



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Υδρολογική ανάλυση και εκτίμηση στερεοαπορροής στη λίμνη
Πλαστήρα

ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΜΠΑΛΤΑΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανατέθηκε στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των προπτυχιακών σπουδών μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή, κ. Ευάγγελο Μπαλτά, για την ανάθεση του θέματος, την επίβλεψη, τις συμβουλές του, αλλά και για τις πολύτιμες γνώσεις που μου μετέδωσε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την υποψήφια διδάκτορα στον τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π, Αιμιλία – Παναγιώτα Θεοχάρη, για την πολύτιμη βοήθειά της, τον χρόνο που διέθεσε, και τις συμβουλές της καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω επίσης στις ευχαριστίες μου τον Επίκουρο Καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π, κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη και τον Αναπληρωτή Καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π, κ. Νικόλαο Μαμάση, οι οποίοι αποτελούν μέλη της εξεταστικής επιτροπής και από τους οποίους έχω αποκτήσει πολύτιμες γνώσεις κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και όλους του κοντινούς μου ανθρώπους για την υποστήριξη και την υπομονή τους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	ii
EXTENDED SUMMARY	vii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	viii
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Αντικείμενο εργασίας.....	2
1.3 Διάρθρωση εργασίας.....	3
2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΕΝΝΟΙΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΩΝ	5
2.1 Διάβρωση και στερεομεταφορά	5
2.2 Όμβριες καμπύλες.....	10
2.3 Επιφανειακή ολοκλήρωση σημειακών βροχοπτώσεων.....	11
2.4 Μοναδιαίο Υδρογράφημα	13
2.5 Υετογράφημα σχεδιασμού	14
2.6 Ενεργή βροχόπτωση.....	16
3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	22
3.1 Μελέτη λεκανών απορροής.....	22
3.1.1 Λεκάνη απορροής του ρέματος Καρυτσιώτη.....	26
3.1.2 Λεκάνη απορροής του ρέματος Μεγάλο Ποτάμι	27
3.1.3 Λεκάνη απορροής Κρυονερίου	29
3.1.4 Λεκάνη απορροής Μορφοβουνίου	30
3.2 Ανάλυση Δεδομένων	32
3.2.1 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM)	32
3.2.2 Γεωλογία	33
3.2.3 Χρήσεις γης.....	35

3.2.4 Μετεωρολογικά δεδομένα.....	38
4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	41
4.1 Γεωμορφολογική ανάλυση.....	41
4.1.1 Χρήση της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS	41
4.1.2 Σχηματισμός των εξεταζόμενων Λεκανών Απορροής.....	47
4.2 Υδρολογική ανάλυση	52
4.2.1 Εκτίμηση ΜΥΓ με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών.....	52
4.2.2 Εκτίμηση Υετογραφήματος σχεδιασμού	60
4.2.3 Εκτίμηση υδρολογικών απωλειών με τη μέθοδο SCS CN.....	63
4.2.4 Εξαγωγή τοπογραφικών χαρακτηριστικών των λεκανών.....	65
4.2.5 Υδρολογική ανάλυση μέσω του HEC-HMS	68
4.3 Εκτίμηση ετήσιου ρυθμού διάβρωσης.....	70
4.3.1 Εκτίμηση συντελεστή χρήσης γης X.....	73
4.3.2 Εκτίμηση συντελεστή αντίστασης εδάφους Y	77
4.3.3 Εκτίμηση συντελεστή διεργασιών διάβρωσης φ.....	79
4.3.4 Εκτίμηση συντελεστή διάβρωσης Z.....	79
4.3.5 Εκτίμηση συντελεστή ετήσιας βροχόπτωσης h	80
4.3.5 Εκτίμηση συντελεστή θερμοκρασίας T	81
4.4 Εκτίμηση στερεοαπορροής	83
5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	86
5.1 Διάβρωση - Στερεοαπορροή.....	86
5.1.1 Αποτελέσματα λεκάνης απορροής του ρέματος Καρυτσιώτη	86
5.1.2 Αποτελέσματα λεκάνης απορροής του ρέματος Μεγάλο Ποτάμι.....	93
5.1.3 Αποτελέσματα λεκάνης απορροής Κρυονερίου.....	99
5.1.4 Αποτελέσματα λεκάνης απορροής Μορφοβουνίου.....	105
5.1.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	111

5.2 Υδρολογική ανάλυση	114
5.2.1 Υδρολογική απόκριση της ανάντη περιοχής για κάθε λεκάνη.....	114
5.2.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	116
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	117
6.1 Σύνοψη	117
6.2 Γενικά συμπεράσματα.....	117
6.3 Ειδικά συμπεράσματα.....	119
6.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	120
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	122

EXTENDED SUMMARY

Introduction

Soil erosion is regarded as one of the greatest threats to the environment and the natural sources of energy, and can substantially increase the risk of flooding. Erosion decreases the soil quality and productivity leading to the degradation of the land. In addition, erosion generates alluvion deposits which affect a number of structures related to aquatic systems (depositions of sediments in ports and estuaries, scouring of bridges, siltation of reservoirs). The risk management of erosion could be defined as a process consisted of estimation, prevention, alertness, reaction and reclamation.

From a hydrologic point of view the interest can be found mainly on the procedures of transfer and deposition of the sediment materials. The process through which the sediment movement in watersheds can be estimated is complicated, giving its dependency on hydrological and morphological factors. The two issues that are closely related to the sediment transport are the sediment yield (in terms of mass, time and area) and the sediment discharge (in terms of mass and time).

The Gavrilović Method (Erosion Potential Method, EPM), (Gavrilović, 1972; 1976; 1988) is a parametric distributed model that estimates the mean annual erosion and sediment yield using empirical coefficients and a matrix of the physical characteristics of basin sub units. Using territorial distributed data (geology, soil, land use) in a Geographical Information System (GIS) environment, is a crucial development of the model, and has been applied in this study.

The subject and aim of the present thesis is the development of a methodological frame for the quantitative estimation of soil erosion. The sediment yield is calculated using the Gavrilović Method. Also, a hydrologic analysis is executed.

Study Area and Data used

The basin of Lake Plastiras is located in the Region Unity of Thessaly and it covers an area of about 161.3 km². Four of the largest subbasins within the broader basin of the lake were selected for the implementation of the Gavrilović model and the execution of the hydrological analysis. In neither of those four subbasins are any data about the total annual soil loss available. The

average annual sediment yield was calculated using four empirical equations of the sediment delivery ratio, SCS (1971), Vanoni (1975a, b), Gavrilović (1988) and Zemljič (1971). The locations of the research basins are presented in Figure 1:

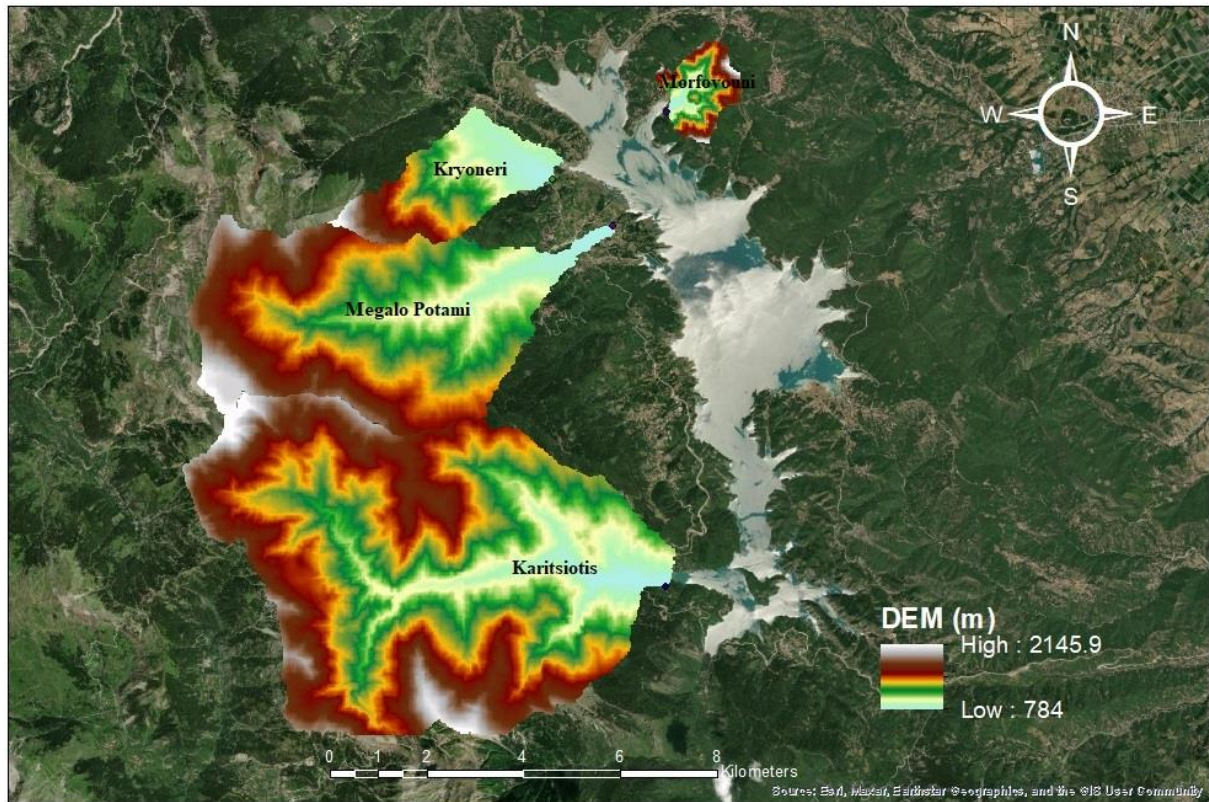


Figure 1: Locations of the basins in Lake Plastiras region

The EPM method considers six factors affecting the erosion process, which are the basin's geologic profile and soil, the average annual rainfall and temperature, the land use and the topological features.

The Karitsiotis river basin has a catchment of 48.9 km² and a perimeter of 31.3 km. According to the 5 m × 5 m digital terrain model, the minimum altitude of the basin is 784 m, the maximum is 2146 m, and the average altitude is 1319 m. The maximum slope of the basin is 75°, the minimum 0°, while the mean slope is 29°. The region's climate is classified as internal Mediterranean. The average annual rainfall is 1603.6 mm and the average annual temperature is 12 °C, as documented by the weather stations of Karitsa and Filakti. From a geological point of view, the Karitsiotis river basin is characterized by medium water permeability, since most of it consists of Pelagian limestones and a series of flysch, which are characterized by high and low water permeability accordingly. According to the land use map "CORINE Land Cover

2018”, the land covering of the basin consists mainly of mixed forests (hardwood and conifer trees), natural meadows, bushes and moorlands, as well as some areas covered in scarce vegetation or boulders.

The Megalo Potami river basin has a catchment of 24.7 km² and a perimeter of 26.5 km. According to the 5x5 digital terrain model, the minimum altitude of the basin is 789 m, the maximum is 2143 m, and the average altitude is 1348 m. The maximum slope of the basin is 79°, the minimum 0°, while the mean slope is 24°. The region’s climate is classified as internal Mediterranean. The average annual rainfall is 1532.9 mm and the average annual temperature is 12 °C, as documented but the weather stations of Pezoula and Filakti. From a geological point of view, the Megalo Potami river basin is characterized by medium water permeability, since it consists of the same geological formations as Karitsiotis river basin. The land covering of the basin consists mainly of hardwood tree forests and transitive areas with bushes and forests, as well as some areas covered in natural meadows and moorlands.

The basin of Kryoneri has a catchment of 6.6 km² and a perimeter of 13.5 km. According to the 5x5 digital terrain model, the minimum altitude of the basin is 788 m, the maximum is 1727 m, and the average altitude is 1045 m. The maximum slope of the basin is 61°, the minimum 0°, while the mean slope is 17°. The region’s climate is classified as internal Mediterranean. The average annual rainfall is 1394.5 mm and the average annual temperature is 12 °C, as documented but the weather stations of Filakti. The geological formations are similar to those of the previous river basins. The land covering of the basin consists of similar land uses too, with the exception of a large area covered in agricultural activities.

The basin of Morfovouni has a catchment of 2.3 km² and a perimeter of 6.8 km. According to the 5x5 digital terrain model, the minimum altitude of the basin is 789 m, the maximum is 963 m, and the average altitude is 862 m. The maximum slope of the basin is 57°, the minimum 0°, while the mean slope is 13°. The region’s climate is classified as internal Mediterranean. The main geological formation is the flysch. The land covering of the basin mostly consists of hardwood tree forests and agricultural activities.

Regarding the data used in the present study, initially, normalized raster files were granted by Ktimatologio A.E, which are the Digital Elevation Model (DEM) of the broader Thessaly region. The DEM has a pixel size of 5.00 m. Each DEM covers a 4.600 m X 3.600 m ground area, with

a perimeter overlap of 300 m, followed by a 1:5000 scale, EGSA87 distribution. The file format is *.img. The geometric accuracy of the product is $RMSEz \leq 2.00$ m and the absolute accuracy ≤ 3.92 m with a 95% confidence interval. In order to estimate the coefficients of the Gavrilović method which are related to the geology, geological maps were obtained by the Greek IGME (Hellenic Institution of Geology and Mineral Exploration). For the estimation of land use factors, the land cover maps of the “CORINE Land Cover” program were used. In order to calculate the rainfall and temperature coefficients, meteorological station data from “Hydroscope” (National Bank of Hydrological and Meteorological Information) were obtained, as well as data from the website of the National Meteorological Service. The meteorological stations which were selected are presented in Figure 2 and their measurements in Table 1.

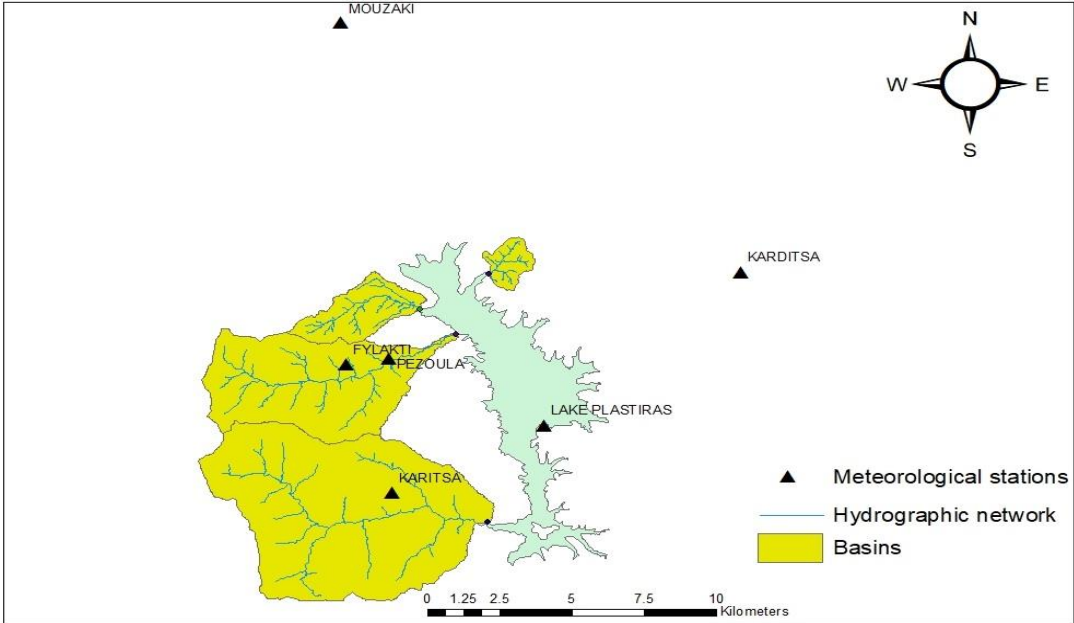


Figure 2: Locations of meteorological stations

Table 1: Average annual rainfall and temperature of each station

NAME OF METEOROLOGICAL STATION	(WGS84) Abscissa, Ordinate, Altitude of stations (m)	Duration of rainfall measurements	Average annual rainfall (mm)	Duration of temperature measurements	Average annual temperature (°C)
FYLAKTI	39.3028, 21.6782, 1150	01/10/2014-30/09/2021	1395	01/10/2014-30/09/2021	12
PEZOULA	39.3061, 21.6950, 931.3	01/10/1997-30/09/2001	1533		-
KARITSA	39.2594, 21.6976, 1074.3	01/10/1997-30/09/2001	1604		-
KARDITSA	39.3609, 21.9043, 106.7	01/10/1997-30/09/2001	533	01/10/1997-30/09/2001	19.8
MOUZAKI	39.4301,	01/10/1997-	733	01/10/1997-	16.7

	21.6648, 226.2	30/09/2001		30/09/2001	
LAKE PLASTIRAS	39.2980, 21.7544, 786		-	01/10/1997- 30/09/2001	13.4

Methodology

- HEC-GeoHMS tool

The HEC-GeoHMS extension of the ArcMap is used in order to determine the boundaries of the four catchment areas of this thesis, as well as their stream network. With the digital model of Thessaly, a series of steps were followed until the DEMs of Karitsiotis, Megalo Potami, Kryoneri and Morfovouni basins were formed. This is done via the HEC-GeoHMS toolbox Preprocessing and Project Setup, as well as some extra ArcMap tools in order to extract the needed results.

- Gavrilović Model

The average annual erosion is calculated by Equation 1:

$$W = T * h * \pi * \sqrt[3]{Z^2} \quad (1)$$

where W is the average annual erosion (m³/y km²), T is the temperature coefficient, h is the mean annual rainfall (mm), and Z is the erosion coefficient.

The temperature coefficient T is calculated by the equation 2:

$$T = \sqrt{\left(\frac{t^o}{10} + 0.1\right)} \quad (2)$$

where t is the mean annual temperature (°C).

The erosion coefficient Z is calculated by Equation 3:

$$Z = Y * X * (\varphi + \sqrt{J}) \quad (3)$$

where X is the soil protection coefficient, Y is the soil erodibility coefficient, φ is the erosion coefficient and J is the mean slope of the catchment (%). Soil protection coefficient X expresses the protection of an area against precipitation and erosion. Its values are tabulated, ranging from 0.05, which is the lower limit of “Mixed and dense forest” class, to 1.0, the upper limit of the “Areas without vegetal cover” class. Soil erodibility coefficient Y expresses the resistance of soil to erosion due to the erosive force of precipitation. Its values are also tabulated, ranging from 0.20, which is the lower limit of the “Hard rock, erosion resistant” class, to 2.0, the upper limit of the “Fine sediments and soils without erosion resistance” class. Coefficient φ stands for the degree of expressed erosion processes (visibly characterized) in the catchment. Its values are tabulated, ranging from 0.10, which is the lower limit of “Limited erosion on watershed” class, to 1.0, the upper limit of the “Whole watershed affected by erosion” class.

The meteorological stations of Fylakti, Mouzaki, Pezoula, Karitsa, Lake Plastiras and Karditsa were used for the calculation of the annual rainfall in each one of the four basins. From the data of the above stations, the typical rainfall for every basin is given by the following mathematical relation:

$$h = 0.9585 * DEM + 490.53 \quad (4)$$

where DEM is the average altitude of every pixel.

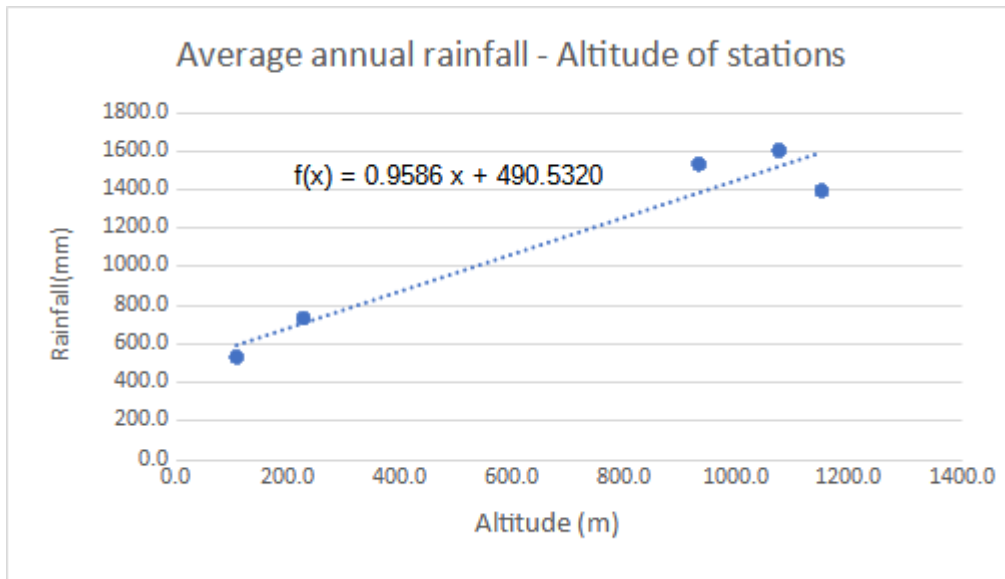


Figure 3: Chart of average annual rainfall – altitude of stations

To calculate the temperature coefficient T (Equation 2), the average annual temperature is at first calculated. For each basin, data from the Fylakti, Karditsa, Mouzaki and Lake Plastiras were used. From the data of the above stations, the typical temperature for every basin is given by the following mathematical relation:

$$t = -0.0068 * DEM + 19.34 \quad (5)$$

where DEM is the average altitude of every pixel of each basin.

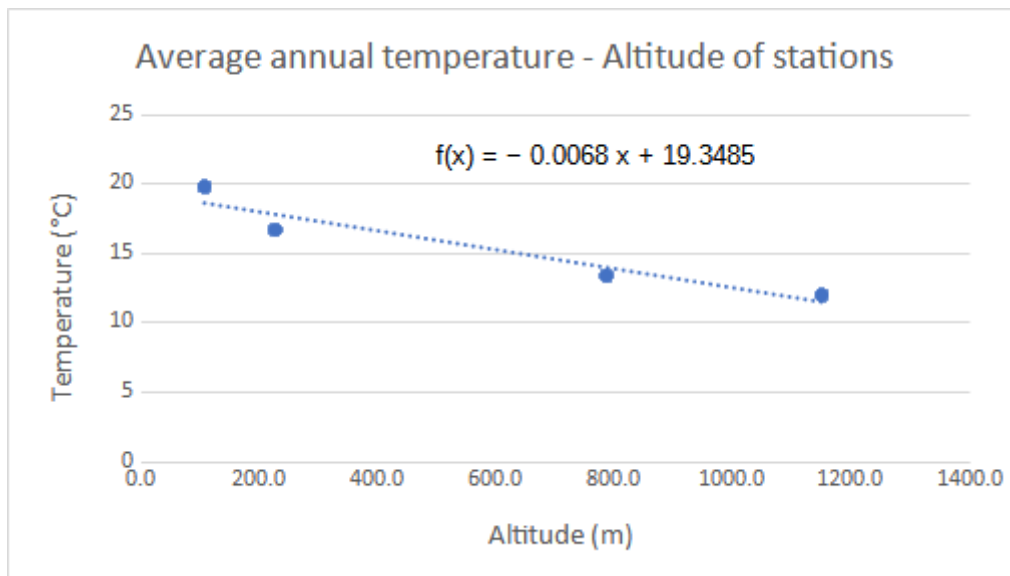


Figure 4: Chart of average annual temperature – altitude of stations

The product of erosion is transferred through the drainage network. In order to estimate the percentage of erosion that is finally converted into sediment yield, many empirical equations have been formulated. In this thesis, the empirical equations of Gavrilović, Zemljič, SCS and Vanoni are being applied to calculate the sediment delivery ratio in order to apply the sediment yield relation.

- Intensity – Duration – Frequency (IDF) Curves

IDF curves are a mathematical expression between the rainfall intensity I , the rainfall duration d and the return period T . Their generic form is described via Equation 6:

$$i(d, T) = \frac{\lambda \left[\left(\frac{T}{\Delta} \right)^k - \psi \right]}{\left(1 + \left(\frac{d}{\theta} \right)^\eta \right)} \quad (6)$$

where k and ψ positive dimensionless parameters, θ parameter with time units, and η dimensionless parameter where $0 < \eta < 1$.

- Alternating Block Method

The alternating block method is used in order to create a more realistic version of the rainfall event. The rainfall intensities are calculated by the IDF curves. The maximum value is placed at the center, the next largest value is placed alternately to the right and left of the rainfall peak in turn. The method was proposed by Chow et al in 1988.

- Curve Number Method

Rainfall losses must be taken into consideration, since only a percentage of the rainfall runoffs. According to FEMA (2018), rainfall losses depend on factors such as soil type, vegetation type and density, land use, percent of impervious area, and antecedent runoff conditions, a measure of how dry or wet a watershed is at the beginning of a storm.

In order to take all these parameters into consideration, the Natural Resource Conservation Service, has categorized soils based on their runoff potential into four groups (Group A, B, C and D). The runoff potential is increasing from Groups A to D. The Ministry of Environment and Energy (MEE) has given values to CORINE codes based on what type of soil they are on, known as Curve Number (CN). The CN number of the basin is given by Equation 7:

$$CN_{II} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i}{A} * CN_i \right) \quad (7)$$

Where CN_{II} the curve number under normal conditions, A_i the area of the subsurface i with a curve number of CN_i and A basin's area.

The complete approach of the study of a flood event requires the investigation of dry and wet soil conditions as well. Therefore, the following equations are used:

$$CN_I = \frac{0.42 * CN_{II}}{1 - 0.0058 * CN_{II}} \quad (8)$$

$$CN_{III} = \frac{2.3 * CN_{II}}{1 + 0.013 * CN_{II}} \quad (9)$$

Where CN_I the curve number for dry conditions and CN_{III} the curve number for wet conditions.

Results

- Soil erosion

In order to calculate the average annual erosion of the catchment areas (Equation 1), firstly the surface distribution of the factors X , Y and ϕ was made. The erosion factors Z , rainfall h and temperature T were calculated from Equations 2 – 5. Finally, annual erosion rate W from Equation 1 is calculated. The results for the assessments of total annual erosion loss of the four catchments of this paper are shown below (Figure 5 – 8).

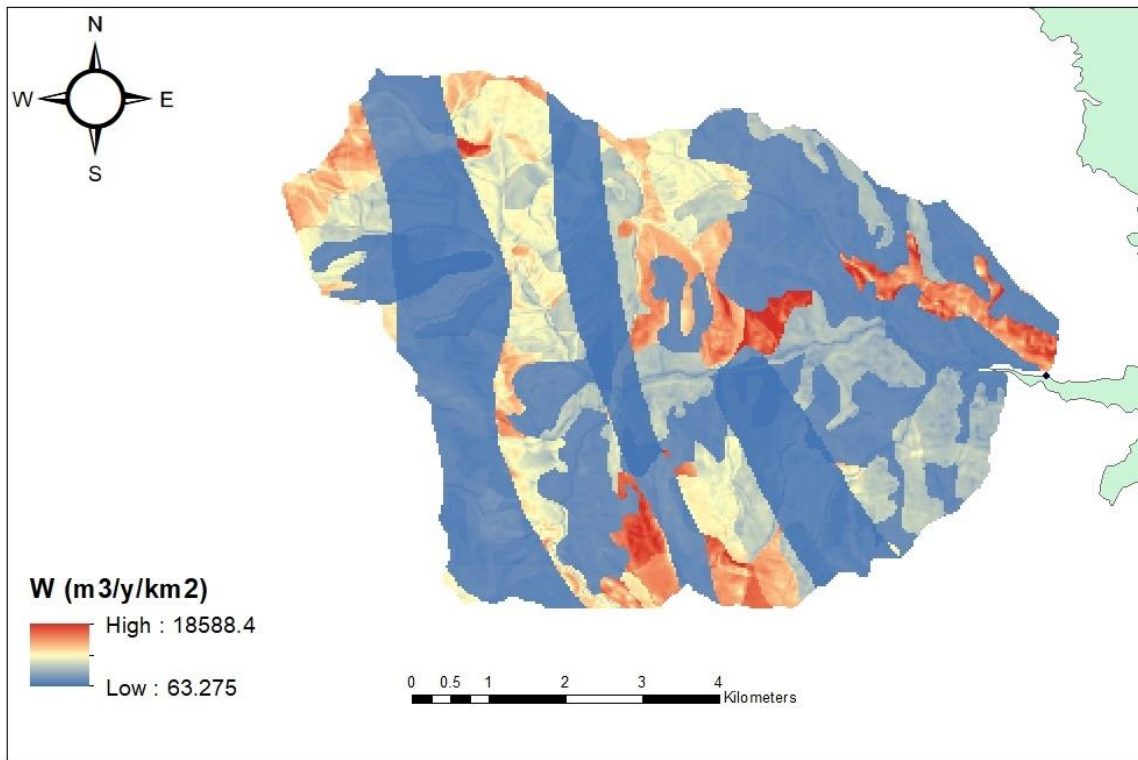


Figure 5: Assessment of total annual erosion loss of the Karitsiotis river basin

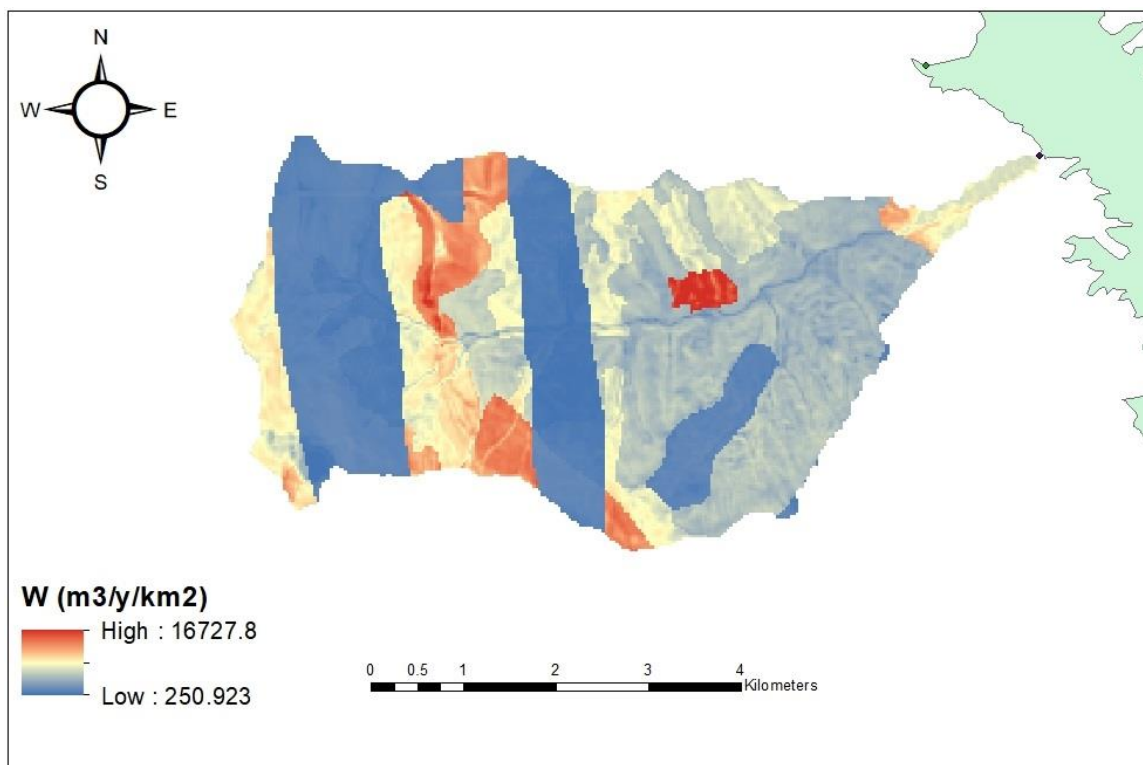


Figure 6: Assessment of total annual erosion loss of the Megalo Potami river basin

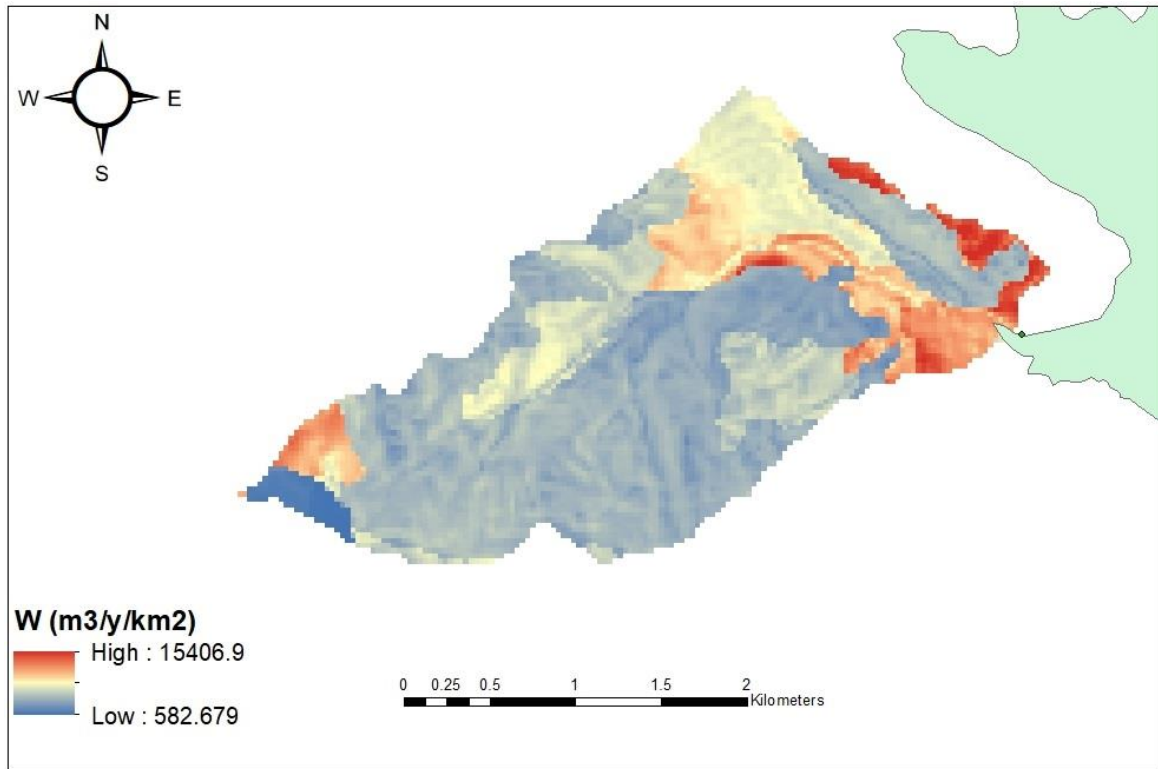


Figure 7: Assessment of total annual erosion loss of the Kryoneri basin

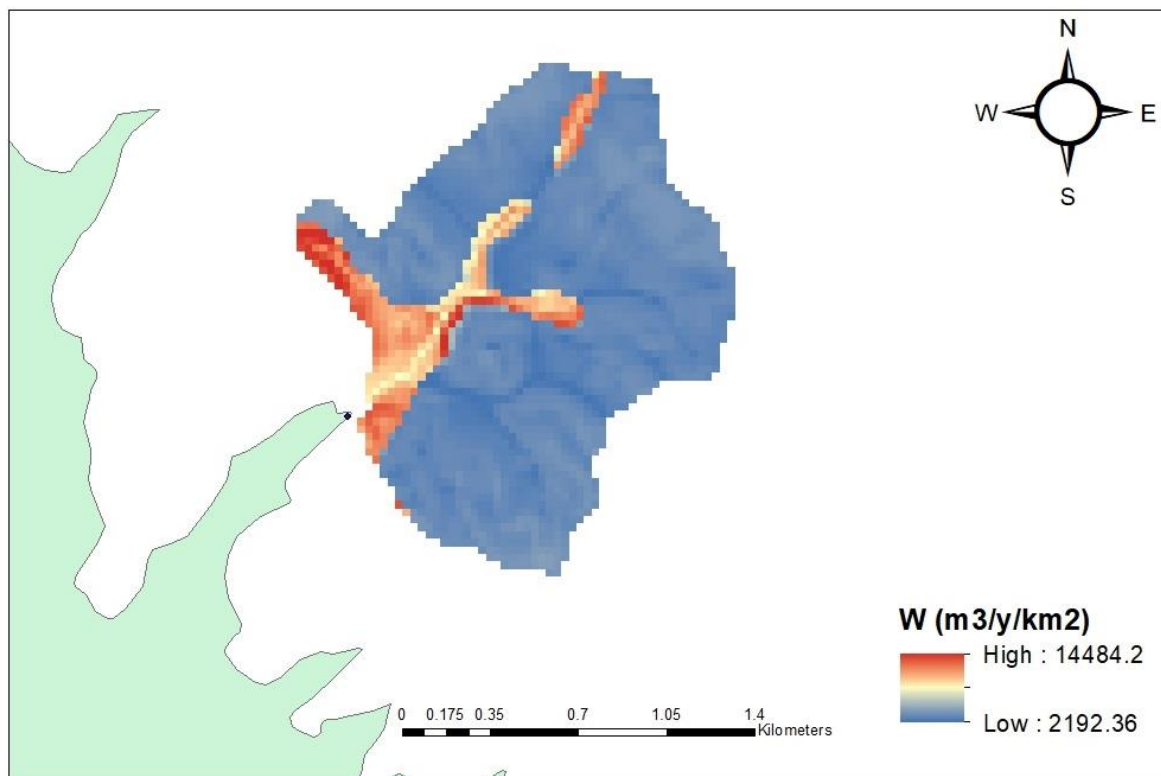


Figure 8: Assessment of total annual erosion loss of the Morfovouni basin

The average annual sediment production for the Karitsiotis river basin has a minimum value of 63.3 m³/y/km², a maximum of 18588.4 m³/y/km², an average of 4099.8 m³/y/km² and a

standard deviation of 3899.9 m³/y/km². However, because the value differs in space, the median of the parameter corresponding to 7311 m³/y/km² is taken into account. Then, applying the empirical equation Gavrilović, Zemljič, SCS and Vanoni, the mean annual sediment yield is calculated.

The average annual sediment production for the Megalo Potami river basin has a minimum value of 250.92 m³/y/km², a maximum of 16727.8 m³/y/km², an average of 4506.8 m³/y/km² and a standard deviation of 3215.2 m³/y/km². However, because the value differs in space, the median of the parameter corresponding to 5965.5 m³/y/km² is taken into account. Then, applying the empirical equation Gavrilović, Zemljič, SCS and Vanoni, the mean annual sediment yield is calculated.

The average annual sediment production for the Kryoneri basin has a minimum value of 582.7 m³/y/km², a maximum of 15406.9 m³/y/km², an average of 5475.9 m³/y/km² and a standard deviation of 2499.1 m³/y/km². However, because the value differs in space, the median of the parameter corresponding to 5228 m³/y/km² is taken into account. Then, applying the empirical equation Gavrilović, Zemljič, SCS and Vanoni, the mean annual sediment yield is calculated.

The average annual sediment production for the Morfovouni basin has a minimum value of 2192.4 m³/y/km², a maximum of 14482.2 m³/y/km², an average of 4363.3 m³/y/km² and a standard deviation of 2610.6 m³/y/km². However, because the value differs in space, the median of the parameter corresponding to 3491.5 m³/y/km² is taken into account. Then, applying the empirical equation Gavrilović, Zemljič, SCS and Vanoni, the mean annual sediment yield is calculated.

The final results are presented in Table 2 and 3:

Table 2: Total results of sediment yield coefficients

Basin	Area of basin (km²)	Sediment yield coefficient DR, Gavrilović	Sediment yield coefficient DR, Zemljič	Sediment yield coefficient SDR, SCS	Sediment yield coefficient SDR, Vanoni
Karitsiotis	48.91	0.867	0.193	0.369	0.291
Megalo Potami	24.72	0.675	0.227	0.397	0.316
Kryoneri	6.56	0.469	0.338	0.460	0.373
Morfovouni	2.26	0.231	0.217	0.517	0.427

Table 3: Total results of soil loss and sediment yield

Basin	Average annual erosion (tn/y)	Average annual sediment yield, Gavrilović (tn/y)	Average annual sediment yield, Zemljič (tn/y)	Average annual sediment yield, SCS (tn/y)	Average annual sediment yield, Vanoni (tn/y)
Karitsiotis	947674.5	821682.5	182963.7	349441.3	275325.1
Megalo Potami	390804.1	263629.4	88746.9	155337.0	123649.4
Kryoneri	90958.6	42658.5	30725.4	41831.0	33966.6
Morfovouni	20921.5	4832.0	4540.7	10818.5	8926.2

- Hydrological analysis

The flow hydrograph of each basin for a three – day flood event were created using the HEC-HMS software, based on the design hyetograph generated through the alternate block method. The peak discharge and the time of the peak for every basin, are shown in Table 4:

Table 4: Total results of peak discharge and peak discharge time

Basin	Drainage area (km²)	Peak discharge (m³/s)	Peak discharge time (h)
Karitsiotis	48.91	75.6	7
Megalo Potami	24.72	46.6	4
Kryoneri	6.56	11.2	4
Morfovouni	2.26	2.3	5.5

Conclusions – Future Research

From the implementation of the Gavrilović method on the catchment areas of river Karitsiotis, river Megalo Potami, Kryoneri and Morfovouni, it appears that the erosion is mostly affected by the parameters of geology, land use, but also rainfall and not at all by the land surface slope and temperature. From the results, it appears that the Karitsiotis river basin has the highest average sediment yield value, followed by the Megalo Potami river basin which, by a small difference, is followed by the Kryoneri basin. The basin of Morfovouni has the lowest average erosion value, mostly because it has the lowest rainfall height and the smaller catchment area. The Karitsiotis river basin appears to have the highest average sediment yield due to the fact that a large area in it is covered by the geological formation of flysch which has a low resistance to erosion, but also because it is covered by a large area with transitive extent of bushes and

forests, which can't suspend effectively the soil erosion procedure. In addition, from the flow hydrographs which were created through the hydrological analysis and using the HEC-HMS software, it appears that Karitsiotis river basin has the highest peak discharge with a value of $75.6 \text{ m}^3/\text{s}$ and a peak time of 7 hours. The application of the ArcGIS environment has a positive outcome because of the inclusion of the territorial variance of the parameters.

Regarding the sediment yield coefficients, it is evident that the Gavrilović coefficient gives a much higher value of sediment yield, because it takes into account only the morphological characteristics of the catchment area (perimeter, mean altitude of the basin, main length), followed by SCS, Vanoni and lastly Zemljič coefficients (for all four basins), due to the fact that they depend solely on basin's size.

It is suggested that the method is applied to other areas of Greece, also, where rainfall and temperature vary. Also, the method should be applied to basins that differ only in one parameter (e.g., rainfall, temperature) in order to assess its effect on the erosion process. A different method of creating the design hyetograph and a different software for the simulation of the flooding event can be used. Finally, it is proposed to verify the sediment yield estimates derived from the Gavrilović, SCS and Vanoni calculations by performing sediment discharge measurements in drainage areas or even using ground penetrating radar (GPR).

Key – words: Lake Plastiras, erosion, sediment yield, hydrological analysis, GIS

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται συνολικά το φαινόμενο της στερεομεταφοράς στις τέσσερις μεγαλύτερες λεκάνες απορροής της ευρύτερης περιοχής της λίμνης Πλαστήρα. Για την εκτίμηση του συνολικού ετήσιου ρυθμού διάβρωσης του εδάφους εφαρμόζεται η μέθοδος Gavrilonić (Gavrilonić, S., 1972, 1976, 1988). Μέσω του συντελεστή στερεοαπορροής, η σχέση υπολογισμού του οποίου εντοπίζεται στη διεθνή βιβλιογραφία, γίνεται η εκτίμηση της στερεομεταφοράς στην έξοδο κάθε λεκάνης απορροής. Ανάντη της εξόδου κάθε λεκάνης πραγματοποιείται επίσης υδρολογική ανάλυση και υπολογίζεται τελικά η παροχή αιχμής στην έξοδο. Αρχικά παράγεται το υετογράφημα σχεδιασμού με περίοδο επαναφοράς 100 ετών με την χρήση επιφανειακά ολοκληρωμένων όμβριων καμπυλών της περιοχής και τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ. Με τη χρήση του λογισμικού HEC-HMS, σε συνδυασμό με το μοντέλο του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος, το υετογράφημα αυτό μεταφράζεται σε πλημμυρογράφημα στην έξοδο κάθε λεκάνης. Από την εφαρμογή των παραπάνω εξάγονται μια σειρά από συμπεράσματα, τόσο γενικής φύσης ως προς τις παραμέτρους που επηρεάζουν την τιμή της συνολικής στερεομεταφοράς σε μια λεκάνη και την ακρίβεια των μεθόδων και των συντελεστών που χρησιμοποιούνται, όσο και ειδικότερα, για τα μεγέθη της ετήσιας στερεοαπορροής και της παροχής αιχμής στην έξοδο κάθε μίας από τις εξεταζόμενες λεκάνες της περιοχής μελέτης. Εκτός των παραπάνω, η παρούσα εργασία συμβάλλει επίσης στην διατύπωση προτάσεων για μελλοντική έρευνα.

Λέξεις – κλειδιά: Λίμνη Πλαστήρα, διάβρωση, στερεοαπορροή, κάρναβος χωρικής κατανομής, Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π)

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η εδαφική διάβρωση αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά περιβαλλοντικά ζητήματα, καθώς προκαλεί αλυσιδωτά προβλήματα τόσο σε οικοσυστήματα όσο και σε κοινωνίες ανθρώπων. Ο αυξημένος κίνδυνος των πλημμυρών καθώς και μια σειρά προβλημάτων σε κατασκευές που σχετίζονται με τα υδάτινα συστήματα (λόγω προσχώσεων ποταμών ή ταμιευτήρων, αποθέσεων φερτών υλικών, υποσκαφών σε θεμέλια), αποτελούν τους λόγους για τους οποίους η διάβρωση μπορεί να θεωρηθεί μια από τις κυριότερες απειλές για την ποιότητα και την παραγωγικότητα των εδαφών (Φελώνη, 2016, Pandey, 2016). Η διάβρωση μπορεί να είναι μέρος μιας φυσικής διαδικασίας η οποία οδηγεί στην ομαλοποίηση του αναγλύφου, όμως αυτό που προβληματίζει είναι το γεγονός ότι το σκέλος της διάβρωσης έχει επιταχυνθεί από ανθρωπογενείς επιδράσεις, οι οποίες κατά συνέπεια έχουν οδηγήσει σε περιβαλλοντική ανισορροπία.

Η εδαφική διάβρωση ξεκινάει όταν η προσθήκη του νερού στο έδαφος ξεπεράσει τη διηθητικότητα του. Τότε παραμένει νερό στην επιφάνεια το οποίο κυλάει χαμηλότερα στο ανάγλυφο, εφόσον υπάρχει εδαφική κλίση, και αποθηκεύεται σε μικρές κοιλάτες που σχηματίζονται. Κατά την κύλιση παρασύρονται εδαφικά τεμαχίδια τα οποία όσο η ταχύτητα του νερού είναι υψηλή παραμένουν σε αιώρηση και στη συνέχεια αποτίθενται ανάλογα με το μέγεθός τους (Πασχαλίδης, 2015). Εκτός από την κίνηση του νερού, η διάβρωση οφείλεται επίσης στον άνεμο ή στη χημική και φυσική αποσάθρωση. Η υδατική διάβρωση ευθύνεται παρόλα αυτά για την απομάκρυνση του μεγαλύτερου όγκου εδάφους σε παγκόσμια κλίμακα. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση είναι το κλίμα, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά, η φυτοκάλυψη, καθώς και ανθρωπογενείς δραστηριότητες όπως τα συστήματα καλλιέργειας εδαφών, η υπερ-βόσκηση, η αποδάσωση (Pandey, 2016, Ευθυμίου, 2016).

Με την ανάπτυξη των υπολογιστών και των κατανεμημένων βάσεων δεδομένων, όπως ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DEM), των συστημάτων τηλεπισκόπησης αλλά και των ραντάρ βροχόπτωσης, έχει αναπτυχθεί μεγάλο μέρος των προσομοιωμάτων διάβρωσης ώστε να χρησιμοποιηθούν για την αντιμετώπιση των σοβαρών συνεπειών της ή τον εντοπισμό περιοχών που χρήζουν μέτρων αντιδιαβρωτικής προστασίας.

1.2 Αντικείμενο εργασίας

Αντικείμενο και στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση ενός μεθοδολογικού πλαισίου με το οποίο μπορεί να προσεγγιστεί το πρόβλημα της εδαφικής διάβρωσης. Κατά το μεθοδολογικό αυτό πλαίσιο χρησιμοποιούνται επιλεγμένες μέθοδοι, εργαλεία και μοντέλα για την ανάλυση της υδρολογικής απόκρισης των λεκανών απορροής, ενώ εφαρμόζεται η μέθοδος Gavrilonić για την εκτίμηση του συνολικού ετήσιου ιζήματος στις λεκάνες και τέσσερις εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού του συντελεστή στερεοαπορροής (SCS (1971), Zemljić (1971), Vanoni (1975a,b) και Gavrilonić (1988) για τον υπολογισμό της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής.

Η μέθοδος Gavrilonić εξετάζει πέντε παράγοντες της λεκάνης απορροής που επιδρούν στη διαδικασία της εδαφικής διάβρωσης, και βρίσκονται σε άμεση συνάρτηση με τη γεωλογία της λεκάνης και τα εδάφη, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά, τη μέση ετήσια βροχόπτωση και θερμοκρασία και τις χρήσεις γης (Φελώνη, 2019).

Η επεξεργασία όλων των παραμέτρων συντελέστηκε σε περιβάλλον Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π). Για την εκτίμηση των γεωλογικών δεικτών έγινε χρήση γεωλογικών χαρτών οι οποίοι πάρθηκαν από το ΙΓΜΕ. Όσον αφορά στην εκτίμηση των δεικτών χρήσεων γης, χρησιμοποιήθηκαν οι χάρτες χρήσεων γης του προγράμματος Copernicus CORINE Land Cover, ενώ στην εκτίμηση των δεικτών της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας αντλήθηκαν δεδομένα από την Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας, από την ιστοσελίδα του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προγνώσεων (ECMWF).

Η μεθοδολογία που αναλύεται στα κεφάλαια που ακολουθούν μπορεί να συνοψιστεί από τα παρακάτω σημεία:

- i. Γεωμορφολογική ανάλυση και ορισμός των λεκανών απορροής μέσω του λογισμικού ArcGIS και της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS.
- ii. Εξαγωγή των Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων κάθε μίας από τις τέσσερις μεγαλύτερες λεκάνες μέσω του μοντέλου βροχής-απορροής των Ισόχρονων Καμπυλών.

- iii. Εφαρμογή της μεθόδου των Εναλλασσόμενων Μπλοκ με χρήση όμβριων καμπυλών για την εκτίμηση της κατανομής της βροχής στο χρόνο και την εξαγωγή των βροχογραφημάτων.
- iv. Εκτίμηση των απωλειών βροχής μέσω της μεθόδου SCS Curve Number.
- v. Χρήση του προγράμματος HEC-HMS, εισάγοντας τα παραπάνω μοναδιαία υδρογραφήματα, βροχογραφήματα και απώλειες βροχής, για την εκτίμηση της παροχής αιχμής σε κάθε λεκάνη απορροής.
- vi. Εκτίμηση της εδαφικής απώλειας και της στερεοαπορροής εντός των τεσσάρων μεγαλύτερων λεκανών απορροής με τη χρήση της μεθόδου Gavrilonić και των συντελεστών στερεοαπορροής, καθώς και χωρική επεξεργασία των παραμέτρων που συμβάλλουν σε αυτές και δημιουργία ψηφιακών χαρτών με χρήση του ArcGIS.

1.3 Διάρθρωση εργασίας

Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται γενικά στοιχεία και βασικές έννοιες για το φαινόμενο της διάβρωσης, τα μοντέλα προσομοίωσης του φαινομένου αυτού και η μέθοδος Gavrilonić που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία.

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται όροι, έννοιες, μοντέλα και μέθοδοι της Τεχνικής Υδρολογίας που συναντώνται και χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται η περιοχή μελέτης και ειδικότερα οι λεκάνες απορροής που έχουν σημείο εξόδου τη λίμνη Πλαστήρα. Περιγράφονται τα τοπογραφικά, γεωλογικά, κλιματολογικά χαρακτηριστικά, οι χρήσεις γης, το υδρογραφικό δίκτυο, και γίνεται ανάλυση των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται η γεωμορφολογική ανάλυση των λεκανών απορροής σε περιβάλλον Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.) με χρήση της εργαλειοθήκης του HEC-GeoHMS, η υδρολογική ανάλυση με χρήση του μοντέλου των ισόχρονων καμπυλών, της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ, των όμβριων καμπυλών, του δείκτη SCS Curve Number και του λογισμικού HEC-HMS, καθώς και η εφαρμογή της μεθόδου Gavrilonić. Επίσης παρουσιάζεται η επεξεργασία των παραμέτρων της γεωλογίας, των χρήσεων γης, της

βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας, καθώς και οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της στερεοαπορροής.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υδρολογικής ανάλυσης και τα αποτελέσματα από την εκτίμηση της μέσης ετήσιας παραγωγής ιζημάτων με τη μέθοδο Gavrilonić και της στερεοαπορροής χρησιμοποιώντας τους συντελεστές συγκράτησης Gavrilonić, Zemljič, SCS και Vanoni και συγκρίνονται μεταξύ τους.

Στο κεφάλαιο 6 αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την υδρολογική ανάλυση και την εφαρμογή της μεθόδου Gavrilonić, στις λεκάνες απορροής της παρούσας εργασίας και της χρήσης των συντελεστών συγκράτησης κατά Gavrilonić, Zemljič, SCS και Vanoni στον υπολογισμό της στερεοαπορροής τους. Τέλος, παρουσιάζονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΕΝΝΟΙΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΩΝ

2.1 Διάβρωση και στερεομεταφορά

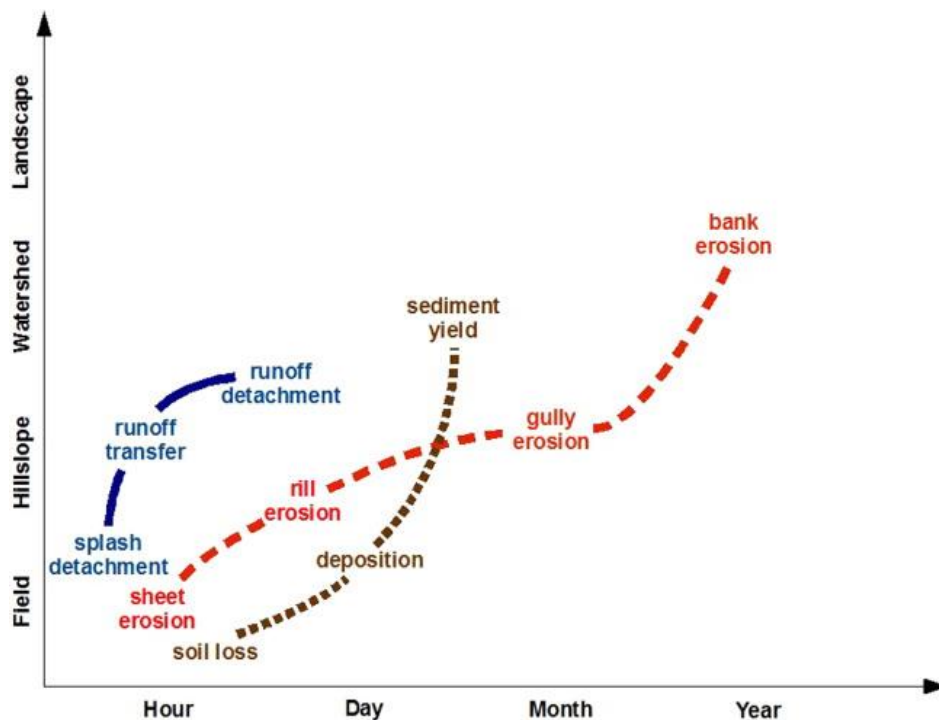
Η διάκριση των φερτών υλικών μπορεί να γίνει ως προς δύο παράγοντες. Ο πρώτος αφορά τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η μεταφορά των φερτών και ο δεύτερος αφορά την προέλευση των φερτών. Ως προς τον πρώτο, υπάρχει η κύρια διάκριση μεταξύ του φορτίου σε αιώρηση (suspended load), όπου τα υλικά μεταφέρονται με την τύρβη χωρίς καμία επαφή με την κοίτη για μεγάλο χρονικό διάστημα, και του φορτίου σε σύρση (bed load), όπου η μεταφορά γίνεται σε επαφή με την κοίτη. Ως προς τον παράγοντα της προέλευσης των φερτών, τα υλικά διακρίνονται σε φορτίο κοίτης (bed material load) και σε φορτίο απόπλυσης (wash load) (Ζαρρής κ.α, 2001). Οι τελικές αποθέσεις των φερτών υλικών πραγματοποιούνται είτε σε φυσικούς αποδέκτες, όπως δέλτα ποταμών, θάλασσες ή λίμνες, είτε σε τεχνητούς αποδέκτες όπως είναι οι ταμιευτήρες (Βαχαβιάλος, 2014). Παρακάτω περιγράφονται οι όροι με τους οποίους γίνεται η ποσοτική περιγραφή του φαινομένου της διάβρωσης (Παναγούλια, 2017, Ζαρρής κ.α, 2001):

- Εδαφική απώλεια (soil loss) είναι η ποσότητα εδαφικού υλικού που τελικά απομακρύνεται από μια έκταση εδάφους σε δεδομένο χρόνο. Χαρακτηρίζει τη διαφορά της ποσότητας που διαβρώθηκε μείον την ποσότητα που αποτέθηκε ξανά στην ίδια εδαφική έκταση. Οι μονάδες στις οποίες εκφράζεται είναι μάζα/επιφάνεια.
- Στερεοαπορροή ή ποσότητα φερτών (sediment yield) είναι η ποσότητα των φερτών υλικών που διέρχονται από μια διατομή αναφοράς (πχ διατομή ποταμού) σε μια ορισμένη χρονική διάρκεια. Οι μονάδες στις οποίες εκφράζεται είναι η μάζα, ενώ συχνά ανάγεται στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής ανάντη της διατομής αναφοράς (μάζα/επιφάνεια).
- Στερεοπαροχή (sediment discharge) είναι ο ρυθμός μεταφοράς των φερτών υλικών που διέρχονται από μια διατομή αναφοράς (μάζα/χρόνος).
- Συντελεστής στερεοαπορροής (sediment delivery ratio) είναι ο λόγος της στερεοαπορροής προς την ποσότητα που έχει διαβρωθεί στην ανάντη της διατομής αναφοράς λεκάνη απορροής. Χαρακτηρίζει την απομείωση των φερτών υλικών που μετακινούνται, λόγω ενδιάμεσων αποθέσεων στη λεκάνη απορροής. Εκφράζεται σε αδιάστατο αριθμό ή ποσοστό.

