

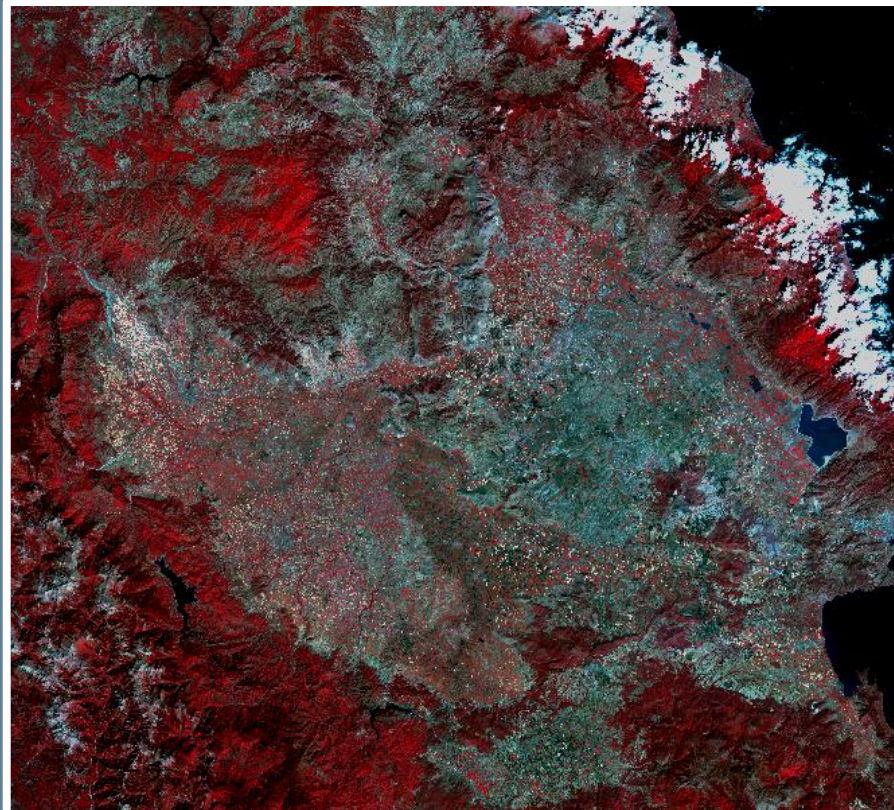


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

Βιώσιμη γεωργική διαχείριση στη λεκάνη του Πηνειού  
με χρήση τηλεπισκόπησης, προσομοίωση σε SWAT  
και ανάλυση αλληλεπιδράσεων νερού-γης-τροφής-ενέργειας



Δαγαλάκη Βασιλική

Επιβλέπουσα: Μ. Μιμίκου, καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2016



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία επιθυμώ να εκφράσω θερμές ευχαριστίες σε όλους εκείνους που συνέβαλαν ο καθένας με το δικό του ιδιαίτερο τρόπο στην υλοποίησή της.

Πρωταρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κυρία Μιμίκου Μαρία, καθηγήτρια του ΕΜΠ, διευθύντρια του Εργαστηρίου Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ και επιβλέπουσα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, τις εύστοχες υποδείξεις καθώς και για τη γενικότερη καθοδήγηση που μου προσέφερε.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αλέξανδρο Ψωμά, επιστημονικό συνεργάτη του Εργαστηρίου Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων στον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος του ΕΜΠ για την άψογη συνεργασία, τις συμβουλές και τη συνεχή παρακολούθηση και στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας. Ιδιαίτερα συνέβαλε στο Κεφάλαιο 5 με ιδέες και προτάσεις για το σχεδιασμό των σεναρίων πολιτικής και την επιλογή δεικτών ανάλυσης των αλληλεπιδράσεων νερού-γης-τροφής-ενέργειας. Επίσης, παρείχε υποστήριξη στην τηλεπισκόπηση και την μοντελοποίηση με SWAT.

Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω τον Δρ. Ιωάννη Παναγόπουλο, επιστημονικό συνεργάτη του Εργαστηρίου Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ για την πολύτιμη βοήθειά του στην εκμάθηση του λογισμικού SWAT, την άμεση ανταπόκρισή του και τις εύστοχες παρατηρήσεις του.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Πολ Κολοκούση, διδάσκοντα και συνεργάτη του Εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης της Σχολής Αγρονόμων-Τοπογράφων Μηχανικών του ΕΜΠ για τις συμβουλές που παρείχε σε σχέση με την επεξήγηση εννοιών και εφαρμογών της Τηλεπισκόπησης και τον τρόπο λειτουργίας των λογισμικών ER Mapper και Ecognition.

Φυσικά το μεγαλύτερο ευχαριστώ το χρωστάω στους φίλους μου, αλλά κυρίως στην οικογένειά μου, στους γονείς μου και την αδερφή μου, Μαρία Δαγαλάκη, για τη συνεχή υποστήριξη τους και την εμπιστοσύνη που μου δείχνουν όλα αυτά τα χρόνια. Γι' αυτό και η παρούσα εργασία είναι αφιερωμένη σε αυτούς.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας περιλαμβάνει τη μεγαλύτερη πεδινή έκταση στην Ελλάδα και το 12% της συνολικής γεωργικής έκτασης στη χώρα. Ωστόσο αποτελεί το πιο ελλειμματικό διαμέρισμα της ηπειρωτικής χώρας σε νερό, καθώς οι τοπικοί επιφανειακοί και υπόγειοι υδατικοί πόροι παρά την ενίσχυσή τους από τις εκροές του ταμιευτήρα Πλαστήρα δεν επαρκούν για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών. Ταυτόχρονα, το Θεσσαλικό πεδίο έχει χαρακτηριστεί με υπουργική απόφαση ως ευπρόσβλητη από νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης ζώνη έπειτα από αξιολόγηση των στοιχείων ποιότητας των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων και εντοπισμό υψηλών συγκεντρώσεων NO<sub>3</sub> σύμφωνα με τα κριτήρια της Οδηγίας 91/676/ΕΟΚ.

Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η συνδυασμένη διαχείριση νερού, γης, τροφής και ενέργειας (WELF nexus) μπορεί να υποστηρίξει την επιδίωξη οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά βιώσιμης ανάπτυξης σε παγκόσμιο, κρατικό ή τοπικό επίπεδο, επιχειρήθηκε η διερεύνηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των διαφορετικών αυτών τομέων στη λεκάνη απορροής του ποταμού Πηνειού. Πιο συγκεκριμένα, στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία δημιουργήθηκε ένας επικαιροποιημένος χάρτης χρήσεων γης για την περιοχή ενδιαφέροντος με χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων, αναπτύχθηκε το καταναμημένο υδρολογικό μοντέλο φυσικής βάσης SWAT και εξετάστηκαν πέντε σενάρια εφαρμογής διαφορετικών γεωργικών πρακτικών στις αρδευόμενες καλλιέργειες της λεκάνης, με ανάλυση των αλληλεπιδράσεων νερού, γης, τροφής και ενέργειας.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε η προμήθεια των δορυφορικών εικόνων προερχόμενων από το δορυφόρο Landsat 8-OLI/TRS. Με χρήση του ERMapper, ενός προγράμματος επεξεργασίας τηλεπισκοπικών εικόνων, επιτεύχθηκε η σύνθεση του μωσαϊκού των δορυφορικών εικόνων που απεικονίζουν την περιοχή μελέτης, η αναγνώριση της περιοχής στη οποία κρίθηκε απαραίτητη η πραγματοποίηση ταξινόμησης και η κατασκευή του κατάλληλου έγχρωμου σύνθετου. Το έγχρωμο σύνθετο εισήχθη ακολούθως στο λογισμικό αντικειμενοστραφούς ανάλυσης εικόνας eCognition, όπου πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της κατάτμησης και ταξινόμησης. Επιλέχθηκε η «από κάτω προς τα πάνω» κατάτμηση (bottom up segmentation) με τις τιμές των παραμέτρων να ορίζονται εμπειρικά. Οι κλάσεις, στις οποίες έγινε η ταξινόμηση των αντικειμένων που δημιουργήθηκαν από την κατάτμηση, ήταν οι εξής: αγρανάπαυση, μηδική, καλαμπόκι, βαμβάκι, βοσκότοποι, ζαχαρότευτλο, τομάτα, δενδρώδης περιοχή και σιτάρι. Η ταξινόμηση ήταν επιβλεπόμενη με χρήση του αλγόριθμου του εγγύτερου γείτονα για τη μέση τιμή και τυπική απόκλιση της φωτεινότητας στα διάφορα κανάλια. Τόσο οι περιοχές εκπαίδευσης όσο και οι περιοχές ελέγχου προήλθαν από τη βάση δεδομένων του Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε. έτσι όπως διαμορφώθηκε έπειτα από τις αιτήσεις Ενιαίας Ενίσχυσης των αγροτών το έτος 2013. Από τις εκτελεσθείσες ταξινομήσεις επιλέχθηκε εκείνη με τη μεγαλύτερη συνολική ακρίβεια (0.67), υψηλότερο δείκτη ΚΙΑ (0.6) και υψηλότερες επιμέρους ακρίβειες για τις σημαντικότερες κλάσεις. Ο χάρτης χρήσεων γης συντέθηκε από τα αποτελέσματα της ταξινόμησης και τα δεδομένα χρήσεων γης CORINE του έτους 2000.

Η κατασκευή του υδρολογικού μοντέλου της λεκάνης απορροής πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό ArcSWAT. Τα δεδομένα εισαγωγής περιλαμβάνουν το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) της περιοχής, τη σχηματοποίηση των υπολεκανών, τον παραχθέντα χάρτη χρήσεων γης, τον εδαφολογικό χάρτη καθώς και χρονοσειρές ημερήσιων μετρήσεων βροχόπτωσης, μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών. Η λεκάνη απορροής χωρίστηκε σε 49 υπολεκάνες και 848 μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRUs). Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των παραμέτρων των αρχείων προγράμματος, ώστε να προσομοιωθούν η λειτουργία των ταμιευτήρων εντός της λεκάνης, οι μεταφορές νερού, οι συμβατικές μέθοδοι άρδευσης και λίπανσης. Η βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με χρήση μηνιαίων χρονοσειρών μετρημένων παροχών και συγκεντρώσεων θρεπτικών σε συνολικά τέσσερις θέσεις κατά μήκος του κύριου ρεύματος.

Στη βαθμονόμηση συμμετείχαν συνολικά 10 παράμετροι σχετικές με τα ποσοτικά χαρακτηριστικά του νερού και 11 παράμετροι σχετιζόμενες με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ποσοτικής βαθμονόμησης υπολογίστηκε ο δείκτης NSE και άλλα μέτρα επίδοσης με τιμές μέσα στα αποδεκτά όρια, όπως ορίζονται από τη βιβλιογραφία, τόσο για την περίοδο της βαθμονόμησης όσο και για την περίοδο της επαλήθευσης και συνεπώς η προγνωστική ικανότητα παροχών του μοντέλου κρίθηκε ικανοποιητική. Αντιθέτως, η συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων φορτίων ολικού φωσφόρου και των παρατηρημένων κρίθηκε μη ικανοποιητική και τα αποτελέσματα δεν αξιοποιήθηκαν περαιτέρω. Τα αποτελέσματα της ποιοτικής βαθμονόμησης όσον αφορά τα νιτρικά κρίθηκαν αποδεκτά για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας.

Το βαθμονομημένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση πέντε σεναρίων εφαρμογής διαφορετικών γεωργικών πρακτικών άρδευσης και λίπανσης για τις αρδευόμενες καλλιέργειες της λεκάνης απορροής. Πέρα από την προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης (REF) τα εκτελεσθέντα σενάρια περιλαμβάνουν εφαρμογή ελλειμματικής άρδευσης (DI), μειωμένης λίπανσης αζώτου (RF), συνδυασμού αυτών (DIRF) και εφαρμογή γεωργίας ακριβείας (PA). Τα αποτελέσματα του μοντέλου SWAT υπέστησαν κατάλληλη επεξεργασία, ώστε από αυτά να εξαχθούν αντιπροσωπευτικοί δείκτες σχετικά με την επίδραση των γεωργικών πρακτικών τόσο στους υδατικούς πόρους όσο και στους τομείς της ενέργειας, της τροφής και του εδάφους.

Το σενάριο PA έχει τις καλύτερες επιδόσεις στον τομέα του νερού και της τροφής (γεωργικής παραγωγής). Πράγματι, καταφέρνει να βελτιώσει την αποδοτικότητα νερού και λίπανσης για την αύξηση της γεωργικής παραγωγής. Προκαλεί ηπιότερες επιπτώσεις στα υπόγεια ύδατα, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει τη μικρότερη εκμετάλλευση των μόνιμων υπόγειων αποθεμάτων νερού συγκριτικά με τα άλλα σενάρια. Τα σενάρια DI και DIRF έχουν παρόμοιες επιπτώσεις στους τομείς του WELF Nexus με εξαίρεση την κατείσδυση NO<sub>3</sub> στα υπόγεια ύδατα όπου το DIRF αποδίδει καλύτερα. Αποτελούν την πλέον συμφέρουσα επιλογή με κριτήριο την τιμή του απλοποιημένου δείκτη WEI. Το σενάριο DI αποτελεί το βέλτιστο σενάριο με κριτήριο τη συνολική καθαρή αξία ενεργειακής παραγωγής, το DIRF είναι το επόμενο σε απόδοση σε αυτόν τον τομέα. Το σενάριο RF δεν αποτελεί βέλτιστη επιλογή για κανένα από τα εξεταζόμενα κριτήρια. Για τον τομέα της Γης, όλα τα γεωργικά σενάρια έχουν παρόμοια απόδοση.

Κανένα σενάριο δεν επικρατεί ολικά απέναντι στα υπόλοιπα. Η αναγώριση ενός σεναρίου ως βέλτιστο προϋποθέτει την ιεράρχηση των κριτηρίων από τους φορείς λήψης αποφάσεων και την ποσοτικοποίηση αυτής. Χρήσιμη προς αυτή την κατεύθυνση θα ήταν επίσης μια ανάλυση ευαισθησίας ανάλυση ευαισθησίας για τις τιμές του νερού, των λιπασμάτων, της ενέργειας και της γεωργικής παραγωγής.





## ABSTRACT

The River Basin District of Thessaly includes the largest lowland area in Greece as well as the 12% of the national agricultural land. However, this River Basin District constitutes the most highly water stressed area in the Greek mainland as the local groundwater and surface water resources are insufficient compared to the local irrigation demand even though there is significant influx of water from the Plastiras reservoir. Furthermore, the plain of Thessaly has been identified according to the requirements of the Directive 91/676/EEC (transposed into national legislation with JMD 161890/1335/1997), as vulnerable zone with respect to nitrogen pollution from agricultural run-offs.

Taking into consideration that the implementation of integrated management practices of the WELF Nexus can foster and facilitate goals of economically, socially, and environmentally sustainable growth either at international, national or local level, an analysis of the interactions among the nexus sectors (water, energy, land, food) was attempted. In this particular thesis an updated land use map of the river basin was produced utilizing available remote sensing methods and classification techniques, a hydrological model of the region was produced using the comprehensive distributed river basin model, SWAT, and five alternative agricultural management scenarios for the irrigated areas of Pinios river basin were modelled.

In particular, satellite multispectral high spatial resolution data (30m) from Landsat 8/OLI-TRS acquired in 2013 were used to generate the land cover maps. Using the ERMapper software the appropriate mosaic depicting the river basin was produced and following the establishment of the band combination to create the appropriate RGB composite, the area of interest for which the classification would take place was identified. The produced composite image of the area of interest was used for segmentation and classification purposes in the object-oriented image analysis software, eCognition. At first, the multiresolution segmentation algorithm was used for producing polygon objects. The values for the homogeneity criteria and the scale factor were adjusted empirically. A class hierarchy to be used in the classification process was defined, consisting of the following classes: agricultural land, alfalfa, corn, cotton, pasture, sugar beet, tomato, trees and winter wheat. The supervised classification was carried out using the Nearest Neighbor algorithm, adding the mean and the standard deviation of the layer values to the standard nearest neighbor feature space. Both training regions and test regions derive from relevant data provided by OPEKEPE. The accuracy assessment of each of the classifications carried out was accomplished using confusion matrix and statistical indexes (Overall Accuracy, Kappa Index of Agreement, etc.). The chosen classification results corresponded to the highest Overall Accuracy (0.67) and KIA (0.6) and were used in the composition of the final landuse map using GIS software.

The hydrological model of Pinios river basin was constructed using the ArcSWAT2012 version. Input data include a Digital Elevation Model (DEM) of the catchment, the schematization of the subbasins, the produced land use map, the soil map of the river basin as well as timeseries of meteorological daily temperature and

precipitation data. The river basin was divided in 49 subbasins and 848 Hydrological Response Units (HRUs). Subsequently, the values of several parameters of the program were adjusted so as to describe the operation of the reservoirs in the catchment, water transports within or inwards the basin as well as the implemented agricultural practices. The model was calibrated and validated on a monthly step, using historical river flow and nutrient loadings records for four locations within the study area.

There were 10 parameters that participated in the flow calibration process and 11 more pertaining the quality characteristics of water in the study area. Model evaluation regarding flow simulation was implemented by the calculation of several quantitative statistics (NSE, PBIAS, etc.) and their values were found within the limits set in international literature indicating that the model simulation can be judged as satisfactory. Likewise, with the use of graphical model evaluation techniques the predicted ability of the model regarding NO<sub>3</sub> loadings was judged as satisfactory with respect to the aims of the thesis. On the other hand, the convergence between the simulated and observed P loadings was regarded weak and the results were not utilized further in the course of this thesis.

Five agricultural management scenarios pertaining to alternative irrigation and fertilization practices for the irrigated areas of the catchment were constructed and modeled over a 20 year period using the calibrated SWAT model. Apart from the reference scenario (REF) reflecting the conventional practices applied at present, the scenarios modelled include implementation of deficit irrigation (DI), reduced fertilization (RF), a combination of the aforementioned (DIRF) as well as precision agriculture (PA). SWAT outputs of each of the modeled scenarios were processed and representative indicators regarding the effect of agricultural practices on the WELF sectors (water, energy, land and food) were calculated. Additionally, the average financial cost/ benefit resulting from the application of each scenario was calculated.

PA renders the best results regarding the sectors of water and food (crop production). Indeed, there is an improvement in water and fertilization productivity and an increase in total crop production. This scenario exerts the mildest effect on groundwater quality while at the same time it requires the lowest exploitation of the non-renewable groundwater resources compared to the rest scenarios in order to fully meet the irrigation demands in the watershed. DI and DIRF share similar influence on the WELF Nexus sectors, with the exception of nitrate percolation under the soil profile which is lower in DIRF. These scenarios constitute the optimum choice as far as the value of simplified WEI is concerned. DI leads to the highest net value of energy production in the watershed. On the other hand RF scenario does not pose as the premier choice according to any of the criteria examined. Lastly, all scenarios share similar performance as far as the sector land is concerned.

There is no clear prevalence of one scenario over the others. The identification of one scenario as optimal requires hierarchical classification (quantified or not) of the criteria used from the decision makers. Towards the same result a sensitivity analysis

of irrigation water prices, agricultural produce prices, fertilizer prices as well as energy prices would prove useful.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος	3
Περίληψη	5
Abstract	9
Περιεχόμενα	13
Περιεχόμενες Εικόνες	15
Περιεχόμενοι Πίνακες	17
Κεφ. 1: Εισαγωγή	19
1.1 Η συνδυασμένη διαχείριση νερού-γης-τροφής-ενέργειας	19
1.2 Αντικείμενο μελέτης	24
1.3 Στόχοι εργασίας	25
1.4 Διάρθρωση περιεχομένου	26
Κεφ. 2: Παρουσίαση περιοχής μελέτης	29
2.1 Διοικητική και γεωγραφική θέση	29
2.2 Γεωλογία & μορφολογία	30
2.3 Κλίμα	31
2.4 Πληθυσμός & ανάπτυξη	31
2.5 Υδατικοί πόροι	32
2.6 Έργα αξιοποίησης υδατικών πόρων	34
2.7 Χρήσεις γης & υδάτων	36
Κεφ. 3: Τηλεπισκόπηση και Φωτοερμηνεία	39
3.1 Τηλεπισκόπηση & Φωτοερμηνεία	39
3.2 Landsat 8-OLI/TIRS	41
3.3 ER Mapper-Αναγνώριση περιοχής ενδιαφέροντος	44
3.4 eCognition-Ταξινόμηση	48
3.5 ArcGIS-Παραγωγή χαρτών	57
Κεφ. 4: Μοντελοποίηση στο SWAT	61
4.1 Το λογισμικό SWAT	61
4.2 Σχηματοποίηση λεκάνης	66
4.3 Καθορισμός Μονάδων Υδρολογικής απόκρισης (HRUs)	68
4.4 Διαμόρφωση βάσεων δεδομένων προγράμματος	70
4.5 Επεξεργασία παραμέτρων αρχείων προγράμματος	70
4.6 Βαθμονόμηση του μοντελου	77

Κεφ. 5: Σενάρια πολιτικής	89
5.1 Σενάριο Αναφοράς (Reference Scenario-REF)	89
5.2 Σενάριο Ελλειμματικής Αρδευσης (Deficit Irrigation Scenario-DI)	90
5.3 Σενάριο Μειωμένης Λίπανσης (Reduced Fertilization Scenario-RF)	91
5.4 Συνδυαστικό Σενάριο (Combination Scenario-DIRF)	91
5.5 Σενάριο Γεωργίας Ακριβείας (Precision Agriculture Scenario-PA)	92
5.5 Γενικές παραδοχές σεναρίων	93
5.7 Παρουσιαση αποτελεσματος	94
Κεφ. 6: Σχολια και συμπεράσματα	111
Κεφ. 7: Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση	113
Βιβλιογραφία	115
Παράρτημα	123

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1: Το WELF Nexus.	20
Εικόνα 2: Το διευρυμένο πλαίσιο του WELF Nexus, Πηγή (Ringler, Bhaduri, & Lawford, 2013)(τροποποιημένο).	22
Εικόνα 3: Τα Υδατικά Διαμερίσματα της Ελλάδας και η Λεκάνη Απορροής του Ποταμού Πηνειού.	29
Εικόνα 4: Όρια των νομών στη λεκάνης απορροής του Πηνειού ποταμού.	30
Εικόνα 5: Το υδρογραφικό δίκτυο στην περιοχή της λεκάνης απορροής του Πηνειού.	32
Εικόνα 6: Χάρτης έργων εκτροπής Αχελώου. Πηγή: ypethe.gr.	35
Εικόνα 7: Κατανομή χρήσεων γης στη λεκάνη απορροής ποταμού Πηνειού. Πηγή: Κ/ΞΙΑ Διαχείρισης Υδάτων Θεσσαλίας, Ηπείρου και Δυτικής Στερεάς Ελλάδας, (2014).	36
Εικόνα 8: Κατανομή ζήτησης νερού στο Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας. Πηγή: ypethe.gr.	37
Εικόνα 9: Η διαδικασία της Τηλεπισκόπησης. Πηγή: www.nrcan.gc.ca (τροποποιημένη).	39
Εικόνα 10: Ο δορυφόρος Landsat 8. Πηγή: landsat.usgs.gov.	41
Εικόνα 11: Προεπισκόπηση της λήψης του Landsat 8. Με κίτρινο και πράσινο φαίνονται η έκταση και η τοποθεσία των πολυφασματικών λήψεων και με κόκκινο η περιοχή μελέτης. Πηγή: glovis.usgs.gov.	43
Εικόνα 12: Έγχρωμα σύνθετα 4,3,2 και 5,4,3 της ψηφιακής τηλεπισκοπικής απεικόνισης με ημερομηνία λήψης 28/09/2013.	45
Εικόνα 13: Έγχρωμα σύνθετα 4,3,2 και 5,7,4 (από πάνω προς τα κάτω) τμήματος της ψηφιακής τηλεπισκοπικής απεικόνισης με ημερομηνία λήψης 28/09/2013.	46
Εικόνα 14: Τηλεσκοπική απεικόνιση της περιοχής μελέτης (πάνω) και της «περιοχής ενδιαφέροντος» όπως ορίστηκε (κάτω). Με λευκό χρώμα έχουν σχεδιαστεί τα όρια της λεκάνης απορροής του ποταμού Πηνειού.	47
Εικόνα 15: Αναπαράσταση ιεραρχίας πολλαπλών επιπέδων αντικειμένων. Πηγή: eCognition Developer 8.7 User's Guide, 2011.	48
Εικόνα 16: Παράμετροι κατάτμησης, για το λογισμικό eCognition.	50
Εικόνα 17: Ορισμός των παραμέτρων κατάτμησης στο λογισμικό eCognition.	51
Εικόνα 18: Απεικόνιση τμήματος της περιοχής ενδιαφέροντος πριν και μετά την ολοκλήρωση της κατάτμησης με χρήση του λογισμικού eCognition.	51
Εικόνα 19: Απεικόνιση μεθόδου ταξινόμησης με χρήση της μεθόδου του εγγύτερου γείτονα. Πηγή: eCognition Developer 7 User's Guide, 2007.	52
Εικόνα 20: Αποτελέσματα επιλεγμένης ταξινόμησης της περιοχής ενδιαφέροντος από το πρόγραμμα eCognition. Δεξιά πάνω φαίνεται η ιεραρχία των κλάσεων της ταξινόμησης.	54
Εικόνα 21: Ο πίνακας σύγχυσης όπως προκύπτει από τα δείγματα ελέγχου της κάθε κατηγορίας για την επιλεγμένη ταξινόμηση.	55
Εικόνα 22: Χάρτης των χρήσεων γης στη λεκάνη απορροής του ποταμού Πηνειού.	59
Εικόνα 23: Σχηματική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου. Πηγή: Neitsch, Arnold, Kiniry, Srinivasan, & Williams, 2009.	61

Εικόνα 24: Σχηματική απεικόνιση των διαθέσιμων κινήσεων νερού στο λογισμικό SWAT. Πηγή: Παναγόπουλος, 2010 από Neitsch, Arnold, Kiniry, Srinivasan, & Williams, 2009.	62
Εικόνα 25: Ο κύκλος του φωσφόρου. Πηγή: Neitsch, Arnold, Kiniry, Srinivasan, & Williams (2009).	64
Εικόνα 26: Ο κύκλος του αζώτου. Πηγή: Neitsch, Arnold, Kiniry, Srinivasan, & Williams (2009).	65
Εικόνα 27: Στάδια προσομοίωσης στο SWAT.	66
Εικόνα 28: Σχηματοποίηση της περιοχής μελέτης με το λογισμικό ArcSWAT.	67
Εικόνα 29: Η χρήσεις γης της λεκάνης απορροής όπως εισήχθησαν στο πρόγραμμα ArcSWAT.	69
Εικόνα 30: Εδαφολογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Πηνειού.	69
Εικόνα 31: Μηνιαία καταναλωτική χρήση νερού όπως ορίστηκε για το φράγμα Γυρτώνης.	71
Εικόνα 32: Στοιχεία ενός υπερχειλιστή με αντιπλυμμηρική ζώνη. Πηγή: Neitsch, Arnold, Kiniry, Srinivasan, & Williams, (2009).	72
Εικόνα 33: Αρδευόμενες εκτάσεις ανά πηγή άρδευσης για την υφιστάμενη κατάσταση.	76
Εικόνα 34: Μέσες ημερήσιες απολήψεις νερού από το κύριο ρεύμα, όπως ορίστηκαν για την υπολεκάνη 48.	76
Εικόνα 35: Σταθμοί μέτρησης Αλή Εφέντη, Κεραμίδι, Αμυγδαλιά και Υδατόπυργος.	78
Εικόνα 36: Ρύθμιση των παραμέτρων με χρήση του εργαλείου Manual Calibration Helper του ArcSWAT.	80
Εικόνα 37: Παρατηρημένες και προσομοιωμένες παροχές στις θέσεις Αλή Εφέντη και Αμυγδαλιά.	84
Εικόνα 38: Αρχική συγκέντρωση NO <sub>3</sub> στον αβαθή υπόγειο υδροφορέα ανά υπολεκάνη.	86
Εικόνα 39: Διαγράμματα προσομοιωμένων-παρατηρημένων μέσω των εποχικών φορτίων NO <sub>3</sub> στις θέσεις Υδατόπυργος και Κεραμίδι	88
Εικόνα 40: Αρχικό βάθος νερού στον αβαθή υδροφορέα για κάθε υπολεκάνη	94
Εικόνα 41: Αρχείο εξόδου output.std	95
Εικόνα 42: Μέση ετήσια αξία και κόστος παραγόμενης και καταναλωμένης ενέργειας στη λεκάνη απορροής του ποταμού Πηνειού για τα διαφορετικά σενάρια	102
Εικόνα 43: Αραχνοειδές γράφημα των επιπτώσεων των σεναρίων αναφοράς και ελλειμματικής άρδευσης στους τομείς του WELF Nexus	106
Εικόνα 44: Αραχνοειδές γράφημα των επιπτώσεων των σεναρίων αναφοράς και μειωμένης λίπανσης στους τομείς του WELF Nexus	107
Εικόνα 45: Αραχνοειδές γράφημα των επιπτώσεων των σεναρίων αναφοράς και συνδυασμού ελλειμματικής άρδευσης-μειωμένης λίπανσης στους τομείς του WELF Nexus	107
Εικόνα 46: Αραχνοειδές γράφημα των επιπτώσεων των σεναρίων αναφοράς και γεωργίας ακριβείας στους τομείς του WELF Nexus	108
Εικόνα 47: Αραχνοειδές γράφημα των επιπτώσεων των σεναρίων στους τομείς του WELF Nexus	109



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1: Ετήσια ζήτηση νερού στη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού. Πηγή: Κ/ΞΙΑ Διαχείρισης Υδάτων Θεσσαλίας, Ηπείρου και Δυτικής Στερεάς Ελλάδας, (2014)	37
Πίνακας 2: Κατανομή της συνολικής απόληψης νερού στη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού. Πηγή: Κ/ΞΙΑ Διαχείρισης Υδάτων Θεσσαλίας, Ηπείρου και Δυτικής Στερεάς Ελλάδας, (2014).	37
Πίνακας 3: Φασματικά κανάλια Landsat 8 με τα αντίστοιχα μήκη κύματος και χωρική ανάλυση. Πηγή: landsat.gsfc.nasa.gov.	42
Πίνακας 4:Εύρη αποτελεσμάτων ταξινομήσεων.	53
Πίνακας 5: Αποτελέσματα επιλεγμένης ταξινόμησης.	53
Πίνακας 6: Οι κατηγορίες χρήσεων γης στην περιοχική μελέτης.	60
Πίνακας 7: Στοιχεία των ταμιευτήρων που προσμοιώνονται.	72
Πίνακας 8: Παράμετροι ποσοτικής βαθμονόμησης, είδος και μέγεθος της μεταβολής τους.	81
Πίνακας 9: Τιμές των μέτρων επίδοσης για τις θέσεις Αμυγδαλιά και Αλή Εφέντη στις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης του μοντέλου.	83
Πίνακας 10: Παράμετροι ποιοτικής βαθμονόμησης, εύρη και τιμές.	86
Πίνακας 11: Στοιχεία προσομοιωμένων καλλιεργειών της λεκάνης απορροής για το σενάριο αναφοράς	90
Πίνακας 12: Στοιχεία προσομοιωμένων καλλιεργειών της λεκάνης απορροής για το σενάριο ελλειμματικής άρδευσης	91
Πίνακας 13: Στοιχεία προσομοιωμένων καλλιεργειών της λεκάνης απορροής για το σενάριο μειωμένης λίπανσης	91
Πίνακας 14: : Στοιχεία προσομοιωμένων καλλιεργειών της λεκάνης απορροής για το συνδυαστικό σενάριο	92
Πίνακας 15: Στοιχεία προσομοιωμένων καλλιεργειών της λεκάνης απορροής για το σενάριο γεωργίας ακριβείας	93
Πίνακας 16: Επιπτώσεις σεναρίων γεωργικών πρακτικών στο Νερό	96
Πίνακας 17: Επιπτώσεις σεναρίων γεωργικών πρακτικών στο Νερό - υπολογισμός απλοποιημένου δείκτη WEI	98
Πίνακας 18: Επιπτώσεις σεναρίων γεωργικών πρακτικών στο Νερό - εφαρμογή και κατείσδυση αζώτου	99
Πίνακας 19: Επιπτώσεις σεναρίων γεωργικών πρακτικών στην Ενέργεια	101
Πίνακας 20: Επιπτώσεις σεναρίων γεωργικών πρακτικών στη Γη	103
Πίνακας 21: Επιπτώσεις σεναρίων γεωργικών πρακτικών στην Τροφή (Αγροτική παραγωγή)	104
Πίνακας 22: Επιπτώσεις των σεναρίων γεωργικών πρακτικών τους τομείς του WELF Nexus	105



# ΚΕΦ. 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Η ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΝΕΡΟΥ-ΓΗΣ-ΤΡΟΦΗΣ-ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

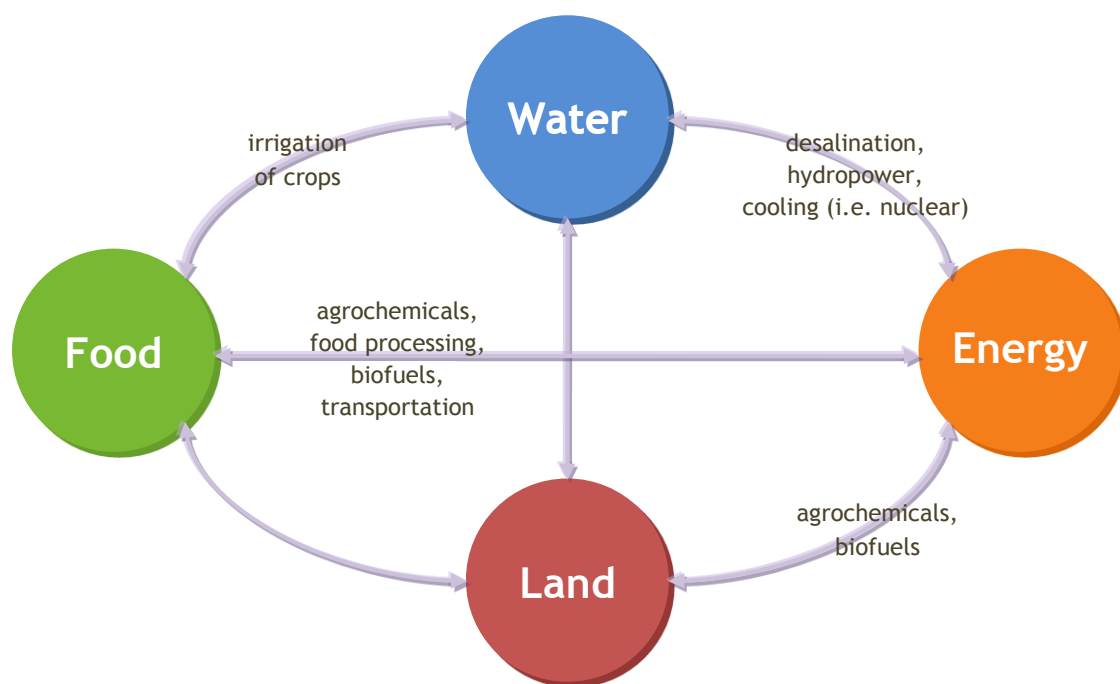
Το νερό, η τροφή, η ενέργεια και το έδαφος αποτελούν αγαθά πρώτης ανάγκης απαραίτητα για την επίτευξη της ανθρώπινης ευημερίας, τη δημιουργία και τη διατήρηση ισχυρών οικονομιών και σταθερών πολιτικών συστημάτων. Ωστόσο, η ραγδαία πληθυσμιακή αύξηση και η αυξανόμενη ευημερία ασκούν δυσβάσταχτες πιέσεις στους φυσικούς πόρους. Σύμφωνα με το Παγκόσμιο Συμβούλιο Ενέργειας (WEC) και τον Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (FAO) η ζήτηση για νερό, τροφή και ενέργεια αναμένεται να αυξηθεί κατά 30-50% στις επόμενες δύο δεκαετίες. Ταυτόχρονα, οι οικονομικές ανισότητες ωθούν σε επεμβάσεις με βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό, οι οποίες υπονομεύουν τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα (World Economic Forum, 2011). Η ολοένα αυξανόμενη πίεση στους φυσικούς πόρους έχει δημιουργήσει ανησυχία, καθώς θα μπορούσε να οδηγήσει σε ελλείψεις, να θέσει σε κίνδυνο την ενεργειακή, την επισιτιστική ασφάλεια και την ασφάλεια υδατικών πόρων, να παρακωλύσει την οικονομική ανάπτυξη, να οδηγήσει σε κοινωνικές και γεωπολιτικές εντάσεις και να αποβεί περιβαλλοντικά επιζήμια σε ανεπανόρθωτο βαθμό (Bonn Nexus Conference, 2011 website).

Οι παρούσες λοιπόν συνθήκες αλλά και οι μελλοντικές προβλέψεις καθιστούν αναγκαία αφενός μεν την εγκατάλειψη των συμβατικών μεθόδων διαχείρισης των φυσικών πόρων και αφετέρου τη δημιουργία ενός νέου πλαισίου διαχείρισης, το οποίο θα ανταποκρίνεται στη διπλή πρόκληση, την κοινωνική δηλαδή και την οικονομική ευημερία μέσα στα περιβαλλοντικά όρια με σεβασμό στη βιωσιμότητα και την κοινωνική ισότητα.

Η συνδυασμένη διαχείριση φυσικών πόρων, νερού, γης, τροφής και ενέργειας ή Water-Energy-Land-Food Nexus (WELF Nexus), όπως συναντάται στη διεθνή βιβλιογραφία, έχει κάνει την εμφάνισή της τα τελευταία χρόνια ως ένα χρήσιμο εργαλείο για την περιγραφή και αντιμετώπιση της πολύπλοκης και αλληλοσχετιζόμενης φύσης του παγκόσμιου συστήματος φυσικών πόρων, πάνω στο οποίο βασιζόμαστε για την επίτευξη διαφορετικών κοινωνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών στόχων. Πιο συγκεκριμένα, αποτελεί μια εννοιολογική προσέγγιση με σκοπό την καλύτερη κατανόηση και τη συστηματική ανάλυση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ του φυσικού περιβάλλοντος και των ανθρώπινων δραστηριοτήτων καθώς και τη συντονισμένη διαχείριση των φυσικών πόρων σε διαφορετικούς τομείς και κλίμακες. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα να αναγνωριστούν και να αντιμετωπιστούν διλήμματα που απορρέουν, να δημιουργηθούν συνέργειες και μέσω των αντιδράσεων να επιτευχθεί ένας πιο ολοκληρωμένος και αποδοτικότερος ως προς το κόστος προγραμματισμός, λήψη αποφάσεων, εφαρμογή, παρακολούθηση και αξιολόγηση τους.

Οι αλληλεπιδράσεις των μερών του WELF Nexus είναι περίπλοκες και δυναμικές και τα θέματα κάθε τομέα του (υδατικοί πόροι, τροφή, ενέργεια και έδαφος) δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους τομείς. Έχουν αναγνωριστεί

εδώ και πολλά χρόνια και αποτελούν αντικείμενο μελέτης οι διάφορες αλληλοσυσχετίσεις όπως αυτή των των υδατικών πόρων με την τροφή, των υδατικών πόρων με το έδαφος και της τροφής με το έδαφος. Ειδικότερα, όσον αφορά τη σύνδεση υδατικών πόρων και τροφής πρέπει να σημειωθεί πως η αρδευόμενη γεωργία ευθύνεται για το 70% των παγκόσμιων απολήψεων γλυκού νερού και για το 90% της κατανάλωσής του, ενώ συμβάλλει ταυτόχρονα κατά 40% στη συνολική παραγωγή σιτηρών (UN-Water, 2016). Κοινή μοντελοποίηση υδατικών πόρων-τροφής έχει πραγματοποιηθεί σε ποικίλες κλίμακες, από επίπεδο αγροτεμαχίου και επίπεδο υδρολογικής λεκάνης μέχρι παγκόσμιο επίπεδο, ενώ οι τρόποι μεταβολής της αποδοτικότητας της χρήσης του νερού έχουν καθοριστεί και κυμαίνονται από την κατάλληλη επιλογή καλλιεργειών μέχρι τη διαχείριση της άρδευσης.



Εικόνα 1: Το WELF Nexus.

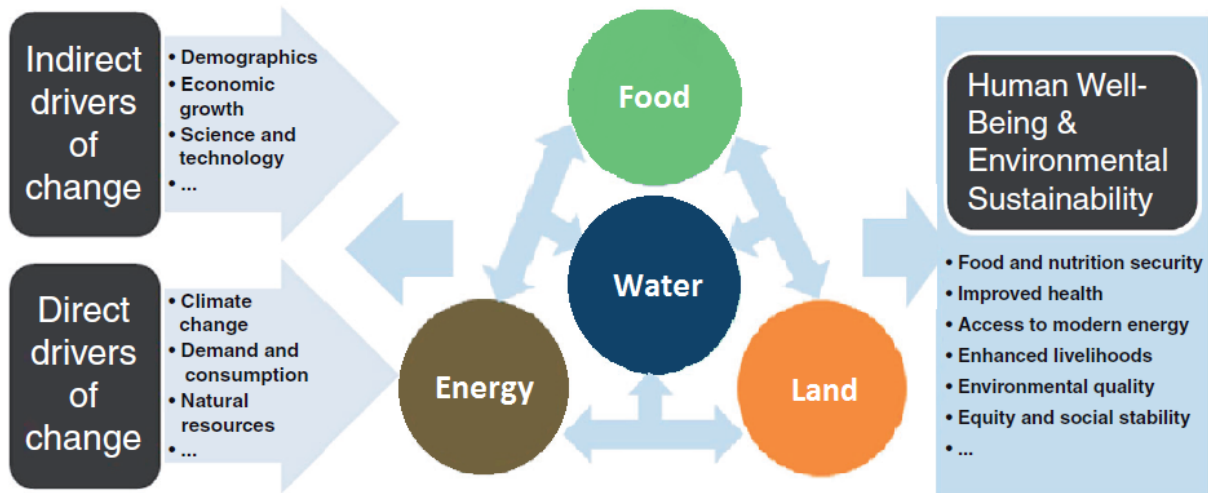
Μικρότερης έκτασης έρευνα έχει γίνει για τις αλληλοσυσχετίσεις των ζευγών εδάφους-ενέργειας, ενέργειας-εδάφους, ενέργειας-νερού και νερού-ενέργειας. Η σύνδεση εδάφους-ενέργειας απέκτησε μεγαλύτερη σημασία με την ανάπτυξη των βιοκαυσίμων, ενώ η σχέση ενέργειας-εδάφους καθορίστηκε από τη ραγδαία αύξηση της χρήσης λιπασμάτων. Με το 43% της αρδευτικής χρήσης νερού να προέρχεται σύμφωνα με τον FAO από απολήψεις υπογείων υδάτων η ενέργεια πλέον αποτελεί απαραίτητο πόρο για την επεξεργασία και τη χρήση των υδατικών πόρων (αφαλατώσεις, επεξεργασία νερού κ.α.) (Siebert, et al., 2010). Αντίστροφα, το νερό παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην παραγωγή συμβατικής ή ανανεώσιμης ενέργειας, (λ.χ. χρήση νερού για ψύξη σε θερμοηλεκτρικά εργοστάσια, υδροηλεκτρική ενέργεια). Παρόλο δε που η χρήση αυτή δεν είναι καταναλωτική και η μεγαλύτερη ποσότητα του νερού επιστρέφει στο υδατικό σύστημα, οι απολήψεις αυτές σε συνδυασμό με την αυξανόμενη έλλειψη νερού επιδρούν στα οικοσυστήματα και στους υδατικούς πόρους κάθε περιοχής και καθιστούν τη χρήση του νερού για παραγωγή ενέργειας ανταγωνιστική απέναντι σε άλλες χρήσεις, όπως λ.χ. η άρδευση.

Μέσα από την κατασκευή μεγάλων φραγμάτων πολλαπλών χρήσεων επιτυγχάνεται η σύνδεση του νερού με την τροφή και την ενέργεια στο πλαίσιο του WELF Nexus. Οι περισσότεροι μεγάλοι ταμιευτήρες σήμερα χτίζονται ως έργα υποδομής πολλαπλού σκοπού, συνδυάζοντας τη χρήση νερού για παραγωγή ενέργειας, την αποθήκευση νερού και τη διάθεσή του για άρδευση ή/και ύδρευση και την αντιπλημμυρική προστασία της κατάντη λεκάνης. Συχνά δε κυρίως λόγω της έλλειψης συντονισμού των οργανισμών για την παραγωγή ενέργειας και την άρδευση, αλλά και σε περιπτώσεις οικοδόμησης του φράγματος σε διακρατικό ποταμό ή περιοχή που γενικότερα διατρέχεται από κάποιο πολιτικό όριο, οι παραπάνω χρήσεις γίνονται ανταγωνιστικές.

Τέλος, η ενεργειακή χρήση για την παραγωγή τροφής δεν περιορίζεται στην άντληση νερού για άρδευση, αλλά περιλαμβάνει επιπροσθέτως τη μηχανοποίηση της παραγωγής, την παραγωγή λιπασμάτων, τη μεταποίηση μετά τη συγκομιδή και τη μεταφορά. Συχνά η σύνδεση ενέργειας-τροφής εμφανίζει αρνητικά αποτελέσματα όπως λ.χ. ο ευτροφισμός και η αποξυγόνωση που προκαλείται στους υδάτινους αποδέκτες, όταν υπερβολικές ποσότητες θρεπτικών συστατικών προερχόμενων από λιπάσματα καταλήγουν σε αυτούς. Από την άλλη πλευρά όμως η ενεργειακά απαιτητική εντατικοποίηση της γεωργίας έχει μειώσει ουσιαστικά την ανάγκη για νέες καλλιεργούμενες εκτάσεις και κατά συνέπεια και την αποψίλωση των δασών επιτυγχάνοντας υψηλότερη γεωργική παραγωγικότητα ανά μονάδα γης, νερού, εργασίας και κεφαλαίου.

Τα προαναφερθέντα μέρη του WELF Nexus και οι αλληλεπιδράσεις τους δεν υφίστανται αποκομμένα, αλλά εντάσσονται σε ένα ευρύτερο πλαίσιο διαδικασιών μετασχηματισμού, τους παράγοντες αλλαγής, οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη. Οι παράγοντες αλλαγής αποτελούν παγκόσμιες τάσεις και επηρεάζουν άμεσα είτε έμμεσα τους φυσικούς πόρους προκαλώντας περιβαλλοντική υποβάθμιση και έλλειψη πόρων, ενώ ταυτόχρονα ασκούν και δέχονται επιρροή από διαφορετικούς οικονομικούς, κοινωνικούς και περιβαλλοντικούς στόχους και συμφέροντα. Οι κυριότεροι παράγοντες αλλαγής είναι οι εξής (Hoff, 2011):

- Η αύξηση του πληθυσμού, η οικονομική ανάπτυξη και οι αλλαγές στον τρόπο ζωής πληθυσμιακών ομάδων που προκαλούν ραγδαία αύξηση στη ζήτηση για φυσικούς πόρους.
- Η επιτακτική ανάγκη καταπολέμησης της φτώχειας, καθώς περίπου το ένα έβδομο του παγκόσμιου πληθυσμού δεν απολαμβάνει επισιτιστική ασφάλεια και έχει περιορισμένη πρόσβαση σε καθαρό νερό, αποχέτευση και σύγχρονες μορφές ενέργειας.
- Η εντεινόμενη αστικοποίηση που δημιουργεί συγκεντρωμένη ζήτηση πόρων και παραγωγή αποβλήτων, μεγαλύτερη κατά κεφαλήν κατανάλωση σε σύγκριση με τις αγροτικές περιοχές και ως εκ τούτου αυξημένη ανάγκη μεταφορών λ.χ. μεταφορές πραγματικού ή εικονικού νερού.



Εικόνα 2: Το διευρυμένο πλαίσιο του WELF Nexus, Πηγή (RINGLER, BHADURI, & LAWFORD, 2013)(τροποποιημένο).

- Η κλιματική αλλαγή, η οποία είναι πιθανό να αυξήσει τις πιέσεις στους φυσικούς πόρους και την ευαισθησία των ελλειμματικών σε νερό ή απόκεντρων περιοχών. Μια προσέγγιση συνδυασμένης διαχείρισης είναι απαραίτητη για να καταστούν τα μέτρα προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή (π.χ. εντατικοποίηση της άρδευσης) λιγότερο απαιτητικά σε ενέργεια και τα μέτρα μετριασμού της (π.χ. βιοκαύσιμα) λιγότερο απαιτητικά σε νερό και γη.
- Η παγκοσμιοποίηση, η οποία μέσω του εμπορίου ή των ξένων άμεσων επενδύσεων (FDI), μπορεί να διαδώσει τεχνολογικές καινοτομίες, να δημιουργήσει θέσεις εργασίας σε αναπτυσσόμενες περιοχές και να παρέχει πόρους εκεί όπου υπάρχει τοπική έλλειψη. Ωστόσο η αυξανόμενη οικονομική αλληλοσύνδεση δίνει την ευκαιρία για απόσπαση πόρων από άλλες περιοχές και εκθέτει χώρες στην αστάθεια της διεθνούς αγοράς. Χρειάζεται προσοχή ώστε τα οφέλη της παγκοσμιοποίησης να μοιραστούν ισότιμα και το περιβαλλοντικό κεφάλαιο να διατηρηθεί.
- Σε πολλές περιπτώσεις η υποβάθμιση των φυσικών πόρων και η έντονη μεταβολή των οικοσυστημάτων έχουν μη αναστρέψιμο χαρακτήρα σε κλίμακα χρόνου σχετική με τη χάραξη πολιτικής (π.χ. ερημοποίηση).

Η καινοτομία, λοιπόν, του WELF Nexus έγκειται ακριβώς στη συνειδητοποίηση πως οποιαδήποτε στρατηγική, η οποία επικεντρώνεται σε έναν τομέα του Nexus χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις διασυνδέσεις μεταξύ των τομέων αλλά και την επίδραση των εξωτερικών δράσεων στους τομείς, κινδυνεύει να έχει σοβαρές μη προβλεπόμενες συνέπειες (World Economic Forum, 2011). Δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις στις οποίες οι αποφάσεις για τη λύση ενός προβλήματος πάρθηκαν χωρίς διατομεακό συντονισμό, στοχεύοντας στη βελτιστοποίηση ενός συγκεκριμένου τομέα και οδήγησαν σε κινδύνους και αστάθειες στους άλλους τομείς, καθώς κάθε επέμβαση μπορεί να μεταβάλει ουσιαστικά τις συνθήκες κάτω από τις οποίες σχεδιάστηκε, για παράδειγμα να επηρεάσει έμμεσα τις κοινωνικές δομές, την κατάσταση των φυσικών πόρων ή τις χρηματοοικονομικές ροές.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα έλλειψης διατομεακού συντονισμού αποτελεί η κατασκευή του φράγματος Ασσουάν στη Αίγυπτο. Το μεγαλύτερο φράγμα της Αιγύπτου με συνολική χωρητικότητα ταμίευσης  $132 \text{ km}^3$  νερού ανεγέρθη τη δεκαετία του 1960 με στόχο τον αποτελεσματικό έλεγχο των πλημμυρών του Νείλου, την ταμίευση των πλημμυρικών όγκων και την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή ενέργειας από το φράγμα αποτελεί περίπου το μισό της παραγόμενης ενέργειας στην Αίγυπτο, ενώ η διαθεσιμότητα αρδευτικού νερού καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου έχει αυξήσει τον αριθμό των ετήσιων περιόδων βλάστησης από μία σε τρεις με αντίστοιχα αποτελέσματα στο αγροτικό εισόδημα. Ωστόσο, έπειτα από την έναρξη λειτουργίας του φράγματος παρατηρήθηκε μια σειρά από δυσάρεστες επιπτώσεις οι οποίες δεν είχαν προβλεφτεί στα στάδια μελέτης του έργου. Το μεγαλύτερο μέρος των φερτών ( $100-140 \cdot 10^6 \text{ tn}$ ), τα οποία για χρόνια αποτελούσαν φυσική λίπανση, τώρα εγκλωβίζεται στον ταμιευτήρα ανάντη του φράγματος με αποτέλεσμα πλέον να απαιτείται η παραγωγή και εφαρμογή τεχνητών λιπασμάτων. Η απόθεση φερτών στο Δέλτα του ποταμού έχει σταματήσει προκαλώντας αρνητικές συνέπειες στη βιοποικιλότητα της περιοχής, συμβάλλοντας στην επιδείνωση των προβλημάτων ακτομηχανικής διάβρωσης και επιφέροντας πλήγμα στον τουρισμό και στον τομέα της αλιείας (Kashef, 1981).

Μια προσέγγιση λοιπόν συνδυασμένης διαχείρισης των φυσικών πόρων βοηθά στην καλύτερη κατανόηση των πολύπλοκων και δυναμικών σχέσεων μεταξύ των υδατικών πόρων, της γης, της τροφής και της ενέργειας, έτσι ώστε να γίνει δυνατή η βιώσιμη διαχείριση των πόρων. Μας εξαναγκάζει να σκεφτούμε τον αντίκτυπο που μπορεί να έχει μια απόφαση για έναν τομέα στους υπόλοιπους τομείς. Έτσι, προβλέποντας πιθανούς συμβιβασμούς και συνέργειες, μπορούμε να σχεδιάσουμε, να αξιολογήσουμε και να βάλουμε σε σειρά προτεραιότητας τις επιλογές αντιμετώπισης που είναι βιώσιμες για όλους τους διαφορετικούς τομείς. Πέραν των ανωτέρω, η προσέγγιση αυτή δίνει την ευκαιρία για διάλογο και συνεργασία με τα ενδιαφερόμενα μέρη με στόχο τη βέλτιστη διαχείριση των συμβιβασμών και τη μεγιστοποίηση των συνολικών οφελών. Ιδανικά τα ενδιαφερόμενα μέρη καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα, περιλαμβάνοντας τοπικές διοικήσεις και εθνικές κυβερνήσεις, υπηρεσίες ανάπτυξης, εθνικούς και διεθνείς οργανισμούς, ερευνητικά ιδρύματα και πανεπιστήμια, μη κυβερνητικές οργανώσεις, την κοινωνία και τον ιδιωτικό τομέα.

Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί πως υπάρχουν διαφορετικές μορφές του Nexus, οι οποίες ποικίλλουν ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους, τους στόχους και την αντίληψη των κινητήριων δυνάμεων. Πολλές από αυτές τις μορφές περιορίζονται στη μελέτη των συνδέσεων μεταξύ νερού, τροφής και ενέργειας, ενώ άλλες περιλαμβάνουν τους ορυκτούς πόρους και τα οικοσυστήματα (Food and Agriculture Organisation of the United Nations, 2014).

