



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»

**ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ
ΑΛΦΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΑΤΩ ΑΠΟ
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

ΜΕΛΙΩΜΕΝΗ ΜΟΣΧΟΥ

Επιβλέπων: Μπαλτάς Ε., Καθηγητής, ΕΜΠ

Δ.Π.Μ.Σ.
«Επιστήμη
& Τεχνολογία
Υδατικών
Πόρων»

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΑΛΦΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

ΜΕΛΙΩΜΕΝΗ ΜΟΣΧΟΥ

Επιβλέπων: Μπαλτάς Ε., Καθηγητής, ΕΜΠ

Τριμελής Επιτροπή:

Μπαλτάς Ε., Καθηγητής, ΕΜΠ (Επιβλέπων)

Τσικριντζής Β., Καθηγητής, ΕΜΠ

Μαλαμής Σ., Αν. Καθηγητής, ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας έρχεται το πέρας των μεταπτυχιακών μου σπουδών, στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα 'Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων', της σχολής των Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή μου, κ. Ευάγγελο Μπαλιτά, καθηγητή του ΕΜΠ, για την επίβλεψη και την καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον Απόλλων Μπουρνά, διδάκτορα του ΕΜΠ, που χωρίς τις γνώσεις του, την συνεχή επικοινωνία και καθοδήγηση του δεν θα ήταν εφικτή η ολοκλήρωση της εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δασάρχη Καπανδριτίου κ. Διονύσιο Σωτηρόπουλο, για τις χρήσιμες πληροφορίες του όσον αφορά το δασολογικό κομμάτι της εργασίας. Ευχαριστώ επίσης, τον Πυροσβέστη Δασικών Επιχειρήσεων (Επιστημονικό προσωπικό) και φίλο κ. Βλάση-Επαμεινώνδα Κατσιούλη, για την συμβολή του στην πληρέστερη αποτύπωση των δασικών πυρκαγιών στον Ελλαδικό χώρο.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη τους σε κάθε μου βήμα.

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στην μελέτη του υδατικού ισοζυγίου της υπολεκάνης του Αλφειού ποταμού, αυτή της Καρύταινας μετά από την συνθήκη της αλλαγής χρήσεων γης μετά από πυρκαγιά. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού ArcMap και του υδρολογικού μοντέλου Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Το SWAT είναι ένα κατανεμημένο μοντέλο βροχής – απορροής που με την βοήθεια του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM), των χρήσεων γης, των τύπων εδαφών, τις κλίσεις αλλά και των μετεωρολογικών δεδομένων προσομοιώνει τις υδρολογικές διεργασίες της λεκάνης απορροής. Στην παρούσα εργασία το χρονικό βήμα είναι ημερήσιο. Η προσομοίωση έγινε αρχικά για τα έτη 2001-2014 με βάση παρατηρημένων χρονοσειρών και στην συνέχεια η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για τα έτη 2020-2070 με βάση συνθετικών χρονοσειρών που δημιουργήθηκαν. Για την ολοκλήρωση της έρευνας χαράχθηκαν τρία σενάρια πυρκαγιάς που ορίστηκαν με βάση την επικρατούσα χλωρίδα, τις κλίσεις των εδαφών αλλά και των πυρκαγιών που επικρατούν σε παρόμοιες περιοχές στην Ελλάδα, με την περιοχική μελέτης. Με βάση της επικρατούσας βλάστησης επιλέχθηκε και ο χρόνος και τα στάδια αποκατάστασης της βλάστησης. Η βασική μετατροπή που παρατηρείται μετά από μία πυρκαγιά είναι η μεταβολή του curve number (CN). Η παρούσα εργασία έδειξε, τις αλλαγές στην απορροή που παρουσιάζονται μετά από κάθε σενάριο ξεχωριστά αλλά και συγκριτικά μεταξύ τους. Τέλος, αναλύθηκε το κατά πόσο το υδατικό δυναμικό επανέρχεται με το πέρασμα του χρόνου, μετά από κάποια τυχόν πυρκαγιά.

Λέξεις Κλειδιά: Υδρολογική ανάλυση, SWAT, αλλαγή χρήσης γης, Καρύταινα, Αλφειός

ABSTRACT

This thesis concerns the study of the water balance of the sub-basin of the Alfeios river, that of Karitaina after the condition of land use change following a fire. This study was carried out using ArcMap software and the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). SWAT is a distributed rainfall-basin model that with the help of the digital terrain model (DEM), land uses, soil types, slopes and meteorological data simulates the hydrological processes of the basin. In this study the time step is daily. The simulation was initially performed for the years 2001-2014 based on observed time series and then the simulation was performed for the years 2020-2070 based on synthetic time series created. In order to complete the study, three fire scenarios were drawn up, defined on the basis of the prevailing flora, the slopes of the soils and the fires prevalent in similar areas in Greece, with the study area. The time and stages of vegetation recovery were also selected on the basis of the prevailing vegetation. The main change observed after a fire is the change in the curve number (CN). The present work has therefore shown the changes in basin which occur after each scenario separately and in comparison, with each other. Finally, it was analyzed whether the water potential recovers over time after a fire.

Key words: Hydrological analysis, SWAT, land use change, Karitaina, Alfeios

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|---|-----------|
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ..... | 3 |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ..... | 4 |
| ABSTRACT | 5 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ | 6 |
| EXTENDED ABSTRACT | 9 |
| 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 33 |
| 1.1 Γενικά | 33 |
| 1.1.1 Το μοντέλο SWAT | 36 |
| 1.2 Αντικείμενο της Εργασίας..... | 38 |
| 1.3 Δομή της Εργασίας | 38 |
| 2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ..... | 40 |
| 2.1 Γενικά | 40 |
| 2.1.1 Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Πελοποννήσου..... | 40 |
| 2.1.2 Λεκάνη απορροής του Αλφειού Ποταμού..... | 41 |
| 2.1.3 Λεκάνη Απορροής Καρύταινας | 41 |
| 2.2 Γεωλογικά χαρακτηριστικά | 42 |
| 2.3 Κλιματικά χαρακτηριστικά | 43 |
| 2.4 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά Καρύταινας | 45 |
| 2.5 Χλωρίδα | 47 |
| 2.5.1 Ζώνη βλάστησης Καρύταινα | 47 |
| 2.5.2 Υδατικό δυναμικό δένδρων..... | 49 |
| 2.5.3 Το νερό στο δασικό οικοσύστημα | 49 |
| 2.6 Χρήσεις Γης..... | 51 |
| 2.7 Δεδομένα | 52 |
| 2.7.1 Γεωχωρικά Δεδομένα | 52 |
| 2.7.2 Δεδομένα Βροχόπτωσης | 53 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 2.7.3 | Δεδομένα παροχών | 54 |
| 3 | ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ..... | 56 |
| 3.1 | Γενική επισκόπηση..... | 56 |
| 3.2 | Το Υδρολογικό Μοντέλο SWAT..... | 56 |
| 3.2.1 | Υδρολογικός κύκλος κατά το μοντέλο SWAT | 56 |
| 3.2.2 | Υδρολογικές διεργασίες..... | 60 |
| 3.3 | Εφαρμογή Μοντέλου SWAT..... | 63 |
| 3.3.1 | Το λογισμικό ArcSWAT..... | 63 |
| 3.3.2 | Δημιουργία μονάδων υδρολογικής απόκρισης (HRUs) | 64 |
| 3.3.3 | Χρήσεις γης (Land Use) | 65 |
| 3.3.4 | Δεδομένα εδάφους (Soil Data) | 66 |
| 3.3.5 | Κλίσεις (Slope)..... | 68 |
| 3.3.6 | Κλιματικά δεδομένα | 69 |
| 3.4 | Εκτέλεση και βαθμονόμηση μοντέλου..... | 69 |
| 3.5 | Συνθετικές Χρονοσειρές | 70 |
| 3.6 | Σενάρια αλλαγής Χρήσεων Γης | 71 |
| 3.6.1 | Σενάριο Πυρκαγιάς 1 | 73 |
| 3.6.2 | Σενάριο Πυρκαγιάς 2 | 74 |
| 3.6.3 | Σενάριο Πυρκαγιάς 3 | 74 |
| 4 | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ | 75 |
| 4.1 | Αποτελέσματα βασικού σεναρίου..... | 75 |
| 4.2 | Προσομοίωση σεναρίων χρήσεων γης..... | 77 |
| 4.2.1 | Σενάριο 1 | 77 |
| 4.2.2 | Σενάριο 2 | 80 |
| 4.2.3 | Σενάριο 3 | 83 |
| 4.3 | Συζήτηση Αποτελεσμάτων | 87 |
| 4.3.1 | Σύγκριση και Αξιολόγηση Σεναρίων | 87 |
| 4.3.2 | Σύγκριση επιμέρους μεταβολών | 90 |
| 5 | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ..... | 94 |

| | |
|--|-----------|
| 5.1 Σύνοψη..... | 94 |
| 5.2 Συμπεράσματα | 94 |
| 5.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα | 95 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 97 |

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Water is one of the essential elements for life conservation. Water resources are renewable and inexhaustible. It is at the same time an irreplaceable natural resource, as well as an economic good whose value is increasingly understood by governments and the world in general (Kalogeropoulos K. 2011).

In recent years the climate has been changing, either naturally or due to human activity due to uncontrolled emissions of greenhouse gases. As a consequence, there is an increase in extreme weather events, such as floods and extreme temperatures. In dry climates, such as the Mediterranean climate characterized by mild winters and dry summers, combined with a lack of forest management, lead to an increased risk of fires.

As expected, the impact of forest fires on the hydrological water cycle is also of great importance.

All the risks of pollution of the environment and water resources, as well as the concern about the increasing in floods, have led the European Union and the institutions to take measures to protect them. Some of these measures are set out in the following guidelines:

- Directive 2000/60/EC 'Water Framework Directive – Establishing a framework for Community action in the field of water policy'
- Directive 2007/60/EC 'Directive on the assessment and management of flood risks'

The SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model is a daily hydrological model of a basin that operates in a Geographic Information Systems (GIS) environment. The aim of the model is to simulate a range of physical and chemical processes and to forecast/calculate the effect of land use changes on runoff, water yields, sediment production and

transport (Neitsch S. I. et al, 2011) and finally the contamination of water bodies by pesticide use and waste disposal in them.

The purpose of this research is to estimate the hydrological potential under the condition of land use change after fire regime, using ArcSWAT software. A mountainous basin, that of Karitaina, was used to implement this process. After a fire event, land use types can undergo significant changes. SWAT facilitates the analysis of post-fire land use changes and their effects on water resources. Significant variations in basin hydrology are observed from the percentage of the basin that is 'burned' and the influence of burned area on hydrology in the basin as a whole.

Study Area and Data Used

Study Area

The basin area of Karitaina is located in Southern Greece and specifically in the central Peloponnese, in the Prefecture of Arcadia and is a sub-basin of the River Alfeios, as shown in Figure 1.

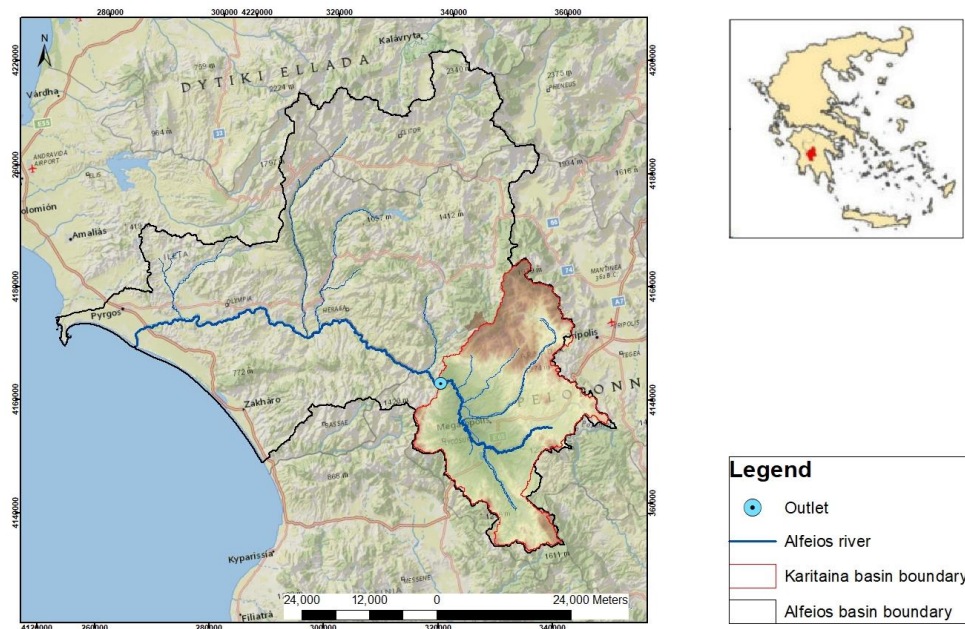


Figure 1: Karitaina subbasin location within Alfeios river basin

The outlet of the basin area is defined at the location of Karitaina and in particular at the Ancient Bridge of Karitaina with coordinates x: 327410,40 and y: 4149570,66 of the EGSA '87 coordinate system.

The basin area of Karitaina is enclosed by Mount Mainalon, Mount Parnonas and the Arcadian part of the Taygetos. It occupies an area of about 828m² and has an average altitude of 1067m, as shown in Figure 2. The main river that crosses the whole basin is the part of the Alfeios River. Its sources are located within the basin area of Karitaina on the plateau of Tripoli, at the mouth of Mount Parnon and on the slopes of the Northern Taygetos, in the area of the Aseatic plain at an altitude of 700-800m. Other rivers such as the Elisson and the Lousios River play an important role in the hydrology of the basin and contribute to the water balance of the Alfeios River.

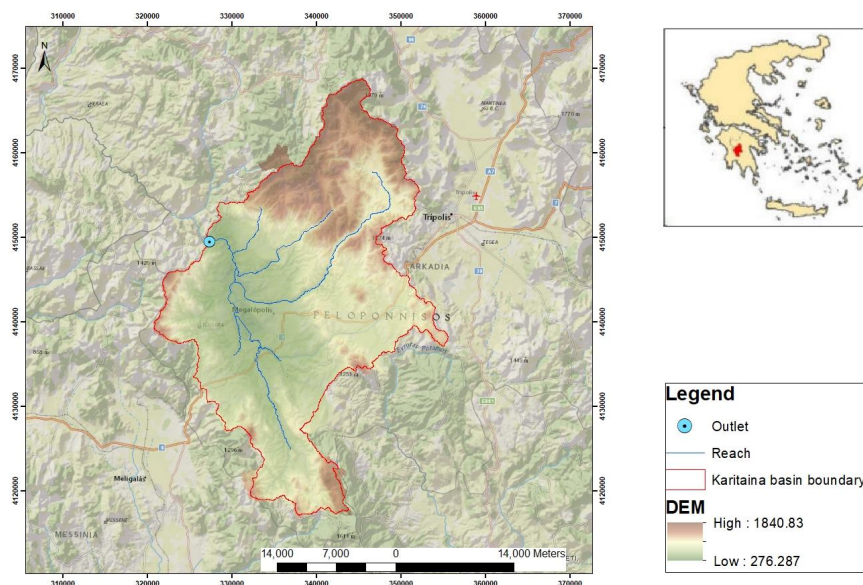


Figure 2: Digital terrain model of Karitaina (DEM)

Data used

Geospatial data

The data used for the analysis and generated using some of the above applications in a GIS environment are presented below:

- **Digital Elevation Model (DEM):** The Digital Elevation Model (DEM) was taken from Copernicus in a raster file. The DEM represents the raw surface as captured by satellites. EU-DEM

provides elevation data Europe-wide with a resolution of $\approx 25\text{m}$ and is mainly based on data from the SRTM and ASTER GDEM missions.

- **Land Use:** For the land use data, the Corine (Coordination Information on the Environment) background was used. Corine is a project that concerns the mapping of the land cover of European countries with the aim of collecting and coordinating land use data. The files are free of charge and the vector data are in 'shapefile' format. The 2018 version was used in this thesis. The scale of Corine is 1:100,000. Corine classifies the land cover of Europe into 44 subcategories.
- **Soil Data:** soil data were obtained from the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) for the whole world. The soil map contains information on the soil and subsoil, which have an important influence on the components of the hydrological cycle. Together with soil morphology and land use, these are the elements that influence the response of a basin.

Rainfall data

Due to the lack of historical time series data in the wider area of the Karitaina' basin, the meteorological data were taken from the official website of the ArcSWAT model. (see: <https://swat.tamu.edu/data/>).

More specifically, they were taken from the World Weather for Water Data Service (W3S). It is a platform that provides meteorological data (precipitation, maximum and minimum temperature) in a predefined format, compatible with the SWAT model, for any catchment throughout the year. The data have a daily step.

The data used are for the years 2001 up to the end of 2014. This choice was made based on the number of data gaps and the maximum available overlapping time series period.

For the study area of this thesis five (5) stations were used, which are shown in Table 1, below.

Table 1: Satellite rainfall data points

| STATION | X | Y |
|---------|-----------|------------|
| 1 | 345264.82 | 4157039.67 |
| 2 | 345058.46 | 4145944.01 |
| 3 | 336212.37 | 4146113.04 |
| 4 | 327136.72 | 4139195.65 |
| 5 | 344647.15 | 4123753.19 |

Then, with the help of Thiessen polygons, the stations which have the greatest influence on the Karitaina basin are found. As shown in the Figure 3, stations three (3) and four (4) are the ones that have the most influence on the hydrology of the aforementioned area.

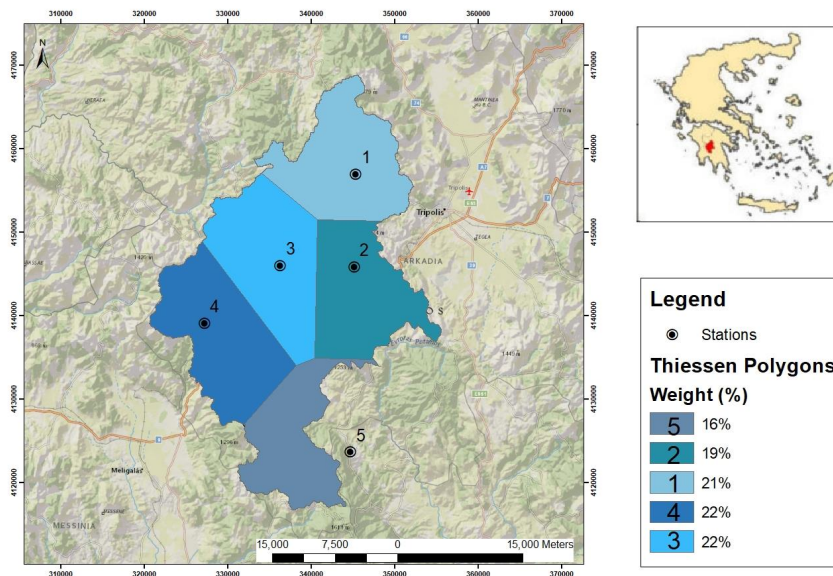


Figure 3: Precipitation points & Thiessen polygons

Flow Data

For the implementation of the present study, the average values of daily flows in Karitaina were used, which were obtained from the PPC. The flow (Q) at the outlet of the Karitaina' basin was calculated based on weighted data (H) through the level-flow curve. The mathematical description of the flow curve is (Bournas 2021):

$$Q = 7,798 \times H^{1,906}$$

The data cover the period from the hydrological year 1961-1962 to the hydrological year 2015-2016.

Methodology

This chapter describes in detail all the procedures followed for the preparation of this thesis. In addition, the hypothetical scenarios created for this research and the changes that were made in order to realize these scenarios are presented.

After the collection of the necessary data was completed, which was difficult due to their scarcity, and their processing to be compatible with the ArcSWAT 2012 program in the ArcGIS 10.5.1 environment, the model configuration process was started.

Application of the SWAT Model

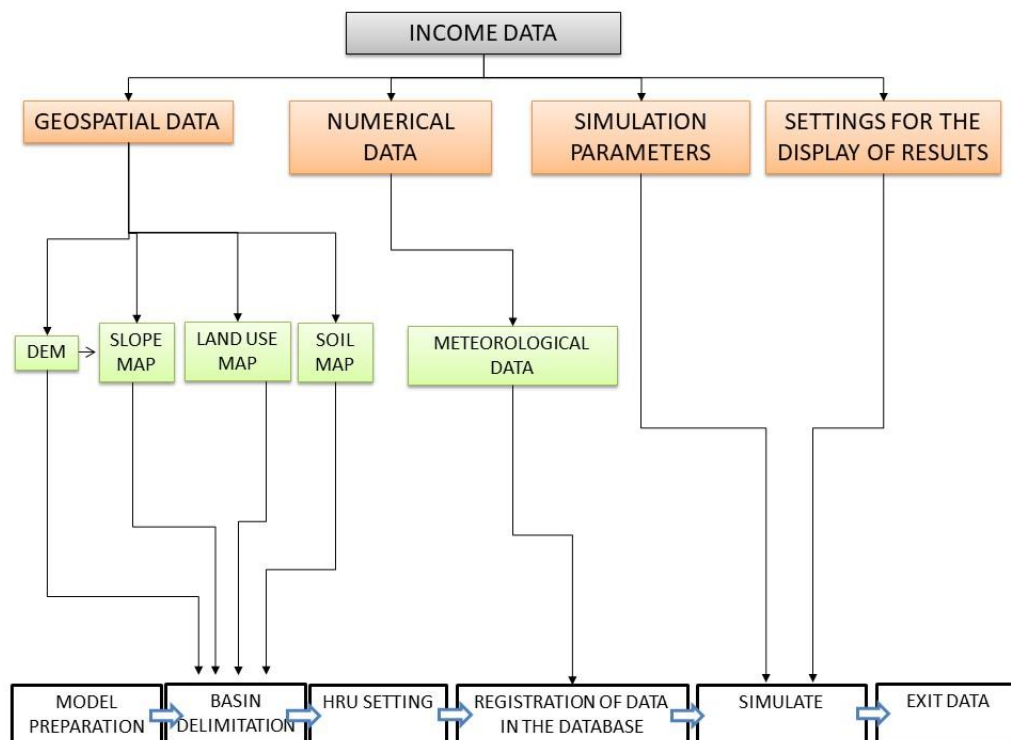


Figure 4: SWAT Flowchart

Initially, the sub-basin of Karitaina was levelled by the basin area of the Alfeios River. The 25m x 25m Digital Elevation Model (DEM) was used to define the basin and start the modelling process. Based on the topography (DEM), the hydrographic network was defined and the direction of water flow (Flow direction) and where it accumulates (Flow accumulation) were determined.

As a final stage of the basic model setup is the drawing of the sub-basins. The Karitaina basin was divided into 13 sub-basins and the basin was delineated, shown in Figure 5. Once all the HRUs were defined 330 HRUs were created.

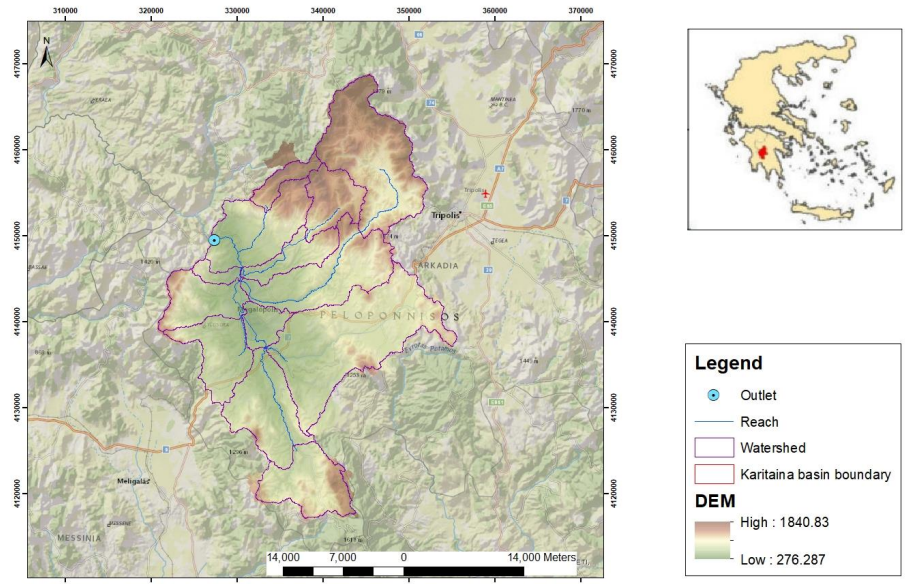


Figure 5: SWAT sub-basins

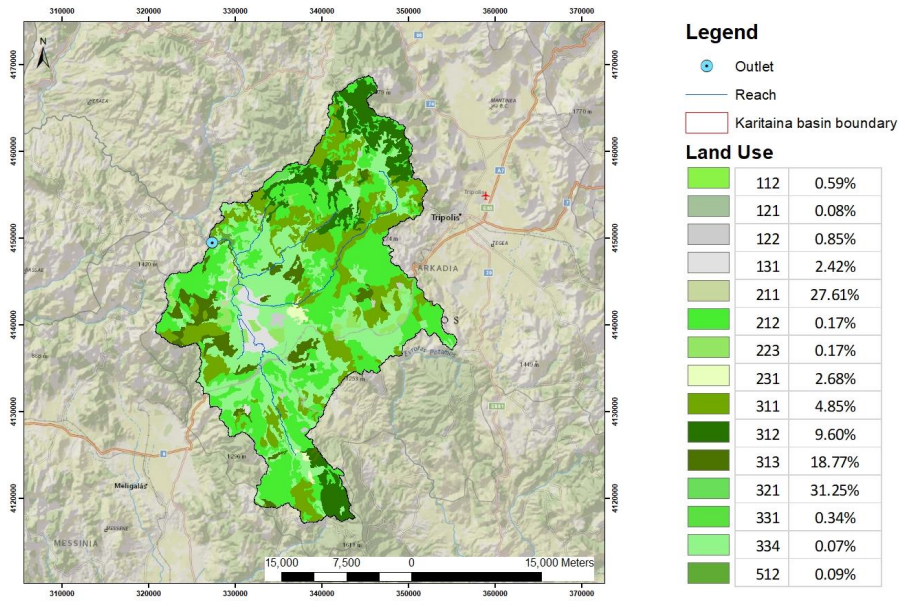


Figure 6: Land use map and percentages of vegetation cover of each vegetation type

For land use, the land cover maps, taken as mentioned above from the Copernicus Corine Land Cover program, were input into the model. Once the land use was entered, the necessary processing was done to make the land use compatible with the SWAT tool. The resulting land uses in this basin are shown in the table below and in Figure 6.

Table 2: Description of the SWAT software land use codes used in the Karitaina' basin

| SWAT CODE | TYPE | Description |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| WATR | Water | Stagnant water surfaces |
| UTRN | Transportation | Road and railway networks |
| URML | Discontinuous urban fabric | Discontinuous urban sites |
| UIDU | Mineral extraction sites | Mineral extraction sites |
| UCOM | Industrial or commercial units | Industrial and commercial zones |
| RNGE | Natural grasslands | Natural pastures |
| PAST | Pastures | Meadows |
| OLIV | Olives | Olive groves |
| FRST | Mixed forest | Mixed forest |
| FRSE | Coniferous forest (evergreen) | Coniferous forest |
| FRSD | Broad-leaved forest (deciduous) | Broadleaf forest |
| BERM | Bermudagrass | Areas with sparse vegetation |
| AGRL | Complex cultivation patterns | Composite crops |
| AGRC | Permanently irrigated land | Permanently irrigated land |

Soil Data

For the continuation of the model setup, soil data as obtained from the World Food and Agriculture Organization (FAO) were added.

Three soil types appear to the study area, according to the World Organisation for Agriculture and Food (FAO). The following table presents detailing the soil types.

Table 3: Description of SWAT software soil types used in the Karitaina basin

| FAO SOIL CODE | GEOLOGICAL FORMATIONS | Description |
|-----------------------|-----------------------|---|
| I-Lc-3c-3113 | Lithosols | Fine hard and rocky rocks. These soils are found in very steep mountainous areas, where soil material is removed so quickly by erosion. |
| Lc104-2-3-3185 | Chromic Luvisols | Soils with strong clay accumulation at the B-horizon. They show evidence of clay-silicate mineral movement without excessive base leaching. Soils with a diagnostic horizon of 7.5 YR Munsell Hue (or redder). Occur on flat soils or soils with gentle slopes mainly in Mediterranean regions which have dry and wet periods. |
| Rc52-2-3b-3259 | Calcaric Regosols | They are characterised by shallow, medium to fine, unconsolidated parent material that may be of alluvial origin and by the lack of significant soil horizon formation due to dry or cold climatic conditions. They occur mainly in polar and desert areas, occupying about 2 % of the continental land area. They are usually found under their original natural vegetation or under limited dryland crops |

The largest percentage of land cover in this basin is the Lithosols Formation with a percentage of 52.72%. This leads to the conclusion that due to the hydrological category it belongs to, which is C, it has low permeability, resulting in an increased possibility of surface runoff.

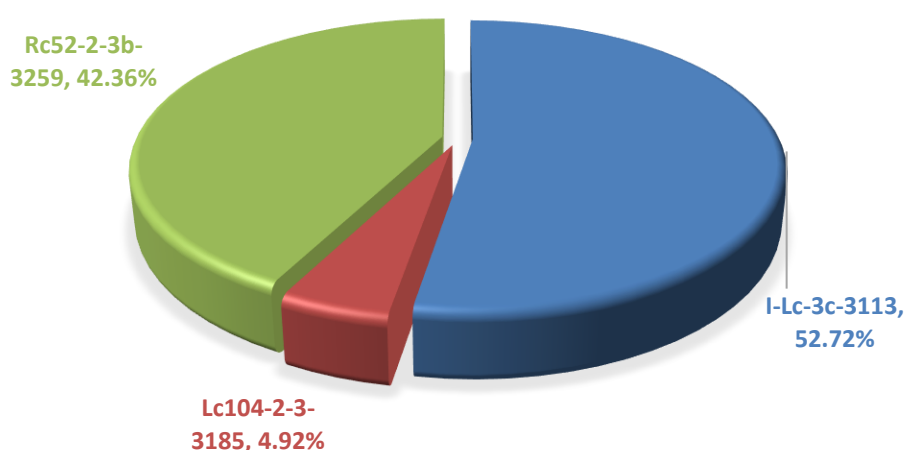


Figure 7: Percentage coverage of soil types in the Karitaina basin area

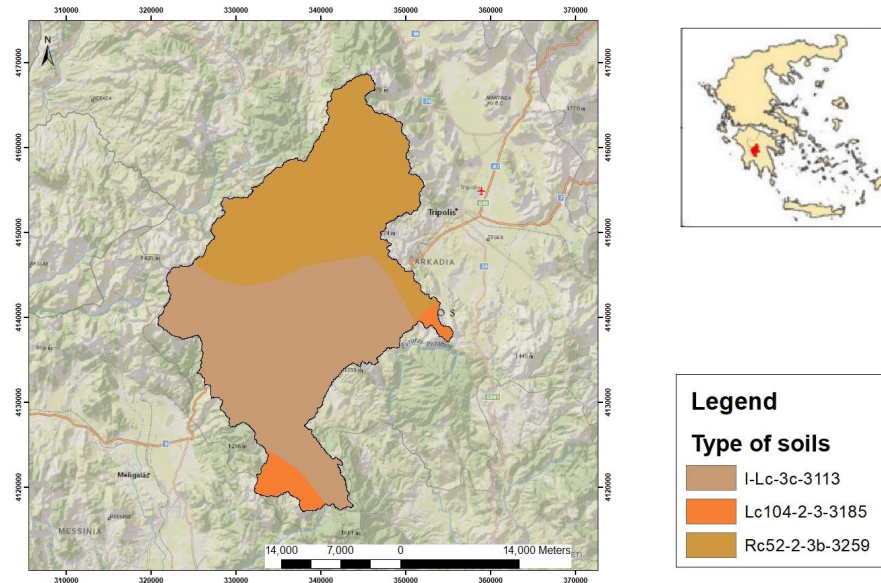


Figure 8: Soil Types of the Study Area

Slope

The slopes of the area were then defined based on the slope histogram. The slopes were divided into 4 classes, 0%-15%, 15%-35%, 35%-65% and 65%-100%, as shown in Figure 9.