Οι πιο βασικές και συνήθεις διεργασίες υδατικής διάβρωσης του εδάφους είναι οι εξής (Fournier, 1960, Στεφανίδης 2007):

- Η διάβρωση διασποράς (splash erosion) παρατηρείται όταν η πρόσκρουση των σταγόνων της βροχής οδηγεί στην απόσπαση και απομάκρυνση με εκτόξευση εδαφικών τεμαχιδίων.
- Η επιφανειακή/φυλλοειδής διάβρωση ή διάβρωση κατά στρώσεις (sheet erosion) δημιουργείται όταν η συνδυασμένη δράση της βροχής και της επιφανειακής απορροής οδηγεί στην απομάκρυνση ενός ομοιόμορφου, λεπτού επιφανειακού στρώματος εδάφους. Είναι μια αργόσυρτη διαδικασία κατά την οποία μειώνεται σταδιακά η διηθητικότητα του εδάφους σε ευρείες επιφάνειες.
- Η αυλακωτή/αυλακοειδής διάβρωση (rill erosion) συμβαίνει σε περιπτώσεις που ξεπερνιούνται οι τιμές ορισμένων καθοριστικών παραμέτρων και δημιουργείται η τάση συσσώρευσης ροής του νερού, που απέρρευε αρχικά κατά στρώσεις, σε κάποια τοπική ταπείνωση του εδάφους με αποτέλεσμα την αύξηση της σφοδρότητας της διάβρωσης. Υπό αυτές τις συνθήκες (αυξημένη υδαταπορροή, μια κρίσιμη επιφάνεια λεκάνης απορροής και μεγάλη κλίση εδάφους), πλέον λαμβάνει χώρα η αυλακωτή/αυλακοειδής διάβρωση, διεργασία που συναντάται κυρίως σε επικλινή εδάφη, όπου σχηματίζονται πολυάριθμα αυλάκια βάθους 30-50 cm.
- Η χαραδρωτική/χαραδρωτή/χαραδρώδη διάβρωση ή διάβρωση χαντακιών (gully erosion) παρουσιάζεται ως μετεξέλιξη της αυλακωτής διάβρωσης και, εν γένει, οφείλεται στη συγκεντρωμένη ροή του νερού σε στενά κανάλια ή σε σαφώς σχηματισμένες κοίτες. Στη συγκεκριμένη μορφή διάβρωσης το νερό συσσωρεύεται σε χαράδρες απομακρύνοντας εδαφικό υλικό με γρήγορο ρυθμό και σε σημαντικό πλάτος και βάθος. Γενικότερα η χαραδρωτική διάβρωση αναφέρεται στη διάβρωση που προκαλείται από την ύπαρξη διαμορφωμένου υδρογραφικού δικτύου, το οποίο δημιουργεί βαθιές χαράδρες (>30 m) και έχει συμβάλει σε μεγάλο βαθμό στη συνολική εδαφολογική απώλεια (Poesen et al., 2002). Η φαραγγωτή διάβρωση αποτελεί μια πολύ έντονη μορφή χαραδρωτικής διάβρωσης.
- Η πρηνική ή υποσκαπτική διάβρωση προέρχεται από τη χαραδρωτική διάβρωση, η οποία περιλαμβάνει μέρος της άμεσης αφαίρεσης φερτών υλικών από τα πρηνή χειμάρρων και από τις κοίτες. Με την υψηλή ταχύτητα ροής του νερού, μέσω του υδρογραφικού δικτύου μπορεί ένα μεγάλο ποσοστό φερτών να προέλθει και από τον ίδιο τον χείμαρρο.

Οι κλίμακες του χώρου και του χρόνου επιδρούν σημαντικά στην εξέλιξη της εδαφικής διάβρωσης, τόσο στις μορφές που αυτή λαμβάνει αλλά και στις παραμέτρους οι οποίες την καθορίζουν. Στο παρακάτω Σχήμα 2.1 συμπυκνώνονται τα σκέλη των διεργασιών της διάβρωσης (μπλε γραμμή), οι μορφές τις οποίες αυτή λαμβάνει (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) και οι χαρακτηριστικές καταστάσεις εξέλιξης του φαινομένου (καφέ διακεκομμένη γραμμή) όπως εκτυλίσσονται ενδεικτικά σε χρονική και χωρική κλίμακα.



Σχήμα 2.1: Διεργασίες της διάβρωσης (μπλε γραμμή), μορφές που λαμβάνει (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή), χαρακτηριστικές καταστάσεις εξέλιξης (καφέ διακεκομμένη γραμμή) σε χώρο-χρονική κλίμακα (Karydas et al., 2012).

Η φυτοκάλυψη αναστέλλει έντονα το ρυθμό διάβρωσης με την αύξηση της διηθητικής ικανότητας του εδάφους που ελαττώνει την απορροή, με την ελάττωση της ταχύτητας ροής του νερού η οποία μειώνει τη διαβρωτική ικανότητά του και με μείωση της πιθανότητας επαφής της βροχής με τους κόκκους του εδάφους. Τα χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως η κοκκομετρική κατανομή, η συνεκτικότητα και η δομή επιδρούν στο ρυθμό απόσπασης των κόκκων (δομή-συνεκτικότητα), στη διαβρωτική και μεταφορική ικανότητα της ροής (μέγεθος κόκκων), στην υδραυλική της ροής (τραχύτητα-μέγεθος κόκκων) και στην ποσότητα της απορροής (διαπερατότητα). Τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά επηρεάζουν το ρυθμό της

διάβρωσης, αφού η γωνία κλίσης επηρεάζει τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της ροής, κατά συνέπεια και τη μεταφορική και διαβρωτική ικανότητα των κόκκων του εδάφους (Παναγούλια, 2017).

Έχει δειχθεί σε εργαστηριακές αναλύσεις και μετρήσεις ότι υπάρχει επίδραση της θερμοκρασίας στην στερεοαπορροή. Σε ποικίλες εμπειρικές σχέσεις στερεοαπορροής που έχουν αναπτυχθεί, η μέση θερμοκρασία της λεκάνης απορροής έχει ληφθεί ως ανεξάρτητη μεταβλητή (Παναγούλια, 2017).

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα προσομοιώματα διάβρωσης ώστε να γίνει εκτίμηση και πρόβλεψη της εδαφικής απώλειας, τα οποία διακρίνονται (Ευθυμίου, 2016):

- Ως προς τη χωρική κλίμακα προσομοίωσης σε:
 - i. Ενιαία ή Συγκεντρωτικά ή Αδιαμέριστα (lumped): Η υδρολογική λεκάνη στο σύνολό της αποτελεί μία ενιαία χωρική ενότητα. Οι παράμετροι λαμβάνουν ενιαίες τιμές στο σύνολο της έκτασης της λεκάνης,
 - ii. Ημί-κατανεμημένα (semi-distributed): Γίνεται διαχωρισμός της λεκάνης σε μεγάλα τμήματα (υπολεκάνες).
 - iii. Κατανεμημένα (distributed): Γίνεται διαχωρισμός της υδρολογικής λεκάνης σε μικρότερα τμήματα (κελιά).
- Ως προς τη χρονική κλίμακα προσομοίωσης σε:
 - i. Μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος (event-based): Λειτουργούν και παράγουν αποτελέσματα σε επίπεδο επεισοδίου βροχής.
 - ii. Συνεχή (continuous): Λειτουργούν και παράγουν αποτελέσματα σε συνεχή χρόνο (πχ πολλά έτη).
- Ως προς την στοχαστική δομή των μεταβλητών σε:
 - i. Προσδιοριστικά (deterministic): Καμία μεταβλητή δεν έχει στοχαστική δομή.
 - ii. Στοχαστικά (stochastic): Μία τουλάχιστον μεταβλητή έχει στοχαστική δομή (εξισώσεις πιθανότητας).

- Ως προς την προσέγγιση των φυσικών διεργασιών σε:
 - i. Φυσικής βάσης (physically-based): Χρησιμοποιούν απευθείας τις εξισώσεις που διέπουν το φυσικό φαινόμενο.
 - ii. Εννοιολογικά (conceptual): Λειτουργούν με βάση απλουστευμένες παραδοχές του φυσικού συστήματος.
 - iii. Εμπειρικά (empirical): Χρησιμοποιούν απλές εξισώσεις, οι οποίες δεν αναπαριστούν τις ενδιάμεσες φυσικές διεργασίες.

Ένα παραμετρικό καταναμημένο μοντέλο για την εκτίμηση της μέσης ετήσιας διάβρωσης και στερεοαπορροής αποτελεί η μέθοδος Gavrilović (Erosion Potential Method, EPM) (Gavrilović, S., 1972, 1976, 1988). Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί εμπειρικούς συντελεστές όπως ο συντελεστής αντίστασης εδάφους, ο συντελεστής διαβρωσιμότητας και ο συντελεστής διάβρωσης, και έναν πίνακα με τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (ετήσια βροχόπτωση, θερμοκρασία, μέση κλίση, περίμετρος και εμβαδόν επιφάνειας) (Fanetti, 2007, Globevnik, 2003). Το μοντέλο εξελίχθηκε σημαντικά μέσω της χρήσης χωρικά καταναμημένων δεδομένων (γεωλογία, χρήσεις γης, χαρακτηριστικά εδάφους) σε περιβάλλον Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π) (Fanetti, 2007), όπως εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία.

Σημειώνεται ότι βασικό μειονέκτημα των εμπειρικών μοντέλων είναι η θεώρηση μονιμότητας των επιμέρους συντελεστών σε κάθε χρονική κλίμακα, κάτι που δεν ισχύει και συνεπώς είναι δόκιμο σε περίπτωση διαφοροποιήσεων στο σύστημα να γίνεται εκ νέου συλλογή δεδομένων και προσδιορισμός των συντελεστών των μοντέλων αυτών (Ιμπάμπι, 2022).

2.2 Όμβριες καμπύλες

Αποτέλεσμα της ανάλυσης των μέγιστων ετήσιων τιμών ύψους βροχής h (mm) και έντασης i (mm/hour) σε έναν σταθμό μέτρησης βροχής για μια ορισμένη διάρκεια t βροχής μέσα σε n χρόνια μετρήσεων, είναι ο υπολογισμός των σχέσεων (i,t,T) έντασης (ή ύψους) βροχής-διάρκειας-περιόδου επαναφοράς. Οι σχέσεις αυτές ονομάζονται όμβριες καμπύλες και είναι απαραίτητες για τον υδρολογικό σχεδιασμό μεγάλου αριθμού υδραυλικών έργων (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012).

Οι συνήθεις μορφές των αναλυτικών σχέσεων μιας όμβριας καμπύλης μεταξύ ύψους h ή έντασης i και διάρκειας t για συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς T είναι οι εξής (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012):

1. Απλές εκθετικές:

$$h = kt^m \text{ ή } i = kt^{m-1} \quad (2.1)$$

όπου k και m σταθερές. Πρόκειται για τις πιο απλές σχέσεις, οι οποίες γραμμικοποιούνται εύκολα με λογαρίθμηση και μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων προσδιορίζονται χωρίς δυσκολία οι τιμές των k και m .

2. Υπερβολικές της μορφής:

$$h = \frac{kt}{(t+b)} \text{ ή } i = \frac{k}{(t+b)} \quad (2.2)$$

όπου b είναι μια επιπλέον σταθερά.

3. Μικτές της μορφής:

$$h = \frac{kt}{(t+b)^m} \text{ ή } i = \frac{k}{(t+b)^m} \quad (2.3)$$

Πρόκειται για τις σχέσεις με την μεγαλύτερη ευελιξία. Η παράμετρος b διορθώνει τη χρονική κλίμακα δίνοντας τη δυνατότητα βελτιστοποίησης της σκέδασης των σημείων γύρω από την όμβρια καμπύλη. Η απόκτηση των όμβριων καμπύλων στη γενική τους μορφή που φαίνεται παρακάτω, γίνεται μέσω της απόκτησης των σχέσεων (h ή i, t) και για άλλες περιόδους επαναφοράς T :

$$i = \frac{kT^\alpha}{(t+b)^m} \quad (2.4)$$

όπου α μια επιπλέον παράμετρος.

Στο πλαίσιο εφαρμογής της Οδηγίας 2007/60/EK η Ειδική Γραμματεία Υδάτων (ΕΓΥ) έκανε ανάθεση την εκπόνηση μελετών για την κατάρτιση Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας στα 14 Υδατικά Διαμερίσματα της Ελλάδας. Έτσι, καταρτίστηκαν εξισώσεις όμβριων καμπύλων στις θέσεις των σταθμών μέτρησης βροχής σε κάθε Υδατικό Διαμέρισμα. Από τις όμβριες καμπύλες που καταρτίστηκαν, χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας

διπλωματικής εργασίας εκείνες που αφορούν τους σταθμούς Μπεζούλα και Καρίτσα, οι οποίοι βρίσκονται εντός των ορίων του νομού Καρδίτσας και πλησίον της λίμνης Πλαστήρα.

2.3 Επιφανειακή ολοκλήρωση σημειακών βροχοπτώσεων

Οι μετρήσεις που λαμβάνονται από τους βροχομετρικούς σταθμούς είναι σημειακές και ως εκ τούτου αντιπροσωπεύουν μόνο το σημείο στο οποίο έγινε η μέτρηση. Όμως, στις περισσότερες περιπτώσεις ιδιαίτερη σημασία έχει η επιφανειακή βροχόπτωση, δηλαδή η βροχόπτωση η οποία αντιπροσωπεύει ολόκληρη τη λεκάνη απορροής που μελετάται. Για αυτόν το λόγο οι σημειακές μετρήσεις ανάγονται σε επιφανειακή βροχόπτωση της λεκάνης χρησιμοποιώντας μεθόδους επιφανειακής ολοκλήρωσης, εφόσον έχει εγκατασταθεί στην εξεταζόμενη περιοχή επαρκές δίκτυο βροχογράφων (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012).

Οι μέθοδοι επιφανειακής ολοκλήρωσης μπορούν να χωριστούν στις μεθόδους άμεσης ολοκλήρωσης και στις μεθόδους προσαρμογής επιφάνειας (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1997). Η μέθοδοι αυτές υπολογίζουν την επιφανειακή βροχόπτωση απευθείας, από τις τιμές της σημειακής βροχόπτωσης. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος άμεσης ολοκλήρωσης είναι η μέθοδος Thiessen. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, η συνολική επιφάνεια A της λεκάνης απορροής χωρίζεται γεωμετρικά σε ζώνες επιρροής A_i , μια για κάθε σταθμό, έτσι ώστε:

$$\sum_{i=1}^k A_i = A \quad (2.5)$$

Ο συντελεστής βάρους θεωρείται ανάλογος του εμβαδού της ζώνης επιρροής του σταθμού, δηλαδή:

$$w_i = \frac{A_i}{A} \quad (2.6)$$

Τελικά, η επιφανειακή βροχόπτωση είναι:

$$h_s = \sum_{i=1}^k w_i * h_i \quad (2.7)$$

Όπου h_s το επιφανειακό ύψος βροχής (mm), h_i το σημειακό ύψος του i σταθμού (mm) και w_i ο συντελεστής βάρους του σταθμού i στη λεκάνη. Οι ζώνες επιρροής προσδιορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε σημείο της ζώνης του σταθμού i να απέχει από τη θέση του σταθμού i λιγότερο απ' όσο απέχει από οποιονδήποτε άλλον σταθμό της περιοχής. Η αρχή αυτή οδηγεί σε μια απλή γεωμετρική κατασκευή των ζωνών επιρροής βασισμένη στις μεσοκαθέτους των

ευθύγραμμων τμημάτων που συνδέουν τους σταθμούς ανά ζεύγη. Τα πολύγωνα που δημιουργούνται από τη διαδικασία αυτή ονομάζονται πολύγωνα Thiessen (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012).

Οι μέθοδοι προσαρμογής επιφάνειας εκτιμούν αρχικά τη γεωγραφική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης στην εξεταζόμενη περιοχή, και με βάση αυτή υπολογίζουν την επιφανειακή βροχόπτωση. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος προσαρμογής επιφάνειας είναι η μέθοδος των ισοϋέτιων. Οι ισοϋέτιες καμπύλες ορίζονται από τον γεωμετρικό τόπο των σημείων στα οποία το ύψος βροχής λαμβάνει μια δεδομένη τιμή. Πρόκειται για τις αντίστοιχες των ισοϋψών για το υψόμετρο, αφού ανάλογα με το εύρος διακύμανσης του ύψους βροχής χαράσσονται οι ισοϋέτιες καμπύλες με δεδομένη ισοδιάσταση ΔP . Αρχικά σημειώνονται από τον μελετητή στο χάρτη οι θέσεις των σταθμών με τα ύψη βροχής τους, ενώ στη συνέχεια μέσω γραμμικής παρεμβολής χαράσσει τις καμπύλες. Αφού γίνει αυτό, ώστε να προκύψει η επιφανειακή βροχόπτωση της περιοχής, εμβαδομετρούνται οι επιφάνειες A_i μεταξύ διαδοχικών καμπυλών που αντιστοιχούν σε ύψη βροχής P_i και P_{i-1} , ως εξής:

$$P_s = \sum_r \frac{(P_i + P_{i-1})A_i}{2A} \quad (2.8)$$

2.4 Μοναδιαίο Υδρογράφημα

Το μοναδιαίο υδρογράφημα (MYT) είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο το οποίο χρησιμοποιείται για την περιγραφή του μηχανισμού βροχής – απορροής και εισήχθη στην υδρολογική ανάλυση από τον Sherman (1932). Σύμφωνα με τον Sherman, μοναδιαίο υδρογράφημα είναι το υδρογράφημα το οποίο προκαλείται από ενεργό βροχή ύψους 10 mm, η οποία σε ολόκληρη την έκταση της λεκάνης κατανέμεται ομοιόμορφα και έχει ομοιόμορφη ένταση.

Η μέθοδος βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές (Wilson, 1990, Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012):

- Σε μια συγκεκριμένη λεκάνη, βροχές με ίση διάρκεια και οι οποίες προκαλούν απορροή, δίνουν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με την ίδια περίπου χρονική βάση, ανεξάρτητα από την ένταση της βροχής.
- Σε μια συγκεκριμένη λεκάνη, η άμεση απορροή που προκαλεί μια συγκεκριμένη βροχή είναι ανεξάρτητη από τις επόμενες και τις προηγούμενες βροχές.

- Η κατάσταση της υδρολογικής λεκάνης παραμένει αμετάβλητη σε σχέση με το χρόνο.

Οι παραπάνω παραδοχές μπορεί να θεωρηθεί ότι ικανοποιούνται σε μια φυσική υδρολογική λεκάνη μόνο κατά προσέγγιση. Από την πρώτη παραδοχή προκύπτει ότι για βροχές ίσης διάρκειας όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της βροχής τόσο περισσότερο νερό αποθηκεύεται, αφού όσο αυξάνεται η αποθηκευτική ικανότητα των ρεμάτων αυξάνεται και η στάθμη του νερού. Για το λόγο ότι το νερό απορρέει μετά την παύση της βροχής που οδηγεί στην επιμήκυνση του χρόνου της άμεσης απορροής, αναμένεται διακύμανση ως προς το χρόνο απορροής ανάλογα με την ένταση της βροχής. Για τη δεύτερη παραδοχή, η εφαρμογή του κριτηρίου αυτού κρίνεται σχετική μιας και οι βροχές που προηγούνται του εξεταζόμενου γεγονότος επηρεάζουν την απορροή, ενώ επίσης η άμεση απορροή εξαρτάται από το επίπεδο υγρασίας τους εδάφους και το ποσοστό πληρώσεως των κοιλοτήτων του εδάφους πριν τη βροχή. Η τρίτη παραδοχή μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει αφού δεν αναμένονται ουσιαστικές διαφοροποιήσεις στην κατάσταση μιας λεκάνης σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα (Δεβελέκου, 2020).

Σύμφωνα με τους Μιμίκου & Μπαλτά (2012), η μέθοδος του ΜΥΓ στηρίζεται σε δυο βασικές αρχές:

- Αρχή της αναλογίας, σύμφωνα με την οποία δυο ενεργές βροχές με την ίδια διάρκεια αλλά διαφορετικής έντασης δημιουργούν υδρογραφήματα με την ίδια χρονική βάση αλλά με τεταγμένες σε κάθε χρονική στιγμή που έχουν λόγο μεταξύ τους ίσο με το λόγο των εντάσεων.
- Αρχή της επαλληλίας, σύμφωνα με την οποία το συνολικό υδρογράφημα που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των επιμέρους υδρογραφημάτων.

2.5 Υετογράφημα σχεδιασμού

Για πλημμύρες με περιόδους επαναφοράς της τάξης των 50 και 100 ετών η συνήθης μέθοδος υπολογισμού της χρονικής κατανομής της βροχόπτωσης είναι η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ (Chow et al, 1988). Σε συνδυασμό με την χρήση των όμβριων καμπύλων της περιοχής μελέτης παράγεται το υετογράφημα σχεδιασμού. Η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ συνιστά μια διαδικασία κατά την οποία υπολογίζονται αρχικά τα τμηματικά ύψη βροχής και στη συνέχεια κατανέμονται με τον εξής τρόπο: το μεγαλύτερο υψόμετρο τοποθετείται στο

κεντρικό χρονικό διάστημα και τα υψόμετρα που ακολουθούν τοποθετούνται εναλλάξ αριστερά και δεξιά του κεντρικού διαστήματος σε φθίνουσα σειρά.

Για την κατάρτιση υετογραφήματος σχεδιασμού, με βάση τις Προδιαγραφές Μελετών οι οποίες καταρτίστηκαν στα πλαίσια των Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας, η διάρκεια βροχόπτωσης λαμβάνεται ως σημαντικό πολλαπλάσιο του χρόνου συγκέντρωσης της ανάντη λεκάνης απορροής.

Η πιο διαδεδομένη σχέση υπολογισμού του χρόνου συγκέντρωσης είναι η εξής (Giandotti, 1934):

$$tc = \frac{4\sqrt{A}+1.5L}{0.8\sqrt{Hm-Hmin}} \quad (2.9)$$

Όπου t_c ο χρόνος συγκέντρωσης (hours), A η επιφάνεια της υπό εξέταση λεκάνης απορροής (km^2), L το μήκος του κύριου υδατορέματος (km), Hm το μέσο υψόμετρο της λεκάνης (m) και $Hmin$ το υψόμετρο του σημείου εξόδου (m).

Για μεγάλες λεκάνες πάνω από 200 km^2 επιλέγεται χρονικό βήμα ανά μια ώρα, ενώ σε αρκετά μικρές λεκάνες συνίσταται η επιλογή χρονικού βήματος μισής ώρας ή ανά ένα τέταρτο (Πετρίτσης, 2022).

Η σχέση που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ για βροχοπτώσεις κοινής περιόδου επαναφοράς είναι η εξής:

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1-\eta} \quad (2.10)$$

Όπου η σταθερά η οποία προκύπτει από την όμβρια καμπύλη της περιοχής που εξετάζεται.

2.6 Ενεργή βροχόπτωση

Το καθαρό ποσό της βροχής το οποίο τελικά απορρέει ορίζεται ως ενεργή βροχόπτωση. Όταν κατασκευάζεται το υετογράφημα σχεδιασμού περιλαμβάνονται οι συνολικές βροχοπτώσεις, επομένως είναι απαραίτητο να γίνει διαχωρισμός των υδρολογικών απωλειών από το σύνολο του υετογραφήματος έτσι ώστε να εκτιμηθεί η ενεργή βροχόπτωση. Για την εκτίμηση των υδρολογικών απωλειών το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενεργείας (ΥΠΕΝ) προτείνει τη

χρήση της μεθόδου SCS - Curve Number (CN), η οποία δημιουργήθηκε το 1954 και πρόκειται για μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους.

Οι τρεις παραδοχές στις οποίες βασίζεται η μέθοδος είναι οι εξής (Soil Conservation Service, 1972, Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999):

- Για ένα αρχικό διάστημα $t_{α0}$ όλη η ποσότητα της βροχόπτωσης $h_{α0}$ μετατρέπεται σε έλλειμμα (αρχικό έλλειμμα), χωρίς να προσφέρει ενεργή βροχόπτωση. Επομένως, μετά το χρόνο $t_{α0}$, το μέγιστο ενεργό ύψος βροχής h_e δε δύναται να υπερβεί το δυνητικό μέγεθος $h-h_{α0}$, όπου h το ολικό ύψος βροχόπτωσης.
- Το επιπλέον, πέραν του αρχικού $h_{α0}$, ελλειμματικό ύψος κατά τη διάρκεια μια μεγάλης βροχόπτωσης δεν μπορεί να ξεπεράσει μια μέγιστη τιμή S , η οποία ονομάζεται μέγιστη δυνητική κατακράτηση (potential maximum retention).
- Σε κάθε χρονική στιγμή $t > t_{α0}$ οι λόγοι του ενεργού ύψους βροχής h_e και του ελλειμματικού μείον το αρχικό έλλειμμα, προς τα αντίστοιχα δυνητικά μεγέθη ($h-h_{α0}$ και S , αντίστοιχα), είναι ίσοι.

Στη μέθοδο SCS – Curve Number (CN) ενσωματώνονται οι επιδράσεις της χρήσης και εκμετάλλευσης της γης. Υπολογίζει το ενεργό ύψος βροχής σύμφωνα με τη σχέση (Μιμίκου & Μπαλάς, 2012):

$$h_e = \begin{cases} 0, & h \leq 0.2S \\ \frac{(h-0.2S)^2}{h+0.8S}, & h > 0.2S \end{cases} \quad (2.11)$$

Όπου h_e το ενεργό ύψος βροχής, h το συνολικό ύψος βροχής και S παράμετρος που εκφράζει τη μέγιστη δυνητική κατακράτηση και συνδέεται με τον αριθμό καμπύλης (CN).

Η παράμετρος S εκτιμάται εμπειρικά μέσω του CN. Αρχικά γίνεται κατάταξη των τύπων του εδάφους δεδομένης της διηθητικότητάς τους στις παρακάτω κατηγορίες, με βάση τους ορισμούς της SCS, οι οποίοι περιέχονται και στις οδηγίες του ΥΠΕΝ (πηγή: floods.ypeka.gr):

- A. Εδάφη με χαμηλό δυναμικό επιφανειακής απορροής (πχ αμμώδη και χαλικώδη με πολύ μικρό ποσοστό ιλύος και αργίλου). Έχουν υψηλό ρυθμό διήθησης όταν είναι κορεσμένα με νερό.

- B. Εδάφη με μέτριο δυναμικό επιφανειακής απορροής (πχ αμμώδης πηλός), με μέτριο ρυθμό διήθησης.
- C. Εδάφη με σχετικά υψηλό δυναμικό επιφανειακής απορροής (πχ εδάφη με αργιλοπηλό, εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου, εδάφη φτωχά σε οργανικό υλικό), με μικρούς ρυθμούς διήθησης.
- D. Εδάφη με πολύ υψηλό δυναμικό επιφανειακής απορροής (πχ εδάφη που διογκώνονται σημαντικά όταν διαβραχούν, πλαστικές άργιλοι, αλλά και εδάφη μικρού βάθους με σχεδόν αδιαπέρατους υπο-ορίζοντες κοντά στην επιφάνεια), τα οποία έχουν πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης.

Το ΥΠΕΝ έχει αντιστοιχήσει σε κάθε ένα από τα κύρια πετρώματα που απαντώνται στον Ελλαδικό χώρο, μία η περισσότερες ομάδες διηθητικότητας εδάφους (Πίνακας 2.1) αλλά και τιμές αριθμού CN για κάθε χρήση γης και κάθε ομάδα διηθητικότητας (Πίνακας 2.2).

Πίνακας 2.1: Ομάδες διηθητικότητας εδαφών για πετρώματα του Ελλαδικού χώρου (πηγή: floods.ypeka.gr).

Πέτρωμα	Υφή	Υδρολογικός Τύπος
A. Πλουτώνια πετρώματα		
Γρανίτης	Αμμώδη έως πηλώδη	A
Συηνίτης	Βαρύτερα του Γρανίτη	B
Διορίτης	Αργιλώδη ή αργιλοπηλώδη	D
Γάββρος και Περιδοτίτης	Πηλώδη μέχρι αργιλώδη	B, C ,D
B. Εκρηξιγενή		
Διαβάσης	Αργιλώδη	D
Οφείτης	Λεπτή ή μέτρια λεπτή υφή	C, D
Ρυόλιθος	Αμμώδη	A
Τραχείτης	Αμμώδη	A
Ανδεσίτης	Αργιλώδη	D
Βασάλτης	Αργιλώδη	D
Γ. Μηχανικά ιζηματογενή		
Αμμόλιθοι και ψαμμίτες	Αμμώδη έως αμμοπηλώδη	A
Κροκαλοπαγή, λατυποπαγή	Αμμοπηλώδη	A
Σχιστή άργιλος, αργίλιτες	Αργιλώδη	D
Φλύσχης Αδριατικοϊόνιας ζώνης και	Αμμοαργιλώδη έως Αργιλώδη	D

Πίνακας 2.1(συνέχεια): Ομάδες διηθητικότητας εδαφών για πετρώματα του Ελλαδικού χώρου (πηγή: floods.ypeka.gr).

Πέτρωμα	Υφή	Υδρολογικός Τύπος
Ωλονού-Πίνδου		
Φλύσχης Πίνδου	Ελαφρύτερα της προηγούμενης	B
Φλύσχης Τριπόλεως-Γαβρόβου	Ενδιάμεση υφή μεταξύ των δυο προηγούμενων.	C
Δ. Χημικά και βιογενή ιζηματογενή		
Σκληροί Ασβεστόλιθοι	Αργιλοπηλώδη έως αργιλώδη	D
Ασβεστολιθικές μάργες	Πηλώδη έως Αργιλοπηλώδη	C
Ε. Μεταμοφωσιγενή		
Γνεύσιος	Αμμοπηλώδη έως πηλώδη	A, B
Σχιστόλιθος (μαρμαρυγιακός)	Αμμοπηλώδη	A
Σχιστόλιθος (σερικιτικός)	Αμμώδη έως πηλοαμμώδη	A
Σχιστόλιθος (χλωριτικός)	Βαρύτερα από τα τρία παραπάνω	B
Αργλικός σχιστόλιθος ή σχίστης	Βαριά εδάφη	D
Χαλαζίτης	Αμμώδη	A

Πίνακας 2.2: Τιμές CN ανάλογα με την ομάδα διηθητικότητας του εδάφους και την φυτοκάλυψη που υφίσταται (πηγή: floods.ypeka.gr).

κωδικός CORINE	Κωδικός SC	Περιγραφή	Υδρολογικός τύπος εδάφους			
			A	B	C	D
111	720	Συνεχής αστική οικοδόμηση	69	80	87	90
112	770	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	66	77	83	86
121	100	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	85	90	93	94
122	100	Οδικά σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη	87	92	94	95
123	100	Ζώνες λιμένων	85	90	93	94
124	100	Αεροδρόμια	85	90	93	94
131	200	Χώροι εξορύξεως ορυκτών	69	80	87	90
133	200	Χώροι οικοδόμησης	69	80	87	90
141	630	Περιοχές αστικού πράσινου	44	65	62	82
142	200	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	50	70	80	85
211	320	Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη	67	76	83	86
212	330	Μόνιμα αρδεύομενη γη	67	76	83	86
213	100	Ορυζώνες	59	72	81	85
221	310	Αμπελώνες	63	72	79	82
222	500	Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	44	66	77	83
223	500	Ελαιώνες	49	59	72	82
231	400	Λιβάδια	54	70	80	85
241	500	Ετήσιες καλλιέργειες που συνδέονται με μόνιμες καλλιέργειες	67	76	83	86
242	320	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	67	76	83	86
243	320	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	67	76	83	86
311	665	Δάσος πλατυφύλλων	35	61	74	80
312	665	Δάσος κωνοφόρων	35	61	74	80
313	665	Μικτό δάσος	35	61	74	80
321	400	Φυσιικοί βοσκότοποι	49	69	79	84
322	400	Θάμνοι και χερσότοποι	42	62	74	80
323	400	Σκληροφυλλική βλάστηση	42	62	74	80
324	630	Μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις	42	62	74	80
331	200	Παραλίες αμμόλοφοι αμμουδιές	42	62	74	80
332	200	Απογυμνωμένοι βράχοι	76	86	90	92
333	200	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	42	62	74	80
411	100	Βάλτοι στην ενδοχώρα	95	95	95	95
421	100	Παραθαλάσσιοι βάλτοι	95	95	95	95
422	100	Αλυκές	95	95	95	95
511	100	Ροές υδάτων	100	100	100	100
512	100	Συλλογές υδάτων	100	100	100	100
521	100	Παράκτιες λιμνοθάλασσες	100	100	100	100
523	100	Θάλασσα και ωκεανός	100	100	100	100

Ο υπολογισμός του αριθμού καμπύλης απορροής γίνεται μέσω του τύπου:

$$CNII_{II} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i}{A} * CN_i \right) \quad (2.12)$$

Όπου A_i η έκταση της υποπεριοχής i , A η συνολική επιφάνεια της λεκάνης απορροής και CN_i ο αριθμός καμπύλης απορροής της υποπεριοχής i .

Ότι προκύπτει από τους παραπάνω υπολογισμούς αφορά σε υγρασιακή κατάσταση τύπου II, δηλαδή αφορά μια μέση κατάσταση του εδάφους. Για την εξαγωγή του αριθμού καμπύλης απορροής CN υγρασιακής κατάστασης I (ξηρά εδάφη) και III (κορεσμένα εδάφη) θα πρέπει να

γίνει αναγωγή με βάση τις σχέσεις 2.13 και 2.14, ενώ στον Πίνακα 2.3 αναφέρονται τα αναλυτικά χαρακτηριστικά κάθε τύπου προηγούμενης υγρασιακής κατάστασης.

$$CN_I = \frac{0.42 * CN_{II}}{1 - 0.0058 * CN_{II}} \quad (2.13)$$

$$CN_{III} = \frac{2.3 * CN_{II}}{1 + 0.013 * CN_{II}} \quad (2.14)$$

Πίνακας 2.3: Περιγραφή της προηγούμενης υγρασιακής κατάστασης του εδάφους (Μιμίκου & Μπαλτάς 2012, Soil Conservation Service, 1972).

Προηγούμενη υγρασιακή κατάσταση	Περιγραφή
Τύπος I	Στεγνά εδάφη, αλλά όχι σε σημείο μόνιμης μάρανσης και όταν υφίσταται ικανή άροση ή καλλιέργεια. Το σημείο μόνιμης μάρανσης αφορά το ποσοστό του νερού που υπάρχει στο έδαφος κατά την οριστική ξήρανση των φυτών. Οι ξηρές συνθήκες αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων πέντε ημερών είναι μικρότερη από 13 mm (ή μικρότερη των 35 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
Τύπος II	Αφορά μια μέση περίπτωση για ετήσιες πλημμύρες, δηλαδή έναν μέσο όρο των συνθηκών που είχαν προηγηθεί της μέγιστης ετήσιας πλημμύρας σε πολλές λεκάνες απορροής. Ουσιαστικά αντιστοιχεί σε βροχόπτωση των προηγούμενων πέντε ημερών μεταξύ 13 και 38 mm (ή μεταξύ 35 mm και 53 mm για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
Τύπος III	Η κατάσταση αυτή αφορά την περίπτωση στην οποία τις τελευταίες πέντε ημέρες πριν την δεδομένη καταγίδα υπήρξε κάποιο γεγονός μεγάλης βροχόπτωσης η μικρής με χαμηλές

θερμοκρασίες και το έδαφος ήταν κορεσμένο. Αντιστοιχούν σε βροχόπτωση μεγαλύτερη των 38mm.

Τελικά, για την μέγιστη δυνατή κατακράτηση χρησιμοποιείται η σχέση:

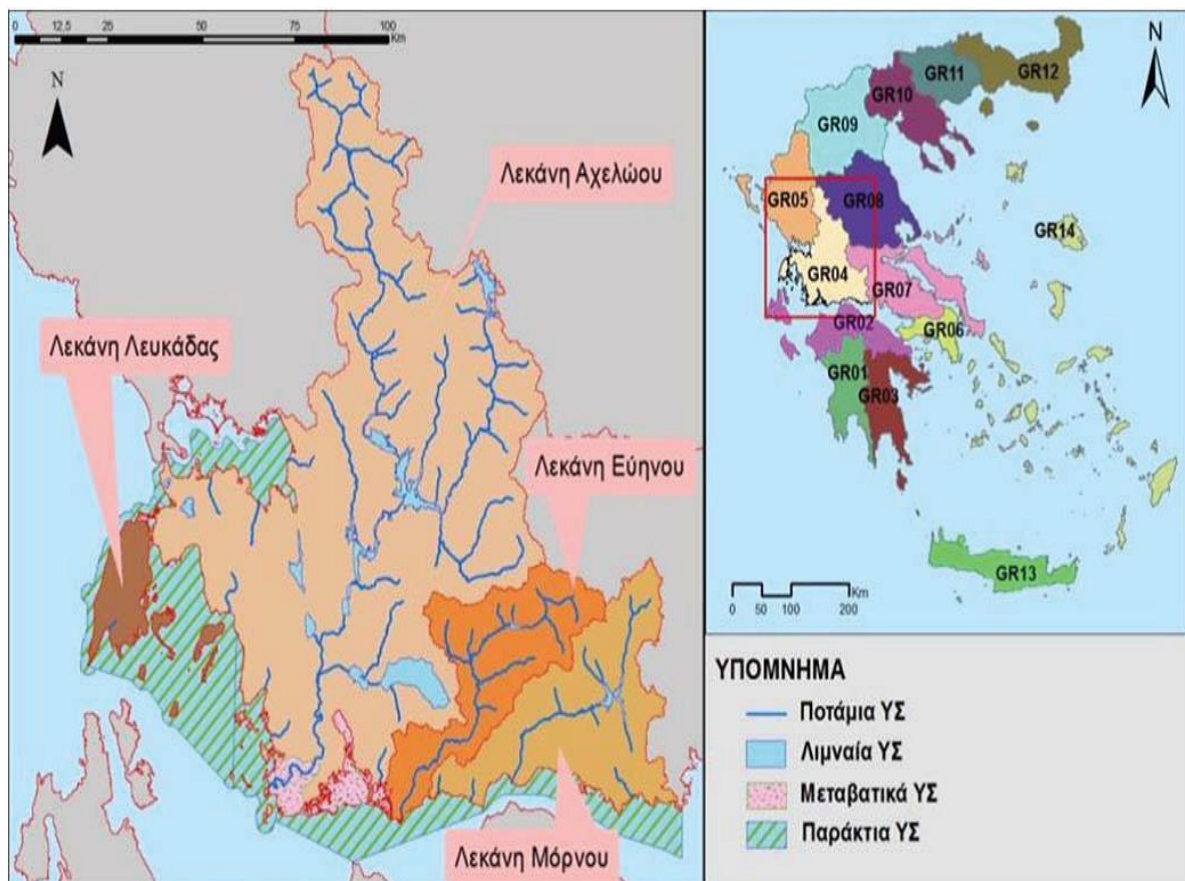
$$S = 254 * \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (2.15)$$

Όπου CN ο αριθμός καμπύλης απορροής. Ανάλογα με την υγρασιακή κατάσταση του εδάφους, το S λαμβάνει τρεις διαφορετικές τιμές.

3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

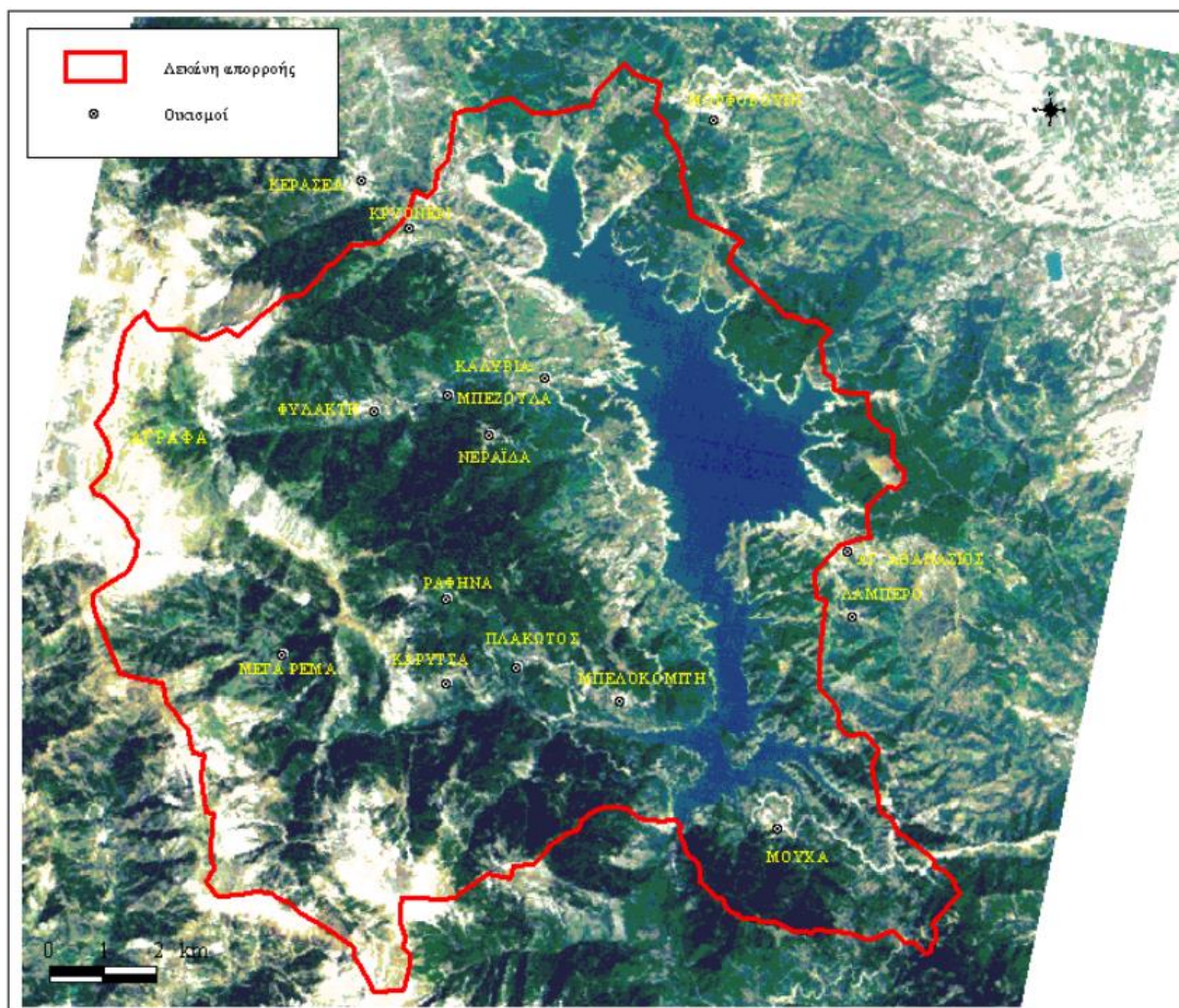
3.1 Μελέτη λεκανών απορροής

Η περιοχή μελέτης ανήκει στην ευρύτερη λεκάνη απορροής του ταμειυτήρα Πλαστήρα (λίμνη Ταυρωπού, όπως επίσημα ονομάζεται) και βρίσκεται στο Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (ΥΔ GR 04), το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1. Το συγκεκριμένο αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ΥΔ της χώρας και η έκτασή του ανέρχεται περίπου στα 10398.60 km². Η μέση ετήσια τιμή του ύψους βροχής στο σύνολο του ΥΔ εκτιμάται σε 1370 mm, και η περίοδος με την εντονότερη εμφάνιση βροχοπτώσεων είναι από τον Νοέμβριο έως τον Φεβρουάριο, ενώ οι πιο ξηροί μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Στο ΥΔ της Δυτικής Στερεάς Ελλάδας ανήκουν οι κύριες υδρολογικές λεκάνες του Αχελώου, του Εύηνου και του Μόρνου και οι λεκάνες των παραποτάμων του Αχελώου (Ανάργυρος-Ελευθέριος, 2015).



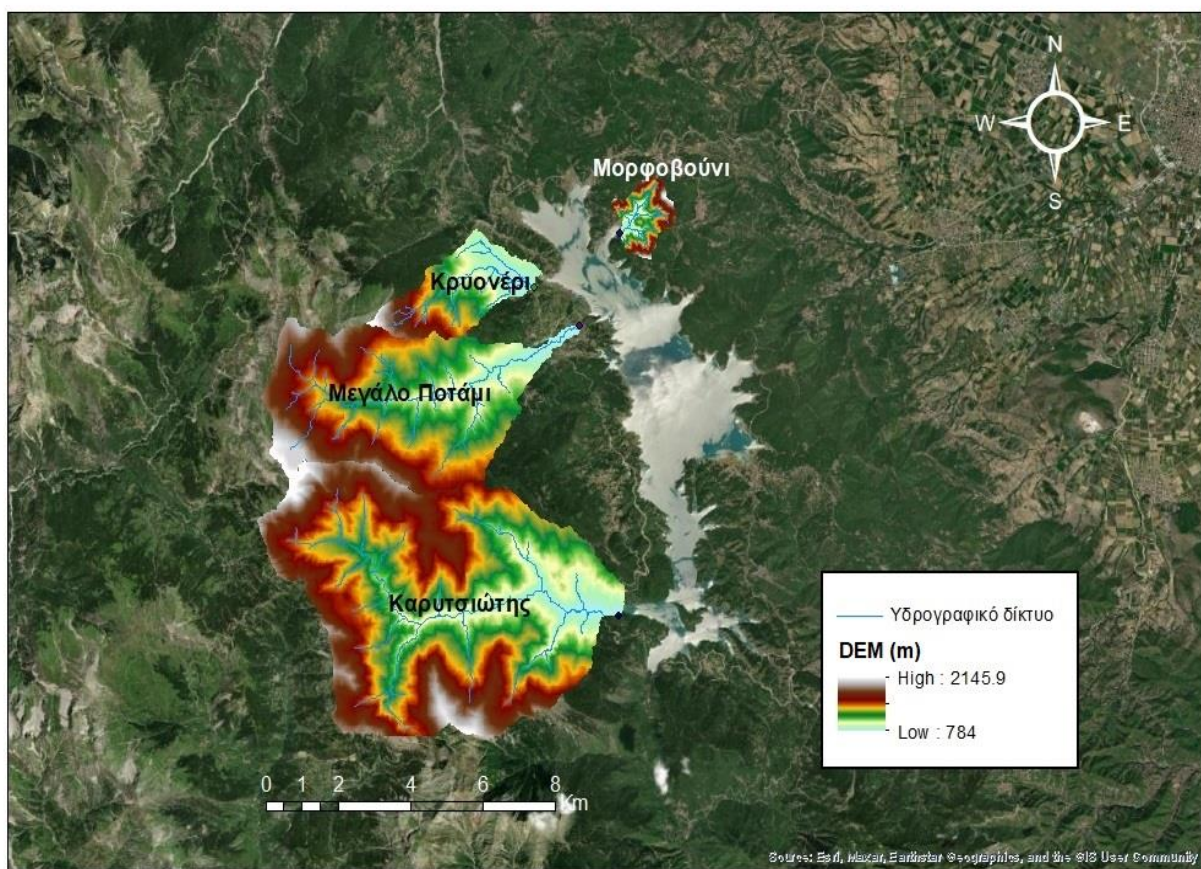
Σχήμα 3.1: Υδατικό διαμέρισμα Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (πηγή: <https://www.ypethe.gr/>).

Η λίμνη Πλαστήρα βρίσκεται στο Βόρειο - Ανατολικό τμήμα του ΥΔ Δυτικής Στερεάς Ελλάδας, και αποτελεί τεχνητό ταμιευτήρα συνολικής επιφάνειας 24 km². Η μέση ετήσια καθαρή εισροή του ταμιευτήρα είναι 153.2 hm³, ενώ το μέσο ετήσιο ύψος απορροής στη λίμνη είναι 1029 mm. Η ευρύτερη λεκάνη της λίμνης Πλαστήρα ανάντη του φράγματος έχει έκταση 161.3 km² και απεικονίζεται σε επεξεργασία δορυφορικής λήψης στο παρακάτω Σχήμα 3.2 (Ευστρατιάδης κ.α, 2002).



Σχήμα 3.2: Δορυφορική εικόνα της ευρύτερης λεκάνης της λίμνης Πλαστήρα (Ευστρατιάδης κ.α, 2002).

Για την πραγματοποίηση της υδρολογικής ανάλυσης και την εφαρμογή της μεθόδου Γαντιλονιό εξετάστηκαν οι 4 μεγαλύτερες σε έκταση λεκάνες της λίμνης Πλαστήρα, οι οποίες προέκυψαν από τη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4.1. Οι δύο από τις λεκάνες απορροής που εξετάζονται είναι η λεκάνη απορροής Καρυτσιώτη και η λεκάνη απορροής Μεγάλου Ποταμιού και αντιστοιχούν στα κύρια υδατορεύματα της ευρύτερης λεκάνης απορροής της λίμνης, τα οποία εκβάλλουν στις δυτικές όχθες της. Οι υπόλοιπες δύο μικρότερες σε έκταση λεκάνες είναι η λεκάνη απορροής Κρυονερίου, επίσης στο δυτικό τμήμα, και η λεκάνη απορροής Μορφοβούνι, στην ανατολική πλευρά της λίμνης. Στον Πίνακα 3.1 αναφέρονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων λεκανών απορροής.



Σχήμα 3.3: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) των εξεταζόμενων λεκανών απορροής.

Πίνακας 3.1: Κύρια χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων λεκανών απορροής.

Λεκάνη Απορροής	Εμβαδό (km ²)	Μήκος Υδροκρίτη (km)	Μήκος κύριου Υδατορεύματος (km)	Μέση Κλίση (%)
Καρυτσιώτη	48.9	43.6	8.9	54.4
Μεγάλου Ποταμιού	24.7	33.3	12.8	44.7
Κρυονερίου	6.6	18.9	5.9	30.5
Μορφοβουνίου	2.3	8.5	2.2	23.4

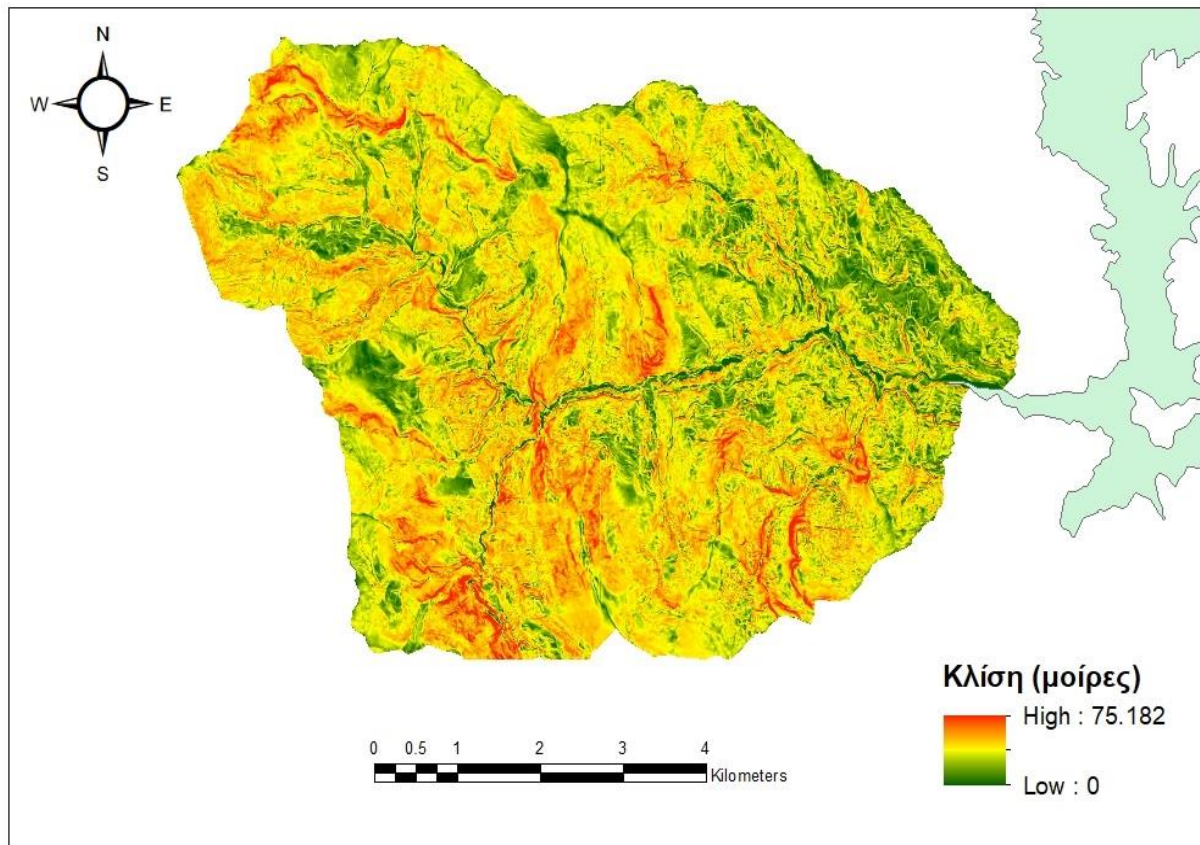
3.1.1 Λεκάνη απορροής του ρέματος Καρυτσιώτη

Η λεκάνη απορροής του υδατορεύματος Καρυτσιώτη εντοπίζεται στο νοτιοδυτικό τμήμα της ευρύτερης λεκάνης απορροής της λίμνης Πλαστήρα, και αποτελεί τη μεγαλύτερη σε έκταση υπολεκάνη. Το κλίμα της περιοχής, όπως και σε όλες τις υπόλοιπες εξεταζόμενες λεκάνες, είναι ηπειρωτικό, δηλαδή η θερμοκρασία μπορεί να μειωθεί σε τιμές υπό του μηδενός ενώ την άνοιξη και το καλοκαίρι υπάρχουν βροχοπτώσεις.

Το ρέμα Καρυτσιώτη πηγάζει από τα νοτιοδυτικά της οροσειράς των Αγράφων και εκβάλλει νότια του οικισμού Μπελοκομίτη. Κατά μήκος της διαδρομής του συναντώνται οικισμοί και χωριά με πλούσια ιστορία από τα βυζαντινά χρόνια και ύστερα, καθώς και λείψανα οικισμών της ελληνιστικής περιόδου (Πηγή: <https://karitsa-dolopon.gr>). Στα ορεινότερα σημεία της λεκάνης, δυτικά του χωριού Μέγα Ρεύμα και βόρεια του χωριού Καρβάσaras διαμορφώνονται φυσικές βάρρες του ποταμού Καρυτσιώτη τις οποίες έχουν την δυνατότητα επισκέπτες της περιοχής να προσεγγίσουν και να κολυμπήσουν σε αυτές.

Το εμβαδόν της παραπάνω λεκάνης είναι 48.9 km² και η περίμετρός της είναι 31.3 km. Σύμφωνα με το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους 5 m x 5 m, το ελάχιστο υψόμετρο της λεκάνης

είναι 784 m, το μέγιστο 2146 m και το μέσο υψόμετρο είναι 1319 m. Οι κλίσεις γης φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 3.4. Η μέγιστη κλίση της λεκάνης είναι 75 °, η ελάχιστη 0 ° και η μέση κλίση 29 °.



Σχήμα 3.4: Κλίσεις γης για τη λεκάνη απορροής Καρτυσιώτη.

Από γεωλογική άποψη, η λεκάνη απορροής του ποταμού Καρτυσιώτη βρίσκεται στη ζώνη Πίνδου και αποτελείται κυρίως από Πελαγικούς ασβεστόλιθους, κατά κύριο λόγο βιομικρίτες, καθώς και μια σειρά φλυσχών και πηλιτών οι οποίοι συναντώνται στη συγκεκριμένη ζώνη και χαρακτηρίζονται από χαμηλή υδατοπερατότητα (Ραρανικόλαου et al., 1986).

