: A Case Study in Central Tunisia (Maknassy Basin)*', Water Resour. Manage. 24, 921–939.

Chester Engineers and Shamsi, U.M. (2008) '*Arc Hydro: A Framework for Integrating GIS and Hydrology*', Journal of Water Management Modeling.

Costa AMD, de Salis HHC, Viana JHM, Leal Pacheco FA. (2019) '*Groundwater Recharge Potential for Sustainable Water Use in Urban Areas of the Jequitiba River Basin, Brazil*', Sustainability, 11(10), 2955.

Deh, S.K., Kouame, K.J., Eba, A.E.L., Djemin, J.E., Kpan, A. and Jourda, J.P. (2017) '*Contribution of Geographic Information Systems in Protection Zones Delineation around a Surface Water Resource in Adzope Region (Southeast of Côte d'Ivoire)*', Journal of Environmental Protection, 8, 1652-1673.

Djokic Dean (2015) '*Hydrologic and Hydraulic Modeling with ArcGIS*', 2015 Esri User Conference-Presentation, ESRI.

Domakinis, C. (2020) '*Use of remote sensing and geographic information systems in mapping flood extent and assessing flood hazard: application example: Evros's tributary, Erythrotamos river*'. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ), Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Φυσικής και Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας. <https://doi.org/10.12681/eadd/47354>.

Elkhrachy, I. (2015) '*Flash Flood Hazard Mapping Using Satellite Images and GIS Tools: A case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA)*', The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 18(2), pp. 261–278. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.06.007>.

EPA: United States Environmental Protection Agency (2022), '*Wellhead Protection Area (WHPA) Model*'. <https://www.epa.gov/water-research/wellhead-protection-area-whpa-model>

ESRI (2021) '*An overview of the Groundwater toolset*', ArcMap 10.8 <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-groundwater-tools.htm>

ESRI (2023) 'Location Intelligence. Insights that transform decision-making'. Available at: <https://www.esri.com/en-us/location-intelligence/overview>

European Investment Bank - The EU bank (2022) '*Wastewater as a resource*', EIB Projects Directorate-SECTOR PAPERS, pp.3-5.
https://www.eib.org/attachments/publications/wastewater_as_a_resource_en.pdf

Evans, B. M., Myers, W. L., (1990) '*A GIS-Based Approach to Evaluating Regional Groundwater Pollution Potential with DRASTIC*'. Journal of Soil and Water Conservation, 45 (3) 242-245.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2022) '*Level of Water Stress (SDG 6.4.2) by major river basin*'. <https://data.apps.fao.org/catalog/dataset/40bc32f6-1467-44ac-8f7c-3d67cbb1cbd7>

Franci, F. et al. (2016) '*Satellite remote sensing and GIS-based multi-criteria analysis for flood hazard mapping*', Natural Hazards, 83(S1), pp. 31–51.

Franz (2020) '*Automatically delineate a watershed in ArcGIS Pro*', GISCrack.
<https://giscrack.com/automatically-delineate-a-watershed-in-arcgis-pro/>

Gebeyehu, M. N. (2019) '*Remote sensing and GIS application in agriculture and natural resource management*', International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources, 19 (2), 556009.

Hossein Mojaddadi, Biswajeet Pradhan, Haleh Nampak, Noordin Ahmad and Abdul Halim bin Ghazali (2017) '*Ensemble machine-learning-based geospatial approach for flood risk assessment using multi-sensor remote-sensing data and GIS*', Geomatics, Natural Hazards and Risk, 8:2, 1080-1102.

Job AC (2010) '*Groundwater Economics*', CRC Press, Boca Raton, p. 650.

Karthik Nagarajan, Raju Narwade, Ashwini P., Sachin Panhalkar, Vedashree Sameer Kulkarni, Aishwarya Pramod Hingmire (2022) '*Employing Digital Elevation Model (DEM) for Floodplain mapping with applications of HEC-HMS, HEC-RAS, and ArcGIS*'. Journal of Remote Sensing & GIS. 13(2): 1–15p.

