ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

Ανάπτυξη μεθοδολογίας βέλτιστης χωροθέτησης δικτύου υδρομετρικών σταθμών στην Αττική με χρήση μεθόδων GIS

Αιμιλία – Παναγιώτα Θεοχάρη

Επιβλέπων: Ε. Μπαλτάς, Καθηγητής

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

Αθήνα, Φεβρουάριος 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων Καθηγητή της σχολής Πολιτικών μηχανικών του Ε.Μ.Π. κ. Ευάγγελο Μπαλτά, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ μ΄ ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, μέσα από το οποίο έλαβα πολλές γνώσεις, καθώς επίσης και για την πολύτιμη βοήθειά του, τις συμβουλές του και το χρόνο που αφιέρωσε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας, αλλά και για τις πολύτιμες γνώσεις που μου μετέδωσε στον τομέα των υδατικών πόρων κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα της σχολής Πολιτικών μηχανικών του Ε.Μ.Π. Ελισάβετ Φελώνη, για την στήριξη, τις συμβουλές και την πολύτιμη βοήθειά της καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, όπως επίσης και τον τοπογράφο μηχανικό MSc του Ε.Μ.Π, Απόλλωνα Μπουρνά, ο οποίος συνέβαλε σε μεγάλο βαθμό στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω επίσης στις ευχαριστίες μου τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Βασίλειο Τσιχριντζή και την Επίκουρη Καθηγήτρια κ. Αικατερίνη Νάνου, οι οποίοι αποτελούν τα μέλη της τριμελούς επιτροπής και από τους οποίους έχω αποκτήσει χρήσιμες γνώσεις κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την υπάλληλο Πολιτικό Μηχανικό του Υ.Π.Ε.Χ.Ω.Δ.Ε κ. Μαρία Ντζόιδου για τα δεδομένα που μου παραχώρησε προκειμένου να ολοκληρώσω τη διπλωματική μου εργασία, και τη φίλη μου Κατερίνα Αντωνοπούλου, η οποία βοήθησε πάρα πολύ στην εύρεση απαραίτητων δεδομένων.

Θα ήθελα ακόμη να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου και στον αδερφό μου που είναι δίπλα μου και με στήριζαν διαρκώς όλη αυτή την περίοδο και ξεπερνούσα με τη βοήθειά τους κάθε δυσκολία. Τέλος, δεν μπορώ να μην ευχαριστήσω τους φίλους μου Ανδρεανή και Τάσο, οι οποίοι ήταν δίπλα μου όποτε τους χρειαζόμουν και ζητούσα τη βοήθειά τους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ iii

ΠΕΡΙΛΗΨΗ vii

EXTENDED ABSTRACT viii

Introduction viii

Study area and Data used ix

Methodology x

Results and Discussion xv

Conclusions – Future Research xx

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1

1.1 ΓΕΝΙΚΑ 1

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 2

1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 3

2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ 4

2.1 Λεκάνη Σαρανταπόταμου 4

2.2 Λεκάνη Ερασίνου 7

2.3 Λεκάνη Εσχατιάς 9

2.4 Λεκάνη Ραφήνας 12

2.5 Λεκάνη Χάραδρου 14

2.6 Λεκάνη Ραπεντώσας 17

2.7 Λεκάνη Γιαννούλας 19

2.8 Πλημμυρικά Φαινόμενα στις περιοχές μελέτης 22

3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ-ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ 26

3.1 Ανάλυση και επεξεργασία Δεδομένων 26

3.1.1 Στοιχεία περιοχής μελέτης 26

3.1.2 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) 26

3.1.3 Κάλυψη γης (CORINE Land Cover) 37
3.2 Μεθοδολογία Πολυκριτηριακής Ανάλυσης 37
3.2.1 Πολυκριτηριακή Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA) 38
3.2.2 Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP) 41
3.2.3 Κριτήρια χωροθέτησης Δικτύου Υδρομετρικών Σταθμών 46
3.2.4 Το πρόσθετο «Easy AHP» του QGIS 60
4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ 65
4.1 Σύγκριση βαρών βάσει 4 σεναρίων 65
4.2 Αποτελέσματα χωροθέτησης στη λεκάνη Σαρανταπόταμου 66
4.3 Αποτελέσματα χωροθέτησης στη λεκάνη Ερασίνου 68
4.4 Αποτελέσματα χωροθέτησης στη λεκάνη Εσχατιάς 71
4.5 Αποτελέσματα χωροθέτησης στη λεκάνη Ραφήνας 73
4.6 Αποτελέσματα χωροθέτησης στη λεκάνη Χάραδρου 75
4.7 Αποτελέσματα χωροθέτησης στη λεκάνη Ραπεντώσας 77
4.8 Αποτελέσματα χωροθέτησης στη λεκάνη Γιαννούλα 80
4.9 Ανάλυση ευαισθησίας των κριτηρίων χωροθέτησης στη λεκάνη απορροής της Εσχατιάς 82
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 84
5.1 Σύνοψη 84
5.2 Συμπεράσματα 84
5.2.1 Γενικά 84
5.2.2 Ειδικά 85
5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα 86
Βιβλιογραφικές Αναφορές 87

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει μια μέθοδο βασισμένη στα Γεωγραφικά Συστημάτα Πληροφοριών (GIS), συνδυάζοντας τα με το μεθοδολογικό υπόβαθρο της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης, για τη χωροθέτηση ενός βέλτιστου δικτύου υδρομετρικών σταθμών στα σημαντικότερα ρέματα της Αττικής, ως ένα βασικό μέτρο πρόληψης έναντι του υπαρκτού πλημμυρικού κινδύνου στις γειτονικές κατοικημένες ή ημιαγροτικές περιοχές. Οι περιοχές εφαρμογής, συγκεκριμένα, είναι: η λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου, η λεκάνη του ρέματος Γιαννούλα, της Εσχατιάς, του Ερασίνου, της Ραπεντώσας, του Χάραδρου και της Ραφήνας. Για την υλοποίηση της εργασίας εξετάζονται χωριστά οι παραπάνω λεκάνες απορροής ως προς τα χαρακτηριστικά του αναγλύφου (μέσω του ψηφιακού μοντέλου εδάφους), τις χρήσεις γης, το υδρογραφικό δίκτυο, τις κλίσεις του εδάφους και άλλα στοιχεία που είναι απαραίτητα για τη χωροθέτηση. Έχοντας εξετάσει τα παραπάνω στοιχεία, γίνεται λήψη αποφάσεων πολλαπών κριτηρίων (MCDM) για τις καλύτερες θέσεις χωροθέτησης των υδρομετρικών σταθμών, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο σύγκρισης ανά ζεύγη «Analytical Hierarchical Process» (AHP). Τελικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την πολυκριτηριακή ανάλυση σε περιβάλλον ArcGIS, για κάθε περιοχή μελέτης. Συγκεκριμένα ταξινομούνται οι προτεινόμενες θέσεις με βάση το βαθμό επίδοσής τους (final score, FS) και από αυτές τελικά προτείνεται η/οι καταλληλότερη/ες, κατά περίπτωση. Τέλος, ενδεικτικά για τη λεκάνη απορροής του ρ. Εσχατιάς πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας στα προσδιορισμένα ως «βέλτιστα» βάρη για δύο κριτήρια, το κατά το σχεδιασμό σημαντικότερο και το λιγότερο σημαντικό. Όπως αναμενόταν, τα αποτελέσματα διαφοροποιήθηκαν σε μικρό βαθμό, τόσο ως προς το μέγιστο βαθμό επίδοσης, όσο και ως προς τις προτεινόμενες θέσεις.

Λέξεις – κλειδιά: δίκτυο υδρομετρικών σταθμών, Αττική, πλημμύρες, ΣΓΠ, Πολυκριτηριακή ανάλυση

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The lack of adequate meteo-hydrological data affects the ability to model, predict and plan for catastrophic events such as floods and droughts which have obvious negative impacts on public health and socio-economic aspects (Hong et al., 2016). The collection of stream flow data that are accurate and representative of the water resources of a region is necessary. The monitoring tools used to measure the flow rate and the stage of the streams, are the surface stream gauge stations. The objective of a Hydrological Station Network is its ability to address all of the above mentioned concerns, by providing timely, quantitative and comparable information and being a comprehensive, comprehensible and effective network that provides coverage in all river basins where flow data are required. The overall site of the Hydrological Stations depends on the specific purpose of recording the stream flow. This purpose may be to study the hydrology of a region, the floods prevention, the right design and technical works design such as dams, bridges. The need to monitor water is also in line with the objectives of the European directive. Directive 2007/60 / EK was created following the devastating floods that hit the Europe during 1998-2002. The hydrological and flood regime in Europe is varied due to the variability of the relief and the climate between the regions. So severe floods have been observed both in residential areas and in cultivated land. More specifically, Greece suffers from flood events due to the strong geographic variability of climatic data due to coexistence of developed coastline and horizons. In Attica, floods over the past 50 years have led to the loss of 96 human lives in six different flood events. It is a fact that flood risk is exacerbated by the extreme interference of the anthropogenic environment into the natural characteristics of a basin, thus often leading to the production of insoluble flood-related problems in order to management them.

This study presents a method based on Geographical Information Systems (GIS) for the location of an optimal Hydrological Station Network in some streams of Attica where there is a flood hazard in the neighboring residential areas. As the study area, some Attica basins were chosen, as Attica is an area that has historically been hit by a series of major and devastating floods. Extreme rainfalls in the Attica region, despite

its dry climate, show great tensions compared to other regions of the country, for small time scales, thus increasing the likelihood of flood events. The multi-criteria decision-making (MCDM) for the best sites installation of hydrological stations is made, using the pairwise comparisons of the Analytical Hierarchical Process (AHP), developed by Saaty. The need for an elementary forecast of flood phenomena for prevention, particularly in the Attica region, where the problem is more pronounced due to geomorphologic, meteorological and anthropogenic reasons, becomes more pronounced, especially in residential areas and areas with intense industrial development.

Key-words: stage-gauge station network, Attiki, floods, GIS, MCDM

Study area and Data used

Seven basins were selected for study in Attica. The basin of Sarantapotamos, Giannoula, Eschatia, Erasinos, Rapedosa, Haradros and Rafina. The criteria for the selection of the above basins are based on the fact that they have a long hydrographic network, they are morphologically diverse and face severe flood problems after intense rainfall. The absolute maximum daily rainfall in Attica is almost 23% of the corresponding annual average. The average annual rainfall is 376.1 mm and the average annual number of rain days 99 and it is 3-5 times lower than in other parts of western Greece, with run-off rates also lower than those in the western part of the country. The basins cover an area of:

- 310 km^2 for Sarantapotamos
- 153 km^2 for Erasinos
- 72 km^2 for Eschatia
- 123 km^2 for Rafina
- 64 km^2 for Haradros
- 39 km^2 for Rapedosa
- 129 km^2 for Giannoula

As gedard to the data used in the present study, initially normalized raster files were granted by Ktimatologio A.E that are the Digital Elevation Model (DEM) for the Attica region. The DEM has a pixel size of 5.00m. Each DEM sign has dimensions in the ground of 4600m X 3600m, with a perimeter overlap of 300m, followed by a 1:

5000 scale ΕΓΣΑ87 distribution. The type of files is img. The geometric accuracy of the product is RMSEz ≤ 2,00m and the absolute accuracy ≤ 3,92m for a 95% confidence level. In order to display the study area in the ArcGIS environment, the shapefile that came from the site http://geodata.gov.gr/ was introduced, and contained the borders of local authorities of Attica. In addition from the same source, the shapefiles were provided with the settlements and the road network of Attica, as well as the historical floods of the area, which are necessary for the optimal positioning. Furthermore, for the construction of the land use map for all study basins, the shapefile was used from the https://land.copernicus.eu/acl_users site for 2012 land cover and introduced into ArcGIS. In order to create the color palette based on Corine standards, the .lyr file was downloaded from the site http://eidc.ceh.ac.uk/metadata/32533dd6-7c1b-43e1-b892-e80d61a5ea1d/corine-land-cover- legend-layer-file / view to file word. Through the symbology command, the layer file was linked to the shapefile.

Methodology

The aim of this study is the the optimal positioning of a Hydrological Station Network in the streams of Attica with multi-criteria analysis. For this purpose, multi-criteria decisions were made, following the methodology of the Analytical Hierarchy Process (AHP). It is generally considered that MCDA was launched in the early 1960s. Decision problems that include geographic data are referred to as geographic or spatial decision problems. Problems of spatial decisions often require that a large number of feasible alternatives must be evaluated on the basis of multiple criteria. Consequently, many real-world spatial problems can lead to multi-criteria decision-making (MCDM) based on the geographic information system (GIS). The problem addressed in this study is a spatial decision problem as it includes a large number of geographic data and is also based on GIS techniques for its solution.

Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) aims to develop standardized procedures that help decision-makers to solve various problems by linking factors associated with the problem. It is a process that combines and transforms geographic data (inputs) into a resulting decision (outflow), it defines a relationship between "input maps" and "output maps". Geographic information can be defined as georeferenced data processed in a form that is meaningful to the recipient. Data in the geographic

information system is usually organized by separate thematic maps referred to as a layer. Firstly, the general problems as well as the individual objectives are identified, criteria and alternatives are then identified. Criteria may be factors and restrictions related to the problem to be tested. The next phase relates to assessing the criteria and defining the preferences of decision-makers. After selecting the method of composing the criteria and determining the gravity coefficients, the final results for the alternatives are produced. Finally, the final proposals are based on the evaluation of alternative options.

There are many ways in which decision criteria can be combined into MCDM. The Weighted Linear Combination (WLC) and its variants require an aggregation of the weighted criteria. The Analytical Hierarchy Process (AHP) is an adoption of WLC. AHP was proposed by T.L. Saaty (Saaty, 1978, Saaty 1987) and is based on the principle that, for making a decision, people's experience and knowledge is as important as the available data. The implementation stages of the AHP method are:

1. Deconstruction of the problem studied in a hierarchical (or network) model, made up of its basic components, allowing for pairwise comparisons.
2. Comparative assessment of each component - criterion.
3. Composition of the evaluated criteria in order to produce the final results.
4. Find optimal / desired position.

The application of the method therefore includes two general phases, the structure of the hierarchy and the stage of evaluation of the individual criteria. The assessment stage is based on the idea of pairwise comparisons of different criteria according to the subjective (personal, empirical, bibliographic, field research, etc.) view of the researcher, as to the significance relationship that factors have between them. The pairwise comparisons is based on the fundamental comparison scale introduced by Saaty and shown in the following Table 1.

Table 1. Fundamental scale of pair comparison (Saaty, 1977)
(Samo Drobne and Anka Lisec, 2009)

Intensity of Importance	Definition
1	Equal importance
2	Equal to moderate importance
3	Moderate importance
4	Moderate to strong importance
5	Strong importance
6	Strong to very strong importance
7	Very strong importance
8	Very to extremely strong importance
9	Extreme importance

In Saaty's technique, weights come from a series of operations of a matrix of comparable pairs among the criteria. The comparisons concern the relative relevance of the two criteria related to the determination of suitability for the intended objective. To assess the weight of each criterion, the following procedure is followed by the QGIS program:

1. Column values of each matrix of comparable pairs are asummed.
2. Divide each matrix element with the sum of its column that was previously found.
3. Calculate the average of the data for each matrix sequence that occurred in the previous step

The resulting averages are the weights of the criteria (Samo Drobne and Anka Lisec, 2009). Follows a check on the consistency of the comparison of the criteria and the severity factors that have emerged. The consistency ratio should not overcomes 10% ($CR \leq 0.10$) in order to consider the hierarchy and the comparison between the primary factors and to accept the resulting weighting factors (Halkias, 2015). Saaty suggests that gravity coefficients should be reassessed by changing uterine elements if $CR \leq 0.10$ does not apply. The consistency ratio is calculated by the formula:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

A further procedure to be taken to arrive at the suitability map of the optimum positions of the Hydrological Station Network is to standardize the criteria by categorizing each criterion into a single regular grading scale. The categorization of criteria aims to create comparable sizes for each criterion (Halkias, 2015). Voogd

(1983) reviewed a variety of standardization processes, usually using minimum and maximum values as scaling points. The simplest is a linear scale like the following formula:

$$xi = \frac{(FVi - FVmin)}{(FVmax - FVmin)} * SR \text{ or } xi = 1 - \frac{(FVi - FVmin)}{(FVmax - FVmin)} * SR$$

The last step of the method involves creating, calculating the required level of information regarding the suitability of the areas for the optimal positioning of a Hydrological Station Network in specific basins. Therefore, the suitability map should be developed. The weighted linear combination (WLC) is incorporated into the QGIS environment according to equation:

$$FS = \Sigma wixi$$

In cases where the Boolean constraints also apply, the process can be modified by multiplying the FS value by the product coefficients of the constraints:

$$FS' = \Sigma wixi * \Pi ci$$

Thus, the total score for each alternative is multiplied by multiplying the significance of the weight attributed to each attribute by the scaled value given for that feature in the alternative, and then adding the products to all attributes. The scores are calculated for all alternatives and the one with the highest score is all selected.

The WMO (2010) recommended the density of a Hydrological Station Network according to the type of area as shown in the following Table 2.

Table 2. Density of Hydrological Station Network (2010)

Type	Density
Coastal	1 station *per* 2750km^2
Mountainous	1 station *per* 1000km^2
Hilly	1 station *per* 1875km^2
Plains	1 station *per* 1875km^2
Small islands (area<500km^2)	1 station *per* 1985km^2
Polar, arid	1 station *per* 20000km^2

The ideal gauge site satisfies the following criteria, many of which are defined in ISO 1100-1 (WMO-No. 1044, 2010):

I. The general course of the stream is straight for about 10 times the stream width, upstream and downstream from the gauge site.
II. The total flow is confined to one channel at all stages and no flow bypasses the site as subsurface flow.
III. The stream-bed is not subject to scour and fill and is relatively free of aquatic vegetation.
IV. Banks are permanent, high enough to contain floods, and are free of brush.
V. A pool is present upstream from the control at extremely low stages to ensure a recording of stage at extremely low flow, and to avoid high velocities at the streamward end of stage recorder intakes, transducers, or manometer orifice during periods of high flow. The sensitivity of the control should be such that any significant change in discharge should result in a measurable change in stage.
VI. The gauge site is far enough upstream from the confluence with another stream or from tidal effect to avoid any variable influence the other stream or the tide may have on the stage at the gauge site.

The site is readily accessible for ease in installation and operation of the gauging station.

Criteria that were used are:

1. Stations density
2. Distance from settlements
3. Distance from floods
4. Slopes
5. Distance from confluence with another stream

In order to have the weigths of criteria was used the Easy AHP, which provides Analytic Hierarchy Process (AHP) and Weighted Linear Combination (WLC) analysis in QGIS. Target audience is decision makers that work on suitability analysis for land use, agriculture, disaster management, environmetal resources etc. The user-friendly interface makes analysis easier by dividing operations to different steps (https://plugins.qgis.org/plugins/EasyAHP/).

The highest weight has the criterio of slopes 0.529, as it has the highest value in significance as the rest of the criterion. The weight for the distance from the

contributions is 0.303, for the distance from settlements the value is 0.112 and finally for the distance from the floods the value is 0.056.

Finally, Table 3 depicts the summary of the selected criteria, as well as, some special remarks considering the GIS-based AHP approach.

Table 3 Criteria and GIS-procedure

Factor(*)	**Standardization procedure**	**Constraints**	**Remarks**
1. Surface Slope	Eq. (3.4)		Technical Criterion of maximum importance
2. Distance from settlements	Eq. (3.4)	Boolean Map ‘1’ (>500m) ; ‘0’ (d<500)	Mosaic with “Euclidean distance”raster Flow accumulation layer for the upstream-downsteam identification
3. Distance from floods	Eq. (3.4)	Boolean Map ‘1’ (>1000m) ; ‘0’ (d<1000)	Based on the historic floods Mosaic with “Euclidean distance”raster layer Flow accumulation layer for the upstream-downsteam identification
4. Distance from confluence from another stream	Eq. (3.4)	Boolean Map ‘1’ (>250m) ; ‘0’ (d<250)	Technical Criterion Point Feauture class of confluence sites Mosaic with “Euclidean distance”raster layer
7. Elevation (station density)	Definition of station number		It is performed for the final selection of stations. The number of stations per zone is based on the values of Tab. 3.4 and positions of maximum score are finally selected for each basin.
8. River		Boolean Map ‘1’ (in channel) ; ‘0’ (out of channel)	

Results and Discussion

In figure 1 are repsented the statistics for the proposed locations of the hydrological stations for the seven basins:

- Basin of Sarantapotamos: most proposed locations are 1671 with a score of lower than 90%. The optimal locations have a score of more than 90% and

they are 317 in number. The majority of the optimum proposed locations are seen upstream of the basin in the western part of this.

- Basin of Erasinos: most proposed locations are 644 in number with a score of more than 90% and they are also the best seating positions.
- Basin of Esxatia: the optimum proposed locations are only 3 with a score of lower than 90%.
- Basin of Rafina: most proposed locations are 296 in number with a score of lower than 60%. Instead, the optimum proposed locations are only 6 with a score higher than 90%.
- Basin of Xaradros: most proposed locations are 321 in number with a score of lower than 90%. The best recommended positions are 54 with a score higher than 90%.
- Basin of Rapentosa: most proposed locations are 360 in number with a score of lower than 60%. Instead, the optimum proposed locations are 22 with a score of lower than 90%
- Basin of Giannoula: most proposed locations are 527 with a score of lower than 60%. The optimum proposed locations are 15 with a score higher than 90%

As concern the optimal locations, which have the highest score, are represented in figure 2. In most of the basins was installed one station, except for Sarantapotamos basin, which is a large basin and needed two stations. Similarly, at Xaradros basin were installed two hydrological stations, as well as at Erasinos basin were installed two stations. The one station at Erasinos basin was installed upstream the archaeological site of Vravrona in order to be allerted in case of flood. Finally, at Rapentosa basin the station was installed downstream of the barrier that shown in figure.

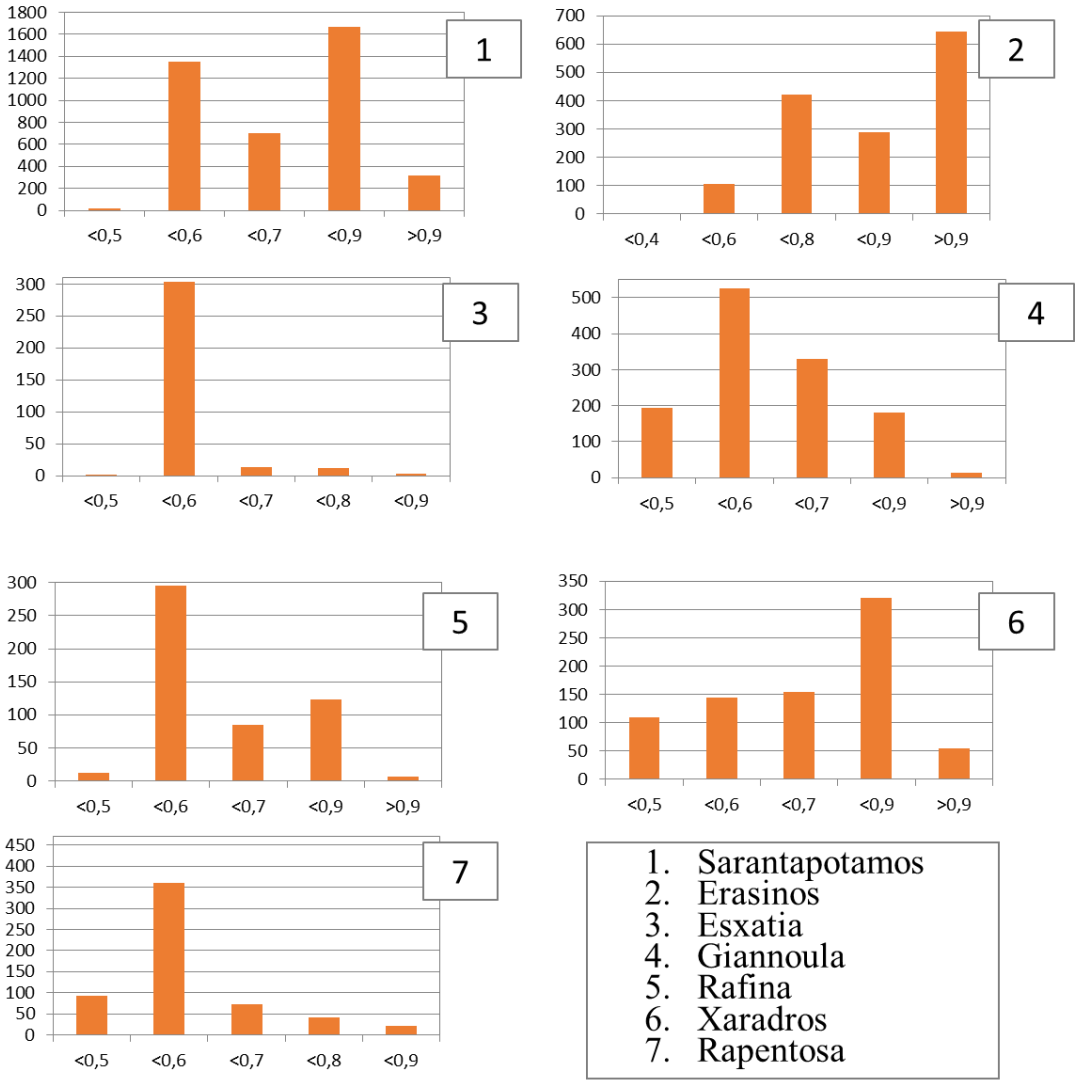


Figure 1: Number of positions per class of scores for the seven study basins.

After the previous procedure, a sensitivity analysis was performed for ± 5% on the slope criterion and the flood distance criterion for the Basin of Esxatia. The results from the sensitivity analysis are represented in figure 3, where are shown the new locations for per change of sensitivity analysis.

- In the case where the weight of slopes was reduced by 5%, it is observed that two new optimal proposed locations were obtained, as expected, as the elasticity of the slope along the stream increased. When the weight of slopes increased by 5%, then the rating of the proposed locations was reduced compared to the original ones.

- In the case of a 5% reduction in the weight of the flood criterion, as shown in the areas enclosed by the orange, yellow, gray and purple boxes, the proposed locations have a lower score. When the flood weight increased by 5%, a new extra optimal location, which is located in the area enclosed by the yellow dotted frame, emerged. Also, in the areas enclosed in the three frames shown in the figure in the case of + 5%, proposed locations are obtained with a lower score than the original ones.

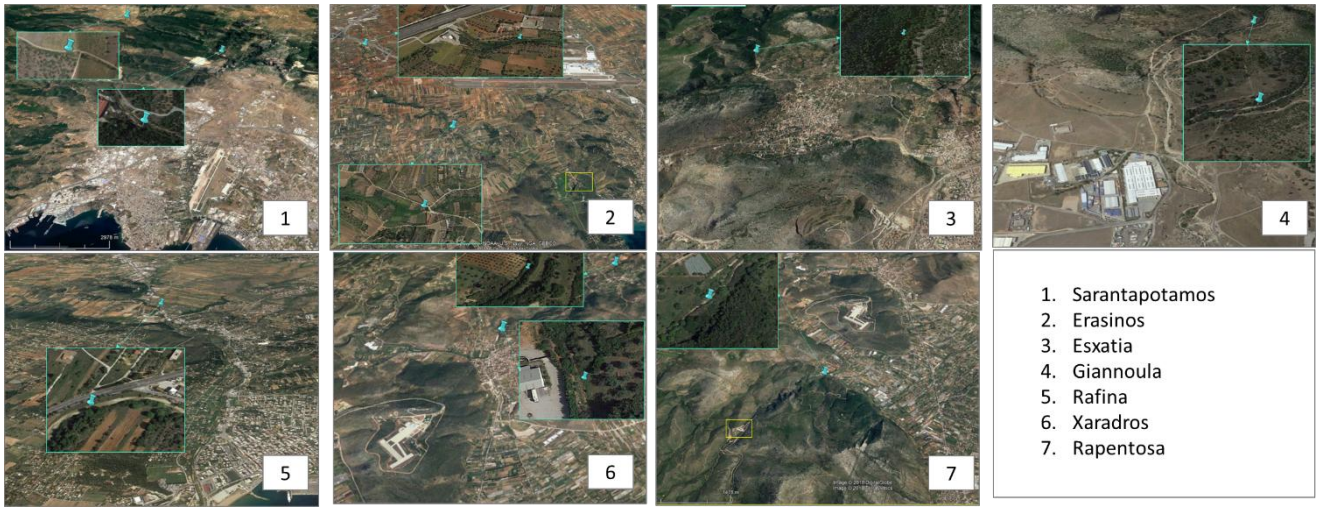


Figure 2: Optimum recommended positioning sites for hydrological stations at seven study basins

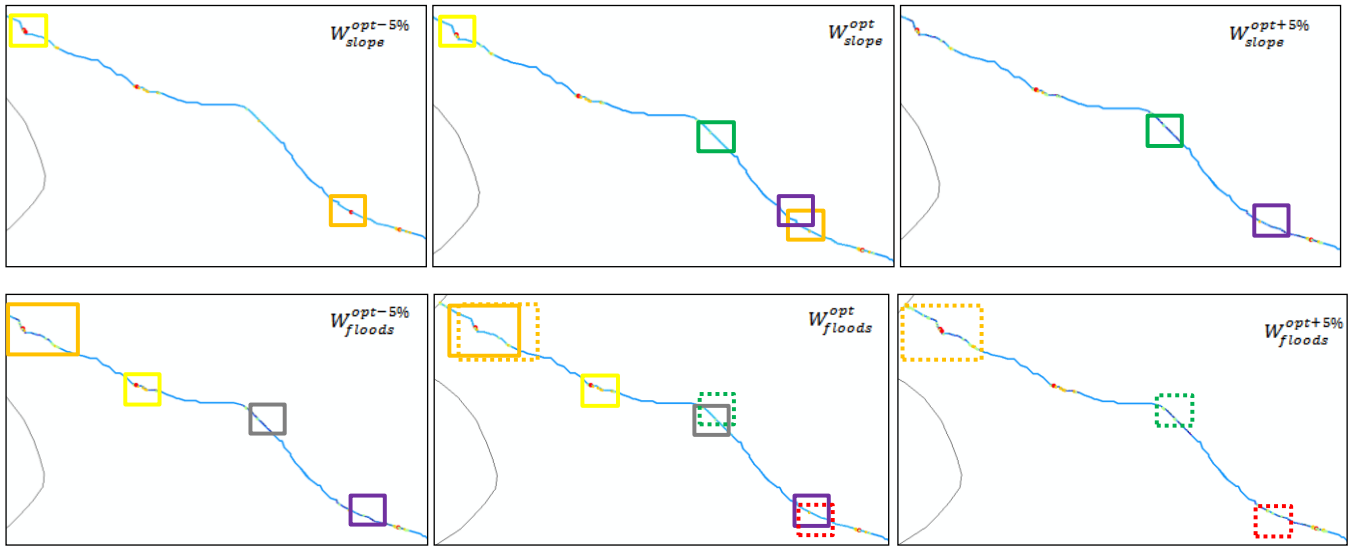


Figure 3: Sensitivity analysis results by varying weights for stream slopes criteria and distance from floodplains at the basin of Esxatia

Conclusions – Future Research

In this study, a methodology was developed for the optimal positioning of a network of hydrometer stations in seven basins of Attica using GIS methods. The methodology was based on multi-criteria analysis and particularly the Analytical Hierarchy (AHP) process, which is implemented for four criteria. These criteria concern the distances from settlements, the junction locations along mainstream waterfalls, the historic floods, as well as gradients along the mainstream, which are preferred to be mild. Therefore, initially, with the help of the Easy AHP tool, the criteria weights were calculated and the GIS-based procedure suggested the proposed hydrological station positions for all seven basins (best scores), according to the final score of the MCDM process. In addition, in order to examine what weights are decisive for the optimal site selection, a sensitivity analysis was made for a ± 5% change in the 'terrain slope raster' and 'flood field' criteria. The proposed locations are eventually depicted in the ArcGIS environment and through Google Earth.

Initially, it is concluded that it is particularly important to select the proposed criteria in the framework of the methodology development. In general, the location of hydrological stations, which are intended to alert in case of floods, it is necessary to be installed upstream the settlements for early prevention, away from contributions to other streams, in oder to avoid their impact in the flow regime, and finally upstream of floodplains. In addition, it is necessary to put some restrictions on the spatial planning process, such as, the general rule that hydrological stations should be installed along the main watercourse. The selection of the appropriate value in the scale (1-9) according to the significance of each criterion also plays a decisive role in exporting the weight because it is directly affected by the values which given by the decision maker. So it is necessary to have experience and integrated knowledge. Finally, a sensitivity analysis was conducted, as the change in the weight of a criterion for a percentage relative to the other criteria is quite decisive, because if this criterion is the most sensitive, then completely different positioning positions can occur.

Concerning the specific conclusions of this study, these are summarizes as follows:

- A large number of proposed hydrological site positions have been calculated for seven Attica basins and a satisfactory number of optimal recommended sites.
- The basin containing the top-ranking proposed station locations is Erasinos basin, which has 644 optimal suggested spatial locations with a score of more than 90%. Sarantapotamos follows, which has 317 optimal proposed positions, with the corresponding scores varing in values higher than 90%.
- The basins containing the lower-score among the optimal recommended station locations is Eschatia with three (3) optimal positioning locations (final score < 90%. Also, Rafina Basin includes 6 suitable locations with a score of higher than 90%.
- The basin area with the largest absolute number of optimal proposed positions is that of Erasinos, as the analyzed area (downstream of Attiki Odos) is mostly flat. Therefore, the criterion with the highest degree of influence leads to a higher performance for a large number of positions. Additionally, it is reported that the sites proposed for the area are two; the first station is located close to Attiki Odos and the downstream one is proposed at a distance of about 7 km upstream of the Archeological site of Vravrona.
- From the sensitivity analysis performed for the Basin of Eschaha and for a ± 5% change in the two highest and lower impact criteria, respectively, it was observed that the most sensitive criterion for changes is that of the water slope.

This study added a variety of findings and in this framework some suggestions for future research as proposed.

- With regard to the site-selection criteria, it is proposed to investigate the introduction of additional spatial criteria such as the level of cleaning and filling in the studied water stream, the dense vegetation. These data have not been included in the present work as in-situ exploration and design of the corresponding geospatial database is required.
- It is also recommended to use remote sensing data in corresponding applications for larger catchments. In this case, there is no error of the digitization of the stream or of the DEM-based process for the automatic

extraction, since the actual position of the water stream can be detected by the satellite product.

- Finally, a more detailed sensitivity analysis is proposed for the factors weighting of the design criteria, as well as, exploration using different methods for prioritizing the criteria, as the analyst- decision maker's knowledge and experience plays a key role in this approach.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η έλλειψη επαρκών υδρομετεωρολογικών δεδομένων επηρεάζει την ικανότητα μοντελοποίησης, πρόβλεψης και σχεδιασμού για καταστροφικά γεγονότα όπως πλημμύρες και ξηρασίες, οι οποίες έχουν αρνητικές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία και στις κοινωνικοοικονομικές πτυχές. Η συλλογή δεδομένων ροής ρέματος που είναι ακριβής και αντιπροσωπευτική των υδάτινων πόρων μιας περιοχής είναι αναγκαία. Τα εργαλεία παρακολούθησης λοιπόν που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του ρυθμού ροής και της στάθμης των υδατορευμάτων είναι οι σταθμοί μέτρησης επιφανειακών υδάτων. Ο στόχος ενός δικτύου παρακολούθησης υδρομετρικών σταθμών είναι η ικανότητά του να αντιμετωπίσει όλες αυτές τις ανησυχίες που προαναφέρθηκαν με την παροχή έγκαιρης ποσοτικής και συγκρίσιμης πληροφορίας και να αποτελεί ένα ολοκληρωμένο, κατανοητό και αποτελεσματικό δίκτυο που θα παρέχει κάλυψη σε όλες τις λεκάνες απορροής όπου απαιτούνται δεδομένα ροής. Η γενική θέση των υδρομετρικών σταθμών εξαρτάται από το συγκεκριμένο σκοπό που εξυπηρετεί η καταγραφής της ροής του ρέματος. Ο σκοπός αυτός μπορεί να αφορά τη μελέτη της υδρολογίας μιας περιοχής, την πρόληψη πλημμυρών, το σωστό σχεδιασμό και διαστασιολόγηση τεχνικών έργων όπως φράγματα, γέφυρες.

Η αναγκαιότητα παρακολούθησης των υδάτων είναι και στους στόχους της ευρωπαϊκής οδηγίας. Η οδηγία 2007/60/ΕΚ δημιουργήθηκε μετά από τις καταστροφικές πλημμύρες που έπληξαν τον Ευρωπαϊκό χώρο κατά το διάστημα 1998-2002. Το υδρολογικό και πλημμυρικό καθεστώς στην Ευρώπη είναι ποικίλο λόγω της μεταβλητότητας του αναγλύφου και του κλίματος μεταξύ των περιοχών. Έτσι έντονες πλημμύρες έχουν παρατηρηθεί τόσο σε κατοικημένες περιοχές, όσο και σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Πιο συγκεκριμένα, η Ελλάδα πλήττεται από πλημμυρικά γεγονότα εξαιτίας της έντονης γεωγραφικής μεταβλητότητας των κλιματικών στοιχείων λόγω της συνύπαρξης ανεπτυγμένης ακτογραμμής και ορογραφίας. Στην Αττική οι πλημμύρες τα τελευταία 50 χρόνια έχουν οδηγήσει στην απώλεια τουλάχιστον 96 ανθρώπινων ζωών σε έξι διαφορετικά πλημμυρικά γεγονότα. Είναι γεγονός ότι η πλημμυρική επικινδυνότητα επιτείνεται από την ακραία επέμβαση του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος στα φυσικά χαρακτηριστικά μιας λεκάνης απορροής,

οδηγώντας έτσι πολλές φορές στην παραγωγή δυσεπίλυτων, στην αντιμετώπιση και διαχείριση τους, πλημμυρικών προβλημάτων.

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η Αττική στο σύνολό της πρόκειται για περιοχή όπου ιστορικά έχει πληγεί από σειρά σημαντικών και καταστροφικών πλημμυρών. Οι ακραίες βροχοπτώσεις στην περιοχή της Αττικής, παρά το ξηρό κλίμα της περιοχής, εμφανίζουν μεγάλες εντάσεις, σε σχέση με άλλες περιοχές της χώρας για μικρές χρονικές κλίμακες αυξάνοντας έτσι τις πιθανότητες εμφάνισης πλημμυρικών γεγονότων. Αναφορικά με την υφιστάμενη κατάσταση, ο αριθμός των υδρομετρικών σταθμών που είναι εγκατεστημένοι και από τους οποίους κάποιοι μόνο βρίσκονται σε λειτουργία, είναι ελάχιστος. Η ανάγκη για στοιχειώδη πρόγνωση των πλημμυρικών φαινομένων με σκοπό την πρόληψη, συγκεκριμένα για την περιφέρεια της Αττικής, όπου το πρόβλημα είναι εντονότερο για γεωμορφολογικούς, μετεωρολογικούς αλλά και ανθρωπογενείς λόγους, καθίσταται εντονότερη, ειδικά σε οικιστικές περιοχές και περιοχές με έντονη βιομηχανική ανάπτυξη.