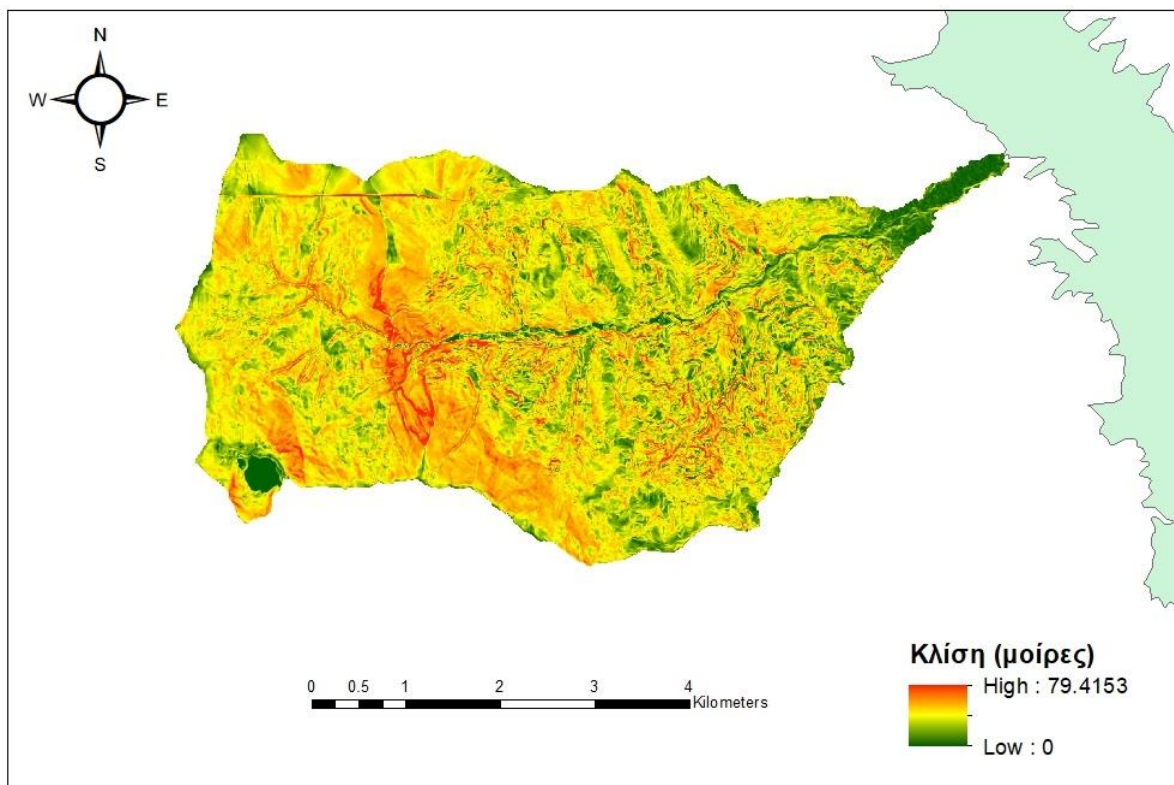
Σχετικά με την κάλυψη γης, σύμφωνα με τους χάρτες χρήσεων γης CORINE Land Cover 2018, προκύπτει ότι η λεκάνη καλύπτεται κυρίως από μικτά δάση και δάση πλατύφυλλων και κωνοφόρων, κάποιους φυσικούς βοσκότοπους, θάμνους και χερσότοπους, ενώ σε σημαντικά κομμάτια υπάρχουν εκτάσεις με αραιή βλάστηση αλλά και απογυμνωμένοι βράχοι.

3.1.2 Λεκάνη απορροής του ρέματος Μεγάλο Ποτάμι

Στο δυτικό τμήμα της ευρύτερης λεκάνης απορροής της λίμνης Πλαστήρα εντοπίζεται η λεκάνη απορροής του υδατορεύματος Μεγάλο Ποτάμι, η οποία αποτελεί τη δεύτερη μεγαλύτερη σε έκταση υπολεκάνη. Το κλίμα της περιοχής είναι επίσης ηπειρωτικό.

Το ρέμα Μεγάλο Ποτάμι πηγάζει από τα βορειοδυτικά της οροσειράς των Αγράφων και εκβάλλει στη περιοχή του οικισμού Καλύβια. Στις περιοχές κατά μήκος του συναντώνται διάφορα πετρόχτιστα κτίσματα, όπως γεφύρια και βρύσες, αλλά και το ιστορικό διατηρητέο μνημείο της Μονής Αγίας Τριάδας, ενώ οι οικισμοί Φυλακτή και Πεζούλα αποτελούν χωριά με ιστορία που χρονολογείται στην προβυζαντινή περίοδο (Πηγή: <https://plastiras-ota.gr>).

Το εμβαδόν της λεκάνης είναι 24.7 km² και η περιμέτρος της είναι 26.5 km. Σύμφωνα με το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους 5 m x 5 m, το ελάχιστο υψόμετρο της λεκάνης είναι 789 m, το μέγιστο 2143 m και το μέσο υψόμετρο είναι 1348 m. Οι κλίσεις γης φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 3.5. Η μέγιστη κλίση της λεκάνης είναι 79 ° η ελάχιστη 0 ° και η μέση κλίση 24 °.



Σχήμα 3.5: Κλίσεις γης για τη λεκάνη απορροής Μεγάλου Ποταμιού.

Η λεκάνη απορροής Μεγάλου Ποταμιού έχει παρόμοια γεωλογική σύνθεση με την λεκάνη απορροής Καρυτσιώτη. Βρίσκεται επίσης στη ζώνη Πίνδου και χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση Πελαγικών ασβεστόλιθων, κυρίως βιομικρίτες, και μιας σειράς φλυσχών και πηλιτών που διαμορφώνονται με κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στη συγκεκριμένη ζώνη.

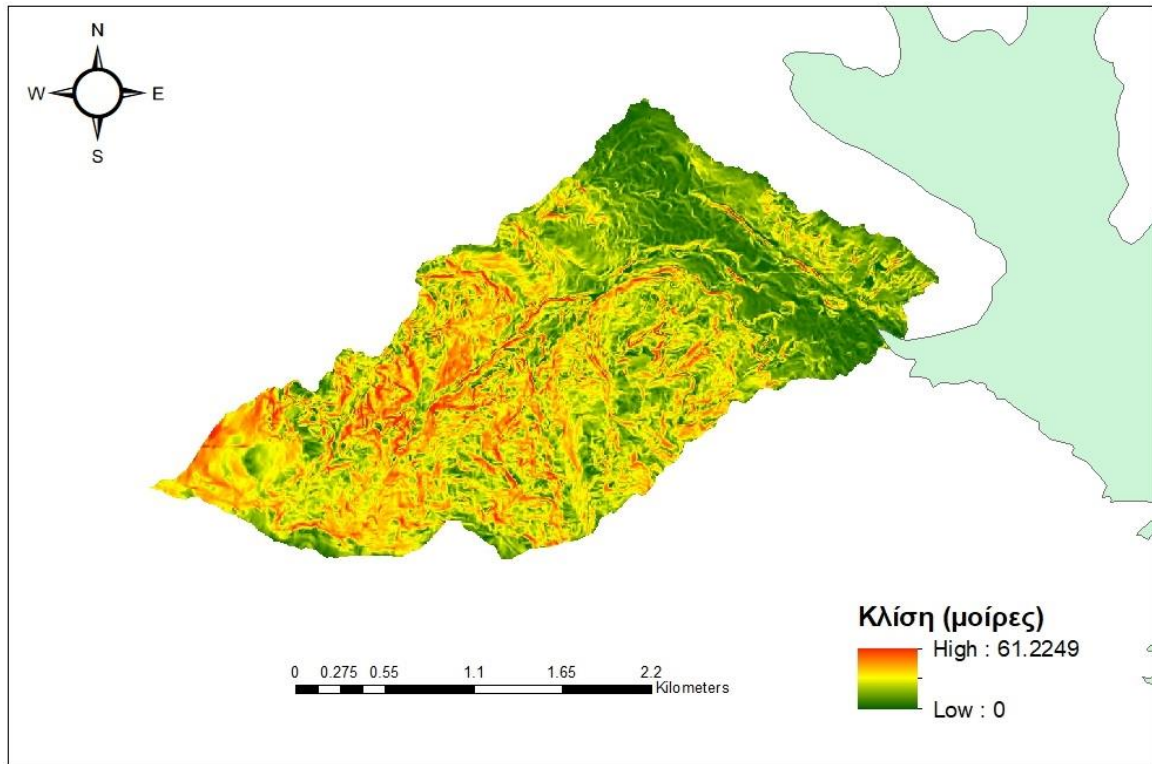
Για την κάλυψη γης, σύμφωνα με τους χάρτες χρήσεων γης CORINE Land Cover 2018, το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης καλύπτεται από δάση κωνοφόρων και από μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις. Σε σημαντικό κομμάτι της λεκάνης υπάρχουν και φυσικοί βοσκότοποι και χερσότοποι.

3.1.3 Λεκάνη απορροής Κρυονερίου

Η λεκάνη απορροής Κρυονερίου εντοπίζεται στο βορειοδυτικό τμήμα της ευρύτερης λεκάνης απορροής της λίμνης Πλαστήρα, και αποτελεί την τρίτη μεγαλύτερη σε έκταση εξεταζόμενη λεκάνη, με κλίμα όμοιο των υπόλοιπων λεκανών.

Σημαντικό ρέμα της περιοχής είναι το Κρυονερίτικο ποτάμι μήκους 5 km, το οποίο ενώνεται με το υδατόρευμα Βαλτόρεμα και μαζί απορρέουν στη λίμνη Πλαστήρα. Το χωριό Κρυονέρι είναι από τους λίγους οικισμούς της περιοχής με ιδιαίτερα σταθερό πληθυσμό καθ'όλη τη διάρκεια του έτους και βρίσκεται σε νευραλγική θέση για την ανάπτυξη δραστηριοτήτων στην ευρύτερη περιοχή της λίμνης Πλαστήρα (Πηγή: <https://plastiras-ota.gr/>).

Η λεκάνη έχει έκταση 6.6 km² και περίμετρο 13.5 km. Το ελάχιστο υψόμετρο σύμφωνα με το Ψ.Μ.Ε 5 m x 5 m είναι 788 m, το μέγιστο 1727 m, ενώ το μέσο υψόμετρο βρίσκεται στα 1045 m. Στο Σχήμα 3.6 φαίνονται οι κλίσεις γης της λεκάνης. Η μέγιστη κλίση είναι 61°, η ελάχιστη 0°, ενώ η μέση κλίση τους εδάφους είναι στις 17°.



Σχήμα 3.6: Κλίσεις γης για τη λεκάνη απορροής Κρυονερίου.

Η γεωλογία της περιοχής δεν διαφέρει από εκείνη των λεκανών απορροής Καρυτσίωτη και Μεγάλου Ποταμιού. Σχετικά με την κάλυψη γης, σύμφωνα με το Corine 2018, εκτός από τις δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις που απαντώνται και στις υπόλοιπες λεκάνες, σημαντικό κομμάτι της καλύπτεται από γεωργική γη με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης.

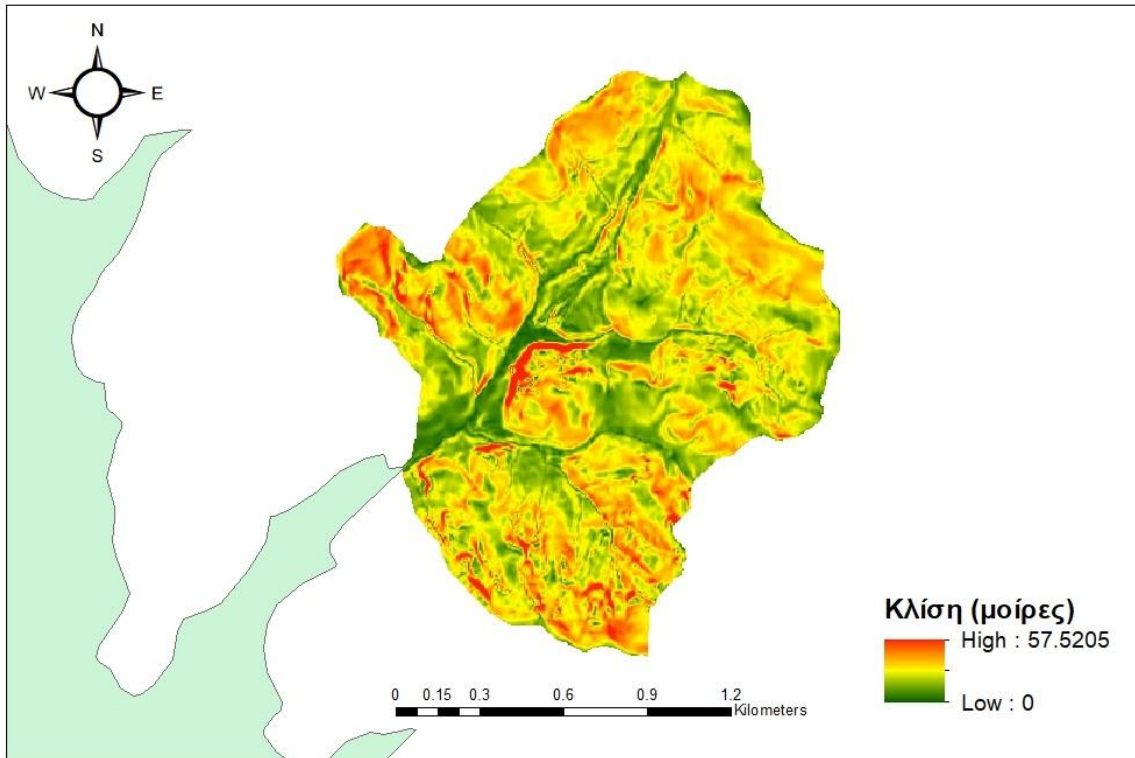
3.1.4 Λεκάνη απορροής Μορφοβουνίου

Στο βορειοανατολικό τμήμα της ευρύτερης λεκάνης απορροής της λίμνης Πλαστήρα εντοπίζεται η λεκάνη απορροής του Μορφοβουνίου. Πρόκειται για μια σημαντικά μικρότερη των υπολοίπων εξεταζόμενων λεκανών απορροής, όμως ικανή να βοηθήσει στην ολοκληρωμένη επισκόπηση της απώλειας εδαφικού υλικού και στερεοαπορροής της περιοχής.

Το Μορφοβούνι είναι το μεγαλύτερο χωριό του Δήμου Πλαστήρα και πρόκειται για την γενέτειρα του Νικόλαου Πλαστήρα. Στην περιοχή βρίσκονται αρκετά μνημεία αρχαίων πολιτισμών, ενώ επίσης λειτουργεί το Μουσείο Πλαστήρα το οποίο είναι τμήμα του Κέντρου Ιστορικών Μελετών «Ν.Πλαστήρα» (Πηγή: <https://plastiras-ota.gr/>).

Η λεκάνη έχει έκταση 2.3 km² και περίμετρο 6.8 km. Το ελάχιστο υψόμετρο σύμφωνα με το Ψ.Μ.Ε 5 m x 5 m είναι 789 m, το μέγιστο 963 m, ενώ το μέσο υψόμετρο βρίσκεται στα 862 m.

Στο Σχήμα 3.7 φαίνονται οι κλίσεις γης της λεκάνης. Η μέγιστη κλίση είναι 57 °, η ελάχιστη 0 °, ενώ η μέση κλίση τους εδάφους είναι στις 13 °.



Σχήμα 3.7: Κλίσεις γης για τη λεκάνη απορροής Μορφοβουνίου.

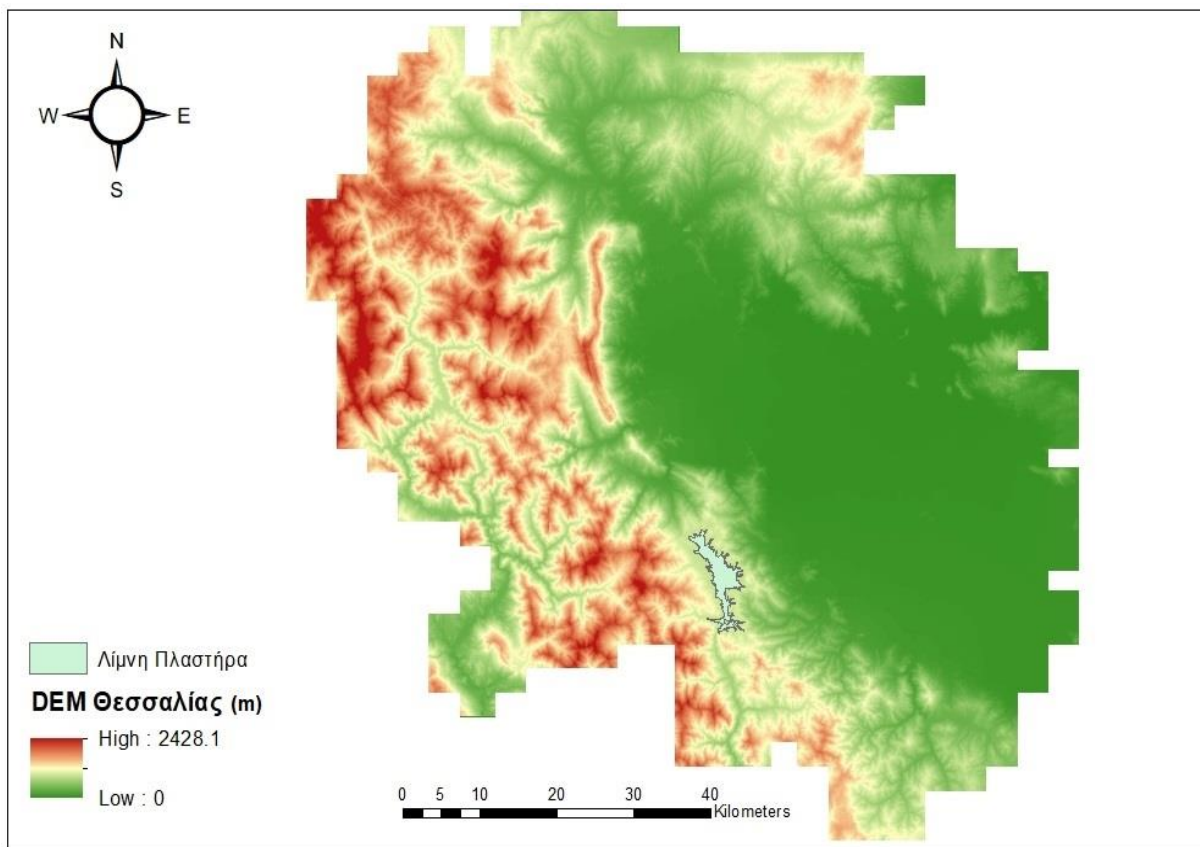
Η γεωλογία της περιοχής χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη τυπικού φλύσχη της ζώνης Πίνδου. Σχετικά με την κάλυψη γης, σύμφωνα με το Corine 2018, παρατηρείται κάλυψη γης κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης, και αρκετά μεγάλη κάλυψη γης από δάση πλατύφυλλων.

3.2 Ανάλυση Δεδομένων

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η υδρολογική ανάλυση και η εφαρμογή της μεθόδου Gantiloniό στις τέσσερις παραπάνω λεκάνες απορροής έγινε συλλογή και επεξεργασία προϋπαρχόντων γεωχωρικών δεδομένων. Επιπροσθέτως, αναπτύχθηκαν τα απαραίτητα θεματικά επίπεδα με τα οποία έγινε δυνατή η επιτυχής ολοκλήρωση της γεωμορφολογικής ανάλυσης. Για τον σκοπό της καλύτερης αποθήκευσης και διαχείρισης των δεδομένων σχεδιάστηκε μια κατάλληλη γεωβάση (geodatabase), η οποία συνιστά μια κεντρική αποθηκευτική μονάδα γεωγραφικών δεδομένων η οποία αφορά τη γεωμετρία, τις ιδιότητες των χωρικών δεδομένων, αλλά και τις σχέσεις μεταξύ μη χωρικών και χωρικών δεδομένων.

3.2.1 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM)

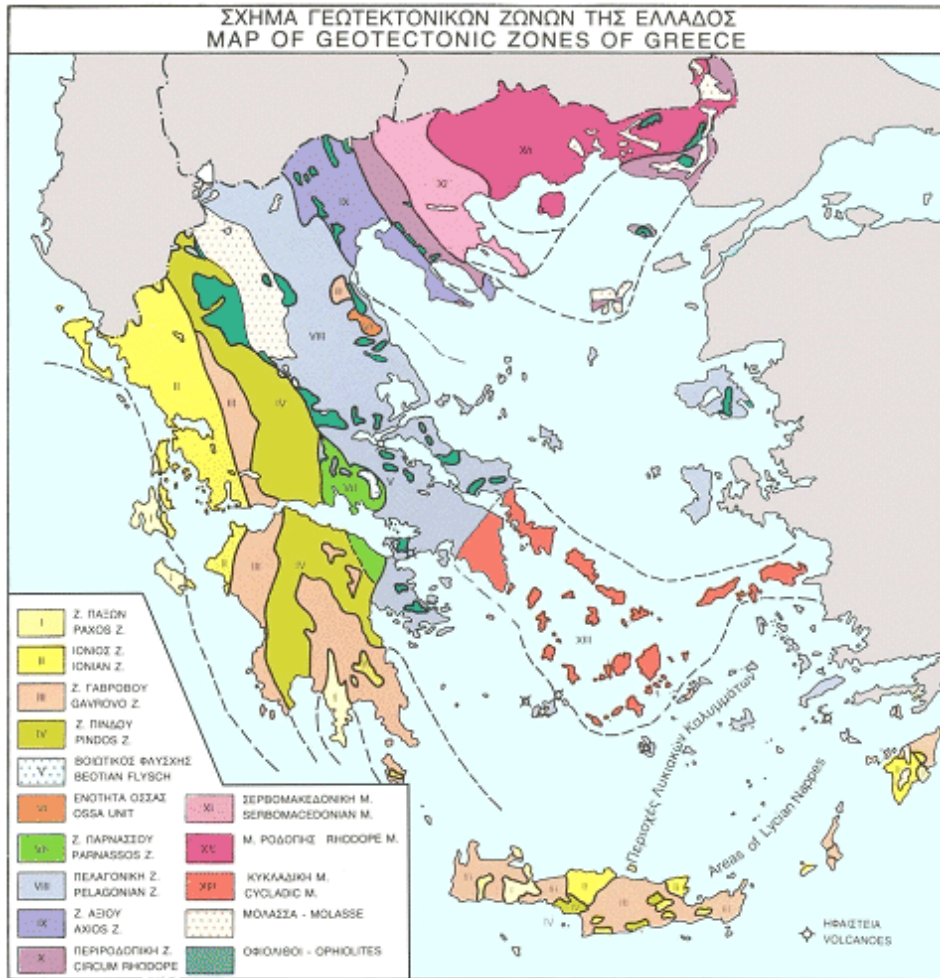
Αρχικά χορηγήθηκε από την υπηρεσία Κτηματολόγιο Α.Ε. κανονικοποιημένο αρχείο raster που αποτελεί το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους για την ευρύτερη περιοχή της δυτικής Θεσσαλίας, κομμάτι της οποίας αποτελεί και η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας. Το αρχείο απαρτίζεται από ψηφίδες οι οποίες αναπαριστούν τα υψόμετρα της περιοχής σε μέτρα. Η ανάλυση των φανωμάτων του καννάβου του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου είναι 5 m x 5 m. Κάθε πινακίδα DEM έχει διαστάσεις στο έδαφος 4600 m x 3600 m, με περιμετρική επικάλυψη 300 m, και ακολουθεί τη διανομή ΕΓΣΑ87 κλίμακας 1:5000. Τα αρχεία είναι τύπου img και η γεωμετρική ακρίβεια του προϊόντος είναι $RMSEz \leq 2.00$ m και η απόλυτη ακρίβεια ≤ 3.92 m για το επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Στο Σχήμα 3.8 φαίνεται το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της Θεσσαλίας, καθώς και το διανυσματικό αρχείο (shapefile) που αναπαριστά τη λίμνη Πλαστήρα το οποίο πάρθηκε από τον εθνικό κατάλογο ανοικτών γεωχωρικών δεδομένων (<http://geodata.gov.gr>).



Σχήμα 3.8: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους για μέρος της Θεσσαλίας.

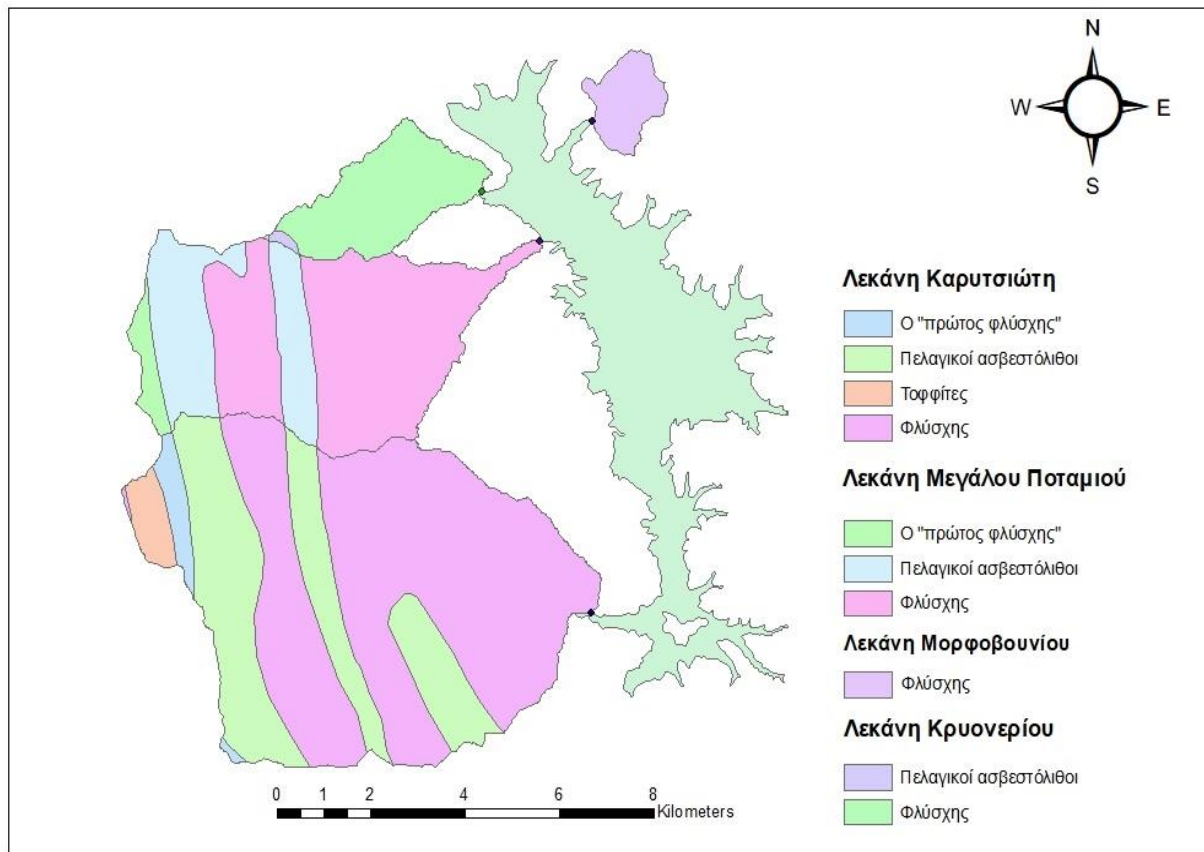
3.2.2 Γεωλογία

Σύμφωνα με τον γεωτεκτονικό χάρτη της Ελλάδας, ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 3.9, η περιοχή μελέτης ανήκει στη γεωτεκτονική Ζώνη Πίνδου. Το κάλυμμα Πίνδου αποτέθηκε ως η λιθολογική ενότητα Πίνδου η οποία δομείται μέσω μιας Μεσοζωϊκής ακολουθίας ανθρακικών και πυριτικών ιζημάτων βαθιάς θάλασσας των οποίων το συνολικό πάχος δεν ξεπερνά τα 1050 m. Επί των Μεσοζωϊκών σχηματισμών αναπτύσσεται η συντεκτονική κλαστική ακολουθία του Πινδικού φλύσχη που καλύπτει ένα στρωματογραφικό εύρος από το Παλαιόκαινο έως το Ολιγόκαινο. Οι κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί διακρίνονται σε κλαστικούς σχηματισμούς, σε ανθρακικά πετρώματα και σε σχηματισμούς ραδιολαριτών (Paranikolaou et al., 1986). Στην περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας εντοπίζεται ο κλαστικός σχηματισμός «Πρώτος Φλύσχης», αλλά και τυπικός Φλύσχης, σχηματισμοί ραδιολαριτών, ενώ από τα ανθρακικά πετρώματα εντοπίζονται Πελαγικοί ασβεστόλιθοι.



Σχήμα 3.9: Γεωτεκτονικός χάρτης της Ελλάδας (Πηγή: <https://igme.gr>).

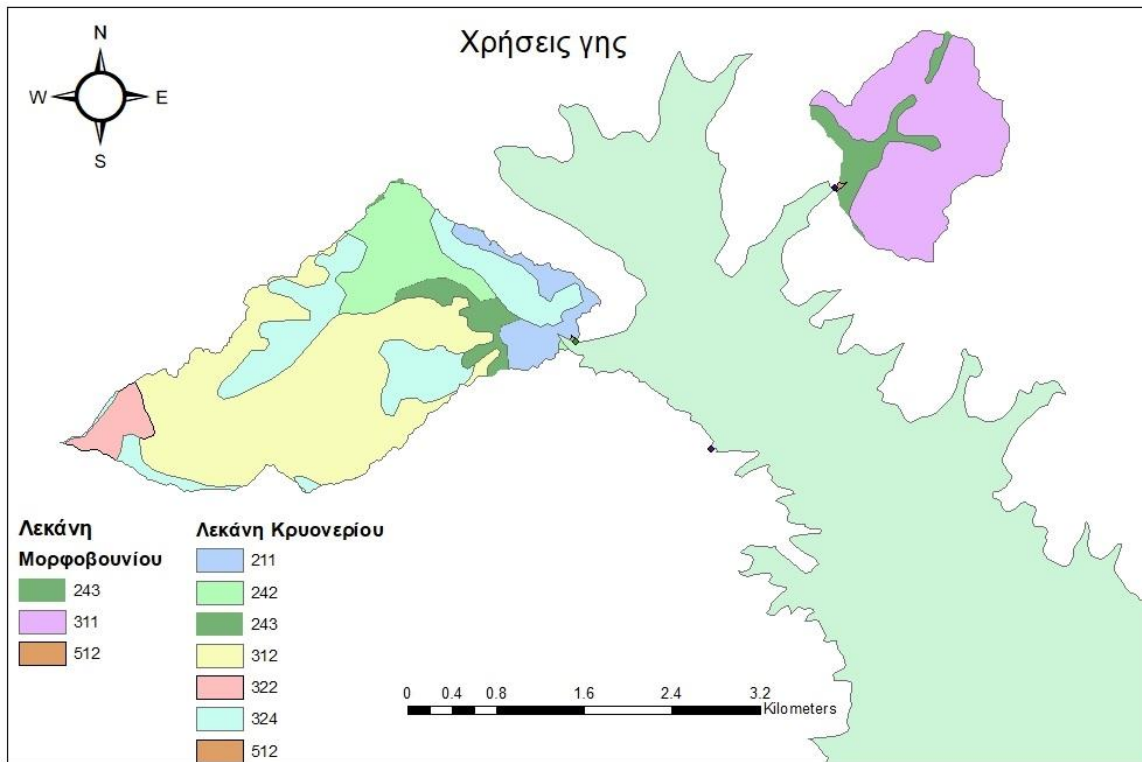
Για την εφαρμογή της μεθόδου Γανβιλονιέ και συγκεκριμένα για την εκτίμηση των συντελεστών που σχετίζονται με τη γεωλογία της περιοχής, αλλά και στην εκτίμηση των υδρολογικών απωλειών με την μέθοδο SCS Curve Number χρειάστηκε να χρησιμοποιηθούν οι γεωλογικοί χάρτες του ΙΓΜΕ κλίμακας 1:50.000 από την ιστοσελίδα «Διανομή Φύλλων Γεωλογικού Χάρτη ΙΓΜΕ». Τα φύλλα χάρτη εισήχθησαν στο ArcGIS και από τη γεωγραφική προσαρμογή τους προέκυψαν τα ψηφιδωτά αρχεία που απεικονίζουν τη γεωλογία όπως φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 3.10.



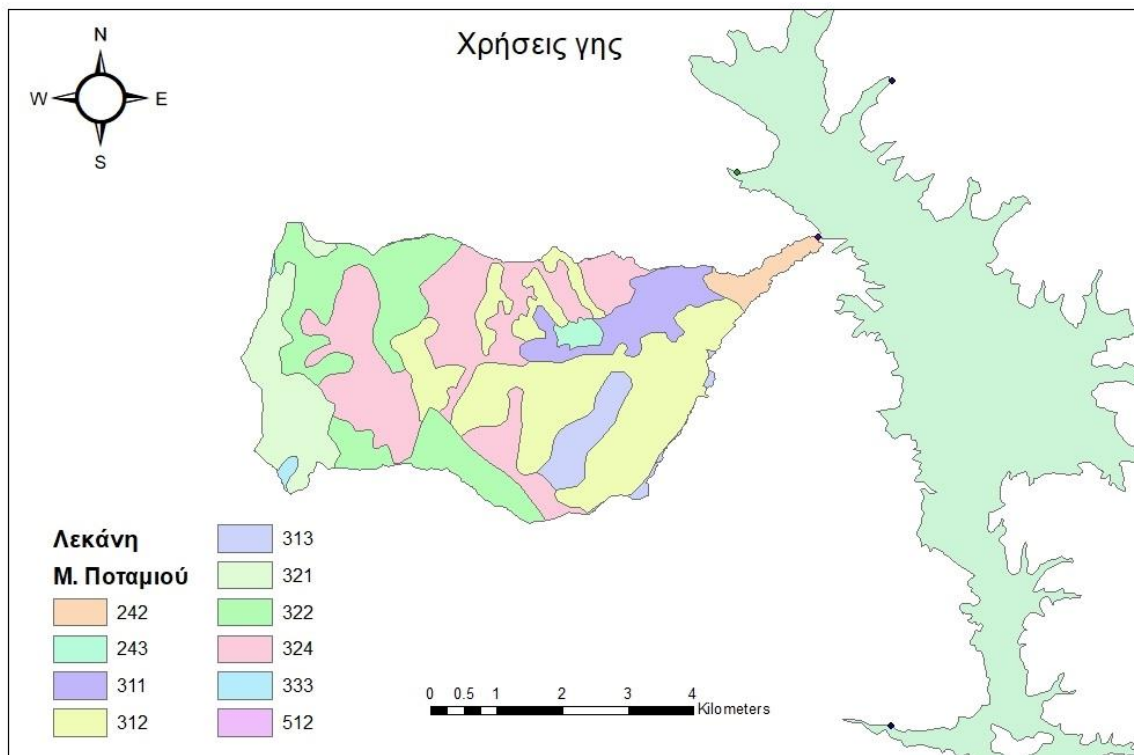
Σχήμα 3.10: Γεωλογικός χάρτης των εξεταζόμενων λεκανών απορροής.

3.2.3 Χρήσεις γης

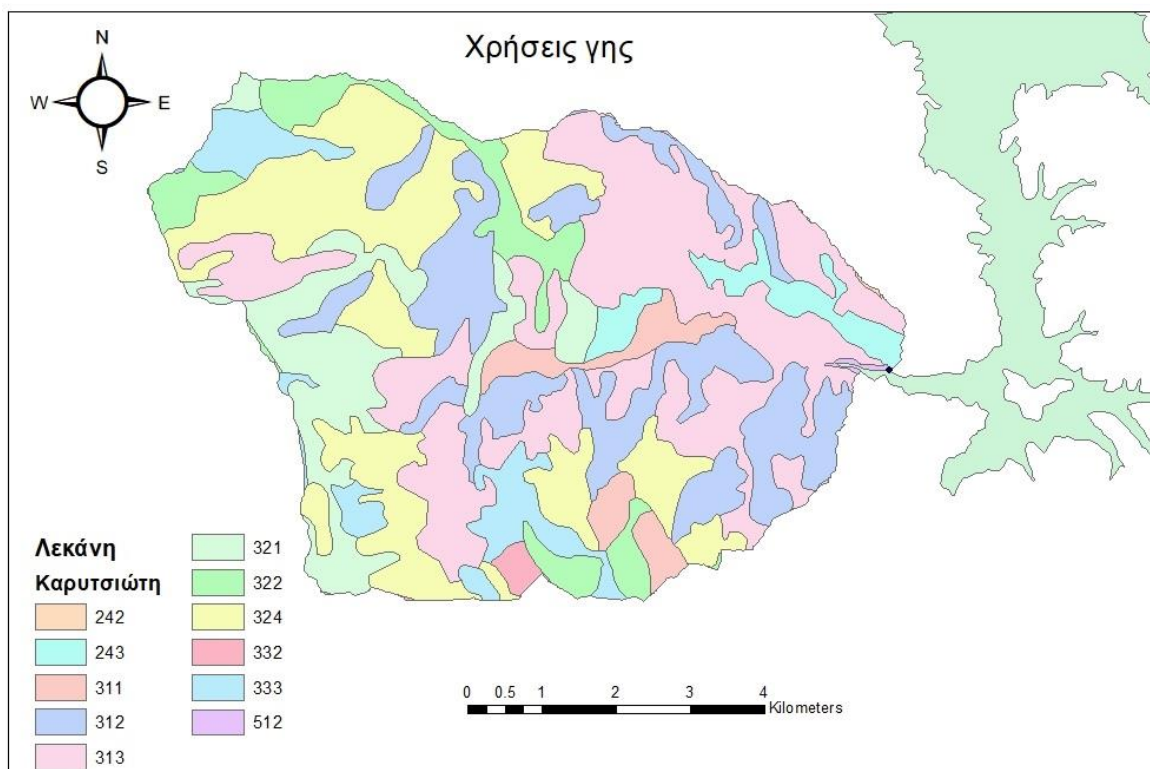
Για την εκτίμηση των συντελεστών που σχετίζονται με το είδος κάλυψης γης χρησιμοποιήθηκε το διανυσματικό αρχείο (shapfile) για τις χρήσεις γης του 2018 από τους ψηφιακούς χάρτες του Ευρωπαϊκού προγράμματος γεωσκόπησης Copernicus, οι οποίοι προέκυψαν έπειτα από συλλογή και επεξεργασία δορυφορικών και επίγειων δεδομένων. Ο ψηφιακός χάρτης που προκύπτει έχει υψηλή γεωμετρική ακρίβεια (≤ 10 m), καθώς τα δεδομένα προκύπτουν από χρήση τόσο του δορυφόρου Sentinel-2 όσο και του Landsat-8 για την πλήρωση κενών. Για την εκτίμηση της στερεομεταφοράς έχει σημασία η κατηγοριοποίηση των διαφορετικών χρήσεων γης καθώς από αυτές μπορεί να εξαρτηθεί ο βαθμός των υδρολογικών παραμέτρων όπως η εξάτμιση, η διήθηση και η απορροή, όπως επίσης και οι συντελεστές που υπεισέρχονται κατά την εφαρμογή της μεθόδου Γαντιλονιέ και οι οποίοι σχετίζονται άμεσα με τις χρήσεις γης. Στα Σχήματα 3.11α, 3.11β, 3.11γ παρουσιάζεται ο χάρτης χρήσεων γης για κάθε μια από τις εξεταζόμενες λεκάνες απορροής. Στο Σχήμα 4.13 φαίνεται η αντιστοίχιση κάθε κωδικού με τις χρήσεις γης.



Σχήμα 3.11α: Χάρτης χρήσεων γης λεκανών απορροής Κρουονερίου και Μορφοβουνίου.



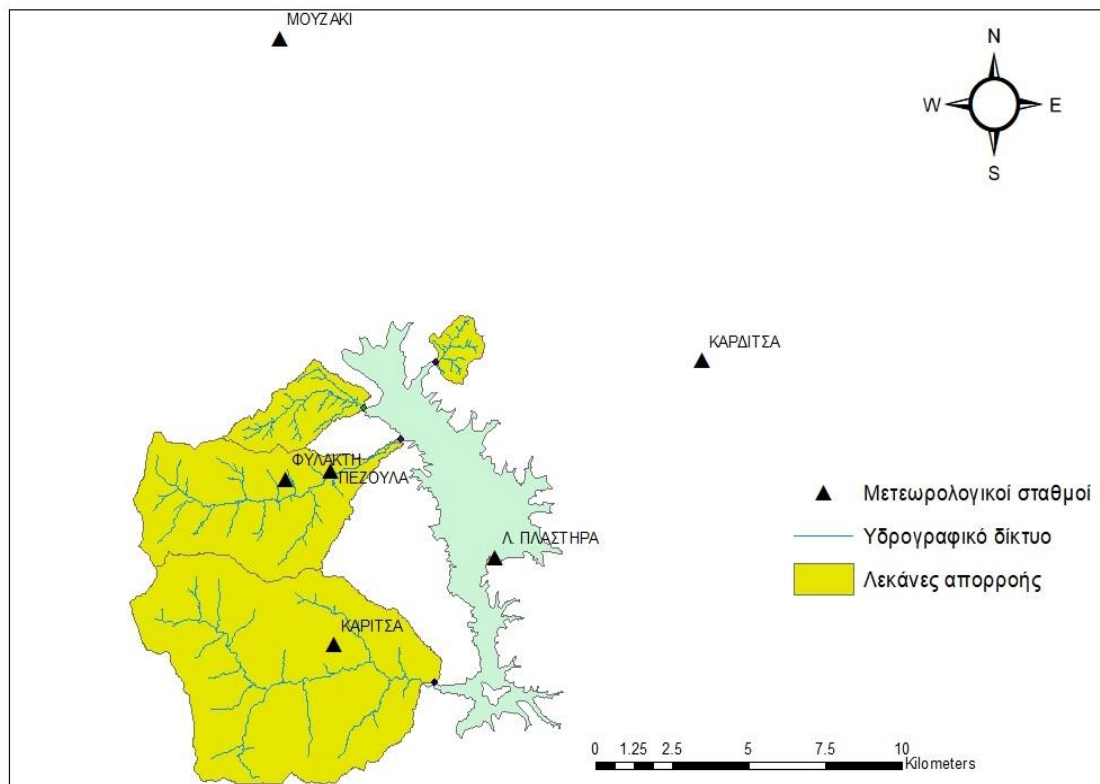
Σχήμα 3.11β: Χάρτης χρήσεων γης λεκάνης απορροής Μεγάλου Ποταμιού.



Σχήμα 3.11γ: Χάρτης χρήσεων γης λεκάνης απορροής Καρτυσιώτη.

3.2.4 Μετεωρολογικά δεδομένα

Για τον υπολογισμό των συντελεστών βροχόπτωσης και θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών Καρίτσας, Πεζούλας, Καρδίτσας και Μουζακίου από την ιστοσελίδα του Υδροσκοπίου που αποτελεί την Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας (<http://www.hydroscope.gr/>), από την διαδικτυακή πύλη του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (<https://status.meteo.gr>) για τον σταθμό της Φυλακτής, καθώς και από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προγνώσεων (<https://ecmwf.int>) για τον σταθμό της λίμνης Πλαστήρα. Οι μετεωρολογικοί σταθμοί που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.12, ενώ στον Πίνακα 3.2 φαίνονται οι μέσες ετήσιες τιμές της βροχής και της θερμοκρασίας των σταθμών, όπου ήταν διαθέσιμη η πληροφορία για αυτές, και οι οποίες προέκυψαν από επεξεργασία δεδομένων των σταθμών για μηνιαίες τιμές τους.



Σχήμα 3.12: Θέσεις μετεωρολογικών σταθμών.

Πίνακας 3.2: Μέση ετήσια βροχόπτωση και θερμοκρασία μετεωρολογικών σταθμών.

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΣΤΑΘΜΟΥ	(WGS84) Τετμημένη, Τεταγμένη, Υψόμετρο Σταθμού (m)	Χρονική διάρκεια μετρήσεων βροχόπτωσης	Μέση Ετήσια Βροχόπτωση (mm)	Χρονική διάρκεια μετρήσεων θερμοκρασίας	Μέση ετήσια Θερμοκρασία (°C)
ΦΥΛΑΚΤΗ	39.3028, 21.6782, 1150	01/10/2014- 30/09/2021	1395	01/10/2014- 30/09/2021	12
ΜΠΕΖΟΥΛΑ	39.3061, 21.6950, 931.3	01/10/1997- 30/09/2001	1533		-
ΚΑΡΙΤΣΑ	39.2594, 21.6976, 1074.3	01/10/1997- 30/09/2001	1604		-
ΚΑΡΔΙΤΣΑ	39.3609, 21.9043, 106.7	01/10/1997- 30/09/2001	533	01/10/1997- 30/09/2001	19.8
ΜΟΥΖΑΚΙ	39.4301, 21.6648, 226.2	01/10/1997- 30/09/2001	733	01/10/1997- 30/09/2001	16.7
ΛΙΜΝΗ ΠΛΑΣΤΗΡΑ	39.2980, 21.7544, 786		-	01/10/1997- 30/09/2001	13.4

4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

4.1 Γεωμορφολογική ανάλυση

Προκειμένου να γίνει καθορισμός των ορίων των τεσσάρων λεκανών απορροής που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε γεωμορφολογική ανάλυση σε όλην την περιοχή της Θεσσαλίας για την οποία χορηγήθηκε DEM. Η γεωμορφολογική ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον ArcGIS (ArcMap 10.5.1) με χρήση της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS. Στη συνέχεια, έχοντας το DEM της περιοχής (Σχήμα 3.8), πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από εντολές, μέχρι να σχηματιστούν τα φυσικά όρια των λεκανών απορροής του ρέματος Καρυτσιώτη, του ρέματος Μεγάλο Ποτάμι, του Κρυονερίου και του Μορφοβουνίου, οι οποίες συνιστούν την περιοχή μελέτης για την εκτίμηση της διάβρωσης και της στερεοαπορροής.

4.1.1 Χρήση της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS

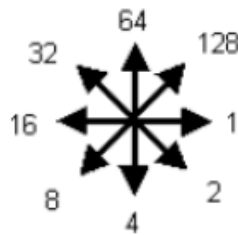
Η εργαλειοθήκη του HEC-GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modeling Extension) πρόκειται για μια επέκταση τους λογισμικού ArcGIS και του εργαλείου Spatial Analyst που χρησιμοποιείται ως μια γεωχωρική υδρολογική εργαλειοθήκη. Κάνοντας χρήση των εντολών του HEC-GeoHMS σχηματίζεται η λεκάνη απορροής του υδρογραφικού δικτύου και στη συνέχεια οι υδρολογικές παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν. Αυτό μπορεί να γίνει είτε από τις παραμέτρους του κάθε φατνίου (pixel) ξεχωριστά, είτε από τις μέσες τιμές των χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής (User's Manual HEC-GeoHMS, 2013).

Για τα παραπάνω, γίνεται χρήση του πακέτου εντολών Preprocessing και Project Setup της εργαλειοθήκης του HEC-GeoHMS. Αρχικά, χρησιμοποιείται το πακέτο εντολών Preprocessing, με τις οποίες κάθε μοντέλο εδάφους (terrain) προεπεξεργάζεται βήμα προς βήμα έως ότου προκύψει το υδρογραφικό δίκτυο. Τα βήματα που ακολουθούνται από το πακέτο εντολών του Preprocessing είναι τα εξής:

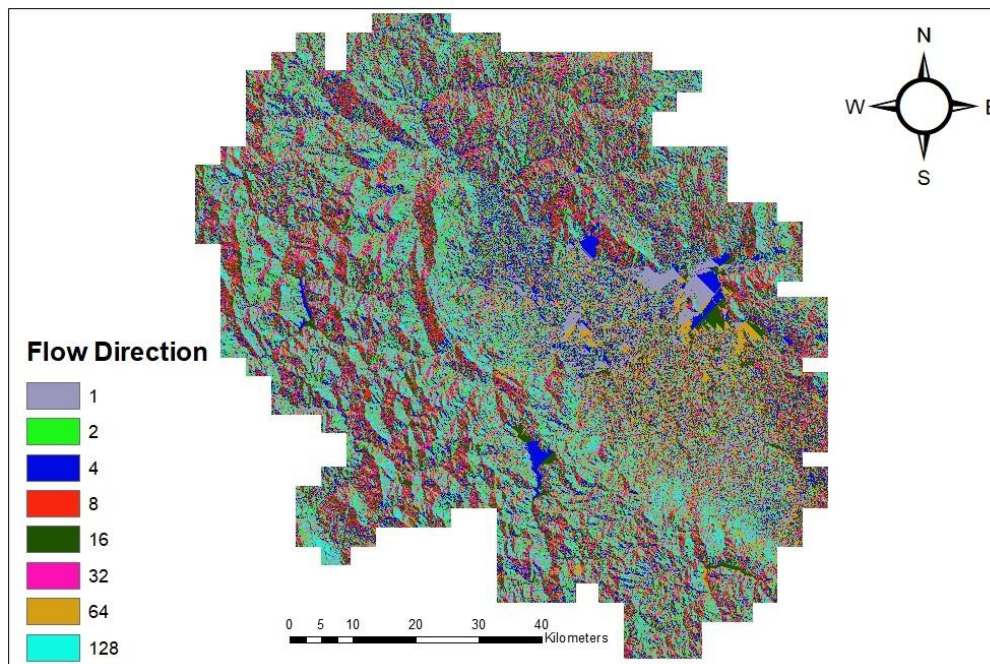
- Το ενοποιημένο DEM του συγκεκριμένου κομματιού της Θεσσαλίας (Σχήμα 3.8) περιέχει κάποια βυθίσματα, δηλαδή περιοχές στις οποίες δεν υπάρχει πληροφορία για το υψόμετρο ή είναι εσφαλμένα μηδενικό. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται ως πρώτο βήμα η εντολή Fill Sinks που διορθώνει τα βυθίσματα δίνοντας μεγαλύτερες τιμές για το υψόμετρο σε κάθε

rixel στο οποίο συμβαίνει βύθιση μέχρι να φτάσουν το επίπεδο της γειτονικής επιφάνειας του εδάφους.

- Ακολουθώς, μέσω της εντολής Flow Direction δημιουργείται ο κάνναβος διεύθυνσης απορροής. Η βασική αρχή του καννάβου είναι ότι η απορροή ξεκινά από κάθε εικονοστοιχείο του ψηφιακού μοντέλου εδάφους προς ένα και μόνο εικονοστοιχείο από τα 8 γειτονικά του ανάλογα με την κλίση του (Τσούλος, 2015). Ανάλογα με τη διεύθυνση απορροής το εικονοστοιχείο παίρνει μια τιμή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, η τιμή 1 αντιστοιχεί στα ανατολικά, η τιμή 2 στα νοτιοανατολικά, η τιμή 4 στα νότια, η τιμή 8 στα νοτιοδυτικά, η τιμή 16 στα δυτικά, η τιμή 32 στα βορειοδυτικά, η τιμή 64 στα βόρεια, και η τιμή 128 στα βορειοανατολικά. Ο κάνναβος κατεύθυνσης ροής που προέκυψε μετά την εκτέλεση της εντολής φαίνεται στο Σχήμα 4.2.

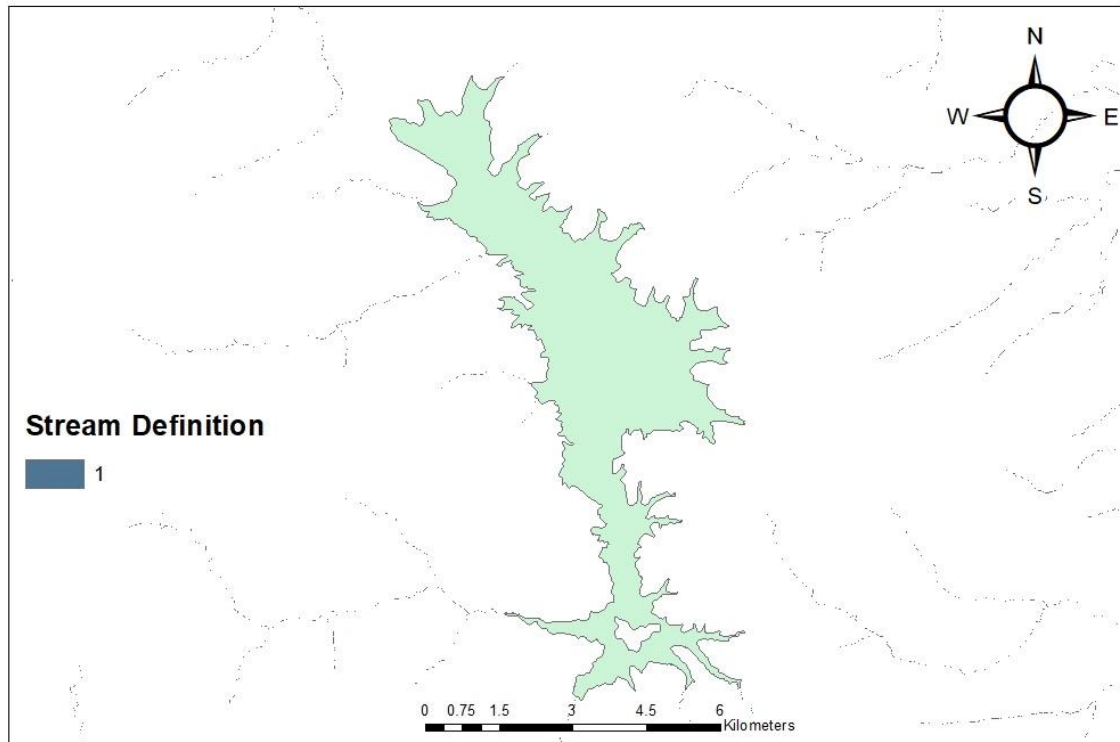


Σχήμα 4.1: Τιμή κεντρικού εικονοστοιχείου ανάλογα με τον κάνναβο διεύθυνσης απορροής (Πηγή: User's Manual HEC-GeoHMS, US Army Corps of Engineers).



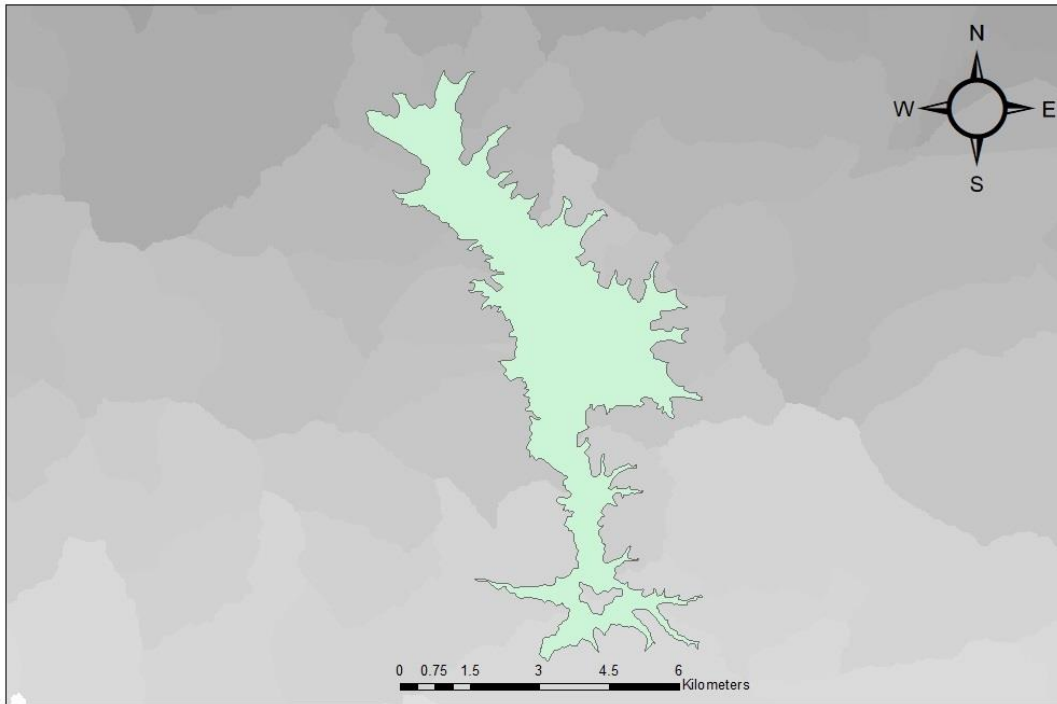
Σχήμα 4.2: Κάνναβος κατεύθυνσης ροής της περιοχής για την οποία δόθηκε το DEM.

- Μέσω της εντολής Flow Accumulation προκύπτει ο κάνναβος συγκεντρωτικής ροής, δηλαδή καθορίζεται ο αριθμός των ανάντη ψηφίδων οι οποίες απορρέουν προς κάθε ψηφίδα. Η πληροφορία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς ψηφίδες με μεγάλο αριθμό συνιστούν τον τόπο συγκέντρωσης της ροής που υποδεικνύει ύπαρξη πιθανού ποταμού.
- Από την εντολή Stream Definition γίνεται η επιλογή όλων των κελιών στα οποία η συγκέντρωση ροής είναι μεγαλύτερη από μια ελάχιστη τιμή, η οποία προσδιορίζεται από τον χρήστη. Εκφράζεται ως το κατώφλι που ορίζεται ως ο αριθμός των κελιών ο οποίος καθορίζει ποια κελιά αποτελούν υδρογραφικό δίκτυο έχοντας σαν δεδομένο τον κάνναβο συγκεντρωτικής ροής. Το κατώφλι εκφράζεται σε pixels τα οποία σχηματίζουν μια έκταση απορροής σε km^2 ανάντη του υδρογραφικού δικτύου η οποία εξαρτάται και από το μέγεθος των ψηφίδων. Συνήθεις τιμές της έκτασης απορροής των υδατορευμάτων είναι $1 \text{ km}^2 - 5 \text{ km}^2$. Στην παρούσα εργασία για διαστάσεις ψηφίδας $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ χρησιμοποιήθηκε εμβαδόν 2 km^2 . Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται ο κάνναβος της εντολής για κατώφλι 2 km^2 για την περιοχή γύρω από την λίμνη Πλαστήρα.