Σύμφωνα με τον Hoff (2011) οι στόχοι της συνδυασμένης διαχείρισης των φυσικών πόρων (νερό-γη-τροφή-ενέργεια) περιλαμβάνουν την προώθηση της ασφάλειας υδατικών πόρων και της επισιτιστικής και ενεργειακής ασφάλειας για όλους, την επίτευξη ισότιμης και βιώσιμης ανάπτυξης και τη μετακίνηση προς ένα παραγωγικότερο περιβάλλον ανθεκτικό στην αλλαγή. Οι στόχοι αυτοί επιτυγχάνονται με τη λήψη οικονομικών μέτρων, την κατάλληλη διακυβέρνηση, την αξιοποίηση της καινοτομίας καθώς και την ανάληψη δράσης σύμφωνα με τρεις

Βασικές αρχές: την επένδυση στη διατήρηση των υπηρεσιών των οικοσυστημάτων, την αύξηση της παραγωγικότητας και την επίτευξη της ισότιμης πρόσβασης και των φτωχότερων στους φυσικούς πόρους.

Οι ανωτέρω αρχές αναδεικνύουν τη στενή σχέση του WELF Nexus με την έννοια της Πράσινης Οικονομίας (Green Economy) και των Στόχων για Αειφόρο Ανάπτυξη (Sustainable Development Goals), πρωτοβουλία που αναπτύχθηκε κατά τα προπαρασκευαστικά στάδια του Συνεδρίου των Ηνωμένων Εθνών για την Αειφόρο Ανάπτυξη, που πραγματοποιήθηκε στο Ρίο ντε Τζανέιρο τον Ιούνιο του 2012 (Rio+20). Οι Στόχοι για την Αειφόρο ανάπτυξη αποτελούν μετεξέλιξη των Αναπτυξιακών Στόχων της Χιλιετίας (Millennium Development Goals) με ατζέντα από το 2015 και μετά για τη διασφάλιση στα συμμετέχοντα κράτη μιας περιβαλλοντικά και κοινωνικά βιώσιμης ανάπτυξης, δηλαδή ανάπτυξης «...που ικανοποιεί τις ανάγκες των σύγχρονων γενεών χωρίς να θέτει σε κίνδυνο την ικανότητα των επόμενων γενεών να ικανοποιήσουν τις δικές τους ανάγκες...» (Brundtland & World Commission on Environment and Development, 1987).

Μέσα από τις διαβουλεύσεις για τη θέσπιση και την εφαρμογή των SDGs έγινε φανερή η αναγκαιότητα της σύνδεσης των στόχων βιωσιμότητας με τις αρχές της συνδυασμένης διατομεακής διαχείρισης. Η μέχρι στιγμής εφαρμοζόμενη κατακόρυφη διαδικασία, που ξεκινά με τη θέσπιση ενός υπερκείμενου στόχου και συνεχίζει με τον καθορισμό των επιμέρους υποστηρικτικών επιδιώξεων, καθιστά δύσκολο να τεθούν επί τάπητος οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υπερκείμενων στόχων και των πόρων που απαιτούνται. Αντ' αυτής προτείνεται η θέσπιση διατομεακών επιμέρους επιδιώξεων (nexus targets ή integrated targets) που θα εξυπηρετούν πολλαπλούς υπερκείμενους σκοπούς (Dodds & Bartram, 2014). Για παράδειγμα, η επιμέρους επιδίωξη για βελτίωση της πρόσβασης σε πόσιμο νερό εξυπηρετεί πολλαπλούς στόχους αναφορικά με την προαγωγή της υγείας, της εκπαίδευσης, της επισιτιστικής ασφάλειας και της ανάπτυξης.

Τόσο οι Στόχοι για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη όσο και η χρήση της συνδυασμένης διαχείρισης των φυσικών πόρων απευθύνονται προς όλα τα συμμετέχοντα κράτη με διαφοροποιούμενη ωστόσο κατά περίπτωση εφαρμογή. Καθώς τα κράτη αντιμετωπίζουν διαφορετικές μεταξύ τους προκλήσεις τα ζητούμενα αναπτυξιακά αποτελέσματα θα επιτευχθούν μέσα από την επιδίωξη προγραμμάτων στόχων με διαφοροποιούμενη ιεραρχία. Ακόμη και εντός κάθε κράτους, εφόσον οι φορείς λήψης αποφάσεων οφείλουν να λαμβάνουν υπόψη τις τοπικές περιβαλλοντικές, οικονομικές και πολιτικές ιδιαιτερότητες, η διατομεακή διαχείριση προς υποστήριξη των SDGs οφείλει να λαμβάνει χώρα σε αντιστοιχο επίπεδο με το επίπεδο για το οποίο θα ληφθούν οι αποφάσεις (Weitz, Nilsson, Huber-Lee, Davis, & Hoff, 2014).

## 1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕΛΕΤΗΣ

Το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας περιλαμβάνει τη μεγαλύτερη πεδινή έκταση στην Ελλάδα και σύμφωνα με τα τελευταία διαθέσιμα στοιχεία της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (2000) το 12% της συνολικής γεωργικής έκτασης στη χώρα. Ωστόσο, αποτελεί το πιο ελλειμματικό διαμέρισμα της ηπειρωτικής χώρας σε νερό καθώς οι τοπικοί επιφανειακοί και υπόγειοι υδατικοί πόροι παρά την ενισχυσή τους από τις εκροές του ταμιευτήρα Πλαστήρα δεν επαρκούν για την κάλυψη των αρδευτικών



αναγκών(Κουτσογιάννης κ.α., 2008). Ταυτόχρονα, το Θεσσαλικό πεδίο έπειτα από την αξιολόγηση των στοιχείων ποιότητας των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων του και τον εντοπισμό υψηλών συγκεντρώσεων  $\text{NO}_3$  σύμφωνα με τα κριτήρια της Οδηγίας 91/676/ΕΟΚ, έχει χαρακτηριστεί με υπουργική απόφαση ως ευπρόσβλητη από νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης ζώνη. Είναι φανερό λοιπόν ότι η διαχείριση των υδατικών πόρων στο Υδατικό Διαμέρισμα θέτει προκλήσεις ως προς τις επιδράσεις των μέτρων που θα ληφθούν τόσο στον υδρολογικό κύκλο της λεκάνης όσο και στους τομείς της γεωργικής παραγωγής, ενέργειας και εδάφους.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί αφενός η χρήση τηλεπισκόπησης καθώς και του λογισμικού SWAT για την κατασκευή υδρολογικού μοντέλου της λεκάνης απορροής του ποταμού Πηνειού και αφετέρου η εκτέλεση σε αυτό πέντε διαφορετικών γεωργικών σεναρίων για τη διερεύνηση των επιπτώσεών τους τόσο στην ποιοτική και ποσοτική κατάσταση των υδατικών πόρων στη λεκάνη όσο και στους συνδεδεμένους με το νερό τομείς της ενέργειας, γης και τροφής. Απώτερος στόχος της μελέτης είναι η διερεύνηση της βιωσιμότητας της διαχείρισης της λεκάνης στο πλαίσιο της συνδυασμένης διατομεακής διαχείρισης του υδατικού, ενεργειακού, εδαφικού και επισιτιστικού τομέα. Πέρα από την προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης, τα εκτελεσθέντα σενάρια περιλαμβάνουν μεταβολή των εφαρμοζόμενων γεωργικών πρακτικών στις υφιστάμενες αρδευόμενες καλλιέργειες και πιο συγκεκριμένα, εφαρμογή ελλειμματικής άρδευσης, μειωμένης λίπανσης αζώτου, συνδυασμού αυτών και εφαρμογή γεωργίας ακριβείας. Τέλος, η χρήση των λογισμικών ERMapper, eCognition και ArcGIS και αξιοποίηση τηλεπισκοπικών δορυφορικών δεδομένων στοχεύει στην παραγωγή χάρτη χρήσεων γης για το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας για το έτος 2013.

### 1.3 ΣΤΟΧΟΙ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Οι πρωταρχικοί και δευτερεύοντες στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Παραγωγή χάρτη χρήσεων γης για το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας με χρήση των λογισμικών ERMapper, eCognition και ArcGIS.
  - Προμήθεια δορυφορικών εικόνων και δεδομένων αναφορικά με τις υφιστάμενες καλλιέργειες από τη βάση του Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε.για την περιοχή μελέτης.
  - Κατασκευή μωσαϊκού και κατάλληλου έγχρωμου σύνθετου με χρήση του προγράμματος ERMapper.
  - Εκτέλεση επαναλαμβανόμενων επιβλεπόμενων ταξινομήσεων με χρήση του λογισμικού αντικειμενοστραφούς ανάλυσης εικόνας eCognition.
  - Αξιολόγηση της ακρίβειας των εκτελεσθέντων ταξινομήσεων και επιλογή της ταξινόμησης με την υψηλότερη ακρίβεια.
  - Σύνθεση του τελικού χάρτη χρήσεων γης στο λογισμικό ArcGIS.
2. Ανάπτυξη, βαθμονόμηση και επικύρωση του μοντέλου της περιοχής μελέτης με χρήση του λογισμικού SWAT.
  - Συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων εισόδου.
  - Παραμετροποίηση του μοντέλου.

- Εκτέλεση χειροκίνητης βαθμονόμησης και επαλήθευσης για τις παραμέτρους που σχετίζονται με τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού.
  - Χρήση μέτρων επίδοσης και γραφικών μεθόδων για την αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου.
3. Ορισμός, κατασκευή και εκτέλεση των σεναρίων μεταβολής γεωργικών πρακτικών.
- Κατάλληλη παραμετροποίηση του μοντέλου για την εκτέλεση των σεναρίων.
  - Εξαγωγή αποτελεσμάτων.
4. Επεξεργασία των αποτελεσμάτων του μοντέλου και εκτίμηση των επιπτώσεων των σεναρίων στους υδατικούς πόρους, το έδαφος, ενέργεια και την τροφή στην περιοχή μελέτης.
- Βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τη συνδυασμένη διατομεακή διαχείριση υδατικών πόρων, γης, τροφής, ενέργειας.
  - Επιλογή των μεγεθών-δεικτών που θα παρουσιαστούν.
  - Σχολιασμός των αποτελεσμάτων κάθε σεναρίου.

#### 1.4 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ

Το 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή στο αντικείμενο μελέτης της διπλωματικής εργασίας. Αρχικά γίνεται αναφορά στις υφιστάμενες πιέσεις στους φυσικούς πόρους και τις προκλήσεις του μέλλοντος. Παρουσιάζεται η ανάγκη για υιοθέτηση ενός πλαισίου συνδυασμένης διαχείρισης φυσικών πόρων, νερού τροφής και ενέργειας (WELF Nexus). Έπειτα από την επεξήγηση της έννοιας της συνδυασμένης διατομεακής διαχείρισης περιγράφεται η ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των συμμετέχοντων τομέων, η επίδραση των παραγόντων αλλαγής καθώς και οι στόχοι αυτού του πλαισίου διαχείρισης, ενώ παρατίθενται παραδείγματα επιτυχούς και ελλειπούς εφαρμογής του. Αναδεικνύεται επίσης η σύνδεση της συνδυασμένης διαχείρισης με πρωτοβουλίες όπως η Πράσινη Ανάπτυξη και οι Στόχοι για Βιώσιμη Ανάπτυξη (SDGs). Τέλος, παρουσιάζεται το αντικείμενο, οι πρωτεύοντες και δευτερεύοντες στόχοι και η δομή της παρούσας εργασίας.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο επιχειρείται η περιγραφή των γενικών γνωρισμάτων της περιοχής μελέτης. Παρατίθενται συνοπτικά τα διοικητικά, γεωμορφολογικά, κλιματικά και ανθρωπογενή χαρακτηριστικά για το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας. Το κεφάλαιο κλείνει με μια παρουσίαση της ποιοτικής και ποσοτικής κατάστασης των υδατικών πόρων στη λεκάνη του Πηνειού, των υφιστάμενων έργων αξιοποίησης καθώς και των καταγεγραμμένων χρήσεων γης και υδάτων.

Το επόμενο κεφάλαιο ξεκινά με μια εισαγωγή στις έννοιες της τηλεπισκόπησης και φωτοερμηνείας, τις κύριες εφαρμογές τους, μερικές πληροφορίες για το δορυφόρο Landsat 8-OLI/TRS και τον τρόπο απόκτησης των απαιτούμενων δορυφορικών εικόνων. Στη συνέχεια, επιχειρείται η παρουσίαση των χρησιμοποιούμενων προγραμμάτων, ERMapper, eCognition και ArcGIS, ενώ περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία παραγωγής του χάρτη χρήσεων γης, από τη δημιουργία του μωσαϊκού για την περιοχή μελέτης μέχρι την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης και τη σύνθεση του τελικού χάρτη.

Το 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στο λογισμικό υδρολογικής προσομοίωσης SWAT. Παρατίθενται τα βασικά θεωρητικά στοιχεία που αφορούν το πρόγραμμα και περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία εισαγωγής των απαραίτητων δεδομένων στο πρόγραμμα, παραμετροποίησης των διαφόρων στοιχείων της περιοχής μελέτης, βαθμονόμησης και επαλήθευσης του μοντέλου.

Το 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο αφορά την κατασκευή και εκτέλεση των πέντε επιλεγμένων σεναρίων μεταβολής των γεωργικών πρακτικών στις αρδευόμενες εκτάσεις της λεκάνης απορροής. Πραγματοποιείται περιγραφή των πέντε σεναρίων και της απαραίτητης παραμετροποίησης του μοντέλου για κάθε ένα από αυτά. Παρατίθενται τα κυριότερα αποτελέσματα του μοντέλου από την εκτέλεση κάθε σεναρίου και με βάση αυτά επιχειρείται μια ποσοτικοποίηση των αναμενόμενων επιπτώσεων στους τομείς των υδατικών πόρων, της γης, της τροφής και της ενέργειας.

Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο συνοψίζονται τα γενικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

Στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρατίθενται προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση.



## ΚΕΦ. 2: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 2.1 ΔΙΟΙΚΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ

Περιοχή μελέτης αποτελεί η λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού συνολικής έκτασης περίπου 10.550 km<sup>2</sup>. Ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας (ΥΔ08), ένα από τα 14 Υδατικά Διαμερίσματα στα οποία έχει χωριστεί η χώρα με το Ν. 1739/1987 «Διαχείριση των υδατικών πόρων και άλλες διατάξεις» (ΦΕΚ Α' 201/19-20.11.1987) του Υπουργείου Ανάπτυξης σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ.

τ



Εικόνα 3: Τα Υδατικά Διαμερίσματα της Ελλάδας και η Λεκάνη Απορροής του Ποταμού Πηνειού.

Το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας σχεδόν συμπίπτει με το αντίστοιχο γεωγραφικό διαμέρισμα, περιλαμβάνοντας σχεδόν ολόκληρο το Νομό Λάρισας, πολύ μεγάλο μέρος των Νομών Μαγνησίας, Τρικάλων και Καρδίτσας καθώς επίσης και ένα μικρό μέρος των Νομών Πιερίας, Γρεβενών και Φθιώτιδας. Η λεκάνη απορροής του Πηνειού

ποταμού καλύπτει σχεδόν το σύνολο του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας, έκτασης 13377 km<sup>2</sup>, και περιλαμβάνει τμήματα των προαναφερθέντων νομών όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 4: Όρια των νομών στη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού.

Οι κυριότεροι φορείς Τοπικής Αυτοδιοίκησης που εμπλέκονται στην έρευνα, αξιοποίηση, χρήση και προστασία των υδατικών πόρων του διαμερίσματος είναι οι εξής:

- οι Διευθύνσεις Υδάτων των Περιφερειών Θεσσαλίας, Κεντρικής Μακεδονίας, Στερεάς Ελλάδας και Δυτικής Μακεδονίας,
- οι Διευθύνσεις Περιβάλλοντος και Χωροταξίας των αντίστοιχων Περιφερειών,
- οι Διευθύνσεις Αυτοδιοίκησης και Αποκέντρωσης σε κάθε νομό,
- οι ΔΕΥΑ,
- οι Διευθύνσεις Εγγείων Βελτιώσεων και Υδατικών Πόρων σε κάθε νομό,
- οι Γενικοί/Τοπικοί Οργανισμοί Εγγείων Βελτιώσεων.

## 2.2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ & ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

Η γεωμορφολογική εικόνα του Υδατικού Διαμερίσματος είναι απλή. Στο κέντρο του εκτείνεται το Θεσσαλικό Πεδίο, ένα τεκτονικό βύθισμα το οποίο περιβάλλεται από τον Όλυμπο και τα Καμβούνια Όρη στα βόρεια, την οροσειρά της Πίνδου στα δυτικά, το όρος Όθρυς στα νότια, την Όσσα και την οροσειρά Πηλίου στα ανατολικά. Το Θεσσαλικό Πεδίο χωρίζεται σε ανατολικό και δυτικό από τα Χαλκηδόνια όρη που συναντώνται στο μέσον του. Το μέσο υψόμετρο του διαμερίσματος είναι 285m.

Όσον αφορά τις γεωτεκτονικές ζώνες και ενότητες που αναπτύσσονται σε αυτό το υδατικό διαμέρισμα, αυτές είναι οι ακόλουθες:

- η Ενότητα Όσσας, που συναντάται στο βορειοδυτικό τμήμα και συνίσταται από φυλλίτες, μάρμαρα και δολομίτες,
- η Πελαγονική Ζώνη, που βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα του διαμερίσματος με παλαιά μεταμορφωμένα σχιστογενευσιακά και ανθρακικά πετρώματα,
- η Υποπελαγονική Ζώνη, που συναντάται στην κεντρική Θεσσαλία με σχιστοκερατολιθικούς σχηματισμούς και οφιολιθικά πετρώματα και
- η Ζώνη της Πίνδου, που αναπτύσσεται στα δυτικά όρια της πεδιάδας με ασβεστολιθικά πετρώματα, σχιστοκερατόλιθους και φλύσχη.

Το ανατολικό και δυτικό τμήμα του Θεσσαλικού Πεδίου αποτελούν διαφορετικούς προσχωματικούς υδροφορείς-υδρογεωλογικές λεκάνες. Διαχωρίζονται από τη λοφώδη περιοχή νεογενών αποθέσεων (Ταουσάνη), η οποία θεωρείται ξεχωριστή υδρογεωλογική ενότητα, και περιβάλλονται από καρστικές ενότητες με σημαντική υδροφορία.

### 2.3 ΚΛΙΜΑ

Το Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας διαιρείται σε τρεις περιοχές, σε κάθε μία από τις οποίες διαμορφώνεται διαφορετικό κλίμα. Πιο συγκεκριμένα, η ανατολική παράκτια και ορεινή περιοχή παρουσιάζει μεσογειακό κλίμα, η κεντρική πεδινή περιοχή ηπειρωτικό κλίμα και η δυτική ορεινή ορεινό κλίμα.

Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 16 ως 17°C, ενώ το ετήσιο θερμομετρικό εύρος ξεπερνά τους 22°C, με πιο θερμούς μήνες τον Ιούλιο και τον Αύγουστο και πιο ψυχρούς τον Ιανουάριο, το Φεβρουάριο και το Δεκέμβριο. Επιπρόσθετα, κατά την περίοδο Νοεμβρίου-Απριλίου εμφανίζονται συχνά παγετοί.

Όσον αφορά το ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων είναι αυξημένο στα ορεινά τμήματα και μειώνεται στο κεντρικό πεδινό τμήμα του Υδατικού Διαμερίσματος. Ενδεικτικά το ετήσιο ύψος βροχής διαμορφώνεται στα 468 mm στο σταθμό Λάρισας, 550 mm στο σταθμό Τυρνάβου και 1.142 mm στον ορεινό σταθμό του Μουζακίου. Στο σύνολο του διαμερίσματος η μέση ετήσια επιφανειακή βροχόπτωση εκτιμάται στα 678 mm, με πιο βροχερό το χρονικό διάστημα από τον Οκτώβριο ως τον Ιανουάριο και πιο ξηρούς μήνες τον Ιούλιο και Αύγουστο. Οι χιονοπτώσεις αποτελούν συχνό φαινόμενο, ιδιαίτερα στα ορεινά του διαμερίσματος, με την έντασή τους να αυξάνεται από τα νότια προς τα βόρεια και από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Οι χαλαζοπτώσεις είναι επίσης συχνές κυρίως κατά τους μήνες Μάιο και Ιούνιο στα βόρεια του διαμερίσματος και κατά τους μήνες Φεβρουάριο ως Απρίλιο στο νοτιοανατολικό τμήμα.

Η μέση ετήσια σχετική υγρασία κυμαίνεται από 67% ως 72%.

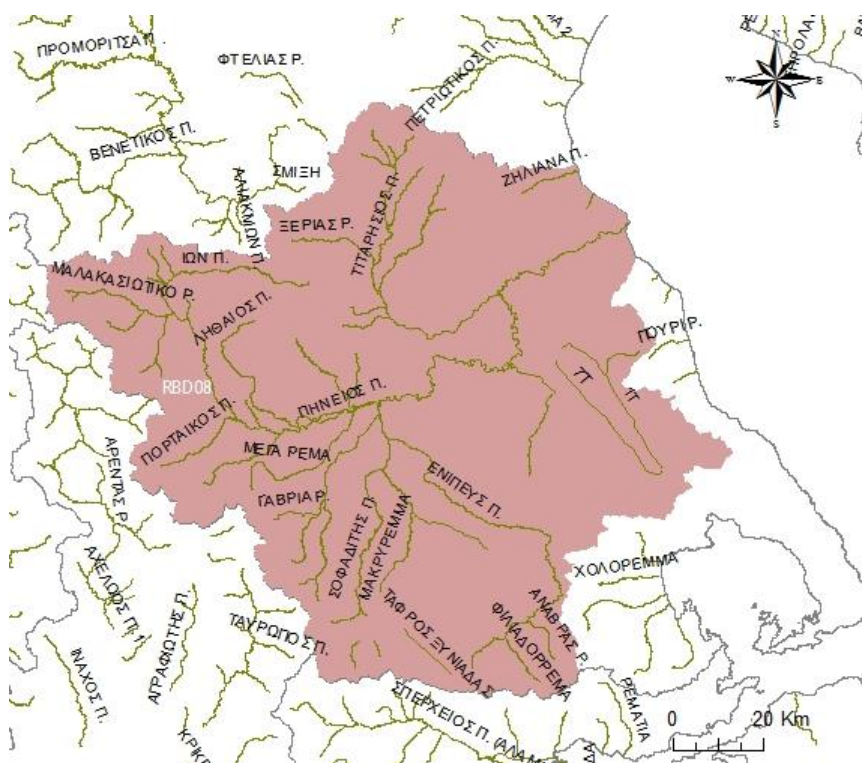
### 2.4 ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ & ΑΝΑΠΤΥΞΗ

Το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας συμπίπτει σχεδόν με την Περιφέρεια Θεσσαλίας, μια σχετικά αναπτυγμένη περιφέρεια στο κέντρο της χώρας. Στο διαμέρισμα αυτό ανήκει η μεγαλύτερη πεδιάδα της χώρας, η οποία ωστόσο αντιμετωπίζει ολοένα και πιο επιτακτικό πρόβλημα έλλειψης υδατικών πόρων. Επιπρόσθετα, σε αυτό βρίσκεται και η πόλη του Βόλου, ένα σημαντικό αστικό κέντρο με ανώτερου βαθμού υπηρεσίες, τεχνική υποδομή διεθνούς επιπέδου και με μια από τις μεγαλύτερες και παλαιότερες μεταλλουργικές βιομηχανίες της χώρας. Επίσης, στην περιοχή αυτή

βρίσκονται μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς όλων των εποχών, τόποι φυσικού κάλλους και αξιόλογες ακτές. Σημαντικές δε είναι οι οικολογικές αλλοιώσεις, ειδικά στα τουριστικώς ανεπτυγμένα σημεία, καθώς και η ρύπανση του Πηνειού και του Παγασητικού κόλπου.

Ο πληθυσμός του εν λόγω Υδατικού Διαμερίσματος με βάση τα απογραφικά στοιχεία της ΕΣΥΕ υπολογίστηκε το 2001 σε 750.445 κατοίκους και συγκεντρώνεται στα δύο μεγάλα αστικά κέντρα της Λάρισας και του Βόλου, στα μικρότερα αστικά κέντρα (Τρίκαλα, Καρδίτσα, Τύρναβος) και σε 32 ημιαστικά. Η κατανομή της απασχόλησης και του ΑΕΠ στον πρωτογενή, δευτερογενή και τριτογενή τομέα το 2001 ήταν 33.5%, 26.1% και 40.3% αντίστοιχα, ενώ το κατά κεφαλήν ΑΕΠ στο διαμέρισμα είναι χαμηλότερο από το μέσο όρο της χώρας. Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι στη Θεσσαλία παράγεται πάνω από το 10% της αγροτικής παραγωγής της χώρας και το 40% της συνολικής παραγωγής βαμβακιού.

## 2.5 ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ



Εικόνα 5: Το υδρογραφικό δίκτυο στην περιοχή της λεκάνης απορροής του Πηνειού.

Στο Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας εκτός της κύριας υδρολογικής λεκάνης του, αυτής του ποταμού Πηνειού με έκταση περίπου 10.550 km<sup>2</sup>, υπάρχουν και μικρότερες λεκάνες, όπως οι λεκάνες Πηλίου, με συνολική έκταση περίπου 2.800 km<sup>2</sup>. Οι κυριότεροι παραπόταμοι του Πηνειού είναι προς τα νότια ο Ενιπέας, ο Φαρσαλιώτης, ο Σοφαδίτης και ο Καλέντζης, προς τα δυτικά-νοτιοδυτικά ο Πάμισος και ο Πορταϊκός, και στο βόρειο μέρος ο Ληθαίος, ο Νεοχωρήτης και ο Τιταρήσιος. Η μέση μηνιαία φυσική απορροή της λεκάνης του Πηνειού στη θέση Πυργετός (κοντά στις εκβολές) κυμαίνεται από 28.8 hm<sup>3</sup> τον Αύγουστο έως 496.2 hm<sup>3</sup> το Μάρτιο, ενώ η ετήσια φυσική απορροή στην ίδια θέση είναι 2557.8 hm<sup>3</sup> (Κουτσογιάννης, και συν., 2008).



Επιπρόσθετα, στη λεκάνη του ποταμού Πηνειού συμπεριλαμβάνεται και η κλειστή λεκάνη της λίμνης Κάρλας, το σύστημα της οποίας βρίσκεται υπό διαμόρφωση. Η Κάρλα σήμερα αποτελεί μια τεχνητή λίμνη, που βρίσκεται στη θέση της φυσικής λίμνης πριν την αποξήρανση της το 1962. Η έκταση της κλειστής λεκάνης υπολογίζεται σε περίπου 1.050 km<sup>2</sup> και η μέση ετήσια απορροή της υπολογίζεται σε 38 hm<sup>3</sup>. Η απορροή αυτή θεωρείται ρυθμισμένη, καθώς επηρεάζεται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες στην περιοχή (π.χ. αρδεύσεις).

Συμπεριλαμβάνοντας τις καθαρές ετήσιες εισροές στη λεκάνη του Πηνειού από το φράγμα Πλαστήρα, το μέσο ετήσιο επιφανειακό υδατικό δυναμικό της λεκάνης του Πηνειού ανέρχεται σε 2.700hm<sup>3</sup> (Κουτσογιάννης, και συν., 2008). Σημειώνεται ότι στον υπολογισμό του επιφανειακού υδατικού δυναμικού δεν έχει συμπεριληφθεί η ρυθμισμένη απορροή του φράγματος Σμοκόβου, το οποίο δεν είχε τεθεί ακόμα σε επιχειρησιακή λειτουργία. Αντ' αυτού συμπεριελήφθη η επιφανειακή απορροή του τμήματος της λεκάνης που απορρέει στον ταμιευτήρα Σμοκόβου.

Όσον αφορά την ποιοτική κατάσταση των επιφανειακών υδάτινων σωμάτων, επισημαίνεται ότι το σύνολο των υδάτινων σωμάτων της λεκάνης ικανοποιεί κατ' αρχήν βασικά αγρονομικά κριτήρια για άρδευση γεωργικών εκτάσεων. Επιπρόσθετα, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των υδάτων καλύπτουν τις προϋποθέσεις της κατηγορίας A2 και κατά τόπους A1 της Οδηγίας 75/440/ΕΟΚ για τα επιφανειακά ύδατα που είναι κατάλληλα για πρόσληψη νερού για ύδρευση μετά από επεξεργασία. Σημειώνεται ωστόσο ότι σε ορισμένες θέσεις κυρίως κατά τους θερινούς μήνες έχουν καταγραφεί υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών και φωσφορικών που παραβιάζουν τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές της Οδηγίας 75/440/ΕΟΚ, οφειλόμενες στην απορροή από τις εκτεταμένες καλλιεργούμενες εκτάσεις της λεκάνης. Ταυτόχρονα, έχουν καταγραφεί υψηλές τιμές ορισμένων βαρέων μετάλλων όπως το χρώμιο, το νικέλιο και ο χαλκός που παραβιάζουν τις ενδεικτικές τιμές ποιότητας των υδάτων που καθορίζονται από την υπ' αριθμόν 2/1-2-2001 Πράξη Υπουργικού Συμβουλίου. Σχετικά με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που αφορούν τη ρύπανση από λύματα, αυτά είναι ικανοποιητικά, παρόλο που ο Πηνειός και οι παραπόταμοι του είναι αποδέκτες αστικών λυμάτων. Τέλος, στη λίμνη Πλαστήρα ικανοποιούνται τα κριτήρια για τις διάφορες χρήσεις νερού, ενώ δεν παρατηρείται πρόβλημα ευτροφισμού.

Όπως προαναφέρθηκε, στο εν λόγω Υδατικό Διαμέρισμα αναπτύσσονται προσχωματικές υδροφορίες και καρστικές υδρολογικές ενότητες. Οι υπόγειοι υδροφορείς τροφοδοτούνται είτε από επιφανειακά νερά είτε από τα δυτικά και νότια όρια της λεκάνης. Συνοπτικά αναφέρονται οι Κώνοι Πηνειού-Πορταϊκού-Πάμισου και ο Κώνος Σοφαδίτη στη δυτική Θεσσαλία, η λεκάνη Τύρναβου στην ανατολική Θεσσαλία καθώς και οι καρστικές ενότητες Κόζιακα και κρυσταλλικών ασβεστολίθων κεντρικής Θεσσαλίας. Αναλυτικός χάρτης των υπόγειων υδροφορέων του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας βρίσκεται στο παράρτημα. Συνολικά για το Υδατικό Διαμέρισμα η έκταση των υπόγειων υδροφορέων υπολογίζεται σε 12.500 km<sup>2</sup> εκ των οποίων η πλειοψηφία (10.500 km<sup>2</sup>) ανήκει στην λεκάνη του ποταμού Πηνειού. Το δε ετήσιο υπόγειο υδατικό δυναμικό υπολογίζεται σε 590 hm<sup>3</sup> στους προσχωματικούς υδροφορείς και 210 hm<sup>3</sup> για τα καρστικά συστήματα, το οποίο δεν εκφορτίζεται εντός του διαμερίσματος ή δεν είναι εκμεταλλεύσιμο λόγω υφαλμύρωσης (Κουτσογιάννης, και συν., 2008). Τις τελευταίες δεκαετίες οι ποσότητες που αντλούνται από τους

υπόγειους υδροφορείς της Θεσσαλίας γενικά υπερβαίνουν τις ανανεώσιμες ποσότητες. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει σε πτώσεις στάθμης που σε σημεία φτάνουν και τα 100m.

Οι περιοχές ανατολικής και δυτικής Θεσσαλίας έχουν αναγνωριστεί και οριοθετηθεί ως ευπρόσβλητη ζώνη με την ΚΥΑ 19652/1906/5-08-98. Σε ορισμένες θέσεις έχουν καταγραφεί στους υπόγειους υδροφορείς υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών, νιτρωδών και αμμωνιακών, οι οποίες υπερβαίνουν τα συνιστώμενα ανώτατα όρια και αποδίδονται στις έντονες αγροτικές δραστηριότητες και στην παρουσία σημειακών πηγών ρύπανσης, όπως είναι οι κτηνοτροφικές ή βιομηχανικές μονάδες στις περιοχές αυτές. Ωστόσο για την πλειοψηφία των υπόγειων υδροφορέων δεν υπάρχουν ενδείξεις ρύπανσης που να υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια της νομοθεσίας. Συγκεκριμένα οι συγκεντρώσεις αζωτούχων ενώσεων είναι χαμηλές παρά την ύπαρξη σημαντικών σημειακών και μη ρυπαντών λόγω της μεγάλης δυναμικότητας των υδροφορέων, ενώ η παρουσία αργιλικών πετρωμάτων στις προσχώσεις, που απορροφούν τμήμα των ρυπαντικών φορτίων, συμβάλλει στην προστασία των υπόγειων υδάτων.

## **2.6 ΈΡΓΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ**

Μέχρι σήμερα έχουν κατασκευαστεί δύο μεγάλα έργα για την αξιοποίηση των επιφανειακών υδατικών πόρων στη λεκάνη, οι ταμιευτήρες πολλαπλού σκοπού Πλαστήρα και Σμοκόβου. Μέσω του φράγματος Πλαστήρα επιτυγχάνεται η εκτροπή νερού από το Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Στερεάς Ελλάδας και συγκεκριμένα από τον Ταυρωπό, παραπόταμο του Αχελώου, στο Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας, που χρησιμοποιείται για άρδευση, ύδρευση και παραγωγή υδροηλεκτρικής. Το φράγμα και η τεχνητή λίμνη Σμοκόβου στον ποταμό Σοφαδίτη καθώς και η σήραγγα εκτροπής Λεονταρίου κατασκευάστηκαν με στόχο την εξασφάλιση νερού για άρδευση έως και 2.500 km<sup>2</sup>, ύδρευση και παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας και ξεκίνησαν να λειτουργούν πιλοτικά το 2003.

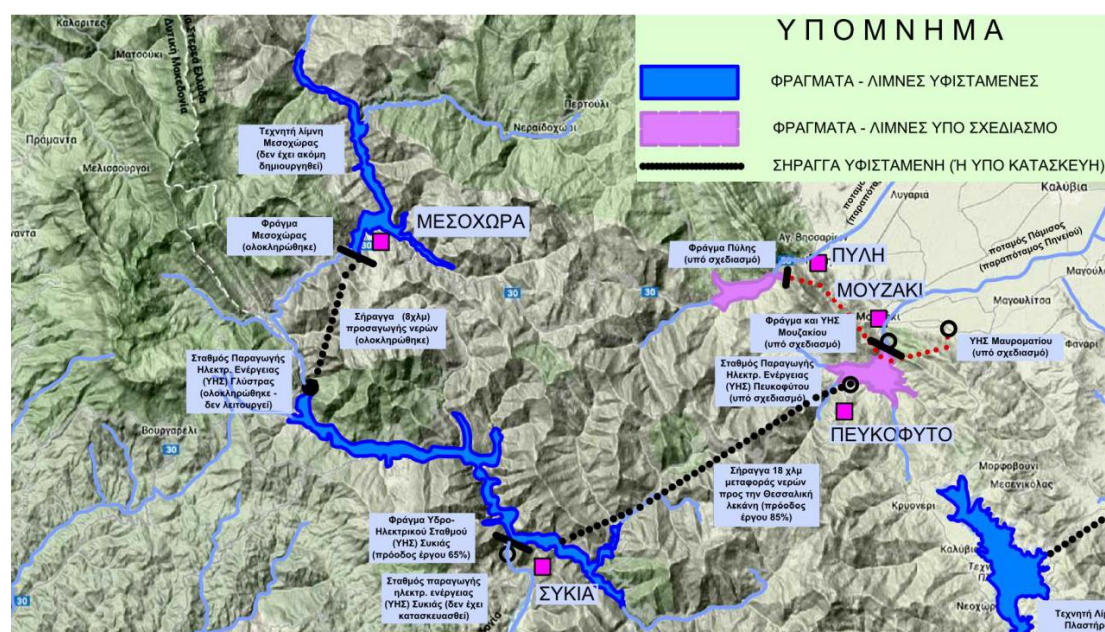
Η επαναδημιουργία της λίμνης Κάρλας αποτελεί ένα ακόμη σημαντικό έργο στην Περιφέρεια Θεσσαλίας, το οποίο συμβάλλει στη γενικότερη περιβαλλοντική αποκατάσταση και προστασία της περιοχής. Πέραν τούτου αποσκοπεί και στην αντιπλημμυρική προστασία της ευρύτερης περιοχής όπως και στην αποκατάσταση των υποβαθμισμένων συνθηκών του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα των γειτονικών περιοχών με την ταυτόχρονη εξασφάλιση επιφανειακών και υπόγειων νερών για άρδευση έως και 1000 km<sup>2</sup> καθώς και υπόγειων νερών για την ύδρευση του Βόλου. Η αρχική λίμνη είχε έκταση ως 195 km<sup>2</sup> και μέσο βάθος ως τα 6 m. Το Δεκέμβριο του 2010 άρχισε η άντληση νερού από τον ποταμό Πηνειό που τροφοδοτεί τη λίμνη, η οποία θα έχει έκταση περίπου 38 km<sup>2</sup>. Όταν τεθούν σε πλήρη λειτουργία τα πέντε αντλιοστάσια του Πηνειού, μέρος των αποθεμάτων θα διατίθεται για άρδευση συμβάλλοντας στην ετήσια ανανέωση των υδάτων της λίμνης.

Στον ποταμό Πηνειό, κατάντη της Λάρισας έχει κατασκευαστεί το φράγμα-ρουφράκτης Γυρτώνης. Σκοπός του φράγματος είναι η αποθήκευση των φυσικών απορροών του Πηνειού και των ποσοτήτων νερού με τις οποίες ενισχύεται ο Πηνειός από τον ταμιευτήρα Ταυρωπού και τον Αχελώο-όταν βέβαια ολοκληρωθεί η εκτροπή. Ταυτόχρονα, επιτυγχάνεται η μεταφορά νερού στην τεχνητή λίμνη της Κάρλας, ενώ

ρυθμίζεται και η οικολογική παροχή κατάντη του φράγματος. Η κατασκευή του ρουφράκτη Γυρτώνης ολοκληρώθηκε το 2013, οπότε και ξεκίνησε η λειτουργία του.

Πέραν των παραπάνω μεγάλης κλίμακας έργων στο Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας για την εξυπηρέτηση των αναγκών σε αρδευτικό νερό έχει κατασκευαστεί πλήθος έργων μικρής κλίμακας. Συγκεκριμένα λειτουργούν 13 πεδινοί ταμιευτήρες οι οποίοι έχουν κατασκευαστεί σε ακαλλιέργητες εκτάσεις του Δημοσίου, 85 μόνιμα και 60 πρόχειρα φράγματα και λιμνοδεξαμενές. Τέλος στο εν λόγω Υδατικό Διαμέρισμα λειτουργεί πλήθος γεωτρήσεων κρατικών και ιδιωτικών, νόμιμων και παράνομων. Συγκεκριμένα αναφέρονται περίπου 33000 γεωτρήσεις στο Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας με την πλειοψηφία τους (31000) να είναι ιδιωτικές (Γκούμας, 2006).

Με σκοπό την ενίσχυση του ελλειμματικού υδατικού ισοζυγίου του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας, τη βελτίωση της ποιοτικής και ποσοτικής κατάστασης του Πηνειού και των υπόγειων υδροφορέων του διαμερίσματος, μελετήθηκε η μερική εκτροπή του άνω ρου του Αχελώου προς τη Θεσσαλία. Το σχέδιο αυτό περιλαμβάνει ένα σύστημα φραγμάτων, σηράγγων αλλά και υδροηλεκτρικών σταθμών που θα επιτρέπουν την ενεργειακή αξιοποίησή του. Στην πλήρη ανάπτυξή του αναμένεται να είναι το σημαντικότερο στη χώρα όσον αφορά τον τομέα της ενέργειας, εξυπηρετώντας ταυτόχρονα καταναλωτικές και περιβαλλοντικές χρήσεις, τόσο στην πλευρά του Αχελώου όσο και την πλευρά της Θεσσαλίας.



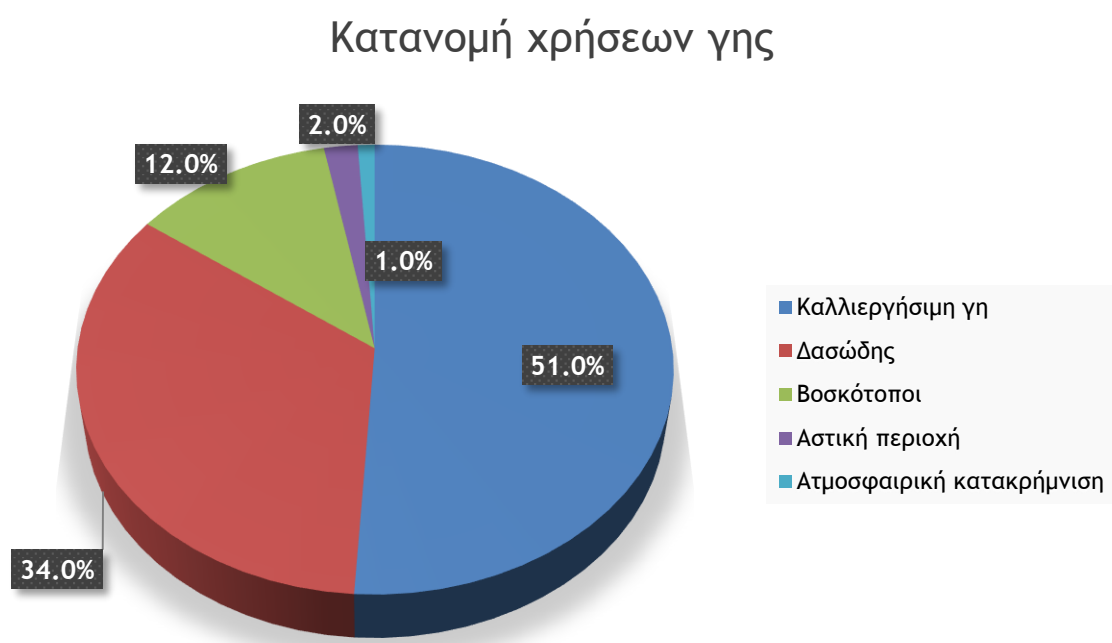
Εικόνα 6: Χάρτης έργων εκτροπής Αχελώου. Πηγή: [ypethe.gr](http://ypethe.gr).

Από τα έργα που εντάσσονται στο σύστημα μεταφοράς νερού από τον Αχελώο έχουν ήδη κατασκευαστεί οι ταμιευτήρες Κρεμαστών, Καστρακίου και Στράτου. Επίσης έχει κατασκευαστεί το φράγμα της Μεσοχώρας χωρίς να έχει πληρωθεί ο ταμιευτήρας, η σήραγγα προσαγωγής και ο ΥΗΣ Γλύστρας, χωρίς όμως να έχουν ξεκινήσει τη λειτουργία τους. Ταυτόχρονα, το φράγμα ΥΗΣ της Συκιάς και η σήραγγα εκτροπής προς τη Θεσσαλική λεκάνη βρίσκονται κοντά στην ολοκλήρωση της κατασκευής τους, ενώ τα υπόλοιπα έργα του συστήματος, δηλαδή το φράγμα και ο ΥΗΣ Μουζακίου, το φράγμα Πύλης και ο ΥΗΣ Μαυροματίου, βρίσκονται υπό σχεδιασμό.

Άλλα μεγάλα έργα εντός περιοχής μελέτης τα οποία έχουν μελετηθεί, αλλά δεν έχουν κατασκευαστεί ακόμα, είναι το φράγμα Ενιπέα, το φράγμα Κεφαλόβρυσου καθώς και το φράγμα Νεοχωρίτη, ενώ το φράγμα Αγιονερίου βρίσκεται υπό κατασκευή. Αναλυτικός χάρτης με τα φράγματα, τις τεχνητές λίμνες και τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς στην περιοχική μελέτη παρατίθεται στο παράρτημα.

## 2.7 ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ & ΥΔΑΤΩΝ

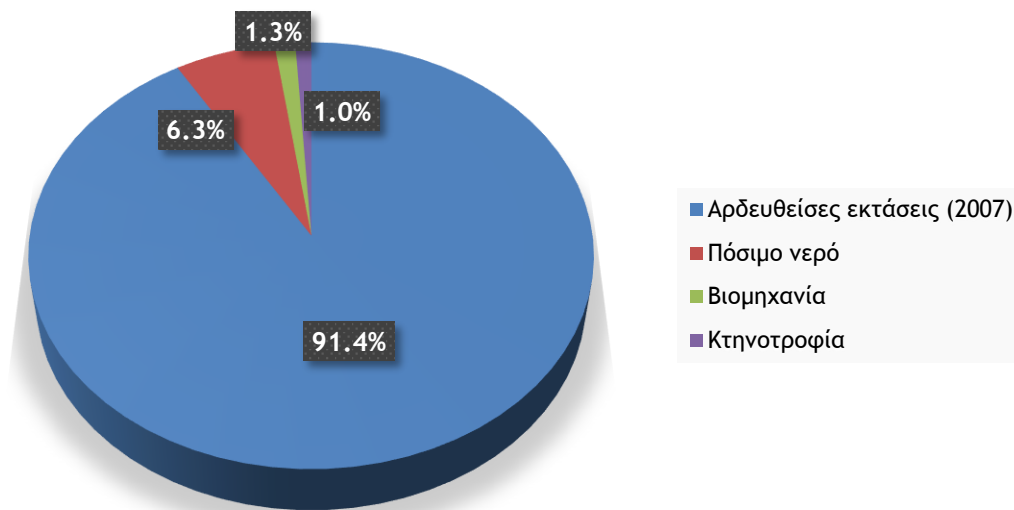
Σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας οι χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού διαμορφώνονται ως εξής:



Εικόνα 7: Κατανομή χρήσεων γης στη λεκάνη απορροής ποταμού Πηνειού. Πηγή: Κ/ΞΙΑ Διαχείρισης Υδάτων Θεσσαλίας, Ηπείρου και Δυτικής Στερεάς Ελλάδας, (2014).

Η κύρια χρήση νερού στο Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας είναι η άρδευση. Ακολουθεί η ζήτηση νερού για ύδρευση, ενώ οι χρήσεις νερού από τη βιομηχανία και κτηνοτροφία συγκεντρώνουν πολύ μικρότερα ποσοστά.

## Κατανομή ζήτησης νερού



Εικόνα 8: Κατανομή ζήτησης νερού στο Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας. Πηγή: [ypethe.gr](http://ypethe.gr).

Χρήση	Ετήσια Ζήτηση (hm <sup>3</sup> )
Άρδευση για το σύνολο των αρδευσίμων εκτάσεων	1743
Άρδευση για τις εκτάσεις που αρδεύτηκαν το 2007*	1114
Πόσιμο νερό (ύδρευση και τουρισμός)	62

\* Εκτιμάται ότι δεν καλύφθηκαν πλήρως οι ανάγκες των εκτάσεων που αρδεύτηκαν το 2007.

Πίνακας 1: Ετήσια ζήτηση νερού στη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού. Πηγή: Κ/ΞΙΑ Διαχείρισης Υδάτων Θεσσαλίας, Ηπείρου και Δυτικής Στερεάς Ελλάδας, (2014)

Συνολική απόληψη ανά έτος (hm <sup>3</sup> )	
Ανανεώσιμοι πόροι	981
Μη ανανεώσιμοι πόροι	130

Πίνακας 2: Κατανομή της συνολικής απόληξης νερού στη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού. Πηγή: Κ/ΞΙΑ Διαχείρισης Υδάτων Θεσσαλίας, Ηπείρου και Δυτικής Στερεάς Ελλάδας, (2014).

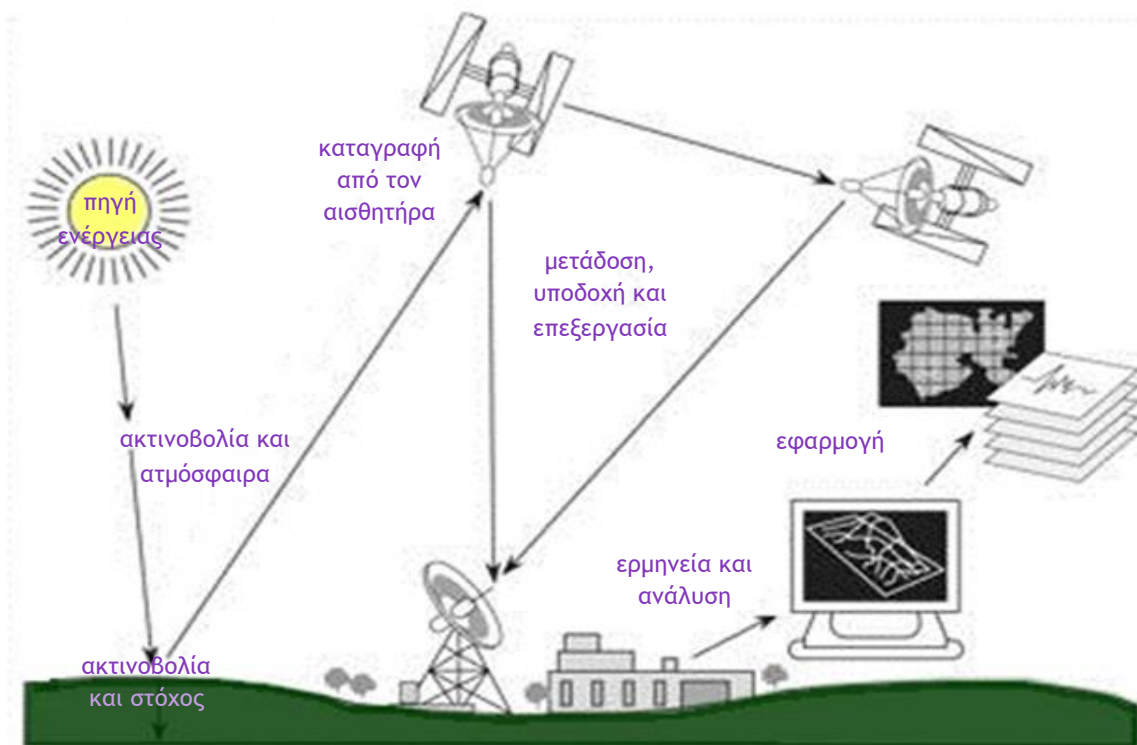
Σύμφωνα με το Γκούμα (2006) στους τέσσερις νομούς της Θεσσαλίας ο μέσος όρος των αρδευόμενων εκτάσεων για τα χρόνια 2000-2004 ανήλθε σε 25250 km<sup>2</sup> εκ των οποίων τα 7500 km<sup>2</sup> (29.7%) αρδεύονται από επιφανειακά νερά ενώ τα 17750 (70.3%) από τα υπόγεια ύδατα.



## ΚΕΦ. 3: ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΦΩΤΟΕΡΜΗΝΕΙΑ

### 3.1 ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ & ΦΩΤΟΕΡΜΗΝΕΙΑ

Με τον όρο τηλεπισκόπηση (τηλε + επισκοπώ, δηλαδή παρατηρώ από μακριά) εννοούμε την επιστήμη απόκτησης πληροφορίας από απόσταση για ένα αντικείμενο, περιοχή ή φαινόμενο. Η τηλεπισκόπηση (remote sensing) επιτυγχάνεται αφενός μέσω της ανίχνευσης και καταγραφής από απομακρυσμένους αισθητήρες (remote sensors) της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται ή αντανακλάται από το υπό παρατήρηση αντικείμενο, και αφετέρου μέσω της υποδοχής, επεξεργασίας και εφαρμογής της πληροφορίας αυτής. Αποτελεί διακριτό επιστημονικό πεδίο με μεγάλο εύρος εφαρμογών· το Κτηματολόγιο, η Μετεωρολογία, η μελέτη της κλιματικής αλλαγής, η ανίχνευση και παρακολούθηση δασικών πυρκαγιών και η χαρτογράφηση του βαρυτικού πεδίου αποτελούν μόνο ένα μικρό δείγμα των εφαρμογών αυτών. Ακόμα και η λειτουργία της ανθρώπινης όρασης εμπίπτει στον ευρύτερο ορισμό τηλεπισκόπησης.



Εικόνα 9: Η διαδικασία της Τηλεπισκόπησης. Πηγή: [www.nrscan.gc.ca](http://www.nrscan.gc.ca) (τροποποιημένη).

Η διαδικασία της τηλεπισκόπησης προϋποθέτει την ύπαρξη μιας πηγής ενέργειας ή φωτισμού η οποία παρέχει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια στο υπό παρατήρηση αντικείμενο-στόχο. Καθώς η ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ταξιδεύει από την πηγή προς το στόχο αλλά και από το στόχο προς τον αισθητήρα αλληλεπιδρά με τα σωματίδια και τα αέρια της γήινης ατμόσφαιρας (σκέδαση, απορρόφηση). Η ακτινοβολία που δεν υφίσταται σκέδαση ή απορρόφηση φτάνει στην επιφάνεια της Γης και αλληλεπιδρά με τα επιφανειακά της χαρακτηριστικά· ένα

τμήμα της απορροφάται, ένα άλλο μεταδίδεται σε άλλα αντικείμενα και το υπόλοιπο ανακλάται. Κάθε αντικείμενο εκτεθειμένο σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα ανακλά με διαφορετικό τρόπο την ακτινοβολία για τα διάφορα μήκη κύματος. Επίσης κάθε θερμαινόμενο αντικείμενο εκπέμπει ενέργεια με συγκεκριμένη ένταση για κάθε μήκος κύματος. Ο ιδιαίτερος τρόπος με τον οποίο κάθε αντικείμενο ανακλά ή εκπέμπει την ακτινοβολία για κάθε μήκος κύματος, είναι χαρακτηριστικός για κάθε αντικείμενο και ονομάζεται φασματική ταυτότητα ή φασματική απόκριση. Ένας ή περισσότεροι ψηφιακοί σαρωτές (τηλεπισκοπικοί ανιχνευτές) που βρίσκονται εγκατεστημένοι σε τεχνητούς δορυφόρους κινούμενους σε τροχιά γύρω από τη Γη ή σε αερομεταφερόμενα μέσα (ελικόπτερα, αεροσκάφη), καταγράφουν την ανακλώμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ή την ένταση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η πληροφορία στη συνέχεια μεταδίδεται με ηλεκτρονική μορφή στο σταθμό λήψης όπου με τη χρήση λογισμικού μετατρέπεται σε έντυπη ή ψηφιακή εικόνα. Στη συνέχεια γίνεται χρήση ψηφιακών και οπτικών τεχνικών αναγνώρισης και ερμηνείας των αντικειμένων (ταξινόμηση, φωτοερμηνεία κ.α.). Το τελικό στάδιο της τηλεπισκόπησης ολοκληρώνεται με την εφαρμογή της πληροφορίας, που αποκτήθηκε στα παραπάνω στάδια για την καλύτερη κατανόηση του στόχου, την απόκτηση καινούριας πληροφορίας ή τη λύση ενός συγκεκριμένου προβλήματος.

Η επιστήμη της τηλεπισκόπησης και ειδικότερα η δορυφορική τηλεπισκόπηση δίνει λύση στα προβλήματα συλλογής δεδομένων από περιοχές μεγάλης έκτασης, καθώς επιτρέπει έως και πλανητική χωρική κάλυψη. Γίνεται πλέον δυνατή η παρατήρηση περιοχών που δεν μπορούν να προσεγγιστούν εύκολα από τη Γη (λ.χ. περιοχές με ραδιενέργεια, αντίξοες κλιματικές συνθήκες). Λαμβάνοντας, τέλος, υπόψη την έκταση της περιοχής κάλυψης, την ακρίβεια της παρεχόμενης πληροφορίας και τον απαιτούμενο χρόνο για την εκτέλεση των παρατηρήσεων/μετρήσεων, γίνεται φανερό πως η τηλεπισκόπηση αποτελεί μια οικονομικά συμφέρουσα εναλλακτική μέθοδο παρακολούθησης περιοχών ή διεξαγωγής μετρήσεων.