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει μια μέθοδο βασισμένη στα Γεωγραφικά Συστημάτα Πληροφοριών (GIS), συνδυάζοντας τα με το μεθοδολογικό υπόβαθρο της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης, για τη χωροθέτηση ενός βέλτιστου δικτύου υδρομετρικών σταθμών στα σημαντικότερα ρέματα της Αττικής, ως ένα βασικό μέτρο πρόληψης έναντι του υπαρκτού πλημμυρικού κινδύνου στις γειτονικές κατοικημένες ή ημιαγροτικές περιοχές. Συγκεκριμένα, η μεθοδολογία που αναπτύσσεται εφαρμόζεται για τη λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου, τη λεκάνη του ρέματος Γιαννούλα, της Εσχατιάς, του Ερασίνου, της Ραπεντώσας, του Χάραδρου και της Ραφήνας. Για την υλοποίηση της εργασίας εξετάζονται χωριστά οι παραπάνω λεκάνες απορροής ως προς τα χαρακτηριστικά του αναγλύφου (μέσω του ψηφιακού μοντέλου εδάφους), τις χρήσεις γης, το υδρογραφικό δίκτυο, τις κλίσεις του εδάφους και άλλα στοιχεία που είναι απαραίτητα για τη χωροθέτηση. Έχοντας εξετάσει τα παραπάνω στοιχεία, γίνεται λήψη αποφάσεων πολλαπών κριτηρίων (MCDM) για τις καλύτερες θέσεις χωροθέτησης των υδρομετρικών σταθμών, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο σύγκρισης ανά ζεύγη «Analytical Hierarchical Process» (AHP), η οποία αναπτύχθηκε από τον Saaty (1977). Τελικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την πολυκριτηριακή ανάλυση σε περιβάλλον ArcGIS, για κάθε περιοχή μελέτης. Συγκεκριμένα ταξινομούνται οι προτεινόμενες

θέσεις με βάση το βαθμό επίδοσής τους (final score, *FS*) και από αυτές τελικά προτείνεται η/οι καταλληλότερη/ες, κατά περίπτωση. Τέλος, ενδεικτικά για τη λεκάνη απορροής του ρ. Εσχατιάς πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας στα προσδιορισμένα ως «βέλτιστα» βάρη για δύο κριτήρια, το κατά το σχεδιασμό σημαντικότερο και το λιγότερο σημαντικό. Όπως αναμενόταν, τα αποτελέσματα διαφοροποιήθηκαν σε μικρό βαθμό, τόσο ως προς το μέγιστο βαθμό επίδοσης, όσο και ως προς τις προτεινόμενες θέσεις.

1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται αναφορά στην κατάσταση που επικρατεί στην Ευρώπη και στην Ελλάδα σχετικά με τα πλημμυρικά επεισόδεια και στη σημασία συλλογής δεδομένων ροής ρέματος από υδρομετρικούς σταθμούς ώστε να υπάρχει έγκαιρη ποσοτική και συγκρίσιμη πληροφορία για την αποφυγή πλημμυρικών καταστροφών. Επιπλέον στο ίδιο κεφάλαιο αναλύεται το αντικείμενο της εργασίας και η διάρθρωση της.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης σχετικά με τη μορφολογία, το υδρογραφικό δίκτυο, τις χρήσεις γης, τα κλιματικά χαρακτηριστικά , τη γεωλογία και την διοικητική οργάνωση για την κάθε λεκάνη απορροής που εξετάζεται.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αναλυτική περιγραφή των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και της επεξεργασία τους. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μεθολογία που αναπτύχθηκε για βέλτιστη χωροθέτηση του προτεινόμενου δικτύου υδρομετρικών σταθμών.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται η παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων της μεθολογίας που χρησιμοποιήθηκε. Παρουσιάζεται το προτεινόμενο δίκτυο των υδρομετρικών σταθμών και οι βέλτιστες θέσεις τοποθέτησής τους για κάθε λεκάνη απορροής σύμφωνα με τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται αναφορά στα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία και διακρίνονται σε γενικά και ειδικά και σε μια σύνοψη. Και τέλος γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στο πλαίσιο της χωροθέτησης νέων υδρομετρικών σταθμών στα ρέματα της Αττικής σε περιοχές που τίθενται σε κίνδυνο πλημμύρας, επιλέχθηκαν για μελέτη επτά λεκάνες απορροής. Η λεκάνη του Σαρανταπόταμου, του ρέματος Γιαννούλα, της Εσχατιάς, του Ερασίνου, της Ραπεντώσας, του Χάραδρου και της Ραφήνας. Τα κριτήρια επιλογής των παραπάνω λεκανών βασίζονται στο ότι αποτελούνται από μεγάλου μήκους υδάτινες γραμμές, παρουσιάζουν μορφολογική ποικιλία και αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα πλημμυρών ύστερα από έντονες βροχοπτώσεις. Το απόλυτο μέγιστο ημερήσιο ύψος βροχής στην Αττική αποτελεί σχεδόν το 23% του αντίστοιχου μέσου ετήσιου. Η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι 376.1 mm και ο μέσος ετήσιος αριθμός ημερών βροχής 99 και είναι 3-5 φορές χαμηλότερη απ' ότι σε άλλα μέρη της δυτικής Ελλάδας, με τους συντελεστές απορροής να είναι επίσης χαμηλότεροι από τους αντίστοιχους στο δυτικό τμήμα της χώρας (Βαχαβιώλος, 2011). Στη συνέχεια αναλύονται τα χαρακτηριστικά κάθε λεκάνης απορροής που επιλέχθηκε για μελέτη.

2.1 Λεκάνη Σαρανταπόταμου

Η συνολική λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου έχει έκταση 310 km^2 και περίμετρο 116310,5 m. Ορίζεται περιμετρικά από το όρος Πατέρας στα δυτικά, την Πάρνηθα στα ανατολικά, το όρος Κιθαιρώνας στα βορειοδυτικά, και τέλος στα βόρεια από το όρος Πάστρα. Ο Σαρανταπόταμος διασχίζει την κοιλάδα της Οινόης και το Θριάσιο Πεδίο και εκβάλει στον κόλπο της Ελευσίνας. Πριν την είσοδό του στο Θριάσιο πεδίο, αποτελείται από δύο επιμέρους υδατορεύματα, το ρέμα Πέλκες που διασχίζει την κοιλάδα της Οινόης και το ρέμα Αγίου Γεωργίου που διασχίζει νοτιότερα την ομώνυμη κοιλάδα. Η κύρια πηγή του Σαρανταπόταμου είναι στον Κιθαιρώνα κοντά στα Βίλια. Πρόκειται για το μεγαλύτερο ποτάμι της περιοχής με συνολικό μήκος περίπου 43 km, καθώς είναι ο αποδέκτης των απορροών των τριγύρω ορεινών όγκων. Τα κυριότερα ρέματα που συμβάλουν σε αυτό είναι το ρέμα Αγίου Βλασίου, το Ξηρόρεμα και το ρέμα Μεγάλο Κατερίνι (Κουτσογιάννης & Μαμάσης, 2001). Το ανάντη τμήμα της λεκάνης απορροής του Σαρανταπόταμου ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα της Αττικής (ΥΔ 06). Στο τμήμα αυτό δε υπάρχει αστική

ανάπτυξη, μόνο χωριά, με πιο σημαντικά τα Βίλια (1.269 κάτοικοι, 2011, ΕΛΣΤΑΤ[1]) και την Οινόη (765 κάτοικοι, 2001, ΕΛΣΤΑΤ). Αντιθέτως, στο κατάντη τμήμα του Σαρανταπόταμου παρατηρείται έντονη αστικοποίηση με κυριότερα κέντρα την Ελευσίνα, τον Ασπρόπυργο, τη Μάνδρα και τη Μαγούλα και συνολικό πληθυσμό περίπου 70.000 κατοίκους (σύμφωνα με την τελευταία απογραφή του 2011). Η περιοχή έχει εξελιχθεί σε ένα από τα σημαντικότερα βιομηχανικά κέντρα της Ελλάδος.

Όσον αφορά το υδρογραφικό δίκτυο, είναι αρκετά πυκνό και αποτελείται κυρίως από εποχιακής ροής χείμαρρους. Γενικά ο Σαρανταπόταμος χαρακτηρίζεται από εφήμερη ροή.

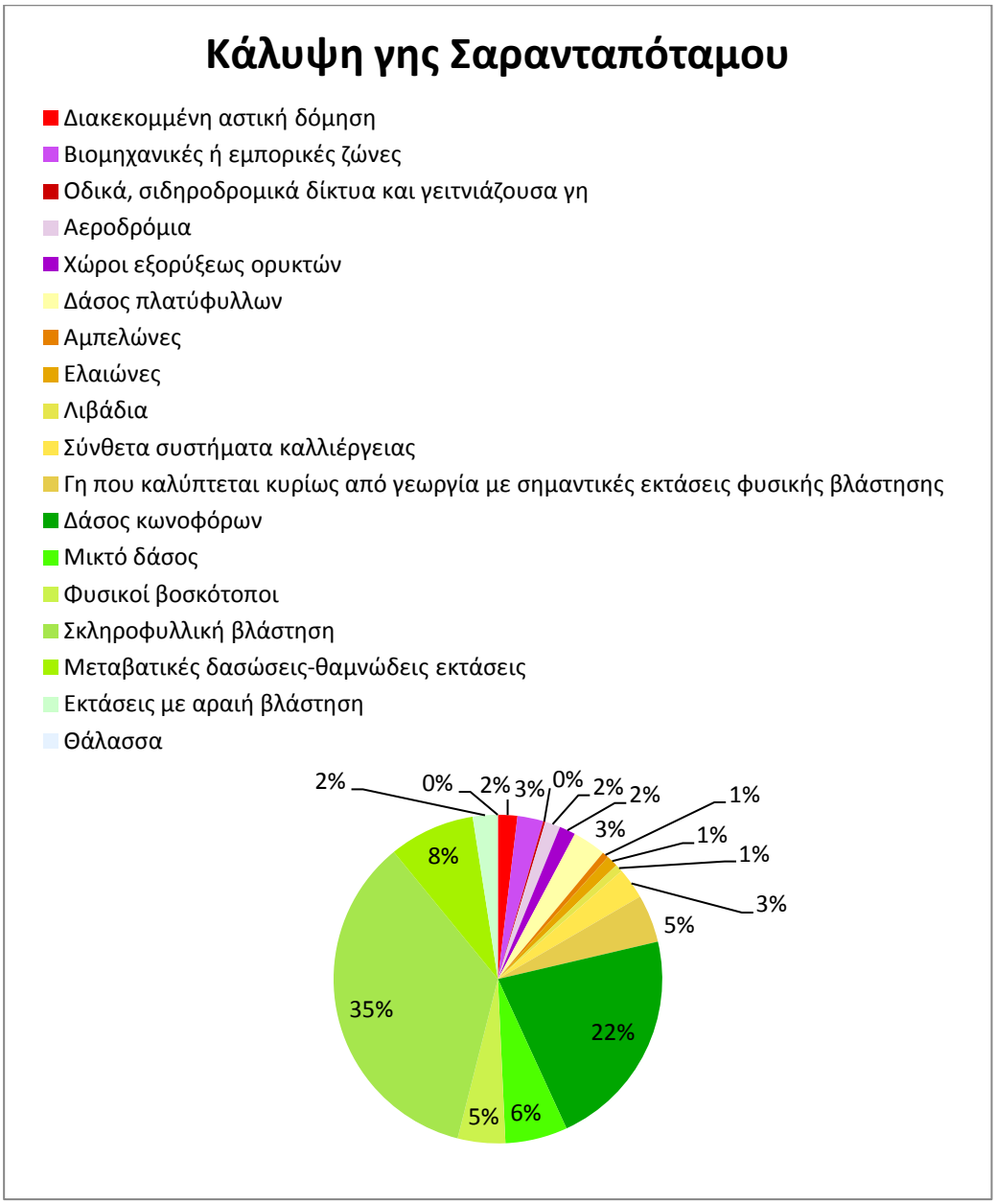
Από γεωλογική άποψη η λεκάνη χαρακτηρίζεται από υψηλή υδατοπερατότητα λόγω της καρστικοποίησης των ασβεστολιθικών πετρωμάτων που κυριαρχούν στην περιοχή. Συγχρόνως όμως παρατηρούνται και περιοχές με μέτρια ή χαμηλή υδατοπερατότητα όπου πρόκειται για ασβεστολιθικούς φακούς και αλλουβιακές προσχώσεις (Ζαρκαδούλας, 2014).

Σχετικά με τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής, το κλίμα χαρακτηρίζεται γενικώς μεσογειακό με εξαίρεση τα υψηλά σημεία της λεκάνης όπου είναι ορεινό. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κυμαίνεται από 300 έως 400 mm ετησίως ενώ οι μέρες βροχής από 50 έως 100 σε ένα έτος. Η χιονόπτωση είναι σπάνια στις παράκτιες περιοχές, ενώ αυξάνει στα υψηλότερα σημεία της λεκάνης. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 17˚ C και 19˚ C, ανάλογα με το υψόμετρο και την απόσταση από τη θάλασσα, ενώ το ετήσιο θερμομετρικό εύρος είναι περίπου 19˚ C (Ζαρκαδούλας, 2014).

Σύμφωνα με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους 5x5m το ελάχιστο υψόμετρο της λεκάνης είναι 0 m, το μέγιστο 1324,5m και το μέσο υψόμετρο 425,7m.

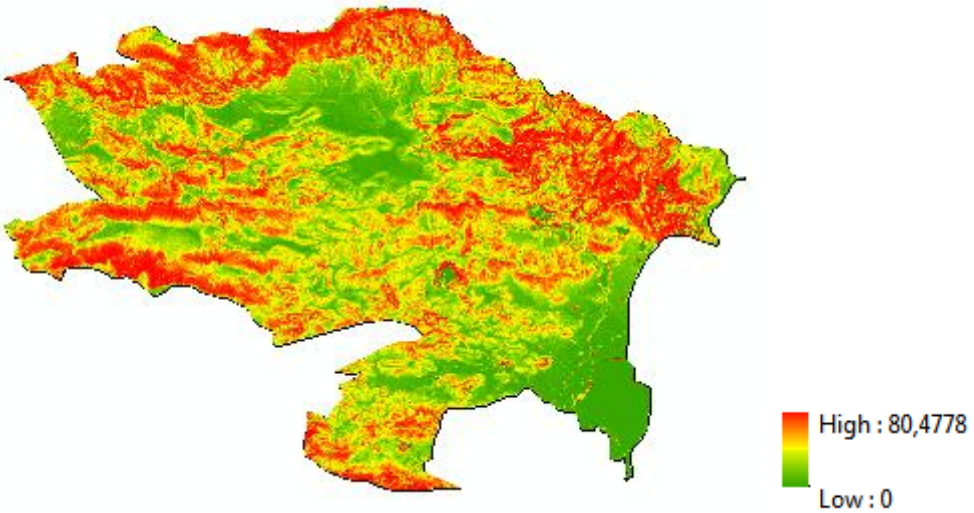
Για την κάλυψη γής σύμφωνα με το Corine 2012 προκύπτει ότι μεγαλύτερο ποσοστό της λεκάνης 35,13% καλύπτεται από θαμνώδεις σκληροφυλλική βλάστηση που περιλαμβάνει μακία και φρύγανα, ενώ ακολουθεί η κάλυψη γής από δάση κωνοφόρων με ποσοστό 21,80%. Στο παρακάτω Σχήμα 2.1 φαίνονται τα ποσοστά για κάθε κάλυψη γής στη λεκάνη του Σαρανταπόταμου.

[1] Ελληνική Στατιστική Αρχή (www.statistics.gr/)



Σχήμα 2.1: Κάλυψη γης στη λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου

Οι κλίσεις γης της λεκάνης φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 2.2. Η μέγιστη κλίση της περιοχής είναι 80°, ενώ η ελάχιστη 0° και η μέση κλίση είναι 13°. Παρατηρείται γενικά ότι η περιοχή αποτελείται από υψηλές κλίσεις στο βόρειο κομμάτι της λεκάνης, ενώ η υπόλοιπη περιοχή στο μεγαλύτερο κομμάτι της παρουσιάζει μέσες κλίσεις με κάποια σημεία να είναι πολύ χαμηλές τιμές στην κλίση τους.



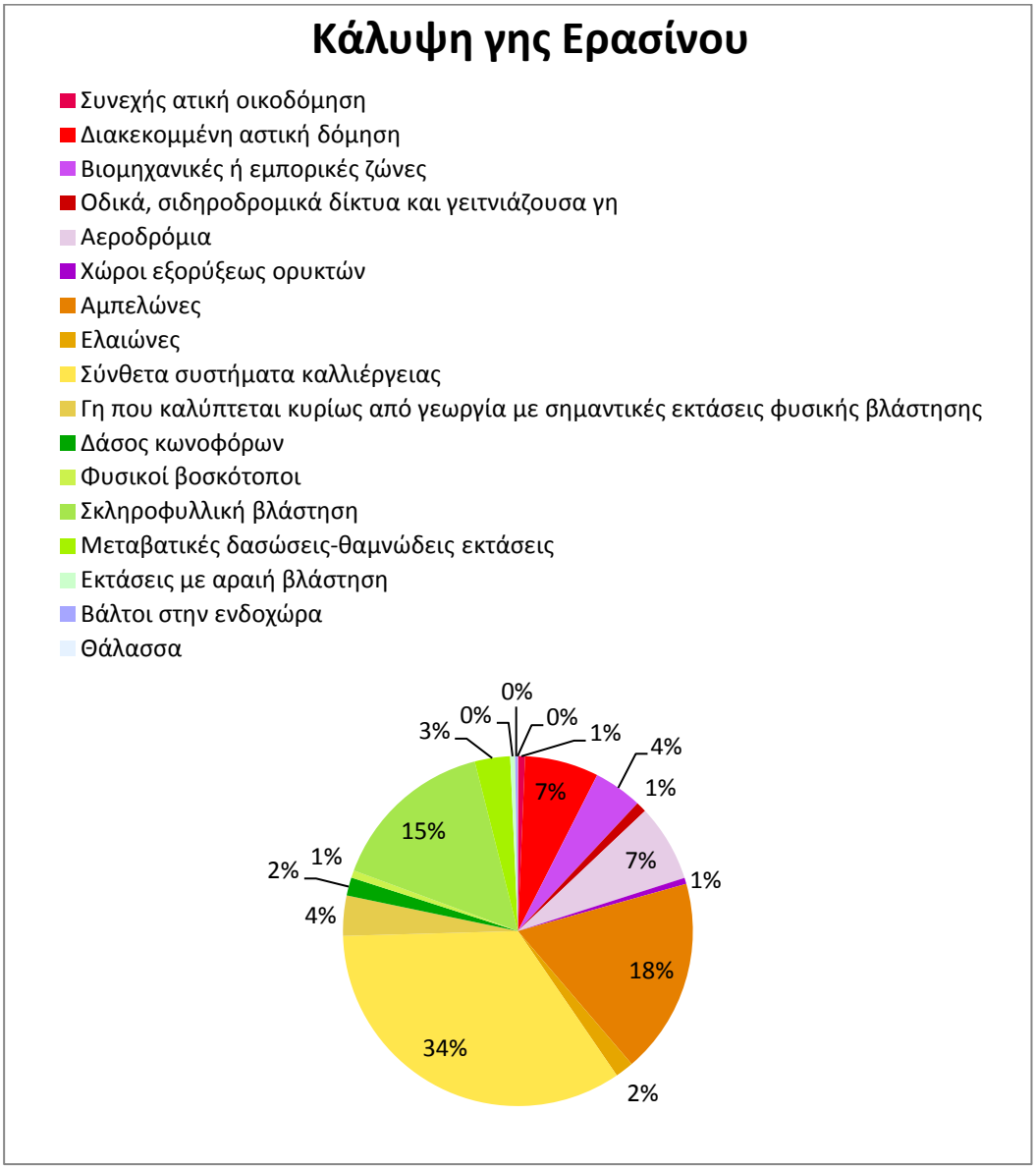
Σχήμα 2.2: Κλίσεις γης σε μοίρες για τη λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου

2.2 Λεκάνη Ερασίνου

Ο Ερασίνος βρίσκεται στην περιοχή των Μεσογείων και αποτελεί τον αποδέκτη της απορροής της κεντρικής περιοχής των Μεσογείων (ευρύτερη περιοχή Παιανίας, Κορωπίου, νότια ζώνη Σπάτων) και της νότιας περιοχής των Μεσογείων (Μαρκόπουλο, Κουβαράς). Το μήκος του ανάντι και κατάντη συμβολής είναι 8,2 km και σχηματίζεται στην περιοχή της Παιανίας από συμβολή ρεμάτων που ρέουν από τον Υμηττό και ρέει ανατολικά εκβάλλοντας στο Νότιο Ευβοϊκό κόλπο στην περιοχή της Βραυρώνας. Η συνολική λεκάνη του Ερασίνου έχει έκταση 153 km^2 και περίμετρο 59035,4m και οριοθετείται βόρεια από τον υδροκρίτη του ρέματος Ραφήνας, δυτικά από την οροσειρά του Υμηττού και νότια από τους αυχένες μεταξύ των υψωμάτων Ψηλόβραχος, Κορυφή, Μερέντα, Κερατοβούνι, Πάνειο Όρος, Στρογγυλοπούλα, Ζυγός και Κόντρα.

Όσον αφορά το υδρογραφικό δίκτυο, συγκεντρώνει την απορροή τριών βασικών ρεμάτων, του ρέματος Αγίου Γεωργίου του ρέματος Αγ. Κων/νου – Μαρκοπούλου και του ίδιου του Ερασίνου, που είναι και ο τελικός αποδέκτης. Η συμβολή Ερασίνου-Αγ.Γεωργιου πραγματοποιείται σε μικρή απόσταση από την εκβολή του στον όρμο Βραυρώνας. Η λεκάνη απορροής του Ερασίνου διακρίνεται σε τρεις ζώνες. Στο ανάντη τμήμα της λεκάνης υπάρχουν έντονες πτυχώσεις και μισγάγγειες στις κλιτύες του Υμηττού και έντονες κατά μήκος κλίσεις. Στο μεσαίο τμήμα της λεκάνης παρατηρούνται κώνοι αποθέσεων των φερτών των ανάντη χειμάρρων από τις εύφορες καλλιεργήσιμες περιοχές του κάμπου των Μεσογείων (πολεοδομικές

περιοχές Παιανίας, Κορωπίου, Καρελά, νότιο τμήμα Σπάτων, βόρειο Μαρκόπουλο). Τέλος, στο τρίτο, κατάντη τμήμα της λεκάνης απορροής παρουσιάζονται πτυχώσεις εδάφους με φυσικές βαθιές γραμμές και μικρές κοιλάδες και η κοίτη του ποταμού επανεμφανίζεται με διάκριση σε τρεις φυσικές μισγάγγειες (ΤΕΕ Ελλάδας, 2004).



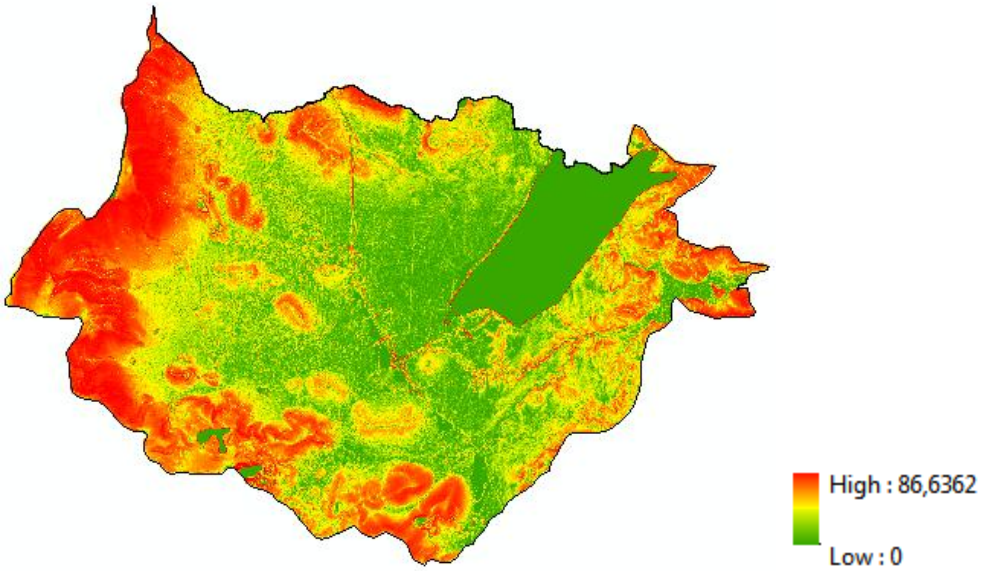
Σχήμα 2.3: Κάλυψη γης στη λεκάνη απορροής του Ερασίνου

Σχετικά με τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής, το κλίμα είναι εύκρατο Μεσογειακό με ξηρό και ζεστό καλοκαίρι και ήπιο και βροχερό χειμώνα. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 16,5^{o} και 19° C (Κασιμάτης, 2011).

Σύμφωνα με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους ανάλυσης 5x5m το ελάχιστο υψόμετρο της λεκάνης είναι -0,06 m, το μέγιστο 1019,8m και το μέσο υψόμετρο 170,1m.

Για την κάλυψη γής σύμφωνα με το Corine 2012 προκύπτει ότι μεγαλύτερο ποσοστό της λεκάνης (34.13%) καλύπτεται από σύνθετα συστήματα καλλιέργειας όπου αποτελούν ένα μωσαικό από μικρά αγροτεμάχια με διάφορες ετήσιες καλλιέργειες, λιβάδεια και μόνιμες καλλιέργειες, ενώ ακολουθεί η κάλυψη γής από αμπελώνες με ποσοστό 18,08%. Στο παρακάτω Σχήμα 2.3 φαίνονται τα ποσοστά για κάθε κάλυψη γής στη λεκάνη του Ερασίνου.

Οι κλίσεις γης της λεκάνης φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 2.4. Η μέγιστη κλίση της περιοχής είναι 87°, ενώ η ελάχιστη 0° m και η μέση κλίση είναι 7°. Παρατηρείται γενικά ότι η περιοχή αποτελείται στο μεγαλύτερο κομμάτι της από μικρές κλίσεις, ενώ πολύ υψηλές κλίσεις παρουσιάζονται στην αριστερή περιοχή της λεκάνης.



Σχήμα 2.4: Κλίσεις γης σε μοίρες για τη λεκάνη απορροής του Ερασίνου

2.3 Λεκάνη Εσχατιάς

Στην πορεία του ο Κηφισός είναι αποδέκτης ενός σημαντικού αριθμού συμβαλλόντων ρεμάτων, ανάμεσα στα οποία από τη δυτική πλευρά του λεκανοπεδίου είναι το ρέμα της Εσχατιάς. Η λεκάνη της Εσχατιάς έχει έκταση 72,13 km^2 και περίμετρο 45378,24m. Το συνολικό μήκος του ρέματος της Εσχατιάς είναι 13 km και ξεκινάει από την Πάρνηθα, διασχίζει τους δήμους Αχαρνές, Ζεφύρι, Καματερό, Άγιοι Ανάργυροι και Ιλίον και διασταυρώνεται με την Αττική Οδό εντός του Δήμου Ζεφυρίου. Το 1994 εντάχθηκε στο πρόγραμμα "αττική s.o.s προστασία, ανάπλαση

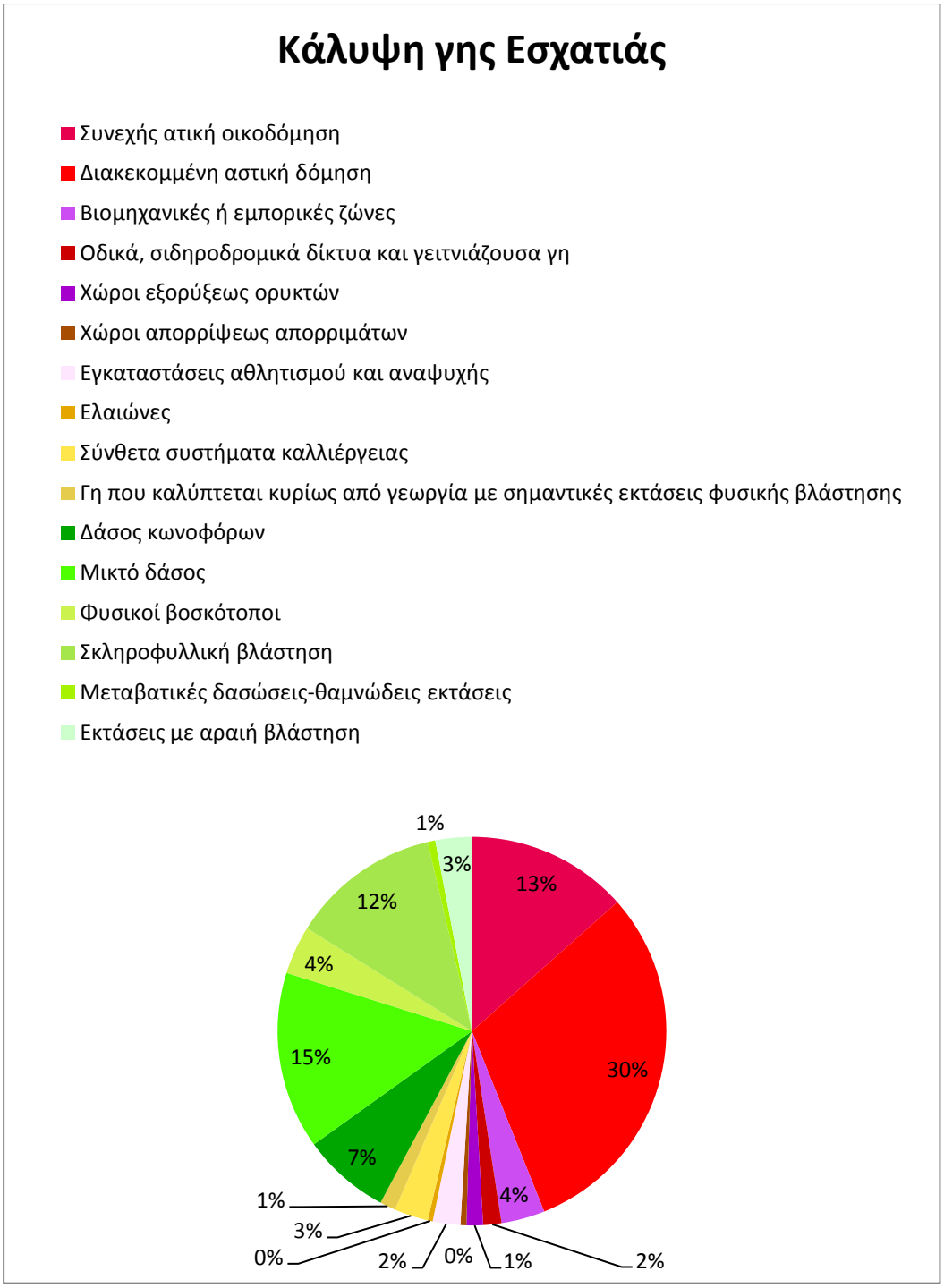
και ανάδειξη των ρεμάτων της αττικής” και με το ΦΕΚ 281Δ/93 περιλαμβάνεται στα χαρακτηρισμένα ως διατηρητέου περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος ρεμάτα, χειμάρρους και ρυάκια του Νομού Αττικής (Χαλδέζου, 2014).

Από γεωλογική άποψη στη λεκάνη διαμορφώνονται σχηματισμοί αποτελούμενοι από ριπίδια χειμάρρων, πλευρικά κορήματα, προσχωσιγενή υλικά και αλλουβιακές αποθέσεις.

Σχετικά με τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής, το κλίμα μπορεί να θεωρηθεί ως μεσογειακό με ξηρό και θερμό καλοκαίρι και ήπιους χειμώνες. Το μέσο ολικό ετήσιο ύψος του υετού είναι 423,2 mm και οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται τους χειμερινούς μήνες, ενώ η θερινή περίοδος είναι ουσιαστικά ξηρή. Όσον αφορά τις βροχοπτώσεις, εκτός από τους αναμενόμενους μήνες αυξημένων βροχοπτώσεων παρατηρούνται έκτακτα φαινόμενα, όπως τοπικές καταιγίδες κατά τους ζεστούς μήνες, κυρίως Ιούλιο και Σεπτέμβριο, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν πλημμυρικά φαινόμενα (Χατζηγιάννη, 2016).

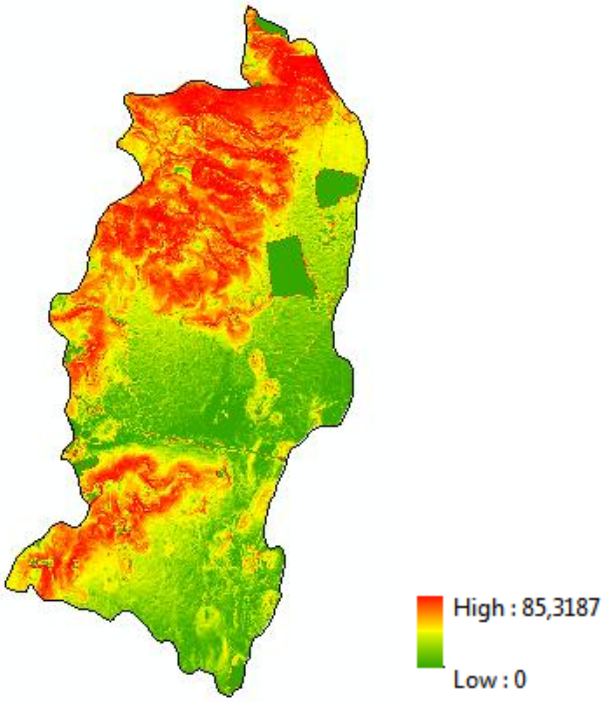
Σύμφωνα με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους 5x5m το ελάχιστο υψόμετρο της λεκάνης είναι 58,4m, το μέγιστο 1157,6m και το μέσο υψόμετρο 338,4m.

Για την κάλυψη γής σύμφωνα με το Corine 2012 προκύπτει ότι μεγαλύτερο ποσοστό της λεκάνης 30,49% καλύπτεται από διακεκομμένη αστική οικοδόμηση όπου οι περισσότερες εκτάσεις γης καλύπτονται από κτίσματα. Κτήρια, δρόμοι και ζώνες τεχνητής επιφάνειας σε συνδυασμό με ζώνες βλάστησης και γυμνού εδάφους, που καλύπτουν διακεκομμένες αλλά εκτενείς επιφάνειες. Ακολουθεί η κάλυψη γής από συνεχή αστική οικοδόμηση με ποσοστό 13,45%. Κτήρια, δρόμοι και ζώνες τεχνητής επιφάνειας καλύπτουν σχεδόν όλο το έδαφος. Στο παρακάτω Σχήμα 2.5 φαίνονται τα ποσοστά για κάθε κάλυψη γής στη λεκάνη της Εσχατιάς.



Σχήμα 2.5: Κάλυψη γης στη λεκάνη απορροής της Εσχατιάς

Οι κλίσεις γης της λεκάνης φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 2.6. Η μέγιστη κλίση της περιοχής είναι 85°, ενώ η ελάχιστη 0° και η μέση κλίση είναι 10°. Παρατηρείται γενικά ότι η περιοχή αποτελείται στο μεγαλύτερο κομμάτι της από μικρές κλίσεις, ενώ πολύ υψηλές κλίσεις παρουσιάζονται στην αριστερή περιοχή της λεκάνης προς το βορρά και λίγο νότια.



Σχήμα 2.6: Κλίσεις γης σε μοίρες για τη λεκάνη απορροής της Εσχατιάς

2.4 Λεκάνη Ραφήνας

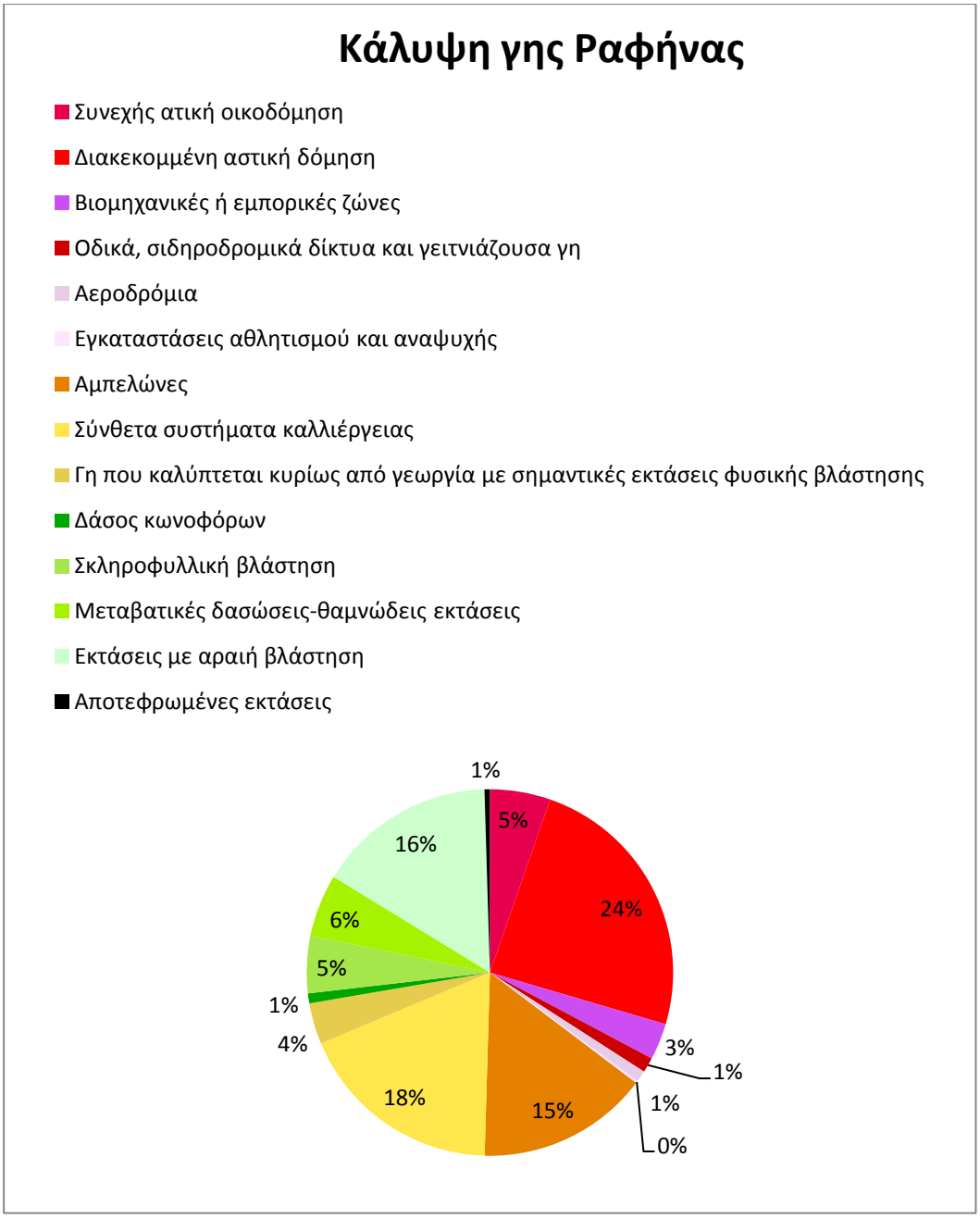
Η λεκάνη απορροής στην περιοχή της Ραφήνας έχει έκταση 123 km^2 και περίμετρο 67629,5m. Οριοθετείται βόρεια από το Πεντελικό όρος (950m), δυτικά και νοτιοδυτικά από τον Υμηττό (400m) και νότια από λόφους μικρότερων υψομέτρων όπως ο λόφος Μπούρα (300m) , Έτος και η Πετροκορφή (167m).

Όσον αφορά τη γεωλογία της περιοχής, στα βόρεια παρουσιάζονται άργιλοι που έχουν πολύ χαμηλή υδατοπερατότητα ενώ στην ίδια περιοχή παρουσιάζονται σποραδικές περιοχές με μάρμαρα της Βορειοανατολικής Αττικής. Κατά μήκος του ρέματος και της λεκάνης απορροής του ρέματος παρουσιάζονται ποταμοχειμαρρικές αποθέσεις και προσχώσεις οι οποίες προκύπτουν από τις άμεσες και έμμεσες ροές του ρέματος (Ραγκούσης, 2014).

Σχετικά με τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής στη λεκάνη της Ραφήνας, το κλίμα της χαρακτηρίζεται ως μεσογειακό υποτροπικό με παρατεταμένα ζεστά και ξηρά καλοκαίρια και πολύ ήπιους και υγρούς χειμώνες (FLIRE[2]).