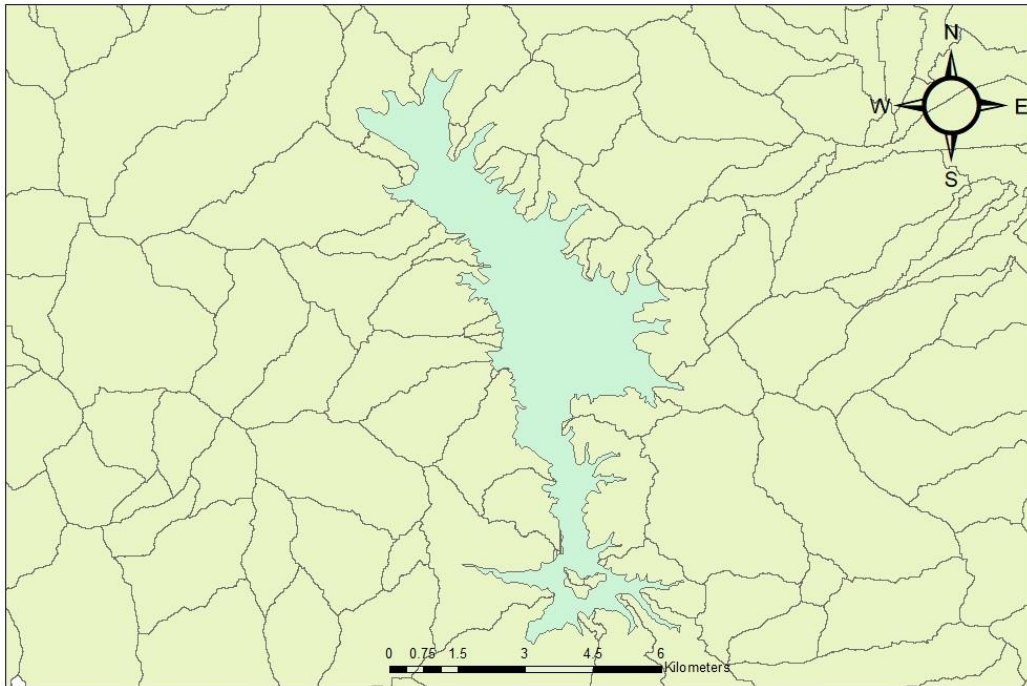
Σχήμα 4.3: Κάνναβος καθορισμού ροής μέσω του Stream Definition για την περιοχή της λίμνης.

- Με την εντολή Stream Segmentation το υδατόρευμα διαιρείται σε μικρότερα κομμάτια, τα οποία είναι τμήματα του υδατορεύματος που βρίσκονται ανάμεσα στις διασταυρώσεις. Δεδομένα εισόδου για το βήμα αυτό είναι το κατώφλι και ο κάνναβος κατεύθυνσης ροής.
- Ακολουθεί η εντολή Catchment Grid Delineation, με την οποία σχεδιάζονται, σύμφωνα με το Σχήμα 4.4, οι λεκάνες απορροής για κάθε τμήμα υδατορεύματος που προέκυψε από το προηγούμενο βήμα.



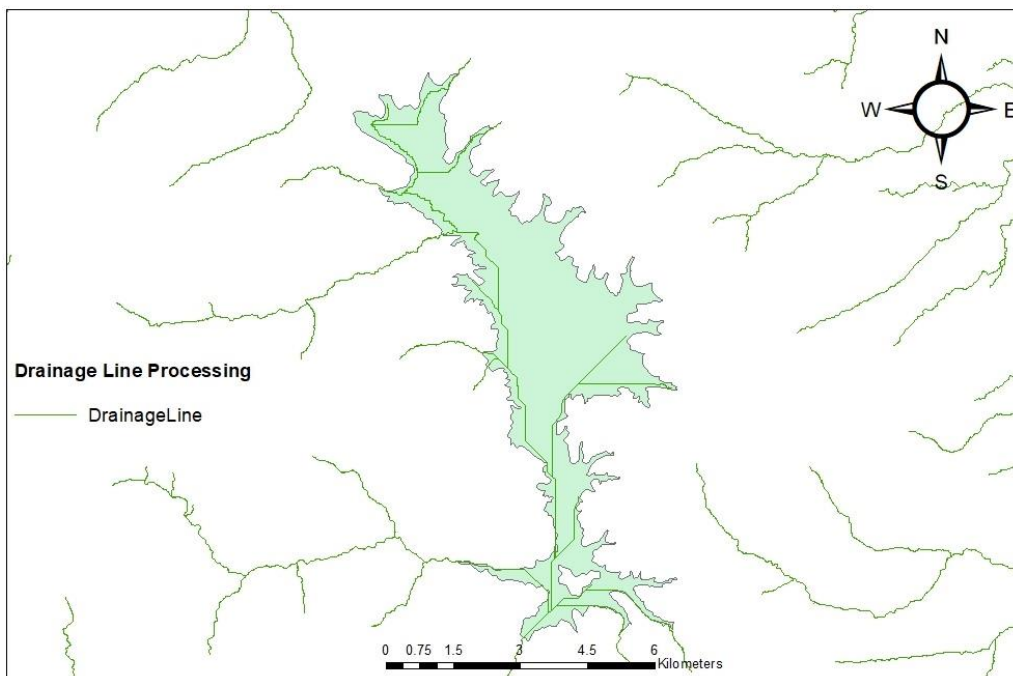
Σχήμα 4.4: Δημιουργία υπολεκανών για κάθε τμήμα υδατορεύματος.

- Επόμενο βήμα είναι η επιλογή της εντολής *Catchment Polygon Processing* με την οποία, επειδή η μορφή των υπολεκανών είναι σε μορφή *grid*, μετατρέπονται σε διανυσματική μορφή (*vector*) σύμφωνα με το Σχήμα 4.5. Σαν δεδομένο εισόδου δέχεται την προηγούμενη διαδικασία δημιουργίας υπολεκανών για κάθε τμήμα υδατορεύματος.



Σχήμα 4.5: Μετατροπή υπολεκανών κάθε τμήματος υδατορεύματος σε διανυσματική μορφή.

- Ομοίως, η εντολή Drainage Line Processing μετατρέπει το υδρογραφικό δίκτυο σε διανυσματική μορφή, σύμφωνα με το Σχήμα 4.6, έχοντας ως δεδομένα εισόδου τον κάνναβο κατεύθυνσης ροής και το διαχωρισμό του υδρογραφικού δικτύου.

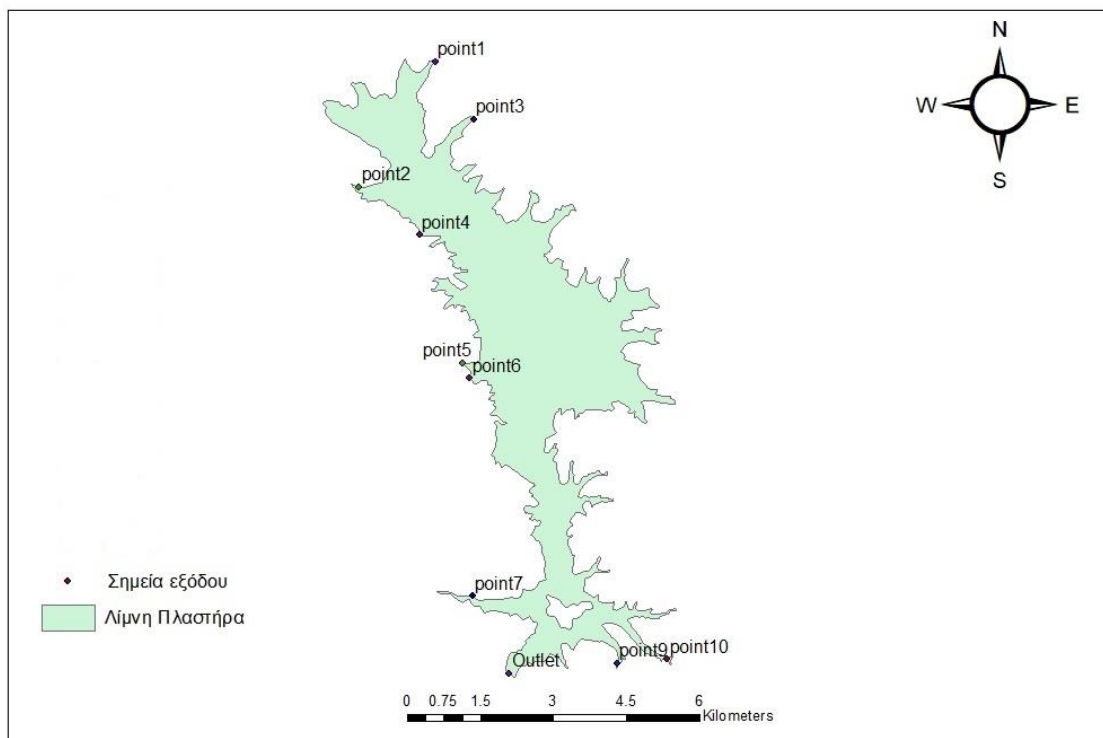


Σχήμα 4.6: Υδρογραφικό δίκτυο στη διανυσματική του μορφή.

4.1.2 Σχηματισμός των εξεταζόμενων Λεκανών Απορροής

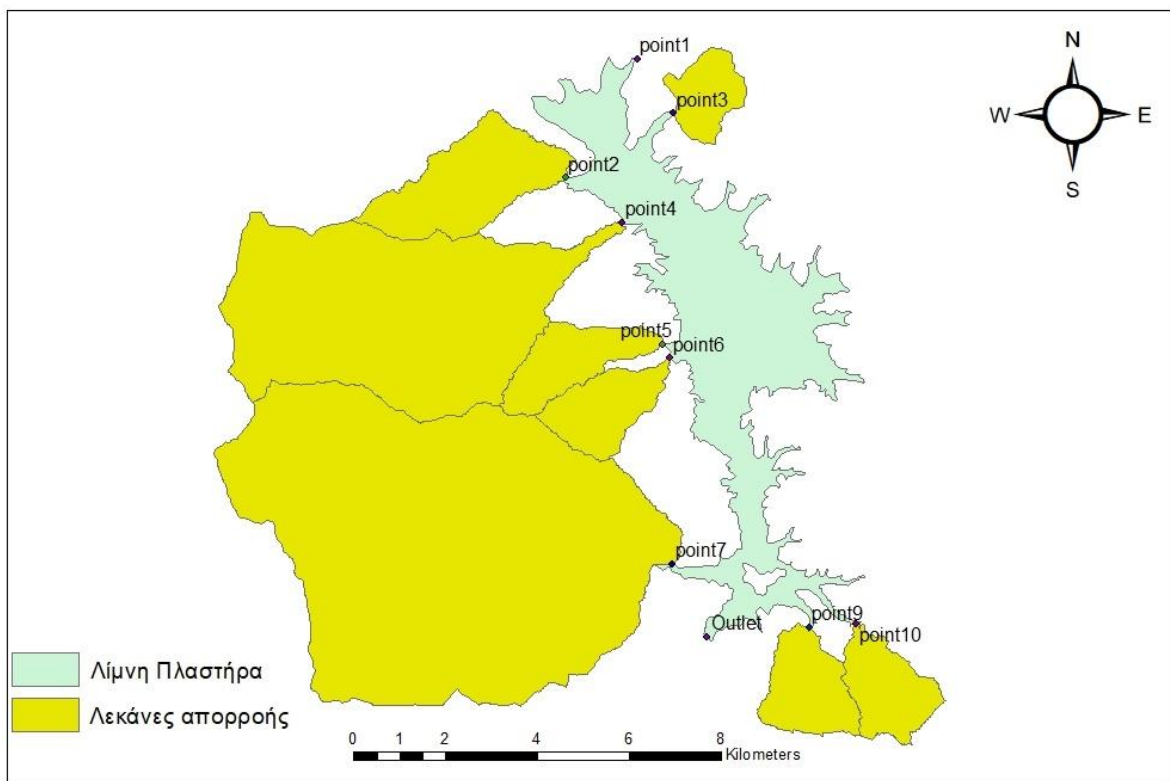
Μετά τη δημιουργία μέσω του HEC-GeoHMS των υπολεκανών στο σύνολο της περιοχής μελέτης, καθώς και των αντίστοιχων υδρογραφικών δικτύων, σχηματίζονται οι λεκάνες οι οποίες συμβάλλουν συγκεκριμένα στην απορροή προς την λίμνη. Αυτό υλοποιείται με την εξής διαδικασία:

- Μέσω του εργαλείου Editor δημιουργούνται νέα διανυσματικά αρχεία σημείου για κάθε μια υπολεκάνη τα οποία αντιστοιχούν στην έξοδο του κύριου υδατορεύματος κάθε μιας προς τη λίμνη. Συγκεκριμένα, αυτό υλοποιείται με την επιλογή της εντολής Feature Class στην γεωβάση στην οποία γίνεται η εργασία και επιλέγοντας την δημιουργία Point Type Vector αρχείου στο σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ87. Τέλος, με την επιλογή Edit Features και Start Editing ψηφιοποιείται στον χάρτη κάθε σημείο εξόδου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Σημειώνεται ότι το Outlet αποτελεί την έξοδο της λίμνης και το σημείο του φράγματος του ταμιευτήρα Πλαστήρα.



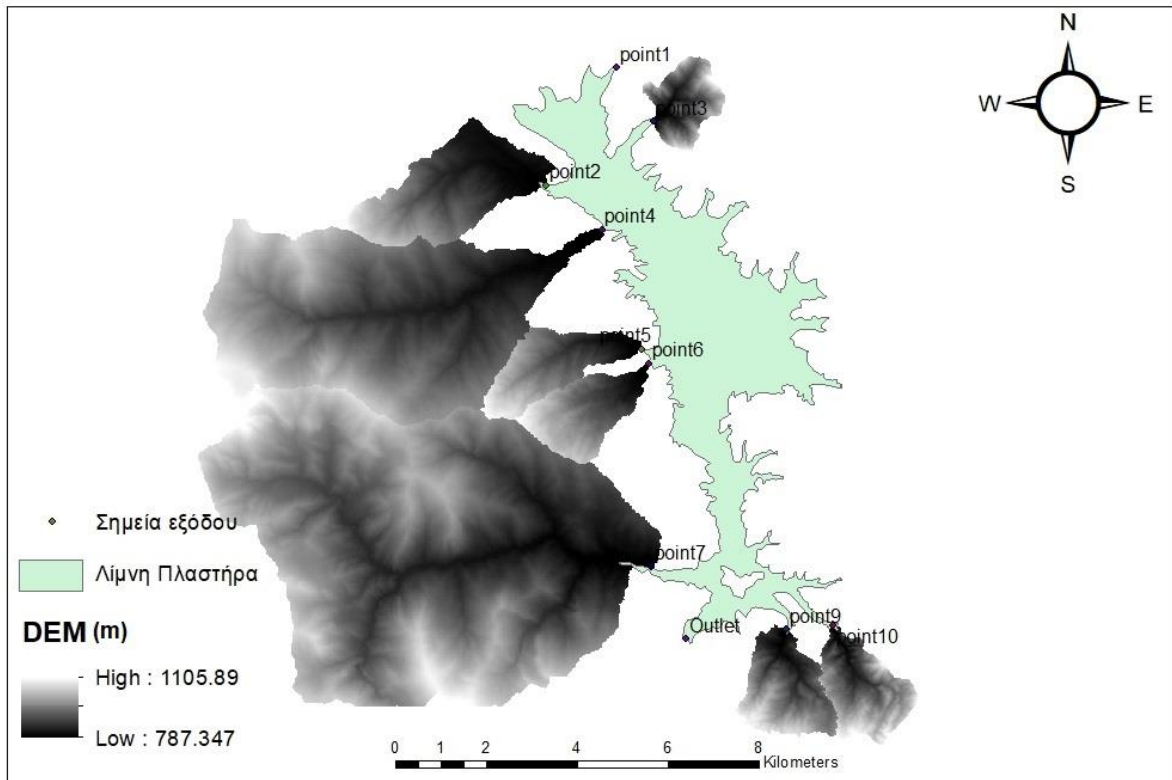
Σχήμα 4.7: Σημεία εξόδου λεκανών απορροής στη λίμνη.

- Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την εντολή Watershed για κάθε σημείο εξόδου που δημιουργήθηκε, δημιουργήθηκαν οι λεκάνες απορροής οι οποίες συνεισφέρουν στην απορροή προς τη λίμνη Πλαστήρα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8. Σαν raster εισόδου επιλέγεται το αρχείο που προέκυψε μέσω της εντολής Flow Direction η οποία παρουσιάστηκε προηγουμένως στην διαδικασία του HEC-GeoHMS. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας κρατήθηκαν προς εξέταση οι τέσσερις μεγαλύτερες σε έκταση λεκάνες απορροής που συνεισφέρουν στην απορροή προς τον ταμιευτήρα. Σημειώνεται ότι για το Point 1 δεν δημιουργήθηκε κάποια λεκάνη απορροής.



Σχήμα 4.8: Λεκάνες απορροής που σχηματίστηκαν με την εντολή Watershed.

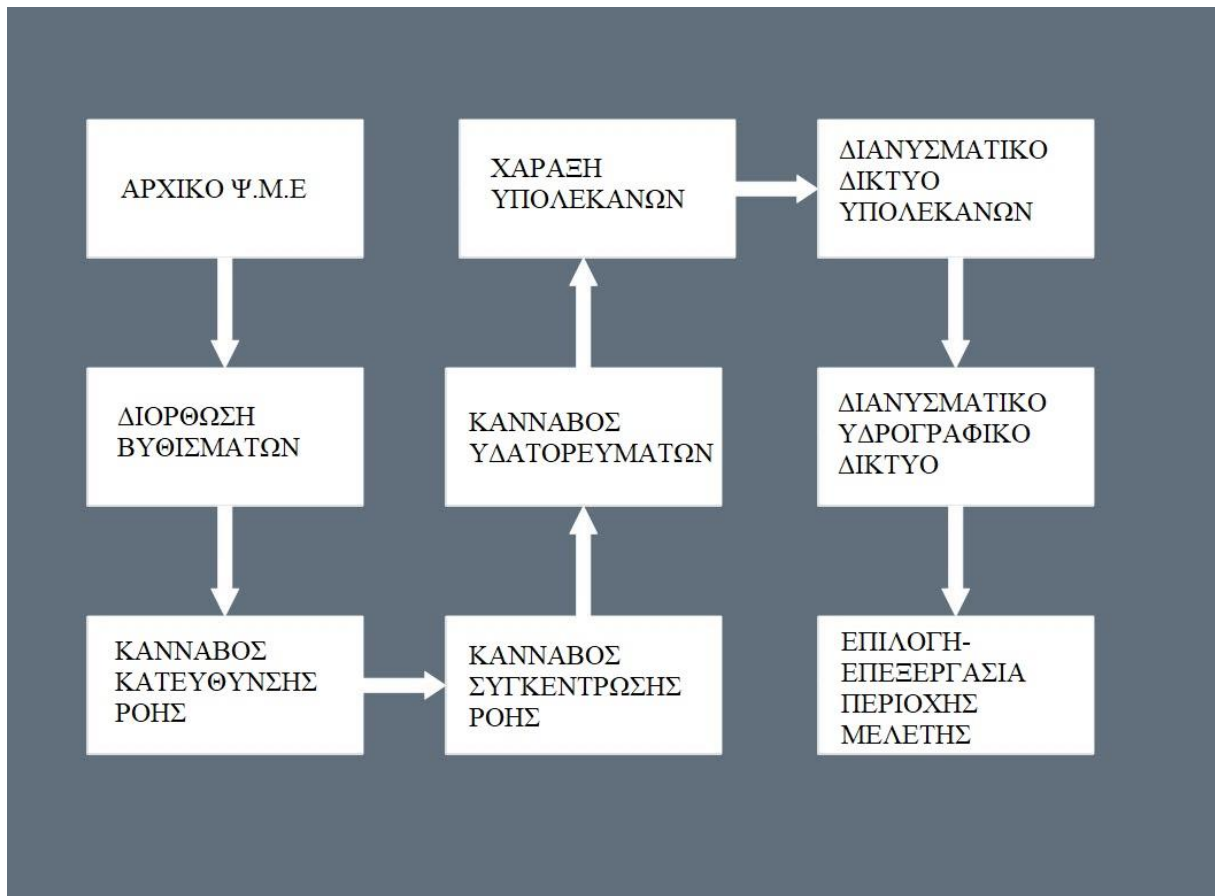
- Καθώς τα αρχεία των λεκανών απορροής βρίσκονται σε ψηφιδωτή (raster) μορφή, μετατρέπονται σε διανυσματική μορφή (vector) μέσω του εργαλείου Raster to Polygon. Το κάθε πολύγωνο χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως όριο της μάσκας για την εξαγωγή από το βασικό DEM ενός περικομμένου Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους για την κάθε μια από τις λεκάνες απορροής. Αυτό υλοποιείται μέσω της εντολής Extract by Mask. Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζονται τα τελικά DEM για κάθε λεκάνη απορροής γύρω από τη λίμνη Πλαστήρα.



Σχήμα 4.9: Ψ.Μ.Ε για κάθε λεκάνη απορροής.

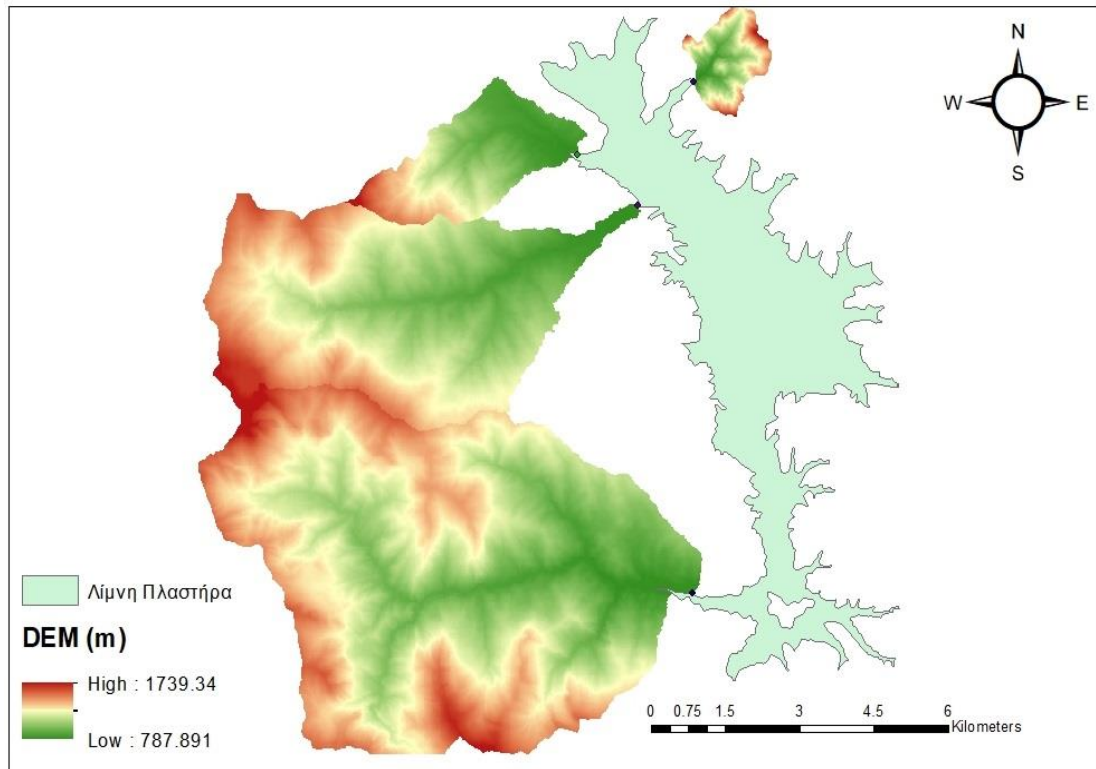
- Τέλος, εκτελείται η εντολή Stream Order μέσω της οποίας εκχωρείται μια αριθμητική σειρά σε τμήματα ενός αρχείου raster τα οποία αντιπροσωπεύουν κλάδους ενός γραμμικού δικτύου μέσω των μεθόδων Strahler ή Shreve. Στην προκειμένη περίπτωση ακολουθείται η μέθοδος Strahler και με σκοπό την ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου το οποίο παράχθηκε μέσω των βημάτων που ακολουθήθηκαν στις διαδικασίες του HEC-GeoHMS. Η ταξινόμηση κατά Strahler εκτιμά ως 1ης τάξης εκείνους τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου οι οποίοι δε δέχονται απορροή από άλλα μικρότερα υδατορεύματα. Σε κάθε συμβολή δύο κλάδων 1ης τάξης προκύπτει κλάδος 2ης τάξης, ενώ στη συμβολή δύο κλάδων 2ης τάξης προκύπτει κλάδος 3ης τάξης κ.ο.κ. Στη συμβολή δύο κλάδων διαφορετικής τάξης ο κλάδος που προκύπτει διατηρεί τη μεγαλύτερη από τις τάξεις των συμβαλλόμενων κλάδων (Strahler, 1975). Με το εργαλείο Stream to Feature μετατρέπεται το ιεραρχημένο υδρογραφικό δίκτυο από raster σε vector μορφή και προκύπτει το υδρογραφικό δίκτυο κάθε λεκάνης σε διανυσματική.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στα παραπάνω υποκεφάλαια παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 4.10.

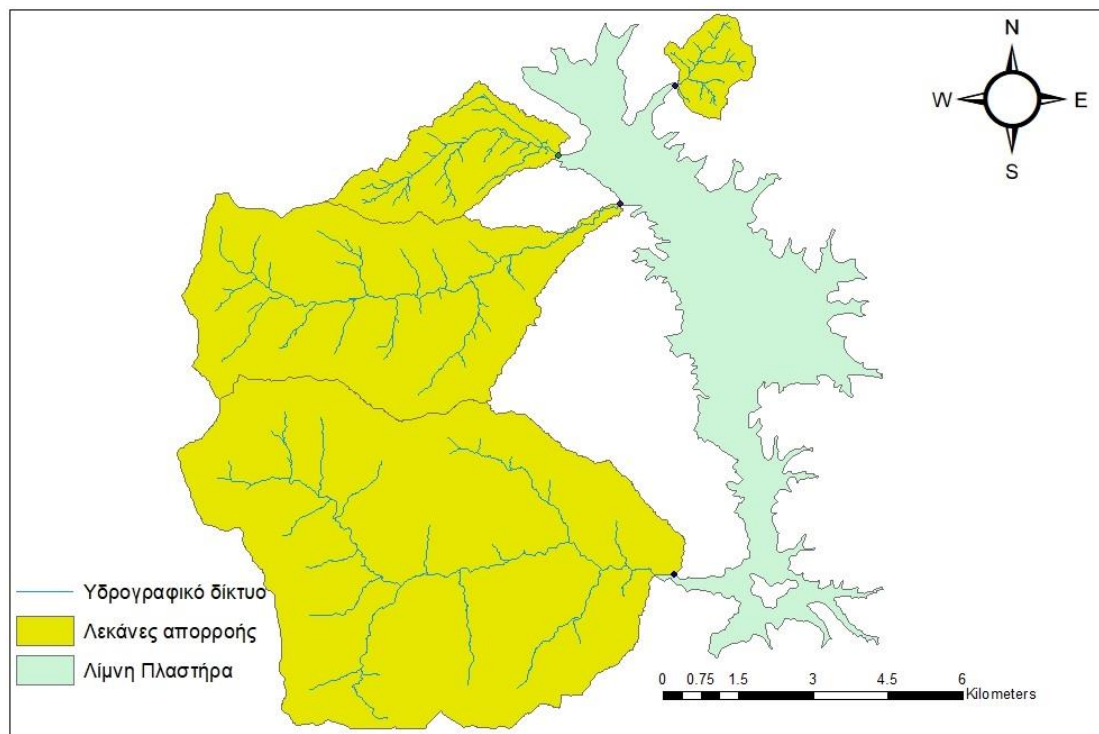


Σχήμα 4.10: Διάγραμμα ροής προεπεξεργασίας δεδομένων στο περιβάλλον του ArcGIS μέσω της επέκτασης HEC-GeoHMS και των εργαλείων του λογισμικού.

Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους και τα υδρογραφικά δίκτυα των τεσσάρων λεκανών απορροής που εξετάζονται στην παρούσα εργασία (ρέματος Καρυτσιώτη, ρέματος Μεγάλο Ποτάμι, Κρουνερίου, Μορφοβουνίου) και σχηματίστηκαν με τις παραπάνω εργασίες παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.11α και 4.11β.



Σχήμα 4.11α: Ψ.Μ.Ε των εξεταζόμενων λεκανών απορροής.



Σχήμα 4.11β: Υδρογραφικό δίκτυο των εξεταζόμενων λεκανών απορροής.

Στη συνέχεια, προσδιορίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως το εμβαδόν και η περίμετρος μέσω του Attribute Table των θεματικών επιπέδων των λεκανών απορροής που

δημιουργήθηκαν στα παραπάνω βήματα. Ομοίως από το Attribute Table των θεματικών επιπέδων των υδρογραφικών δικτύων προσδιορίστηκαν τα μήκη των κυρίων υδατορευμάτων τους, ενώ από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους σε κάθε μία από τις τέσσερις λεκάνες υπολογίστηκε το μέσο υψόμετρο κάθε μίας. Τα αποτελέσματα έχουν παρουσιαστεί στον Πίνακα 3.1.

4.2 Υδρολογική ανάλυση

Η υδρολογική ανάλυση αφορά την ανάντη λεκάνη η οποία απορρέει σε κάθε μία από τις θέσεις εξόδου που σχηματίστηκαν στην διαδικασία που ακολουθήθηκε προηγουμένως και έχει ως αποτέλεσμα ένα πλημμυρογράφημα από το οποίο μπορεί να υπολογισθεί η παροχή αιχμής στις θέσεις αυτές. Επίσης, αν και στην παρούσα εργασία δεν πραγματοποιείται η διαδικασία αυτή, το πλημμυρογράφημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δεδομένο εισόδου για την υδραυλική προσομοίωση στην περιοχή κατάντη του σημείου εξόδου.

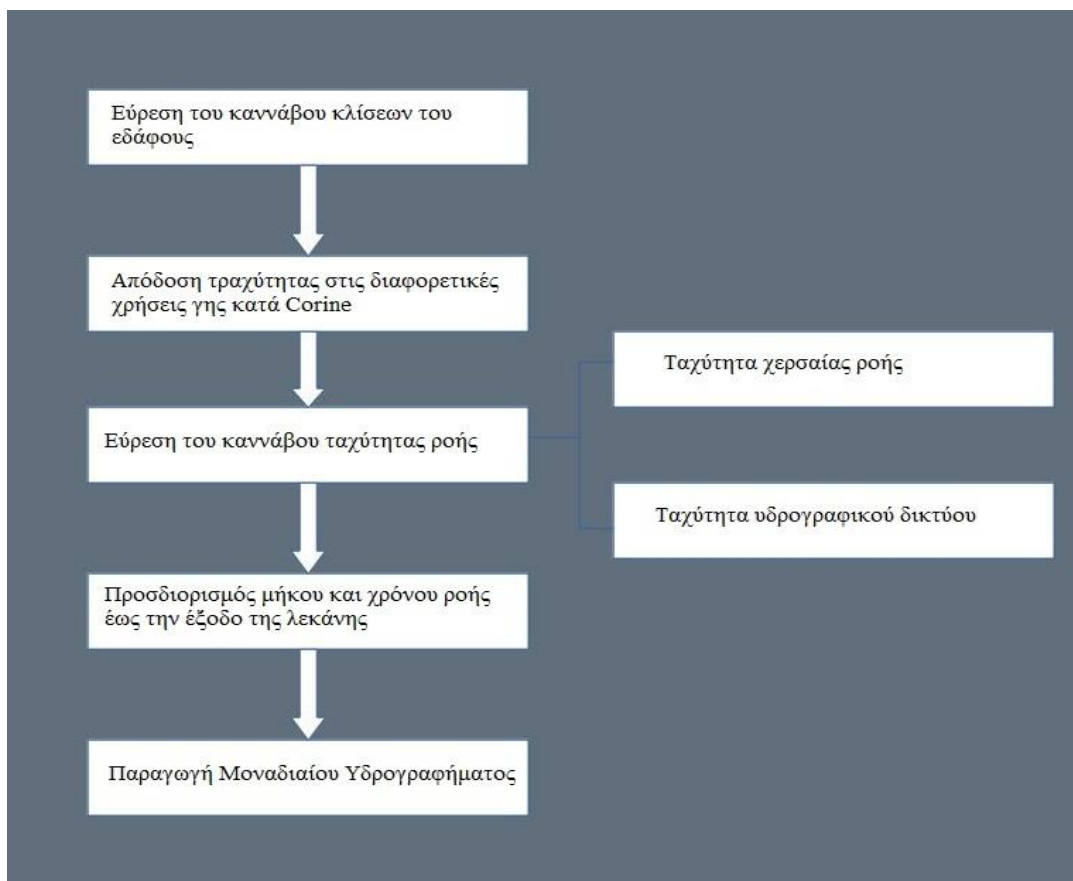
4.2.1 Εκτίμηση ΜΥΓ με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών

Για την εκτίμηση του ΜΥΓ, το οποίο περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2.4, για κάθε λεκάνη απορροής, χρησιμοποιείται το μοντέλο βροχής-απορροής των ισόχρονων καμπυλών. Με τον όρο ισόχρονες καμπύλες περιγράφεται εκείνος ο γεωμετρικός τόπος των σημείων από τα οποία η απορροή ισαπέχει χρονικά μέχρι την έξοδο της λεκάνης (Καββαδά, 2012). Οι καμπύλες αυτές αφενός δεν μπορούν να διασταυρωθούν μεταξύ τους, αφού η κάθε μία εκφράζει διαφορετική χρονική απόσταση από την έξοδο της λεκάνης, αφετέρου δύναται να εκτείνονται μόνο εντός των ορίων της λεκάνης απορροής (Dooge, 1959). Η μέθοδος είναι χρήσιμη διότι μπορεί να αξιοποιηθεί για τον μετασχηματισμό της ενεργούς βροχόπτωσης σε απορροή λαμβάνοντας υπόψη τον χρόνο που απαιτείται ώστε να καταλήξει το νερό από κάθε σημείο της λεκάνης στην έξοδό της.

Στα πλαίσια της εφαρμογής της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών για την παραγωγή των ΜΥΓ στην παρούσα εργασία, έγινε χρήση των λογισμικών ArcGIS και της επέκτασης HEC-GeoHMS. Επιλέχθηκαν οι μεγαλύτερες σε έκταση λεκάνες απορροής που σχηματίστηκαν από τα βήματα του κεφαλαίου 4.1 (λεκάνη ρέματος Καρυτσιώτη, λεκάνη ρέματος Μεγάλο Ποτάμι, λεκάνη Κρυονερίου), όμως για λόγους ορθότερης χωρικής κατανομής των μεγεθών που επρόκειτο να εκτιμηθούν συμπεριλήφθηκε στην παραπάνω διαδικασία και η λεκάνη απορροής

στο ανατολικό τμήμα της όχθης της λίμνης (λεκάνη Μορφοβουνίου) παρόλο που δεν καλύπτει σημαντικό χώρο ως λεκάνη. Τα δεδομένα εισόδου είναι το DEM, το υδρογραφικό δίκτυο, του οποίου η κατανομή προέκυψε από την γεωμορφολογική ανάλυση, και ο χάρτης χρήσεων γης (Corine, 2018), για κάθε λεκάνη.

Η διαδικασία πραγματοποιείται σε τέσσερις θέσεις ενδιαφέροντος, όσα είναι τα σημεία εξόδου σε κάθε μία από τις εξεταζόμενες λεκάνες απορροής. Σημειώνεται ότι για να γίνει η εφαρμογή της μεθόδου χρειάστηκε αρχικά να μετατραπούν οι καννάβοι των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους των λεκανών από διαστάσεις φατνωμάτων 5 m x 5 m , σε διαστάσεις 30 m x 30 m. Ο σκοπός του βήματος αυτού ήταν η ομαλότερη εκτέλεση των εντολών σε περιβάλλον ArcGIS καθώς η ανάλυση 5 m x 5 m είναι τέτοια που συχνά δημιουργεί προβλήματα σε αυτή. Η μετατροπή έγινε μέσω της εντολής Resample χρησιμοποιώντας την διγραμμική παρεμβολή (Bilinear Resampling Technique). Στο παρακάτω Σχήμα 4.12 συνοψίζονται τα βήματα που ακολουθούνται για την εφαρμογή της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών.



Σχήμα 4.12: Βήματα υλοποίησης της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών.

Αρχικά, δημιουργείται ο κάνναβος των κλίσεων εδάφους για την περιοχή μελέτης με χρήση της εντολής Slope του ArcGIS, επιλέγοντας να δοθεί η κλίση σε ποσοστό. Έπειτα, μέσω του εργαλείου Raster Calculator παράγεται από την σχέση «float(power(“slope_per”/100.0,0.5))» ένα αρχείο raster του οποίου κάθε κελί λαμβάνει την τιμή της τετραγωνικής ρίζας της ποσοστιαίας κλίσης που υπολογίστηκε προηγουμένως.

Στη συνέχεια, αποδίδεται σε κάθε κατηγορία χρήσης γης κατά Corine μια τιμή για τον συντελεστή τραχύτητας εδάφους k. Αυτό γίνεται σύμφωνα με τον πίνακα του Σχήματος 4.13, και παράγεται ένα ψηφιδωτό αρχείο (raster) με την τιμή που αντιστοιχεί σε κάθε κελί χρησιμοποιώντας την εντολή Feature to Raster. Οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας πολλαπλασιάζονται επί 100 (k100), έτσι ώστε να είναι ακέραιοι αριθμοί σύμφωνα με τη δομή του λογισμικού στο αρχικό στάδιο των υπολογισμών, κάτι που διορθώνεται στη συνέχεια των βημάτων εκτέλεσης της μεθόδου.

3ο Επίπεδο	Manning n	k100
1.1.1	0.013	115
1.1.2		
1.2.1	0.013	115
1.2.2		
1.2.3		
1.2.4	0.013	115
1.3.1		
1.3.2		
1.3.3	0.025	60
1.4.1		
1.4.2	0.03	50
2.1.1		
2.1.2		
2.1.3	0.08	19
2.2.1		
2.2.2	0.035	43
2.2.3		
2.3.1		
2.4.1	0.04	37
2.4.2		
2.4.3	0.05	30
2.4.4		
3.1.1	0.1	15
3.1.2		
3.1.3		
3.2.1	0.04	37
3.2.2		
3.2.3	0.05	30
3.2.4		
3.3.1	0.025	60
3.3.2		
3.3.3	0.027	55
3.3.4		
3.3.5	0.01	149
4.1.1		
4.1.2	0.04	37
4.2.1		
4.2.2		
4.2.3	0.05	30
5.1.1		
5.1.2	0.07	21
5.2.1		
5.2.2		
5.2.3		

Σχήμα 4.13: Συντελεστής τραχύτητας k100 και Manning n, για κάθε κατηγορία χρήσης γης κατά CORINE (Πηγή: Μπαλτάς 2020, Παρουσίαση μαθήματος «Πλημμύρες και Αντιπλημμυρικά Έργα»)

Η ταχύτητα ροής διακρίνεται σε χερσαία (overland) και ποτάμια (overchannel). Η χερσαία ροή εξαρτάται από την κλίση του εδάφους και την τραχύτητά του, ενώ η ποτάμια βρίσκεται σε συνάρτηση με την χερσαία ταχύτητα ροής, αλλά και την ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου (Ανδρικοπούλου, 2018).

Οι ταχύτητες χειρσαίας ροής υπολογίζονται σε κάθε φατνίο σύμφωνα με την παρακάτω Εξίσωση 4.1 (Μαμάσης, 2007):

$$V \left(\frac{m}{s} \right) = k * \sqrt{\left(s \left(\frac{m}{m} \right) \right)} \quad (4.1)$$

Όπου k ο συντελεστής τραχύτητας και S η κλίση του εδάφους.

Η σχέση αυτή υπαισέρχεται στο εργαλείο Raster Calculator του ArcMap, το οποίο πραγματοποιεί τους υπολογισμούς και κατασκευάζει τον κάνναβο της χειρσαίας ροής. Σημειώνεται ότι η τάξη μεγέθους της χειρσαίας ταχύτητας ροής κυμαίνεται από 0 έως 1.5 m/s.

Για την κατασκευή του καννάβου ποτάμιας ροής, δηλαδή της ταχύτητας ροής εντός του υδρογραφικού δικτύου κάθε λεκάνης, γίνεται αρχικά η παραδοχή πως η ταχύτητα ροής αυξάνεται με την τάξη του υδρογραφικού δικτύου. Η ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου έχει προκύψει προηγουμένως από τα βήματα της γεωμορφολογικής ανάλυσης. Επομένως, ορίζοντας χειροκίνητα για κάθε τάξη μια τιμή της ταχύτητας μέσω της συνθήκης (con) του εργαλείου Raster Calculator, υπολογίζεται η αντίστοιχη ταχύτητα ροής στο υδρογραφικό δίκτυο που απεικονίζεται σε ένα αρχείο raster.

Η συνολική ταχύτητα ροής υπολογίζεται προσθέτοντας τα δύο ψηφιδωτά αρχεία, της χειρσαίας και της ποτάμιας ταχύτητας ροής, που υπολογίστηκαν σε κάθε λεκάνη. Για τον λόγο ότι τα αρχεία των ταχυτήτων εντός του υδρογραφικού δικτύου δεν έχουν τιμές για ολόκληρη την λεκάνη όπως αυτά των χειρσαίων ταχυτήτων, δηλαδή δεν έχουν κοινό τόπο σημείων, χρησιμοποιείται η εντολή Mosaic to New Raster αντί του Raster Calculator ορίζοντας την μέθοδο SUM, καθώς αθροίζονται οι ταχύτητες για να υπολογιστεί η συνολική ταχύτητα ροής.

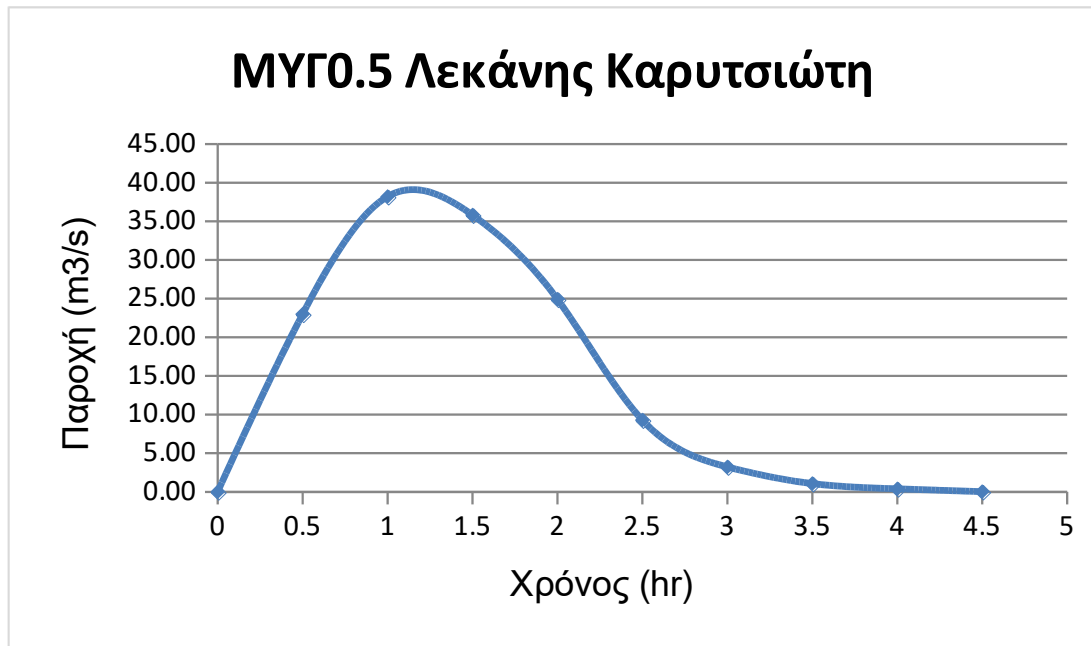
Ελέγχοντας την τάξη μεγέθους των ολικών ταχυτήτων ροής σε κάθε λεκάνη, προέκυψε ότι υπολογίστηκαν μεγάλες τιμές ταχυτήτων στις περιοχές εκείνες που η κλίση του εδάφους είναι υψηλή καθώς και στα φατνία τα οποία βρίσκονται εντός του υδρογραφικού δικτύου. Αντιθέτως, στις περιοχές με μικρές τιμές k100 δεν αντιστοιχούσαν μεγάλες τιμές ταχύτητας ροής.

Στη συνέχεια υπολογίζεται ένας κάνναβος βαρών του οποίου οι τιμές αντιστοιχούν σε 1/Velocity, κάτι που γίνεται ούτως ώστε να χρησιμοποιηθεί στο επόμενο βήμα το οποίο αφορά τον υπολογισμό του καννάβου συγκεντρωτικού χρόνου ροής. Ο συγκεκριμένος κάνναβος εκτιμά για κάθε κελί τον χρόνο που χρειάζεται το νερό ώστε να φτάσει από αυτό στην έξοδο

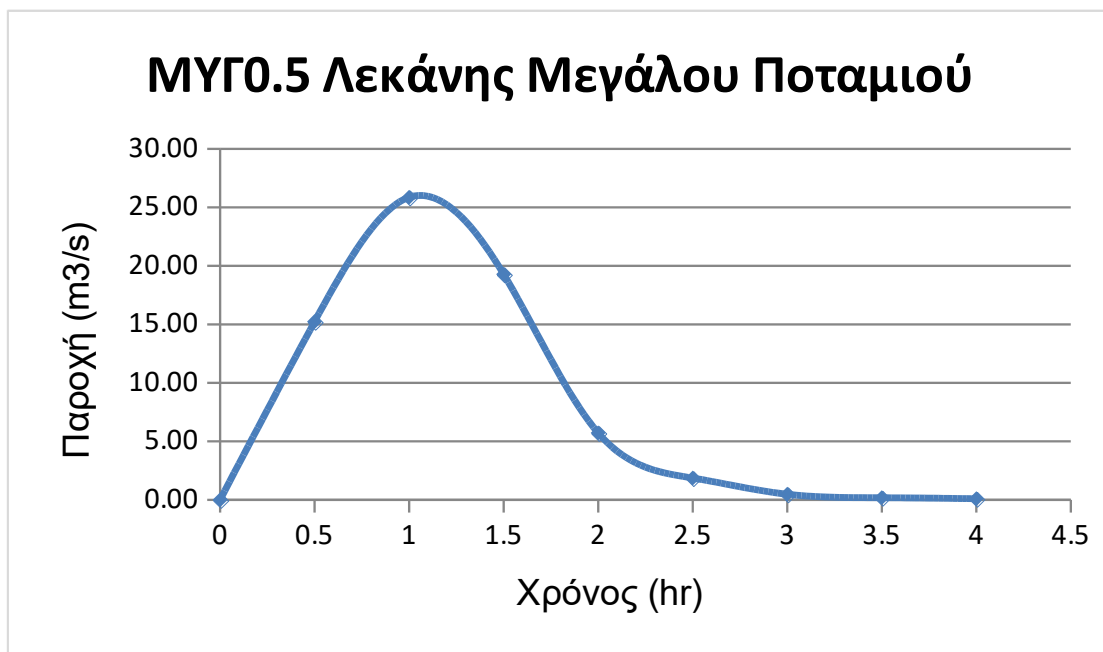
της λεκάνης απορροής. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η εντολή Flow Length η οποία υπολογίζει το μήκος διαδρομής κάθε σταγόνας από το σημείο εκκίνησης έως την έξοδο, έχοντας ως δεδομένο εισόδου τον κάρναβο βαρών που υπολογίστηκε προηγουμένως. Χρησιμοποιώντας αυτό το δεδομένο εισόδου, η χωρική απόσταση κάθε κελιού μετατρέπεται σε χρονική.

Έπειτα μέσω του Raster Calculator ανάγεται ο χρόνος συρροής σε ώρες, και μέσω της εντολής Reclassify ορίζεται η ισοδιάσταση των ισόχρονων καμπυλών για Μοναδιαίο Υδρογράφημα μισής ώρας (ΜΥΓ0.5). Στον Attribute Table του αρχείου που δημιουργείται φαίνεται ο αριθμός των pixels τα οποία απορρέουν σε αντίστοιχο χρονικό διάστημα, με χρονικό βήμα μισής ώρας. Ο αριθμός των pixels που απορρέουν στο αντίστοιχο χρονικό βήμα πολλαπλασιάζεται με το εμβαδόν του pixel 30 m x 30 m και την ένταση της βροχής, δηλαδή 10 mm/hr για ΜΥΓ μισής ώρας. Η παραπάνω διαδικασία εκτελείται χωριστά για κάθε μια από τις τέσσερις λεκάνες απορροής.

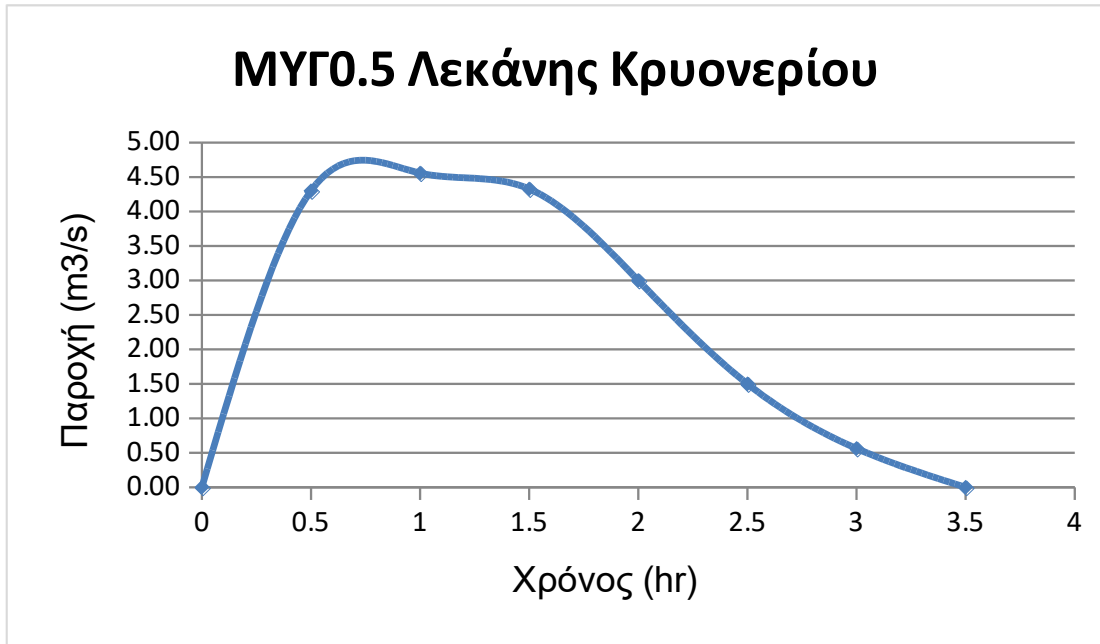
Σε ένα υπολογιστικό φύλλο Excel μπορούν να παραχθούν τα διαγράμματα των ΜΥΓ και στη συνέχεια να διορθωθούν ώστε να προκύπτει υδρολογική συνέπεια. Κρατώντας την παροχή αιχμής σταθερή, μεταβάλλονται οι αριθμοί των φατνίων σε κάθε χρονικό βήμα ώστε να προκύψει ένα ομαλό μοναδιαίο υδρογράφημα μισής ώρας σε κάθε λεκάνη απορροής. Τέλος, γίνεται ο έλεγχος $\sum Q * i = A$ ώστε να επιβεβαιωθεί η ορθότητα της επεξεργασίας των δεδομένων. Τα Μοναδιαία Υδρογραφήματα μισής ώρας που παρήχθησαν για κάθε λεκάνη απορροής παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.14α, 4.14β, 4.14γ, και 4.14δ.



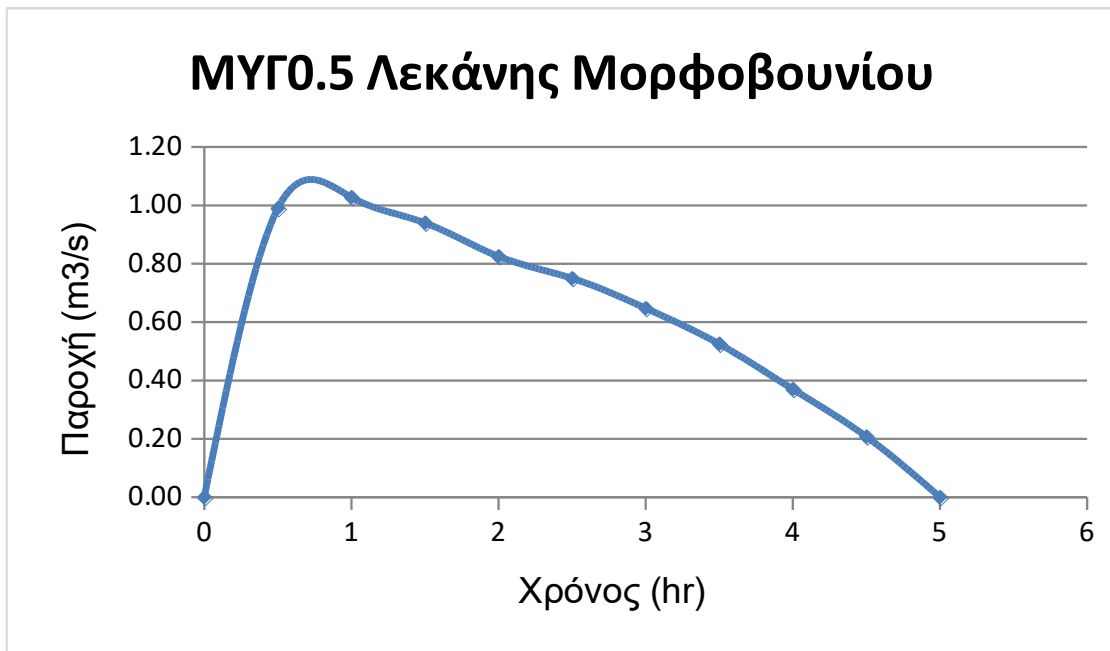
Σχήμα 4.14α: Μοναδιαίο Υδρογράφημα μισής ώρας λεκάνης απορροής ρέματος Καρυτσιώτη.



Σχήμα 4.14β: Μοναδιαίο Υδρογράφημα μισής ώρας λεκάνης απορροής ρέματος Μεγάλου Ποταμιού.



Σχήμα 4.14γ: Μοναδιαίο Υδρογράφημα μισής ώρας λεκάνης απορροής Κρυονερίου.



Σχήμα 4.14δ: Μοναδιαίο Υδρογράφημα μισής ώρας λεκάνης απορροής Μορφοβουνίου.

4.2.2 Εκτίμηση Υετογραφήματος σχεδιασμού

Όπως παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 2.5, η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κατανομής της βροχόπτωσης στον χρόνο είναι τα εναλλασσόμενα μπλοκ, από την οποία προκύπτει υετογράφημα συγκεκριμένης διάρκειας βροχής, περιόδου επαναφοράς και από συγκεκριμένη όμβρια καμπύλη.

Χρειάζεται αρχικά να εφαρμοστεί η σχέση Giandotti (Εξίσωση 2.9), ώστε να εκτιμηθεί ο χρόνος συγκέντρωσης για κάθε λεκάνη. Οι παράμετροι που υπεισέρχονται στην σχέση αυτή είναι το μήκος του κύριου υδατορεύματος, το εμβαδόν της λεκάνης απορροής, αλλά και το μέσο και το ελάχιστο υψόμετρό της.

Συγκεκριμένα, για το μήκος του κύριου υδατορεύματος χρησιμοποιείται το εργαλείο Flow Tracing του HEC-GeoHMS, αφού εντοπίζεται μέσω της εντολής Flow Length το σημείο εκείνο σε κάθε λεκάνη με το μεγαλύτερο μήκος που διανύεται κατά την απορροή του στο σημείο εξόδου. Στη συνέχεια εφαρμόζεται σε υπολογιστικό φύλλο Excel η μεθοδολογία της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ για κάθε μία λεκάνη χωριστά.

Για την λεκάνη του ρέματος Καρυτσιώτη η οποία έχει σημαντικά μεγαλύτερο εμβαδό από τις υπόλοιπες εφαρμόζεται βροχή 12 ωρών και χρησιμοποιείται η όμβρια καμπύλη του σταθμού της Καρίτσας. Για τις υπόλοιπες τρεις λεκάνες χρησιμοποιείται βροχή 6 ωρών και χρησιμοποιείται η όμβρια καμπύλη του σταθμού της Πεζούλας. Η περίοδος επαναφοράς σε κάθε μία από τις λεκάνες απορροής είναι $T = 100$ έτη. Στους παρακάτω Πίνακες 4.1α και 4.1β φαίνονται οι παράμετροι για τις όμβριες καμπύλες των σταθμών Καρίτσα και Πεζούλα.

Πίνακας 4.1α: Παράμετροι όμβριας καμπύλης σταθμού Καρίτσας.