Πράγματι, η παρατήρηση και παρακολούθηση της Γης από το διάστημα αποτελεί τα τελευταία χρόνια σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη και παρακολούθηση του περιβάλλοντος καθώς και για το σχεδιασμό και την ενίσχυση αναπτυξιακών και παραγωγικών δραστηριοτήτων. Οι εμπορικοί δορυφόροι (IKONOS της Space Imaging, QUICKBIRD της DigitalGlobe κ.α.), που κινούνται σε τροχιά γύρω από τη Γη, συλλέγουν καθημερινά εικόνες σε διάφορα τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Οι εικόνες στο ορατό τμήμα μας δίνουν πληροφορίες για τις ανθρώπινες δραστηριότητες, οι εικόνες στο υπέρυθρο τμήμα είναι ευαίσθητες στην παρουσία και την ανάπτυξη της βλάστησης και οι εικόνες στο θερμικό τμήμα παράγουν θερμοκρασιακούς χάρτες και μπορούν να καταγράψουν τις περιοχές όπου υπάρχει αυξημένη εξάτμιση. Οι εικόνες που λαμβάνονται από δορυφόρους προσφέρουν μία μοναδική άποψη τόσο της Γης όσο και των αποτελεσμάτων της ανθρώπινης παρέμβασης σε αυτή. Για παράδειγμα, καθίσταται δυνατό μέσω των δορυφορικών εικόνων να πραγματοποιείται ανίχνευση κοιτασμάτων μετάλλων (Ciampalini, Garfagnoli, Antonielli, Moretti, & Righini, 2013), εντοπισμός πετρελαιοκηλίδων και άλλων ρυπαντικών ουσιών στο παράκτιο περιβάλλον (Karantalos & Argialas, 2006) ακόμη και παρακολούθηση της παραμόρφωσης του φλοιού της Γης.

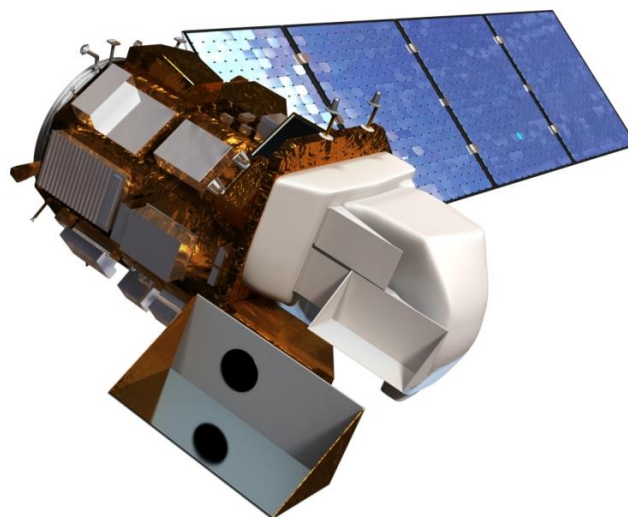


Όπως προαναφέρθηκε, ένα από τα βασικά στάδια της διαδικασίας της τηλεπισκόπησης αποτελεί η ανάλυση των δορυφορικών εικόνων, δηλαδή η διάκριση των φυσικών και ανθρωπογενών χαρακτηριστικών που είναι αποτυπωμένα σε αυτές. Η αναγνώριση και καταγραφή αυτών των χαρακτηριστικών ονομάζεται ποιοτική ανάλυση ή φωτοερμηνεία, ενώ ο καθορισμός της γεωμετρίας τους στο χώρο καλείται ποσοτική ανάλυση ή φωτογραμμετρία. Σύμφωνα με τον Αργιαλά (1999) «...η δυνατότητα αναγνώρισης αντικειμένων που υπάρχουν στις φωτογραφίες και αναμετάδοση της πληροφορίας αυτής σε τρίτους, χαρακτηρίζει το πρόσωπο που εκτελεί τη διαδικασία αυτή, ότι εκτελεί Φωτοερμηνεία...».

Η φωτοερμηνεία βασίζεται στην παρατήρηση των χαρακτηριστικών των εικονιζόμενων αντικειμένων και με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά στην αναγνώριση και καταγραφή τους. Στα φωτοερμηνευτικά αυτά χαρακτηριστικά περιλαμβάνονται το σχήμα, το χρώμα, ο φωτογραφικός τόνος, το μέγεθος, η διάταξη, η υφή, η σκιά, η τοποθεσία και η σχέση του αντικειμένου με το περιβάλλον του. Είναι φανερό δε ότι η φωτοερμηνεία αποτελεί μια διαδικασία με έντονο υποκειμενικό χαρακτήρα, καθώς η επιτυχία της επηρεάζεται από παράγοντες όπως η οξύτητα της όρασης, η εμπειρία και η αντίληψη του ερευνητή. Ταυτόχρονα, σημαντικό ρόλο παίζουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των δεδομένων (χωρική, φασματική και ραδιομετρική ανάλυση) και η τεχνική που χρησιμοποιείται.

### 3.2 LANDSAT 8-OLI/TIRS

Η σειρά δορυφόρων Landsat ξεκίνησε τη λειτουργία της το 1972 στο πλαίσιο του ομώνυμου προγράμματος με στόχο τη θεματική χαρτογράφηση του πλανήτη που αναπτύχθηκε από την Εθνική Υπηρεσία Αεροναυτικής και Διαστήματος (NASA) σε συνεργασία με το Γεωλογικό Ινστιτούτο των Ηνωμένων Πολιτειών (USGS). Το 2013 τέθηκε σε λειτουργία ο δορυφόρος γεωσκόπησης Landsat 8 στο πλαίσιο της αποστολής LDCM (Landsat Data Continuity Mission).



Εικόνα 10: Ο δορυφόρος Landsat 8. Πηγή: [landsat.usgs.gov](http://landsat.usgs.gov).

Ο δορυφόρος με ελάχιστο εκτιμώμενο χρόνο ζωής τα 5 χρόνια εκτελεί ηλιοσύγχρονη κυκλική τροχιά ακτίνας 705 χλμ. Φέρει δύο δέκτες, τον Operational Land Imager (OLI) με εννέα φασματικά κανάλια τα οποία περιλαμβάνουν και ένα παγχρωματικό και τον Thermal Infrared Sensor (TIRS) με δύο θερμικά κανάλια. Οι προαναφερόμενοι δέκτες παρέχουν εικόνες στο ορατό, εγγύς υπέρυθρο, μέσο υπέρυθρο και θερμικό υπέρυθρο με ανάλυση 15μ -100μ ανάλογα με τη φασματική συχνότητα στην οποία βρίσκονται. Ο Landsat 8 παρουσιάζει μεγαλύτερη φασματική και ραδιομετρική διακριτική ικανότητα συγκριτικά με τον προκάτοχό του Landsat 7, ενώ παρέχει και δύο νέα φασματικά κανάλια, ένα ειδικά προσαρμοσμένο για την ανίχνευση των θυσάνων και ένα άλλο για την παρατήρηση της θαλάσσιας ζώνης.

Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Band 1 - Coastal aerosol	0.43-0.45	30
Band 2 - Blue	0.45-0.51	30
Band 3 - Green	0.53-0.59	30
Band 4 - Red	0.54-0.67	30
Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85-0.88	30
Band 6 - SWIR 1	1.57-1.65	30
Band 7 - SWIR 2	2.11-2.29	30
Band 8 - Panchromatic	0.50-0.68	15
Band 9 - Cirrus	1.36-1.38	30
Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60-11.19	100
Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50-12.51	100

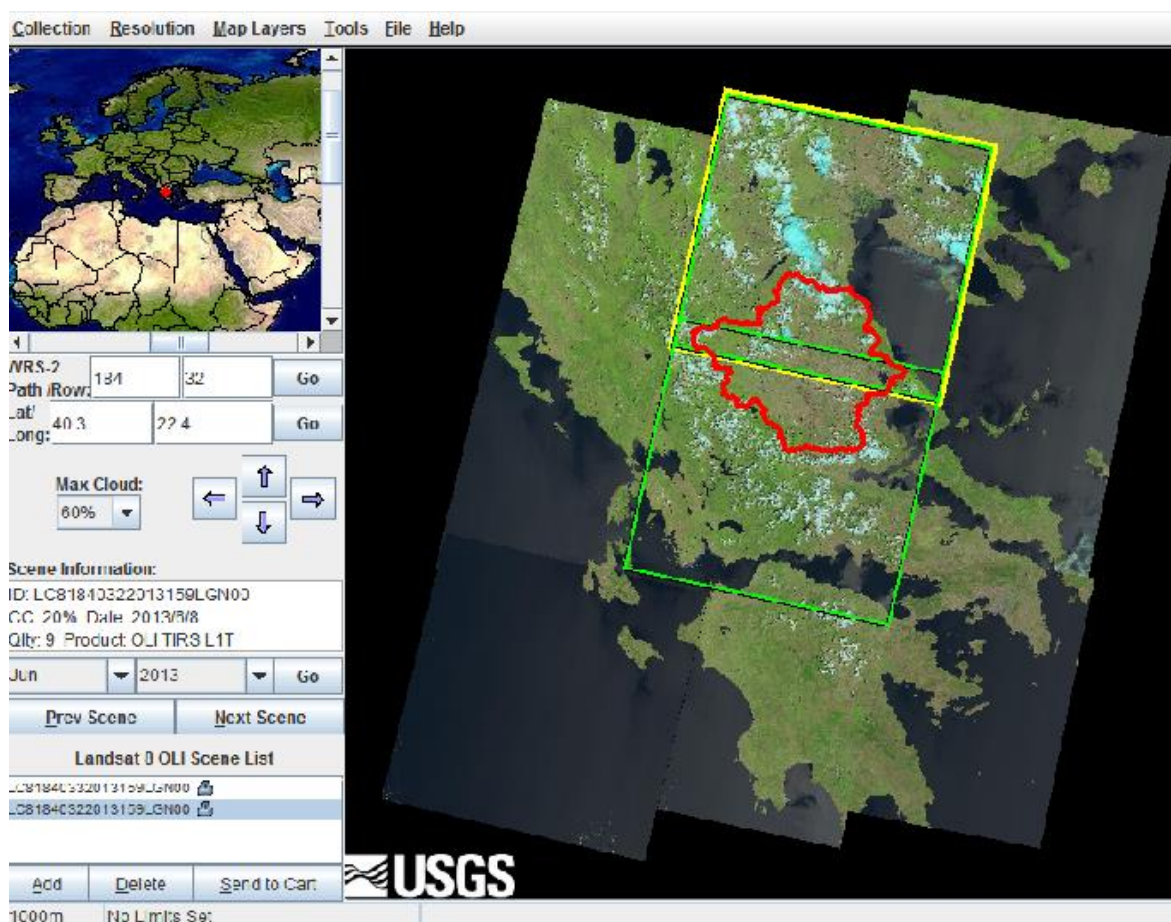
**Πίνακας 3: Φασματικά κανάλια Landsat 8 με τα αντίστοιχα μήκη κύματος και χωρική ανάλυση. Πηγή: [landsat.gsfc.nasa.gov](http://landsat.gsfc.nasa.gov).**

Τα δεδομένα του Landsat 8 λαμβάνονται σε λωρίδες πλάτους 185χλμ και έπειτα χωρίζονται σε σκηνές 185 x 185χλμ, ορισμένες στο WRS-2 (Worldwide Reference System 2) με συντεταγμένες path και row. Ο δορυφόρος επιστρέφει 450-550 σκηνές ανά ημέρα στο αρχείο της USGS αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα λήψης σκηνών απαλλαγμένων από τα σύννεφα. Οι σκηνές αυτές υφίστανται ραδιομετρική και γεωμετρική διόρθωση (ορθοαναγωγή), ώστε να προκύψουν ορθοδιορθωμένες εικόνες που να αναφέρονται στο σύστημα UTM και έπειτα τοποθετούνται στους τελικούς χάρτες με ανάλυση 16bit σε μορφή GeoTIFF (National Aeronautics and Space Administration, 2015).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν ψηφιακές τηλεπισκοπικές απεικονίσεις της περιοχής μελέτης προερχόμενες από το θεματικό χαρτογράφο Landsat 8 OLI/TIRS. Συγκεκριμένα, ύστερα από εγγραφή στην υπηρεσία GLOVIS (Global Visualisation Viewer) του Γεωλογικού Ινστιτούτου των Ηνωμένων Πολιτειών (USGS) έγινε αναζήτηση και προμήθεια όλων των διαθέσιμων εικόνων της περιοχής μελέτης για τους μήνες Μάιο έως Σεπτέμβριο των ετών 2012-2014. Κριτήριο επιλογής των συγκεκριμένων ημερομηνιών αποτέλεσε η δυνατότητα απεικόνισης των υπό

μελέτη καλλιεργειών στα διάφορα στάδια ανάπτυξής τους. Από τις εν λόγω εικόνες απορρίφθηκαν κάποιες λόγω εκτεταμένης συννεφιάς πάνω από την περιοχή μελέτης και άλλες λόγω κακής ποιότητάς τους οφειλόμενης σε ανεπαρκή λειτουργία του χαρτογράφου. Τελικά, επιλέχθηκαν για περαιτέρω αξιοποίηση οι εικόνες τριών ημερομηνιών με τα παρακάτω στοιχεία:

- Ημερομηνία λήψης: 24/06/2013, path:184 row:32
- Ημερομηνία λήψης: 24/06/2013, path:184 row:33
- Ημερομηνία λήψης: 26/07/2013, path:184 row:32
- Ημερομηνία λήψης: 26/07/2013, path:184 row:33
- Ημερομηνία λήψης: 28/09/2013, path:184 row:32
- Ημερομηνία λήψης: 28/09/2013, path:184 row:33



Εικόνα 11: Προεπισκόπηση της λήψης του Landsat 8. Με κίτρινο και πράσινο φαίνονται η έκταση και η τοποθεσία των πολυφασματικών λήψεων και με κόκκινο η περιοχή μελέτης. Πηγή: [glovis.usgs.gov](http://glovis.usgs.gov).

Σημειώνεται πως για κάθε ημερομηνία λήφθηκαν δύο ψηφιακές τηλεπισκοπικές απεικονίσεις, για να καλυφθεί γεωγραφικά ολόκληρη η περιοχή μελέτης. Ο δορυφόρος Landsat 8 παρέχει γεωμετρικά διορθωμένες εικόνες με ενιαίο σύστημα συντεταγμένων, το παγκόσμιο γεωδαίτικό σύστημα WGS84 (World Geodetic System 1984), συγκεκριμένο επίσης προβολικό σύστημα ανά περιοχή, UTM (Universal Transverse Mercator), και συγκεκριμένα για την περιοχή μελέτης, NUTM34. Οι ψηφιακές δορυφορικές απεικονίσεις συνοδεύονται από τα μεταδεδομένα τους, όπου σημειώνονται οι ιδιότητές τους και αναφέρεται οποιαδήποτε επεξεργασία έχουν

υποστεί. Μια σύνοψη των σημαντικότερων από αυτά για κάθε μια από τις χρησιμοποιούμενες ψηφιακές απεικονίσεις παρατίθεται στο παράρτημα.

Σύμφωνα με τους προαναφερθέντες πίνακες όλες οι εικόνες έχουν υποστεί ραδιομετρική διόρθωση (εμφανίζεται σε όλες η τιμή L1T) και έχουν άριστη ποιότητα, χωρίς να έχουν ανιχνευτεί σφάλματα. Επίσης από τη θετική τιμή του αζιμούθιου για τον Ήλιο συμπεραίνεται πως όλες οι εικόνες έχουν ληφθεί κατά τη διάρκεια της ημέρας.

### 3.3 ER MAPPER-ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

Το ER Mapper αποτελεί ένα πρόγραμμα ψηφιακής επεξεργασίας τηλεσκοπικών εικόνων το οποίο αναπτύχθηκε από τη Earth Resource Mapping Inc., θυγατρική της ERDAS Inc. Στο πρόγραμμα αυτό όπως και σε άλλα προγράμματα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας κάθε ψηφιακή εικόνα αποθηκεύεται ως ένας διδιάστατος πίνακας (raster) αποτελούμενος από μικρά τμήματα, τα εικονοστοιχεία (pixels). Κάθε εικονοστοιχείο χωροταξικά αντιστοιχεί σε ένα τμήμα της επιφάνειας της Γης και αναπαρίσταται από έναν ψηφιακό αριθμό (digital number). Οι τιμές των ψηφιακών αυτών αριθμών μπορούν να αποθηκεύσουν σε ψηφιογραφική μορφή και να αναπαραστήσουν διαφορετικά είδη δεδομένων ανεξαρτήτως της πηγής τους. Για παράδειγμα για δορυφορικά δεδομένα οι τιμές των ψηφιακών αριθμών αντιπροσωπεύουν την ένταση του ανακλώμενου φωτός στο ορατό, υπέρυθρο και σε άλλα μήκη κύματος.

Το εν λόγω λογισμικό έχει τη δυνατότητα εφαρμόζοντας μαθηματικούς μετασχηματισμούς στους ψηφιακούς αριθμούς να βελτιώσει τα δεδομένα της εικόνας, ώστε να εξάγει λεπτομερειακή πληροφορία, πράγμα που δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί με τις κλασικές αναλογικές τεχνικές ερμηνείας. Επιπρόσθετα, προσεγγίζει την επεξεργασία εικόνας με καινοτόμο τρόπο σε σχέση με την πλειοψηφία των προγραμμάτων επεξεργασίας εικόνας. Δεν απαιτεί να εγγραφεται στο δίσκο ένα αρχείο ανά βήμα επεξεργασίας και ταυτόχρονα επιτρέπει να συνδυαστούν πολλές διαδικασίες επεξεργασίας σε ένα βήμα (αλγόριθμος) και να αποδοθούν τα αποτελέσματα στην οθόνη του υπολογιστή σε σύντομο χρονικό διάστημα. Δίνει τη δυνατότητα αποθήκευσης του αλγορίθμου, δηλαδή της περιγραφής των βημάτων επεξεργασίας, χωρίς τις ενδιάμεσες εικόνες-αποτελέσματα των βημάτων επεξεργασίας, καθιστώντας έτσι ταχύτερη την επεξεργασία εικόνας και ευκολότερη την εκμάθησή του. Γεγονός που προσδίδει σε αυτό το λογισμικό ένα συγκριτικό πλεονέκτημα ιδιαίτερα όσο αφορά τη διαχείριση δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης και άλλων αρχείων μεγάλου μεγέθους. Τέλος, επιτρέπει την αποθήκευση της επεξεργασμένης εικόνας σε μια πληθώρα μορφών συμπεριλαμβανομένης και της ER Mapper Raster Dataset (.ers).

Οι αλγόριθμοι στο ER Mapper μπορούν να χρησιμοποιηθούν για απλή παρουσίαση των δεδομένων ή για πολύπλοκη επεξεργασία εικόνων. Μερικές από τις διεργασίες επεξεργασίας εικόνων που υποστηρίζει το πρόγραμμα είναι οι εξής: ανάγνωση/εισαγωγή δεδομένων, απεικόνιση εικόνας, γεωκωδικοποίηση (εγγραφή, αναγωγή και ορθοαναγωγή), δημιουργία μωσαϊκού, βελτίωση εικόνας (σύζευξη εικόνων, φιλτράρισμα, ταξινόμηση κ.α.), επικαλύψεις δυναμικών συνδέσεων (με

προγράμματα GIS/Βάσεις δεδομένων κ.α.), σημείωση και σύνθεση χάρτη, αποθήκευση/εξαγωγή δεδομένων και εκτύπωση.

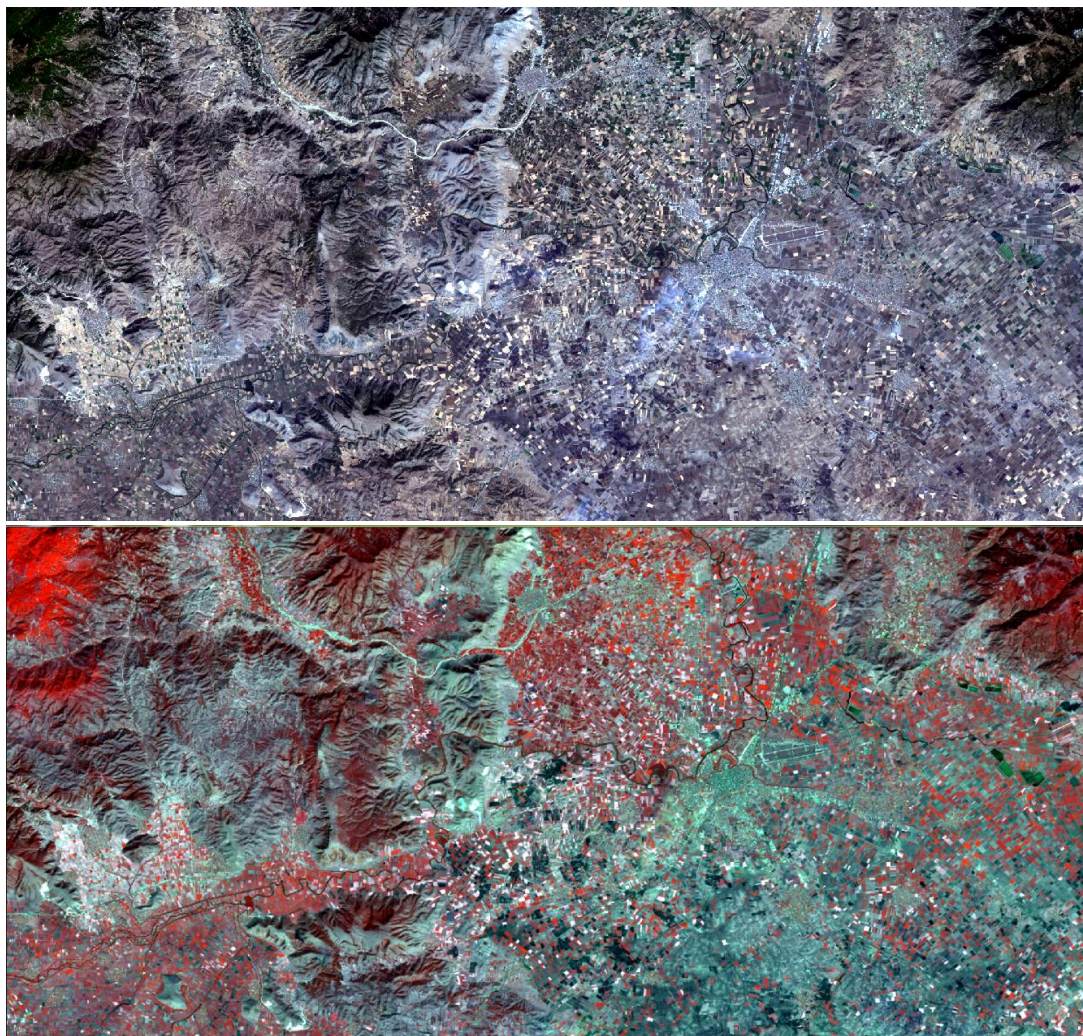
Η επεξεργασία των ψηφιακών τηλεσκοπικών εικόνων ξεκίνησε με την εισαγωγή των αρχείων GeoTIFF (.tif) όπως αυτά διατέθηκαν από την υπηρεσία GLOVIS στο λογισμικό ER Mapper. Αρχικά οι εικόνες εισήχθησαν ανά δύο με κριτήριο την ταύτιση της ημερομηνίας, για να δημιουργηθεί για κάθε ημερομηνία ένα μωσαϊκό εικόνων που θα απεικονίζουν γεωγραφικά ολόκληρη την περιοχή μελέτης. Στο ER Mapper αυτό συνίσταται στη ρύθμιση της τιμής των κενών εικονοστοιχείων στη μηδενική τιμή, καθώς οι δύο εικόνες έχοντας κοινή εγγραφή αυτόματα απεικονίζονται στις σωστές γεωγραφικές μεταξύ τους θέσεις.



Εικόνα 12: Έγχρωμα σύνθετα 4,3,2 και 5,4,3 της ψηφιακής τηλεπισκοπικής απεικόνισης με ημερομηνία λήψης 28/09/2013.

Στη συνέχεια για τις τρεις ανωτέρω εικόνες δημιουργήθηκαν έγχρωμα σύνθετα και πραγματοποιήθηκε φωτοερμηνεία προσδιορίζοντας τις κύριες χρήσεις γης που συναντώνται στην περιοχή μελέτης:

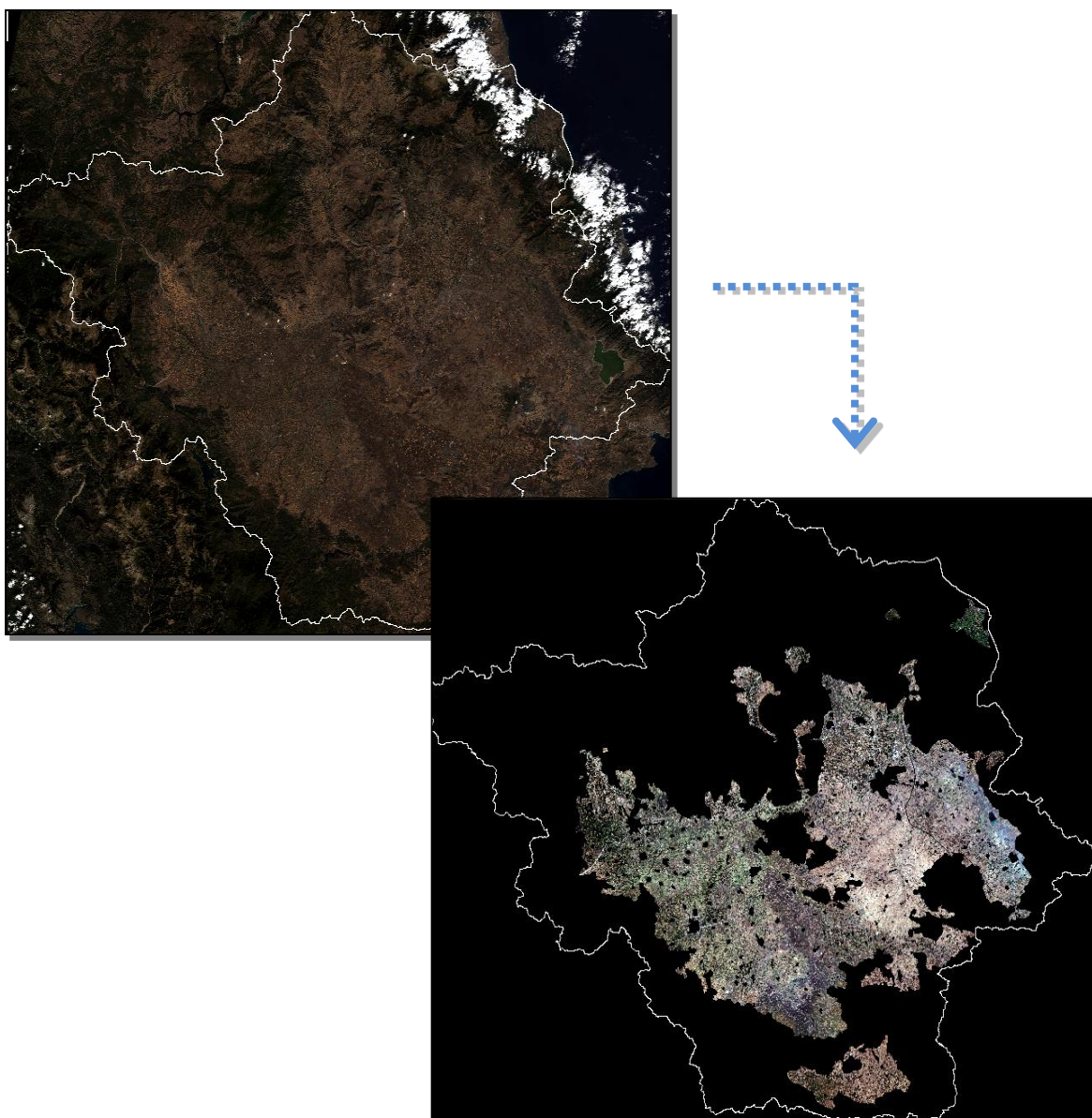
- Το έγχρωμο σύνθετο 4,3,2 (R,G,B) του Landsat 8 OLI/TIRS αποτελεί απεικόνιση της πραγματικότητας με απομίμηση φυσικών χρωμάτων. Επιτρέπει την αναγνώριση όλων των αντικειμένων που μπορούν να διακριθούν με γυμνό μάτι, λαμβάνοντας υπόψη τη διακριτική ικανότητα του τηλεσκοπικού δέκτη.
- Το έγχρωμο σύνθετο 5,7,4, (R,G,B) εμφανίζει καλό διαχωρισμό των περιοχών με κωνοφόρα (σκούρο καφέ χρώμα) από τις περιοχές με πλατύφυλλα (κόκκινο χρώμα) και τις θαμνώδεις εκτάσεις (καφέ χρώμα με αραιή διάταξη). Το γυμνό έδαφος εμφανίζεται με γαλάζιο χρώμα και το νερό με μαύρο.
- Το έγχρωμο σύνθετο 5,4,3 (R,G,B) αναδεικνύει καλύτερα τις περιοχές καλλιεργειών.



Εικόνα 13: Έγχρωμα σύνθετα 4,3,2 και 5,7,4 (από πάνω προς τα κάτω) τμήματος της ψηφιακής τηλεοπτικής απεικόνισης με ημερομηνία λήψης 28/09/2013.

Από τη φωτοερμηνεία προκύπτει πως η πλειοψηφία της καλλιεργούμενης έκτασης είναι συγκεντρωμένη στο κέντρο της περιοχής μελέτης, δηλαδή της λεκάνης

απορροής του ποταμού Πηνειού. Περιφερειακά διακρίνονται ορεινές εκτάσεις κωνοφόρων, πλατύφυλλων, θαμνώδους ή αραιής βλάστησης και εκτάσεις σποραδικών μόνο καλλιεργειών. Για τη διευκόλυνση λοιπόν της διαδικασίας της ταξινόμησης αποφασίστηκε να γίνει αποκοπή των περιφερειακών αυτών εκτάσεων και δημιουργία μιας μικρότερης «περιοχής ενδιαφέροντος» εμβαδού 3.818 km<sup>2</sup>, η οποία θεωρείται ότι περικλείει την πλειοψηφία των καλλιεργούμενων εκτάσεων. Επίσης έγινε αποκοπή των περιοχών που αναγνωρίστηκαν ως αστικός ιστός, βιομηχανικές και εμπορικές μονάδες, αεροδρόμια και αθλητικές εγκαταστάσεις. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον ArcMap του λογισμικού ArcGIS και αξιοποιήθηκαν τόσο τα αποτελέσματα της φωτοερμηνείας όσο και ο χάρτης χρήσεων γης CORINE της περιοχής μελέτης του έτους 2000.



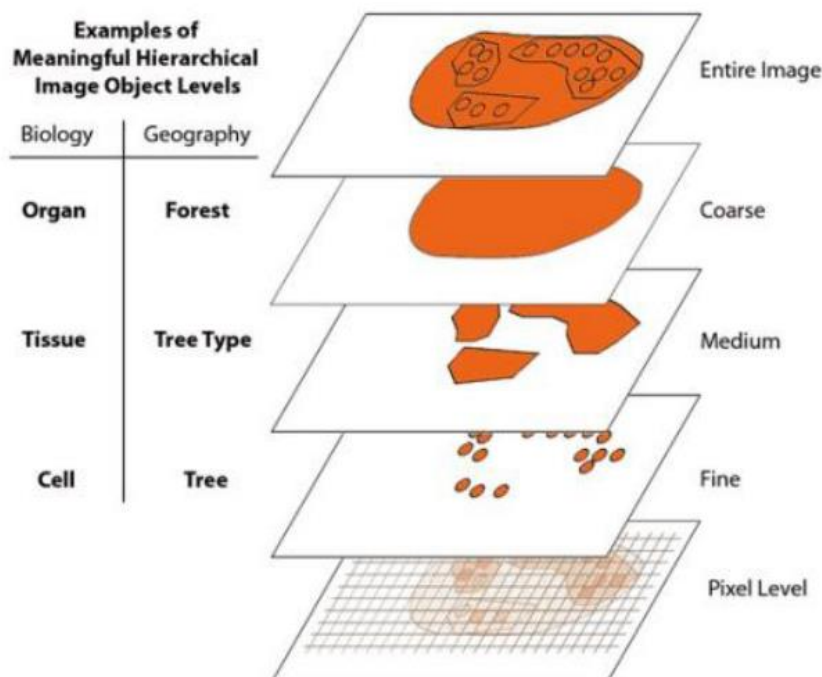
**Εικόνα 14:** Τηλεσκοπική απεικόνιση της περιοχής μελέτης (πάνω) και της «περιοχής ενδιαφέροντος» όπως ορίστηκε (κάτω). Με λευκό χρώμα έχουν σχεδιαστεί τα όρια της λεκάνης απορροής του ποταμού Πηνειού.

Τελικώς, στο λογισμικό ER Mapper δημιουργήθηκε για την περιοχική ενδιαφέροντος, όπως αυτή ορίστηκε, το έγχρωμο σύνθετο που χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία της ταξινόμησης. Πιο συγκεκριμένα έγινε ανάθεση και σύνθεση των τριών συνιστωσών nir για τις τρεις ημερομηνίες των διατιθέμενων δορυφορικών εικόνων στα τηλεσκοπικά κανάλια (κόκκινο, πράσινο, μπλε) με αποκοπή 1% στα άκρα των ιστογραμμάτων.

### 3.4 ECOGNITION-ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ

Το λογισμικό eCognition δημιουργήθηκε το 2000 από την DEFiNiENS Imaging GmbH. Πρόκειται για ένα λογισμικό αντικειμενοστραφούς ανάλυσης της εικόνας (Object-based Image Analysis), καθώς εφαρμόζει την αρχή που ορίζει ότι κατά την ανάλυση μιας εικόνας η σημαντική πληροφορία για τη φωτοερμηνεία δε βρίσκεται σε επίπεδο μεμονωμένων εικονοστοιχείων (pixels) αλλά στο επίπεδο νοηματικών αντικειμένων/τμημάτων της εικόνας και στις αλληλοσυσχετίσεις τους (DEFiNiENS, 2000).

Πρωταρχικό στάδιο της ανάλυσης εικόνας στο eCognition αποτελεί η κατάτμησή της σε ομοιογενή τμήματα (segmentation) μέσω τεχνικών συγχώνευσης (bottom-up segmentation) ή διαίρεσης (top-down segmentation) περιοχών. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει έμμεσα το μέγεθος των τμημάτων ή αντικειμένων που είναι επιθυμητό να προκύψουν, τη φασματική ομοιογένεια που θα παρουσιάζουν καθώς και σε ποιο βαθμό το σχήμα τους θα είναι συμπαγές ή λείο. Η επιλογή των καταλληλότερων τιμών των παραπάνω παραμέτρων γίνεται φωτοερμηνευτικά με χρήση επαναληπτικών μεθόδων, λαμβάνοντας πάντα υπόψη τις προδιαγραφές κάθε εφαρμογής.



Εικόνα 15: Αναπαράσταση ιεραρχίας πολλαπλών επιπέδων αντικειμένων. Πηγή: eCognition Developer 8.7 User's Guide, 2011.

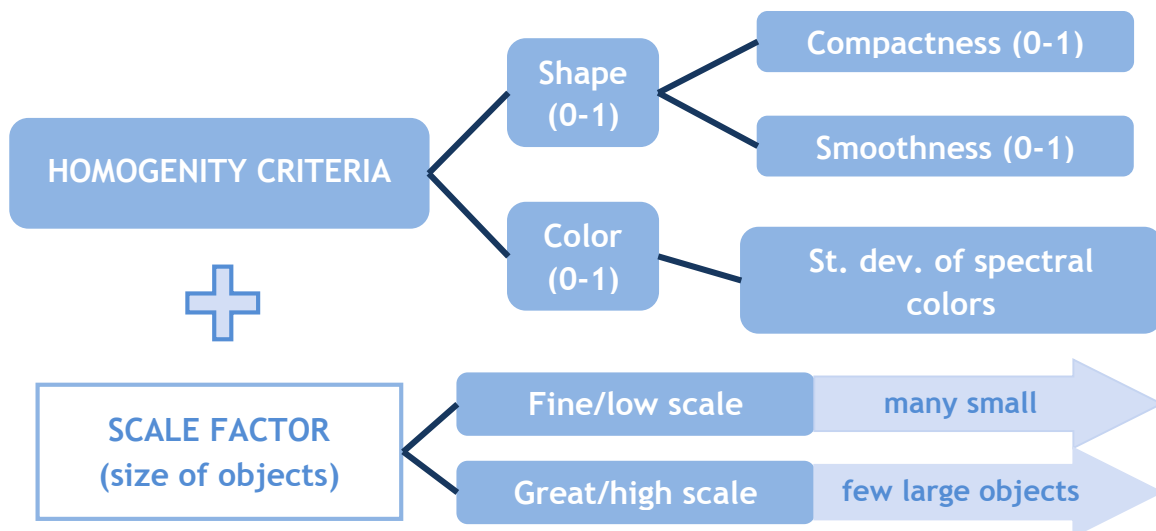


Η διαδικασία της κατάτμησης της εικόνας δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να διαχειριστεί ένα πεπερασμένο σύνολο ομοιογενών αντικειμένων αντί των μεμονωμένων εικονοστοιχείων (pixels). Ταυτόχρονα, υπάρχει η δυνατότητα να δημιουργηθεί ιεραρχία πολλαπλών επιπέδων από ομοιογενή ως προς τον τόνο και σχήμα αντικείμενα της εικόνας, τα οποία κάθε στιγμή «γνωρίζουν» τους γείτονές τους στο ίδιο επίπεδο αλλά και τα αντικείμενα που βρίσκονται πάνω και κάτω από αυτά.

Η ταξινόμηση των αντικειμένων που δημιουργήθηκαν από την κατάτμηση, δηλαδή η ομαδοποίηση τους σε ευρύτερες κατηγορίες ορισμένες από το χρήστη, είναι επιβλεπόμενη. Από το λογισμικό παρέχονται δύο μηχανισμοί ταξινόμησης: ο μηχανισμός του εγγύτερου γείτονα (Nearest Neighbor), ο οποίος περιγράφει τις υπό ανίχνευση κατηγορίες μέσω δειγμάτων που καθορίζει ο χρήστης για κάθε κατηγορία, και οι συναρτήσεις ασαφούς λογικής (fuzzy membership functions) οι οποίες περιγράφουν τις αποστάσεις των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων για τις οποίες τα αντικείμενα ανήκουν σε μια ορισμένη κατηγορία ή όχι. Η ταξινόμηση μπορεί να γίνει βάσει των φασματικών χαρακτηριστικών των αντικειμένων, του σχήματός τους, της συσχέτισης τους με άλλες κατηγορίες στο ίδιο ή διαφορετικό επίπεδο κατάτμησης και όποιου άλλου χαρακτηριστικού ή συνδυασμού χαρακτηριστικών ορίσει ο χρήστης. Μετά το τέλος της ταξινόμησης πραγματοποιείται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της με χρήση στατιστικών ελέγχων ενσωματωμένων στο λογισμικό eCognition.

Παρόλο που τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά και οι μέθοδοι επεξεργασίας συναντώνται τμηματικά και σε άλλα προγράμματα επεξεργασίας εικόνας, το eCognition αποτελεί το πρώτο λειτουργικό το οποίο συνδυάζει όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά και δίνει τη δυνατότητα ποσοτικής αναπαράστασης των σχέσεων γειτνίασης μεταξύ των αντικειμένων της εικόνας και των στατιστικών χρώματος και σχήματος των αντικειμένων ως προς το περιβάλλον τους (Αργιαλάς και Τζώτσος, 2002).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η επεξεργασία εικόνας με χρήση του λογισμικού eCognition ξεκίνησε με την εισαγωγή στο πρόγραμμα της τελικής εικόνας που έχει παραχθεί από το πρόγραμμα ER Mapper. Για την εικόνα αυτή προτιμήθηκε να χρησιμοποιηθεί η από κάτω προς τα πάνω κατάτμηση (bottom-up segmentation) κατά την οποία ενώνονται μικρά αντικείμενα για τη δημιουργία μεγαλύτερων αντικειμένων. Και συγκεκριμένα η κατάτμηση multiresolution η οποία λαμβάνει υπόψη την πολυπλοκότητα των δεδομένων με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Μετά από επαναληπτικές διαδικασίες και λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της φωτοερμηνείας καθορίστηκαν οι παράμετροι για την κατάτμηση της εικόνας με στόχο μετά την κατάτμηση να παραχθούν όσο δυνατόν μεγαλύτερα αντικείμενα (segments) και ταυτόχρονα να είναι δυνατή η διάκριση μεταξύ των διαφορετικών αντικειμένων που αναγνωρίστηκαν φωτοερμηνευτικά. Οι παράμετροι αυτές συμπεριλαμβάνουν τα κριτήρια ομοιογένειας, την παράμετρο κλίμακας (scale factor) και το βάρος με το οποίο θα συμμετέχει κάθε κανάλι στη διαδικασία της κατάτμησης.



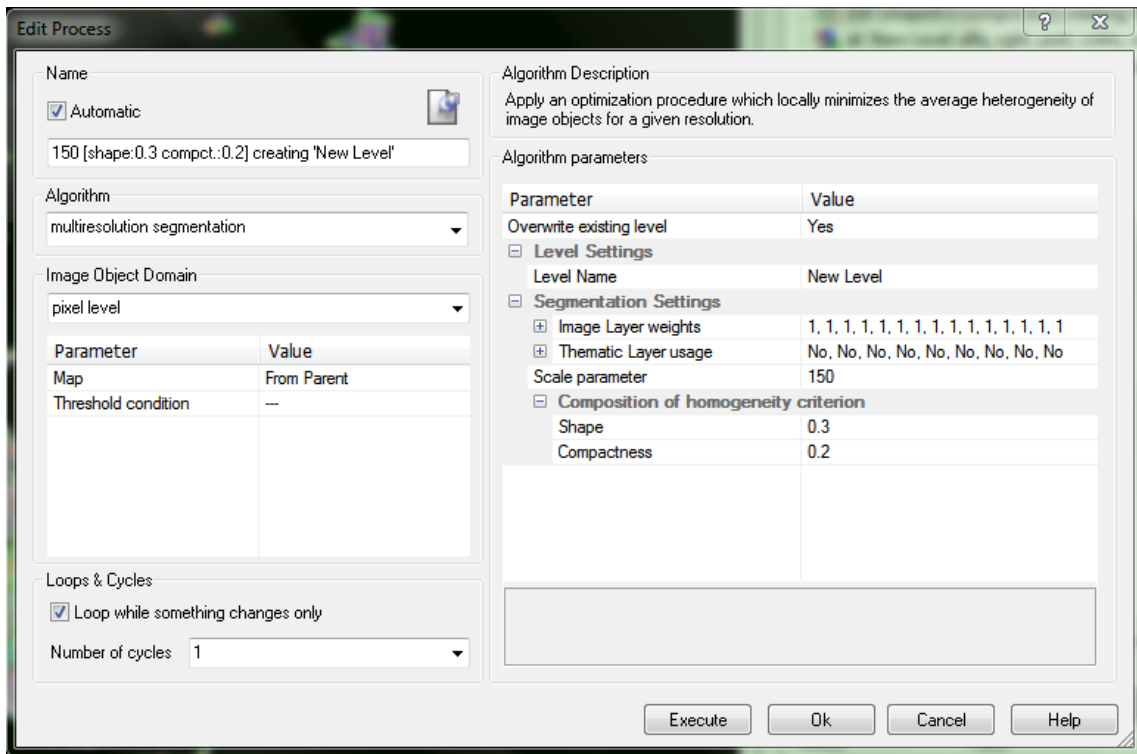
Εικόνα 16: Παράμετροι κατάτμησης, για το λογισμικό eCognition.

Τα κριτήρια ομοιογένειας εκφράζουν το βαθμό ομοιογένειας που θα παρουσιάζουν τα παραγόμενα αντικείμενα της κατάτμησης. Πρόκειται για δύο συμπληρωματικές παραμέτρους, την παράμετρο του χρώματος και την παράμετρο του σχήματος. Η παράμετρος του χρώματος καθορίζει τη βαρύτητα που θα δίνεται στα φασματικά χαρακτηριστικά των εικονοστοιχείων κατά την ομαδοποίηση τους, ενώ η παράμετρος του σχήματος καθορίζει την έμφαση που θα δίνεται στο σχήμα του παραγόμενου από την κατάτμηση αντικειμένου. Όσον αφορά το σχήμα δίνεται επίσης η επιλογή μεταξύ ομαλότερων ορίων στα αντικείμενα και κανονικότητας σχημάτων μέσω των παραμέτρων compactness και smoothness, οι οποίες είναι επίσης συμπληρωματικές.

Καθώς στόχος της ταξινόμησης είναι ο κατά το δυνατόν ακριβέστερος προσδιορισμός των χρήσεων γης στην περιοχή ενδιαφέροντος, προτιμήθηκε να δοθεί περισσότερο βάρος στο φασματικό κριτήριο (color) για την ανίχνευση της βλάστησης (0.7) και στο κριτήριο για το λείο της οριογραμμής (smoothness-0.8). Επίσης, ορίστηκε ίσο με τη μονάδα το βάρος για όλα τα κανάλια που συμμετέχουν στην ταξινόμηση και προσδιορίστηκε η παράμετρος κλίμακας. Οι ακριβείς τιμές που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στην παρακάτω εικόνα(εικ.17).

Στη συνέχεια ορίστηκαν οι κλάσεις δηλαδή οι ευρύτερες ομάδες στις οποίες θα ταξινομηθούν τα αντικείμενα που δημιουργήθηκαν από τη διαδικασία της κατάτμησης. Επιλέχθηκε να δημιουργηθούν οι εξής εννέα κλάσεις:

- αγρανάπαυση (agrl)
- μηδική (alfa)
- καλαμπόκι (corn)
- βαμβάκι (cotto)
- βοσκότοπος (past)
- ζαχαρότευτλο (sgbt)
- τομάτα (toma)
- δενδρώδης περιοχή (tree)
- σιτάρι (wwht)



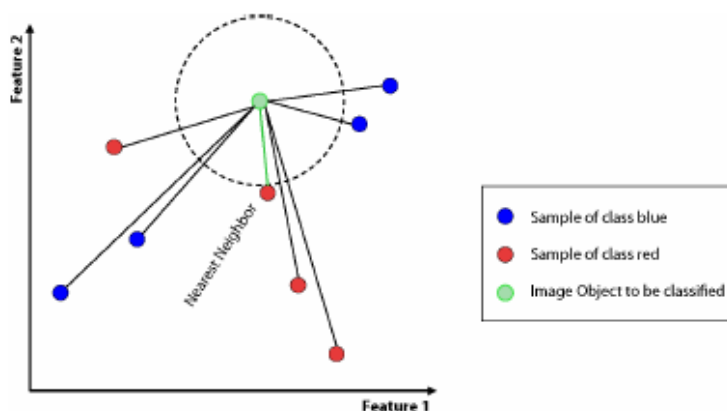
Εικόνα 17: Ορισμός των παραμέτρων κατάτμησης στο λογισμικό eCognition.



Εικόνα 18: Απεικόνιση τμήματος της περιοχής ενδιαφέροντος πριν και μετά την ολοκλήρωση της κατάτμησης με χρήση του λογισμικού eCognition.

Επιλέχθηκε να μη δημιουργηθεί ξεχωριστή κλάση για τους υγροτόπους, καθώς αυτό δημιουργούσε πρόβλημα διάκρισης μεταξύ των υγροτόπων και καλλιεργειών αραβόσιτου. Αντ' αυτού προτιμήθηκε να πραγματοποιηθεί η ταξινόμηση στις εννέα παραπάνω κλάσεις και έπειτα να οριστούν οι περιοχές υγροτόπων με βάση τις χρήσεις γης CORINE του έτους 2000.

Η διαδικασία της ταξινόμησης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δειγμάτων (samples), τα οποία ορίζει ο χρήστης για κάθε μία από τις κλάσεις. Αρχικά, ως δείγματα-περιοχές εκπαίδευσης επιλέχθηκαν δέκα αγροτεμάχια για κάθε κλάση από τη βάση δεδομένων του ΟΠΕΚΕΠΕ έτσι όπως διαμορφώθηκε έπειτα από τις αιτήσεις Ενιαίας Ενίσχυσης των αγροτών το έτος 2013. Ακολούθησε η εφαρμογή της ασαφούς εκδοχής του αλγόριθμου του εγγύτερου γείτονα (Nearest Neighbor). Ο αλγόριθμος συγκρίνει κάθε αντικείμενο με το σύνολο των δειγμάτων των διαφορετικών κλάσεων και το ταξινομεί στην κλάση της οποίας τα δείγματα αποτελούν τον εγγύτατο γείτονα του αντικειμένου (όσον αφορά τις τιμές των ιδιοτήτων του αντικειμένου).



Εικόνα 19: Απεικόνιση μεθόδου ταξινόμησης με χρήση της μεθόδου του εγγύτερου γείτονα. Πηγή: eCognition Developer 7 User's Guide, 2007.

Καθώς η ταξινόμηση έχει ως στόχο την ακριβέστερη διάκριση των διαφορετικών τύπων καλλιεργειών στην περιοχή ενδιαφέροντος, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν κατά την ταξινόμηση για όλες τις κλάσεις χαρακτηριστικά που σχετίζονται με το αντικείμενο (Object-related features) και συγκεκριμένα η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση φωτεινότητας στα διάφορα κανάλια. Για την πραγματοποίηση της ταξινόμησης εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος Hierarchical Classification.

Είναι φανερό πως η επιτυχία κάθε επιβλεπόμενης ταξινόμησης επηρεάζεται σημαντικά από την επιλογή των κατάλληλων περιοχών εκπαίδευσης. Η επιλογή αυτή αντιπροσωπεύοντας όλες τις κλάσεις που συμμετέχουν στην ταξινόμηση πρέπει να είναι πλήρης και ακριβής ως προς τον προσδιορισμό της φασματικής υπογραφής κάθε κλάσης. Επίσης, ο αριθμός και η έκταση των επιλεγόμενων περιοχών εκπαίδευσης εξαρτάται από τη σημαντικότητα της κάθε κλάσης σε σχέση με τους στόχους της ταξινόμησης ή τη μεταβλητότητα που παρουσιάζει. Πολλές φορές είναι χρήσιμο να ληφθούν περισσότερα ή πιο εκτεταμένα δείγματα για τις σημαντικές κατηγορίες και τις κατηγορίες εκείνες οι οποίες παρουσιάζουν ισχυρή

μεταβλητότητα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται αρκετές φορές με στόχο την επίτευξη ικανοποιητικού αποτελέσματος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, έγιναν πολλαπλές επαναλήψεις της διαδικασίας της επιβλεπόμενης ταξινόμησης με μεταβολή κάθε φορά των δειγμάτων μιας ή περισσότερων κλάσεων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα εύρη των εκτάσεων για κάθε μια από τις εννέα κλάσεις, όπως αυτά προέκυψαν από τις εννέα ταξινομήσεις που κρίθηκαν ως οι πιο επιτυχημένες. Εκφράζονται δε σε km<sup>2</sup> και ως ποσοστά επί της συνολικής έκτασης της περιοχής ενδιαφέροντος στην οποία πραγματοποιήθηκε η ταξινόμηση. Εκτός αυτών παρουσιάζεται επίσης το εύρος του δείκτη συνολικής ακρίβειας και ο δείκτης KIA (Kappa Index of Agreement) για τις προαναφερθείσες ταξινομήσεις. Ο τρόπος υπολογισμού των δεικτών αυτών και η σημασία τους περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

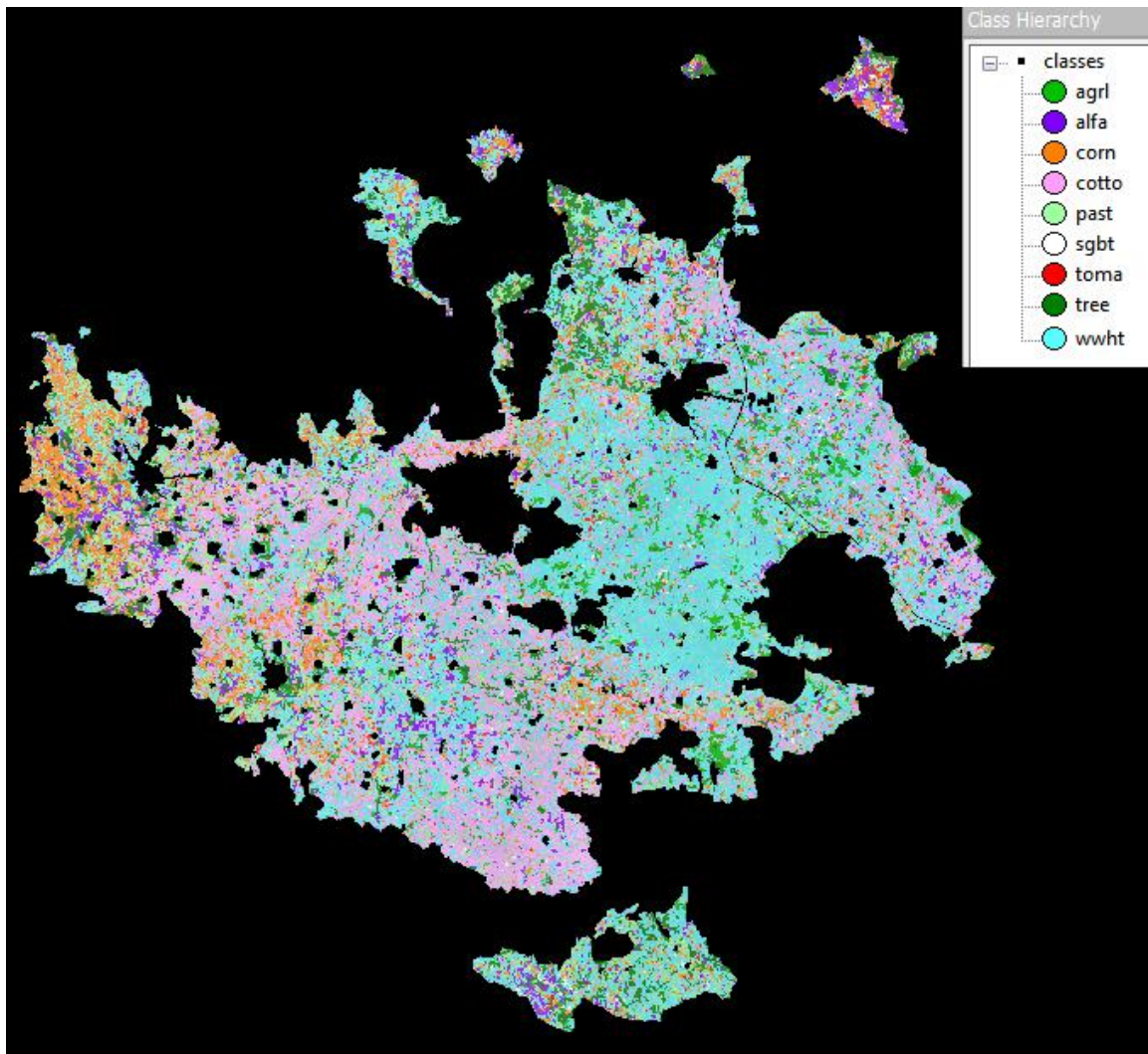
	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Ποσοστό	Συνολική ακρίβεια ταξινόμησης	KIA ταξινόμησης
cotto	917.1-1102.2	23.8-28.9	0.55-0.67	0.47-0.60
corn	276.6-407	7.3-10.7		
alfa	124.3-243.2	3.3-6.4		
toma	19.4-50.1	0.5-1.3		
sgbt	18.1-79.1	0.5-2.1		
wwht	532.5-1504.2	6.2-8.3		
agrl	127-387.8	3.3-10.2		
past	393.4-1219.6	10.3-32		
tree	237.9-316.7	14-39.4		

Πίνακας 4:Εύρη αποτελεσμάτων ταξινόμησης.