Σύμφωνα με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους 5x5m το ελάχιστο υψόμετρο της λεκάνης είναι 0,24m, το μέγιστο 950,4m και το μέσο υψόμετρο 226,4m.

[2] http://www.flire.eu/el/information/status

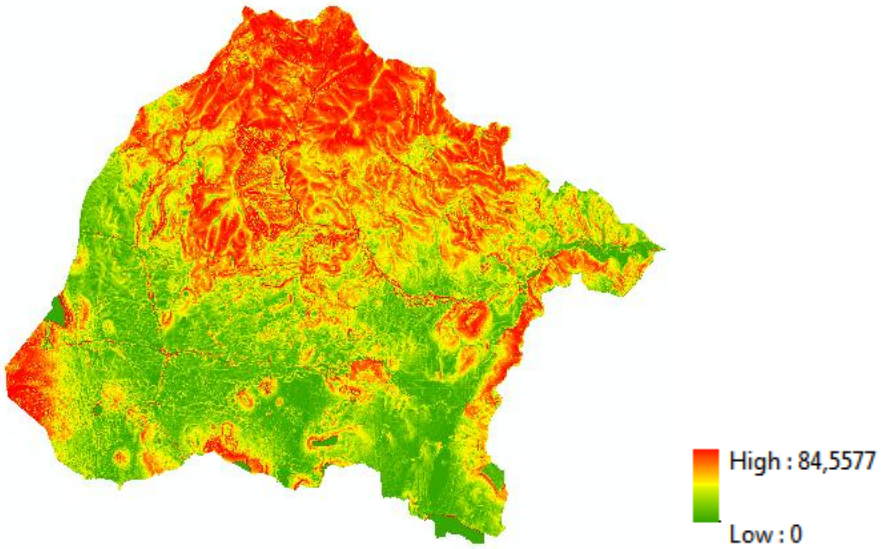


Σχήμα 2.7: Κάλυψη γης στη λεκάνη απορροής της Ραφήνας

Για την κάλυψη γής σύμφωνα με το Corine 2012 προκύπτει ότι μεγαλύτερο ποσοστό της λεκάνης 24,21% καλύπτεται από διακεκομμένη αστική οικοδόμηση όπου οι περισσότερες εκτάσεις γης καλύπτονται από κτίσματα. Κτήρια, δρόμοι και ζώνες τεχνητής επιφάνειας σε συνδυασμό με ζώνες βλάστησης και γυμνού εδάφους, που καλύπτουν διακεκομμένες αλλά εκτενείς επιφάνειες. Ακολουθούν με ποσοστό 18,23% η κάλυψη γής από σύνθετα συστήματα καλλιέργειας όπου αποτελούν ένα μωσαικό από μικρά αγροτεμάχια με διάφορες ετήσιες καλλιέργειες, λιβάδεια και μόνιμες καλλιέργειες, καθώς και εκτάσεις με αραιή βλάστηση, όπου περιλαμβάνουν

στέπα, τούνδρα και αμμόλοφους, δηλαδή διασπαρμένη ορεινή βλάστηση. Στο παρακάτω Σχήμα 2.7 φαίνονται τα ποσοστά για κάθε κάλυψη γής στη λεκάνη της Ραφήνας.

Οι κλίσεις γης της λεκάνης φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 2.8. Η μέγιστη κλίση της περιοχής είναι 85°, ενώ η ελάχιστη 0° και η μέση κλίση είναι 9°. Παρατηρείται γενικά ότι η περιοχή στο μεγαλύτερο μέρος της αποτελείται από υψηλές κλίσεις στο βόρειο κομμάτι της λεκάνης, ενώ η υπόλοιπη περιοχή στο μεγαλύτερο κομμάτι της παρουσιάζει μέσες κλίσεις με κάποια σημεία να είναι πολύ χαμηλές τιμές στην κλίση τους.



Σχήμα 2.8: Κλίσεις γης σε μοίρες για τη λεκάνη απορροής της Ραφήνας

2.5 Λεκάνη Χάραδρου

Ο ποταμός Χάραδρος βρίσκεται στη Βορειοανατολική Αττική. Η λεκάνη απορροής του έχει έκταση 64,27 km^2 και περίμετρο 61419,32m. Οριοθετείται δυτικά από τον ορεινό όγκο της Πάρνηθας και νότια από το Πεντελικό Όρος. Το συνολικό μήκος της κεντρικής κοίτης είναι 31 km και έχει γενική διεύθυνση ροής από τα δυτικά προς τα ανατολικά και εκβάλλει στον όρμο του Μαραθώνα σχηματίζοντας την παράκτια πεδιάδα του Μαραθώνα. Κατά μήκος της κεντρικής κοίτης του ποταμού έχει κατασκευαστεί το φράγμα του Μαραθώνα με την ομώνυμη τεχνητή λίμνη. Οι μεγαλύτεροι οικισμοί που εντοπίζονται εντός της λεκάνης απορροής είναι το Καπανδρίτι, οι Αφινίδες, ο Άγιος Στέφανος, το Γραμματικό και ο Μαραθώνας στα ανατολικά. Η Βόρεια υδροκριτική γραμμή της λεκάνης φθάνει σε υψόμετρο 500 m

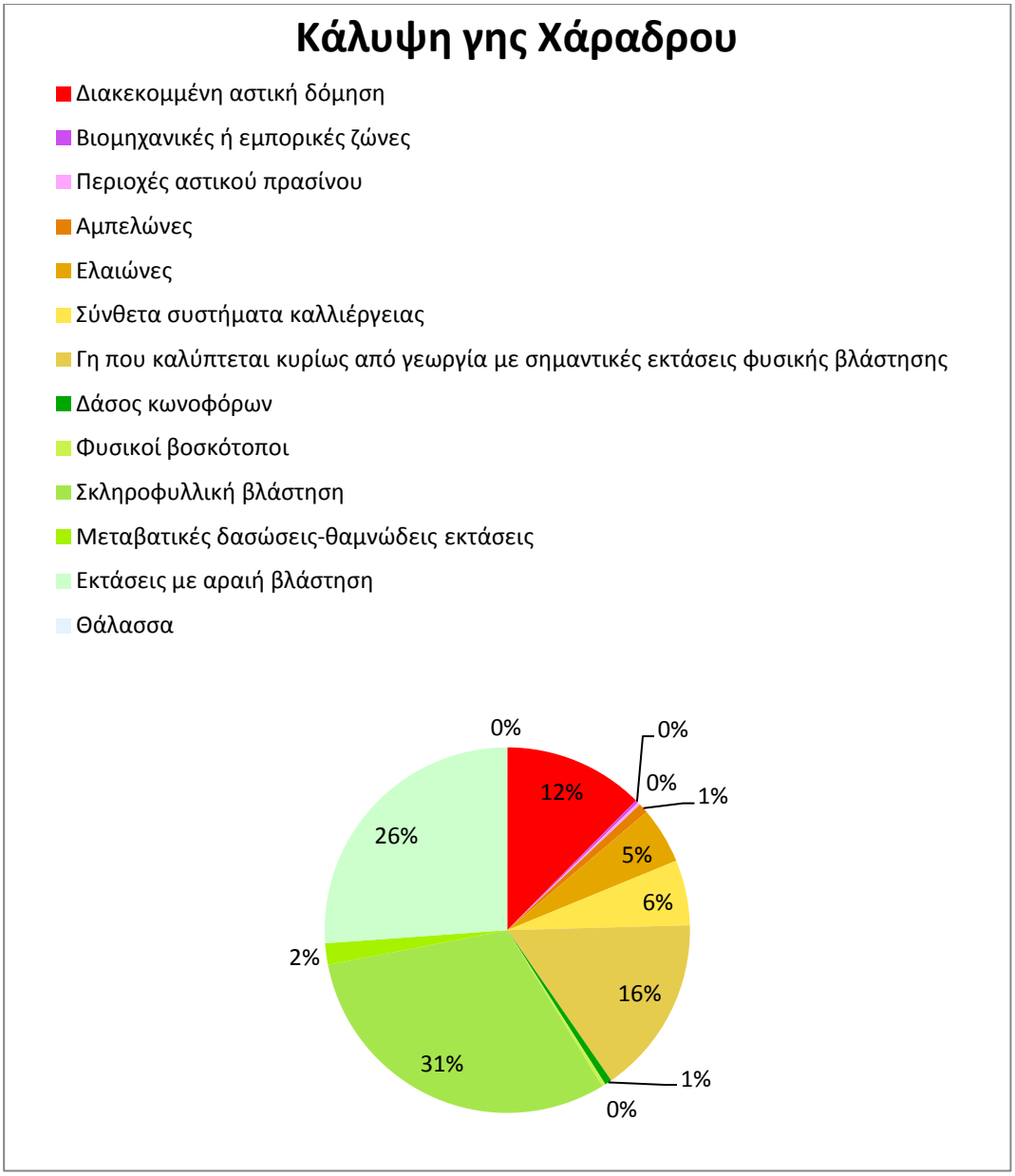
και διαχωρίζει την λεκάνη απορροής του Χάραδρου στα νότια από τα μικρά υδρογραφικά δίκτυα τα οποία έχουν κατάληξη στο νότιο Ευβοϊκό κόλπο (Νασοπούλου, 2006).

Όσον αφορά τη γεωλογία της περιοχής, στο νότιο και ανατολικό τμήμα της λεκάνης απορροής εμφανίζονται οι σχηματισμοί της «αυτόχθονης ενότητας Αλμυροπόταμου-Αττικής» (Παυλόπουλος et al., 2002).

Σχετικά με τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής, το κλίμα μπορεί να θεωρηθεί ως μεσογειακό με ξηρό και θερμό καλοκαίρι και ήπιους χειμώνες. Το μέσο ολικό ετήσιο ύψος του υετού είναι της τάξης των 500mm και οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται τους χειμερινούς μήνες, ενώ η θερινή περίοδος είναι ουσιαστικά ξηρή.

Σύμφωνα με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους 5x5m το ελάχιστο υψόμετρο της λεκάνης είναι -0,33m, το μέγιστο 591,6m και το μέσο υψόμετρο 266,7m.

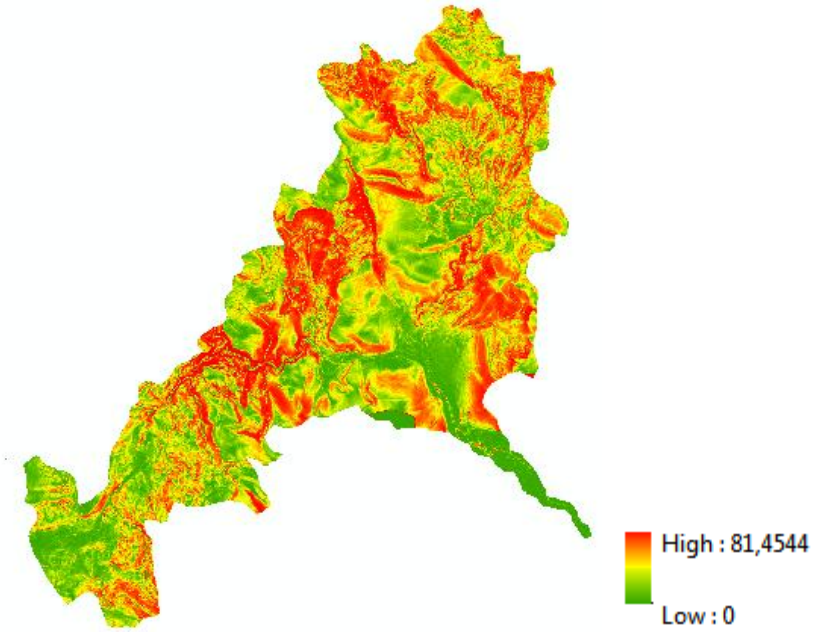
Για την κάλυψη γής σύμφωνα με το Corine 2012 προκύπτει ότι μεγαλύτερο ποσοστό της λεκάνης 30,66% καλύπτεται από θαμνώδης σκληροφυλλική βλάστηση που περιλαμβάνει μακία και φρύγανα. Ακολουθεί η κάλυψη γής από εκτάσεις με αραιή βλάστηση όπου περιλαμβάνει στέπα, τούνδρα και αμμόλοφους με ποσοστό 26,11%. Στο παρακάτω Σχήμα 2.9 φαίνονται τα ποσοστά για κάθε κάλυψη γής στη λεκάνη του Χάραδρου.



Σχήμα 2.9: Κάλυψη γης στη λεκάνη απορροής του Χάραδρου

Πηγή:

Οι κλίσεις γης της λεκάνης φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 2.10. Η μέγιστη κλίση της περιοχής είναι 81°, ενώ η ελάχιστη 0° και η μέση κλίση είναι $11,5^{o}$. Παρατηρείται γενικά ότι η περιοχή αποτελείται διάσκορπα και από σημεία με πολύ υψηλές κλίσεις και με ήπιες.



Σχήμα 2.10: Κλίσεις γης σε μοίρες για τη λεκάνη απορροής του Χάραδρου

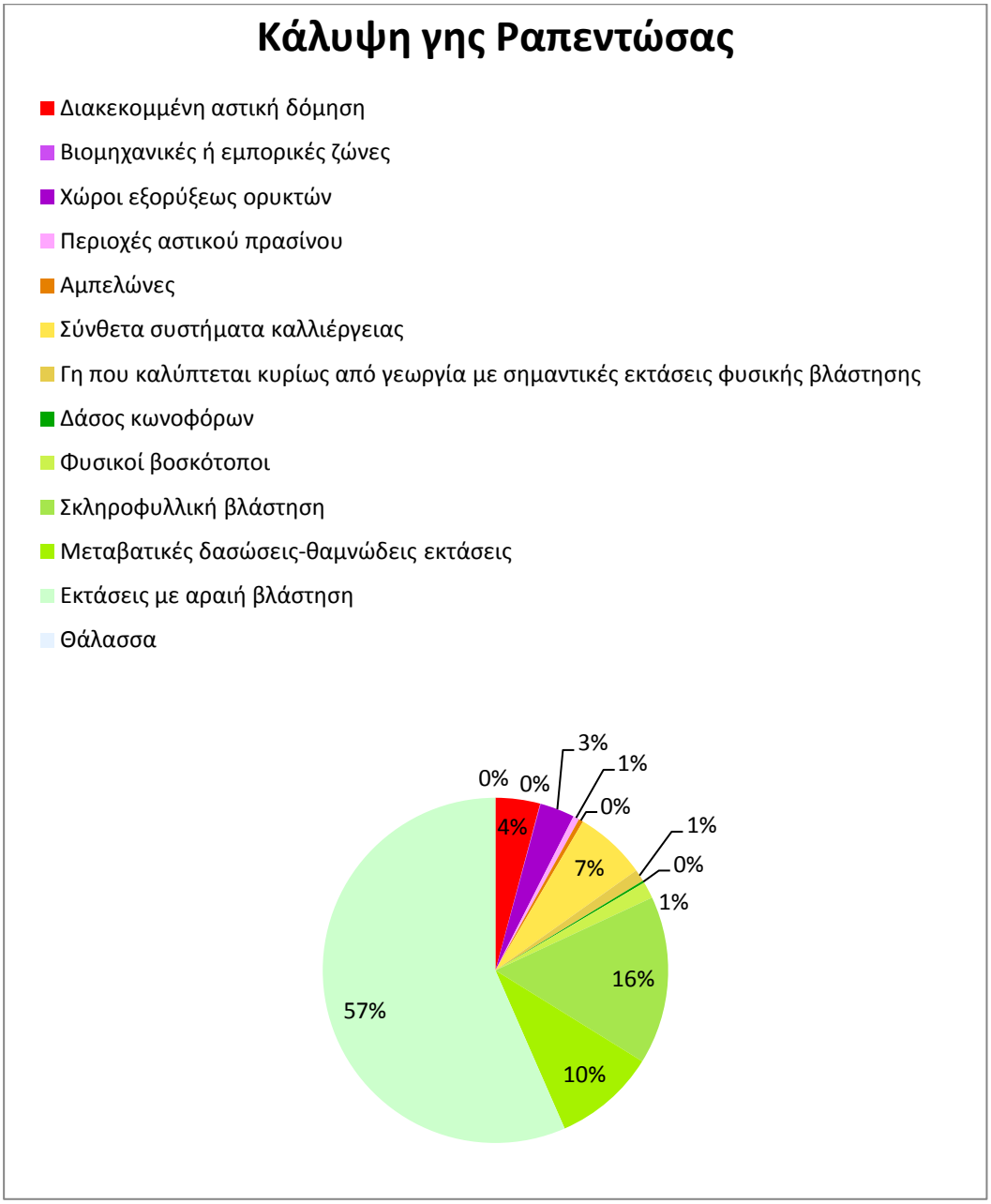
2.6 Λεκάνη Ραπεντώσας

Η λεκάνη απορροής της Ραπεντώσας, χωροθετείται μεταξύ των δήμων Διονύσου και Μαραθώνα, στο βορειοανατολικό τμήμα του νομού Αττικής και είναι έκτασης 39,06 km^2 και περίμετρο 38613,4 m. Η περιοχή μελέτης χωρίζεται σε δύο ζώνες. Η πρώτη είναι πεδινή και αποτελείται από τον καλλιεργήσιμο κάμπο του Μαραθώνα, τον οικισμό και όλη την παράκτια ζώνη ως τον Σχοινιά και τη Νέα Μάκρη. Η δεύτερη ζώνη είναι ημιορεινή-ορεινή και περιλαμβάνει πολλά υψώματα, μεταξύ των οποίων η Ραπεντώσα, το Αγριλίκι, η Πετρωτή, το Διονυσοβούνι. Το συνολικό μήκος του ρέματος Ραπεντώσας είναι 10173 m.

Το κλίμα της περιοχής είναι εύκρατο μεσογειακό με ξηρά και ζεστά καλοκαίρια και βροχοπτώσεις τον χειμώνα. Η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι μεταξύ 16,5 και 19°C, και η μέση υγρασία κυμαίνεται μεταξύ 59% και 64%. Οι άνεμοι είναι ψυχροί βόρειοι και κατά το καλοκαίρι μεταβάλλονται βορειοανατολικοί. Η σχετική ημερήσια υγρασία είναι 67% με χαμηλότερες τιμές τον Ιούλιο στο 57% και υψηλότερες τον Φεβρουάριο στο 75% (Παλημέρης, 2017).

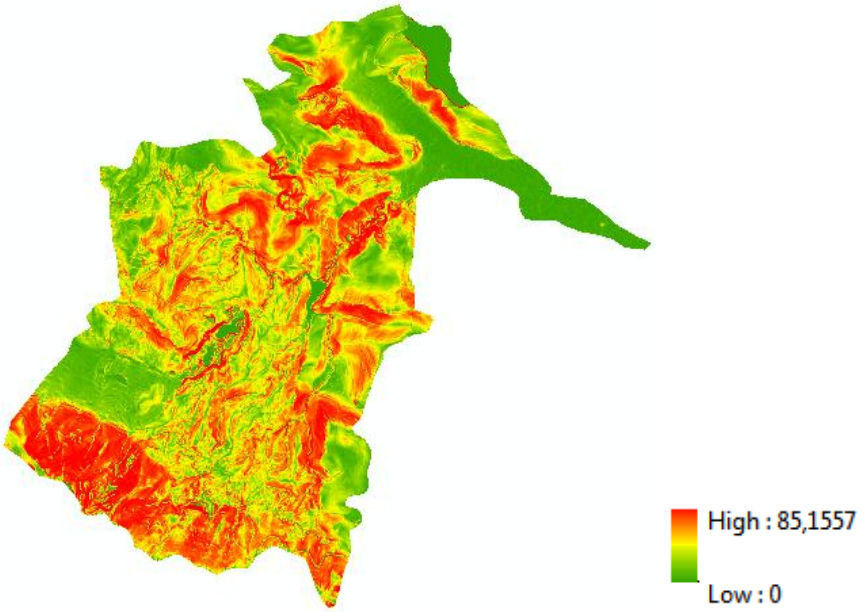
Σύμφωνα με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους 5x5m το ελάχιστο υψόμετρο της λεκάνης είναι 1,21m, το μέγιστο 1097,7m και το μέσο υψόμετρο 369,5m.

Για την κάλυψη γής σύμφωνα με το Corine 2012 προκύπτει ότι μεγαλύτερο ποσοστό της λεκάνης 56,57% καλύπτεται από εκτάσεις με αραιή βλάστηση όπου περιλαμβάνει στέπα, τούνδρα και αμμόλοφους. Ακολουθεί η κάλυψη γής με εκτάσεις από θαμνώδης σκληροφυλλική βλάστηση που περιλαμβάνει μακία και φρύγανα, με ποσοστό 15,75%. Στο παρακάτω Σχήμα 2.11 φαίνονται τα ποσοστά για κάθε κάλυψη γής στη λεκάνη της Ραπεντώσας.



Σχήμα 2.11: Κάλυψη γης στη λεκάνη απορροής της Ραπεντώσας

Οι κλίσεις γης της λεκάνης φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 2.12. Η μέγιστη κλίση της περιοχής είναι 85°, ενώ η ελάχιστη 0° και η μέση κλίση είναι 17°. Παρατηρείται γενικά ότι η περιοχή στο μεγαλύτερο μέρος της αποτελείται από υψηλές κλίσεις, με πολύ υψηλές τιμές στα νότια και σε κάποια σημεία βόρεια.



Σχήμα 2.12: Κλίσεις γης σε μοίρες για τη λεκάνη απορροής της Ραπεντώσας

2.7 Λεκάνη Γιαννούλας

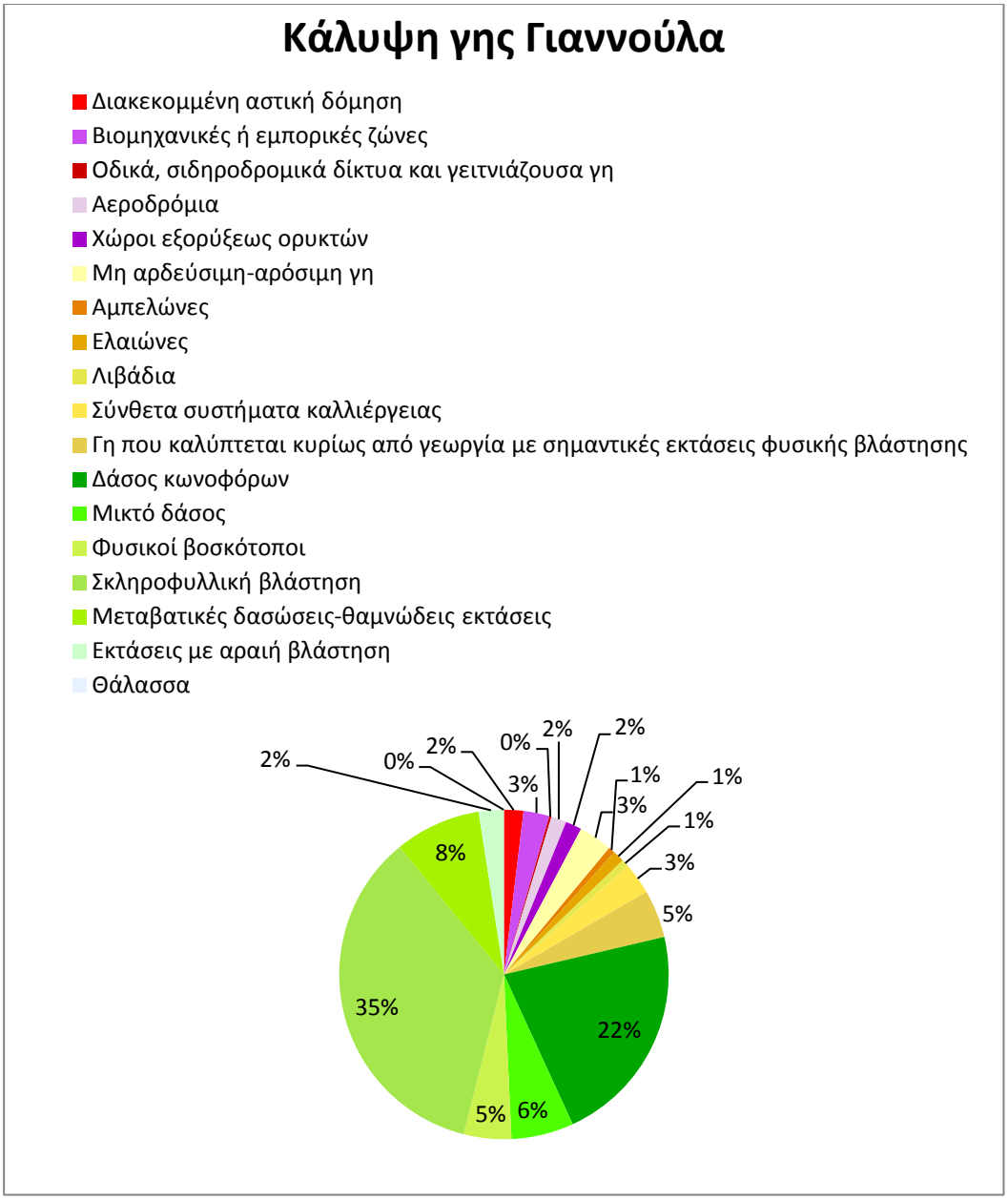
Η λεκάνης απορροής του ρέματος Γιαννούλα έχει έκταση 129 km^2 και περίμετρο 65295,3 m. Το ρέμα Γιαννούλας είναι ένας χείμαρρος περιοδικής ροής που πηγάζει από τον ορεινό όγκο της Πάρνηθας και εμφανίζει επιφανειακή απορροή μόνο κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου του έτους και ιδιαίτερα, μετά από έντονες βροχοπτώσεις. Κατά τη διάρκεια της ξηρής περίοδου του έτους, τόσο η κεντρική κοίτη του ρέματος όσο και των κυριότερων παραποτάμων του δεν εμφανίζουν ροή. Το μήκος της κεντρική του κοίτης είναι περίπου 20 km. Ρεει με διεύθυνση ροής Β-Ν, στη συνέχεια για ένα μήκος 3 km ρέει από τα Α.ΒΑ προς Δ.ΝΔ , και στη συνέχεια, με διεύθυνση ροής ΒΒΑ-ΝΝΔ, εισέρχεται στο ανατολικό Θριάσιο πεδίο, το οποίο διαρρέει έως την περιοχή των διυλιστηρίων Ασπροπύργου όπου χάνεται. Οι κυριότεροι παραπόταμοι του χειμάρρου είναι το Συκόρεμα και το ρέμα Βελανίδια, που αποστραγγίζουν το δυτικό και βορειοδυτικό τμήμα τη λεκάνης και τα ρέματα Καμπέρα και Ρεματάκι που αποστραγγίζουν το βορειοανατολικό και βόρειο τμήμα της υδρολογικής λεκάνης αντίστοιχα.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που υπάρχουν στη λεκάνη απορροής του ρέματος Γιαννούλας είναι τόσο Αλπικοί όσο και Μεταλπικοί. Οι Αλπικοί σχηματισμοί που καταλαμβάνουν τη λεκάνη απορροής του ρέματος Γιαννούλας ανήκουν στη γεωτεκτονική ζώνη της Πελαγονικής,που είναι μια από τις εσωτερικές Ελληνίδες.

Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται ως μεσογειακό, με εξαίρεση τα υψηλά σημεία της λεκάνης όπου είναι ορεινό. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κυμαίνεται μεταξύ 300 και 400 mm. Η χιονόπτωση είναι σπάνια στις παράκτιες περιοχές, ενώ αυξάνει στα υψηλότερα σημεία της λεκάνης. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 17°C και 19 ^{o}C (Καρύμπαλης, 2015).

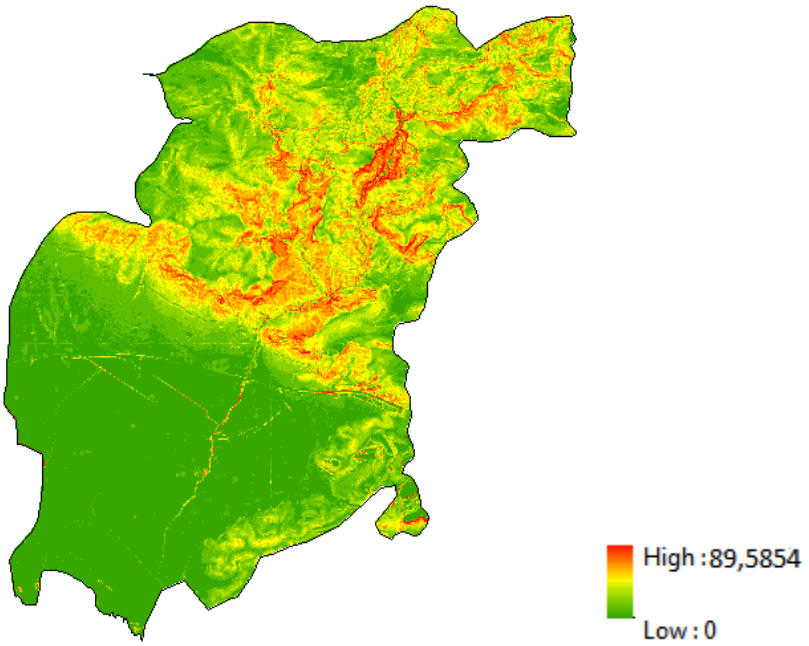
Σύμφωνα με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους 5x5m το ελάχιστο υψόμετρο της λεκάνης είναι 0m, το μέγιστο 1279,8m και το μέσο υψόμετρο 390,9m.

Για την κάλυψη γής σύμφωνα με το Corine 2012 προκύπτει ότι μεγαλύτερο ποσοστό της λεκάνης 35,13% καλύπτεται από σκληροφυλλική βλάστηση που περιλαμβάνει μακία και φρύγανα. Ακολουθεί η κάλυψη γής με εκτάσεις από δάση κωνοφόρων με ποσοστό 21,80%. Στο παρακάτω Σχήμα 2.13 φαίνονται τα ποσοστά για κάθε κάλυψη γής στη λεκάνη του Γιαννούλα.



Σχήμα 2.13: Κάλυψη γης στη λεκάνη απορροής του Γιαννούλα

Οι κλίσεις γης της λεκάνης φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 2.14. Η μέγιστη κλίση της περιοχής είναι 89,5^{o}, ενώ η ελάχιστη 0° και η μέση κλίση είναι 12°. Παρατηρείται γενικά ότι η περιοχή στο μεγαλύτερο μέρος της αποτελείται από ήπιες κλίσεις κυρίως στα νότια της λεκάνης, ενώ κεντρικά προς βόρεια εμφανίζονται και υψηλές κλίσεις.



Σχήμα 2.14: Κλίσεις γης σε μοίρες για τη λεκάνη απορροής του Γιαννούλα

2.8 Πλημμυρικά Φαινόμενα στις περιοχές μελέτης

Η περιγραφή ιστορικών πλημμυρών με σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις, καθώς και η προσπάθεια αποφυγής δυνητικών αρνητικών συνεπειών για μελλοντικές πλημμύρες, αποτελεί βασική συνιστώσα για την εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας μιας περιοχής σε μία δοσμένη χρονική περίοδο. Η Αττική είναι μια περιοχή όπου οι ακραίες βροχοπτώσεις είναι ικανές να καταγράψουν υψηλά ωριαία και ημερήσια ύψη βροχής ακόμα και της τάξεως των 70-80 mm με συχνότητα εμφάνισης 2-4 φορές το χρόνο. Αυτό το φαινόμενο είναι συμβάλλει μαζί με μια σειρά άλλων παραγόντων, στην ύπαρξη αυξημένης πλημμυρικής επικινδυνότητας στην περιοχή. Όσον αφορά το πλημμυρικό ιστορικό στις λεκάνες απορροής της Αττικής που εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική αναλύεται ακολούθως.

Η ευρύτερη περιοχή του Θριασίου πεδίου έχει πληγεί στο παρελθόν αρκετές φορές από έντονα πλημμυρικά γεγονότα, τα οποία έχουν οδηγήσει σε ορισμένες περιπτώσεις και σε ανθρώπινες απώλειες. Τα πλημμυρικά γεγονότα επηρεάζουν την κυκλοφορία στην Εθνική Οδό Αθηνών-Κορίνθου στο ύψος της «Χαλυβουργικής» καθώς 8 φορές τα τελευταία 40 χρόνια έχει μετατραπεί σε λίμνη η Εθνική Οδός στο εν λόγω ύψος με αποτέλεσμα την πολύωρη διακοπή της κυκλοφορίας (Ζαρκαδούλας, 2014). Σημαντικό πλημμυρικό γεγονός που συνέβη πρόσφατα στις 15.11.2017 στη δυτική Αττική στους δήμους Μάνδρας – Ειδυλλίας, Μεγαρέων και στη Δ.Ε. Νέας

Περάμου, άφησε πίσω του 23 νεκρούς, κυρίως στη Μάνδρα, και ανυπολόγιστες καταστροφές. Το φαινόμενο ήταν τοπικό. Αλλά ήταν αρκετό για να προκαλέσει την τρίτη μεγαλύτερη καταστροφή από πλημμύρες στην Αττική σχετικά με τον αριθμό των θυμάτων. Είχαν προηγηθεί μεγάλη πλημμύρα στα δυτικά προάστια, στις 5 και 6 Νοεμβρίου 1961 και στην ίδια περιοχή στις 2 και 3 Νοεμβρίου 1977 με ύψος βροχής 90.50mm και 20 θύματα. Επίσης πλημμυρικά επεισόδια με σημαντικά μικρότερο ύψος βροχής όπου υπήρξαν ανθρώπινα θύματα εκδηλώθηκαν στις 27/1/1996, με ύψος βροχής 173mm και 2 θύματα. Παρά όμως τα σοβαρά προβλήματα που έχουν προκληθεί από τις πλημμύρες, η αντιπλημμυρική προστασία στην ευρύτερη περιοχή είναι εντελώς αναντίστοιχη, ενώ δυσχεραίνεται και από την αυθαίρετη δόμηση πολλών κατοικιών και βιομηχανικών μονάδων.

Σχετικά με τη λεκάνη του Ερασίνου, η έλλειψη φυσικών αποδεκτών είναι η πλανώμενη απορροή των πλημμυρών, γεγονός το οποίο στις περιοχές καλλιεργήσιμης γης (ελιές, αμπέλια, συκιές) διηθείται και εμπλουτίζει τον υδροφόρο ορίζοντα χωρίς προβλήματα κατακλύσεων. Η μεταβολή στις χρήσεις γης περιορίζει συνεχώς τη διαδικασία διήθησης και η επιφανειακή απορροή μετατρέπεται πλέον σε εκτεταμένη πλημμύρα. Οι δήμοι των Μεσογείων είναι ανοχύρωτοι από πλευράς αντιπλημμυρικής προστασίας, καθώς κυριαρχεί η αυθαίρετη δόμηση γίνεται συνεχής αποψίλωση των δασών από τις πυρκαγιές και την οικοπεδοποίηση. Λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης και της αστιοποίησης υπάρχουν πολλά ρέματα τα οποία δεν λειτουργούν πια λόγω ανθρώπινων επεμβάσεων. Κατά την κατασκευή της Αττικής Οδού πραγματοποιήθηκαν πολλά αντιπλημμυρικά έργα για την προστασία του αυτοκινητόδρομου, τα οποία εξυπηρετούν και παρακείμενες περιοχές. Όμως τα έργα αυτά διατάραξαν τη ροή των χειμάρρων της ευρύτερης περιοχής. Ο Ερσίνος γίνεται αποδέκτης των νερών της Αττικής Οδού και κυρίως του αεροδρομίου χωρίς να υπάρχει καμία μελέτη διευθέτησης ενώ δημιουργούνται προβλήματα σε κάθε ραγδαία βροχή ιδιαίτερα κοντά στο αεροδρόμιο. Ως εκ τούτου, μεγάλες αγροτικές εκτάσεις καταστρέφονται από τις πλημμύρες και το αεροδρόμιο πλημμυρίζει κάποιες φορές περιφερειακά (Κασιμάτης, 2011).

Το ρέμα της Εσχατιάς αντιμετωπίζεται από τους κατοίκους και το πολιτικό σύστημα ως «πληγή», «υδάτινη βόμβα», λόγω του ιστορικού πλημμυρικών φαινομένων. Η σημερινή εικόνα του ρέματος είναι αρκετά προβληματική καθώς πολλοί από τους παραρεμάτιους δήμους αντιμετωπίζουν σημαντικά πλημμυρικά προβλήματα ενώ το

φυσικό τοπίο του ρέματος έχει καταστραφεί (Κρίκου, 2017). Στις 6/11/1961 υπήρξε καταστροφική πλημμύρα με απώλειες ανθρώπινων ζωών αλλά και πολλές υλικές ζημιές, όπως 3000 κτίρια με προβλήματα. Έτσι αποφασίστηκε διευθέτηση του ρέματος της Εσχατιάς με κλειστό αγωγό που αντιμετωπίζει σημειακά το πρόβλημα και όχι συνολικά το πλημμυρικό πρόβλημα. Τα δυσμενέστερα σημεία στο ρέμα εντοπίζονται στην περιοχή του Καματερού και στην περιοχή όπου περνά η Αττική Οδός (δήμοι Ζεφυρίου και Αχαρνών) (Χατζηγιάννη, 2016). Το 1994 εντάχθηκε στο πρόγραμμα "αττική s.o.s προστασία, ανάπλαση και ανάδειξη των ρεμάτων της αττικής" και με το ΦΕΚ 281Δ/93 περιλαμβάνεται στα χαρακτηρισμένα ως διατηρητέου περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος ρεμάτα, χειμάρρους και ρυάκια του Νομού Αττικής (Χαλδέζου, 2014).

Σύμφωνα με ιστορικά δεδομένα, σημαντικά πλημμυρικά γεγονότα προκάλεσαν μεγάλες καταστροφές στην περιοχή της Ραφήνας. Αυτά συνέβησαν στις 25/2/1988 όπου επλήγησαν η Παιανία και ο Μαραθώνας και στις 22/2/013 όπου προκλήθηκαν σημαντικές καταστροφές. Κατά το τελευταίο επεισόδιο προκλήθηκαν σημαντικές ζημιές στην περιοχή των Σπάτων. Ο μεγάλος όγκος κατέστρεψε τα προστατευτικά στηθαία της γέφυρας στη Λεωφόρο Σπάτων με αποτέλεσμα σημαντικές κατολισθήσεις. Επίσης, σημαντικές ζημιές προκλήθηκαν και στο δήμο Ραφήνας. Ο εγκατεστημένος στην περιοχή σταθμηγράφος, κατέγραψε ύψος νερού πάνω από 3m και οι υποδομές της περιοχής επλήγησαν σημαντικά (Πηγή: FLIRE).

Στις υδρολογικές λεκάνες της Ραπεντώσας και του Χάραδρου καταγράφεται ένα πλούσιο πλημμυρικό ιστορικό με σημαντικές ζημιές σε περιουσίες και υποδομές αλλά και θύματα τις χρονολογίες 1806 και 1980. Από τη μελέτη του ιστορικού προκύπτει ότι ανάμεσα στα χαρακτηριστικά των πλημμυρών είναι η αιφνίδια και ταχεία άνοδος των πλημμυρικών υδάτων, με αυξημένη ταχύτητα κυρίως στις θέσεις Πατητήρια και Βρανάς και χαμηλή ταχύτητα στις θέσεις Βαλάρια, Αγ. Γεώργιος. Οι πλημμύρες ενεργούν, έχοντας τον ίδιο χωρικό προσδιορισμό, τουλάχιστον τα τελευταία 200 χρόνια. Εξαίρεση σε αυτό αποτελεί η ελάττωση των πλημμυρών στο Χάραδρο μετά την κατασκευή του φράγματος τη δεκαετία του 1920. Επιπρόσθετα, στο χώρο του Κάτω Σουλίου και του Αγίου Γεωργίου παρατηρείται αύξηση των πλημμυρών κατά τα τελευταία χρόνια, η οποία όμως οφείλεται κυρίως στην αύξηση της παρουσίας ανθρώπινων δραστηριοτήτων εκεί (Διακάκης, 2012). Οι σημαντικότερες επιπτώσεις εμφανίζονται στη λεκάνη του ρέματος της Ραπεντώσας.