Khouni, I., Louhichi, G. and Ghrabi, A. (2021) '*Use of GIS based Inverse Distance Weighted interpolation to assess surface water quality: Case of Wadi El Bey, Tunisia*', Environmental Technology & Innovation, 24, p. 101892.

Kourgialas, N. N. and Karatzas, G. P. (2011) '*Flood management and a GIS modeling method to assess flood-hazard areas-a case study*'. Hydrol. Sci. J. 56(2), 212–225.

Kourgialas, N.N. and Karatzas, G.P. (2015) '*Groundwater contamination risk assessment in Crete, Greece, using numerical tools within a GIS framework*', Hydrological Sciences Journal, 60(1), pp. 111–132.

Latinopoulos D. (2002) '*The economic value of irrigation water: Analysis and critical assessment of valuation studies*'. MSc dissertation, Department of Economics, UCL, London

Li Y., Gong H., Zhu L. and Li X. (2017) '*Measuring Spatiotemporal Features of Land Subsidence, Groundwater Drawdown, and Compressible Layer Thickness in Beijing Plain, China*'. Water: 9 64.

Liu, J. (2009) '*A GIS-based tool for modelling large-scale crop-water relations*', Environmental Modelling & Software, 24(3), pp. 411–422.

Longley, P. A., Goodchild, M., Maguire, D. J., and Rhind, D. (2005) '*Geographic Information Systems and Science*'. John Wiley & Sons.

Mair, M., Sitzenfrei, R., Kleidorfer, M., Möderl, M., and Rauch, W., (2012) '*GIS-based applications of sensitivity analysis for sewer models*'. Water Sci. Technol.: 65(7): pp. 1215-22.

Mancuso G., Parlato MCM, Lavrnić S., Toscano A., Valenti F. (2022) '*GIS-Based Assessment of the Potential for Treated Wastewater Reuse in Agricultural Irrigation: A Case Study in Northern Italy*'. Sustainability, 14(15):9364.

Martin, P.H., LeBoeuf, E.J., Dobbins, J.P., Daniel, E.B. and Abkowitz, M.D. (2005), '*Interfacing GIS with water resource models: A state-of-the-art review*'. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 41: 1471-1487.

Marwaha Nikita and Duffy Elizabeth (2021) '*Everything you need to know about Digital Elevation Models (DEMs), Digital Surface Models (DSMs), and Digital Terrain Models (DTMs)*'. UP42

Mather, P.M. and Koch, M. (2011) '*Computer processing of remotely-sensed image: an introduction*'. Chichester, West Sussex, Uk ; Hoboken, Nj: Wiley-Blackwell.

Megahed, H.A. (2020) '*GIS-based assessment of groundwater quality and suitability for drinking and irrigation purposes in the outlet and central parts of Wadi El-Assiuti, Assiut Governorate, Egypt*', Bulletin of the National Research Centre 44, 187.

Mirrah AA, Kusratmoko E (2017) '*Application of GIS for assessment of water availability in the Cianten Watershed, West Java*', IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Science (98), 012018.

Mohammadi, N.K. (2019) '*A Review on GIS in Irrigation and Water Management* ', International Journal of Engineering Research, 8(05), p. 5.

Moeller, R. A. (1991) '*Application of a geographic information system to hydrologic modeling using HEC-I*', Master thesis, 4 May, University of Washington. Moutal, H. P. and Bowen, D. R.: Updating New York city

National Geographic (2023) '*National Geographic Society and Utrecht University Launch World Water Map*'. Available at: <https://blog.nationalgeographic.org/2023/03/20/world-water-map-launch/>

Nguyen, T.T. et al. (2020) '*New approach of water quantity vulnerability assessment using satellite images and GIS-based model: An application to a case study in Vietnam*', Science of The Total Environment, 737, p. 139784.