Από τις παραπάνω ταξινομήσεις επιλέγεται εκείνη η οποία θεωρείται ακριβέστερη, αφενός επειδή χαρακτηρίζεται από τις υψηλότερες τιμές των δεικτών συνολικής ακρίβειας και KIA συγκριτικά με τις υπόλοιπες ταξινομήσεις και αφετέρου επειδή προσεγγίζει με τον καλύτερο τρόπο την εικόνα της λεκάνης, όπως αυτή διαμορφώθηκε μέσα από τη διαδικασία της φωτοερμηνείας. Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης εκείνης χρησιμοποιούνται για τη μόρφωση του επικαιροποιημένου χάρτη χρήσεων γης της περιοχής μελέτης, που θα χρησιμοποιηθεί ως δεδομένο εισόδου για την κατασκευή του μοντέλου της λεκάνης απορροής του Πηνειού ποταμού.

	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Ποσοστό	Συνολική ακρίβεια ταξινόμησης	KIA ταξινόμησης
cotto	955.2	25.1	0.67	0.60
corn	372.8	9.8		
alfa	224.3	5.9		
toma	19.4	0.5		
sgbt	18.6	0.5		
wwht	1465.1	38.4		
agrl	127	3.3		
past	396.6	10.4		
tree	239.1	6.3		

Πίνακας 5: Αποτελέσματα επιλεγμένης ταξινόμησης.



Εικόνα 20: Αποτελέσματα επιλεγμένης ταξινόμησης της περιοχής ενδιαφέροντος από το πρόγραμμα eCognition. Δεξιά πάνω φαίνεται η ιεραρχία των κλάσεων της ταξινόμησης.

Για την αποτίμηση της ακρίβειας κάθε ταξινόμησης που πραγματοποιήθηκε δημιουργήθηκε ο αντίστοιχος πίνακας σύγχυσης. Αρχικά, ως δεδομένα ελέγχου-περιοχές ελέγχου επιλέχτηκαν δέκα αγροτεμάχια για κάθε κλάση από τη βάση δεδομένων του ΟΠΕΚΕΠΕ, διαφορετικά από αυτά που επιλέχτηκαν ως δείγματα. Έπειτα με χρήση του αλγόριθμου “Error Matrix based on TTA Mask” έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης με τιμές αναφοράς τις δεδομένες περιοχές ελέγχου.

Η κύρια διαγώνιος του πίνακα σύγχυσης περιέχει τα τμήματα εκείνα που επιλέχθηκαν για περιοχές ελέγχου και ταξινομήθηκαν σωστά στις αντίστοιχες κλάσεις. Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του πίνακα αντιπροσωπεύουν τα σφάλματα αποκλεισμού και συμπερίληψης της ταξινόμησης.

Πιο συγκεκριμένα, τα σφάλματα αποκλεισμού αντιστοιχούν στα μη διαγώνια στοιχεία των στηλών του πίνακα και αφορούν τις ακρίβειες του παραγωγού (producer accuracy), δείχνοντας πόσο καλά ταξινομούνται τα τμήματα των περιοχών ελέγχου για κάθε δεδομένη κάλυψη γης-κλάση. Η ακρίβεια για κάθε κλάση υπολογίζεται διαιρώντας τον αριθμό των ορθά ταξινομημένων τμημάτων της (πάνω στην κύρια

διαγώνιο) με το συνολικό αριθμό των τμημάτων της στήλης (συνολικός αριθμός των τμημάτων των περιοχών ελέγχου για τη συγκεκριμένη κλάση). Για παράδειγμα, από τα 819 εικονοστοιχεία των περιοχών ελέγχου που έπρεπε να έχουν ταξινομηθεί στην κατηγορία alfa, μόλις τα 433 έχουν ταξινομηθεί σωστά, ενώ 386 έχουν αποκλειστεί (έχουν ταξινομηθεί σε άλλες κατηγορίες). Επομένως η ακρίβεια του παραγωγού για την κατηγορία alfa ανέρχεται σε ποσοστό 52.9% και το σφάλμα αποκλεισμού σε 47.1%.

Error Matrix based on TTA Mask

User \ Refere...	alfa	sgbt	past	colto	wwht	toma	corn	agrl	tree	Sum
<b>Confusion M...</b>										
alfa	433	11	50	5	22	39	100	14	3	677
sgbt	70	0	0	0	0	0	0	0	0	70
past	0	1	25	70	0	0	51	0	8	155
colto	81	47	0	1263	0	34	35	30	9	1499
wwht	89	22	164	100	1153	2	141	21	162	1854
toma	131	0	0	134	0	18	76	0	0	359
corn	0	10	0	16	3	8	557	5	0	599
agrl	15	1	46	25	31	0	0	0	0	118
tree	0	0	90	8	0	1	0	5	657	761
unclassified	0	0	20	3	6	0	6	0	2	37
Sum	819	92	395	1624	1215	102	966	75	841	
<b>Accuracy</b>										
Producer	0.5286935	0	0.06329113924	0.7777094	0.949	0.1764706	0.5766046	0	0.7812128	
User	0.6395864	0	0.1612903	0.8425617	0.6218986	0.05013927577	0.9298831	0	0.8633377	
KIA Per Class	0.4701692	-0.01155306156	0.03898751128	0.7057410	0.9268408	0.1252319	0.5307431	-0.01963067709	0.7501963	
<b>Totals</b>										
Overall Accu...	0.67									
KIA	0.6									

Εικόνα 21: Ο πίνακας σύγχυσης όπως προκύπτει από τα δείγματα ελέγχου της κάθε κατηγορίας για την επιλεγμένη ταξινόμηση.

Αντίστοιχα, τα σφάλματα συμπερίληψης αντιστοιχούν στα μη διαγώνια στοιχεία των γραμμών του πίνακα και αφορούν τις ακρίβειες ταξινόμησης του χρήστη (user accuracy). Η ακρίβεια χρήστη δηλώνει την πιθανότητα ένα εικονοστοιχείο το οποίο ταξινομήθηκε στο χάρτη να αναπαριστά πραγματικά αυτή τη χρήση εδάφους-κλάση. Υπολογίζεται για κάθε κλάση διαιρώντας τον αριθμό των ορθά ταξινομημένων τμημάτων της (πάνω στην κύρια διαγώνιο) με το συνολικό αριθμό των τμημάτων που ταξινομήθηκαν στην κλάση αυτή (σύνολο γραμμής). Για παράδειγμα, από τα 677 εικονοστοιχεία που ταξινομήθηκαν ως alfa, μόλις τα 433 έχουν ταξινομηθεί σωστά, ενώ 244 έχουν συμπεριληφθεί (στην πραγματικότητα ανήκουν σε άλλες κλάσεις). Επομένως, η ακρίβεια χρήστη για την κατηγορία alfa ανέρχεται σε ποσοστό 64% και το σφάλμα συμπερίληψης σε 36%.

Η συνολική ακρίβεια της ταξινόμησης (overall accuracy) προκύπτει διαιρώντας τον αριθμό των εικονοστοιχείων της κύριας διαγωνίου, δηλαδή των εικονοστοιχείων που ταξινομήθηκαν σωστά, με το συνολικό αριθμό των εικονοστοιχείων των περιοχών ελέγχου. Στη συγκεκριμένη δε ταξινόμηση ανέρχεται σε ποσοστό 67%.

Ο στατιστικός δείκτης KIA (Kappa Index of Agreement) είναι αποτέλεσμα της ανάλυσης Kappa και αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους δείκτες συμφωνίας ή ακρίβειας για την αξιολόγηση ταξινομήσεων, καθώς χρησιμοποιεί τόσο τα διαγώνια όσο και τα μη διαγώνια στοιχεία ενός πίνακα σύγχυσης. Χρησιμοποιείται τόσο για την

εκτίμηση της ακρίβειας μιας ταξινόμησης όσο και για τη σύγκριση διαφορετικών ταξινομήσεων, ειδικά αν αναφέρονται σε διαφορετικές ημερομηνίες ή έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικές τεχνικές. Ο δείκτης αυτός δηλώνει τη διαφορά μεταξύ των πραγματικών συμφωνιών, δηλαδή των ορθών ταξινομήσεων που παρουσιάζονται στην κύρια διαγώνιο του πίνακα σύγχυσης, και των τυχαίων συμφωνιών μεταξύ των περιοχών ελέγχου και των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015).

$$KIA = \frac{\text{observed accuracy} - \text{chance agreement}}{1 - \text{chance agreement}}$$

Ο δείκτης KIA συνήθως κυμαίνεται από 0 έως 1 με την τιμή ένα να αποτελεί την ιδανική περίπτωση, ενώ μπορεί να πάρει και αρνητικές τιμές εκφράζοντας μια φτωχή ταξινόμηση. Η τιμή 0.6 της συγκεκριμένης ταξινόμησης σημαίνει ότι η ταξινόμηση λόγω των πραγματικών συμφωνιών είναι 60% καλύτερη από την τυχαία ταξινόμηση. Ο τύπος υπολογισμού του δείκτη δίνεται παρακάτω:

$$KIA = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}$$

όπου:

N: το πλήθος των παρατηρήσεων στον πίνακα σύγχυσης

R: το πλήθος των σειρών/ στηλών του πίνακα σύγχυσης

$x_{i+}$ : το άθροισμα των παρατηρήσεων της σειράς i

$x_{+i}$ : το άθροισμα των παρατηρήσεων της στήλης i

Για την αξιολόγηση της ακρίβειας μιας ταξινόμησης δεν αρκεί μόνο ο υπολογισμός της συνολικής ακρίβειας και του δείκτη KIA. Είναι αναγκαίο να πραγματοποιείται ταυτόχρονα υπολογισμός και μελέτη των ακριβειών παραγωγού και χρήστη, δίνοντας ιδιαίτερη σημασία στις κλάσεις οι οποίες είναι σημαντικές για το σκοπό της ταξινόμησης. Συγκεκριμένα, στην παρούσα ταξινόμηση η συνολική ακρίβεια κρίνεται ως μη ικανοποιητική σύμφωνα με τα κριτήρια που τίθενται στη διεθνή βιβλιογραφία. Για παράδειγμα, οι Thomlinson, Bolstad και Cohen (1999), για να θεωρηθεί μια ταξινόμηση ως επαρκώς ακριβής, θέτουν ως κατώφλι 85% για τη συνολική ακρίβεια και 70% για την επιμέρους ακρίβεια κάθε κλάσης.

Μελετώντας όμως μεμονωμένα τις κλάσεις, παρατηρούμε ότι οι κλάσεις cotto, wwht, corn, alfa και tree παρουσιάζουν ικανοποιητική ακρίβεια παραγωγού και χρήστη. Τα μεγαλύτερα σφάλματα αποκλεισμού και συμπερίληψης εμφανίζονται στις κλάσεις sgbt, toma, past και agrl που αντιστοιχούν στις καλλιέργειες ζαχαρότευτλου και τομάτας, στις εκτάσεις για βόσκηση και στις εκτάσεις σε αγρανάπαυση. Οι παραπάνω καλλιέργειες συναντώνται σε αγροτεμάχια που στην πλειοψηφία τους είναι πολύ μικρότερης έκτασης συγκριτικά τόσο με τα αγροτεμάχια άλλων καλλιεργειών στην περιοχή μελέτης όπως το βαμβάκι ή το σιτάρι, όσο και με τα αντικείμενα της κατάτμησης, γεγονός που αιτιολογεί τη δυσκολία εντοπισμού και σωστής ταξινόμησής τους.

Όσον αφορά την κατηγορία agrl, στην οποία εντάσσονται οι εκτάσεις σε αγρανάπαυση, παρατηρήθηκαν εξαιρετικά χαμηλές ακρίβειες παραγωγού και χρήστη



στην πλειοψηφία των ταξινομήσεων που έγιναν. Λαμβάνοντας επιπρόσθετα υπόψη ότι αφενός μεν θεσπίστηκε υποχρεωτική και επιδοτούμενη ετήσια αγρανάπαυση ή ακαλλιέργητο περιθώριο ανερχόμενο τουλάχιστον στο 20-25% της ενταγμένης έκτασης στο πλαίσιο της Δράσης 2.1 «Προστασία των Ευαίσθητων στα Νιτρικά Περιοχών» του Προγράμματος Αγροτικής Ανάπτυξης της Ελλάδας (ΠΑΑ) 2007-2013, το οποίο υλοποιήθηκε και στην περιοχή της Θεσσαλίας, αφετέρου δε ότι τόσο οι περιοχές εκπαίδευσης όσο και τα σημεία ελέγχου της ταξινόμησης προέρχονται από αρχείο του ΟΠΕΚΕΠΕ, το οποίο βασίζεται στις δηλώσεις των αγροτών που αιτούνται επιδότηση Ενιαίας Ενίσχυσης το 2013 χωρίς τη διενέργεια ποιοτικού ελέγχου ακρίβειας στα στοιχεία αυτά, τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα ότι για τα προαναφερθέντα χαμηλά ποσοστά ακριβειών είναι πιθανότερο να ευθύνεται το ανακριβές των δηλώσεων παρά κάποιο σφάλμα στη διαδικασία της ταξινόμησης.

Ωστόσο, για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας κρίνεται σκόπιμο να μην υπάρξει περαιτέρω διερεύνηση εναλλακτικών ταξινομήσεων για την επίτευξη υψηλότερης ακρίβειας. Από τον πίνακα σύγκρισης είναι φανερό ότι στην επιλεγμένη ταξινόμηση έχει επιτευχθεί καλή διάκριση μεταξύ αρδευόμενων και μη εκτάσεων καθώς επίσης και εντοπισμός των διαφορετικών αρδευόμενων καλλιεργειών με εξαίρεση τις αμελητέες έκτασης καλλιέργειες τομάτας και ζαχαρότευτλου. Αυτός ο διαχωρισμός εξυπηρετεί τους σκοπούς δημιουργίας του αναθεωρημένου χάρτη χρήσεων γης για τη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού και συνεπώς τα αποτελέσματα της παρούσας ταξινόμησης κρίνονται επαρκώς ακριβή.

Τελικώς, τα αποτελέσματα της ταξινόμησης εξήχθησαν από το λογισμικό eCognition μέσω του αλγορίθμου export vector layers σε μορφή .shp και εισήχθησαν στο περιβάλλον ArcMap του λογισμικού ArcGIS για περαιτέρω επεξεργασία.

### 3.5 ARCGIS-ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΧΑΡΤΩΝ<sup>1</sup>

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΓΠΣ ή GIS-Geographic Information Systems) είναι πληροφοριακά συστήματα τα οποία επιτρέπουν τη σύνδεση χωρικών δεδομένων με περιγραφική πληροφορία. Τα δεδομένα αυτά συλλέγονται, διαχειρίζονται, αποθηκεύονται, αναλύονται και οπτικοποιούνται σε ψηφιακό περιβάλλον, οργανωμένα με τοπολογικές σχέσεις αναφορικά με το γεωγραφικό χώρο.

Το πλέον διαδεδομένο εμπορικό εργαλείο για τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών είναι το ArcGIS, κατασκευής της Environmental Systems Research Institute Inc (ESRI). Το ArcGIS είναι μια ολοκληρωμένη συλλογή από προγράμματα λογισμικού για Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) και χρησιμοποιείται σε μεγάλη ποικιλία εφαρμογών οι οποίες περιλαμβάνουν σχεδιασμό, ανάλυση,

---

<sup>1</sup> Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης και η παραγωγή χαρτών χρήσεων γης για την περιοχή μελέτης δεν υποκαθιστούν, ούτε έρχονται σε αντίθεση, με επίσημες πηγές που υφίστανται για τις χρήσεις γης στη λεκάνη του Πηνειού. Η συγκεκριμένη εργασία είχε εκπαιδευτικό και ερευνητικό χαρακτήρα. Οι όποιες απλοποιητικές παραδοχές γίνονται εξυπηρετούν τις απαιτήσεις χρήσης αυτών των προϊόντων σε εφαρμογές υδρολογικής ανάλυσης και διερεύνησης επιπτώσεων γεωργικών πρακτικών.

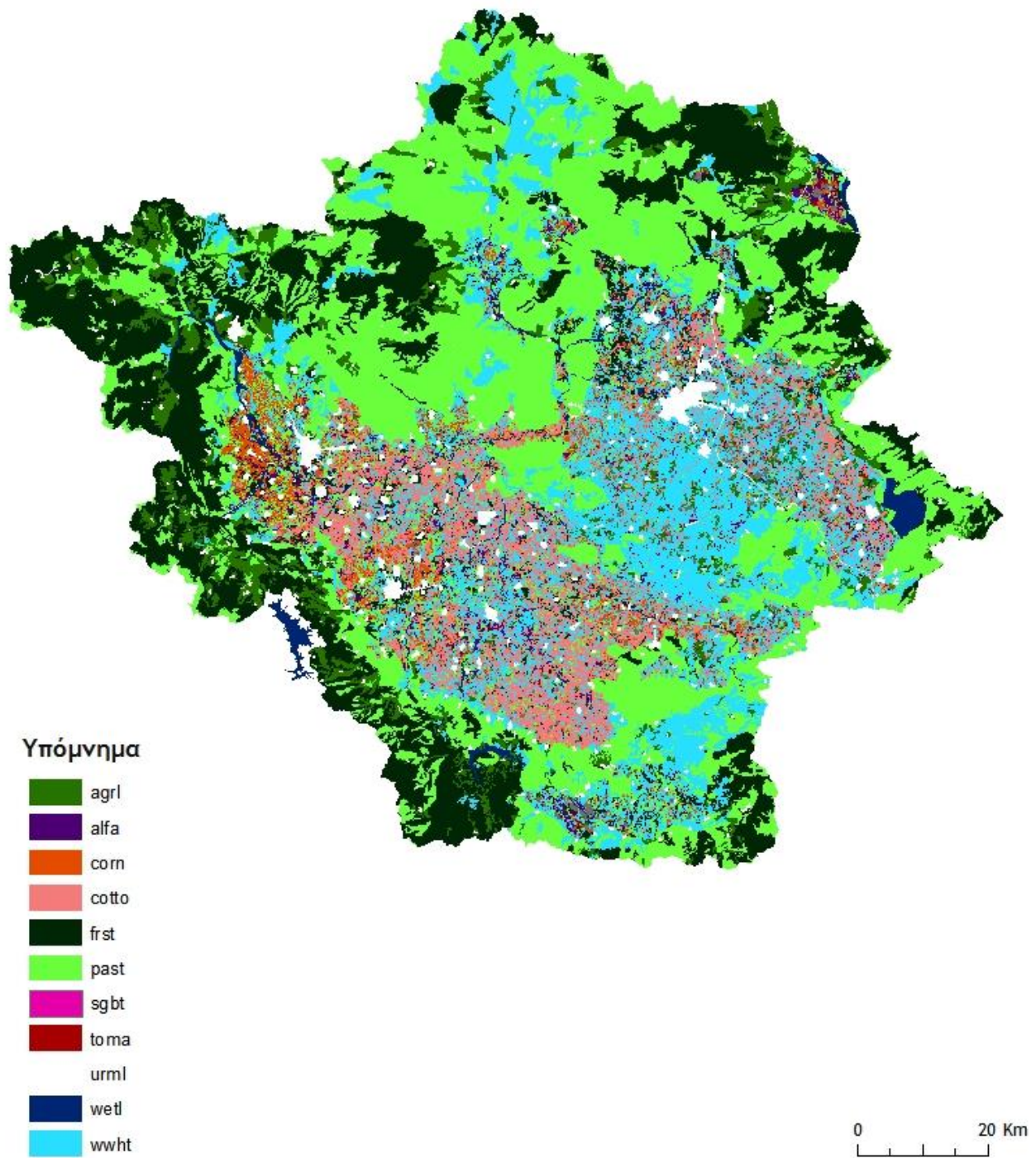
διαχείριση και καταγραφή γεωγραφικών συστημάτων, περιβαλλοντική διαχείριση, διαχείριση του κτηματολογίου κ.α.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία για την γεωχωρική προσομοίωση της περιοχής μελέτης χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ArcGis 10.0. Στο περιβάλλον ArcMap του ArcGIS έγινε σύνθεση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης και των χρήσεων γης Corine του έτους 2000 με σκοπό να προκύψει ο τελικός χάρτης των χρήσεων γης για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Πηνειού. Συγκεκριμένα:

- Οι εκτάσεις εκτός περιοχής ενδιαφέροντος που χαρακτηρίζονται από το Corine ως *wwht* (σιτάρι) διατηρήθηκαν και ενώθηκαν με τις εκτάσεις οι οποίες χαρακτηρίστηκαν ως *wwht* μέσα από τη διαδικασία της ταξινόμησης.
- Αντίστοιχα, οι εκτάσεις εκτός περιοχής ενδιαφέροντος που χαρακτηρίζονται από το Corine ως *agrl* (γη σε αγρανάπαυση) διατηρήθηκαν και ενώθηκαν με τις εκτάσεις οι οποίες χαρακτηρίστηκαν ως *agrl* μέσα από τη διαδικασία της ταξινόμησης.
- Οι εκτάσεις εκτός περιοχής ενδιαφέροντος που χαρακτηρίζονται από το χάρτη Corine ως *frsd*, *frse* και *frst* (δάσος φυλλοβόλων, αειθαλές δάσος και μεικτό δάσος αντίστοιχα) διατηρήθηκαν και ενώθηκαν σε μία ενιαία χρήση γης με το όνομα *frst*, συμπεριλαμβάνοντας και τις εκτάσεις οι οποίες χαρακτηρίστηκαν ως *tree* μέσα από τη διαδικασία της ταξινόμησης.
- Ομοίως, οι εκτάσεις εκτός περιοχής ενδιαφέροντος που χαρακτηρίζονται από το χάρτη Corine ως *past*, *rnge* και *rngb* (βοσκοτόπια, λιβάδια και θαμνώδεις εκτάσεις αντίστοιχα) διατηρήθηκαν και ενώθηκαν σε μία ενιαία χρήση γης με το όνομα *past* συμπεριλαμβάνοντας και τις εκτάσεις οι οποίες χαρακτηρίστηκαν ως *past* μέσα από τη διαδικασία της ταξινόμησης.
- Στην κατηγορία *wetl* (υγρότοποι) διατηρήθηκαν οι περιοχές που ορίζονται από το χάρτη των χρήσεων γης Corine 2000 σε ολόκληρη την περιοχή μελέτης.
- Στην κατηγορία *urml* (αστική γη μέσης πυκνότητας) εντάχθηκαν οι περιοχές που ορίζονται ως *urml* και *uidu* (αστική βιομηχανική γη) στο χάρτη Corine αλλά και οι περιοχές που αναγνωρίστηκαν μέσα από τη διαδικασία της φωτοερμηνείας ως αστικός ιστός, βιομηχανικές και εμπορικές μονάδες, αεροδρόμια και αθλητικές εγκαταστάσεις.
- Όσον αφορά τις χρήσεις γης *corn*, *sgbt*, *alfa*, *toma* και *cotto* (αραβόσιτος, ζαχαρότευτλα, μηδική, τομάτα και βαμβάκι αντίστοιχα) διατηρήθηκαν μόνο οι εκτάσεις που αποδόθηκαν για κάθε μια χρήση από τη διαδικασία της ταξινόμησης.
- Τέλος, όσες εκτάσεις δεν αποδόθηκαν σε κάποια από τις προαναφερθείσες χρήσεις γης μέσω της παραπάνω διαδικασίας ενσωματώθηκαν στην κατηγορία *past*.

Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε ο χάρτης με τις κυριότερες χρήσεις γης της λεκάνης απορροής του ποταμού Πηνειού. Για κάθε μια από τις χρήσεις γης που εμφανίζονται στο χάρτη, υπολογίστηκε η συνολική έκταση σε  $\text{km}^2$  καθώς και το ποσοστό κάλυψης επί της συνολικής έκτασης της λεκάνης απορροής.

# Χάρτης χρήσεων γης στη λεκάνη απορροής του ποταμού Πηνειού, 2013



Εικόνα 22: Χάρτης των χρήσεων γης στη λεκάνη απορροής του ποταμού Πηνειού.

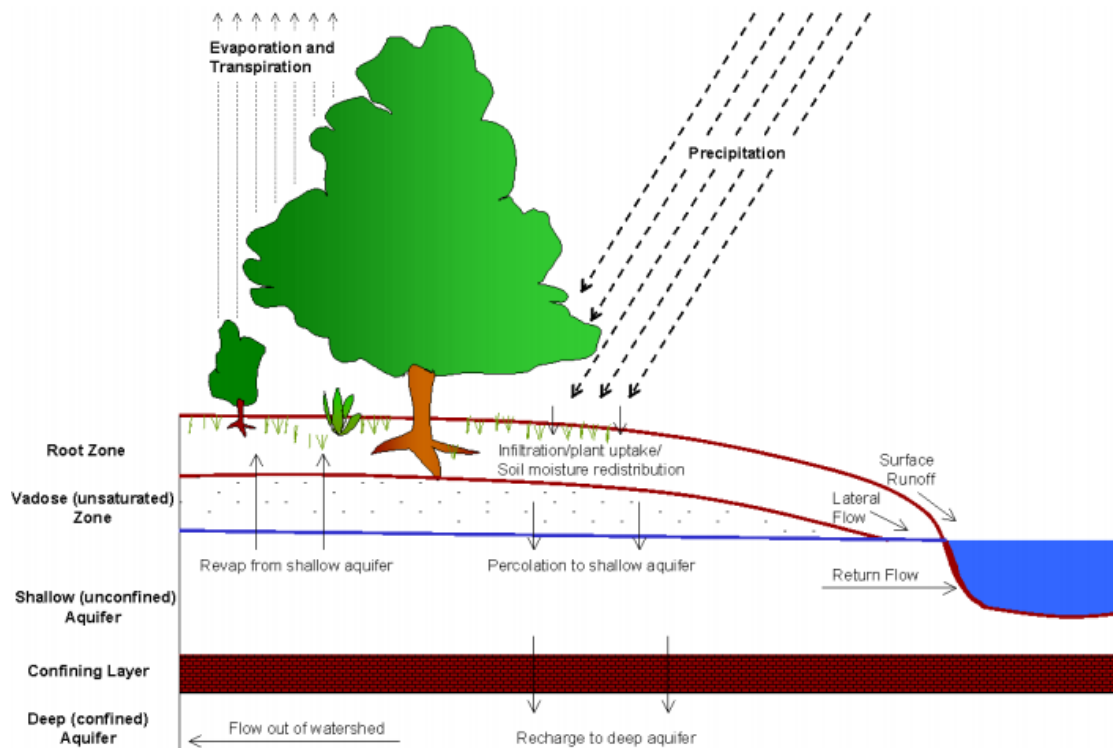
Κατηγορία	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Ποσοστό κάλυψης επί της συνολικής έκτασης (%)	Ποσοστό κάλυψης επί της αρδευόμενης έκτασης (%)
past	3857.18	34.79	-
frst	2339.8	21.11	-
wwht	2118.59	19.11	-
cotto	935.13	8.44	59.13
agrl	741.27	6.68	-
corn	369.37	3.33	23.36
urml	304.18	2.74	-
alfa	208.93	1.89	13.21
wetl	144.04	1.3	-
toma	50.05	0.45	3.17
sgbt	17.92	0.16	1.13
Σύνολο	11086.46	100	100

Πίνακας 6: Οι κατηγορίες χρήσεων γης στην περιοχή μελέτης.

## ΚΕΦ. 4: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ SWAT

### 4.1 Το ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SWAT

Το Soil and Water Assessment Tool ή SWAT όπως είναι γνωστό, είναι ένα υδρολογικό μοντέλο λεκάνης απορροής, το οποίο αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Γεωργικής Έρευνας του Υπουργείου Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (USDA -ARS) στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Αρχικός στόχος του λογισμικού αυτού ήταν η πρόβλεψη της επίδρασης των πρακτικών διαχείρισης γης όσον αφορά το νερό, τα φερτά υλικά και τη συγκέντρωση ρύπων σε μεγάλες λεκάνες απορροής, οι οποίες παρουσιάζουν διαφοροποιούμενη εδαφική σύσταση, χρήσεις γης και τεχνικές διαχείρισης, για μεγάλες χρονικές περιόδους (Neitsch, Arnold, Kiniry, Srinivasan, & Williams, 2009). Σήμερα διατίθεται ελεύθερα μέσω του διαδικτύου και θεωρείται ένα από τα πιο δημοφιλή λογισμικά υδρολογικής προσομοίωσης παγκοσμίως.

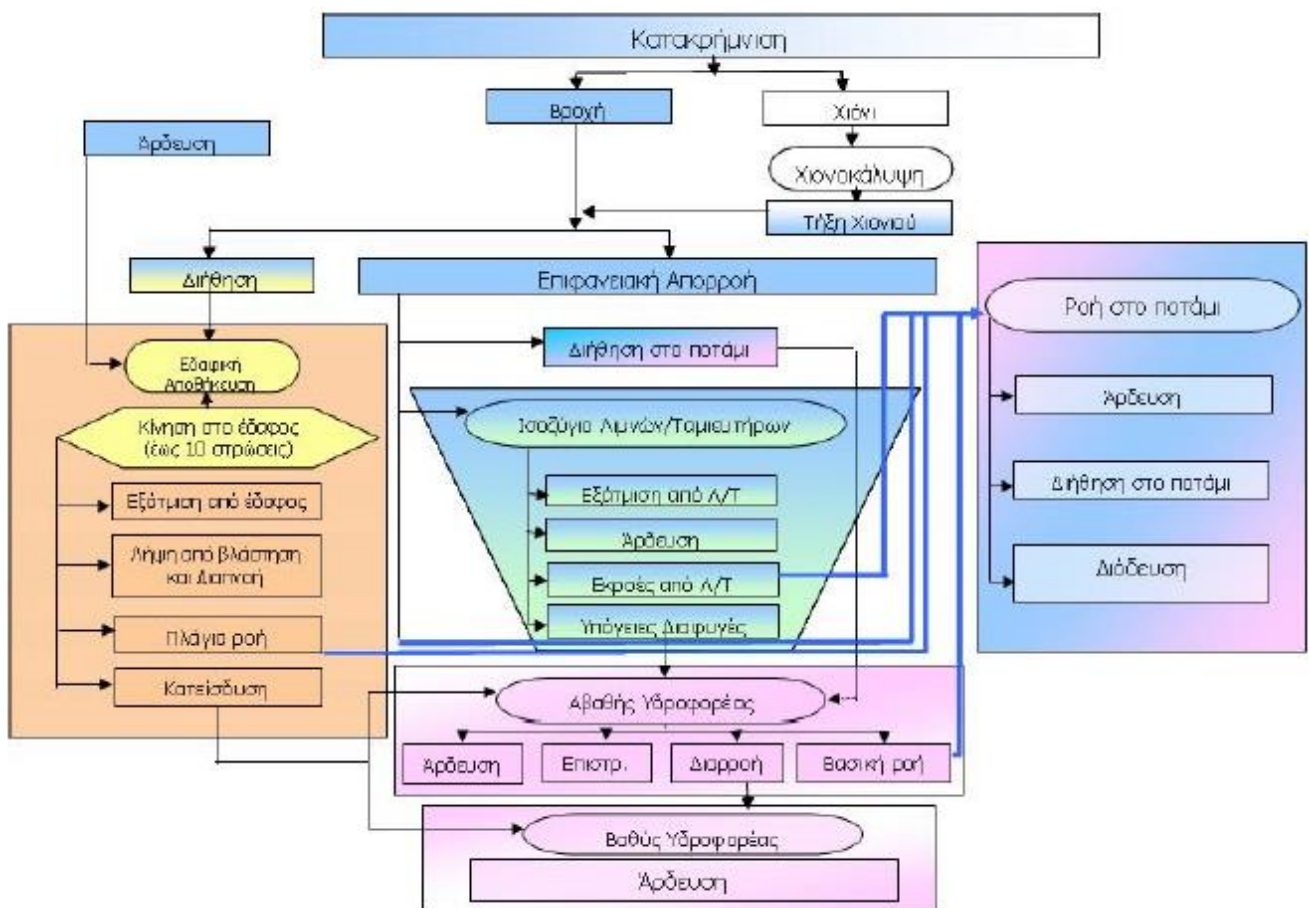


Εικόνα 23: Σχηματική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου. Πηγή: Neitsch, Arnold, Kiniry, Srinivasan, & Williams, 2009.

Το SWAT αποτελεί ένα μοντέλο καταμετρημένο, αφού επιτρέπει τη χωρική διαφοροποίηση των παραμέτρων, προσδιοριστικό, καθώς δίνει μονοσήμαντες προγνώσεις των μεταβλητών που αναπαριστά, συνεχούς χρόνου και φυσικής βάσης, αφού αντί για τη χρήση εξισώσεων παλινδρόμησης το SWAT δέχεται συγκεκριμένα κλιματικά, γεωλογικά, τοπογραφικά δεδομένα, δεδομένα βλάστησης και διαχείρισης της γης, τα οποία χρησιμοποιεί για να προσομοιώσει τις βασικές λειτουργίες μέσα στη λεκάνη απορροής. Έτσι, επιτρέπει την προσομοίωση λεκανών απορροής με ελλιπή δεδομένα, καθώς μπορεί να τα αντικαταστήσει με παραγόμενες χρονοσειρές/

δεδομένα με βάση στατιστικά δεδομένα τα οποία εισάγει ο χρήστης. Ταυτόχρονα, επιτρέπει στο χρήστη να εξοικειωθεί με το υδρολογικό σύστημα και να ποσοτικοποιήσει το μακροχρόνιο αντίκτυπο εναλλακτικών σεναρίων στην ποιότητα και διαθεσιμότητα νερού. Τέλος, το λογισμικό SWAT επιτρέπει την προσομοίωση μεγάλων και πολύπλοκων λεκανών απορροής με οικονομία στο χρόνο και τους υπολογιστικούς πόρους.

Τα σημαντικότερα φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα στη λεκάνη απορροής όπως η μετατροπή της κατακρήμνισης σε απορροή, η εξατμισοδιαπνοή, η στερεομεταφορά και πολλά άλλα προσομοιώνονται στο λογισμικό SWAT με τη χρήση των γνωστών εξισώσεων της υδρολογίας. Τα φαινόμενα αυτά ανήκουν στις δύο διακριτές φάσεις του υδρολογικού κύκλου. Η χερσαία φάση του υδρολογικού κύκλου καθορίζει την ποσότητα νερού, ιζήματος καθώς και τα φορτία θρεπτικών ουσιών και φυτοφαρμάκων που καταλήγουν στο κύριο ρεύμα κάθε υπολεκάνης. Η δεύτερη φάση περιλαμβάνει την κίνηση νερού, ιζημάτων και φορτίων μέσω του δικτύου ρευμάτων προσεγγίζοντας την έξοδο της λεκάνης απορροής.



Εικόνα 24: Σχηματική απεικόνιση των διαθέσιμων κινήσεων νερού στο λογισμικό SWAT. Πηγή: Παναγόπουλος, 2010 από Neitsch, Arnold, Kiniry, Srinivasan, & Williams, 2009.

Η γενική εξίσωση που χρησιμοποιεί το SWAT για την περιγραφή του υδρολογικού κύκλου είναι η εξής:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i)$$

όπου:

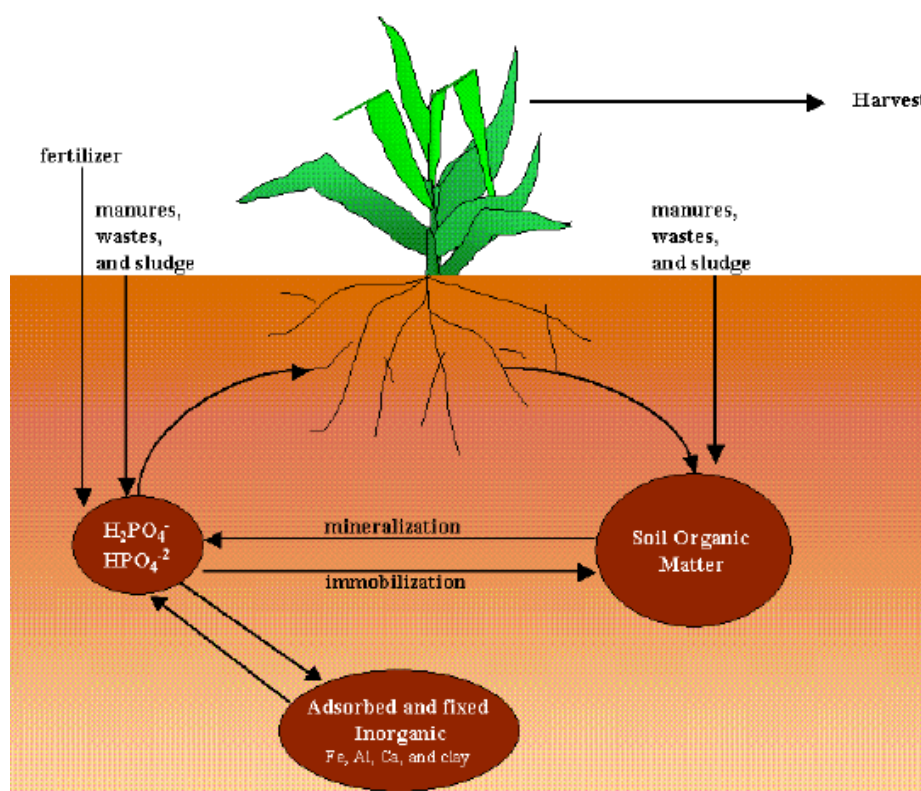
- SW<sub>t</sub>: το τελικό περιεχόμενο του εδάφους σε νερό (mm)
- SW<sub>0</sub>: το αρχικό περιεχόμενο του εδάφους σε νερό (mm)
- R: η ημερήσια κατακρήμνιση (mm)
- Q: η ημερήσια επιφανειακή απορροή (mm)
- ET: η ημερήσια εξατμισοδιαπνοή (mm)
- P: η ημερήσια διήθηση (mm)
- QR: η ημερήσια υπόγεια ροή (mm)

Όσο αφορά τη δεύτερη φάση του υδρολογικού κύκλου, η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε υπολεκάνες, για να προσομοιωθεί η ροή του νερού στο υδρολογικό δίκτυο. Σε κάθε υπολεκάνη υπάρχουν τα κύρια τμήματα του ποταμού και οι παραπόταμοι. Η ροή του νερού προσομοιώνεται ως ροή με ελεύθερη επιφάνεια και στο λογισμικό SWAT χρησιμοποιείται η εξίσωση Manning για τον προσδιορισμό της ταχύτητας της ροής. Καθώς το νερό ρέει προς τα κατάντη, υπάρχουν απώλειες λόγω εξάτμισης μέσω του πυθμένα του ποταμού ή λόγω απολήψεων. Η ροή μπορεί να ενισχυθεί από τη βροχόπτωση άμεσα μέσα στον ποταμό ή από εισροή νερού από σημειακές πηγές. Για τη διόδευση της ροής μέσα στον ποταμό χρησιμοποιείται είτε η μέθοδος μεταβλητού συντελεστή αποθήκευσης που αναπτύχθηκε από τον Williams (1969) είτε η μέθοδος Muskingum. Επίσης προσομοιώνεται η κίνηση του ιζήματος, των θρεπτικών και των φυτοφαρμάκων κατά μήκος του ποταμού. Το λογισμικό SWAT δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης τεσσάρων ειδών υδατικών σωμάτων: λιμνών, υγροτόπων, κοιλωμάτων-καθιζήσεων εδάφους και ταμιευτήρων. Οι τρεις πρώτοι τύποι υδατικών σωμάτων τοποθετούνται εκτός του κύριου τμήματος του ποταμού και δέχονται εισροές νερού προερχόμενου μόνο από την υπολεκάνη μέσα στην οποία βρίσκονται. Αντίθετα, οι ταμιευτήρες τοποθετούνται στο κύριο τμήμα του ποταμού και οι εισροές τους προέρχονται από την περιοχή της λεκάνης απορροής που βρίσκεται ανάντη.

Πέραν των ανωτέρω το κυριότερο ίσως στοιχείο διαφοροποίησης αυτού του λογισμικού από τα άλλα διαθέσιμα λογισμικά υδρολογικής προσομοίωσης λεκάνης απορροής είναι ο διαχωρισμός της λεκάνης απορροής σε υπολεκάνες και Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης (Hydrologic Response Units-HRUs) διαδοχικά. Αρχικά η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε μικρότερα τμήματα το καθένα από τα οποία διαθέτει έξοδο ορισμένη στο δίκτυο ρευμάτων της λεκάνης. Το χαρακτηριστικό αυτό δίνει τη δυνατότητα να υπολογιστούν δεδομένα εξόδου, λ.χ. η παροχή, σε παραπάνω από ένα εσωτερικά σημεία της λεκάνης. Ακολουθεί περαιτέρω διαχωρισμός της λεκάνης απορροής σε HRUs με κριτήρια κλίσης, εδαφικής σύστασης και χρήσεων γης. Η παραπάνω εξίσωση του υδρολογικού κύκλου και οι εξισώσεις της διάβρωσης και των κύκλων των θρεπτικών εφαρμόζονται σε κάθε HRU και η επιφανειακή απορροή, οι υπόγειες ροές και οι φορτίσεις οδηγούνται μέσω των κατάντη HRUs μέχρι την έξοδο της λεκάνης. Σημειώνεται ότι η κλίση του εδάφους και η βροχόπτωση ορίζονται σε επίπεδο υπολεκάνης. Η χρήση των HRUs επιτρέπει τη συμπερίληψη και προσομοίωση της εδαφικής, τοπογραφικής και αναφορικής στις χρήσεις γης ετερογένειας στη λεκάνη απορροής και συνεπώς την καλύτερη φυσική περιγραφή του υδρολογικού

κύκλου και στη δημιουργία ενός ακριβέστερου μοντέλου με καλύτερες δυνατότητες πρόβλεψης (Douglas-Mankin, Srinivasan, & Arnold, 2010).

Η προσομοίωση των διεργασιών που σχετίζονται με τον υδρολογικό κύκλο πραγματοποιείται στο λογισμικό SWAT σε πολλαπλά επίπεδα. Η προσομοίωση της απορροής, των διεργασιών διάβρωσης, της κίνησης του εδαφικού νερού, της εξατμισοδιαπνοής, της ανάπτυξης και απόδοσης των καλλιεργειών, του κύκλου των θρεπτικών ουσιών και του άνθρακα και της μεταφοράς και αποδόμησης βακτηρίων και φυτοφαρμάκων επιτυγχάνεται σε επίπεδο HRU. Το SWAT δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης πλήθους γεωργικών πρακτικών όπως άρωση, λίπανση, αποστράγγιση αγροτεμαχίου, άρδευση και δημιουργία ζωνών ανάσχεσης. Η κατακράτηση νερού, φερτών υλικών και ρύπων καθώς και η αποδόμηση των θρεπτικών ουσιών, των φυτοφαρμάκων και των βακτηρίων κατά τη διάρκειά της, προσομοιώνονται σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Τέλος, σε επίπεδο ρευμάτων διακινείται η ροή, αποτίθεται και συμπαρασύρεται το ίζημα και γίνεται η αποδόμηση των θρεπτικών ουσιών, των φυτοφαρμάκων και των βακτηρίων κατά τη διάρκεια της μεταφοράς τους. Το SWAT παράγει ημερήσια αποτελέσματα για την έξοδο κάθε υπολεκάνης, τα οποία αθροιζόμενα δίνουν τα μηνιαία και ετήσια φορτία/παροχές.

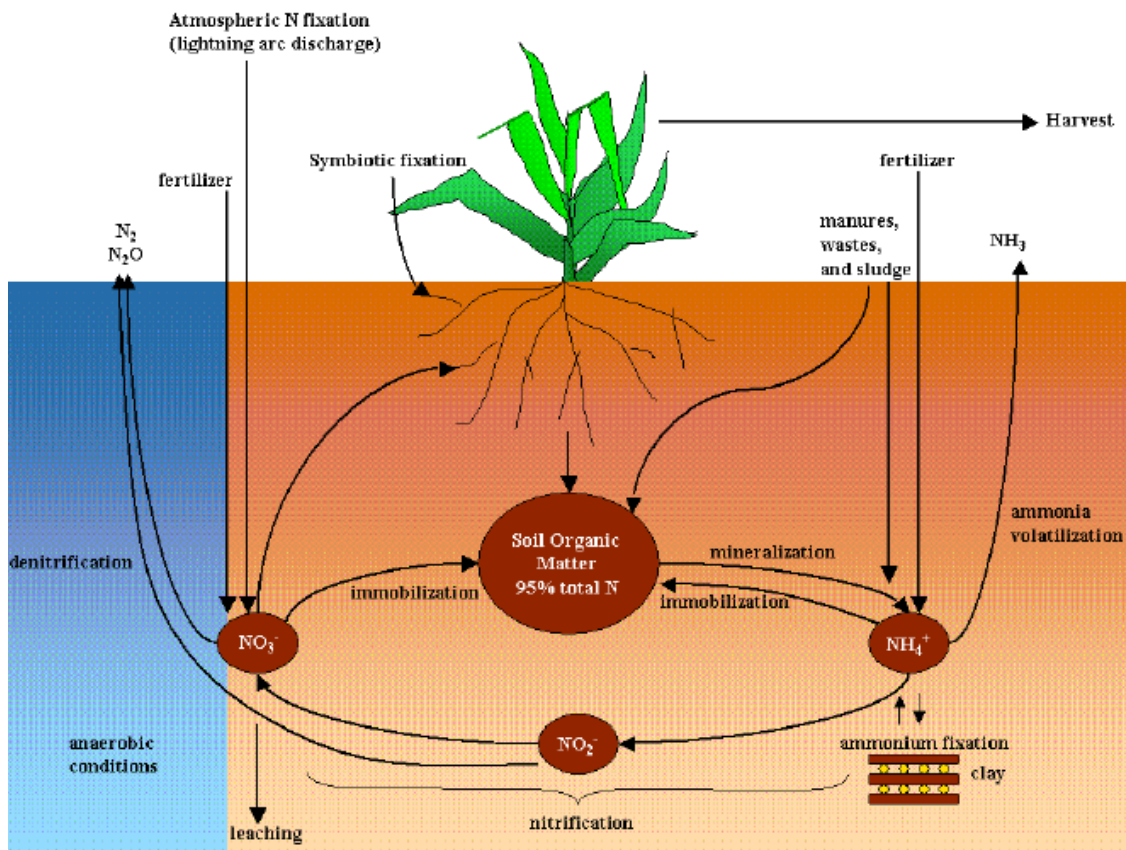


Εικόνα 25: Ο κύκλος του φωσφόρου. Πηγή: Neitsch, Arnold, Kiniry, Srinivasan, & Williams (2009).

Η προσομοίωση από το λογισμικό SWAT της κίνησης και μετατροπής πολλαπλών μορφών φωσφόρου και αζώτου στη λεκάνη απορροής καθορίζεται από τον κύκλο φωσφόρου και αζώτου αντίστοιχα, όπως παρουσιάζονται στις εικόνες 25 και 26. Συγκεκριμένα, οι κυριότερες γραμμές ροής του φωσφόρου είναι η ανοργανοποίηση

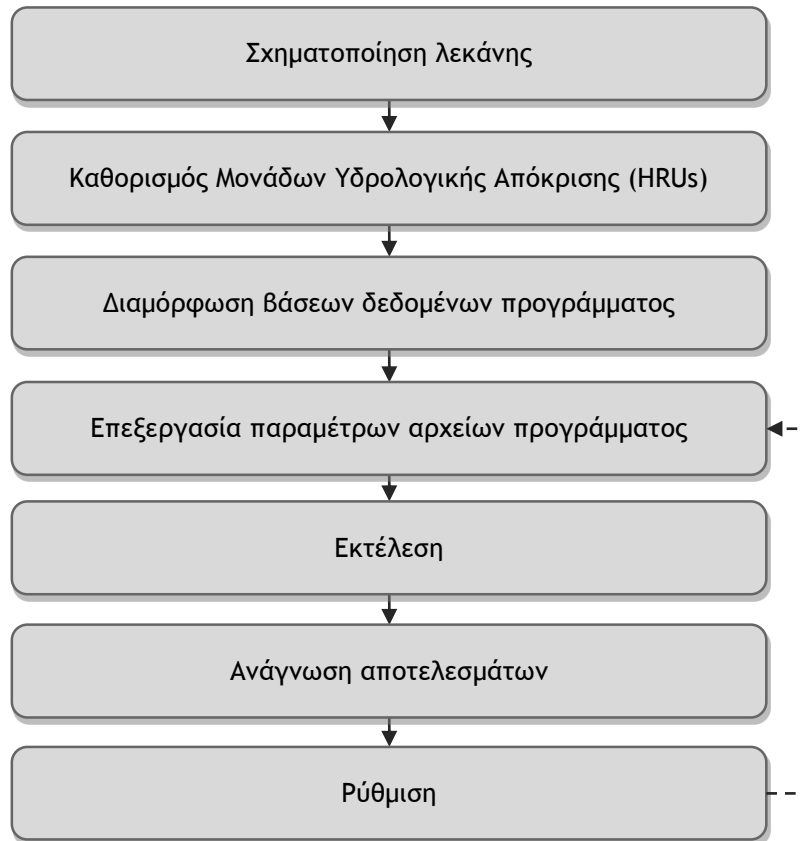


(mineralization), δηλαδή η παραγωγή ανόργανων μορφών φωσφόρου διαθέσιμων για τα φυτά μέσω της διάσπασης νεκρής οργανικής ύλης από τους μικροοργανισμούς του εδάφους, και η προσρόφηση (absorption), δηλαδή ο σχηματισμός αδιάλυτων ενώσεων φωσφόρου με ιόντα σιδήρου, αργιλίου κ.α. που βρίσκονται στο έδαφος.



Εικόνα 26: Ο κύκλος του αζώτου. Πηγή: Neitsch, Arnold, Kiniry, Srinivasan, & Williams (2009).

Αναφορικά με τον κύκλο του αζώτου η είσοδος του στο έδαφος πραγματοποιείται μέσω εφαρμογής λιπασμάτων, ατμοσφαιρικής εναπόθεσης και φυσικής ή βιολογικής δέσμευσης (fixation). Αφαιρείται από το έδαφος μέσω της πρόσληψης από τα φυτά, της κατείδυσης στον υπόγειο υδροφόρα, της αμμωνιοποίησης ή εξάχνωσης (ammonia volatilization), της απονιτροποίησης (denitrification) και της διάβρωσης του εδάφους. Το φαινόμενο της νιτροποίησης (nitrification) αφορά τη βιολογική μετατροπή της αμμωνίας σε νιτρικά ( $\text{NO}_3^-$ ) και αποτελεί παράγοντα αποξυγόνωσης εξαιτίας της αερόβιας οξειδωσης που λαμβάνει μέρος. Αντίθετα, η απονιτροποίηση αφορά τη μετατροπή των νιτρικών σε μονοξείδιο του αζώτου ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ή αέριο άζωτο ( $\text{N}_2$ ) από μικροοργανισμούς κάτω από αναερόβιες συνθήκες. Η είσοδος του αζώτου στον υπόγειο υδροφόρα γίνεται μέσω της κατείδυσης νερού από το εδαφικό στρώμα. Συγκεκριμένα, στο λογισμικό SWAT το άζωτο στον υπόγειο αβαθή υδροφόρα παραμένει εντός του υδροφόρα, είτε κατεισδύει στον βαθύ υπόγειο υδροφόρα εκρέοντας στο κύριο ρεύμα μέσω της βασικής απορροής είτε επιστρέφει στο εδαφικό στρώμα ανάλογα με το έλλειμμα υγρασίας.



Εικόνα 27: Στάδια προσομοίωσης στο SWAT.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcSWAT 2012.10.18 ως επέκταση του ArcGIS/ArcView και ως γραφικό περιβάλλον-διεπαφή του χρήστη με το πρόγραμμα SWAT για την εισαγωγή δεδομένων. Μια συνοπτική σχηματοποίηση των βημάτων που ακολουθήθηκαν για την επιτυχή προσομοίωση της περιοχής μελέτης παρατίθεται παραπάνω.

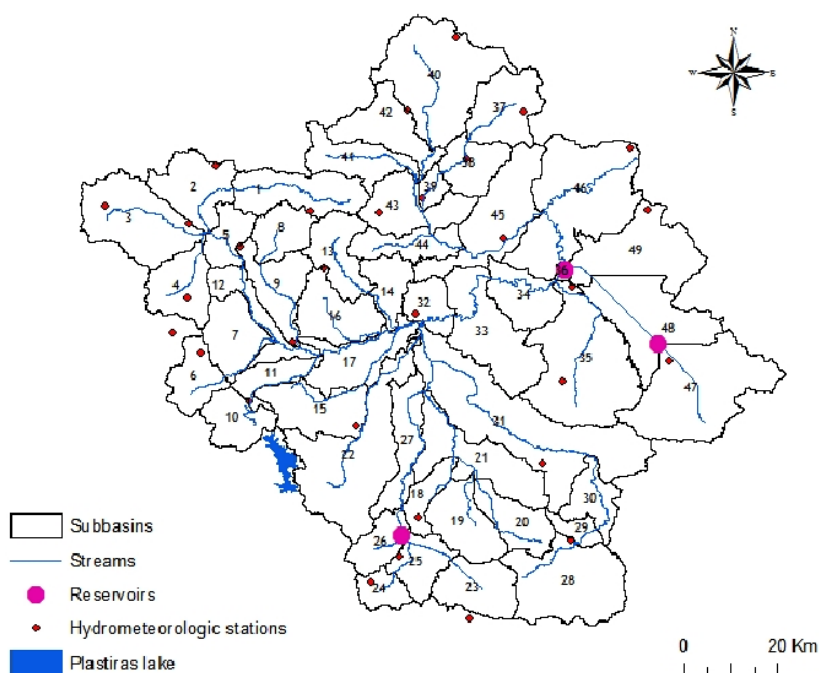
Για το υδρολογικό μοντέλο της λεκάνης απορροής που κατασκευάστηκε χρησιμοποιήθηκε ως πρότυπο το αντίστοιχο υδρολογικό ομοίωμα της λεκάνης απορροής του Πηνειού ποταμού, το οποίο κατασκευάστηκε στο πλαίσιο του προγράμματος i-adapt της Γενικής Διεύθυνσης Περιβάλλοντος της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Το [i-adapt](#) αποτέλεσε ένα πιλοτικό πρόγραμμα με σκοπό την ανάπτυξη ενός συγκεκριμένου και εφαρμόσιμου σχεδίου δράσης για την αντιμετώπιση της ερημοποίησης μέσω της χρήσης νέων τεχνολογιών στη λεκάνη απορροής του ποταμού Πηνειού, το οποίο υλοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των ετών 2011-2012 από το την ερευνητική ομάδα του Κέντρου Υδρολογίας και Πληροφορικής (CHI) του Εργαστηρίου Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

#### 4.2 ΣΧΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΚΑΝΗΣ

Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει τη σχηματοποίηση της λεκάνης απορροής για τον ορισμό της κλίσης σε όλα τα σημεία της λεκάνης. Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή στο ArcSWAT του Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Digital Elevation Model-DEM), ενός καννάβου με ανάλυση 25x25m, διαθέσιμου στο Εργαστήριο Υδρολογίας και

Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, όπου κάθε κελί χαρακτηρίζεται από μία τιμή υψομέτρου. Η μέση τιμή υψομέτρου στη λεκάνη είναι 413.24m, η τυπική απόκλιση 357.83m, ενώ το μέγιστο και το ελάχιστο υψόμετρο είναι 2791m και 0m αντίστοιχα. Με βάση αυτό το αρχείο μπορεί να γίνει η σχεδίαση του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής στο ArcSWAT αυτόματα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση για την αποφυγή σφαλμάτων λόγω ατελειών του DEM και λόγω της ιδιαίτερης σύνδεσης της λίμνης Κάρλας με το κύριο ρεύμα του Πηνειού ποταμού επιλέχθηκε να εισαχθεί το ήδη ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο ως αρχείο .shp.