Σύμφωνα με τον Διακάκη (2012) στη θέση Πατητήρια στην υδρολογική λεκάνη της Ραπεντώσας, καταγράφεται η μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης πλημμυρών και οι περισσότερες ζημιές κατά την περίοδο 1979-2009. Επίσης παρουσιάζουν σημαντικές ζημιές και οι εκβολές του Χάραδρου και ο οικισμός Άγιος Γεώργιος. Οι θέσεις αυτές πρέπει να αποτελέσουν προτεραιότητες στις μελλοντικές δράσεις αντιπλημμυρικού σχεδιασμού στην περιοχή. Ο Χάραδρος εμφανίζει υψηλότερες τιμές κινδύνου γύρω από το χωριό Μαραθώνα, τον οικισμό Μπέι και σε ορισμένες θέσεις στην Παραλία. Στη Ραπεντώσα οι υψηλότερες τιμές κινδύνου εμφανίζονται στη θέση Βρανάς και τον οικισμό Τύμβος.

Τέλος, η περιοχή στη λεκάνη του Γιαννούλα έχει πληγεί από πλημμύρες πολλές φορές, ακόμη και από την αρχαιότητα. Το 1963 ξεχείλισε το ρέμα Σούρες και προκάλεσε το θάνατο ενός ανθρώπου. Επίσης το 1977 οι χείμαρροι Αγίου Γεωργίου και Μαύρης Ώρας και κυρίως ο Γιαννούλας απείλησαν την παραλία Ασπροπύργου και κατέστρεψαν σπίτια και περιουσίες στην παράκτια ζώνη. Η κατάσταση φαίνεται ότι είναι κάπως δύσκολο να βελτιωθεί άμεσα, καθώς τα αντιπλημμυρικά έργα βρίσκονται σταθερά, κυρίως τα τελευταία χρόνια λόγω της κρίσης (Καρύμπαλης, 2015).

3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ-ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Ανάλυση και επεξεργασία Δεδομένων

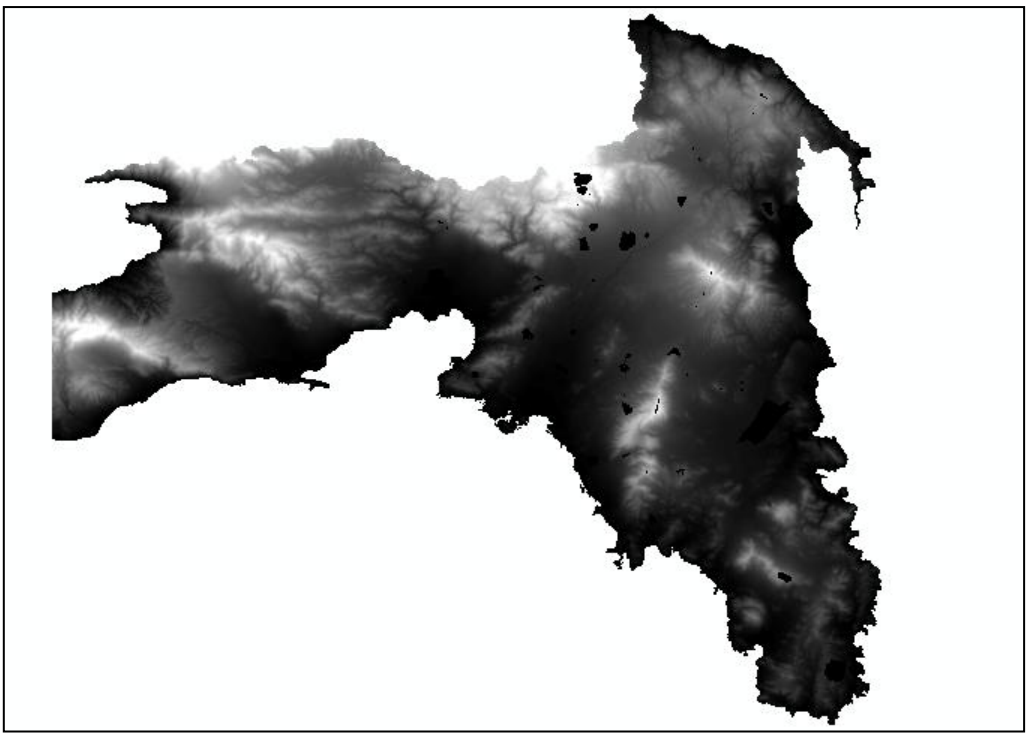
Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία προκειμένου να γίνει βέλτιστη χωροθέτηση δικτύου υδρομετρικών σταθμών στα ρέματα της Αττικής σε συγκεκριμένες λεκάνες όπου υπάρχει κίνδυνος πλημμυρικών επεισοδίων αναλύονται παρακάτω. Η υδρολογική ανάλυση των λεκανών έγινε στο περιβάλλον του ArcGIS (ESRI, 2010).

3.1.1 Στοιχεία περιοχής μελέτης

Προκειμένου να εμφανιστεί στο περιβάλλον του ArcGIS η περιοχή μελέτης, εισήχθη το shapefile που προήλθε από την ιστοσελίδα http://geodata.gov.gr/, και περιείχε τα όρια δήμων Καλλικράτη της Αττικής. Επιπλέον από την ιστοσελίδα του Υ.Π.Ε.Κ.Α. έγινε λήψη των ιστορικών πλημμυρών της Αττικής, Υ.Δ. 06 (http://www.ypeka.gr), καθώς αποτελούν ένα από τα κριτήρια για τη διαδικασία της χωροθέτησης. Στο συγκεκριμένο κριτήριο συμπεριλήφθηκαν και στοιχεία από την Πυροσβεστική Υπηρεσία, αναφορικά με τις θέσεις όπου πραγματοποιήθηκε επέμβαση για άντληση υδάτων κατά την εκδήλωση πλημμυρών λόγω ισχυρών βροχοπτώσεων. Χρησιμοποιείται σαν παράδειγμα για τη συνέχεια η λεκάνη της Εσχατιάς για να απεικονιστούν τα αποτελέσματα ενδεικτικά για κάθε βήμα της επεξεργασίας που αναλύεται πιο κάτω.

3.1.2 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM)

Αρχικά χορηγήθηκαν από την υπηρεσία του Κτηματολόγιο Α.Ε. κανονικοποιημένα αρχεία raster που αποτελούν το ψηφιακό μοντέλο εδάφους για την περιοχή της Αττικής. Το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο (DEM) έχει μέγεθος εικονοστοιχείου στο έδαφος 5,00m. Κάθε πινακίδα DEM έχει διαστάσεις στο έδαφος 4600m X 3600m, με περιμετρική επικάλυψη 300m, και ακολουθούν τη διανομή ΕΓΣΑ87 κλίμακας 1:5000. Ο τύπος των αρχείων είναι img. Η γεωμετρική ακρίβεια του προϊόντος είναι RMSEz ≤ 2,00m και η απόλυτη ακρίβεια ≤ 3,92m για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Στη συνέχεια τα αρχεία αυτά αποτέλεσαν αρχεία εισόδου στο πρόγραμμα ArcGIS και προκειμένου να ενωθούν και να δημιουργηθεί ένα ενιαίο ψηφιακό μοντέλο εδάφους για όλη την Αττική, χρησιμοποιήθηκε το Mosaic to new raster και έτσι προέκυψε το DEM Mosaic για όλη την Αττική όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους για όλη την Αττική
Πηγή: Copyright c 2012, NATIONAL CADASTRE & MARRING AGENCY S.A.
after editing with ArcMap 10.5.1

Ύστερα έγινε ψηφιοποίηση του υδροκρίτη ώστε να προκύψει η κάθε λεκάνη απορροής που μελετάται και σύγκριση της καθεμιάς με πραγματικά δεδομένα ώστε να γίνουν οι απαραίτητες τροποποιήσεις. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για να γίνει η σύγκριση των ορίων των λεκανών, ήταν υδρολογικές μελέτες και οριοθετήσεις για τις λεκάνες που εξετάζονται, καθώς και το Masterplan της Αττικής που ολοκληρώθηκε το 2004 (Πηγή δεδομένων: Υ.Π.Ο.Μ.Ε.Δ.Υ.). Στη συνέχεια έχοντας δημιουργήσει τα σωστά όρια των λεκανών απορροής, διαπιστώθηκε ότι υπήρχαν κάποιες περιοχές απουσία τιμών στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ), (σ.σ. στα σημεία αυτά δεν υπήρχε πληροφορία για το υψόμετρο ή ήταν εσφαλμένα μηδενικό) δηλαδή αποτελούσαν βυθίσματα για το ΨΜΕ. Για να διορθωθεί λοιπόν το ψηφιακό μοντέλο εδάφους χρησιμοποιήθηκε η εντολή Fill από το ArcToolbox επιλέγοντας Spatial Analyst Tools, στη συνέχεια Hydrology και ύστερα το Fill για κάθε λεκάνη ξεχωριστά. Η εντολή αυτή διορθώνει τα βυθίσματα, ένα ή περισσότερα φατνία γύρω από το οποίο όλα τα φατνία έχουν υψηλότερο υψόμετρο, που προκύπτουν κατά τη δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Στα παρακάτω Σχήματα 3.2, 3.3,

παρουσιάζεται το ψηφιακό μοντελό εδάφους της λεκάνης απορροής της Εσχατιάς πριν και μετά τη διόρθωση.

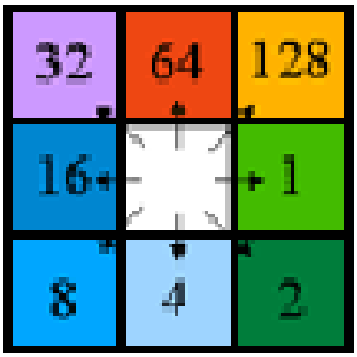
Σχήμα 3.2: Η λεκάνη της Εσχατιάς πριν τη διόρθωση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους

Σχήμα 3.3: Η λεκάνη της Εσχατιάς μετά τη διόρθωση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους

Στη συνέχεια, προκειμένου να προκύψει το υδρογραφικό δίκτυο στις λεκάνες μελέτης ακολουθήθηκε μια διαδικασία για κάθε λεκάνη ξεχωριστά. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τις εξής εντολές:

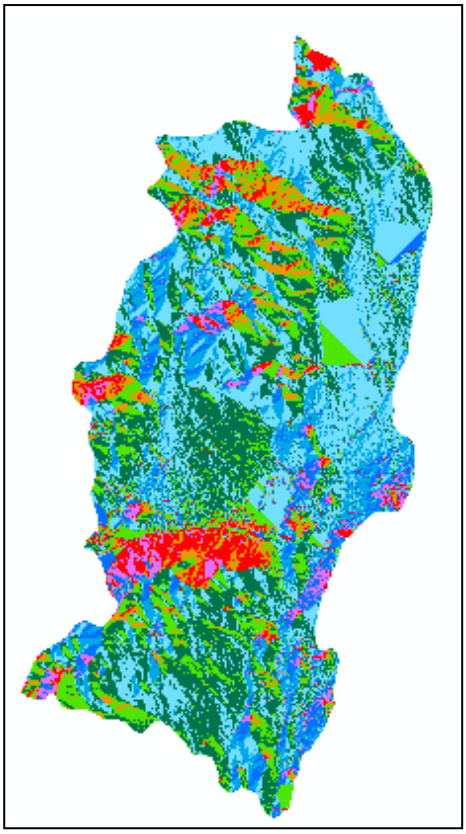
- Flow Direction: Η εντολή αυτή βρίσκεται στο ArcToolbox επιλέγοντας Spatial Analyst Tools και ύστερα Hydrology. Δημιουργείται ένας κάνναβος διεύθυνσης απορροής. Η βασική αρχή του καννάβου είναι ότι η απορροή υπάρχει από κάθε εικονοστοιχείο του ψηφιακού μοντέλου εδάφους προς ένα μόνο από τα 8 γειτονικά εικονοστειχεία με βάση τη μεγαλύτερη κλίση. Ανάλογα με τη διεύθυνση απορροής το εικονοστοιχείο παίρνει μια τιμή όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζεται το αποτέλεσμα για την εντολή Flow Direction.

1=ανατολικά 16=δυτικά 64=βόρεια 4=νότια



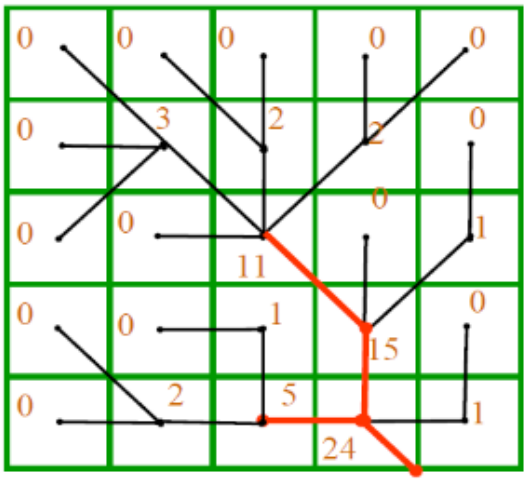
Σχήμα 3.4: Τιμή κεντρικού εικονοστειχείου ανάλογα με τον κάνναβο διεύθυνσης απορροής

[Πηγή: ΕΜΠ, 2014, Πρωτογενής πηγή: ESRI]



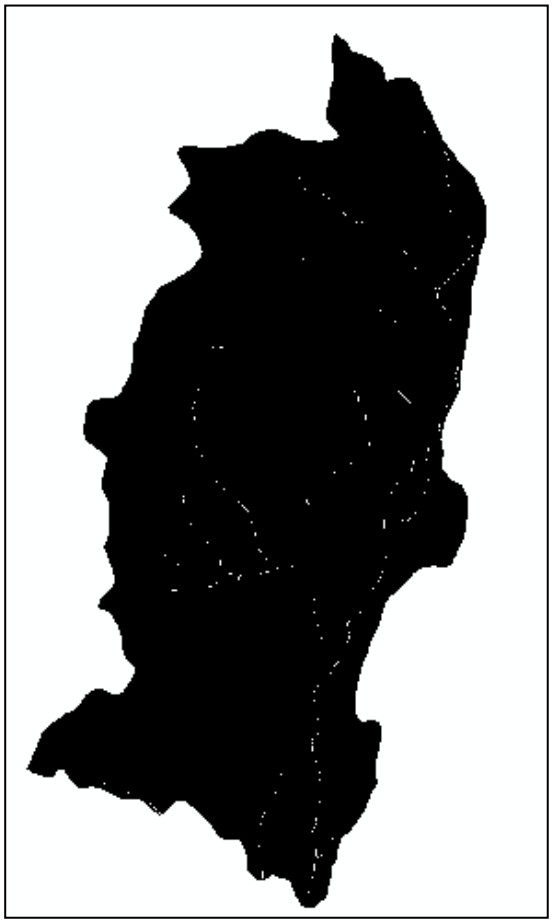
Σχήμα 3.4: Αποτέλεσμα για τη Λεκάνη Εσχατιάς με την εντολή Flow Direction

- Flow Accumulation: Η εντολή αυτή βρίσκεται στο ArcToolbox επιλέγοντας Spatial Analyst Tools και ύστερα Hydrology. Προκύπτει ο κάνναβος συγκέντρωτικής ροής όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Η συγκεντρωτική ροή για κάθε φατνίο του καννάβου ισούται με το άθροισμα των φατνίων που απορρέουν σ΄αυτό από τα γειτονικά φατνία. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας το Classified από το Symbology γίνεται αλλαγή στον αριθμό κλάσεων με N=2, με αποτέλεσμα να διακρίνονται και οι κλάδοι μικρότερης τάξης. Επίσης στο Classified ορίζεται κάποιο κατώφλι π.χ. 100 με την εντολή Break Values, το οποίο αποτελεί πολύ σημαντικό βήμα για την ανάλυση. Στο Σχήμα 3.6 απεικονίζεται το αποτέλεσμα για την εντολή Flow Accumulation, με δύο τάξεις και κατώφλι για τη λεκάνη της Εσχατιάς.



Σχήμα 3.5: Κάνναβος συγκεντρωτικής ροής

[Πηγή: http://hdl.handle.net/11419/2514]



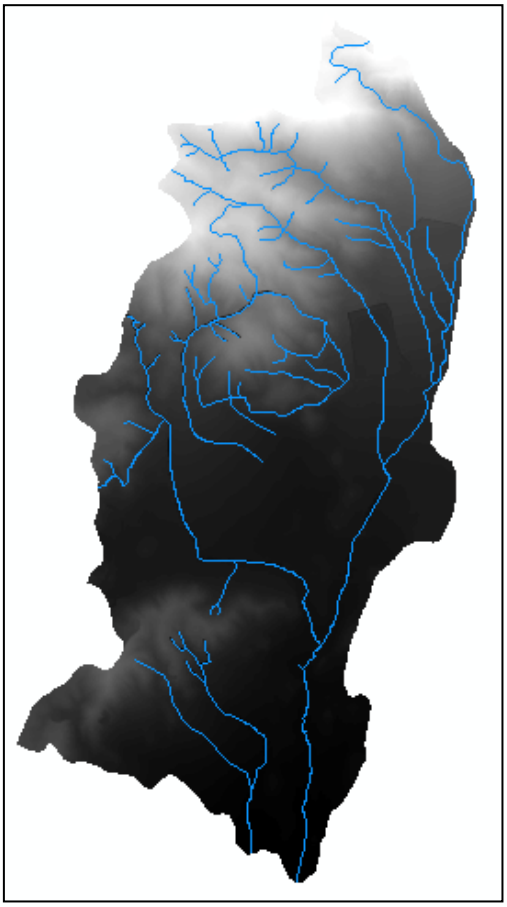
Σχήμα 3.6: Αποτέλεσμα για τη Λεκάνη Εσχατιάς με την εντολή Flow Accumulation

- Reclassify: Η εντολή αυτή βρίσκεται στο ArcToolbox επιλέγοντας Spatial Analyst Tools και ύστερα Reclass και Reclassify. Με την εντολή αυτή γίνεται διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7.

Σχήμα 3.7: Αποτέλεσμα για τη Λεκάνη Εσχατιάς με την εντολή Reclassify

Στη συνέχεια γίνεται μετατροπή από raster σε διανυσματικό αρχείο με line χρησιμοποιώντας το Conversion Tools και ύστερα From Raster to Polyline, προκύπτοντας έτσι το υδρογραφικό δίκτυο. Στα διανυσματικά αρχεία με το υδρογραφικό δίκτυο που προέκυψαν για κάθε λεκάνη, έγιναν κάποιες διορθώσεις, επιπλέον ψηφιοποιήσεις, έχοντας ως υπόβαθρο κάποιους τοπογραφικούς χάρτες και πιο συγκεκριμένα τους χάρτες athina_peireas_019, athinai_elefsis_017, athinai_koropion_018, eretria_236, erithrai_106, kifisia_161, megara_208, plaka_301, rafina_322 (Πηγή: Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού – Γ.Υ.Σ.). Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε ως υπόβαθρο και το basemap, μια εντολή του ArcMap, «add Basemap», όπου σύμφωνα με το site της esri πρόκειται για χάρτη με ανάλυση ενός μέτρου, και περιέχει εικόνες με ανάλυση 15m TerraColor για μικρές και μεσαίες κλίμακες και 2.5m Spot για τον κόσμο, και έχει εναλλασσόμενη ακρίβεια με βάση το zoom. Επίσης έγινε και γρήγορη μετάβαση στο Google Earth, ώστε χρησιμοποίωντας το τελευταίο αλλά και το Basemap υπήρξε σύγκριση με την κατάσταση που επικρατεί

σήμερα. Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται το υδρογραφικό δίκτυο για τη λεκάνη της Εσχατιάς όπως προέκυψε μετά τις διορθώσεις.

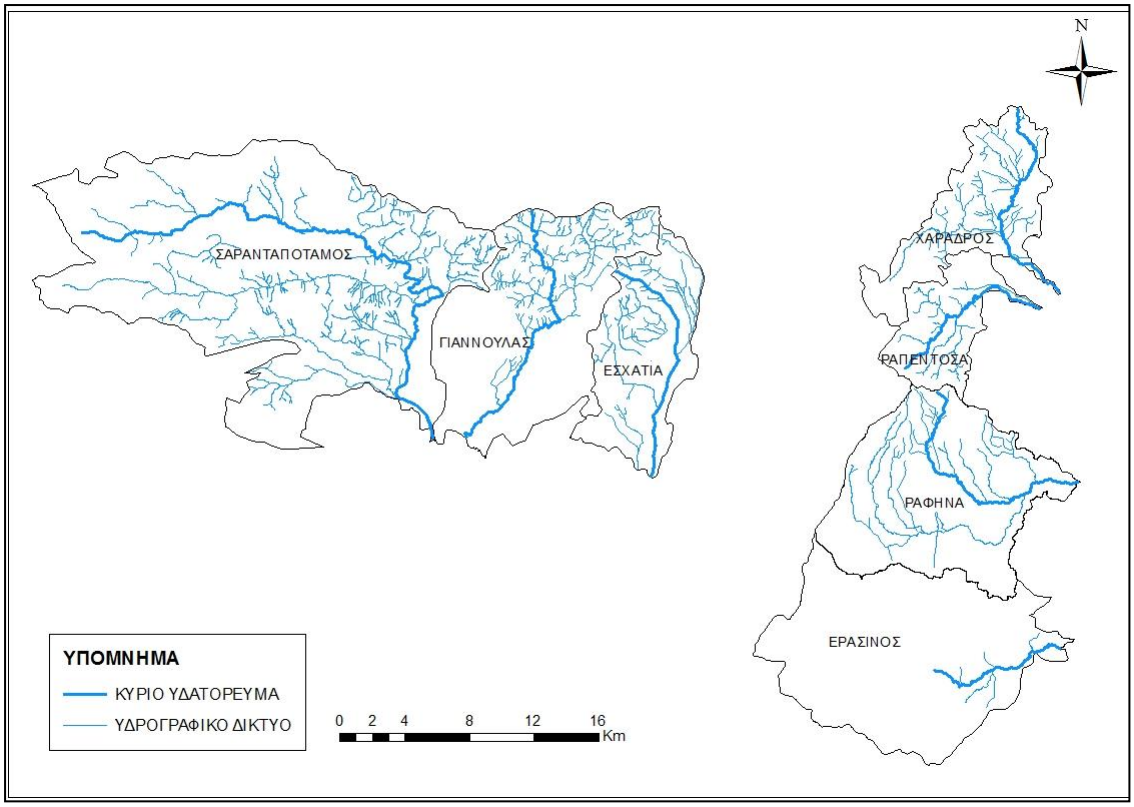


Σχήμα 3.8: Υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης Εσχατιάς σε διανυσματική μορφή ύστερα από διορθώσεις

Έχοντας λοιπόν το υδρογραφικό δίκτυο για κάθε λεκάνη, υπήρξε στη συνέχεια μια διαδικασία κατάταξης του υδρογραφικού δικτύου σε τάξεις κατά Strahler ώστε να βρεθεί το κύριο υδατόρευμα σε κάθε λεκάνη που εξετάζεται. Στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζονται τα υδρογραφικά δίκτυα των λεκανών έχοντας τα κύρια υδατορεύματα με την πιο έντονη γραμμή (σ.σ. για την υδρολογική λεκάνη του Ερασίνου, το δίκτυο αποτυπώνεται κατάντη της Αττικής Οδού).

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το υδρογραφικό δίκτυο που δημιουργήθηκε όπως αναλύθηκε προηγουμένως, έγινε διόρθωση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους σύμφωνα με το υδρογραφικό δίκτυο για όλες τις λεκάνες απορροής που εξετάζονται. Στα Σχήματα 3.10 και 3.11 φαίνεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους πριν τη νέα διόρθωση και μετά τη διόρθωση αντίστοιχα.

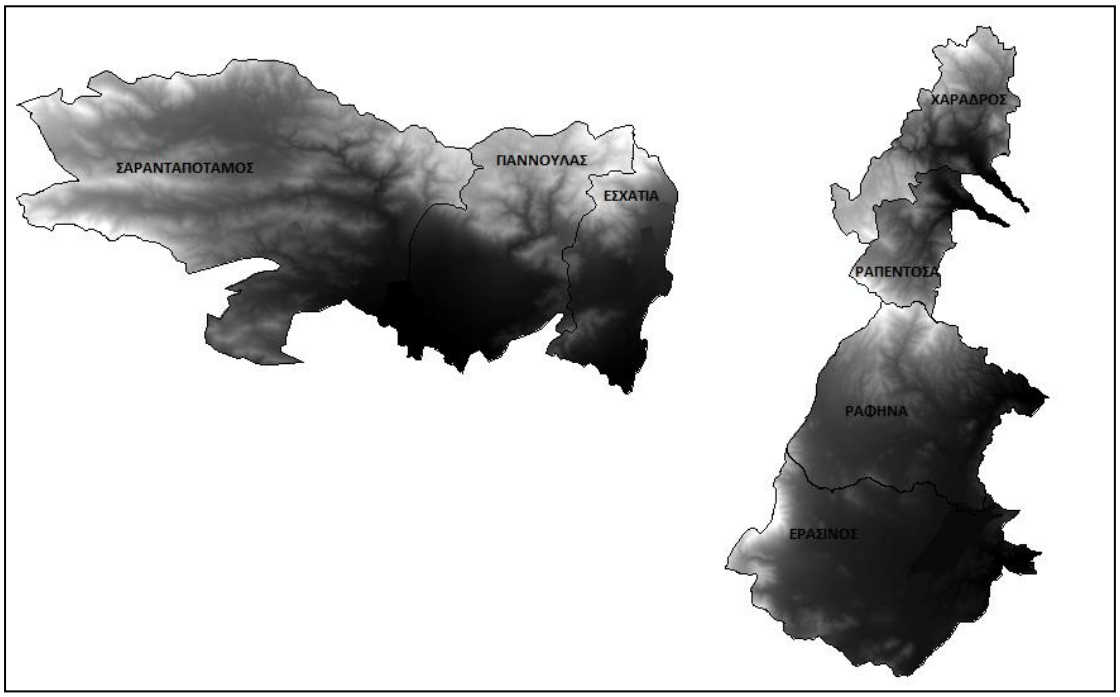
Επιπλέον, με τη βοήθεια του νέου ψηφιακού μοντέλου εδάφους υπολογίστηκαν και οι κλίσεις πρανών για κάθε λεκάνη χωριστά με την εντολή Slope (percentage). Η εντολή αυτή βρίσκεται στο ArcToolbox επιλέγοντας Spatial Analyst Tools και ύστερα Surface. Οι κλίσεις που προέκυψαν ταξινομήθηκαν σε έξι κλάσεις οι οποίες φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 3.1.Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 3.12 για τη λεκάνη της Εσχατιάς.



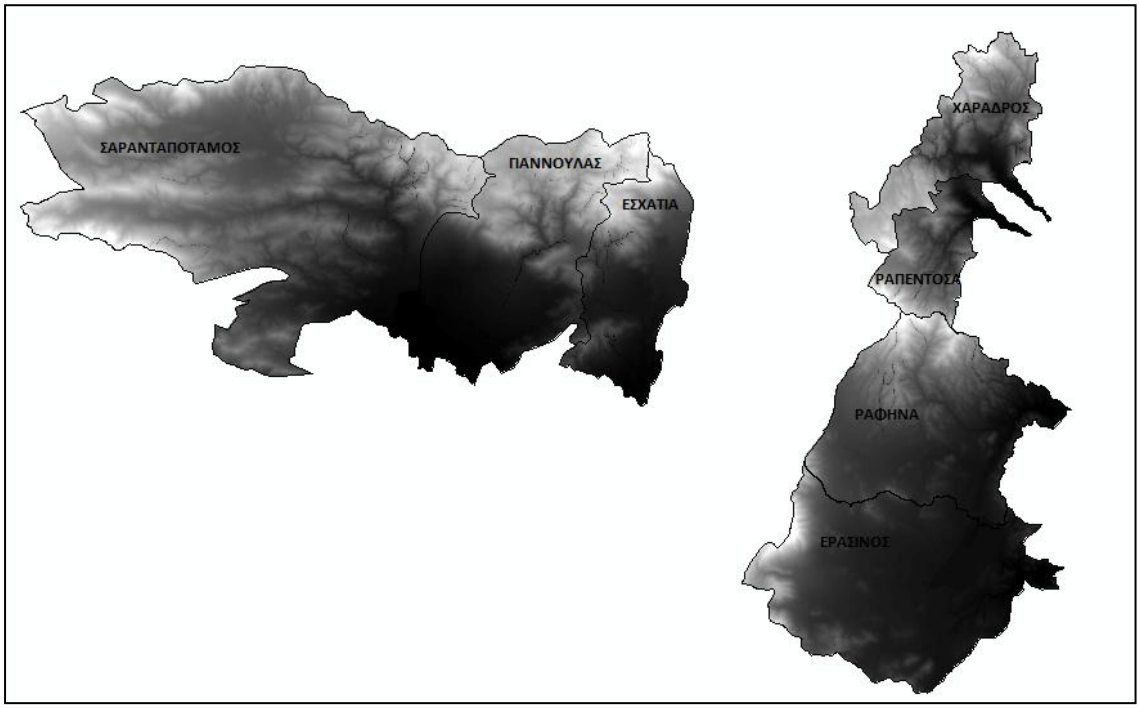
Σχήμα 3.9: Υδρογραφικό δίκτυο και κύρια υδατορεύματα των λεκανών απορρροής μελέτης της Αττικής

Πίνακας 3.1: Πίνακας ταξινόμησης των κλίσεων

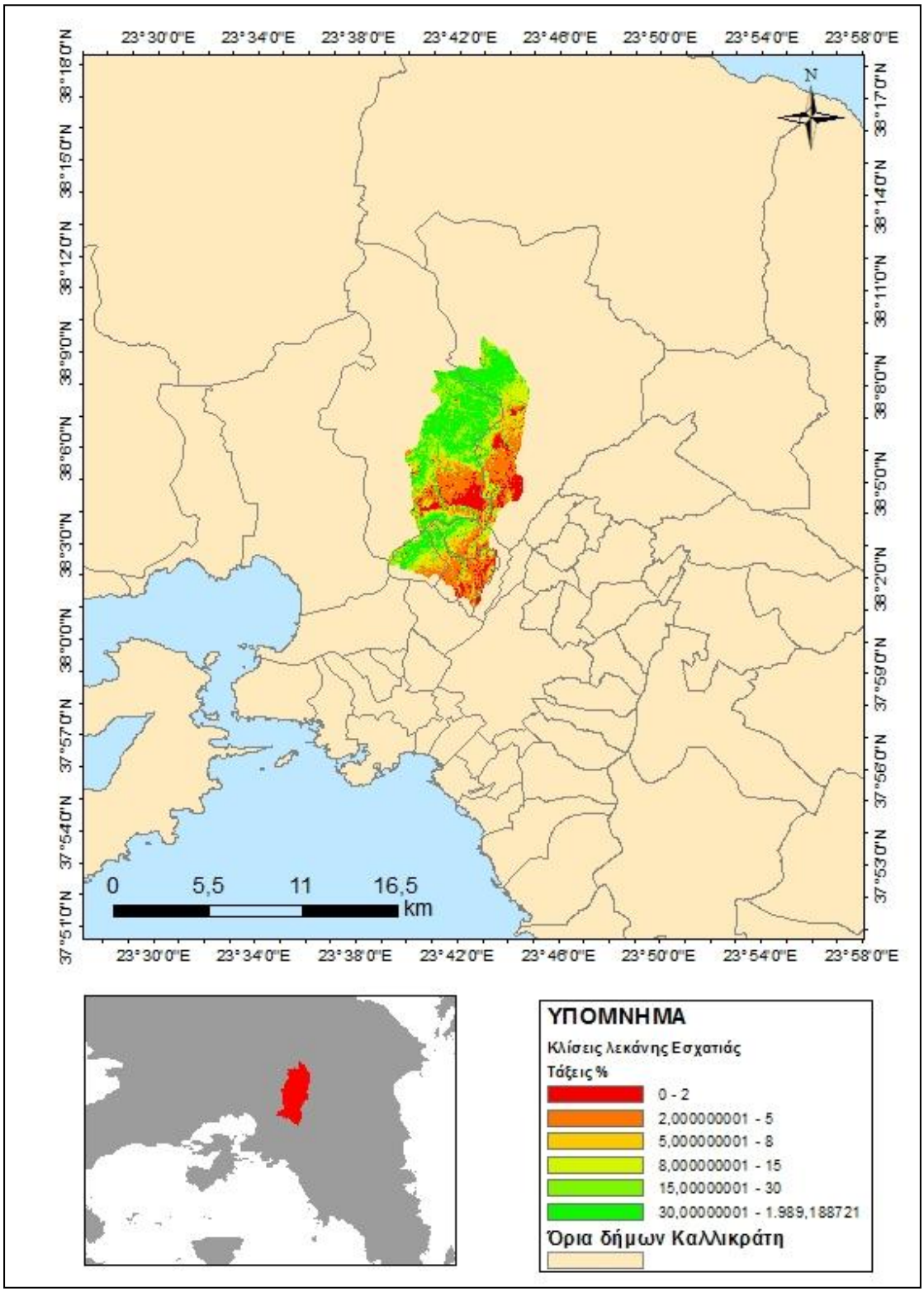
Από 0 έως 2%
Από 2% έως 5%
Από 5% έως 8%
Από 8% έως 15%
Από 15% έως 30%
Από 30% έως max



Σχήμα 3.10: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους των λεκανών απορρροής μελέτης της Αττικής πριν τη διόρθωση σύμφωνα με το υδρογραφικό δίκτυο



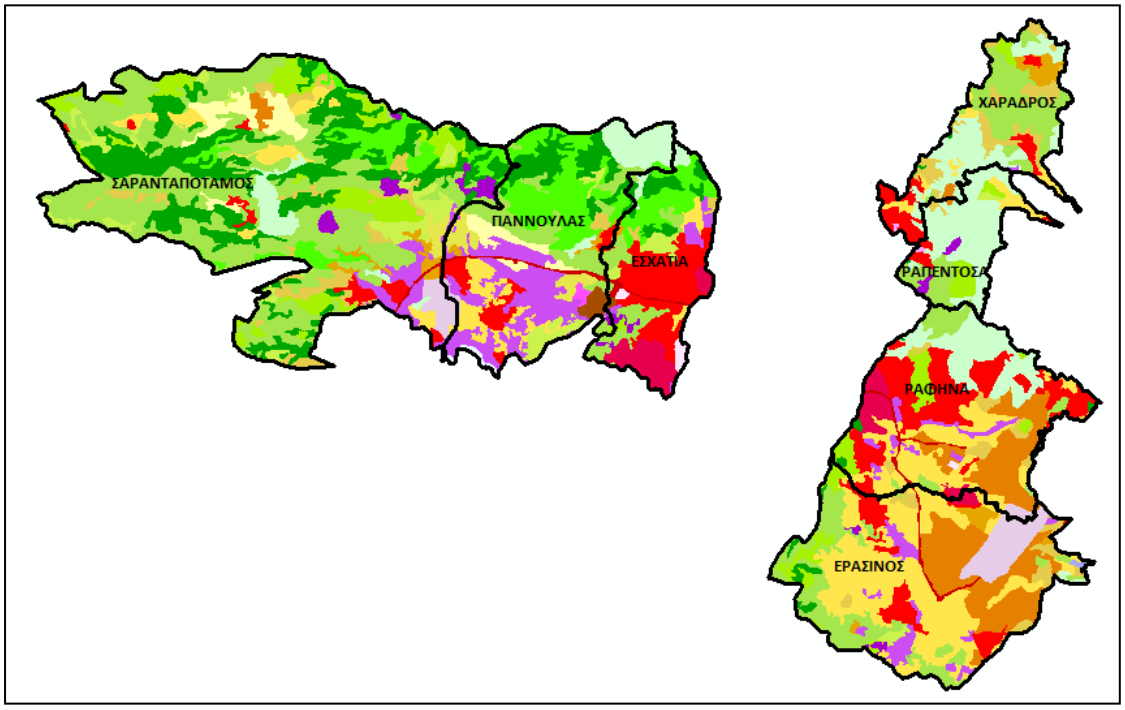
Σχήμα 3.11: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους των λεκανών απορρροής μελέτης της Αττικής μετά τη διόρθωση σύμφωνα με το υδρογραφικό δίκτυο



Σχήμα 3.12: Κλίσεις πρανών σε ποσοστά για τη λεκάνη απορροής της Εσχατιάς

3.1.3 Κάλυψη γης (CORINE Land Cover)

Για την κατασκευή του χάρτη χρήσεων γης για κάθε λεκάνη απορροής που εξετάζεται, χρησιμοποιήθηκε το shapefile που προήλθε από το site https://land.copernicus.eu/acl_users, για καλύψεις γης του 2012 και εισήχθη στο ArcGIS. Για τη δημιουργία της χρωματικής παλέτας με βάση τα πρότυπα του Corine ελήφθη το αρχείο .lyr από το site http://eidc.ceh.ac.uk/metadata/32533dd6-7c1b-43e1-b892-e80d61a5ea1d/corine-land-cover-legend-layer-file/view σε αρχείο word. Μέσω της εντολής symbology συνδέθηκε το layer αρχείο με το shapefile. Παρακάτω στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζονται οι καλύψεις γης για όλες τις λεκάνες απορροής που μελετώνται.



Σχήμα 3.13: Χρήσεις γης για τις λεκάνες απορροής που εξετάζονται στην Αττική

3.2 Μεθοδολογία Πολυκριτηριακής Ανάλυσης

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η χωροθέτηση ενός βέλτιστου δικτύου υδρομετρικών σταθμων στα ρέματα της Αττικής με πολυκριτηριακή ανάλυση. Για το σκοπό αυτό έγινε λήψη αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων, ακολουθώντας τη μεθοδολογία της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (AHP). Θεωρείται γενικά, ότι η ανάλυση λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (MCDA)

ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Η ανάλυση της απόφασης μπορεί να οριστεί ως ένα σύνολο συστηματικών διαδικασιών για την ανάλυση περίπλοκων προβλημάτων. Οι διαφορές μεταξύ της επιθυμητής και της πραγματικής κατάστασης του πραγματικού κόσμου του γεωγραφικού συστήματος είναι ένα πρόβλημα χωρικής απόφασης, το οποίο μπορεί να προσεγγιστεί συστηματικά μέσω απόφασης πολλαπλών κριτηρίων. Η λήψη αποφάσεων βασίζεται σε πολλά στοιχεία που αφορούν το πρόβλημα στο χέρι. Έχει εκτιμηθεί ότι το 80% των δεδομένων που χρησιμοποιούνται από τους διαχειριστές και τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων είναι γεωγραφικά στη φύση. Τα προβλήματα αποφάσεων που περιλαμβάνουν γεωγραφικά δεδομένα αναφέρονται ως γεωγραφικά ή προβλήματα χωρικής απόφασης. Τα προβλήματα χωρικών αποφάσεων συχνά απαιτούν να αξιολογείται ένας μεγάλος αριθμός εφικτών εναλλακτικών λύσεων στη βάση πολλαπλών κριτηρίων. Κατά συνέπεια, πολλά χωρικά προβλήματα του πραγματικού κόσμου μπορούν να οδηγήσουν σε λήψη αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (MCDM) με βάση το γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (GIS). Αυτοί οι δύο ξεχωριστοί τομείς έρευνας, GIS και MCDM, μπορούν να επωφεληθούν ο ένας από τον άλλο. Τεχνικές και διαδικασίες GIS έχουν αναλάβει σημαντική θέση στη λήψη αποφάσεων με την έννοια ότι προσφέρουν μοναδικές δυνατότητες για αυτοματοποίηση, διαχείριση και ανάλυση μιας ποικιλίας χωρικών στοιχείων για τη λήψη αποφάσεων (Samo Drobne & Anka Lisec, 2009). Επομένως και το πρόβλημα που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί «*πρόβλημα χωρικής απόφασης*», καθώς περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό γεωγραφικών δεδομένων και επιπλέον στηρίζεται στις τεχνικές του GIS για την επιλυσή του.