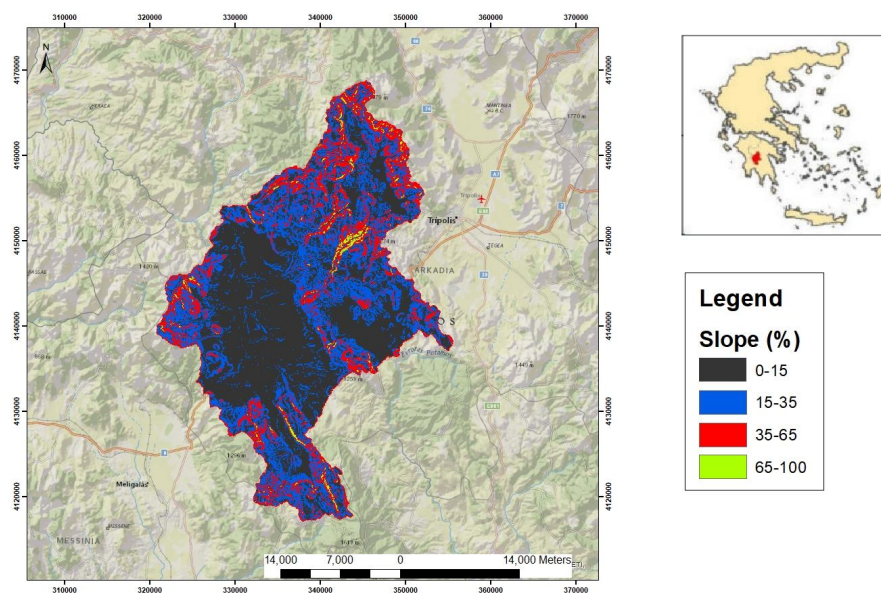


Figure 9: Categorization of slopes in the SWAT model

Climate data

Meteorological data taken from 4 points around the basin were used to formulate the model as described in the data used chapter. The period of daily meteorological data used is from 01/10/2000 to 12/30/2015.

Model execution parameters

After the end of adding all the necessary data, the model was run. The model was simulated from 01/01/2001 to 12/30/2014. The Warm up period was also set to 1 year.

Synthetic Time Series

The stochastic autocorrelation model AR(2) was used to generate the synthetic time series and 50 synthetic time series were produced on a daily scale of 50 years. More specifically for the years mentioned the synthetic time series are from 2020 to 2070.

First, as has been mentioned, historical data have a daily step. To produce the synthetic time series, the historical data were converted to monthly data to produce the most correct synthetic time series in terms of the statistical characteristics of the time series. Some specific day was therefore added for all years of the synthetic time series. This was done for all days separately, but also for each month for all years. These results are useful to derive the rainfall rates observed for each day of the year. With the help of the stochastic autocorrelation model AR(2), the monthly synthetic time series were produced. Using the rainfall rates of each day separately, the monthly synthetic time series were converted to daily time series in order to be compatible with the SWAT model.

The AR(2) stochastic autocorrelation model is a tool for analyzing hydrological time series, helping to understand, model and predict complex phenomena, taking into account their linear relationships based on past observations. Hydrological time series data, such as flow, rainfall, etc., exhibit temporal patterns and dependencies.

The AR(2) model, adapted to hydrology, is defined as:

$$Q_t = \varphi_1 Q_{t-1} + \varphi_2 Q_{t-2} + w_t$$

Where,

Q1, Q2: hydrological variable (e.g. flow) at time t.

φ_1 , φ_2 : autocorrelation parameters.

w_t : white noise at time t.

Hydrological processes often show short-term and medium-term time dependencies. Accurate estimation of the parameters is an essential step in modelling.

Application of Land Use Scenarios

In this research three fire scenarios scenario are analyzed, where a specific region within the study area is burned.

The selection of scenarios was based on the land use in the basin area and the characteristics that favour the spread of forest fires in Greece. Areas were selected which are mostly covered with coniferous trees, which are particularly flammable. Another characteristic that led to the selection of these areas, as shown by the slope map, is the steep slopes found there, which makes it easier for the fire to spread.

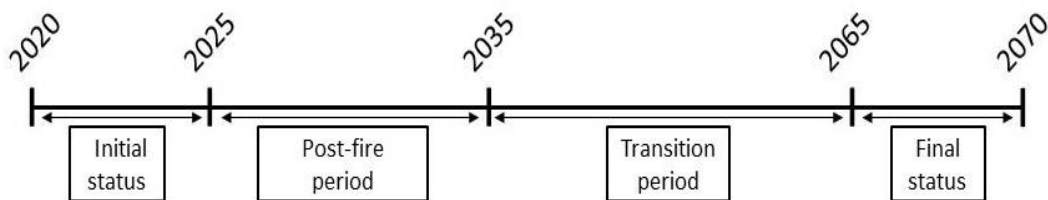


Figure 10: Temporal simulation of vegetation change after a fire scenario

The first 5 years simulate the status quo. In the next 10 years, i.e. from the fire onwards, the area takes on the barren area designation (BARR), thus simulating the burned area. Due to the presence of spruce in the area, for the next 30 years or so, the area will be in a transitional stage, designating the coniferous forests and the remaining forests with the grassland (RNGE) designation. For the following years and until the end

of the synthetic time series, where the simulation is performed, the vegetation has reverted to its original stage.

Table 4: Soil characteristics used for the simulation of the fire scenarios

| Barren (BARR) | | Range-Grasses (RNGE) | |
|----------------------|------|-----------------------------|------|
| A | 77 | A | 49 |
| B | 86 | B | 69 |
| C | 91 | C | 79 |
| D | 94 | D | 84 |
| Manning's N | 0.14 | Manning's N | 0.15 |

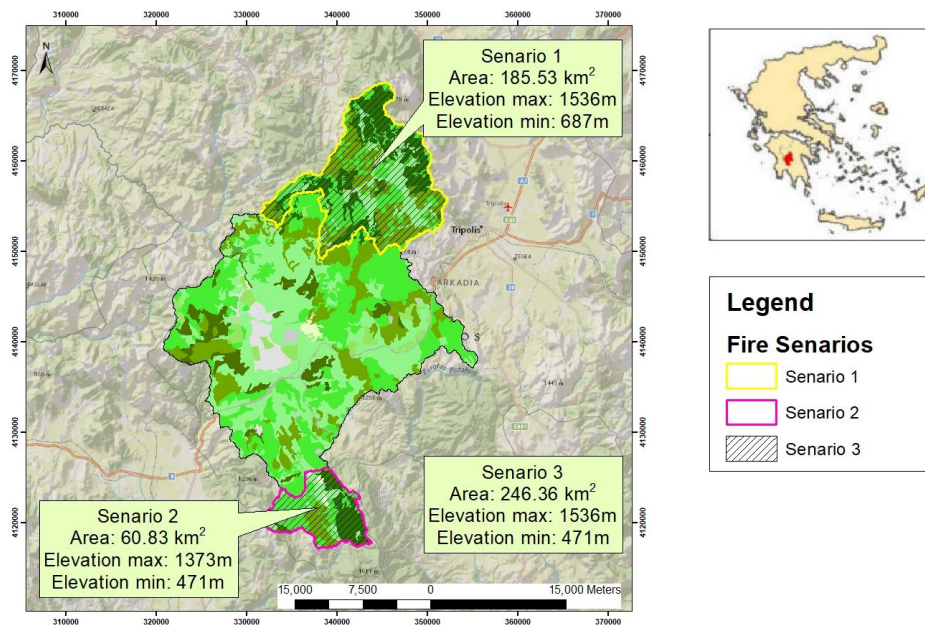


Figure 11: Scenario Implementation Areas

Fire Scenario 1

According to the first scenario, the northern part of the basin area is burnt. A total of 185.53 km² is burnt, i.e. about 22.41% of the total basin area.

Fire Scenario 2

In the second scenario, the southern part of the basin area is burnt. A total of 60.83 km² is burnt, i.e. about 7.35% of the total basin area.

Fire scenario 3

In the third scenario, a combination of the above two scenarios is used. In this scenario, both the northern and southern parts of the basin area are burnt.

A total of 246.36 km² is burnt, i.e. about 29.75% of the total basin area.

Results and Discussion

Baseline scenario results

The highest average annual volume reaches 351,4*10⁶ m³, which occurs in the year 2035. The average annual flow rate respectively equals 11,1m³/s. In Figure 12, as expected, the average annual volume value decreases significantly in the summer months (June, July, August). The average annual volume is equal to 333.61*10⁶ m³ while the average annual flow is equal to 10.58m³/s. The maximum volume value occurs overall for all years in January and February.

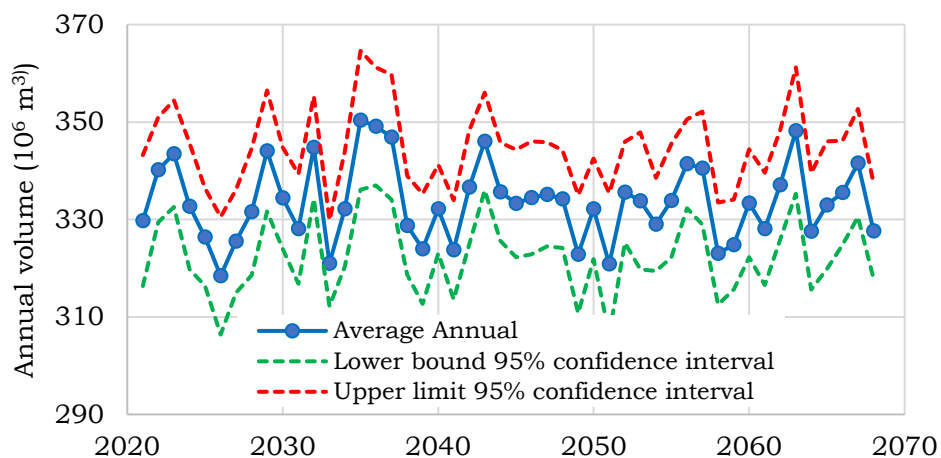


Figure 12: Average annual runoff volume in the baseline scenario

As can be seen in Table 5, the winter months also show the highest volume of benefits, while in the summer months the values decrease significantly. This is justified as there is more precipitation in the summer months.

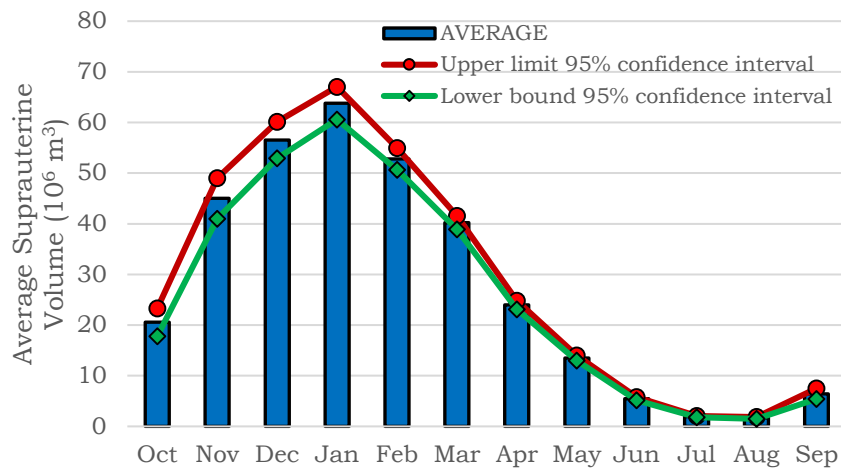


Figure 13: Mean hypertensive volume and upper and lower limits of 95% confidence interval of the baseline scenario

Table 5: Average monthly volume, upper and lower confidence intervals and maximum and minimum values

| Base scenario | Average | Lower 95% confidence interval | Upper 95% confidence interval | Max | Min |
|---------------|---------|-------------------------------|-------------------------------|-------|-------|
| Jan | 63.82 | 60.58 | 67.05 | 73.30 | 54.07 |
| Feb | 52.80 | 50.67 | 54.94 | 66.26 | 39.60 |
| Mar | 40.23 | 38.92 | 41.53 | 55.76 | 26.71 |
| Apr | 23.98 | 23.13 | 24.83 | 35.02 | 14.80 |
| May | 13.51 | 13.01 | 14.02 | 21.45 | 7.21 |
| Jun | 5.47 | 5.18 | 5.77 | 11.08 | 1.84 |
| Jul | 1.94 | 1.80 | 2.08 | 3.96 | 1.33 |
| Aug | 1.67 | 1.49 | 1.85 | 3.80 | 0.91 |
| Sep | 6.44 | 5.40 | 7.48 | 20.96 | 1.50 |
| Oct | 20.55 | 17.82 | 23.28 | 42.39 | 4.28 |
| Nov | 45.00 | 40.98 | 49.02 | 63.45 | 17.54 |
| Dec | 56.52 | 52.91 | 60.13 | 64.91 | 12.76 |

Simulation of land use change scenarios

Fire Scenario 1

The highest average annual volume reaches $357.3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, which occurs in the year 2035. In scenario 1 the average annual volume of supplies compared to the baseline scenario increased by $7,66 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ or by 2.31%. The average annual volume is equal to $339.42 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. The

average monthly volume compared to the baseline scenario increased by $17,30 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ or by 163.64%.

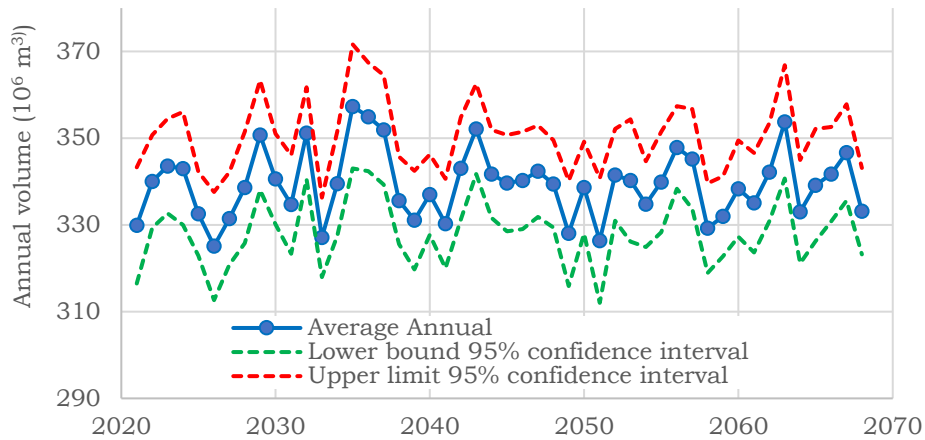


Figure 14: Annual supply volume of scenario 1

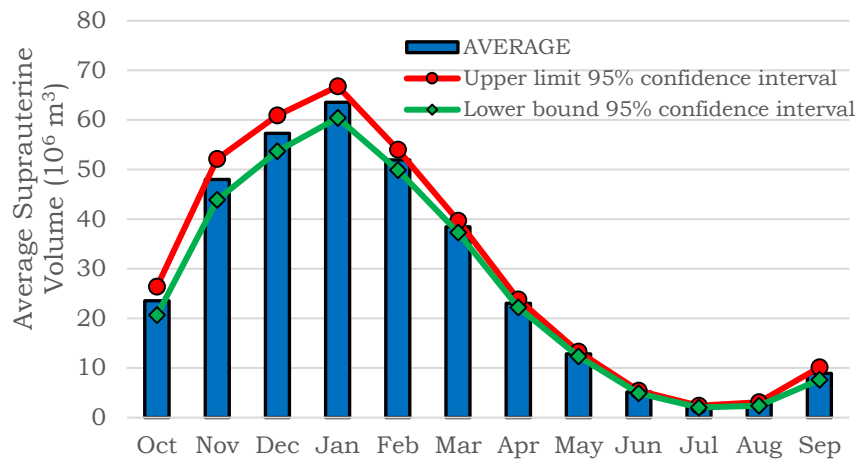


Figure 15: Average hypertonic volume of scenario 1

Fire Scenario 2

The highest average annual volume reaches $350,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, which occurs in the year 2035. In scenario 2 the average annual volume of runoff compared to the baseline scenario increased by $2,05 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ or by 0.62%. The average annual volume is equal to $333,86 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. The average monthly volume compared to the baseline scenario increased by $16,85 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ or 159.36%. The average monthly volume change can be as high as 176%.

This fire does not significantly affect the runoff volume. Due to the low runoff shown by this area in the model it is reasonable in the output.

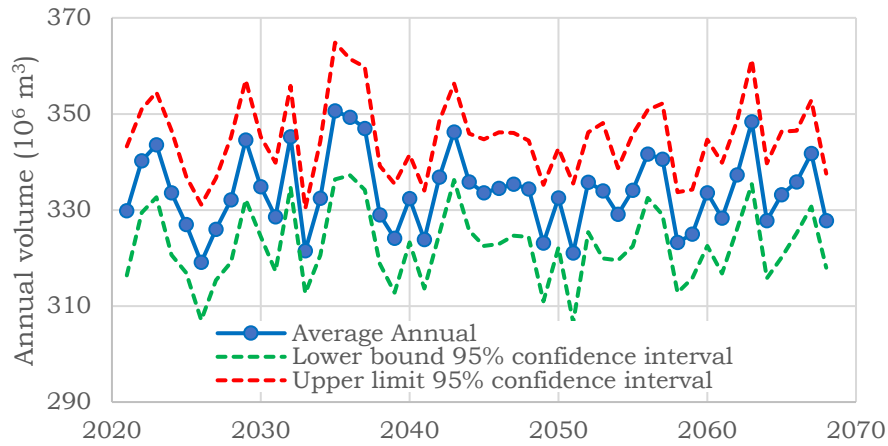


Figure 16: Annual runoff volume of scenario 2

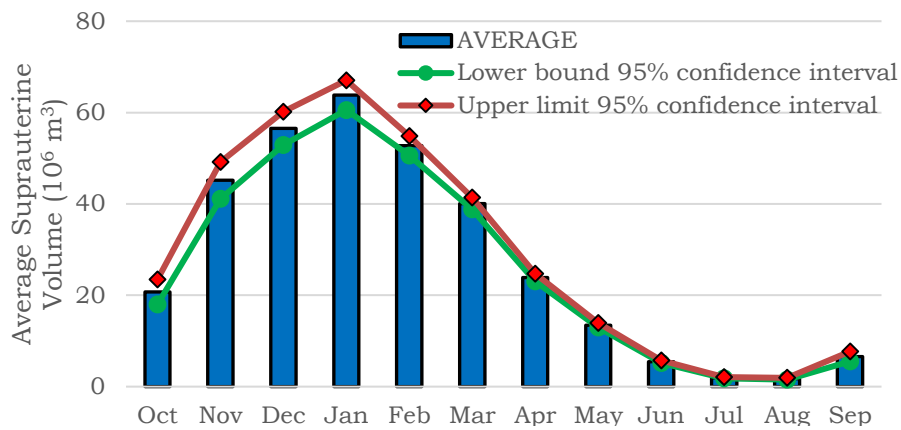


Figure 16: Average service volume of scenario 2

Fire Scenario 3

The highest average annual volume reaches $357,74 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, which occurs in the year 2035. Of the three scenarios, this is the one that shows the largest change in the volume of the supplies. The average annual volume of outflows compared to the baseline scenario increased by $7,88 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ or by 2.37%. The average monthly volume compared to the baseline scenario increased by $17,32 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ or by 163.82%. The average annual volume is equal to $339.69 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. The average monthly volume change can be as high as 416%.

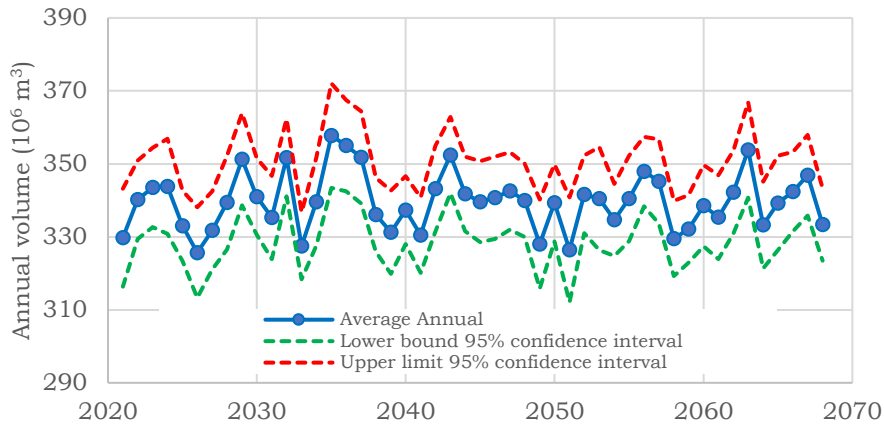


Figure 17: Runoff volume of scenario 3

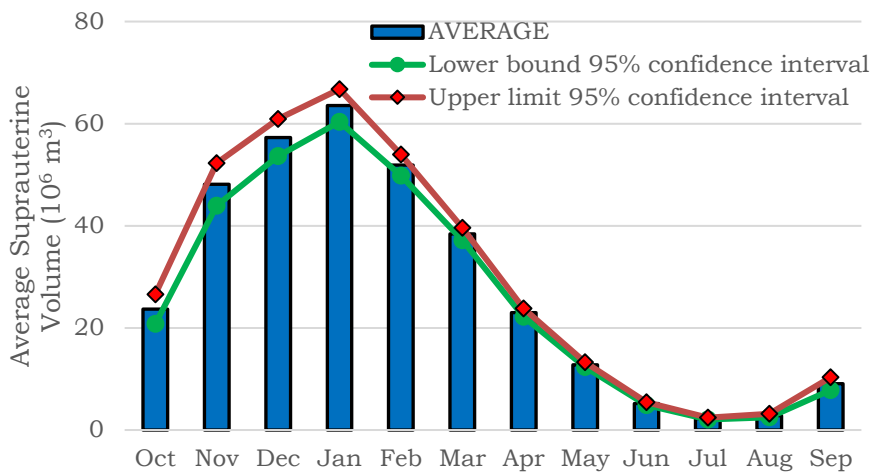


Figure 19: Average service volume of scenario 3

Comparison and Evaluation

In this section of the paper, the results of the scenarios will be compared with each other and with the baseline scenario.

From Figure 20, it can be seen that scenarios 1 and 3 are almost identical, which makes sense, since the difference is the addition of scenario 2 to scenario 1, i.e. the addition of 7% of the total catchment area.

According to Figure 21, the following conclusion is drawn:

- The first year of the fire shows the highest percentage change in volume compared to the baseline scenario, since the change in scenario 3 reaches 3.3%, while in scenario 2 it reaches 3.1%. The

second scenario, as expected, does not show a large change due to their size.

- At the restoration stage, strong variations are shown for scenarios 1 and 3.
- Over time the annual percentage change seems to decrease.

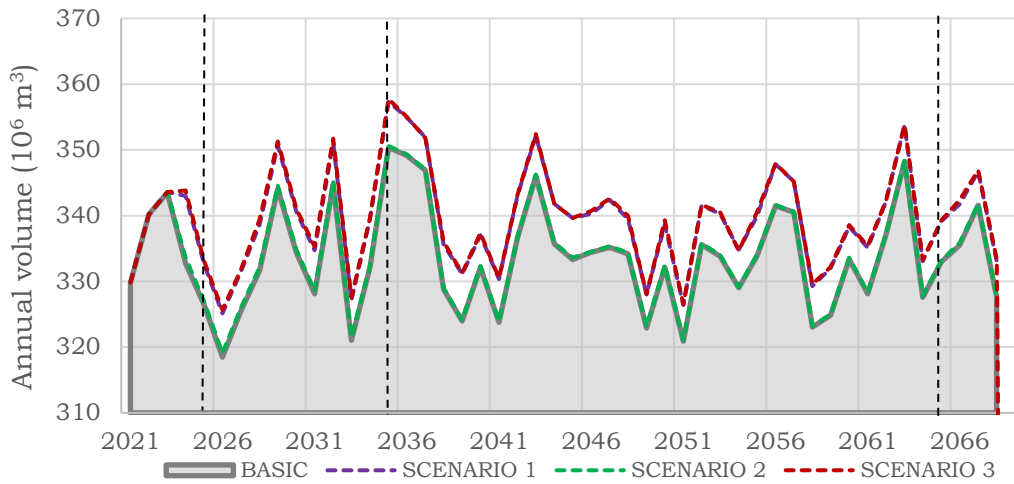


Figure 20: Comparison of annual runoff volumes

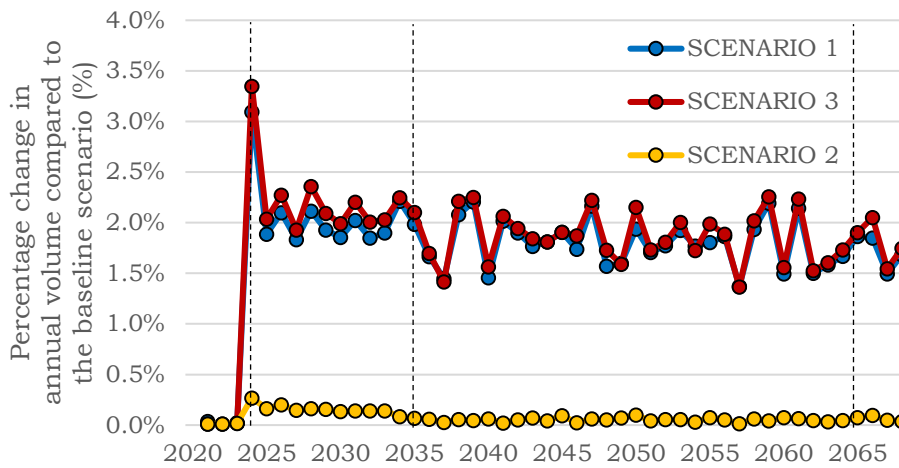


Figure 21: Percentage change in annual volume of all scenarios compared to the baseline scenario

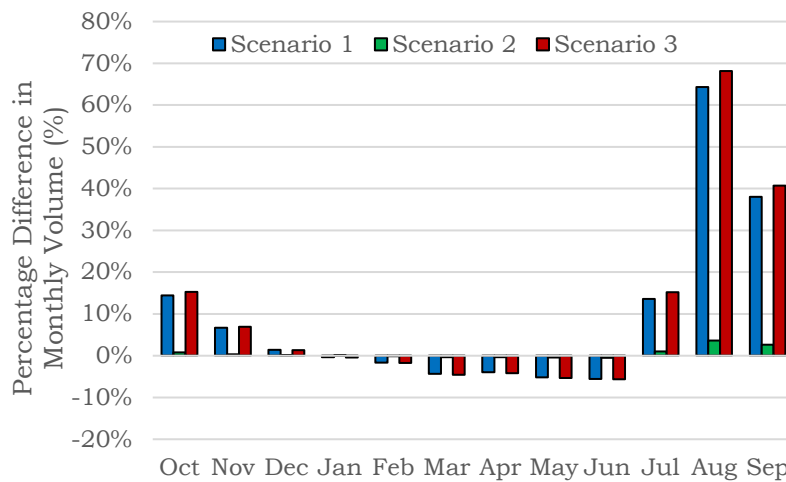


Figure 22: Percentage difference in monthly volume

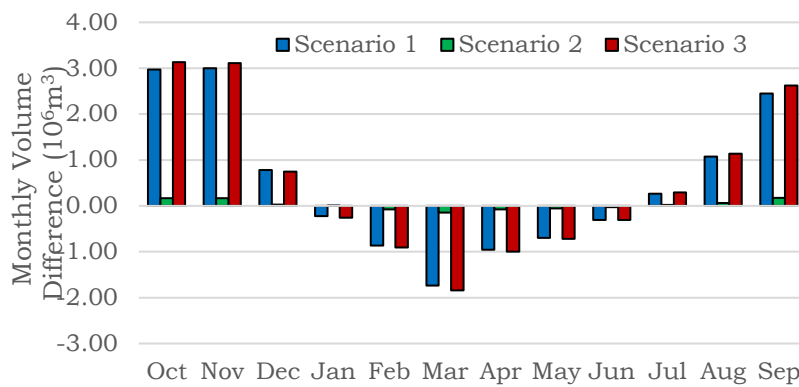


Figure 23: Absolute Monthly Volume Difference

As mentioned above, and based on Figures 22 and 23, it can be seen that while the percentage monthly difference in volume between each scenario separately and the baseline scenario shows a large percentage in August, the large absolute difference in monthly volume occurs in the months of October and November. This is because in the summer months the runoff is very small, so any change shows a large percentage increase, while on the other hand in October and November there is a large absolute difference in monthly volume because the first significant rainfall occurs.

Comparison of individual changes

In order to further investigate the results of this issue, firstly the change in monthly volume observed in scenario 3, the scenario with the largest change compared to the baseline scenario, was investigated. Furthermore, an individual separation of the vegetation changes that took place in the scenarios was made.

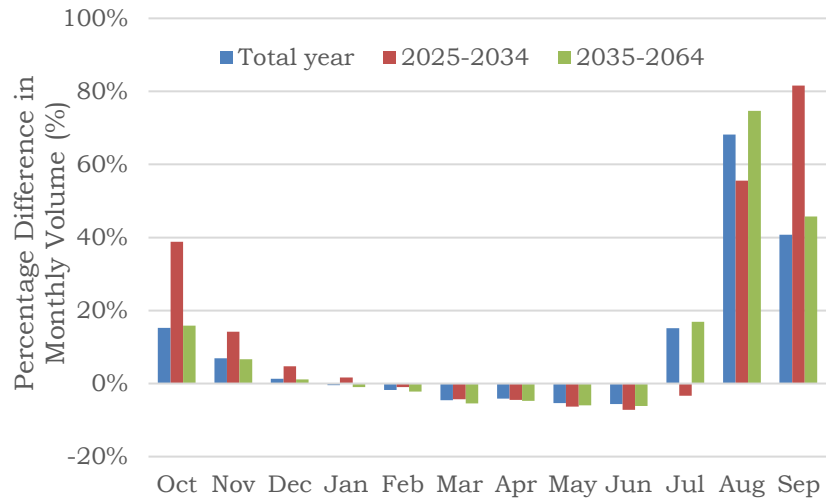


Figure 24: Percentage difference in monthly recovery stage volume for scenario 3

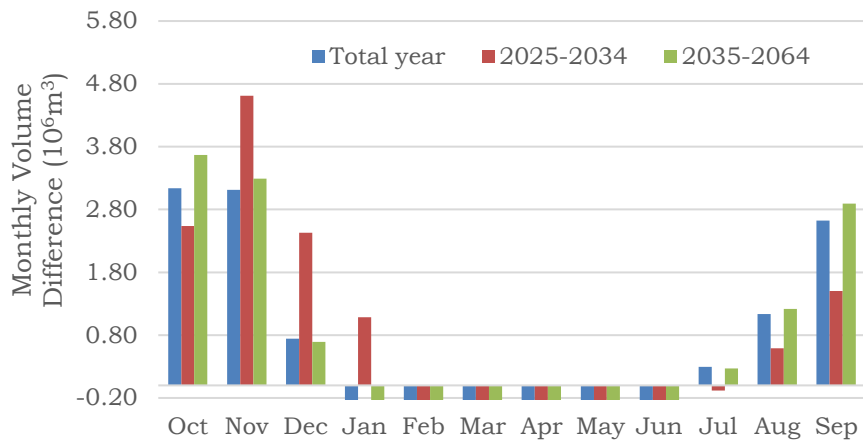


Figure 25: Difference in monthly volume of recovery stages for scenario 3

Figure 24 and 25 lead to the following conclusions:

- In the years 2025-2034, the monthly volume difference increases from August to January, with a maximum value in November which is equal to $4.61 \cdot 10^6 \text{m}^3$. It seems, therefore, that for the period of the fire the month most affected is November.

- In the years 2035-2064, the highest increase is found in October with a value equal to $3.67 \times 10^6 \text{m}^3$. It is therefore observed that the highest runoff occurs during the fire period. A remarkable increase occurs in January compared to the other stages.

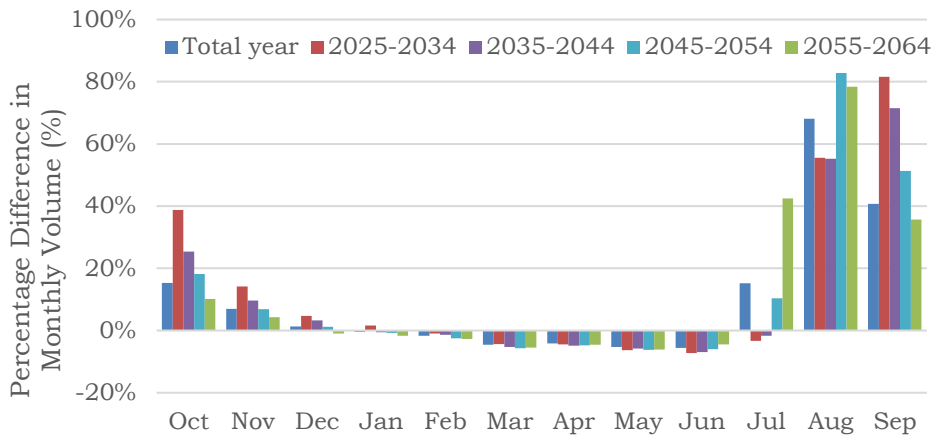


Figure 26: Monthly percentage volume difference between scenario 3 and baseline scenario, in individual compartments per decade

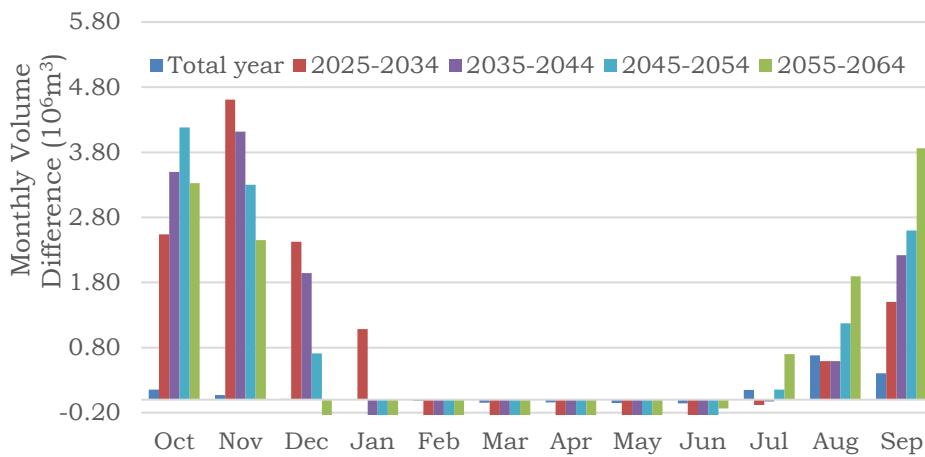


Figure 27: Monthly volume difference between scenario 3 and baseline scenario, in individual compartments per decade

Below, a breakdown of the rehabilitation stage by decade was carried out (Figure 26 & 27).