Oulidi Hassane Jarar (2019) Chapter 1: Theoretical framework. In: Hassane Jarar Oulidi *Spatial data on water: Geospatial Technologies and Data Management*. Elsevier

Pedrero, F., Alarcón, J. J., Abellán, M., & Perez-Cutillas, P. (2015) '*Optimization of the use of reclaimed water through groundwater recharge, using a Geographic Information System*'. *Desalination and Water Treatment*, 57(11), 4864–4877.

Pereira, L. S., and Allen, R. G. (1999) 'Crop water requirements' In: '*CIGR Handbook of Agricultural Engineering*' (Vol. 1: Land and Water Engineering), American Society of Agricultural Engineers. pp. 213–214.

Ragan, R. M. and Kosicki, A. J. (1993) '*An operational GIS to support state-wide hydrologic and nonpoint pollution modeling*', Proc. ASCE Int. Symp. Eng. Hydrology, San Francisco, CA.

Ramírez-Cuesta, J. M., Mirás-Avalos, J. M., Rubio-Asensio, J. S., and Intrigliolo, D. S. (2018) '*A novel ArcGIS toolbox for estimating crop water demands by integrating the dual crop coefficient approach with multi-satellite imagery*', *Water (Switzerland)*, 11(1), 38.

Richey, A. S. et al. (2015) '*Quantifying renewable groundwater stress with GRACE*'. *Water Resour. Res.* 51, 5217–5238.

Rios, J.F. et al. (2013) '*ArcNLET: A GIS-based software to simulate groundwater nitrate load from septic systems to surface water bodies*', *Computers & Geosciences*, 52, pp. 108–116.

Ross, M. A., & Tara, P. D. (1993) '*Integrated hydrologic modeling with geographic information systems*'. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119(2), 129–140.

Rossetto, R. et al. (2018) '*Integrating free and open source tools and distributed modelling codes in GIS environment for data-based groundwater management*', *Environmental Modelling & Software*, 107, pp. 210–230.

Rundquist, D., Peters, A., Di, L., Rodekohl, D., Ehrman, R. and Murray, G., (1991) '*Statewide ground water vulnerability assessment in Nebraska using the DRASTIC/GIS model*'. *GeoCarto International*, 6(2), pp. 51–58.

Rowshon, M.K., Kwok, C.Y. and Lee, T.S. (2003) '*GIS-based scheduling and monitoring irrigation delivery for rice irrigation system*', *Agricultural Water Management*, 62(2), pp. 117–126.

Saha, A.K. and Agrawal, S. (2020) '*Mapping and assessment of flood risk in Prayagraj district, India: a GIS and remote sensing study*', *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 5(2), p. 11.

Serageldin, I. (1995) '*Water Resources Management: A new Policy for a Sustainable Future, Water Resources Development*', *International Journal of Water Resources Development*, 11(3), pp. 221–232.

Shariat, R., Roozbahani, A., and Ebrahimian, A (2019) '*Risk analysis of urban stormwater infrastructure systems using fuzzy spatial multi-criteria decision making*', *Science of The Total Environment*, 647, 1468–1477.

Stumptner, A. (2007) '*Which are the objectives of WM?*', GeoLearning, Watershed Management- Free University of Berlin.

Tsihrintzis, V.A., Hamid, R. and Fuentes, H.R. (1996) '*Use of Geographic Information Systems (GIS) in water resources: A review*', Water Resources Management, 10(4), pp. 251–277.

Upadhyay, P. and Patel, J.N. (2022) '*Delineation of flood risk zones in Jodhpur District, Rajasthan, India using remote sensing, GIS and multi-criteria decision making techniques*', International Journal of Hydrology Science and Technology, 14(4), p. 406.

United Nations (2020) '*The Sustainable Development Goals Report 2020*'. Available at: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2020.pdf>

UN Environment Programme (2015) '*Options for decoupling economic growth from water use and water pollution*' Report of the International Resource Panel Working Group on Sustainable Water Management.