3.2.1 Πολυκριτηριακή Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA)

Η πολυκριτηριακή ανάλυση αποφάσεων (MultiCriteria Decision Analysis ή MCDA), έχει ως κύριο στόχο τη διαμόρφωση τυποποιημένων διαδικασιών οι οποίες βοηθούν τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων στην επίλυση διαφόρων προβλημάτων με βάση τη σύνδεση παραγόντων που σχετίζονται με το πρόβλημα. Είναι μια διαδικασία που συνδυάζει και μεταμορφώνει γεωγραφικά δεδομένα (εισροές) σε μια προκύπτουσα απόφαση (εκροή), δηλαδή ορίζει μια σχέση μεταξύ "χαρτών εισόδου" και "χαρτών εξόδου". Οι γεωγραφικές πληροφορίες μπορούν να οριστούν ως δεδομένα με γεωαναφορά που έχουν μεταποιηθεί σε μορφή που έχει νόημα στον παραλήπτη. Τα δεδομένα στο γεωγραφικό συστήμα πληροφοριών είναι συνήθως οργανωμένα από

χωριστούς θεματικούς χάρτες που αναφέρονται ως επίπεδα χαρτών (layers). Ανεξάρτητα από την οργάνωση των χωρικών δεδομένων, ο τελικός στόχος των GIS είναι η παροχή στήριξης για χωρικές αποφάσεις, με δυνατότητες αποθήκευσης, ανάκτησης, χειρισμού και ανάλυσης. Η MCDM έχει τη σημαντική ικανότητα να συνδυάζει τα γεωγραφικά δεδομένα και τις προτιμήσεις του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων σε μονοδιάστατες αξίες των εναλλακτικών αποφάσεων (Samo Drobne & Anka Lisec, 2009).

Τα γενικά στάδια υλοποίησης της μεθοδολογίας της MCDM παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.14.

Σχήμα 3.14: Στάδια υλοποίησης μοντέλου Πολυκριτηριακής Ανάλυσης
[Πηγή: Χαλκιάς, 2015]

Αρχικά γίνεται ο προσδιορισμός του γενικού προβλήματος, καθώς και των επιμέρους στόχων. Όταν το προς επίλυση πρόβλημα προϋποθέτει την εξέταση πολλών αντικρουόμενων επιμέρους στόχων, τότε η μέθοδος καλείται πολλαπλών στόχων

(MultiObjective Decision Analysis - MODA). Σε αντίθετη περίπτωση, όταν η στόχευση είναι μία, τότε η μέθοδος καλείται πολλαπλών περιγραφών (MultiAttribute Decision Analysis MADA), καθώς η ανάλυση βασίζεται στην εξέταση κριτηρίων με μετρήσιμες περιγραφές που σχετίζονται με το γενικό πρόβλημα. Για την επίλυση του προβλήματος που εξετάζεται στο παρόν τεύχος χρησιμοποιείται η μέθοδος MADA, καθώς εξετάζονται κριτήρια για την επίτευξη ενός στόχου που είναι η βέλτιστη χωροθέτηση υδρομετρικών σταθμών. Στη συνέχεια, προσδιορίζονται τα κριτήρια και οι εναλλακτικές επιλογές. Τα κριτήρια μπορεί να είναι παράγοντες (factors) και περιορισμοί (restrictions) που σχετίζονται με το πρόβλημα προς εξέταση. Η επόμενη φάση σχετίζεται με την αξιολόγηση των κριτηρίων και τον καθορισμό των προτιμήσεων των υπεύθυνων λήψης αποφάσεων. Αφού επιλεγεί η μέθοδος σύνθεσης των κριτηρίων και καθοριστούν οι συντελεστές βαρύτητας, παράγονται τα τελικά αποτελέσματα για τις εναλλακτικές επιλογές. Η ανάλυση της ευαισθησίας του μοντέλου (Sensitivity Analysis), είναι το επόμενο βήμα πριν τη διαμόρφωση των τελικών προτάσεων. Στην ανάλυση ευαισθησίας ελέγχεται αν το μοντέλο και τα τελικά αποτελέσματα είναι ευαίσθητα σε μικρές αλλαγές είτε στη βαθμονόμηση των κριτηρίων, είτε στους συντελεστές βαρύτητας. Οι έλεγχοι αυτοί πραγματοποιούνται υπολογιστικά με διαδοχικές επανεκτελέσεις του μοντέλου. Σε περίπτωση που διαγνωστεί μεγάλη ευαισθησία του μοντέλου σε τέτοιες μικροαλλαγές, θα πρέπει να γίνουν οι απαραίτητες τροποποιήσεις σε προηγούμενα στάδια. Τέλος διαμορφώνονται οι οριστικές προτάσεις, οι οποίες βασίζονται στην αποτίμηση των εναλλακτικών επιλογών (Χαλκιάς, 2015).

Η πρακτική διαμόρφωση αυτής της δομής σ’ ένα υπολογιστικό σύστημα γίνεται με τη δημιουργία του πίνακα αποφάσεων (Decision Matrix), ο οποίος παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Πίνακας απόφασης (Ε: Εναλλακτικές επιλογές, W: Weights - Συντ/στές βαρύτητας)

	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ 1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ 2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ 3.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ 3.2	• • •	ΤΕΛΙΚΗ ΑΠΟΦΑΣΗ
Ε 1	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ 1 - 1	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ 1 - 2	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ 1 - 3.1	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ 1 - 3.2	• • •	ΤΑ - 1
Ε 2	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ 2 - 1	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ 2 - 2	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ 2 - 3.1	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ 2 - 3.2	• • •	ΤΑ - 2
Ε 3	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ 3 - 1	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ 3 - 2	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ 3 - 3.1	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ 3 - 3.2	• • •	ΤΑ - 3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
ΠΡΟΤΙΜΗΣΕΙΣ	W 1	W 2	W 3.1	W 3.2	• • •	

[Πηγή: Χαλκιάς, 2015]

Οι γραμμές του πίνακα αντιστοιχούν στις εναλλακτικές επιλογές (altenratives), ενώ οι στήλες στις περιγραφές (attributes) των κριτηρίων. Στα κελιά του πίνακα υπολογίζονται οι παραγόμενες τιμές κάθε περιγραφής για κάθε εναλλακτική επιλογή λαμβάνοντας υπόψη και τον αντίστοιχο συντελεστή βαρύτητας (weight), ενώ η τελική στήλη περιέχει την τελική αξιολόγηση - αποτίμηση κάθε εναλλακτικής επιλογής (Χαλκιάς, 2015).

3.2.2 Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP)

Υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους μπορούν να συνδυαστούν τα κριτήρια απόφασης στην MCDM. Ο σταθμισμένος γραμμικός συνδυασμός (WLC) και οι παραλλαγές του απαιτούν άθροιση των σταθμισμένων κριτηρίων. Η Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχισης (AHP), αποτελεί μια υιοθέτηση του WLC. Η AHP προτάθηκε από τον T.L. Saaty (Saaty, 1977, Saaty 1987) και στηρίζεται στην αρχή ότι, για τη λήψη μίας απόφασης, η εμπειρία και η γνώση των ανθρώπων είναι το ίδιο σημαντική με τα διαθέσιμα δεδομένα. Στα ελληνικά έχει προταθεί η απόδοση της μεθόδου με τον όρο «Μέθοδος Αναλυτικής Ιεράρχησης» ή «Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης». Πρόκειται για μια αναλυτική μέθοδο που πριέχει μαθηματική και λογική αιτιολόγηση για τη λήψη αποφάσεων και συμβάλλει στη μετατροπή των σκέψεων και διαισθήσεων του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων σε αριθμητικές αξιολογήσεις. Επίσης, δομεί το πρόβλημα σε μια ιεραρχία, με στόχο τη μείωση της πολυπλοκότητας του μέσα από την αποδόμησή σε υπο-προβλήματα. Γενικά, αποτελεί

υπολογιστική θεωρία η οποία χρησιμοποιεί τόσο παραγωγική όσο και επαγωγική λογική λαμβάνοντας υπόψη πολλούς διαφορετικούς παράγοντες ταυτόχρονα.

Τα στάδια υλοποίησης της μεθόδου AHP είναι (Χαλκιάς, 2015):

1. Αποδόμηση του μελετώμενου προβλήματος σ' ένα ιεραρχικό (ή δικτυακό) μοντέλο, το οποίο απαρτίζεται από τις βασικές συνιστώσες του επιτρέποντας τις συγκρίσεις κατά ζεύγη.
2. Συγκριτική αξιολόγηση κάθε συνιστώσας- κριτηρίου.
3. Σύνθεση των αξιολογημένων κριτηρίων με σκοπό την παραγωγή των τελικών αποτελεσμάτων.
4. Εύρεση βέλτιστης / επιθυμητής επιλογής.

Επομένως γίνεται ιεράρχηση του προβλήματος με τον καθορισμό των κριτηρίων με βάση τα οποία θα γίνει η ανάλυση, ακολουθεί η συγκριτική κατάταξη των κριτηρίων, η οποία προκύπτει από την εμπειρία των υπεύθυνων λήψης αποφάσεων και τέλος πραγματοποιείται η σύνθεση αυτών ώστε να παραχθεί το τελικό αποτέλεσμα, ως η βέλτιστη εναλλακτική λύση σύμφωνα με τις προτεραιότητες και τους στόχους που έχουν τεθεί από τον ερευνητή. Στην AHP, οι ανθρώπινες απόψεις απεικονίζονται με απόλυτες τιμές μέσα σ' ένα αυστηρό αριθμητικό πλαίσιο.

Η εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει κατά συνέπεια δύο γενικές φάσεις, τη δόμηση της ιεραρχίας και το στάδιο της αξιολόγησης των επιμέρους κριτηρίων. Το στάδιο της αξιολόγησης βασίζεται στην ιδέα των συγκρίσεων ανά ζεύγη (pairwise comparisons) των διαφόρων κριτηρίων σύμφωνα με την υποκειμενική (προσωπική, εμπειρική, βιβλιογραφική, έρευνα πεδίου, κ.τ.λ) άποψη του ερευνητή, ως προς την σχέση σημαντικότητας που έχουν οι παράγοντες μεταξύ τους. Η σύγκριση ανά ζεύγη γίνεται σύμφωνα με την θεμελιώδη κλίμακα σύγκρισης που έχει εισάγει ο Saaty και φαίνεται στον Πίνακα 3.3. Στην τεχνική του Saaty, τα βάρη προέρχονται από μια σειρά πράξεων ενός τετραγώνου αμοιβαίας μήτρας συγκρίσιμων ζευγαριών μεταξύ των κριτηρίων. Οι συγκρίσεις αφορούν την συγγενή σημασία των δύο κριτηρίων που συνδέονται με τον προσδιορισμό της καταλληλότητας για τον επιδιωκόμενο στόχο. Αυτή η τεχνική αναπτύχθηκε έξω από το λογισμικό GIS χρησιμοποιώντας μια ποικιλία αναλυτικών πηγών και η πρώτη χρήση της με εφαρμογή GIS ήταν το 1991 (Samo Drobne & Anka Lisec, 2009).

Πίνακας 3.3: Θεμελιώδης κλίμακα σύγκρισης ζευγών (Saaty, 1977)

Intensity of Importance	Definition
1	Equal importance
2	Equal to moderate importance
3	Moderate importance
4	Moderate to strong importance
5	Strong importance
6	Strong to very strong importance
7	Very strong importance
8	Very to extremely strong importance
9	Extreme importance

Πηγή: Samo Drobne & Anka Lisec, 2009

Επομένως η παραπάνω τέχνικη σύγκρισης ζευγών θα συμβάλλει στην ανάπτυξη των βαρών των κριτηρίων. Όταν υπάρχουν πολλά κριτήρια, τότε τα βάρη συνήθως κανονικοποιούνται, έτσι ώστε να ανέρχονται σε τιμή 1. Στην περίπτωση n κριτηρίων, ένα σύνολο βαρών ορίζεται ως εξής:

$$W=(w_1,w_2,\ldots,w_j,\ldots,w_n)$$

και

$$\Sigma w_j=1$$

Κατά την ανάπτυξη βαρών, ένα άτομο ή μια ομάδα συγκρίνει κάθε πιθανή αντιστοίχιση και εισάγει τις βαθμολογίες σε ζεύγη συγκρίσιμης μήτρας. Αν η μήτρα είναι συμμετρική, μόνο το κατώτερο τρίγωνο πρέπει να συμπληρωθεί.Τα υπόλοιπα κελιά είναι απλά ορισμένα βάσει του κατώτερου τριγώνου. Για την εκτίμηση του βάρους κάθε κριτηρίου ακολουθείται από το πρόγραμμα του QGIS η εξής διαδικασία:

1. Αθροίζονται οι τιμές κάθε στήλης της μήτρας συγκρίσιμων ζευγών
2. Διαιρείται κάθε στοιχείο της μήτρας με το άθροισμα της στήλης της που βρέθηκε προηγουμένως.
3. Υπολογίζεται ο μέσος όρος των στοιχείων για κάθε σειρά της μήτρας που προέκυψε στο προηγούμενο βήμα

Οι μέσοι όροι που προκύπτουν αποτελούν και τα βάρη των κριτηρίων (Samo Drobne & Anka Lisec, 2009).

Ακολουθεί ο έλεγχος συνέπειας της σύγκρισης των κριτηρίων και των συντελεστών βαρύτητας που προέκυψαν. Ο λόγος συνέπειας δε θα πρέπει να ξεπερνά το 10% (CR ≤ 0.10) για να θεωρείται λογική η ιεράρχηση και η σχέση σύγκρισης που έχει πραγματοποιηθεί μεταξύ των πρωτογενών παραγόντων και να είναι αποδεκτοί οι συντελεστές βαρύτητας που προέκυψαν (Χαλκιάς, 2015). Ο Saaty προτείνει ότι θα πρέπει να επανεκτιμηθούν οι συντελεστές βαρύτητας αλλάζοντας στοιχεία της μήτρας εάν δεν ισχύει ότι CR ≤ 0.10. Η εκτίμηση του λόγου συνέπειας γίνεται από την Εξίσωση 3.1:

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{3.1}$$

Όπου

RI: Ο τυχαίος δείκτης συνέπειας της τυχαίας παραγόμενης μήτρας συγκρίσιμων ζευγών και εξαρτάται από τον αριθμό των στοιχείων που συγκρίνονται.

CI: Ο δείκτης συνέπειας που παρέχει ένα μέτρο απομάκρυσνης από τη συνέπεια. Υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.2:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \tag{3.2}$$

Όπου

λ: Η ιδιοτιμή του πίνακα

n: Ο αριθμός των κριτηρίων

Μια ακόμη διαδικασία που πρέπει να πραγματοποιηθεί ώστε να καταλήξουμε στο χάρτη καταλληλότητας των βέλτιστων θέσεων του δικτύου υδρομετρικών σταθμών είναι η τυποποίηση των κριτηρίων με κατηγοριοποίηση (classification) κάθε κριτηρίου σε μια ενιαία τακτική κλίμακα ταξινόμησης. Η κατηγοριοποίηση των κριτηρίων έχει σκοπό τη δημιουργία συγκρίσιμων μεγεθών για κάθε κριτήριο (Χαλκιάς 2015). Ο Voogd (1983) επανεξέτασε μια ποικιλία διαδικασιών για τυποποίηση, χρησιμοποιώντας συνήθως τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές ως σημεία κλιμάκωσης. Το απλούστερο είναι μια γραμμική κλίμακα όπως οι ακόλουθες Εξισώσεις (3.3), (3.4) :

$$x_i = \frac{(FV_i - FV_{min})}{(FV_{max} - FV_{min})} \cdot SR \quad (3.3) \quad \text{ή} \quad x_i = 1 - \frac{(FV_i - FV_{min})}{(FV_{max} - FV_{min})} \cdot SR \quad (3.4)$$

Όπου

FVi: Η ακατέργαστη τιμή του κριτηρίου i

FVmin,max: Η ελάχιστη και μέγιστη τιμή του κριτηρίου i

SR: Το τυποποιημένο φάσμα με τιμές από 0 έως 1

Η Εξίσωση (3.4) χρησιμοποιείται σε κριτήρια όπου εμφανίζουν τη βέλτιστη τιμή τους στην ελάχιστη τιμή, όπως συμβαίνει στην κλίση όταν χρησιμοποιείται για κριτήριο στη χωροθέτηση υδρομετρικών σταθμών.

Το τελευταίο βήμα της μεθόδου αφορά στη δημιουργία, υπολογισμό του ζητούμενου επιπέδου πληροφορίας που αφορά στην καταλληλότητα των περιοχών για τη βέλτιστη χωροθέτηση δικτύου υδρομετρικών σταθμών σε συγκεκριμένες λεκάνες απορροής. Επομένως πρέπει να προκύψει ο χάρτης καταλληλότητας. Ο σταθμισμένος γραμμικός συνδυασμός **(**WLC) ή απλά πρόσθετο βάρους, ενσωματώνεται στο περιβάλλον του QGIS σύμφωνα με την Εξίσωση (3.5), όπου χρησιμοποιήθηκε επίσης από τους Feloni et al., (2018) για την εύρεση βέλτιστων θέσεων τοποθέτησης υδρομετρικών σταθμών.

$$FS = \sum w_i x_i \quad (3.5)$$

Όπου

FS: Η τελική τιμή για κάθε κελί

wi: Το βάρος του κριτηρίου i

xi: Η τυποποιημένη τιμή του κριτηρίου i

Σε περιπτώσεις, όπου ισχύουν επίσης οι περιορισμοί Boolean, η διαδικασία μπορεί να τροποποιηθεί πολλαπλασιάζοντας την τιμή FS με τους συντελεστές των προϊόντων των περιορισμών, όπως φαίνεται στην Εξίσωση (3.6) :

$$FS' = \sum w_i x_i \cdot \prod c_i \quad (3.6)$$

Όπου

ci: Οι περιορισμοί

Με την παραπάνω εξίσωση οι περιοχές με κωδικό 0 οδηγούν σε τελική τιμή μηδενική άρα ακατάλληλες, ενώ οι κατάλληλες περιοχές δεν περιέχουν 0.

Ως εκ τούτου, λαμβάνεται η συνολική βαθμολογία για κάθε εναλλακτική λύση πολλαπλασιάζοντας τη σημαντικότητα του βάρους που αποδίδεται σε κάθε ένα χαρακτηριστικό από την κλιμακούμενη τιμή που δίνεται για το χαρακτηριστικό αυτό στην εναλλακτική λύση και στη συνέχεια αθροίζονται τα προϊόντα σε όλα τα χαρακτηριστικά. Οι βαθμολογίες υπολογίζονται για όλες τις εναλλακτικές λύσεις και αυτή με το υψηλότερο σκόρ όλων επιλέγεται.

3.2.3 Κριτήρια χωροθέτησης Δικτύου Υδρομετρικών Σταθμών

Οι κατάλληλες θέσεις που μπορεί να εγκατασταθεί ένας υδρομετρικός στάθμος, θα πρέπει να ικανοποιεί τα κριτήρια που είναι ορισμένα στο ISO 1100-1 και τα οποία είναι (WMO-No. 1044, 2010):

I. Η γενική πορεία του ρέματος θα πρέπει να είναι ευθεία περίπου 10 φορές το πλάτος ροής, ανάντη και κατάντη από το σημείο μέτρησης.

II. Η συνολική ροή να περιορίζεται σε ένα κανάλι σε όλα τις στάθμες και καμιά ροή να μην παρακάμπτει την περιοχή ως υπόγεια ροή.

III. Το σώμα του ρέματος να μην υπόκειται σε καθαρισμό και πλήρωση και να είναι σχετικά απαλλαγμένο από υδρόβια βλάστηση.

IV. Οι όχθες να είναι μόνιμες, αρκετά υψηλές ώστε να αντέχουν πλημμύρες, και χωρίς χαμόκλαδα.

V. Να υπάρχει μια μικρή περιοχή καλυμμένη με νερό ανάντι της θέσης του σταθμού για να εξασφαλιστεί η εγγραφή της στάθμης σε εξαιρετικά χαμηλά στάδια ροής και για να αποφευχθούν υψηλές ταχύτητες στην καταγραφή της ροής του ρέματος, ή στο στόμιο μανομέτρου κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής ροής. Η ευαισθησία του ελέγχου θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε οποιαδήποτε σημαντική αλλαγή στην εκροή πρέπει να επιφέρει μια μετρήσιμη αλλαγή στη στάθμη.

VI. Η περιοχή του σταθμού πρέπει να είναι αρκετά μακριά ανάντη της συρροής με άλλο ρέμα ή από παλιρροϊακή επίδραση για να αποφευχθεί οποιαδήποτε επιρροή στη στάθμη στην περιοχή που μετράει ο σταθμός από άλλη ροή ή παλίρροια.

VII. Ο χώρος είναι εύκολα προσβάσιμος για εύκολη εγκατάσταση και λειτουργία του σταθμού μέτρησης.

Σπάνια θα βρεθεί μια ιδανική τοποθεσία για έναν σταθμό μέτρησης και πρέπει να ασκείται κριτική κατά την επιλογή μεταξύ κατάλληλων τοποθεσιών, κάθε μία από τις οποίες μπορεί να έχει ορισμένες ελλείψεις. Συχνά δυσμενείς συνθήκες μπορεί να υπάρχουν σε όλες τις πιθανές τοποθεσίες για την εγκατάσταση ενός απαιτούμενου σταθμού μέτρησης και ένας ελλειπής χώρος να πρέπει να γίνει αποδεκτός. Για παράδειγμα, όλα τα ρέμματα που υπάρχουν σε μια δοσμένη περιοχή μπορεί να έχουν ασταθή σώματα και όχθες, με αποτέλεσμα συνεχώς να μεταβάλλονται οι σχέσεις μεταξύ στάθμης και εκφόρτισης. Η ικανοποίηση της πλειοψηφίας των παραπάνω κριτηρίων προκύπτει ύστερα από επί τόπου παρατήρηση στο πεδίο. Η διαδικασία στο περιβάλλον του GIS μπορεί να προτείνει μερικές υποψήφιες θέσεις για εγκατάσταση σταθμών σύμφωνα μόνο με μερικές ομάδες από τα κριτήρια που αναφέρθηκαν προηγουμένως και αυτά είναι τα κριτήρια: I, VI, III, ή I, VI, IV, V, III. Η δυνατότητα της διαδικασίας του GIS επηράζεται άμεσα από την ποιότητα των διαδέσιμων γεωγραφικών δεδομένων (Feloni et al., 2018).

3.2.3.1 Κριτήριο Πυκνότητας Δικτύου Υδρομετρικών Σταθμών

Η πυκνότητα των υδρομετρικών σταθμών είναι σημαντική για τη συλλογή δεδομένων σε μια λεκάνη απορροής. Επομένως, η επιλογή της θέσης για τους σταθμούς είναι πολύ σημαντική για την προσαρμογή της ζήτησης των δεδομένων και των οικονομικών για την εγκατάστασή τους. Το WMO (2010) συνέστησε την πυκνότητα ενός δικτύου υδρομετρικών σταθμών ανάλογα με τον τύπο περιοχής όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα 3.4 (WMO, 2010).

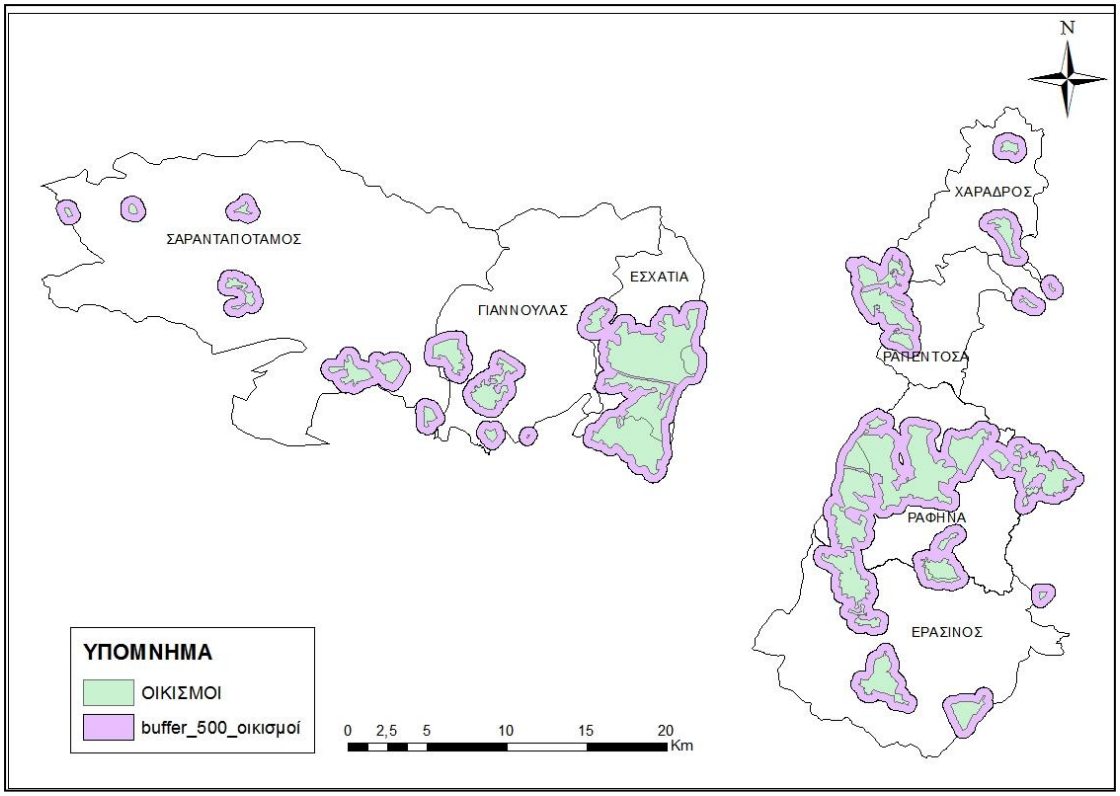
Πίνακας 3.4: Πυκνότητα Δικτύου Υδρομετρικών Σταθμών (Πηγή δεδομένων: WMO, 2010)

Type	Density
Coastal	1 station *per* 2750km^2
Mountainous	1 station *per* 1000km^2
Hilly	1 station *per* 1875km^2
Plains	1 station *per* 1875km^2
Small islands (area<500km^2)	1 station *per* 1985km^2
Polar, arid	1 station *per* 20000km^2

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αποφασίστηστηκε η εγκατάσταση ενός υδρομετρικού σταθμού σε κάθε λεκάνη απορροής που μελετήθηκε, καθώς το εμβαδόν των λεκανών της Αττικής είναι πολύ μικρό, οπότε σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα απαιτείται τουλάχιστον ένας στάθμος, αλλά σε κάποιες λεκάνες αποφασίστηκε η εγκατάσταση δύο υδρομετρικών σταθμών.

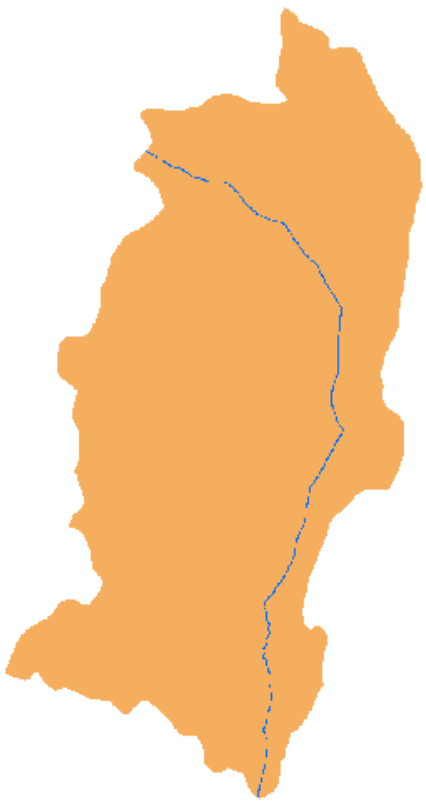
1.2.3.1. Κριτήριο απόστασης από οικισμούς

Η εγκατάσταση υδρομετρικών σταθμών κοντά σε οικισμούς, είναι ιδιαίτερα σημαντική για την προειδοποίηση σε περίπτωση πλημμυρικών επεισοδιών. Προκειμένου να εμφανιστούν οι οικισμοί στις λεκάνες που εξετάζονται, επιλέχθηκε από το Corine 2012 στο ArcGIS η κατηγορία αστική οικοδόμηση που περιέχει τους κωδικούς 111, 112 για συνεχής αστική οικοδόμηση και διακεκομμένη αστική οικοδόμηση αντίστοιχα. Ως εκ τούτου, εμφανίστηκαν οι οικισμοί σαν πολύγονα για κάθε λεκάνη και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας την εντολή buffer δημιουργήθηκε μια ζώνη 500 μέτρων γύρω από την περίμετρο των οικισμών έχοντας την τιμή 0, στην οποία δεν θα ήταν καλό να εγκατασταθεί κάποιος υδρομετρικός σταθμός, διότι δεν θα είχε νόημα για προειδοποίηση σε περίπτωση πλημμύρας. Επομένως, η ζώνη αυτή θα χρησιμοποιηθεί σαν περιορισμός για αποκλεισμό χωροθέτησης εντός της. Στο Σχήμα 3.15 φαίνονται οι οικισμοί για τις λεκάνες απορροής, καθώς και οι ζώνες που δημιουργήθηκαν.



Σχήμα 3.15: Χάρτης οικισμών και raster buffer 500 μέτρων των οικισμών για τις λεκάνες μελέτης της Αττικής

Ύστερα, προκειμένου να εφαρμοστεί το κριτήριο ώστε ο υδρομετρικός σταθμός να βρίσκεται στην πιο κοντινή απόσταση από τα πολύγονα των οικισμών, αλλά και εκτός της ζώνης των 500 μέτρων που δημιουργήθηκε, υπολογίστηκαν οι ευκλείδειες αποστάσεις από τα buffer των οικισμών και δημιουργήθηκε ένα αρχείο στο οποίο έγινε τυποποίηση μέσω της εντολής των πράξεων από το Raster Calculator χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 3.4, ώστε η καλύτερη θέση χωροθέτησης να είναι αυτή με τιμές πιο κοντά στο μηδέν. Επομένως προέκυψε ένα αρχείο τυποποιημένο με τιμές (0,1) με κριτήριο τις αποστάσεις από οικισμούς. Στη συνέχεια, για να οριστεί το ανάντι των οικισμών και να προκύψει το τελικό τυποποιημένο κριτήριο που θα περιέχει την μικρότερη απόσταση και το ανάντι από τους οικισμούς, ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Αρχικά επιλέχθηκε το διανυσματικό αρχείο των κύριων υδατορευμάτων και δημιουργήθηκε ένα νέο πεδίο το οποίο επιλέχθηκε και εισήχθη η τιμή 1 μέσω του Field Calculator. Με την εντολή Feature to Raster, το διανυσματικό αρχείο των κύριων υδατορευμάτων, επιλέγοντας το πεδίο που ορίστηκε να έχει την τιμή 1 μετατράπηκε σε αρχείο raster με τιμή 1. Στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα για την περίπτωση της Εσχατιάς.

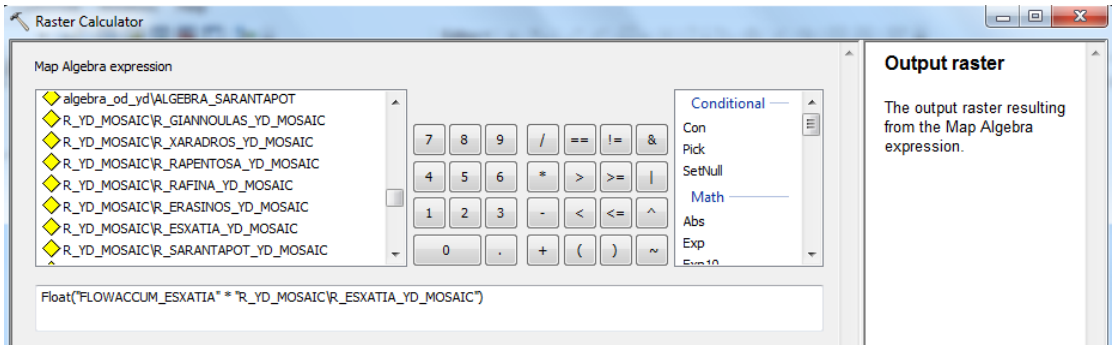


Σχήμα 3.16: Κύριο υδατόρευμα σε μορφή raster με τιμή 1 για τη λεκάνη της Εσχατιάς

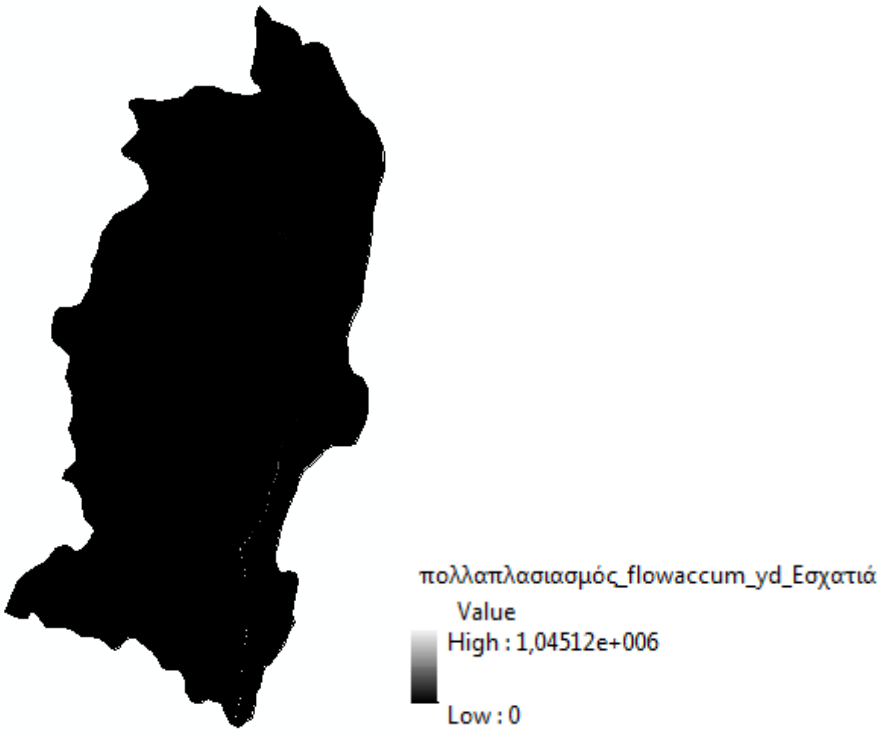
Έπειτα ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία για όλες τις λεκάνες απορροής που μελετώνται ώστε να προκύψει αρχείο raster για κάθε λεκάνη με τιμή όμως 0. Έχοντας λοιπόν τα δύο αρχεία raster της λεκάνης και του κύριου υδατορεύματος που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκε η εντολή Mosaic to New Raster ώστε να ενωθούν και να προκύψει ένα ενιαίο μωσαϊκό που θα περιέχει τα δυο παραπάνω αρχεία και το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.17 για την περίπτωση της λεκάνης απορροής της Εσχατιάς.

Σχήμα 3.17: Αποτέλεσμα της εντολής Mosaic to New Raster των raster αρχείων κύριου υδατορεύματος και λεκάνης απορροής της Εσχατιάς

Αφού δημιουργήθηκε το ενιαίο αυτό αρχείο που έχει τιμές (0-1), πολλαπλασιάστηκε με το αρχείο flow accumulation που υπολογίστηκε όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.1.2. Ο πολλαπλασιασμός έγινε μέσω της εντολής πράξεων Raster Calculator της φαίνεται στο Σχήμα 3.18 για την περίπτωση της λεκάνης απορροής της Εσχατιάς. Αυτή η πράξη έγινε για όλες τις λεκάνες ξεχωριστά. Στο Σχήμα 3.19 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού για την περίπτωση της λεκάνης απορροής της Εσχατιάς.

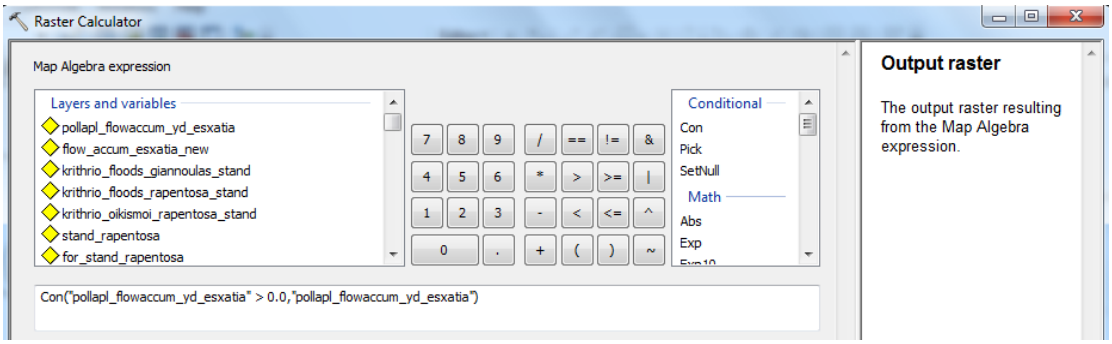


Σχήμα 3.18: Πολλαπλασιασμός του αρχείου Mosaic του κύριου υδατορεύματος και της λεκάνης της Εσχατιάς με το αρχείο του flow accumulation της Εσχατιάς.

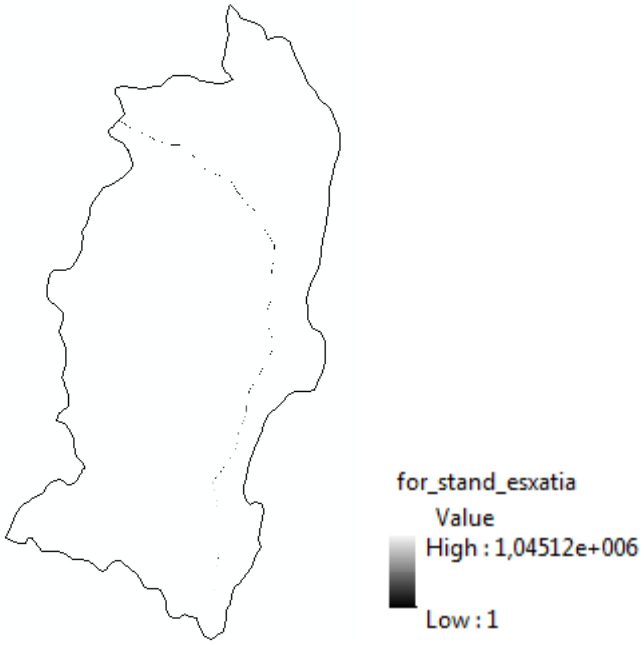


Σχήμα 3.19: Αποτέλεσμα πολλαπλασιασμού Πολλαπλασιασμός του αρχείου Mosaic του κύριου υδατορεύματος και της λεκάνης της Εσχατιάς με το αρχείο του flow accumulation της Εσχατιάς.

Για το αποτέλεσμα αυτό, εφαρμόστηκε η συνθήκη που φαίνεται στο Σχήμα 3.20, μέσω της εντολής πράξεων Raster Calculator, για να απομονωθεί το κύριο υδατόρευμα. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα 3.21 για τη λεκάνη απορροής της Εσχατιάς.

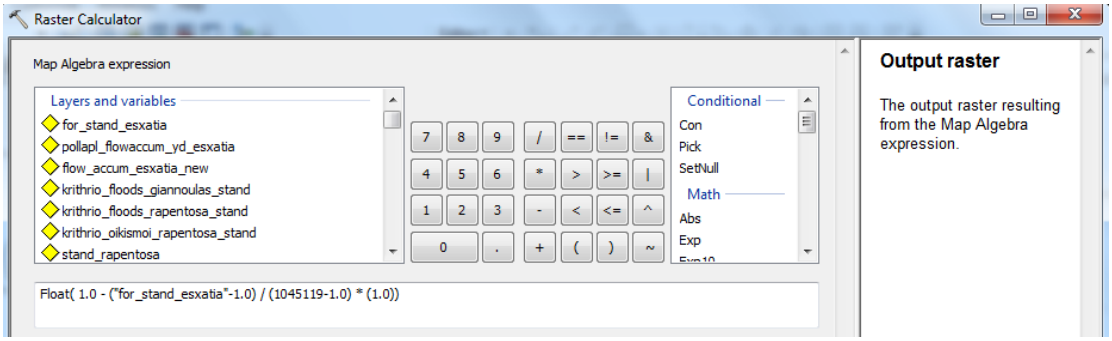


Σχήμα 3.20: Σύμβαση του αρχείου που προέκυψε από τον πολλαπλασιασμό του αρχείου Mosaic του κύριου υδατορεύματος και της λεκάνης της Εσχατιάς με το αρχείο του flow accumulation της Εσχατιάς.