- 2025-2034: the same change as mentioned above is observed.
- 2035-2044: the monthly volume difference for the months of September and October appears larger than in the decade of the fire, with a larger value equal to $4,12 \times 10^6 \text{m}^3$ and occurs in November.

- 2045-2054: the maximum monthly volume difference between scenario 3 and the baseline scenario occurs in October with a value equal to $3,75 \cdot 10^6 \text{m}^3$. For this decade, variation occurs in fewer months than in previous decades, i.e. the months July to November.
- 2055-2064: the maximum monthly difference in volume occurs in October with a value of $3,67 \cdot 10^6 \text{m}^3$.

Conclusions

In this thesis the hydrological processes that take place in the Karitaina basin under changing conditions after a fire were investigated.

This study was carried out using the ArcMap software and the SWAT hydrological model, which are the main tools for hydrological simulation at basin level.

During the preparation of this study, many problems were obviously encountered. First of all, due to the American origin of the SWAT model, there are differences in the model database. Another major problem is the lack of large time series of meteorological data as well as of streamflow data. The meteorological data finally used are for the years 2001-2014 where the only continuous flow data were found.

What can be observed based on this research is that there is a change in runoff after the fire, but it depends on the percentage of the basin that burns, how much the portion of the basin affects the entire basin, and the land use that was prevalent in the area prior to the fire.

If meteorological and flow data were available, there would be more confidence in the results of the simulations.

Some summary conclusions are as follows:

- By using a distributed model, and in this case the SWAT hydrological model, the water potential of a catchment can be accurately predicted (depending on the input data) and its change in response to any change in the environmental conditions of the area.
- The fire scenarios, even those with the largest area, did not show a large increase in runoff, which can be explained by the small

percentages of area of the fire scenarios and the small contribution of runoff from the subbasins that burned to the total basin runoff.

- Annual runoff, even in the scenario with the largest area, did not show a significant increase, but monthly percentage changes showed a fairly significant increase, but this occurs in months with low runoff.
- The months that appear to be most affected are those that receive the highest amounts of precipitation, i.e. October through February.
- In Scenario 1 the average annual volume of discharges compared to the baseline scenario increased by $7.66 \cdot 10^6 \text{m}^3$ or 2.31%.
- In scenario 2 the average annual runoff volume compared to the baseline scenario increased by $2.05 \cdot 10^6 \text{m}^3$ or 0.62%.
- In scenario 3 the average annual volume of runoff compared to the baseline scenario increased by $7.88 \cdot 10^6 \text{m}^3$ or by 2.37%.
- Scenario 3 has a slightly higher monthly percentage change, reaching 3.3%, than Scenario 1, which reaches 3.1%, compared to the baseline scenario in the year of fire start.
- The largest difference in monthly volumes occurs in the decade of the fire.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Το νερό, είναι ένα από τα απαραίτητα στοιχεία για τη διατήρηση της ζωής. Οι υδατικοί πόροι είναι ανανεώσιμοι και ανεξάντλητοι. Είναι ταυτόχρονα ένας αναντικατάστατος φυσικός πόρος, καθώς και ένα οικονομικό αγαθό που με το πέρασμα των χρόνων γίνεται ολοένα και περισσότερο κατανοητή η αξία του από τις κυβερνήσεις και από τον κόσμο γενικότερα (Καλογέροπουλος Κ. 2011). Οι υδρατμοί κάτω από κατάλληλες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας συμπυκνώνονται και κατακρημνίζονται ξανά στη γη για να τροφοδοτήσουν επιφανειακούς και υπόγειους υδροφορείς, απ' όπου θα ξαναρχίσει η διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής κ.ο.κ. σε ένα αδιάκοπο υδρολογικό κύκλο.

Βασικό αίτιο των υδρολογικών φαινομένων πάνω στην γη είναι η κατακρήμνιση. Κατακρήμνιση είναι οι διάφορες μορφές νερού, όπως χιόνι, βροχή, υδρατμοί κ.α.. Η κατακρήμνιση που φτάνει στην επιφάνεια της γης και δεν απορρέει με τη μορφή της επιφανειακής ή υπόγειας ροής καλείται υδρολογική απώλεια, που οι κυριότητες συνιστώσες (Eagleson 1970) της είναι:

- α) Εξάτμιση, η διαδικασία με την οποία το νερό περνά άμεσα από την υγρή στην αέρια κατάσταση.
- β) Διαπνοή, η διαδικασία με την οποία το νερό περνά από την υγρή στην αέρια κατάσταση δια μέσου του μεταβολισμού των φυτών.
- γ) Ενσωμάτωση του νερού μέσα στην φυσική δομή της φυτοκάλυψης στην διαδικασία ανάπτυξης της.
- δ) Εξάχνωση, η διαδικασία με την οποία το νερό περνά άμεσα από τη στερεά στην αέρια κατάσταση.

Ακόμα και αν τα φυσικά φαινόμενα βρισκόταν τρόπος να γίνουν πλήρως αντιληπτά, δεν θα ήταν δυνατό να περιγράψει κανείς μαθηματικά τη διαίτα παροχής σε φυσικό ποτάμι χωρίς να συμπεριλάβει μη

συστηματικές και άγνωστες επιδράσεις, όπως χρωροχρονικά μεταβλητά φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, και του ποταμού, η εξατμισοδιαπνοή κ.λπ. που εισέρχονται και διαταράζουν τυχαία τη συναρτησιακή σχέση κατακρήμνισης-απορροής. Τυχαία φαινόμενα όπως αλλαγές στην κοίτη του ποταμού, κίνηση φερτών, ανάπτυξη φυτών προκαλούν διάφορες ανακρίβειες και λάθη στην εκτίμηση της παροχής από την καμπύλη. Η τυχειότητα και η αιτιότητα συνυπάρχουν στις υδρολογικές μεταβλητές και διαδικασίες.

Ο συνεχώς αυξανόμενος ρυθμός πληθυσμιακής και πολιτιστικής ανάπτυξης της γης, που μεταφράζεται σε αντίστοιχα αυξανόμενο ρυθμό υδατικών αναγκών, σε συνδυασμό με τη μικρή αναλογία διαθέσιμου στον άνθρωπο νερού του υδρολογικού κύκλου, δίνουν μια εικόνα του υδατικού προβλήματος.

Για την επίλυση του προβλήματος των υδατικών αναγκών, κατασκευάζονται υδρολογικά έργα που είτε συλλέγουν το νερό, είτε ρυθμίζουν κατάλληλα τη χρονική και χωρική του διαίτα και την ποιότητα του, είτε προστατεύουν από τις καταστροφικές τους συνέπειες. Στον σχεδιασμό του έργου η πιο σημαντική πληροφορία είναι η τυχειότητα της διαδικασίας της επιφανειακής απορροής

Τα τελευταία χρόνια το κλίμα αλλάζει, είτε φυσικά είτε λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας που οφείλεται στις ανεξέλεγκτες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Συνέπεια αυτών είναι η αύξηση των ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως πλημμύρες και ακραίες θερμοκρασίες. Σε περιοχές με ξηρό κλίμα, όπως το Μεσογειακό κλίμα που χαρακτηρίζεται από ήπιους χειμώνες και ξηρά καλοκαίρια, σε συνδυασμό με την έλλειψη διαχείρισης των δασών, οδηγούν στην αύξηση του κινδύνου πυρκαγιών.

Όπως είναι αναμενόμενο, μεγάλη σημασία έχει και η επίδραση των δασικών πυρκαγιών στον υδρολογικό κύκλο του νερού. Η επίδραση αυτή, ξεκινάει όταν καταστραφεί η βλάστηση της εκάστοτε λεκάνης απορροής. Μετά την πυρκαγιά, το έδαφος παρουσιάζει μειωμένη διήθηση και κατά συνέπεια αυξάνεται η επιφανειακή απορροή. Αρχικά, λόγω αποδόμησης του εδάφους, η οποία συνεπάγεται αύξηση της πυκνότητας του και μείωση του πορώδους, μειώνεται σημαντικά η διήθηση. Επιπλέον, η πρόσκρουση

των σταγόνων της βροχής στο γυμνό από βλάστηση έδαφος μετά την πυρκαγιάς οδηγεί στην συμπύκνωση και στην μείωση του πορώδους και της διηθητικής ικανότητας. Τέλος, η στάχτη και ο ξυλάνθρακας που μένουν στην επιφάνεια ως κατάλοιπα της πυρκαγιάς φράζουν τους πόρους, εμποδίζοντας εκ νέου την διαφυγή του νερού προς το υπέδαφος (DeBano et al. 1998).

Πέρα από το πρόβλημα της διήθησης, παρουσιάζονται συνέπειες και από την καταστροφή της βλάστησης όπως είναι η αύξηση της επιφανειακής απορροής λόγω της μείωσης της παρεμπόδισης του νερού από τα φυλλώματα των φυτών. Ακόμη, η μείωση της εξατμισοδιαπνοής από τα φυτά οδηγεί στην αύξηση των απωλειών του νερού (Parathanasiou et al. 2015).

Σημαντική αλλά φανερά μικρότερη επιρροή στον υδρολογικό κύκλο έχει και η υλοτομία. Αυτή, δεν επηρεάζει την σύσταση του εδάφους αλλά με την μείωση της βλάστησης, μειώνεται και η παρεμπόδιση των κατακρημνισμάτων που φτάνουν στο έδαφος, αλλά και εννοείται στην μείωση της εξατμισοδιαπνοής (Γκόφας 2001).

Όλοι οι ανωτέρω κίνδυνοι ως προς την ρύπανση του περιβάλλοντος και των υδατικών πόρων, αλλά και η ανησυχία για την αύξηση των πλημμυρικών φαινομένων έχουν οδηγήσει την Ευρωπαϊκή Ένωση και τα θεσμικά όργανα στην λήψη μέτρων που αφορούν την προστασία τους. Μερικά από τα μέτρα αυτά παρουσιάζονται στις ακόλουθες οδηγίες:

Οδηγία 2000/60/ΕΚ 'Οδηγία πλαίσιο για τα νερά – Θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων':

Η οδηγία 2000/60/ΕΚ συνδυάζει ποιοτικούς, οικολογικούς και ποσοτικούς στόχους για την προστασία υδάτινων οικοσυστημάτων και την καλή κατάσταση των υδατικών πόρων. Ως κεντρική ιδέα είναι η ολοκληρωμένη διαχείριση των λεκανών απορροής των ποταμών. Η οδηγία προωθεί την αειφόρο και ολοκληρωμένη διαχείριση των λεκανών απορροής καθώς και προσεγγίζει την αντιμετώπιση των κινδύνων από τις πλημμύρες και την ξηρασία, συχνά φαινόμενα δηλαδή που αντιμετωπίζει τα τελευταία χρόνια ο πλανήτης λόγω της κλιματικής αλλαγής.

Οδηγία 2007/60/ΕΚ ‘Οδηγία για την αξιολόγηση και την διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας’:

Ο βασικός στόχος της οδηγίας 2007/60/ΕΚ είναι να βοηθήσει τα κράτη μέλη στον περιορισμό και την αντιμετώπιση των πλημμυρών. Με την οδηγία δημιουργείται Ευρωπαϊκό πλαίσιο για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, με στόχο την δημιουργία ενός μακροπρόθεσμου σχεδίου αντιμετώπισης των κινδύνων πλημμύρας.

1.1.1 Το μοντέλο SWAT

Το μοντέλο SWAT (Soil and Water Assessment Tool) είναι ένα ημερήσιο υδρολογικό ομοίωμα λεκάνης απορροής το οποίο λειτουργεί σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS). Είναι ένα προσδιοριστικό, κατανεμημένο υδρολογικό μοντέλο συνεχούς χρόνου και αναπτύχθηκε για την Υπηρεσία Αγροτικών Ερευνών της USDA (Arnold et al. 1998) με σκοπό την εκτίμηση την μακροχρόνια επιρροή των ανθρώπινων και φυσικών δραστηριοτήτων εντός της λεκάνης σε διάφορες παραμέτρους ενδιαφέροντος (Gassman et al., 2007). Πρόκειται για ένα ελεύθερο λογισμικό και λειτουργεί σε περιβάλλον Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS). Στόχος του μοντέλου είναι να προσομοιώνει μία σειρά από φυσικές και χημικές διεργασίες και να προβλέψει/υπολογίσει την επίδραση των αλλαγών χρήσεων γης στην απορροή, τις αποδόσεις του νερού, την παραγωγή και μεταφορά ιζημάτων (Neitsch S. I. et al., 2011) και τέλος την μόλυνση των υδάτινων σωμάτων από την χρήση φυτοφαρμάκων και την διάθεση αποβλήτων σε αυτά.

Για την επίτευξη των παραπάνω απαιτεί συγκεκριμένες πληροφορίες οι οποίες χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, στα μετεωρολογικά δεδομένα - τα οποία είναι δεδομένα θερμοκρασίας, χρονοσειρές βροχόπτωσης, ταχύτητα ανέμου, σχετική υγρασία και διάρκεια ηλιοφάνειας - και στα χαρτογραφικά δεδομένα - τα οποία αναφέρονται στις χρήσεις γης, στα δεδομένα εδάφους (π.χ. ιδιότητες εδάφους, τύπους εδαφών κλπ.) καθώς και στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM).

Από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του μοντέλου είναι η δυνατότητα υποδιαίρεσης της λεκάνης απορροής σε μικρότερες υδρολογικές οντότητες που έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά χρήσεων γης και τύπου εδάφους και

ονομάζονται Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης (MYA), (Hydrologic Response Unit – HRU). Κάθε HRU αντιμετωπίζεται ξεχωριστά από το μοντέλο και όλες μαζί συνθέτουν το τελικό αποτέλεσμα. Με τον διαχωρισμό επιτυγχάνεται αύξηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων της πρόβλεψης της λεκάνης (Καλογερόπουλος Κ., 2011). Η δυνατότητα αυτή, είναι ενδεικτική της βαρύτητας που απέδωσαν οι κατασκευαστές του μοντέλου Swat στην επίδραση της χρήσης γης και του τύπου εδάφους στον υδρολογικό κύκλο (Μιμίκου 2006).

Το ArcSWAT χρησιμοποιείται ευρέως γιατί παρέχει μία ολοκληρωμένη προσέγγιση ενσωματώνοντας τις δυνατότητες του GIS με την υδρολογική μοντελοποίηση, επιτρέποντας μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση των υδατικών πόρων λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική μεταβλητότητα και τις αλληλεπιδράσεις εντός της λεκάνης απορροής. Ακόμα, το μοντέλο παρέχει πολύτιμες γνώσεις σχετικά με τις επιπτώσεις των πρακτικών διαχείρισης της γης στη διαθεσιμότητα νερού, την απόδοση ιζημάτων και τις ροές θρεπτικών ουσιών. Αυτές οι πληροφορίες βοηθούν στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με τον σχεδιασμό χρήσης γης, τις πρακτικές διατήρησης και τη διαχείριση των υδάτινων πόρων. Μια από τις πιο σημαντικές ιδιότητες που παρέχει το SWAT είναι η δημιουργία διαφορετικών σεναρίων διαχείρισης γης. Αυτό το χαρακτηριστικό διευκολύνει την αξιολόγηση πιθανών στρατηγικών διαχείρισης και την πρόβλεψη των μελλοντικών συνθηκών των υδάτινων πόρων υπό διαφορετικές συνθήκες, όπως σεσάρια κλιματικής αλλαγής ή τροποποιήσεις χρήσης γης.

Το μοντέλο SWAT είναι ευρέως διαδεδομένο και χρησιμοποιείται παγκοσμίως. Οι Anand, J., Gosain, A. K., & Khosa, R. (2018), χρησιμοποίησαν το μοντέλο για να προβλέψουν την αλλαγή που παρουσιάζει το υδατικό ισοζύγιο στην λεκάνη απορροής του ποταμού Ganga στην Ινδία, κάτω από την συνθήκη της αλλαγής χρήσης γης. Οι Bal, M., Dandpat, A. K., & Naik, B. (2021), πραγματοποίησαν υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Budhabalanga στην Ινδία, σε σχέση με την επίδραση της αλλαγής χρήσης γης, με την χρήση του μοντέλου SWAT. Ο Μπαλάσκας Α. (2018), με την

χρήση του μοντέλου SWAT πραγματοποίησε υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Αλιάκμονα κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες κάλυψης γης. Ο Μπατέλης Σ., το 2012, πραγματοποίησε έρευνα για την επίδραση των πυρκαγιών στην περίπτωση του ποταμού Ενιπέα Θεσσαλίας. Ακόμη, ο Τσιχριντζής Α. (2021), με την χρήση του μοντέλου SWAT, πραγματοποίησε προσομοίωση του ποταμού Eel της Καλιφόρνιας, κάτω από συνθήκες αλλαγής χρήσης γης.

1.2 Αντικείμενο της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας ερευνητικής εργασίας είναι η εκτίμηση του υδρολογικού δυναμικού κάτω από την συνθήκη της αλλαγής χρήσεων γης μετά από το καθεστώς πυρκαγιάς, με την χρήση του λογισμικού ArcSWAT. Για την υλοποίηση της διεργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκε το άνω ρου της λεκάνης απορροής του Αλφειού ποταμού, η υπολεκάνη της Καρύταινας. Μετά από ένα συμβάν πυρκαγιάς, οι τύποι χρήσης γης μπορεί να υποστούν σημαντικές μεταβολές. Το SWAT διευκολύνει την ανάλυση των αλλαγών χρήσης γης μετά την πυρκαγιά και των συνεπειών τους στους υδάτινους πόρους. Σημαντικές διακυμάνσεις στην υδρολογία της λεκάνης απορροής παρατηρούνται με βάση του ποσοστού της λεκάνης που 'καίγεται' καθώς και την επιρροή που έχει η καμένη έκταση ως προς την υδρολογία στο σύνολο της λεκάνης απορροής. Γίνεται λοιπόν έρευνα για το πόσο είναι δυνατόν μία έκταση μετά από την συνθήκη πυρκαγιάς να επανέλθει υδρολογικά στην πρότερη κατάσταση.

1.3 Δομή της Εργασίας

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται η εισαγωγή της παρούσας εργασίας. Στα πλαίσια αυτού γίνεται μικρή ανάλυση ως προς τις υδρολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα. Ακόμη, γίνεται μια γενική αναφορά ως προς τις αιτίες που προκαλούν τα πλημμυρικά φαινόμενα, καθώς και τις οδηγίες που τις διέπουν. Στο τέλος του κεφαλαίου διατυπώνεται το αντικείμενο της εργασίας και παρουσιάζεται η διάρθρωση αυτής.

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται τα χαρακτηριστικά του Υδατικού Διαμερίσματος όπου ανήκει η περιοχή μελέτης. περιγράφονται τα γεωγραφικά – γεωλογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής της Καρύταινας καθώς και τα υδρολογικά χαρακτηριστικά αυτής. Ακόμη, γίνεται μια μικρή αναφορά στην βλάστηση που επικρατεί στην περιοχή καθώς και περιγράφεται η σχέση δάσους και υδρολογίας. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού παρουσιάζονται τα γεωχωρικά και υδρομετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της έρευνας.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται περιγραφή του μοντέλου SWAT που είναι και ο βασικός παράγοντας της εργασίας αυτής. Ακόμη, περιγράφονται οι υδρολογικές διεργασίες που χρησιμοποιεί το μοντέλο κατά την προσομοίωση. Επιπλέον αναλύεται εκτενώς η μεθοδολογία της παρούσας έρευνας. Παρουσιάζεται λοιπόν, η δομή του υδρολογικού μοντέλου SWAT και αναλύονται τα στάδια για την δημιουργία του.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται, σχολιάζονται και επεξηγούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά από την ανάλυση. Συγκεκριμένα αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε σεναρίων ξεχωριστά και ύστερα συγκρίνονται μεταξύ τους. Ακόμη, γίνεται εκτενέστερη διερεύνηση των αποτελεσμάτων διασπώντας τα έτη της αποκατάστασης σε δεκαετίες.

Στο Κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει τα κυριότερα συμπεράσματα της έρευνας μετά από συνοπτική επισκόπηση της εργασίας. Στο τέλος του κεφαλαίου διατυπώνονται και μερικές μελλοντικές προτάσεις, όσον αφορά το αντικείμενο της παρούσας έρευνας.

2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

2.1 Γενικά

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ως περιοχή μελέτης ορίσθηκε η λεκάνη απορροής της Καρύταινας η οποία ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα της Δυτικής Πελοποννήσου και συγκεκριμένα στην Λεκάνη Απορροής (ΛΑΠ) του Αλφειού ποταμού. Στην ΛΑΠ Καρύταινας παρατηρούνται έντονες βροχοπτώσεις στα ορεινά, κυρίως, τμήματα της λεκάνης ενώ αντίστοιχα παρουσιάζει πλούσια βλάστηση που διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην υδρολογία της λεκάνης απορροής.

2.1.1 Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Πελοποννήσου

Το Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Πελοποννήσου (ΥΔ01 ή GR01) περιλαμβάνει το δυτικό και νοτιοδυτικό τμήμα της Πελοποννήσου και η συνολική του έκταση είναι 7.235 km². Περιλαμβάνει εξ ολοκλήρου ή εν μέρει οι νομοί Αρκαδίας, Ηλείας, Αχαΐας, Μεσσηνίας και Λακωνίας.

Τα φυσικά-γεωμορφολογικά όρια του διαμερίσματος αυτά είναι προς τα βόρεια οι ορεινοί όγκοι Ερύμανθου και Αροανίων, προς τα ανατολικά τα όρη του Αρτεμισίου, του Μαίναλου και του Ταΰγετου, προς τα νότια ο Μεσσηνιακός Κόλπος και προς τα δυτικά το Ιόνιο Πέλαγος και ο Κυπαρισσιακός Κόλπος. Σύμφωνα με στοιχεία της ΕΛ.ΣΤΑΤ. για το 2001, ο πληθυσμός του Υδατικού διαμερίσματος ανέρχεται στους 331.180 κατοίκους.

Η μέση ετήσια βροχόπτωση του διαμερίσματος εκτιμάται σε 1.100 mm (Σχέδιο διαχείρισης του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Πελοποννήσου (GR01), 2013), με τις υψηλότερες τιμές να παρατηρούνται στις ορεινές περιοχές της Αρκαδίας και του Ταΰγετου και τις χαμηλότερες όπως είναι αναμενόμενο στα παράλια.

Όπως φαίνεται στον πίνακα 2-1, το μήκος της κύριας κοίτης του Αλφειού ποταμού ισούται με 127,03km και η έκταση της λεκάνης απορροής του είναι ίση με 3497,09km². Οι λεκάνες απορροής του Αλφειού ποταμού (GR29) και Πάμισου – Νέδοντος – Νέδα (GR32) συγκροτούν το συγκεκριμένο Υδατικό Διαμέρισμα της Δυτικής Πελοποννήσου (ΥΔ01 ή GR01).

Πίνακας 2-1: Ποτάμια υδατικού διαμερίσματος Δυτικής Πελοποννήσου

| ΟΝΟΜΑ | ΜΗΚΟΣ ΚΥΡΙΑΣ ΚΟΙΤΗΣ (km) | ΕΚΤΑΣΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΟΥ (km²) |
|--------------|---------------------------------|---|
| ΑΛΦΕΙΟΣ Π. | 127.03 | 3497.09 |
| ΛΑΔΩΝΑΣ Π. | 65.78 | 1137.19 |
| ΕΡΥΜΑΝΘΟΣ Π. | 51.85 | 359.48 |

2.1.2 Λεκάνη απορροής του Αλφειού Ποταμού

Στην λεκάνη απορροής του Αλφειού (GR29), ο κύριος ποταμός είναι ο Αλφειός και με κυριότερους παραποτάμους του Λάδωνα και Ερύμανθο.

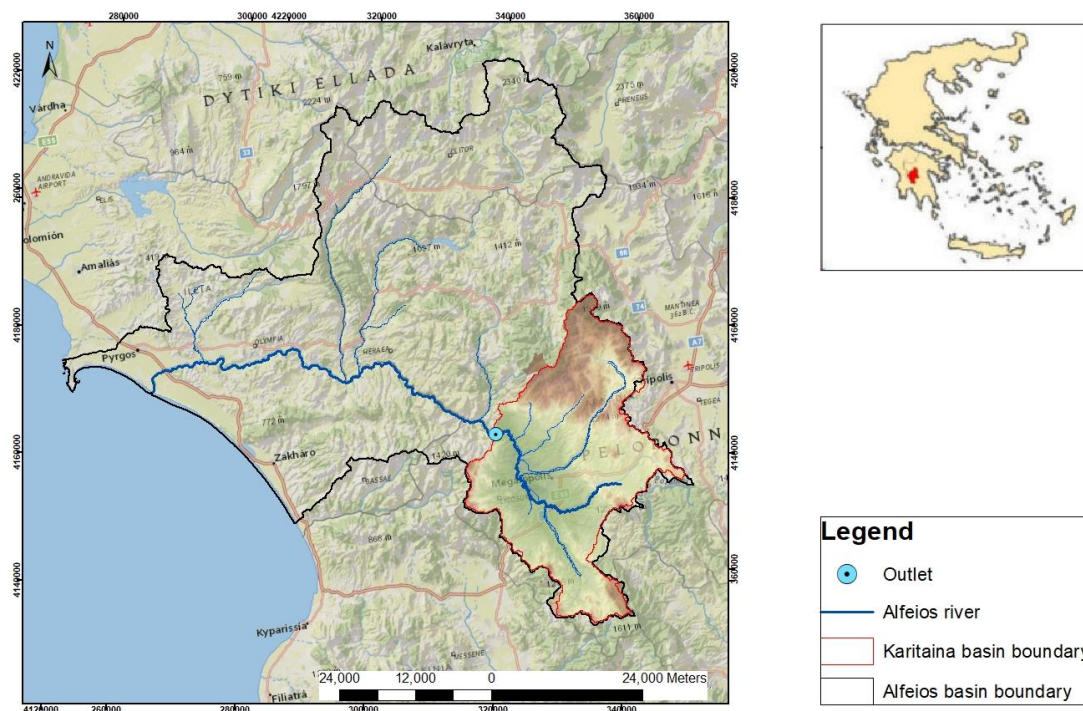
Η Λεκάνη απορροής του Αλφειού ποταμού (GR29) έκτασης 3.810km². Περιλαμβάνει την υδρολογική λεκάνη του Αλφειού ποταμού έκτασης 8.568km² και δύο παράκτιες λεκάνες χωρίς σημαντικούς ποταμούς, τη λεκάνη που βρίσκεται η λιμνοθάλασσα Καϊάφα με έκταση 165,8km² και στην βόρεια πλευρά αυτής η λεκάνη της αποξηραμένης λίμνης Αγουλινίτσας με έκταση 756km².

Η τεχνητή λίμνη του Λάδωνα κωροθετείται εντός του Δήμου Γορτυνίας της Περιφερειακής Ενότητας Αρκαδίας, στα όρια των Δημοτικών Ενοτήτων Τροπαίων, Κοντοβαζαίνης και Κλείτορος. Δημιουργήθηκε το 1955, σε μία χαράδρα στη θέση Πήδημα, με την κατασκευή φράγματος επί του ποταμού Λάδωνα από τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ). Η επιφάνεια της λίμνης είναι περίπου 3km² ενώ η έκταση της λεκάνης απορροής της είναι 766,70km².

2.1.3 Λεκάνη Απορροής Καρύταινας

Η λεκάνη απορροής της Καρύταινας βρίσκεται στην Νότια Ελλάδα και συγκεκριμένα στην κεντρική Πελοπόννησο, στον Νομό Αρκαδίας και

αποτελεί υπολεκάνη του Αλφειού ποταμού, Σχήμα 2-1. Έχει έκταση περίπου 828km², με μέσο υψόμετρο 1067m. Η έξοδος της λεκάνης απορροής έχει οριστεί στην θέση της Καρύταινας και συγκεκριμένα στην Αρχαία γέφυρα της Καρύταινας με συντεταγμένες x: 327410,40 και y: 4149570,66 του συστήματος αναφοράς ΕΓΣΑ '87.



Σχήμα 2-1: Λεκάνη απορροής Καρύταινας

2.2 Γεωλογικά χαρακτηριστικά

Στην λεκάνη απορροής του Αλφειού παρουσιάζονται οι αλπικοί σχηματισμοί των γεωτεκτονικών ζωνών Τρίπολης, Πίνδου και της σειράς Φυλλιτών – Χαλαζιτών στα ορεινά και ανατολικά όσο και από τις σύγχρονες τεταρτογενείς και νεογενείς αποθέσεις που έχουν πληρώσει τα τεκτονικά βυθίσματα στα δυτικά της λεκάνης και στη λεκάνη της Μεγαλόπολης στα ανατολικά.

Συναντώνται εδώ οι παρακάτω σχηματισμοί:

Ζώνη Τρίπολης.

Περιλαμβάνει παχυστρωματώδεις ασβεστολίθους και μικρότερες εμφανίσεις στρωμάτων του φλύσχη και συναντάται στο ανατολικό όριο της

λεκάνης μεταξύ του χωριού Ασέας στο νότο και του ποταμού Λάδωνα και σε μικρότερες εμφανίσεις στο βορειοανατολικό όριο (περιοχή ποταμού Τράγου) και νότια της λεκάνης της Μεγαλόπολης (περιοχή ρέματος Ξερίλα).

Ζώνη Πίνδου.

Συναντάται στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης του ποταμού Αλφειού και στους ορεινούς όγκους και περιλαμβάνει λεπτοπλακώδεις ασβεστολίθους, κερατολίθους και στρώματα του φλύσχη. Παρουσιάζονται τα στρώματα εντόνως πολυπτυχωμένα και διαρρηγμένα.

Σειρά Φυλλιτών – Χαλαζιτών.

Συναντάται στα νοτιοανατολικά όρια της λεκάνης με πολύ μικρή εμφάνιση εντός αυτής και περιλαμβάνει εναλλαγές φυλλιτών – χαλαζιτών με παρεμβολές μαρμάρων.

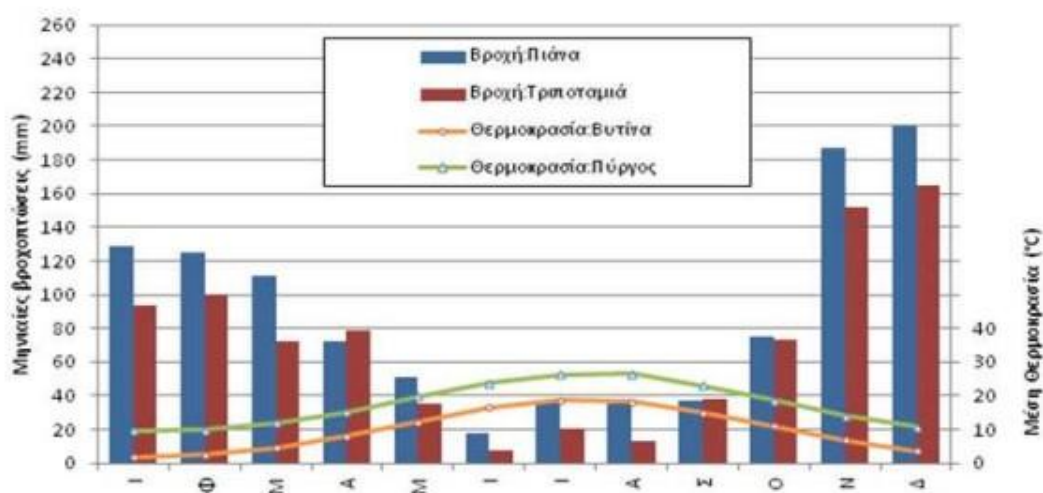
Μεταλλικοί σχηματισμοί του νεογενούς και τεταρτογενούς.