ΥΔ	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΟΝΟΜΑ	κ	λ	ψ	θ	η
GR04	182	ΚΑΡΙΤΣΑ	0.036	327.3	0.873	0.334	0.627

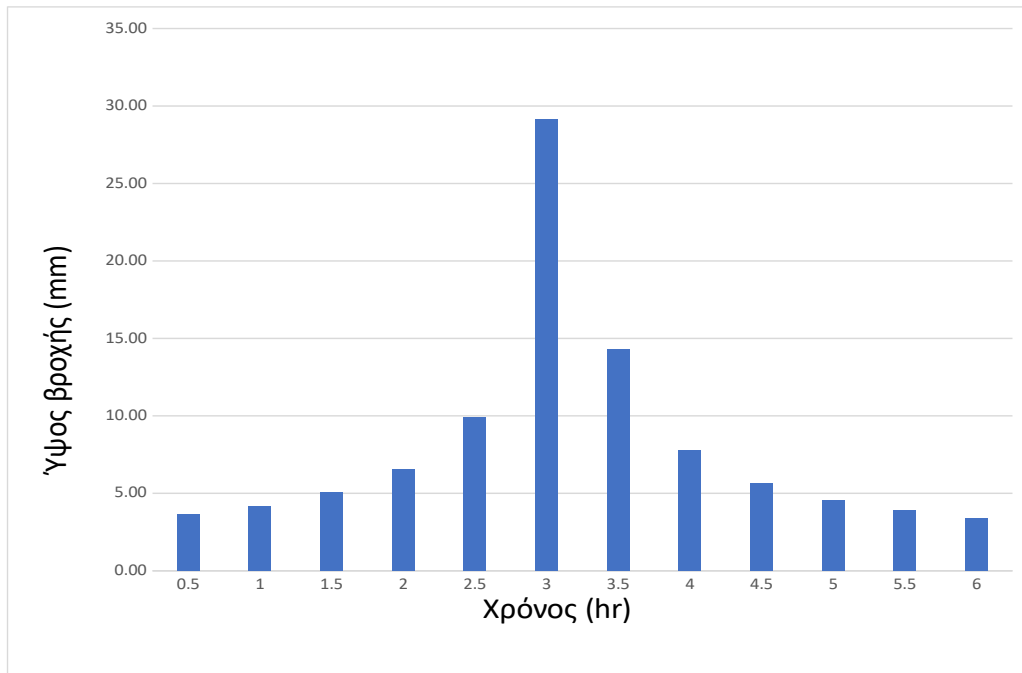
Πίνακας 4.1β: Παράμετροι όμβριας καμπύλης σταθμού Πεζούλας.

ΥΔ	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΟΝΟΜΑ	κ	λ	ψ	θ	η
GR04	200	ΜΠΕΖΟΥΛΑ	0.036	314	0.851	0.334	0.627

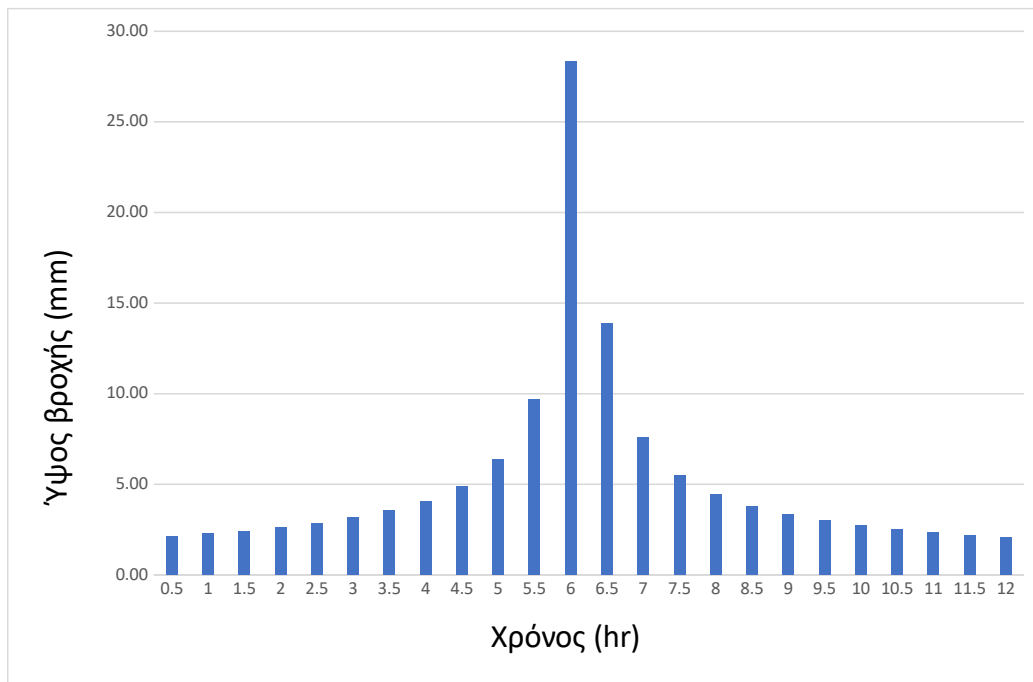
Η ένταση βροχόπτωσης σχεδιασμού για $T = 100$ έτη υπολογίζεται $i = 16.34$ mm/hr και $i = 10.46$ mm/hr για τις τρεις μικρότερες και τη μία μεγάλη από τις λεκάνες αντίστοιχα.

Με βάση την Εξίσωση 2.10 υπολογίζονται τα αθροιστικά ύψη βροχής κάθε χρονικού βήματος. Για κάθε μία από τις λεκάνες απορροής και τις αντίστοιχες παραμέτρους που τις χαρακτηρίζουν, τα ύψη βροχής τοποθετούνται κατά φθίνουσα σειρά και στη συνέχεια η κατανομή μεταβάλλεται με τέτοιο τρόπο ώστε το μεγαλύτερο ύψος βροχής να βρίσκεται στο κεντρικό χρονικό διάστημα, το αμέσως μικρότερο ύψος βροχής στο επόμενο χρονικό διάστημα από δεξιά, το αμέσως μικρότερο στο επόμενο χρονικό διάστημα από αριστερά και η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου συμπληρωθεί η χρονική κατανομή της βροχόπτωσης.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ για τις λεκάνες Μορφοβουνίου, Κρουονερίου και ρέματος Μεγάλου Ποταμιού που ανήκουν στην όμβρια καμπύλη Μπεζούλα και χρησιμοποιούν βροχή 6 ωρών ($T = 100$ έτη), καθώς και της λεκάνης ρέματος Καρυτσιώτη η οποία ανήκει στην όμβρια καμπύλη της Καρίτσα και χρησιμοποιεί βροχή 12 ωρών ($T = 100$ έτη), παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.15α και στο Σχήμα 4.15β αντίστοιχα.



Σχήμα 4.15α: Υετογράφημα σχεδιασμού με χρήση της μεθόδου εναλλασσόμενων μπλοκ για $T = 100$ έτη και $d = 6$ ώρες.

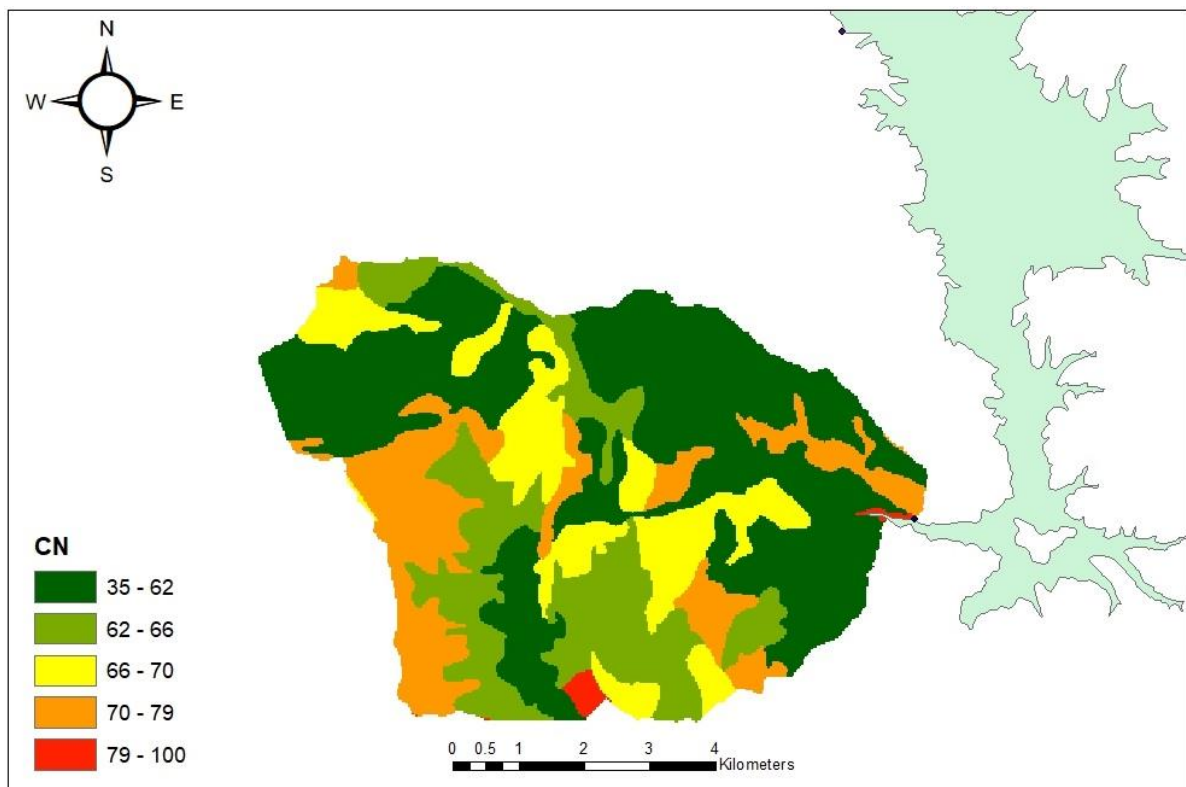


Σχήμα 4.15β: Υετογράφημα σχεδιασμού με χρήση της μεθόδου εναλλασσόμενων μπλοκ για $T = 100$ έτη και $d = 12$ ώρες.

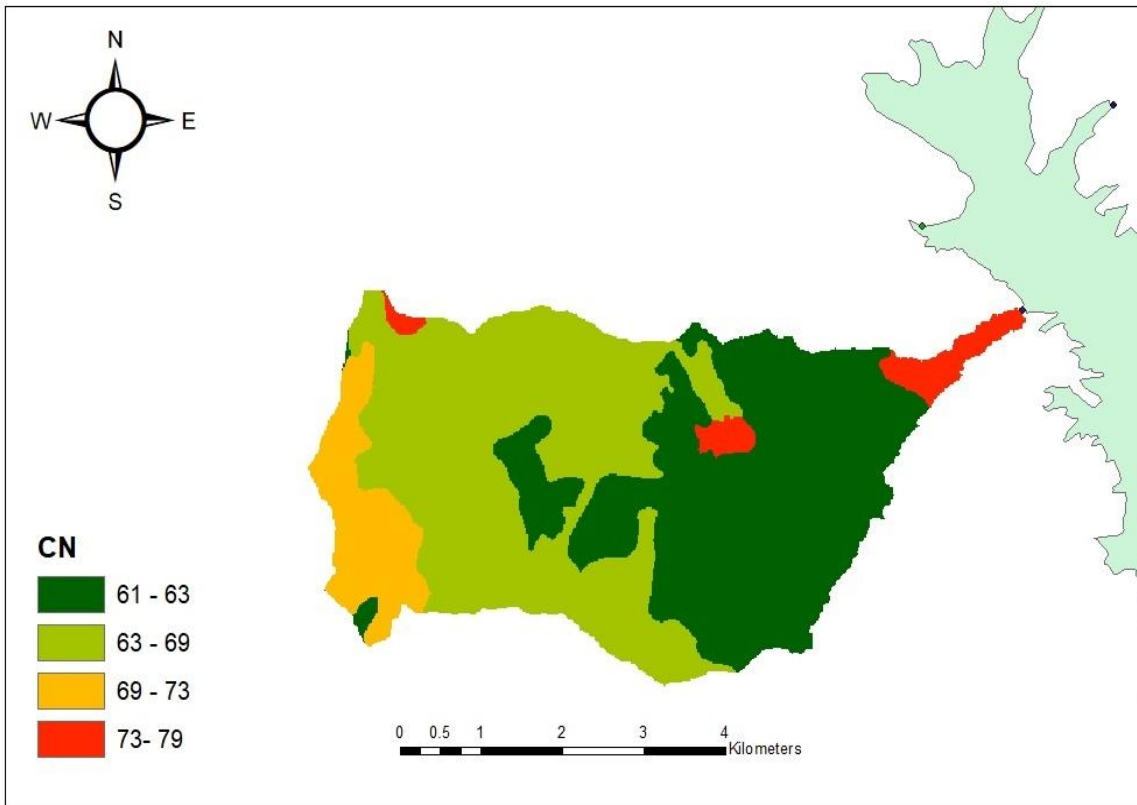
4.2.3 Εκτίμηση υδρολογικών απωλειών με τη μέθοδο SCS CN

Όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 2.6, οι υδρολογικές απώλειες οφείλονται στο τμήμα της βροχής το οποίο αρχικά κατακρατείται στο έδαφος και στη συνέχεια είτε διηθείται στο έδαφος είτε εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα. Για τον υπολογισμό των υδρολογικών απωλειών εφαρμόζεται η μέθοδος της SCS Curve Number της οποίας η μεθοδολογία αναπτύχθηκε επίσης στο παραπάνω κεφάλαιο.

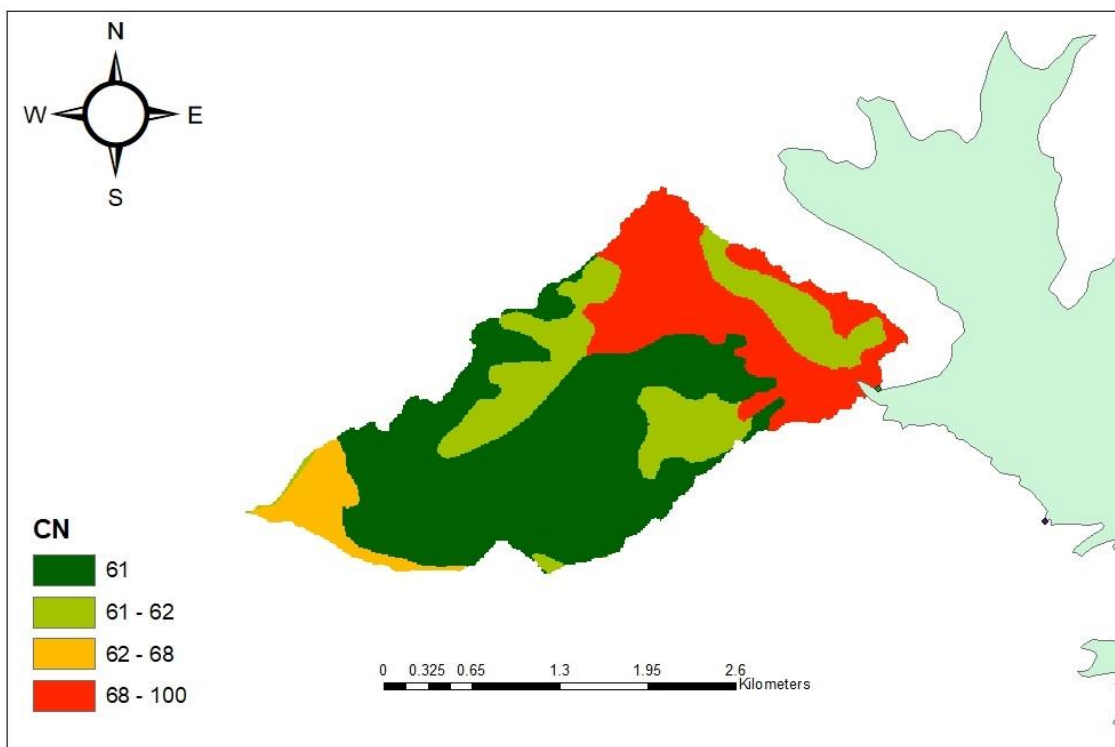
Αρχικά βρίσκεται το Curve Number για κατηγορία II, για κάθε χρήση γης και για κάθε γεωλογικό τύπο εδάφους και στη συνέχεια χρησιμοποιείται η Εξίσωση 2.12, έτσι ώστε να προκύψει ένας σταθμισμένος μέσος αριθμός καμπύλης απορροής CN για την εκάστοτε λεκάνη απορροής που εξετάζεται. Στα παρακάτω Σχήματα 4.16α, 4.16β, 4.16γ και 4.16δ φαίνεται ο κάρναβος των CN για κάθε λεκάνη απορροής.



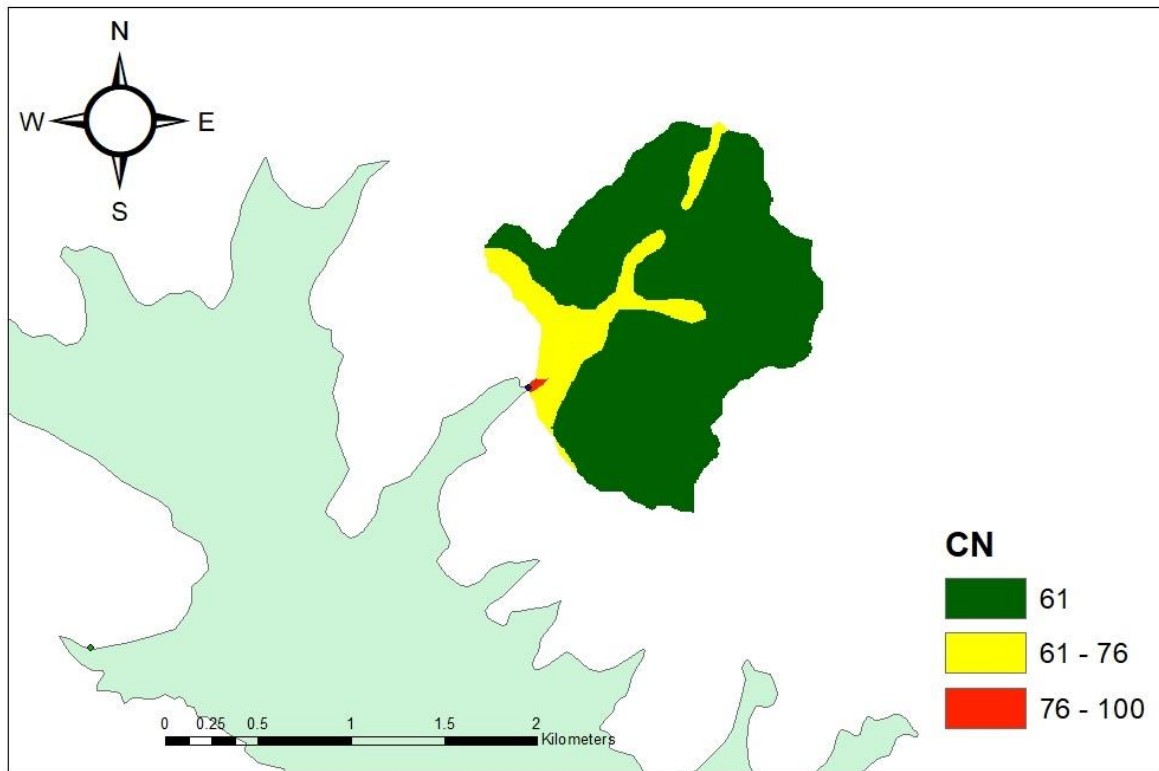
Σχήμα 4.16α: Χάρτης του αριθμού καμπύλης CN για την λεκάνη απορροής Καρυτσιώτη.



Σχήμα 4.16β: Χάρτης του αριθμού καμπύλης CN για την λεκάνη απορροής Μεγάλου Ποταμιού.



Σχήμα 4.16γ: Χάρτης του αριθμού καμπύλης CN για την λεκάνη απορροής Κρουονερίου.

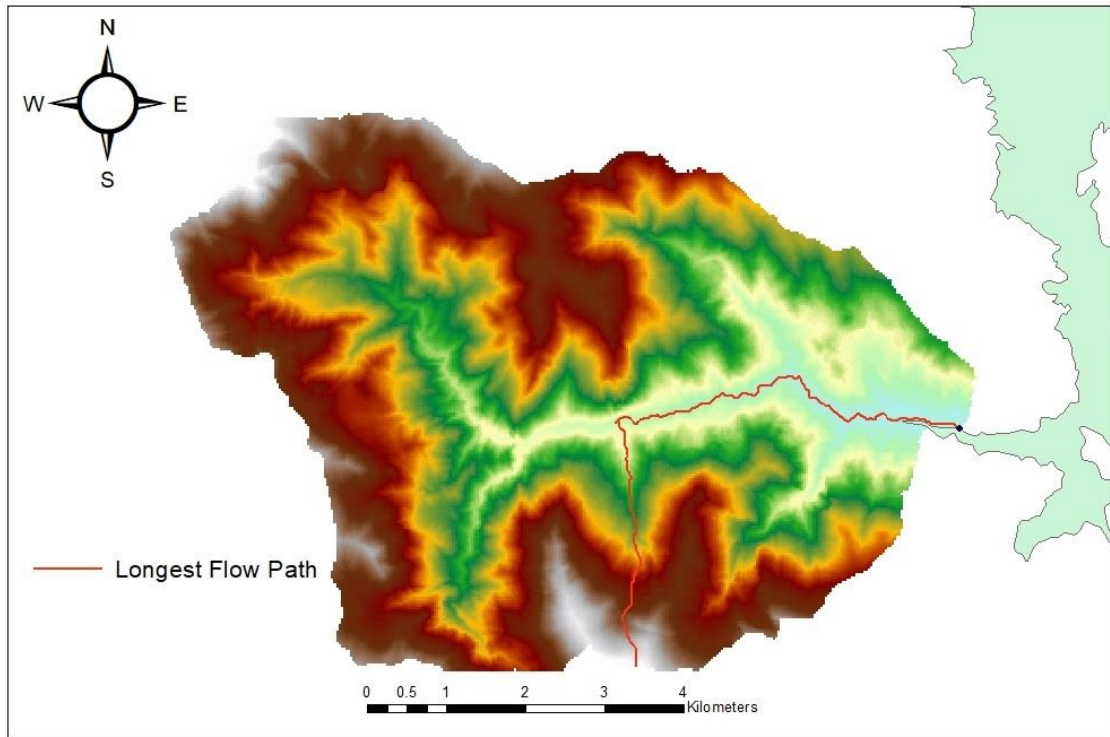


Σχήμα 4.16δ: Χάρτης του αριθμού καμπύλης CN για την λεκάνη απορροής Μορφοβουνίου.

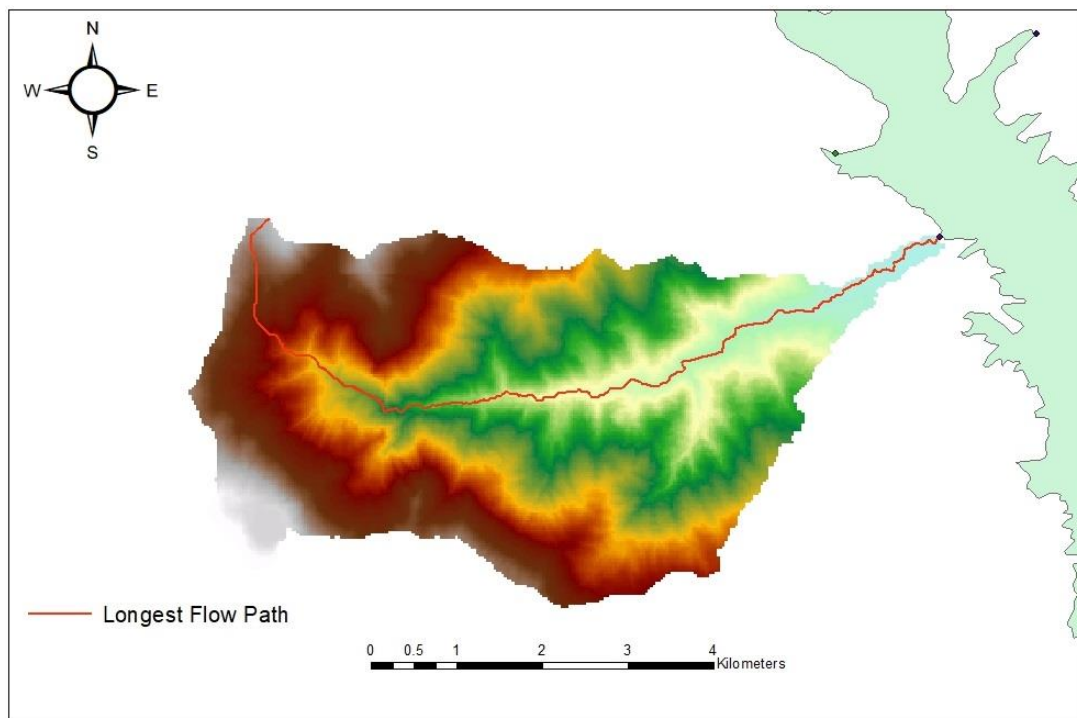
4.2.4 Εξαγωγή τοπογραφικών χαρακτηριστικών των λεκανών

Μέσω της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS εκτιμούνται ορισμένα τοπογραφικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων λεκανών τα οποία χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στο λογισμικό HEC-HMS. Υπολογίζεται το μέγιστο μήκος υδατορεύματος της κάθε λεκάνης μέχρι την έξοδό της καθώς και το μήκος κύριου υδατορεύματος.

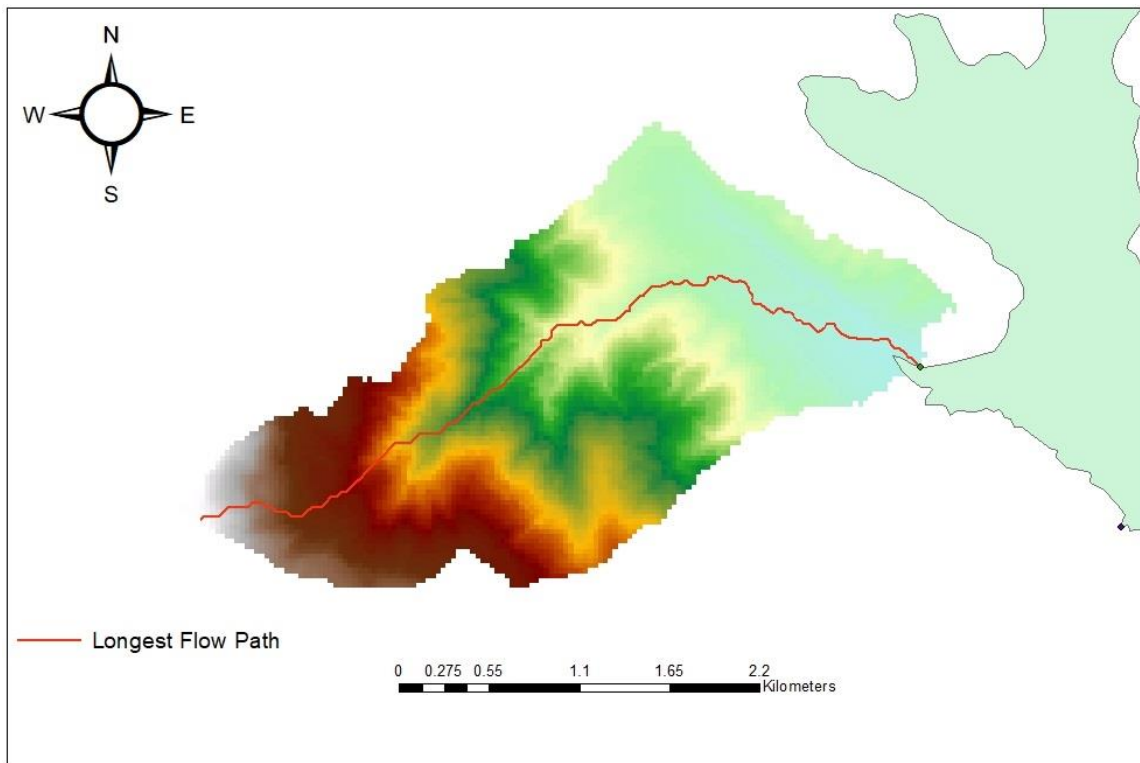
Τα μέγιστα μήκη υδατορεύματος σε κάθε λεκάνη υπολογίστηκαν χειροκίνητα. Αρχικά μέσω των raster αρχείων τα οποία έχουν ήδη δημιουργηθεί μέσω της εντολής Flow Length, αναγνωρίζεται η μέγιστη τιμή που λαμβάνει ένα κελί μέσω των properties του αρχείου για κάθε λεκάνη. Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται ως break value στο μενού Symbology και για την επιλογή Classified, ορίζοντας δύο κλάσεις, μία για τη μέγιστη τιμή και μία για όλες τις υπόλοιπες. Με αυτόν τρόπο δημιουργείται ένα κόκκινο Pixel σε κάθε λεκάνη από το οποίο ξεκινάει και η χάραξη του μέγιστου μήκους υδατορεύματος με την εντολή Interactive Flow Path. Τα μέγιστα μήκη υδατορεύματος για κάθε λεκάνη φαίνονται στα Σχήματα 4.17α, 4.17β, 4.17γ και 4.17δ.



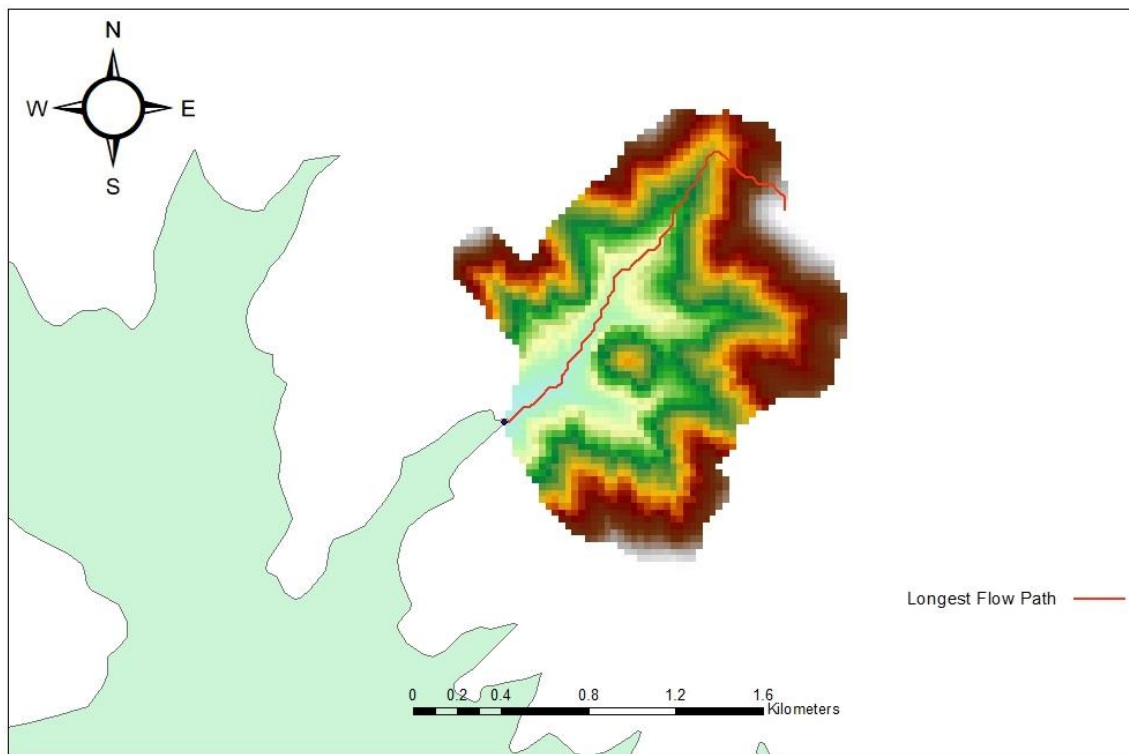
Σχήμα 4.17α: Μέγιστο μήκος υδατορεύματος για την λεκάνη Καρυτσιώτη.



Σχήμα 4.17β: Μέγιστο μήκος υδατορεύματος για την λεκάνη Μεγάλου Ποταμιού.



Σχήμα 4.17γ: Μέγιστο μήκος υδατορεύματος για την λεκάνη Κρυονερίου.



Σχήμα 4.17δ: Μέγιστο μήκος υδατορεύματος για την λεκάνη Μορφοβουνίου.

4.2.5 Υδρολογική ανάλυση μέσω του HEC-HMS

Το HEC-HMS αποτελεί μια πλατφόρμα μέσω της οποίας διασυνδέονται διάφορα υδρολογικά μοντέλα και το οποίο χρησιμοποιείται παγκοσμίως και στηρίζεται στη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος με σκοπό την μετατροπή της βροχής σε απορροή. Με τον όρο υδρολογικό μοντέλο εννοείται ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών που κάνουν χρήση δεδομένων πεδίου και παραδοχές σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς, με στόχο την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών που ενδιαφέρουν σε πρακτικές εφαρμογές (Ευστρατιάδης, 2009).

Τα μοντέλα τα οποία περιλαμβάνει το HEC-HMS είναι:

- Μοντέλο λεκάνης απορροής (Basin Model)
- Μετεωρολογικό μοντέλο (Meteorological Model Manager)
- Μοντέλο υπολογισμού απωλειών
- Μοντέλο υπολογισμού επιφανειακής απορροής
- Μοντέλο υπολογισμού βασικής απορροής
- Μοντέλο υδρολογικής διόδευσης

Ως δεδομένα εισόδου στο λογισμικό χρησιμοποιούνται τα όρια της αντίστοιχης λεκάνης απορροής που εξετάζεται, το υδρογραφικό της δίκτυο και το σημείο εξόδου της στη λίμνη Πλαστήρα. Τα αρχεία αυτά εξάγονται από το ArcGIS σε μορφή shapefile.

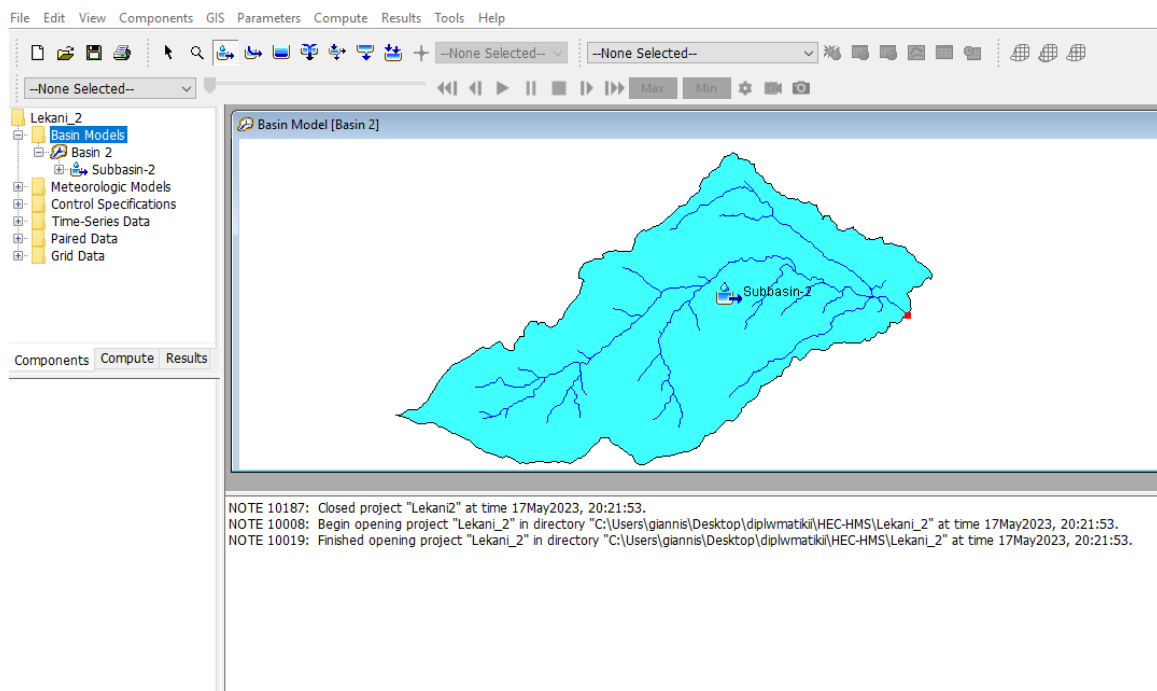
Το πρώτο μοντέλο που κατασκευάζεται είναι το μοντέλο λεκάνης απορροής (Basin Model), στο οποίο φορτώνονται τα δεδομένα εισόδου που προαναφέρθηκαν (Map Layers) για την αντίστοιχη λεκάνη και στη συνέχεια κατασκευάζεται η υπολεκάνη με το εργαλείο Subbasin Creation Tool. Αντίστοιχα, δημιουργείται η έξοδος της υπολεκάνης μέσω του Sink Creation Tool στο σημείο εξόδου προς τη λίμνη. Αφού γίνουν τα βήματα αυτά, επιλέγεται η υπολεκάνη και της αποδίδονται τα χαρακτηριστικά της όπως η έκταση, η μέθοδος απωλειών, και το μοντέλο βροχής απορροής.

Ως μέθοδο για την μετατροπή της βροχής σε απορροή ορίζεται το Ορισμένο Μοναδιαίο Υδρογράφημα από τον χρήστη (User Specified Unit Hydrograph), ενώ για βροχή σχεδιασμού

το Ορισμένο Υετογράφημα (Specified Hyetograph), των οποίων ο υπολογισμός περιγράφεται στα κεφάλαια 4.2.2 και 4.2.1 αντίστοιχα. Ως μέθοδος απωλειών χρησιμοποιείται η μέθοδος της SCS Curve Number με το αντίστοιχο CN που υπολογίζεται σε κάθε λεκάνη, όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 4.2.3.

Το τελικό βήμα πριν τον υπολογισμό των πλημμυρογραφημάτων των λεκανών απορροής είναι ο ορισμός της χρονικής διάρκειας της προσομοίωσης, το οποίο γίνεται μέσω του αρχείου προσομοιώσεων (Control specifications). Ως χρονικό βήμα προσομοίωσης (Time interval) τίθεται το χρονικό βήμα του υετογραφήματος σχεδιασμού δηλαδή 30 λεπτά, και το ίδιο βήμα επιλέγεται και για το ΜΥΓ καθώς και για τα δεδομένα.

Η υλοποίηση της προσομοίωσης γίνεται μέσω της εντολής Compute. Για κάθε μία από τις τέσσερις λεκάνες προσομοιώνονται επεισόδια διάρκειας 3 ημερών. Το περιβάλλον του λογισμικού καθώς και η δομή των Components όπως υλοποιήθηκε για τη λεκάνη του ρέματος Κρυονερίου φαίνονται στο Σχήμα 4.18.



Σχήμα 4.18: Το περιβάλλον του λογισμικού HEC-HMS.

4.3 Εκτίμηση ετήσιου ρυθμού διάβρωσης

Η διάβρωση και κατ' επέκταση η μεγάλου όγκου στερεομεταφορά αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα σε παγκόσμιο επίπεδο (Boardman, 2006). Για την εκτίμηση του ετήσιου ρυθμού διάβρωσης χρησιμοποιείται η μέθοδος Gavrilonić. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει ως πεδίο εφαρμογής της ορεινές λεκάνες τις οποίες διασχίζουν υδατορεύματα χειμναρικού τύπου. Σε πρώτο βαθμό αναπτύχθηκε με σκοπό την εφαρμογή της στις χειμναρικές λεκάνες απορροής της νότιας και νοτιοανατολικής Γιουγκοσλαβίας, όμως αργότερα εφαρμόστηκε σε πλήθος λεκανών απορροής με διαφορετικά μετεωρολογικά και γεωγραφικά χαρακτηριστικά, κυρίως σε χώρες των Βαλκανίων όπως η Σερβία, η Σλοβενία και η Κροατία, αλλά στη συνέχεια και σε άλλες περιοχές όπως η Ελβετία, το Ιράν, η Ιταλία και η Ελλάδα (Ευθυμίου, 2016, Dragičević et al., 2016).

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου Gavrilonić παραλείπεται η εξέταση των μηχανισμών μεταφοράς των φερτών, και για τον λόγο αυτό συνιστά μια κατάλληλη μέθοδο μόνο για την εκτίμηση της μέσης ετήσιας διάβρωσης, ειδικά στην περίπτωση των λεκανών απορροής της Μεσογείου όπου ο κύριος όγκος των φερτών μεταφέρεται κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων (Ευθυμίου, 2016). Για την εφαρμογή της μεθόδου στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται τεχνικές Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (G.I.S) (Globevnik et al, 2003, Auddino, 2015, Emmanouiloudis, 2003, Vacca, 2015). Επίσης, καινούρια δεδομένα όπως τα δορυφορικά δεδομένα μπορούν να εφαρμοστούν για τον υπολογισμό της ετήσιας διάβρωσης των εδαφών μέσω της μεθόδου Gavrilonić (Daneshvar & Bagherzadeh, 2012). Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται η συγκεκριμένη μέθοδος σε περιβάλλον Σ.Γ.Π (ArcGIS) για την εκτίμηση του ετήσιου ρυθμού εδαφικών απωλειών.

Η μέση ετήσια παραγωγή φερτών υλικών δίνεται από την παρακάτω Εξίσωση 4.2:

$$W = T * h * \pi * \sqrt[3]{Z^2} \quad (4.2)$$

Όπου:

- W (m³/year km²): Η μέση ετήσια παραγωγή ιζημάτων
- T: Συντελεστής θερμοκρασίας που υπολογίζεται από την εξίσωση

$$T = \sqrt{\left(\frac{t^{\circ}}{10} + 0.1\right)} \quad (4.3)$$

όπου t° η μέση θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$).

- h (mm): Η μέση ετήσια βροχόπτωση
- Z : Συντελεστής διάβρωσης ο οποίος υπολογίζεται από την εξίσωση

$$Z = Y * X * (\varphi + \sqrt{J}) \quad (4.4)$$

όπου

Y : Ο συντελεστής αντίστασης σε διάβρωση σε βράχο και έδαφος

X : Ο συντελεστής χρήσης γης, ο οποίος εκφράζει τη συμβολή της φυτοκάλυψης στη μείωση της αντίστασης του γεωλογικού αποθέματος κατά τη διάβρωση (Ευθυμίου, 2016)

φ : Ο συντελεστής για τις παρατηρούμενες διεργασίες διάβρωσης και

J : Η μέση κλίση (%).

Όσον αφορά τους δείκτες X , Y , φ , γίνεται ομαδοποίηση σε προκαθορισμένες κλάσεις για τις οποίες αποδίδεται μια συγκεκριμένη τιμή σύμφωνα με τους Πίνακες 4.2 – 4.4 (Ευθυμίου, 2016).

Πίνακας 4.2: Τιμές συντελεστή χρήσης γης X (Πηγή: Ευθυμίου, 2016).

Κάλυψη γης	X
Μικτά και πυκνά δάση	0.05-0.2
Αραιά δάση με υποόροφο	0.05-0.2
Κωνοφόρα δάση με μικρό άλσος, θαμνώδη λιβάδια	0.2-0.4
Κατεστραμμένα δάση, θάμνοι και βοσκότοποι	0.4-0.6
Κατεστραμμένοι βοσκότοποι και καλλιεργούμενη γη	0.6-0.8
Περιοχές χωρίς φυτική κάλυψη	0.8-1.0

Πίνακας 4.3: Τιμές συντελεστή αντίστασης εδάφους Y (Πηγή: Ευθυμίου, 2016).

Γεωλογικοί σχηματισμοί	Y
Σκληρός βράχος με αντίσταση στη διάβρωση	0.2-0.6
Βράχος με μέτρια αντίσταση στη διάβρωση	0.6-1.0
Βραχώμαζα χαμηλής αντοχής, με σχίστωση	1.0-1.3
Ιζήματα, μοραίνες, πηλός και άλλοι βράχοι με μικρή αντίσταση	1.3-1.8
Λεπτά ιζήματα και εδάφη χωρίς αντίσταση στη διάβρωση	1.8-2.0

Πίνακας 4.4: Τιμές συντελεστή τύπου και έκτασης διάβρωσης φ (Πηγή: Ευθυμίου, 2016).

Διεργασίες διάβρωσης	φ
Μικρή διάβρωση στη λεκάνη απορροής	0.1-0.2
Διάβρωση στο υδατόρευμα σε ποσοστό 20-50% της λεκάνης απορροής	0.3-0.5
Διάβρωση σε ποτάμια, χαράδρες και προσχώσεις, καρστική διάβρωση	0.6-0.7
Διάβρωση επιφάνειας και κατολισθήσεων στο 50-80% της λεκάνης απορροής	0.8-0.9
Ολόκληρη η λεκάνη απορροής έχει επηρεαστεί από τη διάβρωση	1.0

Οπότε, για την εκτίμηση της μέσης ετήσιας παραγωγής ιζημάτων, εκτιμούνται οι συντελεστές X, Y, και φ που σχετίζονται με την κατηγορία χρήσης γης, τη γεωλογία και τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά, η μέση κλίση (%) του εδάφους και οι παράμετροι h και T που σχετίζονται με τη βροχόπτωση και τη θερμοκρασία αντίστοιχα.

4.3.1 Εκτίμηση συντελεστή χρήσης γης X

Για τον υπολογισμό του συντελεστή X, απομονώνονται τα πολύγωνα χρήσεων γης κατά CORINE Land Cover που βρίσκονται εντός των ορίων της κάθε λεκάνης απορροής με την εντολή Clip (Σχήματα 3.11α, 3.11β και 3.11γ). Στον Attribute Table του κάθε αρχείου vector προστίθεται μέσω της εντολής Add Field ένα νέο πεδίο-στήλη με ονομασία X, στο οποίο γίνεται αντιστοίχιση σε κάθε κωδικό χρήσης γης η τιμή του συντελεστή χρήσης γης που του αναλογεί. Με την εντολή Polygon to Raster δημιουργούνται οι κάρτες του συντελεστή X για κάθε εξεταζόμενη λεκάνη. Οι τιμές για κάθε κατηγορία χρήσης γης φαίνονται στον Πίνακα 4.5

και εκτιμήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τον Πίνακα 4.2, καθώς και την βιβλιογραφία (Globevnik, 2003, Ευθυμίου, 2016).

Πίνακας 4.5: Αντιστοίχιση χρήσεων γης με τον συντελεστή X.

Ορισμοί ονοματολογίας CORINE Land Cover	X
<p>1.1.1 Συνεχής αστικός ιστός</p> <p>Οι περισσότερες εκτάσεις γης καλύπτονται από αυτή. Κτήρια, δρόμοι και ζώνες τεχνητής επιφάνειας καλύπτουν σχεδόν όλο το έδαφος. Οι μη γραμμικές ζώνες βλάστησης και το γυμνό έδαφος αποτελούν εξαίρεση.</p>	0.0
<p>1.1.2 Ασυνεχής αστικός ιστός</p> <p>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.</p>	0.05
<p>1.2.1 Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες</p> <p>Ζώνες τεχνητής επιφάνειας (με σκυρόδεμα, άσφαλτο, πισσούχο ασφαλτόμιγμα, ή σταθεροποιημένες, π.χ ισοπεδωμένο έδαφος) χωρίς βλάστηση, καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος την εν λόγω ζώνης, η οποία περιέχει εξίσου κτήρια/ ή ζώνες βλάστησης.</p>	0.05
<p>1.2.2 Οδικά, σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη</p> <p>Αυτοκινητόδρομοι, σιδηρόδρομοι, που περιέχουν συναφείς εγκαταστάσεις (σταθμούς, αποβάθρες, αναχώματα). Ελάχιστο πλάτος για την κατηγορία: 100 m</p>	0.05

Πίνακας 4.5 (συνέχεια): Αντιστοίχιση χρήσεων γης με τον συντελεστή X.

Ορισμοί ονοματολογίας CORINE Land Cover	X
<p>1.2.4 Αεροδρόμια</p> <p>Εγκαταστάσεις αεροδρομίων: διάδρομοι, κτήρια και συνδεδεμένα εδάφη</p>	0.05
<p>1.3.1 Χώροι εξορύξεως ορυκτών</p> <p>Ζώνες υπαίθριας εξόρυξης βιομηχανικών ορυκτών (τόποι αμμοληψίας, λατομεία) ή άλλων ορυκτών (επιφανειακά ανθρακωρυχεία). Περιλαμβάνει πλημμυρισμένα σκυρωρυχεία, εκτός από εξόρυξη κοίτης ποταμού.</p>	0.05
<p>1.3.3 Χώροι οικοδόμησης</p> <p>Χώροι υπό οικοδομητική ανάπτυξη, εκσκαφές εδάφους ή υποβάθρου, χωματουργικά έργα.</p>	0.05
<p>1.4.2 Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής</p> <p>Χώροι κατασκηνώσεων, αθλητικές εγκαταστάσεις, πάρκα ψυχαγωγίας, γήπεδα γκολφ, πίστες αγώνων, κτλ. Περιλαμβάνει διαρρυθμισμένους χώρους πρασίνου που δεν εντάσσονται σε αστικές ζώνες.</p>	0.60
<p>2.1.1 Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη</p> <p>Δημητριακά, όσπρια, καλλιέργειες ζωοτροφών, βολβόφυτα και χέρσο έδαφος. Περιλαμβάνονται καλλιέργειες λουλουδιών και δέντρων (φυτώρια), καθώς και λαχανικών είτε σε ανοικτό χωράφι, είτε κάτω από πλαστικό ή γυαλί. Περιλαμβάνει αρωματικά, φαρμακευτικά και μαγειρικά φυτά. Αποκλείονται τα μόνιμα λιβάδια.</p>	0.90

Πίνακας 4.5 (συνέχεια): Αντιστοίχιση χρήσεων γης με τον συντελεστή X.

Ορισμοί ονοματολογίας CORINE Land Cover	X
<p>2.2.1 Αμπελώνες</p> <p>Περιοχές φυτεμένες με αμπέλια</p>	0.55
<p>2.2.3 Ελαιώνες</p> <p>Περιοχές φυτεμένες με ελαιόδεντρα, συμπεριλαμβάνοντας μικτή εμφάνιση ελαιόδεντρων και αμπελώνων στο ίδιο αγροτεμάχιο.</p>	0.45
<p>2.3.1 Λιβάδια</p> <p>Πυκνή, κάλυψη κυρίως από ποώδη βλάστηση, όχι στο πλαίσιο ενός συστήματος εναλλαγής καλλιέργειας. Χρησιμοποιείται κυρίως για βοσκή, αλλά η ζωοτροφή μπορεί να συγκομιστεί μηχανικά. Περιλαμβάνει και τις περιοχές με φυτά φράκτες.</p>	0.60
<p>2.4.2 Σύνθετες καλλιέργειες</p> <p>Μωσαϊκό από μικρά αγροτεμάχια από διάφορες ετήσιες καλλιέργειες, λιβάδια και/ή μόνιμες καλλιέργειες.</p>	0.70
<p>2.4.3 Γη που χρησιμοποιείται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης.</p> <p>Περιοχές που καλύπτονται κυρίως από τη γεωργία, με διάσπαρτες περιοχές φυσικής βλάστησης.</p>	0.80
<p>3.1.2 Δάσος κωνοφόρων</p> <p>Βλάστηση που αποτελείται κυρίως από δέντρα, συμπεριλαμβανομένων υποορόφων με θάμνους και άλλη χαμηλή βλάστηση, όπου τα κωνοφόρα είδη</p>	0.40

Ορισμοί ονοματολογίας CORINE Land Cover	X
υπερισχύουν.	

Πίνακας 4.5 (συνέχεια): Αντιστοίχιση χρήσεων γης με τον συντελεστή X.

Ορισμοί ονοματολογίας CORINE Land Cover	X
<p>3.1.3 Μικτό δάσος</p> <p>Βλάστηση που αποτελείται κυρίως από δέντρα, συμπεριλαμβανομένων υποορόφων με θάμνους και άλλη χαμηλή βλάστηση, όπου τα πλατύφυλλα και τα κωνοφόρα είδη επικρατούν.</p>	0.20
<p>3.2.1 Φυσικοί βοσκότοποι</p> <p>Συχνά τοποθετημένοι σε περιοχές με ανώμαλο ανισόπεδο έδαφος. Συχνά περιλαμβάνουν βραχώδεις περιοχές, φρύγανα και χερσότοπος.</p>	0.60
<p>3.2.3 Σκληροφυλλική βλάστηση</p> <p>Θαμνώδης σκληροφυλλική βλάστηση. Περιλαμβάνει μακία και φρύγανα. Η μακία αποτελεί μία πυκνή φυτοκοινότητα που αποτελείται από πολυάριθμους θάμνους συνδυαζόμενη με πυριτικά εδάφη στο μεσογειακό περιβάλλον. Τα φρύγανα είναι ασυνεχείς φυτοκοινότητες θάμνων των μεσογειακών ασβεστούχων οροπεδίων. Γενικά αποτελούνται από πουρνάρια, κουμαριές, λεβάντα, θυμάρι, κλπ. Μπορούν να περιλαμβάνουν μερικά μεμονωμένα δέντρα.</p>	0.50

Πίνακας 4.5 (συνέχεια): Αντιστοίχιση χρήσεων γης με τον συντελεστή X.

Ορισμοί ονοματολογίας CORINE Land Cover	X
<p>3.2.4 Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις</p> <p>Θαμνώδης και ποώδης βλάστηση με διασπαρμένα δέντρα. Μπορεί να αντιπροσωπεύει υποβαθμισμένο δασικό οικοσύστημα ή αναδάσωση-ανάπλαση.</p>	0.50
<p>3.3.3 Εκτάσεις με αραιή βλάστηση</p> <p>Βραχώδεις εξάρσεις λόφων, απότομες πλαγιές, βράχοι και προεξοχές βράχων.</p>	0.65
<p>3.3.4 Αποτεφρωμένες εκτάσεις</p> <p>Εκτάσεις προσβεβλημένες από πρόσφατη πυρκαγιά, παραμένουν κυρίως μαύρες.</p>	0.80

Ο συντελεστής X εξαρτάται από τις χρήσεις γης και τη βλάστηση και εκφράζει την προστασία της περιοχής από τη βροχοπτώση και τη διάβρωση. Οι χαμηλότερες τιμές του συντελεστή αντιστοιχούν στις περιοχές στις οποίες παρατηρείται υψηλή φυτοκάλυψη, γεγονός που υποδηλώνει την έντονα προστατευτική δράση της βλάστησης έναντι του φαινομένου της εδαφικής διάβρωσης. Οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται σε περιοχές ήπιας ή και χαμηλής φυτοκάλυψης, οι οποίες είναι περισσότερο επιρρεπείς στις αρνητικές συνέπειες του φαινομένου. Τα δάση δεν αντιμετωπίζονται ως ενιαίο σύνολο. Ο συντελεστής για την κατηγορία δάση κωνοφόρων έχει μεγαλύτερη τιμή σε σύγκριση με την κατηγορία μικτό δάσος, διότι ευδοκμούν σε περιοχές που ευνοείται περισσότερο η επιφανειακή απορροή. Κάτι τέτοιο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η κατείδυση είναι μικρότερη, το έδαφος πιο ξηρό και η διάβρωση μεγαλύτερη. Το μικτό δάσος των πλατύφυλλων και κωνοφόρων δέντρων έχει μεγαλύτερη υγρασία, η κατείδυση είναι μεγαλύτερη και η διάβρωση μικρότερη (Ευθυμίου, 2016). Ο συντελεστής X λαμβάνει πολύ μικρές τιμές (0, 0.05) στους κωδικούς χρήσεων γης 111, 112,

121, 122, 124, 131, 133, καθώς όπου υπάρχουν τεχνητές επιφάνειες το έδαφος προστατεύεται από τη βροχόπτωση και συνεπώς από τη διάβρωση.

Η λεκάνη απορροής του ρέματος Καρυτσιώτη καλύπτεται κυρίως από πλατύφυλλα και κωνοφόρα δέντρα, ορισμένους φυσικούς βοσκότοπους, θάμνους και χερσότοπους, ενώ σε σημαντικά κομμάτια υπάρχουν εκτάσεις με αραιή βλάστηση αλλά και απογυμνωμένοι βράχοι. Κοντά στους οικισμούς Καρίτσα και Λογγά που βρίσκονται πλησίον του ρέματος υπάρχει ένα κομμάτι γης στο οποίο παρατηρούνται σύνθετα συστήματα καλλιεργειών. Για τη λεκάνη του ρέματος Μεγάλο Ποτάμι, το μεγαλύτερο μέρος της καλύπτεται από δάση κωνοφόρων και από μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις, ενώ σε σημαντικό κομμάτι της λεκάνης υπάρχουν και φυσικοί βοσκότοποι και χερσότοποι. Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας αναπτύσσονται στα ανατολικά της λεκάνης κατά μήκος του ρέματος. Στις λεκάνες απορροής Κρουονερίου και Μορφοβουνίου, εκτός από τις δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις που παρατηρούνται και στις υπόλοιπες λεκάνες, σημαντικό κομμάτι τους καλύπτεται από γεωργική γη με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης.

4.3.2 Εκτίμηση συντελεστή αντίστασης εδάφους Y

Για την εκτίμηση του συντελεστή Y γίνεται ψηφιοποίηση των γεωλογικών σχηματισμών όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.10. Ύστερα δημιουργείται το θεματικό επίπεδο του συντελεστή Y για κάθε εξεταζόμενη λεκάνη ξεχωριστά. Ο συντελεστής Y εξαρτάται από τη γεωλογία και εκφράζει την αντίσταση του εδάφους στη διάβρωση λόγω της διαβρωτικής δύναμης της βροχής (Ευθυμίου, 2016). Η αντιστοίχιση των τιμών του συντελεστή για κάθε γεωλογικό σχηματισμό που φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 4.6, έγινε λαμβάνοντας υπόψη τον Πίνακα 4.3, αλλά και τη βιβλιογραφία (Μαρίνος, 1991, Globevnik, 2003, Ευθυμίου, 2016).