Με τη χρήση ίδιου τύπου αρχείου γίνεται η εισαγωγή των ήδη ορισμένων υπολεκανών. Συνολικά η λεκάνη απορροής χωρίστηκε σε 49 υπολεκάνες μέσης έκτασης 216.3 km<sup>2</sup>, ελάχιστης και μέγιστης έκτασης 11.57 km<sup>2</sup> και 666 km<sup>2</sup> αντίστοιχα. Ο ορισμός των υπολεκανών έγινε λαμβάνοντας υπόψη το φυσικό υδρογραφικό δίκτυο, τα σημεία πάνω σε αυτό για τα οποία υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία μετρήσεων παροχής/συγκεντρώσεων θρεπτικών, την πυκνότητα των δεδομένων βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης, τις θέσεις υπάρχοντων και μελλοντικών φραγμάτων/ταμιευτήρων και τις υπάρχουσες τεχνικές διαχείρισης νερού στη λεκάνη (Μακροπούλος & Μιμίκου, 2012). Επιλέχθηκε να δοθεί περισσότερη σημασία στη διάκριση των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών και ο διαχωρισμός των λεκανών να μη γίνει βάσει της υδρογεωλογικής ομοιογένειας. Επιπρόσθετα, πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια της σχηματοποίησης της λεκάνης τοποθετήθηκε μια σημειακή πηγή σε κάθε υπολεκάνη με σκοπό να χρησιμοποιηθεί για την ενσωμάτωση στο μοντέλο τυχόν εισροών νερού προερχόμενων από Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων, από άλλες εξωτερικές πηγές ή λόγω μεταφορών νερού. Στην περίπτωση που τέτοιες εισροές δεν υπάρχουν για κάποια υπολεκάνη, διατηρούνταν οι μηδενικές τιμές για τις αντίστοιχες σημειακές πηγές.



Εικόνα 28: Σχηματοποίηση της περιοχής μελέτης με το λογισμικό ArcSWAT.

Είναι φανερό από την εικόνα 20 πως στην υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής του Πηνειού ποταμού συμπεριλαμβάνεται και η κλειστή λεκάνη της λίμνης Κάρλας. Οι υπολεκάνες 47-49 εμφανίζονται στην προσομοίωση να συνδέονται με το κύριο ρεύμα και να απορρέουν στην κατάντη λεκάνη 46, παρόλο που κάτι τέτοιο δε συμβαίνει στην πραγματικότητα. Ωστόσο, καθώς τα δύο ξεχωριστά συστήματα δεν είναι δυνατόν να συμπεριληφθούν σε κοινή προσομοίωση SWAT και λόγω της έντονης αλληλεπίδρασης τους και των μεγάλων συστηματικά μεταφερόμενων ποσοτήτων νερού από τον Πηνειό στην Κάρλα, προτιμήθηκε να προσομοιωθούν με αυθαίρετη σύνδεση αγνοώντας το φυσικό ανάγλυφο και να τροποποιηθούν οι κατάλληλες παράμετροι, όπως περιγράφεται στις παραγράφους που ακολουθούν, ώστε να αποδοθεί η πραγματική κατάσταση.

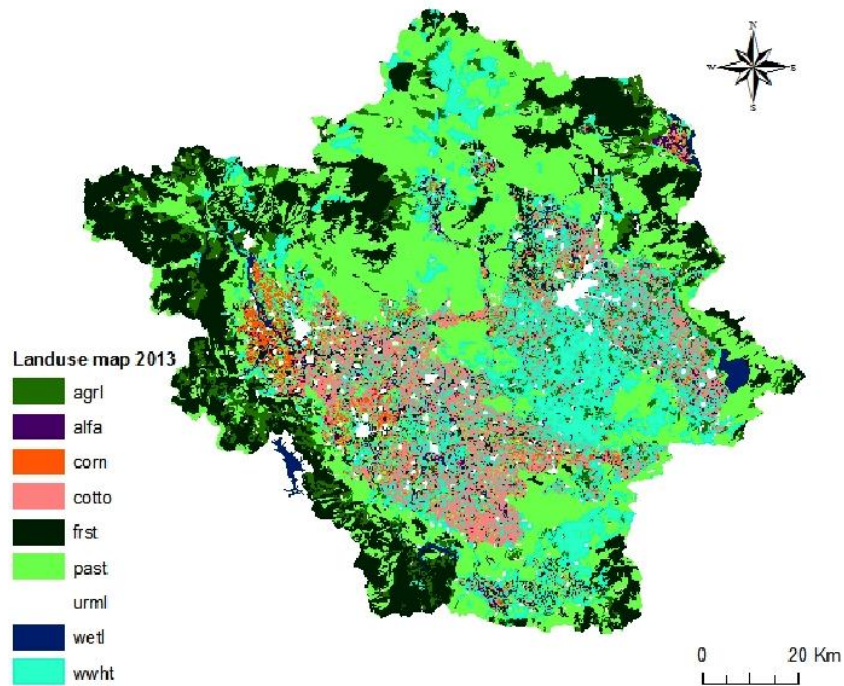
#### 4.3 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ (HRUs)

Ο ορισμός των χρήσεων γης στη σχηματοποιημένη πλέον λεκάνη έγινε με την εισαγωγή του χάρτη των χρήσεων γης που παράχθηκε μέσω της διαδικασίας της ταξινόμησης τηλεπισκοπικών απεικονίσεων, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Με στόχο τη μείωση του αριθμού των HRUs που θα παραχθούν στη συνέχεια από το λογισμικό ArcSWAT, αποφασίστηκε οι κατηγορίες toms και sgbt με τα μικρότερα ποσοστά κάλυψης στη λεκάνη (0.45 και 0.16 αντίστοιχα) να ενσωματωθούν στην κατηγορία cotto. Στη συνέχεια έγινε η αντιστοίχιση των τελικών εννέα (9) κατηγοριών χρήσεων γης με τους αντίστοιχους κωδικούς κατηγοριοποίησης τύπων εδαφοκάλυψης, που αναγνωρίζονται από το λογισμικό ArcSWAT. Το σύνολο της αρδευόμενης γης προέκυψε περίπου 1600 km<sup>2</sup>.

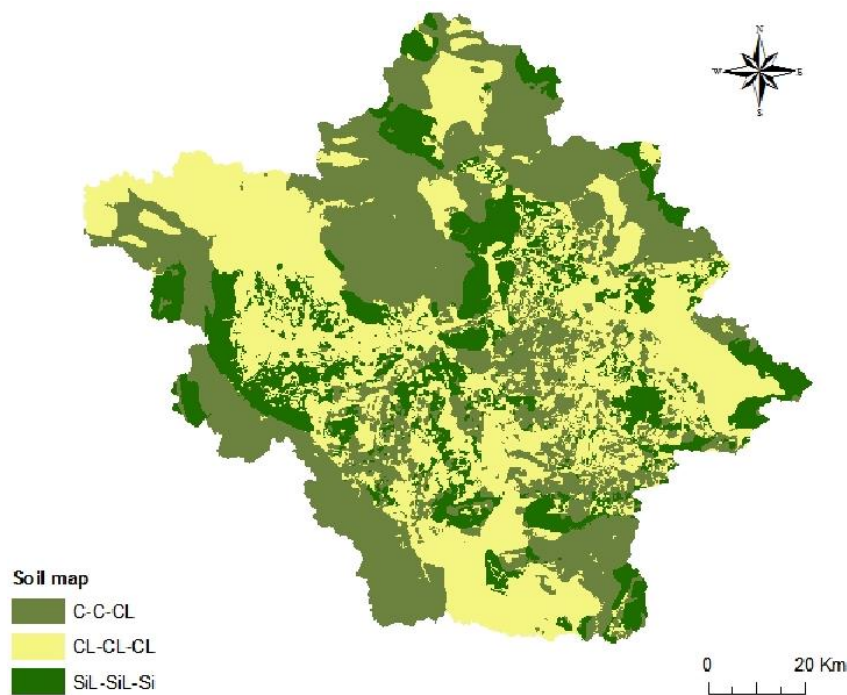
Για τον ορισμό των εδαφολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής χρησιμοποιήθηκε ο εδαφολογικός χάρτης που προέκυψε έπειτα από ομαδοποίηση των εδαφών σε τρεις κύριες κατηγορίες σύμφωνα με την κοκκομετρική σύσταση και την υδροχωρητικότητά τους. Τα απαραίτητα δεδομένα προέρχονται από το Ινστιτούτο Χαρτογράφησης και Ταξινόμησης Εδαφών του Εθνικού Ιδρύματος Αγροτικής Έρευνας (ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε.). Σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης που χρησιμοποιείται στις Η.Π.Α. (Soil Survey Staff, 2014) τα εδάφη χωρίζονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: αμμώδες (S), πηλώδες (L), ιλυώδες (Si) και αργιλώδες (C). Μέσω αυτών των κατηγοριών μπορεί να χαρακτηριστεί οποιοδήποτε εδαφικό στρώμα. Η υδροχωρητικότητα των εδαφών που συναντώνται στην περιοχή ενδιαφέροντος κυμαίνεται μεταξύ 10 και 15 mm ανά 100 mm εδάφους, ενώ οι τρεις στρώσεις εδάφους φτάνουν σε βάθος 250, 750 και 1500 mm αντιστοίχως.

Με την επικάλυψη του χάρτη χρήσεων γης, του χάρτη των εδαφών και του χάρτη των υπολεκάνων διακρίνονται οι Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης (HRUs) της λεκάνης, δηλαδή οι εκτάσεις εκείνες με μοναδικό συνδυασμό τοπογραφικής, εδαφικής πληροφορίας και εδαφοκάλυψης. Κατά τη δημιουργία των HRUs δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει ένα κατώφλι όσο αφορά τις χρήσεις γης που θα συμπεριληφθούν. Όσοι τύποι εδαφοκάλυψης έχουν μικρότερα ποσοστά από το κατώφλι που ορίζεται από το χρήστη, αγνοούνται από το μοντέλο και οι υπόλοιπες χρήσεις γης αυξάνονται αναλογικά συμπεριλαμβάνοντας τις χρήσεις που αγνοήθηκαν. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή του μοντέλου τέθηκε μηδενικό κατώφλι, δηλαδή στη δημιουργία των HRUs συμμετείχαν όλοι οι διαφορετικοί τύποι εδαφοκάλυψης. Με αυτό το κατώφλι ο μέγιστος αριθμός HRUs που θα μπορούσαν να

προκύψουν είναι  $49(\text{υπολεκάνες}) \cdot 9(\text{χρήσεις γης}) \cdot 3(\text{τύποι εδαφών}) = 1.323$ , αν όλες οι χρήσεις γης και οι τύποι εδαφών συναντιόταν σε όλες τις υπολεκάνες. Τελικώς, προέκυψαν 848 HRUs με μέση, μέγιστη και ελάχιστη έκταση 12.5, 194.1 και 0.001  $\text{km}^2$  αντίστοιχα.



Εικόνα 29: Η χρήσεις γης της λεκάνης απορροής όπως εισήχθησαν στο πρόγραμμα ArcSWAT.



Εικόνα 30: Εδαφολογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Πηνειού.

#### 4.4 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΒΑΣΕΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Το επόμενο στάδιο στη διαδικασία προσομοίωσης αφορά την εισαγωγή των κλιματικών δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά αφορούν κυρίως την ημερήσια βροχόπτωση και την ημερήσια ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία. Για τον υπολογισμό της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής με χρήση της μεθόδου Penman-Monteith απαιτούνται επιπροσθέτως δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας, σχετικής υγρασίας και ταχύτητας ανέμου. Για την εφαρμογή της μεθόδου Priestley-Taylor απαιτούνται μόνο στοιχεία ηλιακής ακτινοβολίας, σχετικής υγρασίας και ταχύτητας ανέμου, ενώ η μέθοδος Hargreaves η οποία και επιλέχθηκε να εφαρμοστεί στην παρούσα εργασία χρησιμοποιεί μόνο στοιχεία θερμοκρασίας. Εκτός των παραπάνω, το ArcSWAT δίνει τη δυνατότητα γένεσης ή συμπλήρωσης μετεωρολογικών χρονοσειρών με βάση στατιστικές κατανομές και ιστορικές μέσες ετήσιες τιμές χρησιμοποιώντας το μοντέλο WXGEN (weather generator model). Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από 30 βροχομετρικούς σταθμούς με ημερήσιες μετρήσεις από το 1975 έως το 2011 και 8 σταθμούς μέτρησης θερμοκρασίας με ημερήσιες μετρήσεις ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας από το 1975 μέχρι το 2010. Για όσες ημερομηνίες δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα χρησιμοποιήθηκε η τιμή -99.0 και αργότερα παράχθηκε τιμή από το πρόγραμμα. Τα μετεωρολογικά δεδομένα αποδόθηκαν από το μοντέλο σε κάθε υπολεκάνη με βάση τον κοντινότερο στο κέντρο βάρους της σταθμό.

#### 4.5 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΡΧΕΙΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Στο κατασκευαζόμενο μοντέλο προσομοιώνονται 3 ταμιευτήρες. Ο πρώτος αφορά τον πρόσφατα κατασκευασμένο ρουφράκτη-φράγμα Γυρτώνης στην έξοδο της υπολεκάνης 36. Το φράγμα αυτό με ταμιευτήρα χωρητικότητας  $5\text{hm}^3$  χρησιμοποιείται για την εκτροπή νερού μέσω καναλιών προς τη λίμνη της Κάρλας στην υπολεκάνη 47 καθώς και για την εκτροπή νερού προς μια σειρά δεξαμενών στην υπολεκάνη 48 με σκοπό την άρδευση της πλειοψηφίας της καλλιεργούμενης έκτασης στην υπολεκάνη αυτή. Καθώς όμως το πρόγραμμα δεν επιτρέπει την απόληψη νερού για άρδευση από τέτοιου είδους υδάτινα σώματα, για να προσομοιωθεί η πραγματική λειτουργία του φράγματος, η χωρητικότητά του αυξήθηκε σε  $30\text{hm}^3$  περιλαμβάνοντας και το συνολικό όγκο των δεξαμενών στην υπολεκάνη 48 ( $25\text{hm}^3$ ). Ταυτόχρονα, το φράγμα Γυρτώνης ορίζεται ως πηγή απόληψης για τις εκτάσεις της υπολεκάνης 48 ( $93.69\text{km}^2$  αρδευόμενων καλλιεργειών). Στην αρχή της περιόδου άρδευσης, το Μάιο, ο ταμιευτήρας είναι γεμάτος λόγω της υψηλής ροής σε αυτό το σημείο του ποταμού εξασφαλίζοντας την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών για την περιοχή αυτή για τους μήνες Μάιο-Ιούνιο. Κατά τη διάρκεια των υπόλοιπων μηνών της αρδευτικής περιόδου η ποσότητα νερού που διατίθεται για την άρδευση της υπολεκάνης 48 εξαρτάται από την καλοκαιρινή ροή του Πηνειού, την υπάρχουσα ποσότητα νερού στον ταμιευτήρα και τις υπόλοιπες χρήσεις νερού που λαμβάνουν χώρα. Αυτές περιλαμβάνουν την οικολογική παροχή ( $5\text{m}^3/\text{s}$ ) και την εκτροπή νερού προς τη λίμνη Κάρλα η οποία ανέρχεται σε περίπου  $100\text{hm}^3/\text{y}$  ή  $500000\text{m}^3/\text{d}$  ή  $5.8\text{m}^3/\text{s}$  κατά τη διάρκεια των μηνών Οκτωβρίου-Απριλίου. Η τελευταία απόληψη προσομοιώνεται αφαιρώντας την αντίστοιχη ποσότητα νερού σε συνεχή ρυθμό από την υπολεκάνη 36, ποσότητα που καταλήγει εκτός του συστήματος.

Monthly Data

Monthly Parameter  
Monthly Consumptive Use

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun
50	50	50	50	0	0
Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0	0	0	50	50	50

Edit Values   Cancel Edits   Save Edits   Exit

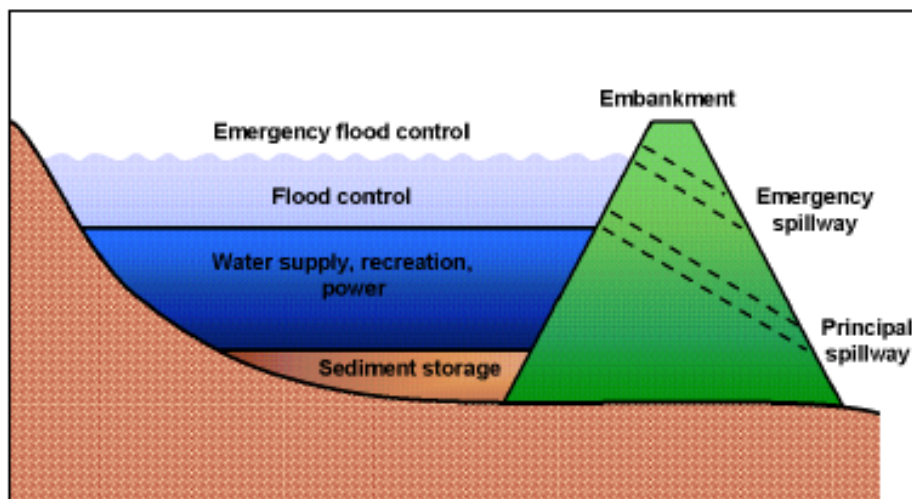
Εικόνα 31: Μηνιαία καταναλωτική χρήση νερού όπως ορίστηκε για το φράγμα Γυρτώνης.

Όσον αφορά την τεχνητή λίμνη Κάρλα, η λίμνη αυτή έκτασης 38 km<sup>2</sup> προσομοιώνεται ως ταμιευτήρας στην έξοδο της υπολεκάνης 47 και όχι ως λίμνη, καθώς το ArcSWAT δεν επιτρέπει την απόληψη νερού για άρδευση από τέτοιου είδους υδατικά σώματα. Οι εισροές νερού στην λίμνη Κάρλα προέρχονται από τρεις διαφορετικές πηγές:

- την απορροή της ανάντη λεκάνης 47
- την απορροή των υπολεκανών 48 και 49 η οποία μεταφέρεται μέσω ενός πρόσφατα κατασκευασμένου αγωγού στη λίμνη Κάρλα.
- εκτροπή νερού από τον Πηνειό ποταμό μέσω του φράγματος Γυρτώνης 5.8m<sup>3</sup>/s για τους μήνες Οκτώβρη-Απρίλη, όπως περιγράφηκε παραπάνω, που αποτελεί και τη μεγαλύτερη πηγή εισροών για τη λίμνη Κάρλα.

Η πρώτη πηγή εισροών στη λίμνη Κάρλα προσομοιώνεται αυτομάτως από το λογισμικό ArcSWAT, ενώ η δεύτερη θεωρείται πολύ μικρή σε σχέση με την επόμενη και αμελείται. Για την προσομοίωση της εισροής του εκτρεπόμενου νερού από τον Πηνειό στη λίμνη Κάρλα η ροή της σημειακής πηγής που τοποθετήθηκε στην υπολεκάνη 47 αυξάνεται αντιστοίχως. Ταυτόχρονα, με τη ρύθμιση συστηματικής αφαίρεσης μίας επαρκώς μεγάλης ποσότητας νερού από το ποτάμιο τμήμα των υπολεκανών 48 και 49 εξασφαλίζεται ότι δε θα υπάρχει απορροή από την κλειστή λεκάνη της Κάρλας προς τον Πηνειό ποταμό. Στην πραγματικότητα, αυτό υλοποιείται με τη διόδευση των υπερχειλίσεων της λίμνης μέσω ενός τεχνητού καναλιού στον Παγασητικό κόλπο. Ποσότητα νερού από τη λίμνη Κάρλα χρησιμοποιείται για την άρδευση της υπολεκάνης 47 (67.83 km<sup>2</sup> αρδευόμενων καλλιεργειών).

Ο τελευταίος ταμιευτήρας ο οποίος προσομοιώνεται στην περιοχή μελέτης είναι ο ταμιευτήρας του αρδευτικού φράγματος Σμοκόβου. Βρίσκεται στην έξοδο της υπολεκάνης 25 και αρδεύει την υπολεκάνη 19 (84.82 km<sup>2</sup> αρδευόμενων καλλιεργειών), ενώ η οικολογική παροχή ανέρχεται σε 1m<sup>3</sup>/s.



Εικόνα 32: Στοιχεία ενός υπερχειλιστή με αντιπλυμμηρική ζώνη. Πηγή: Neitsch, Arnold, Kiniry, Srinavasan, & Williams, (2009).

RES_	SUB	PSA (km <sup>2</sup> )	PVOL (hm <sup>3</sup> )	ESA (km <sup>2</sup> )	EVOL (hm <sup>3</sup> )	VOL (hm <sup>3</sup> )	RR (m <sup>3</sup> /s)	K (mm/h)
Σμόκοβο	25	4.5	10	8.5	240	7	1	0.1
Κάρλα	47	40	10	40	160	7	0.1	0.1
Γυρτώνη	36	0.7	1	1.3	30	0.7	0.1	0.1

Για την Πίνακας 7: Στοιχεία των ταμιευτήρων που προσομοιώνονται.

προσομοίωση των ταμιευτήρων στο λογισμικό SWAT ορίστηκε η τιμή των εξής παραμέτρων:

- RES\_SUB: ο αριθμός της υπολεκάνης στην οποία εντοπίζεται ο ταμιευτήρας.
- RES\_ESA: η έκταση της επιφάνειας του νερού, όταν ο ταμιευτήρας είναι γεμάτος μέχρι τον υπερχειλιστή έκτακτης ανάγκης.
- RES\_EVOL; ο όγκος του νερού που χρειάζεται για να γεμίσει ο ταμιευτήρας μέχρι τον υπερχειλιστή έκτακτης ανάγκης.
- RES\_PSA: η έκταση της επιφάνειας του νερού, όταν ο ταμιευτήρας είναι γεμάτος μέχρι τον κύριο υπερχειλιστή.
- RES\_PVOL: ο όγκος του νερού που χρειάζεται για να γεμίσει ο ταμιευτήρας μέχρι τον κύριο υπερχειλιστή.
- RES\_VOL: ο αρχικός όγκος νερού στον ταμιευτήρα στην αρχή της περιόδου προσομοίωσης. Ορίζεται στο 70% του RES\_EVOL, καθώς προηγούνται υγρά χρόνια της προσομοίωσης.
- RES\_RR: ο ρυθμός αποδέσμευσης μέσω του κύριου υπερχειλιστή.
- RES\_K: η υδραυλική αγωγιμότητα του πυθμένα του ταμιευτήρα.



- IRESCO: ο τρόπος προσομοίωσης της εκροής. Ορίζεται 0 για ταμιευτήρες χωρίς θυροφράγματα, δηλαδή για ταμιευτήρες που δεν χρησιμοποιούνται για ανάσχεση πλημμυρών. Συνεπώς δε γίνεται απελευθέρωση ποσοτήτων νερού από τον κύριο υπερχειλιστή, όταν υπάρχει κίνδυνος πλημμύρας, αλλά μεγάλες ποσότητες εκρέουν από τον υπερχειλιστή έκτακτης ανάγκης, όταν ο ταμιευτήρας είναι γεμάτος, κάτι που οφείλεται στο μικρό RES\_RR που έχει οριστεί.

Γνωρίζοντας τα παραπάνω στοιχεία το λογισμικό SWAT μπορεί να υπολογίσει τον όγκο νερού στον ταμιευτήρα, την έκταση της επιφάνειας του και το νερό που απελευθερώνεται κάθε στιγμή για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αν το ύψος του νερού ξεπερνά το ύψος του κύριου υπερχειλιστή, τότε νερό απελευθερώνεται με ρυθμό RES\_RR. Αν το ύψος του νερού ξεπερνά και το ύψος του υπερχειλιστή έκτακτης ανάγκης, τότε εκρέει νερό και από τον υπερχειλιστή αυτόν. Μέσω του υπολογισμού της έκτασης της επιφάνειας του ταμιευτήρα υπολογίζεται η βροχόπτωση σε αυτόν, η εξάτμιση από την επιφάνειά του καθώς και η διήθηση από τον πυθμένα.

Πέρα από τα παραπάνω, εκτός της λεκάνης απορροής του Πηνειού ποταμού βρίσκεται ο ταμιευτήρας Πλαστήρα ο οποίος αρδεύει την υπολεκάνη 15 (71.76 km<sup>2</sup> αρδευόμενων καλλιεργειών). Ταυτόχρονα, ο ταμιευτήρας αυτός προμηθεύει με νερό για ύδρευση την πόλη της Καρδίτσας και η μεταφερόμενη ποσότητα εισάγεται στο μοντέλο ως σημειακή πηγή στην υπολεκάνη 22, δηλαδή ως απορροή της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων της πόλης. Ωστόσο η παροχή αυτής της σημειακής πηγής (130000m<sup>3</sup>/d) συμπεριλαμβάνει μια πρόσθετη ποσότητα νερού που μεταφέρεται από τον ταμιευτήρα Πλαστήρα, με σκοπό να ενισχύσει την παροχή του Πηνειού κατάντη και να υποστηρίξει την εκτροπή νερού από τον Πηνειό προς τη λίμνη Κάρλα.

Όσον αφορά την εκροή των υπόλοιπων ΕΕΛ που εντοπίζονται στη λεκάνη και τη διάθεση αποβλήτων από τους οικισμούς σε βόθρους, αυτές οι λειτουργίες επιλέχθηκε να μην προσομοιωθούν στο μοντέλο για τους εξής λόγους: Πρώτον, καθώς τόσο η άντληση του νερού όσο και η απορροή του συμβαίνουν μέσα στην ίδια λεκάνη απορροής και συγκεκριμένα στην ίδια υπολεκάνη, δεν υπάρχει προσθήκη ή αφαίρεση νερού παρά μόνο μεταφορά του από ένα σημείο της λεκάνης σε άλλο. Δεύτερον, τα φορτία θρεπτικών ουσιών τα οποία απελευθερώνονται στο σύστημα είναι μηδαμινά σε σχέση με τα φορτία από τις μη σημειακές πηγές και ως εκ τούτου η παράλειψή τους από το μοντέλο δεν επηρεάζει την ακρίβεια της προσομοίωσης.

Το SWAT προσομοιώνει δύο υδροφορείς για κάθε υπολεκάνη, έναν αβαθή φρεάτιο υδροφορέα, ο οποίος συνεισφέρει στη ροή του κύριου ρεύματος της υπολεκάνης, και έναν βαθύ περιορισμένο υδροφορέα, οποίος θεωρείται ότι συνεισφέρει στη ροή κάποιου ρεύματος εκτός λεκάνης απορροής. Συγκεκριμένα, ο αβαθής υδροφορέας προσομοιώνεται σε επίπεδο HRU. Έτσι, σε κάθε HRU υπολογίζεται το απόθεμα του φρεάτιου υδροφορέα με βάση την έκταση του υδροφορέα (δηλαδή την έκταση του HRU) και το απόθεμα από το προηγούμενο χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Το απόθεμα αυξάνεται όταν συμβαίνει κατείσδυση νερού και μειώνεται λόγω της επανατροφοδότησης της ακόρεστης ζώνης από τον φρεάτιο φορέα, λόγω βασικής ροής, κατείσδυσης νερού προς το βαθύ υδροφορέα ή άντλησης. Η αφαίρεση νερού

από τον αβαθή υδροφορέα για άρδευση ή για άλλες χρήσεις καθώς και η βασική απορροή στο κύριο ρεύμα μιας υπολεκάνης προσομοιώνονται σε επίπεδο υπολεκάνης, αφαιρώντας την ποσότητα νερού από όλα τα συμπεριλαμβανόμενα HRUs. Μάλιστα όσον αφορά τη χρήση υπόγειου νερού για άρδευση, το SWAT δίνει τη δυνατότητα για μεταφορά υπόγειου νερού από διαφορετική υπολεκάνη. Έτσι, παρόλο που στην πραγματικότητα οι υδροφορείς δε χαρακτηρίζονται από τα όρια των υπολεκανών, πόσο μάλλον από τα όρια των HRUs, και ενώ το SWAT δε λαμβάνει υπόψη του το σχήμα, το μέγεθος και τη μορφολογία των υπόγειων υδροφορέων, οι παραπάνω λειτουργίες δίνουν τη δυνατότητα για μια έμμεση προσομοίωση των βασικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στους υπόγειους υδροφορείς της λεκάνης απορροής προσεγγίζοντας καλύτερα την πραγματικότητα.

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Πηνειού είναι μια περιοχή που χαρακτηρίζεται από έντονη εκμετάλλευση του υπόγειου υδροφορέα για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών. Στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιείται ο φρεάτιος υδροφορέας ως πηγή απόληψης του αρδευτικού νερού, ενώ ο βαθύς υδροφορέας λαμβάνει το νερό που κατεισδύει από τον αβαθή και πρακτικά εξέρχεται από το σύστημα. Καθώς στον αβαθή υδροφορέα προσομοιώνονται τόσο τα μόνιμα όσο και τα ανανεώσιμα αποθέματα νερού, δηλαδή η ποσότητα νερού που κάθε χρόνο κατεισδύει φυσικά στον υδροφορέα, έχει νόημα ο χωρικός προσδιορισμός του αποθέματος νερού στην αρχή της προσομοίωσης. Ο αρχικός όγκος του διαθέσιμου νερού σε κάθε HRU δίνεται από το γινόμενο του αρχικού βάθους του νερού στον αβαθή υδροφορέα και της έκτασης του HRU.

Το γεγονός ότι στην περιοχή μελέτης υπάρχει εκτεταμένη εκμετάλλευση του υπόγειου υδροφορέα με αντλήσεις ποσοτήτων που υπερβαίνουν τα ετησίως ανανεώσιμα αποθέματα είναι ευρέως γνωστό. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το λογισμικό SWAT δεν προσφέρει δυνατότητα διαχωρισμού των απολήψεων από τον αβαθή ή βαθύ υδροφορέα για τα HRU, προτιμήθηκε ο συνυπολογισμός των μόνιμων αποθεμάτων μαζί με τα ανανεώσιμα αποθέματα στον αβαθή υδροφορέα για την καλύτερη προσομοίωση της πραγματικής κατάστασης. Συνεπώς, στην παράμετρο SHALLST, που δηλώνει το αρχικό βάθος νερού στον αβαθή υδροφορέα δόθηκε η τιμή 25000 mm για ολόκληρη τη λεκάνη απορροής. Η τιμή αυτή δε βασίζεται σε τυχόν διαθέσιμα στοιχεία για το μέγεθος των μόνιμων και ανανεώσιμων αποθεμάτων της λεκάνη απορροής του ποταμού Πηνειού, αλλά προσδιορίστηκε έπειτα από διαδοχικές εκτελέσεις του μοντέλου ως το αρχικό βάθος του αβαθή υδροφορέα για το οποίο ικανοποιούνται πλήρως οι παρακάτω οριζόμενες αρδευτικές ανάγκες σε ολόκληρη τη λεκάνη απορροής και για ολόκληρη την περίοδο της προσομοίωσης.

Ακολούθως ορίστηκαν τιμές για τις αντίστοιχες μεταβλητές που προσομοιώνουν τις αγροτικές διαχειριστικές πρακτικές, οι οποίες είναι σε εφαρμογή στην περιοχή μελέτης. Θεωρήθηκε ότι οι τιμές αυτές εκφράζουν όλη την περιοχή μελέτης και εφαρμόζονται χωρίς παρεκτροπή σε ετήσιο κύκλο.

- Η σπορά του βαμβακιού γίνεται στα τέλη του μήνα Απριλίου. Τότε χορηγείται και η πρώτη δόση άρδευσης (20 mm). Στη συνέχεια ακολουθούν 11 δόσεις άρδευσης, 50 mm/δόση ανά 10 μέρες μέχρι τις αρχές του Σεπτεμβρίου. Η συνολική ποσότητα νερού που απαιτείται για την καλλιέργεια βαμβακιού

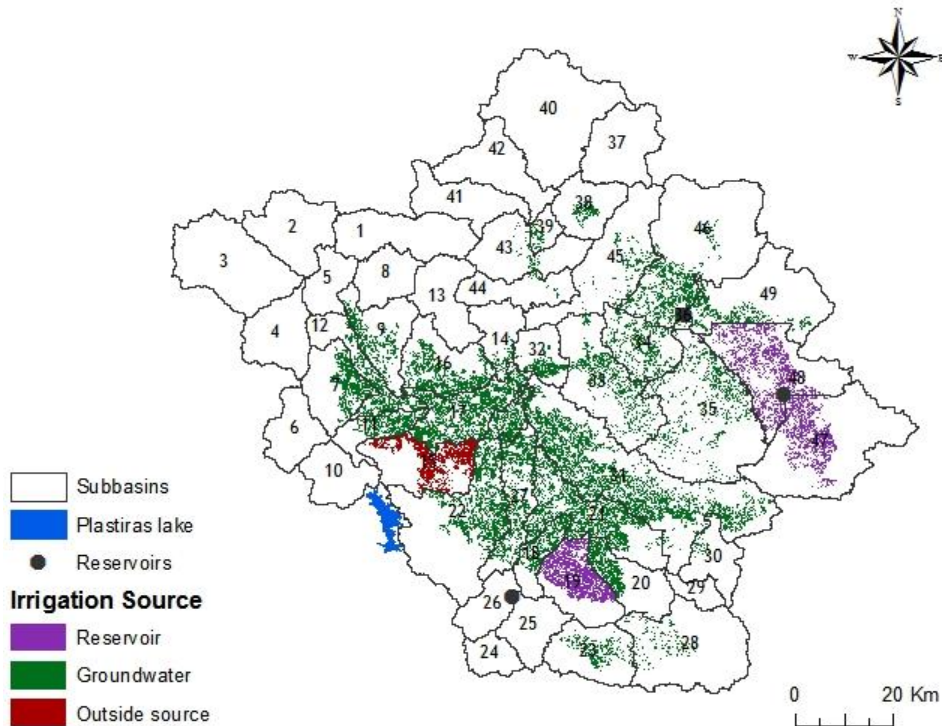
ανέρχεται σε 570 mm. Η συγκομιδή της καλλιέργειας γίνεται στις αρχές του Οκτωβρίου, ενώ μετά από περίπου ένα μήνα ακολουθεί άρωση των αγροτεμαχίων. Η λίπανση των καλλιεργειών βαμβακιού εφαρμόζεται σε 4 δόσεις με την πρώτη να προηγείται της σποράς. Συγκεκριμένα εφαρμόζονται 100 kg/ha τύπου 33-0-0, 200 kg/ha τύπου 46-0-0 σε δύο δόσεις και 350 kg/ha τύπου 20-20-0. Συνολικά εφαρμόζονται 195 kg/ha N και 31 kg/ha P.

- Η σπορά του αραβόσιτου γίνεται στα τέλη του μήνα Μαρτίου. Τότε χορηγείται και η πρώτη δόση άρδευσης (20 mm). Στη συνέχεια ακολουθούν 12 δόσεις άρδευσης, 50 mm/δόση ανά 10 μέρες μέχρι τις αρχές του Σεπτεμβρίου. Η συνολική ποσότητα νερού που απαιτείται για την καλλιέργεια αραβόσιτου ανέρχεται σε 620 mm. Η συγκομιδή της καλλιέργειας γίνεται στις αρχές του Σεπτεμβρίου, ενώ μετά από περίπου δύο μήνες ακολουθεί άρωση των αγροτεμαχίων. Η λίπανση των καλλιεργειών αραβόσιτου εφαρμόζεται σε 5 δόσεις με την πρώτη να προηγείται της σποράς. Συγκεκριμένα εφαρμόζονται 500 kg/ha τύπου 20-20-0, 100 kg/ha τύπου 46-0-0, 140 kg/ha τύπου 33-0-0 σε δύο δόσεις και 70 kg/ha τύπου 31-13-0. Συνολικά εφαρμόζονται 214 kg/ha N και 48 kg/ha P.
- Η σπορά της μηδικής γίνεται στα μέσα του μήνα Μαρτίου. Τότε χορηγείται και η πρώτη δόση άρδευσης (20 mm). Στη συνέχεια ακολουθούν 9 δόσεις άρδευσης, 80 mm/δόση ανά 10 μέρες μέχρι τα τέλη του Αυγούστου. Η συνολική ποσότητα νερού που απαιτείται για την καλλιέργεια μηδικής ανέρχεται σε 740 mm. Η κοπή της μηδικής γίνεται στην αρχή κάθε μήνα από τον Ιούνιο μέχρι τον Οκτώβριο, ενώ μετά από περίπου μερικές μέρες ακολουθεί άρωση των αγροτεμαχίων. Η λίπανση των καλλιεργειών μηδικής εφαρμόζεται σε 1 δόση η οποία προηγείται της σποράς. Συγκεκριμένα εφαρμόζονται 200 kg/ha τύπου 0-52-0 που αντιστοιχεί σε 46 kg/ha P.
- Η σπορά του σιταριού γίνεται στις αρχές του Ιανουαρίου. Αποτελεί χειμερινή καλλιέργεια με συγκομιδή στα μέσα Ιουνίου. Στην καλλιέργεια αυτή εφαρμόζεται μόνο μια δόση άρδευσης λίγο πριν τη συγκομιδή, 40 mm. Η λίπανση των καλλιεργειών σιταριού εφαρμόζεται σε 2 δόσεις με την πρώτη να προηγείται της σποράς. Συγκεκριμένα εφαρμόζονται 250 kg/ha τύπου 22-14-00 και 230 kg/ha τύπου 33-0-0 που αντιστοιχούν σε 131 kg/ha N και 16 kg/ha P.

Ορίζεται ότι για όλες τις καλλιέργειες το 20% των λιπασμάτων εφαρμόζεται στα πρώτα 10mm εδάφους, ενώ το υπόλοιπο στο 1ο εδαφικό στρώμα.

Ορίζοντας τις κατάλληλες τιμές για τις μεταβλητές IRR\_NO και IRR\_SC ανά HRU ορίζονται αντίστοιχα και η πηγή προέλευσης του αρδευτικού νερού που εφαρμόζεται στο HRU και ο τύπος της, ποταμός, ταμιευτήρας, βαθύς/αβαθής υδροφορέας ή πηγή που βρίσκεται εξωτερικά της λεκάνης απορροής. Έτσι, στην υπολεκάνη 15 αρδεύονται 71.76 km<sup>2</sup> καλλιεργειών με νερό προερχόμενο από εξωτερική πηγή (ταμιευτήρας Πλαστήρα), στην υπολεκάνη 19 αρδεύονται 84.82 km<sup>2</sup> καλλιεργειών από τον ταμιευτήρα Σμοκόβου (στην έξοδο της υπολεκάνης 25), στην υπολεκάνη 47 αρδεύονται 67.83 km<sup>2</sup> καλλιεργειών από τη λίμνη Κάρλα που βρίσκεται στην ίδια υπολεκάνη και τέλος στην υπολεκάνη 48 αρδεύονται 93.69 km<sup>2</sup> από τον ταμιευτήρα Γυρτώνης. Για την υπόλοιπη αρδευόμενη έκταση ως προέλευση του αρδευτικού νερού ορίζεται ο αβαθής υδροφορέας κάθε υπολεκάνης. Για την καλύτερη

προσομοίωση της πραγματικότητας ορίζεται  $IRR_{SQ}=0.25$  για τη συνολική έκταση της λεκάνης απορροής, ωθώντας το μοντέλο να προσομοιώσει στις παραπάνω ορισμένες ποσότητες αρδευτικού νερού 25% απώλειες κατά τη μεταφορά του στις καλλιέργειες λόγω διαρροών ή διήθησης νερού από τα αρδευτικά κανάλια.



Εικόνα 33: Αρδευόμενες εκτάσεις ανά πηγή άρδευσης για την υφιστάμενη κατάσταση.

Επιπρόσθετα, στις υπολεκάνες 48 και 49 με σκοπό την αποφυγή μεταφοράς νερού από τη λίμνη Κάρλα στον ποταμό Πηνειό ορίζονται δυσανάλογα μεγάλες απολήψεις νερού από τον κύριο ποταμό για όλους τους μήνες του έτους ( $WURCH=5000$ ).

Parameter:	Unit:	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
WURCH	(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000

Εικόνα 34: Μέσες ημερήσιες απολήψεις νερού από το κύριο ρεύμα, όπως ορίστηκαν για την υπολεκάνη 48.

#### 4.6 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

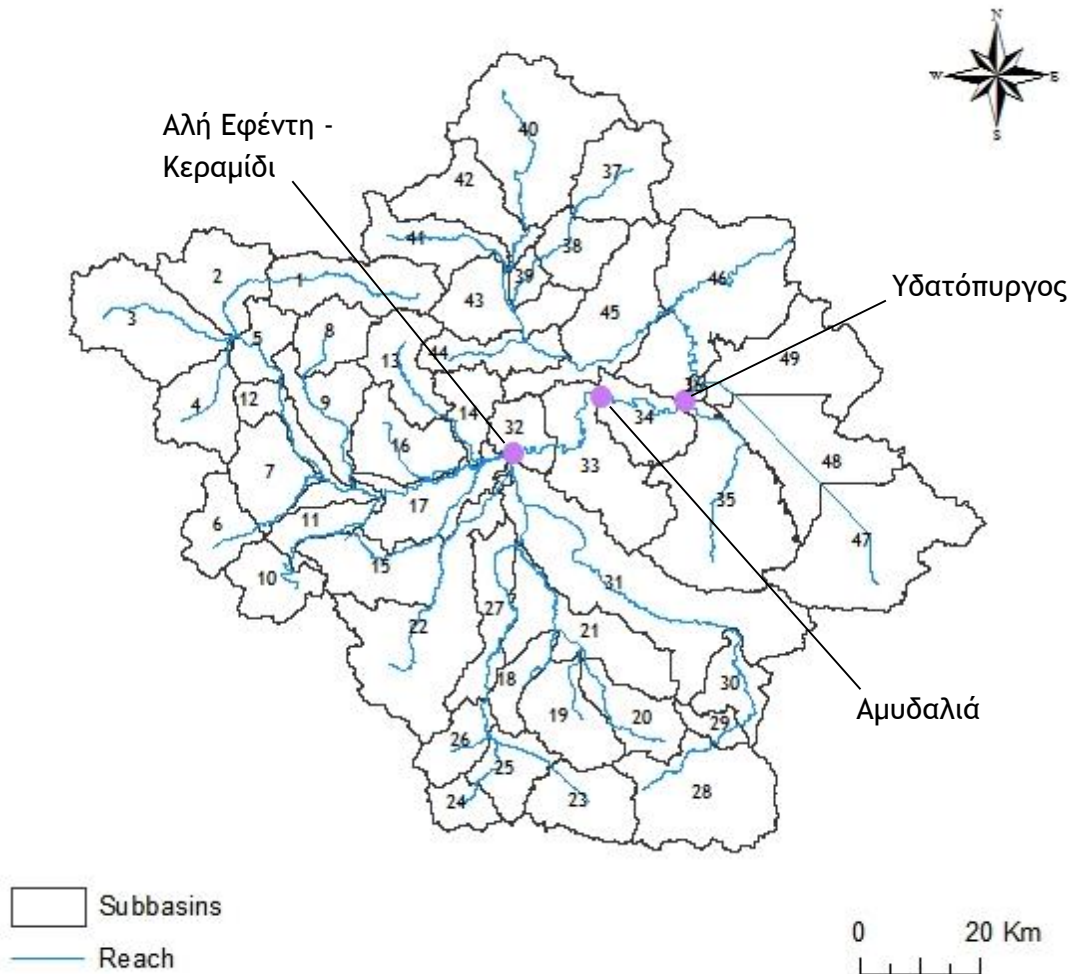
Η διαδικασία της βαθμονόμησης (calibration) είναι απαραίτητη για την επίτευξη ακριβούς προσομοίωσης της κίνησης του νερού, των θρεπτικών ουσιών και του ιζήματος από το μοντέλο SWAT και ιδιαίτερα σε λεκάνες απορροής με εντατικοποιημένη διαχείριση και ανθρωπογενή επιρροή στους υδατικούς πόρους όπως η λεκάνη απορροής του ποταμού Πηνειού. Η βαθμονόμηση συνίσταται στην προσπάθεια επίτευξης μιας καλύτερης παραμετροποίησης του μοντέλου με βάση τα δεδομένα πεδίου, δηλαδή τις συνθήκες που επικρατούν τοπικά, μειώνοντας επακόλουθα την αβεβαιότητα των προβλέψεων (Arnold, et al., 2012).

Η πραγματοποίηση ανάλυσης ευαισθησίας (sensitivity analysis) για τον εντοπισμό των μεταβλητών με τη μεγαλύτερη επιρροή στα αποτελέσματα του μοντέλου προηγείται της διαδικασίας βαθμονόμησης. Είναι μια διαδικασία απαραίτητη για τον εντοπισμό των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν στη βαθμονόμηση, καθώς και της απαιτούμενης ακρίβειας για τη ρύθμισή τους. Πρακτικά η ανάλυση ευαισθησίας βοηθά στον προσδιορισμό των κύριων λειτουργιών που λαμβάνουν χώρα σε μια λεκάνη απορροής αναφορικά με το βαθμονομούμενο στοιχείο (απορροή, συγκεντρώσεις θρεπτικών, ιζήματος κ.α.).

Η διαδικασία της βαθμονόμησης πραγματοποιείται επιλέγοντας τιμές για τις μεταβλητές εισόδου του μοντέλου και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα προσομοίωσης του μοντέλου για δεδομένες συνθήκες με παρατηρημένα (μετρημένα) δεδομένα για τις ίδιες συνθήκες. Μπορεί να πραγματοποιηθεί χειροκίνητα, χρησιμοποιώντας τα εργαλεία αυτόματης βαθμονόμησης στο λογισμικό SWAT είτε το λογισμικό SWAT-CUP. Το τελευταίο στάδιο περιλαμβάνει την επαλήθευση (validation) του μοντέλου για το βαθμονομούμενο στοιχείο (απορροή, συγκεντρώσεις θρεπτικών, ιζήματος κ.α.). Η διαδικασία της επαλήθευσης προσδιορίζει κατά πόσο ένα συγκεκριμένο μοντέλο είναι ικανό να παράγει επαρκώς ακριβείς προσομοιώσεις αναφορικά πάντα και με τους προς εκπλήρωση στόχους. Περιλαμβάνει την εκτέλεση του μοντέλου με χρήση των παραμέτρων που προσδιορίστηκαν μέσω της βαθμονόμησης και σύγκριση των προσομοιωμένων αποτελεσμάτων με παρατηρημένα δεδομένα τα οποία δε χρησιμοποιήθηκαν στη βαθμονόμηση. Υπάρχει πλήθος γραφικών και στατιστικών μεθόδων, αντικειμενικά στατιστικά κριτήρια-μέτρα επίδοσης, τα οποία χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν πότε ένα μοντέλο είναι βαθμονομημένο και επαληθευμένο.

Σύμφωνα με τους Arnold et al. (2012) η σωστή διαδικασία βαθμονόμησης και ελέγχου περιλαμβάνει:

- την ύπαρξη συστηματικών μετρήσεων για ένα ευρύ φάσμα υδροκλιματικών συνθηκών καλύπτοντας υγρά, μέσα και ξηρά έτη
- τις πολλαπλές τεχνικές ελέγχου
- τη βαθμονόμηση όλων των στοιχείων που θα ελεγχθούν
- την εξακρίβωση ότι όλα τα σημαντικά αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι εύλογα.



Εικόνα 35: Σταθμοί μέτρησης Αλή Εφέντη, Κεραμίδι, Αμυδαλιά και Υδατόπυργος.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια βαθμονόμησης πρώτα των παραμέτρων που επηρεάζουν την ποσότητα του ύδατος και έπειτα των παραμέτρων που επηρεάζουν την ποιότητα του ύδατος. Για την ποσοτική και ποιοτική βαθμονόμηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μετρήσεων σε τέσσερις αντιπροσωπευτικές θέσεις της λεκάνης, Αλή Εφέντη και Αμυδαλιά για την ποσοτική βαθμονόμηση, Κεραμίδι και Υδατόπυργος για την ποιοτική βαθμονόμηση. Για την ποσοτική βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκαν χρονοσειρές μηνιαίων μετρήσεων παροχών στις παραπάνω θέσεις από τη μελέτη των Ναλμπάντη και Κουτσογιάννη (1997), εκτεινόμενες από το 1975 έως το 1995. Η αλληλουχία υγρών και ξηρών ετών και η έντονη αυξητική τάση της αρδευτικής ζήτησης και των υπόγειων απολήψεων καθιστούν την περίοδο αυτή κατάλληλη για τη ρύθμιση του μοντέλου. Χωρίστηκε σε δύο χρονικές ενότητες, κατά την πρώτη (1976-1985) έγινε η βαθμονόμηση του μοντέλου, κατά τη δεύτερη (1986-1995) η επαλήθευση, ενώ ο πρώτος χρόνος διατέθηκε για τη θέρμανση του μοντέλου. Όσον αφορά την ποιοτική βαθμονόμηση τα διαθέσιμα ελλιπή δεδομένα μετρημένων συγκεντρώσεων αζώτου και φωσφόρου στην απορροή στις δύο προαναφερθείσες θέσεις αναφέρονται στην περίοδο 1984-2004.

Για μια λεκάνη στην οποία η ανθρωπογενής παρέμβαση όπως τα φράγματα, οι μεταφορές νερού, οι γεωτρήσεις και οι απολήψεις λυμάτων μεταβάλλουν σημαντικά

τις φυσικές διεργασίες, είναι απαραίτητο οι παρεμβάσεις αυτές να λαμβάνονται υπόψη τόσο κατά την κατασκευή όσο και κατά τη ρύθμιση του μοντέλου. Συνεπώς, κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης το μοντέλο μεταβλήθηκε ώστε να προσομοιώνει καλύτερα την κατάσταση της λεκάνης για τη χρονική περίοδο της βαθμονόμησης. Έτσι, για τη ρύθμιση του μοντέλου στη λεκάνη απορροής δεν υπάρχουν ταμιευτήρες, ενώ η αρδευόμενη γη μειώνεται ομοιόμορφα κατά μήκος της λεκάνης κατά 40%. Αυτό επιτυγχάνεται αποδίδοντας ως αγρανάπαιση (AGRL) όλα τα HRUs με χαρακτηριστικά COTO/CL-CL-CL/0-9999 και ALFA/C-C-CL/0-9999, των οποίων η αθροιστική έκταση ανέρχεται σε 614,7 km<sup>2</sup>. Με εξαίρεση την αρδευόμενη έκταση της υπολεκάνης 15 η οποία λαμβάνει νερό από τον ταμιευτήρα Πλαστήρα, το σύνολο της έκτασης των καλλιεργειών αρδεύεται από τον αβαθή υδροφορέα, ενώ το αρχικό βάθος του (SHALLST) ορίζεται στα 5000 mm για όλη τη λεκάνη απορροής, ωθώντας έτσι το μοντέλο να ικανοποιήσει πλήρως ή σε μεγάλο ποσοστό τις αρδευτικές ανάγκες των καλλιεργειών με νερό από τον αβαθή υδροφορέα.

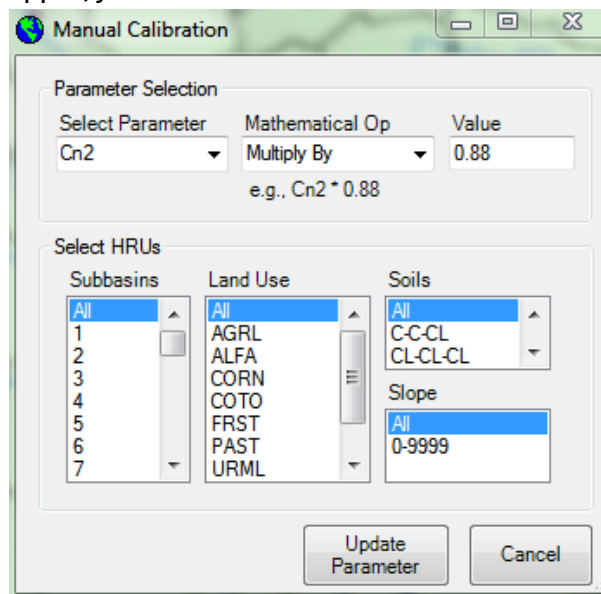
Στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας και ποσοτική βαθμονόμηση εξ αρχής. Οι τιμές των παραμέτρων που ρυθμίστηκαν εισήχθησαν στο μοντέλο με τη χρήση του εργαλείου βαθμονόμησης (Manual Calibration Helper) του ArcSWAT έπειτα από μια αρχική εκτέλεση του προγράμματος με χρήση των αρχικών-καθορισμένων από το πρόγραμμα τιμών (default). Βοηθητικά, αξιοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα της ποσοτικής βαθμονόμησης των μοντέλων λεκάνης απορροής του ποταμού Πηνειού, τα οποία κατασκευάστηκαν και βαθμονομήθηκαν στο πλαίσιο των προγραμμάτων [i-adapt](#) και Nomoteleia.