Οι σχηματισμοί αυτοί έχουν πληρώσει τα τεκτονικά βυθίσματα της Δ. Πελοποννήσου και το βύθισμα της Μεγαλόπολης. Αποτελούνται από εναλλαγές αδρομερών υλικών (κροκάλες, κροκαλοπαγή, άμμοι) με πλέον λεπτομερή υλικά (άργιλοι, μάργες, ιλύες).

2.3 Κλιματικά χαρακτηριστικά

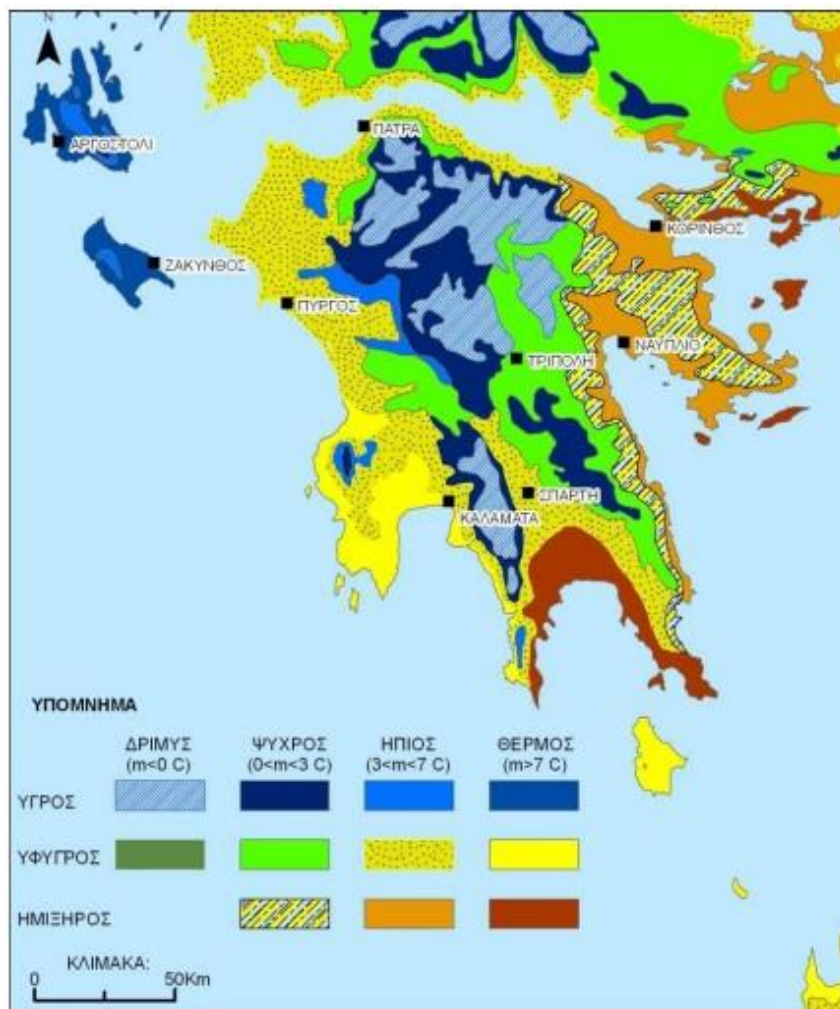
Όπως -σχεδόν- σε όλη την Ελλάδα έτσι και στην Πελοπόννησο το κλίμα είναι Μεσογειακό. Χαρακτηρίζεται δηλαδή από υγρό κλίμα κατά την διάρκεια του χειμώνα και ξηρό κλίμα κατά τους θερινούς μήνες. Το μέσο ετήσιο ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο Υδατικό Διαμέρισμα της Δυτικής Πελοποννήσου, στο οποίο και ανήκει η περιοχή μελέτης της εργασίας, φτάνει στα 900 mm. Ωστόσο, κατά την πάροδο των εποχών παρατηρείται σημαντική αύξηση τους χειμερινούς μήνες (Νοέμβριο – Φεβρουάριο) που μπορεί να υπερβεί και τα 100mm τον μήνα, ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες το ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων μπορεί να μειωθεί και να φτάσει έως και 20-40mm ανά μήνα.

Τα κατακρημνίσματα στην περιοχή της λεκάνης απορροής του Αλφειού ποταμού φτάνουν περίπου 1.058mm το χρόνο. Στις ορεινές περιοχές της Αρκαδίας το ύψος βροχής κυμαίνεται μεταξύ 1.000mm και 1.200mm, ενώ στο κεντρικό τμήμα και στα παράλια φτάνει τα 1.000mm. Τα ανωτέρω μέσα ετήσια κατακρημνίσματα αντιστοιχούν κατά προσέγγιση σε έναν όγκο 8.112hm³ (8.1 δις μ³) νερού ανά έτος. Το περισσότερο ύψος βροχής, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-2, παρουσιάζεται τους μήνες Οκτώβριο έως και Μάρτιο, με πιο υγρό μήνα το Δεκέμβριο και πιο ξηρό τον Ιούνιο.



Σχήμα 2-2: Μέση μηνιαία βροχόπτωση και μέση μηνιαία θερμοκρασία σε σταθμούς της λεκάνης απορροής ποταμού Αλφειού [πηγή: Σχέδιο διαχείρισης του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Πελοποννήσου (GR01), 2013]

Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται ο χάρτης βιοκλιματικών ορόφων όπως έχει διαμορφωθεί στο σχέδιο διαχείρισης η Ειδική Γραμματεία Υδάτων του ΥΠΑΑΤ, μετά από την επεξεργασία μετεωρολογικών δεδομένων για το σύνολο της Πελοποννήσου. Για τον χαρακτηρισμό του κλίματος μιας περιοχής χρησιμοποιούνται οι παράγοντες θερμοκρασία και βροχόπτωση.

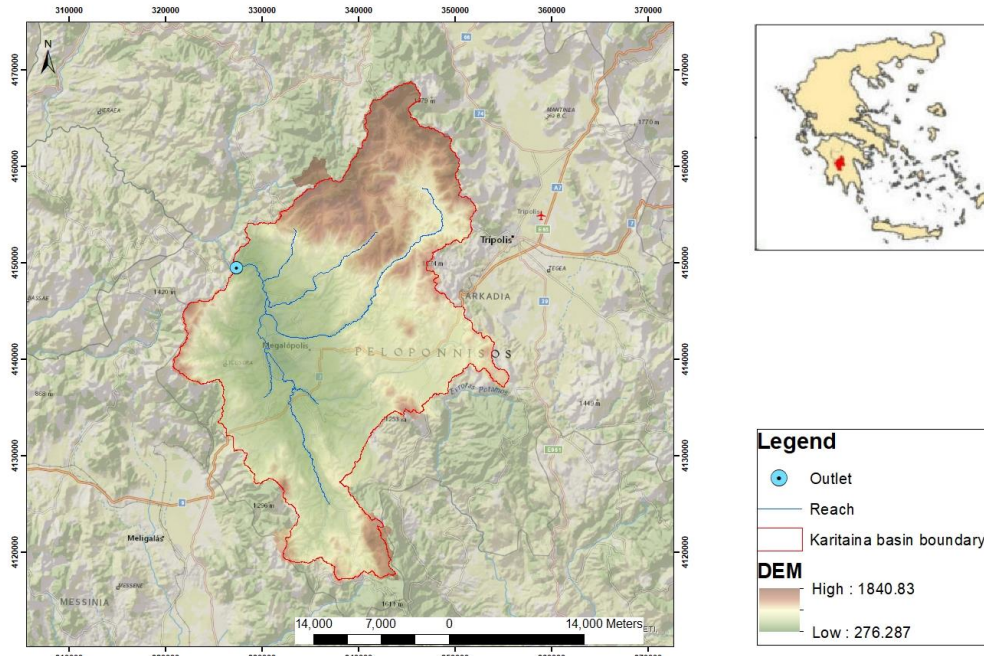


Σχήμα 2-3: Χάρτης βιοκλιματικών ορόφων για την περιοχή της Πελοποννήσου [πηγή: Σχέδιο διαχείρισης του Υδατικού Διαμερισματος Δυτικής Πελοποννήσου (GR01), 2013

2.4 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά Καρύταινας

Η λεκάνη απορροής της Καρύταινας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-4, περικλείεται από το Όρος Μαίναλο, τον Πάρνωνα καθώς και το Αρκαδικό τμήμα του Ταυγέτου. Καταλαμβάνει έκταση περίπου 828km² και έχει μέσο υψόμετρο 1067m. Κύριος ποταμός που διασχίζει όλη την λεκάνη απορροής είναι το τμήμα του Αλφειού ποταμού. Οι πηγές του, βρίσκονται εντός της λεκάνης απορροής της Καρύταινας στο οροπέδιο της Τρίπολης, στις απολήξεις του Πάρνωνα και στις πλαγιές του Βόρειου Ταυγέτου, στην περιοχή του Ασεατικού πεδίου σε υψόμετρο 700-800m. Σημαντικό ρόλο

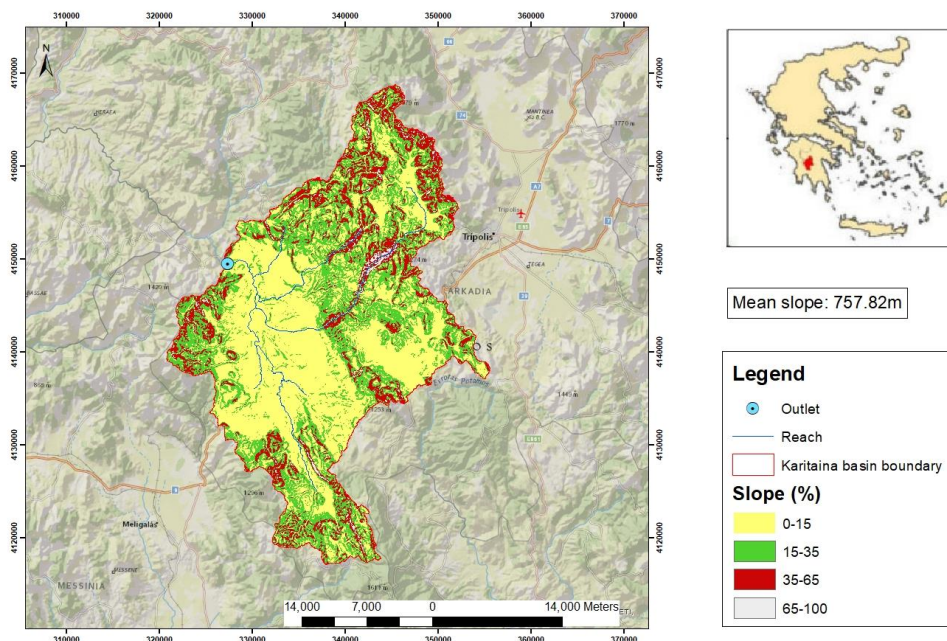
στην υδρολογία της λεκάνης διαδραματίζονται και άλλοι ποταμοί όπως ο Ελισσώνας και ο Λούσιος ποταμός, οι οποίοι συμβάλουν και αυτοί στο υδατικό ισοζύγιο του Αλφειού ποταμού.



Σχήμα 2-4: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους Καρύταινας (DEM)

Κλίσεις

Με την χρήση του ArcGIS, εισάγοντας ως δεδομένο το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, δημιουργήθηκε ο χάρτης των κλίσεων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-5. Η μέση κλίση του συνόλου της λεκάνης απορροής ισούται με 757,82m. Οι κλίσεις της λεκάνης απορροής χωρίστηκαν σε 4 κλάσεις. Ο διαχωρισμός αυτός έγινε έπειτα από την ομαδοποίηση των κλίσεων ώστε να γίνει καλύτερη αποτύπωση του ανάγλυφου της λεκάνης απορροής.



Σχήμα 2-5: Χάρτης Κλίσεων

2.5 Χλωρίδα

2.5.1 Ζώνη βλάστησης Καρύταινα

Σύμφωνα με τους Ντάφη 1973 και Αθανασιάδη 1986, στην λεκάνη απορροής της Καρύταινας εμφανίζονται δύο ζώνες βλάστησης, *Quercetalia rubescentis* (Παραμεσογειακή βλάστηση) η οποία είναι στο μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης απορροής και εμφανίζεται στη λοφώδη-υποορεινή περιοχή, την οποία συνθέτουν θερμόφιλα φυλλοβόλα είδη και η Ζώνη *Fagetalia* (Οξιάς-ελάτης και ορεινών παραμεσόγειων κωνοφόρων), που βρίσκεται στα ορεινά της λεκάνης απορροής πάνω από την πρώτη ζώνη, η οποία εκτείνεται στις ορεινές και υπαλπικές περιοχές της χώρας. Τα κυριότερα είδη που συναντώνται στην λεκάνη απορροής της Καρύταινας και συγκεκριμένα στην Παραμεσογειακή ζώνη βλάστησης είναι η Πλατύφυλλη βελανιδιά (*Quercus frainetto*), Χνοώδης βελανιδιά (*Quercus pubescens*), ενώ συχνά εμφανίζονται τα είδη Πουρνάρι (*Quercus coccifera*) κ.α.. Τα είδη αυτά συντάσσουν πυκνά δάση αείφυλλων

πλατύφυλλων με συντελεστή *manning* να είναι ίσο με 0,05. Στην ζώνη αυτή παρατηρούνται καλλιέργειες.



Εικόνα 2-1: Τυπική μορφή δάσους Παραμεσογειακή ζώνη βλάστησης
Στην ζώνη Οξιός-ελάτης και ορεινών παραμεσόγειων κωνοφόρων, εμφανίζονται κυρίως τα είδη της Κεφαλληνιακής Ελάτης (*Abies cephalonica*), της Υβριδογενής Ελάτη (*Abies borissi-regis*) και η Μαύρη Πεύκη (*Pinus nigra*). Στην ζώνη αυτή επικρατούν τα δάση ορομεσογειακών κωνοφόρων με συντελεστή *manning* ίσο με 0,1.



Εικόνα 2-2: Τυπική μορφή δάσους ζώνης βλάστησης Οξιός-Ελάτης

2.5.2 Υδατικό δυναμικό δένδρων

Το υδατικό δυναμικό εκφράζει το δυναμικό του νερού σε μια δεδομένη κατάσταση σε σχέση με το καθαρό ελεύθερο νερό ως κανονική ατμοσφαιρική πίεση, το οποίο έχει τη μέγιστη τιμή και είναι 0 MPa.

Το υδατικό δυναμικό καθορίζεται από την πίεση που ασκείται σε αυτό (εκτός της ατμοσφαιρικής), την παρουσία διαλυμένου σώματος, την ύπαρξη μεγάλων μορίων στο υδατικό σύστημα και την επίδραση της βαρύτητας. Η εξίσωση που το περιγράφει είναι η παρακάτω:

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_s + \Psi_m + \Psi_g$$

Όπου σύμφωνα με τους Warning & Running το 1998, το υδατικό δυναμικό μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις (4) συνιστώσες:

Δυναμικό της πίεσης (Ψ_p)

Αντιπροσωπεύει τη διαφορά της υδροστατικής πίεσης από το ένα κύτταρο στο άλλο. Μπορεί να πάρει είτε θετικές τιμές (κύτταρα σε σπαργή), είτε αρνητικές τιμές (έντονη διαπνοή αγγείων).

Οσμωτικό δυναμικό (Ψ_s)

Αντιπροσωπεύει την ύπαρξη διαλυμένων σακχάρων και αλάτων. Παίρνει μόνο αρνητικές τιμές.

Δυναμικό στρώματος (Ψ_m)

Αντιπροσωπεύει τις μικρές αρνητικές δυνάμεις στην επιφάνεια των υδρόφιλων στερεών, όπως είναι τα κυτταρικά τοιχώματα που συγκρατούν μόρια νερού, με αποτέλεσμα να δημιουργείται αρνητικό δυναμικό και να επηρεάζει το δυναμικό του εδάφους.

Δυναμικό οφειλόμενο στην βαρύτητα (Ψ_g)

Αντιπροσωπεύει το δυναμικό το οποίο αυξάνεται με το υπέργειο ύψος του φυτού από το έδαφος στα 0,01 MPa m⁻¹. (Ραδόγλου & Κορακλάκη 2012)

2.5.3 Το νερό στο δασικό οικοσύστημα

Στα δάση η κύρια πηγή νερού είναι τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Το νερό εισέρχεται στο φυσικό χερσαίο οικοσύστημα, με το μεγαλύτερο μέρος του να απορρέει (επιφανειακά ή υπόγεια) ή εξατμίζεται και ξαναγυρνάει στην ατμόσφαιρα μέσω της διεργασίας της εξατμισοδιαπνοής. Ανάλογα το είδος της βλάστησης, δάσος πλατύφυλλων ή δάσος

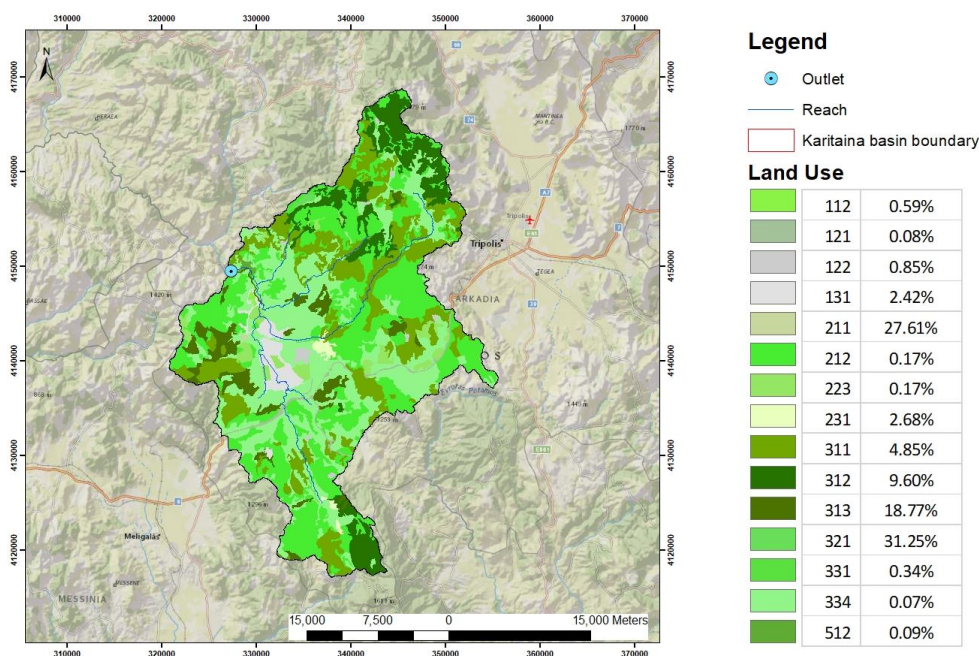
κωνοφόρων, εξαρτάται και το ποσοστό της βροχής που θα καταλήξει στο έδαφος. Το μικροκλίμα του δάσους ευνοεί στον σχηματισμό ομίχλης και με την πρόσκρουση των σταγόνων της ομίχλης στην κόμη των δένδρων επιτυγχάνεται η υγροποίηση της και κατά συνέπεια η πτώση τους στο έδαφος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ομιχλοβροχή (Loewe 1960, Kerfoot 1968). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε παράκτιες δασικές εκτάσεις καθώς και σε ορεινές με μεγάλο υψόμετρο. Η ομιχλοβροχή πολλές φορές μεταβάλλει αρκετά τις παραμέτρους του υδρολογικού ισοζυγίου μια λεκάνης απορροής και συμβάλλει στην αύξηση των υδατικών πόρων των περιοχών που δημιουργείται (Ingraham & Matthews 1968, Price 1992).

Στην Ελλάδα έρευνες έχουν δείξει ότι σε συστάδα Ελάτης στον Άγιο Νικόλαο Ευρυτανίας, που έχει παρατηρηθεί ομιχλοβροχή, το ετήσιο ύψος της είναι ίσο με 13,8% της συνολικής βροχής (Μπαλούτσος κ.ά. 2005). Το δάσος πέραν της χρησιμοποίησης του νερού για τις διεργασίες των δασικών ειδών αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην διαχείριση του νερού ως προς την απορροή και τα πλημμυρικά φαινόμενα κατάντη. Ακόμη, αυξάνει τα αποθέματα των υπόγειων νερών και βελτιώνει την ποιότητα του νερού. Τα δάση παρουσιάζουν σταθερά υδρολογικό δυναμικό η οποία όμως με κάποια ακραία μεταβολή όπως μια δασική πυρκαγιά μπορεί να προκαλέσει μεγάλη αύξηση στην απορροή και στην διάβρωση, όμως μειώνονται με το πέρασμα του χρόνου καθώς το οικοσύστημα αποκαθίσταται (Molchanov 1973, Pobedinsky 1979, Rakhmanov 1981, Lebedev 1982).

Το φύλλωμα των δένδρων μπορεί να συγκρατήσει μόνο μικρές ποσότητες βροχής ((FAO 1962, Duwig 1994, Biron 1994), όμως επηρεάζει την ταχύτητα πρόσπτωσης της βροχής στο έδαφος και κατά συνέπεια καθυστερεί την έναρξη της απορροής και την παρατείνει στον χρόνο (Meunier et al. 1995). Το νερό που θα καταλήξει να απορρέει επιφανειακά καθορίζεται από την διηθητικότητα του εδάφους. Ο Grèsillon το 1994, διαπίστωσε ότι σε περιοχές όπου υπάρχει βλάστηση, ακόμη και σε συνθήκη ισχυρής βροχής παρατηρείται ότι υπάρχει αυξημένη διηθητικότητα σε σχέση με περιοχές όπου απομακρύνθηκε η βλάστηση

και το ριζικό σύστημα. Σημαντικό ρόλο στην διηθητικότητα παίζει το βάθος και ο τύπος εδαφών. Στην διαμόρφωση της πλημμύρας επηρεάζει και η εδαφική υγρασία. Υπάρχει λοιπόν, πιθανότητα σε ένα κορεσμένο έδαφος μια μικρή σε όγκο βροχή να προκαλέσει επιφανειακή απορροή ίση με το ύψος βροχής ενώ σε μια ξηρή περίοδο με έντονη βροχή να μην παρατηρηθεί επιφανειακή απορροή. Η απορροή κατά συνέπεια εξαρτάται από περισσότερους παράγοντες πέραν της βροχόπτωσης. (Μπουρλέτσικας & Προύτσος, 2012)

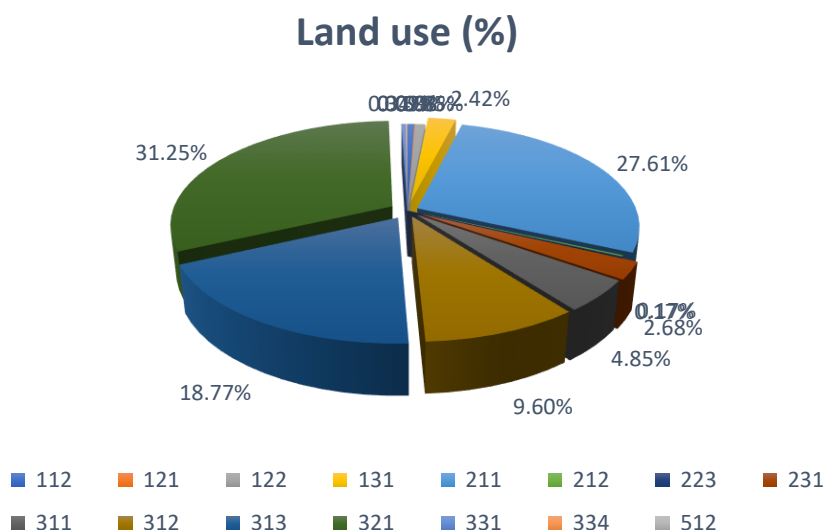
2.6 Χρήσεις Γης



Σχήμα 2-6: Χάρτης χρήσεων γης και ποσοστά φυτοκάλυψης κάθε τύπου βλάστησης

Σύμφωνα με το σχήμα 2-6 και 2-7 παρατηρείται, ότι λόγω της ύπαρξης πεδιάδας καθώς και χαμηλών λόφων, το μεγαλύτερο ποσοστό κάλυψης παρατηρείται στους φυσικούς βοσκοτόπους σε ποσοστό 31,25%, δηλαδή αραιή βλάστηση που κυρίως επικρατεί θαμνώδης βλάστηση. Ακόμη, στην περιοχή λόγω των ευνοϊκών συνθηκών που επικρατούν, υπάρχουν και αρκετές καλλιέργειες κυρίως σιταριού, κριθαριού και διαφόρων

δημητριακών που ευδοκιμούν στην περιοχή. Μεγάλο ποσοστό συναντάται και στα μικτά δάση, όπως είναι αναμενόμενο λόγω της ζώνης βλάστησης που επικρατεί στην περιοχή όπως προαναφέρθηκε.



Σχήμα 2-7: Ποσοστό κάλυψης τύπων χρήσεων γης στην λεκάνη απορροής της Καρύταινας

2.7 Δεδομένα

2.7.1 Γεωχωρικά Δεδομένα

Τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν για την ανάλυση και δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας ορισμένες από τις παραπάνω εφαρμογές σε περιβάλλον GIS παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM):** Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Digital Elevation Model – DEM) πάρθηκε από το Copernicus σε αρχείο raster. Το DEM αντιπροσωπεύει την πρώτη επιφάνεια όπως αποτυπώνεται από τους δορυφόρους. Το EU-DEM προσφέρει υψομετρικά δεδομένα πανευρωπαϊκά με ανάλυση $\approx 25m$ και βασίζεται κατά κύριο λόγο σε δεδομένα από τις αποστολές SRTM και ASTER GDEM.
- **Χρήσεις γης – Land Use:** Για τα στοιχεία των χρήσεων γης χρησιμοποιήθηκε το υπόβαθρο CORINE LAND COVER (Coordination Information on the Environment). Το Corine είναι

ένα πρόγραμμα που αφορά την χαρτογράφηση της εδαφικής κάλυψης των Ευρωπαϊκών χωρών με στόχο την συλλογή και τον συντονισμό των χρήσεων γης. Τα αρχεία είναι δωρεάν και τα διανυσματικά δεδομένα είναι σε μορφή 'shapefile'. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση του 2018. Η κλίμακα του Corine είναι 1:100.000. Το Corine κατατάσσει την εδαφική κάλυψη της Ευρώπης σε 44 υποκατηγορίες.

- ο **Δεδομένα εδάφους – Soil Data:** Τα εδαφολογικά δεδομένα ελήφθησαν από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Γεωργίας και Τροφίμων (Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO) για όλο τον κόσμο. Ο εδαφολογικός χάρτης περιέχει πληροφορίες που αφορούν το έδαφος και το υπέδαφος, τα οποία και επηρεάζουν σημαντικά τις συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου. Σε συνδυασμό με την μορφολογία του εδάφους και τις χρήσεις γης είναι τα στοιχεία που επηρεάζουν την απόκριση μιας λεκάνης.

2.7.2 Δεδομένα Βροχόπτωσης

Λόγω της έλλειψης δεδομένων ιστορικών χρονοσειρών στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής της Καρύταινας, τα μετεωρολογικά δεδομένα πάρθηκαν από την επίσημη ιστοσελίδα του μοντέλου ArcSWAT (βλέπε: <https://swat.tamu.edu/data/>) (Ghimire U. et all 2022, Huffman G. J. et all 2015, CPC). Πιο συγκεκριμένα, πάρθηκαν από την υπηρεσία World Weather for Water Data Service (W3S). Είναι μια πλατφόρμα που παρέχει μετεωρολογικά δεδομένα (βροχόπτωσης, μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία) σε προκαθορισμένη μορφή, συμβατή με το μοντέλο SWAT, για οποιαδήποτε λεκάνη απορροής σε όλο τον χρόνο. Τα δεδομένα έχουν ημερήσιο βήμα.

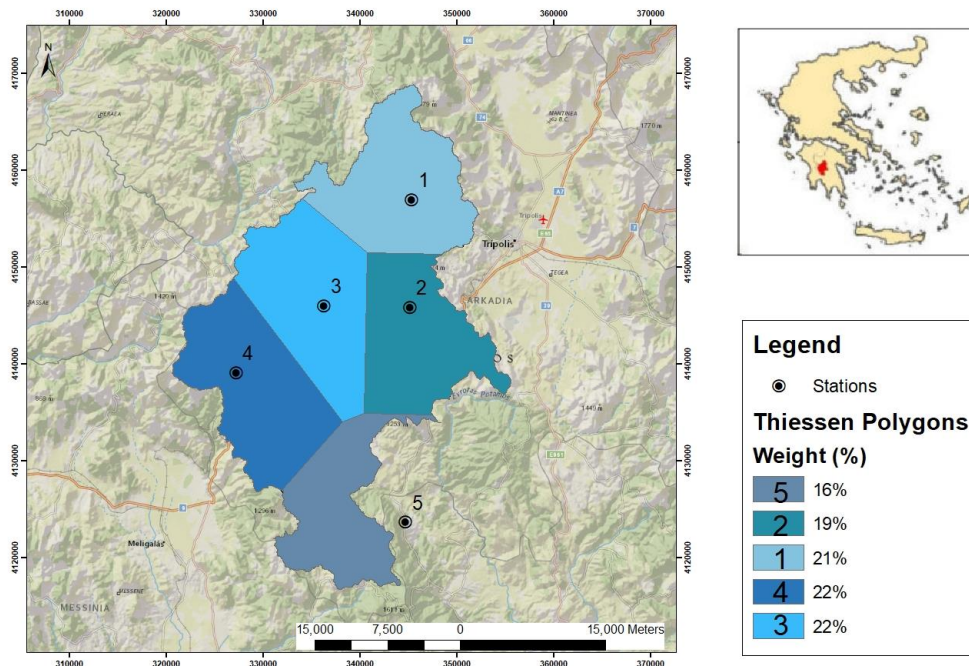
Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται για τα έτη 2001 μέχρι και το τέλος του 2014. Η επιλογή αυτή έγινε με βάση τον αριθμό των ελλείψεων δεδομένων αλλά και την μέγιστη διαθέσιμη περίοδο επικαλυπτόμενης χρονοσειράς.

Για την περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αξιοποιήθηκαν πέντε (5) σταθμοί οι οποίοι φαίνονται στον πίνακα 2-2.

Πίνακας 2-2: Δορυφορικά σημεία βροχομετρικών δεδομένων

| STATION | X | Y |
|----------------|-----------|------------|
| 1 | 345264.82 | 4157039.67 |
| 2 | 345058.46 | 4145944.01 |
| 3 | 336212.37 | 4146113.04 |
| 4 | 327136.72 | 4139195.65 |
| 5 | 344647.15 | 4123753.19 |

Στην συνέχεια, με την βοήθεια των πολυγώνων Thiessen έγινε έλεγχος με σκοπό να εντοπισθεί ποιοι σταθμοί έχουν την μεγαλύτερη επιρροή στην λεκάνη απορροής της Καρύταινας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2-8, οι σταθμοί τρία (3) και τέσσερα (4) είναι αυτοί που επηρεάζουν περισσότερο την υδρολογία της προαναφερθείσας περιοχής.



Σχήμα 2-8: Βροχομετρικά σημεία & Πολύγωνα Thiessen

2.7.3 Δεδομένα παροχών

Για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές των ημερήσιων παροχών στην Καρύταινα, τα οποία πάρθηκαν από την ΔΕΗ. Η παροχή (Q) στην έξοδο της λεκάνης απορροής της Καρύταινας υπολογίστηκε με βάση σταθμιομετρικών δεδομένων (H) μέσω της

καμπύλης στάθμης-παροχής. Η μαθηματική περιγραφή της καμπύλης της παροχής είναι (Bournas 2021):

$$Q = 7,798 \times H^{1,906}$$

Τα δεδομένα αφορούν την περίοδο από το υδρολογικό έτος 1961-1962 έως το υδρολογικό έτος 2015-2016.

3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Γενική επισκόπηση

Στο παρών κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά όλες οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα υποθετικά σενάρια που δημιουργήθηκαν για την παρούσα έρευνα καθώς και οι αλλαγές που έγιναν για να πραγματοποιηθούν τα σενάρια αυτά.