UNESCO World Water Assessment Programme (WWAP) (2022) '*The UN World Water Development Report 2022: groundwater: making the invisible visible*', UN-Water, p.18 Available at: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380721/PDF/380721eng.pdf.multi>

Velasco, V. et al. (2014) '*GIS-based hydrogeochemical analysis tools (QUIMET)*', Computers & Geosciences, 70, pp. 164–180.

Wang, X. and Xie, H. (2018) '*A Review on Applications of Remote Sensing and Geographic Information Systems (GIS) in Water Resources and Flood Risk Management*', Water, 10(5), p. 608.

Wang, X.H., Liu, Y.J. , Wang, Z. and Zhang, W. (2014) '*Design and Development of the Urban Water Supply Pipe Network Information System Based on GIS*', Applied Mechanics and Materials, 580–583, pp. 2389–2393.

Ward, R. C., and M. Robinson (1989) '*Principles of Hydrology*', 3rd edition, McGrawHill, London.

WCED (1987) '*Our Common Future*', Oxford University Press, Oxford, England.

World Bank (2022) "*Water Resources Management*". Available at: <https://www.worldbank.org/en/topic/waterresourcesmanagement#2>

World Economic Forum (2023) '*The Global Risks Report 2023*', 18th Edition, Insight Report, pp.57-61. https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2023.pdf

Yeh, HF., Lee, CH., Hsu, KC. et al. (2009), '*GIS for the assessment of the groundwater recharge potential zone*', Environ Geol. 58, p.185–195.

Zolfaghary, P., Zakerinia, M. and Kazemi, H. (2021) '*A model for the use of urban treated wastewater in agriculture using multiple criteria decision making (MCDM) and geographic information system (GIS)*', Agricultural Water Management, 243, p. 106490.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Αλαμάνος, Α. (2019) *'Ολοκληρωμένο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για τη βιώσιμη Διαχείριση Υδατικών Πόρων, μέσω Υδρο-Οικονομικής Μοντελοποίησης και Πολυκριτηριακής Ανάλυσης'*, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Βασιλειάδης, Λ. (2017) *Σημειώσεις Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Υδραυλικός Τομέας και Περιβάλλον*, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.

Γιαμαλάκη Δέσποινα (2015) *'Εκτίμηση Πλημμυρικής Επικινδυνότητας Περιοχών της Περιφερειακής Ενότητας Αχαΐας & Κατευθύνσεις Βιώσιμου Χωρικού Σχεδιασμού'*, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας (ΠΜΣ Εφαρμοσμένης Γεωγραφίας και Διαχείρισης του Χώρου).

Γκαβαλέκα Ευαγγελία (2019) *'Εκτίμηση του κινδύνου ρύπανσης των υπόγειων υδάτων (τρωτότητα) με εφαρμογή μεθόδων χωρικής ανάλυσης. Η περίπτωση της Δυτικής Θεσσαλίας'*, Σχολή Θετικών Επιστημών-Περιβαλλοντικός σχεδιασμός έργων υποδομής, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Γκιτάκου Δήμητρα και Καραφύλλης Στυλιανός (2015) *'Εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου ArcHydro στο ΒΑ τμήμα της νήσου Νάξου και χρησιμοποίηση των δεδομένων για εντοπισμό θέσεων δημιουργίας μικρών φραγμάτων'*, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος.

Δημοπούλου Γερασιμούλα (2005) *'Μελέτη Περιβαλλοντικών παραμέτρων σε υδατικά περιβάλλοντα με χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και Πολυδιάστατης Στατιστικής Ανάλυσης'*, Πανεπιστήμιο Πατρών.

ΕΕ (2007) *ΟΔΗΓΙΑ 2007/2/ΕΚ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 14ης Μαρτίου 2007 για τη δημιουργία υποδομής χωρικών πληροφοριών στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα (Inspire)*, Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, L108.

Ζουρούδη Ανθούλα (2009) *'Διαχείριση υδάτινων πόρων'*, ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας.