Πίνακας 4.6: Αντιστοίχιση των παρατηρούμενων γεωλογικών σχηματισμών με τον συντελεστή Υ.

Γεωλογικοί σχηματισμοί	Υ
Πελαγικοί ασβεστόλιθοι (κυρίως βιομικρίτες)	0.5
Ο “πρώτος φλύσχη” καθώς και σειρά πηλιτών και ραδιολαριτών με ψαμμίτες και ενίοτε λεπτοπλακώδεις	1.3
Τοφφίτες	1.4
Φλύσχη	1.5

Η λεκάνη απορροής του ρέματος Καρυτσιώτη αποτελείται κυρίως από Φλύσχεις και Πελαγικούς ασβεστόλιθους, κατά κύριο λόγο βιομικρίτες, καθώς και μια σειρά τοφφιτών και πηλιτών τους οποίους συναντάμε στη συγκεκριμένη ζώνη και χαρακτηρίζονται από χαμηλή υδατοπερατότητα, κυρίως στα δυτικά της λεκάνης. Για τη λεκάνη του ρέματος Μεγάλο Ποτάμι, το μεγαλύτερο μέρος της καλύπτεται από κομμάτια Φλυσχών και Πελαγικών ασβεστόλιθων, κυρίως βιομικρίτες, ενώ στα βόρεια της λεκάνης παρατηρούνται σχηματισμοί του “πρώτου φλύσχη”. Η λεκάνη απορροής Μορφοβουνίου αποτελείται εξολοκλήρου από γεωλογικούς σχηματισμούς τυπικού Φλύσχη, ενώ η λεκάνη απορροής Κρυονερίου καλύπτεται κυρίως από Πελαγικούς ασβεστόλιθους και πολύ μικρό κομμάτι της στο βόρειο τμήμα από τυπικό Φλύσχη.

Η αντοχή κάθε γεωλογικού τύπου επηρεάζει άμεσα την έκταση του φαινομένου της διάβρωσης. Το γεωλογικό υλικό λόγω της διαφορετικής συμπεριφοράς του διακρίνεται σε εδάφη και σε πετρώματα. Με τον όρο έδαφος περιγράφεται το φυσικό συσσωμάτωμα ορυκτών κόκκων που μπορεί να διαχωριστεί με απλή μηχανική κίνηση. Με τον όρο πέτρωμα περιγράφεται ένα φυσικό συσσωμάτωμα ορυκτών κόκκων οι οποίοι συνδέονται με ισχυρές και μόνιμες δυνάμεις συνοχής. Τα εδάφη προέρχονται από την καταστροφή πετρωμάτων μέσω των διεργασιών της αποσάθρωσης και της διάβρωσης, από τις οποίες γίνεται εξολοκλήρου αλλοίωση του αρχικού χαρακτήρα του πετρώματος (Μαρίνος, 1991).

Εφόσον υπάρχουν ρωγμές στο πέτρωμα, διευκολύνουν την προχώρηση της υποβάθμισης του πετρώματος σε βάθος και την αύξηση του πάχους από την επιφάνεια του εδάφους, κάτι που οδηγεί στην αδυναμία να συμπεριφέρεται σαν συμπαγές μέσο, έστω και με ρωγμές. Ανάλογα με το βαθμό επιδεκτικότητας κάθε πετρώματος στην αποσάθρωση, σχηματίζεται ένας μανδύας εδάφους πάνω στην επιφάνειά του που η σύστασή του εξαρτάται από τη σύσταση και τα προϊόντα αποσαθρώσεως του υποκείμενου μητρικού πετρώματος. Τα εδαφικά υλικά που προκύπτουν από την αποσάθρωση παραλαμβάνονται από το νερό της επιφανειακής απορροής, μεταφέρονται και, ανάλογα με την κλίση του αναγλύφου μισγάγγειας, δηλαδή την ταχύτητα ροής, και την αρχική κοκκομετρική τους σύσταση, ταξινομούνται και αποτίθενται γρήγορα ή αργά για να δημιουργήσουν προσχώσεις. (Μαρίνος, 1991).

Συχνά οι προσχώσεις οργανώνονται ανάλογα με την υψομετρία σε διάφορες βαθμίδες οι οποίες αντιστοιχούν σε παλαιότερες προσχώσεις οι οποίες έχουν πλέον μερικώς διαβρωθεί. Τα υλικά που μεταφέρονται από την επιφανειακή απορροή καταλήγουν σε θάλασσες ή λίμνες, όπου και συσσωρεύονται και παραμένουν μέχρι την εξαφάνιση π.χ της λίμνης. Οι ασβεστόλιθοι αποτελούν ιζηματογενή πετρώματα καλής ως υψηλής αντοχής, με συμπεριφορά όμως η οποία αλλάζει σε περίπτωση που αυτοί προσβληθούν από καρστική διάβρωση ή όταν τα καρστικά κενά παρουσιάζουν μια πλήρωση με αργιλικά. Οι τόφοι είναι ηφαιστειακά χαλαρά πετρώματα. Ο φλύσχος αποτελείται κυρίως από εναλλαγές μαργών, ασβεστολίθων, κροκαλοπαγών, και αδρόκοκκων ψαμμιτών (Μαρίνος, 1991).

4.3.3 Εκτίμηση συντελεστή διεργασιών διάβρωσης φ

Ο συντελεστής φ εκφράζει τη διαδικασία διάβρωσης και καθορίζεται ύστερα από παρατήρηση του εδάφους (Ευθυμίου, 2016). Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε να υπολογιστεί ως ένας συνδυασμός των χρήσεων γης και της αντίστασης στη διάβρωση προκειμένου να αποδοθεί η επιφανειακή κατανομή του εύρους διάβρωσης.

4.3.4 Εκτίμηση συντελεστή διάβρωσης Z

Για τον υπολογισμό του συντελεστή διάβρωσης Z χρειάζεται η κατασκευή των καννάβων κλίσης για κάθε εξεταζόμενη λεκάνη απορροής όπως φαίνονται στο Κεφάλαιο 3.1. Ο συντελεστής διάβρωσης Z αποτυπώνει την ένταση της διαδικασίας της διάβρωσης. Όταν η τιμή

του Z είναι μικρότερη του 0.19 τότε η διάβρωση θεωρείται πολύ μικρή, ενώ όταν είναι μεγαλύτερη της μονάδας η κατάσταση θεωρείται σοβαρή (Amini, 2010, Ευθυμίου, 2016).

4.3.5 Εκτίμηση συντελεστή ετήσιας βροχόπτωσης h

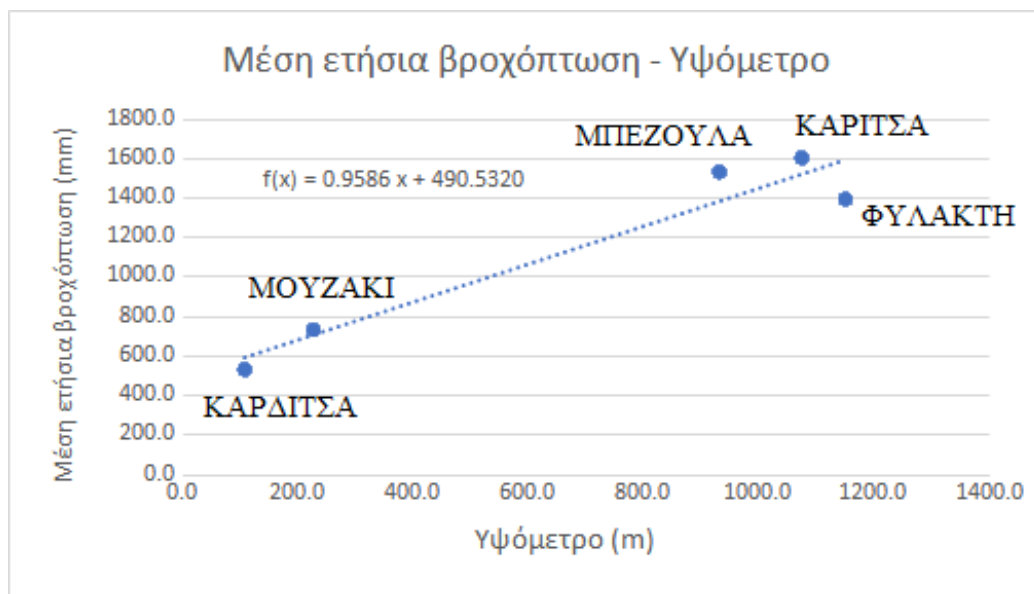
Για τον υπολογισμό του συντελεστή ετήσιας βροχόπτωσης h χρησιμοποιείται η μέθοδος της επιφανειακής ολοκλήρωσης (επιφανειακή βροχόπτωση). Το σημειακό ύψος βροχής αυξάνει με την αύξηση του υψομέτρου (Μπαλτάς, 2012). Σε αρχική φάση υπολογίζεται η βροχοβαθμίδα, η οποία αποτελεί την μέση αύξηση του ετήσιου σημειακού βροχομετρικού ύψους ανά 100 m αύξησης του υψομέτρου. Η βροχοβαθμίδα προκύπτει από την κατασκευή της γραφικής παράστασης των μέσων ετήσιων βροχομετρικών υψών των σταθμών της περιοχής μελέτης (Σχήμα 3.12) σε συνάρτηση με τα υψόμετρα των σταθμών, ύστερα από δοκιμές και με άλλους σταθμούς με σκοπό η ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης να έχει χαμηλό βαθμό γραμμικής συσχέτισης (Μπαλτάς, 2015). Στη συνέχεια, μέσω της χρήσης των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, γίνεται η επιφανειακή κατανομή της ετήσιας βροχόπτωσης για κάθε λεκάνη απορροής της παρούσας εργασίας. Αυτό υλοποιείται με την χρήση της εξίσωσης που προκύπτει από τη γραφική παράσταση των μέσων ετήσιων βροχομετρικών υψών των σταθμών σε συνάρτηση με τα υψόμετρα των σταθμών.

Και για τις τέσσερις υπό εξέταση λεκάνες απορροής, δηλαδή τη λεκάνη του ρέματος Καρυτσιώτη, τη λεκάνη απορροής του ρέματος Μεγάλο Ποτάμι, τη λεκάνη Κρυονερίου, καθώς και τη λεκάνη απορροής Μορφοβουνίου, χρησιμοποιήθηκαν οι μετεωρολογικοί σταθμοί της Φυλακτής, της Πεζούλας, της Καρίτσας, της Καρδίτσας αλλά και του Μουζακίου (Σχήμα 3.12). Επομένως, μέσω της γραφικής παράστασης των μέσων ετήσιων βροχομετρικών υψών για κάθε έναν από τους παραπάνω σταθμούς σε συνάρτηση με τα υψόμετρα τους, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.19, προσδιορίζεται ο συντελεστής ετήσιας βροχόπτωσης για τις λεκάνες που μελετώνται σύμφωνα με την Εξίσωση:

$$h = 0.9585 * DEM + 490.53 \quad (4.5)$$

Όπου:

- DEM (m): Το μέσο υψόμετρο κάθε φατνίου διάστασης 30 m x 30 m.



Σχήμα 4.19: Διάγραμμα μέσων ετήσιων υψών βροχόπτωσης προς υψόμετρα των σταθμών

4.3.6 Εκτίμηση συντελεστή θερμοκρασίας T

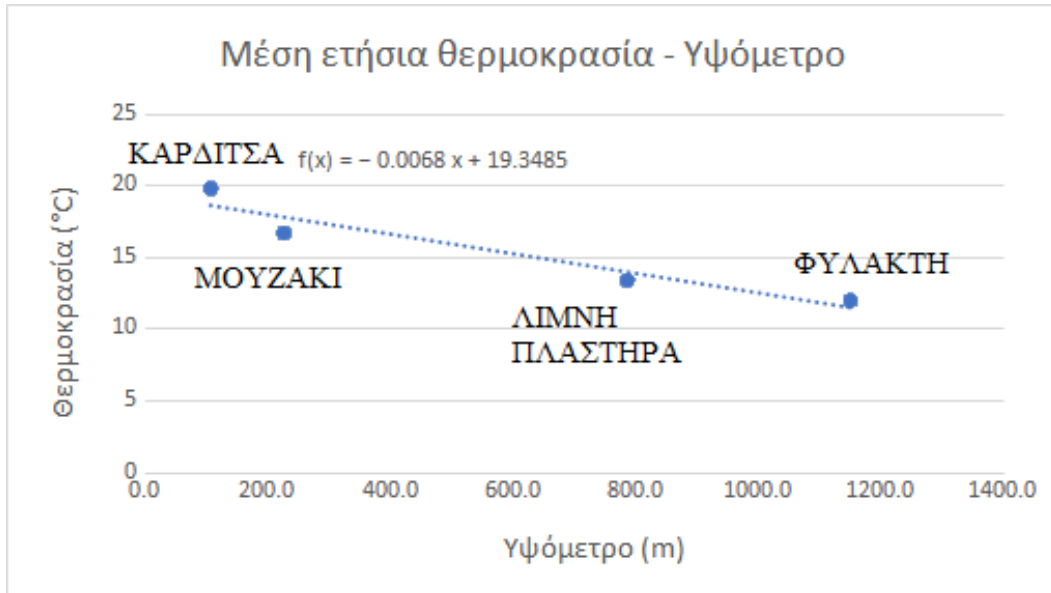
Με σκοπό να υπολογιστεί ο συντελεστής θερμοκρασίας T (Εξίσωση 4.3), αρχικά εκτιμάται η μέση ετήσια θερμοκρασία (t°). Σε κανονικές συνθήκες η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται καθώς ο αέρας ανεβαίνει στην τροπόσφαιρα. Η τυπική θερμοβαθμίδα είναι $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (Μπαλτάς, 2015). Για τον υπολογισμό του συντελεστή της θερμοκρασίας επιλέχθηκε να υπολογιστεί η επιφανειακή κατανομή της θερμοκρασίας στις εξεταζόμενες λεκάνες απορροής με τη βοήθεια των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών χωρίς να χρησιμοποιηθεί όμως η τυπική θερμοβαθμίδα αλλά αυτή που προκύπτει από την κατασκευή της γραφικής παράστασης των μέσων ετήσιων θερμοκρασιών των σταθμών της περιοχής μελέτης (Σχήμα 3.12) σε συνάρτηση με τα υψόμετρα των σταθμών.

Και για τις τέσσερις υπό εξέταση λεκάνες απορροής, δηλαδή την λεκάνη του ρέματος Καρυτσιώτη, την λεκάνη απορροής του ρέματος Μεγάλο Ποτάμι, την λεκάνη Κρυονερίου, καθώς και την λεκάνη απορροής Μορφοβουνίου, χρησιμοποιήθηκαν οι μετεωρολογικοί σταθμοί της Φυλακτής, του ΥΗΣ Λίμνης Πλαστήρα, της Καρδίτσας αλλά και του Μουζακίου (Σχήμα 3.12). Επομένως, μέσω της γραφικής παράστασης των μέσων ετήσιων θερμοκρασιών για κάθε έναν από τους παραπάνω σταθμούς σε συνάρτηση με τα υψόμετρα τους, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.20, προσδιορίζεται η μέση ετήσια θερμοκρασία κάθε σημείου για τις λεκάνες που μελετώνται σύμφωνα με την Εξίσωση:

$$t = -0.0068 * DEM + 19.34 \quad (4.6)$$

Όπου:

- DEM (m): Το μέσο υψόμετρο κάθε φατνίου διάστασης 30 x 30 m.



Σχήμα 4.20: Διάγραμμα μέσων ετήσιων θερμοκρασιών προς υψόμετρα των σταθμών

4.4 Εκτίμηση στερεοαπορροής

Η στερεοαπορροή εξαρτάται από τη διαδικασία της διάβρωσης, αλλά και από την ικανότητα του συστήματος να μεταφέρει τα φερτά υλικά μέσα από το υδρογραφικό δίκτυο. Για να εκτιμηθεί η στερεοαπορροή χρησιμοποιείται η παρακάτω Εξίσωση 4.7:

$$SDR = \frac{S_y}{A_s} \quad (4.7)$$

Όπου:

- SDR: Ο συντελεστής απορροής
- S_y (tn/ha): Το μέγεθος της στερεοαπορροής
- A_s (tn/ha): Η απώλεια εδαφικού υλικού λόγω διάβρωσης

Για να υπολογιστεί το ποσοστό της διάβρωσης το οποίο εν τέλει μετατρέπεται σε στερεοαπορροή έχουν αναπτυχθεί διάφορες εμπειρικές εξισώσεις (Φελώνη, 2019). Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για τον υπολογισμό του συντελεστή απορροής χρησιμοποιούνται εκείνες των Gavrilović, SCS, Zemljič και Vanoni και στη συνέχεια από την Εξίσωση 3.9 εκτιμάται η στερεοαπορροή.

Με την μέθοδο Gavrilović, η στερεοαπορροή (G) που παράγεται λόγω της εδαφικής διάβρωσης και η ποσότητα των φερτών που εναποτίθενται εντός της λεκάνης, καθορίζουν την ποσότητα των φερτών υλικών που μεταφέρεται μέσω του υδρογραφικού δικτύου σύμφωνα με την Εξίσωση 4.8 (Ευθυμίου, 2016, Fanetti, 2007):

$$G = DR * W \quad (4.8)$$

Όπου:

- W (m³/year km²): Η μέση ετήσια παραγωγή ιζημάτων
- G (m³/year km²): Η μέση ετήσια στερεοαπορροή
- DR: Ο συντελεστής συγκράτησης (αντίστοιχος με τον συντελεστή στερεοαπορροής) ο οποίος σύμφωνα με Gavrilović είναι:

$$DR = \frac{\sqrt{(O*D)}}{0.25*(L+10)} \quad (4.9)$$

- O (km): Η περίμετρος της λεκάνης απορροής
- D (km): Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής
- L (km): Το μήκος του κύριου υδατορεύματος

Ο Zemljič το 1971 ύστερα από έρευνες σε λεκάνες απορροής των Άλπεων παρατήρησε πως η Εξίσωση 4.9 τείνει να υπερεκτιμά το συντελεστή συγκράτησης DR και σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να δώσει ως αποτέλεσμα τιμές μεγαλύτερες της μονάδας (Milanesi L., Pilotti M., Clerici A. & Gavrilović Z., 2015). Για τον λόγο αυτόν τροποποίησε την εξίσωση που προτείνεται από το μοντέλο Gavrilović ως εξής:

$$DR(Zemljic) = \frac{\sqrt{(O*D)*(L+Li)}}{(L+10)*F} \quad (4.10)$$

Όπου:

- L_i (km): Το μήκος των δευτερευόντων παραποτάμων
- F (km²): Η επιφάνεια της λεκάνης απορροής

Από τις εμπειρικές σχέσεις SCS (1971) και Vanoni (1975a,b) υπολογίζεται ο συντελεστής απορροής SDR ως εξής (Φελώνη, 2019, Βαχαβιώλος, 2018):

$$SDR(SCS) = 0.51 * A^{-0.11} \quad (4.11)$$

$$SDR(Vanoni) = 0.42 * A^{-0.125} \quad (4.12)$$

Όπου:

- A (km²): Το εμβαδόν της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής

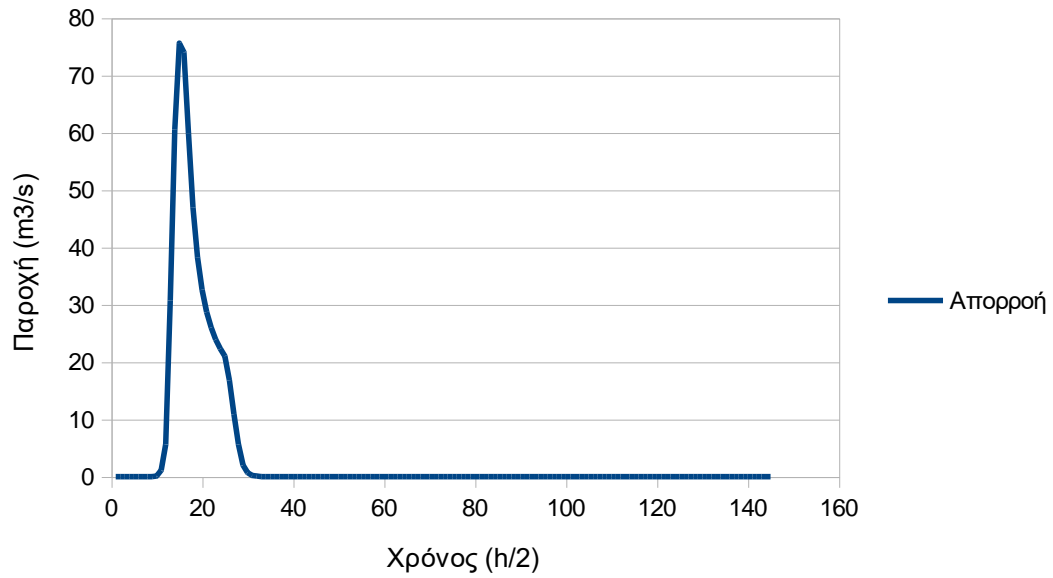
Ο συντελεστής στερεοαπορροής κατά Gavrilović και κατά Zemljič (Εξισώσεις 4.9, 4.10) επηρεάζεται άμεσα από τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης που μελετάται, ενώ οι συντελεστές στερεοαπορροής κατά Vanoni και SCS (Εξισώσεις 4.11, 4.12) είναι φθίνουσες συναρτήσεις της έκτασης της λεκάνης. Η πρώτη, προέκυψε από δεδομένα στερεοαπορροής 300 λεκανών σε παγκόσμια κλίμακα γι' αυτό και θεωρείται πιο γενικευμένη, ενώ η εξίσωση κατά SCS προέκυψε από δεδομένα στερεοαπορροής στην περιοχή του Τέξας των Η.Π.Α (Βαχαβιώλος, 2018).

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

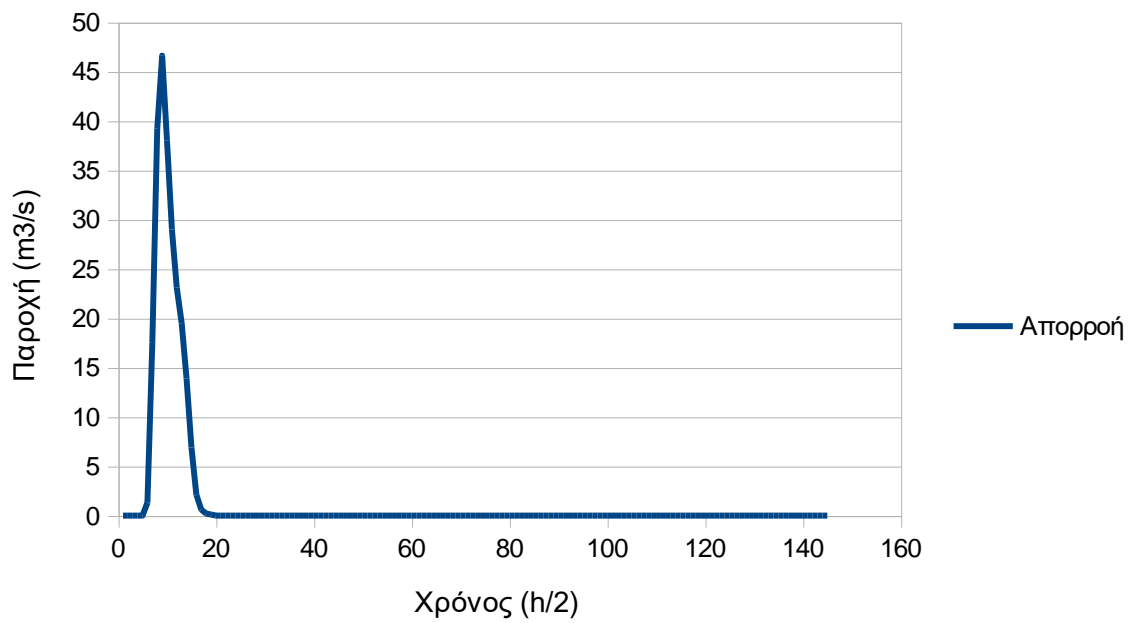
5.1 Υδρολογική ανάλυση

Αφού παράγεται το ΜΥΓ μισής ώρας για κάθε λεκάνη (Σχήμα 4.14α, 4.14β, 4.14γ και 4.14δ) μέσω της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών, τα υετογραφήματα σχεδιασμού με την μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ (Σχήμα 4.15α και 4.15β), καθώς και οι κάρναβοι υδρολογικών απωλειών για κάθε λεκάνη απορροής κατά SCS Curve Number (Σχήμα 4.16α, 4.16β, 4.16γ και 4.16γ), χρησιμοποιείται το λογισμικό HEC-HMS σύμφωνα με όσα περιγράφονται στο κεφάλαιο 4.2.5, έτσι ώστε να εξαχθεί ένα πλημμυρογράφημα για κάθε λεκάνη στην έξοδο της (Σχήμα 5.5α, 5.5β, 5.5γ και 5.5δ).

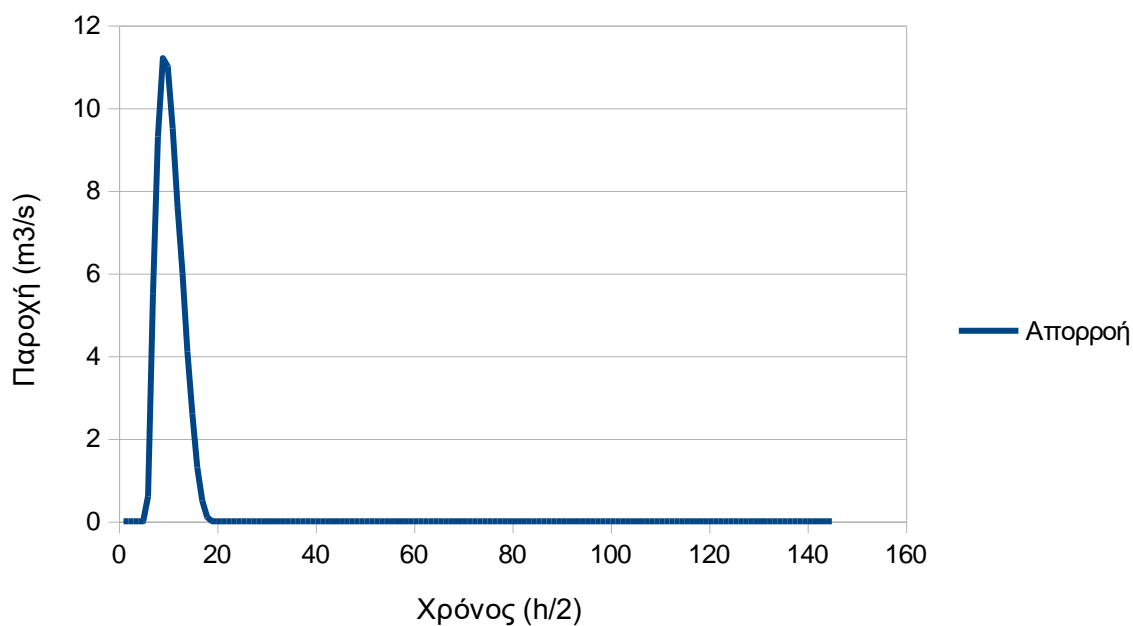
Από τα σχήματα 4.14α – 4.14δ προκύπτουν τα βασικά χαρακτηριστικά των ΜΥΓ μισής ώρας κάθε λεκάνης απορροής. Για το ΜΥΓ της λεκάνης απορροής Καρυτσιώτη προκύπτει παροχή αιχμής $38.2 \text{ m}^3/\text{s}$, ενώ ο χρόνος αιχμής του αντιστοιχεί στη 1 h και ο χρόνος βάσης του στις 4.5 h. Το ΜΥΓ της λεκάνης απορροής Μεγάλου Ποταμιού έχει τον ίδιο χρόνο αιχμής, δηλαδή 1 h, ενώ χαρακτηρίζεται από παροχή αιχμής $25.9 \text{ m}^3/\text{s}$ και χρόνο βάσης τις 4 h. Για την λεκάνη απορροής Κρυονερίου το ΜΥΓ παρουσιάζει παροχή αιχμής $4.6 \text{ m}^3/\text{s}$, χρόνο αιχμής 1 h και χρόνο βάσης 3.5 h. Τέλος, το ΜΥΓ της λεκάνης Μορφοβουνίου χαρακτηρίζεται από παροχή αιχμής $1.03 \text{ m}^3/\text{s}$, χρόνο αιχμής 1 h και χρόνος βάσης 5 h. Παρακάτω φαίνονται τα πλημμυρογραφήματα στην έξοδο κάθε λεκάνης απορροής:



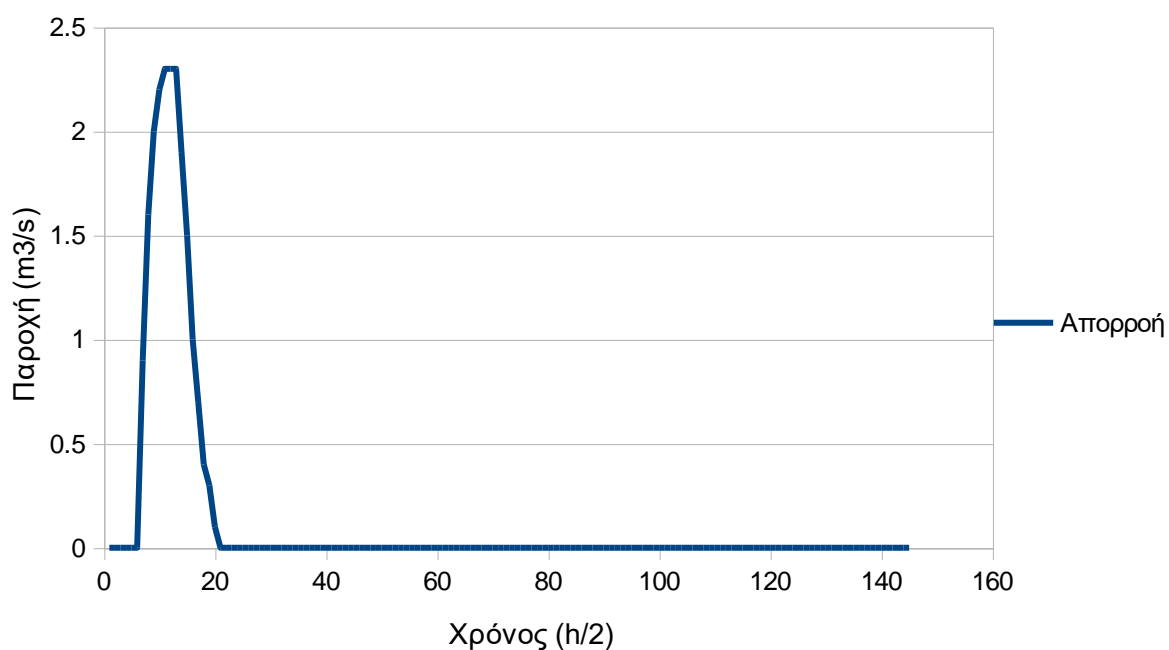
Σχήμα 5.5α: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης Καρτυσιώτη



Σχήμα 5.5β: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης Μεγάλου Ποταμιού



Σχήμα 5.5γ: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης Κρουονερίου



Σχήμα 5.5β: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης Μορφοβουνίου

Σύμφωνα με τα παραπάνω πλημμυρογραφήματα, η μεγαλύτερη παροχή αιχμής που παρατηρείται για διάρκεια επεισοδίου τριών ημερών είναι στη λεκάνη Καρυτσιώτη με τιμή $75.6 \text{ m}^3/\text{s}$ και με χρόνο αιχμής στις 7 h. Στον παρακάτω Πίνακα 5.7 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Πίνακας 5.7: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της υδρολογικής ανάλυσης κάθε λεκάνης

Όνομα Λεκάνης	Έκταση (km ²)	Παροχή αιχμής (m ³ /s)	Χρόνος αιχμής (h)
Καρυτσιώτη	48.91	75.6	7
Μεγάλου Ποταμιού	24.72	46.6	4
Κρυονερίου	6.56	11.2	4
Μορφοβουνίου	2.26	2.3	5.5

5.2 Διάβρωση - Στερεοαπορροή

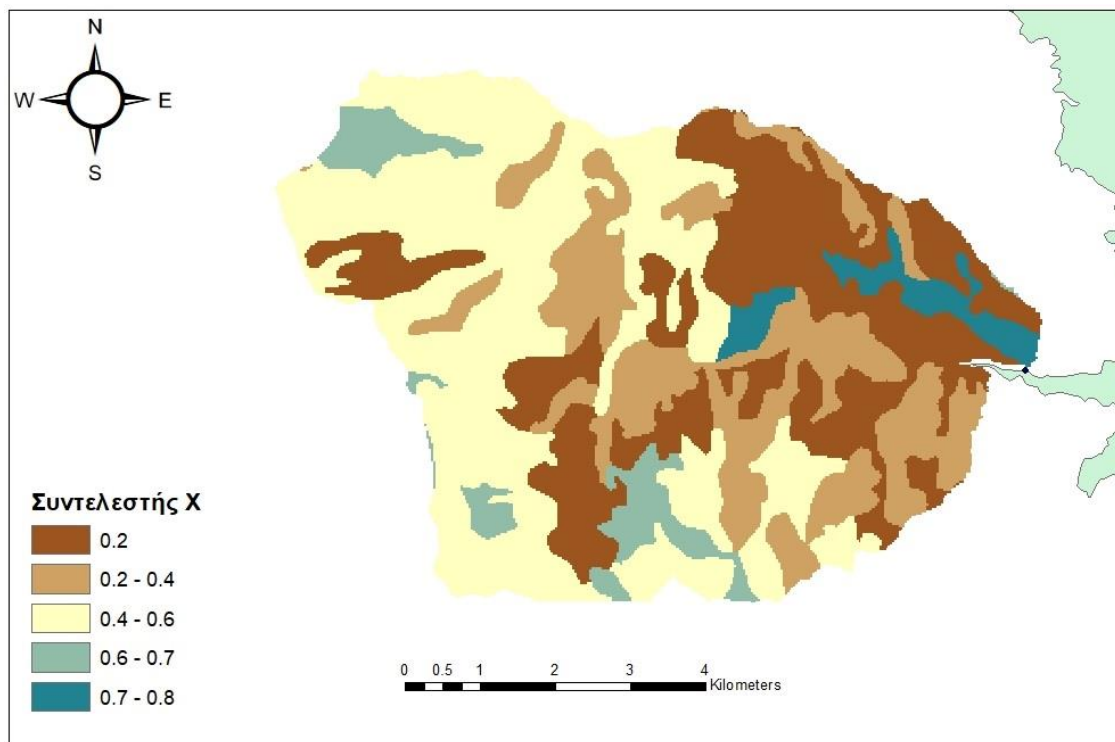
Προκειμένου να υπολογιστεί η μέση ετήσια διάβρωση των λεκανών απορροής (Εξίσωση 4.2), πραγματοποιείται αρχικά η επιφανειακή κατανομή των συντελεστών X, Y και φ. Ακολούθως, υπολογίζονται οι συντελεστές διάβρωσης Z, βροχόπτωσης h και θερμοκρασίας T από τις Εξισώσεις 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, χρησιμοποιώντας το εργαλείο Raster Calculator. Τέλος, υπολογίζεται ο ετήσιος ρυθμός διάβρωσης W από την Εξίσωση 4.2. Τα αποτελέσματα και για τις τέσσερις εξεταζόμενες λεκάνες της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται παρακάτω.

5.2.1 Αποτελέσματα λεκάνης απορροής του ρέματος Καρυτσιώτη

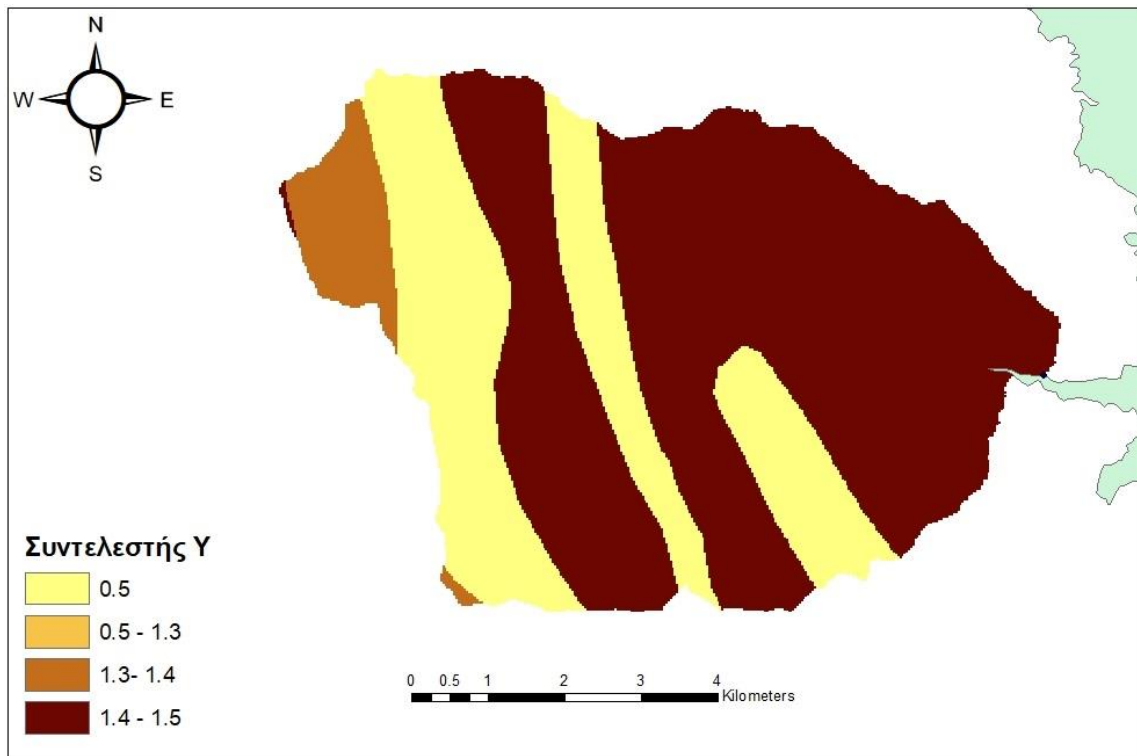
Από την επιφανειακή κατανομή του συντελεστή X, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1α, προκύπτει ότι η λεκάνη απορροής του ρέματος Καρυτσιώτη σε σχέση με την κάλυψη χρήσεων γης εμφανίζει μέτρια προστασία από διάβρωση, δηλαδή μεσαίες τιμές του συντελεστή στο μεγαλύτερο μέρος της. Πρόκειται κυρίως για περιοχή με σημαντική κάλυψη από δάση, τόσο πλατύφυλλων όσο και κωνοφόρων δέντρων αλλά και μικτών δασών ($0.2 < X < 0.4$), καθώς και περιοχές σημαντικής κάλυψης από θάμνους, βοσκότοπους και χερσότοπους αλλά και αραιή βλάστηση ($0.5 < X < 0.65$). Μόνο στα κομμάτια όπου αναπτύσσεται γεωργική δραστηριότητα υπάρχει μικρότερη προστασία ($0.7 < X < 0.8$). Από γεωλογική άποψη (Σχήμα 5.1β), η λεκάνη εμφανίζει μέτρια έως χαμηλή αντίσταση στη διάβρωση, καθώς η έκτασή της καλύπτεται από

γεωλογικούς σχηματισμούς όπως είναι οι φλύσχεις και τοφίτες οι οποίοι δεν προσφέρουν ιδιαίτερη αντίσταση ($1.3 < Y < 1.5$), και σε μικρότερη έκταση από σχηματισμούς ασβεστολίθων οι οποίοι είναι πιο ανθεκτικοί ($Y = 0.5$).

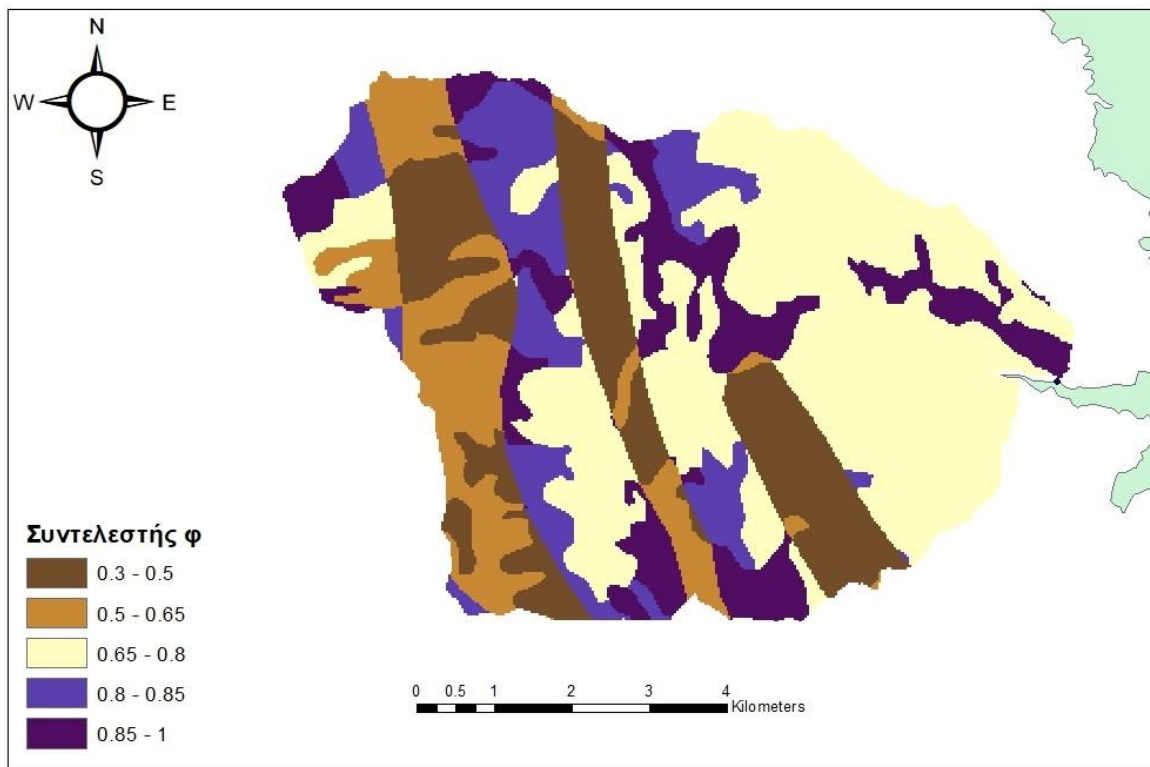
Οι παραπάνω συντελεστές X και Y επηρεάζουν τον συντελεστή διάβρωσης (Σχήμα 5.1δ), ο οποίος εμφανίζει μέση τιμή 0.72 (μέτρια διάβρωση). Στα κομμάτια εκείνα της λεκάνης στα οποία ναι μεν οι γεωλογικοί σχηματισμοί δεν προσφέρουν ιδιαίτερη αντίσταση στη διάβρωση αλλά οι χρήσεις γης είναι τέτοιες που βοηθούν στην αντίσταση έναντι της, εμφανίζονται χαμηλές τιμές του συντελεστή Z , καθιστώντας την κάλυψη της γης κρισιμότερο παράγοντα που επηρεάζει την τιμή του συντελεστή διάβρωσης. Επίσης, παρατηρείται ότι οι κλίσεις γης δεν επηρεάζουν σε ιδιαίτερο βαθμό τον συντελεστή διάβρωσης καθώς δεν υπάρχει φανερή συσχέτισή της με τις τιμές που λαμβάνει αυτός, είτε σε ορεινότερα είτε σε πιο πεδινά κομμάτια της λεκάνης. Από τους καννάβους θερμοκρασίας και βροχόπτωσης (Σχήματα 5.1ε, 5.1στ, 5.1ζ) παρατηρείται ότι στα υψηλά υψόμετρα η θερμοκρασία μειώνεται, ενώ αντίθετα το ύψος βροχής αυξάνεται. Η βροχόπτωση είναι η κινητήριος δύναμη της διάβρωσης και η αύξηση της έντασης της αυξάνει το ρυθμό διάβρωσης (Κεφάλαιο 2.1).



Σχήμα 5.1α: Κάνναβος συντελεστή X λεκάνης απορροής Καρτυσιώτη



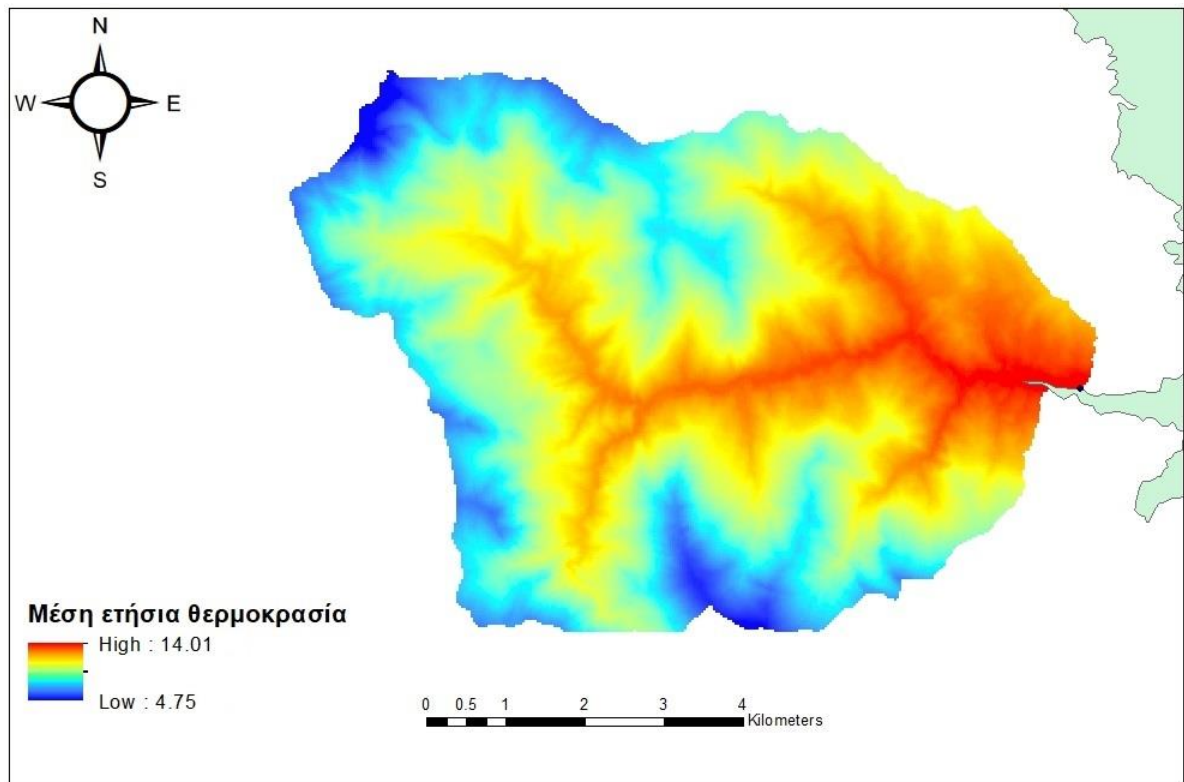
Σχήμα 5.1β: Κάνναβος συντελεστή Υ λεκάνης απορροής Καρτυσιώτη



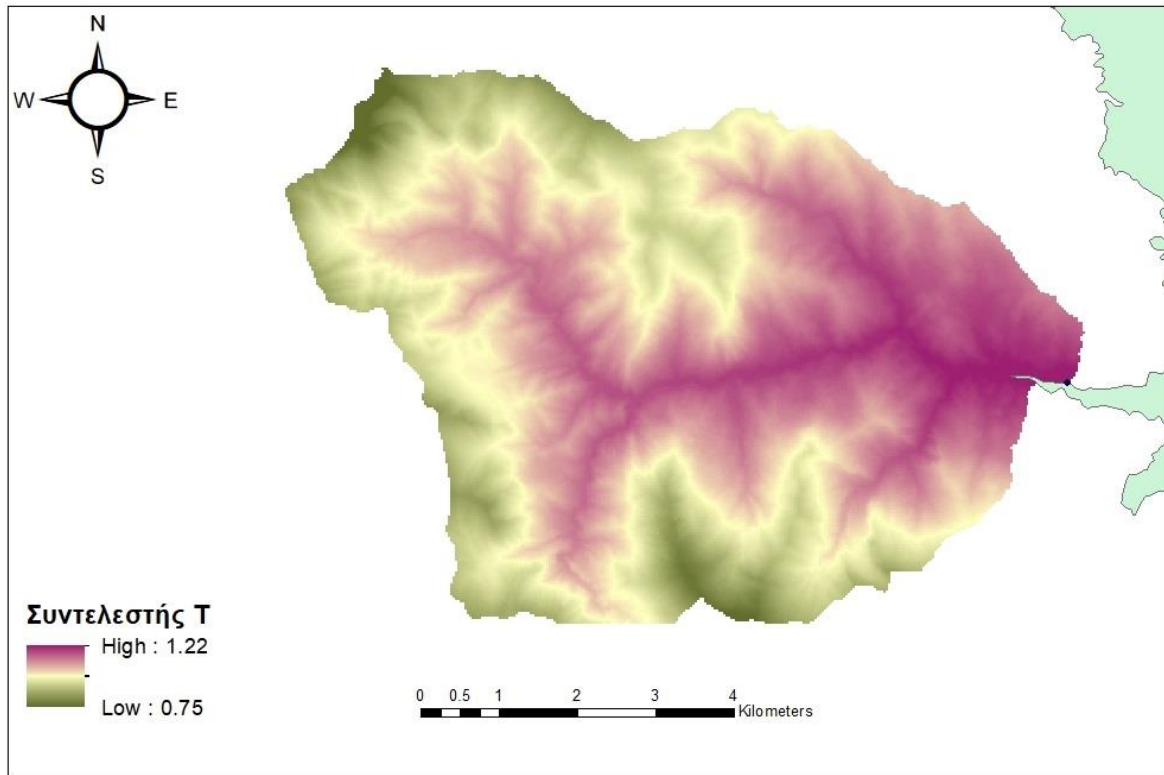
Σχήμα 5.1γ: Κάνναβος συντελεστή φ λεκάνης απορροής Καρτυσιώτη



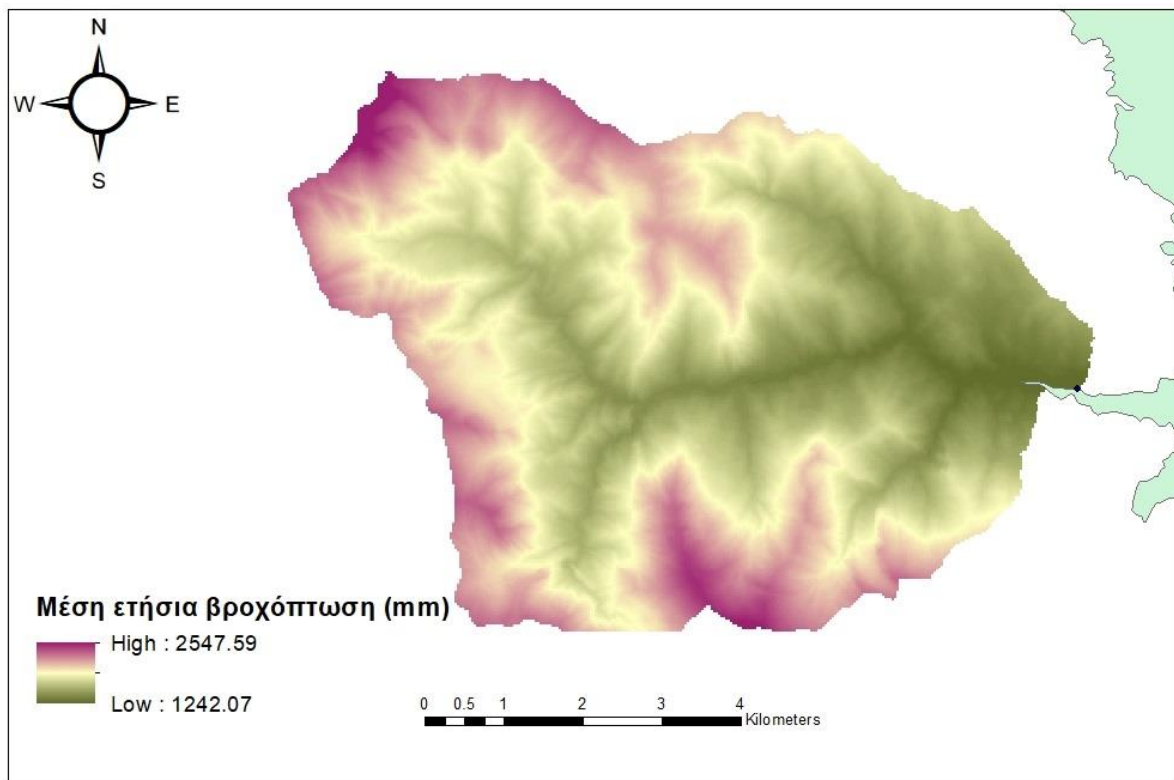
Σχήμα 5.1δ: Κάνναβος συντελεστή Z λεκάνης απορροής Καρυσιώτη



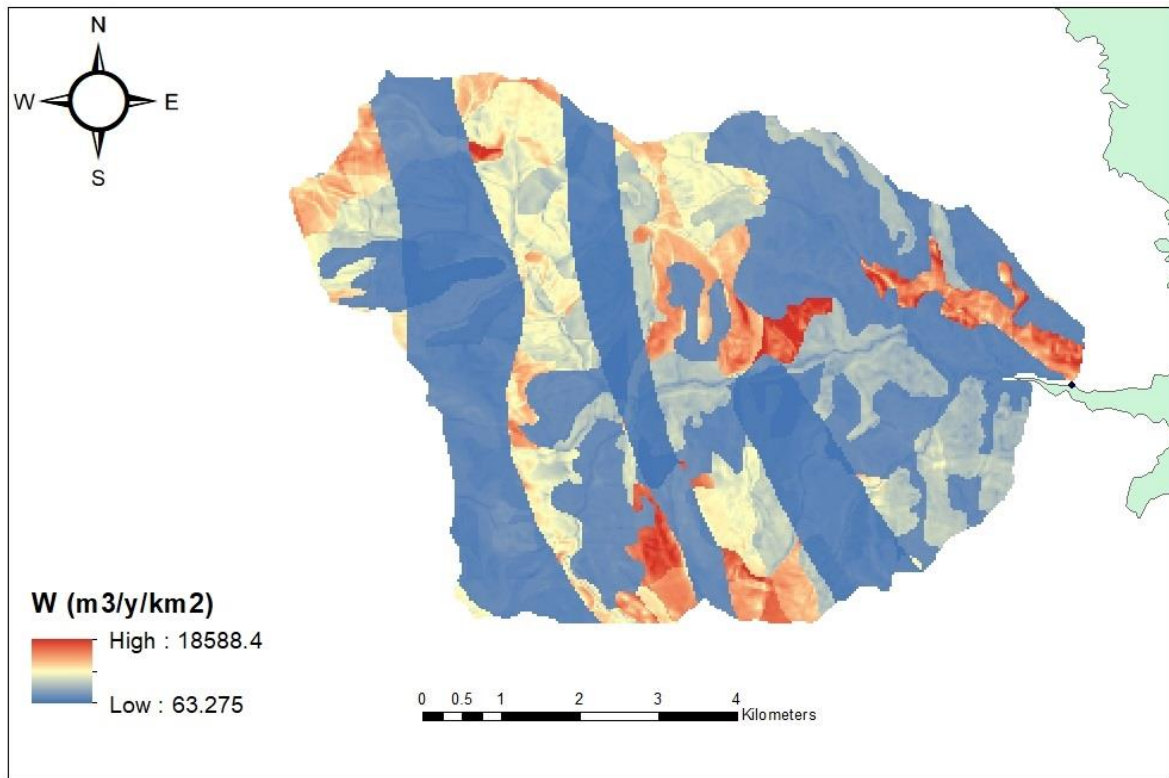
Σχήμα 5.1ε: Κάνναβος μέσης ετήσιας θερμοκρασίας λεκάνης απορροής Καρυσιώτη



Σχήμα 5.1στ: Κάνναβος συντελεστή T λεκάνης απορροής Καρυτσιώτη



Σχήμα 5.1ζ: Κάνναβος μέσης ετήσιας βροχόπτωσης λεκάνης απορροής Καρυτσιώτη



Σχήμα 5.1η: Εκτίμηση συνολικού ετήσιου ρυθμού διάβρωσης W λεκάνης απορροής Καρτυσιώτη

Τέλος, παρατηρείται ότι ο κάρναβος του συνολικού ετήσιου ρυθμού διάβρωσης W (Σχήμα 5.1η) έχει παρόμοια κατανομή με εκείνη του κάρναβου του συντελεστή διάβρωσης Z (Σχήμα 5.1δ). Επίσης παρατηρείται ότι ο κάρναβος της διάβρωσης, όπως και εκείνος του συντελεστή Z, ακολουθεί κυρίως την επιφανειακή κατανομή του Y (γεωλογία), όμως επηρεάζεται σχεδόν εξίσου σημαντικά και από εκείνη του συντελεστή X (χρήσεις γης).