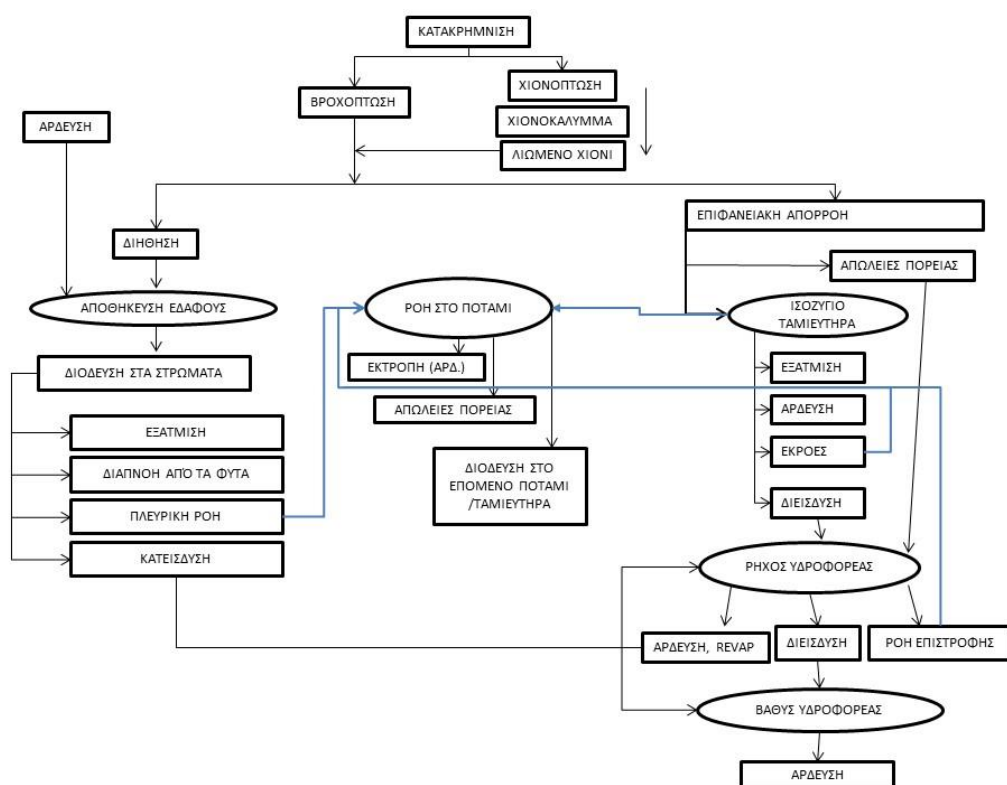
3.2 Το Υδρολογικό Μοντέλο SWAT

3.2.1 Υδρολογικός κύκλος κατά το μοντέλο SWAT

Όπως αναφέρθηκε, το μοντέλο SWAT είναι ένα ολοκληρωμένο σύγχρονο υδρολογικό μοντέλο, το οποίο για κάθε προσομοίωση εκτελεί διάφορες φυσικές διεργασίες. Στο σχήμα 3-1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του μοντέλου. Το SWAT αναπαριστά τον κύκλο του νερού με ένα δικό του τρόπο που θεωρεί και υπολογίζει. Στο σχήμα φαίνεται πως τα κατακρημνίσματα (βροχή, χιόνι) τροφοδοτούν με νερό την επιφανειακή απορροή, μέσω της οποίας τροφοδοτούν και τα υδατορεύματα με νερό, αλλά και την διήθηση που με την βοήθεια της άρδευσης συμβάλλουν στην αποθήκευση και στην διόδευση του νερού στα διάφορα στρώματα του εδάφους.

Η διαδικασία προσομοίωσης του φυσικού συστήματος από το μοντέλο SWAT ορίζεται παρακάτω. Η κατακρήμνιση διαχωρίζεται σε βροχή και χιόνι ανάλογα με την επικρατούσα θερμοκρασία. Το ύψος χιονοστρώματος υπολογίζεται σε ημερήσια βάση και ο ρυθμός λιώσιματος του χιονιού ακολουθεί τις θερμοκρασιακές μεταβολές. Το διαθέσιμο νερό, είτε διηθείται στο έδαφος, όπου διοδεύεται στις διαφορετικές στρώσεις, είτε απορρέει επιφανειακά. Το εδαφικό νερό προσλαμβάνεται από την βλάστηση και διαπνέεται, εξατμίζεται απ' ευθείας στην ατμόσφαιρα, κατεισδύει στον υδροφόρα ή και επιστρέφει στην επιφάνεια μέσω της

υποερμικής ροής. Ένα μέρος του υπόγειου νερού θεωρείται ότι φτάνει στα βαθύτερα στρώματα και χάνεται από το σύστημα. Το επιφανειακό νερό κινούμενο στο ποτάμι συναντά πιθανούς ταμιευτήρες και λίμνες, όπου η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου διέπει την αποθήκευση και την απελευθέρωση νερού στο εκάστοτε χρονικό βήμα. Το αθροιστικό νερό που παραμένει στο ποτάμι διοδεύεται μέχρι τον επόμενο ταμιευτήρα ή λίμνη ή μέχρι την έξοδο της λεκάνης. Τέλος, το ομοίωμα επιτρέπει την αφαίρεση νερού από κάθε σημείο του συστήματος (υδατόρεμα, ταμιευτήρας, λίμνη, υπόγειος υδροφόρος) για ανθρωπογενείς χρήσεις (Μιμίκου 2006).



Σχήμα 3-1: Διάγραμμα Ροής μοντέλου SWAT

Το SWAT ενσωματώνει διάφορους βασικούς υδρολογικούς τύπους για την προσομοίωση και την αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών εντός της λεκάνης απορροής:

Μοντελοποίηση βροχοπτώσεων-απορροών

Το SWAT χρησιμοποιεί δεδομένα βροχοπτώσεως για να εκτιμήσει την απορροή που δημιουργείται από μια λεκάνη απορροής. Λαμβάνει υπόψη παράγοντες όπως η κάλυψη γης, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και οι

ρυθμοί διείσδυσης για να προσομοιώσει τη μετατροπή της βροχόπτωσης σε απορροή.

Εξατμισοδιαπνοή

Το μοντέλο εκτιμά την απώλεια νερού μέσω της εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους και της διαπνοής από τα φυτά. Λαμβάνει υπόψη τα κλιματικά δεδομένα, την κάλυψη γης και τις παραμέτρους βλάστησης για τον υπολογισμό των ρυθμών εξατμισοδιαπνοής εντός της λεκάνης απορροής.

Διήθηση και κίνηση του νερού στο έδαφος

Το SWAT αντιπροσωπεύει τη διείσδυση νερού στο έδαφος και την επακόλουθη μετακίνησή του μέσα από διαφορετικά στρώματα εδάφους. Λαμβάνει υπόψη τις ιδιότητες του εδάφους όπως η ικανότητα διήθησης, η υδραυλική αγωγιμότητα και η ικανότητα συγκράτησης νερού για την προσομοίωση της κίνησης του νερού εντός της λεκάνης απορροής.

Επιφανειακή απορροή

Το μοντέλο προσομοιώνει τη χερσαία ροή του νερού στην επιφάνεια του εδάφους, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η κλίση, η κάλυψη του εδάφους και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Η επιφανειακή απορροή είναι ένα βασικό συστατικό για την εκτίμηση της διαθεσιμότητας νερού και της πιθανής διάβρωσης.

Ροή υπόγειων υδάτων

Το SWAT ενσωματώνει την ροή των υπόγειων υδάτων για την εκτίμηση της κίνησης του νερού μέσω του υπεδάφους. Λαμβάνει υπόψη παράγοντες όπως οι ιδιότητες του υδροφόρου ορίζοντα, οι ρυθμοί επαναφόρτισης και η δυναμική του υδροφόρου ορίζοντα για την προσομοίωση της ροής των υπόγειων υδάτων και της αλληλεπίδρασής τους με τα επιφανειακά ύδατα.

Μεταφορά ιζημάτων και θρεπτικών ουσιών

Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις διαδικασίες μεταφοράς ιζημάτων, συμπεριλαμβανομένης της διάβρωσης, της εναπόθεσης και της απόδοσης ιζήματος. Επιπλέον, προσομοιώνει τη μετακίνηση θρεπτικών ουσιών, όπως το άζωτο και ο φώσφορος, εντός της λεκάνης απορροής, γεγονός που βοηθά στην εκτίμηση των επιπτώσεων στην ποιότητα του νερού.

Ο υδρολογικός κύκλος όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-2, προσομοιώνεται από το SWAT βασιζόμενος στο ισοζύγιο νερού εξίσωση:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

όπου:

SW_t: η τελική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό (mm)

SW₀: η αρχική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό (mm)

t: ο χρόνος σε ημέρες (days)

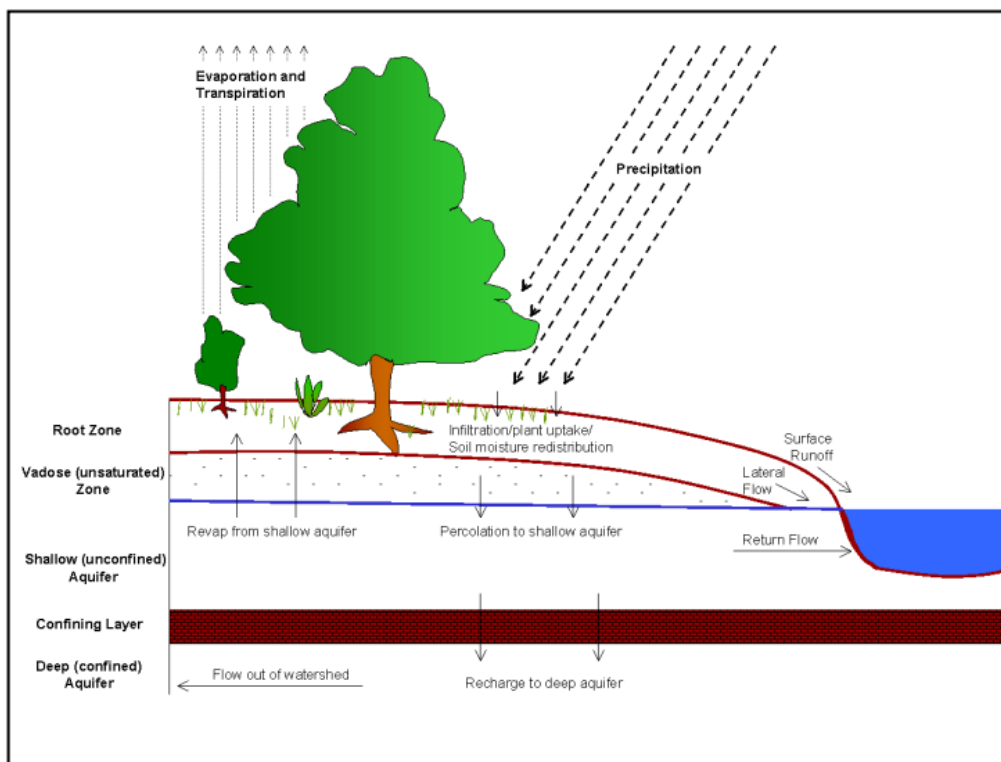
R_{day}: η ημερήσια βροχόπτωση (mm)

Q_{surf}: η ημερήσια απορροή (mm)

E_a: η εξατμισοδιαπνοή (mm)

W_{seep}: η διήθηση στο υπέδαφος (mm)

Q_{gw}: η υπόγεια ροή (mm)



Σχήμα 3-2: Υδρολογικός κύκλος κατά το μοντέλο SWAT [πηγή: ArcSWAT]

3.2.2 Υδρολογικές διεργασίες

Επιφανειακή Απορροή

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το νερό των κατακρημνισμάτων απορρέει επιφανειακά ή διηθείται στο έδαφος. Το ποσοστό που απορρέει ρυθμίζεται με τον συντελεστή απορροής (Curve Number - CN) ανάλογα με τον τύπο εδάφους και τις χρήσεις γης. Ο υπολογισμός της απορροής από το μοντέλο γίνεται με την βοήθεια μίας τροποποιημένης μεθόδου των καμπυλών SCS (Soil Conservation Service). Είναι μία εμπειρική παράμετρος που εξαρτάται από τον τύπο εδάφους, τη χρήση γης, την βλάστηση και την κατάσταση την επιφάνειας του εδάφους και την κατάσταση αρχικής υγρασίας. Η τιμές της παραμέτρου CN μεταβάλλονται μεταξύ 0 (για μια θεωρητική λεκάνη απορροής με άπειρες απώλειες) και 100 (για μια αδιαπέρατη λεκάνη). Οι τιμές λαμβάνονται από συγκεκριμένους πίνακες.

Η εξίσωση που περιγράφει την επιφανειακή απορροή σε συνάρτηση της ημερήσιας βροχόπτωσης με την χρήση των καμπυλών SCS είναι:

$$Q_{surf} = \frac{(P_{day} - I_a)^2}{(P - I_a + S)}$$

όπου:

Q_{surf} : η επιφανειακή απορροή (mm)

P_{day} : η ημερήσια βροχόπτωση (mm)

I_a : οι αρχικές απώλειες (mm)

S : η ικανότητα κατακράτησης ή κατακράτηση κορεσμού του εδάφους (mm)

Διήθηση

Το μοντέλο υπολογίζει την διήθηση ξεχωριστά για κάθε εδαφικό στρώμα. Όταν το νερό ρέει σε ένα στρώμα το οποίο είναι κορεσμένο από νερό τότε διηθείται στο αμέσως σε ένα κατώτερο στρώμα εδάφους θα πρέπει η ποσότητα να ξεπερνά την αποθηκευτικότητα του εκάστοτε στρώματος.

Η ποσότητα του νερού που πρόκειται να διηθηθεί εκτιμάται ανάλογα με την ήδη υπάρχουσα ποσότητα νερού στο στρώμα.

$$SW_{ly,excess} = \begin{cases} SW_{ly} - FC_{ly} & \text{if } SW_{ly} > FC_{ly} \\ 0 & \text{if } SW_{ly} \leq FC_{ly} \end{cases}$$

όπου:

$SW_{ly,excess}$: ο όγκος νερού που διηθείται από ένα στρώμα σε μια μέρα (mm H₂O)

SW_{ly} : ο υπάρχων όγκος νερού στο εδαφικό στρώμα την ίδια μέρα (mm H₂O)

FC_{ly} : η χωρητικότητα του εδαφικού στρώματος σε νερό (mm H₂O)

Τελικά, ο τύπος που υπολογίζει την ποσότητα του νερού που μετακινείται από το ένα στρώμα στο άλλο είναι ο παρακάτω.

$$W_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \left[1 - \exp\left(\frac{-\Delta_t}{TT_{perc}}\right) \right]$$

όπου:

$W_{perc,ly}$: η ποσότητα του νερού που διηθείται στο αμέσως επόμενο στρώμα (mm H₂O)

Δ_t : το χρονικό βήμα (hrs)

TT_{perc} : ο χρόνος που απαιτείται για την διήθηση (hrs)

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}}$$

όπου:

SAT_{ly} : η ποσότητα του νερού στο στρώμα όταν αυτό είναι εντελώς κορεσμένο (mm H₂O)

K_{sat} : η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα του εδαφικού στρώματος (mm h⁻¹)

Εξατμισοδιαπνοή

Η εξατμισοδιαπνοή περιλαμβάνει τόσο την διαπνοή από την βλάστηση όσο και την εξατμηση από υδάτινες επιφάνειες, το έδαφος το χιόνι, τον πάγο και την βλάστηση (Μπαλιτάς & Μιμίκου, 2018). Είναι ο κύριος μηχανισμός με τον οποίο το νερό απομακρύνεται από την λεκάνη απορροής.

Το μοντέλο χρησιμοποιεί τρεις μεθόδους υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής την μέθοδος Penman-Monteith, η οποία χρησιμοποιεί ως δεδομένα εισόδου την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία του αέρα,

την ταχύτητα του ανέμου, και τη σχετική υγρασία, την μέθοδο του Hargreaves που χρησιμοποιεί την θερμοκρασία του αέρα και τέλος η Priestley-Taylor που χρησιμοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία του αέρα. Η πιο διαδεδομένη είναι η μέθοδος Penman-Monteith η οποία περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$E' = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma'} * \frac{R_n}{\lambda} * \frac{\gamma'}{\Delta + \gamma'} * F(u) * D$$

όπου:

Δ : η κλίση της καμπύλης κορεσμού των υδάτων (hPa/ °C)

R_n : η ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας [kJ/(m² d)]

λ : η λανθάνουσα θερμότητας εξάτμισης (kJ/kg)

D : το έλλειμα κορεσμού των υδρατμών (hPa)

$F(u)$: η τροποποιημένη μορφή της συνάρτησης ταχύτητας του ανέμου [kg/(hPa m²d)]

γ' : η τροποποιημένη έκφραση του ψυχομετρικού συντελεστή, ώστε να λαμβάνει υπόψη την αντίσταση των στομάτων (hPa/ °C)

Η τροποποιημένη μορφή της συνάρτησης ταχύτητας του ανέμου και του ψυχομετρικού συντελεστή περιγράφονται παρακάτω:

$$F(u) = \frac{90}{T + 275} * u$$

$$\gamma' = (1 + 0,33u) * \gamma$$

όπου:

T : η θερμοκρασία (°C)

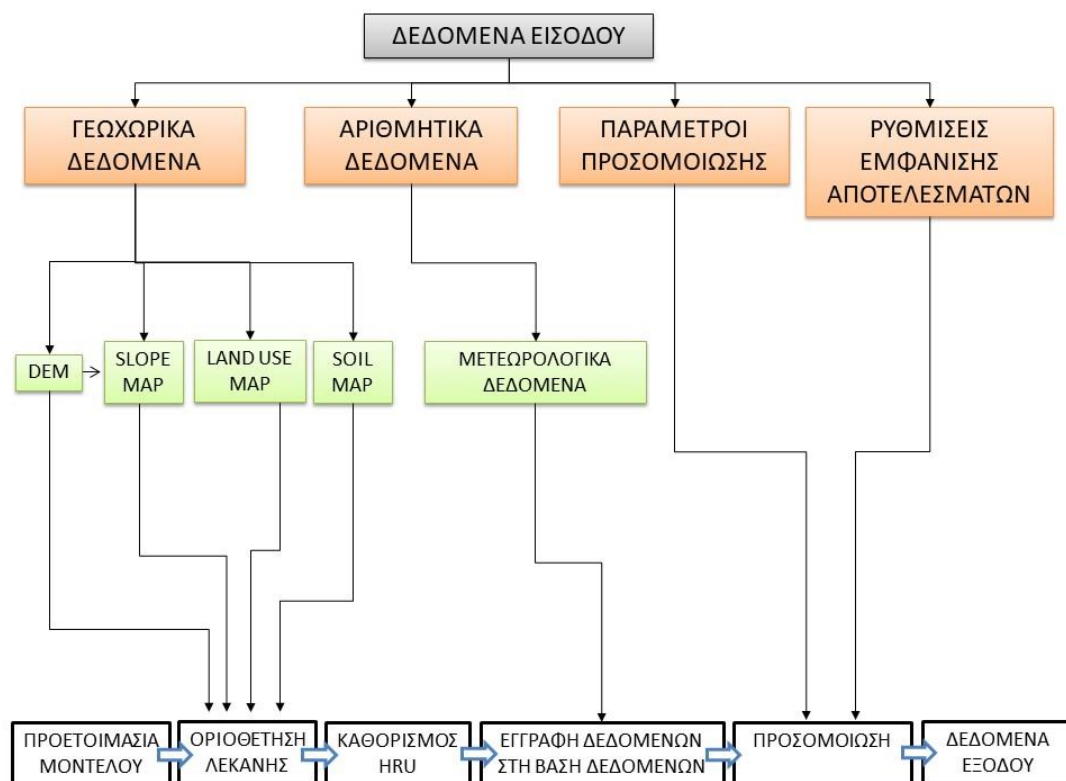
u : η ταχύτητα ανέμου (m/s)

γ : ο ψυχομετρικός συντελεστής (hPa/ °C)

3.3 Εφαρμογή Μοντέλου SWAT

3.3.1 Το λογισμικό ArcSWAT

Στο σχήμα 3-3 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής που υλοποιείται μέσω του λογισμικού ArcSWAT 2012 στο περιβάλλον του ArcGIS 10.5.1.



Σχήμα 3-3: Διάγραμμα Ροής λογισμικού ArcSWAT

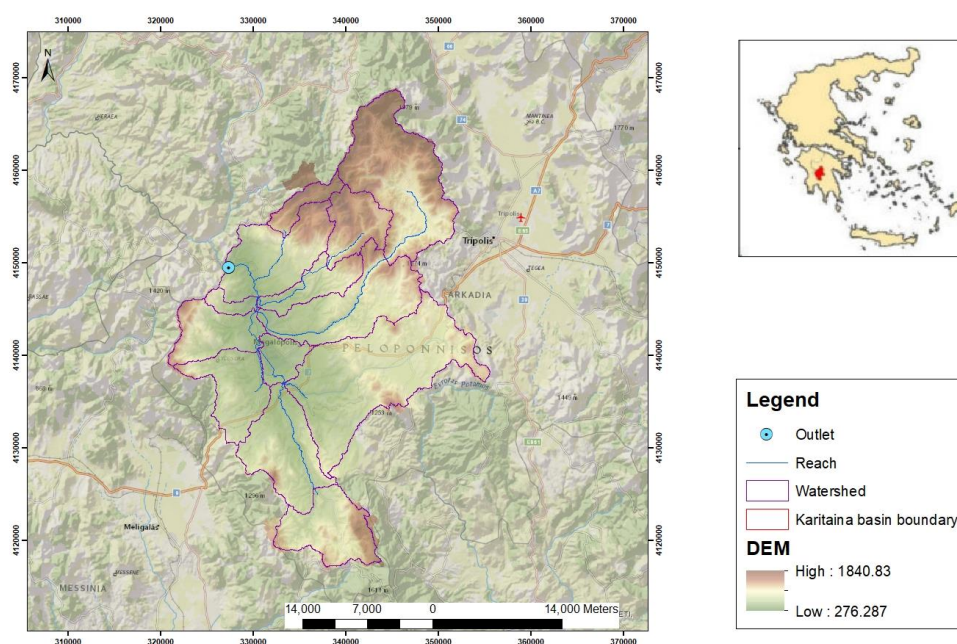
Τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου του μοντέλου για την υλοποίηση της προσομοίωσης της λεκάνης απορροής είναι α) τα γεωχωρικά δεδομένα, και β) τα αριθμητικά δεδομένα, που αφορούν κυρίως τα μετεωρολογικά δεδομένα. Ως γεωχωρικά δεδομένα ορίζεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM), από το οποίο προκύπτουν οι κλίσεις της λεκάνης απορροής, ο χάρτης χρήσεων γης καθώς και ο χάρτης τύπων εδαφών. Ωστόσο, τα δεδομένα αυτά, δηλαδή τα μετεωρολογικά ρυθμίζουν και το χρονικό βήμα των υπολογισμών που στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε το χρονικό διάστημα 1 ημέρας.

Αφού ολοκληρώθηκε η συλλογή των απαραίτητων δεδομένων, καθότι δύσκολη λόγω της έλλειψής τους και πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία

τους ώστε να είναι συμβατά με το πρόγραμμα ArcSWAT 2012 ξεκίνησε η διαδικασία διαμόρφωσης του μοντέλου.

Αρχικά, οροθετήθηκε από την λεκάνη απορροής του Αλφειού ποταμού, η υπολεκάνη της Καρύταινας. Για τον προσδιορισμό της λεκάνης απορροής και το ξεκίνημα της διαδικασίας διαμόρφωσης του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) ισοδιάστασης 25m x 25m. Με βάση το ανάγλυφο (DEM) λοιπόν, ορίσθηκε το υδρογραφικό δίκτυο καθώς και προσδιορίσθηκε η διεύθυνση της ροής των υδάτων (Flow direction) αλλά και που αυτά συσσωρεύονται (Flow accumulation).

Σαν τελευταίο στάδιο του στησίματος του βασικού μοντέλου είναι η χάραξη των υπολεκανών. Η λεκάνη απορροής της Καρύταινας χωρίστηκε σε 13 υπολεκάνες και χαράχθηκε ο υδροκρίτης, Σχήμα 3-4.



Σχήμα 3-4: Υπολεκάνες SWAT

3.3.2 Δημιουργία μονάδων υδρολογικής απόκρισης (HRUs)

Σημαντική στο στήσιμο του μοντέλου είναι η σωστή επιλογή των υδρολογικών μονάδων απόκρισης HRUs. Οι υδρολογικές μονάδες αποτελούν περιοχές με συγκεκριμένες και κοινές ιδιότητες ως προς τις χρήσεις γης, το έδαφος και τις κλίσεις. Προκειμένου να γίνει ο διαχωρισμός της λεκάνης απορροής σε HRUs είναι αναγκαίο να εισαχθούν

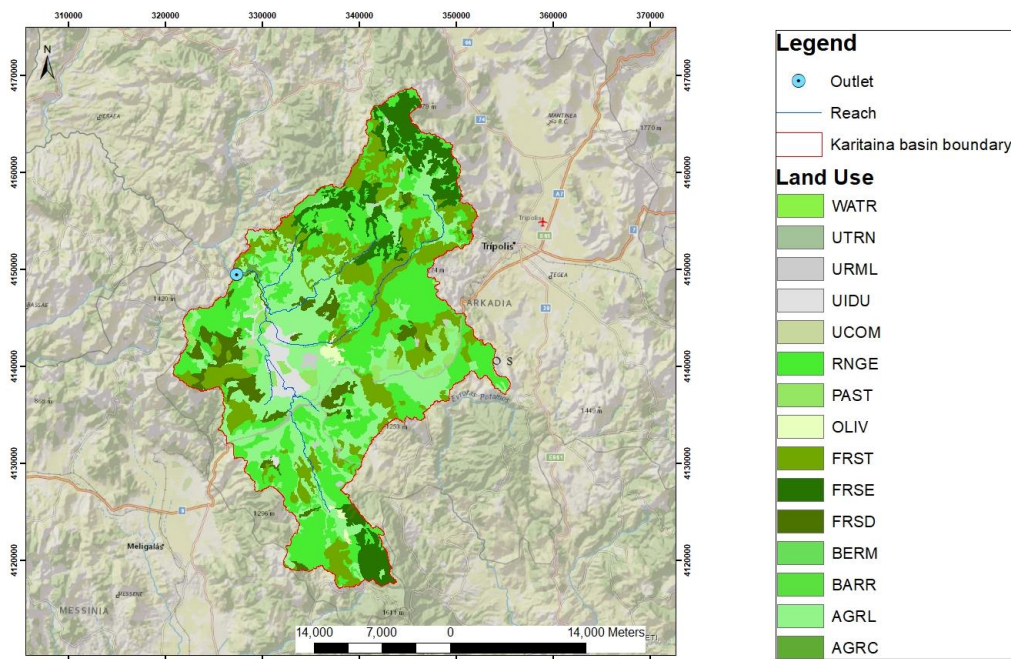
σωστά τα δεδομένα εισόδου με ορθό προσανατολισμό στο σωστό σύστημα συντεταγμένων. Αφού εισαχθούν οι χρήσεις γης, οι τύποι εδαφών της λεκάνης απορροής και ορισθούν οι κλάσεις των κλίσεων από το DEM, γίνεται διαχωρισμός των HRUs. Επιλέχθηκε αρκετά μεγάλη ανάλυση με ελάχιστο ποσοστό που μπορεί να καταλαμβάνουν οι χρήσεις γης σε 0,5%, οι εδαφολογικοί τύποι σε 5% και οι κλίσεις σε 3%. Τελικά δημιουργήθηκαν 330 HRUs.

3.3.3 Χρήσεις γης (Land Use)

Για τις χρήσεις γης εισήχθησαν στο μοντέλο οι χάρτες καλύψεων γης, που πάρθηκαν όπως προαναφέρθηκε από το πρόγραμμα Corine Land Cover του Copernicus. Αφού εισήχθησαν οι χρήσεις γης έγινε η απαραίτητη επεξεργασία με σκοπό να γίνουν συμβατές οι χρήσεις γης με το εργαλείο του SWAT. Οι χρήσεις που προέκυψαν στην συγκεκριμένη λεκάνη απορροής φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 3-1, και στο Σχήμα 3-5.

Πίνακας 3-1: Περιγραφή των κωδικών χρήσεων γης του λογισμικού SWAT που χρησιμοποιήθηκαν στην λεκάνη απορροής της Καρύταινας

| SWAT CODE | TYPE | ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ |
|-------------|---------------------------------|----------------------------------|
| WATR | Water | Επιφάνειες στάσιμου ύδατος |
| UTRN | Transportation | Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα |
| URML | Discontinuous urban fabric | Ασυνεχής αστικός ιστός |
| UIDU | Mineral extraction sites | Χώροι εξορύξεως ορυκτών |
| UCOM | Industrial or commercial units | Βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες |
| RNGE | Natural grasslands | Φυσικοί βοσκότοποι |
| PAST | Pastures | Λιβάδια |
| OLIV | Olives | Ελαιώνες |
| FRST | Mixed forest | Μικτό δάσος |
| FRSE | Coniferous forest (evergreen) | Δάσος κωνοφόρων |
| FRSD | Broad-leaved forest (deciduous) | Δάσος πλατύφυλλων |
| BERM | Bermudagrass | Εκτάσεις με αραιή βλάστηση |
| AGRL | Complex cultivation patterns | Σύνθετες καλλιέργειες |
| AGRC | Permanently irrigated land | Μόνιμα αρδευόμενη γη |



Σχήμα 3-5: Χρήσεις Γης SWAT

3.3.4 Δεδομένα εδάφους (Soil Data)

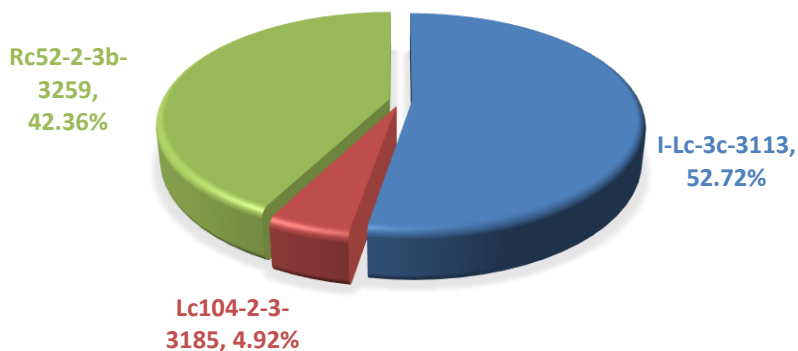
Για την συνέχεια του στησίματος του μοντέλου προστέθηκαν τα δεδομένα εδάφους όπως αυτά πάρθηκαν από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Γεωργίας και Τροφίμων (FAO). Επειδή, το πρόγραμμα δεν είναι αρκετά συμβατό με περιοχές εκτός των ΗΠΑ, πραγματοποιήθηκαν κάποιες αλλαγές ώστε και να αντιμετωπισθεί το πρόγραμμα αυτό. Με την χρήση του λογισμικού Map Window αντικαταστάθηκε η βάση δεδομένων των τύπων εδαφών του SWAT με το λογισμικό MWSWAT 2012, το οποίο είναι διαθέσιμο στην επίσημη σελίδα του SWAT.

Στην περιοχική μελέτη εμφανίζονται τρεις τύποι εδαφών, σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Γεωργίας και Τροφίμων (FAO). Στον παρακάτω πίνακα, πίνακα 3-2, παρουσιάζονται αναλυτικά οι τύποι εδαφών, ενώ στο σχήματα 3-6 και 3-7 το αντίστοιχο ποσοστό τους και η θέση τους στην περιοχική μελέτη.