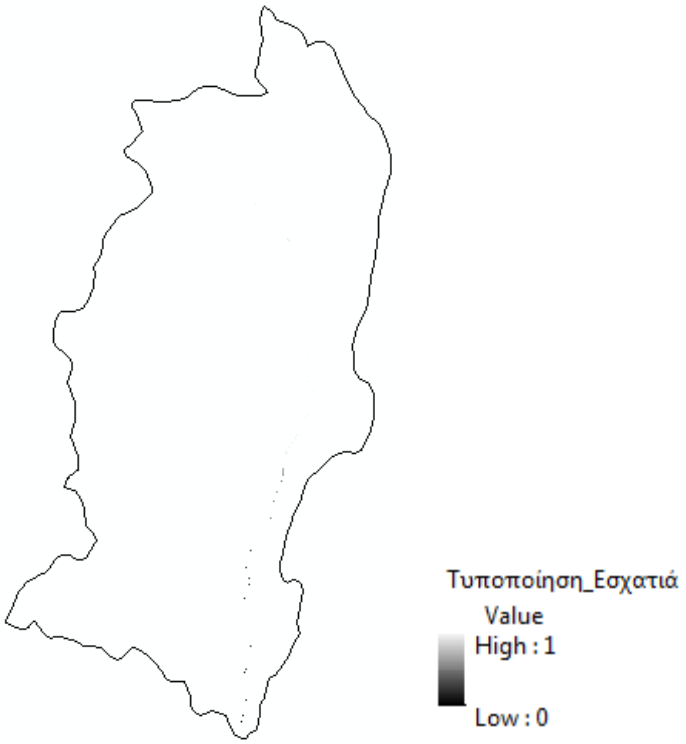


Σχήμα 3.21: Αποτέλεσμα σύμβασης για τη λεκάνη απορροής της Εσχατιάς

Στη συνέχεια το αποτέλεσμα της σύμβασης τυποποιήθηκε σύμφωνα με την Εξίσωση 3.4, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.22, ώστε η καλύτερη θέση χωροθέτησης να είναι να είναι αυτή με τιμές πιο κοντά στο μηδέν Επομένως προέκυψε ένα αρχείο τυποποιημένο με τιμές (0,1) με κριτήριο το ανάντι από τους οικισμούς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.23 για τη λεκάνη απορροής της Εσχατιάς.

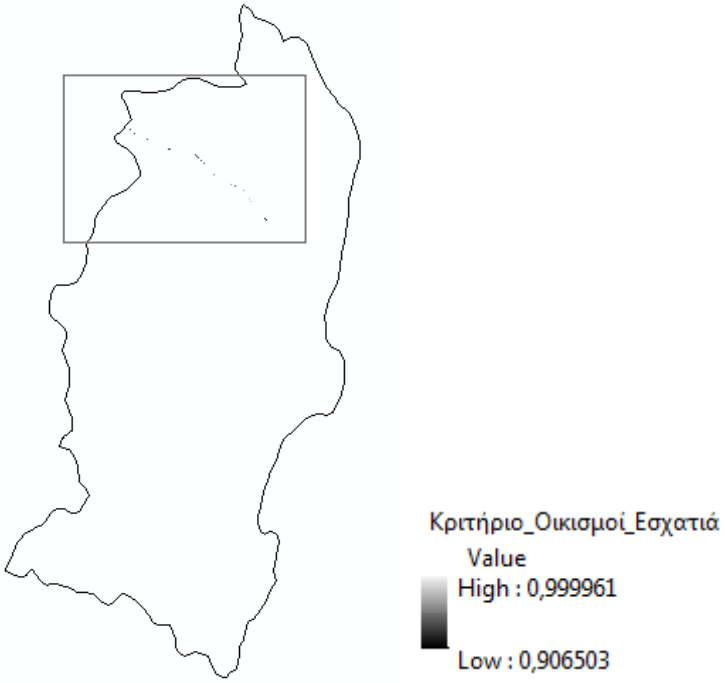


Σχήμα 3.22: Πράξη τυποποίησης του κριτηρίου για ανάντι των οικισμών στη λεκάνη απορροής της Εσχατιάς



Σχήμα 3.23: Τυποποίηση του κριτηρίου για ανάντι των οικισμών στη λεκάνη απορροής της Εσχατιάς

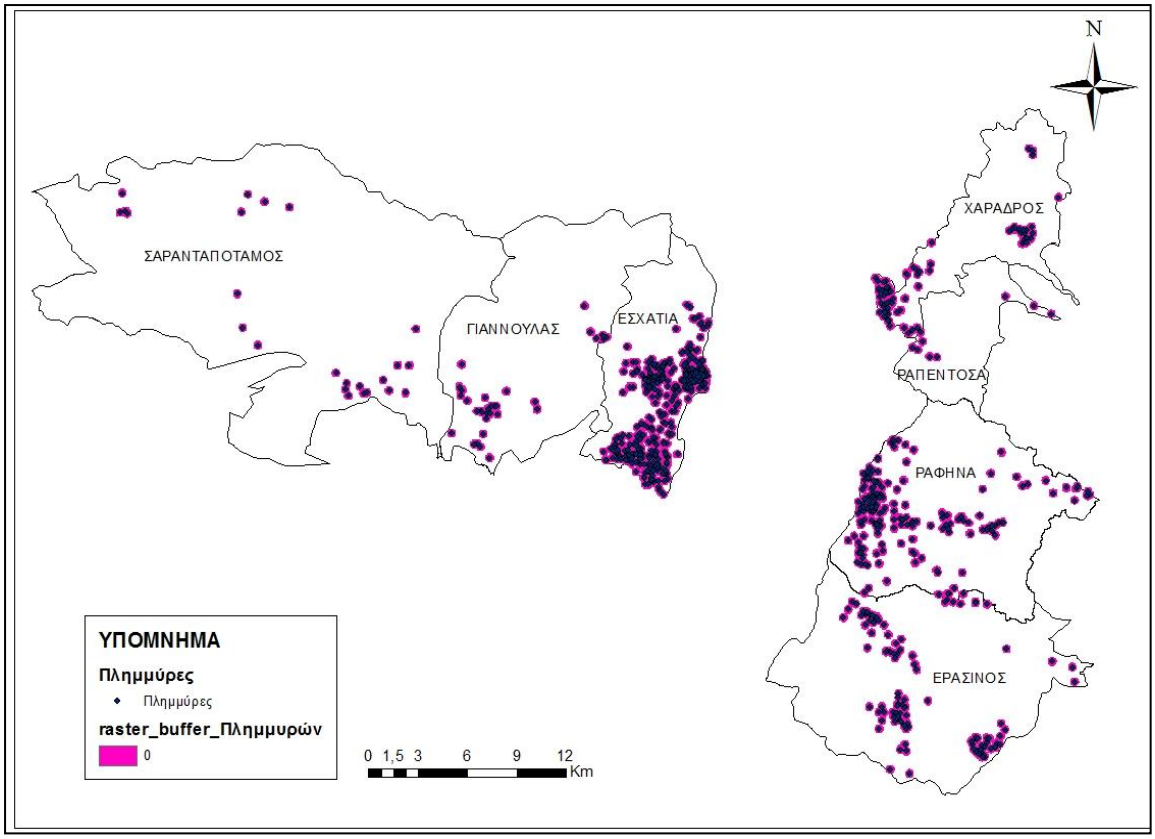
Επομένως, αφού δημιουργήθηκαν τα δυο τυποποιημένα κριτήρια, με βέλτιστες τιμές πιο κοντά στο μηδέν, έγινε πολλαπλασιασμός αυτών των δύο κριτηρίων για τη μικρότερη απόσταση από τους οικισμούς και για τη μικρότερη απόσταση ανάντι των οικισμών, και προέκυψε το Σχήμα 3.24 για τη λεκάνη της Εσχατιάς. Οι παραπάνω διαδικασίες πραγματοποιήθηκαν για όλες τις λεκάνες μελέτης.



Σχήμα 3.24: Κριτήριο απόστασης από οικισμούς για τη λεκάνη απορροής της Εσχατιάς

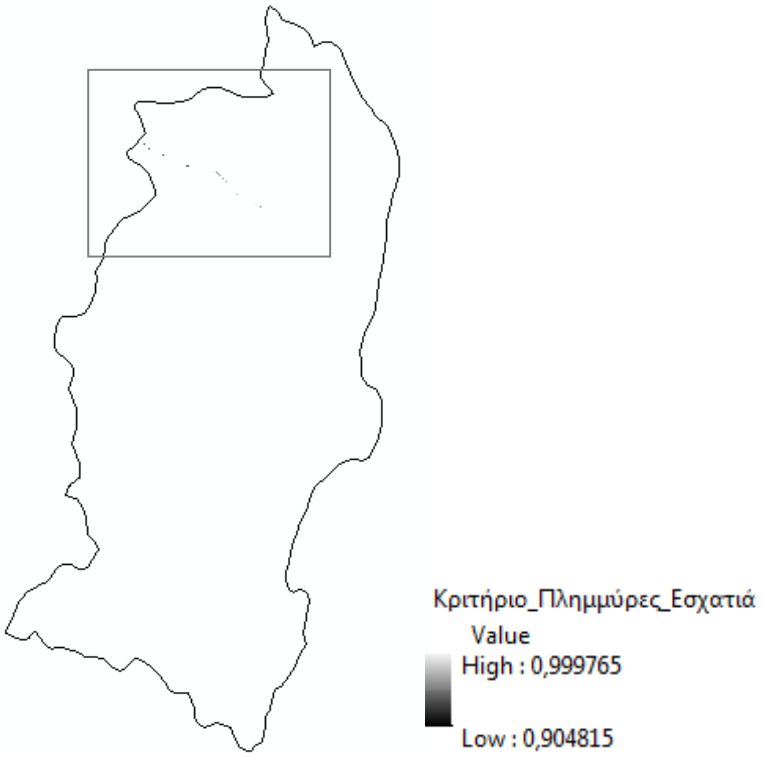
1.2.3.2. Κριτήριο Πλημμυρικού ιστορικού

Είναι ιδιαίτερα σημαντική η γνώση του πλημμυρικού ιστορικού για την χωροθέτηση υδρομετρικών σταθμών για προειδοποίηση πλημμυρών, καθώς προτιμούνται θέσεις κοντά σε περιοχές που πλήττονται περισσότερο από πλημμύρες σύμφωνα με το ιστορικό, καθώς και ανάντη αυτών των περιοχών. Για να εφαρμοστεί λοιπόν το κριτήριο της εγγύτητας, εισήχθη στο ArcGIS το shapefile των ιστορικών πλημμυρών ως σημειακή πληροφορία για κάθε λεκάνη που μελετάται. Στη συνέχεια, για τα σημεία αυτά, χρησιμοποιώντας την εντολή buffer, δημιουργήθηκε μια ζώνη των 1000 μέτρων έχοντας την τιμή 0, στην οποία δεν θα ήταν καλό να εγκατασταθεί κάποιος υδρομετρικός σταθμός, διότι δεν θα είχε νόημα για προειδοποίηση σε περίπτωση πλημμύρας. Επομένως, η ζώνη αυτή θα χρησιμοποιηθεί σαν περιορισμός για αποκλεισμό χωροθέτησης εντός της. Στο Σχήμα 3.25 φαίνονται τα σημεία των πλημμυρών για τις λεκάνες απορροής που εξετάζονται, καθώς και οι buffer ζώνες που δημιουργήθηκαν.



Σχήμα 3.25: Χάρτης πλημμυρών και raster buffer των πλημμυρών για τις λεκάνες μελέτης της Αττικής [Πηγή δεδομένων: ΥΠΕΚΑ, Πυροσβεστική Υπηρεσία]

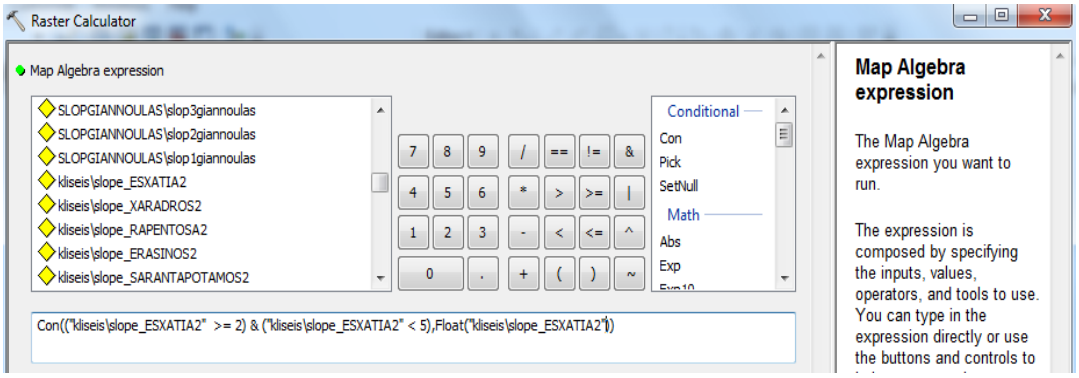
Ύστερα, προκειμένου να εφαρμοστεί το κριτήριο του ανάντι ώστε ο υδρομετρικός σταθμός να βρίσκεται στην πιο κοντινή απόσταση από τις πλημμύρες, αλλά και εκτός της ζώνης των 1000 μέτρων που δημιουργήθηκε, υπολογίστηκαν οι ευκλείδειες αποστάσεις από τα buffer των πλημμυρών. Στη συνέχεια ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με το κριτήριο απόσταση από οικισμούς και προέκυψε το Σχήμα 3.26 για τη λεκάνη της Εσχατιάς. Οι παραπάνω διαδικασίες πραγματοποιήθηκαν για όλες τις λεκάνες μελέτης.



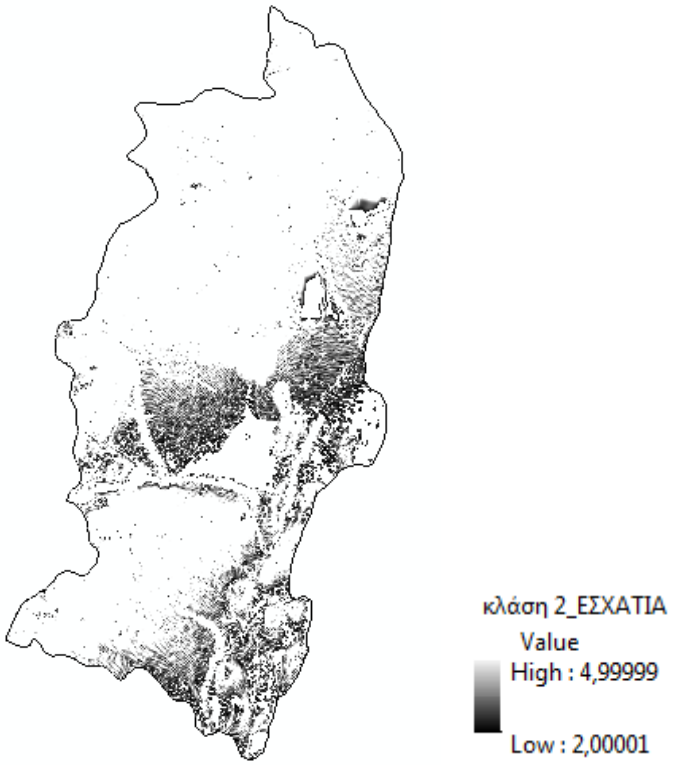
Σχήμα 3.26: Κριτήριο απόστασης από πλημμύρες για τη λεκάνη απορροής της Εσχατιάς

1.2.3.3. Κριτήριο Τοπογραφικών κλίσεων

Σύμφωνα με συστάσεις του WMO, οι υδρομετρικοί σταθμοί θα ήταν καλό να τοποθετούνται σε εδάφη με ήπιες κλίσεις. Προκειμένου να δημιουργηθεί το κριτήριο των κλίσεων ακολουθήθηκε μια διαδικασία. Αρχικά, στο αρχείο των κλίσεων για κάθε λεκάνη που ήταν ταξινομημένο σε έξι κλάσεις, έγινε υποδιαίρεση της κάθε κλάσης σε 6 κλάσεις έχοντας σαν όρια η καθεμία τα άκρα της αντίστοιχης αρχικής κλάσης χρησιμοποιώντας την πράξη που φαίνεται στο Σχήμα 3.27 μέσω της εντολής του Raster Calculator. Στο σχήμα αυτό φαίνεται η περίπτωση που προκύπτει η δεύτερη κλάση για την περίπτωση της Εσχατιάς και στο Σχήμα 3.28 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα αυτής της πράξης.



Σχήμα 3.27: Πράξη για τη δημιουργία της δεύτερης κλάσης από την αρχική κλάση

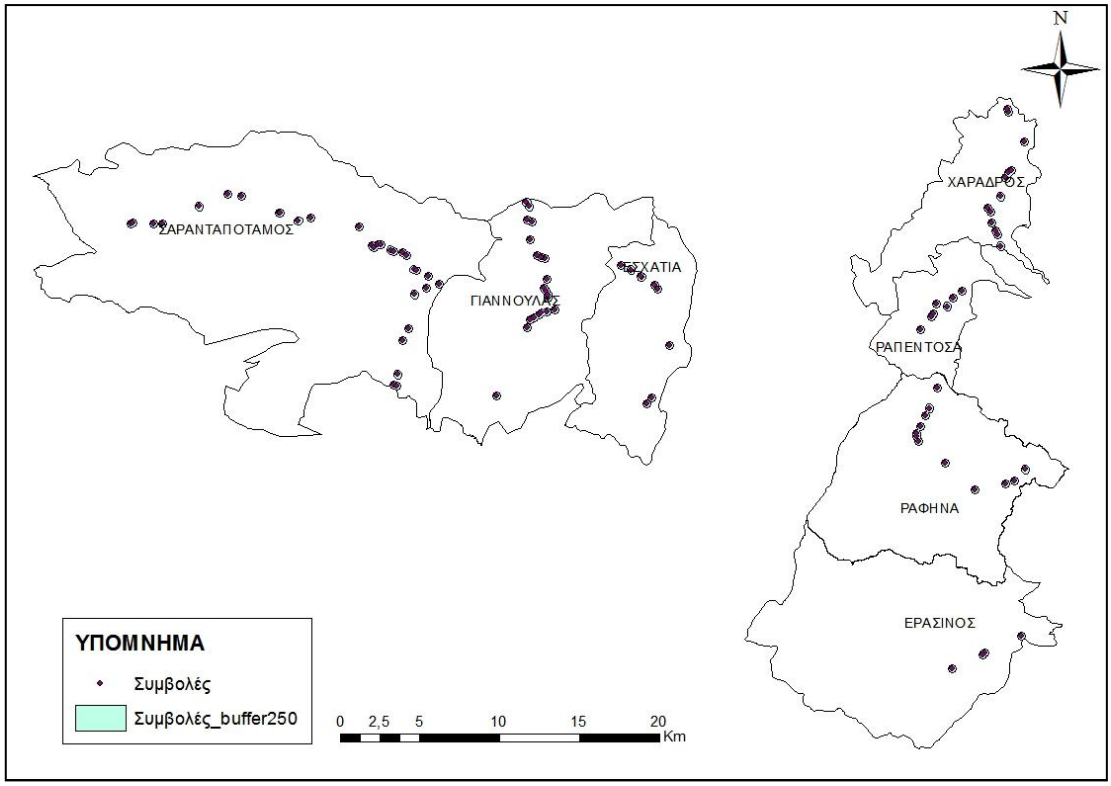


Σχήμα 3.28: Αποτέλεσμα δημιουργίας της δεύτερης κλάσης από την αρχική κλάση

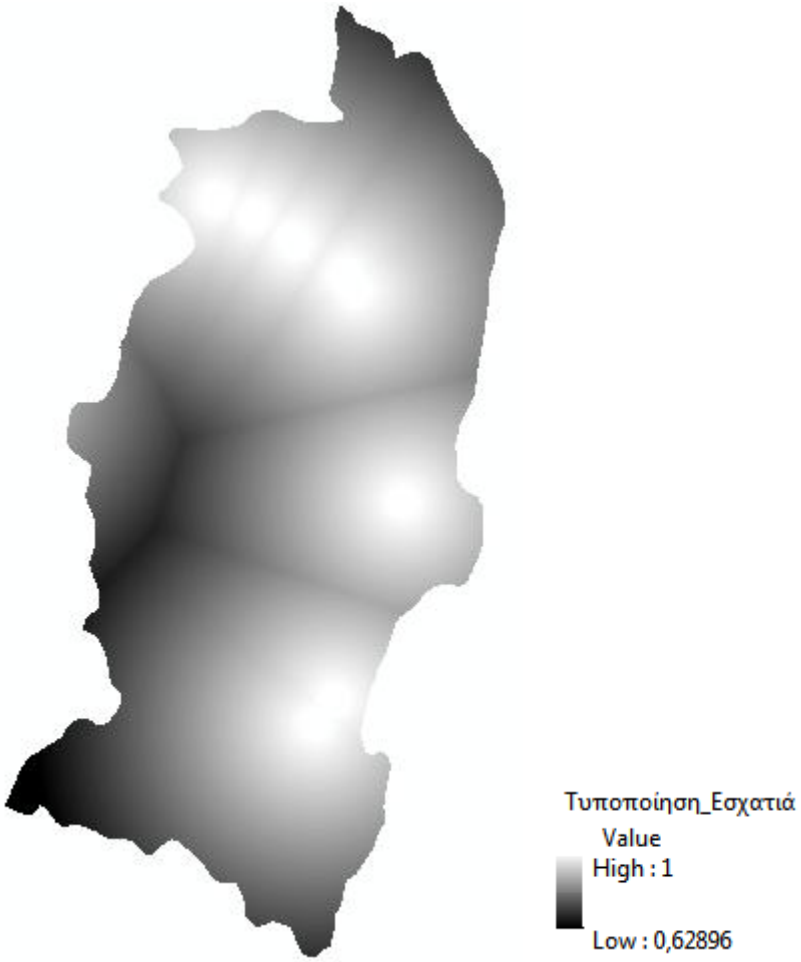
Στη συνέχεια, για τις έξι κλάσεις που προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία γίνεται τυποποίηση κάθε κλάσης χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 3.4 που αναλύεται στο κεφάλαιο 3.2.2, και η οποία εκτεκλείται με την εντολή του Raster Calculator. Χρησιμοποείται η συγκεκριμένη εξίσωση διότι οι καλύτερες τιμές κλίσεων για χωροθέτηση υδρομετρικών σταθμνών είναι αυτές που έχουν τη χαμηλότερη τιμή. Ως εκ τούτου, προέκυψαν έξι κλάσεις με τιμές 0 έως 1 και ύστερα τα έξι αυτά αρχεία raster ενοποιήθηκαν σ΄ένα raster χρησιμοποιώντας την εντολή Mosaic to New Raster. Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε επτά φορές όσες είναι οι λεκάνες που εξετάζονται. Επομένως προέκυψε το κριτήριο των τοπογραφικών κλίσεων.

1.2.3.4. Κριτήριο Συμβολών

Η εγκατάσταση υδρομετρικών σταθμών μακριά από τις συμβολές είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αποφυγή επηρεασμού από άλλα ρέματα. Ως εκ τούτου, ψηφιοποιήθηκαν κόμβοι στα σημειά συμβολών και στη συνέχεια για τα σημεία αυτά, χρησιμοποιώντας την εντολή buffer, δημιουργήθηκε μια ζώνη των 250 μέτρων έχοντας την τιμή 0, στην οποία δεν θα ήταν καλό να εγκατασταθεί κάποιος υδρομετρικός σταθμός, για να μην επηρεαστεί από άλλα ρέματα. Επομένως, η ζώνη αυτή θα χρησιμοποιηθεί σαν περιορισμός για αποκλεισμό χωροθέτησης εντός της. Στη συνέχεια ομοίως με την περίπτωση του κριτηρίου απόσταση από οικισμούς υπολογίστηκαν οι ευκλείδειες αποστάσεις από τα buffer τωέτσιν συμβολών και δημιουργήθηκε ένα αρχείο στο οποίο έγινε τυποποίηση μέσω της εντολής των πράξεων από το Raster Calculator χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 3.4. Στο Σχήμα 3.29 φαίνονται οι κόμβοι των συμβολών για τις λεκάνες απορροής που εξετάζονται, καθώς και οι raster ζώνες που δημιουργήθηκαν. Στο Σχήμα 3.30 παρουσιάζεται το κριτήριο που προέκυψε για τις συμβολές.



Σχήμα 3.29: Χάρτης κόμβων και raster buffer των συμβολών για τις λεκάνες μελέτης της Αττικής

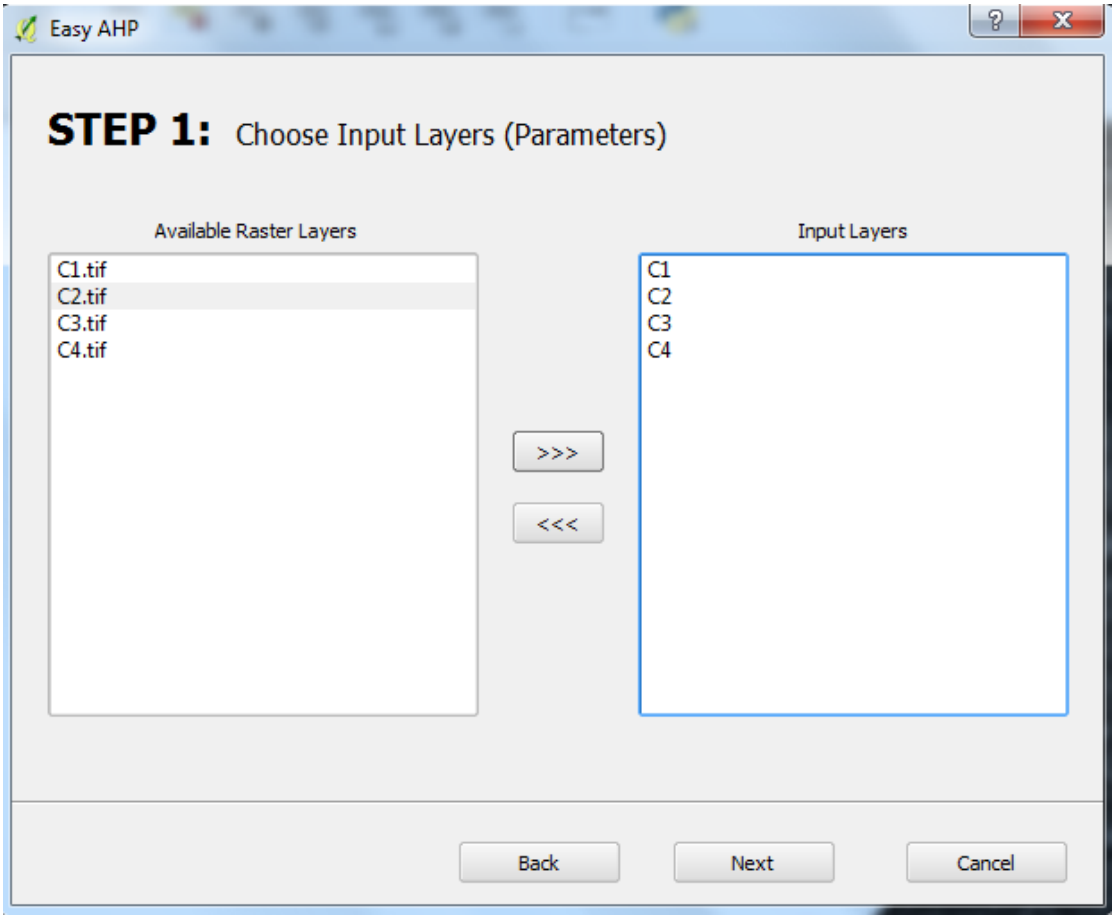


Σχήμα 3.30: Τυποποίηση του κριτηρίου για ευκλείδεια απόσταση από συμβολές στη λεκάνη απορροής της Εσχατιάς

3.2.4 Το πρόσθετο «Easy AHP» του QGIS

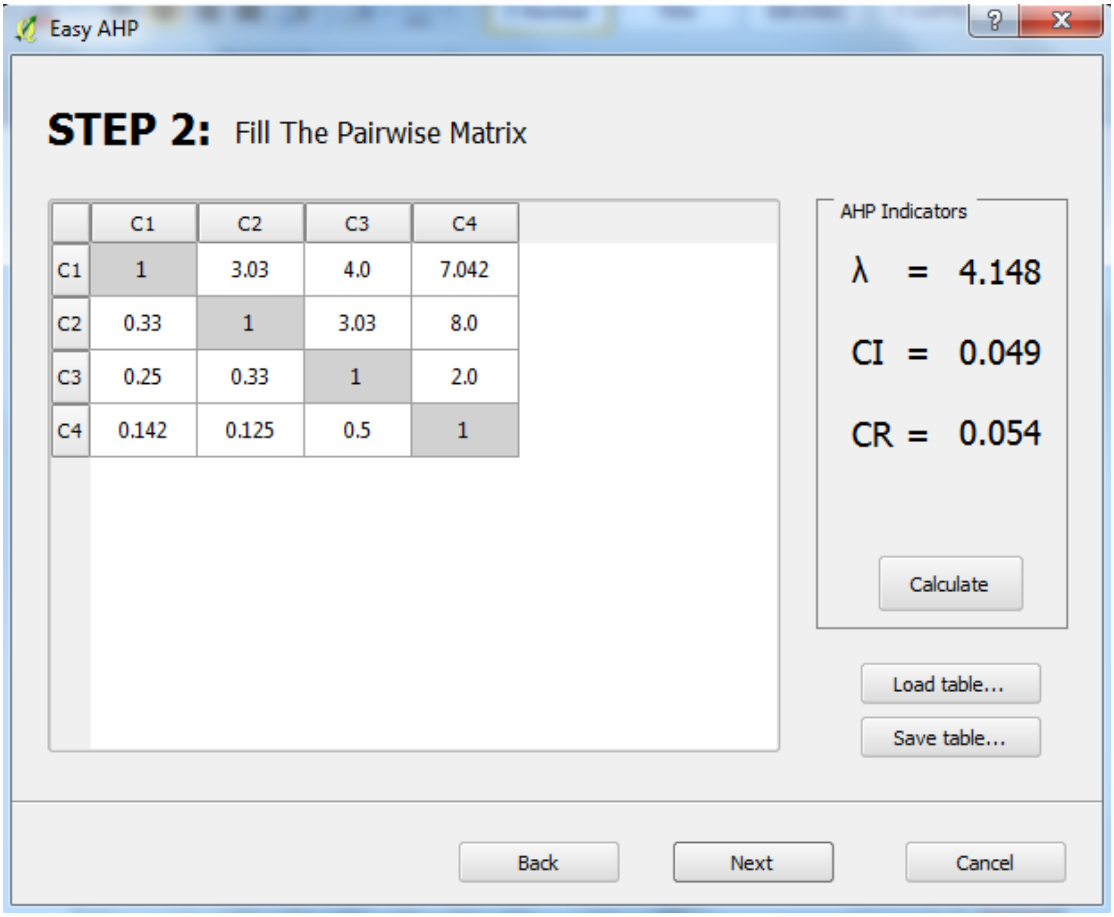
Το πρόσθετο εργαλείο Easy AHP παρέχει αναλύσεις της Αναλυτικής ιεραρχικής διαδικασίας (AHP) και του σταθμισμένου γραμμικού συνδυασμού (WLC) περιβάλλον του QGIS. Το κοινό που το χρησιμοποιεί είναι οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων, οι οποίοι εργάζονται για αναλύσεις καταλληλότητας χρήσης γής, για τη γεωργία, τη διαχείριση καταστροφών, για περιβαλλοντικούς πόρους και άλλα ζητήματα λήψης αποφάσεων. Το φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον του εργαλείου διευκολύνει την ανάλυση, διαιρώντας τις λειτουργείες σε διαφορετικά βήματα (https://plugins.qgis.org/plugins/EasyAHP/). Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το «Easy AHP» προκειμένου να υπολογιστούν τα βάρη τεσσάρων κριτηρίων αξιολόγησης για τη χωροθέτηση των υδρομετρικών σταθμών. Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαλείο είναι οι κλίσεις (C1), η απόσταση από συμβολές (C2), η απόσταση από οικισμούς (C3) και η απόσταση από πλημμύρες (C4). Το

αρχικό βήμα ήταν η εισαγωγή των κριτηρίων στο εργαλείο όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.31.



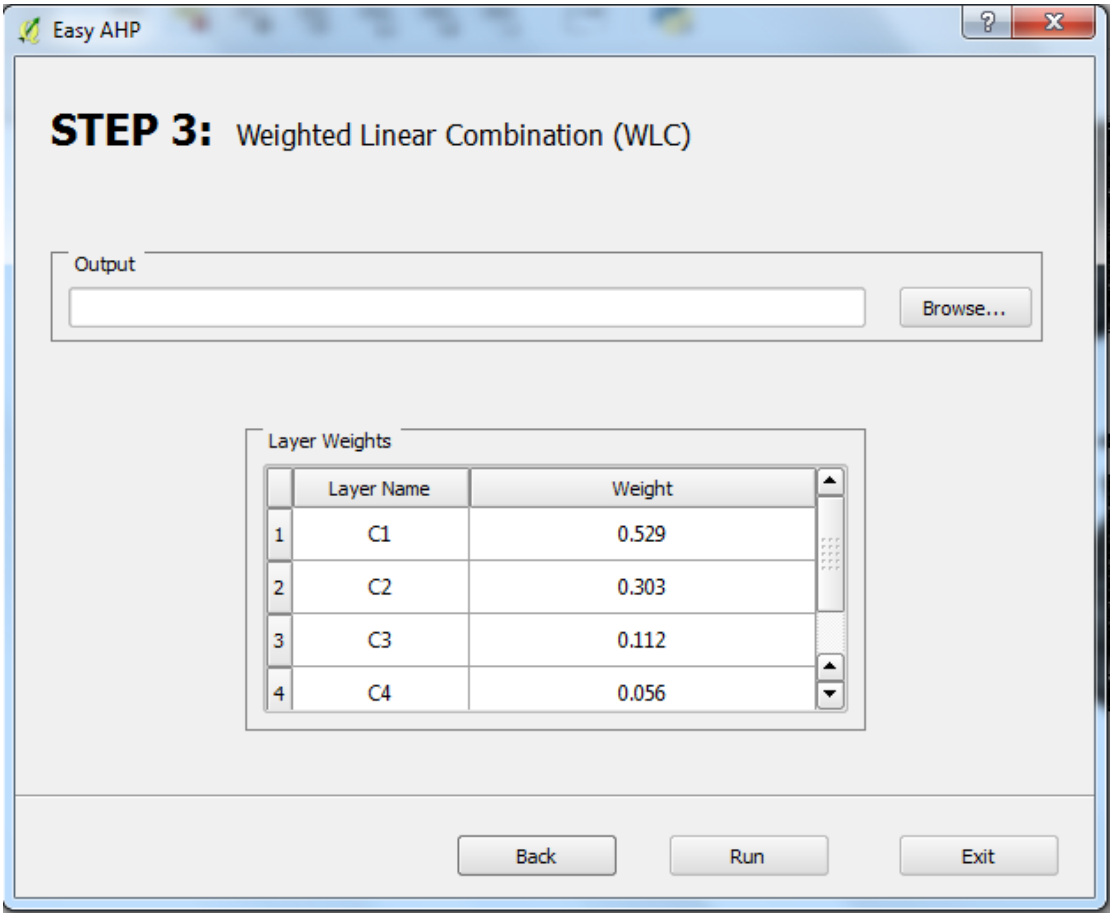
Σχήμα 3.31: Εισαγωγή κριτηρίων στο εργαλείο Easy AHP

Στη συνέχεια ακολουθεί το δεύτερο βήμα όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.32, στο οποίο εισάγεται η σημαντικότητα του κάθε κριτηρίου στον πίνακα σε σχέση με τα υπόλοιπα, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.3, ο οποίος παρουσιάζει τη θεμελιώδη κλίμακα σύγκρισης ζευγών. Αποφασίστηκε το κριτήριο των κλίσεων να έχει τη μεγαλύτερη βαθμολογία σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα κριτήρια, έπεται σε σημαντικότητα το κριτήριο της απόστασης από συμβολές και ακολουθούν τα κριτήρια απόστασης από οικισμούς και πλημμύρες. Έτσι συμπληρώνεται όλος ο πίνακας του εργαλείου και στη συνέχεια υπόλογίζονται αυτόματα η ιδιοτιμή λ του πίνακα, ο δείκτης CI συνέπειας και τέλος ο λόγος συνέπειας όπου πρέπει να ισχύει ότι CR ≤ 0.10 όπως και προέκυψε , καθώς υπολογίστηκε ότι CR=0,054.



Σχήμα 3.32: Εισαγωγή τιμών σύγκρισης μεταξύ των κριτηρίων στο εργαλείο Easy AHP και υπολογισμός δεικτών της AHP (Σενάριο 1)

Έχοντας λοιπόν υπολογιστεί οι παραπάνω δείκτες, το εργαλείο υπολογίζει αυτόματα τα βάρη κάθε κριτηρίου τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 3.33. Όπως ήταν αναμενόμενο το μεγαλύτερο βαρός έχει το κριτήριο των κλίσεων με τιμή 0,529, καθώς είχε την μεγαλύτερη τιμή στη σημαντικότητα ως πος τα υπόλοιπα κριτήρα. Το βάρος για την απόσταση από συμβολές έχει την τιμή 0,303, για την απόσταση από οικισμούς την τιμή 0,112 και τέλος για την απόσταση από τις πλημμύρες την τιμή 0,056.



Σχήμα 3.33: Εξαγωγή βαρών των κριτηρίων από το εργαλείο Easy AHP

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 3.5) συνοψίζονται τα επιμέρους κριτήρια που λήφθηκαν υπόψη για την παρούσα ανάλυση, όπως και ο τροπός χειρισμού τους.

Πίνακας 3.5: Συγκεντρωτικός πίνακας κριτηρίων χωροθέτησης, με επιγραμματική αναφορά στη διαδικασία εφαρμογής

Παράγοντας(*)	**Διαδικασία τυποποίησης**	**Χειρισμός περιορισμών**	**Παρατηρήσεις**
1. Κλίσεις	Εξ. (3.4)		Τεχνικό κριτήριο μέγιστου βαθμού επιρροής
2. Απόσταση από οικισμούς	Εξ. (3.4)	Boolean Map ‘1’ (>500m) ; ‘0’ (d<500)	Μωσαϊκό μαζί με raster“Euclidean distance” Flow accumulation raster για την ανίχνευση του ανάντη-κατάντη
3. Απόσταση από πλημμύρες	Εξ. (3.4)	Boolean Map ‘1’ (>1000m) ; ‘0’ (d<1000)	Βασίζεται στο ιπλημμυρικό ιστορικό Μωσαϊκό μαζί με raster “Euclidean distance” Flow accumulation raster για την ανίχνευση του ανάντη-κατάντη
4. Απόσταση από συμβολή με ρέμα (ανάντη, κατάντη)	Εξ. (3.4)	Boolean Map ‘1’ (>250m) ; ‘0’ (d<250)	Point Feauture class με τα σημεία συμβολής ρεμάτων επιμέρους τάξεων Μωσαϊκό μαζί με raster “Euclidean distance”
7. Υψόμετρα (Απαιτούμενη πυκνότητα δικτύου)	Εκτίμηση της πυκνότητας		Εφαρμόζεται για την τελική επιλογή θέσης (βλ. Πιν. 3.4).
8. Υδρογραφικό δίκτυο	Αποκλεισμός σημείων εκτός κύριου υδατορεύματος (ΚΥ)	Boolean Map ‘1’ (εντός ΚΥ) ; ‘0’ (εκτός ΚΥ)	Αρχείο που βασίζεται στην ψηφιοποίηση με βάση τα τοπογραφικά διαγράμματα της ΓΥΣ

(*) Κριτήριο για την AHP ή βοηθητικός παράγοντας κατά την υλοποίηση

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, ολοκληρώθηκε η χωροθέτηση προτεινόμενων θέσεων ενός δικτύου υδρομετρικών σταθμών στις λεκάνες απορροής που εξετάζονται στην Αττική. Παράχθηκε ένα διανυσματικό αρχείο με τις θέσεις των υδρομετρικών σταθμών που παρουσιάζουν τη βέλτιστη βαθμολογία για χωροθέτηση σε κάθε λεκάνη μελέτης. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των βαρών των κριτηρίων που προκύπτουν κάνοντας τέσσερα διαφορετικά σενάρια για διαφορετική τιμή κάποιων κριτήριων στη σύγκριση ζευγών. Τέλος, έγινε ανάλυση ευαισθησίας για τον εντοπισμό του κριτηρίου που είναι πιο καθοριστικό στη χωροθέτηση.