Η μέση ετήσια παραγωγή ιζημάτων για τη λεκάνη του ρέματος Καρτυσιώτη παρουσιάζει ελάχιστη τιμή $63.3 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$, μέγιστη τιμή $18588.4 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$, μέση τιμή $4099.8 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$ και τυπική απόκλιση $3899.9 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$. Η τιμή παρουσιάζει διαφοροποίηση στο χώρο, γι' αυτό λήφθηκε υπόψη η διάμεσος της παραμέτρου που αντιστοιχεί σε $7311 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$. Εφαρμόζοντας τις μεθόδους που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4.4 υπολογίζεται η μέση ετήσια στερεοαπορροή. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 5.1:

Πίνακας 5.1: Μέση ετήσια στερεοαπορροή λεκάνης Καρυτσιώτη

Μέθοδος	Συντελεστής συγκράτησης	Μέση ετήσια στερεοαπορροή (tn/y)
DR, Gavrilović	0.87	821682.4
DR, Zemljič	0.19	182963.7
SDR, SCS	0.37	349441.3
SDR, Vanoni	0.29	275325.1

Ο συντελεστής συγκράτησης κατά Gavrilović έχει σχεδόν τριπλάσια τιμή από τους υπόλοιπους συντελεστές (Zemljič, SCS, Vanoni) γιατί τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του ρέματος Καρυτσιώτη (μέσο υψόμετρο, περίμετρος, μήκος κύριου υδατορεύματος), από τα οποία εξαρτάται σύμφωνα με τον Gavrilović, επηρεάζουν την είσοδο στο υδρογραφικό δίκτυο μεγάλης ποσότητας ιζημάτων που έχει παραχθεί από τη διάβρωση (στερεοαπορροή). Έτσι παρατηρείται στην πράξη ποιος ήταν ο λόγος της τροποποίησης της σχέσης για την εκτίμηση του συντελεστή DR της μεθόδου από τον Zemljič.

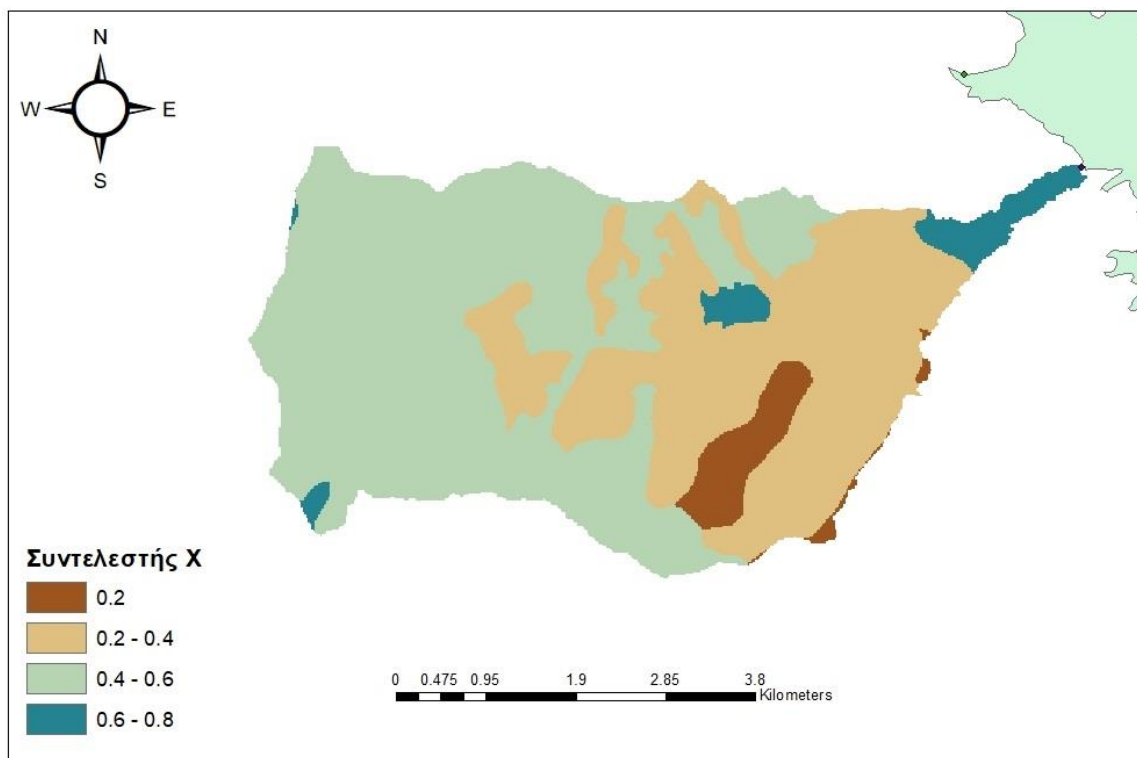
5.2.2 Αποτελέσματα λεκάνης απορροής του ρέματος Μεγάλο

Ποτάμι

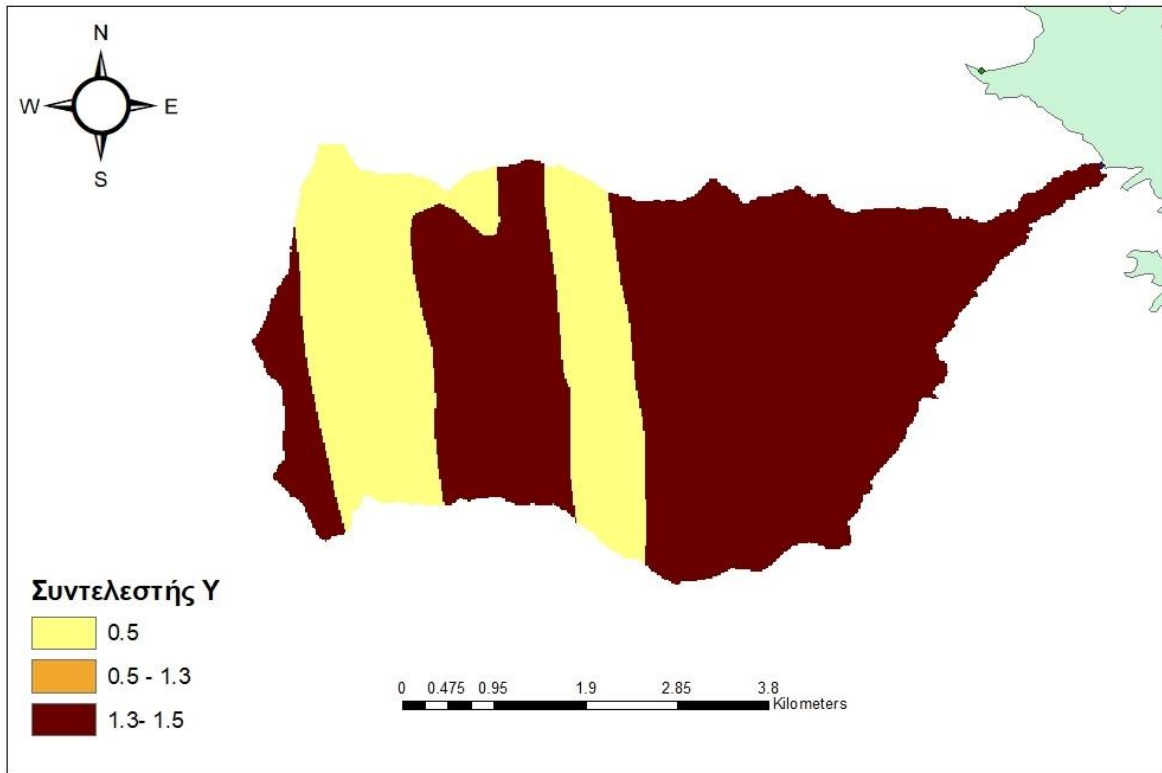
Από την επιφανειακή κατανομή του συντελεστή X , όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2α, προκύπτει ότι η λεκάνη απορροής του ρέματος Μεγάλο Ποτάμι εμφανίζει μέτρια προστασία από διάβρωση σε σχέση με την κάλυψη χρήσεων γης, δηλαδή μεσαίες τιμές του συντελεστή στο μεγαλύτερο μέρος της. Πρόκειται κυρίως για περιοχή με σημαντική κάλυψη από δάση, πλατύφυλλων και κωνοφόρων δέντρων ($X=0.4$), καθώς και περιοχές σημαντικής κάλυψης από θάμνους και χερσότοπους αλλά και μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις ($0.5 < X < 0.6$). Στα κομμάτια όπου αναπτύσσεται γεωργική δραστηριότητα αλλά και σε εκτάσεις φυσικής βλάστησης υπάρχει μικρότερη προστασία ($0.7 < X < 0.8$). Από γεωλογική άποψη (Σχήμα 5.2β), η λεκάνη εμφανίζει μέτρια αντίσταση στη διάβρωση, καθώς η έκτασή της καλύπτεται κυρίως

από σχηματισμούς φλυσχών οι οποίοι δεν προσφέρουν ιδιαίτερη αντίσταση ($1.3 < Y < 1.5$), και σε μικρότερη έκταση από σχηματισμούς ασβεστολίθων οι οποίοι είναι πιο ανθεκτικοί ($Y = 0.5$).

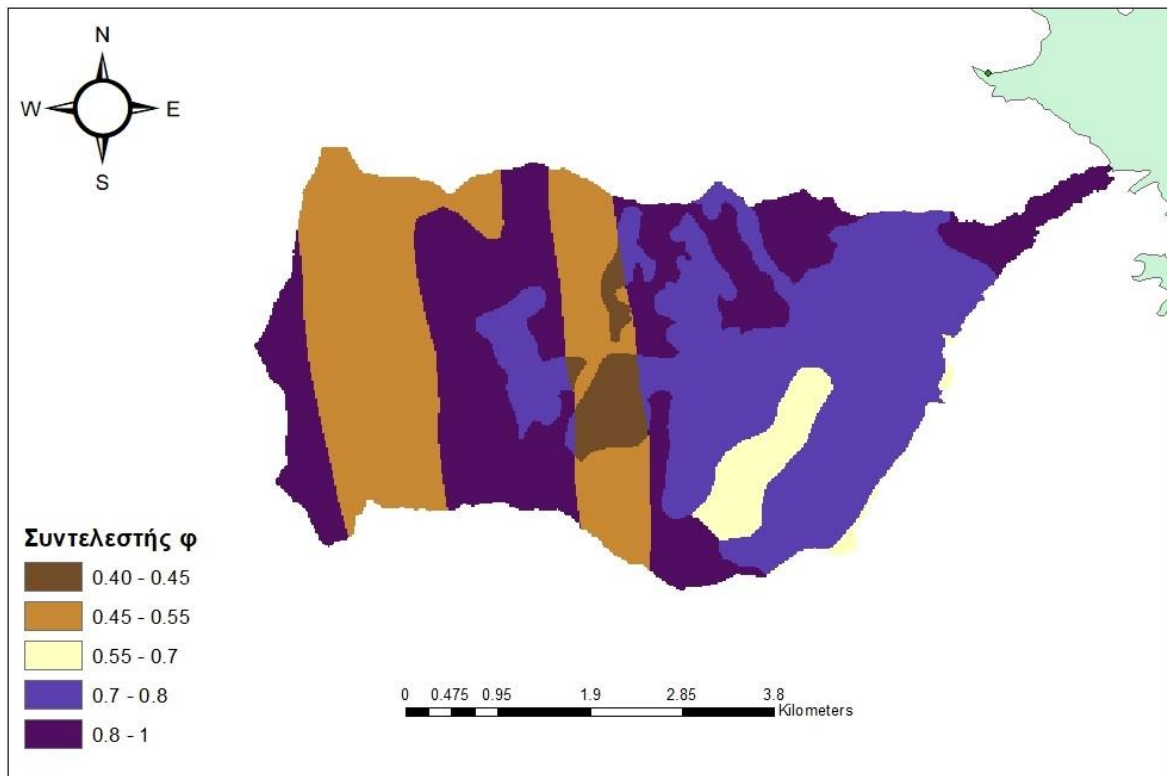
Οι παραπάνω συντελεστές X και Y επηρεάζουν τον συντελεστή διάβρωσης (Σχήμα 5.2δ), ο οποίος εμφανίζει μέση τιμή 0.79 (μέτρια διάβρωση). Ως προς τις τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής Z παρατηρείται ότι μένουν σε χαμηλά επίπεδα στα τμήματα της λεκάνης στα οποία αν και οι γεωλογικοί σχηματισμοί δεν αντιστέκονται ιδιαίτερα στη διάβρωση, οι χρήσεις γης είναι τέτοιες που βοηθούν στην αντίσταση έναντι της. Έτσι, η κάλυψη της γης καθίσταται κρισιμότερος παράγοντας που επηρεάζει την τιμή του συντελεστή διάβρωσης. Επίσης, παρατηρείται ότι οι κλίσεις γης δεν επηρεάζουν σε ιδιαίτερο βαθμό τον συντελεστή διάβρωσης καθώς δεν υπάρχει φανερή συσχέτιση της με τις τιμές που λαμβάνει αυτός, είτε σε ορεινότερα είτε σε πιο πεδινά κομμάτια της λεκάνης. Από τους καννάβους θερμοκρασίας και βροχόπτωσης (Σχήματα 5.2ε, 5.2στ, 5.2ζ) παρατηρείται ότι στα υψηλά υψόμετρα η θερμοκρασία μειώνεται, ενώ αντίθετα το ύψος βροχής αυξάνεται.



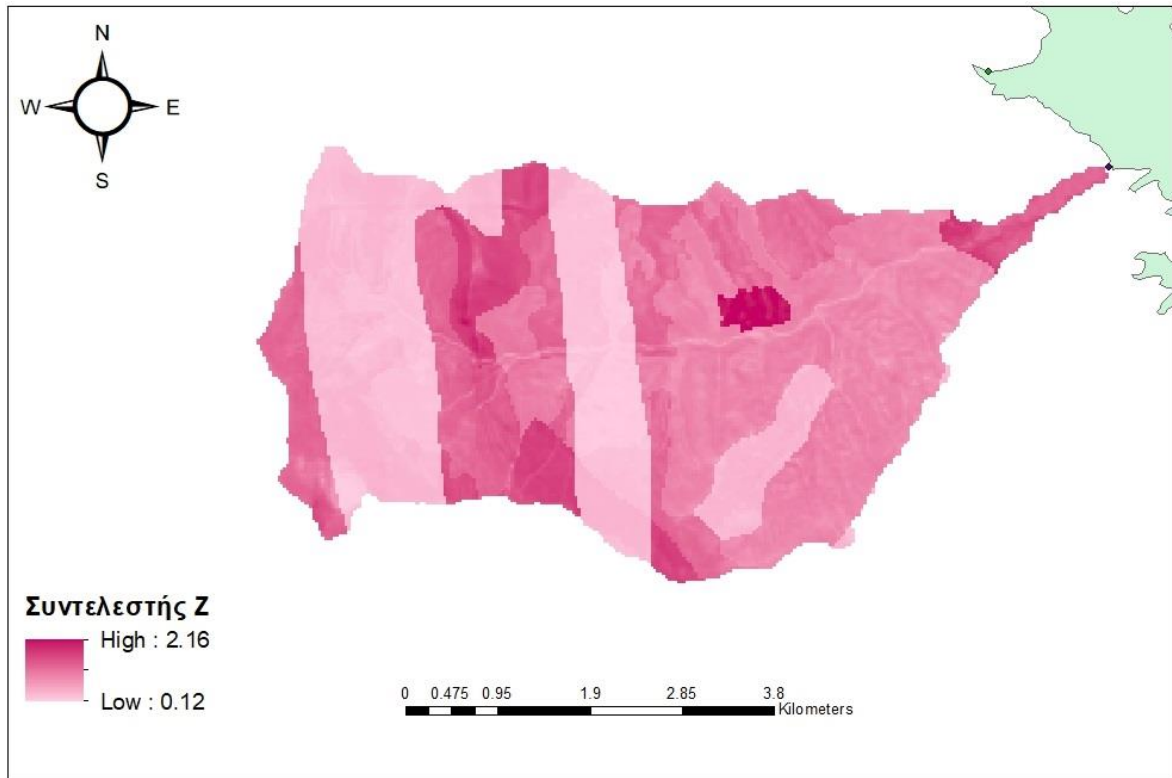
Σχήμα 5.2α: Κάνναβος συντελεστή X λεκάνης απορροής Μεγάλου Ποταμού



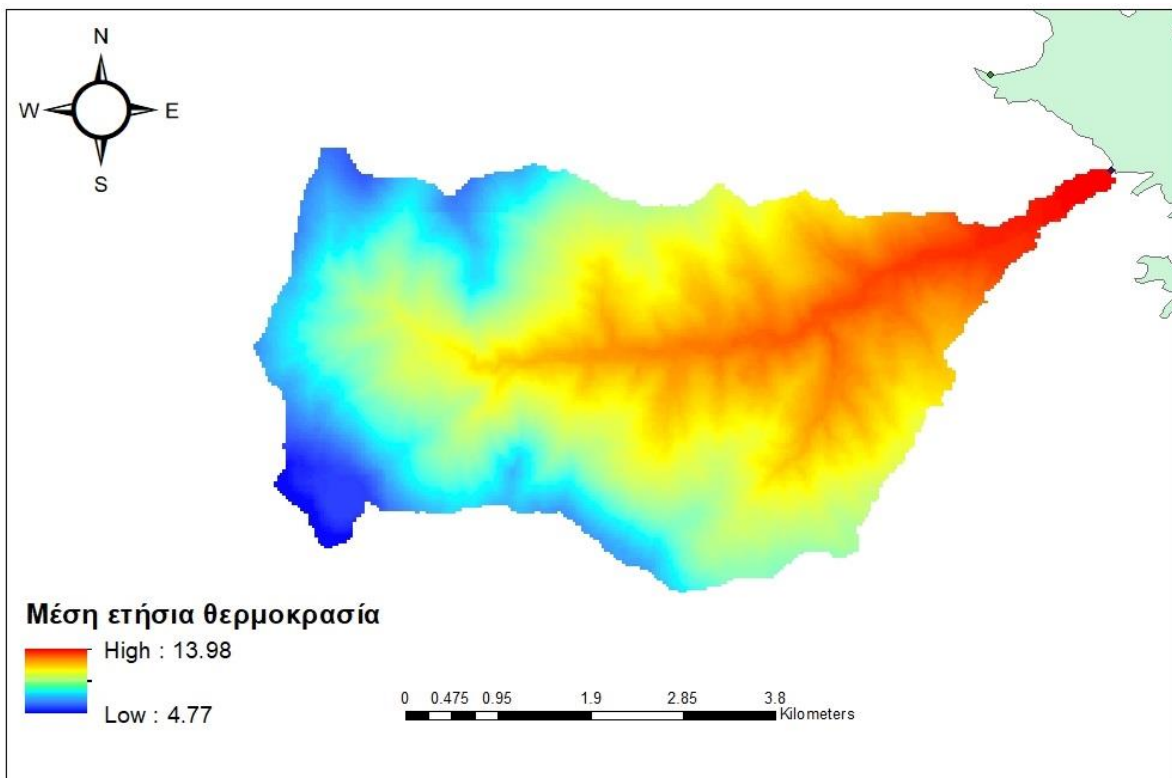
Σχήμα 5.2β: Κάνναβος συντελεστή Υ λεκάνης απορροής Μεγάλου Ποταμιού



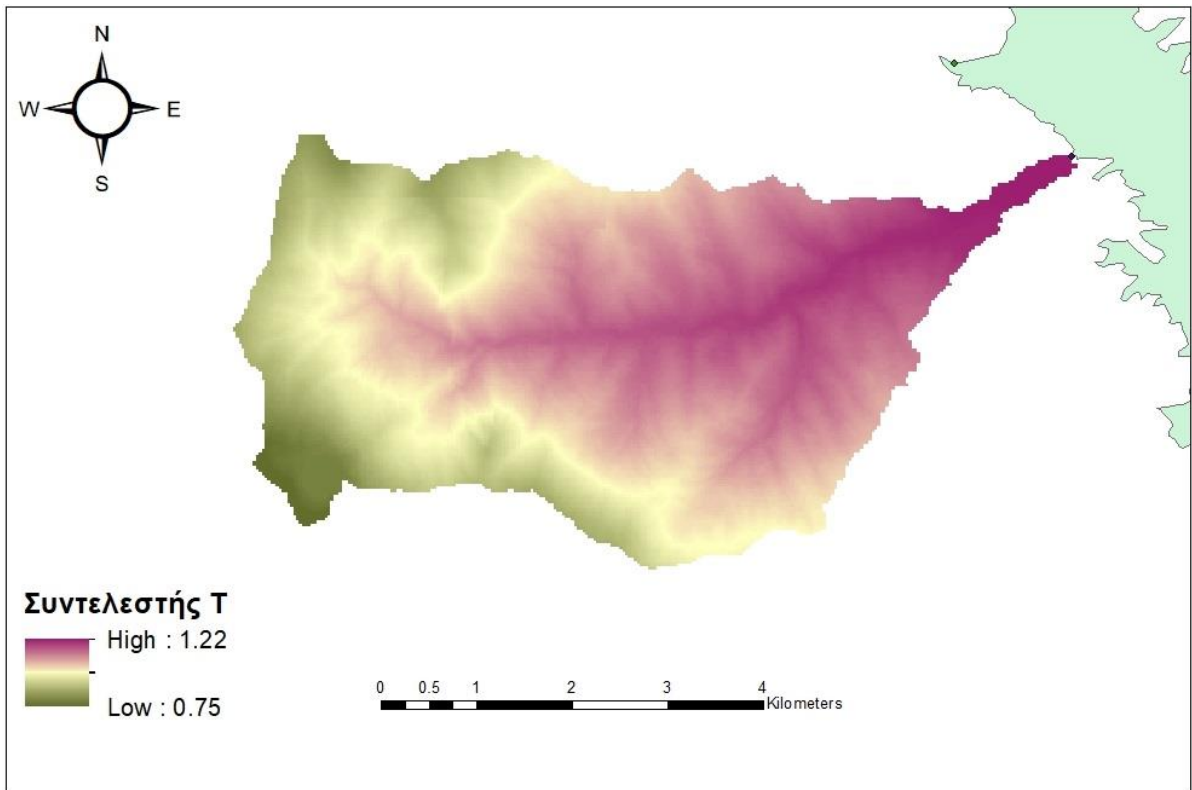
Σχήμα 5.2γ: Κάνναβος συντελεστή φ λεκάνης απορροής Μεγάλου Ποταμιού



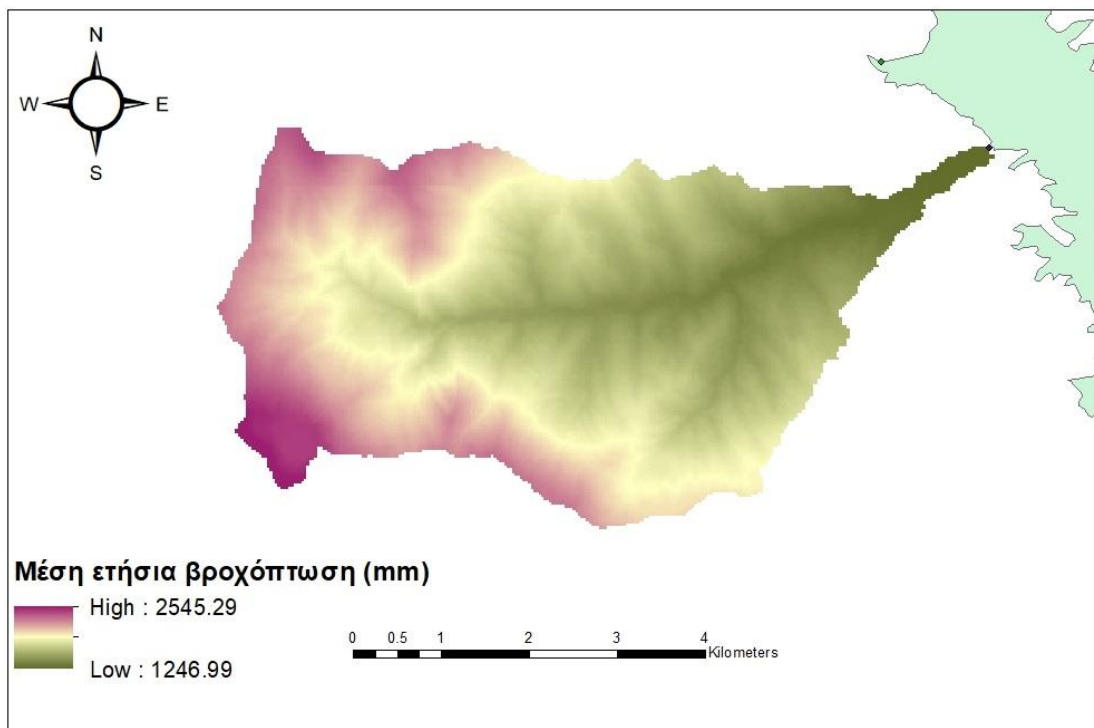
Σχήμα 5.2δ: Κάνναβος συντελεστή Z λεκάνης απορροής Μεγάλου Ποταμιού



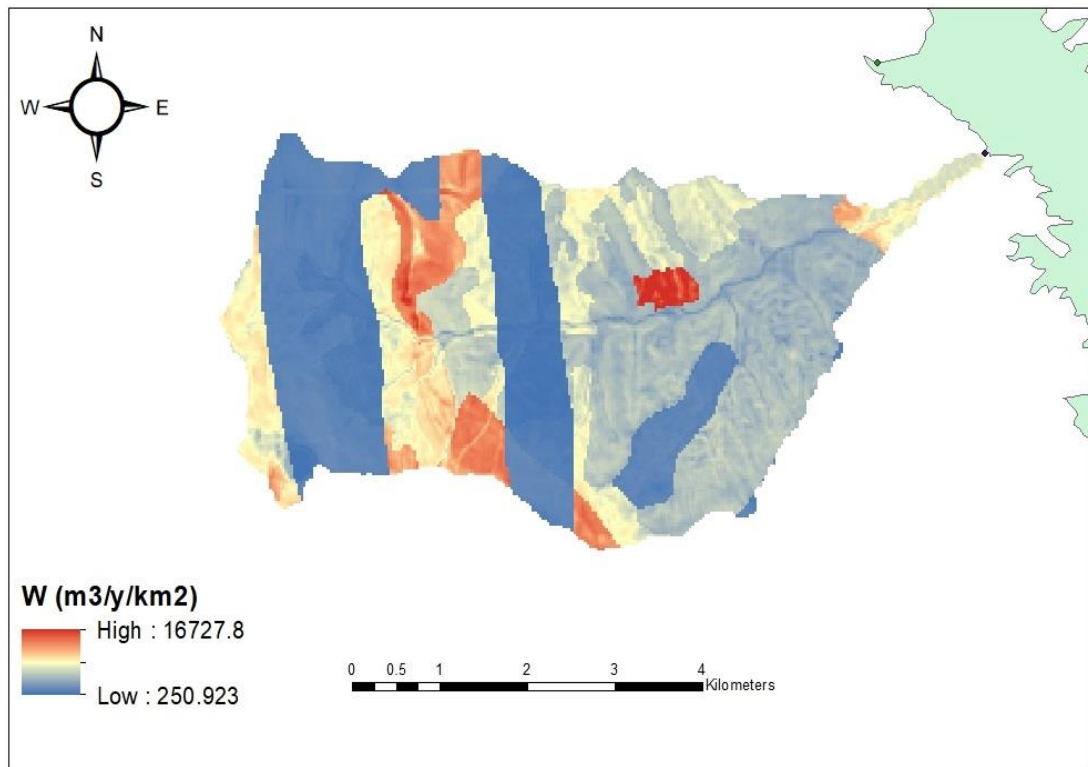
Σχήμα 5.2ε: Κάνναβος μέσης ετήσιας θερμοκρασίας λεκάνης απορροής Μεγάλου Ποταμιού



Σχήμα 5.2στ: Κάνναβος συντελεστή T λεκάνης απορροής Μεγάλου Ποταμιού



Σχήμα 5.2ζ: Μέση ετήσια βροχόπτωση λεκάνης απορροής Μεγάλου Ποταμιού



Σχήμα 5.2η: Εκτίμηση συνολικού ετήσιου ρυθμού διάβρωσης W λεκάνης απορροής Μεγάλου Ποταμιού

Τέλος, παρατηρείται ότι ο κάρναβος του συνολικού ετήσιου ρυθμού διάβρωσης W (Σχήμα 5.2η) έχει παρόμοια κατανομή με εκείνη του κάρναβου του συντελεστή διάβρωσης Z (Σχήμα 5.2δ). Επίσης παρατηρείται ότι ο κάρναβος της διάβρωσης, όπως και εκείνος του συντελεστή Z, ακολουθεί κυρίως την επιφανειακή κατανομή του Y (γεωλογία), όμως επηρεάζεται σχεδόν εξίσου σημαντικά και από εκείνη του συντελεστή X (χρήσεις γης).

Η μέση ετήσια παραγωγή ιζημάτων για τη λεκάνη του ρέματος Μεγάλου Ποταμιού παρουσιάζει ελάχιστη τιμή $250.92 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$, μέγιστη τιμή $16727.8 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$, μέση τιμή $4507.8 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$ και τυπική απόκλιση $3215.2 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$. Η τιμή παρουσιάζει διαφοροποίηση στο χώρο, γι' αυτό λήφθηκε υπόψη η διάμεσος της παραμέτρου που αντιστοιχεί σε $5965.5 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$. Εφαρμόζοντας τις μεθόδους που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4.4 υπολογίζεται η μέση ετήσια στερεοαπορροή. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 5.2:

Πίνακας 5.2: Μέση ετήσια στερεοαπορροή λεκάνης Μεγάλου Ποταμιού

Μέθοδος	Συντελεστής συγκράτησης	Μέση ετήσια στερεοαπορροή (tn/y)
DR, Gavrilović	0.68	263639.4
DR, Zemljič	0.23	88746.9
SDR, SCS	0.39	155337.0
SDR, Vanoni	0.32	123649.4

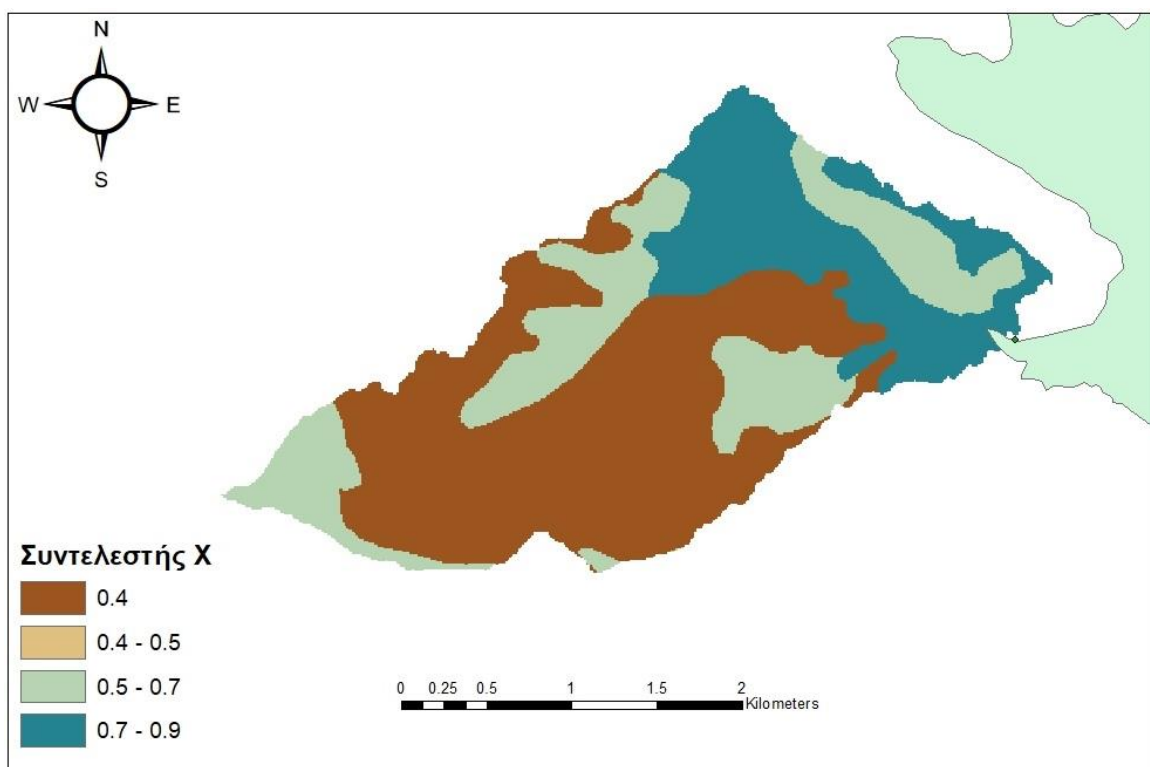
Ο συντελεστής συγκράτησης κατά Gavrilović έχει σχεδόν διπλάσια ή τριπλάσια τιμή από τους υπόλοιπους συντελεστές (Zemljič, SCS, Vanoni) γιατί τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του ρέματος Καρυτσιώτη (μέσο υψόμετρο, περίμετρος, μήκος κύριου υδατορεύματος), από τα οποία εξαρτάται σύμφωνα με τον Gavrilović, επηρεάζουν την είσοδο στο υδρογραφικό δίκτυο μεγάλης ποσότητας ιζημάτων που έχει παραχθεί από τη διάβρωση (στερεοαπορροή). Οι συντελεστές κατά Zemljič, SCS και Vanoni είναι μεγαλύτεροι σε σχέση με εκείνους που υπολογίστηκαν για τη λεκάνη απορροής Καρυτσιώτη, αφού οι τιμές τους είναι αντιστρόφως ανάλογες με την αύξηση του εμβαδού της λεκάνης.

5.2.3 Αποτελέσματα λεκάνης απορροής Κρυονερίου

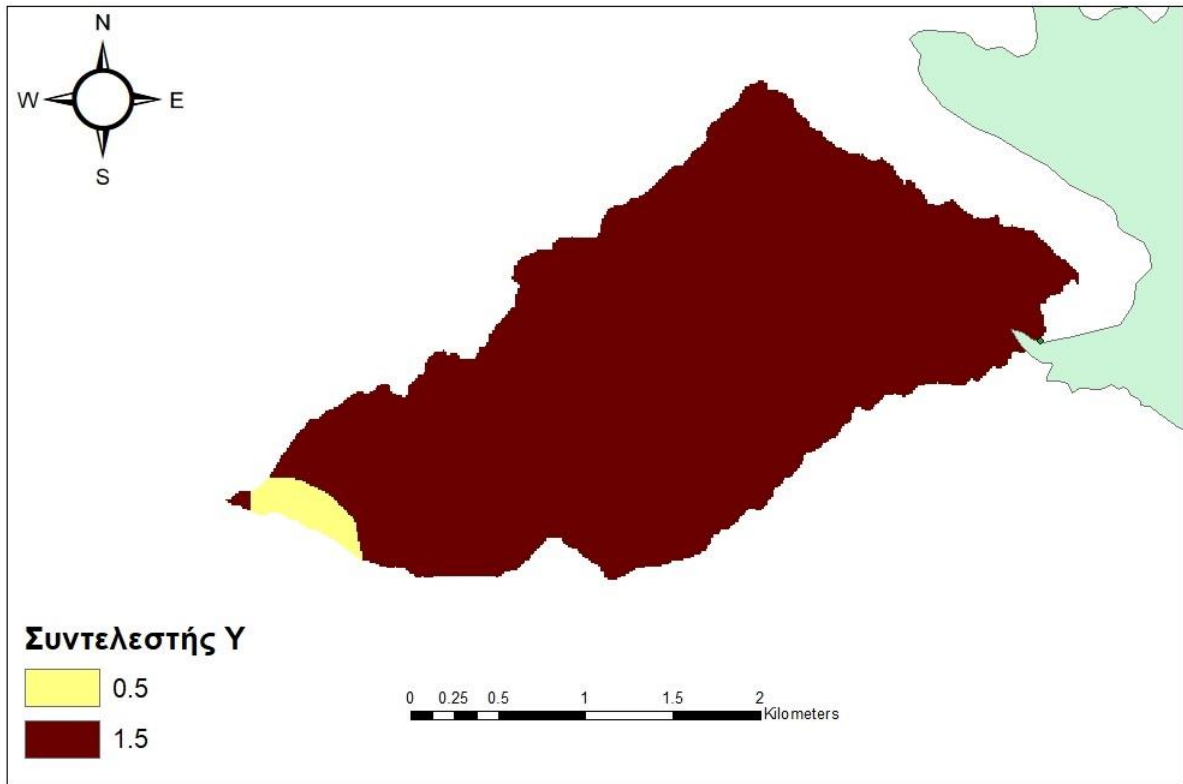
Στη λεκάνη απορροής Κρυονερίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3α, σε σχέση με την κάλυψη χρήσεων γης παρατηρείται μέτρια έως χαμηλή προστασία από διάβρωση, δηλαδή μεσαίες και υψηλές τιμές του συντελεστή X στο μεγαλύτερο μέρος της. Σε μεγάλο κομμάτι κυρίως στη νότια πλευρά της λεκάνης υπάρχουν περιοχές με σημαντική κάλυψη από μη-αρδεύσιμη αρόσιμη γη και περιοχές σημαντικής κάλυψης από σύνθετα συστήματα καλλιεργειών ή εκτάσεις φυσικής βλάστησης ($0.7 < X < 0.9$), καθώς και περιοχές που συνίστανται από θάμνους, χερσότοπους και μεταβατικές θαμνώδεις-δασώδεις εκτάσεις ($0.5 < X < 0.6$). Στα κομμάτια όπου αναπτύσσονται δάση κωνοφόρων υπάρχει μια σχετικά καλύτερη προστασία ($X=0.4$). Από γεωλογική άποψη (Σχήμα 5.3β), η λεκάνη εμφανίζει χαμηλή αντίσταση στη διάβρωση, καθώς

η έκτασή της είναι σχεδόν εξολοκλήρου καλυμμένη από γεωλογικούς σχηματισμούς φλύσχη οι οποίοι δεν είναι αρκετά ανθεκτικοί έναντι διάβρωσης ($Y=1.5$), και ένα μικρό μόνο κομμάτι καλύπτεται από ασβεστόλιθους ($Y=0.5$).

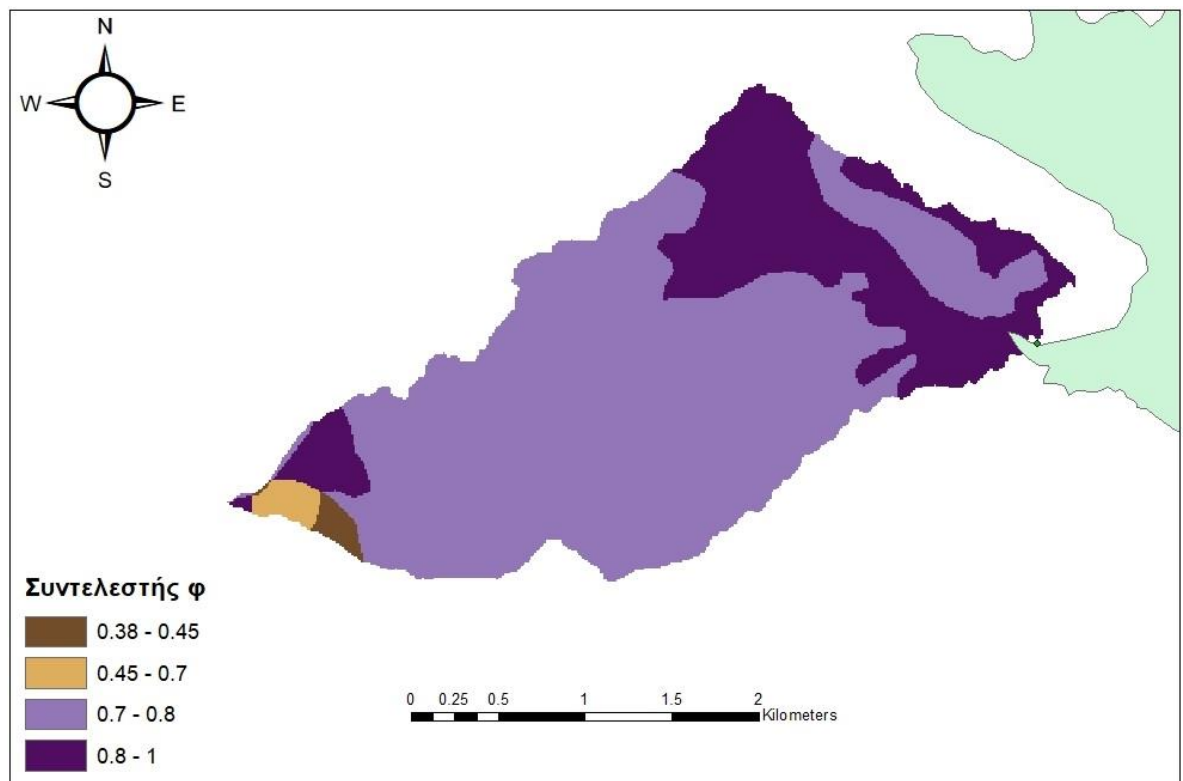
Ο συντελεστής διάβρωσης Z εμφανίζει μέση τιμή 1, τιμή από την οποία ξεκινάει να θεωρείται υψηλή διάβρωση. Συνεπώς η λεκάνη απορροής Κρυονερίου, κυρίως στο νοτιοανατολικό τμήμα της όπου υπάρχουν καλλιεργούμενες εκτάσεις παρουσιάζει σημαντική διάβρωση. Ομοίως με τις προηγούμενες λεκάνες, η κάλυψη της γης φαίνεται να αποτελεί κρισιμότερο ή εξίσου σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει την τιμή του συντελεστή διάβρωσης. Επίσης, παρατηρείται ότι οι κλίσεις γης δεν επηρεάζουν σε ιδιαίτερο βαθμό τον συντελεστή διάβρωσης καθώς δεν υπάρχει φανερή συσχέτισή της με τις τιμές που λαμβάνει αυτός, είτε σε ορεινότερα είτε σε πιο πεδινά κομμάτια της λεκάνης. Από τους καννάβους θερμοκρασίας και βροχόπτωσης (Σχήματα 5.3ε, 5.3στ, 5.3ζ) παρατηρείται ότι σε αντίθεση με τις προηγούμενες λεκάνες, στη λεκάνη απορροής Κρυονερίου το ύψος βροχόπτωσης είναι στα χαμηλά επίπεδα στο μεγαλύτερο τμήμα της.



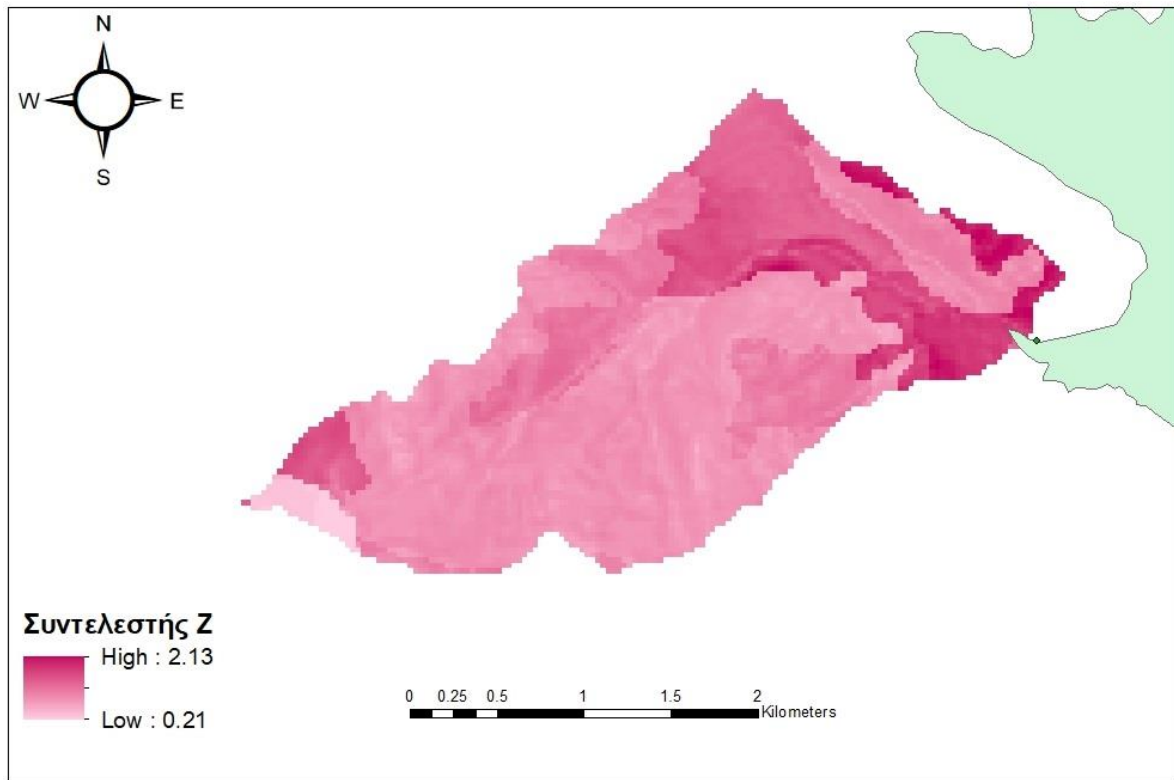
Σχήμα 5.3α: Κάνναβος συντελεστή X λεκάνης απορροής Κρυονερίου



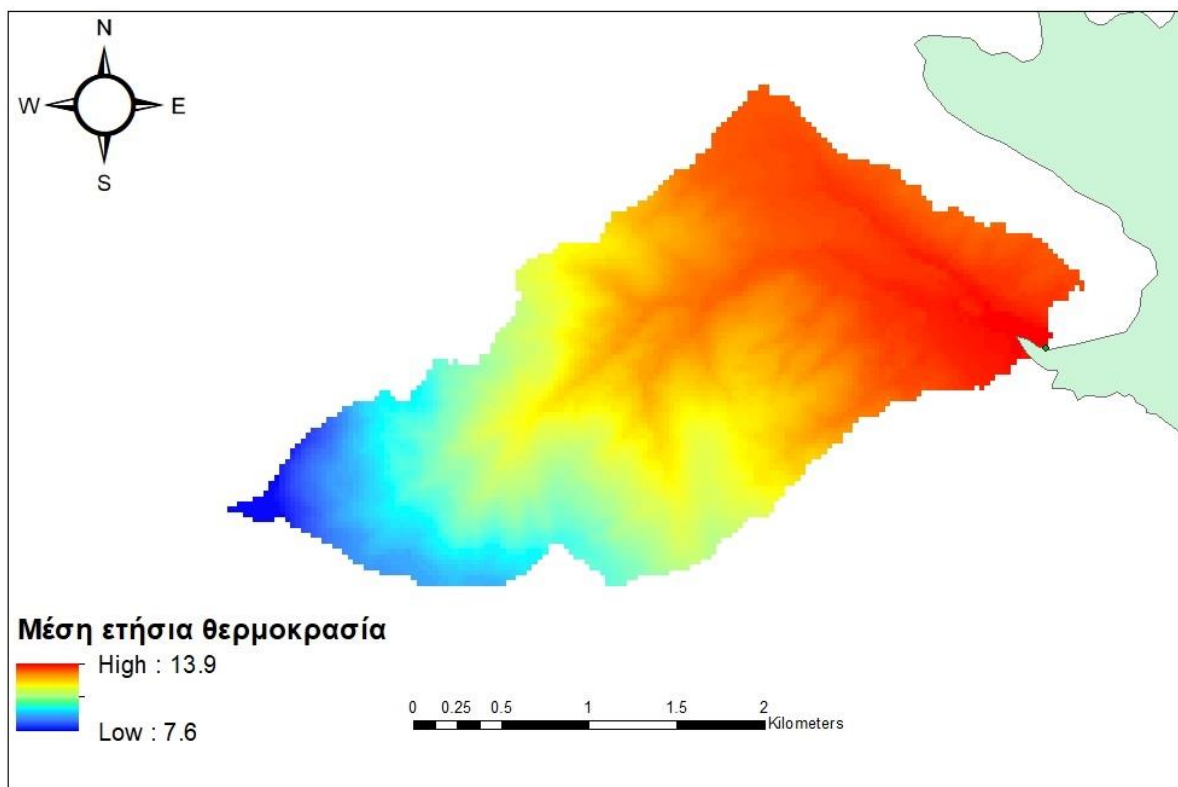
Σχήμα 5.3β: Κάνναβος συντελεστή Υ λεκάνης απορροής Κρυονερίου



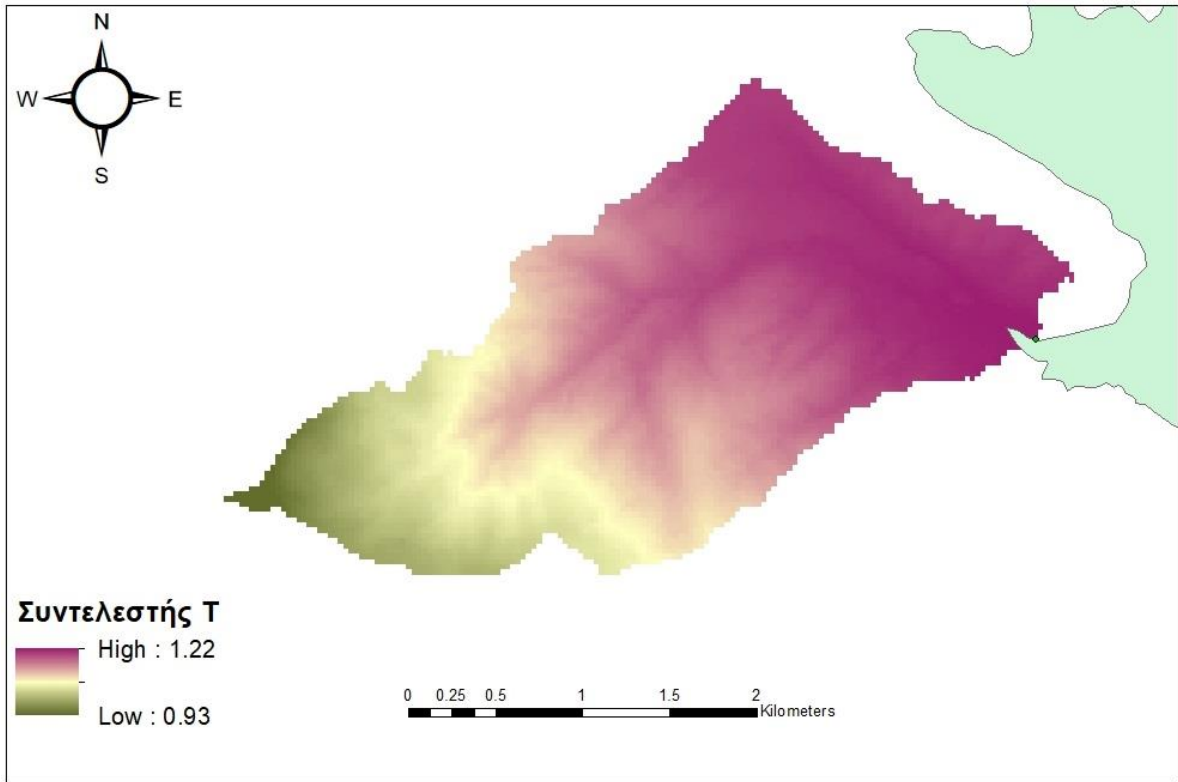
Σχήμα 5.3γ: Κάνναβος συντελεστή φ λεκάνης απορροής Κρυονερίου



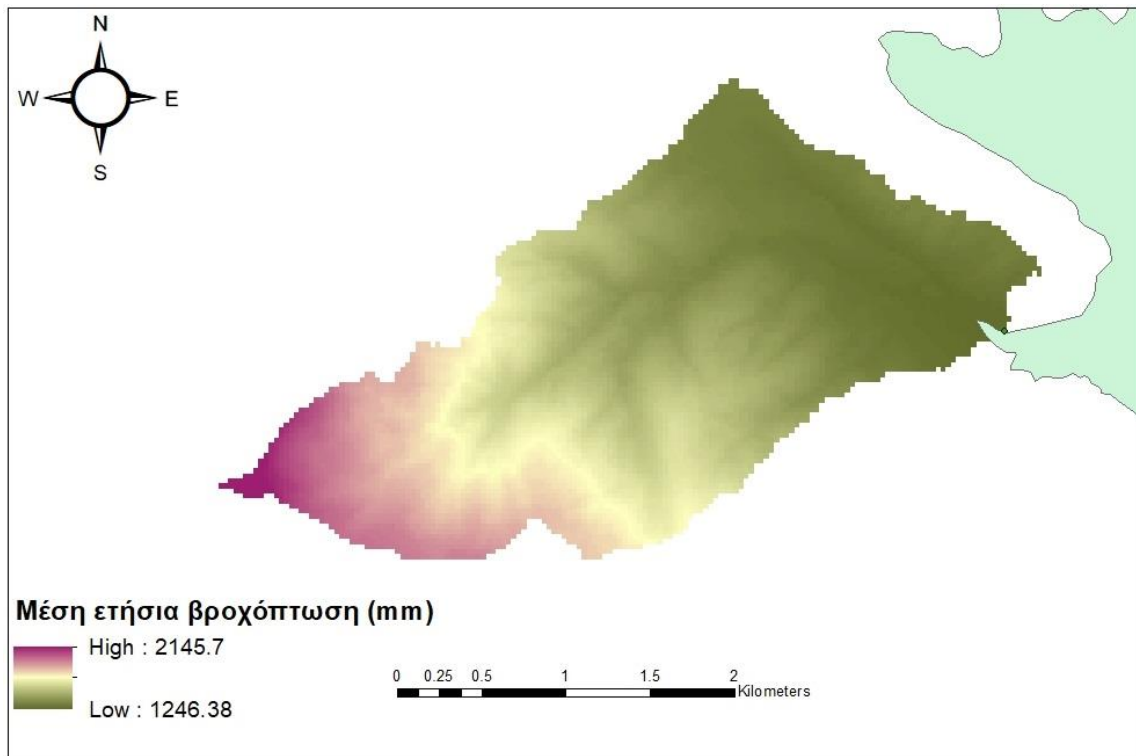
Σχήμα 5.3δ: Κάνναβος συντελεστή Z λεκάνης απορροής Κρυονερίου



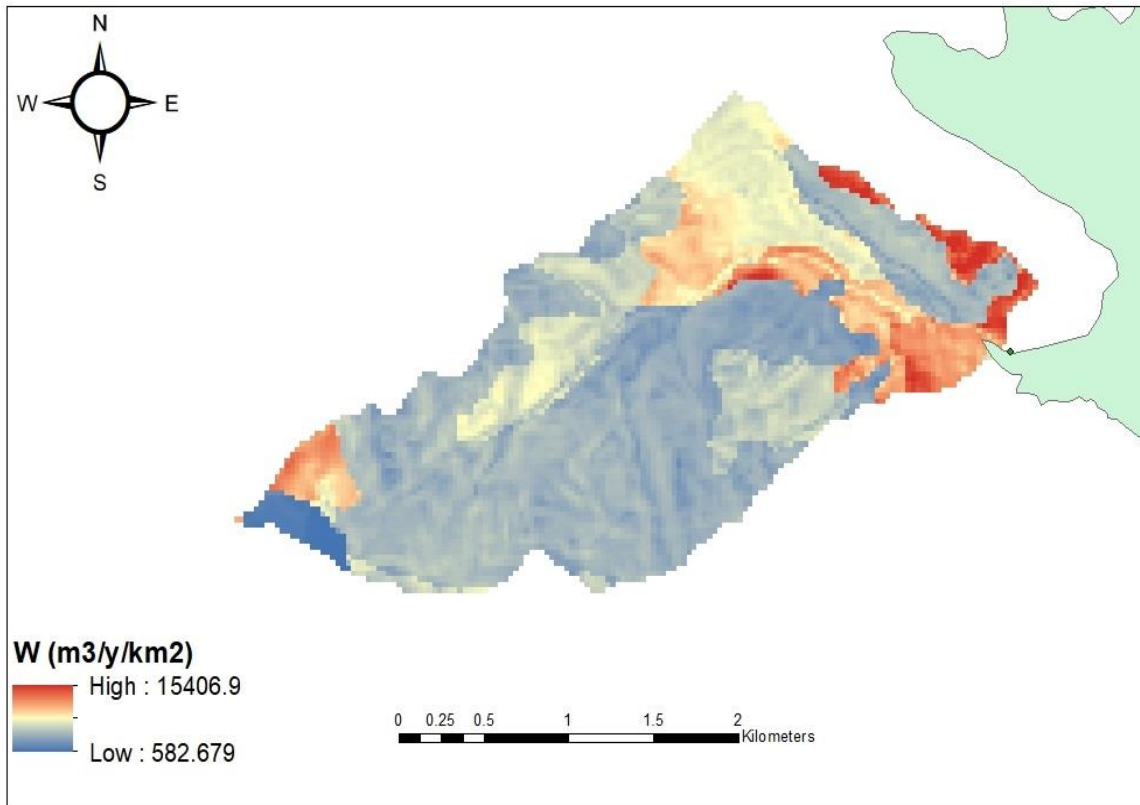
Σχήμα 5.3ε: Μέση ετήσια θερμοκρασία λεκάνης απορροής Κρυονερίου



Σχήμα 5.3στ: Κάνναβος συντελεστή T λεκάνης απορροής Κρουονερίου



Σχήμα 5.3ζ: Μέση ετήσια βροχόπτωση λεκάνης απορροής Κρουονερίου



Σχήμα 5.3η: Εκτίμηση συνολικού ετήσιου ρυθμού διάβρωσης W λεκάνης απορροής Κρυνονερίου

Από το Σχήμα 5.3η προκύπτει ότι η λεκάνη απορροής Κρυνονερίου εμφανίζει τη μεγαλύτερη διάβρωση στο νοτιοανατολικό τμήμα τα οποία καλύπτονται από σύνθετα συστήματα καλλιεργειών και φυσική βλάστηση. Η μορφή του καννάβου είναι παρόμοια με εκείνη του καννάβου του συντελεστή διάβρωσης Z (Σχήμα 5.3δ). Επίσης παρατηρείται ότι ο κάνναβος της διάβρωσης, όπως και εκείνος του συντελεστή Z, επηρεάζεται εξίσου σημαντικά από εκείνη του συντελεστή X (χρήσεις γης) και του συντελεστή Y (γεωλογία).