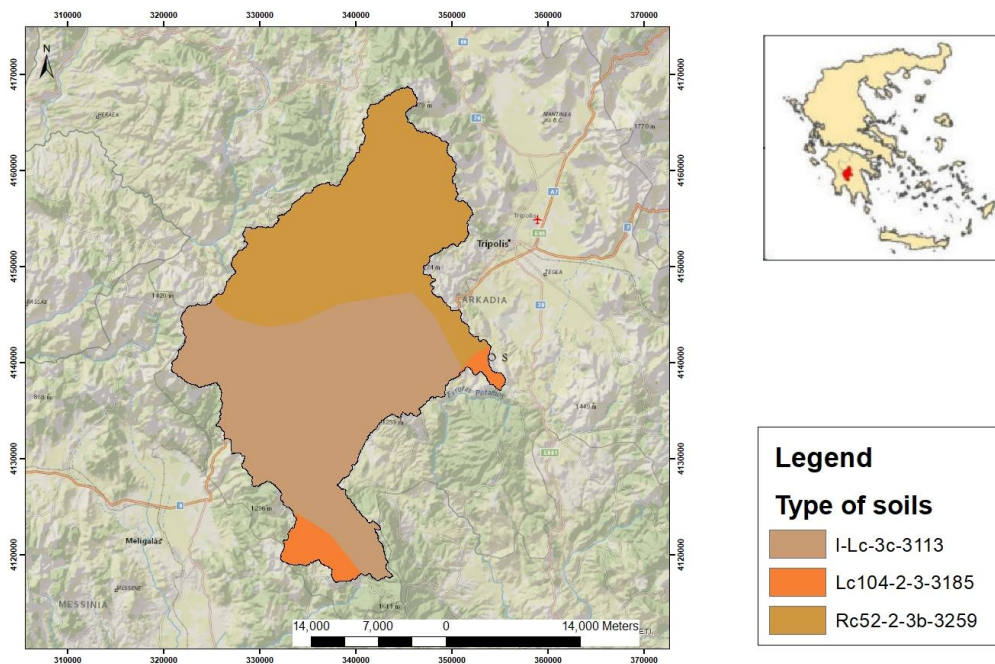
Πίνακας 3-2: Περιγραφή τύπων εδαφών του λογισμικού SWAT που χρησιμοποιήθηκαν στην λεκάνη απορροής της Καρύταινας

| FAO SOIL CODE | ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ | ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ |
|-----------------------|-------------------|--|
| I-Lc-3c-3113 | Lithosols | Λεπτά σκληρά και βραχώδη πετρώματα. Τα εδάφη αυτά απαντώνται σε πολύ απότομες ορεινές περιοχές, όπου το εδαφικό υλικό απομακρύνεται τόσο γρήγορα λόγω της διάβρωσης. |
| Lc104-2-3-3185 | Chromic Luvisols | Εδάφη με ισχυρή συσσώρευση αργίλου στον Β-ορίζοντα. Παρουσιάζουν ενδείξεις μετακίνησης αργίλλο-πυριτικών ορυκτών χωρίς υπερβολική έκπλυση βάσεων. Εδάφη με διαγνωστικό ορίζοντα με απόχρωση 7.5 YR της κατάταξης Munsell Hue (ή και πιο κόκκινο). Απαντώνται σε επίπεδα εδάφη ή σε εδάφη με ήπια κλίση κυρίως σε Μεσογειακές περιοχές οι οποίες έχουν ξηρές και υγρές περιόδους. |
| Rc52-2-3b-3259 | Calcaric Regosols | Χαρακτηρίζονται από ρηχό, μεσαίο έως λεπτό, μη στερεοποιημένο γονικό υλικό που μπορεί να είναι προσχωσιγενής προέλευσης και από την έλλειψη σημαντικού σχηματισμού εδαφικού ορίζοντα λόγω ξηρών ή ψυχρών κλιματικών συνθηκών. Οι εμφανίζονται κυρίως σε πολικές και έρημες περιοχές, καταλαμβάνοντας περίπου το 2% της ηπειρωτικής γης Βρίσκονται συνήθως κάτω από την αρχική τους φυσική βλάστηση ή κάτω από περιορισμένες ξηρές καλλιέργειες |

Το μεγαλύτερο ποσοστό κάλυψης του εδάφους της εν λόγω λεκάνης απορροής είναι ο σχηματισμός Lithosols με ποσοστό 52,72%. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι λόγω της υδρολογικής κατηγορίας που ανήκει, η οποία είναι C, παρουσιάζει μικρή διηθητικότητα, με αποτέλεσμα την αύξηση της πιθανότητας της επιφανειακής απορροής.



Σχήμα 3-6: Ποσοστό κάλυψης τύπων εδαφών στην λεκάνη απορροής της Καρύταινας

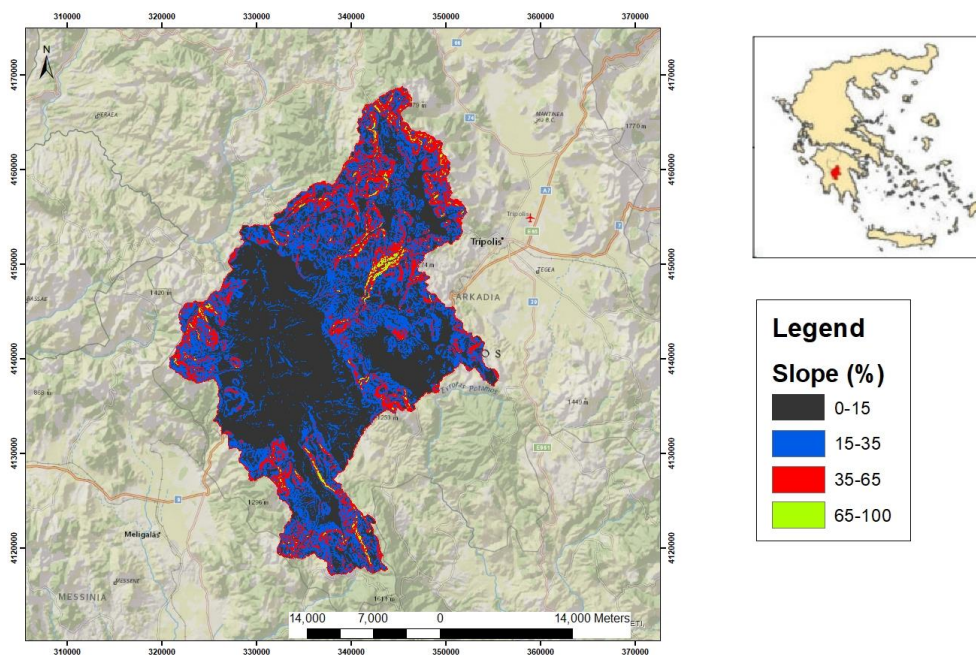


Σχήμα 3-7: Εδαφολογικού Τύποι Περιοχής Μελέτης

3.3.5 Κλίσεις (Slope)

Στην συνέχεια ορίστηκαν οι κλίσεις της περιοχής με βάση το εύρος τους όπως εμφανίζονται στο Σχήμα 3-8. Ο διαχωρισμός των κλίσεων έγινε σε 4 κλάσεις:

- 0%-15%
- 15%-35%
- 35%-65%
- 65%-100%



Σχήμα 3-8: Κατηγοριοποίηση των Κλίσεων στο μοντέλο SWAT

3.3.6 Κλιματικά δεδομένα

Για την διαμόρφωση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα που πάρθηκαν από 4 σημεία γύρω από την λεκάνη. Τα απαραίτητα μετεωρολογικά δεδομένα εισαγωγής ώστε να επιτευχθεί η ορθή λειτουργία του προγράμματος είναι οι μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες καθώς και καθώς και τα ύψη βροχής. Αφού πραγματοποιήθηκε η απαραίτητη επεξεργασία και η δημιουργία wgen file έγινε η εισαγωγή των δεδομένων. Το χρονικό διάστημα των ημερήσιων μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν είναι από 01/10/2000 έως και 12/30/2015.

3.4 Εκτέλεση και βαθμονόμηση μοντέλου

Μετά το τέλος της προσθήκης όλων των απαραίτητων στοιχείων πραγματοποιήθηκε το 'τρέξιμο' του μοντέλου. Η προσομοίωση του μοντέλου έγινε από την 01/01/2001 έως και τις 12/30/2014. Ορίστηκε και η περίοδος Warm up, η οποία είναι απαραίτητη για την βέλτιστη

λειτουργία του μοντέλου, αφού μέσα σε αυτά τα χρόνια γίνονται οι αρχικοί υπολογισμοί για τον υδρολογικό κύκλο αλλά και για τις παραμέτρους. Στην συγκεκριμένη έρευνα ως περίοδος Warm up ορίστηκε 1 χρόνος.

3.5 Συνθετικές Χρονοσειρές

Για την παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών χρησιμοποιήθηκε το στοχαστικό μοντέλο αυτοσυσχέτισης AR(2) και παρήχθησαν 50 συνθετικές χρονοσειρές σε ημερήσια κλίμακα διάρκειας 50 ετών. Πιο συγκεκριμένα για τα έτη που αναφέρονται οι συνθετικές χρονοσειρές είναι από το 2020 έως το 2070.

Για την δημιουργία των συνθετικών χρονοσειρών με βάση του μοντέλου AR(2) ακολουθείται συγκεκριμένη διαδικασία.

Αρχικά, όπως έχει αναφερθεί τα ιστορικά δεδομένα έχουν ημερήσιο βήμα καθώς και επίσης το μοντέλο SWAT δέχεται μόνο ημερήσιες τιμές. Καθώς η διαδικασία των συνθετικών χρονοσειρών προτείνεται να πραγματοποιείτε σε μηνιαίο χρονικό βήμα. Συγκεκριμένα, για την παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών τα ιστορικά δεδομένα μετατράπηκαν σε μηνιαία για να παραχθούν όσο πιο ορθές συνθετικές χρονοσειρές όσον αφορά τα στατιστικά χαρακτηριστικά της χρονοσειράς. Συγκεκριμένα λοιπόν, κάποια συγκεκριμένη μέρα για όλα τα έτη της συνθετικής χρονοσειράς. Αυτό έγινε για όλες τις μέρες ξεχωριστά, αλλά και για κάθε μήνα για το σύνολο των ετών. Τα αποτελέσματα αυτά είναι χρήσιμα για να παραχθούν τα ποσοστά βροχόπτωσης που παρατηρούνται για κάθε μέρα του χρόνου. Με την βοήθεια του στοχαστικού μοντέλου αυτόσυσχέτισης AR(2), παρήχθησαν οι μηνιαίες συνθετικές χρονοσειρές. Με την βοήθεια των ποσοστών βροχόπτωσης κάθε ημέρας ξεχωριστά έγινε μετατροπή των μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών σε ημερήσιων, με σκοπό να είναι συμβατές στο μοντέλο SWAT.

Το στοχαστικό μοντέλο αυτοσυσχέτισης AR(2) είναι ένα εργαλείο ανάλυσης υδρολογικών χρονοσειρών, βοηθώντας στην κατανόηση, τη μοντελοποίηση και την πρόβλεψη πολύπλοκων φαινομένων, λαμβάνοντας υπόψη τις γραμμικές σχέσεις τους με βάση προηγούμενων παρατηρήσεων. Τα

δεδομένα υδρολογικών χρονοσειρών, όπως η παροχή, η βροχόπτωση κ.α., παρουσιάζουν χρονικά μοτίβα και εξαρτήσεις.

Το μοντέλο AR(2), προσαρμοσμένο στην υδρολογία, ορίζεται ως:

$$Q_t = \varphi_1 Q_{t-1} + \varphi_2 Q_{t-2} + w_t$$

Όπου,

Q_1, Q_2 : υδρολογική μεταβλητή (π.χ. παροχή) τη στιγμή t .

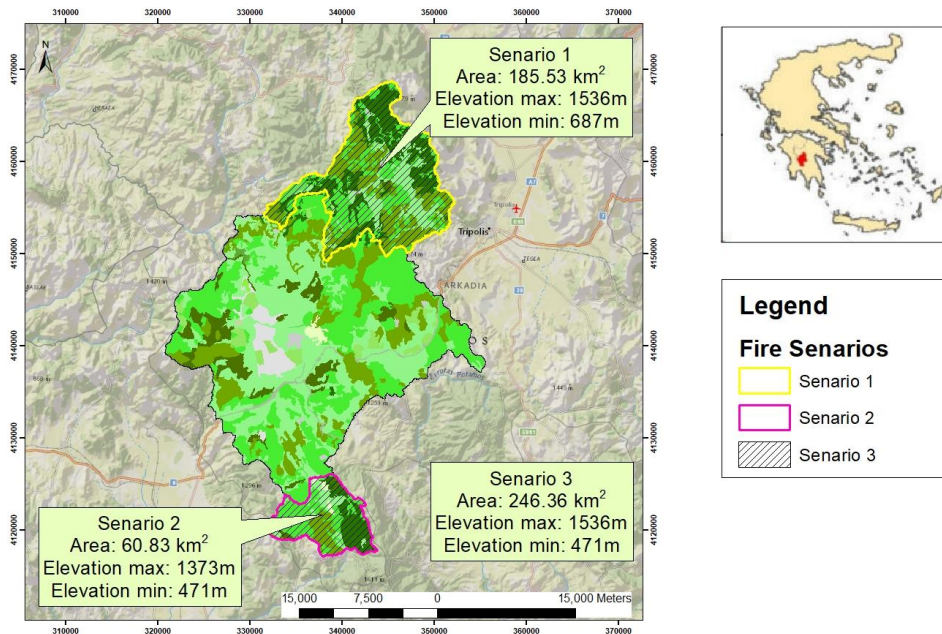
φ_1, φ_2 : παράμετροι αυτοσυσχέτισης.

w_t : λευκός θόρυβος τη στιγμή t .

Οι υδρολογικές διεργασίες συχνά εμφανίζουν βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες χρονικές εξαρτήσεις. Η ακριβής εκτίμηση των παραμέτρων είναι απαραίτητο στάδιο για την μοντελοποίηση.

3.6 Σενάρια αλλαγής Χρήσεων Γης

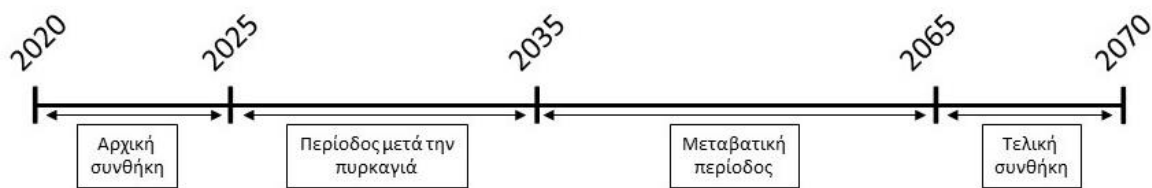
Στο Σχήμα 3-9, παρουσιάζονται τα σενάρια πυρκαγιάς που αναλύονται στην συγκεκριμένη εργασία. Εξετάσθηκαν τρία σενάρια, ένα όπου επηρεάζεται το βόρειο τμήμα της ΛΑΠ, ένα το νότιο και ένα όπου επηρεάζονται και τα δύο τμήματα. Η επιλογή των σεναρίων έγινε με βάση των χρήσεων γης που υπάρχουν στην λεκάνη απορροής, όπως φαίνεται και στον χάρτη των χρήσεων γης της λεκάνης απορροής της Καρύταινας, καθώς και των χαρακτηριστικών που ευνοούν την εξάπλωση των δασικών πυρκαγιών στην Ελλάδα.



Σχήμα 3-9: Περιοχές Εφαρμογής Σεναρίων

Επιλέχθηκαν περιοχές οι οποίες στο μεγαλύτερο ποσοστό τους καλύπτονται με κωνοφόρα δένδρα, τα οποία είναι ιδιαίτερος εύφλεκτα. Ένα άλλο χαρακτηριστικό το οποίο οδήγησε στην επιλογή των συγκεκριμένων περιοχών, όπως προκύπτει από τον χάρτη των κλίσεων, είναι οι μεγάλες κλίσεις που απαντώνται εκεί, γεγονός που κάνει ευκολότερη την εξάπλωση της πυρκαγιάς.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3-10, τα πρώτα 5 χρόνια προσομοιώνουν την υπάρχουσα κατάσταση. Τα επόμενα 10 χρόνια, δηλαδή από την πυρκαγιά και έπειτα, η περιοχή παίρνει τον χαρακτηρισμό του άγονου (BARR), προσομοιώνοντας έτσι την καμένη έκταση. Λόγω της ύπαρξης ελάτης στην περιοχή, για τα επόμενα 30 χρόνια περίπου, η περιοχή θα βρίσκεται σε μεταβατικό στάδιο, χαρακτηρίζοντας τα δάση κωνοφόρων και τα υπόλοιπα δάση με τον χαρακτηρισμό των βοσκοτόπων (RNGE). Για τα επόμενα χρόνια και μέχρι το τέλος της συνθετικής χρονοσειράς, όπου γίνεται η προσομοίωση, η βλάστηση έχει επανέλθει στο αρχικό της στάδιο.



Σχήμα 3-10: Χρονική προσομοίωση μεταβολής βλάστησης μετά από σενάριο πυρκαγιάς

Για την διερεύνηση των σεναρίων χρησιμοποιήθηκε το ArcSWAT. Μετά από ενδελεχή έλεγχο στην παγκόσμια βιβλιογραφία για την προσομοίωση των καμένων εκτάσεων επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το Land use update του λογισμικού ArcSWAT. Οι παράμετροι που επηρεάζονται και χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα για κάθε χρήση γης (BARR, RNGE) παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-3.

Πίνακας 3-3: Χαρακτηριστικά εδαφών που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των σεναρίων πυρκαγιάς

| Barren (BARR) | | Range-Grasses (RNGE) | |
|----------------------|------|-----------------------------|------|
| A | 77 | A | 49 |
| B | 86 | B | 69 |
| C | 91 | C | 79 |
| D | 94 | D | 84 |
| Manning's N | 0.14 | Manning's N | 0.15 |

3.6.1 Σενάριο Πυρκαγιάς 1

Σύμφωνα με το πρώτο σενάριο καίγεται το βόρειο τμήμα της λεκάνης απορροής. Το σημείο έναρξης ήταν εκτός λεκάνης απορροής δυτικά της Τρίπολης, στους πρόποδες του Όρους Μαίναλο. Λόγω της επικρατούσας βλάστησης, των ανέμων και για την διασφάλιση της προστασίας της πόλης, η πυρκαγιά επεκτάθηκε προς τα δυτικά. Εξαιτίας της πυκνής βλάστησης και των δυνατών ριπών ανέμων η πυρκαγιά επεκτάθηκε γρήγορα και όταν εισήλθε στην λεκάνη απορροής διασπάστηκε δημιουργώντας 2 μέτωπα. Το πρώτο και βασικό μέτωπο επεκτάθηκε Βορεία - Βορειοδυτικά της λεκάνης απορροής και το δεύτερο επεκτάθηκε Ανατολικά οριοθετώντας την από την πυροσβεστική υπηρεσία στα σημεία όπου ήταν προσβάσιμα και η έντασή

της πυρκαγιάς ήταν αντιμετωπίσιμη. Στο Βόρειο και Βορειοδυτικό τμήμα της λεκάνης απορροής όπου οι κλίσεις είναι μεγάλες η πυρκαγιά ήταν αδύνατο να αντιμετωπιστεί παίρνοντας έτσι μεγάλες διαστάσεις καθώς επεκτάθηκε και έξω από τα όρια της λεκάνης. Κάτι τέτοιο όμως δεν επηρεάζει κάπου την μελέτη της ενδιαφερόμενης περιοχής.

Συνολικά καίγονται 185,53km², δηλαδή περίπου το 22,41% από το σύνολο της λεκάνης απορροής.

3.6.2 Σενάριο Πυρκαγιάς 2

Στο δεύτερο σενάριο, καίγεται το Νότιο τμήμα της λεκάνης απορροής. Η πυρκαγιά ξέσπασε σε εκτάσεις με αραιή βλάστηση στα νοτιοδυτικά της λεκάνης. Οι δυνατοί άνεμοι ώθησαν την πυρκαγιά με μεγάλη ταχύτητα ανατολικά και ελαφρώς νότια με αποτέλεσμα να μην προλάβουν να αντιδράσουν οι πυροσβεστικές δυνάμεις και η πυρκαγιά να εισέλθει σε δασική έκταση. Η πυρκαγιά περιορίστηκε στο νότιο τμήμα της λεκάνης κοντά στο χωριό Δυρράχιο. Στην συνέχεια η πυροσβεστική χρησιμοποίησε τους δασικούς δρόμους από το Δυρράχιο μέχρι της Ιερά Μονή Ρεκίτσας, για την δημιουργία αντιπυρικών ζωνών και λόγω της κόπωσης των έντονων ανέμων η πυρκαγιά οριοθετήθηκε. Στο βόρειο τμήμα του σεναρίου η πυρκαγιά οριοθετήθηκε κοντά στο χωριό Καμποχώρι όπου υπάρχουν σχεδόν μηδενικές κλίσεις.

Συνολικά καίγονται 60,83km², δηλαδή περίπου το 7,35% από το σύνολο της λεκάνης απορροής.

3.6.3 Σενάριο Πυρκαγιάς 3

Στο τρίτο σενάριο, γίνεται συνδυασμός των δύο παραπάνω σεναρίων. Στον σενάριο αυτό, καίγεται και το Βόρειο και το Νότιο τμήμα της λεκάνης απορροής.

Συνολικά καίγονται 246,36km², δηλαδή περίπου το 29,75% από το σύνολο της λεκάνης απορροής.

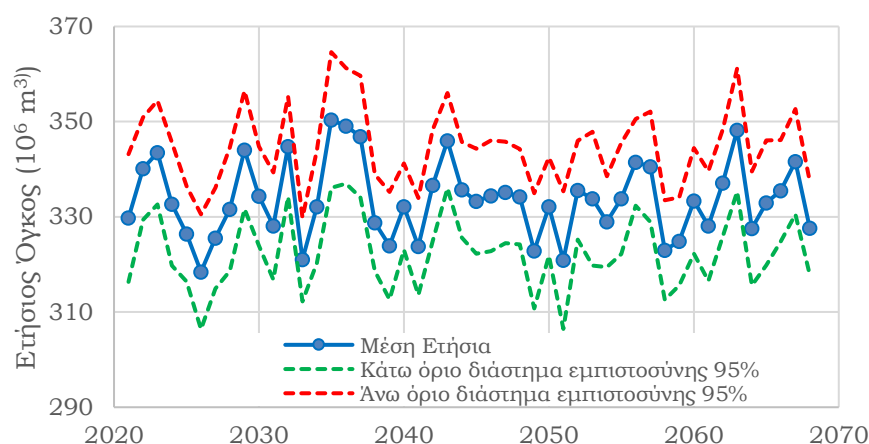
4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 Αποτελέσματα βασικού σεναρίου

Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης του βασικού μοντέλου με την χρήση συνθετικών χρονοσειρών για τα έτη 2020-2070, εξάγονται τα ακόλουθα αποτελέσματα. Παρόλο που το χρονικό βήμα των χρονοσειρών είναι ημερήσιο, για την όσο το δυνατόν μείωση κάθε είδους αβεβαιότητας, τα αποτελέσματα εξάγονται σε μηνιαίο και ετήσιο βήμα. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ως όγκος απορροής.

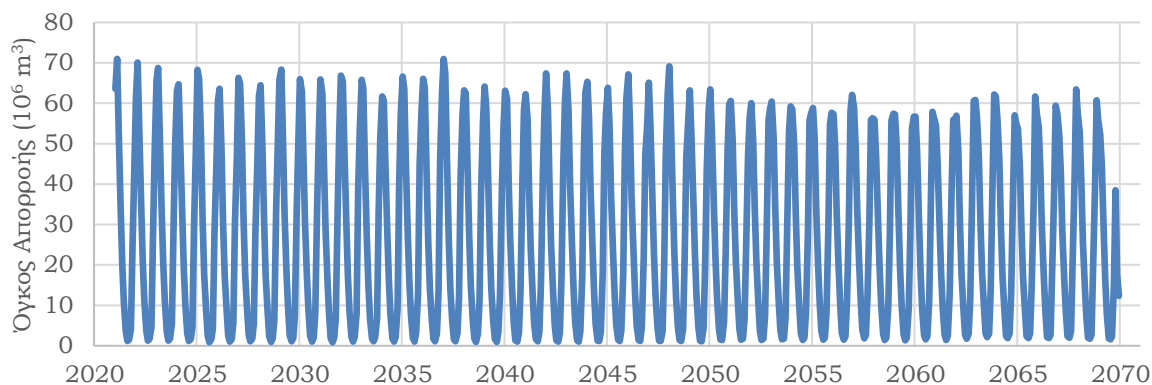
Ο υπολογισμός των μηνιαίων όγκων έγινε πολλαπλασιάζοντας την παροχή του εκάστοτε μήνα με $3600 \cdot 24 \cdot 30 \cdot 10^6$. Η τιμή 30 μεταβάλλεται ανάλογα τον μήνα που αφορά ο υπολογισμός. Για τους ετήσιους όγκους πολλαπλασιάστηκε η παροχή με $3600 \cdot 24 \cdot 365 \cdot 10^6$. Η τιμή 365 μεταβάλλεται τα δίσεκτα έτη.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4-1, που παρουσιάζει τον μέσο ετήσιο όγκο παροχής καθώς και τα όρια εμπιστοσύνης, ο μέσος ετήσιος όγκος φτάνει στα $333.61 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, ενώ η μέση ετήσια παροχή είναι ίση με $10,58 \text{ m}^3/\text{s}$. Ο μεγαλύτερος μέσος ετήσιος όγκος φτάνει στα $351,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, η οποία εμφανίζεται το έτος 2035. Η μέση ετήσια παροχή αντίστοιχα ισούται με $11,1 \text{ m}^3/\text{s}$.



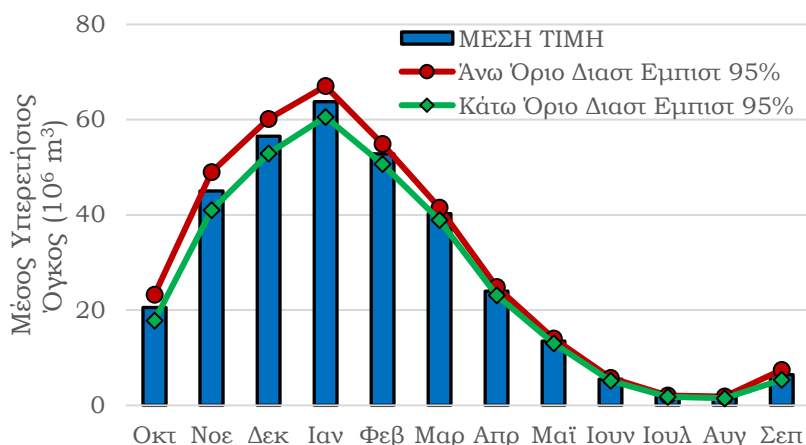
Σχήμα 4-1: Μέσος ετήσιος όγκος απορροής στο βασικό σενάριο.

Στο σχήμα 4-2, με τους μέσους μηνιαίους όγκους παροχών φαίνεται ότι η μέση μέγιστη τιμή είναι ίση με $71 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ και εμφανίζεται στην αρχή της προσομοίωσης, τον Φεβρουάριο του 2021.



Σχήμα 4-2: Μέσος μηνιαίος όγκος απορροής στο βασικό σενάριο.

Στο σχήμα 4-3, όπως είναι αναμενόμενο, η μέση ετήσια τιμή του όγκου μειώνεται σημαντικά τους θερινούς μήνες (Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος). Η μέγιστη τιμή του όγκου εμφανίζεται συνολικά για όλα τα χρόνια τον μήνα Ιανουάριο και Φεβρουάριο. Παρατηρώντας το σχήμα 4-3, διαπιστώνεται η μεγαλύτερη απόκλιση του άνω και κάτω ορίου διαστήματος εμπιστοσύνης 95% στον μέσο υπερειτήσιο όγκο εμφανίζεται τους μήνες Οκτώβρη, Νοέμβρη και Δεκέμβρη, ενώ η διαφορά τους θερινούς μήνες είναι μικρή.



Σχήμα 4-3: Μέσος υπερειτήσιος όγκος καθώς και άνω και κάτω όριο διαστήματος εμπιστοσύνης 95% του βασικού σεναρίου.

Όπως φαίνεται στον πίνακα 4-1, τους χειμερινούς μήνες εμφανίζεται και ο μεγαλύτερος όγκος παροχών, ενώ τους θερινούς μήνες οι τιμές μειώνονται σημαντικά. Αυτό δικαιολογείται καθώς τους θερινούς μήνες υπάρχουν περισσότερα κατακρημνίσματα.

Πίνακας 4-1: Μέσος μηνιαίος όγκος (hm³), άνω και κάτω όριο διαστήματος εμπιστοσύνης καθώς και μέγιστες και ελάχιστες τιμές.

| Σενάριο Βάσης | Μέση Τιμή | Κάτω Όριο | Άνω Όριο | Μέγιστη | Ελάχιστη |
|---------------|-----------|--------------------|--------------------|---------|----------|
| | | Διαστ. Εμπιστ. 95% | Διαστ. Εμπιστ. 95% | | |
| Ιαν | 63.82 | 60.58 | 67.05 | 73.30 | 54.07 |
| Φεβ | 52.80 | 50.67 | 54.94 | 66.26 | 39.60 |
| Μαρ | 40.23 | 38.92 | 41.53 | 55.76 | 26.71 |
| Απρ | 23.98 | 23.13 | 24.83 | 35.02 | 14.80 |
| Μαϊ | 13.51 | 13.01 | 14.02 | 21.45 | 7.21 |
| Ιουν | 5.47 | 5.18 | 5.77 | 11.08 | 1.84 |
| Ιουλ | 1.94 | 1.80 | 2.08 | 3.96 | 1.33 |
| Αυγ | 1.67 | 1.49 | 1.85 | 3.80 | 0.91 |
| Σεπ | 6.44 | 5.40 | 7.48 | 20.96 | 1.50 |
| Οκτ | 20.55 | 17.82 | 23.28 | 42.39 | 4.28 |
| Νοε | 45.00 | 40.98 | 49.02 | 63.45 | 17.54 |
| Δεκ | 56.52 | 52.91 | 60.13 | 64.91 | 12.76 |

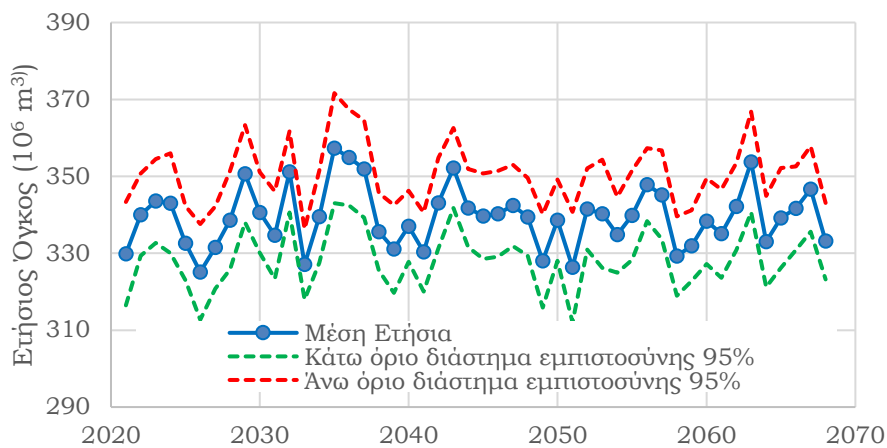
4.2 Προσομοίωση σεναρίων χρήσεων γης

Τα αποτελέσματα των σεναρίων αρχικά θα μελετηθούν ξεχωριστά καθώς και θα αναλυθούν οι μεταβολές που υπάρχουν σε σχέση με το βασικό μοντέλο. Έπειτα, θα γίνει σύγκριση των σεναρίων αναλύοντας τα αποτελέσματά τους.

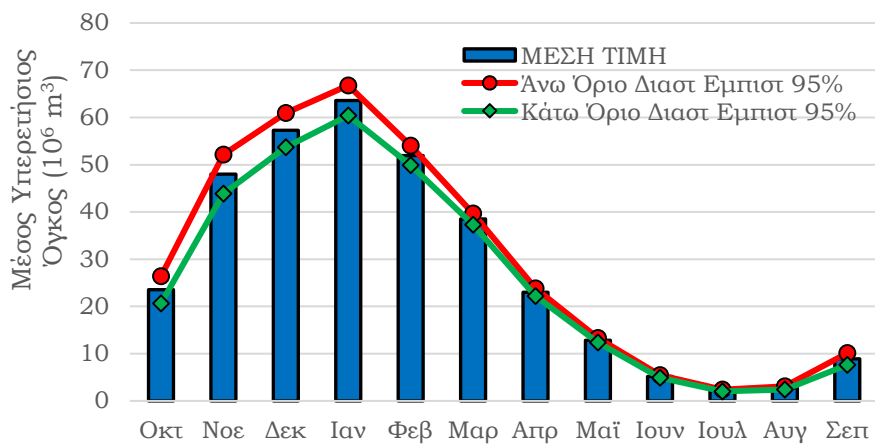
4.2.1 Σενάριο 1

Στο πρώτο σενάριο 'καίγεται' το βόρειο τμήμα της λεκάνης με έκταση 185,53km² και ποσοστό 22,41% της λεκάνης απορροής.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4-4, που αφορά τον μέσο ετήσιο όγκο παροχής καθώς και τα όρια εμπιστοσύνης, ο μέσος ετήσιος όγκος φτάνει στα 339.42*10⁶ m³. Ο μεγαλύτερος μέσος ετήσιος όγκος φτάνει στα 357.3*10⁶ m³, η οποία εμφανίζεται το έτος 2035. Οι τιμές των μέσων ετήσιων όγκων διακυμαίνονται μέσα στα όρια εμπιστοσύνης.



Σχήμα 4-4: Ετήσιος όγκος παροχής σεναρίου 1.