Οι παράμετροι που ρυθμίστηκαν είναι οι εξής:

- CN2: ο αρχικός αριθμός καμπύλης για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής. Η τιμή του εξαρτάται από την υδατοπερατότητα του εδάφους, τη χρήση γης και τις προγενέστερες συνθήκες υγρασίας του εδάφους και ορίζεται μεταβαλλόμενη ανά HRU.
- EPCO: ο συντελεστής αντιστάθμισης της απορρόφησης των φυτών. Η τιμή του κυμαίνεται από 0 έως 1. Όταν η τιμή του EPCO προσεγγίζει το άνω όριο, το μοντέλο επιτρέπει ολοένα μεγαλύτερο μέρος της απορρόφησης νερού από τα φυτά να ικανοποιείται από τα βαθύτερα στρώματα εδάφους. Η τιμή της μεταβλητής αυτής ορίστηκε κοινή για ολόκληρη τη λεκάνη απορροής.
- ESCO: ο συντελεστής αντιστάθμισης της εξάτμισης του εδάφους. Επιτρέπει τον ορισμό του βαθμού συμμετοχής του βαθύτερου εδάφους στην ποσότητα νερού που εξατμίζεται από το έδαφος και αναφέρεται στην τριχοειδική δράση. Η τιμή της μεταβλητής κυμαίνεται από 0.01 έως 1 και καθώς μειώνεται το μοντέλο, μπορεί να αποσπά μεγαλύτερη ποσότητα νερού για εξάτμιση από βαθύτερα επίπεδα εδάφους. Η τιμή της μεταβλητής αυτής ορίστηκε κοινή για ολόκληρη τη λεκάνη απορροής.
- GW\_DELAY: ο χρόνος υστέρησης των υπογείων υδάτων (days). Η τιμή της μεταβλητής κυμαίνεται από -100 έως 100 ημέρες και εκφράζει το χρόνο από την έξοδο του νερού από το εδαφικό προφίλ μέχρι την είσοδο στον αβαθή υδροφορέα. Εξαρτάται από το βάθος μέχρι τον υδροφόρο ορίζοντα, από τις υδραυλικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών στην ακόρεστη ζώνη και

τη ζώνη του υπόγειου υδροφορέα. Η μεταβλητή αυτή λαμβάνει ίδια τιμή για όλα τα HRUs κάθε υπολεκάνης.

- **GW\_REVAP:** ο συντελεστής επανατροφοδότησης υπόγειου νερού. Ορίζει την ποσότητα νερού που επιστρέφει από τον αβαθή υδροφορέα λόγω εξάτμισης ή λόγω λήψης από φυτά με εκτεταμένο ριζικό σύστημα. Η τιμή του συντελεστή κυμαίνεται από 0 έως 1. Για την τιμή 0 η μεταφορά νερού από τον αβαθή υδροφορέα στη ριζική ζώνη είναι περιορισμένη, ενώ για την τιμή 1 ο ρυθμός μεταφοράς προσεγγίζει το ρυθμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Η τιμή για τη μεταβλητή αυτή αποδίδεται ομοιόμορφα για όλα τα HRUs κάθε υπολεκάνης.
- **GWQMN:** το ελάχιστο βάθος νερού στον αβαθή υδροφορέα, για να υπάρχει βασική απορροή (mm). Η τιμή για τη μεταβλητή αυτή αποδίδεται ομοιόμορφα για όλα τα HRUs κάθε υπολεκάνης.
- **REVAPMN:** το ελάχιστο βάθος νερού στον αβαθή υδροφορέα, για να υπάρχει κίνηση νερού είτε προς την ακόρεστη ζώνη είτε προς τον βαθύ υδροφορέα (mm). Η μεταβλητή αυτή λαμβάνει ίδια τιμή για όλα τα HRUs κάθε υπολεκάνης.
- **RCHRG\_DP:** το τμήμα ποσότητας νερού που κατεισδύει από τον αβαθή στο βαθύ υδροφορέα (mm). Η μεταβλητή αυτή λαμβάνει ίδια τιμή για όλα τα HRUs κάθε υπολεκάνης.
- **SOL\_AWC:** η διαθέσιμη υδροχωρητικότητα του εδαφικού στρώματος (mm νερού/mm εδάφους). Είναι η διαφορά του σημείου μόνιμης μάρανσης (PWP) από τη διαθέσιμη υδατοϊκανότητα (FC) και λαμβάνει την ίδια τιμή για κάθε είδος εδάφους κατά μήκος της λεκάνης απορροής.
- **SOL\_K** η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα του εδαφικού στρώματος (mm/hr). Είναι αντίστροφη της αντίστασης από το έδαφος στη ροή του νερού μέσα σε αυτό και λαμβάνει την ίδια τιμή για κάθε είδος εδάφους κατά μήκος της λεκάνης απορροής.



Εικόνα 36: Ρύθμιση των παραμέτρων με χρήση του εργαλείου Manual Calibration Helper του ArcSWAT.



Παράμετρος	Αρχική τιμή	Εύρος	Είδος μεταβολής	Τελική αλλαγή
Cn2	60-85	-25 - 25	ποσοστιαία μεταβολή	-12
Epc0	1	0 - 1	επιλογή τιμής	0.44
Esco	0.95	0 - 1	επιλογή τιμής	0.21
Gw_Delay	5-50 days	-100 - 100	ποσοστιαία μεταβολή	10.3
Gw_Revap	0.05	-0.036 - 0.036	πρόσθεση τιμής στην αρχική τιμή	-0.012
Gwqmn	5000 mm	-1000 - 1000	πρόσθεση τιμής στην αρχική τιμή	-75
Revapmn	5000 mm	-1000 - 1000	πρόσθεση τιμής στην αρχική τιμή	-10
Rchrg_Dp	0.05-0.20	0 - 1	ποσοστιαία μεταβολή	-62
Sol_Awc	0.10-0.20 mm νερού / mm εδάφους	-25 - 25	ποσοστιαία μεταβολή	-17
Sol_K	10-100 mm/hr	-25 - 25	ποσοστιαία μεταβολή	-12.4

**Πίνακας 8:** Παράμετροι ποσοτικής βαθμονόμησης, είδος και μέγεθος της μεταβολής τους.

Για την εκτίμηση της προγνωστικής ικανότητας ενός μοντέλου, τον προσδιορισμό της ισχύος της γραμμικής σχέσης μεταξύ των προσομοιωμένων και των παρατηρημένων πληροφοριών καθώς και την ποσοτικοποίηση της απόκλισης μεταξύ τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί πλήθος στατιστικών μεθόδων. Ταυτόχρονα οι γραφικές μέθοδοι παρέχουν τη δυνατότητα αφενός της οπτικής σύγκρισης των προσομοιωμένων αποτελεσμάτων του μοντέλου με τα παρατηρημένα στοιχεία και αφετέρου μιας αρχικής επισκόπησης της επίδοσης του μοντέλου.

Ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μέτρα επίδοσης αποτελεί ο δείκτης επίδοσης Nash-Sutcliffe (Nash-Sutcliffe Efficiency-NSE). Αποτελεί μια κανονικοποιημένη στατιστική έκφραση, η οποία εκφράζει κατά πόσο το διάγραμμα των παρατηρημένων με τις προσομοιωμένες τιμές προσεγγίζει τον άξονα 1:1. Υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

Όπου  $Q_{sim}$  είναι η προσομοιωμένη χρονοσειρά,  $Q_{obs}$  η παρατηρημένη χρονοσειρά,  $\bar{Q}_{obs}$  ο αριθμητικός μέσος όρος της παρατηρημένης χρονοσειράς και  $n$  το μήκος τους. Η τιμή του δείκτη NSE κυμαίνεται μεταξύ  $-\infty$  και 1.0 με την τελευταία να είναι η βέλτιστη. Γενικά, οι θετικές τιμές του NSE καταδεικνύουν αποδεκτές επιδόσεις προσομοίωσης, ενώ οι αρνητικές τιμές δείχνουν ότι ο μέσος όρος της παρατηρημένης χρονοσειράς αποτελεί καλύτερη προσομοίωση από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination -  $R^2$ ) εκφράζει το ποσοστό της διακύμανσης των παρατηρημένων δεδομένων που μπορεί να προβλεφτεί από το μοντέλο. Η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1.0 με τις μεγαλύτερες τιμές να υποδεικνύουν μικρότερη διακύμανση σφάλματος. Ο δείκτης αυτός είναι ευαίσθητος σε ακραίες τιμές και μη ευαίσθητος σε πρόσθετες και αναλογικές διαφορές μεταξύ της προσομοίωσης και των παρατηρημένων τιμών.

Ο δείκτης PBIAS (Percent Bias) εκφράζει την τάση των προσομοιωμένων τιμών να υπερβαίνουν ή να υπολείπονται των αντίστοιχων παρατηρημένων τιμών. Τιμές του PBIAS που προσεγγίζουν το 0 (βέλτιστη τιμή) υποδεικνύουν ακρίβεια στην προσομοίωση του μοντέλου. Θετικές τιμές δείχνουν μια τάση υποεκτίμησης, ενώ αρνητικές τάση υπερεκτίμησης. Ο δείκτης υπολογίζεται σαν ποσοστό επί τοις εκατό με χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i})}$$

όπου  $Q_{sim}$  είναι η προσομοιωμένη χρονοσειρά,  $Q_{obs}$  η παρατηρημένη χρονοσειρά και  $n$  το μήκος τους.

Ο δείκτης RSR (RMSE Standard Deviation Ratio) αποτελεί κανονικοποίηση του μέσου υπολειμματικού σφάλματος (Root Mean Square Error - RMSE) χρησιμοποιώντας την τυπική απόκλιση των παρατηρήσεων και υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}}$$

Όπου  $Q_{sim}$  είναι η προσομοιωμένη χρονοσειρά,  $Q_{obs}$  η παρατηρημένη χρονοσειρά,  $\bar{Q}_{obs}$  ο αριθμητικός μέσος όρος της παρατηρημένης χρονοσειράς και  $n$  το μήκος τους. Λαμβάνει θετικές τιμές και για βέλτιστη προσομοίωση και μηδενικό υπολειμματικό σφάλμα ο δείκτης RSR παίρνει την τιμή 0. Γενικά, όσο μικρότερη η τιμή του RSR τόσο μικρότερο είναι το μέσο υπολειμματικό σφάλμα και συνεπώς τόσο καλύτερη η επίδοση του μοντέλου.

Σύμφωνα με τους Moriasi et al. (2007) η προγνωστική ικανότητα ενός μοντέλου όσο αφορά την παροχή κρίνεται ικανοποιητική εάν  $NSE > 0.5$ ,  $RSR \leq 0.7$  και  $PBIAS \pm 25\%$ .

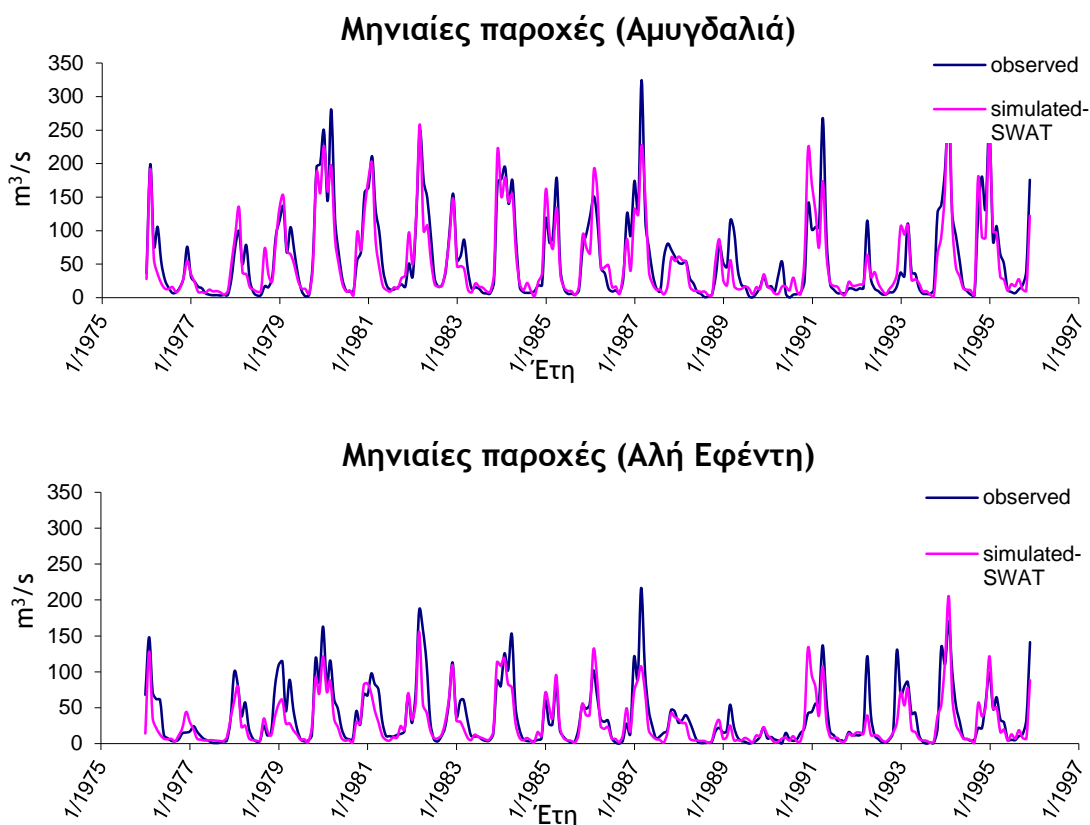
Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με τις τιμές που λαμβάνουν τα προαναφερθέντα μέτρα επίδοσης για τις παρατηρημένες και προσομοιωμένες μηνιαίες τιμές παροχών στις θέσεις Αμυγδαλιά και Αλή Εφέντη στις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης του μοντέλου.

Θέση	Διάστημα	Στατιστικοί δείκτες			
		NSE	RSR	PBIAS (%)	R <sup>2</sup>
Αλή Εφέντη	Βαθμονόμηση (1976-1985)	0.694	0.55	23.16	0.75
	Επαλήθευση (1986-1995)	0.635	0.60	15.97	0.66
Αμυγδαλιά	Βαθμονόμηση (1976-1985)	0.878	0.35	6.85	0.88
	Επαλήθευση (1986-1995)	0.758	0.49	9.06	0.77

Πίνακας 9: Τιμές των μέτρων επίδοσης για τις θέσεις Αμυγδαλιά και Αλή Εφέντη στις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης του μοντέλου.

Είναι φανερό ότι όλες οι τιμές των μέτρων επίδοσης βρίσκονται εντός των προαναφερθέντων αποδεκτών ορίων τόσο για τη θέση Αμυγδαλιά όσο και για τη θέση Αλή Εφέντη. Οι υψηλές τιμές του δείκτη R<sup>2</sup> δηλώνουν ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων και των παρατηρημένων χρονοσειρών παροχής. Οι τιμές του δείκτη PBIAS υποδηλώνουν μια συστηματική τάση του μοντέλου να υποεκτιμά τις μέσες μηνιαίες παροχές, κυρίως στη θέση Αλή Εφέντη, όπου το μοντέλο υποεκτίμησε την παρατηρημένη χρονοσειρά κατά περίπου 23%. Οι τιμές του δείκτη RSR δηλώνουν την ύπαρξη μικρού υπολειμματικού σφάλματος μέσα στα αποδεκτά όρια και παρουσιάζουν μικρή αύξηση για την περίοδο επαλήθευσης. Γενικά, υπάρχει ομοιογένεια στις τιμές των μέτρων επίδοσης του μοντέλου για την περίοδο της βαθμονόμησης και επαλήθευσης, όπου παρατηρείται ελάχιστα χαμηλότερη επίδοση του μοντέλου με εξαίρεση την τιμή του PBIAS για τη θέση Αλή Εφέντη και την περίοδο επαλήθευσης, η οποία είναι αισθητά βελτιωμένη από την αντίστοιχη τιμή για την περίοδο βαθμονόμησης. Η ομοιογένεια αυτή δηλώνει ότι το μοντέλο είναι ικανό να παράγει προβλέψεις των παροχών σε μηνιαίο βήμα με ικανοποιητική ακρίβεια όχι μόνο για την περίοδο της βαθμονόμησης αλλά και για διαφορετικές περιόδους.

Παρουσιάζονται επίσης και τα γραφήματα των παρατηρημένων και προσομοιωμένων μέσων μηνιαίων χρονοσειρών παροχής για τις δύο θέσεις και για το άθροισμα των περιόδων βαθμονόμησης και επαλήθευσης, ώστε να είναι δυνατός ο οπτικός εντοπισμός των αποκλίσεων και των διαφορών στο σχήμα μεταξύ των δύο χρονοσειρών. Παρατηρείται ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των δύο χρονοσειρών όσον αφορά το γενικότερο σχήμα τους σε όλη τη διάρκεια σύγκρισης και για τις δύο θέσεις. Αποδεικνύεται συνεπώς η ικανότητα του μοντέλου να προσομοιώνει τις έντονες εποχιακές διακυμάνσεις στις παροχές, ενώ ανά σημεία είναι φανερή η υποεκτίμηση των παροχών από το μοντέλο κυρίως στις αιχμές των παροχογραφημάτων.



Εικόνα 37: Παρατηρημένες και προσομοιωμένες παροχές στις θέσεις Αλή Εφέντη και Αμυγδαλιά.

Η βαθμονόμηση των παραμέτρων σχετικών με την ποιότητα του ύδατος έγινε χειροκίνητα, με χρήση των διαθέσιμων εργαλείων στο λογισμικό SWAT (Manual Calibration Helper, Edit SWAT Input) και ακολούθησε τη βαθμονόμηση των παραμέτρων σχετικών με την ποσότητα ύδατος.

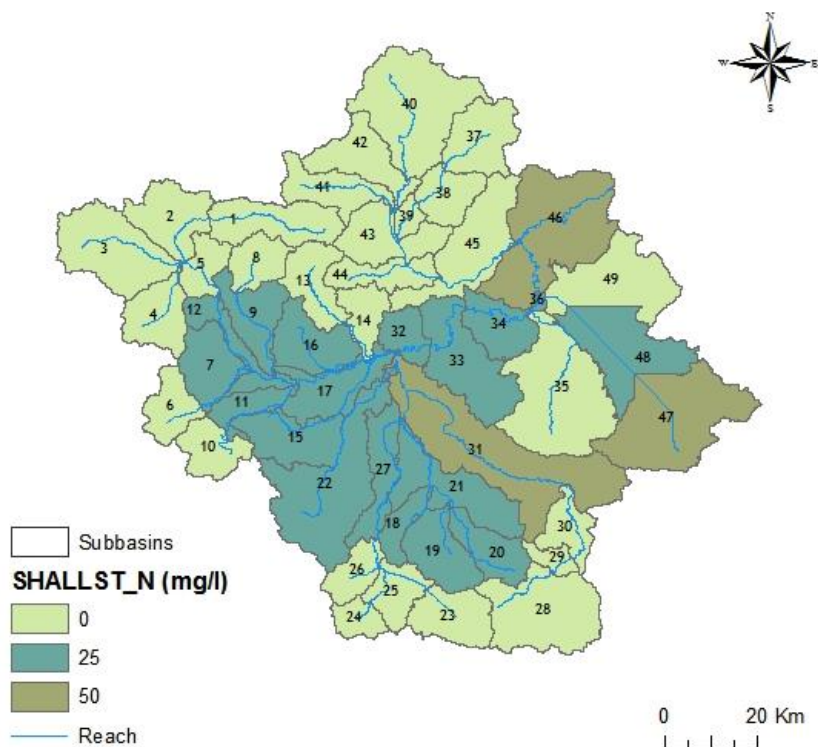
Οι παράμετροι που συμμετείχαν στη βαθμονόμηση είναι οι εξής:

- NPERCO: ο συντελεστής κατείσδυσης αζώτου των νιτρικών. Καθορίζει την ποσότητα νιτρικών που απομακρύνεται μέσω της επιφανειακής απορροής από την επιφάνεια του εδάφους σε σχέση με την ποσότητα που απομακρύνεται μέσω της κατείσδυσης νερού προς τους υπόγειους υδροφορείς. Η τιμή του κυμαίνεται από 0.01 έως 1.0. Είναι κοινή για ολόκληρη τη λεκάνη απορροής και η μέγιστη τιμή συνεπάγεται ίση συγκέντρωση των νιτρικών στην επιφανειακή απορροή και στο νερό που κατεισδύει.
- PPERCO: ο συντελεστής κατείσδυσης διαλυτού φωσφόρου ( $10^3 \text{ m}^3/\text{Mg}$ ). Λαμβάνει τιμή κοινή για όλη τη λεκάνη απορροής και είναι ο λόγος της συγκέντρωσης του διαλυμένου φωσφόρου στο επιφανειακό στρώμα εδάφους προς τη συγκέντρωση του φωσφόρου στο νερό που κατεισδύει προς τους υπόγειους υδροφορείς.
- PHOSKD: ο συντελεστής κινητικότητας διαλυτού φωσφόρου ( $\text{m}^3/\text{Mg}$ ). Είναι ο λόγος της συγκέντρωσης του διαλυτού φωσφόρου στο επιφανειακό στρώμα εδάφους προς τη συγκέντρωση του διαλυτού φωσφόρου στην επιφανειακή

- απορροή. Η παράμετρος λαμβάνει μια τιμή για ολόκληρη τη λεκάνη απορροής, ενώ μεγάλη τιμή δηλώνει μικρή δυνατότητα κινητικότητας.
- SOL\_CBN: η περιεκτικότητα οργανικού άνθρακα στο έδαφος (% βάρους εδάφους). Η τιμή της παραμέτρου μεταβάλλεται ανά τύπο εδάφους και ανά εδαφική στρώση.
  - CDN: ο συντελεστής εκθετικού ρυθμού απονιτροποίησης. Η τιμή της παραμέτρου κυμαίνεται από 0 έως 3 και είναι κοινή για ολόκληρη τη λεκάνη απορροής.
  - SDNCO: το κατώφλι περιεκτικότητας εδαφικής υγρασίας για την προσομοίωση απονιτροποίησης. Εάν η τιμή της εδαφικής υγρασίας εκφρασμένης ως λόγος της υδατοϊκανότητας υπερβαίνει την τιμή της παραμέτρου SDNCO, τότε προσομοιώνονται αναερόβιες συνθήκες και συνεπώς λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της απονιτροποίησης. Η τιμή της παραμέτρου είναι ίδια για όλη τη λεκάνη απορροής.
  - PSP: ο συντελεστής διαθεσιμότητας διαλυτού φωσφόρου. Καθορίζει το ποσοστό του φωσφόρου που εφαρμόζεται στο έδαφος μέσω λιπάνσεων και βρίσκεται σε διαλυτή μορφή μετά την ολοκλήρωση της άμεσης αντίδρασής του με άλλα στοιχεία του εδάφους κατά την εφαρμογή του. Λαμβάνει μια τιμή για το σύνολο της λεκάνης απορροής.
  - ADJ\_PKR: ο παράγοντας προσαρμογής επίδρασης αιχμών στη διόδευση των φερτών στο ποτάμι. Καθορίζει το εύρος της διάβρωσης που δημιουργείται σε κάθε HRU και λαμβάνει μία τιμή για το σύνολο της λεκάνης.
  - USLE\_P: ο παράγοντας διαχείρισης εδαφών κατά της διάβρωσης. Ορίζεται ως ο λόγος της απώλειας εδάφους με εφαρμογή κάποιας πρακτικής ενάντια στη διάβρωση του εδάφους, λ.χ. διαμόρφωση αναβαθμίδων, καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς κ.α., προς την αντίστοιχη απώλεια με καλλιέργεια κάθετα στις ισοϋψείς. Η παράμετρος έχει δυνατότητα να λάβει διαφορετική τιμή ανά HRU.
  - SHALLST\_N: η αρχική συγκέντρωση των νιτρικών στον αβαθή υδροφορέα (mg N/l ή ppm). Η τιμή της μεταβλητής μεταβάλλεται ανά HRU.
  - HLIFE\_GW: ο χρόνος ημιζωής των νιτρικών στον αβαθή υδροφορέα (days). Δηλώνει την απαραίτητη χρονική περίοδο για να επιτευχθεί μείωση της συγκέντρωσης των νιτρικών στον αβαθή υδροφορέα στο μισό της αρχικής τιμής της λόγω της πρόσληψης των νιτρικών από τα βακτήρια ή άλλων χημικών μετατροπών που λαμβάνουν χώρα στον υπόγειο αβαθή υδροφορέα. Λαμβάνει τιμές από 0 έως 500 ημέρες και η τιμή της μπορεί να μεταβληθεί ανά HRU.

Το Θεσσαλικό πεδίο χαρακτηρίστηκε με την ΚΥΑ 19652/1906/1999 ως ευπρόσβλητη από νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης ζώνη έπειτα από αξιολόγηση των στοιχείων ποιότητας των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων σύμφωνα με τα κριτήρια της Οδηγίας 91/676/EOK. Ως ευπρόσβλητες ζώνες ορίζονται οι περιοχές στις οποίες η συγκέντρωση των NO<sub>3</sub><sup>-</sup> στα επιφανειακά ή υπόγεια ύδατα υπερβαίνει έστω και παροδικά την ανώτερη τιμή των 50 mg/l, το όριο δηλαδή καταλληλότητας του πόσιμου νερού. Λαμβάνοντας υπόψη τα όρια των ευαίσθητων περιοχών και τα αποτελέσματα των δειγματοληψιών για τη μέτρηση των συγκεντρώσεων των νιτρικών στα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα όπως παρουσιάζονται στο ΦΕΚ. 1422 Β 22-10-2001, καθώς και τα ποσοστά κάλυψης των αρδευόμενων καλλιεργειών (οι

οποίες δέχονται και τις μεγαλύτερες δόσεις λίπανσης) ανά υπολεκάνη, ορίστηκαν οι τιμές της παραμέτρου SHALLST\_N όπως φαίνεται στον παρακάτω χάρτη.



Εικόνα 38: Αρχική συγκέντρωση NO<sub>3</sub> στον αβαθή υπόγειο υδροφόρα ανά υπολεκάνη.

Παράμετρος	Επίδραση	Εύρος	Τελική τιμή
NPERCO	NO <sub>3</sub> -N	0-1	0.2
PPERCO	Διαλυτός P	10-17.5 (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /Mg)	10
PHOSKD	Διαλυτός P	100-200 (m <sup>3</sup> /Mg)	175
SOL_CBN	Οργανικό N, P	0.05-10 (%)	1.0 1.22 για C-C-CL και soil layers 1 & 2
CDN	NO <sub>3</sub> -N	0-3.0	1.4
SDNCO	NO <sub>3</sub> -N	0-1.0	1.1
PSP	Διαλυτός P	0.01-0.7	0.4
ADJ_PKR	Φερτά	0.5-2.0	0.5
USLE_P	Φερτά	0-1.0	0.5
HLIFE_NGW	NO <sub>3</sub> -N	0-500 (days)	500

Πίνακας 10: Παράμετροι ποιοτικής βαθμονόμησης, εύρη και τιμές.

Η εκτέλεση του μοντέλου SWAT έγινε για την περίοδο 1978-2004 με χρήση δύο ετών για τη θέρμανση του μοντέλου. Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις  $\text{NO}_3\text{-N}$  και P, τα διαθέσιμα δεδομένα καταγραφής από το Υπουργείο Γεωργίας και το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής υπάρχουν για την περίοδο 1980 έως 2004 για τις θέσεις Κεραμίδι και Υδατόπυργος στις εξόδους των υπολεκανών 17 και 34 αντίστοιχα. Ωστόσο οι χρονοσειρές των παρατηρημένων μηνιαίων συγκεντρώσεων των θρεπτικών ουσιών παρουσιάζουν αρκετά κενά και συνεπώς προτιμώνται γραφικές τεχνικές για τον έλεγχο και την αξιολόγηση της βαθμονόμησης παρά ο υπολογισμός των μέτρων επίδοσης, όπως έγινε για την αξιολόγηση της ποσοτικής βαθμονόμησης.

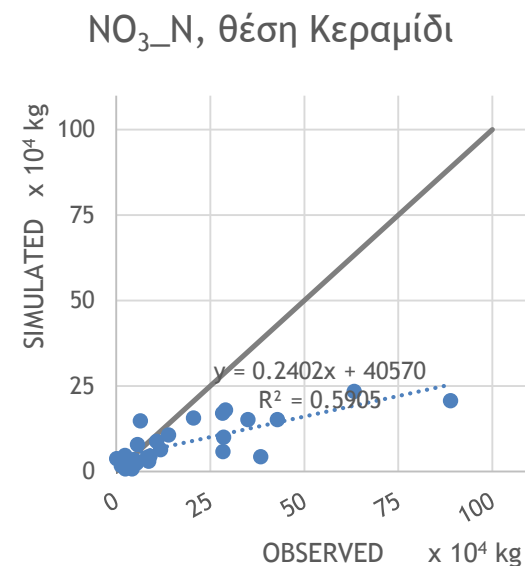
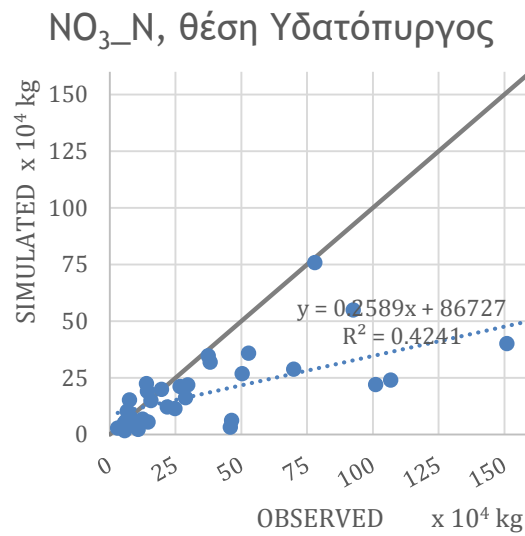
Οι μηνιαίες παρατηρημένες συγκεντρώσεις θρεπτικών πολλαπλασιάστηκαν με τις παρατηρημένες μέσες μηνιαίες παροχές στις αντίστοιχες θέσεις και υπολογίστηκαν τα μέσα μηνιαία φορτία θρεπτικών. Καθώς δε η χρονοσειρά των μέσων μηνιαίων παρατηρημένων παροχών στη θέση Υδατόπυργος δεν ήταν διαθέσιμη, χρησιμοποιήθηκε η χρονοσειρά παροχών της θέσης Αμυγδαλιάς. Επειδή τέλος οι χρονοσειρές παρατηρημένων θρεπτικών με μηνιαίο βήμα παρουσίαζαν χαμηλή συσχέτιση με τις αντίστοιχες προσομοιωμένες, επιλέχθηκε η κατασκευή χρονοσειρών μετρημένων φορτίων θρεπτικών με εποχικό βήμα και η σύγκριση τους με τις αντίστοιχες προσομοιωμένες. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η βαθμονόμηση και επαλήθευση των παραμέτρων ποιότητας νερού συχνά πραγματοποιούνται σε μεγαλύτερο του μηνιαίου χρονικό βήμα λόγω της έλλειψης των απαραίτητων δεδομένων μετρήσεων μικρότερης χρονικής κλίμακας (Wu & Chen, 2009).

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης τα ζεύγη των παρατηρημένων και προσομοιωμένων εποχικών φορτίων διατάσσονται σε διάγραμμα (scatter plot) με τις πρώτες στον οριζόντιο άξονα και τις τελευταίες στον κατακόρυφο άξονα. Η ευθεία  $x=y=1$  αντιπροσωπεύει την ιδανική βαθμονόμηση για την οποία οι παρατηρημένες τιμές είναι ίσες με τις προσομοιωμένες. Η απόκλιση των απεικονιζόμενων σημείων από την ευθεία των  $45^\circ$  δείχνει τη διασπορά του σφάλματος στη βαθμονόμηση, ενώ είναι δυνατός ο εντοπισμός κάποιας συστηματικής τάσης υπερεκτίμησης ή υποεκτίμησης του μοντέλου είτε ύπαρξης ακραίων τιμών. Η γραμμική τάση και ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  υποδηλώνουν τη ισχύ της συσχέτισης μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρημένων τιμών.

Επιλέχθηκε να παρουσιαστεί η γραφική απεικόνιση των ζευγών των προσομοιωμένων και παρατηρημένων εποχικών συγκεντρώσεων  $\text{NO}_3$  στις θέσεις Κεραμίδι και Υδατόπυργος. Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις του P στις παραπάνω θέσεις η βαθμονόμηση κρίθηκε μη ικανοποιητική και τα αντίστοιχα αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται.

Είναι φανερό από τα διαγράμματα ότι τόσο για τη θέση Υδατόπυργος όσο και για τη θέση Κεραμίδι η συσχέτιση μεταξύ των παρατηρημένων και των προσομοιωμένων τιμών είναι θετική. Για μικρές τιμές φορτίων, τα σημεία βρίσκονται πολύ κοντά στην ευθεία  $x=y$ , γεγονός που υποδηλώνει ότι το μοντέλο δεν υπερεκτιμά ή υποεκτιμά τα φορτία  $\text{NO}_3$ , αλλά είναι ικανό να τα προβλέψει επιτυχώς. Ωστόσο για μεγάλες τιμές των φορτίων το πρόγραμμα εμφανίζει σαφή τάση υποεκτίμησης των προσομοιωμένων σε σχέση με τις παρατηρημένες τιμές.

Το μέσο ετήσιο προσομοιωμένο φορτίο NO<sub>3</sub> για τη θέση Κεραμίδι και την περίοδο της βαθμονόμησης υπολογίστηκε 1125120 kg ενώ το πραγματικό μέσο ετήσιο φορτίο με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία είναι 2245526 kg. Αντίστοιχα, στη θέση Υδατόπυργος το προσομοιωμένο μέσο ετήσιο φορτίο υπολογίστηκε 2546782 kg, ενώ το καταγεγραμμένο μέσο ετήσιο φορτίο ανέρχεται σε 3957804 kg. Τα παραπάνω στοιχεία καθιστούν ξεκάθαρη την τάση του μοντέλου να υποεκτιμά τα φορτία των NO<sub>3</sub> και στις δύο θέσεις που μελετήθηκαν, ωστόσο για τις ποιοτικές παραμέτρους του νερού οι παραπάνω αποκλίσεις κρίνονται αποδεκτές και τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης ικανοποιητικά.



**Εικόνα 39: Διαγράμματα προσομοιωμένων-παρατηρημένων μέσων εποχικών φορτίων NO<sub>3</sub> στις θέσεις Υδατόπυργος και Κεραμίδι**



## ΚΕΦ. 5: ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ

Έπειτα από την κατασκευή και τη ρύθμιση του μοντέλου όσο αφορά τις διεργασίες του υδρολογικού κύκλου και τις ποιοτικές παραμέτρους του νερού πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή πέντε σεναρίων στην λεκάνη απορροής του ποταμού Πηνειού. Διαφορετικές πρακτικές εφαρμογής της άρδευσης και λίπανσης για τις αρδευόμενες καλλιέργειες (βαμβάκι, αραβόσιτος, μηδική) συνιστούν τα σεναρία αυτά, τα οποία αναπτύσσονται αναλυτικότερα στη συνέχεια. Σκοπός της εφαρμογής των σεναρίων είναι η διερεύνηση των επιπτώσεων των αλλαγών που αφορούν τις πρακτικές άρδευσης και λίπανσης των καλλιεργειών τόσο στην ποσοτική και ποιοτική κατάσταση των υδατικών πόρων της λεκάνης όσο και στους υπόλοιπους τομείς του WELF Nexus (ενέργεια, γη και τροφή). Συνεπώς, έπειτα από τον ορισμό και την εκτέλεση των σεναρίων ακολουθεί μια πρώτη ποσοτικοποίηση των προαναφερθέντων επιπτώσεων, η σύγκριση και αξιολόγηση των σεναρίων με βάση αυτές. Τα σεναρία πολιτικής και οι δείκτες που επελέγησαν για την ανάλυση των αλληλεπιδράσεων νερού, γης, τροφής, ενέργειας συζητήθηκαν και διαμορφώθηκαν σε συνεργασία με τον ΥΔ ΕΜΠ Ψωμά Αλέξανδρο (Psomas, 2015).

### 5.1 ΣΕΝΑΡΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (REFERENCE SCENARIO-REF)

Το πρώτο σενάριο ενσωματώνει τις συμβατικές γεωργικές πρακτικές και τις πραγματικές χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής, ενώ ταυτόχρονα χρησιμεύει ως επίπεδο αναφοράς για την κατασκευή των υπόλοιπων σεναρίων και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους. Για την υλοποίηση αυτού του σεναρίου οι τιμές των παραμέτρων διατηρήθηκαν όπως υπολογίστηκαν μέσα από τη διαδικασία της βαθμονόμησης ενώ οι χρήσεις γης της λεκάνης, η διάρθρωση των καλλιεργειών, οι καλλιεργητικές πρακτικές καθώς και οι χρήσεις των υδατικών πόρων προσαρμόστηκαν στα σημερινά επίπεδα, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην αντίστοιχη ενότητα του κεφαλαίου 4.

Συνοπτικά στη λεκάνη προσομοιώθηκαν 1552.5 km<sup>2</sup> αρδευόμενης γης εκ των οποίων το 20.5% αρδεύεται από επιφανειακά ύδατα, τους ταμιευτήρες Πλαστήρα, Γυρτώνης, Σμοκόβου και τη λίμνη Κάρλα. Για το υπόλοιπο 79.5% αρδευόμενων καλλιεργειών ως πηγή άρδευσης ορίστηκε ο αβαθής υπόγειος υδροφόρας κάθε υπολεκάνης.

Ταυτόχρονα προσομοιώνεται μεταφορά νερού από τον ταμιευτήρα Γυρτώνης για την πλήρωση της λίμνης Κάρλας, η οποία ανέρχεται σε 500000 m<sup>3</sup>/d και πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια των μηνών Οκτώβριο έως Απρίλιο, και εισροή νερού από τον ταμιευτήρα Πλαστήρα ύψους 130000 m<sup>3</sup>/d για την ύδρευση της πόλης της Καρδίτσας. Η διάρθρωση των καλλιεργειών, η συνολική ετήσια δόση άρδευσης/λίπανσης ανά καλλιέργεια καθώς και οι απώλειες αρδευτικού νερού που ορίστηκαν για το σενάριο αυτό παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Καλλιέργεια	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Συνολική ετήσια δόση άρδευσης (mm)	Ποσοστό απωλειών νερού άρδευσης	Συνολική ετήσια δόση λίπανσης (kg N/ha)
Βαμβάκι	996.43	570	0.25	195
Αραβόσιτος	362.02	620	0.25	214
Μηδική	194.05	740	0.25	0
Σιτάρι	2102.03	40	0.25	131

Πίνακας 11: Στοιχεία προσομοιωμένων καλλιεργειών της λεκάνης απορροής για το σενάριο αναφοράς

## 5.2 ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΛΛΕΙΜΜΑΤΙΚΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ (DEFICIT IRRIGATION SCENARIO-DI)

Η ελλειμματική άρδευση αποτελεί εναλλακτική μέθοδο άρδευσης η οποία αναπτύχθηκε με στόχο τη βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας της χρήσης του αρδευτικού νερού. Περιλαμβάνει την υδατική καταπόνηση των φυτών σε συγκεκριμένα στάδια ή σε ολόκληρη τη διάρκεια του βιολογικού τους κύκλου χωρίς ωστόσο να μειώνεται σημαντικά η απόδοσή τους. Ο σωστός σχεδιασμός και εφαρμογή ενός προγράμματος ελλειμματικής άρδευσης προϋποθέτει εις βάθος κατανόηση της ευαισθησίας των φυτών στην υδατική πίεση και του οικονομικού αντίκτυπου των μειώσεων της παραγωγής. Σε περιοχές όπου οι υδατικοί πόροι αποτελούν τον περιοριστικό παράγοντα, η μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας του νερού αποτελεί μια περισσότερο συμφέρουσα λύση από τη μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας της γης. Συνεπώς με εφαρμογή των πρακτικών της ελλειμματικής άρδευσης το εξοικονομούμενο νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλες χρήσεις είτε για την άρδευση πρόσθετων εκτάσεων καλλιεργειών.

Πιο συγκεκριμένα με την εφαρμογή ελλειμματικής άρδευσης, δηλαδή όταν η ποσότητα εφαρμοζόμενης άρδευσης είναι μικρότερη των αναγκών των φυτών (ET<sub>c</sub>), τα φυτά τείνουν να αναπληρώνουν το νερό από την αποθηκευμένη εδαφική υγρασία. Αν το αποθηκευμένο εδαφικό νερό επαρκεί, τότε δεν επηρεάζεται η εξατμισοδιαπνοή και η απόδοση των φυτών. Μάλιστα αν υπάρχει αναπλήρωση των εδαφικών αποθεμάτων από βροχοπτώσεις, τότε η πρακτική της ελλειμματικής άρδευσης αποτελεί μια βιώσιμη πρόταση, καθώς επιτυγχάνεται μείωση της εφαρμοζόμενης άρδευσης χωρίς τη μείωση των αποδόσεων των φυτών. Στην περίπτωση που το εδαφικό νερό δεν επαρκεί παρατηρείται μείωση της ET<sub>c</sub> και ταυτόχρονη μείωση των αποδόσεων (Κωτούλας, 2010).

Στο σενάριο ελλειμματικής άρδευσης που εφαρμόστηκε στο παρόν μοντέλο επιλέχθηκε η μείωση της ποσότητας εφαρμοζόμενης άρδευσης κατά 30% ομοιόμορφα κατά τη διάρκεια του βιολογικού κύκλου των αρδευόμενων καλλιεργειών (βαμβάκι, αραβόσιτος, μηδική). Οι συνολικές ετήσιες δόσεις άρδευσης που διαμορφώθηκαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Η διάρθρωση των καλλιεργειών, η συνολική ετήσια δόση λίπανσης ανά καλλιέργεια καθώς και οι απώλειες αρδευτικού νερού δε διαφοροποιήθηκαν από τις αντίστοιχες του σεναρίου αναφοράς. Τέλος, τα υπόλοιπα στοιχεία του υδρολογικού κύκλου, τα οποία προσομοιώθηκαν στη λεκάνη απορροής

(έργα αποθήκευσης νερού, μεταφορές νερού), παρέμειναν όπως ορίστηκαν στο σενάριο αναφοράς.

Καλλιέργεια	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Συνολική ετήσια δόση άρδευσης (mm)	Ποσοστό απωλειών νερού άρδευσης	Συνολική ετήσια δόση λίπανσης (kg N/ha)
Βαμβάκι	996.43	399	0.25	195
Αραβόσιτος	362.02	434	0.25	214
Μηδική	194.05	518	0.25	0
Σιτάρι	2102.03	40	0.25	131

Πίνακας 12: Στοιχεία προσομοιωμένων καλλιεργειών της λεκάνης απορροής για το σενάριο ελλειμματικής άρδευσης

### 5.3 ΣΕΝΑΡΙΟ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΛΙΠΑΝΣΗΣ (REDUCED FERTILIZATION SCENARIO-RF)

Στο σενάριο μειωμένης λίπανσης που εφαρμόστηκε στο μοντέλο επιλέχθηκε η μείωση των εφαρμοζόμενων δόσεων λίπανσης κατά 30% για τις αρδευόμενες καλλιέργειες (βαμβάκι, αραβόσιτος, μηδική). Η διάρθρωση των καλλιεργειών, η συνολική ετήσια δόση άρδευσης ανά καλλιέργεια καθώς και οι απώλειες αρδευτικού νερού δε διαφοροποιήθηκαν από τις αντίστοιχες του σεναρίου αναφοράς. Τέλος, τα υπόλοιπα στοιχεία του υδρολογικού κύκλου, τα οποία προσομοιώθηκαν στη λεκάνη απορροής (έργα αποθήκευσης νερού, μεταφορές νερού), παρέμειναν όπως ορίστηκαν στο σενάριο αναφοράς.

Καλλιέργεια	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Συνολική ετήσια δόση άρδευσης (mm)	Ποσοστό απωλειών νερού άρδευσης	Συνολική ετήσια δόση λίπανσης (kg N/ha)
Βαμβάκι	996.43	570	0.25	136.5
Αραβόσιτος	362.02	620	0.25	149.8
Μηδική	194.05	740	0.25	0
Σιτάρι	2102.03	40	0.25	131

Πίνακας 13: Στοιχεία προσομοιωμένων καλλιεργειών της λεκάνης απορροής για το σενάριο μειωμένης λίπανσης

### 5.4 ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ (COMBINATION SCENARIO-DIRF)

Στο συνδυαστικό σενάριο προσομοιώθηκαν ταυτόχρονα εφαρμογή ελλειμματικής άρδευσης και μειωμένης λίπανσης για τις αρδευόμενες καλλιέργειες της περιοχής ενδιαφέροντος. Η διάρθρωση των καλλιεργειών καθώς και οι απώλειες αρδευτικού νερού δε διαφοροποιήθηκαν από τις αντίστοιχες του σεναρίου αναφοράς. Τέλος, τα υπόλοιπα στοιχεία του υδρολογικού κύκλου, τα οποία προσομοιώθηκαν στη λεκάνη απορροής (έργα αποθήκευσης νερού, μεταφορές νερού), παρέμειναν όπως ορίστηκαν στο σενάριο αναφοράς.

Καλλιέργεια	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Συνολική ετήσια δόση άρδευσης (mm)	Ποσοστό απωλειών νερού άρδευσης	Συνολική ετήσια δόση λίπανσης (kg N/ha)
Βαμβάκι	996.43	399	0.25	136.5
Αραβόσιτος	362.02	434	0.25	149.8
Μηδική	194.05	518	0.25	0
Σιτάρι	2102.03	40	0.25	131

Πίνακας 14: : Στοιχεία προσομοιωμένων καλλιεργειών της λεκάνης απορροής για το συνδυαστικό σενάριο

### 5.5 ΣΕΝΑΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ (PRECISION AGRICULTURE SCENARIO-PA)

Η γεωργία ακριβείας αποτελεί μια νέα μέθοδο γεωργικής πρακτικής με στόχο τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας των εισροών (άρδευτικό νερό, λίπανση, ζιζανιοκτόνα/φυτοφάρμακα) στο αγροτεμάχιο με ταυτόχρονη μείωση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων (Καρυδάς & Συλλαίος, 2000). Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές γεωργικές πρακτικές στις οποίες η μεταβλητότητα των εδαφολογικών συνθηκών, της γονιμότητας του εδάφους, της εδαφικής υγρασίας, των χαρακτηριστικών των φυτών καθώς και των πληθυσμών των ζιζανίων και των εντόμων μέσα σε ένα αγροτεμάχιο δε λαμβάνονταν υπόψη στον καθορισμό των εισροών σε αυτό, η γεωργία ακριβείας αξιοποιώντας νέες τεχνολογίες επιτυγχάνει την ανάγνωση των προαναφερθέντων χωρικών και χρονικών μεταβολών, των μεταβαλλόμενων αναγκών των καλλιεργειών και την αντίστοιχη μεταβολή των εισροών στο αγροτεμάχιο.

Πιο συγκεκριμένα με χρήση αισθητήρων στο αγροτεμάχιο, παγκοσμίων συστημάτων εντοπισμού θέσης (GPS), γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (GIS) και συστημάτων ελέγχου της εφαρμογής των εισροών το αγροτεμάχιο χωρίζεται σε μικρότερες ζώνες διαχείρισης οι οποίες παρουσιάζουν μια σχετική ομοιογένεια. Ο εντοπισμός αυτών των ζωνών διαχείρισης επιτρέπει την κατάλληλη διαχείριση των εισροών με στόχο την αύξηση της απόδοσης της παραγωγής, της βελτίωσης της ποιότητας των προϊόντων, τη βελτίωση της αποδοτικότητας των χρησιμοποιούμενων λιπασμάτων/φυτοφαρμάκων/ζιζανιοκτόνων, την εξοικονόμηση ενέργειας καθώς και την προστασία του εδάφους και των υδατικών πόρων (Ευαγγέλου & Τσαντίλας, 2010).

Στο μοντέλο SWAT η γεωργία ακριβείας εφαρμόστηκε απλοποιημένα για τις καλλιέργειες βαμβακιού σε επίπεδο HRU. Οι λειτουργίες άρδευσης και λίπανσης που είχαν οριστεί παραπάνω αντικαταστάθηκαν για το σενάριο αυτό από τις λειτουργίες αυτόματης άρδευσης (autoirrigation) και αυτόματης λίπανσης (autofertilization) αντίστοιχα. Το έλλειμμα εδαφικής υγρασίας για το οποίο ενεργοποιείται η λειτουργία της άρδευσης (AUTO\_WSTRS) ορίστηκε 100 mm, η μέγιστη εφαρμοζόμενη αρδευτική δόση (IRR\_MX) ορίστηκε 50 mm που αποδίδει την πραγματική διαθεσιμότητα νερού σε κάθε εφαρμογή, ενώ η αποδοτικότητα της άρδευσης (IRR\_EFF) διατηρήθηκε στα ίδια επίπεδα με τα υπόλοιπα σενάρια, στο 75% της εφαρμοζόμενης δόσης. Η λειτουργία της αυτόματης λίπανσης ενεργοποιείται όταν η ανάπτυξη των φυτών ανά

HRU (AUTO\_NSTRS) μειωθεί στο 95% της βέλτιστης σε κάθε χρονικό βήμα. Η μέγιστη δόση αζώτου για μία εφαρμογή (AUTO\_NAPP) ορίστηκε σε 20 kg/ha, ενώ το αντίστοιχο ανώτατο ετήσιο όριο (AUTO\_NYR) ορίστηκε 120 kg/ha.

Οι λειτουργίες άρδευσης και λίπανσης για τις υπόλοιπες καλλιέργειες (αραβόσιτος, μηδική) διατηρήθηκαν ίδιες με τις αντίστοιχες του σεναρίου αναφοράς. Παρομοίως, η διάρθρωση των καλλιεργειών, οι απώλειες αρδευτικού νερού καθώς και τα υπόλοιπα στοιχεία του υδρολογικού κύκλου, τα οποία προσομοιώθηκαν στη λεκάνη απορροής (έργα αποθήκευσης νερού, μεταφορές νερού), παρέμειναν όπως ορίστηκαν στο σενάριο αναφοράς.

Καλλιέργεια	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Συνολική ετήσια δόση άρδευσης (mm)	Ποσοστό απωλειών νερού άρδευσης	Συνολική ετήσια δόση λίπανσης (kg N/ha)
Βαμβάκι	996.43	αυτόματη	0.25	αυτόματη
Αραβόσιτος	362.02	620	0.25	214
Μηδική	194.05	740	0.25	0
Σιτάρι	2102.03	40	0.25	131

**Πίνακας 15: Στοιχεία προσομοιωμένων καλλιεργειών της λεκάνης απορροής για το σενάριο γεωργίας ακριβείας**

### 5.5 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

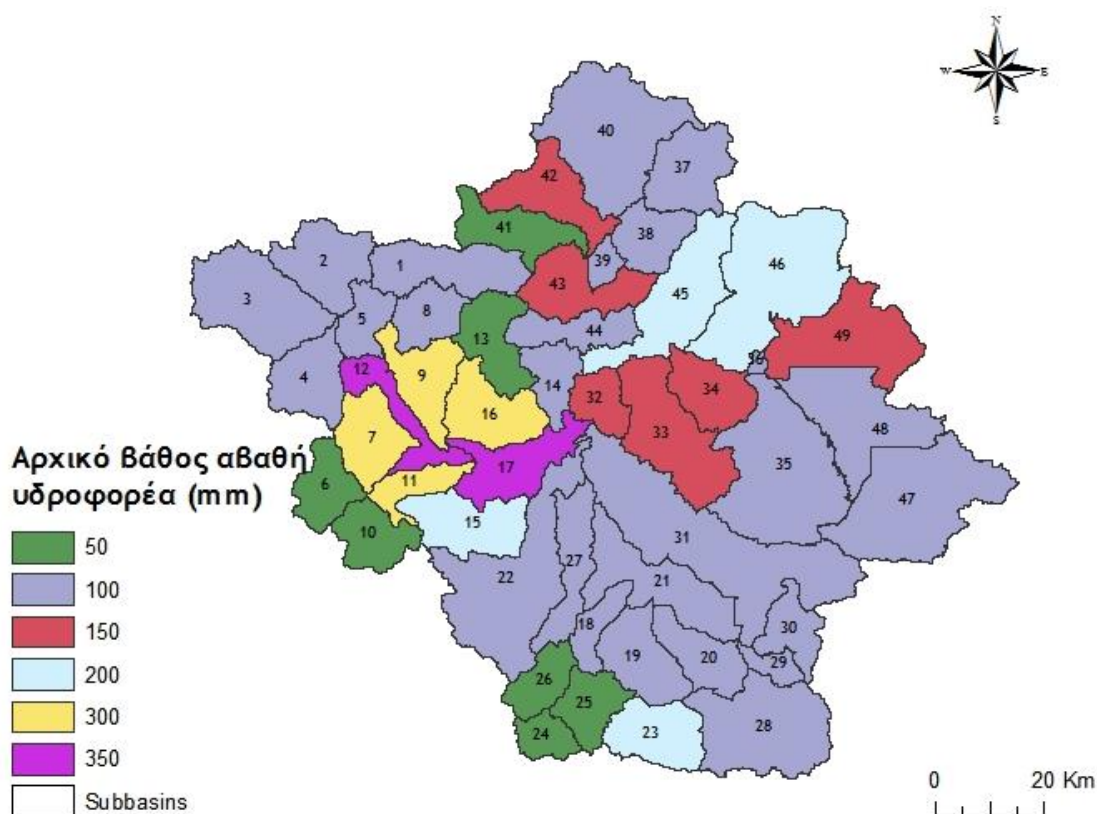
Τα παραπάνω σενάρια εκτελέστηκαν για εικοσαετή περίοδο με χρήση 2 χρόνων για τη θέρμανση του μοντέλου. Όσο αφορά τα μετεωρολογικά δεδομένα έγινε χρήση του μοντέλου WXGEN το οποίο υπάρχει ενσωματωμένο στο ArcSWAT και δίνει τη δυνατότητα γένεσης ή συμπλήρωσης μετεωρολογικών χρονοσειρών με βάση στατιστικές κατανομές και ιστορικές μέσες ετήσιες τιμές. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν οι πλέον πρόσφατες διαθέσιμες χρονοσειρές ημερήσιων μετρήσεων μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας και βροχομετρικά δεδομένα από το 1989 μέχρι το 2010.

Για όλα τα σενάρια το αρχικό βάθος νερού στον αβαθή υδροφορέα ορίστηκε 25000 mm ανά υπολεκάνη, ώστε να αντιπροσωπεύει τα συνολικά αποθέματα νερού στους υπόγειους υδροφορείς (βαθύς και αβαθής). Με τον τρόπο αυτό επιχειρείται να προσομοιωθεί η υφιστάμενη μη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων, αφού αντλούνται ποσότητες νερού και από τους ανανεώσιμους και τους μη ανανεώσιμους υδατικούς πόρους με στόχο την πλήρη κάλυψη των αρδευτικών αναγκών στη λεκάνη απορροής.

Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε δεύτερη εκτέλεση των σεναρίων με μεταβολή της παραμέτρου SHALLST που δηλώνει το αρχικό βάθος νερού στον αβαθή υδροφορέα. Επιλέχθηκε να δοθεί να διαφορετική τιμή της παραμέτρου SHALLST για κάθε υπολεκάνη με τις τιμές να κυμαίνονται μεταξύ 50 και 350 mm βάσει υδρογεωλογικών κριτηρίων. Σύμφωνα με τους Makropoulos & Mimikou, (2012) οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν τα ανανεώσιμα ετήσια αποθέματα νερού και χαρακτηρίζουν κάθε υπολεκάνη. Ο συνδυασμός των δύο αναλύσεων (βιώσιμη και μη βιώσιμη διαχείριση)

θα χρησιμοποιηθεί ως ένδειξη της δυνητικής χρήσης νερού από τα μόνιμα αποθέματα για την κάλυψη των αναγκών των φυτών.