Καμπράγκου Ελένη (2006) *'Ολοκληρωμένη Διαχείριση των Υδατικών πόρων. Εφαρμογή του πίνακα ισορροπημένης στοχοθεσίας στη λεκάνη απορροής του Νέστου'*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Καρατζάς Γεώργιος (2022) *Σημειώσεις Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων-Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος.*

Κουτσογιάννης, Δ., και Ξανθόπουλος, Θ. (1999) *'Τεχνική Υδρολογία'* (Προπτυχιακό εγχειρίδιο), Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://hdl.handle.net/11419/5888>

Κουτσόπουλος, Κ. (2002) *'Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και Ανάλυση Χώρου'*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

Μεταξάς Γεώργιος (2004) *'Συμβολή της δορυφορικής τηλεπισκόπησης και των γεωγραφικών πληροφοριακών συστημάτων στη διαχείριση υδατικών πόρων: διερεύνηση στη λεκάνη Πηνειού Ηλείας'*, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Μουζιούρας Σπυρίδων (2020) *'Περιβαλλοντική Συνείδηση Πολιτών και Αειφορική Διαχείριση Υδατικών Πόρων'*, Παν. Θεσσαλίας.

Μυλόπουλος, Ν. (2006) Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Διδακτικές σημειώσεις, Παν. Θεσσαλίας.

Νικολακόπουλος Κωνσταντίνος (2015) Σημειώσεις Χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και Τηλεπισκόπησης στην εφαρμοσμένη Γεωλογία, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Τμήμα Γεωλογίας της Σχολής Θετικών Επιστημών.

Νικολακόπουλος Κ., Κατσάνου Κ. και Λαμπράκης Ν.(2015) *'Τηλεπισκόπηση και Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών'*. Κεφάλαιο στο Νικολακόπουλος Κ., Κατσάνου Κ. και Λαμπράκης Ν. 2015. *'Υδρολογία με χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών και δεδομένων τηλεπισκόπησης'*, Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <http://hdl.handle.net/11419/2521>

Σιούτη Π. Γλυκερία (2018) *'Εγχειρίδιο Δικαίου Περιβάλλοντος'*, Γ' έκδοση, Εκδόσεις Σακκούλα.

Σταθόπουλος Νικόλαος (2018) *'Μέθοδοι διερεύνησης γεωπεριβαλλοντικών κινδύνων και Υδατικών Πόρων, στη λεκάνη του Σπερχειού ποταμού, με την αξιοποίηση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και τηλεπισκόπησης'*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, τομέας Γεωλογικών Επιστημών.

Τσακίρης Γ. (1995) *'Υδατικοί Πόροι'*, Ι. Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις Συμμετρία. Αθήνα.

Τσουχλαράκη Ανδρονίκη (2001) Σημειώσεις Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών-Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος.

ΥΠΕΝ (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας) (2015) *'Διαχείριση Υδατικών Πόρων'*, <https://ypen.gov.gr/perivallon/ydatikoi-poroi/diacheirisi-ydatikon-poron/>

ΥΠΕΝ (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας) (2020) *'Επαναχρησιμοποίηση λυμάτων'*, <https://ypen.gov.gr/diacheirisi-apovlition/astika-lymata/epanachrisimopoiisi-lymaton/>

Χαλκιάς, Χ. και Γκούσια Μ. (2015) *'Γεωγραφική ανάλυση με την αξιοποίηση της γεωπληροφορικής'*, Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://hdl.handle.net/11419/4546>

Χαλκιάς Χ.Ν.,(2006) *'Όροι και έννοιες επιστήμης γεωγραφικών πληροφοριών (GIS)'*, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.

Χαλκιάς Χρίστος (2022) Σημειώσεις Τι είναι τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS), Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας.

Χαριζόπουλος Νίκος (2017) Σημειώσεις Διαχείριση και Προστασία των υδατικών Πόρων, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Τμήμα Γεωλογίας της Σχολής Θετικών Επιστημών.