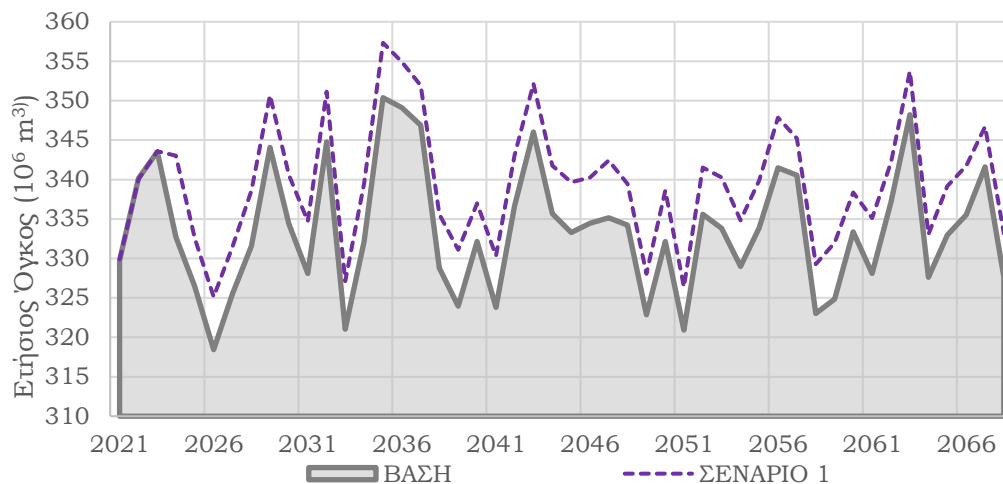


Σχήμα 4-5: Μέσος υπερετήσιος όγκος σεναρίου 1

Στο σενάριο 1 όπως φαίνεται και στο σχήμα 4-5, η μέση υπερετήσια τιμή του όγκου τον μήνα Ιανουάριο φτάνει στα $63,59 \cdot 10^6 \text{m}^3$, το οποίο βρίσκεται μέσα στον εύρος των διαστημάτων εμπιστοσύνης, για διάστημα 95%, όπως φαίνεται και στον πίνακα 4-2. Η μικρότερη μέση τιμή εμφανίζεται τον μήνα Ιούλιο με τιμή ίση με $2,21 \cdot 10^6 \text{m}^3$.

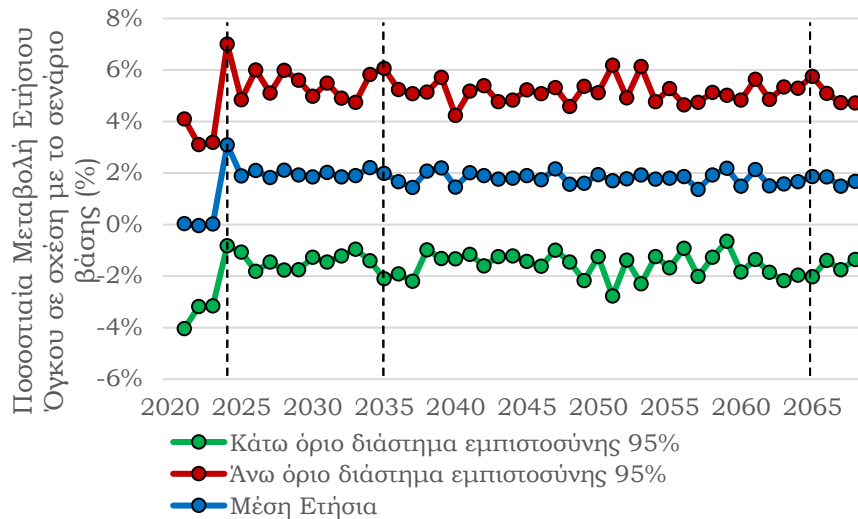
Πίνακας 4-2: Τιμές μέσου υπερειήσιου όγκου (hm³) σεναρίου 1

| Μήνας | Μέση Ετήσια | Κάτω Όριο Διαστ Εμπιστ 95% | Άνω Όριο Διαστ Εμπιστ 95% |
|-------------|-------------|----------------------------|---------------------------|
| Ιανουάριος | 63.59 | 60.40 | 66.79 |
| Φεβρουάριος | 51.94 | 49.87 | 54.00 |
| Μάρτιος | 38.49 | 37.28 | 39.69 |
| Απρίλιος | 23.02 | 22.21 | 23.83 |
| Μάιος | 12.82 | 12.35 | 13.29 |
| Ιούνιος | 5.17 | 4.89 | 5.45 |
| Ιούλιος | 2.21 | 2.03 | 2.39 |
| Αύγουστος | 2.74 | 2.40 | 3.08 |
| Σεπτέμβριος | 8.88 | 7.63 | 10.13 |
| Οκτώβριος | 23.52 | 20.65 | 26.40 |
| Νοέμβριος | 48.00 | 43.86 | 52.15 |
| Δεκέμβριος | 57.30 | 53.66 | 60.94 |



Σχήμα 4-6: Σύγκριση ετήσιου όγκου σεναρίου 1 με το σενάριο βάσης

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4-6, στο σενάριο 1 ο μέσος ετήσιος όγκος των παροχών σε σχέση με το βασικό σενάριο αυξήθηκε κατά $7,66 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ή κατά 2,31%. Ο μέσος μηνιαίος όγκος σε σχέση με το βασικό σενάριο αυξήθηκε κατά $17,30 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ή κατά 163,64%. Η μέση μηνιαία μεταβολή του όγκου μπορεί να φτάσει μέχρι και 406%. Τόσο μεγάλες μεταβολές παρατηρούνται σε μήνες με χαμηλούς όγκους απορροών. Με αυτόν τον τρόπο φαινομενικά η ποσοστιαία μεταβολή είναι μεγάλη αλλά ο πραγματικός όγκος απορροής είναι πολύ μικρός.



Σχήμα 4-7: Ποσοστιαία μεταβολή ετήσιου όγκου σεναρίου 1 σε σχέση με το μοντέλο βάσης

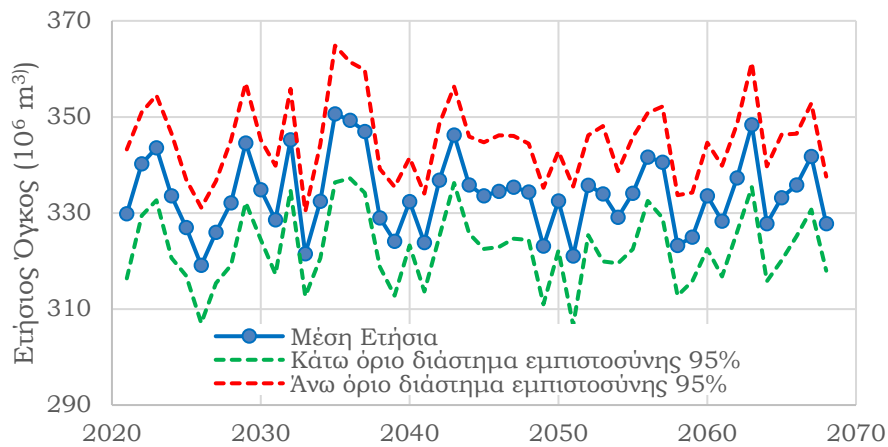
Σύμφωνα με το σχήμα 4-7, παρατηρείται μεγάλη ποσοστιαία αύξηση το έτος έναρξης πυρκαγιάς, το 2025, σε ποσοστό 2,1%. Ακόμη, διακρίνεται ότι το άνω όριο διαστήματος εμπιστοσύνης φτάνει μέχρι 7% αύξηση και εμφανίζει πολλές αιχμές κατά το χρονικό διάστημα της πυρκαγιάς, αλλά και κατά το στάδιο της αποκατάστασης. Το κάτω όριο διαστήματος εμπιστοσύνης για $\alpha=95\%$, μπορεί να φτάσει μέχρι και -4%, παρουσιάζοντας πολλές διακυμάνσεις το τελευταίο διάστημα του σταδίου της αποκατάστασης. Αξίζει να σημειωθεί πως με το πέρασμα του χρόνου παρουσιάζεται μείωση της ποσοστιαίας μεταβολής του ετήσιου όγκου του σεναρίου 1 με το σενάριο βάσης.

4.2.2 Σενάριο 2

Στο δεύτερο σενάριο θεωρείται ότι 'καίγεται' το νοτιότερο τμήμα της λεκάνης απορροής με έκταση 60,83km² και ποσοστό κάλυψης 7,35% της συνολικής έκτασης της λεκάνης. Λόγω της μικρής έκτασης που καίγεται στο σενάριο αυτό δεν αναμένεται μεγάλη διαφορά των όγκων απορροής σε σχέση με το βασικό σενάριο.

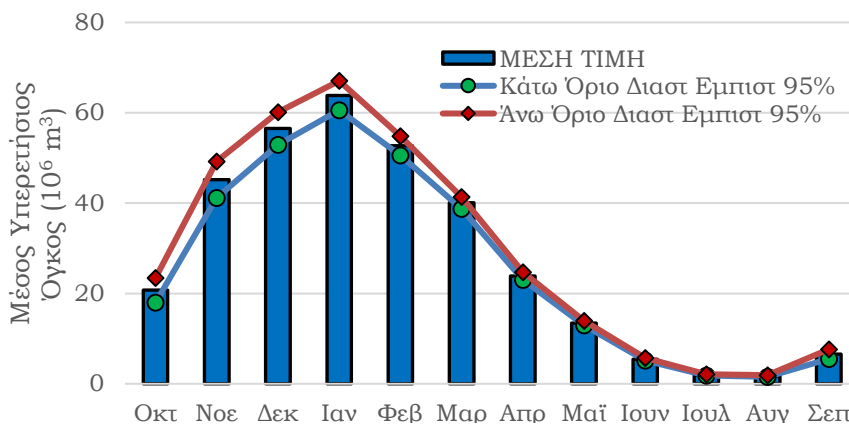
Όπως φαίνεται στο σχήμα 4-8, με τον μέσο ετήσιο όγκο, ο μέσος ετήσιος όγκος φτάνει στα 333.86*10⁶ m³. Ο μεγαλύτερος μέσος ετήσιος όγκος

φτάνει στα $350,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, η οποία εμφανίζεται το έτος 2035. Οι τιμές των μέσων ετήσιων όγκων διακυμαίνονται μέσα στα όρια εμπιστοσύνης.



Σχήμα 4-8: Ετήσιος όγκος απορροής σεναρίου 2.

Στο σενάριο 2 όπως φαίνεται και στο σχήμα 4-9, η μέση υπερετήσια τιμή του όγκου τον μήνα Ιανουάριο φτάνει στα $63,82 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, το οποίο βρίσκεται μέσα στον εύρος των διαστημάτων εμπιστοσύνης, για διάστημα 95%, όπως φαίνεται και στον πίνακα 4-3. Η μικρότερη μέση τιμή εμφανίζεται τον μήνα Ιούλιο με τιμή ίση με $1,73 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Όπως διαπιστώνεται οι τιμές αυτές είναι σχεδόν ίσες με τις τιμές του σεναρίου βάσης.

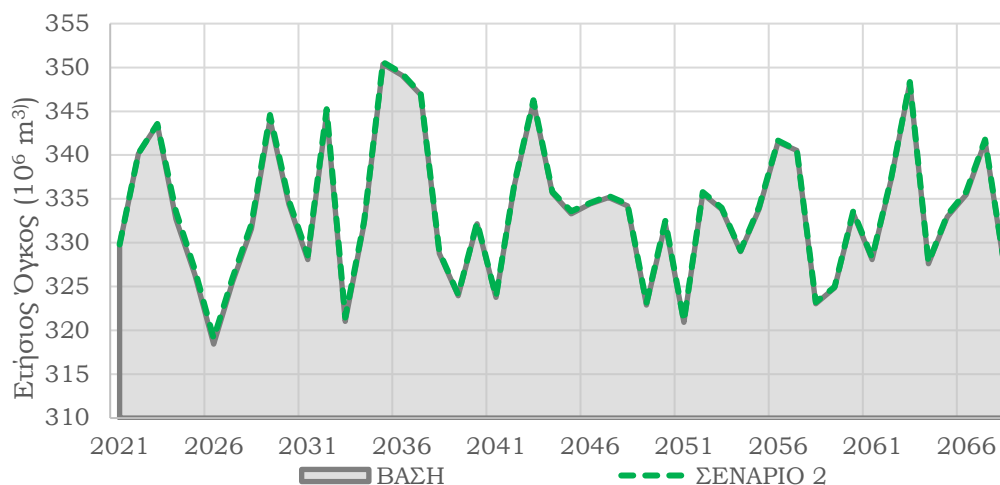


Σχήμα 4-9: Μέσος υπερετήσιος όγκος σεναρίου 2

Πίνακας 4-3: Τιμές μέσου υπερειήσιου όγκου (hm³) σεναρίου 2

| Μήνας | Μέση Ετήσια | Κάτω Όριο Διαστ Εμπιστ 95% | Άνω Όριο Διαστ Εμπιστ 95% |
|-------------|-------------|----------------------------|---------------------------|
| Ιανουάριος | 63.82 | 60.57 | 67.06 |
| Φεβρουάριος | 52.73 | 50.59 | 54.87 |
| Μάρτιος | 40.08 | 38.78 | 41.39 |
| Απρίλιος | 23.90 | 23.05 | 24.75 |
| Μάιος | 13.46 | 12.96 | 13.96 |
| Ιούνιος | 5.45 | 5.15 | 5.74 |
| Ιούλιος | 1.96 | 1.82 | 2.11 |
| Αύγουστος | 1.73 | 1.54 | 1.92 |
| Σεπτέμβριος | 6.61 | 5.54 | 7.67 |
| Οκτώβριος | 20.72 | 17.98 | 23.46 |
| Νοέμβριος | 45.17 | 41.13 | 49.21 |
| Δεκέμβριος | 56.55 | 52.92 | 60.18 |

Σύμφωνα με το σχήμα 4-10, στο οποίο γίνεται σύγκριση του σεναρίου 2 με το βασικό σενάριο, η διαφορά τους είναι μηδαμινή καθώς όπως προαναφέρθηκε το συγκεκριμένο σενάριο καταλαμβάνει μόνο το 7% του συνόλου της λεκάνης απορροής.

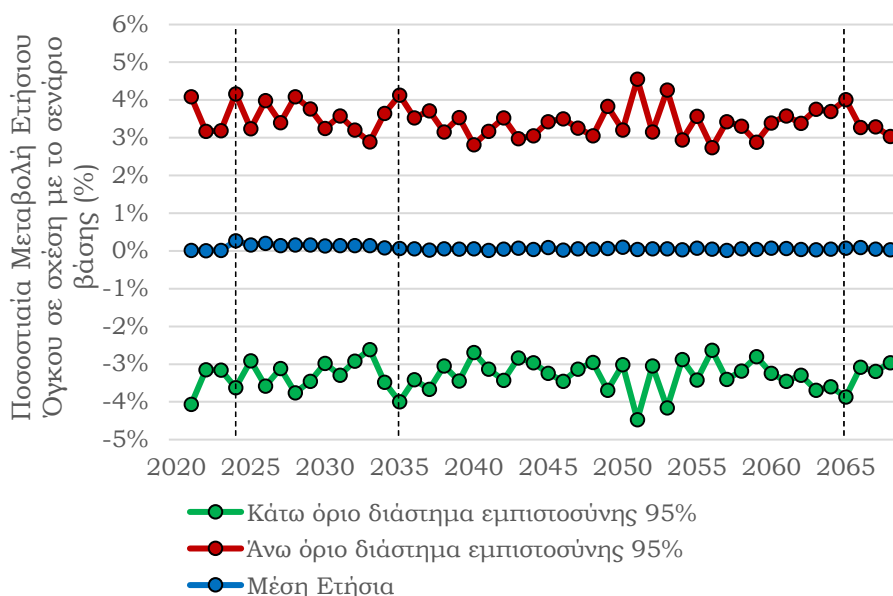


Σχήμα 4-10: Σύγκριση ετήσιου όγκου σεναρίου 2 με το σενάριο βάσης

Στο σενάριο 2 ο μέσος ετήσιος όγκος των απορροών σε σχέση με το βασικό σενάριο αυξήθηκε κατά $2,05 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ή κατά 0,62%. Ο μέσος μηνιαίος όγκος σε σχέση με το βασικό σενάριο αυξήθηκε κατά $16,85 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ή κατά 159,36%. Η μέση μηνιαία μεταβολή του όγκου μπορεί να φτάσει μέχρι

και 176%. Όπως αναφέρθηκε και στο σενάριο 1, μεγάλες μεταβολές εμφανίζονται σε μήνες με χαμηλούς όγκους απορροών.

Η συγκεκριμένη πυρκαγιά δεν επηρεάζει σημαντικά τον όγκο των απορροών. Λόγω της μικρής απορροής που έδειχνε η συγκεκριμένη έκταση στο μοντέλο είναι λογικό στην έξοδο της.



Σχήμα 4-11: Ποσοστιαία μεταβολή ετήσιου όγκου σεναρίου 2 σε σχέση με το μοντέλο βάσης

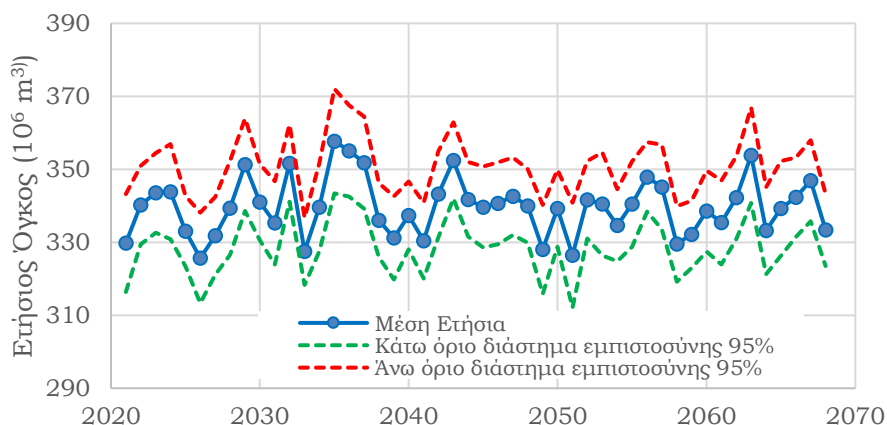
Σύμφωνα με το σχήμα 4-11, η μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση κατά την διάρκεια όλων των ετών εμφανίζεται με την έναρξης πυρκαγιάς, το 2025, σε ποσοστό 0,3%. Ακόμη, διακρίνεται ότι το άνω όριο διαστήματος εμπιστοσύνης φτάνει μέχρι 4,6% αύξηση και εμφανίζει πολλές αιχμές καθ' όλη την διάρκεια των ετών. Το κάτω όριο διαστήματος εμπιστοσύνης για $\alpha=95\%$, μπορεί να φτάσει μέχρι και -4,5%, παρουσιάζοντας πολλές διακυμάνσεις από την αρχή μέχρι το τέλος των συνθετικών χρονοσειρών.

4.2.3 Σενάριο 3

Στο τρίτο σενάριο θεωρείται ότι 'καιγονται' και τα δύο παραπάνω σενάρια ταυτόχρονα, με συνολική έκταση 246,36 km² και ποσοστό κάλυψης 29,75% της συνολικής έκτασης της λεκάνης απορροής.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4-12, που αφορά τον μέσο ετήσιο όγκο, ο μέσος ετήσιος όγκος φτάνει στα 339.69*10⁶ m³. Ο μεγαλύτερος μέσος ετήσιος

όγκος φτάνει στα $357,74 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, η οποία εμφανίζεται το έτος 2035. Οι τιμές των μέσων ετήσιων όγκων διακυμαίνονται μέσα στα όρια εμπιστοσύνης. Από τα τρία σενάρια είναι και αυτό που παρουσιάζει την μεγαλύτερη μεταβολή του όγκου των παροχών.

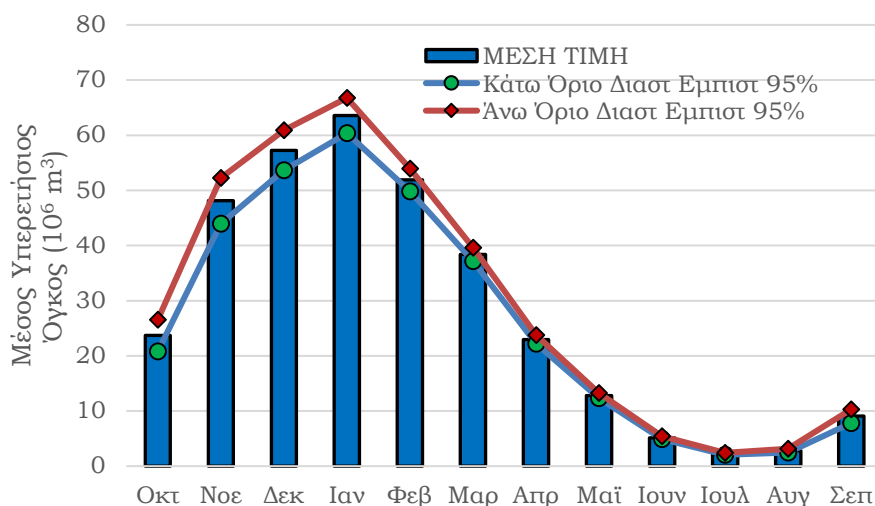


Σχήμα 4-12: Όγκος απορροής σεναρίου 3.

Πίνακας 4-4: Τιμές μέσου υπερειτήσιου όγκου (hm^3) σεναρίου 3

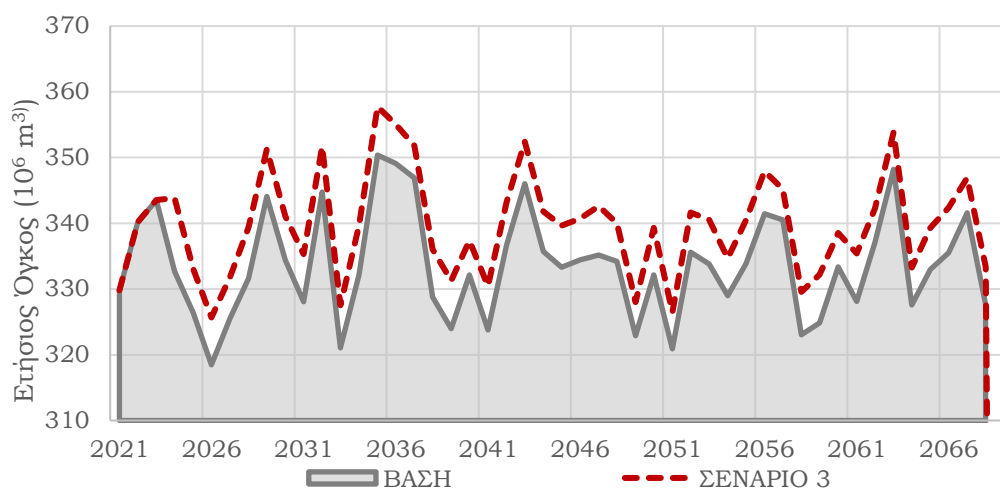
| Μήνας | Μέση Ετήσια | Κάτω Όριο Διαστ Εμπιστ 95% | Άνω Όριο Διαστ Εμπιστ 95% |
|--------------|--------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Ιανουάριος | 63.56 | 60.35 | 66.76 |
| Φεβρουάριος | 51.89 | 49.82 | 53.96 |
| Μάρτιος | 38.38 | 37.18 | 39.58 |
| Απρίλιος | 22.98 | 22.18 | 23.79 |
| Μάιος | 12.80 | 12.33 | 13.26 |
| Ιούνιος | 5.17 | 4.90 | 5.44 |
| Ιούλιος | 2.24 | 2.06 | 2.42 |
| Αύγουστος | 2.81 | 2.46 | 3.15 |
| Σεπτέμβριος | 9.06 | 7.79 | 10.33 |
| Οκτώβριος | 23.69 | 20.80 | 26.57 |
| Νοέμβριος | 48.11 | 43.96 | 52.27 |
| Δεκέμβριος | 57.27 | 53.63 | 60.91 |

Στο σενάριο 3 όπως φαίνεται και στο σχήμα 4-13, η μέση υπερειτήσια τιμή του όγκου τον μήνα Ιανουάριο φτάνει στα $63,56 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, το οποίο βρίσκεται μέσα στον εύρος των διαστημάτων εμπιστοσύνης, για διάστημα 95%, όπως φαίνεται και στον πίνακα 4-4. Η μικρότερη μέση τιμή εμφανίζεται τον μήνα Ιούλιο με τιμή ίση με $2,24 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.



Σχήμα 4-13: Μέσος υπερεπίστος όγκος σεναρίου 3

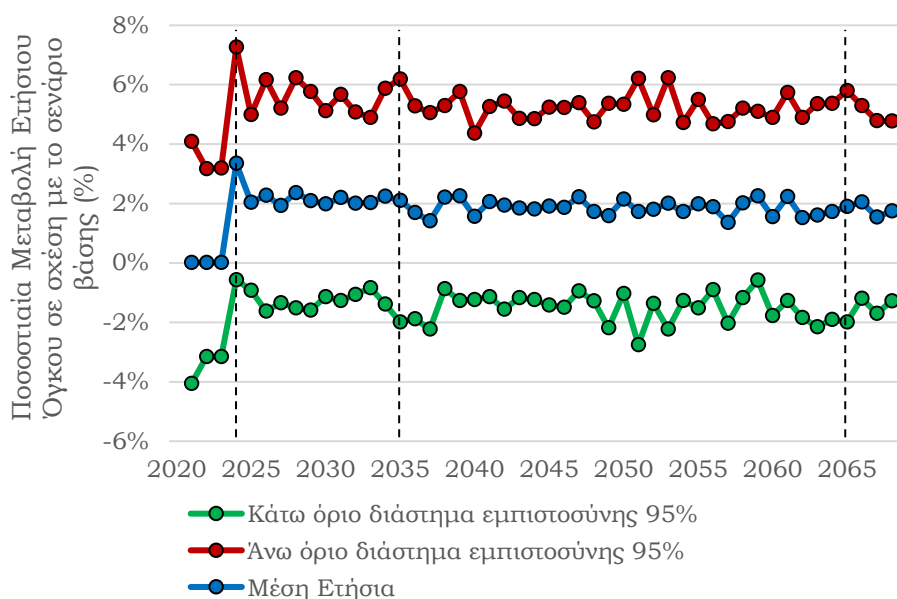
Στο σχήμα 4-14, γίνεται σύγκριση του σεναρίου 3 με το σενάριο της βάσης. Είναι το σενάριο με την μεγαλύτερη αναμενόμενη μεταβολή των όγκων των παροχών καθώς είναι και το σενάριο με την μεγαλύτερη μεταβολή χρήσεων γης σε ποσοστό ίσο με 29,75% του συνόλου της λεκάνης απορροής.



Σχήμα 4-14: Σύγκριση ετήσιου όγκου σεναρίου 3 με το σενάριο βάσης

Ο μέσος ετήσιος όγκος των απορροών σε σχέση με το βασικό σενάριο αυξήθηκε κατά $7,88 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ή κατά 2,37%. Ο μέσος μηνιαίος όγκος σε σχέση με το βασικό σενάριο αυξήθηκε κατά $17,32 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ή κατά 163,82%. Η μέση μηνιαία μεταβολή του όγκου μπορεί να φτάσει μέχρι και 416%.

Παρατηρώντας το σενάριο αυτό, τα συμπεράσματα που βγαίνουν είναι κοινά με το σενάριο 1 καθώς τα διαγράμματα και οι τιμές που παρουσιάζουν είναι σχεδόν ίδιες. Αυτό συμβαίνει διότι η διαφορά τους είναι ως προς την προσομοίωση είναι μικρή, δηλαδή για το σενάριο 3 προστίθενται στο σενάριο 1 και το σενάριο 2 που όπως προαναφέρθηκε, καταλαμβάνει μόνο το 7% της λεκάνης απορροής.



Σχήμα 4-15: Ποσοστιαία μεταβολή ετήσιου όγκου σεναρίου 3 σε σχέση με το μοντέλο βάσης

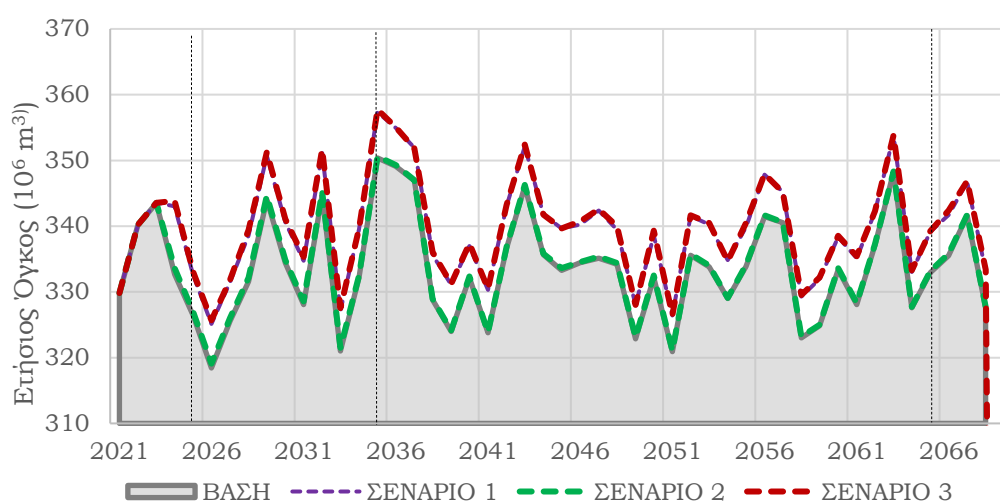
Σύμφωνα με το σχήμα 4-15, παρατηρείται μεγάλη ποσοστιαία αύξηση το έτος έναρξης πυρκαγιάς, το 2025, σε ποσοστό 3,3% και παρουσιάζει έντονη διακύμανση κατά την διάρκεια του σταδίου αποκατάστασης. Ακόμη, διακρίνεται ότι το άνω όριο διαστήματος εμπιστοσύνης φτάνει μέχρι 7,3% αύξηση και εμφανίζει πολλές αιχμές κατά το χρονικό διάστημα της πυρκαγιάς, αλλά και κατά το στάδιο της αποκατάστασης, με ποσοστό που φτάνει μέχρι και 6.2%. Το κάτω όριο διαστήματος εμπιστοσύνης για $\alpha=95\%$, μπορεί να φτάσει μέχρι και -4.1%, παρουσιάζοντας πολλές διακυμάνσεις το τελευταίο διάστημα του σταδίου της αποκατάστασης. Αξίζει να σημειωθεί πως, όπως και στο στάδιο 1 έτσι και σε αυτό, με το πέρασμα του χρόνου παρουσιάζεται μείωση της

ποσοστιαίας μεταβολής του ετήσιου όγκου του σεναρίου 3 με το σενάριο βάσης.

4.3 Συζήτηση Αποτελεσμάτων

4.3.1 Σύγκριση και Αξιολόγηση Σεναρίων

Στην παρούσα παράγραφο της εργασίας θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων των σεναρίων μεταξύ τους αλλά και σε σχέση με το βασικό σενάριο. Ακόμη, θα αναλυθούν τα αποτελέσματα ως προς την μεταβολή της βλάστησης κατά την διάρκεια του πέρασ του χρόνου.



Σχήμα 4-16: Σύγκριση ετήσιων όγκων απορροών

Από το σχήμα 4-16, διαπιστώνεται ότι τα σενάρια 1 και 3 είναι σχεδόν ίδια, πράγμα λογικό, αφού η διαφορά τους είναι στην προσθήκη του σεναρίου 2 στο σενάριο 1, δηλαδή της προσθήκης του 7% της συνολικής έκτασης της λεκάνης απορροής.

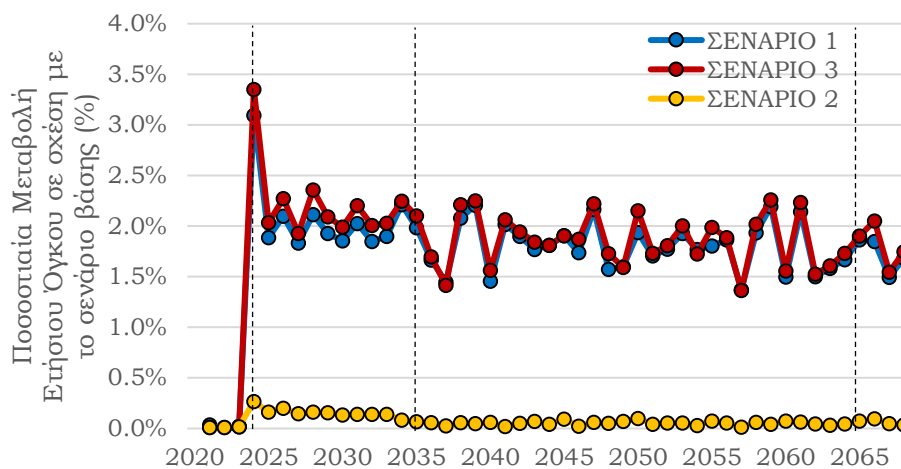
Στην μεγαλύτερη καμένη έκταση, που αφορά το σενάριο 3 και το σενάριο 1, παρουσιάζονται και οι μεγαλύτερες μεταβολές. Οι μεγαλύτερες μηνιαίες ποσοστιαίες μεταβολές υπάρχουν τους θερινούς μήνες, δεν αποτελεί όμως την απόλυτη μεταβολή καθώς αυτή είναι μικρή.