4.1 Σύγκριση βαρών βάσει 4 σεναρίων

Πραγματοποιήθηκε αλλαγή στην τιμή σημαντικότητας για τη σύγκριση μεταξύ των ζευγών σε δύο κριτήρια προκειμένου να ενσωματωθούν στον πίνακα του εργαλείου της Easy AHP και να προκύψουν τα νέα βάρη. Τα 4 σενάρια ήταν τα εξής:

1. Το κριτήριο των κλίσεων έχει την τιμή 7 (ισχυρά προτιμητέο) σε σχέση με το κριτήριο απόσταση από πλημμυρικό πεδίο.
2. Το κριτήριο των κλίσεων έχει την τιμή 6 (μέτρια-ισχυρά προτιμητέο) σε σχέση με το κριτήριο απόσταση από πλημμυρικό πεδίο.
3. Το κριτήριο των κλίσεων έχει την τιμή 4 (ελαφρά-μέτρια προτιμητέο) σε σχέση με το κριτήριο απόσταση από πλημμυρικό πεδίο.
4. Το κριτηρίο απόσταση από συμβολές έχει την τιμή 3 (ελαφρά προτιμητέο) σε σχέση με το κριτήριο απόσταση από οικισμούς

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τα βάρη και τους δείκτες της AHP παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 4.1.

Παρατηρείται ότι όσο μειώνεται η σημαντικότητα του κριτηρίου των κλίσεων σε σχέση με το κριτήριο απόσταση από πλημμυρικό πεδίο, τόσο μειώνεται το βάρος του, ενώ αντίθετα αυξάνεται το βάρος του κριτηρίου απόσταση από πλημμυρικό πεδίο, καθώς και τα βάρη των υπόλοιπων κριτηρίων αλλά σε πιο μικρό βαθμό . Επίσης, όταν μειώνεται η σημαντικότητα του κριτήριου απόσταση από συμβολές σε σχέση με την απόσταση από οικισμούς τότε παρατηρείται αύξηση του βάρους του κριτηρίου

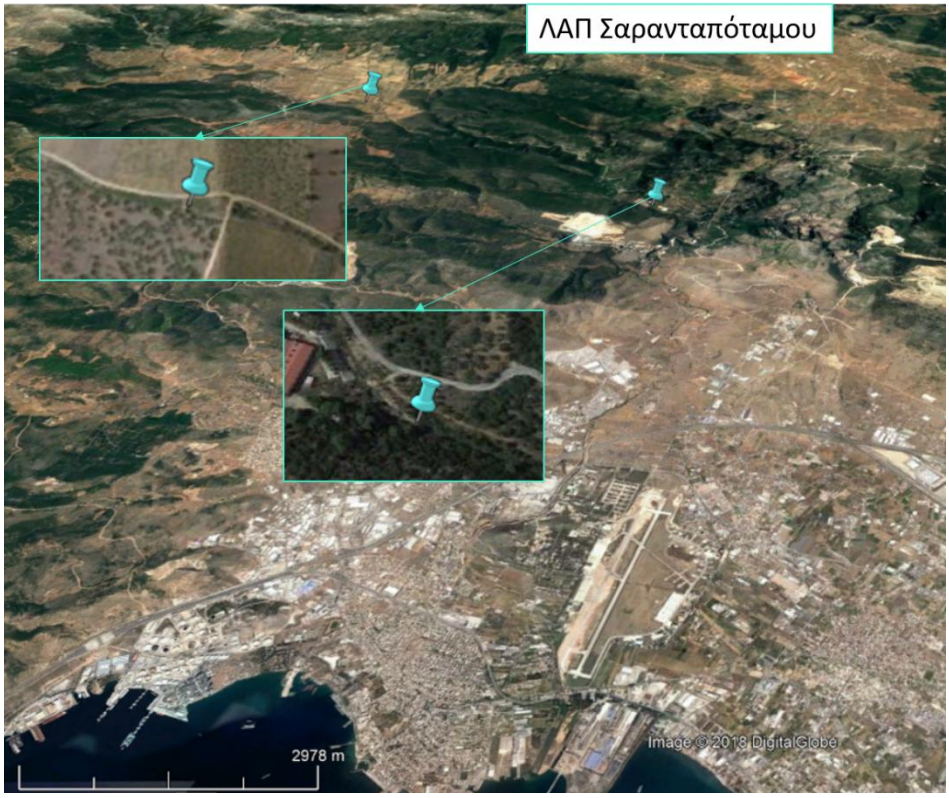
απόσταση από οικισμούς. Επομένως, η τιμή σημαντικότητας σύμφωνα με τον Πίνακα 3.3 που αποδίδεται σε κάθε κριτήριο συγκριτικά με ένα άλλο καθορίζει τα βάρη που προκύπτουν από τη διαδικασία σύγκρισης ζευγών της AHP.

Πίνακας 4.1: Σύγκριση βαρών των κριτηρίων βάσει 4 σεναρίων

	Σενάριο 1	**Σενάριο 2**	**Σενάριο 3**	**Σενάριο 4**
C1	0,529	0,517	0,505	0,481
C2	0,303	0,309	0,316	0,326
C3	0,112	0,113	0,115	0,128
C4	0,056	0,06	0,066	0,066
λ	4,148	4,18	4,227	4,246
CI	0,049	0,06	0,076	0,082
CR	0,054	0,067	0,084	0,091

4.2 Αποτελέσματα χωροθέτησης στη λεκάνη Σαρανταπόταμου

Για τη λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου, προέκυψαν οι βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1 και αντιστοιχεί η καθεμία σε φατνίο με διαστάσεις 5x5. Επιπλέον στο ίδιο σχήμα φαίνονται και οι θέσεις αυτές στην πραγματικότητα μέσω του Google Earth.



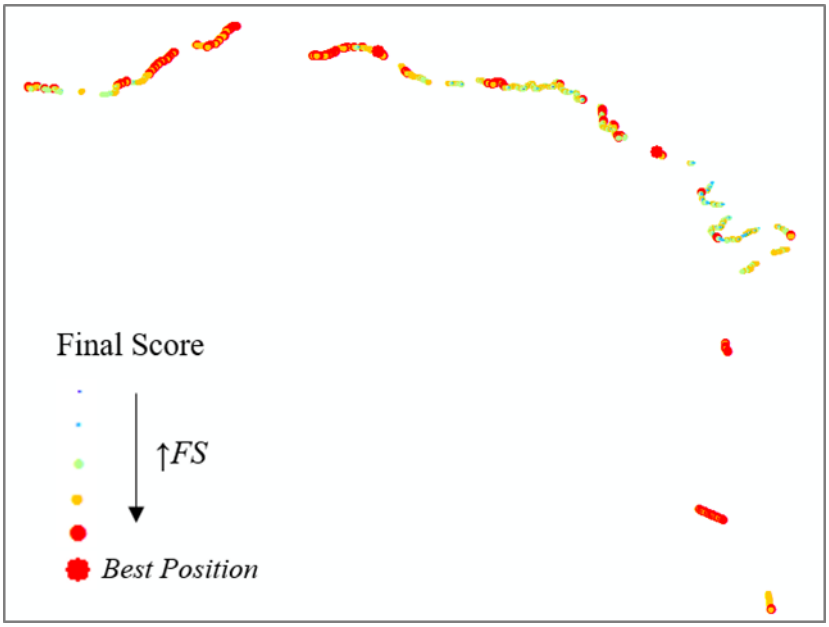
Σχήμα 4.1: Βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης υδρομετρικών σταθμών στη λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία για τις προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης των υδρομετρικών σταθμών, τα οποία υπολογίστηκαν μέσω του ArcGIS ύστερα από το αποτέλεσμα χωροθέτησης. Τα αποτελέσματα των θέσεων ταξινομήθηκαν σε πέντε (5) κλάσεις (βλ. Σχήμα 4.2^{α}, μπλε έως κόκκινη χρωματική διαβάθμιση για τις πέντε κλάσεις), όπου για κάθε κλάση υπάρχουν τα όρια βαθμολογίας και ο αριθμός των θέσεων υδρομετρικών σταθμών για κάθε κλάση (βλ. Σχήμα 4.2α, με κόκκινη ένδειξη σημειώνεται η βέλτιστη θέση). Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4.2, στη λεκάνη του Σαρανταπόταμου οι περισσότερες προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης είναι 1671 με βαθμολογία μικρότερη του 90% και ανήκουν στην τέταρτη κλάση, καθώς επίσης υπάρχουν και 1354 θέσεις με βαθμολογία μικρότερη του 60% και ανήκουν στην δεύτερη κλάση. Χαμηλότερη βαθμολογία μικρότερη του 50% ως προτεινόμενες θέσεις έχουν μόνο 19 θέσεις. Οι βέλτιστες θέσεις χωροθέτησης έχουν βαθμολογία μεγαλύτερη του 90% και είναι σε αριθμό 317. Η πλειοψηφία των βέλτιστων θέσεων παρατηρείται ανάντη της λεκάνης απορροής στο δυτικό τμήμα της.

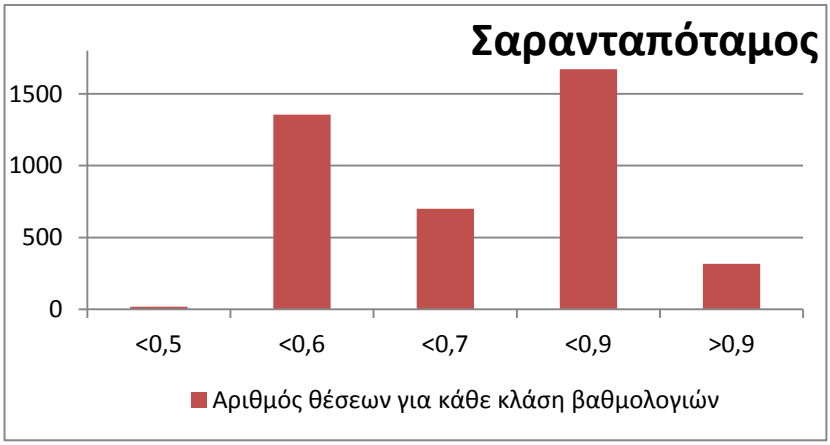
Πίνακας 4.2: Κλάσεις-όρια βαθμολογίας και αριθμός προτεινόμενων θέσεων για τη λεκάνη του Σαρανταπόταμου

Κλάσεις	Όρια σκορ	Αριθμός θέσεων
1	<0,5	19
2	<0,6	1354
3	<0,7	700
4	<0,9	1671
5	>0,9	317

α)



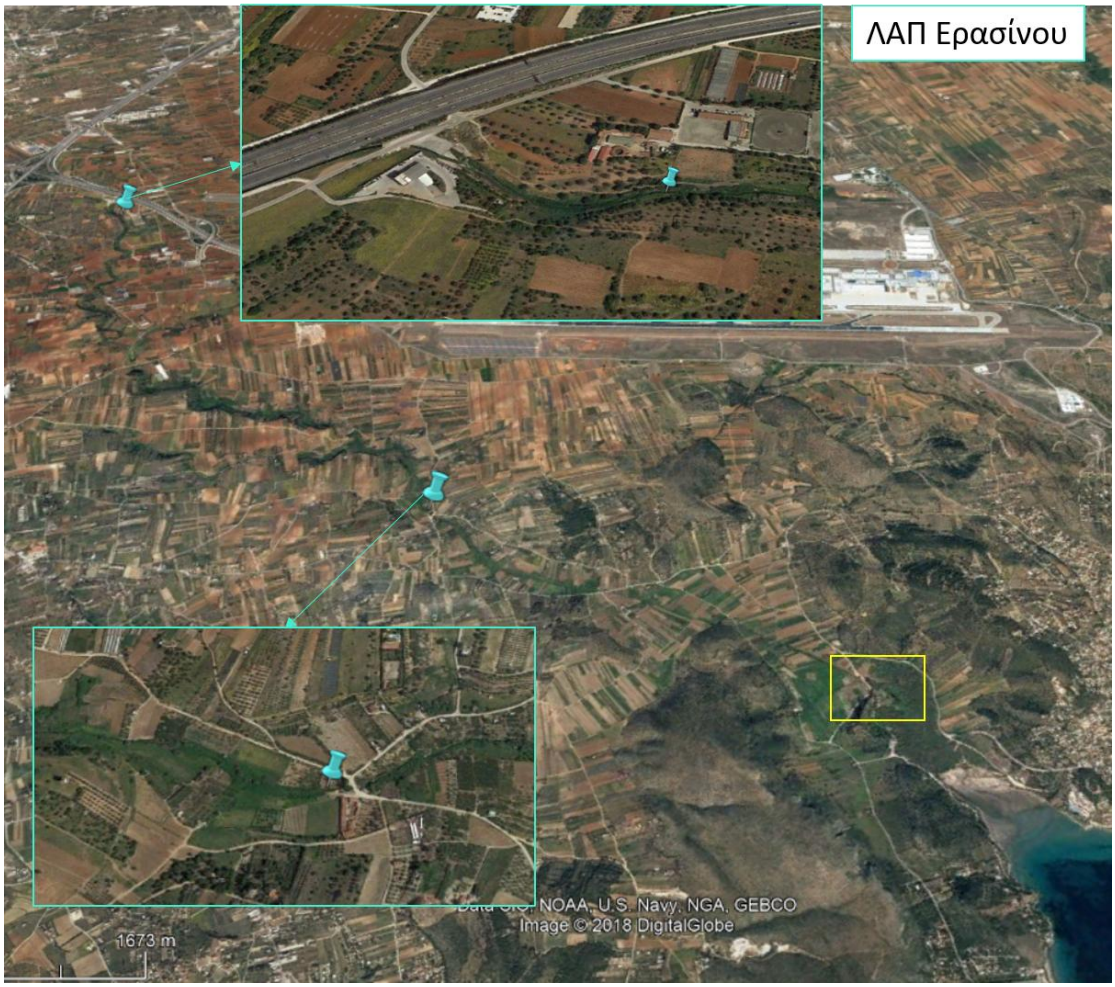
β)



Σχήμα 4.2: α) Αποτύπωση κατάλληλων θέσεων με ταξινόμηση του βαθμού επίδοσης σε πέντε κλάσεις, β) Στατιστικά στοιχεία προτεινόμενων θέσεων στη λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου

4.3 Αποτελέσματα χωροθέτησης στη λεκάνη Ερασίνου

Για τη λεκάνη απορροής του Ερασίνου, προέκυψαν οι βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3 και αντιστοιχεί η καθεμία σε φατνίο με διαστάσεις 5x5. Επιπλέον στο ίδιο σχήμα φαίνονται και οι θέσεις αυτές στην πραγματικότητα μέσω του Google Earth. Στη συγκεκριμένη λεκάνη όπως φαίνεται στο Σχήμα με κίτρινο πλαίσιο, υπάρχει ο αρχαιολογικός χώρος της Βραυρώνας και επομένως λήφθηκε υπόψην ώστε ο σταθμός να εγκατασταθεί ανάντη του για προειδοποίηση σε πε΄ρίπτωση πλημμυρικού επεισοδείου..



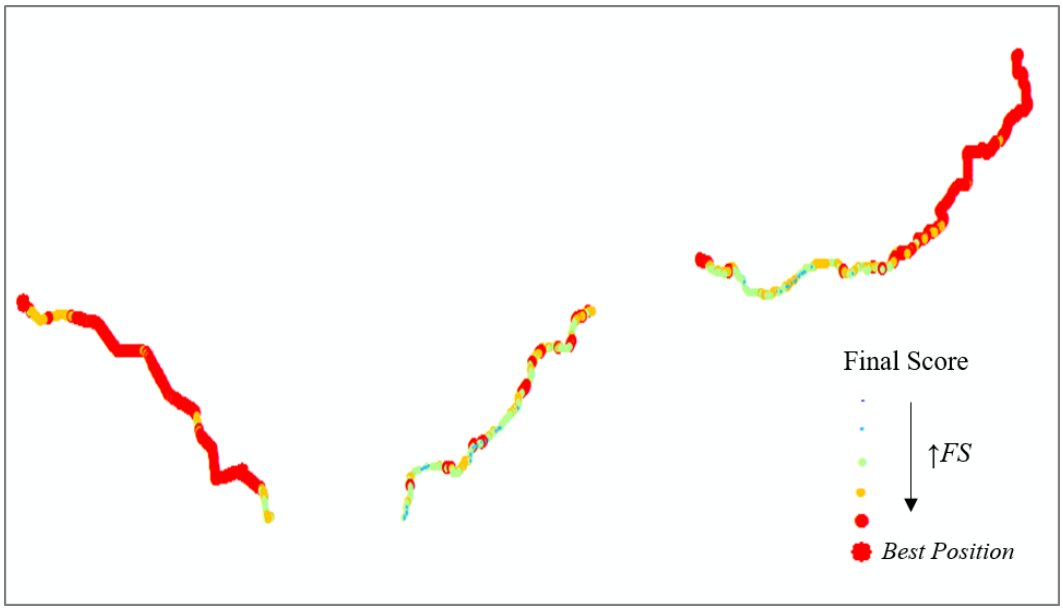
Σχήμα 4.3: Βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης υδρομετρικών σταθμών στη λεκάνη απορροής του Ερασίνου (με κίτρινο πλαίσιο σημειώνεται ο Αρχαιολογικός χώρος Βραυρώνας)

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία για τις προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης των υδρομετρικών σταθμών, τα οποία υπολογίστηκαν μέσω του ArcGIS ύστερα από το αποτέλεσμα χωροθέτησης. Τα αποτελέσματα των θέσεων ταξινομήθηκαν σε 5 κλάσεις, όπου για κάθε κλάση υπάρχουν τα όρια βαθμολογίας και ο αριθμός των θέσεων υδρομετρικών σταθμών για κάθε κλάση. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4.4, στη λεκάνη του Ερασίνου, οι περισσότερες προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης είναι 644 με βαθμολογία μεγαλύτερη του 90% και ανήκουν στην πέμπτη κλάση, και αποτελούν και τις βέλτιστες θέσεις χωροθέτησης. Επίσης υπάρχουν 422 θέσεις με βαθμολογία μικρότερη του 80% και ανήκουν στην τρίτη κλάση. Χαμηλότερη βαθμολογία μικρότερη του 40% ως προτεινόμενες θέσεις έχουν μόνο μια θέση. Η πλειοψηφία των βέλτιστων θέσεων παρατηρείται προς τα δύο άκρα του κύριου υδατορεύματος.

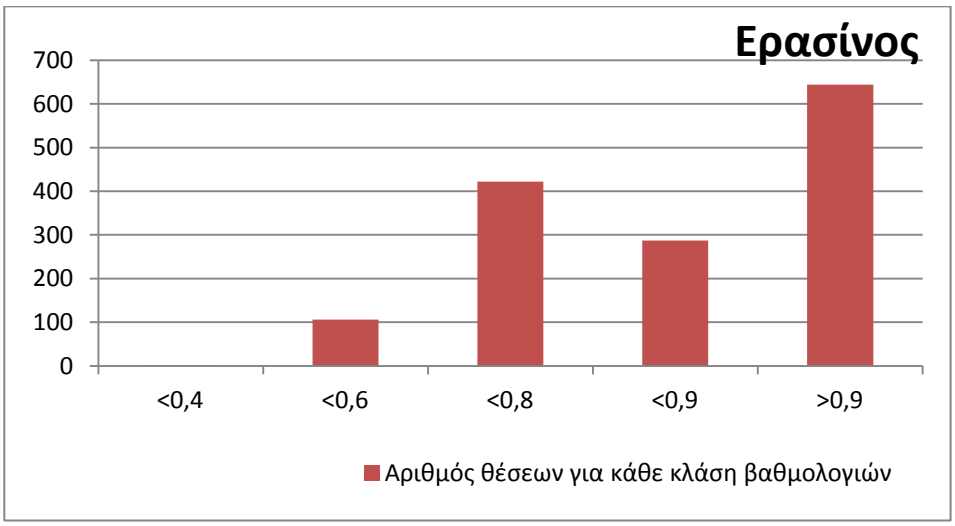
Πίνακας 4.3: Κλάσεις-όρια βαθμολογίας και αριθμός προτεινόμενων θέσεων για τη λεκάνη του Ερασίνου

Κλάσεις	Όρια σκορ	Αριθμός θέσεων
1	<0,4	1
2	<0,6	106
3	<0,8	422
4	<0,9	287
5	>0,9	644

α)



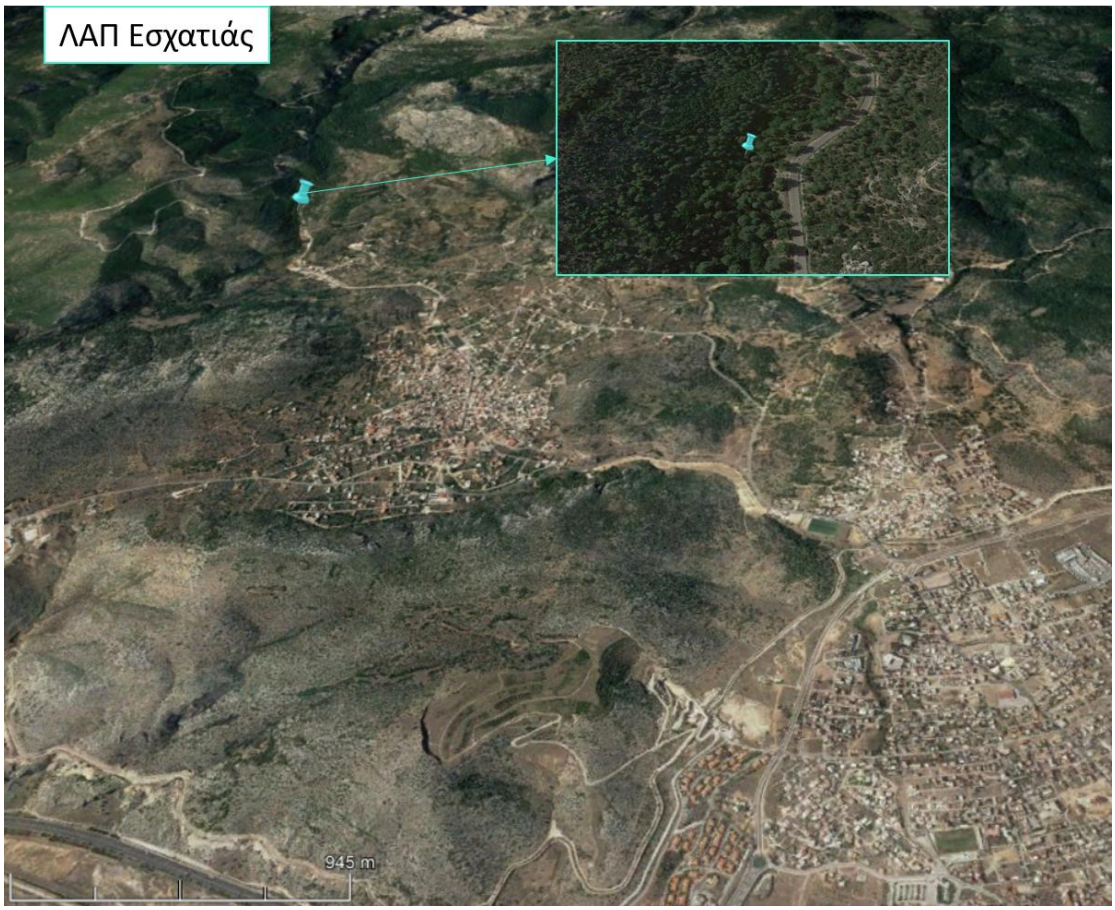
β)



Σχήμα 4.4: α) Αποτύπωση κατάλληλων θέσεων με ταξινόμηση του βαθμού επίδοσης σε πέντε κλάσεις, β) Στατιστικά στοιχεία προτεινόμενων θέσεων στη λεκάνη απορροής του Ερασίνου

4.4 Αποτελέσματα χωροθέτησης στη λεκάνη Εσχατιάς

Για τη λεκάνη απορροής της Εσχατιάς, προέκυψαν οι βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.5 και αντιστοιχεί η καθεμία σε φατνίο με διαστάσεις 5x5. Επιπλέον στο ίδιο σχήμα φαίνονται και οι θέσεις αυτές στην πραγματικότητα μέσω του Google Earth.



Σχήμα 4.5: Βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης υδρομετρικών σταθμών στη λεκάνη απορροής της Εσχατιάς

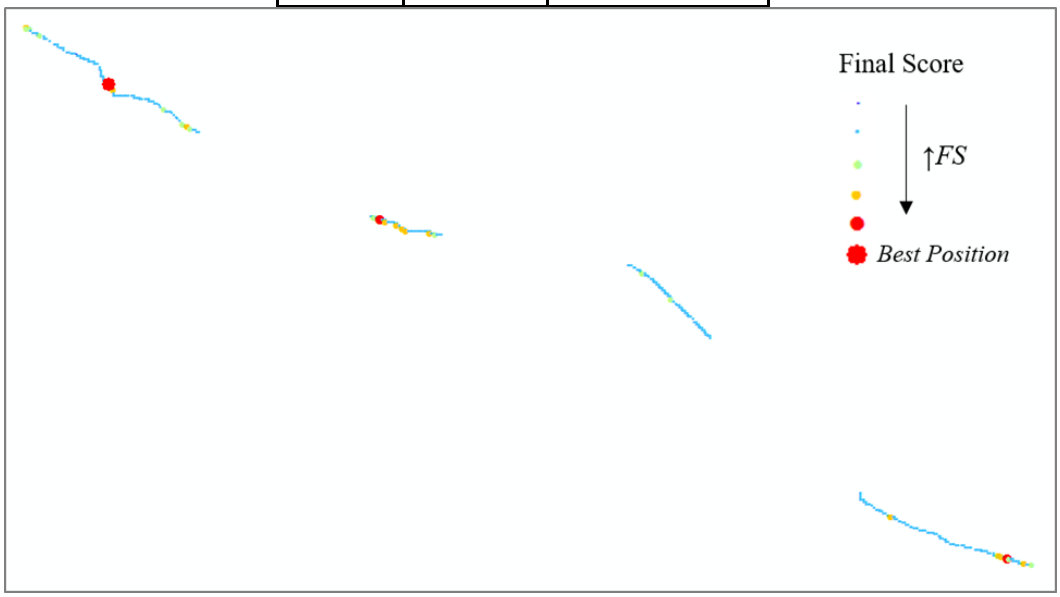
Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία για τις προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης των υδρομετρικών σταθμών, τα οποία υπολογίστηκαν μέσω του ArcGIS ύστερα από το αποτέλεσμα χωροθέτησης. Τα αποτελέσματα των θέσεων ταξινομήθηκαν σε 5 κλάσεις, όπου για κάθε κλάση υπάρχουν τα όρια βαθμολογίας και ο αριθμός των θέσεων υδρομετρικών σταθμών για κάθε κλάση. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4.6, στη λεκάνη της Εσχατιάς, οι περισσότερες προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης είναι 303 με βαθμολογία μικρότερη του 60% και ανήκουν στη δεύτερη κλάση. Αντίθετα, οι βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις είναι μόνο 3 με βαθμολογία μικρότερη του 90% και ανήκουν στην πέμπτη κλάση. Χαμηλότερη

βαθμολογία μικρότερη του 50% ως προτεινόμενες θέσεις έχουν μόνο μια θέση. Οι βέλτιστες θέσεις παρατηρείται ότι βρίσκονται στην αρχή του κύριου υδατορεύματος.

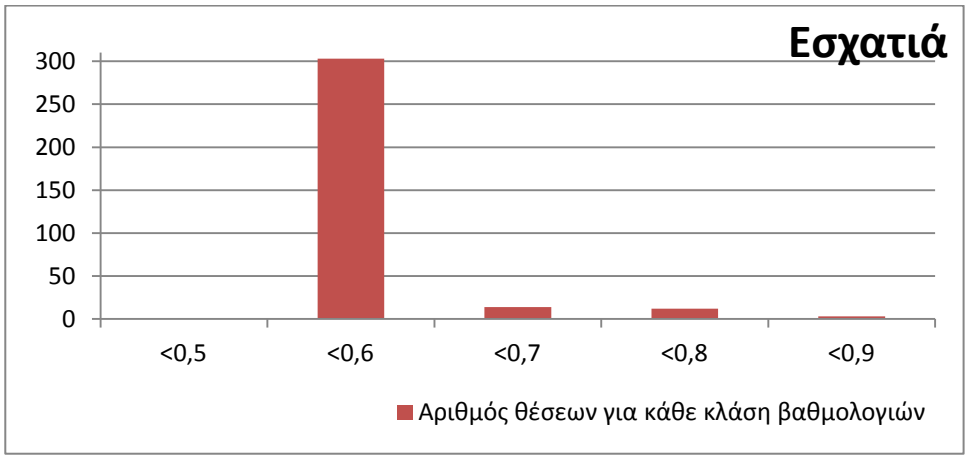
Πίνακας 4.4: Κλάσεις-όρια βαθμολογίας και αριθμός προτεινόμενων θέσεων για τη λεκάνη της Εσχατιάς

Κλάσεις	Όρια σκορ	Αριθμός θέσεων
1	<0,5	1
2	<0,6	303
3	<0,7	14
4	<0,8	12
5	<0,9	3

α)



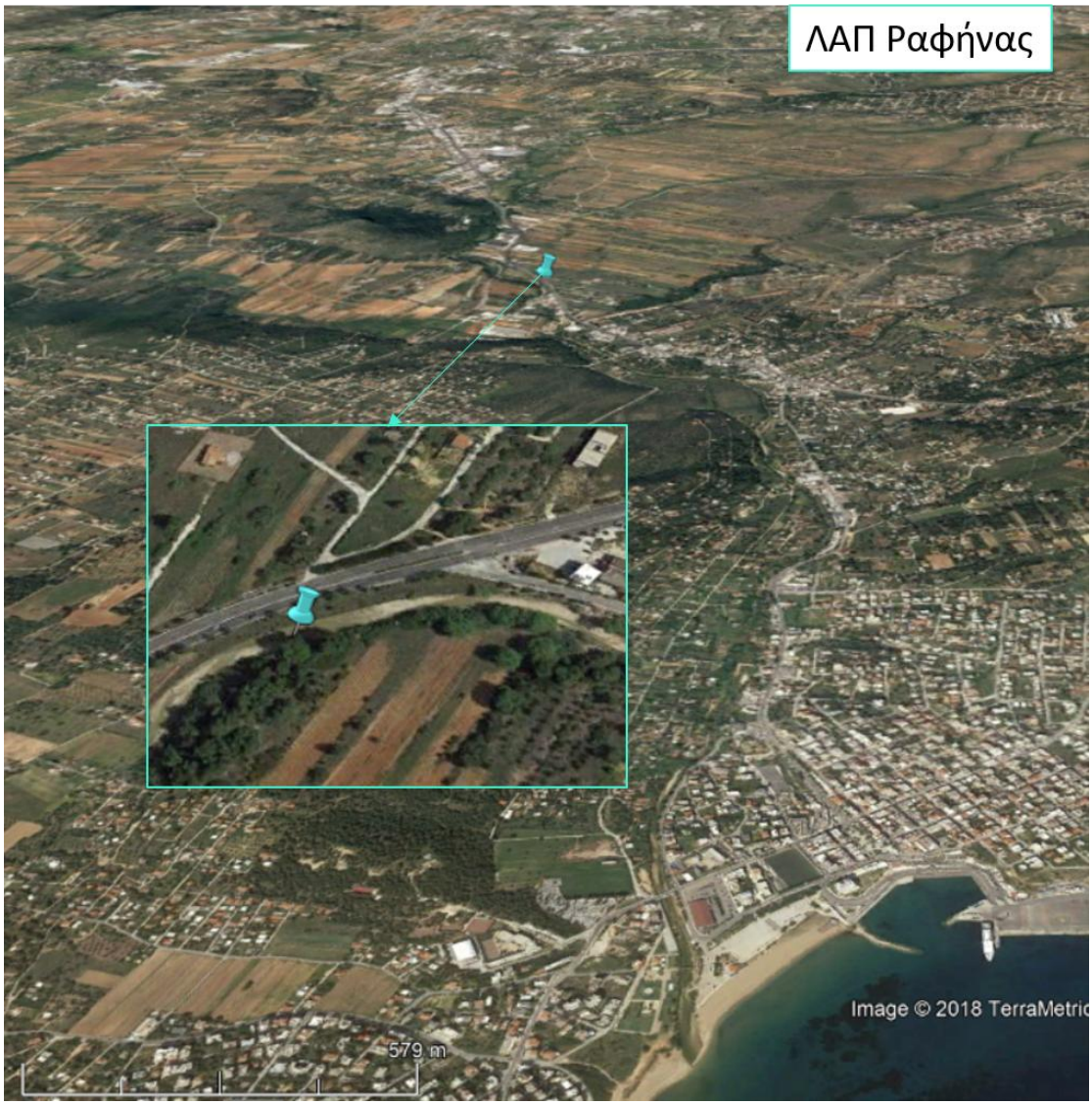
β)



Σχήμα 4.6: α) Αποτύπωση κατάλληλων θέσεων με ταξινόμηση του βαθμού επίδοσης σε πέντε κλάσεις, β) Στατιστικά στοιχεία προτεινόμενων θέσεων στη λεκάνη απορροής της Εσχατιάς

4.5 Αποτελέσματα χωροθέτησης στη λεκάνη Ραφήνας

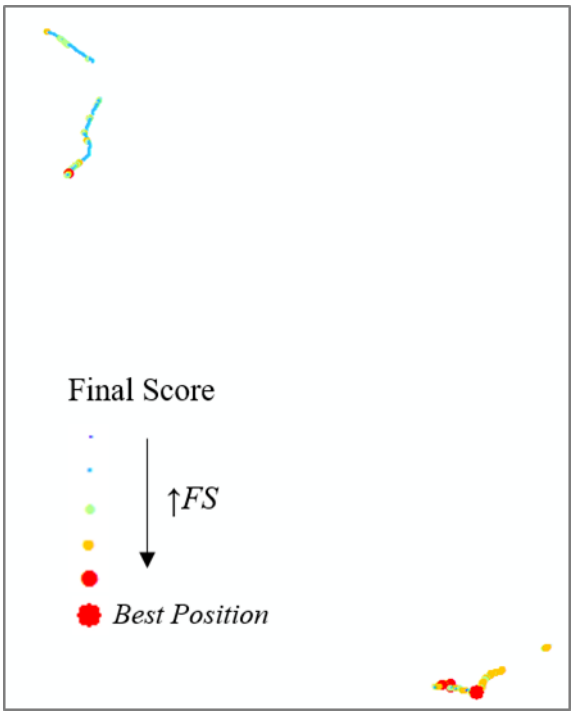
Για τη λεκάνη απορροής της Ραφήνας, προέκυψαν οι βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.7 και αντιστοιχεί η καθεμία σε φατνίο με διαστάσεις 5x5. Επιπλέον στο ίδιο σχήμα φαίνονται και οι θέσεις αυτές στην πραγματικότητα μέσω του Google Earth.



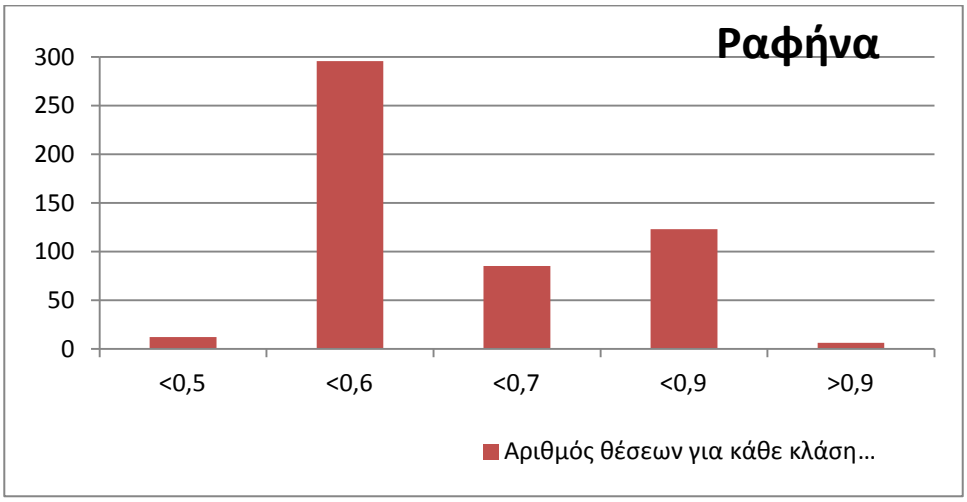
Σχήμα 4.7: Βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης υδρομετρικών σταθμών στη λεκάνη απορροής της Ραφήνας

Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία για τις προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης των υδρομετρικών σταθμών, τα οποία υπολογίστηκαν μέσω του ArcGIS ύστερα από το αποτέλεσμα χωροθέτησης. Τα αποτελέσματα των θέσεων ταξινομήθηκαν σε 5 κλάσεις, όπου για κάθε κλάση υπάρχουν τα όρια βαθμολογίας και ο αριθμός των θέσεων υδρομετρικών σταθμών για κάθε κλάση. Όπως

παρατηρείται στο Σχήμα 4.8, στη λεκάνη της Ραφήνας, οι περισσότερες προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης είναι 296 με βαθμολογία μικρότερη του 60% και ανήκουν στη δεύτερη κλάση. Αντίθετα, οι βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις είναι μόνο 6 με βαθμολογία μεγαλύτερη του 90% και ανήκουν στην πέμπτη κλάση. Χαμηλότερη βαθμολογία μικρότερη του 50% ως προτεινόμενες θέσεις έχουν 12 θέσεις. Η πλειοψηφία των βέλτιστων προτεινόμενων θέσεων παρατηρείται ότι βρίσκεται προς το τέλος του κύριου υδατορεύματος, ενώ μόνο μια βέλτιστη βρίσκεται κοντά στην αρχή του.