Είναι φανερό ότι στην προσομοίωση βιώσιμης διαχείρισης οι νέες τιμές SHALLST δεν επαρκούν για να καλύψουν τις αρδευτικές ανάγκες πολλών υπολεκανών για τις μέσες υδρολογικά χρονιές. Αυτό εξαρτάται τόσο από τα διαθέσιμα υπόγεια αποθέματα όσο και από το ποσοστό κάλυψης από αρδευόμενες καλλιέργειες ανά υπολεκάνη.



Εικόνα 40: Αρχικό βάθος νερού στον αβαθή υδροφορέα για κάθε υπολεκάνη

## 5.7 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του μοντέλου για κάθε σενάριο εξήχθησαν σε μηνιαίο βήμα. Από τα αρχεία εξόδου που δημιουργήθηκαν για κάθε σενάριο τα παρακάτω χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων:

- Output.std: Αποτελεί ένα γενικευμένο αρχείο εξόδου το οποίο περιλαμβάνει μέσες τιμές για τα φορτία από τα HRU στους κλάδους διόδευσης. Συνοψίζει μέσες τιμές υπερετήσιες των υδρολογικών συνιστωσών για το σύνολο της λεκάνης (βροχόπτωση, εξατμισοδιαπνοή, απορροή, κατείδυση) και αποτελεί πρωταρχικό εργαλείο για την κατανόηση για το κερσαίο τμήμα του υδρολογικού κύκλου, του κύκλου των θρεπτικών και των φερτών.
- Output.hru: Περιλαμβάνει τα αποτελέσματα στην έξοδο κάθε HRU. Τα δεδομένα που παρέχει σχετίζονται τόσο με τον υδρολογικό κύκλο (βροχόπτωση, εξατμισοδιαπνοή, απορροή, κ.α.), με τους κύκλους των

θρεπτικών και των φερτών όσο και με τις διαχειριστικές πρακτικές που εφαρμόζονται στη λεκάνη (εφαρμογή αζώτου και φωσφόρου με μορφή λιπασμάτων, εφαρμοζόμενη άρδευση, απόδοση καλλιεργειών, παραγωγή βιομάζας κ.α.).

- Output.rch: Περιέχει τα αποτελέσματα για την είσοδο και την έξοδο κάθε κλάδου διόδευσης στη λεκάνη απορροής με μεγάλη χρησιμότητα στην ποιοτική προσομοίωση.

UNIT	SED PREC YIELD	NO3 SURQ	NO3 LATQ	NO3 GWQ PERC	PERCO NO3 LATE CROP	TILE Q ORGANIC	N SW SOLUBLE	P ET ORGANIC	PET
TIME	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
YIELD	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
TILENO3	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
(kg/ha)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	64.76	11.03	9.66	0.47	21.19	0.00	176.40	19.30	20.01
21.45	0.39	0.04	0.10	5.23	2.08	1.00	0.00	0.12	
0.00									
2	63.02	6.31	8.73	0.62	22.70	0.00	169.68	31.99	33.28
15.97	0.23	0.01	0.08	3.90	12.90	0.51	0.00	0.06	
0.00									
3	68.46	2.59	4.43	0.39	5.68	0.00	162.90	63.49	68.52
7.62	0.09	0.01	0.03	1.31	6.90	0.19	0.00	0.02	
0.00									
4	144.92	24.30	11.79	0.30	22.49	0.00	168.37	81.31	86.59
36.69	1.51	0.07	0.08	4.63	5.37	3.13	0.01	0.40	
0.00									
5	74.38	6.14	5.84	0.36	3.28	0.00	137.86	101.26	129.79
12.67	0.13	0.03	0.03	0.88	15.21	0.25	0.00	0.03	
0.00									
6	12.52	4.68	1.28	0.13	0.18	0.00	79.19	85.23	198.20
6.40	0.01	0.01	0.01	0.02	14.72	0.02	0.00	0.00	
0.00									
7	47.16	6.90	2.81	0.01	0.57	0.00	64.03	72.09	184.69
9.81	0.05	0.02	0.00	0.03	10.05	0.13	0.00	0.02	
0.00									
8	38.60	6.23	2.46	0.00	1.35	0.00	54.44	57.01	156.66
8.58	0.01	0.01	0.00	0.09	1.74	0.03	0.00	0.00	
0.00									

Εικόνα 41: Αρχείο εξόδου output.std

Με σκοπό να διερευνηθούν οι επιδράσεις των διαφορετικών σεναρίων στις συνιστώσες του WELF Nexus (νερό, ενέργεια, γη και τροφή) ορίζονται δείκτες για κάθε συνιστώσα και παρακολουθείται η μεταβολή της τιμής τους από σενάριο σε σενάριο. Συνοπτικοί πίνακες των αποτελεσμάτων για κάθε σενάριο παρατίθενται στη συνέχεια, ενώ αναλυτικότεροι πίνακες έχουν συμπεριληφθεί στο παράρτημα.

### 5.7.1 Επιπτώσεις σεναρίων στον τομέα του Νερού

Αρχικά διερευνάται η επίδραση της μεταβολής της άρδευσης και της λίπανσης κάθε σεναρίου στα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού στη λεκάνη απορροής, ενώ υπολογίζεται και ο δείκτης υδατικής εκμετάλλευσης (Water Exploitation Index).

Στον πίνακα 16 παρουσιάζονται οι μέσες ετήσιες απολήψεις άρδευσης, η μέση ετήσια ποσότητα αναπλήρωσης των υπόγειων υδροφορέων καθώς και οι μέσες ετήσιες απολήψεις άρδευσης από τους υπόγειους υδροφορείς. Από την εκτέλεση των σεναρίων με περιορισμένα αρχικά αποθέματα στον αβαθή υδροφορέα (βιώσιμη

διαχείριση) προκύπτει η μέγιστη δυνατή ποσότητα άντλησης από τα ανανεώσιμα αποθέματα. Ακολουθώντας, υπολογίζονται τα ποσοστά των αρδευτικών αντλήσεων που αντιστοιχούν στα μόνιμα και τα ανανεώσιμα αποθέματα για τις προσομοιώσεις σεναρίων με την υφιστάμενη μη βιώσιμη διαχείριση υδατικών πόρων. Τέλος, στον πίνακα περιλαμβάνεται και υπολογισμός της αξίας των ετήσιων απολήψεων για αρδευτικό νερό σε εκατομμύρια € ο οποίος έγινε με χρήση του μέσου σταθμισμένου χρηματοοικονομικού κόστους για την άρδευση του Υδατικού Διαμέρισματος Θεσσαλίας ίσο με 0.067 €/m<sup>3</sup> (Κοινοπραξία Διαχείρισης Υδάτων Θεσσαλίας, Ηπείρου και Δυτικής Στερεάς Ελλάδας, 2014).

Εξεταζόμενες μεταβλητές	REF-Σενάριο αναφοράς	DI-Σενάριο ελλειμματικής άρδευσης	RF-Σενάριο περιορισμένης λίπανσης	DIRF-Συνδυαστικό σενάριο	PA-Σενάριο γεωργίας ακριβείας
<b>Μη βιώσιμη διαχείριση</b>					
Μέσες ετήσιες απολήψεις άρδευσης από επιφανειακά και υπόγεια (hm <sup>3</sup> )	1020.9	740.1	1020.9	740.1	1048.9
Αξία ετήσιου αρδευτικού νερού (εκατομμύρια €)	51.3	37.2	51.3	37.2	52.7
Μέση ετήσια ποσότητα αναπλήρωσης υπόγειου υδροφορέα (hm <sup>3</sup> )	961.5	914.0	960.3	914.1	970.1
Μέσες ετήσιες απολήψεις άρδευσης από τον υπόγειο υδροφορέα (hm <sup>3</sup> )	832.2	608.0	832.2	608.0	853.8
<b>Βιώσιμη διαχείριση</b>					
Μέσες ετήσιες απολήψεις άρδευσης από τον υπόγειο υδροφορέα (hm <sup>3</sup> )	427.1	378.2	427.1	376.7	645.1
Ποσοστό ανανεώσιμων-μόνιμων (%)	51.3-48.7	62.2-37.8	51.3-48.7	62.0-38.0	75.6-24.4

**Πίνακας 16: Επιπτώσεις σεναρίων γεωργικών πρακτικών στο Νερό**

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτουν οι εξής διαπιστώσεις:

- Η ποσότητα νερού που κατεισδύει κάτω από την εδαφική στρώση μειώνεται με τη μείωση της εφαρμοζόμενης άρδευσης.



- Η μείωση των ετήσιων αρδευτικών απολήψεων στα σενάρια DI και DIRF είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μείωση της ετήσιας ποσότητας αναπλήρωσης των υπόγειων υδροφορέων. Συνεπώς, στα σενάρια αυτά υπάρχει μεγαλύτερη ποσότητα ανεκμετάλλετου υδατικού δυναμικού.
- Η εφαρμογή των πρακτικών PA οδηγεί σε αύξηση των συνολικών αρδευτικών απολήψεων κατά 2.8% σε σχέση με το σενάριο αναφοράς.
- Το ποσοστό των αρδευτικών απολήψεων που αντιστοιχούν στα ανανεώσιμα αποθέματα για τα σενάρια DI και DIRF είναι 62% έναντι 51.3% στα σενάρια REF και RF.
- Παρόλο που το σενάριο PA χαρακτηρίζεται από τις υψηλότερες ετήσιες αντλήσεις αρδευτικού νερού, το ποσοστό που προέρχεται από τα μόνιμα αποθέματα περιορίζεται σε 24.4%. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει τη δυνατότητα καλύτερης κατανομής και εκμετάλλευσης του διαθέσιμου αρδευτικού νερού σε κάθε βήμα της προσομοίωσης μεταξύ των HRUs κάθε υπολεκάνης υπό συνθήκες αυτόματης άρδευσης που οδηγεί σε καλύτερη εκμετάλλευση των διαθέσιμων ανανεώσιμων αποθεμάτων, η οποία δεν περιορίζεται τους καλλιέργειες βαμβακιού όπου υπάρχει εφαρμογή τους γεωργίας ακριβείας, αλλά επηρεάζει τους την ίδια κατεύθυνση και τους υπόλοιπες καλλιέργειες.

Ο δείκτης εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων (Water Exploitation Index - WEI) χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ανθρωπογενούς πίεσης τους υδατικούς πόρους και την αναγνώριση των περιοχών που είναι ευάλωτες σε λειψυδρία και ξηρασία. Ο WEI αρχικά ορίστηκε ως ο λόγος των ετήσιων υδατικών απολήψεων τους τα διαθέσιμα υδατικά αποθέματα γλυκού νερού σε επίπεδο χώρας εκφρασμένος ως ποσοστό, ωστόσο τόσο ο τρόπος υπολογισμού του όσο και η χρονική και τοπική κλίμακα στην οποία αναφέρεται έχουν υπάρξει θέματα διαβουλεύσεων, που οδήγησε στη διαμόρφωση του δείκτη WEI+ (Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος, 2013).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία υπολογίζεται μια απλοποιημένη μορφή του δείκτη εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων (WEI simplified), έτσι ώστε να συμβαδίζει με την παραμετροποίηση του SWAT. Ειδικότερα, ο δείκτης ορίζεται ως ο λόγος των συνολικών ετήσιων απολήψεων ύδατος στη λεκάνη απορροής τους τη συνολική ετήσια διαθεσιμότητα νερού στην ίδια περιοχή:

$$WEI_{\text{simpl}} = \frac{\text{συνολικές ετήσιες απολήψεις ύδατος}}{\text{συνολική ετήσια διαθεσιμότητα νερού}}$$

Η συνολική ετήσια ποσότητα απολήψεων υπολογίζεται από τους συνολικές ετήσιες αρδευτικές απολήψεις με την παραδοχή ότι αποτελούν το 92% των συνολικών απολήψεων στην περιοχή μελέτης, δηλαδή δεν περιλαμβάνουν την αστική και βιομηχανική χρήση. Η συνολική ετήσια διαθεσιμότητα αποτελεί το άθροισμα τους τεχνητής και φυσικής διαθεσιμότητας, δηλαδή τους ετήσιας ποσότητας αναπλήρωσης του αβαθή υδροφορέα και του ωφέλιμου όγκου του ταμιευτήρα Σμοκόβου, ενώ δεν συμπεριελήφθησαν οι εισροές νερού στη λεκάνη από τον ταμιευτήρα του Πλαστήρα, που αποτελεί εξωτερική πηγή σε σχέση με τη λεκάνη.

Το όριο τιμής του δείκτη WEI το οποίο διακρίνει την αποδεκτή από τη μη αποδεκτή πίεση τους υδατικούς πόρους μιας περιοχής έχει οριστεί 20% ενώ, τιμές του WEI που

υπερβαίνουν το 40% καταδεικνύουν έντονη υδατική πίεση και εκμετάλλευση των υδατικών πόρων εκτός των ορίων βιωσιμότητας (Werner, et al., 2012).

Εξεταζόμενες μεταβλητές	REF-Σενάριο αναφοράς	DI-Σενάριο ελλειμματικής άρδευσης	RF-Σενάριο περιορισμένης λίπανσης	DIRF-Συνδυαστικό σενάριο	PA-Σενάριο γεωργίας ακριβείας
Συνολικές ετήσιες απολήψεις νερού (hm <sup>3</sup> )	1109.7	804.5	1109.7	804.5	1140.1
Φυσική διαθεσιμότητα (hm <sup>3</sup> )	961.5	914.0	960.3	914.1	970.1
Τεχνητή διαθεσιμότητα (hm <sup>3</sup> )	240.0	240.0	240.0	240.0	240.0
WEI απλοποιημένος	0.92	0.70	0.92	0.70	0.94

**Πίνακας 17: Επιπτώσεις σεναρίων γεωργικών πρακτικών στο Νερό - υπολογισμός απλοποιημένου δείκτη WEI**

Από τον πίνακα 17 εξάγονται τα παρακάτω:

- Σε τρία από τα πέντε σενάρια που εξετάστηκαν συμπεριλαμβανομένου Η μείωση κατά 30% των ετήσιων εφαρμοζόμενων αρδευτικών δόσεων στα σενάρια DI και DIRF οδηγεί σε μείωση των συνολικών απολήψεων νερού κατά 27.5%. Τους προαναφέρθηκε στον υπολογισμό του μεγέθους των ετήσιων απολήψεων νερού στη λεκάνη απορροής περιλαμβάνονται εκτός των αρδευτικών απολήψεων για τους αρδευόμενες καλλιέργειες και οι αρδευτικές δόσεις που εφαρμόζονται σε μη αρδευόμενες καλλιέργειες (σιτάρι) καθώς και η αστική και βιομηχανική χρήση του νερού.
- και του σεναρίου αναφοράς η τιμή του απλοποιημένου δείκτη WEI προσεγγίζει τη μονάδα υποδηλώνοντας εκμετάλλευση του συνόλου των ετήσια διαθέσιμων αποθεμάτων.
- Ακόμα και στα σενάρια στα οποία γίνεται περιορισμός της αρδευτικής ζήτησης (DI και DIRF) παρόλο που η τιμή του δείκτη WEI μειώνεται σημαντικά, η πίεση του υδατικού πόρου παραμένει σε κρίσιμο επίπεδο (>40%). Η λεκάνη υφίσταται πολύ υψηλή πίεση απολήψεων, η διαχείριση επιβεβαιώνεται ότι είναι μη βιώσιμη και υφίσταται κίνδυνος λειψυδρίας-ξηρασίας.

Για την αποτίμηση των επιπτώσεων των διαφορετικών γεωργικών πρακτικών στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των υδατικών πόρων παρουσιάζονται στον πίνακα 19 η μέση ετήσια ποσότητα εφαρμοζόμενου N τους καλλιεργούμενες εκτάσεις τους λεκάνης απορροής καθώς και το μέσο ετήσιο φορτίο NO<sub>3</sub>, το οποίο κατεισδύει ετησίως κάτω από την εδαφική στρώση. Για τον υπολογισμό της αξίας της μέσης ετήσιας εφαρμοζόμενης λίπανσης λήφθηκε ενδεικτικό κόστος εφαρμογής λίπανσης 1.3 €/kg N (Makropoulos & Mimikou, 2012).

Εξεταζόμενες μεταβλητές	REF-Σενάριο αναφοράς	DI-Σενάριο ελλειμματικής άρδευσης	RF-Σενάριο περιορισμένης λίπανσης	DIRF-Συνδυαστικό σενάριο	PA-Σενάριο γεωργίας ακριβείας
Μέση ετήσια ποσότητα εφαρμοζόμενου N στη λεκάνη (tn)	55,538.09	55,538.09	47,215.62	47,215.62	49,017.59
Αξία μέσης ετήσιας εφαρμοζόμενης λίπανσης (εκ. €)	72.2	72.2	61.4	61.4	63.7
Μέσο ετήσιο φορτίο NO <sub>3</sub> κατεισδύον κάτω από το εδαφικό προφίλ (kg/ha)	24.22	23.64	18.22	17.94	14.28

**Πίνακας 18: Επιπτώσεις σεναρίων γεωργικών πρακτικών στο Νερό - εφαρμογή και κατεισδυση αζώτου**

Εξάγονται τα εξής:

- Είναι σαφές ότι η εφαρμογή τους γεωργίας ακριβείας επιτυγχάνει σημαντική μείωση τους εφαρμοζόμενης λίπανσης τους καλλιέργειες βαμβακιού, που οδηγεί σε μείωση κατά 12% τους μέσης ετήσιας ποσότητας εφαρμοζόμενου αζώτου για τη συνολική καλλιεργούμενη έκταση τους λεκάνης συγκριτικά με το αντίστοιχο μέγεθος για το σενάριο REF.
- Για το σενάριο DIRF και το σενάριο RF ο περιορισμός τους εφαρμοζόμενης λίπανσης κατά 30% τους αρδευόμενες καλλιέργειες συγκριτικά με τους συμβατικές γεωργικές πρακτικές του σεναρίου REF μεταφράζεται σε μείωση 15%, όταν τους υπολογισμούς συμπεριληφθεί και η λιπαντική αγωγή των καλλιεργειών σιταριού στη λεκάνη απορροής.
- Το μέγεθος του ανηγμένου φορτίου NO<sub>3</sub>, το οποίο κατεισδύει κάτω από την εδαφική στρώση, φαίνεται να επηρεάζεται από τη μείωση στην ποσότητα τους εφαρμοζόμενης λίπανσης αζώτου και σε μικρότερο βαθμό από τη μείωση στην ποσότητα τους εφαρμοζόμενης άρδευσης.
- Η μεγαλύτερη μείωση στα προαναφερθέντα ετήσια φορτία NO<sub>3</sub> παρατηρείται στο σενάριο PA, όπου τα κατεισδύοντα φορτία νιτρικών είναι μειωμένα κατά 41% σε σχέση με το σενάριο REF. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει σημαντική άυξη τους αποδοτικότητας τους λίπανσης για το σενάριο αυτό.

Ανάλογα με το κριτήριο που θα επιλεγεί, διαφορετικό σενάριο έχει βέλτιστη απόδοση. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας τα προαναφερθέντα υπόψη προκύπτει ότι όσον αφορά τους επιπτώσεις εφαρμογής των σεναρίων γεωργικών πρακτικών στον τομέα του νερού:

- Με κριτήριο την καλύτερη αξιοποίηση των ανανεώσιμων αποθεμάτων και την ελάχιστη εκμετάλλευση των μόνιμων αποθεμάτων των υπόγειων υδροφορέων καλύτερη απόδοση έχει το σενάριο PA.
- Τα σενάρια DI και DIRF αποτελούν τα πλέον συμφέροντα αν εξεταστεί η τιμή του απλοποιημένου δείκτη WEI.

- Τέλος, η ποσότητα NO<sub>3</sub> που κατεισδύει κάτω από το εδαφικό προφίλ στο σενάριο PA είναι η πιο μειωμένη. Συνεπώς, η PA προκαλεί ηπιότερες επιπτώσεις στα υπόγεια ύδατα συγκριτικά με τα υπόλοιπα σενάρια.

### 5.7.2 Επιπτώσεις σεναρίων στον τομέα τους Ενέργειας

Όσον αφορά τον τομέα τους ενέργειας διερευνάται η επίδραση κάθε σεναρίου στην παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μέσα στη λεκάνη απορροής. Η παραγωγή περιλαμβάνει την παραγωγή βιοαιθανόλης καθώς και την υδροηλεκτρική αξιοποίηση του νερού που διατίθεται από τους ταμιευτήρες Σμοκόβου και Πλαστήρα για αρδευτική ή υδρευτική χρήση. Αντίθετα, η άντληση ποσοτήτων νερού για αρδευτική χρήση υπολογίζεται ως η κύρια καταναλωτική χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα γίνονται οι εξής παραδοχές:

- Επιλέγεται η παραγωγή βιοαιθανόλης 2<sup>ης</sup> γενιάς στη λεκάνη απορροής χωρίς αξιοποίηση του καρπού αραβοσίτου παρά με αξιοποίηση των λιγνοκυτταρινούχων υπολειμμάτων τους συγκομιδής. Καθώς δεν είναι δυνατή ή οικονομικά συμφέρουσα η συλλογή του συνόλου των υπολειμμάτων τους καρποδοτικής καλλιέργειας, μόνο το 30% εξ αυτών αξιοποιείται τελικά για την παραγωγή βιοαιθανόλης με βαθμό απόδοσης σε βιοκαύσιμό 0.5 l βιοαιθανόλης ανά kg υπολειμμάτων (biofuels.gr, 2016). Η μέση πυκνότητα τους παραγόμενης βιοαιθανόλης είναι 0.79 kg/l σε θερμοκρασία 20 °C (European Biofuels Technology Platform, 2016), ενώ η εμπορική τιμή τους βιοαιθανόλης λήφθηκε 500 €/ton (European Biomass Industry Association, 2016).
- Για τον υπολογισμό τους παραγόμενης υδροηλεκτρικής ενέργειας από τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς Σμοκόβου και Πλαστήρα χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις

$$P = q * \rho * g * h * n / (3.6 * 10^6) \text{ και } E = P * t$$

(Στάμου, 2009), όπου P η ισχύς (kW), q η παροχή (m<sup>3</sup>/h), ρ η πυκνότητα νερού (1000 kg/m<sup>3</sup>), g η επιτάχυνση βαρύτητας (9.81 m/s<sup>2</sup>), h το ύψος υδατόπτωσης (m) και n ο συνολικός βαθμός απόδοσης. Τους, όπου E η παραγόμενη ενέργεια (kWh) και t ο χρόνος λειτουργίας (h). Με την παραδοχή δωρης καθημερινής λειτουργίας των υδροηλεκτρικών σταθμών για τη διοχέτευση αρδευτικού και υδρευτικού νερού υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες μέσες μηνιαίες παροχές και ακολούθως η μέση μηνιαία και ετήσια παραγόμενη ενέργεια των υ/η σταθμών Σμοκόβου και Πλαστήρα. Τα ύψη υδατόπτωσης λήφθηκαν 65 m για το σταθμό Σμοκόβου και 577 m για το σταθμό Πλαστήρα, ενώ ο συνολικός βαθμός απόδοσης 85%.

- Αντίστοιχα για τον υπολογισμό τους απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία των αρδευτικών γεωτρήσεων στη λεκάνη απορροής χρησιμοποιήθηκαν οι τύποι:

$$P = q * \rho * g * h / (n * 3.6 * 10^6) \text{ και } E = P * t$$

(Στάμου, 2009), όπου P η ισχύς (kW), q η παροχή (m<sup>3</sup>/h), ρ η πυκνότητα νερού (1000 kg/m<sup>3</sup>), g η επιτάχυνση βαρύτητας (9.81 m/s<sup>2</sup>), h το ύψος άντληση (m) και n ο συνολικός βαθμός απόδοσης. Επίσης όπου E η απαιτούμενη ενέργεια (kWh) και t ο χρόνος λειτουργίας (h). Εδώ οι μέσες

μηνιαίες παροχές υπολογίστηκαν με χρήση των μέσων μηνιαίων ποσοτήτων αρδευτικού νερού για το σύνολο τους λεκάνης απορροής με παραδοχή 8ωρης λειτουργίας των γεωτρήσεων 20 ημέρες ανά μήνα για τους μήνες που υπάρχουν αρδευτικές ανάγκες. Θεωρήθηκε μέσο ύψος άντλησης τα 200 m και βαθμός απόδοσης 0.80. Ακολούθως υπολογίστηκε η μέση ετήσια ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται για την άντληση αρδευτικού νερού.

- Από το αγροτικό και οικιακό τιμολόγια τους Δ.Ε.Η. λήφθησαν πληροφορίες για την τιμολόγηση του αγροτικού και οικιακού ρεύματος αντίστοιχα, οι οποίες αξιοποιήθηκαν για τον υπολογισμό τους αξίας τους ισοδύναμης ηλεκτρικής κατανάλωσης (0.10252 €/kWh) για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και το κόστος τους ενέργειας που καταναλώνεται από τους αρδευτικές γεωτρήσεις (0.6412 €/kWh).

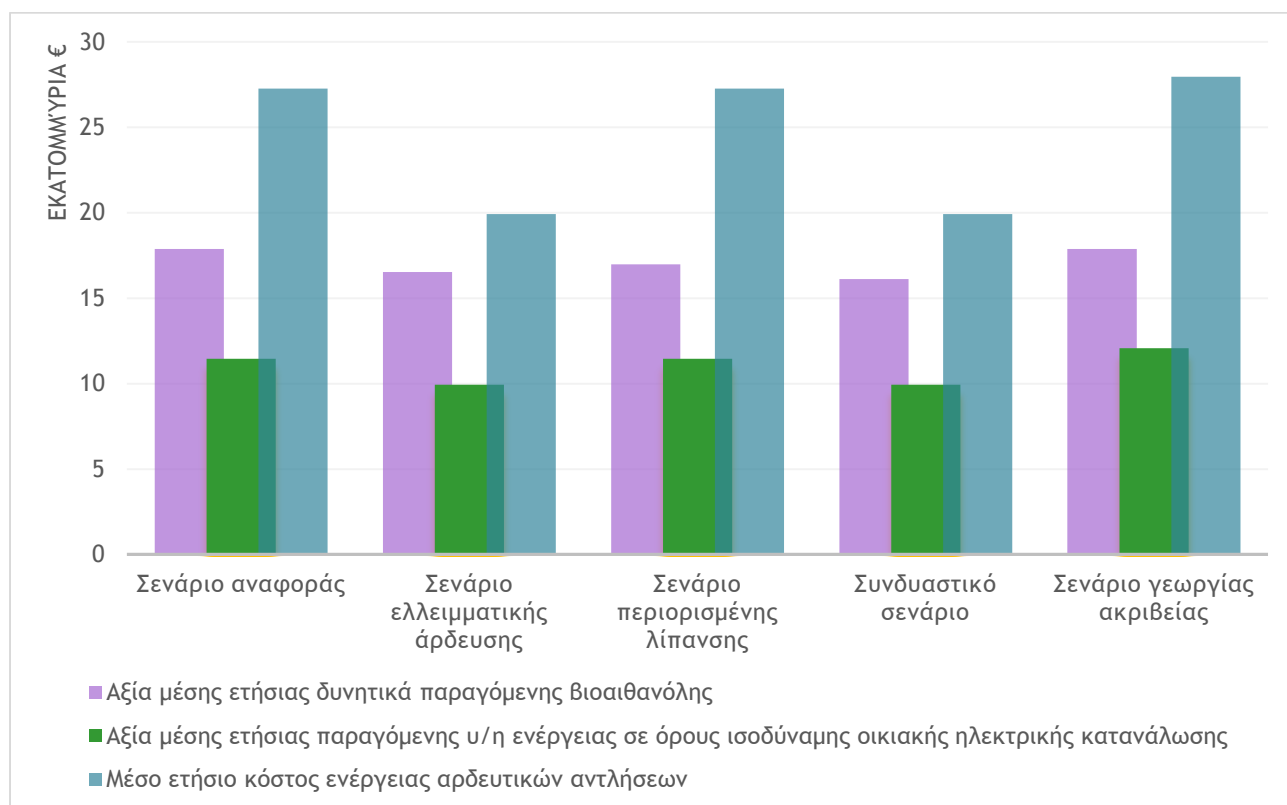
Στον πίνακα 19 παρατίθενται τα κύρια οικονομικά μεγέθη που αφορούν την εν δυνάμει παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας στη λεκάνη απορροής σύμφωνα με τους παραδοχές που ορίστηκαν. Υπολογίζεται επιπρόσθετα η συνολική αξία ενεργειακής κατανάλωσης παραγωγής ως διαφορά τους αξίας τους καταναλώμενης ενέργειας από την αξία τους παραγόμενης ενέργειας.

Εξεταζόμενες μεταβλητές	REF-Σενάριο αναφοράς	DI-Σενάριο ελλειμματικής άρδευσης	RF-Σενάριο περιορισμένης λίπανσης	DIRF-Συνδυαστικό σενάριο	PA-Σενάριο γεωργίας ακριβείας
<b>Παραγωγή ενέργειας</b>					
Αξία δυνητικά παραγόμενης βιοαιθανόλης (εκατομμύρια €)	17.9	16.5	17.0	16.1	17.9
Αξία υδροηλεκτρικής παραγωγής σε όρους ισοδύναμης οικιακής ηλεκτρικής κατανάλωσης (εκατομμύρια €)	11.5	10.0	11.5	10.0	12.1
<b>Κατανάλωση ενέργειας</b>					
Κόστος ενέργειας αρδευτικών αντλήσεων (εκατομμύρια €)	27.3	20.0	27.3	20.0	28.0
Συνολική καθαρή αξία ενεργειακής κατανάλωσης/ παραγωγής (εκ. €)	2.1	6.5	1.2	6.1	2.0

**Πίνακας 19: Επιπτώσεις σεναρίων γεωργικών πρακτικών στην Ενέργεια**

Από τον πίνακα 19 διαπιστώνονται τα εξής:

- Στα σενάρια DI και DIRF, όπου απαιτούνται λιγότερες αντλήσεις νερού, παρατηρείται το μεγαλύτερο πλεόνασμα παραγόμενης ενέργειας.
- Το σενάριο PA παρουσιάζει το μεγαλύτερο κόστος ενέργειας άντλησης νερού, ενώ η αξία τους παραγόμενης βιοαιθανόλης είναι ίση με αυτή του σεναρίου αναφοράς καθώς οι πρακτικές που εφαρμόζονται τους καλλιέργειες αραβόσιτου στα δύο σενάρια είναι κοινές.



Εικόνα 42: Μέση ετήσια αξία και κόστος παραγόμενης και καταναλωμένης ενέργειας στη λεκάνη απορροής του ποταμού Πηνειού για τα διαφορετικά σενάρια

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι όσον αφορά τους επιπτώσεις εφαρμογής των σεναρίων γεωργικών πρακτικών στον τομέα τους ενεργειας:

- Με κριτήριο τη συνολική καθαρή αξία ενεργειακής κατανάλωσης/παραγωγής, το σενάριο DI αποτελεί το βέλτιστο σενάριο.

### 5.7.3 Επιπτώσεις σεναρίων στον τομέα τους Γης

Για τη διερεύνηση τους επίδρασης εφαρμογής διαφορετικών αρδευτικών και λιπαντικών πρακτικών στον τομέα τους γης (έδαφος) υπολογίζεται το μέσο ετήσιο φορτίο φερτών στην έξοδο του ποταμού καθώς και η μέση ετήσια ένταση διάβρωσης στη λεκάνη απορροής, δηλαδή η συνολική ανηγμένη ποσότητα φερτών, η οποία εγκαταλείπει τα HRU κατά τη διάρκεια τους προσομοίωσης.

Εξεταζόμενες μεταβλητές	REF-Σενάριο αναφοράς	DI-Σενάριο ελλειμματικής άρδευσης	RF-Σενάριο περιορισμένης λίπανσης	DIRF-Συνδυαστικό σενάριο	PA-Σενάριο γεωργίας ακριβείας
Μέσο ετήσιο φορτίο φερτών στην έξοδο (tn)	434,016.84	426,422.45	433,788.93	426,267.20	431,755.81
Μέση ετήσια ένταση διάβρωσης (tn/ha)	1.350	1.336	1.350	1.336	1.344

Πίνακας 20: Επιπτώσεις σεναρίων γεωργικών πρακτικών στη Γη

Από τα στοιχεία του πίνακα 20 προκύπτουν τα εξής:

- Γενικά δεν παρατηρούνται έντονες μεταβολές μεταξύ των σεναρίων όσον αφορά το μέσο ετήσιο φορτίο φερτών στην έξοδο τους λεκάνης ή τη μέση ένταση διάβρωσης, καθώς οι γεωργικές πρακτικές δεν εστίαζαν ιδιαίτερα στον τομέα του εδάφους.
- Στα σενάρια RF και REF παρατηρούνται τόσο τα μέγιστα μέσα ετήσια φορτία φερτών στην έξοδο όσο και η μέγιστη ένταση διάβρωσης στη λεκάνη, γεγονός που κατά κύριο λόγο οφείλεται τους υψηλές τιμές επιφανειακής απορροής που εμφανίζονται σε αυτά τα σενάρια. Οι γεωργικές πρακτικές αναμένεται να περιορίσουν σχετικά το φαινόμενο της διάβρωσης.
- Παρόλο που το σενάριο PA χαρακτηρίζεται από τους υψηλότερες απολήψεις νερού συγκριτικά με τα υπόλοιπα σενάρια, τόσο η ετήσια ένταση διάβρωσης όσο και το μέσο ετήσιο φορτίο φερτών είναι μειωμένα συγκριτικά με το σενάριο REF λόγω της μειωμένης επιφανειακής απορροής που παρατηρείται στο σενάριο αυτό.

Συνοπτικά από τα παραπάνω προκύπτει ότι όσον αφορά τους επιπτώσεις εφαρμογής των σεναρίων γεωργικών πρακτικών στον τομέα της γης:

- Με κριτήριο τη μέση ετήσια ένταση διάβρωσης στη λεκάνη απορροής, τα σενάρια DI και DIRF αποτελούν τα βέλτιστα σενάρια.

#### 5.7.4 Επιπτώσεις σεναρίων στον τομέα της Τροφής (Αγροτικής παραγωγής)

Αναφορικά με τους επιδράσεις των γεωργικών σεναρίων στον τομέα της τροφής, έγινε η παραδοχή συμπερίληψης σε αυτόν όχι μόνο των καλλιεργειών που παράγουν καρπό για βρώση από ανθρώπους (σιτάρι, αραβόσιτος) αλλά και των κτηνοτροφικών φυτών (αραβόσιτος, μηδική) καθώς και των βιομηχανικών φυτών (βαμβάκι), που αποδίδουν το μεγαλύτερο μέρος της γεωργικής παραγωγής στην Θεσσαλική πεδιάδα. Συνεπώς, στη συνέχεια έγινε ο υπολογισμός της αξίας παραγωγής ανά καλλιέργεια σύμφωνα με τους μέσους ετήσιους αποδόσεις που ποέκυψαν ως αποτέλεσμα εξόδου του λογισμικού SWAT, και την έκταση κάθε καλλιέργειας στη λεκάνη απορροής. Λήφθηκαν οι πιο πρόσφατες διεθνείς τιμές εμπορευμάτων 0.43 €/kg για το σύσπορο βαμβάκι (Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε, 2016), 0.20 €/kg για τον αραβόσιτο (Eurostat, 2016), 0.18 €/kg για τη συμβατική μηδική και 0.22 €/kg για το σιτάρι (Eurostat, 2016). Η αξία της μέσης ετήσιας γεωργικής παραγωγής προκύπτει αθροίζοντας τους αξίες παραγωγής των επιμέρους καλλιεργειών.

Εξεταζόμενες μεταβλητές		REF-Σενάριο αναφοράς	DI-Σενάριο ελλειμματικής άρδευσης	RF-Σενάριο περιορισμένης λίπανσης	DIRF-Συνδυαστικό σενάριο	PA-Σενάριο γεωργίας ακριβείας
Απόδοση καλλιεργειών (tn/ha)	Αραβόσιτος	11.50	10.53	10.92	10.27	11.50
	Μηδική	10.32	9.54	10.32	9.54	10.32
	Σιτάρι	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40
	Βαμβάκι	3.04	2.72	3.04	2.72	3.12
Αξία μέσης ετήσιας γεωργικής παραγωγής (εκατομμύρια €)		406.5	383.2	402.3	381.2	410.3

**Πίνακας 21: Επιπτώσεις σεναρίων γεωργικών πρακτικών στην Τροφή (Αγροτική παραγωγή)**

Από τον πίνακα 21 εξάγονται τα εξής:

- Η απόδοση των καλλιεργειών σιταριού δε διαφέρει σε κανένα σενάριο από αυτήν του σεναρίου REF, καθώς οι αρδευτικές και λιπαντικές πρακτικές του δεν μεταβάλλονται.
- Η απόδοση τους καλλιέργειας μηδικής μειώνεται με τη μείωση τους εφαρμοζόμενης άρδευσης, αλλά δεν επηρεάζεται από τη μείωση τους λίπανσης, καθώς το φυτό εξασφαλίζει την κάλυψη των αναγκών του σε άζωτο μέσω τους δέσμευσης ικανών ποσοτήτων ατμοσφαιρικού αζώτου από αζωτοβακτηρίδια.
- Αναφορικά με τους αποδόσεις βαμβακιού και αραβοσίτου παρατηρείται ότι η μείωση που επιτυγχάνεται με εφαρμογή ελλειμματικής άρδευσης είναι μεγαλύτερη από τη μείωση που επιφέρεται λόγω ελάττωσης τους λίπανσης.
- Ειδικότερα για την καλλιέργεια βαμβακιού η μείωση λόγω ελάττωσης τους λίπανσης κατά 30% είναι μηδενική, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε ανθεκτικότητα του ίδιου του φυτού είτε σε επικράτηση υπέρμετρης λίπανσης τους συμβατικές γεωργικές πρακτικές.
- Τέλος, με εφαρμογή του σεναρίου γεωργίας ακριβείας η απόδοση του βαμβακιού αυξάνεται αισθητά κατά 80 kg/ha. Το γεγονός αυτό αντικατοπτρίζεται στη συνολική αξία γεωργικής παραγωγής με το σενάριο PA να αποδίδει 3.8 εκατομμύρια € παραπάνω από το σενάριο REF.

Συνοπτικά από τα παραπάνω προκύπτει ότι όσον αφορά τους επιπτώσεις εφαρμογής των σεναρίων γεωργικών πρακτικών στον τομέα τους τροφής-αγροτικής παραγωγής:

- Με κριτήριο την αξία τους μέσης ετήσιας γεωργικής παραγωγής, το σενάριο PA αποτελεί το πλέον αποδοτικό σενάριο.

#### 5.7.6 Σύνοψη επιπτώσεων σεναρίων σε όλους τους τομείς (NEXUS)

Για την εποπτική εξέταση των αποτελεσμάτων και τη διάκριση των δυναμικών σχέσεων μεταξύ των διαφορετικών τομέων του WELF Nexus παρουσιάζεται πίνακας με συνοπτικά αποτελέσματα για τους κατηγορίες νερό, ενέργεια, γη και τροφή. Επιλέχθηκε να παρουσιαστεί τουλάχιστον ένας δείκτης ανά τομέα από τους πίνακες 16 έως 21.



Οι τιμές των δεικτών που επιλέχθηκαν για να παρουσιάσουν τους επιπτώσεις των πέντε σεναρίων γεωργικών πρακτικών τους τέσσερις τομείς του νερού, τους γης τους τροφής και τους ενέργειας υπέστησαν κανονικοποίηση και παρουσιάζονται σε αραχνοειδή γραφήματα. Οι τιμές των δεικτών για το σενάριο αναφοράς έλαβαν την τιμή 100 ενώ οι τιμές των δεικτών για τα υπόλοιπα σενάρια εκφράστηκαν σαν ποσοστό τους αντίστοιχης τιμής για το σενάριο αναφοράς με τέτοιο τρόπο ώστε η αύξηση στο γράφημα να συμβολίζει βελτίωση στην τιμή του αντίστοιχου δείκτη. Τα αραχνοειδή γραφήματα αποτελούν έναν απλό τρόπο παρουσίασης τους επιρροής κάθε σεναρίου τους διάφορους τομείς του Nexus, διευκολύνουν την εξαγωγή σύνθετων συμπερασμάτων σχετικά με τους επιπτώσεις κάθε σεναρίου και συνεπώς μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων.

Δείκτης - κριτήριο	REF	DI	RF	DIRF	PA
<b>WATER</b>					
Ποσοστό ανανεώσιμων πόρων επί των συνολικών απολήψεων άρδευσης (%)	51.3	62.2	51.3	62.0	<u>75.6</u>
WEI απλοποιημένος	0.92	<u>0.70</u>	0.92	<u>0.70</u>	0.94
Μέσο ετήσιο φορτίο NO <sub>3</sub> κατεισδύον κάτω από το εδαφικό προφίλ (kg/ha)	24.22	23.64	18.22	17.94	<u>14.28</u>
<b>ENERGY</b>					
Συνολική καθαρή αξία ενεργειακής παραγωγής/κατανάλωσης (εκ. €)	2.1	<u>6.5</u>	1.2	6.1	2.0
<b>LAND</b>					
Μέση ετήσια ένταση διάβρωσης (tn/ha)	1.350	<u>1.336</u>	1.350	<u>1.336</u>	1.344
<b>FOOD-CROPS</b>					
Αξία μέσης ετήσιας γεωργικής παραγωγής (εκατομμύρια €)	406.5	383.2	402.3	381.2	<u>410.3</u>

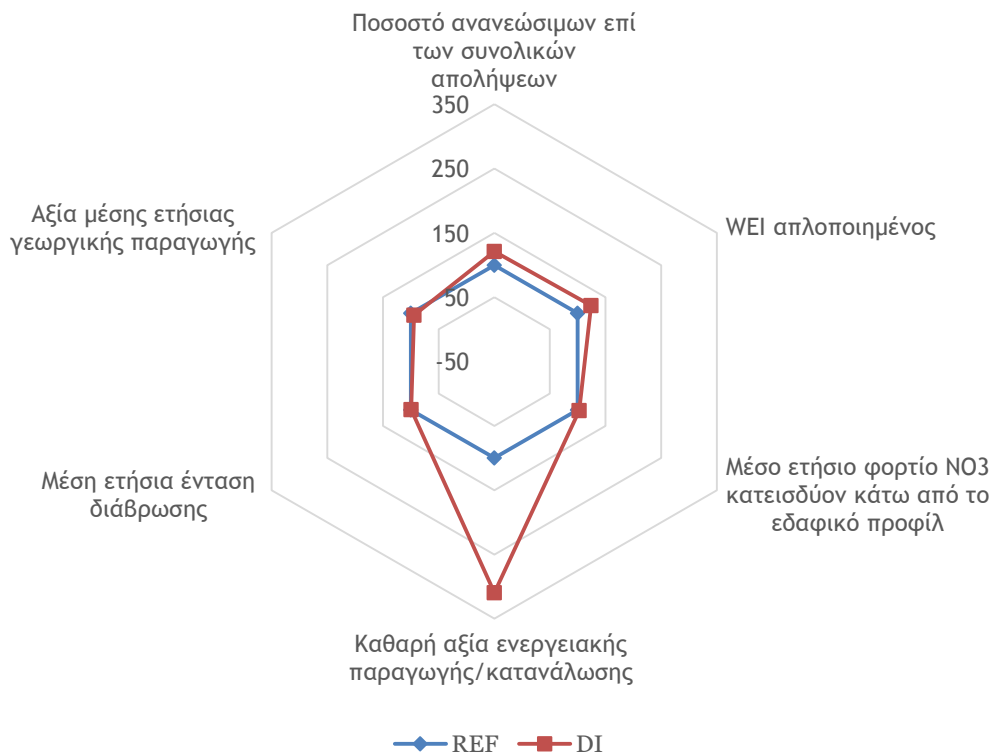
**Πίνακας 22: Επιπτώσεις των σεναρίων γεωργικών πρακτικών τους τομείς του WELF Nexus**

Λαμβάνοντας υπόψη τον παραπάνω πίνακα και τα αραχνοειδή γραφήματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

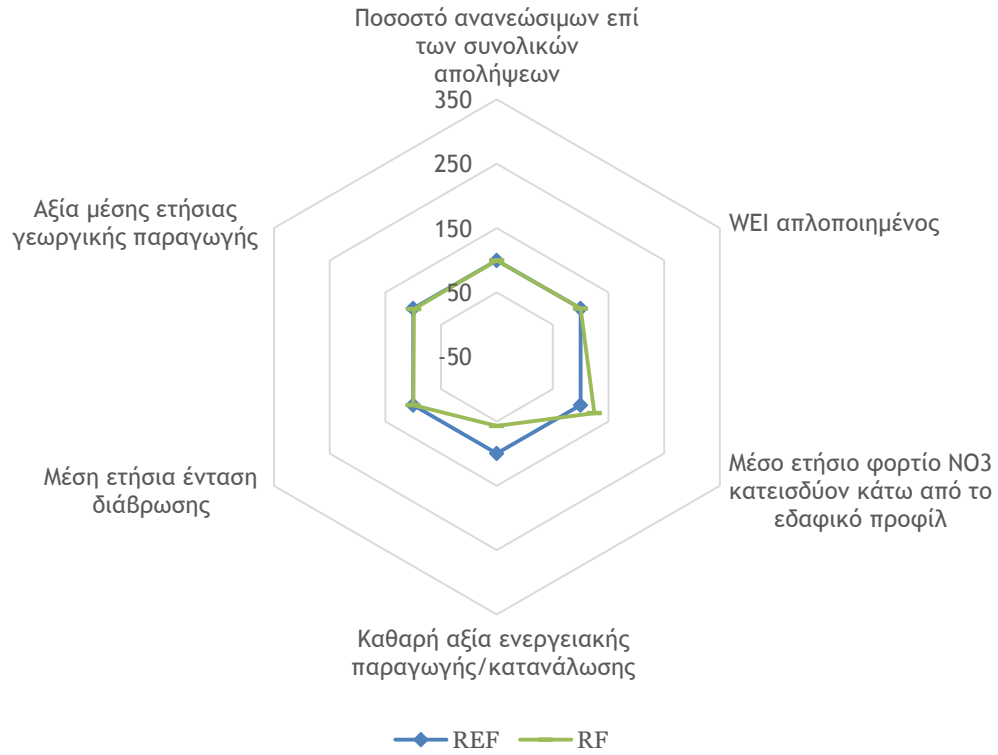
- Για τον τομέα τους Γης, όλα τα γεωργικά σενάρια έχουν παρόμοια απόδοση.
- Το σενάριο PA έχει τους καλύτερες επιδόσεις στον τομέα του Νερού και τους Γεωργικής Παραγωγής. Πράγματι, αυτή η πρακτική είναι σχεδιασμένη για τη βελτίωση τους παραγωγικότητας του νερού στη γεωργία. Μάλιστα, τους φαίνεται από τον πίνακα, η διαχείριση του αρδευτικού νερού γίνεται σημαντικά πιο βιώσιμη με την αύξηση των ανανεώσιμων πόρων που χρησιμοποιούνται, παρά τον κίνδυνο λειψυδρίας που εξακολουθεί να υπάρχει. Να σημειωθεί ότι, σε σχέση με το REF, η καθαρή αξία τους ενέργειας που παράγεται/καταναλώνεται παραμένει σχεδόν σταθερή.
- Το σενάριο RF δεν αποτελεί βέλτιστη επιλογή για κανένα από τα εξεταζόμενα κριτήρια.

- Τα σενάρια DI και DIRF έχουν αρκετά παρόμοιες επιπτώσεις, με σημαντικότερη διαφορά την κατεισδυση NO<sub>3</sub> στα υπόγεια ύδατα. Μια περιβαλλοντικά ορθή διαχείριση θα έδινε βάρος σε αυτό το κριτήριο, ενώ μια διαχείριση εστιασμένη στη μεγιστοποίηση του κέρδους θα αποτιμούσε ως σημαντικότερα τα οικονομικά οφέλη τους DI στον τομέα τους ενέργειας και τους αγροτικής παραγωγής.

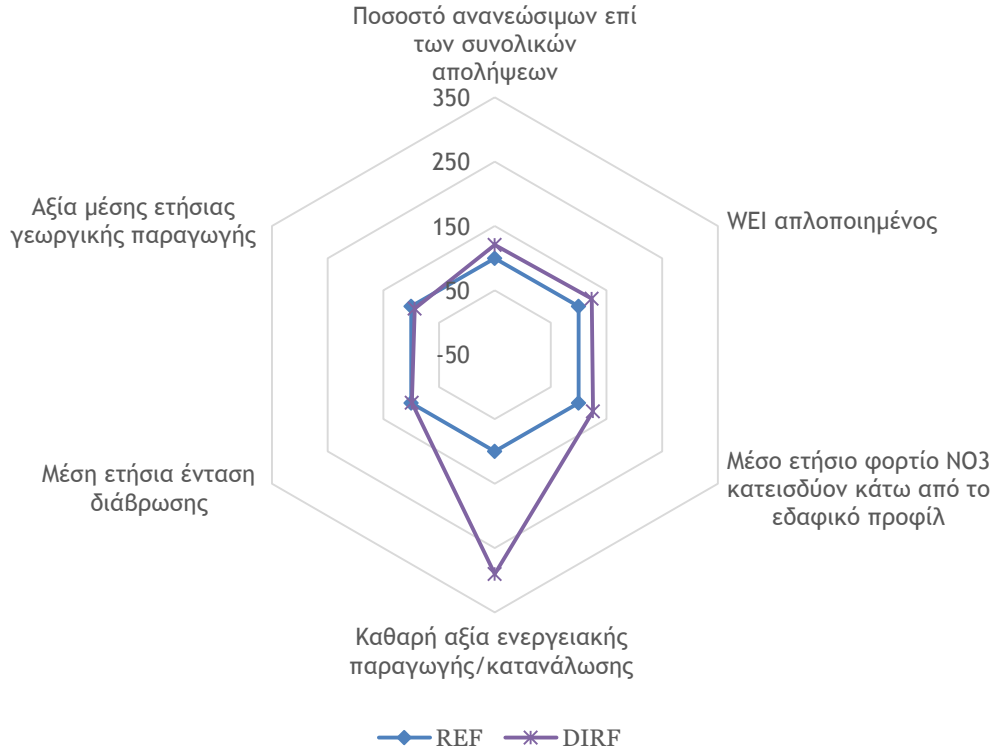
Τα σενάρια DI, DIRF και PA δεν μπορούν να συγκριθούν χωρίς να εκτελεστεί μια ανάλυση ευαισθησίας για τις τιμές του νερού, των λιπασμάτων, της ενέργειας και της γεωργικής παραγωγής, αφού κανένα σενάριο δεν επικρατεί ολικά απέναντι στα υπόλοιπα. Η επιλογή ολικά βέλτιστων λύσεων απαιτεί εφαρμογή της θεωρίας αποφάσεων, ώστε οι υποκειμενικές προσεγγίσεις για τη σημασία κάθε κριτηρίου να μπορέσουν να αποτυπωθούν και ποσοτικοποιημένα. Μια πιθανή προσέγγιση ποσοτικοποίησης θα ήταν η απόδοση βάρους σημαντικότητας σε κάθε κριτήριο, ώστε να εκφραστεί η ιεράρχηση που έχει κάθε ζήτημα για το φορέα λήψης απόφασης. Προφανώς, η διαφοροποίηση αυτού του προσώπου (πχ. τοπική αυτοδιοίκηση, διαχειριστική αρχή, παραγωγός ενέργειας, γεωργός, πολίτης) διαφοροποιεί και την ιεράρχηση των κριτηρίων.