Η μέση ετήσια παραγωγή ιζημάτων για τη λεκάνη του Κρυνονερίου παρουσιάζει ελάχιστη τιμή $582.7 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$, μέγιστη τιμή $15406.9 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$, μέση τιμή $5475.9 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$ και τυπική απόκλιση $2499.1 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$. Η τιμή παρουσιάζει διαφοροποίηση στο χώρο, γι' αυτό λήφθηκε υπόψη η διάμεσος της παραμέτρου που αντιστοιχεί σε $5228 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$. Εφαρμόζοντας τις μεθόδους που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4.4 υπολογίζεται η μέση ετήσια στερεοαπορροή. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 5.3:

Πίνακας 5.3: Μέση ετήσια στερεοαπορροή λεκάνης Κρουνερίου

Μέθοδος	Συντελεστής συγκράτησης	Μέση ετήσια στερεοαπορροή (tn/y)
DR, Gavrilović	0.47	42658.5
DR, Zemljič	0.34	30725.4
SDR, SCS	0.46	41831.0
SDR, Vanoni	0.37	33966.6

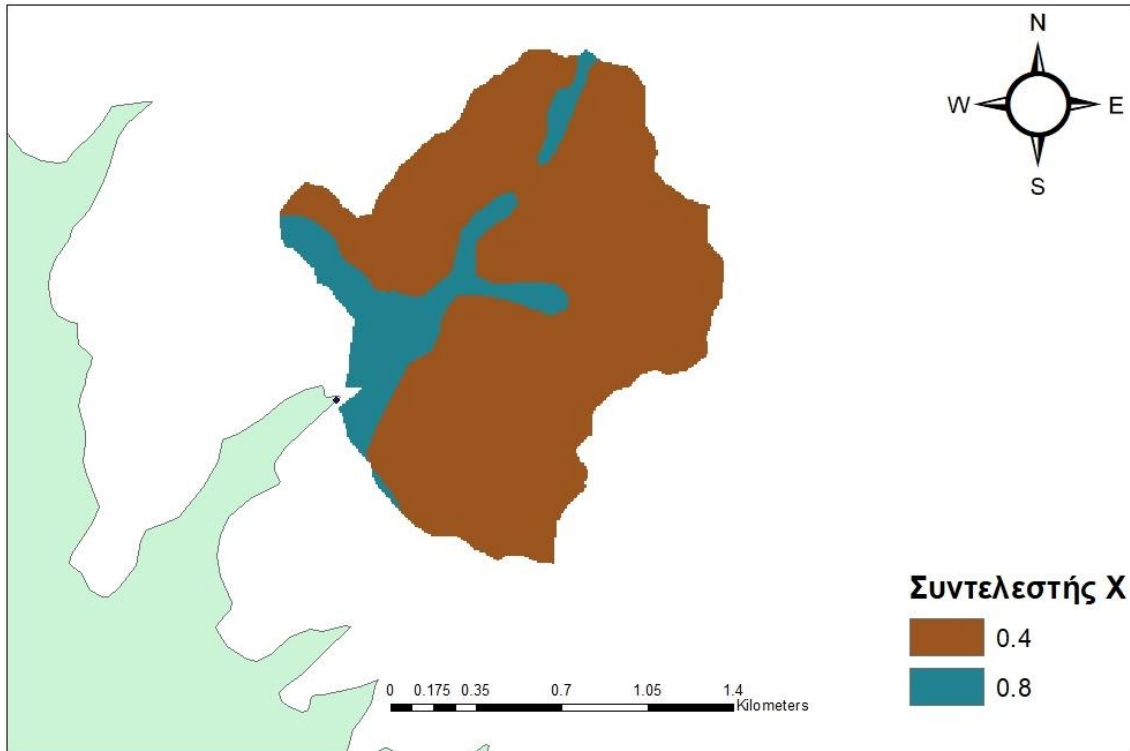
Ο συντελεστής συγκράτησης κατά Gavrilović δεν παρουσιάζει μεγάλη διαφορά από τους συντελεστές κατά SCS, Vanoni και αυτό οφείλεται στο μικρότερο μέσο υψόμετρο λεκάνης που έχει η λεκάνη Κρουνερίου. Οι συντελεστές κατά Zemljič, SCS και Vanoni είναι μεγαλύτεροι σε σχέση με εκείνους που υπολογίστηκαν για τις λεκάνες Καρυτσιώτη και Μεγάλου Ποταμιού, αφού οι τιμές τους είναι αντιστρόφως ανάλογες με την αύξηση του εμβαδού της λεκάνης.

5.2.4 Αποτελέσματα λεκάνης απορροής Μορφοβουνίου

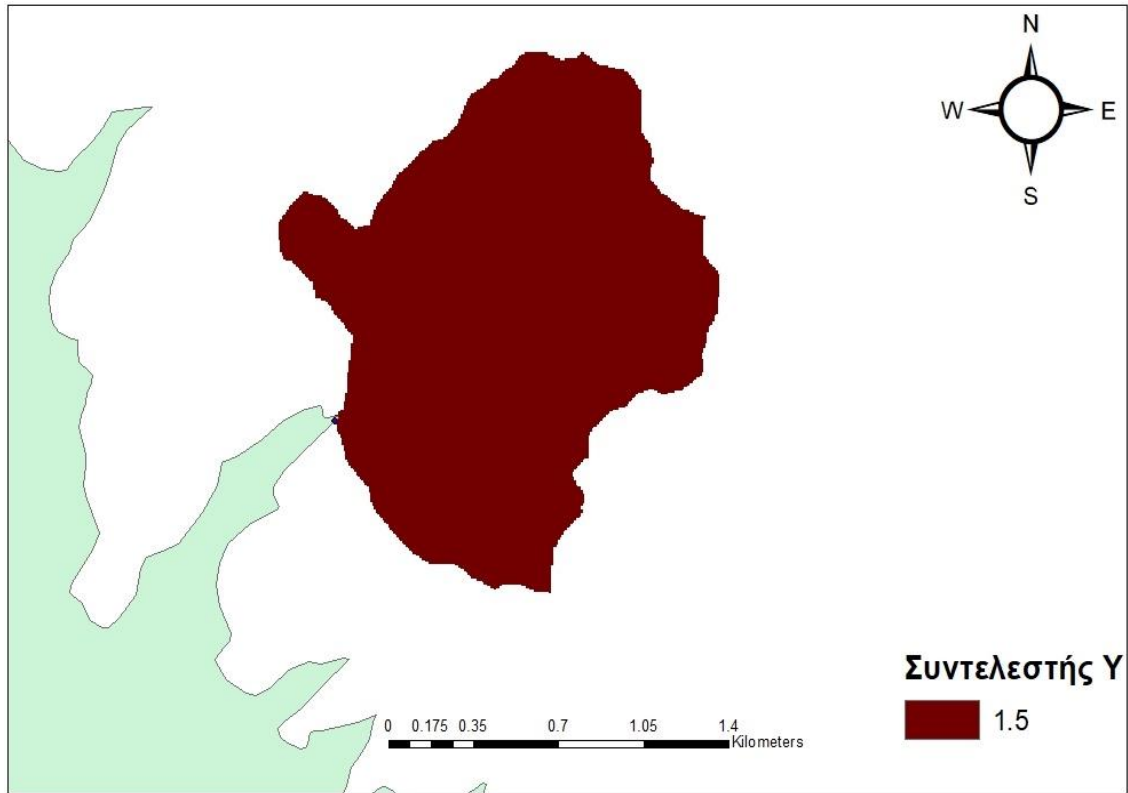
Στη λεκάνη απορροής Κρουνερίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4α, σε σχέση με την κάλυψη χρήσεων γης παρατηρείται κατά κύριο λόγο μέτρια προστασία από διάβρωση, δηλαδή μεσαίες τιμές του συντελεστή X στο μεγαλύτερο μέρος της. Σε μεγάλο κομμάτι υπάρχουν περιοχές με σημαντική κάλυψη από δάση πλατύφυλλων δέντρων ($X=0.4$), καθώς και περιοχές που συνίστανται κυρίως από χρήση για γεωργικές δραστηριότητες και φυσική βλάστηση ($X=0.8$). Από γεωλογική άποψη (Σχήμα 5.4β), η λεκάνη εμφανίζει χαμηλή αντίσταση στη διάβρωση, καθώς η έκτασή της είναι εξολοκλήρου καλυμμένη από γεωλογικούς σχηματισμούς φλύσχη οι οποίοι είναι δεν είναι αρκετά ανθεκτικοί έναντι διάβρωσης ($Y=1.5$).

Ο συντελεστής διάβρωσης Z εμφανίζει μέση τιμή 0.89, τιμή η οποία θεωρείται μέτρια διάβρωση. Ομοίως με τις προηγούμενες λεκάνες, η κάλυψη της γης φαίνεται να αποτελεί κρισιμότερο ή εξίσου σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει την τιμή του συντελεστή διάβρωσης. Επίσης, παρατηρείται ότι οι κλίσεις γης δεν επηρεάζουν σε ιδιαίτερο βαθμό τον

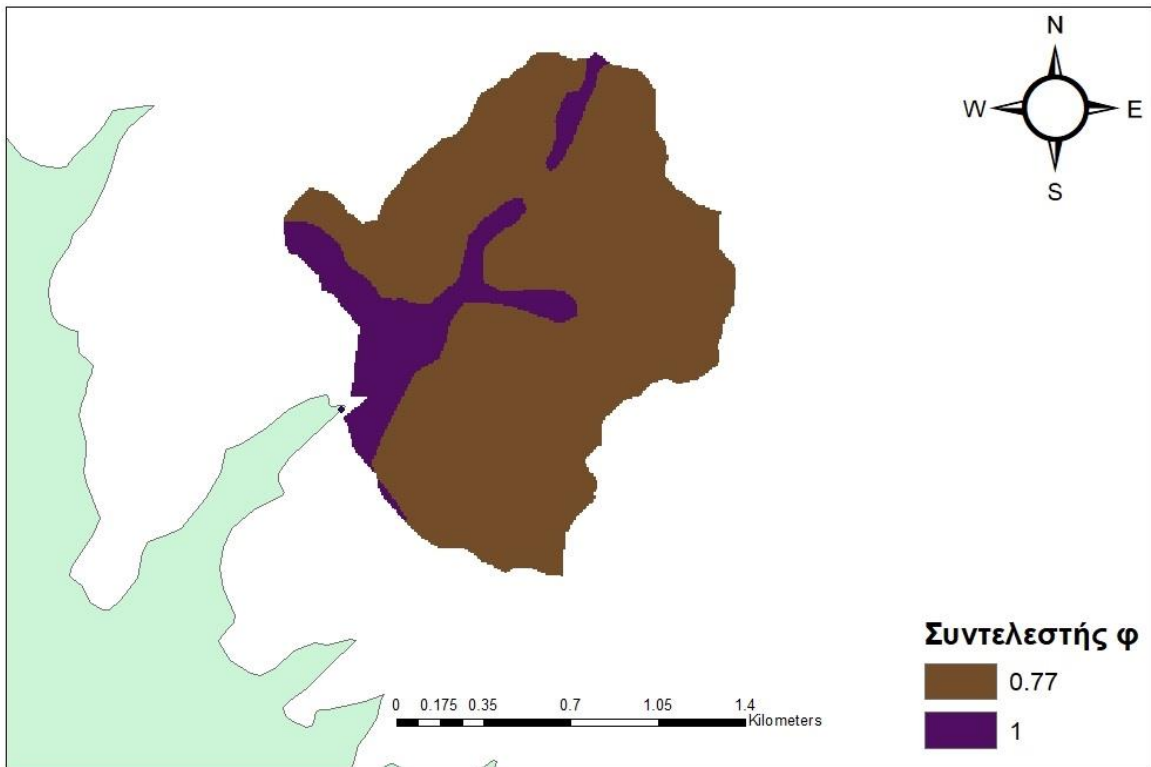
συντελεστή διάβρωσης καθώς δεν υπάρχει φανερή συσχέτιση της με τις τιμές που λαμβάνει αυτός, είτε σε ορεινότερα είτε σε πιο πεδινά κομμάτια της λεκάνης. Από τους καννάβους θερμοκρασίας και βροχόπτωσης (Σχήματα 5.4ε, 5.4στ, 5.4ζ) παρατηρείται ότι η λεκάνη απορροής Μορφοβουνίου έχει τις χαμηλότερες τιμές μέσης ετήσιας βροχόπτωσης.



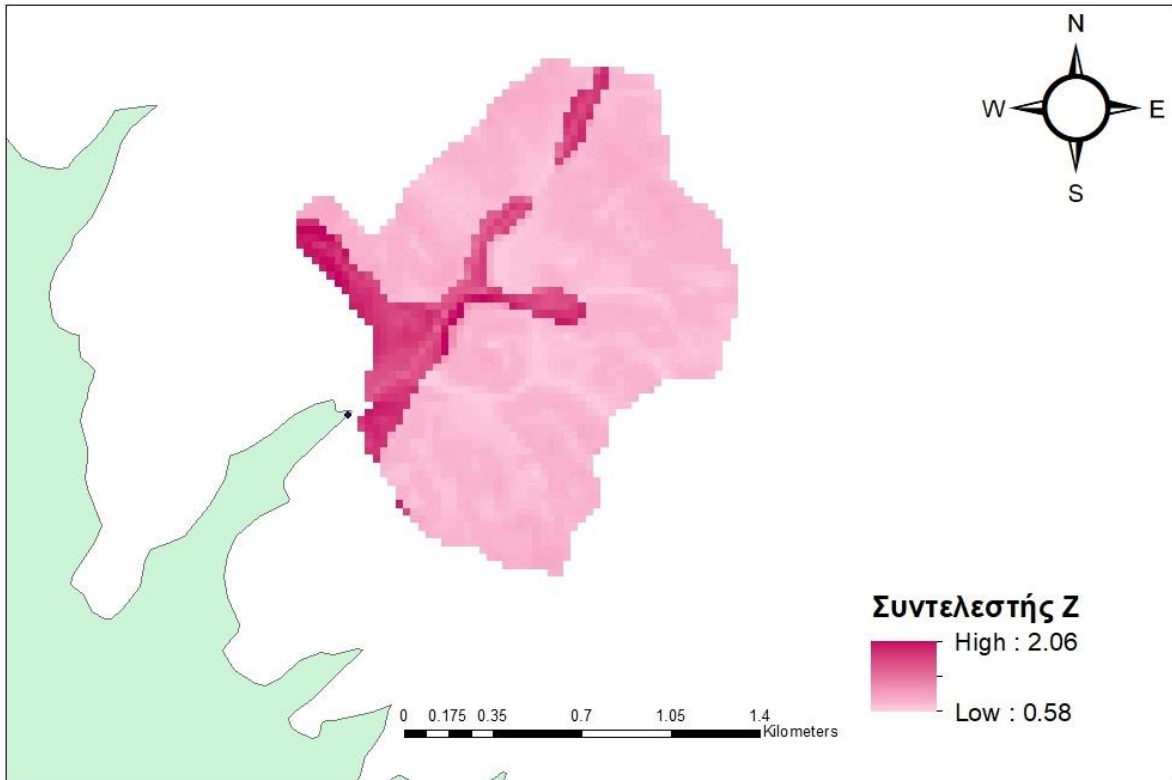
Σχήμα 5.4α: Καννάβος συντελεστή X λεκάνης απορροής Μορφοβουνίου



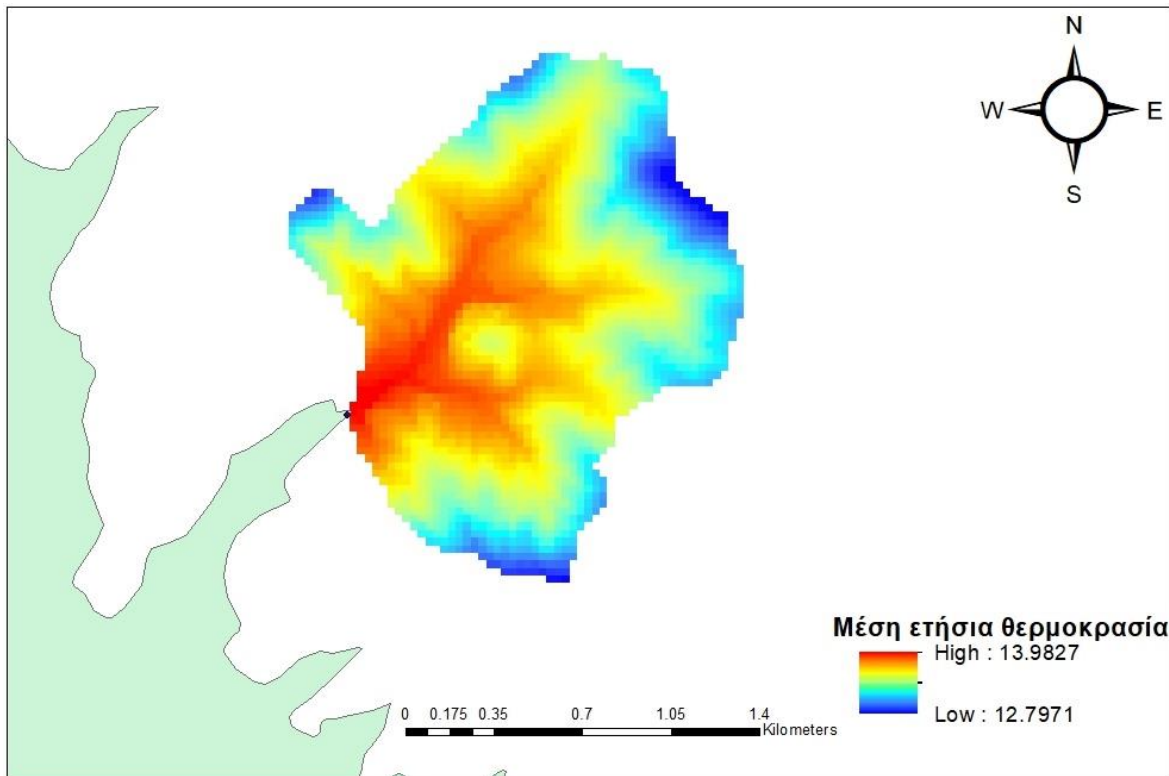
Σχήμα 5.4β: Κάνναβος συντελεστή Υ λεκάνης απορροής Μορφοβουνίου



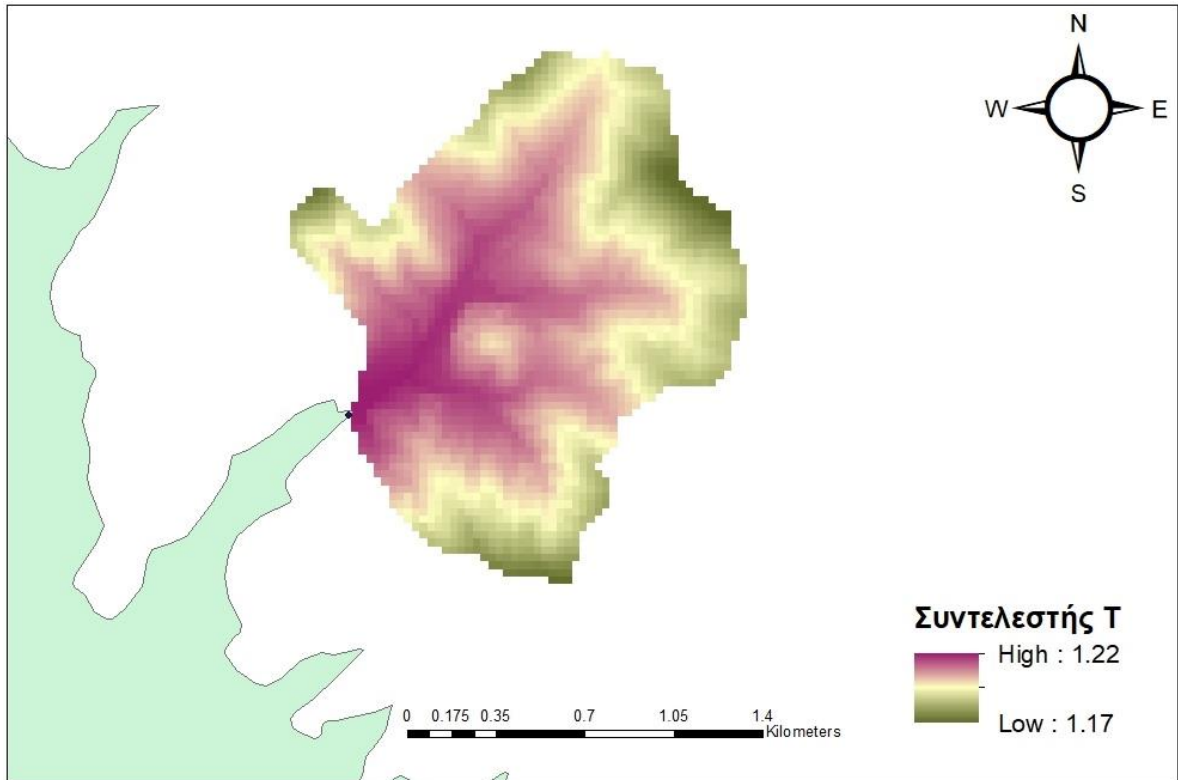
Σχήμα 5.4γ: Κάνναβος συντελεστή φ λεκάνης απορροής Μορφοβουνίου



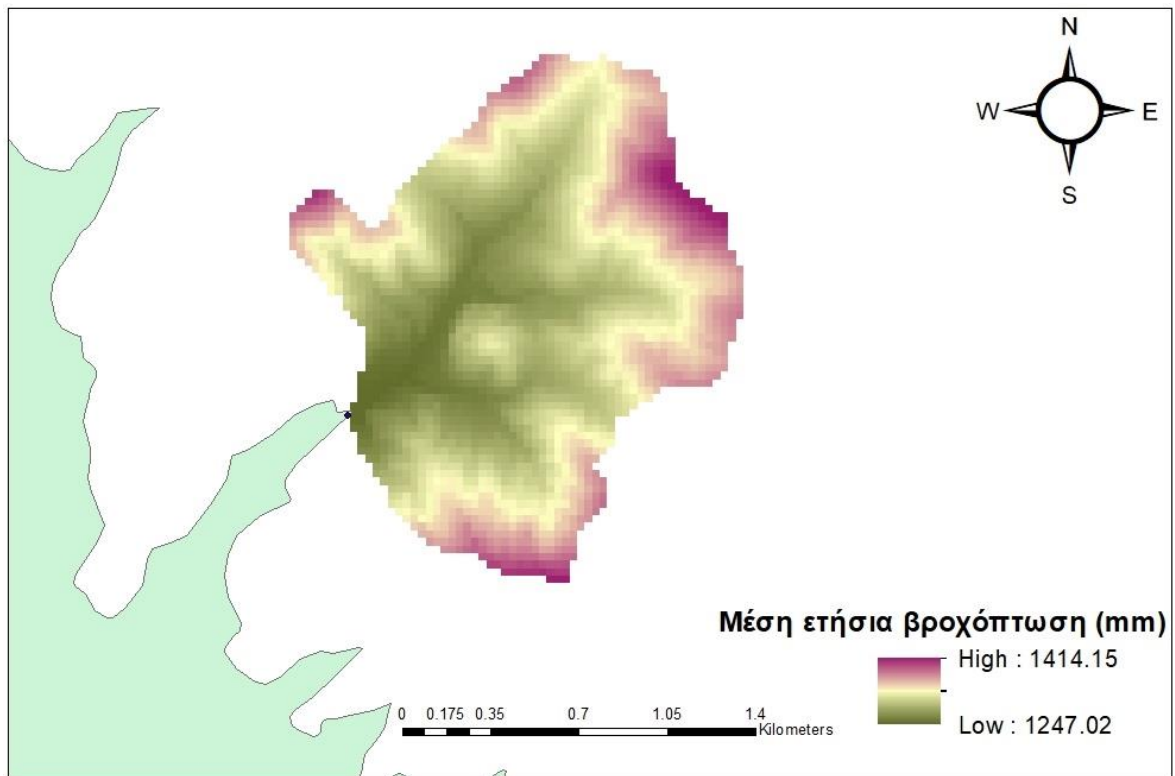
Σχήμα 5.4δ: Κάρτα συντελεστή Z λεκάνης απορροής Μορφοβουνίου



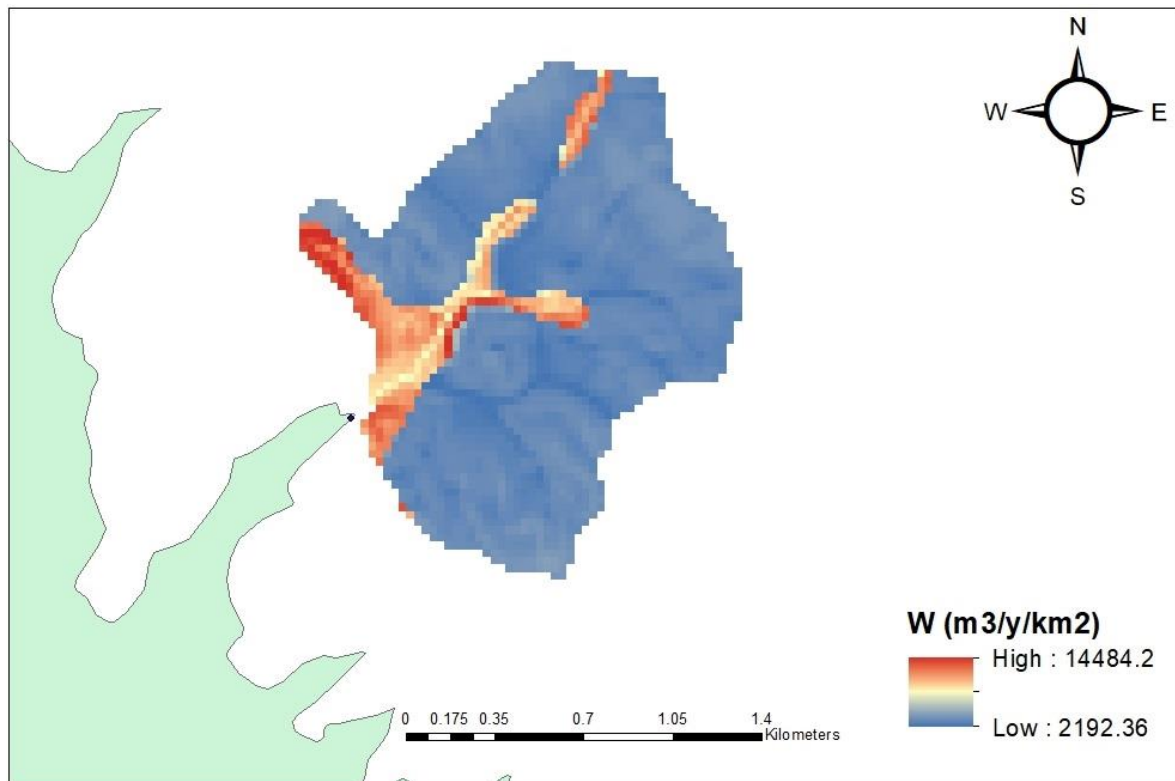
Σχήμα 5.4ε: Μέση ετήσια θερμοκρασία λεκάνης απορροής Μορφοβουνίου



Σχήμα 5.4στ: Κάνναβος συντελεστή T λεκάνης απορροής Μορφοβουνίου



Σχήμα 5.4ζ: Μέση ετήσια βροχόπτωση λεκάνης απορροής Μορφοβουνίου



Σχήμα 5.4η: Εκτίμηση συνολικού ετήσιου ρυθμού διάβρωσης W λεκάνης απορροής Μορφοβουνίου

Από το Σχήμα 5.4η προκύπτει ότι η λεκάνη απορροής Μορφοβουνίου εμφανίζει αρκετά μεγάλη διάβρωση στο νοτιοδυτικό τμήμα το οποίο καλύπτεται από γεωργικές δραστηριότητες και φυσική βλάστηση. Η μορφή του καννάβου είναι παρόμοια με εκείνη του καννάβου του συντελεστή διάβρωσης Z (Σχήμα 5.4δ). Επίσης παρατηρείται ότι ο κάνναβος της διάβρωσης, όπως και εκείνος του συντελεστή Z, επηρεάζεται εξίσου σημαντικά από εκείνη του συντελεστή X (χρήσεις γης) και του συντελεστή Y (γεωλογία).

Η μέση ετήσια παραγωγή ιζημάτων για τη λεκάνη του Κρυονερίου παρουσιάζει ελάχιστη τιμή $2192.4 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$, μέγιστη τιμή $14484.2 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$, μέση τιμή $4363.3 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$ και τυπική απόκλιση $2610.6 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$. Η τιμή παρουσιάζει διαφοροποίηση στο χώρο, γι' αυτό λήφθηκε υπόψη η διάμεσος της παραμέτρου που αντιστοιχεί σε $3491.5 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$. Εφαρμόζοντας τις μεθόδους που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4.4 υπολογίζεται η μέση ετήσια στερεοαπορροή. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 5.4:

Πίνακας 5.4: Μέση ετήσια στερεοαπορροή λεκάνης Μορφοβουνίου

Μέθοδος	Συντελεστής συγκράτησης	Μέση ετήσια στερεοαπορροή (tn/y)
DR, Gavrilović	0.23	4832.0
DR, Zemljič	0.21	4540.7
SDR, SCS	0.51	10818.5
SDR, Vanoni	0.43	8926.2

Ο συντελεστής συγκράτησης κατά Gavrilović είναι σχεδόν υποδιπλάσιος από τους συντελεστές κατά SCS, Vanoni. Αυτό οφείλεται στο μικρότερο μέσο υψόμετρο λεκάνης που έχει η λεκάνη Κρουνερίου. Οι συντελεστές κατά SCS και Vanoni είναι μεγαλύτεροι σε σχέση με εκείνους που υπολογίστηκαν για τις υπόλοιπες εξεταζόμενες, αφού οι τιμές τους είναι αντιστρόφως ανάλογες με την αύξηση του εμβαδού της λεκάνης.

5.2.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Την υψηλότερη μέση ετήσια παραγωγή ιζημάτων εμφανίζει η λεκάνη απορροής του ρέματος Καρυτσιώτη ($7311 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$), ακολουθεί η λεκάνη του ρέματος Μεγάλο Ποτάμι ($5965.5 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$), έπειτα η λεκάνη Κρουνερίου ($5228 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$) με σχετικά μικρή διαφορά, και τέλος, η λεκάνη Μορφοβουνίου ($3491.5 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$). Η λεκάνη απορροής του ρέματος Καρυτσιώτη εμφανίζει τη μεγαλύτερη διάβρωση σε σχέση με τις υπόλοιπες υπό εξέταση λεκάνες απορροής, γιατί υπάρχει σημαντικά μεγαλύτερη έκταση η οποία καλύπτεται από φλύσχη χαμηλής αντίστασης στη διάβρωση και επιπλέον αρκετά μεγαλύτερη έκταση στην οποία υπάρχουν μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις και αραιή βλάστηση, οι οποίες δεν μπορούν να αναστείλουν σημαντικά τον ρυθμό της διάβρωσης. Η λεκάνη του ρέματος Μεγάλο Ποτάμι καλύπτεται στο μεγαλύτερο κομμάτι της από μη ανθεκτικούς στη διάβρωση γεωλογικούς σχηματισμούς φλύσχη, και παρουσιάζει επίσης μεγάλες μεταβατικές θαμνώδεις-δασώδεις εκτάσεις. Η λεκάνη απορροής Κρουνερίου αν και αρκετά μικρότερης έκτασης παρουσιάζει

μικρή διαφορά στην παραγωγή ιζημάτων σε σχέση με εκείνη του ρέματος Μεγάλο Ποτάμι, κυρίως για τον λόγο ότι παρατηρείται η μεγαλύτερη σε έκταση γεωργική δραστηριότητα με σύνθετα συστήματα καλλιεργειών αλλά και εκτάσεις μη αρδύσιμης-αρόσιμης γης, οι οποίες δεν βοηθούν στην αναστολή του ρυθμού διάβρωσης. Ταυτόχρονα καλύπτεται εξολοκλήρου από μη ανθεκτικό στη διάβρωση φλύσχη. Τέλος, η λεκάνη απορροής Μορφοβουνίου εμφανίζει την μικρότερη μέση τιμή διάβρωσης, διότι αρχικά παρατηρείται το χαμηλότερο ύψος βροχόπτωσης, αλλά ταυτόχρονα η έκτασή της στο μεγαλύτερο τμήμα της προστατεύεται από δάση πλατύφυλλων δέντρων. Όμως η τιμή δεν είναι σε πολύ μεγάλη απόκλιση με τις υπόλοιπες λεκάνες οπότε δεν πρόκειται και για αμελητέο βαθμό διάβρωσης, και αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η λεκάνη καλύπτεται εξολοκλήρου από χαμηλής αντίστασης στη διάβρωση γεωλογικούς σχηματισμούς φλύσχη. Στους παρακάτω Πίνακες 5.5 και 5.6 φαίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα και για τις τέσσερις λεκάνες απορροής.

Πίνακας 5.5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα συντελεστών συγκράτησης

Λεκάνη απορροής	Εμβαδόν (km ²)	Συντελεστής συγκράτησης DR, Gavrilović	Συντελεστής συγκράτησης DR, Zemljič	Συντελεστής συγκράτησης SDR, SCS	Συντελεστής συγκράτησης SDR, Vanoni
Καρυτσιώτης	48.91	0.867	0.193	0.369	0.291
Μεγάλο Ποτάμι	24.72	0.675	0.227	0.397	0.316
Κρυονέρι	6.56	0.469	0.338	0.460	0.373
Μορφοβούνι	2.26	0.231	0.217	0.517	0.427

Πίνακας 5.6: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα διάβρωσης και στερεοαπορροής

Λεκάνη απορροής	Μέση ετήσια παραγωγή ιζημάτων (tn/y)	Μέση ετήσια στερεοαπορροή, Gavrilović (tn/y)	Μέση ετήσια στερεοαπορροή, Zemljič (tn/y)	Μέση ετήσια στερεοαπορροή, SCS (tn/y)	Μέση ετήσια στερεοαπορροή, Vanoni (tn/y)
Καρυτσιώτης	947674.5	821682.5	182963.7	349441.3	275325.1
Μεγάλο Ποτάμι	390804.1	263629.4	88746.9	155337.0	123649.4
Κρυονέρι	90958.6	42658.5	30725.4	41831.0	33966.6
Μορφοβούνι	20921.5	4832.0	4540.7	10818.5	8926.2

Σύμφωνα με τον συντελεστή συγκράτησης κατά Zemljič, συνολικά από τις τέσσερις μεγαλύτερες λεκάνες απορροής καταλήγει στην λίμνη Πλαστήρα μια ποσότητα φερτών μεγέθους 306976.6 tn/y. Η στερεοαπορροή ως προς την έκταση είναι η εξής για κάθε λεκάνη απορροής. Για την λεκάνη Καρυτσιώτη προκύπτει 3740.5 tn/y/km², για την λεκάνη του Μεγάλου Ποταμιού 3589.9 tn/y/km², για την λεκάνη Κρυονερίου 4679.9 tn/y/km², ενώ για την λεκάνη Μορφοβουνίου 2008.1 tn/y/km². Από τους παραπάνω πίνακες προκύπτει ότι μεγαλύτερο συντελεστή συγκράτησης, οπότε και μεγαλύτερη στερεοαπορροή, δίνουν ο συντελεστής συγκράτησης υπολογισμένος κατά Gavrilović, στη συνέχεια ο συντελεστής κατά SCS και Vanoni, ενώ μικρότερο δίνει εκείνος κατά Zemljič. Ο συντελεστής κατά Gavrilović εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης (περίμετρος, μέσο υψόμετρο, μήκος κύριου υδατορεύματος), γι αυτό η λεκάνη του ρέματος Καρυτσιώτη λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή του σε σχέση με τις υπόλοιπες λεκάνες απορροής. Από όλους τους συντελεστές προκύπτουν συνολικές στερεοαπορροές ανάλογες με το εμβαδόν της λεκάνης, δηλαδή η λεκάνη απορροής του ρέματος Καρυτσιώτη εμφανίζει τη μεγαλύτερη συνολική στερεοαπορροή και ακολουθούν οι λεκάνες του ρέματος Μεγάλο Ποτάμι, Κρυονερίου και Μορφοβουνίου.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Σύνοψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται η υδρολογική ανάλυση των μεγαλύτερων εκ των υπολεκανών της ευρύτερης λεκάνης απορροής της Λίμνης Πλαστήρα, καθώς και εφαρμόζεται σε κάθε μία από αυτές η μέθοδος Gavrilonici σε περιβάλλον ArcGIS, ώστε να εκτιμηθεί η μέση ετήσια παραγωγή ιζημάτων και η μέση ετήσια στερεοαπορροή χρησιμοποιώντας τους συντελεστές συγκράτησης κατά Gavrilonici, Zemljic, SCS και Vanoni. Από τα παραπάνω προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για τους παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο τη διαδικασία της διάβρωσης και την εκτίμηση της στερεοαπορροής των λεκανών απορροής γενικότερα, αλλά και ειδικότερα για τις εξεταζόμενες λεκάνες απορροής της παρούσας εργασίας και για το συνολικό μέγεθος της στερεοαπορροής στη λίμνη Πλαστήρα.

6.2 Γενικά συμπεράσματα

Τα γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία είναι τα εξής:

- Οι χρήσεις γης αποτελούν μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους που συνεισφέρουν στα εξαγόμενα αποτελέσματα. Η επιρροή τους είναι καταλυτική για την εκτίμηση των υδρολογικών απωλειών, που με την σειρά τους επηρεάζουν έντονα την εκτίμηση της παροχής αιχμής στην έξοδο της λεκάνης για ένα πλημμυρικό επεισόδιο. Επομένως μεγάλη σημασία έχει η ποιότητα και η ακρίβεια των δεδομένων για τις χρήσεις γης.
- Η διάβρωση επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από τη γεωλογία της περιοχής, τις χρήσεις γης, καθώς η φυτοκάλυψη αναστέλλει τον ρυθμό διάβρωσης, και το ύψος βροχόπτωσης, που αποτελεί την κινητήριο δύναμη της διάβρωσης.
- Η ορθότητα των αποτελεσμάτων με βάση τη μεθοδολογία που ακολουθείται στην παρούσα εργασία συσχετίζεται με το πλήθος αλλά και την ακρίβεια των διαθέσιμων δεδομένων, καθώς και από τη ρύθμιση κάποιων παραμέτρων. Κρίσιμο ρόλο διαδραματίζει και η κατάλληλη επιλογή τιμών για τις παραμέτρους που ανήκουν σε ένα εύρος τιμών.

- Η εφαρμογή της μεθόδου Gavrilonić με τη χρήση Σ.Γ.Π επιτρέπει την ακριβέστερη εκτίμηση των παραμέτρων της διάβρωσης, αλλά και της συνολικής παραγωγής ιζημάτων. Με την εφαρμογή των Σ.Γ.Π υλοποιείται ένας ικανοποιητικός συνδυασμός των φυσικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη διάβρωση και καθίσταται εφικτή η επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων σε λιγότερο χρόνο.
- Από τη σύγκριση της επιφανειακής κατανομής της διάβρωσης W (Σχήματα 5.1η, 5.2η, 5.3η, 5.4η) και του συντελεστή θερμοκρασίας T (Σχήματα 5.1στ, 5.2στ, 5.3στ, 5.4στ) δεν παρατηρείται επίδραση της θερμοκρασίας στη διάβρωση.
- Ο συντελεστής συγκράτησης κατά Gavrilonić δίνει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τους συντελεστές κατά Zemljič, SCS και Vanoni, καθώς ο πρώτος λαμβάνει υπόψη μόνο τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (περίμετρος, μέσο υψόμετρο λεκάνης απορροής). Οι συντελεστές SCS και Vanoni αυξάνονται με τη μείωση των εμβαδών της λεκάνης απορροής και μειώνονται με την αύξησή τους.
- Η μέση ετήσια στερεοαπορροή (tn/y) είναι ανάλογη του μεγέθους της κάθε λεκάνης απορροής, ανεξάρτητα από τον συντελεστή συγκράτησης που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της.

6.3 Ειδικά συμπεράσματα

Τα ειδικά συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι τα εξής:

- Τη μεγαλύτερη μέση ετήσια παραγωγή ιζημάτων εμφανίζει η λεκάνη του ρέματος Καρυτσιώτη ($7311 \text{ m}^3/y/\text{km}^2$), ακολουθεί η λεκάνη του ρέματος Μεγάλο Ποτάμι ($5965.5 \text{ m}^3/y/\text{km}^2$), έπειτα η λεκάνη Κρυονερίου ($5228 \text{ m}^3/y/\text{km}^2$) με σχετικά μικρή διαφορά, και τέλος, η λεκάνη Μορφοβουνίου ($3491.5 \text{ m}^3/y/\text{km}^2$). Η λεκάνη απορροής του ρέματος Καρυτσιώτη παρουσιάζει τη μεγαλύτερη διάβρωση σε σχέση με τις υπόλοιπες υπό εξέταση λεκάνες απορροής, γιατί υπάρχει σημαντικά μεγαλύτερη έκταση η οποία καλύπτεται από φλύσχη χαμηλής αντίστασης στη διάβρωση και επιπλέον αρκετά μεγαλύτερη έκταση στην οποία υπάρχουν μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις και αραιή βλάστηση, οι οποίες δεν μπορούν να αναστείλουν σημαντικά το ρυθμό της διάβρωσης (Κεφάλαιο 5.1.5).

- Μεγαλύτερη μέγιστη τιμή παραγωγής ιζημάτων ($18588.4 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$) έχει η λεκάνη του ρέματος Καρυτσιώτη, ακολουθεί η λεκάνη του ρέματος Μεγάλου Ποταμιού ($16727.8 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$), η λεκάνη Κρυονερίου ($15406.9 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$), και τέλος η λεκάνη του Μορφοβουνίου ($14484.2 \text{ m}^3/\text{y}/\text{km}^2$), καθώς παρατηρείται σε αυτή το χαμηλότερο ύψος βροχής και ταυτόχρονα η έκτασή της στο μεγαλύτερο τμήμα της προστατεύεται από δάση πλατύφυλλων δέντρων.
- Το μεγαλύτερο συντελεστή συγκράτησης κατά Gavrilović έχει η λεκάνη απορροής του ρέματος Καρυτσιώτη διότι παρουσιάζει τη μεγαλύτερη περίμετρο λεκάνης αλλά και μικρότερο μήκος κυρίου υδατορεύματος, το οποίο έχει αντιστρόφως ανάλογη σχέση με τον συντελεστή.
- Σύμφωνα με τον συντελεστή συγκράτησης κατά Zemljic, συνολικά από τις τέσσερις μεγαλύτερες λεκάνες απορροής καταλήγει στη λίμνη Πλαστήρα μια ποσότητα φερτών μεγέθους 306976.6 tn/y .
- Οι κλίσεις γης φαίνεται να μην επηρεάζουν τη διάβρωση των λεκανών της παρούσας εργασίας, όπως φαίνεται και από τη σύγκριση των επιφανειακών κατανομών της διάβρωσης W (Σχήματα 5.1η, 5.2η, 5.3η, 5.4η) και των κλίσεων γης (Σχήματα 3.4, 3.5, 3.6, 3.7), αλλά και από τις Εξιιώσεις 4.2 και 4.4, όπου παρατηρείται ότι είναι μικρή η επίδραση της μέσης κλίσης J στη διάβρωση. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι στα πεδινά τμήματα των λεκανών απορροής Καρυτσιώτη, Κρυονερίου και Μορφοβουνίου εμφανίζεται η μεγαλύτερη διάβρωση. Αυτό συμβαίνει γιατί στην πραγματικότητα δύο λεκάνες δεν έχουν ακριβώς την ίδια γεωλογική σύσταση, επομένως δεν αποτελεί η κλίση τον κρίσιμο παράγοντα για την παραγωγή ιζημάτων, ενώ παράλληλα μεγάλη κλίση είναι ένδειξη αυξημένης αντοχής των πετρωμάτων, άρα η λεκάνη με τις μεγαλύτερες κλίσεις είναι περισσότερο προστατευμένη από διάβρωση (Κουτσογιάννης & Τάρλα, 1987).
- Από τα πλημμυρογραφήματα που παράχθηκαν στις εξόδους κάθε λεκάνης παρατηρείται ότι η λεκάνη του ρέματος Καρυτσιώτη παρουσιάζει τη μεγαλύτερη παροχή αιχμής ($75.6 \text{ m}^3/\text{s}$), ενώ ακολουθούν η λεκάνη του Μεγάλου Ποταμιού ($46.6 \text{ m}^3/\text{s}$), του Κρυονερίου ($11.2 \text{ m}^3/\text{s}$), και τέλος εκείνη του Μορφοβουνίου ($2.3 \text{ m}^3/\text{s}$).

6.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί αφορμή για τη διατύπωση ορισμένων προτάσεων προς μελλοντική έρευνα.

- Η μέθοδος Gavrilonić εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία μόνο στην περιοχή της ευρύτερης λεκάνης της λίμνης Πλαστήρα, όπου τα μετεωρολογικά δεδομένα είναι παρόμοια και για τις τέσσερις λεκάνες. Προτείνεται η σύγκριση της μεθόδου μεταξύ λεκανών απορροής που ανήκουν σε διαφορετικές περιοχές και έχουν μεγαλύτερες διαφορές στα δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας.
- Επανάληψη εκτέλεσης της υδρολογικής ανάλυσης χρησιμοποιώντας διαφορετικό μοντέλο βροχής-απορροής, όπως εκείνο του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά Snyder, αλλά και διαφορετική μέθοδο υπολογισμού του υετογραφήματος σχεδιασμού, όπως εκείνη της δυσμενέστερης διάταξης, και σύγκριση των αποτελεσμάτων.
- Η χρήση διαφορετικού λογισμικού από το HEC-HMS για την υδρολογική ανάλυση των εξεταζόμενων λεκανών απορροής και σύγκριση των αποτελεσμάτων.
- Προτείνεται η μεθοδολογία που ακολουθείται στην παρούσα εργασία να εφαρμοστεί σε λεκάνες που διαφέρουν μόνο ως προς μια παράμετρο (π.χ βροχόπτωση, θερμοκρασία) προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδρασή της στη διαδικασία διάβρωσης.
- Προτείνεται να γίνει επαλήθευση των υπολογισμών της στερεοαπορροής που προκύπτουν από τη χρήση των συντελεστών συγκράτησης Gavrilonić, Zemljič, SCS και Vanoni, σε λεκάνες απορροής που διαθέτουν στερεοϋδρομετρήσεις ή ακόμα και ραντάρ διείδυσης στο έδαφος (GPR) (Bristow, 2003).
- Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου Gavrilonić με άλλες μεθόδους υπολογισμού της διάβρωσης, όπως το μοντέλο RUSLE.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

A. Ελληνικές

- Ανάργυρος - Ελευθέριος Φώτης (2015). Εκτίμηση υδατικού δυναμικού σε συνθήκες αποδάσωσης: Εφαρμογή στη λεκάνη της Λίμνης Πλαστήρα, Διπλωματική Εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Ανδρικοπούλου Θ. (2019). Ολοκληρωμένη προσέγγιση στην εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου – Η περίπτωση του Πηνειού ποταμού, Διπλωματική εργασία, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Αντωνοπούλου - Γιαννουλάκη Αικατερίνη (2019). Αξιολόγηση μεθόδων υπολογισμού στερεοαπορροής στην περιοχή της Αττικής, Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΔΠΜΣ ΕΤΥΠ. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Βαχαβιώλος Θ. Κ. (2014). Εκτίμηση εδαφικής διάβρωσης, στερεοαπορροής και αποθέσεων ταμειυτήρα από εμπειρικές μεθόδους με έμφαση στην επίδραση της βροχόπτωσης, Μεταπτυχιακή διατριβή. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Δεβελέκου Μαρίνα (2020). Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου στο βορειοδυτικό τμήμα της περιφερειακής ενότητας Ηρακλείου, Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΔΠΜΣ ΕΤΥΠ. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Ευθυμίου Ν. Γ. (2016). Ανάπτυξη στρατηγικών για την ποσοτική εκτίμηση της στερεοαπορροής από την υδατική διάβρωση με τη χρήση συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων σε ορεινές υδρολογικές λεκάνες, Διδακτορική Διατριβή. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Ευστρατιάδης Α., Κουκουβίνος Α., Κουτσογιάννης Δ., Μαμάσης Ν. (2002). Διερεύνηση των δυνατοτήτων διαχείρισης και προστασίας της ποιότητας της Λίμνης Πλαστήρα Τεύχη 1 & 2. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

- Ευστρατιάδης Α., Ρόζος Ε., & Κουκουβίνος Α., (2009). Υδρόγειος: Μοντέλο υδρολογικής και υδρογεωλογικής προσομοίωσης-Θεωρητική τεκμηρίωση.
- Ζαρρής Δ., Λυκούδη Ε., & Κουτσογιάννης Δ. (2001). Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Ιμπάμπι Μοχάμεντ (2022). Υπολογισμός στερεοαπορροής και υδρολογική-υδραυλική προσομοίωση στην περιοχή της Εύβοιας, Διπλωματική Εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Καββαδά Ο. (2012). Ανάπτυξη μοντέλου βροχής – απορροής σε Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, Διπλωματική Εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κουτσογιάννης Δ. (1997). Στατιστική Υδρολογία, Έκδοση 4. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κουτσογιάννης Δ. (2011). Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης, 4η Έκδοση. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κουτσογιάννης Δ., & Ξανθόπουλος Θ. (1999). Τεχνική Υδρολογία. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.
- Κουτσογιάννης Δ., & Ταρλά Κ. (1987). Εκτιμήσεις Στερεοαπορροής στην Ελλάδα. Τεχνικά Χρονικά, Α-7(3).
- Μαρίνος Παύλος (1991) Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας, Σημειώσεις από τις παραδόσεις στους σπουδαστές του βου εξαμήνου Πολιτικών Μηχανικών. Αθήνα.
- Μιμίκου Μ. Α., & Μπαλτάς Ε. Α. (2012). Τεχνική Υδρολογία, 5η Έκδοση. Αθήνα: Παπασωτηρίου Εκδόσεις.
- Μπαλτάς Ευάγγελος (2015) Σημειώσεις μαθήματος Υδρομετεωρολογία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο..
- Μπαλτάς Ευάγγελος (2020). Παρουσίαση μαθήματος «Πλημμύρες και Αντιπλημμυρικά Έργα», Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

- Παναγούλια Διονυσία (2017). Διάβρωση Μεταφορά και Απόθεση Φερτών Υλικών, Σημειώσεις μαθήματος, ΔΠΜΣ ΕΤΥΠ. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Πασχαλίδης Θ. Γεώργιος (2015). Προσομοίωση στερεομεταφοράς σε λεκάνη απορροής κατάντη φράγματος, Διδακτορική Διατριβή. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Πετρίτσης Ελευθέριος (2022). Υδρολογική-Υδραυλική προσομοίωση στον Πάμισο ποταμό Θεσσαλίας, Διπλωματική Εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Τσούλος Λύσανδρος, Σκοπελίτη Ανδριανή, Στάμου Λήδα (2015). Χαρτογραφική Σύνθεση & Απόδοση σε Ψηφιακό Περιβάλλον. Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.
- Φελώνη Ελισάβετ, Μπουρνάς Απόλλων, Μπαλτάς Ευάγγελος (2019). Εκτίμηση στερεοαπορροής σε ορεινή λεκάνη χωρίς δεδομένα με χρήση τεχνικών GIS. 14ο Πανελλήνιο Συνέδριο Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Βόλος.

B. Ξενόγλωσσες

- Amini, S., et al (2010). Estimation of erosion and sediment yield of Ekbatan Dam drainage basin with EPM, using GIS.
- Boardman, J. (2006). Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *Catena*, 68 (2-3), pp. 73-86.
- Bristow, Charlie S., and Harry, M. Jol (2003). Ground penetrating radar in sediments. Geological Society of London.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. and Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw – Hill, New York, 572.
- Dooge, J. C. (1959). A general theory of the unit hydrograph. *Journal of geophysical research*, 64(2), 241-256.

- Dragičević, N., Karleusa, B. and Ožanić, N. (2016). A review of the Gavrilović method (Erosion Potential Method) application. *Građevinar: časopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera*, 68(9), pp.715-725.
- Efthimiou, N., Lykoudi, E, Panagoulia, D., Karavitis, C. (2016). Assessment of soil susceptibility to erosion using the EPM and RUSLE models: The case of Venetikos river catchment, *Global NEST Journal*, Vol 18.
- Emmanouloudis, Dimitrios A.; Christou, Odysseas P.; Filippidis, Evangelos I. (2003). Quantitative estimation of degradation in the Aliakmon river basin using GIS. *International Association of Hydrological Sciences, Publication*, 279: 234-240.
- Fanetti, D., & Vezzoli L (2007). Sediment input and evolution of lacustrine deltas: The Breggia and Greggio rivers case study (Lake Como, Italy), *Quaternary international*, 173, 113-124.
- Fournier, F. (1960). *Climat et erosion*. p.200, Presse Univer, Paris.
- Gavrilovic, S. (1972). *Inženjering o bujicnim tokovima i eroziji*. Izgradnja. Beograd, Serbia, 1972.
- Gavrilovic, S. (1976). *Bujicni tokovi i erozija (Torrents and erosion, in Serbian)*, 159-311. *Gradevinski kalendar*.
- Gavrilović, Z. (1988). *Use of an Empirical Method (Erosion Potential Method) for Calculating Sediment Production and Transportation in Unstudied or Torrential Streams*. In *International Conference on River Regime*. Hydraulics Research Limited, Wallingford, Oxon UK. 1988, pp. 411-422.
- Globevnik, Lidija, et al. (2003). Applicability of the Gavrilović method in erosion calculation using spatial data manipulation techniques, *International Association of Hydrological Sciences. Publication*, 279: 224-233.
- Karydas, C.G., P. Panagos and I.Z. Gitas, (2012). A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics, *International Journal of Digital Earth*, pp 1-22.

- Milanesi, L, Pilotti, M., Clerici, A. & Gavrilović Z. (2015). Application of an improved version of the Erosion Potential Method in Alpine Areas. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 1.
- Pandey, S. K., Himanshu, S. K., Mishra and V. P. Singh (2016). Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. *Catena*, vol. 147, pp. 595-620.
- Papanikolaou, D. (1988). Triassic in Hellenides. *Atti del 740 Congresso della soc. Ged. It., A*, 529-530.
- Poesen, J. et al. (2002). Gully erosion in dryland environments. In L.J Bull and M.J. Kirbby (Editors), *Dryland Environments*. Wiley, Chichester, London, UK.
- SCS (1971). *Hydrology, National Engineering Handbook. Supplement A, Section 4, Chapter 10*, Soil Conservation Service, USDA. Washington, D.C.
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), pp. 913-920.
- User's Manual HEC-GeoHMS (2013). *Geospatial Hydrological Modeling Extension*. US Army Corps of Engineers, Version 10.1.
- Vacca, Carmine; Dominici, Rocco (2015). Preliminary considerations on the application of the Gavrilović method in GIS environment for the calculation of sediment produced by the catchment area of the Stilaro Fiumara (Calabria southeast). *Rend. Online Soc. Geol. It.*, 33: 104-107.
- Vanoni, V.A. (1975a.). *Sediment discharge formulas. Sedimentation engineering*, pp.190-229.
- Vanoni, V.A. (1975b.). *Sedimentation engineering, ASCE manuals and reports on engineering practice—No. 54*. American Society of Civil Engineers, New York, NY.
- Wilson, E. M (1990). *Engineering Hydrology*. Palgrave, London.

Γ. Διαδικτυακοί Ιστότοποι

<https://floods.ypeka.gr/>, Τελευταία προσπέλαση: 20/12/2022

<https://karitsa-dolopon.gr>, Τελευταία προσπέλαση: 12/03/2023

<https://status.meteo.gr>, Τελευταία προσπέλαση: 12/03/2023

<https://ecmwf.int>, Τελευταία προσπέλαση: 12/03/2023

<https://www.hydroscope.gr>, Τελευταία προσπέλαση: 12/03/2023

<https://land.copernicus.eu>, Τελευταία προσπέλαση: 06/11/2022

<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms>, Τελευταία προσπέλαση: 14/01/2023

<https://ypen.gov.gr>, Τελευταία προσπέλαση: 20/12/2022

<https://www.arcgis.com>, Τελευταία προσπέλαση: 06/11/2022

<https://plastiras-ota.gr>, Τελευταία προσπέλαση: 12/03/2023

<https://www.igme.gr>, Τελευταία προσπέλαση: 18/12/2022

<https://geodata.gov.gr>, Τελευταία προσπέλαση: 18/12/2022

<https://dspace.lib.ntua.gr>, Τελευταία προσπέλαση: 29/05/2023

<https://www.ypethe.gr/>, Τελευταία προσπέλαση: 25/05/2023