α)



β)

Σχήμα 4.8: α) Αποτύπωση κατάλληλων θέσεων με ταξινόμηση του βαθμού επίδοσης σε πέντε κλάσεις, β) Στατιστικά στοιχεία προτεινόμενων θέσεων στη λεκάνη απορροής της Ραφήνας

Πίνακας 4.5: Κλάσεις-όρια βαθμολογίας και αριθμός προτεινόμενων θέσεων για τη λεκάνη της Ραφήνας

Κλάσεις	Όρια σκορ	Αριθμός θέσεων
1	<0,5	12
2	<0,6	296
3	<0,7	85
4	<0,9	123
5	>0,9	6

4.6 Αποτελέσματα χωροθέτησης στη λεκάνη Χάραδρου

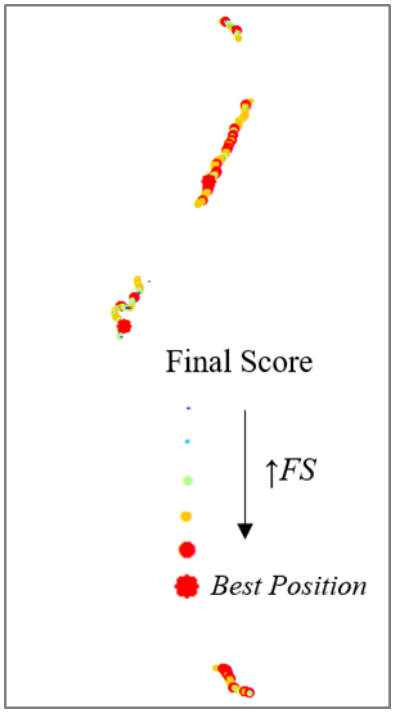
Για τη λεκάνη απορροής του Χάραδρου προέκυψαν οι βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.9 και αντιστοιχεί η καθεμία σε φατνίο με διαστάσεις 5x5. Επιπλέον στο ίδιο σχήμα φαίνονται και οι θέσεις αυτές στην πραγματικότητα μέσω του Google Earth.

Σχήμα 4.9: Βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης υδρομετρικών σταθμών στη λεκάνη απορροής του Χάραδρου

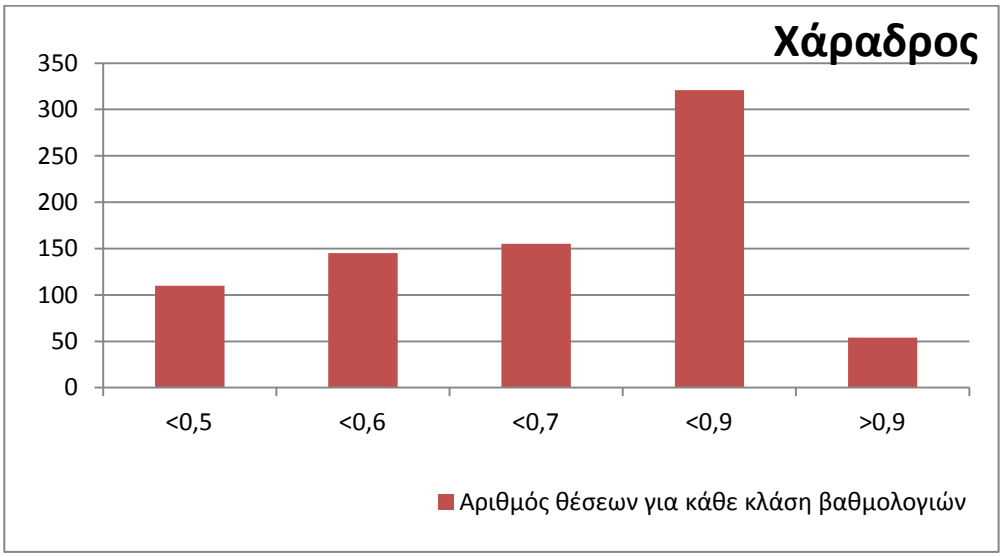
Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία για τις προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης των υδρομετρικών σταθμών, τα οποία υπολογίστηκαν μέσω του ArcGIS ύστερα από το αποτέλεσμα χωροθέτησης. Τα αποτελέσματα των θέσεων ταξινομήθηκαν σε 5 κλάσεις, όπου για κάθε κλάση υπάρχουν τα όρια βαθμολογίας και ο αριθμός των θέσεων υδρομετρικών σταθμών για κάθε κλάση. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4.10, στη λεκάνη του Χάραδρου, οι περισσότερες προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης είναι 321 με βαθμολογία μικρότερη του 90% και ανήκουν στην τέταρτη κλάση. Οι βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις είναι 54 με βαθμολογία μεγαλύτερη του 90% και ανήκουν στην πέμπτη κλάση. Χαμηλότερη βαθμολογία μικρότερη του 50% ως προτεινόμενες θέσεις έχουν 110 θέσεις. Η πλειοψηφία των βέλτιστων προτεινόμενων θέσεων παρατηρείται ότι βρίσκεται προς την κορυφή του κύριου υδατορεύματος.

Πίνακας 4.6: Κλάσεις-όρια βαθμολογίας και αριθμός προτεινόμενων θέσεων για τη λεκάνη του Χάραδρου

Κλάσεις	Όρια σκορ	Αριθμός θέσεων
1	<0,5	110
2	<0,6	145
3	<0,7	155
4	<0,9	321
5	>0,9	54



α)

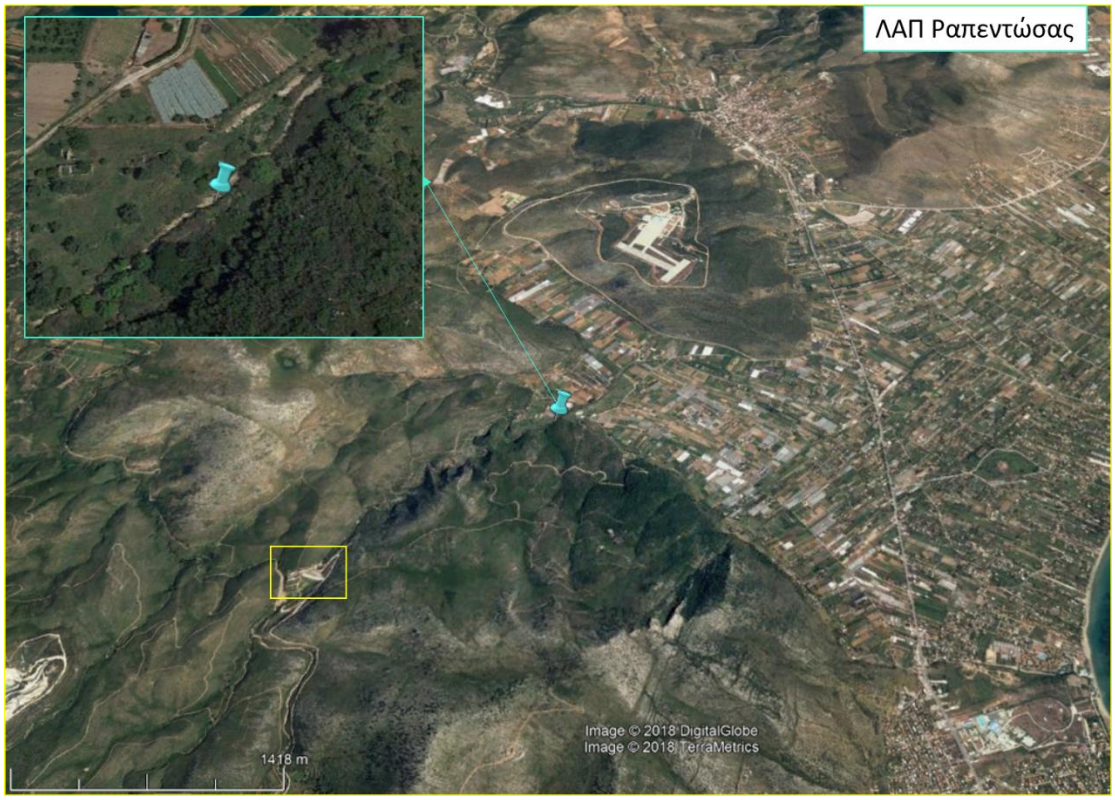


β)

Σχήμα 4.10: α) Αποτύπωση κατάλληλων θέσεων με ταξινόμηση του βαθμού επίδοσης σε πέντε κλάσεις, β) Στατιστικά στοιχεία προτεινόμενων θέσεων στη λεκάνη απορροής του Χάραδρου

4.7 Αποτελέσματα χωροθέτησης στη λεκάνη Ραπεντώσας

Για τη λεκάνη απορροής της Ραπεντώσας, προέκυψαν οι βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.11 και αντιστοιχεί η καθεμία σε φατνίο με διαστάσεις 5x5. Επιπλέον στο ίδιο σχήμα φαίνονται και οι θέσεις αυτές στην πραγματικότητα μέσω του Google Earth.

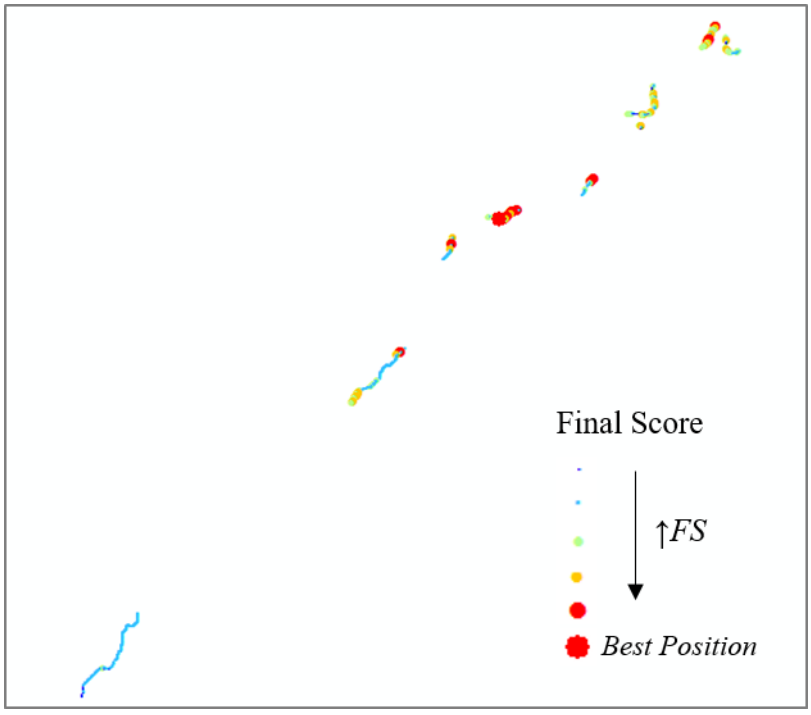


Σχήμα 4.11: Βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης υδρομετρικών σταθμών στη λεκάνη απορροής της Ραπεντώσας (με κίτρινο πλαίσιο σημειώνεται το φρ. Ραπεντώσας)

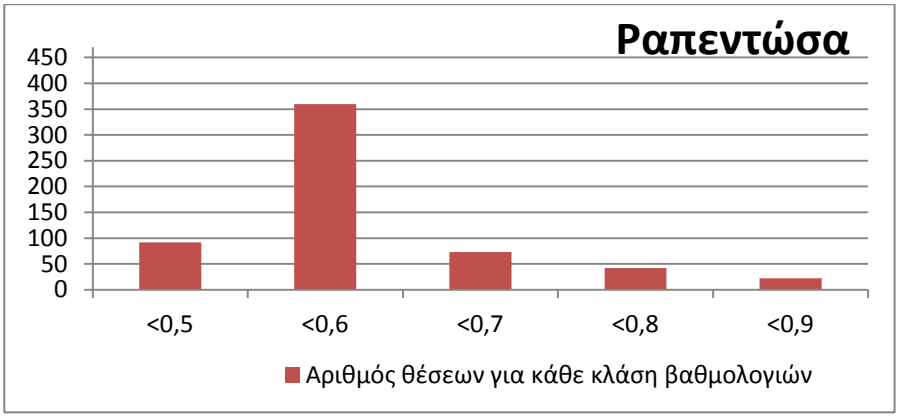
Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία για τις προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης των υδρομετρικών σταθμών, τα οποία υπολογίστηκαν μέσω του ArcGIS ύστερα από το αποτέλεσμα χωροθέτησης. Τα αποτελέσματα των θέσεων ταξινομήθηκαν σε 5 κλάσεις, όπου για κάθε κλάση υπάρχουν τα όρια βαθμολογίας και ο αριθμός των θέσεων υδρομετρικών σταθμών για κάθε κλάση. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4.12, στη λεκάνη της Ραπεντώσας, οι περισσότερες προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης είναι 360 με βαθμολογία μικρότερη του 60% και ανήκουν στη δεύτερη κλάση. Αντίθετα, οι βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις είναι 22 με βαθμολογία μικρότερη του 90% και ανήκουν στην πέμπτη κλάση. Χαμηλότερη βαθμολογία μικρότερη του 50% ως προτεινόμενες θέσεις έχουν 92 θέσεις. Οι βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις παρατηρείται ότι βρίσκονται στη μέση του κύριου υδατορεύμτος.

Πίνακας 4.7: Κλάσεις-όρια βαθμολογίας και αριθμός προτεινόμενων θέσεων για τη λεκάνη της Ραπεντώσας

Κλάσεις	Όρια σκορ	Αριθμός θέσεων
1	<0,5	92
2	<0,6	360
3	<0,7	73
4	<0,8	42
5	<0,9	22



α)

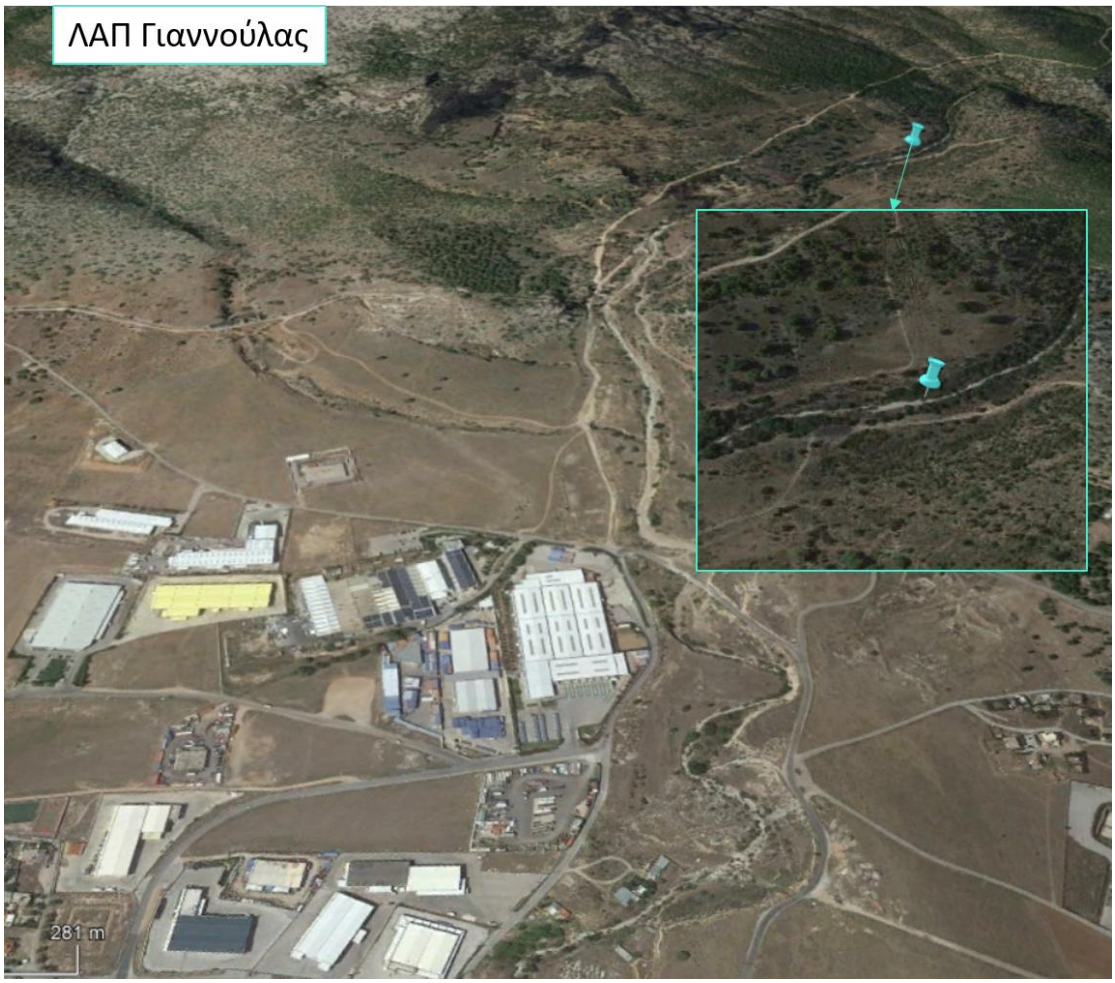


β)

Σχήμα 4.12: α) Αποτύπωση κατάλληλων θέσεων με ταξινόμηση του βαθμού επίδοσης σε πέντε κλάσεις, β) Στατιστικά στοιχεία προτεινόμενων θέσεων στη λεκάνη απορροής της Ραπεντώσας

4.8 Αποτελέσματα χωροθέτησης στη λεκάνη Γιαννούλα

Για τη λεκάνη απορροής του Γιαννούλα προέκυψαν οι βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.13 και αντιστοιχεί η καθεμία σε φατνίο με διαστάσεις 5x5. Επιπλέον στο ίδιο σχήμα φαίνονται και οι θέσεις αυτές στην πραγματικότητα μέσω του Google Earth.

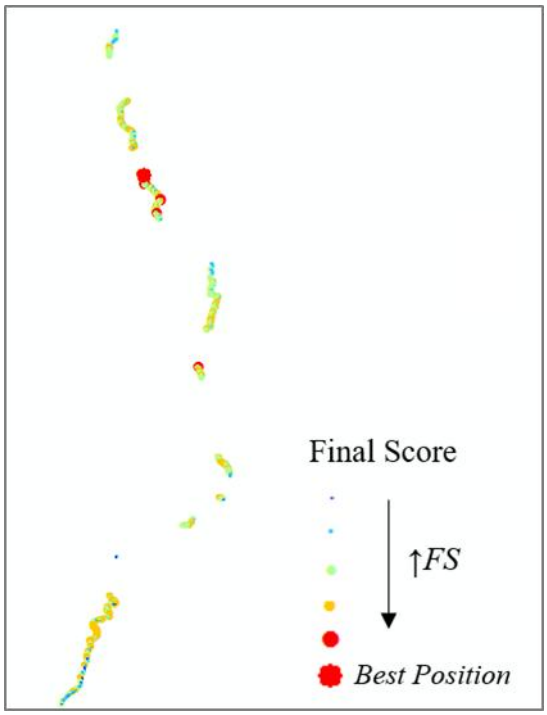


Σχήμα 4.13: Βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης υδρομετρικών σταθμών στη λεκάνη απορροής του Γιαννούλα

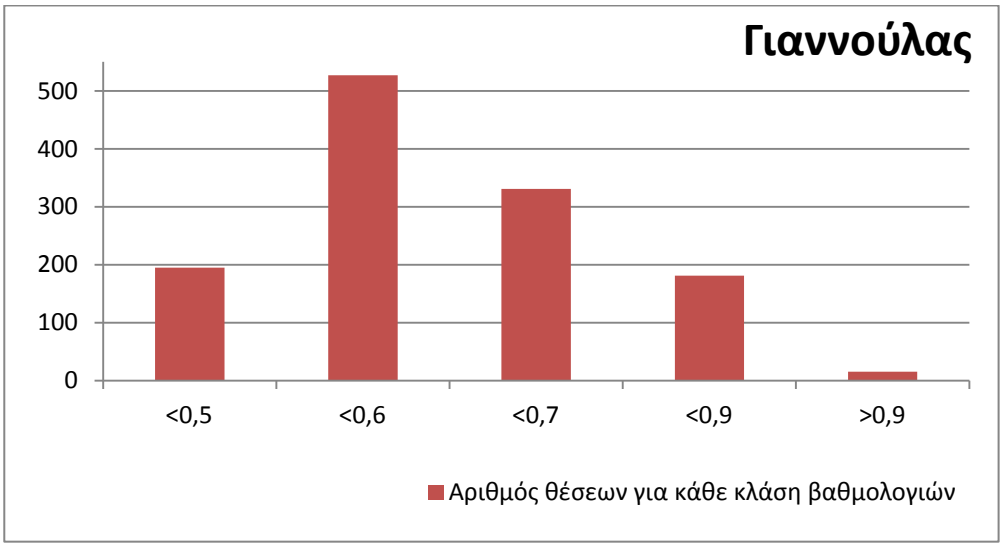
Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία για τις προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης των υδρομετρικών σταθμών, τα οποία υπολογίστηκαν μέσω του ArcGIS ύστερα από το αποτέλεσμα χωροθέτησης. Τα αποτελέσματα των θέσεων ταξινομήθηκαν σε 5 κλάσεις, όπου για κάθε κλάση υπάρχουν τα όρια βαθμολογίας και ο αριθμός των θέσεων υδρομετρικών σταθμών για κάθε κλάση. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4.14, στη λεκάνη του Γιαννούλα, οι περισσότερες προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης είναι 527 με βαθμολογία μικρότερη του 60% και

ανήκουν στη δεύτερη κλάση. Οι βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις είναι 15 με βαθμολογία μεγαλύτερη του 90% και ανήκουν στην πέμπτη κλάση. Χαμηλότερη βαθμολογία μικρότερη του 50% ως προτεινόμενες θέσεις έχουν 195 θέσεις. Οι βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης παρατηρείται ότι βρίσκονται κοντά στην κορυφή του κύριου υδατορεύματος βόρεια της λεκάνης απορροής.

α)



β)



Σχήμα 4.14: α) Αποτύπωση κατάλληλων θέσεων με ταξινόμηση του βαθμού επίδοσης σε πέντε κλάσεις, β) Στατιστικά στοιχεία προτεινόμενων θέσεων στη λεκάνη απορροής του Γιαννούλα

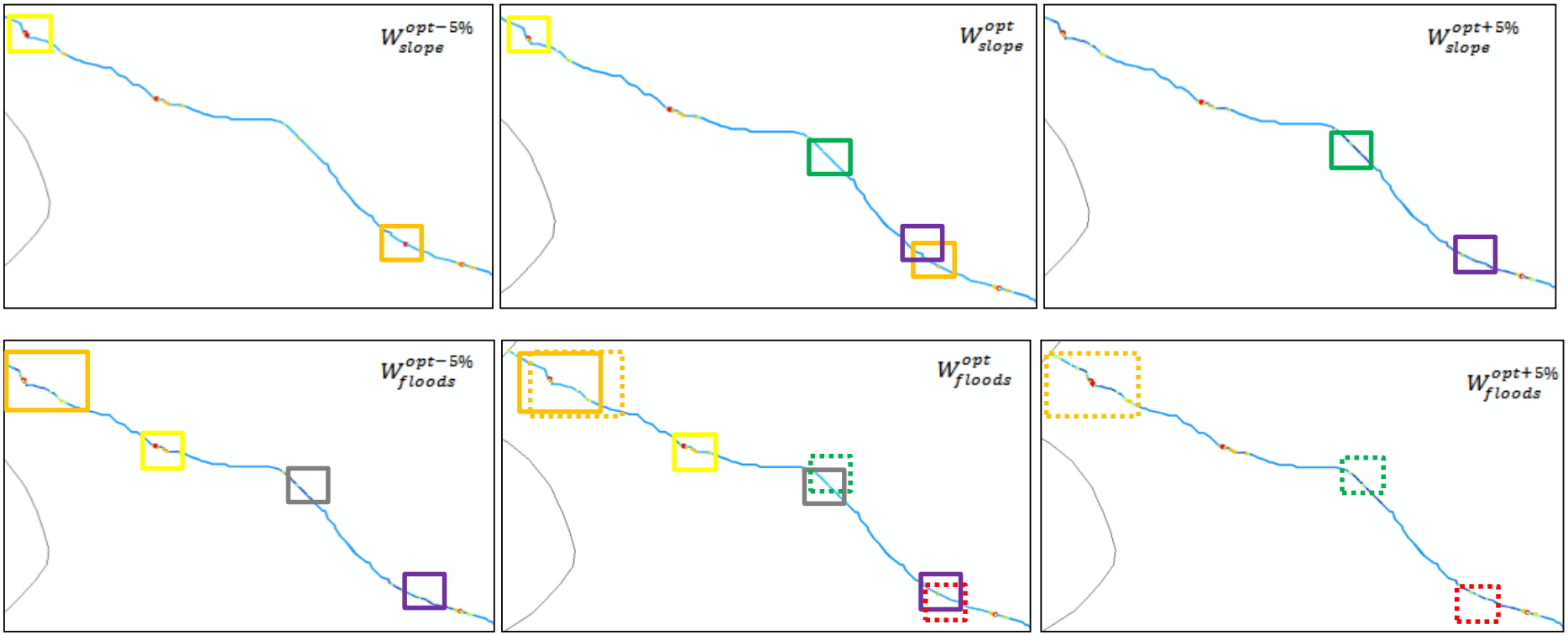
Πίνακας 4.8: Κλάσεις-όρια βαθμολογίας και αριθμός προτεινόμενων θέσεων για τη λεκάνη του Γιαννούλα

Κλάσεις	Όρια σκορ	Αριθμός θέσεων
1	<0,5	195
2	<0,6	527
3	<0,7	331
4	<0,9	181
5	>0,9	15

4.9 Ανάλυση ευαισθησίας των κριτηρίων χωροθέτησης στη λεκάνη απορροής της Εσχατιάς

Στο Σχήμα 4.15 φαίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας που έγινε για ±5% στο κριτήριο των κλίσεων και στο κριτήριο απόσταση από πλημμυρικό πεδίο για τη λεκάνη της Εσχατιάς.

- Στην περίπτωση όπου το βάρος των κλίσεων μειώθηκε 5% παρατηρείται ότι προέκυψαν δύο νέες βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης υδρομετρικών σταθμών, όπως αναμενόταν, καθώς αυξήθηκε η ελαστικότητα έναντι της κλίσης κατά μήκος του ρέματος. Όταν το βάρος των κλίσεων αυξήθηκε 5% τότε μειώθηκε η βαθμολογία των προτεινόμενων θέσεων χωροθέτησης σε σχέση με τις αρχικές.
- Στην περιπτώση μείωσης του βάρους του κριτηρίου των πλημμυρών κατά 5%, όπως φαίνεται στις περιοχές που περικλύονται από τα κουτάκια με χρώματα πορτοκαλί, κίτρινο , γκρί και μώβ, οι προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης έχουν μικρότερη βαθμολογία. Όταν το βάρος των πλημμυρών αυξήθηκε 5% τότε προέκυψε μια νέα επιπλέον βέλτιστη θέση χωροθέτησης, η οποία βρίσκεται στην περιοχή που περικλύεται από το κίτρινο διακεκομμένο πλαίσιο. Επίσης, στις περιοχές που περικλύονται στα τρία πλαίσια που φαίνονται στην εικόνα στην περίπτωση του +5% προκύπτουν προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης με μικρότερη βαθμολογία από τις αρχικές.



Σχήμα 4.15: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας μεταβάλλοντας τα βάρη για τα κριτήρια κλίσεις ρεμάτων και απόσταση από θέσεις πλημμυρών στη λεκάνη της Εσχατιάς

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Σύνοψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε ανάπτυξη μεθολογίας για τη βέλτιστη χωροθέτηση δικτύου υδρομετρικών σταθμών σε επτά λεκάνες της Αττικής με χρήση μεθόδων GIS. Η μεθοδολογία βασίστηκε στην πολυκριτηριακή ανάλυση και τη διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP), χρησιμοποιώντας τέσσερα κριτήρια. Αυτά αφορούν τις αποστάσεις από οικισμούς, θέσεις συμβολών με ρέματα κατ΄αμήκος του κύριου υδατορεύματος, πλημμύρες, καθώς και τις κλίσεις κατά μήκος του κύριου υδατορεύματος, οι οποίες προτιμούνται να είναι ήπιες. Ως εκ τούτου, αρχικά, με τη βοήθεια του εργαλείου Easy AHP υπολογίστηκαν τα βάρη των κριτηρίων και στη συνέχεια προέκυψαν στο ArcGIS οι προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης των υδρομετρικών σταθμών και για τις επτά λεκάνες, με βαθμολογία για την κάθε θέση για το αν ανήκει στην κλάση των βέλτιστων θέσεων. Επιπλέον, προκειμένου να εξεταστεί ποια βάρη είναι καθοριστικά στη χωροθέτηση, έγινε ανάλυση ευαισθησίας για μεταβολή ±5% στα κριτήρια ‘κλίση υδατορευματος’ και ‘απόσταση από πλημμυρικό πεδίο’. Οι προτεινόμενες θέσεις τελικά απεικονίζονται στο περιβάλλον του ArcGIS αλλά και μέσω του Google Earth.

5.2 Συμπεράσματα

5.2.1 Γενικά

Όσον αφορά τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία αυτά είναι τα εξής.

- Αρχικά συμπεραίνεται ότι είναι ιδιαίτερα σημαντική η επιλογή των κριτηρίων για τη χωροθέτηση υδρομετρικών σταθμών, αφού σύμφωνα με αυτά αναπτύσεται η μεθοδολογία.
- Γενικά η χωροθέτηση υδρομετρικών σταθμών που έχουν σκοπό την προειδοποίηση σε περίπτωση πλημμυρικών φαινομένων, είναι αναγκαία να γίνεται ανάντι των οικισμών για έγκαιρη πρόληψη, μακριά από συμβολές με άλλα ρέματα ώστε να αποφεύγεται η επίδρασή τους και τέλος ανάντι πλημμυρικών ζωνών.

- Επιπλέον είναι αναγκαίο να τεθούν κάποιοι περιορισμοί στη διαδικασία της χωροθέτησης, όπως για παράδειγμα οι υδρομετρικοί σταθμοί να εγκατασταθούν κατά μήκος του κύριου υδατορεύματος.
- Η απόδοση τιμής σημαντικότητας στη σύγκριση ζευγών κριτηρίων παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην εξαγωγή των βαρών, διότι επηρεάζονται άμεσα από τις τιμές που δίνει ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων. Οπότε είναι αναγκαίο να υπάρχει εμπειρία και σωστή κρίση από τον τελευταίο.
- Σχετικά με τη μεταβολή του βάρους ενός κριτηρίου για κάποιο ποσοστό σε σχέση με τα υπόλοιπα κριτήρια, είναι αρκετά καθοριστική διότι αν το κριτήριο αυτό είναι το πιο ευαίσθητο τότε μπορεί να προκύψουν εντελώς διαφορετικές θέσεις χωροθέτησης.
- Υπολογίστηκε μεγάλος αριθμός προτεινόμενων θέσων χωροθέτησης υδρομετρικών σταθμών για όλες τις λεκάνες μελέτης της Αττικής, και ικανοποιητικός αριθμός βέλτιστων θέσεων.

5.2.2 Ειδικά

Σχετικά με τα ειδικά συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι τα εξής:

- Η λεκάνη που περιέχει τις περισσότερες βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης με την υψηλότερη βαθμολογία είναι ο Ερασίνος, ο οποίο έχει 644 προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης που πληρούν όλα τα κριτήρια, με βαθμολογία μεγαλύτερη του 90%. Ακολουθεί σε κατάταξη ο Σαρανταπόταμος, ο οποίος έχει 317 βέλτιστες προτεινόμενες θέσεις χωροθέτησης, με βαθμολογία μεγαλύτερη του 90%.
- Η λεκάνες που περιέχουν τις λιγότερες βέλτιστες θέσεις χωροθέτησης είναι η Εσχατιά με 3 βέλτιστες θέσεις χωροθέτησης και βαθμολογία μικρότερη του 90%. Επίσης είναι η λεκάνη της Ραφήνας που περιέχει 6 βέλτιστες θέσεις με βαθμολογία μεγαλύτερη του 90%.
- Η λεκάνη απορροής με τον μεγαλύτερο απόλυτο αριθμό βέλτιστων θέσεων είναι εκείνη του Ερασίνου, καθώς η περιοχή που αναλύθηκε (κατάντη της Αττικής Οδού) είναι κατά κύριο λόγο πεδινή. Ως εκ τούτου, το κριτήριο με το μέγιστο βαθμό επιρροής (‘κλίση υδατορεύματος’) οδηγεί σε υψηλότερο βαθμό επίδοσης για μεγάλο αριθμό θέσεων. Συμπληρωματικά, αναφέρεται ότι

οι θέσεις που προτείνονται για τα συγκεκριμένη περιοχή είναι δύο, η ανάντη βρίσκεται ακριβών μετά την Αττική Οδό και η κατάντη προτείνεται σε απόσταση περίπου 7 km ανάντη του Αρχαιολογικού χώρου Βραυρώνας.

- Από την ανάλυση ευαισθησίας που διεξήχθη για τη λεκάνη της Εσχατιάς και για ποσοστιαία μεταβολή ±5% στα δύο κριτήρια με την υψηλότερη και χαμηλότερη επιρροή, αντίστοιχα, παρατηρήθηκε ότι το κριτήριο που είναι πιο ευαίσθητο στις μεταβολές είναι εκείνο της κλίσης υδατορεύματος.

5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Από την παρούσα διπλωματική εργασία προέκυψε πληθώρα ευρημάτων, ενώ αποτέλεσε την αφορμή για τη διατύπωση ορισμένων προτάσεων προς μελλοντική έρευνα.

- Αναφορικά με τα κριτήρια χωροθέτησης, προτείνεται η διερεύνηση με εισαγωγή πρόσθετων κριτηρίων χωροθέτησης, όπως αν γίνεται καθαρισμός και πλήρωση στο υδατόρευμα που μελετάται, αν υπάρχει πυκνή βλάστηση αλλά και αν εντοπίζεται εκφόρτιση πηγαίων υδάτων. Τα εν λόγω δεδομένα, δε συμπεριλήφθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας καθώς απαιτείται επιτόπου καταγραφή και σχεδιασμός της αντίστοιχης γεωχωρικής βάσης δεδομένων.
- Ακόμα, προτείνεται αναλυτικότερη ανάλυση ευαισθησίας στους συντελεστές βαρύτητας των κριτηρίων σχεδιασμού όπως και διερεύνηση με χρήση διαφορετικών μεθόδων ιεράρχισης των προεπιλεγμένων κριτηρίων, καθώς κατά την εν λογω προσέγγιση παίζει πρωταρχικό ρόλο η γνώση και εμπειρία του αναλυτή/υπεύθυνου λήψης αποφάσεων.
- Τέλος, προτείνεται η εφαρμογή σε μεγάλυτερες λεκάνες απορροής και χρήση δεδομένων τηλεπισκόπησης. Σε αυτή την περίπτωση δεν εμπεριέχεται το σφάλμα της ψηφιοποίησης του υδατορεύματος ή της διαδικασίας αυτόματης εξαγωγής από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, καθώς η πραγματική θέση του υδατορεύματος μπορεί να ανιχνευθεί από το δορυφορικό προϊόν.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Α. Ελληνικές

- Βαχαβιώλος Θ., *Μεθοδολογία προσδιορισμού ευάλωτων περιοχών σε πλημμύρες σύμφωνα με την οδηγία 2007/60,* Διπλωματική Εργασία, 128 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2011

- Διακάκης Μ., *Εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας με τη χρήση μοντέλων προσομοίωσης,* Διδακτορική Διατριβή, 213 σελίδες, Σχολή Θετικών Επιστημών Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος-Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα, 2012

- ΕΜΠ, .Σημειώσεις μαθήματος Πλημμύρες και Αντιπλημμυρικά έργα, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠΜΣ ΕΤΥΠ, 2014.

- Ζαρκαδούλας Θ.-Π., *Ανάπτυξη μοντέλου υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης στη χειμαρρική λεκάνη του Σαρανταπόταμου,* Διπλωματική Εργασία, 210 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2014

- Καρύμπαλης Ε., *Εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου στη λεκάνη απορροής του ρέματος Γιαννούλας (Θριάσιο Πεδίο) με τη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ)),* Διπλωματική Εργασία, 119 σελίδες, Τμήμα Γεωγραφίας– Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα, Φεβρουάριος 2015

- Κασιμάτης Δ., *Εκτίμηση Πλημμυρικών Μεγεθών στην Υδρολογική Λεκάνη του Ερασίνου,* Διπλωματική Εργασία, 132 σελίδες, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2011

- Κουτσογιάννης Δ., και Μαμάσης Ν., *Υδρολογική διερεύνηση ισχυρών βροχοπτώσεων και στερεοαπορροών του Θριασίου Πεδίου*, 21 σελίδες, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2001

- Κρίκου Π., *Η διαχείριση του νερού ως στοιχείο αναβάθμισης του αστικού περιβάλλοντος. Η περίπτωση των ρεμάτων της Αττικής,* Διπλωματική Εργασία, 142 σελίδες, Δ.Π.Μ.Σ. Αρχιτεκτονική-Σχεδιασμός του χώρου – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Νοέμβριος 2017

- Μπενσασσών Α., και Παπαλεξόπουλος Β., *Αντιπλημμυρική προστασία λεκανοπεδίου ρέματος Ερασίνου*, εισήγηση στην Ημερίδα του ΤΕΕ Ελλάδας με θέμα: «Αντιπλημμυρική προστασία Αττικής», Αθήνα 2004

- Νασοπούλου Ι., *Εκτίμηση των παραμέτρων του Υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής του Οινόη ποταμού (Ν. Αττικής),* Διπλωματική Εργασία, 78 σελίδες, Τμήμα Γεωγραφίας– Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα, Φεβρουάριος 2006

- Παλημέρης Π., *Δισδιάστατη προσομοίωση ρέματος Ραπεντώσας με τη χρήση του λογισμικού HEC-RAS,* Διπλωματική Εργασία, 87 σελίδες, Τομέας Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2017

- Παυλόπουλος Κ., Καρίμπαλης Ε., και Μαρουκιάν Χ., Γεωμορφολογική εξέλιξη της λεκάνης απορροής και του παράκτιου αλλουβιακού ριπίδιου του ποταμού Οινόη (Χάραδρου) κατά το τεταρτογενές, 19 σελίδες, 2002.

- Ραγκούσης Ε., *Υδρολογική Προσομοίωση της Λεκάνης Απορροής του Ρέματος Ραφήνας με τη χρήση του HEC-HMS,* 112 σελίδες, Τομέας Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2014

- Χαλδέζου Σ., *Κοινωνικοί και Χωρικοί Παράγοντες στη Διαχείριση Ρεμάτων στο Δυτικό Λεκανοπέδιο,* Διπλωματική Εργασία, 36 σελίδες, Δ.Π.Μ.Σ. Πολεοδομία-Χωροταξία – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Απρίλιος 2014

- Χατζηγιάννη Μ., *Προσέγγιση ολοκληρωμένης διαχείρισης αστικών ρεμάτων & ομβρίων υδάτων: η περίπτωση της Εσχατιάς,* Διπλωματική Εργασία, 68 σελίδες, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούνιος 2016

- Χαλκιάς Χ., *Γεωγραφική Ανάλυση με την αξιοποίηση της Γεωπληροφορικής,*157 σελίδες, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράματα και Βοηθήματα, Αθήνα 2015

- Προσωπική επίσκεψη στην υπηρεσία Υ.Π.Ε.Χ.Ω.Δ.Ε

Β. Ξενόγλωσσες

- Drobne, S., & Lisec, A. Multi-attribute decision analysis in GIS: weighted linear combination and ordered weighted averaging,. Informatica, 2009.
- ESRI,ArcGISDesktop:Release10, Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA, 2010.
- Feloni, D. K. Karpouzos, E. A. Baltas, Optimal hydrometeorological station network design by using GIS techniques and multi-criteria decision analysis
- Saaty T. L. (1977,1987). A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. J. Math. Psychology, 15, pp. 234–281, 2018.
- Voogd H., Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning. Pion, Ltd., London, 1983.
- World Meteorological Organization (WMO), Manual on Stream Gauging-Volumn 1: Fieldwork, Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010.

Γ. Διαδικτιακοί ιστότοποι

- http://www.flire.eu/el/information/status, 26/1/2018
- https://land.copernicus.eu/acl_users, 23/1/2018
- http://eidc.ceh.ac.uk/metadata/32533dd6-7c1b-43e1-b892-e80d61a5ea1d/corine-land-cover-legend-layer-file/view, 32/1/2018
- http://geodata.gov.gr/, 26/9/2017
- http://www.ypeka.gr, 3/10/2017
- https://land.copernicus.eu/acl_users, 8/1/2018
- http://eidc.ceh.ac.uk/metadata/32533dd6-7c1b-43e1-b892-e80d61a5ea1d/corine-land-cover-legend-layer-file/view, 8/1/2018
- http://hdl.handle.net/11419/2514, 25/10/2017
- http://www.statistics.gr/statistics/pop 25/10/2017