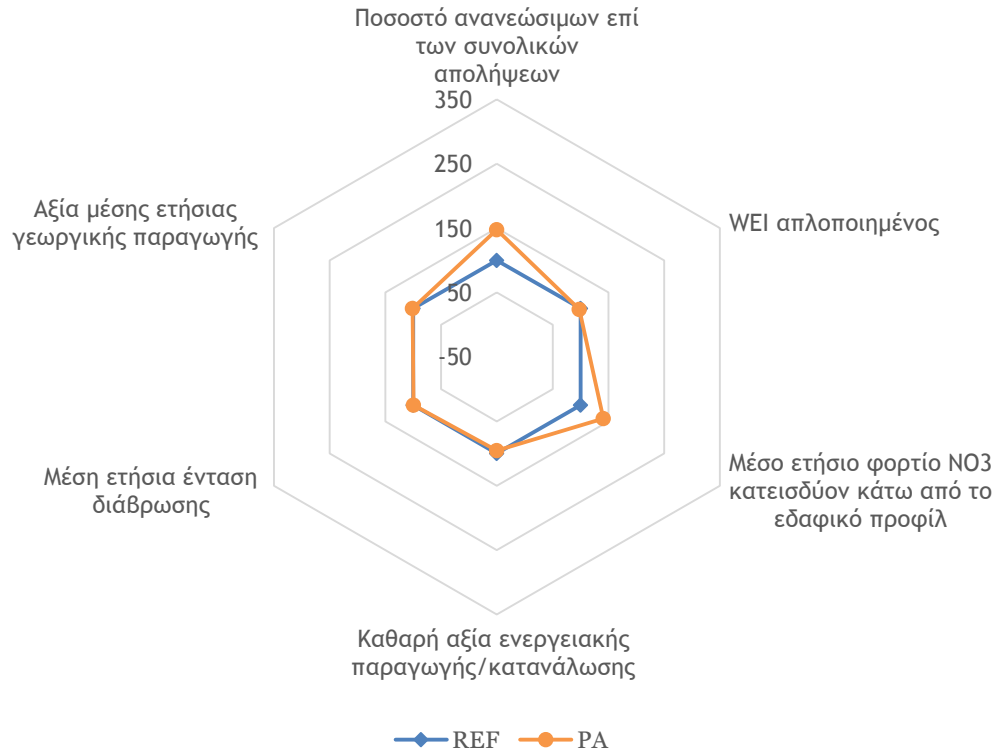
Εικόνα 43: Αραχνοειδές γράφημα των επιπτώσεων των σεναρίων αναφοράς και ελλειμματικής άρδευσης στους τομείς του WELF Nexus



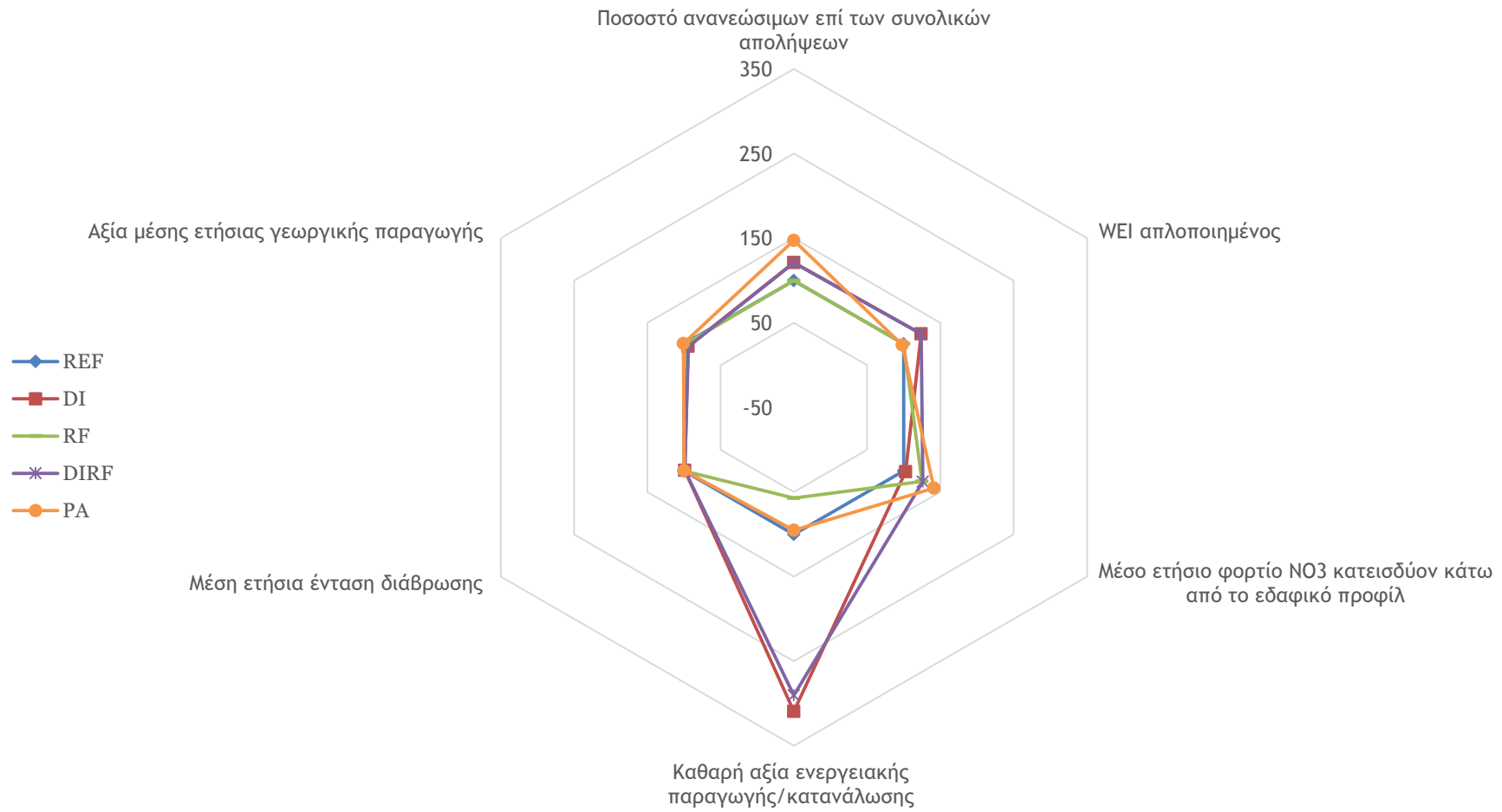
**Εικόνα 44: Αραχνοειδές γράφημα των επιπτώσεων των σεναρίων αναφοράς και μειωμένης λίπανσης στους τομείς του WELF Nexus**



**Εικόνα 45: Αραχνοειδές γράφημα των επιπτώσεων των σεναρίων αναφοράς και συνδυασμού ελλειμματικής άρδευσης-μειωμένης λίπανσης στους τομείς του WELF Nexus**



**Εικόνα 46: Αραχνοειδές γράφημα των επιπτώσεων των σεναρίων αναφοράς και γεωργίας ακριβείας στους τομείς του WELF Nexus**



Εικόνα 47: Αραχνοειδές γράφημα των επιπτώσεων των σεναρίων στους τομείς του WELF Nexus



## ΚΕΦ. 6: ΣΧΟΛΙΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκε εφαρμογή του μοντέλου ArcSWAT στη λεκάνη του ποταμού Πηνειού στο Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας με στόχο τη διερεύνηση των επιπτώσεων εφαρμογής διαφορετικών γεωργικών πρακτικών τόσο τους υδατικούς πόρους της λεκάνης απορροής όσο και τους τομείς της ενέργειας, της γης και της τροφής χωρίς να αγνοούνται οι δυναμικές αλληλεπιδράσεις των τεσσάρων αυτών στοιχείων και η σημασία τους αναγνώρισης και κατανόησής τους για την επίτευξη βιώσιμης διαχείρισης των φυσικών πόρων. Πραγματοποιήθηκε, επιπροσθέτως, χρήση μεθόδων τηλεπισκόπησης και φωτοερμηνείας για τη σύνθεση τους επικαιροποιημένου χάρτη χρήσεων γης της περιοχής μελέτης από δορυφορικά δεδομένα.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν σε σχέση με τις προτεινόμενες γεωργικές πρακτικές στη λεκάνη του Πηνειού είναι τα εξής:

- Η λεκάνη του Πηνειού υποφέρει από λειψυδρία ( $WEI_{simplified} > 40\%$ ). Καμία από τις γεωργικές πρακτικές που εξετάστηκαν δεν αντιμετωπίζει το πρόβλημα ριζικά. Παρόλα αυτά, η μείωση των αρδευτικών αναγκών κατά 30% (μέσω εφαρμογής ελλειμματικής άρδευσης) αποτελεί την αποτελεσματικότερη λύση
- Το ποσοστό των ανανεώσιμων πόρων στις αρδευτικές απολήψεις από τα υπόγεια είναι μέγιστο (76%) στην περίπτωση εφαρμογής γεωργίας ακριβείας, λόγω της καλύτερης κατανομής και εκμετάλλευσης του διαθέσιμου αρδευτικού νερού σε κάθε βήμα της προσομοίωσης.
- Η ελλειμματική άρδευση κατά 30% μειώνει τη συνολική απόληψη νερού στη λεκάνη κατά 27.5% και δημιουργεί το μεγαλύτερο καθαρό κέρδος σε ενεργειακή παραγωγή/κατανάλωση, αφού μειώνονται σημαντικά οι υπόγειες απολήψεις.
- Η μειωμένη λίπανση κατά 30% μειώνει την ποσότητα εφαρμοζόμενου N κατά 15% στο σύνολο της λεκάνης.
- Το φαινόμενο της διάβρωσης περιορίζεται σε όλες τις εξεταζόμενες γεωργικές πρακτικές, αφού μειώνεται η επιφανειακή απορροή.
- Οι αποδόσεις βαμβακιού και αραβόσιτου είναι πιο ευαίσθητες στην ελλειμματική άρδευση κατά 30% παρά στη μειωμένη λίπανση κατά 30%.
- Η απόδοση του βαμβακιού και κατά συνέπεια η αξία της γεωργικής παραγωγής αυξάνεται περισσότερο με την εφαρμογή γεωργίας ακριβείας.
- Η μείωση της λίπανσης κατά 30% δεν δίνει βέλτιστα αποτελέσματα για κανένα από τα εξεταζόμενα κριτήρια.
- Η ελλειμματική άρδευση και ο συνδυασμός μειωμένης άρδευσης και λίπανσης έχουν παρόμοιες επιπτώσεις όλους τους τομείς του WELF Nexus με εξαίρεση την κατεϊσδυση  $NO_3$  στα υπόγεια ύδατα όπου ο συνδυασμός των δύο γεωργικών πρακτικών είναι πιο αποτελεσματικός. Αποτελούν τη βέλτιστη λύση με κριτήριο την τιμή  $WEI_{simplified}$  και έχουν πολύ καλή επίδοση στο κριτήριο της καθαρής αξίας ενεργειακής παραγωγής/κατανάλωσης .
- Η γεωργία ακριβείας έχει τις καλύτερες επιδόσεις στους τομείς του Νερού και της Γεωργικής Παραγωγής. Καταφέρνει να βελτιώσει την αποδοτικότητα χρήσης νερού και λιπασμάτων και να αυξήσει τη γεωργική παραγωγή. Μειώνει τα φορτία νιτρικών στα υπόγεια ύδατα. Περιορίζει τις μη βιώσιμες αρδευτικές απολήψεις από μόνιμα αποθέματα υπογείων υδάτων.
- Κανένα σενάριο γεωργικών πρακτικών στον Πηνειό δεν επικρατεί ολικά απέναντι στα υπόλοιπα. Η γεωργία ακριβείας και στη συνέχεια η ελλειμματική άρδευση και ο συνδυασμός ελλειμματικής άρδευσης και λίπανσης φαίνεται να έχουν την καλύτερη επίδοση με βάση τα προτεινόμενα κριτήρια που αντιπροσωπεύουν τους διάφορους τομείς του WELF Nexus.

Ορισμένα γενικά σχόλια και παρατηρήσεις που αφορούν το σύνολο της προτεινόμενης μεθοδολογίας για το σχεδιασμό βιώσιμων γεωργικών πρακτικών σε αγροτικές λεκάνες απορροής είναι τα παρακάτω:

- Η διαδικασία της ταξινόμησης έχει σε μεγάλο βαθμό υποκειμενικό χαρακτήρα και επαφίεται στην εμπειρία του χρήστη και την ικανότητά του να εντοπίζει τις ιδιαιτερότητες και αδυναμίες κάθε περίπτωσης, να κατανοεί τους στόχους της ταξινόμησης και να θέτει τα κατάλληλα σε κάθε περίπτωση κριτήρια για την αποτίμηση της ακρίβειας. Οι κυριότερες αδυναμίες στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η αμφισβητήσιμη αξιοπιστία των διαθέσιμων δειγμάτων και περιοχών ελέγχου, το μικρό μέγεθος αγροτεμαχίων κάποιων καλλιεργειών γεγονός που δυσχεραίνει τη διάκριση της φασματικής απόκρισής τους από το λογισμικό ταξινόμησης. Αδυναμία τέλος συνιστά και η ατυχής συνάφεια φασματικών αποκρίσεων διαφορετικών κλάσεων (πχ. υγράτοποι, αραβόσιτος).
- Οι κυριότερες προκλήσεις μοντελοποίησης που αντιμετωπίστηκαν στο λογισμικό SWAT οφείλονται στη δομή του ίδιου του λογισμικού και είναι οι εξής:
  - Η δυσκολία παρακολούθησης του κύκλου του αζώτου στους υπόγειους υδροφορείς. Οι μεταβλητές που υπεισέρχονται τους εξισώσεις υπολογισμού των θρεπτικών δεν είναι ορατές στα αποτελέσματα με συνέπεια να μειώνεται η δυνατότητα επέμβασης του χρήστη
  - Ο εξαναγκασμός σύνδεσης κάθε HRU με μοναδική πηγή απόληψης νερού Αφενός, δεν δίνεται η δυνατότητα ταυτόχρονης σύνδεσης τους HRU και με τον βαθύ και τον αβαθή υδροφορέα και αφετέρου δεν παρέχεται η δυνατότητα ταυτόχρονης σύνδεσης με τα επιφανειακά υδάτινα σώματα
  - Η απουσία εργαλείων για την αξιολόγηση της βαθμονόμησης στο περιβάλλον του λογισμικού ώστε αυτή να μην εκτελείται ως εξωτερική εργασία από το χρήστη.
- Το μοντέλο SWAT δεν ευνοεί τη διερεύνηση των δυναμικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ του περιβαλλοντικού και του κοινωνικοοικονομικού συστήματος και δεν ενσωματώνει την ανταπόκριση της κοινωνίας και των φορέων λήψης απόφασης.
- Το μοντέλο SWAT είναι εξειδικευμένο για χρήση σε αγροτικές λεκάνες και εστιάζει σε αγροτικά μέτρα. Επομένως, δεν μπορεί να προσομοιώσει όλο το εύρος των αλληλεπιδράσεων νερού, γης, τροφής, ενέργειας (NEXUS). Κάποιο διαφορετικό μοντέλο ή συνδυασμός μοντέλων θα ήταν περισσότερο κατάλληλα.
- Ο σχεδιασμός γεωργικών πρακτικών με χρήση δορυφορικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης (ιδιαίτερα σε λεκάνες με ελλείψεις στα δεδομένα) απαιτεί τη χρήση κατανεμημένων μοντέλων για την αξιοποίηση της διαθέσιμης χωρικής πληροφορίας. Ωστόσο, η υψηλή ακρίβεια ανάλυσης των τηλεπισκοπικών δεδομένων δημιουργεί σημαντική αύξηση του υπολογιστικού φόρτου και δυσχέρειες στην ανάλυση των αποτελεσμάτων. Είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούνται τεχνικές απλοποίησης της πληροφορίας, χωρίς έκπτωση στην εξυπηρέτηση των στόχων της εκάστοτε μελέτης.
- Η αξιολόγηση της απόδοσης των γεωργικών πρακτικών με δείκτες που αντιπροσωπεύουν τους τομείς του νερού, της γης, της τροφής και της ενέργειας επιτρέπει το σχεδιασμό βιώσιμων γεωργικών πρακτικών που ικανοποιούν ταυτόχρονα πολλούς περιβαλλοντικούς και οικονομικούς στόχους. Η επιλογή συμβιβαστικών βέλτιστων λύσεων για τα διάφορα κριτήρια απαιτεί εφαρμογή της θεωρίας αποφάσεων.



## ΚΕΦ. 7: ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα στοιχεία εκείνα της παρούσας διπλωματικής τα οποία επιδέχονται βελτίωση, επέκταση ή περαιτέρω διερεύνηση.

- Εκτέλεση της διαδικασίας της ταξινόμησης με χρήση δορυφορικών εικόνων με μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα λ.χ. Quickbird, Ikonos για την λεπτομερέστερη αποτύπωση των χρήσεων γης στην περιοχή μελέτης.
- Επιλογή δειγμάτων μεγαλύτερης αξιοπιστίας για την επίτευξη ταξινόμησης υψηλότερης ακρίβειας.
- Αξιοποίηση αντικειμενοστραφούς ταξινόμησης πολλαπλών επιπέδων.
- Προσομοίωση σεναρίων κλιματικής αλλαγής και μελέτη της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στους τομείς του WELF Nexus.
- Ανάλυση των αποτελεσμάτων των σεναρίων της παρούσας διπλωματικής σε επίπεδο υπολεκανών.
- Υπολογισμός δεικτών αποδοτικότητας του αρδευτικού νερού ή της λίπανσης για την αποτελεσματικότερη σύγκριση των σεναρίων γεωργικών πρακτικών.
- Βαθμονόμηση μοντέλου αναφορικά με τις λειτουργίες του κύκλου του φωσφόρου.
- Αναγωγή των επιπτώσεων των σεναρίων σε μια ενιαία κλίμακα για την αποτελεσματικότερη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των σεναρίων.
- Αναγνώριση των διαφορετικού τύπου σχέσεων αλληλεπίδρασης μεταξύ των τομέων (ανταγωνιστικές, εξάρτησης, συνεργατικές, κτλ)
- Διερεύνηση των επιπτώσεων πρόσθετων σεναρίων λ.χ. ανακύκλωσης νερού, περιορισμού των απωλειών, μεταβολής των καλλιεργειών.
- Κατασκευή και εκτέλεση σεναρίων για τη λεκάνη απορροής Πηνειού με μεταβολή των εφαρμοζόμενων γεωργικών πρακτικών ανά καλλιέργεια ή ανά υπολεκάνη και εντοπισμός των βέλτιστων συνδυασμών.
- Σύνδεση του μοντέλου SWAT με κοινωνικοοικονομικό μοντέλο για τη διερεύνηση των δυναμικών σχέσεων μεταξύ των τομέων του WELF Nexus.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Klove, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 733-752.
- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., . . . Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 413-430.
- Almasri, M. N., & Kaluarachchi, J. J. (2007). Modeling nitrate contamination of groundwater in agricultural watersheds. *Journal of Hydrology*, 211-229.
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., & Neitsch, S. L. (2012). *Soil and Water Assessment Tool: Input/Output Documentation Version 2012*. Temple: Texas Water Resources Institute.
- Arnold, J. G., Moriasi, D., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., . . . M. W. Van Liew, N. Kannan, M. K. Jha. (2012). SWAT: Model Use, Calibration and Validation. *Transactions of the ASABE*, 1491-1508.
- Bach, H., Bird, J., Clausen, T. J., Jensen, K. M., Lange, R. B., Taylor, R., . . . Wolf, A. (2012). *Transboundary River Basin Management: Addressing Water, Energy and Food Security*. Lao PDR: Mekong River Commission.
- Bazilian, M., Rogner, H., Howells, M., Hermann, S., Arent, D., Gielen, D., . . . Yumkella, K. K. (2011, December). Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. *Energy Policy*, σσ. 7896-7906.
- biofuels.gr. (2016, March). *Ο αραβόσιτος ως ενεργειακή καλλιέργεια*. Ανάκτηση από biofuels.gr: <http://www.biofuels.gr/energy-crops/maize/>
- Bizikova, L., Roy, D., Swanson, D., Venema, H. D., & McCandless, M. (2013). *The Water-Energy-Food Security Nexus: Towards A Practical Planning and Decision Support Framework for Landscape Investment and Risk Management*. Winnipeg: International Institute for Sustainable Development.
- Brandi, C., Richerzhagen, C., & Stepping, K. (2013). *Post 2015: Why is the Water-Energy-Land Nexus Important for the Future Development Agenda?* Bonn: German Development Institute.
- Brundtland, G. H., & World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future: Report of the World Commission On Environment and Development*. Oxford University.

- Chang, Y., Li, G., Yao, Y., Zhang, L., & Yu, C. (2016, February). Quantifying the Water-Energy-Food Nexus: Current Status and Trends. *Energies*.
- Ciampalini, A., Garfagnoli, F., Antonielli, B., Moretti, S., & Righini, G. (2013). Remote sensing techniques using Landsat ETM+ applied to the detection of iron ore deposits in Western Africa. *Arabian Journal of Geosciences*, 4529-4546.
- Congalton, R. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 35-46.
- Dechmi, F., Burguete, J., & Skhiri, A. (2012). SWAT application in intensive irrigation systems: Model modification, calibration and validation. *Journal of Hydrology*, 227-238.
- DEFiNiENS. (2000). *eCognition User Guide*. Germany.
- Dodds, F., & Bartram, J. (2014). Building Integrated Approaches into the Sustainable Development Goals - A Declaration from the Nexus 2014: Water, Food, Climate and Energy Conference. *Nexus 2014: Water, Food, Climate and Energy Conference*. Chapel Hill: University of North Carolina.
- Douglas-Mankin, K., Srinivasan, R., & Arnold, J. (2010). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: current developments and applications. *Transactions of the ASABE*, 1423-1431.
- Easton, Z. M., Fuka, D. R., White, E. D., Collick, A. S., Ashagre, B. B., McCartney, M., . . . Steenhuis, T. S. (2010). A Multi Basin SWAT Model Analysis of Runoff and Sedimentation in the Blue Nile, Ethiopia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1827-1841.
- ERDAS Inc. (2008). *ErMapper User Guide*. United States of America.
- European Biofuels Technology Platform. (2016, March). *Ethanol fact sheet*. Ανάκτηση από European Biofuels Technology Platform: <http://www.biofuelstp.eu/factsheets/ethanol-fact-sheet.pdf>
- European Biomass Industry Association. (2016, March). *European Biomass Industry Association - Bioethanol*. Ανάκτηση από European Biomass Industry Association: <http://www.eubia.org/index.php/about-biomass/biofuels-for-transport/bioethanol>
- European commission/environment. (2010). *Water Scarcity and Drought in the European Union*. European Union.
- Eurostat. (2016, March). *Database-Eurostat*. Ανάκτηση από Eurostat: <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
- Feyereisen, G. W., Strickland, T. C., Bosch, D. D., & Sullivan, D. G. (2007). Evaluation of SWAT manual calibration and input parameter sensitivity in the Little river Watershed. *Transactions of the ASABE*, 843-855.

- Food and Agriculture Organisation of the United Nations. (2014). *The Water-Energy-Food Nexus: A new approach in support of food security and sustainable agriculture*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Foody, G. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 185-201.
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 1211-1250.
- Ghoraba, S. M. (2015). Hydrological modeling of the Simly Dam Hydrological modeling of the Simly Dam. *Alexandria Engineering Journal*, 583-594.
- Glassman, D., Wucker, M., Isaacman, T., & Champilou, C. (2016, March). *The Water-Energy Nexus: Adding Water to the Energy Agenda. A World Policy Paper*. Ανάκτηση από World Policy Institute:  
[http://www.worldpolicy.org/sites/default/files/policy\\_papers/THE%20WATER-ENERGY%20NEXUS\\_0.pdf](http://www.worldpolicy.org/sites/default/files/policy_papers/THE%20WATER-ENERGY%20NEXUS_0.pdf)
- Glavan, M., & Pintar, M. (2012). Modelling of Surface Water Quality by Catchment Model SWAT. Στο M. Kumarasamy, *Studies on Water Management Issues* (σσ. 107-132). InTech.
- Government of Canada. (2015, October 26). *Fundamentals of Remote Sensing - Introduction*. Ανάκτηση από Natural Resources Canada Web Site:  
<http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/9363>
- Harmel, R. D., & Smith, P. K. (2007). Consideration of measurement uncertainty in the evaluation of goodness-of-fit in hydrologic and water quality modeling. *Journal of Hydrology*, 326-336.
- Hellegers, P., Zilberman, D., Steduto, P., & McCornick, P. (2008). Interactions between water, energy, food and environment: evolving perspectives and policy issues. *Water Policy*, 1-10.
- Hoff, H. (2011). Understanding the Nexus. Background Paper for the Bonn2011 Conference. *Bonn2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus*. Stockholm : Stockholm Environment Institute.
- Hussey, K., & Pittock, J. (2012). The Energy-Water Nexus: Managing the Links between Energy and Water for a Sustainable Future. *Ecology and Society*.
- International Energy Agency. (2012). Water for Energy: Is energy becoming a thirstier resource? Στο *World Energy Outlook 2012* (σσ. 501-528). Paris: OECD/IEA.

- Jägerskog, A., Clausen, T. J., Lexén, K., & Holmgren, T. (2013). *Cooperation for a Water Wise World - Partnerships for Sustainable Development: Report Nr. 32*. Stockholm: Stockholm International Water Institute.
- Karabulut, A., Egoh, B. N., Lanzanova, D., Grizzetti, B., Bidoglio, G., Pagliero, L., . . . Mubarek, S. (2016). Mapping water provisioning services to support the ecosystem-water-food-energy nexus in the Danube river basin. *Ecosystem services*, 278-292.
- Karantalos, K., & Argialas, D. (2006). Automatic detection of oil spills with level set segmentation technique from remotely sensed imagery. *International Symposium of Remote Sensing*, (σσ. 126-129). Korea.
- Kashef, A. (1981, September). Technical and ecological impacts of the High Aswan Dam. *Journal of Hydrology*, σσ. 73-84.
- Lawford, R., Bogardi, J., Marx, S., Sharad, J., Wostl, C., Knuppe, K., . . . Meza, F. (2013). Basin perspectives on the Water-Energy-Food Security Nexus. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 607-616.
- Lele, U., Klousia-Marquis, M., & Goswami, S. (2013). Good Governance for food, water and energy security. *Aquatic Procedia*, 44-63.
- Lenhart, T., Eckhardt, K., Fohrer, N., & Frede, H. G. (2002). Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*, 645-654.
- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation, 7th Edition*. John Wiley & Sons, Inc.
- Makropoulos, C., & Mimikou, M. (2012, May). *i-adapt- Innovative approaches to halt desertification in Pinios: Piloting emerging technologies- A monograph*. Ανάκτηση από i-adapt: <http://i-adapt.gr/>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 885-900.
- National Aeronautics and Space Administration. (2015, October 26). *Landsat 8 / Landsat Science*. Ανάκτηση από National Aeronautics and Space Administration Web Site: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/?p=3186>
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Srinivasan, R., & Williams, J. (2009). *Soil and Water Assessment Tool-theoretical documentation-version 2009*. Temple Tex: Grassland, Soil and Water Research Laboratory.
- Ormsby, Napoleon, Burke, Groessl, & Bowden. (2004). *Getting to know ArcGIS Desktop*. Redlands: ESRI Press.

- Pagliero, L., Bouraoui, F., Willem, P., & Diels, J. (2014). Large-Scale Hydrological Simulations Using the Soil Water Assessment Tool, Protocol Development, and Application in the Danube Basin. *Journal of Environmental Quality*, 145-154.
- Panagopoulos, Y., Makropoulos, C., Kossida, M., & Mimikou, M. (2014). Optimal Implementation of Irrigation Practices: Cost-Effective Desertification Action Plan for the Pinios Basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*.
- Panagopoulou, Y., Makropoulos, C., Gkiokas, A., Kossida, M., Evangelou, L., Lourmas, G., . . . Mimikou, M. (2014). Assessing the cost-effectiveness of irrigation water management practices in water stressed agricultural catchments: The case of Pinios. *Agricultural Water Management*, 31-42.
- Prasad, G., Stone, A., Hughes, A., & Stewart, T. (2012). Towards the development of an Energy-Water-Food Security Nexus based modelling framework as a policy and planning tool for South Africa. *Strategies to Overcome Poverty & Inequality "Towards Carnegie III"*. Cape Town: University of Cape Town.
- Psomas, A. G. (2015). *1st Annual PhD Progress Report*. Athens: National Technical University of Athens (NTUA).
- Querner, E. P., & van Zanen, M. (2013). *Modelling water quantity and quality using SWAT: A case study in the Limpopo River basin, South Africa*. Wageningen: Alterra Wageningen UR.
- Ringler, C., Bhaduri, A., & Lawford, R. (2013, December). The nexus across water, energy, land and food (WELF): potential for improved resource use efficiency? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, σσ. 617-624.
- Rocha, J., Roebeling, P., & Rial, M. E. (2015). Assessing the impacts of sustainable agricultural practices for water quality improvements in the Vouga catchment (Portugal) using the SWAT model. *Science of the Total Environment*, 48-58.
- Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Doell, P., & Portmann, F. T. (2010, June). Groundwater use for irrigation - a global inventory. 3977-4021.
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy, 12th edition*. Washington DC.: USDA-Natural Resources Conservation Service. Ανάκτηση από Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Stehman, S. (1997). Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment*, 77-89.
- Thomlinson, J., Bolstad, P., & Cohen, W. (1999). Coordinating methodologies for scaling landcover classifications from site-specific to global: steps toward validating global map products. *Remote Sensing of Environment*, 16-28.

- U.S. Geological Survey. (2015, October 26). *USGS Global Visualization Viewer*.  
Ανάκτηση από Earth Resources Observation and Science Center (EROS) Web  
Site: <http://glovis.usgs.gov/>
- United Nations World Water Assessment Programme. (2014). *The United Nations  
World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*.  
Paris: UNESCO.
- UN-Water. (2016, March). *UN-Water: Statistics*. Ανάκτηση από UN-Water:  
<http://www.unwater.org/statistics>
- Vilaysanea, B., Takaraa, K., Luo, P., Akkharathc, I., & Duana, W. (2015).  
Hydrological stream flow modelling for calibration and uncertainty analysis  
using SWAT model in the Xedone river basin, Lao PDR. *Procedia  
Environmental Sciences*, 380 - 390.
- Water in the West. (2013). *Water and Energy Nexus: A Literature REview*.  
Stanford: Stanford University.
- Weitz, N., Nilsson, M., Huber-Lee, A., Davis, M., & Hoff, H. (2014). *Cross-sectoral  
integration in the Sustainable Development Goals: a nexus approach-  
Discussion brief*. Stockholm: Stockholm Environment Institute.
- Werner, B., Collins, R., Lago, M., Möller-Gulland, J., Kossida, M., Tekidou, A., . . .  
Ronan, P. (2012). *Towards efficient use of water resources in Europe*. *EEA  
Report No 1/2012*. Copenhagen: EEA.
- Winchell, M., Srinivasan, R., Di Luzio, M., & Arnold, J. (2013). *ArcSWAT Interface  
for SWAT2012: User's Guide*. Temple: USDA.
- World Economic Forum. (2011). *Water Security: the Water-Food-Energy-Climate  
Nexus: th World Economic Forum water initiative*. Washington DC: Island  
Press.
- Yang, H., Zhou, Y., & Liu, J. (2009). Land and water requirements of biofuel and  
implications for food supply and the environment in China. *Energy Policy*,  
1876-1885.
- Αργιαλάς, Δ. (1998). *Ψηφιακή Τηλεπισκόπηση*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Αργιαλάς, Δ. (1999). *Φωτοερμηνεία - Τηλεπισκόπηση*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Αργιαλάς, Δ., & Τζώτσος, Α. (2002). Η συμβολή του eCognition στην  
χαρτογράφηση γεωμορφολογικών σχηματισμών από Ψηφιακό Μοντέλο  
Εδάφους. *2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών*  
(σ. 15). Αθήνα: ΕΜΠ.
- Γκούμας, Κ. (2006). Οι αρδεύσεις στη θεσσαλική πεδιάδα: Επιπτώσεις στα υπόγεια  
και επιφανειακά νερά. *Ημερίδα Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης* (σσ. 39-  
53). Θεσσαλονίκη: ΕΥΕ.



- Ελληνική Κοινότητα Δασολόγων. (2015, Οκτώβρης 26). *Δορυφορική Τηλεπισκόπηση*. Ανάκτηση από [dasodata.gr](http://dasodata.gr): <http://dasodata.gr/index.php/doryforiki-tilepiskopisi>
- Ευαγγέλου, Ε., & Τσαντίλας, Χ. (2010). *Γεωργία Ακριβείας: το μελλοντικό σύστημα παραγωγής αγροτικών προϊόντων. Πρόγραμμα HYDROSENSE, μια ερευνητική προσπάθεια στον ελληνικό χώρο*. Ανάκτηση από The Hydrosense Project: <http://www.hydrosense.org/>
- Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος. (2013). *Results and lessons from implementing the Water Assets Accounts in the EEA area - From concepts to production*. Copenhagen: European Environmental Agency.
- Καραθανάση, Β. (2011). *Σημειώσεις μαθήματος "Ειδικά κεφάλαια Τηλεπισκόπησης"*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Καρυδάς, Χ. Γ., & Συλλαΐος, Ν. Γ. (2000). Γεωργία Ακριβείας: Περιγραφή της μεθοδού -Υφισταμένη κατάσταση και προοπτικές. *2ο ειδικό συνέδριο Πληροφορικά συστήματα στον Αγροτικό Τομέα-Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές* (σφ. 134-146). Χανιά: Ελληνικής Εταιρείας Επιχειρησιακών Ερευνών.
- Κοινοπραξία Διαχείρισης Υδάτων Θεσσαλίας, Ηπείρου και Δυτικής Στερεάς Ελλάδας. (2014). *Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (GR08)*. Αθήνα: Ειδική Γραμματεία Υδάτων.
- Κουτσογιάννης, Δ., Ανδρεαδάκης, Α., Μαυροδήμου, Ρ., Χριστοφίδης, Α., Μαμάσης, Ν., Ευστρατιάδης, Α., . . . Νουτσόπουλος, Κ. (2008). *Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων, Υποστήριξη της κατάρτισης Εθνικού Προγράμματος Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων*. Αθήνα: Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος-Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κωτούλας, Β. Ε. (2010). *Μελέτη των επιδράσεων της ελλειμματικής άρδευσης σε καλλιέργεια βαμβακιού (Gossypium hirsutum L., cv. Celia) (Διδακτορική Διατριβή)*. Αθήνα: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Μιμίκου, Μ. Α., & Μπαλτάς, Ε. Α. (2006). *Τεχνική Υδρολογία*. Αθήνα : Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- Ναλμπάντης, Ι., & Κουτσογιάννης, Δ. (1997). *Αναβάθμιση και επικαιροποίηση της υδρολογικής πληροφορίας της Θεσσαλίας*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε. (2016, Μάρτιος). *Διεθνής Τιμή Βάμβακος*. Ανάκτηση από Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε: <http://www.opekepe.gr/vamvaki.asp>
- Παναγόπουλος, Ι. (2010). *Λήψη αποφάσεων για τον σχεδιασμό βιώσιμων μέτρων για την προστασία της χημικής κατάστασης του υδάτινου περιβάλλοντος από*

μη σημειακές πηγές ρύπανσης (Διδακτορική Διατριβή). Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Στάμου, Α. (2009). *Εφαρμοσμένη Υδραυλική - Ροή υπό πίεση σε κλειστούς αγωγούς*. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου. Ανάκτηση από Εισαγωγή στην ενεργειακή τεχνολογία- Υδροηλεκτρική ενέργεια:

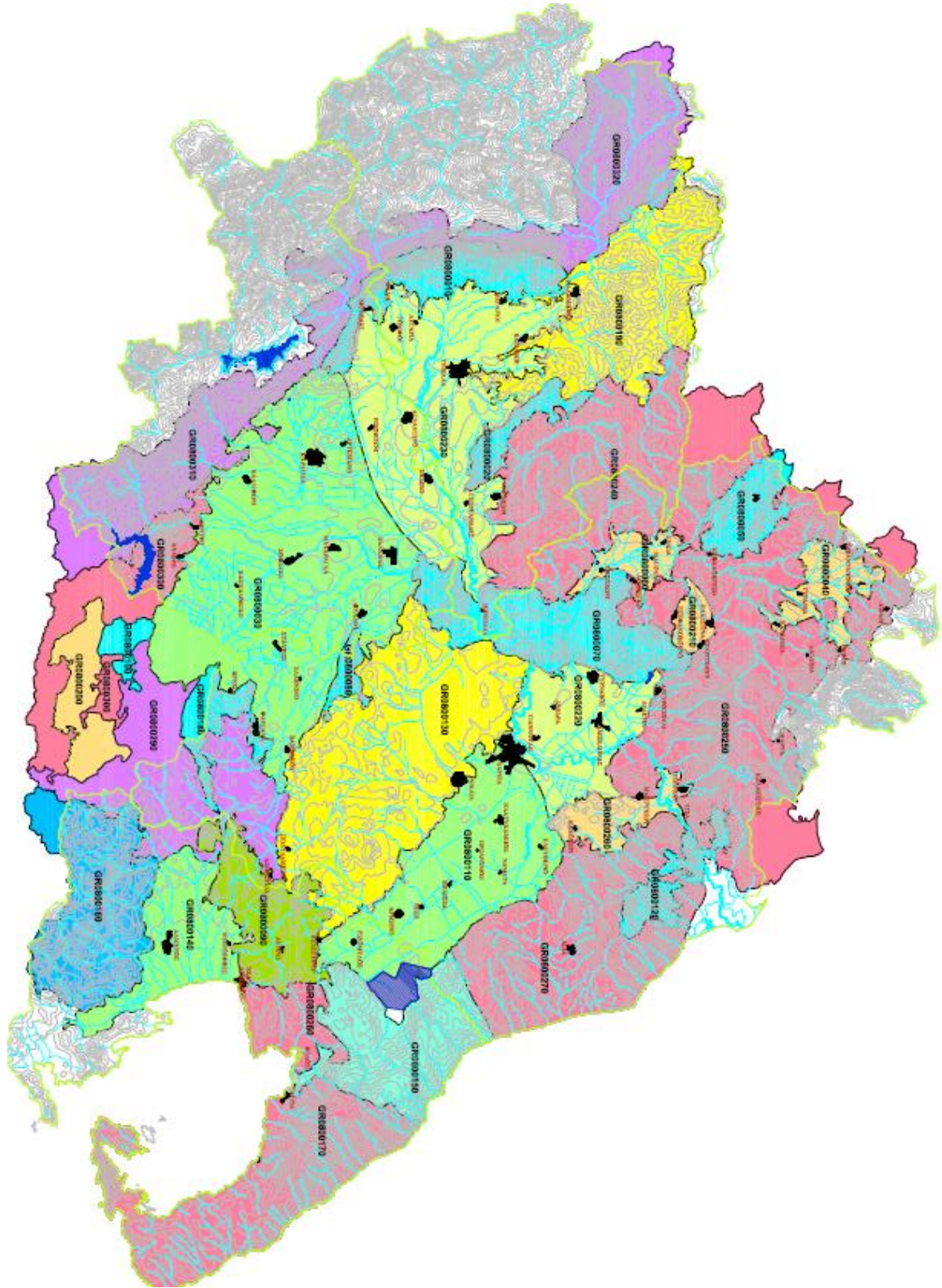
[https://users.itia.ntua.gr/nikos/metsovo/ene\\_yhs\\_10.pdf](https://users.itia.ntua.gr/nikos/metsovo/ene_yhs_10.pdf)

Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωγραφίας. (2014). Εισαγωγή στην Τηλεπισκόπηση. Σεμινάριο "Εισαγωγή στη Γεωπληροφορική". Αθήνα: Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών.

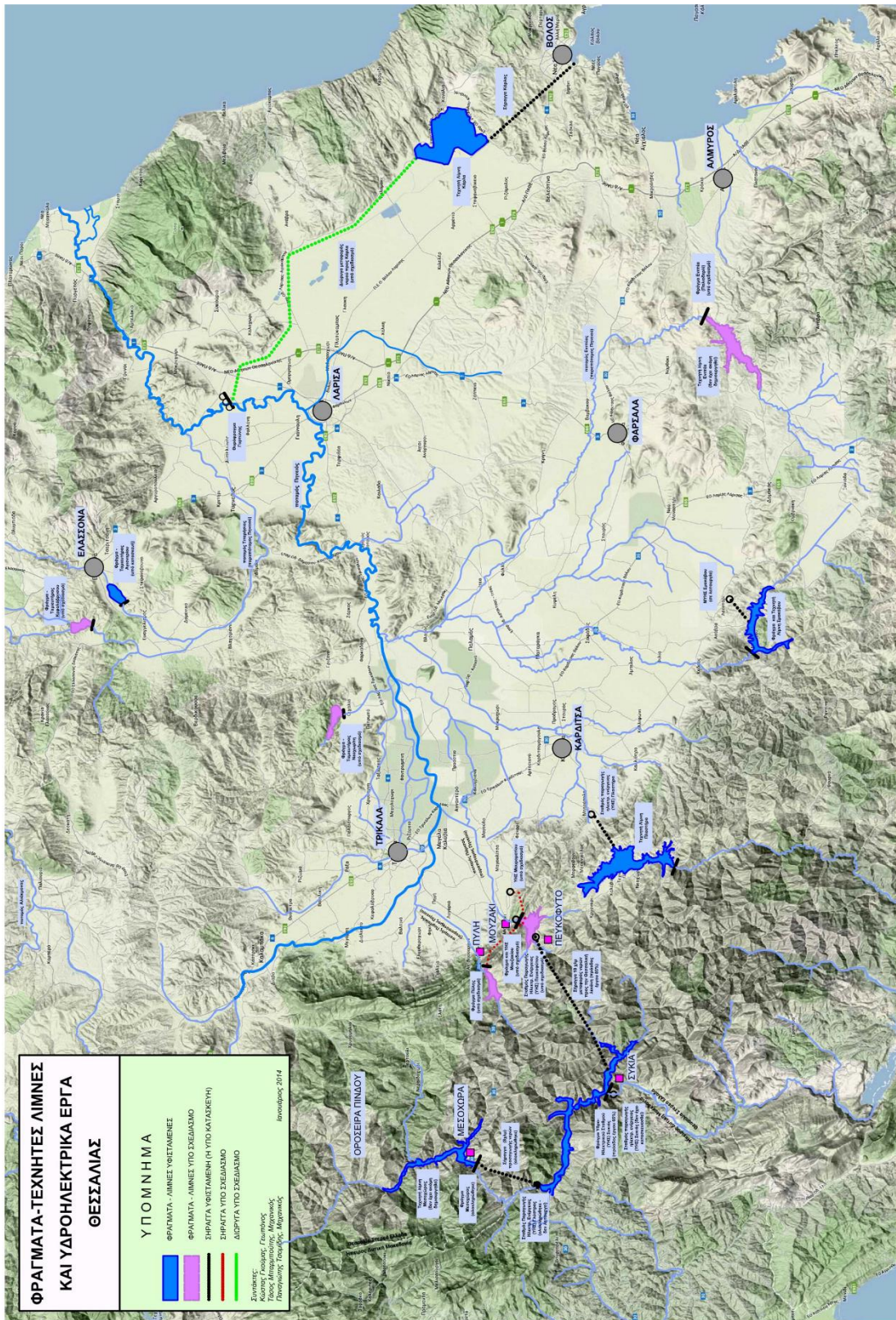
Ψωμάς, Α. (2012). Διαχείριση υδατικών πόρων στη λεκάνη απορροής του ποταμού Πηνειού υπό καθεστώς κλιματικής και κοινωνικοοικονομικής αλλαγής με χρήση του λογισμικού WEAP21 (Μεταπτυχιακή Εργασία). Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Χάρτης υπόγειων υδροφορέων Θεσσαλίας, Πηγή: yrethe.gr



	GR000010 (Σύστημα Κόζακο)		GR000230 (Σύστημα υδροφοριών Κάτω Ολύμπου • Σαρανταπόρου)
	GR000020 (Σύστημα Παλαισσαμάρinas • Βούλας)		GR000260 (Σύστημα υδροφοριών Μακρυχωρίου - Συκουρίου)
	GR000030 (Σύστημα πεδιάδας Νοτιοδυτικής Θεσσαλίας)		GR000270 (Σύστημα υδροφοριών Μαυροβουνίου • Όσσας)
	GR000040 (Σύστημα Σαρανταπόρου)		GR000280 (Σύστημα υδροφοριών Νέας Αγχάλου • Νέας Ιωνίας)
	GR000050 (Σύστημα Κρηνιάς • Ελασσόνας)		GR000290 (Σύστημα υδροφοριών άνω του Ενπιά)
	GR000060 (Σύστημα Ποταμιάς)		GR000300 (Σύστημα υδροφοριών Ξητιάδος • Κέδρου)
	GR000070 (Σύστημα Δομοφίου • Τριπόλου)		GR000310 (Σύστημα υδροφοριών Ελάτης • Ρεντίνας)
	GR000080 (Σύστημα Φυλληγίου • Ορφανών)		GR000320 (Σύστημα υδροφοριών Μαλακασιώτικου ρέματος)
	GR000090 (Λοφώδες σύστημα Αλμυρού • Βελιστινίου)		
	GR000100 (Σύστημα Εκκάρας • Βελιστινίων)		
	GR000110 (Σύστημα Λάρισας • Κάρλας)		
	GR000120 (Σύστημα Ολύμπου • Όσσας)		
	GR000130 (Σύστημα Τσουτσάνης • Καλού Νερού)		
	GR000140 (Σύστημα Αλμυρού)		
	GR000150 (Σύστημα Μαυροβουνίου • Κάρλας)		
	GR000160 (Σύστημα Ορβυρας)		
	GR000170 (Σύστημα Πηλίου)		
	GR000180 (Σύστημα Νορθακίου • Βρυσηών)		
	GR000190 (Σύστημα Χασίων • Ανηχασίων)		
	GR000200 (Σύστημα Ξητιάδος)		
	GR000210 (Σύστημα Ελασσόνας • Τσαριτσάνης)		
	GR000220 (Σύστημα κώνου Τριτορήσιου)		
	GR000230 (Σύστημα κώνου Πηνειού • Παρταφικού • Παμίσιου)		
	GR000240 (Σύστημα υδροφοριών Χασίων • Φαρκαδώνης)		



Μεταδεδομένα δορυφορικών απεικονίσεων Landsat\_8 OLI/TIRS

Χαρακτηριστικά Δεδομένων	Τιμές χαρακτηριστικών
Landsat Scene Identifier	LC81840322013175LGN00
Spacecraft Identifier	LANDSAT_8
Sensor Identifier	OLI_TIRS
Station Identifier	LGN
WRS Path	184
WRS Row	32
Date Acquired	2013-06-24
Data Type	L1T
Image Quality OLI	9
Image Quality TIRS	9
Cloud Cover	5.02
Sun Elevation	66.23572837
Sun Azimuth	128.76382432
Corner Upper Left Latitude Product	41.33450
Corner Upper Left Longitude Product	21.14102
Corner Upper Right Latitude Product	41.29920
Corner Upper Right Longitude Product	23.85340
Corner Lower Left Latitude Product	39.34255
Corner Lower Left Longitude Product	21.13693
Corner Lower Right Latitude Product	39.30964
Corner Lower Right Longitude Product	23.77083

Χαρακτηριστικά Δεδομένων	Τιμές χαρακτηριστικών
Landsat Scene Identifier	LC81840322013207LGN00
Spacecraft Identifier	LANDSAT_8
Sensor Identifier	OLI_TIRS
Station Identifier	LGN
WRS Path	184
WRS Row	32
Date Acquired	2013-07-26
Data Type	L1T
Image Quality OLI	9
Image Quality TIRS	9
Cloud Cover	2.42
Sun Elevation	62.47896988
Sun Azimuth	132.86429669
Corner Upper Left Latitude Product	41.39127
Corner Upper Left Longitude Product	21.11603
Corner Upper Right Latitude Product	41.35561
Corner Upper Right Longitude Product	23.86663
Corner Lower Left Latitude Product	39.28311
Corner Lower Left Longitude Product	21.11247
Corner Lower Right Latitude Product	39.24999
Corner Lower Right Longitude Product	23.77890

Χαρακτηριστικά Δεδομένων	Τιμές χαρακτηριστικών
Landsat Scene Identifier	LC81840322013271LGN00
Spacecraft Identifier	LANDSAT_8
Sensor Identifier	OLI_TIRS
Station Identifier	LGN
WRS Path	184
WRS Row	32
Date Acquired	2013-09-28
Data Type	L1T
Image Quality OLI	9
Image Quality TIRS	9
Cloud Cover	18.34
Sun Elevation	44.91013328
Sun Azimuth	155.50122920
Corner Upper Left Latitude Product	41.39127
Corner Upper Left Longitude Product	21.11603
Corner Upper Right Latitude Product	41.35561
Corner Upper Right Longitude Product	23.86663
Corner Lower Left Latitude Product	39.28311
Corner Lower Left Longitude Product	21.11247
Corner Lower Right Latitude Product	39.24999
Corner Lower Right Longitude Product	23.77890

Χαρακτηριστικά Δεδομένων	Τιμές χαρακτηριστικών
Landsat Scene Identifier	LC81840322013175LGN00
Spacecraft Identifier	LANDSAT_8
Sensor Identifier	OLI_TIRS
Station Identifier	LGN
WRS Path	184
WRS Row	33
Date Acquired	2013-06-24
Data Type	L1T
Image Quality OLI	9
Image Quality TIRS	9
Cloud Cover	0.83
Sun Elevation	66.88331916
Sun Azimuth	125.54510965
Corner Upper Left Latitude Product	39.90182
Corner Upper Left Longitude Product	20.71339
Corner Upper Right Latitude Product	39.87797
Corner Upper Right Longitude Product	23.36915
Corner Lower Left Latitude Product	37.90670
Corner Lower Left Longitude Product	20.72130
Corner Lower Right Latitude Product	37.88448
Corner Lower Right Longitude Product	23.303821

Χαρακτηριστικά Δεδομένων	Τιμές χαρακτηριστικών
Landsat Scene Identifier	LC81840322013207LGN00
Spacecraft Identifier	LANDSAT_8
Sensor Identifier	OLI_TIRS
Station Identifier	LGN
WRS Path	184
WRS Row	33
Date Acquired	2013-07-26
Data Type	L1T
Image Quality OLI	9
Image Quality TIRS	9
Cloud Cover	2.10
Sun Elevation	63.22394012
Sun Azimuth	130.21301157
Corner Upper Left Latitude Product	39.96122
Corner Upper Left Longitude Product	20.68855
Corner Upper Right Latitude Product	39.93710
Corner Upper Right Longitude Product	23.38523
Corner Lower Left Latitude Product	37.84716
Corner Lower Left Longitude Product	20.69766
Corner Lower Right Latitude Product	37.82477
Corner Lower Right Longitude Product	23.31560

Χαρακτηριστικά Δεδομένων	Τιμές χαρακτηριστικών
Landsat Scene Identifier	LC81840322013271LGN00
Spacecraft Identifier	LANDSAT_8
Sensor Identifier	OLI_TIRS
Station Identifier	LGN
WRS Path	184
WRS Row	33
Date Acquired	2013-09-28
Data Type	L1T
Image Quality OLI	9
Image Quality TIRS	9
Cloud Cover	0.92
Sun Elevation	46.08882867
Sun Azimuth	154.41839645
Corner Upper Left Latitude Product	39.96122
Corner Upper Left Longitude Product	20.68504
Corner Upper Right Latitude Product	39.93717
Corner Upper Right Longitude Product	23.38173
Corner Lower Left Latitude Product	37.84715
Corner Lower Left Longitude Product	20.69425
Corner Lower Right Latitude Product	37.82484
Corner Lower Right Longitude Product	23.31219



Πίνακας αποτελεσμάτων εκτέλεσης των σεναρίων και υπολογισμού δεικτών.

		REF-Σενάριο αναφοράς	DI-Σενάριο ελλειμματικής άρδευσης	RF-Σενάριο περιορισμένης λίπανσης	DIRF-Συνδυαστικό σενάριο	PA-Σενάριο γεωργίας ακριβείας
Συνολική έκταση ανά καλλιέργεια (ha)	Βαμβάκι	99,643.45				
	Αραβόσιτος	36,201.52				
	Μηδική	19,405.29				
	Σιτάρι	210,202.62				
<b>FOOD</b>						
Απόδοση καλλιεργείων (tn/ha)	Βαμβάκι	3.04	2.72	3.04	2.72	3.12
	Αραβόσιτος	11.50	10.53	10.92	10.27	11.50
	Μηδική	10.32	9.54	10.32	9.54	10.32
	Σιτάρι	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40
Τιμή παραγωγής ανά καλλιέργεια (€/kg)	Βαμβάκι	0.43				
	Αραβόσιτος	0.20				
	Μηδική	0.18				
	Σιτάρι	0.22				
Συνολικά έσοδα €	Βαμβάκι	130,098,294.0	116,474,335.0	130,098,294.0	116,474,335.0	133,867,915.4
	Αραβόσιτος	83,246,284.6	76,250,056.9	79,061,109.9	74,328,708.4	83,246,284.6
	Μηδική	36,046,762.4	33,333,767.8	36,046,762.4	33,333,767.8	36,045,107.0
	Σιτάρι	157,112,924.1	157,112,924.1	157,112,924.1	157,112,924.1	157,112,924.1
Αξία μέσης ετήσιας γεωργικής παραγωγής (€)		406,504,265.1	383,171,083.8	402,319,090.4	381,249,735.3	410,272,231.1
<b>ENERGY</b>						
Παραγόμενη Βιομάζα (tn/ha)	Βαμβάκι	7.16	6.44	7.16	6.44	7.35
	Αραβόσιτος	19.84	18.24	18.84	17.78	19.84
	Μηδική	17.83	16.00	17.83	16.00	17.83
	Σιτάρι	7.99	7.99	7.99	7.99	7.99
Ετήσια υπολείμματα για παραγωγή βιοαιθανόλης (kg)		90,570,496.9	83,691,997.8	86,038,161.0	81,612,495.8	90,570,496.9
Απόδοση σε βιοκάυσιμο (l/kg)		0.50				
Δυνητική ετήσια παραγωγή βιοκάυσιμου από αραβόσιτο (m3)		45,285.2	41,846.0	43,019.1	40,806.2	45,285.2
Πυκνότητα βιοαιθανόλης στους 20 °C (kg/l)		0.79				

Μέση ετήσια ποσότητα παραγόμενης βιοαιθανόλης (tn)		35,775.3	33,058.3	33,985.1	32,236.9	35,775.3
Αξία παραγόμενης βιοαιθανόλης (€/tn)		500				
Αξία παραγόμενης βιοαιθανόλης (€)		17,887,673.1	16,529,169.6	16,992,536.8	16,118,467.9	17,887,673.1
Δυνητική ετήσια παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας (kWh)	Σμόκοβο	5,541,300.4	3,878,910.3	5,541,300.4	3,878,910.3	5,345,351.8
	Πλαστήρας	106,122,915.3	93,050,167.3	106,122,915.3	93,050,167.3	112,380,136.8
	Σύνολο	111,664,215.8	96,929,077.6	111,664,215.8	96,929,077.6	117,725,488.6
Αξία ισοδύναμης οικιακής ηλεκτρικής κατανάλωσης (€)		11,447,815.4	9,937,169.0	11,447,815.4	9,937,169.0	12,069,217.1
Μέση ετήσια ενέργεια αντλήσεων αρδευτικού νερού (kWh)		425,195,704.4	310,656,662.3	425,195,704.4	310,656,662.3	436,238,065.9
Κόστος ενέργειας αρδευτικών αντλήσεων (€)		27,263,548.6	19,919,305.2	27,263,548.6	19,919,305.2	27,971,584.8
<b>LAND</b>						
Μέσο ετήσιο φορτίο φερτών στην έξοδο (tn)		434,016.84	426,422.45	433,788.93	426,267.20	431,755.81
Μέση ετήσια ένταση διάβρωσης (tn/ha)		1.350	1.336	1.350	1.336	1.344
<b>WATER</b>						
Μέσες ετήσιες απολήψεις άρδευσης (m <sup>3</sup> )		1,020,945,278.2	740,140,408.8	1,020,945,278.2	740,140,408.8	1,048,860,400.9
Αξία αρδευτικού νερού (€/m <sup>3</sup> )		0.067				
Αξία ετήσιου αρδευτικού νερού (€)		51,302,500.2	37,192,055.5	51,302,500.2	37,192,055.5	52,705,235.1
Μέσες ετήσιες απολήψεις άρδευσης από τον αβαθή υπόγειο υδροφόρα (hm <sup>3</sup> )		832,219,838.2	608,032,600.8	832,219,838.2	608,032,600.8	853,840,927.5
Μέση ετήσια ποσότητα αναπλήρωσης αβαθή υδροφόρα (hm <sup>3</sup> )		961,518,663.5	914,036,260.4	960,352,800.9	914,142,247.9	970,103,651.6

Συνολικές ετήσιες απολήψεις νερού (m3)	1,109,723,128.5	804,500,444.3	1,109,723,128.5	804,500,444.3	1,140,065,653.1
Φυσική διαθεσιμότητα (m3)	961,518,663.5	914,036,260.4	960,352,800.9	914,142,247.9	970,103,651.6
Τεχνητή διαθεσιμότητα (m3)	200,000,000.0	200,000,000.0	200,000,000.0	200,000,000.0	200,000,000.0
WEI απλοποιημένος	0.96	0.72	0.96	0.72	0.97
Μέση ετήσια ποσότητα εφαρμοζόμενου Ν στη λεκάνη (kg)	55,538,093.3	55,538,093.3	47,215,624.1	47,215,624.1	49,017,592.8
Αξία μέσης ετήσιας εφαρμοζόμενης λίπανσης (€/kg)	1.3				
Αξία μέσης ετήσιας εφαρμοζόμενης λίπανσης (€)	72,199,521.3	72,199,521.3	61,380,311.3	61,380,311.3	63,722,870.6
Μέση ετήσια ένταση κατείδυσης NO <sub>3</sub> κάτω από το εδαφικό προφίλ (kg/ha)	24.22	23.64	18.22	17.94	14.28
Εκτέλεση σεναρίων με περιορισμένα αρχικά αποθέματα αβαθή υδροφορέα					
Μέσες ετήσιες απολήψεις άρδευσης (m3)	617,795,315.1	511,705,535.8	617,795,315.1	509,291,265.1	841,191,075.3
Μέσες ετήσιες απολήψεις άρδευσης από τον αβαθή υπόγειο υδροφορέα (m3)	427,103,451.8	378,209,604.5	427,103,451.8	376,629,803.8	645,102,819.6