Πίνακας 4-5: Μέσος όγκος απορροής και ποσοστιαία μεταβολή κάθε σεναρίου με το σενάριο βάσης

| Μήνας | ΒΑΣΗ | ΣΕΝΑΡΙΟ 1 | | ΣΕΝΑΡΙΟ 2 | | ΣΕΝΑΡΙΟ 3 | |
|-------------|-------|-----------|------|-----------|-----|-----------|------|
| | Όγκος | Όγκος | % | Όγκος | % | Όγκος | % |
| Ιαν | 23.8 | 23.7 | 0.0 | 23.8 | 0.0 | 23.7 | 0.0 |
| Φεβ | 21.6 | 21.3 | 0.0 | 21.6 | 0.0 | 21.3 | 0.0 |
| Μαρ | 15.0 | 14.4 | 0.0 | 15.0 | 0.0 | 14.3 | 0.0 |
| Απρ | 9.3 | 8.9 | 0.0 | 9.2 | 0.0 | 8.9 | 0.0 |
| Μαϊ | 5.0 | 4.8 | -0.1 | 5.0 | 0.0 | 4.8 | -0.1 |
| Ιουν | 2.1 | 2.0 | -0.1 | 2.1 | 0.0 | 2.0 | -0.1 |
| Ιουλ | 0.7 | 0.8 | 0.1 | 0.7 | 0.0 | 0.8 | 0.2 |
| Αυγ | 0.6 | 1.0 | 0.6 | 0.6 | 0.0 | 1.0 | 0.7 |
| Σεπ | 2.5 | 3.4 | 0.4 | 2.6 | 0.0 | 3.5 | 0.4 |
| Οκτ | 7.7 | 8.8 | 0.1 | 7.7 | 0.0 | 8.8 | 0.2 |
| Νοε | 17.4 | 18.5 | 0.1 | 17.4 | 0.0 | 18.6 | 0.1 |
| Δεκ | 21.1 | 21.4 | 0.0 | 21.1 | 0.0 | 21.4 | 0.0 |

Όπως φαίνεται στον πίνακα 4-5, η μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή παρατηρείται τους μήνες μετά την θερινή περίοδο, από τον μήνα Αύγουστο μέχρι και τον μήνα Οκτώβριο. Με μεγαλύτερη αυτή του Αυγούστου, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι η μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή δεν σημαίνει και μεγάλη αύξηση του όγκου απορροής.

Για το σενάριο 1 και 3, τους μήνες Μάιο και Ιούνιο παρατηρούνται αρνητικές ποσοστιαίες μεταβολές. Αυτό συμβαίνει διότι τους μήνες αυτούς ο όγκος της απορροής μειώνεται σε σχέση με το σενάριο της βάσης.



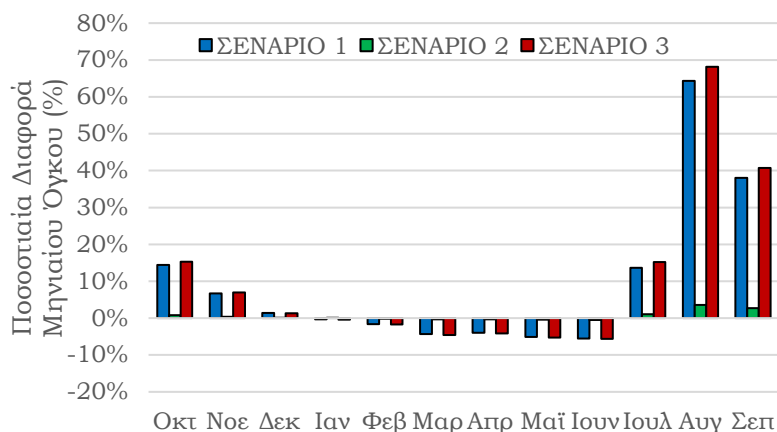
Σχήμα 4-17: Ποσοστιαία μεταβολή ετήσιου όγκου όλων των σεναρίων σε σχέση με το σενάριο βάσης

Σύμφωνα με το σχήμα 4-17, βγαίνει το συμπέρασμα ότι αρχικά, για τα έτη 2021-2024 που προσομοιώνεται το αρχικό στάδιο φαίνεται πως όλα τα σενάρια παρουσιάζουν κοινές τιμές, ειδικά στις αιχμές.

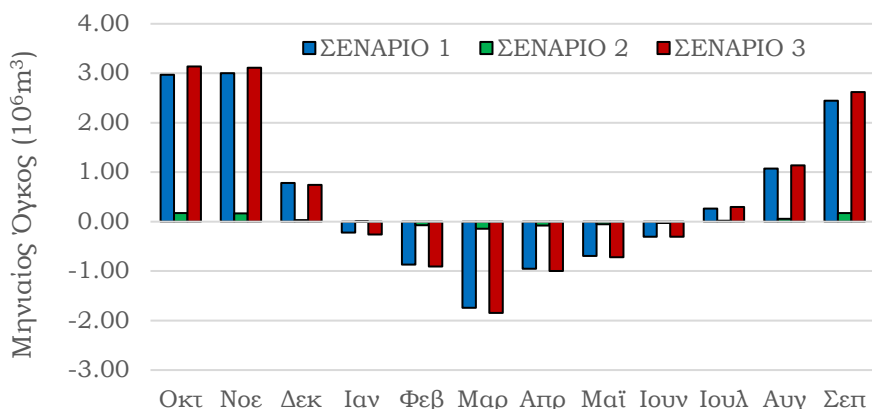
Για τα έτη 2025-2034, όπου και προσομοιώνεται η περίοδος της πυρκαγιάς, αρχίζουν να φαίνονται οι πρώτες μεγάλες μεταβολές. Το σενάριο 3 έχει ελαφρώς μεγαλύτερη μεταβολή, που φτάνει στο 3,3%, από το σενάριο 1, που φτάνει στο 3,1%, σε σχέση με το σενάριο βάσης. Το δεύτερο σενάριο, όπως είναι αναμενόμενο, λόγω της έκτασης τους δεν παρουσιάζει μεγάλη μεταβολή.

Όπως και στο προηγούμενο χρονικό διάστημα, στην περίοδο της πυρκαγιάς, το σενάριο με την μεγαλύτερη μεταβολή είναι το τρίτο και πολύ κοντά στις τιμές είναι και το πρώτο. Κατά το στάδιο της αποκατάστασης, που αφορά τα έτη 2035-2064, η μεγαλύτερη μεταβολή που παρατηρείται κατά την διάρκεια των ετών είναι στο σενάριο 3 με ποσοστό που ισούται με 2,3% για τα έτη 2039 και 2059, ενώ η μικρότερη ετήσια ποσοστιαία μεταβολή παρατηρείται στο σενάριο 2 με ποσοστό ίσο με 0,1%. Η μεταβολή αυτή, είναι λογική καθώς στο στάδιο αυτό η βλάστηση που επικρατεί, αραιά βοσκοτόπια, ευνοεί την ανάπτυξη απορροής.

Στο τελικό στάδιο, για τα έτη 2065-2070, φαίνεται ότι το μοντέλο σε όλα τα σενάρια άρχισε να πλησιάζει πάλι τις τιμές του βασικού σεναρίου. Με το πέρας του χρόνου η ετήσια ποσοστιαία μεταβολή φαίνεται να φθίνει. Ίσως αν γινόταν προσομοίωση για περισσότερα υδρολογικά έτη να ερχόντουσαν ακόμη σε πιο κοντινές τιμές.



Σχήμα 4-18: Ποσοστιαία διαφορά μηνιαίου όγκου



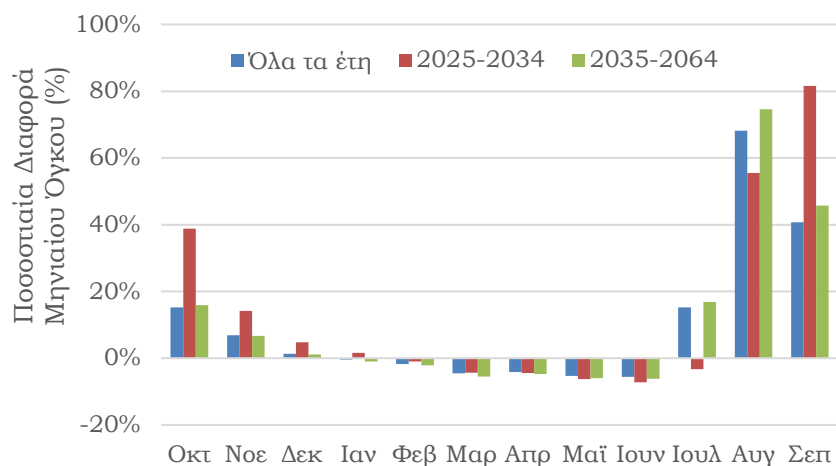
Σχήμα 4-19: Απόλυτη διαφορά μηνιαίου Όγκου

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, και με βάση τα σχήματα 4-18 και 4-19, διαπιστώνεται ότι ενώ η ποσοστιαία μηνιαία διαφορά του όγκου κάθε σεναρίου ξεχωριστά με το σενάριο βάσης, εμφανίζει μεγάλο ποσοστό τον Αύγουστο, η μεγάλη απόλυτη διαφορά του μηνιαίου όγκου εμφανίζεται τους μήνες Οκτώβρη και Νοέμβρη. Αυτό συμβαίνει διότι τους θερινούς μήνες οι απορροές είναι πολύ μικρές, οπότε η όποια μεταβολή εμφανίζει μεγάλη ποσοστιαία αύξηση, ενώ από την άλλη μεριά τον Οκτώβρη και τον Νοέμβρη παρατηρείται μεγάλη απόλυτη διαφορά μηνιαίου όγκου διότι συναντώνται οι πρώτες σημαντικές βροχοπτώσεις.

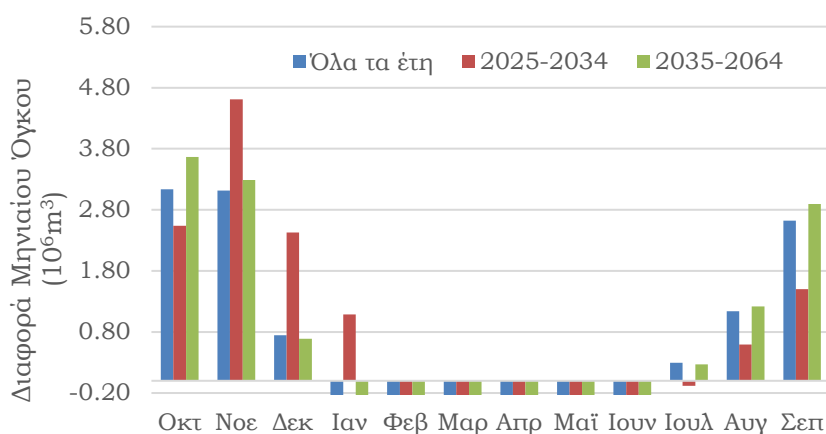
4.3.2 Σύγκριση επιμέρους μεταβολών

Για την περαιτέρω διερεύνηση των αποτελεσμάτων του θέματος, αρχικά έγινε έρευνα της μεταβολής του μηνιαίου όγκου που παρατηρείται στο σενάριο 3, το σενάριο δηλαδή με την μεγαλύτερη μεταβολή σε σχέση με το σενάριο βάσης. Ακόμη, έγινε επιμέρους διαχωρισμός των μεταβολών της βλάστησης που πραγματοποιήθηκε στα σενάρια.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4-20 και 4-21, το σύνολο των ετών όπου παρατηρείται μεταβολή βλάστησης, φαίνεται να εμφανίζεται μεγαλύτερη ποσοστιαία μηνιαία μεταβολή τον Αύγουστο όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Δηλαδή στα έτη 2025-2034, η διαφορά του μηνιαίου όγκου αυξάνεται από τον Αύγουστο και φτάνει μέχρι τον Ιανουάριο, με μέγιστη τιμή τον Νοέμβρη που είναι ίση με $4,61 \cdot 10^6 \text{m}^3$.



Σχήμα 4-20: Ποσοστιαία διαφορά μηνιαίου όγκου σταδίων αποκατάστασης για το σενάριο 3

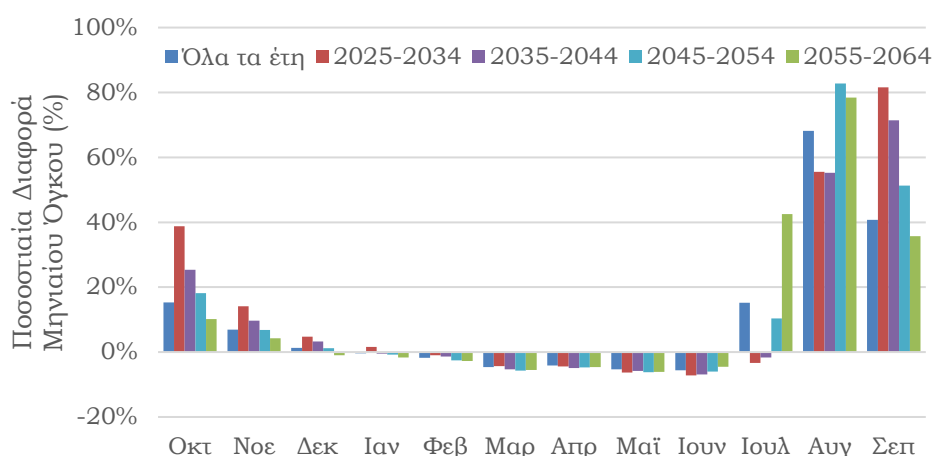


Σχήμα 4-21: Διαφορά μηνιαίου όγκου σταδίων αποκατάστασης για το σενάριο 3

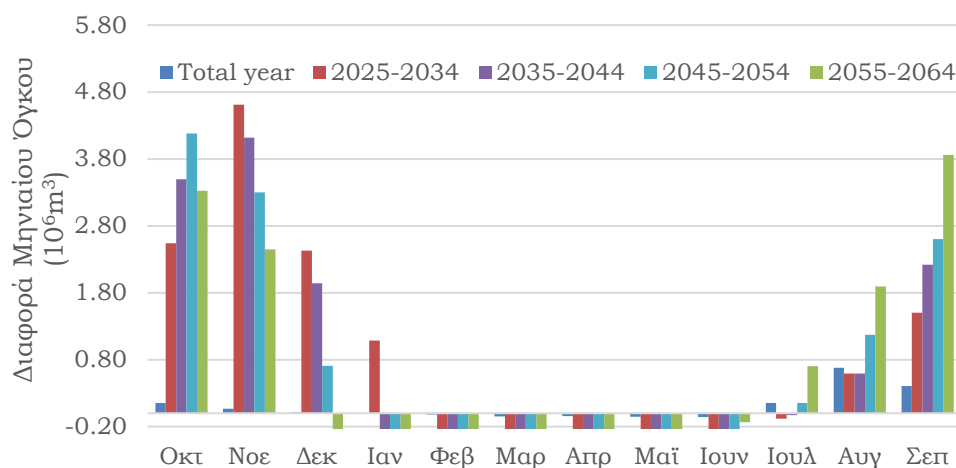
Φαίνεται λοιπόν, ότι για το διάστημα της πυρκαγιάς ο μήνας που επηρεάστηκε περισσότερο είναι ο Νοέμβριος. Όσο αφορά τα χρόνια της αποκατάστασης, τα έτη 2035-2064, παρουσιάζουν αύξηση της μηνιαίας διαφοράς του όγκου. Η μεγαλύτερη αύξηση συναντάται τον Οκτώβρη με τιμή που ισούται με $3.67 \cdot 10^6 \text{m}^3$. Παρατηρείται λοιπόν, ότι η μεγαλύτερη απορροή εμφανίζεται κατά το χρονικό διάστημα της πυρκαγιάς. Αξιοσημείωτη αύξηση εμφανίζεται τον Ιανουάριο σε σχέση με τα υπόλοιπα στάδια.

Παρακάτω, πραγματοποιήθηκε διαχωρισμός του σταδίου αποκατάστασης ανά δεκαετία.

Αρχικά, όπως φαίνεται στο σχήμα 4-22 και 4-23, για τα έτη 2025-2034, παρατηρείται η ίδια μεταβολή όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Στην επόμενη δεκαετία, όπου είναι και η πρώτη δεκαετία του σταδίου αποκατάστασης (2035-2044), η μηνιαία διαφορά του όγκου για τους μήνες Σεπτέμβρη και Οκτώβρη, εμφανίζεται μεγαλύτερη σε σχέση με την δεκαετία της πυρκαγιάς.



Σχήμα 4-22: Μηνιαία ποσοστιαία διαφορά όγκου σεναρίου 3 με το σενάριο βάσης, σε επιμέρους διαμερισμό ανά δεκαετία



Σχήμα 4-23: Μηνιαία διαφορά όγκου σεναρίου 3 με το σενάριο βάσης, σε επιμέρους διαμερισμό ανά δεκαετία

Η μεγαλύτερη τιμή που παίρνει είναι ίση με $4,61 \cdot 10^6 \text{m}^3$ και εμφανίζεται τον Νοέμβριο. Για την δεκαετία 2045-2054, η μέγιστη μηνιαία διαφορά

του όγκου του σεναρίου 3 με το σενάριο βάσης εμφανίζεται τον Οκτώβρη με τιμή ίση με $3,75 \cdot 10^6 \text{m}^3$. Για την δεκαετία αυτή, μεταβολή συναντάται λιγότερους μήνες σε σχέση με τις προηγούμενες δεκαετίες, δηλαδή τους μήνες Ιούλιο με Νοέμβριο. Την τελευταία δεκαετία του σταδίου αποκατάστασης, δηλαδή την δεκαετία 2055-2064, η μέγιστη μηνιαία διαφορά του όγκου εμφανίζεται τον Οκτώβρη με τιμή $3,67 \cdot 10^6 \text{m}^3$.

Είναι εμφανές λοιπόν, ότι η μεγαλύτερη διαφορά των μηνιαίων όγκων παρουσιάζεται την δεκαετία της πυρκαγιάς. Τις επόμενες τρεις δεκαετίες, η αύξηση της διαφοράς των όγκων, τους μήνες Σεπτέμβρη και Οκτώβρη, είναι μεγαλύτερη από την δεκαετία της πυρκαγιάς, όμως από τον Νοέμβρη μέχρι και τον Ιανουάριο, οι τρεις δεκαετίες που αφορούν την αποκατάσταση της βλάστησης μειώνονται σημαντικά σε σχέση με το στάδιο της πυρκαγιάς.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

5.1 Σύνοψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε διερεύνηση των υδρολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην λεκάνη απορροής της Καρύταινας κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες που προκύπτουν μετά από πυρκαγιά.

Η εκπόνηση της εργασίας πραγματοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού ArcMap και του υδρολογικού μοντέλου SWAT, τα οποία και αποτελούν βασικά εργαλεία με σκοπό την υδρολογική προσομοίωση σε επίπεδο λεκάνης απορροής.

Κατά την εκπόνηση της εργασίας προφανώς και παρουσιάστηκαν πολλά προβλήματα. Αρχικά, λόγω της αμερικάνικης προέλευσης του μοντέλου SWAT, παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις ως προς την βάση δεδομένων του μοντέλου. Ένα ακόμη βασικό πρόβλημα είναι η έλλειψη μεγάλων χρονοσειρών μετεωρολογικών δεδομένων καθώς και παροχών. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν τελικά αφορούν τα έτη 2001-2014 όπου βρέθηκαν και τα μοναδικά συνεχής δεδομένα παροχών. Αυτό που παρατηρεί κανείς με βάση την παρούσα έρευνα είναι ότι μετά την πυρκαγιά υπάρχει μεταβολή της απορροής, εξαρτάται όμως από το ποσοστό της λεκάνης που καίγεται, από το πόσο επηρεάζει το τμήμα της λεκάνης το σύνολο της λεκάνης απορροής καθώς και την χρήση γης που επικρατούσε στην περιοχή πριν την πυρκαγιά.

Εάν υπήρχαν μετεωρολογικά δεδομένα και δεδομένα παροχών θα υπήρχε μεγαλύτερη σιγουριά για τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

5.2 Συμπεράσματα

- Με την χρήση ενός κατανεμημένου μοντέλου, και στην περίπτωση αυτή του υδρολογικού μοντέλου SWAT, γίνεται ακριβή πρόβλεψη του υδατικού δυναμικού μίας λεκάνης απορροής (ανάλογα με τα

δεδομένα εισόδου) καθώς και η μεταβολή του σε κάποια τυχών αλλαγή των συνθηκών του περιβάλλοντος της περιοχής.

- Τα σενάρια των πυρκαγιών, ακόμη και αυτά με την μεγαλύτερη έκταση, δεν εμφάνισε μεγάλη αύξηση των απορροών, κάτι που εξηγείται λόγω των μικρών ποσοστών έκτασης των σεναρίων πυρκαγιάς και της μικρής συνεισφοράς απορροής των υπολεκανών που κάηκαν στην συνολική απορροή της λεκάνης.
- Οι ετήσιες απορροές, ακόμη και στο σενάριο με την μεγαλύτερη έκταση, δεν έδειξαν σημαντική αύξηση αλλά οι μηνιαίες ποσοστιαίες μεταβολές παρουσίασαν αρκετά σημαντική αύξηση, κάτι που όμως εμφανίζεται σε μήνες με χαμηλή απορροή.
- Οι μήνες που φαίνεται να επηρεάστηκαν περισσότερο είναι αυτοί που δέχονται τις περισσότερες ποσότητες κατακρημνισμάτων, δηλαδή από τον Οκτώβρη μέχρι και τον Φεβρουάριο.
- Στο σενάριο 1 ο μέσος ετήσιος όγκος των παροχών σε σχέση με το βασικό σενάριο αυξήθηκε κατά $7,66 \cdot 10^6 \text{m}^3$ ή κατά 2,31%.
- Στο σενάριο 2 ο μέσος ετήσιος όγκος των απορροών σε σχέση με το βασικό σενάριο αυξήθηκε κατά $2,05 \cdot 10^6 \text{m}^3$ ή κατά 0,62%.
- Στο σενάριο 3 ο μέσος ετήσιος όγκος των απορροών σε σχέση με το βασικό σενάριο αυξήθηκε κατά $7,88 \cdot 10^6 \text{m}^3$ ή κατά 2,37%.
- Το σενάριο 3 έχει ελαφρώς μεγαλύτερη μηνιαία ποσοστιαία μεταβολή, που φτάνει στο 3,3%, από το σενάριο 1, που φτάνει στο 3,1%, σε σχέση με το σενάριο βάσης, κατά το έτος έναρξης της πυρκαγιάς.
- Η μεγαλύτερη διαφορά των μηνιαίων όγκων παρουσιάζεται την πρώτη δεκαετία της πυρκαγιάς.

5.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Μετά την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας είναι σημαντικό να τονιστεί η χρησιμότητα των υδρολογικών μοντέλων καθώς και η ανάγκη εξέλιξής τους.

Λόγω της προέλευσης του μοντέλου SWAT, όπως αναφέρθηκε, δημιουργούνται πολλά προβλήματα στην συμβατότητα των δεδομένων σε

περιοχές εκτός ΗΠΑ και πιο συγκεκριμένα στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στην Ελλάδα. Θα πρέπει λοιπόν να διερευνηθεί και να διευκολυνθεί η συμβατότητα του υδρολογικού μοντέλου στα Ευρωπαϊκά δεδομένα.

Όπως διαπιστώθηκε, είναι σημαντικό να υπάρχουν επαρκή και ακριβή δεδομένα, πράγμα που οδηγεί στην μείωση της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων. Η ύπαρξη μετεωρολογικών σταθμών σε περισσότερα και πιο πυκνά σημεία καθώς και η εύκολη πρόσβαση στα δεδομένα που θα συλλέγουν, θα οδηγήσει τον εκάστοτε μελετητή στην εκπόνηση πληρέστερων υδρολογικών μελετών. Παρόμοιο πρόβλημα υπάρχει και με τα δεδομένα παροχών.

Ακόμη, όσον αφορά την παρούσα εργασία ενδιαφέρον θα είχε να εφαρμοσθεί κάποιο κλιματικό σενάριο.

Τέλος, η παρούσα εργασία πραγματεύεται την μεταβολή του υδρολογικού δυναμικού μετά από σενάριο πυρκαγιάς. Ενδιαφέρον θα είχε στο μέλλον η μελέτη και της ποιοτικής άποψης των σεναρίων αυτών π.χ. διάβρωση, στερεομεταφορά, μεταβολή ποιότητας υδάτων και αέρα, ώστε να υπάρξουν πιο ολοκληρωμένα συμπεράσματα για την λεκάνη απορροής της Καρύταινας. Ακόμη, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η δημιουργία μεγαλύτερης συνθετικής χρονοσειράς στην οποία να πραγματοποιούταν ένα σενάριο με δύο πυρκαγιές σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και να γινόταν διερεύνηση στο κατά πόσο θα επανέλθει ή όχι το υδατικό δυναμικό στην πρότερη κατάσταση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση

Anand, J., Gosain, A. K., & Khosa, R. (2018). Prediction of land use changes based on Land Change Modeler and attribution of changes in the water balance of Ganga basin to land use change using the SWAT model. *Science of the total environment*, 644, 503-519.

Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah, R.S., Williams J.R., (1998). 'Large area hydrologic modelling and assessment part I: model development' *Journal of American Water Resources Association*. Vol. 34, No. 1, 73-89.

Bal, M., Dandpat, A. K., & Naik, B. (2021). Hydrological modeling with respect to impact of land-use and land-cover change on the runoff dynamics in Budhabalanga river basing using ArcGIS and SWAT model. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23, 100527.

Biron, P. 1994. Le cycle de l'eau en forêt de moyenne montagne: flux de sève et bilans hydriques stationnels (Bassin versant du Strengbach à Audure Hautes Vosges). PhD dissertation, Louis Pasteur University, Strasbourg.

Bournas, A., (2021). Increasing the Efficiency of the Sacramento Model on Event Basis in a Mountainous River Basin, *Environmental Processes*, (accepted, awaiting publication)

Boskidis, I., Gikas, G. D., Sylaios, G. K., & Tsihrintzis, V. A. (2012). Hydrologic and water quality modeling of lower Nestos river basin. *Water resources management*, 26, 3023-3051.

CPC Global Unified Temperature data provided by the NOAA PSL, Boulder, Colorado, USA, (<https://psl.noaa.gov>)

DeBano LF, Daniel GL, Ffolliot PF (1998). *Fire's Effects on Ecosystems*. John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-471-16356-5

Duwig, C. 1994. Elément de modélisation de l'interception des pluies par quatre espèces d'arbres de type méditerranéen. DEA Mécanique des Milieux Géophysiques et Environnement. UJF, CEMAGREF, Aix-en-Provence, France.

Eagleson, P.S., (1970). *Dynamic Hydrology*. McGraw Hill, New York, N.Y. USA.

FAO. 1962. Forest influences: an introduction to ecological forestry. FAO Forestry Series No. 9. Rome.

Gassman P. W., Reyes M. R., Green C. H., Arnold J. G., 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. Transactions of the ASABE, American Society of Agricultural and Biological Engineers, ISSN 0001-2351, Vol. 50(4): 1211-1250.

Ghimire, U., Akhtar, T., Shrestha, N.K. et al. A Long-term Global Comparison of IMERG and CFSR with Surface Precipitation Stations. Water Resour Manage 36, 5695–5709 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03328-5>

Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Xie, P. and Yoo, S.H., 2015. NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG). Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version, 4(26).

Ingraham, N.L., and R.A. Matthews. 1988. Fog drip as a source of groundwater recharge in Northern Kenya. Water Resources Research 24:1406-1410.

Kerfoot, O. 1968. Mist precipitation on vegetation. Forestry Abstracts 29:8-20.

Lebedev, A.V. 1982. Cidrologicheskaya rol gornykh lesov Sibiri (Hydrological role of Siberian mountain forests). Nauka, Novosibirsk (in Russian).

Loewe, F. 1960. Fog precipitation (A review). Australia Bureau of Meteorology, Seminar on Rain, August 1960, Session 2, paper 3. Sydney.

Neitsch S. L., Arnold J. G., Kiniry J. R., Williams J. R., 2009. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Blackland Research Center, Texas AgriLife Research, Temple, Texas.

Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.K., Williams J.R. (2011): Soil and Water Assesment Tool, Theoretical Documentation Version 2009, Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406

Meunier, M., N. Mathys, and J.P. Cambon. 1995. Panorama synthétique des mesures d'érosion effectuées sur trois bassins du site expérimental de Draix. Compte rendu de recherches No. 3. BVRE de Draix. Série Etudes No. 21. Département Equipements pour l'Eau et l'Environnement, Draix France.

Molchanov, A.A. 1973. Vlianie lesa na okruchaiushchuiu sredu (Forest effects on the environment). Nauka, Moscow (in Russian).

Papathanasiou C, Makropoulos C, Mimikou M (2015). Hydrological modelling for flood forecasting: Calibrating the post-fire initial conditions. *Journal of Hydrology* 529(3): 1838-1850. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.07.038

Paudel, M., Nelson, E. J., Downer, C. W., & Hotchkiss, R. (2011). Comparing the capability of distributed and lumped hydrologic models for analyzing the effects of land use change. *Journal of hydroinformatics*, 13(3), 461-473.

Pobedinsky, A.V. 1979. Vodookhrannaya i pochvozashchitnaya rol lesov (Water-protection and soil-conservation role of forests). *Lesnaya promyshlennost*, Moscow (in Russian).

Price, J.S. 1992. Blanket bog in Newfoundland, Part 1. The occurrence and accumulation of fogwater deposits. *Journal of Hydrology* 135:87-101.

Rakhmanov, V.V. 1981. *Lesnaya hydrologia* (Forest hydrology). Results in science and technics. *Lesovedenie i lesovodstvo*, Moscow, VINITI, vol. 3 (in Russian).

USDA Agricultural Research Service. (n.d.). Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Retrieved from <https://www.ars.usda.gov/midwest-area/west-lafayette-in/nsrl/swat/>

Ελληνική

Αθανασιάδης Ν., 1986, Δασική Φοιτοκοινωνιολογία, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Γιακούδη – Γιαπούλη.

Γκόφας Α (2001). 'Εγχειρίδιο Δασοπροστασίας'. Γιακούδη-Γιαπούλη, 342 σελ., ISBN13: 9789607425409

Καλογερόπουλος Κ., 2011, 'Αξιοποίηση του υδρολογικού μοντέλου SWAT στην διερεύνηση δημιουργίας λιμνοδεξαμενών', Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας

Μιμίκου Μ., 2006, 'Τεχνολογία Υδατικών Πόρων', 3η Έκδοση, Αθήνα, Ελλάδα.

Μπαλάσκας, Α. (2018). Υδρολογική προσομοίωση του ποταμού Αλιάκμονα κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες κάλυψης γης.

Μπαλούτσος, Γ., Αθ. Μπουρλέτσικας, και Κ. Καούκης. 2005. Μελέτη και διερεύνηση χαρακτηριστικών ομιχλοβροχής στο ελατοδάσος Αγίου Νικολάου Ευρυτανίας. Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα, Σειρά II, 16:34-45.

Μπατέλης Σ., 2012, 'Επίδραση των πυρκαγιών στο υδατικό δυναμικό λεκανών απορροής: Η περίπτωση του ποταμού Ενιπέα Θεσσαλίας', Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών (Bachelor's thesis).

Μπουρλέτσικας Α., Προύτσος Ν., 2012, 'Το νερό στα δάση', WWF Ελλάς

Ντάφης, Σ. 1973. Ταξινόμηση της δασικής βλαστήσεως της Ελλάδος. Επιστημονική Επετηρίς Γεωπονικής και Δασολογικής Σχολής ΑΠΘ

Ραδόγλου Κ., Κορακάκη Ε., 2012, 'Οι λειτουργίες των δασών στη γη: υδατικό στρες και επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής', WWF Ελλάς

Τσιχριντζής Α., 2021, 'Εφαρμογή του μοντέλου SWAT στη λεκάνη απορροής του ποταμού Eel (Καλιφόρνια, ΗΠΑ) κάτω από συνθήκες αλλαγής χρήσεων γης', Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών.