



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:
ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

Ανάπτυξη μεθοδολογίας διαστασιολόγησης συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στον ταμειευτήρα Καστρακίου

Μανίκας Κωνσταντίνος

Επιβλέπων: Ευάγγελος Μπαλτάς, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα , Οκτώβριος 2023

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαχείριση της ενέργειας, η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών και η πρόσβαση του συνόλου του πληθυσμού σε μία σύγχρονη ενεργειακή παραγωγή, πιο πράσινη και φιλική προς το περιβάλλον, αποτελούν μερικές από τις μεγαλύτερες προκλήσεις με τις οποίες έρχεται αντιμέτωπη η ανθρωπότητα. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν γίνει προσπάθειες για περιορισμό της χρήσης των ορυκτών καυσίμων, παρόλα αυτά η διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) παραμένει ακόμα σε χαμηλά επίπεδα. Αυτό οφείλεται, πέρα από ένα σύνολο κοινωνικών, πολιτικών οικονομικών λόγων, στην ίδια τη φύση των συγκεκριμένων πηγών, η οποία χαρακτηρίζεται από έντονη στοχαστικότητα. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων η ενέργεια που παράγεται από τις ΑΠΕ εξαρτάται άμεσα από παράγοντες με μεγάλη αβεβαιότητα, όπως ο άνεμος, η διαθέσιμη ηλιοφάνεια, η υδρολογική διαίτα ενός ποταμού. Η αβεβαιότητα αυτή καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την ενσωμάτωση των ΑΠΕ σε ένα δίκτυο, καθώς αυξάνει σημαντικά της πολυπλοκότητά του, ενώ παράλληλα η διείσδυσή τους πέρα από κάποιο όριο έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της αξιοπιστίας του δικτύου. Για την αντιμετώπιση των παραπάνω ζητημάτων και την διαμόρφωση μιας ενεργειακής παραγωγής βασισμένης σε πηγές φιλικές προς το περιβάλλον, καθοριστικός είναι ο ρόλος των έργων αποθήκευσης ενέργειας.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, αναπτύσσεται μεθοδολογία για τη διαμόρφωση ενός συστήματος ενεργειακής παραγωγής στον ταμιευτήρα Καστρακίου με χρήση ΑΠΕ (φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες) και παράλληλη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας. Η αποθήκευση ενέργειας πραγματοποιείται μέσω αντλησιοταμίευσης, κατά την οποία η πλεονάζουσα ενέργεια αποθηκεύεται ως υδροδυναμική σε δεύτερο εικονικό ταμιευτήρα, ο οποίος χωροθετείται ανάντη του ταμιευτήρα του Καστρακίου. Το σύστημα που διαμορφώνεται αξιοποιεί τις ήδη υπάρχουσες υποδομές (ταμιευτήρας Καστρακίου) και με το ελάχιστο περιβαλλοντικό κόστος και την ελάχιστη παραγωγή θερμοκηπικών αερίων, διασφαλίζει μια αποτελεσματική και βιώσιμη ενεργειακή παραγωγή.

Το μεθοδολογικό πλαίσιο της εργασίας περιλαμβάνει, την ανάπτυξη μοντέλου παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας, τη διαστασιολόγηση αιολικού και φωτοβολταϊκού πάρκου, την αξιολόγηση το σύστημα ως προς τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών, αλλά και ως προς τη δυνατότητα διαχείρισης των ενεργειακών ελλειμμάτων και πλεονασμάτων, όπως αυτά προκύπτουν από τη διαλείπουσα-στοχαστική παραγωγή των ΑΠΕ. Η προσομοίωση του συστήματος πραγματοποιείται για διάστημα 40 ετών με ωριαίο χρονικό βήμα. Βασικές εισοδοί στο μοντέλο είναι η ταχύτητα του ανέμου και ηλιακή ακτινοβολία, ενώ στις εξόδους περιλαμβάνονται η παραγόμενη ενέργεια, τα ποσοστά κάλυψης των ενεργειακών αναγκών, το ποσοστό συμμετοχής της κάθε πηγής στο ενεργειακό μίγμα.

Από τη διαδικασία διαστασιολόγησης προκύπτει ότι θα εγκατασταθούν 40 ανεμογεννήτριες Adani 5.2-160, 5 ανεμογεννήτριες Enercon 126/7580 και 5 ανεμογεννήτριες Enercon E 101. Το αιολικό πάρκο έχει εγκατεστημένη ισχύ 258.15 MW. Το φωτοβολταϊκό πάρκο, διαθέτει εγκατεστημένη ισχύ 0.63 MW και η συνολική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πάνελ ανέρχεται 2735 m². Η μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια από τις συγκεκριμένες εγκαταστάσεις ανέρχεται στις 649.8 GWh. Η μονάδα αντλησιοταμίευσης συνεισφέρει σε ποσοστό 27.89% στη συνολική παραγόμενη ενέργεια, ενώ αυξάνει σημαντικά το ποσοστό κάλυψης των ενεργειακών αναγκών. Για το σύνολο των ετών προσομοίωσης το ποσοστό από 50.47% ανέρχεται, λόγω της αντλησιοταμίευσης, σε ποσοστό 70.08%. Το σύστημα παρουσιάζει ευαισθησία στις κλιματολογικές συνθήκες, με αποτέλεσμα τους χειμερινούς μήνες, κατά τους οποίους αυξάνονται οι ενεργειακές ζητήσεις, το ποσοστό κάλυψης των ενεργειακών αναγκών να είναι μικρό.

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Energy management, meeting energy needs and the access of the entire population to modern, greener and environmentally friendly energy production are some of the greatest challenges humanity faces. Nowadays, energy needs are covered mainly by the use of fossil fuels, since they cover approximately 80% of global energy needs. However, this has serious implications for the environment, the climate crisis, and the ongoing depletion of fossil fuels. To confront these implications, the interest in Renewable Energy Sources (RES) has increased exponentially, while institutionally, priority is given to it. Through a series of European directives and with the preparation of National Action Plans, specific targets are set for the production of renewable energy.

Despite the efforts made in recent decades to reduce the usage of fossil fuels, the exploitation of RES still remains at low levels. One of the main reasons that inhibit the further participation of these sources in energy mix, is the stochasticity that characterizes them. In the majority of cases, the energy produced by RES directly depends on factors with great uncertainty, such as wind, available sunshine or the hydrological diet of a river. This uncertainty makes it particularly difficult to integrate RES into a network, as it significantly increases its complexity. Furthermore, the replacement of conventional energy sources by RES, above a certain limit, leads to a reduction in system reliability. In order to address the above issues and shape energy production based on environmentally friendly sources, the role of energy storage projects is crucial.

In this research work, a methodology is developed for the configuration of an energy production system in the Kastraki reservoir, using RES (solar panels and wind turbines) combined with an energy storage system. Energy storage is carried out through Pumped Hydropower Storage (PHPS), a process in which excess energy is stored in hydrodynamic form at an upper reservoir. For the configuration of such a system, a second reservoir is implemented upstream of the Kastraki reservoir.

The methodological framework of this research includes the development of a model, that simulates the energy production and energy storage, the sizing of wind and photovoltaic parks and the evaluation of the system in terms of coverage energy needs. The simulation is performed for 40 years with an hourly time step. Basic inputs to the model are the wind speed and solar radiation, while the outputs include the produced energy, the coverage rates of energy needs, the percentage of participation of each source in the energy mix.

ENERGY PRODUCTION AND ENERGY STORAGE

The main parts of the system studied in this research work are a wind farm, a photovoltaic park and a PHPS system. In this chapter, some useful elements of these parts are being reviewed.

Wind turbines are characterized by the power curve, which is typical for each wind turbine model. Based on this particular curve, the power that the wind machine can produce, depends on the wind speed. For low wind speeds, wind turbines cannot produce power. Their operation starts from a minimum speed of 3-5 m/s, which is called cut-in speed. A further increase in speed leads to an increase in the power produced by the wind turbine. The increase in power continues until it reaches a maximum value, which is called the rated power. Any further increase in speed does not increase the power, which remains constant and equal to the maximum. The rated power is selected to be compatible with the wind conditions of the area in which it is

placed. Wind turbines stop working for wind speeds greater than 25 m/s., to avoid wear and possible damage. This speed is called cut-out wind speed.

Photovoltaic elements, through the photovoltaic effect, convert part of the available solar energy into direct current. This conversion is done through the absorption of solar radiation photons by special semiconductors placed in special photovoltaic cells, the collectors. The electricity can be used immediately or stored in batteries/energy storage systems. Semiconductors are placed in special photovoltaic cells, which are the basic unit of a photovoltaic system. A cell is small and produces about 1 or 2 watts of power. To withstand the conditions of the external environment for long periods of time, they are protected by materials, such as glass or plastic. To boost the power output of photovoltaic cells, they are linked together in chains to form larger units known as photovoltaic panels. A set of photovoltaic panels creates a photovoltaic system.

Electricity itself cannot be stored on any scale efficiently and economically. Environmental problems, high costs, the requirement for essential ingredients, low energy density, and limited shelf life are just a few of the batteries' demanding and worrisome disadvantages and limitations. However, electricity can be converted to other forms of energy, which can be stored and later reconverted to electricity on demand. According to this principle, special systems have been developed, that are charged during low-demand periods and are discharged to fulfill peak demand. Based on the mechanism used, energy storage systems can be classified into electrochemical, chemical, electrical, thermal and mechanical.

One of the most mature and widespread technologies of EES is pumped hydropower. The key element is the operation of a reversible pump turbine or a pump hydro turbine, usually Francis-type. The pump hydro turbine operates as a pump during the charging and lifts water from the lower to the upper reservoir. During peak demands, it operates as a turbine to generate hydropower. The energy recovered during the above process amounts to 70-80% of the initial energy given to the system. The observed losses are related both to the efficiency of the steam turbine and the hydraulic losses in the intake pipe. A typical PHPS system consists of one existing lower or upper reservoir and another reservoir much smaller than the existing one. The PHPS system is used for daily to weekly regulation, while the pump hydro-turbines are implemented at the lower reservoir. The existence of the upper reservoir is fundamental for electricity storage in the form of hydrodynamic energy.

STUDY AREA

This study focuses on Kastraki Hydropower Plant (HPP), which is located at a distance of 35 km downstream of the Kremasta dam and north of Agrinio. It belongs entirely to the Prefecture of Aitolokarnania and operates as a multi-purpose project. It is used for energy production, irrigation and water supply of the wider area of Agrinio. Construction of the project began in May 1966 and the station joined the system in May 1969. The initial useful capacity of the reservoir was 53 hm³. In 2010 overturning gates were implemented on the spillway of Kastraki dam, which increased useful capacity to 93 hm³. According to Table 1 in which the technical and functional characteristics of Kastraki are presented, the difference between the minimum and maximum pool level is only 4 m. As a result, Kastraki reservoir is suitable for the implementation of a PHPS system, as the requirement of small fluctuations in the water level in the downstream reservoir, is met. Furthermore, the storage-elevation curve is constructed from the data given by the Public Power Company (PCC) and the equation, which describes this curve is given as follows:

$$s = 21.735(z - 144)^{1.091} \quad (1)$$

Where $s(z)$ is the storage in hm³ and z is the pool level in meters (m).

Table 1: Technical and functional characteristics of Kastraki reservoir

Reservoir				
Minimum pool level (m)	Normal pool level (m)	Useful capacity (hm ³)	Useful storage in terms of energy (GWh)	Area at normal pool level (km ²)
142.0	146.0	98	25	24

For the configuration of the PPHS system, a second reservoir is implemented at higher elevation and north of Kastraki reservoir. The functional and technical characteristics of this reservoir are given at the Table 2

Table 2: Technical and functional characteristics of upstream reservoir

Technical characteristics of upstream reservoir		
Minimum pool level (m)	Normal pool level (m)	Useful capacity (hm ³)
363	407	10.62

Furthermore, the storage-elevation curve is produced and is given by the following equation:

$$s(z) = 0.315 \left(\frac{z}{332} \right)^{17.951} \quad (2)$$

Where $s(z)$ is the storage in hm³ and z is the pool level in meters (m)

DATA PROCESSING

The synthetic time series are produced using Markov processes, since based on the historical data it is proven that there is a correlation between the preceding and the succeeding values of these natural processes. These are stochastic processes, in which the future does not depend on the past, once the present is known. Specifically, the following models are used:

- AR (1): first order autoregressive process. The mathematical expression of the model is:

$$x_{\tau} = ax_{\tau-1} + v_{\tau} \quad (3)$$

- AR (1): second order autoregressive process. The mathematical expression of the model is

$$x_{\tau} = a_1x_{\tau-1} + a_2x_{\tau-2} + v_{\tau} \quad (4)$$

- ARMA (1,1): first-order autoregressive - first-order moving average process. The mathematical expression of the model is:

$$x_{\tau} = ax_{\tau-1} + v_{\tau} + bv_{\tau-1} \quad (5)$$

Where x_{τ} is α stochastic process in discrete time, v_{τ} is discrete time white noise and a,b model parameters

Then Anderson test is conducted, in order to select the optimal synthetic time series. According to test Anderson, for the acceptance of a stochastic model, it is necessary, that estimated autocovariances for different time lags follow the normal distribution, with an average equal to zero and a standard deviation equal to $\frac{1}{n}$. The typical error is equal to $\left(\frac{1}{n}\right)^2$, where n is the simulation length

The historical time series of inflows has a length of 23 years and a monthly time step. Synthetic time series for 40 years are produced and according to Anderson test, model AR (2) is considered to be optimal. The inflow is not a totally naturally determined variable, as the aquatic system of Acheloos is heavily modified. According to Figure 1, it can be concluded that the stochastic models can mostly approach reality and furthermore seasonal variability exists at timeseries of inflows.

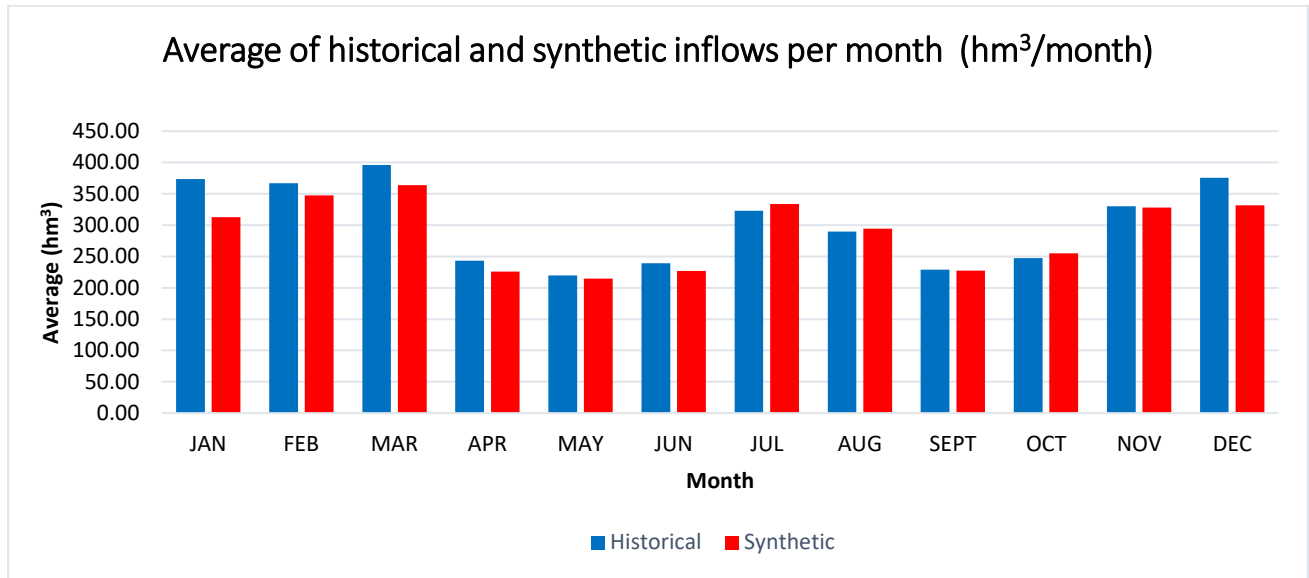


Figure 1: Average of historical and synthetic time series of inflows

The sunshine hours data has a daily time step. During the production of the synthetic time series, seasonal variability is taken into account, while at the same time the astronomical day length is set as an upper limit for each month. Based on the results of the Anderson test, it can be concluded that the ARMA (1,1) model is more appropriate. In Figure 2, the results of the stochastic simulation for a typical year are presented, from which it can be concluded that the model responds satisfactorily, since, as it is expected, during the summer months the sunshine values are high in contrast to the winter months.

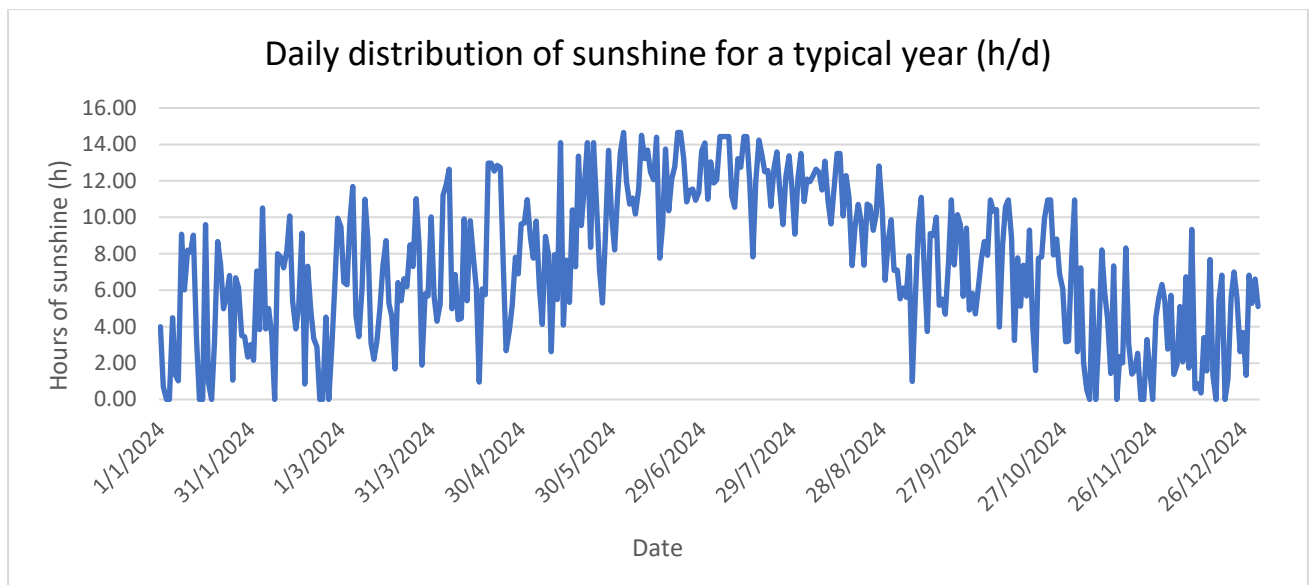


Figure 2: Daily distribution of sunshine for a typical year

The calculation of solar radiation is based on the synthetic timeseries of sunshine and on the average monthly intensity of solar radiation, as it results from the use of the RETScreen program. The data required for the needs of this research work is the horizontal daily solar radiation, which is given by the program as an average value for each month of the year. Given that values are given only for the meteorological stations and not for the study area, a linear interpolation of the data from the stations of Preveza (57 km from Kastraki) and Araxos (66 km from Kastraki) is carried out, in order to calculate the radiation at Kastraki site. For the needs of the simulation model, the time series of the hourly solar radiation reaching the study area needs to be produced. For this purpose, the average daily solar radiation is equally distributed in the time interval between sunrise and sunset, based on the available hours of sunshine.

The production of synthetic wind series is based on the methodology of Negra et al., aiming to maintain the high seasonality of the wind for each month separately. In order to do that, first, the historic wind speed data are classified based on their speed. Afterwards, the wind speed state probability of each class is calculated, along with the corresponding transition rates. These λ_{up} and λ_{down} transition rates show the frequency, with which the wind moves from the previous class to the examined class and vice versa. Essentially, these rates help the model to simulate the high hourly variation of the wind, for every month severally. Consequently, the wind speed (ws) vector takes an initial value, while the time variable takes the initial value of 0 h. For the first simulation year, the initial wind speed vector takes the value that corresponds to the average historic wind speed. Then, two random numbers U_1 and U_2 are produced in the interval (0,1), one for the transition up and one for the transition down. The most important step of this process is the calculation of the time to up (TTU) and the time to down (TTD) and their values are calculated as follows:

$$TTU^i = \frac{h}{\lambda_{up}} \ln(U_1^i) \quad (6)$$

$$TTD^i = \frac{h}{\lambda_{down}} \ln(U_2^i) \quad (7)$$

If $TTU < TTD$, the wind speed goes to the upper state after TTU hours, and t is updated according to following equations:

$$ws(t^{i-1}; t^i) = ws^{i-1} + 1 \quad (8)$$

$$t^i = t^{i-1} + TTU^i \quad (9)$$

If $TTU > TTD$, the wind speed goes to the lower state after TTD hours, and t is updated according to following equations:

$$ws(t^{i-1}; t^i) = ws^{i-1} - 1 \quad (10)$$

$$t^i = t^{i-1} + TTD^i \quad (11)$$

The procedure is repeated, until t is equal or exceeds h . Every year, the initial wind speed vector equals the latest value of the previous synthetic wind speed time series.

In Figure 3 historical and synthetic wind timeseries are compared and it can be concluded that the method used for stochastic production of wind speed is reliable.

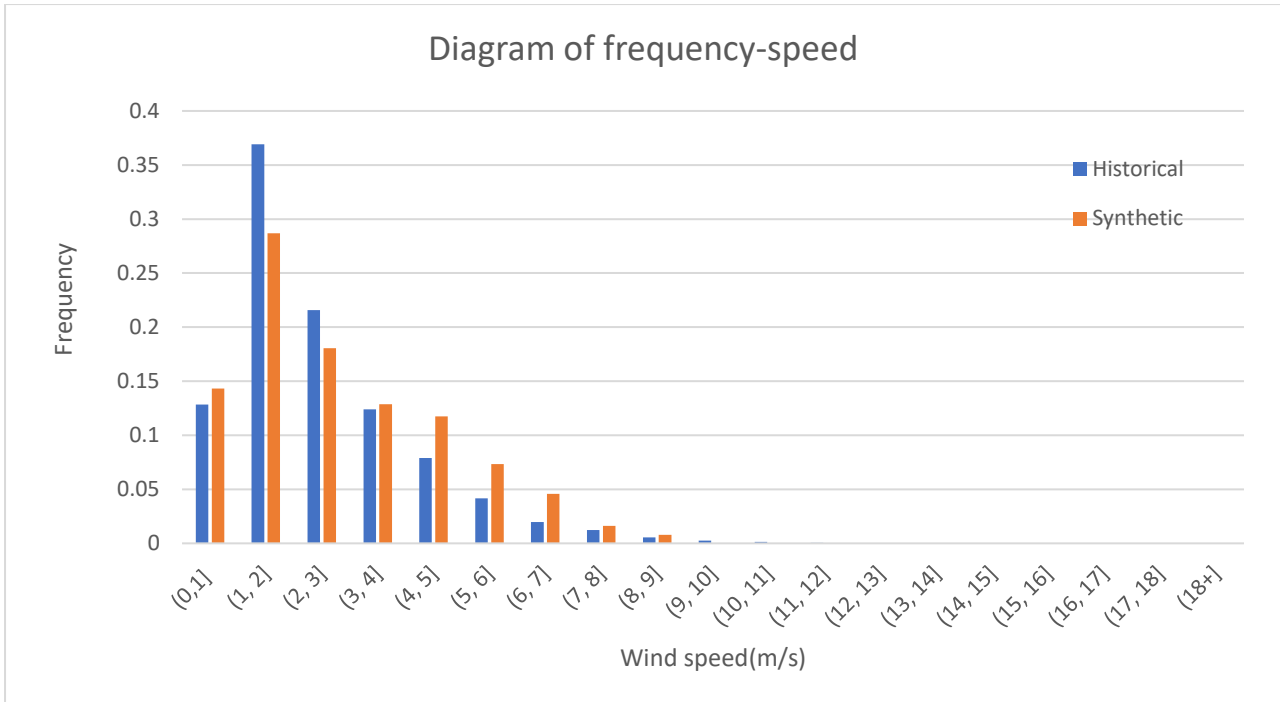


Figure 3: Comparison of historical and synthetic wind timeseries

The calculation of the energy demand is based on the historical data of the energy produced by the Kastraki hydroelectric power plant. Based on the specific data, the average values of the energy demand for each month are calculated and then, in favor of safety, an increase in energy demands by 2% per year is considered. In this way, the energy demand for each month and for each year for the simulation period is calculated. Finally, the monthly energy needs are converted with the use of appropriate coefficients to hourly energy needs (Figure 4).

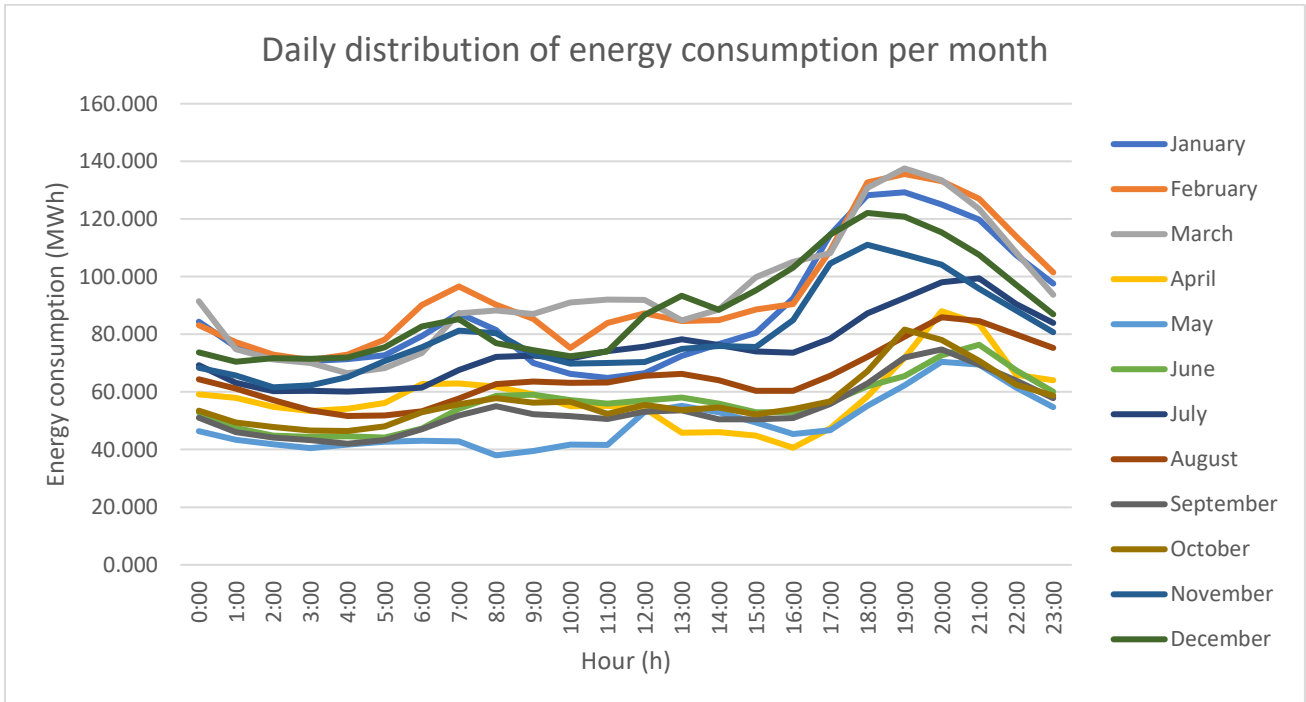


Figure 4: Daily distribution of energy consumption per month

METHODOLOGY

The energy production and storage system are combined with the existing Kastraki reservoir and consists of a wind farm, a photovoltaic park and a PHS unit. A key element of the methodology developed is the configuration of a suitable simulation model, through which the sizing of the wind and photovoltaic parks is carried out, as well as the evaluation of the reliability and viability of the system. The goal of the system is the maximum possible penetration of RES into the network and the achievement of the maximum coverage of energy needs. Therefore, sizing of the RES units is carried out with the criterion of achieving this goal. In the event that the system is unable to cover the energy demand, the deficit is covered by the central electricity supply network, whose contribution is quantified.

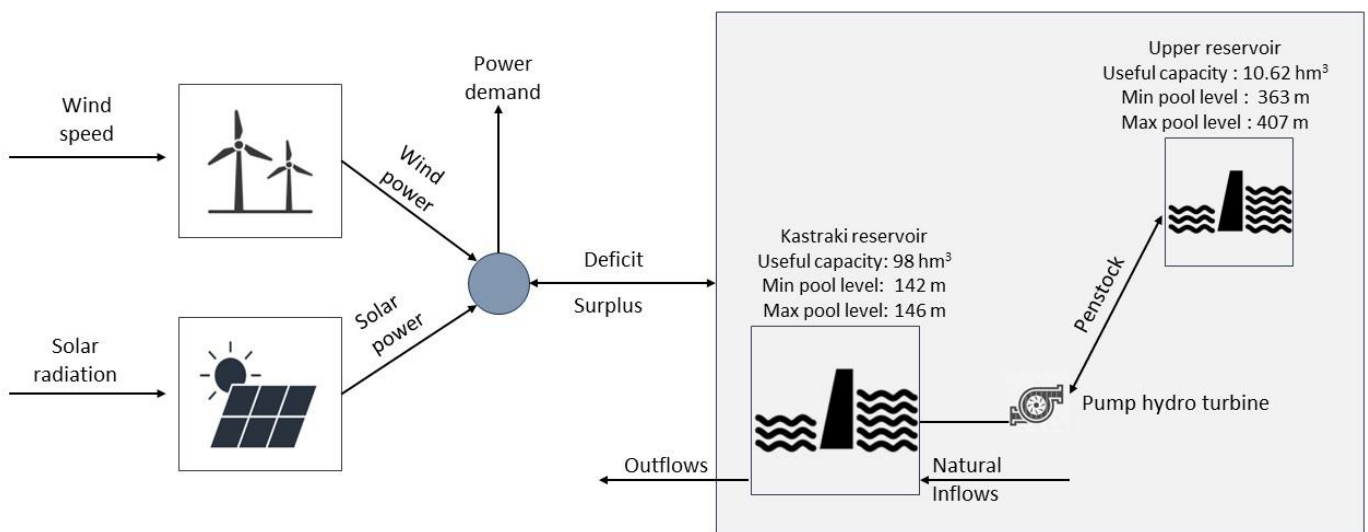


Figure 5: Schematic description of the system

Three different types of wind turbines are selected for the formation of the wind farm, and the results they give in terms of the wind energy produced are evaluated. Specifically, the wind turbines Adani 5.2-160, Enercon 126/7580 and Enercon E101 are selected. Figure 6 shows the power curves, as given by the manufacturer of each model. Using GIS, the average elevation of the wind turbines is estimated at 600 m. The siting criterion of the wind turbines is that they are placed in areas with high wind potential. For this reason, points with the highest altitudes are chosen. In the present case, the locations of the wind turbines are the ridges, which are formed in the area around the virtual reservoir. The station from which the wind data is obtained (Meteorological station of Messolongi) is placed at an altitude of 2 m. Considering the use of a standard instrument of 10 m height, the altitude of the anemological data is equal to 12 m. The wind speed data is adapted to elevation of the rotor of wind turbines.

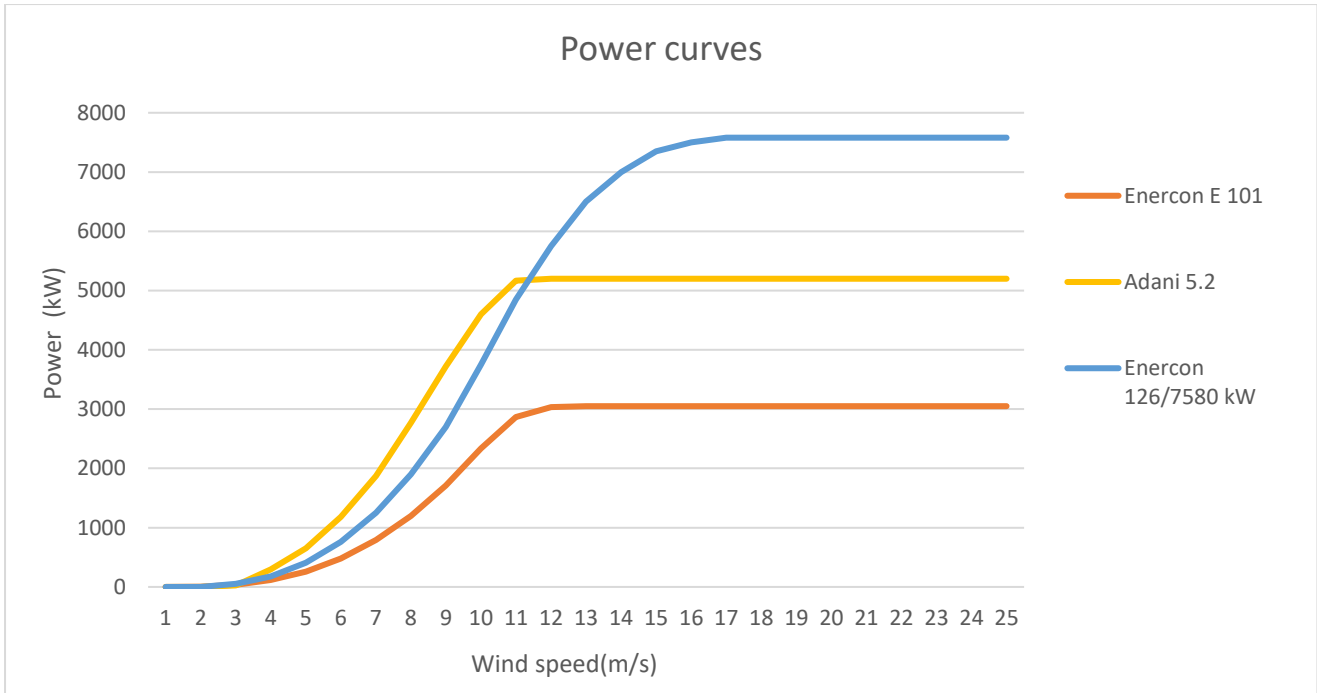


Figure 6: Wind turbine power curves

The energy produced by solar panels is obtained as a product of solar radiation, the surface of the photovoltaic park and the efficiency coefficient of the panels. The energy produced cannot be greater than the energy given by the solar panels, when operating at their full power. The model of photovoltaic panels used is Tiger Neo and its technical and functional characteristics are presented in Table 3.

Table 3: Technical characteristics of solar panels

Tiger Neo-solar panels	
Length (m)	1.134
Width (m)	2.465
Area (m ²)	2.79531
Efficiency coefficient	0.2254
Implemented power (Wp)	630

Concerning the operation of PHPS system, when energy production is greater than demand, then the PHPS system utilizes the resulting surplus and pumps water from the downstream reservoir to the upstream. Whereas when energy production is lower than demand, then the stored volume of water in the upstream reservoir is utilized and the energy deficit is covered. The produced hydroelectric energy is proportional to gravitational acceleration, turbine efficiency coefficient, the volume of water that passes through the turbines and the net head of water. The energy, which is required to pump a specific volume of water can be calculated in a similar way, however it is inversely proportional to the pump efficiency coefficient. The energy consumed for the pumping of a certain amount of water to a certain height is greater than the energy provided by the fall of the same volume of water from the same height. However, the cost of energy during off-peak hours is significantly lower than the cost of energy during peak hours, and therefore a PHPS system can be economically beneficial.

The model simulates both the energy production - storage system and the water balance of the two reservoirs. The simulation of the system has a duration of 40 years (2024-2063) and the time step is hourly.

The input data of the model are as follows:

- The synthetic time series of the inflows to the Kastraki reservoir with an hourly time step,
- the synthetic time series of the outflows from the Kastraki reservoir with an hourly time step,
- the synthetic time series of wind speeds with an hourly time step,
- the synthetic time series of the solar radiation per surface unit and per hour,
- the time series of energy demand with an hourly time step,
- the power curves of the wind turbines,
- the technical and functional characteristics of the photovoltaic panels (panel area, installed power, degree of efficiency),
- the efficiency coefficient of pump turbines,
- the technical and functional characteristics of the two reservoirs (capacity, storage-elevation curve, max-min pool level, head loss),

Based on the previous inputs of the model, the following outputs are derived:

- The number of wind turbines as a result of the optimization of the system,
- The total surface and the number of photovoltaic panels,
- the percentage of coverage of energy needs, for the entire duration of the simulation, with and without the implementation of a PHPS system
- the annual energy production,
- the energy produced by each source (wind, photovoltaic, pumped storage) as well as the contribution of the network to cover possible deficits,
- the average rate of coverage of energy needs per month without the implementation of a PHPS system,
- the average rate of coverage of energy needs per month with the implementation of a PHPS system,
- the generated energy and energy demand for a typical 24-hour period,
- fluctuations in the storage of the two reservoirs

RESULTS AND DISCUSSION

Through the configuration of the model, the number of wind turbines and photovoltaic panels is selected with the criterion of maximizing the coverage rate of energy needs. The results of this procedure are presented in Table 4. The sizing process shows that 40 Adani 5.2-160 wind turbines, 5 Enercon 126/7580 wind turbines and 5 Enercon E 101 wind turbines will be installed. The wind farm has an installed capacity of 258.15 MW. The photovoltaic park has an installed capacity of 0.63 MW and the total surface of the photovoltaic panels amounts to 2735 m². The average annual energy produced by these facilities amounts to 649.8 GWh. The energy mix is presented in Figure 7. The pumped storage unit contributes 27.89% to the total energy produced, while it significantly increases the coverage rate of energy needs. For the total of the simulation years, the percentage of energy coverage rises from 50.47% to 70.08%, when the PHPS system is implemented. The system is sensitive to climatic conditions, as during the winter months, when energy demands increase, the percentage of coverage of energy needs is low.

Table 4: Energy produced by RES units

Results of energy production				
Energy source	Implemented power per unit (MW)	Number of units	Total implemented power (MW)	Portion of the total amount of produced energy
Adani 5.2-160	5.20	40	208	83.30%
Enercon 126/7580	7.58	5	37.9	11.08%
Enercon E 101	3.05	5	15.25	5.54%
Solar panels	630 *10 ⁻⁶	1000 (2735 m ²)	0.63	0.08%
		Sum	261.47	100%

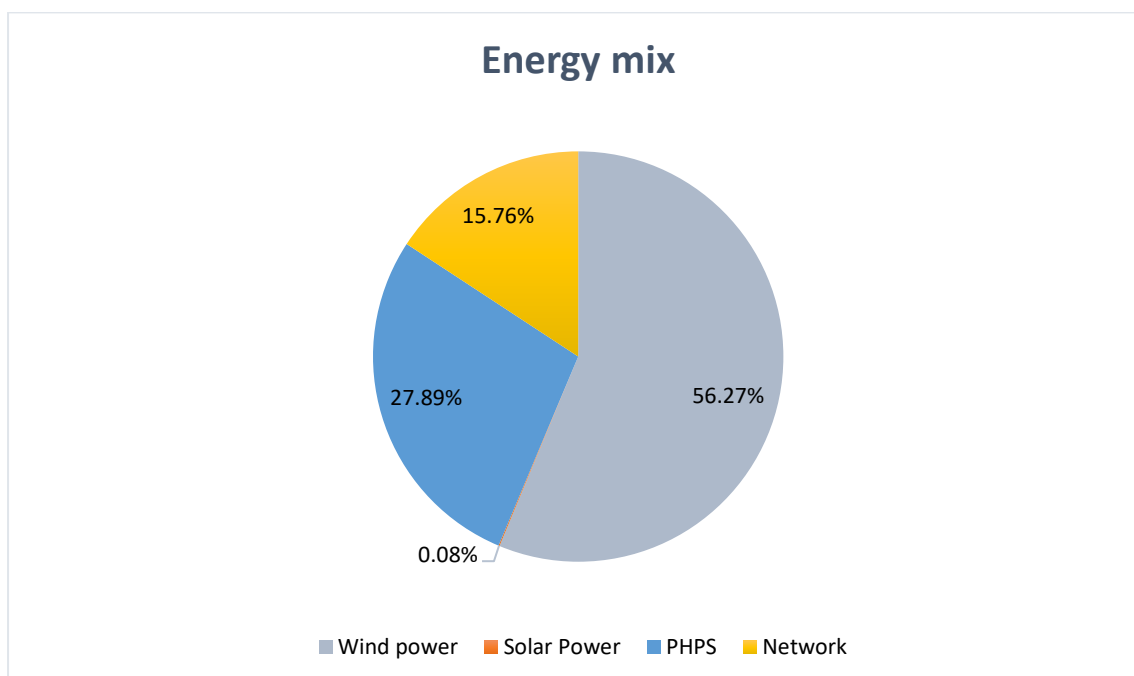


Figure 7: Energy mix

The location of the wind and photovoltaic park is proposed, as shown in Figure 8. For the placement of the wind turbines, the ridges are the most suitable locations, in order to ensure the maximum possible altitude and at the same time to avoid the existence of obstacles. As a result, the maximum wind speed is ensured. For the selection of the location of the solar park, a key criterion is to avoid possible obstacles that may prevent part of the solar radiation from reaching the site. In addition, accessibility to the area is considered, which is easy due to the existence of a road network, while at the same time, there is no nearby settlement, so any visual disturbance is limited.

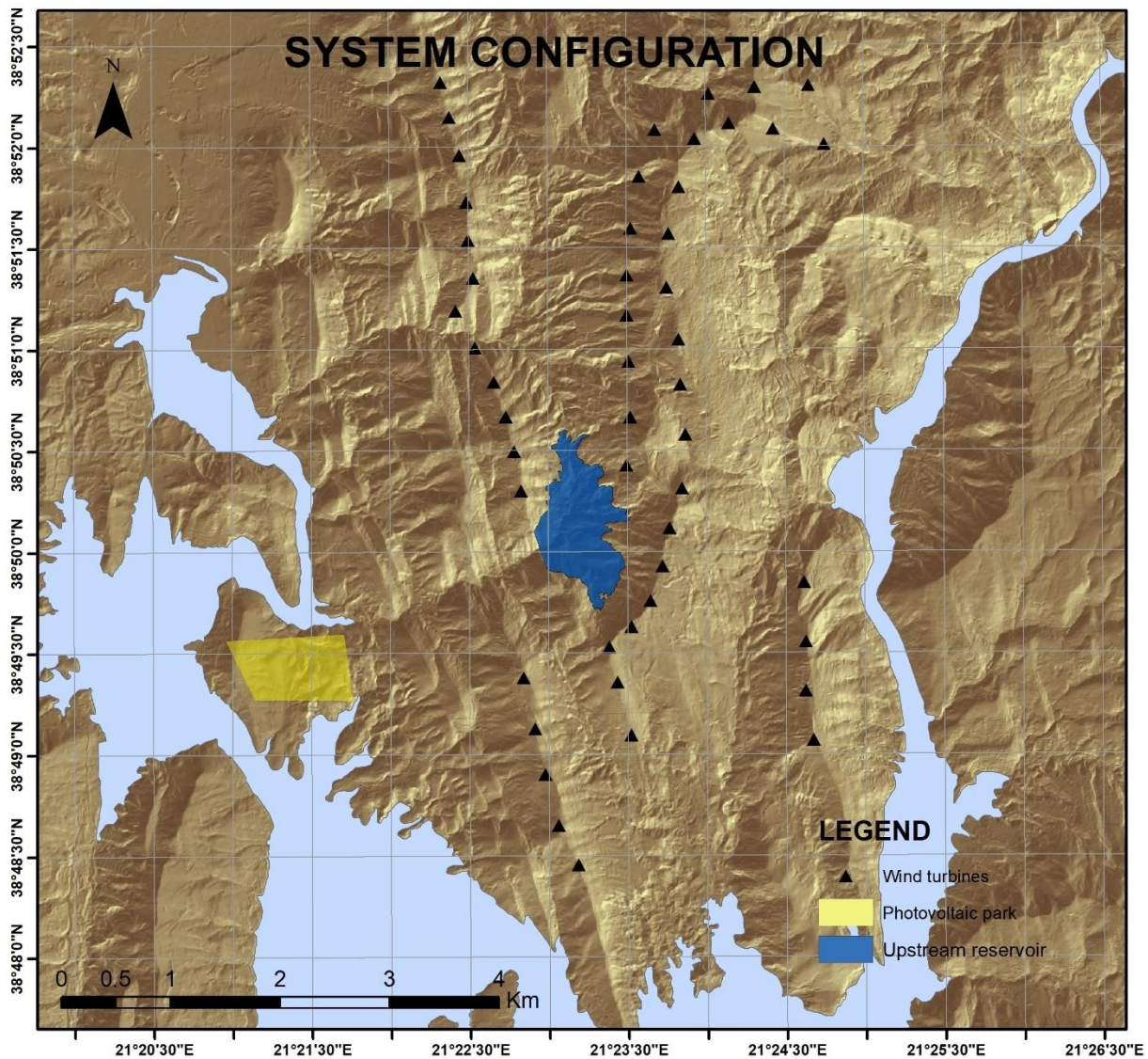


Figure 8: System configuration and placement of RES units

CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH

Generally, it can be concluded that the study area is suitable for the configuration of system of production energy from RES combined with a PHPS unit. First of all, Kastraki reservoir is suitable for the implementation of a PHPS system, as both a rich hydrodynamic potential is ensured and the small range of fluctuations of water elevation makes the installation of reversible pump hydro turbines viable. In addition, the weather conditions, are suitable both for the implementation of a wind farm and a photovoltaic park. The main model inputs are wind and solar radiation, which are characterized by significant uncertainty. As a result, energy production is intermittent and the integration of RES into an electricity grid, beyond a certain limit, increases the complexity and volatility of the grid. As it can be concluded from the results, the system can cover energy needs at percentage of 70.08%. The contribution of PHPS is decisive at further participation of RES at energy mix.

Based on this study and its results, some issues have to be explored for future research, either to address shortcomings or to improve this study. First, the methodology can be applied to other reservoirs, in order to evaluate the feasibility and the protentional of installing combined RES units and PHPS systems. It can also be investigated the implementation of different energy storage technologies, such as green hydrogen. In addition, it is interesting to simulate the financial operation of the system and calculate the financial benefits that it can bring. Furthermore, the possibilities offered by the system for reducing carbon dioxide emissions can also be investigated. Finally, it would also be intriguing to investigate how the system's operation alters, with the alternative above-mentioned objective goals, the optimum energy management and the optimum financial management.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	ii
Extended Abstract	iv
Introduction.....	iv
Energy Production and Energy Storage.....	iv
Study Area	v
Data Processing	vi
Methodology	x
Results and Discussion.....	xii
Conclusions and Future research	xiv
Ευρετήριο Εικόνων.....	xviii
Ευρετήριο Πινάκων	xix
1 Εισαγωγή	1
1.1 Κίνητρα και Σκοπός της Εργασίας	1
1.2 Διάρθρωση της Εργασίας	3
2 Παραγωγή και Αποθήκευση Ενέργειας.....	4
2.1 Το ενεργειακό Ζήτημα σε Παγκόσμιο και Εγχώριο Επίπεδο	4
2.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	6
2.2.1 Άνεμος και Αιολικές Μηχανές	7
2.2.2 Ηλιακή Ενέργεια	11
2.3 Αποθήκευση Ενέργειας.....	13
2.3.1 Στοιχεία για την αποθήκευση ενέργειας	13
2.3.2 Βασικές αρχές των συστημάτων αντλησιοταμίευσης	15
3 Περιοχή Μελέτης.....	17
3.1 Το Υδατικό Σύστημα του Αχελώου	17
3.2 Στοιχεία για τον Ταμιευτήρα Καστρακίου.....	19
3.3 Εικονικός Ταμιευτήρας.....	21
4 Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων	24
4.1 Βασικές Αρχές Στοχαστικής Μοντελοποίησης	24
4.2 Αποτελέσματα των Μοντέλων AR(1), AR(2) και ARMA(1,1)	27
4.3 Συνθετικές Χρονοσειρές Ανέμου.....	30
4.4 Ηλιακή Ακτινοβολία	34
4.5 Υπολογισμός Ενεργειακής Ζήτησης	35
5 Μεθοδολογία	39
5.1 Βασικές Αρχές Διαμόρφωσης του Συστήματος και Στόχοι	39

5.2	Υπολογισμός της Παραγόμενης Ενέργειας	40
5.2.1	Αιολικό Πάρκο Υπολογισμός	40
5.2.2	Φωτοβολταϊκά.....	42
5.3	Λειτουργία του Συστήματος Αντλησιοταμίευσης	42
5.4	Τελική Διαμόρφωση του Μοντέλου Προσομοίωσης.....	43
6	Αποτελέσματα και Συζήτηση.....	45
7	Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	51
7.1	Συμπεράσματα	51
7.2	Μελλοντική Έρευνα.....	52
8	Βιβλιογραφία.....	53

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Διάγραμμα διασποράς εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ανά κάτοικο - ΑΕΠ (Ακαθάριστου Εγχώριου Προϊόντος) ανά κάτοικο και ανά χώρα. (Πηγή: Max Roser, 2020).....	4
Εικόνα 2.2: Η εξέλιξη του Ενεργειακού μίγματος στην Ελλάδα τις τελευταίες δεκαετίες (Πηγή: Our World in Data)	6
Εικόνα 2.3: Χάρτης μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου στον Ελλαδικό χώρο (Πηγή: ΚΑΠΕ).....	8
Εικόνα 2.4: Τα βασικά μέρη μίας ανεμογεννήτριας (Πηγή: Fu et al., 2020).....	10
Εικόνα 2.5: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας (Πηγή: http://www.estiaconsulting.gr/el/FFCO2BOE).....	11
Εικόνα 2.6: Το ηλιακό δυναμικό στην Ελλάδα: Ολική οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας (Πηγή: https://www.atmosphere-upatras.gr/solarmaps)	12
Εικόνα 2.7: Σχηματική αναπαράσταση της δομής και της λειτουργίας ενός τυπικού συστήματος αντλησιοταμίευσης (Πηγή: Bitew et al., 2018)	16
Εικόνα 3.1: Γεωμορφολογικός χάρτης Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (Πηγή: ΣΔΛΑΠ, 2023).....	18
Εικόνα 3.2: Φράγμα Καστρακίου. Στο μπροστινό μέρος διακρίνεται ο υπερχειλιστής και στο βάθος οι αγωγοί πτώσης και ο σταθμός παραγωγής ενέργειας.....	20
Εικόνα 3.3: Γενική Διάταξη Έργων Καστρακίου (Πηγή: Ευστρατιάδη κ.α., 2020)	21
Εικόνα 3.4: Γραφική παράσταση σχέσης στάθμης-αποθέματος εικονικού ταμιευτήρα	22
Εικόνα 3.5: Περιοχή μελέτης και ανάντη ταμιευτήρας (παραγωγή χάρτη στο ArcGIS Pro).....	23
Εικόνα 4.1: Παράδειγμα διαγράμματος κατάστασης μίας Μαρκοβιανής Αλυσίδας (Πηγή: Papadopoulos, Giovanis, 2018)	26
Εικόνα 4.2: Μέσες τιμές ανά μήνα ιστορικών και συνθετικών χρονοσειρών εισροών	27
Εικόνα 4.3: Τεστ Anderson για συνθετικές χρονοσειρές εισροών	28
Εικόνα 4.4: Τεστ Anderson για τις συνθετικές χρονοσειρές ηλιοφάνειας	29
Εικόνα 4.5: Κατανομή ημερήσιων ωρών ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια ενός τυπικού έτους.....	29
Εικόνα 4.6: Σύγκριση ιστορικής – συνθετικής χρονοσειράς	33
Εικόνα 4.7: Περιοχή εγκατάστασης και πλησιέστεροι μετεωρολογικοί σταθμοί (χάρτης από RETScreen)	34
Εικόνα 4.8: Ημερήσια κατανάλωση ενέργειας ανά μήνα για το 1 ^ο έτος προσομοίωσης	38
Εικόνα 5.1: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος.....	39
Εικόνα 5.2: Καμπύλες ισχύος ανεμογεννητριών.....	40
Εικόνα 5.3: Εύρεση της επικρατέστερης διεύθυνσης του ανέμου	42
Εικόνα 6.1: Συνεισφορά της κάθε τεχνολογίας στην παραγόμενη από ΑΠΕ ενέργειας.....	45
Εικόνα 6.2: Χωροθέτηση αιολικού και φωτοβολταϊκού πάρκου	46
Εικόνα 6.3: Παραγόμενη ενέργεια για κάθε έτος προσομοίωσης	47
Εικόνα 6.4: Το ενεργειακό μίγμα όπως διαμορφώνεται με βάση τη λειτουργία του συστήματος	48
Εικόνα 6.5: Μέσο κάλυψη ενεργειακής ζήτησης ανά μήνα με την εφαρμογή και χωρίς την εφαρμογή αντλησιοταμίευσης.....	49
Εικόνα 6.6: Ημερήσια διακύμανση της ενεργειακής παραγωγής και ζήτησης για ένα τυπικό 24ωρο.....	49
Εικόνα 6.7: Μεταβολή του αποθέματος του ταμιευτήρα Καστρακίου για το πρώτο έτος της προσομοίωσης	50
Εικόνα 6.8: Μεταβολή του αποθέματος του εικονικού ταμιευτήρα για το πρώτο έτος της πρώτο έτος της προσομοίωσης	50

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά πηγή στην Ελλάδα (Πηγή: Our World in Data)	6
Πίνακας 3.1: Ζήτηση ανά χρήση ύδατος για το Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Στερεάς Ελλάδας. (Πηγή: ΣΔΛΑΠ).....	17
Πίνακας 3.2: Λειτουργικά χαρακτηριστικά Σταθμού Παραγωγής (Πηγή: ΔΕΗ Α.Ε)	20
Πίνακας 3.3: Λειτουργικά χαρακτηριστικά Ταμιευτήρα (Πηγή: ΔΕΗ Α.Ε)	20
Πίνακας 3.4: Τεχνικά Χαρακτηριστικά εικονικού ταμιευτήρα.....	22
Πίνακας 4.1: Συνοπτικός πίνακας με τα βασικά χαρακτηριστικά των διαθέσιμων ιστορικών χρονοσειρών ..	24
Πίνακας 4.2: Αστρονομική διάρκεια ημέρας στην περιοχή μελέτης.....	28
Πίνακας 4.3: Συχνότητα εμφάνισης κάθε κλάσης ανά μήνα	31
Πίνακας 4.4: Συντελεστής λ_{up} για κάθε μήνα.....	31
Πίνακας 4.5: Συντελεστής λ_{down} για κάθε μήνα.....	32
Πίνακας 4.6: Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία	35
Πίνακας 4.7: Πίνακας μηνιαίων ενεργειακών ζητήσεων	36
Πίνακας 4.8: Συντελεστές ωριαίας διακύμανσης ενεργειακής ζήτησης (Πηγή: Σκρουφούτα, 2020)	37
Πίνακας 5.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών	40
Πίνακας 5.2: Τυπικές τιμές των παραμέτρων z_0 για διάφορες φυσικές επιφάνειες (Πηγή: Κουτσογιάννης, Ξανθόπουλος, 1999)	41
Πίνακας 5.3: Τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά Tiger Neo.....	42
Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα διαστασιολόγησης αιολικού και φωτοβολταϊκού πάρκου	45

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΚΙΝΗΤΡΑ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η πλανητική οικολογική κρίση, με κύρια αιχμή τη κλιματική, είναι πλέον παρούσα και αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις με τις οποίες έρχεται αντιμέτωπη η ανθρωπότητα. Είναι μια κρίση άρρηκτα συνδεδεμένη με το παραγωγικό μοντέλο, που εφαρμόζεται με μικρότερες ή μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις σε παγκόσμια κλίμακα. Ένα παραγωγικό μοντέλο που στον πυρήνα του έχει τη λογική της ανάπτυξης-μεγέθυνσης της παραγωγής, θεωρώντας ότι αυτή μπορεί να επιτευχθεί με αέναο και συνεχή τρόπο σε έναν πεπερασμένο πλανήτη (Νικολόπουλος, 2021). Φυσικά, τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες για μετάβαση σε μία πιο πράσινη οικονομία, προσπάθειες όμως μερικές και αποσπασματικές, με πρωταρχικό σε πολλές περιπτώσεις το οικονομικό-εμπορικό όφελος και όχι το οικολογικό. Προσπάθειες που τελικά δεν καταφέρνουν να ξεφύγουν από το μεγεθυνσιακό μοντέλο παραγωγής και την λογική της υπερεκμετάλλευσης της φύσης, με διαφορετικό βέβαια τρόπο, ούτε να προάγουν αποτελεσματικά και ουσιαστικά την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος.

Βασικός τομέας του σύγχρονου παραγωγικού μοντέλου και με καθοριστικές επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι αυτός της ενέργειας. Η ενεργειακή παραγωγή στο σήμερα στηρίζεται κατά βάση στην εκτεταμένη χρήση των ορυκτών καυσίμων, τα οποία αποτελούν πηγές πεπερασμένες και εξαντλήσιμες με σημαντική επίδραση στην ένταση της κλιματικής κρίσης. Στην κατεύθυνση αντιμετώπισης του προβλήματος, προωθείται τα τελευταία χρόνια συστηματικά η ένταξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο ενεργειακό μίγμα και έχουν τεθεί στόχοι σε διεθνές και ευρωπαϊκό επίπεδο μείωσης των εκπομπών μέχρι το 2030 και επίτευξης κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050. Ειδικότερα για την Ελλάδα και με βάση το Εθνικό Σχέδιο Δράσης, οι στόχοι για το 2030 είναι οι ακόλουθοι:

- Οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου στους τομείς εκτός συστήματος δικαιωμάτων εκπομπών να μειωθούν κατά ελάχιστο 16% σε σχέση με το έτος 2005 και να μην ξεπερνούν τους 54 Mt CO_{2eq}.
- Για τους τομείς εντός του συστήματος δικαιωμάτων εκπομπών, να επιτευχθεί μείωση των εκπομπών σε σχέση με το 2005 τουλάχιστον κατά 43% και να μην ξεπερνούν τους 41 Mt CO_{2eq}.
- Να επιτευχθούν ποσοτικοί στόχοι για τη μείωση των εθνικών εκπομπών συγκεκριμένων ατμοσφαιρικών ρύπων.
- Το μερίδιο συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας να ανέλθει τουλάχιστον στο 31% (χωρίς να συνυπολογιστεί η συνεισφορά των ΑΠΕ για κάλυψη ψυκτικών αναγκών).
- Το μερίδιο συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας να ανέλθει τουλάχιστον στο 55%.
- Το μερίδιο των ΑΠΕ για τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης να ξεπεράσει το 30%.
- Το μερίδιο των ΑΠΕ στον τομέα των μεταφορών να ξεπεράσει το 14% σύμφωνα με τη σχετική μεθοδολογία υπολογισμού της ΕΕ.
- Η τελική κατανάλωση ενέργειας να μην ξεπερνάει τα 18.21 Mtoe² το έτος 2030.

¹ CO_{2eq} - Ισοδύναμο διοξείδιο του άνθρακα (Carbon dioxide equivalent): Αποτελεί μέτρο σύγκρισης των εκπομπών θερμοκηπικών αερίων στη βάση του δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη. Μετατρέπει της ποσότητες των αερίων σε ισοδύναμες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα με το ίδιο δυναμικό υπερθέρμανσης. Για παράδειγμα ένα τόνο μεθανίου έχει ισοδύναμη επίδραση στην υπερθέρμανση του πλανήτη με 25 τόνου διοξειδίου του άνθρακα. (Πηγή: Eurostat)

² toe- Τόνοι Ισοδύναμου Πετρελαίου (tons of oil equivalent): Μονάδα μέτρησης της ενέργειας. Ορίζεται ως την ενέργεια που μπορεί να εξαχθεί από ένα τόνο αργού πετρελαίου. 1 toe = 41.868 GJ = 11.63 MWh (Πηγή: Eurostat)

- Η πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας να μην ξεπερνάει τα 25 Mtoe το έτος 2030.
- Να επιτευχθούν τουλάχιστον 7 Mtoe σωρευτικής εξοικονόμησης ενέργειας κατά την περίοδο 2021-2030.
- Να γίνει σε ετήσια βάση ενεργειακή ανακαίνιση του 3% του συνολικού εμβαδού της θερμικής ζώνης των κτιρίων της κεντρικής δημόσιας διοίκησης έως το έτος 2030 (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2019).

Η μετάβαση όμως σε ένα μοντέλο ενεργειακής παραγωγής βασισμένο στις ΑΠΕ γίνεται σε πολλές περιπτώσεις με άναρχο και αποσπασματικό τρόπο. Δεν εξετάζεται η δυνατότητα και ο βαθμός ενσωμάτωσης στο δίκτυο παρά μόνο η αριθμητική επίτευξη συγκεκριμένης εγκαταστημένης ισχύος. Παράγοντες που σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές, επιπτώσεις σε μια περιοχή (π.χ. εγκατάσταση ανεμογεννητριών στην περιοχή των Αγράφων και υψηλές απαιτήσεις διάνοιξης δρόμων σε παρθένες δασικές εκτάσεις) πολύ συχνά υποτιμούνται, ενώ παράλληλα δε λαμβάνεται υπόψιν το κοινωνικό, πολιτιστικό και ιστορικό πλαίσιο της εκάστοτε περιοχής. Επιπλέον, η μετάβαση σε μια πιο πράσινη ενεργειακή παραγωγή δεν συνδυάζεται απαραίτητα και με μια προσπάθεια απομεγέθυνσης και περιορισμού των ενεργειακών καταναλώσεων.

Η αναγκαιότητα επαναπροσδιορισμού της σχέσης μεταξύ ανθρώπου-φύσης και κατ' επέκταση η αναγκαιότητα υιοθέτησης ενός άλλου παραγωγικού και ενεργειακού μοντέλου, που με ουσιαστικούς-ποιοτικούς όρους θα συμβάλλει στην προστασία του φυσικού περιβάλλοντος, αποτελούν τα βασικά κίνητρα εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Επιπλέον κίνητρο αποτέλεσε και το διεθνές πολιτικό-οικονομικό σκηνικό, υπό το φόντο του πολέμου στην Ουκρανία και την άμεση σύνδεση του με το ζήτημα της ενέργειας και των ενεργειακών διαδρομών. Η ενεργειακή κρίση που βιώνει η Ευρώπη, επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον πόλεμο και τον περιορισμό του εισαγόμενου φυσικού αερίου από τη Ρωσία. Συγκεκριμένα, από 50% των συνολικών εισαγωγών το δεύτερο τρίμηνο του 2021, παρατηρείται μείωση των εισαγωγών στο 12.9% το Νοέμβριο του 2022 (Ευρωπαϊκό Συμβούλιο, 2023). Διαμορφώνεται με αυτόν τον τρόπο ένα ρευστό πεδίο, στο οποίο η αναζήτηση εναλλακτικών ενεργειακών πόρων καθίσταται αναγκαία. Προς το παρόν, το αντιστάθμισμα των απωλειών, γίνεται με τη μορφή υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG), εισαγόμενου από τις ΗΠΑ. Η συγκεκριμένη λύση όμως είναι ιδιαίτερα κοστοβόρα και με σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, λόγω των αυξημένων αναγκών σε μεταφορές. Σε αυτό το πλαίσιο, αναδεικνύεται ακόμα πιο πολύ η αναγκαιότητα της ενεργειακής απεξάρτησης από συγκεκριμένα κέντρα, προκειμένου να διαμορφωθεί μια σταθερή ενεργειακή στρατηγική που θα διαταράσσεται κατά το δυνατόν λιγότερο από την κατάσταση στο διεθνές σκηνικό. Μια κατεύθυνση που πρέπει να εξεταστεί και σε εγχώριο επίπεδο, δεδομένου ότι και η Ελλάδα επηρεάζεται άμεσα και με ιδιαίτερη ένταση από την ενεργειακή κρίση. Επομένως, χρειάζεται να γίνουν βήματα προς την ενεργειακή απεξάρτηση και αυτονομία της χώρας, μέσω της μέγιστης αξιοποίησης των ενεργειακών της δυνατοτήτων, διασφαλίζοντας παράλληλα το ελάχιστο περιβαλλοντικό κόστος. Καθοριστικός σε αυτή την κατεύθυνση είναι ο ρόλος των ΑΠΕ, αλλά και η διαμόρφωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

Κατά την εγκατάσταση μονάδων ΑΠΕ είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψιν και οι αντικειμενικοί περιορισμοί που τίθενται από τη φύση των ίδιων των πηγών. Συγκεκριμένα και σε αντίθεση με τις συμβατικές πηγές, οι ΑΠΕ χαρακτηρίζονται από μεγάλη αβεβαιότητα, λόγω της στοχαστικότητας των φυσικών διεργασιών (άνεμος, ηλιοφάνεια, υδρολογική δίαιτα ενός ποταμού) και κατ' επέκταση από μικρό βαθμό εκμετάλλευσης. Η παραγωγή ενέργειας γίνεται με τρόπο απρόβλεπτο και σε χρόνο που δεν ταυτίζεται πάντα με τις αιχμές στη ζήτηση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η ενσωμάτωση των ΑΠΕ πάνω από ένα συγκεκριμένο όριο σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα να μην είναι δυνατή. Για την αντιμετώπιση των εν λόγω προβλημάτων, την διασφάλιση της σταθερότητας του συστήματος και την μέγιστη διείσδυση των ΑΠΕ στο μίγμα, είναι αναγκαίος ο σχεδιασμός και η διαμόρφωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Τα συστήματα αυτά δίνουν την δυνατότητα αποθήκευσης της παραγόμενης, σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, ενέργειας και την αξιοποίησή της, όταν η ζήτηση είναι αυξημένη. Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία τέτοιων συστημάτων είναι η αντλησιοταμίευση, στην οποία η αποθήκευση πραγματοποιείται με τη μορφή υδροδυναμικής ενέργειας σε

κάποιον ανάντη ταμιευτήρα ή λιμνοδεξαμενή. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον έχει στραφεί σε τεχνολογίες Power to Gas (P2G), κατά τις οποίες η παραγόμενη ενέργεια αξιοποιείται για την παραγωγή αέριων καυσίμων, συνήθως μεθανίου ή υδρογόνου, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν στη συνέχεια για την κάλυψη διαφόρων ενεργειακών αναγκών.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, μελετάται η διαμόρφωση ενός συστήματος ενεργειακής παραγωγής στον ταμιευτήρα Καστρακίου με χρήση ΑΠΕ (φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες) και παράλληλη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας. Η εργασία αποτελεί συνέχεια της διπλωματικής που εκπόνησα σε προπτυχιακό επίπεδο, με θέμα την προσομοίωση και την αξιολόγηση συστήματος αντλησιοταμίευσης στον ταμιευτήρα Καστρακίου, καθώς και σχετικής υπό δημοσίευσης ερευνητικής δουλειάς (Μανίκας, 2021; Manikas et al., 2023). Η αποθήκευση ενέργειας γίνεται μέσω συστήματος αντλησιοταμίευσης με τη διαμόρφωση ενός δεύτερου εικονικού ταμιευτήρα, ο οποίος χωροθετείται ανάντη του ταμιευτήρα Καστρακίου. Η χωροθέτηση και η διαστασιολόγηση του ταμιευτήρα έχει πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο της προπτυχιακής μου διπλωματικής.

Σκοπός της εργασίας είναι η διαμόρφωση ενός συστήματος που αξιοποιεί τις ήδη υπάρχουσες υποδομές (ταμιευτήρας Καστρακίου) και με το ελάχιστο περιβαλλοντικό κόστος και την ελάχιστη παραγωγή θερμοκηπικών αερίων, όπου θα διασφαλίζει μια αποτελεσματική και βιώσιμη ενεργειακή παραγωγή. Για αυτό το λόγο, αναπτύσσεται μοντέλο παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας, πραγματοποιείται διαστασιολόγηση αιολικού και φωτοβολταϊκού πάρκου, αξιολογείται το σύστημα που διαμορφώνεται ως προς τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών, αλλά και ως προς τη δυνατότητα διαχείρισης των ενεργειακών ελλειμμάτων και πλεονασμάτων, όπως αυτά προκύπτουν από τη διαλείπουσα-στοχαστική παραγωγή των ΑΠΕ.

1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο **κεφάλαιο 1**, παρουσιάζονται συνοπτικά τα κίνητρα και οι λόγοι που οδήγησαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής, καθώς και ο σκοπός της εργασίας.

Στο **κεφάλαιο 2**, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση τόσο των βασικών στοιχείων που χαρακτηρίζουν την ενεργειακή παραγωγή, σε παγκόσμιο αλλά και εγχώριο επίπεδο, όσο και των τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ, αλλά και των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας.

Στο **κεφάλαιο 3**, παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία της περιοχής μελέτης. Συγκεκριμένα, παρατίθενται στοιχεία της υδρολογικής λεκάνης και του συγκροτήματος του Αχελώου, αλλά και πιο ειδικά στοιχεία για τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα Καστρακίου.

Στο **κεφάλαιο 4**, παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την εκπόνηση της εργασίας και η επεξεργασία που υφίστανται τα εν λόγω δεδομένα.

Στο **κεφάλαιο 5**, παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθείται για την παραγωγή του μοντέλου προσομοίωσης του συστήματος παραγωγής ενέργειας που προτείνεται.

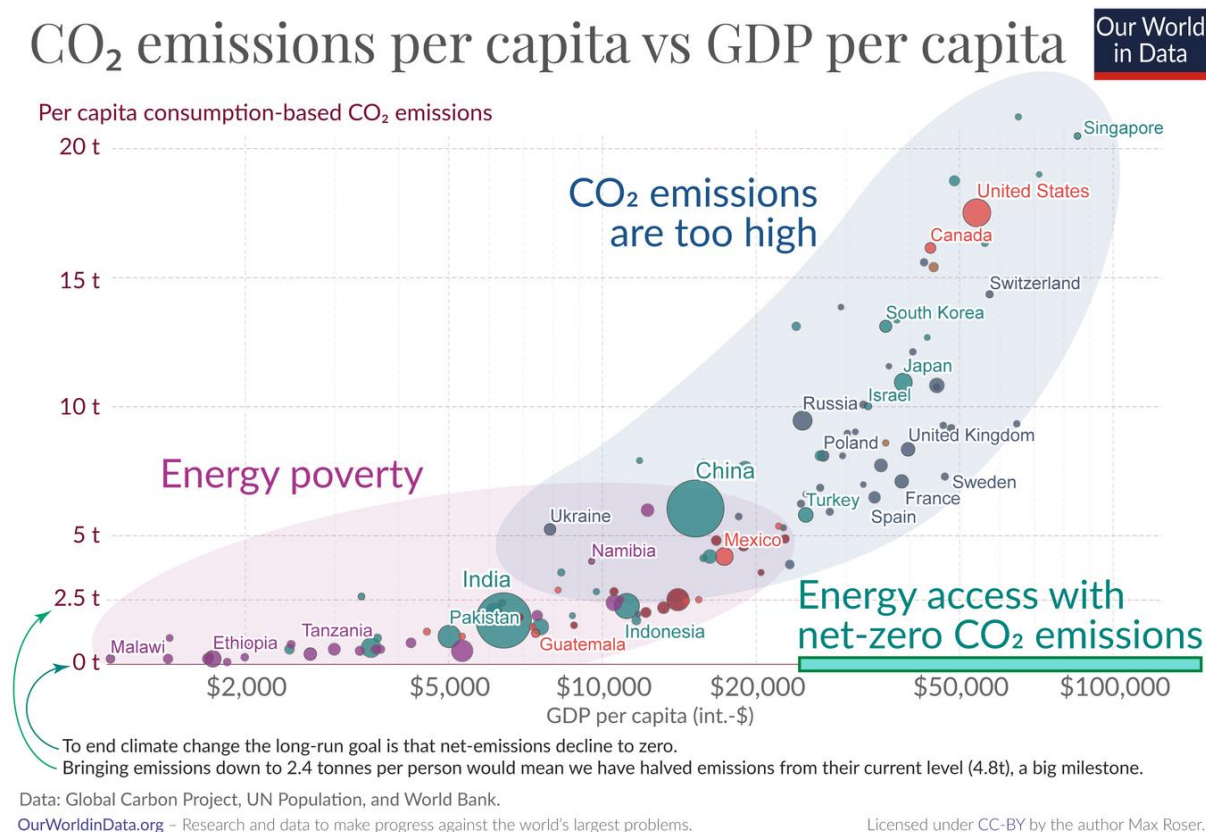
Στο **κεφάλαιο 6**, πραγματοποιείται παράθεση των αποτελεσμάτων του μοντέλου και σχετική συζήτηση επί αυτών.

Στο **κεφάλαιο 7**, συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και παρατίθενται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΖΗΤΗΜΑ ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΚΑΙ ΕΓΧΩΡΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Η παραγωγή ενέργειας είναι υπεύθυνη για το 80% των εκπομπών των θερμοκηπικών αερίων (Amankwa et al., 2020; Saygin et al. 2015) και όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.1 τα μεγαλύτερα ποσοστά εκπομπών καταγράφονται στις πλουσιότερες χώρες. Το ενεργειακό πρόβλημα έχει διπλό χαρακτήρα. Από τη μία, η παραγωγή χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σχετίζεται με την ενεργειακή φτώχεια και την αδυναμία κάλυψης των ενεργειακών αναγκών του πληθυσμού μιας περιοχής. Από την άλλη, σε χώρες που έχει επιτευχθεί ένα υψηλό βιοτικό επίπεδο, και έχει διασφαλιστεί η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της μεγαλύτερης πλειοψηφίας του πληθυσμού, οι εκπομπές θερμοκηπικών αερίων είναι ιδιαίτερα υψηλές.



Εικόνα 2.1: Διάγραμμα διασποράς εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ανά κάτοικο - ΑΕΠ (Ακαθάριστου Εγχώριου Προϊόντος) ανά κάτοικο και ανά χώρα. (Πηγή: Max Roser, 2020)

Η προσπάθεια επίλυσης του ενεργειακού προβλήματος αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για την επίλυση μιας σειράς ζητημάτων, άμεσα σχετιζόμενων με την ποιότητα ζωής του ανθρώπινου πληθυσμού. Τα ζητήματα αυτά μπορεί να σχετίζονται με την υποβάθμιση των οικοσυστημάτων, την αποψίλωση των δασών, την κλιματική κρίση, αλλά και με μια σειρά άλλων παραγόντων βιοτικών, υγειονομικών, κοινωνικών, κ.α. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τον παγκόσμιο οργανισμό υγείας, η εσωτερική ατμοσφαιρική ρύπανση, η οποία προκαλείται από την καύση στερεών καυσίμων σε εσωτερικούς χώρους, αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους κινδύνους της υγείας του ανθρώπου, εξαιτίας περιβαλλοντικών παραγόντων. Το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα εκτεταμένο στις λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες, λόγω της έλλειψης μίας σύγχρονης, κεντρικά

σχεδιασμένης ενεργειακής παραγωγής (Ritchie, Roser, 2013). Επιπλέον, κίνδυνοι δημιουργούνται και στις ανεπτυγμένες χώρες, που μπορεί να σχετίζονται τόσο με την υποβάθμιση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, όσο και με τους κινδύνους της κλιματικής κρίσης και την όλο και πιο συχνή εμφάνιση ακραίων φαινομένων (ξηρασιές, πλημμύρες), τα οποία επηρεάζουν το σύνολο των χωρών παγκοσμίως.

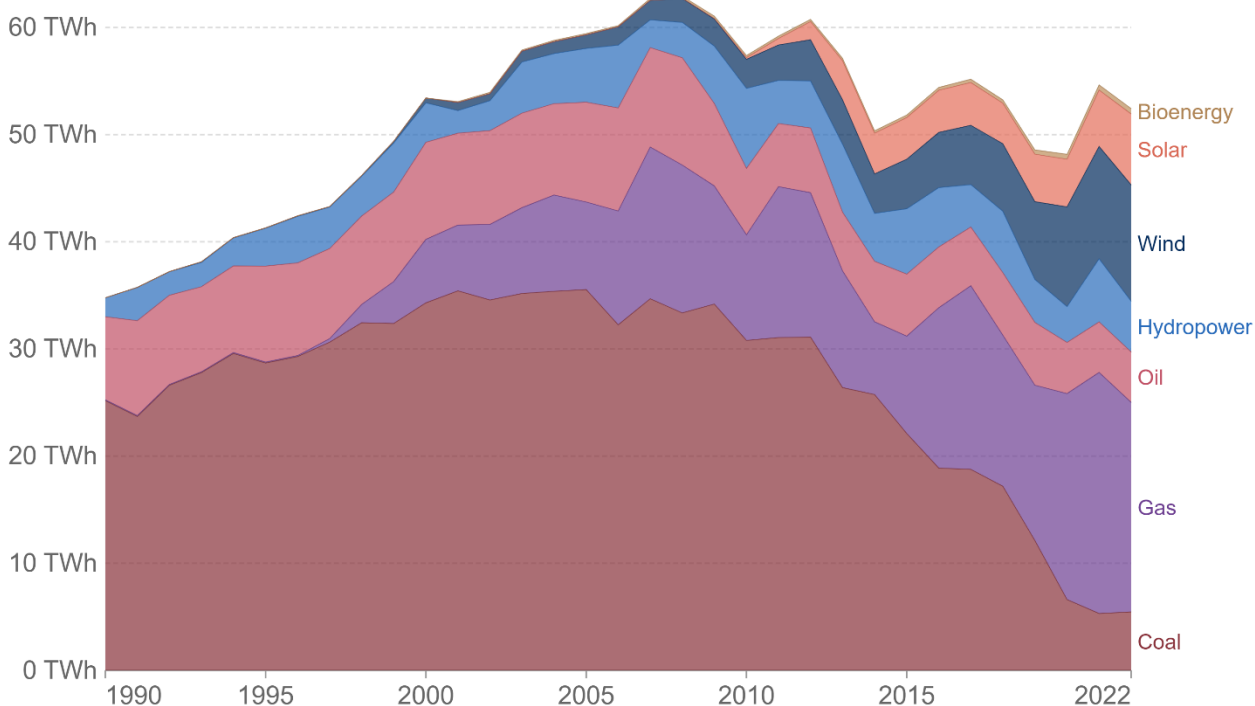
Ένας ακόμα παράγοντας που χρειάζεται να ληφθεί υπόψιν στη εξέταση του ενεργειακού προβλήματος είναι η συνεχής αύξηση της ενεργειακής ζήτησης. Είναι χαρακτηριστικό ότι από το 1965 μέχρι το 2022, η παγκόσμια κατανάλωση σε ενέργεια έχει αυξηθεί από τις 43.25×10^3 TWh στις 178.90×10^3 TWh, αύξηση της τάξης του 214%. Από το σύνολο της καταναλισκόμενης ενέργειας, το 60.94% προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, το 9.15% από πυρηνικά και το 29.91% από ΑΠΕ. (Our World in Data, 2023)

Η προσπάθεια αντιμετώπισης του ενεργειακού προβλήματος αποτελεί μία ιδιαίτερα περίπλοκη διαδικασία, η οποία έρχεται αντιμέτωπη με ένα σύνολο, πολλές φορές ανταγωνιστικών μεταξύ τους, στόχων. Από τη μία, είναι αναγκαίος ο περιορισμός της ενεργειακής κατανάλωσης, πράγμα το οποίο μπορεί να επιτευχθεί μέσα από μια πιο ορθολογική διαχειριστική προσέγγιση της ενεργειακής παραγωγής, αλλά και μέσα από την ευρύτερη διαμόρφωση αποδοτικών, λιγότερο ενεργοβόρων συστημάτων σε όλα τα επίπεδα (από την βιομηχανία και τις μεταφορές μέχρι την οικιακή κατανάλωση). Από τη άλλη όμως, στις λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες είναι αναγκαία η αύξηση της ενεργειακής παραγωγής και η διασφάλιση ισότιμης πρόσβασης του πληθυσμού σε ένα σύγχρονο και ποιοτικό σύστημα ενέργειας. Χρειάζεται, ωστόσο, να γίνει αντιληπτό ότι η επιτυχής αντιμετώπιση της ενεργειακής φτώχειας μπορεί να μεταφραστεί σε ένα καλό βιοτικό επίπεδο, αν και μόνο αν συνδυαστεί με τη δραστική μείωση των θερμοκηπικών αερίων.

Σε μια προσπάθεια σκιαγράφησης του ενεργειακού μίγματος, συμπεραίνεται ότι αν και αποσπασματικά, έχουν γίνει βήματα στην ενσωμάτωση πιο φιλικών προς το περιβάλλον λύσεων. Είναι χαρακτηριστικό ότι το 2000 η παραγόμενη από ΑΠΕ ενέργεια σε παγκόσμια κλίμακα αποτελούσε το 19.07% της συνολικής ενεργειακής παραγωγής, ποσοστό το οποίο έχει ανέλθει στο 29.91% (Our World in Data, 2023). Εξετάζοντας πιο ειδικά το ενεργειακό μίγμα στην Ελλάδα, αρχικά αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει μια ιδιαιτερότητα όσον αφορά στην εξέλιξη της ενεργειακής κατανάλωσης. Συγκεκριμένα, σε αντίθεση με τη συνεχή αύξηση της παγκόσμιας παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας, στην Ελλάδα η αύξηση αυτή έχει ανακοπεί και έχει σημειωθεί μείωση μετά το 2008. Αυτό σχετίζεται άμεσα με τις συνέπειες της οικονομικής κρίσης και την ένταση με την οποία αυτή επηρέασε τη χώρα. Τα τελευταία χρόνια, η ενεργειακή παραγωγή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2, έχει μειωθεί (μείωση της τάξης του 15%), ενώ από το 2015 και μετά αυτή βρίσκεται με διακυμάνσεις εντός ορισμένων σταθερών ορίων.

Σε μια προσπάθεια να γίνει κατανοητή η εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος, στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζεται ανά πηγή ενέργειας η ετήσια παραγωγή σε TWh. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν πέρα του πιο πρόσφατου έτους για το οποίο υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα και αλλά δύο κομβικά έτη, το 2008 (έναρξη οικονομικής κρίσης-μέγιστη τιμή ενεργειακής κατανάλωσης) και το 2016 (υπαγωγή της ΔΕΗ στο υπερταμείο). Μεταξύ των βασικών συμπερασμάτων, μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί ότι η απολιγνιτοποίηση της χώρας έχει ξεκινήσει σταδιακά από το 2000 και έπειτα. Κομβικό όμως διάστημα αποτελούν τα έτη 2016-2017, κατά το οποίο επιταχύνεται η διαδικασία αυτή. Το κενό που δημιουργείται από τον περιορισμό του λιγνίτη, καλύπτεται από την περαιτέρω διεύδυση στο μίγμα αιολικής και ηλιακής ενέργειας καθώς και φυσικού αερίου.

Electricity production by source, Greece



Source: Ember's Yearly Electricity Data; Ember's European Electricity Review; Energy Institute Statistical Review of World Energy
Note: 'Other renewables' includes waste, geothermal, wave and tidal.
OurWorldInData.org/energy • CC BY

Εικόνα 2.2: Η εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος στην Ελλάδα τις τελευταίες δεκαετίες (Πηγή: Our World in Data)

Πίνακας 2.1: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά πηγή στην Ελλάδα (Πηγή: Our World in Data)

Παραγωγή Ενέργειας στην Ελλάδα (TWh)			
Πηγή	2008	2016	2022
Λιγνίτης	33.36	18.88	5.46
Φυσικό Αέριο	13.80	14.97	19.56
Πετρέλαιο	10.01	5.67	4.71
Υδροηλεκτρικά	3.31	2.24	4.73
Άνεμος	2.24	5.15	10.86
Ήλιος	0.01	3.93	6.62
Βιομάζα	0.19	0.27	0.50
Σύνολο	62.92	54.41	52.44

2.2 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι ΑΠΕ διακρίνονται σε μονάδες συνεχούς παραγωγής (από πηγές πάντοτε διαθέσιμες, όπως όπως οι μονάδες γεωθερμίας, βιομάζας και βιοαερίου), ελαστικής παραγωγής (από πηγές διαθέσιμες κατ' επιλογήν, όπως τα μικρά υδροηλεκτρικά), και διαλείπουσας ή στοχαστικής παραγωγής (από ηλιακά ή αιολικά συστήματα ΑΠΕ) (Αγαπητίδου, 2021).

Εστιάζοντας στις μονάδες διαλείπουσας παραγωγής αυτές έχουν την ιδιαιτερότητα ότι δεν παράγονται όταν το σύστημα τις χρειάζεται, αλλά όταν οι καιρικές συνθήκες είναι κατάλληλες. Επομένως, εισάγεται επιπλέον πολυπλοκότητα στο (ήδη περίπλοκο) σύστημα διαχείρισης της ενέργειας, αφού ο διαχειριστής είναι υποχρεωμένος να προσαρμόσει την ενεργειακή παραγωγή από τους άλλους σταθμούς, ανάλογα με τις διακυμάνσεις της παραγόμενης αιολικής και ηλιακής ενέργειας. Η διείσδυση στο δίκτυο αιολικών μονάδων εγκατεστημένης ισχύος τις τάξεως των 3 GW και άνω, σύμφωνα με μελέτη του ΕΜΠ (Διαλυνάς κ.α., 2007) δεν είναι εφικτή χωρίς την αλλαγή υποδομών, αφού η ΔΕΗ δεν θα μπορεί να διαχειριστεί την ενέργεια, καθόσον μάλιστα η νομοθεσία την υποχρεώνει να αγοράζει όλη την παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ ανεξάρτητα από το αν τη χρειάζεται.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προκλήσεων, είναι απαραίτητο ο σχεδιασμός και η εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές να γίνεται με τρόπο ορθολογικό και όχι άναρχο, με κριτήριο την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, την ομαλή ένταξη των νέων μονάδων στο φυσικό, αλλά και κοινωνικό περιβάλλον, καθώς και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Για να μπορέσει λοιπόν να αυξηθεί η συμμετοχή των ΑΠΕ χρειάζονται σημαντικές επεμβάσεις, όπως ο εκσυγχρονισμός και η επέκταση του δικτύου, η κατασκευή υδροηλεκτρικών έργων με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας, και η δρομολόγηση διεθνών συμφωνιών για ανταλλαγή ενέργειας προσαρμοζόμενη σε πραγματικό χρόνο.

2.2.1 Άνεμος και Αιολικές Μηχανές

Ο ατμοσφαιρικός αέρας ο οποίος περιβάλλει τη γη βρίσκεται σε διαρκή κίνηση, λόγω της ανομοιομορφίας κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας, της ανομοιομορφίας του εδαφικού αναγλύφου και της περιστροφικής κίνησης της γης γύρω από τον άξονα της. Εκτιμάται ότι το 1.5-2.5% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια μαζών στην ατμόσφαιρα (Μπαλάρας κ.α., 2006). Οι κινήσεις του αέρα διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Σε ανοδικές και καθοδικές κινήσεις,
- Σε οριζόντιες, οι οποίες αποτελούν και τις σπουδαιότερες κινήσεις και ονομάζονται άνεμοι.

Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα εκτείνεται 500-100 m από τη επιφάνεια του εδάφους και διακρίνεται σε 3 κύρια ατμοσφαιρικά υποστρώματα:

- Το επιφανειακό στρώμα (turbulent surface layer): Χαρακτηρίζεται από έντονες τυρβώδεις κινήσεις την μέρα και εκτείνεται σε ύψος 20-50 m από το έδαφος. Τη νύχτα, οι κινήσεις είναι λιγότερο έντονες και το στρώμα εκτείνεται σε μόλις μερικά μετρά από την επιφάνεια του εδάφους.
- Το στρώμα τραχύτητας (roughness layer): Χαρακτηρίζεται από ακανόνιστη ροή καθώς επηρεάζεται από τα στοιχεία τραχύτητας (κτίρια, βλάστηση). Θεωρείται ότι το ύψος επίδρασης τους φτάνει στο διπλάσιο με τριπλάσιο του μέσου ύψους του εμποδίου.
- Το στρώμα στρωτής ροής (laminar boundary layer): Σε αυτό το ατμοσφαιρικό στρώμα, η ροή του ανέμου θεωρείται κατά προσέγγιση στρωτή και δεν επικρατούν τυρβώδεις αναταράξεις. (Oke, 1987)

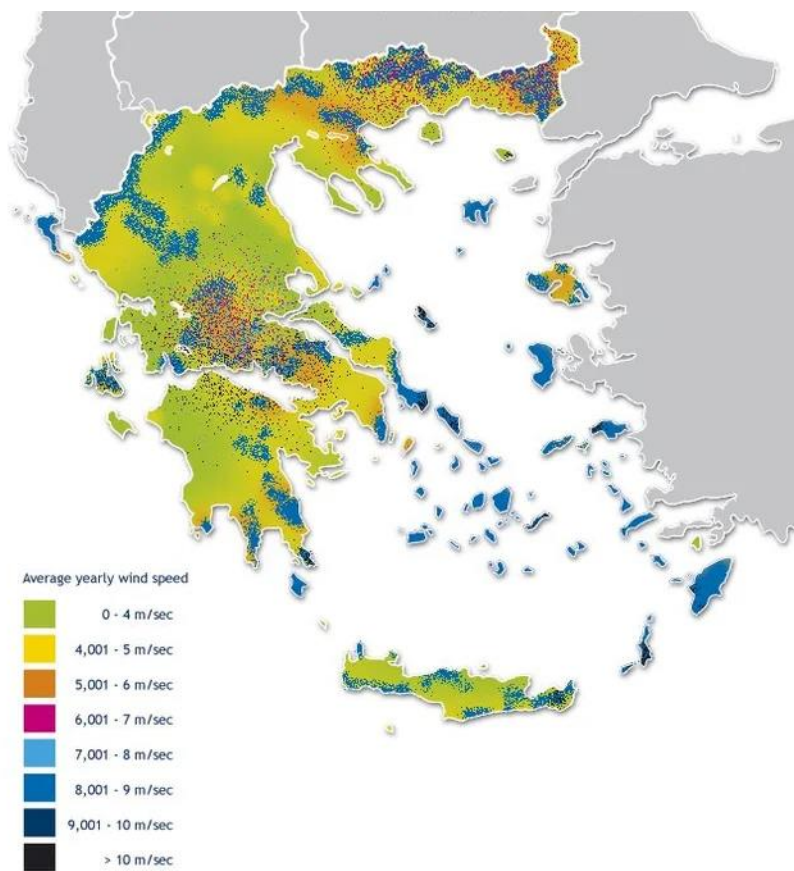
Τα δύο βασικά χαρακτηριστικά του ανέμου είναι η διεύθυνση πνοής και η ταχύτητα του ανέμου. Ως διεύθυνση ορίζεται ως το σημείο του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος. Μετράται κυρίως σε 16 διευθύνσεις ή σε μοίρες.

Κατά τη διαδικασία επιλογής και εγκατάστασης ενός αιολικού πάρκου, βασική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψιν είναι το αιολικό δυναμικό της περιοχής. Το αιολικό δυναμικό σχετίζεται με την ενέργεια των

κινούμενων αερίων μαζών και ο όρος χρησιμοποιείται βιβλιογραφικά για αν δηλώσει τα τρία ακόλουθα μεγέθη:

- Το φυσικώς διαθέσιμο αιολικό δυναμικό, το οποίο αποτελεί το σύνολο της κινητικής ενέργειας των αερίων μαζών ετησίως σε μια περιοχή. Το συγκεκριμένο μέγεθος είναι καθαρά θεωρητικό.
- Το τεχνικώς αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό, το οποίο αποτελεί μέρος του φυσικού αιολικού δυναμικού και περιλαμβάνει την ενέργεια του ανέμου η οποία μπορεί να δεσμευτεί από τις αιολικές μηχανές, χωρίς να τίθεται κάποιου είδους οικονομικός περιορισμός. Πέρα από το φυσικό υπόβαθρο το συγκεκριμένο μέγεθος εξαρτάται και από τη διαθέσιμη τεχνολογία και επομένως μεταβάλλεται συνεχώς.
- Το οικονομικώς αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό, το οποίο αποτελεί το μέρος του τεχνικώς αξιοποιήσιμου αιολικού δυναμικού, το οποίο μπορεί να αποφέρει οικονομικό όφελος. Το συγκεκριμένο μέγεθος εξαρτάται τόσο από τη διαθέσιμη κάθε στιγμή τεχνολογία, αλλά και από τις εκάστοτε οικονομικές συνθήκες. (Μπαλάρας κ.α., 2006)

Το φυσικώς διαθέσιμο και κατ' επέκταση και τα υπόλοιπα μεγέθη του αιολικού δυναμικού εξαρτώνται από την τοπογραφία της περιοχής, το υψομετρικό, αλλά και τις ιδιαίτερες τοπικές συνθήκες. Στην Εικόνα 2.3, απεικονίζεται η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου, δίνοντας έτσι τη γενική εικόνα του αιολικού δυναμικού, στα χερσαία τμήματα της χώρας. Είναι προφανές ότι το αιολικό δυναμικό είναι ιδιαίτερα υψηλό στην κεντρική Ελλάδα, στους κύριους ορεινούς όγκους της χώρα (Πίνδος, Ροδόπη), καθώς και στα νησιά του Αιγαίου. Με αυτόν τον τρόπο, καθορίζονται και οι περιοχές της χώρας στις οποίες η τοποθέτηση ανεμογεννητριών μπορεί να είναι αποδοτική και οικονομικά συμφέρουσα.



Εικόνα 2.3: Χάρτης μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου στον Ελλαδικό χώρο (Πηγή: ΚΑΠΕ)

Τα περιβαλλοντικά οφέλη από την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας είναι πολλά και ορισμένα από αυτά παρατίθενται ακολούθως:

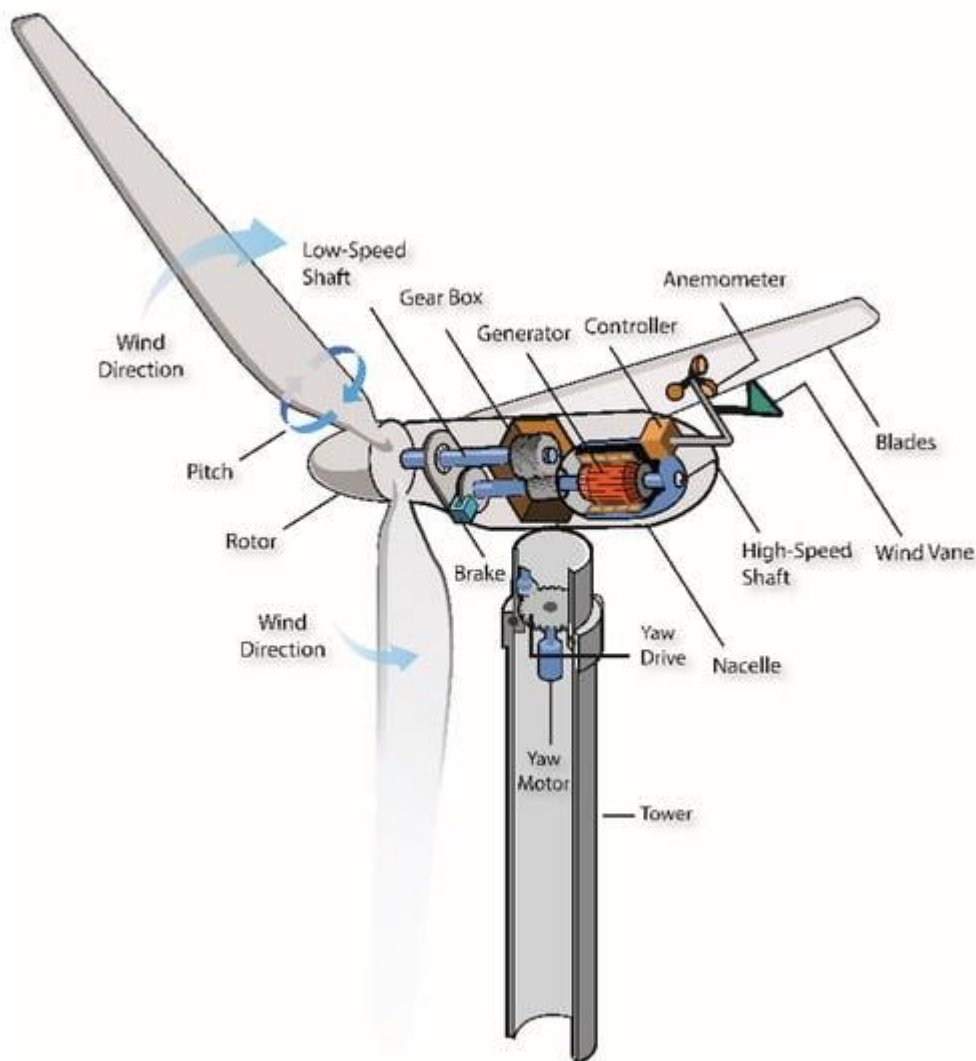
- 1 MW αιολικής ενέργειας καλύπτει τις ανάγκες περίπου 350 οικιακών καταναλωτών και εξοικονομεί περίπου 300 τόνους πετρελαίου.
- • 1 GWh αιολικής ενέργειας εξοικονομεί 600 τόνους διοξειδίου του άνθρακα (CO₂).
- • Η ποσότητα CO₂ που ελκύεται κατά την κατασκευή και εγκατάσταση μίας ανεμογεννήτριας με χρόνο ζωής τα 20 έτη, «αποσβένεται» μέσα στους πρώτους 3 με 6 μήνες λειτουργίας της.
- Οι σύγχρονες αιολικές μηχανές είναι «αθόρυβες». Σε απόσταση 40 μέτρων από μία ανεμογεννήτρια, η στάθμη θορύβου είναι 50-60 dB(A). Σε απόσταση 200 μέτρων, μειώνεται στα 44 dB(A). Συγκριτικά, ο θόρυβος στο εσωτερικό αυτοκινήτου είναι περίπου 80 dB(A), στο εσωτερικό οικίας 50 dB(A) και σε ένα υπνοδωμάτιο 30 dB(A) (Λευθεριώτης, Τηνιακός, 2017).

Πάρα τα περιβαλλοντικά οφέλη κατά την εγκατάσταση αιολικών πάρκων, χρειάζεται να λαμβάνονται υπόψιν και ένα σύνολο ζητημάτων και αρνητικών επιπτώσεων, όπως η αναγκαιότητα κατασκευής μεγάλων οδικών έργων σε απρόσιτες περιοχές, η οπτική όχληση, οι αλλαγές στις χρήσεις γης και οι πιθανές επιδράσεις στον υδρολογικό κύκλο, η επίδραση τους στους πληθυσμούς των πτηνών που διέρχονται από την περιοχή, καθώς και οι κοινωνικές, ιστορικές, πολιτισμικές συνθήκες της κάθε περιοχής. Για την αντιμετώπιση των παραπάνω ζητημάτων από τη μία χρειάζεται λεπτομερής και ολοκληρωμένη μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, σε συνδυασμό με την οριοθέτηση προστατευόμενων αδόμητων περιοχών και την απαγόρευση εγκατάστασης ανεμογεννητριών σε καμένες δασικές εκτάσεις.

Παράλληλα, χρειάζεται η υιοθέτηση μιας προσέγγισης, όπως προτείνεται σε σχετική διπλωματική εργασία (Μαντά, 2021), κατά την οποία η κατασκευή ενός κοινωφελούς έργου, άρα και ενός αιολικού πάρκου, δεν θα πρέπει να στοχεύει μόνο στην εξυπηρέτηση του χρηστικού του σκοπού, αλλά θα πρέπει να υπηρετεί την κοινωνία με κάθε τρόπο που του αναλογεί. Τα έργα ΑΠΕ είναι πονήματα δημιουργών που προορίζονται για την ευημερία του κοινωνικού συνόλου. Συνεπώς, θα πρέπει να εκφράζουν τόσο τον δημιουργό όσο και την κοινωνία σε κάθε επίπεδο. Για την καλύτερη εναρμόνιση ενός κατασκευαστικού έργου στο περιβάλλον (φυσικό και κοινωνικό) και τον περιορισμό στο ελάχιστο των οπτικών οχλήσεων, κρίνεται αναγκαία η προσέγγισή του ως έργο τέχνης. Απαιτείται ξεκάθαρος και στοχευμένος αισθητικός σχεδιασμός, ο οποίος θα λαμβάνει υπόψη τη μορφολογία, την ιστορία, τον πολιτισμό, τα κοινωνικά και πολιτικά χαρακτηριστικά του τόπου, με σκοπό την αρμονική ένταξη του στο τοπίο και την κοινωνία ως σύνολο. Η χρήση εργαλείων πολυκριτηριακής θεωρητικής ανάλυσης, καθώς και στοχαστικής ανάλυσης μπορεί να δώσει ποσοτικά στοιχεία σχετικά με την αλλοίωση ή μη που προκαλεί ένα μεγάλο τεχνικό έργο στο περιβάλλον (Μαντά, 2021).

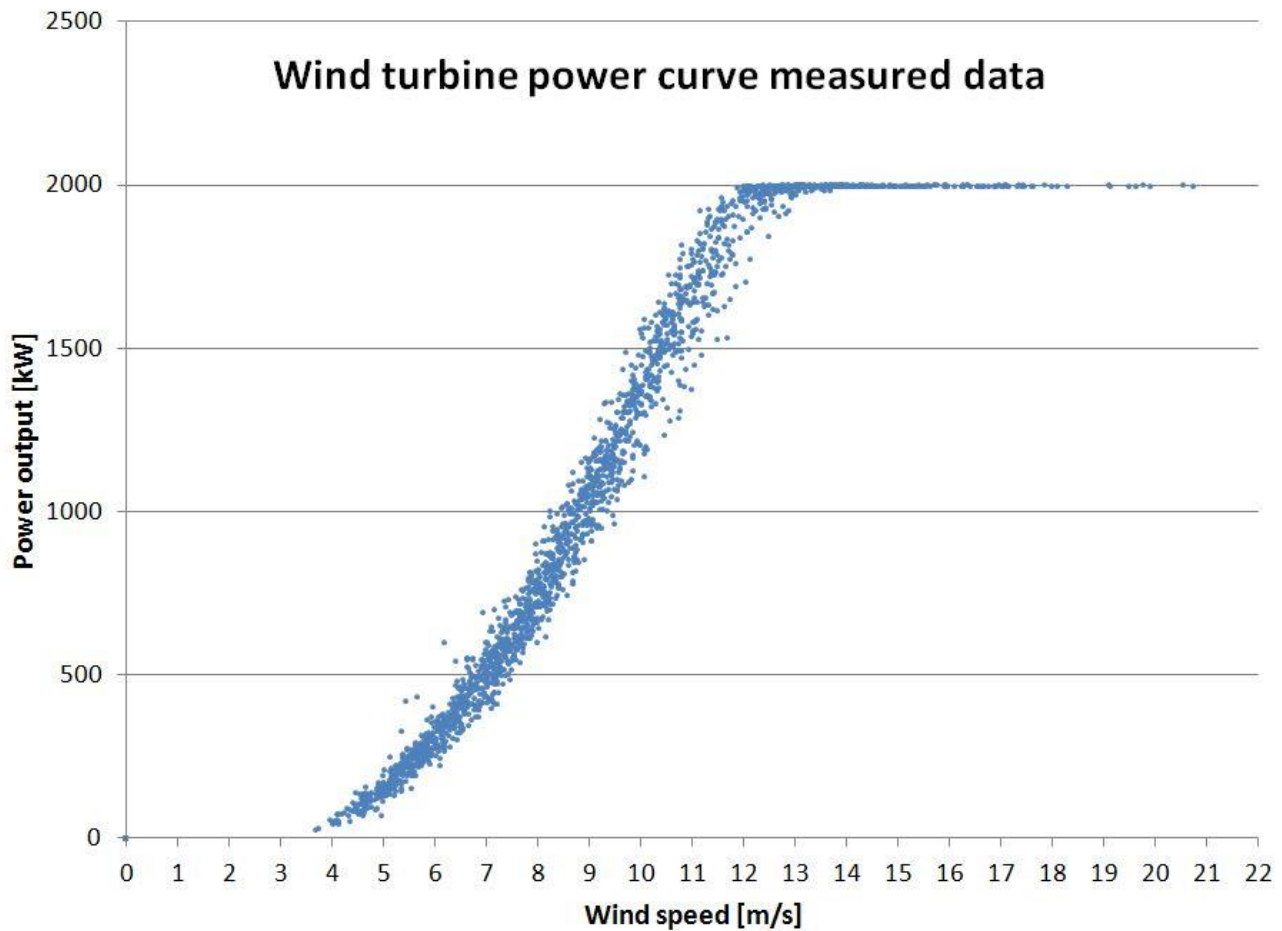
Ειδικότερα, ορισμένα βασικά κριτήρια χωροθέτησης για τη διασφάλιση της λειτουργικότητας και της απόδοσης των αιολικών πάρκων είναι η μεγιστοποίηση της απόστασης από υφιστάμενη οδό χερσαίας προσπέλασης οποιασδήποτε κατηγορίας, η μεγιστοποίηση της απόστασης από το σύστημα μεταφοράς ενέργειας Υψηλής Τάσης (Υ.Τ.) και η ελαχιστοποίηση της απόστασης μεταξύ των ανεμογεννητριών. (Μπαλτάς, 2021).

Όσον αφορά το τεχνικό-κατασκευαστικό κομμάτι των αιολικών μηχανών, οι ανεμογεννήτριες μπορούν να διακριθούν σε οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα και να τοποθετηθούν τόσο στη στεριά, όσο και υπεράκτια. Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα μπορούν να λειτουργήσουν για οποιαδήποτε διεύθυνση ανέμου. Αντίθετα, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα πρέπει να τοποθετηθούν προς την προσήνεμη πλευρά, έχουν όμως μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Τα βασικά μέρη μιας αιολικής μηχανής, όπως φαίνονται και στην Εικόνα 2.4, είναι η πτερωτή, ο δρομέας, το σύστημα μετάδοσης κίνησης, η ηλεκτρογεννήτρια, ο πύργος, καθώς και ο ηλεκτρονικός πίνακας και ο πίνακας ελέγχου.



Εικόνα 2.4: Τα βασικά μέρη μίας ανεμογεννήτριας (Πηγή: Fu et al., 2020)

Οι αιολικές μηχανές χαρακτηρίζονται από την καμπύλη ισχύος, η οποία είναι χαρακτηριστική για κάθε μοντέλο ανεμογεννήτριας. Με βάση τη συγκεκριμένη καμπύλη, προκύπτει η ισχύς που μπορεί να παράγει η αιολική μηχανή ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα καμπύλης ισχύος, το οποίο έχει προκύψει μέσω μετρήσεων, παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.5. Για χαμηλές ταχύτητες του ανέμου, οι ανεμογεννήτριες δεν μπορούν να παράγουν ενέργεια. Η λειτουργία τους ξεκινάει από μία ελάχιστη ταχύτητα, της τάξης των 3-5 m/s, η οποία ονομάζεται ταχύτητα κατωφλίου. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα, τόσο αυξάνεται και η ισχύς που μπορεί να αποδώσει η ανεμογεννήτρια. Η αύξηση της ισχύος συνεχίζεται μέχρι να φτάσει σε μία μέγιστη τιμή, η οποία ονομάζεται ονομαστική ισχύς. Οποιαδήποτε περαιτέρω αύξηση στην ταχύτητα δεν αυξάνει την ισχύ, η οποία παραμένει σταθερή και ίση με τη μέγιστη. Η ονομαστική ισχύς επιλέγεται ώστε να είναι συμβατή με τα ανεμολογικά στοιχεία της περιοχής, στην οποία τοποθετείται. Οι ανεμογεννήτριες παύουν να λειτουργούν για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες των 25 m/s., ώστε να αποφευχθούν φθορές και πιθανές βλάβες.

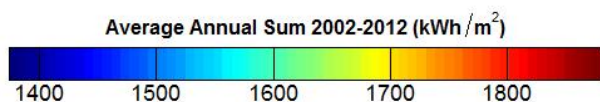
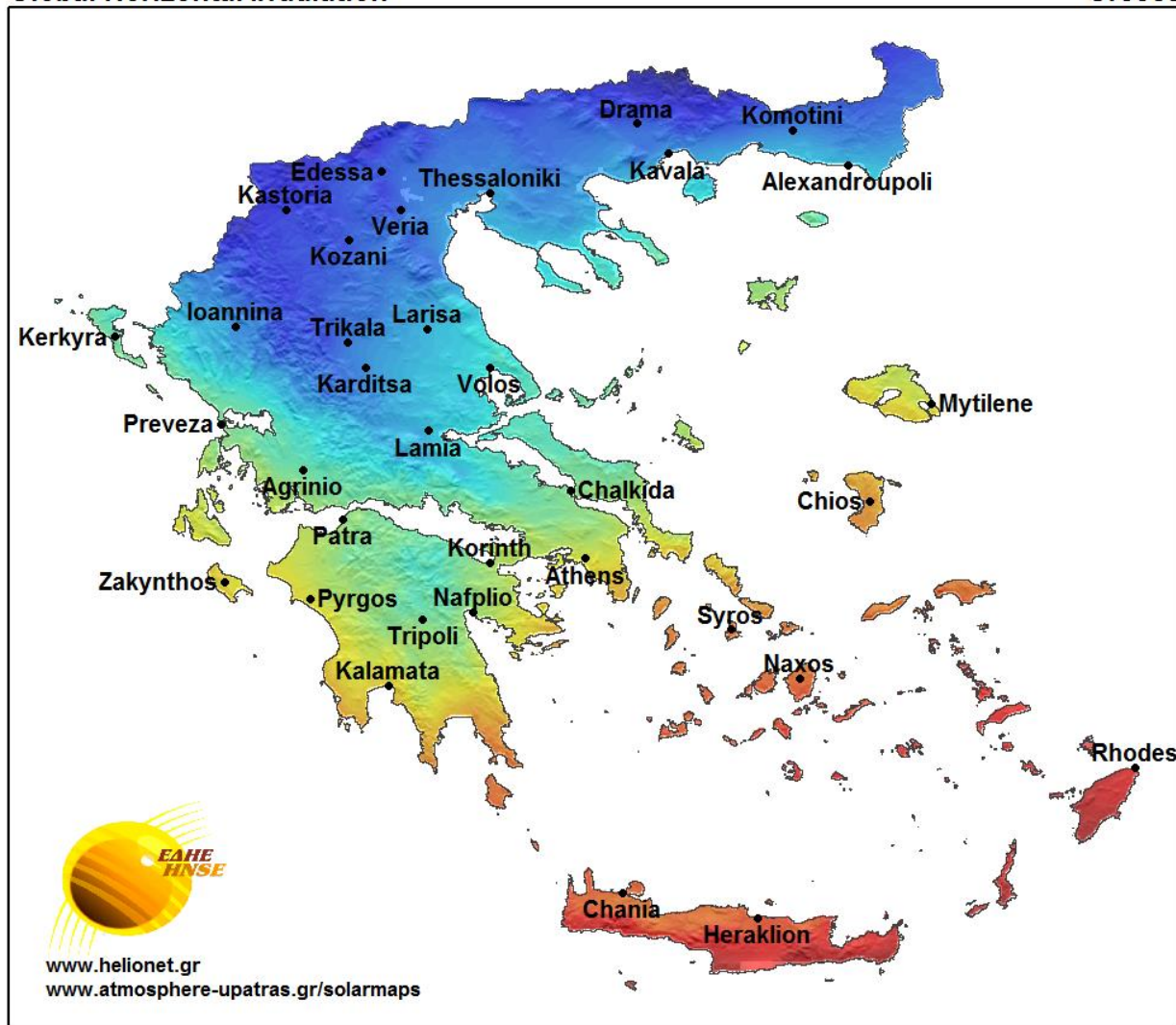


Εικόνα 2.5: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας (Πηγή: <http://www.estiaconsulting.gr/el/FFC02B0E>)

2.2.2 Ηλιακή Ενέργεια

Ο ήλιος αποτελεί τη μοναδική πηγή ενέργειας που επηρεάζει τη δυναμική της ατμόσφαιρας και το κλίμα της γης. Η ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο φτάνει στη γη με την μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ηλιακή ακτινοβολία διακρίνεται στην άμεση, η οποία φτάνει απευθείας στη γήινη επιφάνεια και χαρακτηρίζεται από μικρό μήκος κύματος και στην διάχυτη ακτινοβολία, η οποία έχει σκεδαστεί λόγω της αλληλοεπίδρασης με την ατμόσφαιρα και παρουσιάζει μεγαλύτερα μήκη κύματος. Βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στη γη είναι η απορρόφηση της από την ατμόσφαιρα, το ύψος και η απόσταση του ήλιου, το γεωγραφικό πλάτος και το υψόμετρο της θέσης καθώς και η κλίση της επιφάνειας πρόσπτωσης. Η διάχυτη ακτινοβολία επηρεάζεται επιπλέον από την ανακλαστικότητα του εδάφους, καθώς και το ποσό και το είδος νεφοκάλυψης.

Στην Εικόνα 2.6, παρουσιάζεται το ηλιακό δυναμικό στην Ελλάδα, σε όρους αθροιστικής μέσης ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας. Όπως διαπιστώνεται, η προσπίπτουσα ακτινοβολία εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές στα νότια και νησιώτικα τμήματα της χώρας, καθώς και στις παράκτιες περιοχές της ηπειρωτικής Ελλάδας.



© 2013 Hellenic Network of Solar Energy

Εικόνα 2.6: Το ηλιακό δυναμικό στην Ελλάδα: Ολική οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας (Πηγή: <https://www.atmosphere-upatras.gr/solarmaps>)

Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας διακρίνονται στα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά και τα φωτοβολταϊκά. Τα παθητικά συστήματα ενσωματώνονται στα κτίρια, με στόχο την αξιοποίηση των φυσικών φαινομένων μετάδοσης θερμότητας και ακτινοβολίας. Λειτουργούν χωρίς μηχανολογικά εξαρτήματα και δεν παράγουν πρόσθετη ενέργεια. Τα ενεργητικά συστήματα περιλαμβάνουν συμβατικό ενεργειακό εξοπλισμό (αντλίες, κυκλοφορητές) για την συλλογή, αποθήκευση, διανομή και εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, καθώς και συστήματα ελέγχου και αυτοματισμού. Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα επιτυγχάνουν μεγαλύτερα ποσοστά εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας και επιτρέπουν καλύτερο έλεγχο της λειτουργίας και της απόδοσής τους (Μπαλάρας κ.α., 2006). Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενεργητικών συστημάτων είναι ο ηλιακός συλλέκτης (ηλιακός θερμοσίφωνας), ο οποίος αποτελείται από σωληνώσεις νερού, γυαλί και μόνωση και έχει ως στόχο τη θέρμανση ενός ρευστού (συνήθως νερού ή αέρα) (Φελώνη, 2021).

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου μετατρέπουν μέρος της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας σε συνεχές ρεύμα. Η μετατροπή αυτή γίνεται μέσω της απορρόφησης των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας από ειδικούς ημιαγωγούς τοποθετημένους σε ειδικές φωτοβολταϊκές κυψέλες, τους συλλέκτες. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα ή να αποθηκευτεί σε μπαταρίες ή σε κάποιο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Οι ημιαγωγοί είναι τοποθετημένοι σε ειδικές φωτοβολταϊκές κυψέλες, οι οποίες αποτελούν τη βασική μονάδα ενός φωτοβολταϊκών συστήματος. Μία κυψέλη είναι μικρή και παράγει περίπου 1 ή 2 Watt ισχύος. Για να αντέχουν στις συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος για μεγάλα χρονικά διαστήματα, τοποθετούνται ανάμεσα σε προστατευτικά υλικά σε συνδυασμό από γυαλί ή/και πλαστικό. Για την ενίσχυση της ισχύος εξόδου των φωτοβολταϊκών κυψελών, συνδέονται μεταξύ τους σε αλυσίδες για να σχηματίσουν μεγαλύτερες μονάδες γνωστές ως φωτοβολταϊκά πάνελ. Ένα σύνολο φωτοβολταϊκών πάνελ δημιουργούν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα (Βουράκης, 2022).

Το 95% της αγοράς των φωτοβολταϊκών, χρησιμοποιούν ως ημιαγωγό μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό πυριτίο. Τα πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι πιο αποδοτικά, δεδομένου ότι επιτρέπουν την πιο εύκολη μεταφορά ηλεκτρονίων κατά την παραγωγή ηλεκτρισμού. Παρόλα αυτά, το κόστος τους είναι πιο αυξημένο σε σχέση με τα πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Ο βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών πυριτίου κυμαίνεται στο 20-25%. Άλλες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών χρησιμοποιούν λεπτές μεμβράνες για την διαμόρφωση των κυψελών. Οι μεμβράνες αυτές χρησιμοποιούν ως ημιαγωγούς κυρίως τελουριούχο κάδμιο και μπορούν να κατασκευαστούν με σχετικά χαμηλό κόστος. Οι αποδόσεις τους όμως είναι μικρότερες σε σχέση με τα πάνελ πυριτίου. Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες, όπως τα οργανικά φωτοβολταϊκά, οι κβαντικές τελείες, τα φωτοβολταϊκά περοβσκίτη και τα πολυεπαφικά φωτοβολταϊκά συστήματα, τα οποία βρίσκονται κατά βάση σε ερευνητικό-πειραματικό στάδιο. Ειδικά για τα τελευταία, για τη διαμόρφωση των κυψελών χρησιμοποιούνται πολλαπλά ημιαγωγιμα υλικά και μπορούν να πετύχουν αποδόσεις υψηλότερες από 45%. Παρόλα αυτά το κόστος τους είναι ιδιαίτερα υψηλό και η κατασκευή τους δύσκολη, με αποτέλεσμα η εφαρμογή τους να περιορίζεται σε διαστημικές εφαρμογές (<https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>).

Για την χωροθέτηση ενός φωτοβολταϊκού πάρκου προτεραιότητα θα πρέπει να δίνεται σε γυμνές και άγονες περιοχές με χαμηλό υψόμετρο, κατά προτίμηση αθέατες από πολυσύχναστους χώρους, οι οποίες να προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες διασύνδεσης με το δίκτυο της ΔΕΗ. Από τις περιοχές που εξετάζονται κάθε φορά, θα πρέπει να αποκλείονται περιοχές Natura, γεωργικές εκτάσεις υψηλής παραγωγικότητας, περιοχές απόλυτου προστασίας της φύσης, μνημεία μείζονος σημασίας (Μπαλάς, 2021).

2.3 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.3.1 Στοιχεία για την αποθήκευση ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί ως έχει, αλλά μπορεί να μετατραπεί και να αποθηκευτεί σε άλλες μορφές ενέργειας και να μετατραπεί ξανά, σε μεταγενέστερο χρόνο, σε ηλεκτρική ανάλογα με τη ζήτηση. Διαμορφώνονται έτσι συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία φορτίζονται σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και αποφορτίζονται, όταν χρειάζεται να καλυφθούν οι αιχμές. Με βάση τον μηχανισμό που χρησιμοποιούν, αυτά τα συστήματα μπορούν να διακριθούν σε ηλεκτροχημικά, σε χημικά, σε ηλεκτρικά, σε θερμικά και μηχανικά.

Βασικοί στόχοι ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας είναι:

- Η εξομάλυνση της ανισορροπίας μεταξύ ενεργειακής ζήτησης και ενεργειακής παραγωγής.

- Η μείωση του κόστους προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας μέσα από την αποθήκευση της σε χρόνους εκτός αιχμής.
- Η βελτίωση της αξιοπιστίας σε περιπτώσεις απρόβλεπτων αστοχιών ή καταστροφών.
- Η διατήρηση και η βελτίωση της ποιότητας ισχύος στο δίκτυο (συχνότητα, τάση). (Gilfillan, 2022; Mensah, 2022)

Σε όλους τους τύπους αυτών των συστημάτων, υπάρχουν ενεργειακές απώλειες κατά τη φόρτιση και την εκφόρτισή τους.

Οι βασικές τεχνολογίες μηχανικής ή θερμικής αποθήκευσης ενέργειας είναι οι ακόλουθες:

- Αντλησιοταμίευση (Pumped Hydropower Storage - PHPS): Η ενέργεια χρησιμοποιείται για άντληση ύδατος από κατάντη ταμιευτήρα ή από τη θάλασσα και αποθηκεύεται σε ανάντη ταμιευτήρα ή λιμνοδεξαμενή. Η ενέργεια έχει μετατρέψει σε υδροδυναμική, η οποία ανακτάται όταν υπάρξει αιχμή στη ζήτηση. Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης, δεδομένου ότι αποτελούν και στοιχείο του συστήματος που μελετάται στην παρούσα εργασία, παρουσιάζονται αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 2.3.2.
- Τεχνικές θερμικής αποθήκευσης ενέργειας (Thermal Energy Storage - TES): Θερμική ενέργεια αποθηκεύεται με τη χρήση κατάλληλου αποθηκευτικού μέσου.
- Συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage - CAES): Η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή συμπιεσμένου αέρα σε υψηλές πιέσεις. Για την ανάκτηση της αποθηκευμένης ενέργειας, ο συμπιεσμένος αέρας εκτονώνεται και ενεργοποιεί γεννήτριες ηλεκτρικού ρεύματος. Τα συγκεκριμένα συστήματα είναι κατάλληλα για μεγάλης κλίμακας και μακράς διάρκειας εφαρμογές.
- Σφόνδυλοι για αποθήκευση ενέργειας (Flywheel Energy Storage - FES): Το πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας αποθηκεύεται σε υψηλής γωνιακής ταχύτητας δίσκους-σφονδύλους. Η μορφή της αποθηκευμένης ενέργειας είναι κινητική και μπορεί να αξιοποιηθεί σε επόμενο χρονικό διάστημα για την ενεργοποίηση γεννήτριας και την παραγωγή ηλεκτρισμού. Είναι κατάλληλα για μικρής και μεσαίας κλίμακας εφαρμογές και για διάρκειες μικρότερης περιόδου.
- Συστήματα αποθήκευσης με αντλίες θερμότητας (Pumped Thermal Energy Storage - PTES): Τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν όχι μόνο για παραγωγή/αποθήκευση ηλεκτρισμού, αλλά και για συμπαραγωγή θέρμανσης και ηλεκτρισμού ή ακόμα και για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού, θέρμανσης και ψύξης.

Πέρα από τις τεχνολογίες που εξετάστηκαν και βασίζονται σε μηχανικές/θερμικές μεθόδους αποθήκευσης, η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί και σε χημική μορφή, όπως συμβαίνει με τα διάφορα ήδη μπαταριών. Η αποθήκευση σε μπαταρίες χρησιμοποιείται σε μικρομεσαία χωρική και χρονική κλίμακα και κυρίως για την διασφάλιση της ποιότητας ισχύος και την ομαλή λειτουργία του δικτύου μεταφοράς και διανομής.

Επιπλέον τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί σημαντικά το ενδιαφέρον για τεχνολογίες Power to Gas - P2G. Δηλαδή για τεχνολογίες που αξιοποιούν την ενέργεια για παραγωγή αέριων καυσίμων. Ένα βασικό παράδειγμα μιας P2G τεχνολογίας είναι η παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης. Η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια αξιοποιείται για τη διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο και στη συνέχεια την αποθήκευση του υδρογόνου σε μορφή συμπιεσμένου αερίου ή υγρού (Μάρκου, 2014). Υπό φυσιολογικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, ισχύει ότι 1kg H₂ (υδρογόνου) καταλαμβάνει 12.15 m³ και ενεργειακό περιεχόμενο 33.5 kWh (Khozou, Gkanas, 2020). Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας, στις μεταφορές και στη βιομηχανία. Μπορεί επιπλέον να χρησιμοποιηθεί για έγχυση υδρογόνου στο δίκτυο φυσικού αερίου ή κατά τη διαδικασία μεθανιοποίησης για παραγωγή συνθετικού φυσικού αερίου. Η μεθανιοποίηση αποτελεί μία ακόμα τεχνολογία P2G, κατά την οποία το υδρογόνο αντιδρά με διοξείδιο του άνθρακα, είτε ατμοσφαιρικό, είτε δεσμευμένο από κάποιον θερμικό σταθμό και παράγεται συνθετικό φυσικό αέριο.

Σε επίπεδο διαχειριστικής μελέτης κατά την οποία στόχος είναι η δημιουργία σημαντικών αποθεμάτων ενέργειας για την κάλυψη αιχμών ζήτησης ολόκληρων οικισμών, οι βασικές τεχνολογίες που μπορούν να αξιοποιηθούν είναι η αντλησιοταμίευση, τα συστήματα CAES και οι P2G τεχνολογίες.

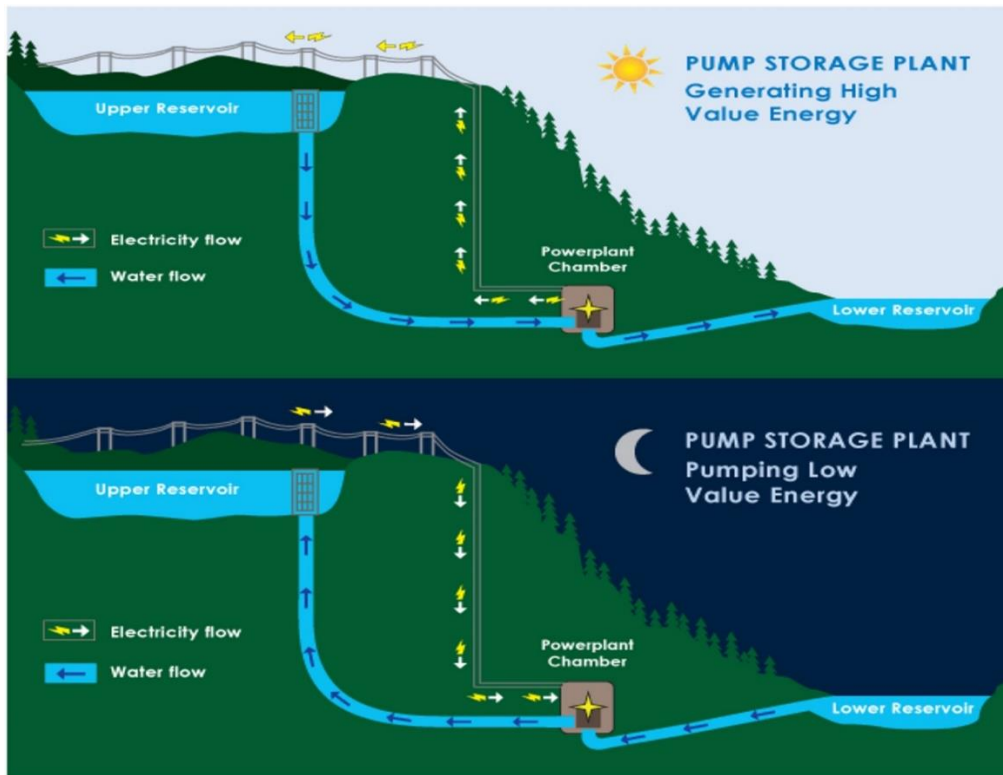
2.3.2 Βασικές αρχές των συστημάτων αντλησιοταμίευσης

Μία από τις πιο ώριμες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας είναι αυτή της αντλησιοταμίευσης (Breckner, 2018), η οποία καλύπτει πάνω από το 95% της εγκατεστημένης ισχύος των μονάδων αποθήκευσης σε παγκόσμια κλίμακα (Shaima et al., 2022; Deane et al., 2010).

Βασικό στοιχείο λειτουργίας του συστήματος, είναι οι μονάδες αντιστρεπτής λειτουργίας, αποτελούμενες από αντλιοστρόβιλους. Ο αντλιοστρόβιλος λειτουργεί ως αντλία κατά τη φόρτιση και την ανύψωση ύδατος από κατάντη ταμιευτήρα ή από τη θάλασσα σε ανάντη ταμιευτήρα ή λιμνοδεξαμενή και σαν στρόβιλος κατά την αιχμή ζήτησης, προκειμένου να παραχθεί η απαιτούμενη ενέργεια. Η ενέργεια που ανακτάται από την παραπάνω διαδικασία κυμαίνεται στο 70-80% της αρχικής ενέργειας, που δίνεται στο σύστημα (Hadjiraschalis et al., 2009). Οι απώλειες που παρατηρούνται, οφείλονται στην απόδοση των αντλιοστρόβιλων και στις υδραυλικές απώλειες (γραμμικές και τοπικές) στον αγωγό προσαγωγής.

Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες στην παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας, τόσο λόγω της ταχείας απόκρισης τους (παραγωγή ενέργειας μέσα σε λίγα λεπτά από την ενεργοποίηση του συστήματος), όσο και στην ικανότητα τους να διαχειρίζονται τις διακυμάνσεις των φορτίων του δικτύου. Οι διακυμάνσεις αυτές, από τη μία αφορούν σε χαρακτηριστικά φυσικά μεγέθη του παραγόμενου ηλεκτρισμού (τάση, συχνότητα) και από την άλλη σχετίζονται με διαφορές που εμφανίζονται μεταξύ ενεργειακής ζήτησης και παραγωγής (Goran et al., 2013). Παραδοσιακά, τα συστήματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τη διαχείριση των ενεργειακών πλεονασμάτων, που παράγονται από μονάδες συνεχούς λειτουργίας (λιγνιτικές μονάδες ή πυρηνικοί αντιδραστήρες), προκειμένου να αποθηκευτούν και να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των αιχμών. Σε μία πιο σύγχρονη προσέγγιση και με την στροφή σε περισσότερο πράσινες λύσεις, η αντλησιοταμίευση προσφέρει σημαντικές δυνατότητες για τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης των ΑΠΕ στο δίκτυο, των οποίων η λειτουργία χαρακτηρίζεται ως διαλείπουσα και η παραγωγή ενέργεια από μεγάλες αβεβαιότητες (Pérez-Díaz et al., 2015); Nikolaou et al., 2020). Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης χρησιμοποιούνται για ημερήσια έως εβδομαδιαία ρύθμιση (Deane et al., 2010).

Ένα τυπικό σύστημα αντλησιοταμίευσης μπορεί να διαμορφωθεί σε ήδη υπάρχοντες ταμιευτήρες, με την εγκατάσταση ενός δεύτερου, σχετικά μικρής χωρητικότητας, ταμιευτήρα ή μιας λιμνοδεξαμενής. Σαν αποτέλεσμα με μια ελάχιστη παρέμβαση σε ένα ήδη διαμορφωμένο περιβάλλον, μπορούν να δοθούν σημαντικές δυνατότητες αξιοποίησης, αλλά και πιο αποτελεσματικής διαχείρισης των υδατικών και ενεργειακών πόρων. Κατά την αναζήτηση όμως της θέσης εγκατάστασης ενός τέτοιου ταμιευτήρα, πρέπει να ληφθούν υπόψιν ένα σύνολο τεχνικών και λειτουργικών παραγόντων, προκειμένου να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα του συστήματος. Σε αυτούς του παράγοντες περιλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά του υπάρχοντος ταμιευτήρα και των υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων, η τοπογραφία της περιοχής, οι ενεργειακές απώλειες του συστήματος, το κόστος κατασκευής και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις.



Εικόνα 2.7: Σχηματική αναπαράσταση της δομής και της λειτουργίας ενός τυπικού συστήματος αντλιοσταμείωσης (Πηγή: Bitew et al., 2018)

Ειδικότερα, για την χωροθέτηση του δεύτερου ταμιευτήρα είναι αναγκαία η αναζήτηση κατάλληλων θέσεων στην περιοχή μελέτης. Τέτοιες θέσεις μπορεί να είναι φυσικά βυθίσματα στο έδαφος (Katsaprakakis et al., 2013), κοιλάδες που με την κατασκευή φράγματος μπορούν να κατακλυστούν με νερό (Χυ, Wang, 2017), καθώς και επίπεδες περιοχές, όπου με μερική ή ολική διαμόρφωση του εδάφους μέσω εκσκαφών, μπορούν να μετατραπούν λεκάνες κατάκλισης (Komatsu et al., 2005). Προσοχής χρήζει το γεγονός ότι σε φυσικές κοιλάδες απαιτείται η εφαρμογή υδατοστεγανών στοιχείων, ώστε να μειωθεί στο ελάχιστο η διαπερατότητα του πυθμένα. Παράλληλα, είναι σημαντικό να διασφαλίζεται η ελαχιστοποίηση της οριζόντιας απόστασης και η μεγιστοποίηση της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ νέου και υπάρχοντος ταμιευτήρα, ώστε να διασφαλιστεί η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας (μεγάλα ύψη πτώσης, μεγαλύτερο δυναμικό) και η ελαχιστοποίηση των υδραυλικών απωλειών (μείωση των υδραυλικών απωλειών, όσο μειώνεται το μήκος του αγωγού πτώσης) (Kucukali, 2014; Τσικνάκου κ.α., 2017).

Επιπρόσθετα, για κατασκευαστικούς και λειτουργικούς λόγους είναι αναγκαίο η στάθμη του κατάντη ταμιευτήρα, όπου τοποθετούνται και οι αντλιοστρόβιλοι, να παρουσιάζει σχετικά μικρές διακυμάνσεις, της τάξης των μερικών μέτρων. Συγκεκριμένα, λειτουργικοί περιορισμοί κατά την άντληση, που σχετίζονται με την αποφυγή ανάπτυξης υποπίεσεων και φαινομένων σπηλαιώσης, απαιτούν οι αντλίες να είναι τοποθετημένες 15 με 20 m κάτω από την ελάχιστη στάθμη λειτουργίας του κατάντη αποθηκευτικού ταμιευτήρα. Αυτή η απαίτηση, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, οδηγεί σε κατασκευή υπόγειων σταθμών. Επομένως, για μεγάλες διακυμάνσεις συνεπάγεται τη ανάγκη βαθύτερων εκσκαφών, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο τις κατασκευαστικές-λειτουργικές απαιτήσεις, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του έργου και το κόστος κατασκευής (Τσικνάκου κ.α., 2017).

3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

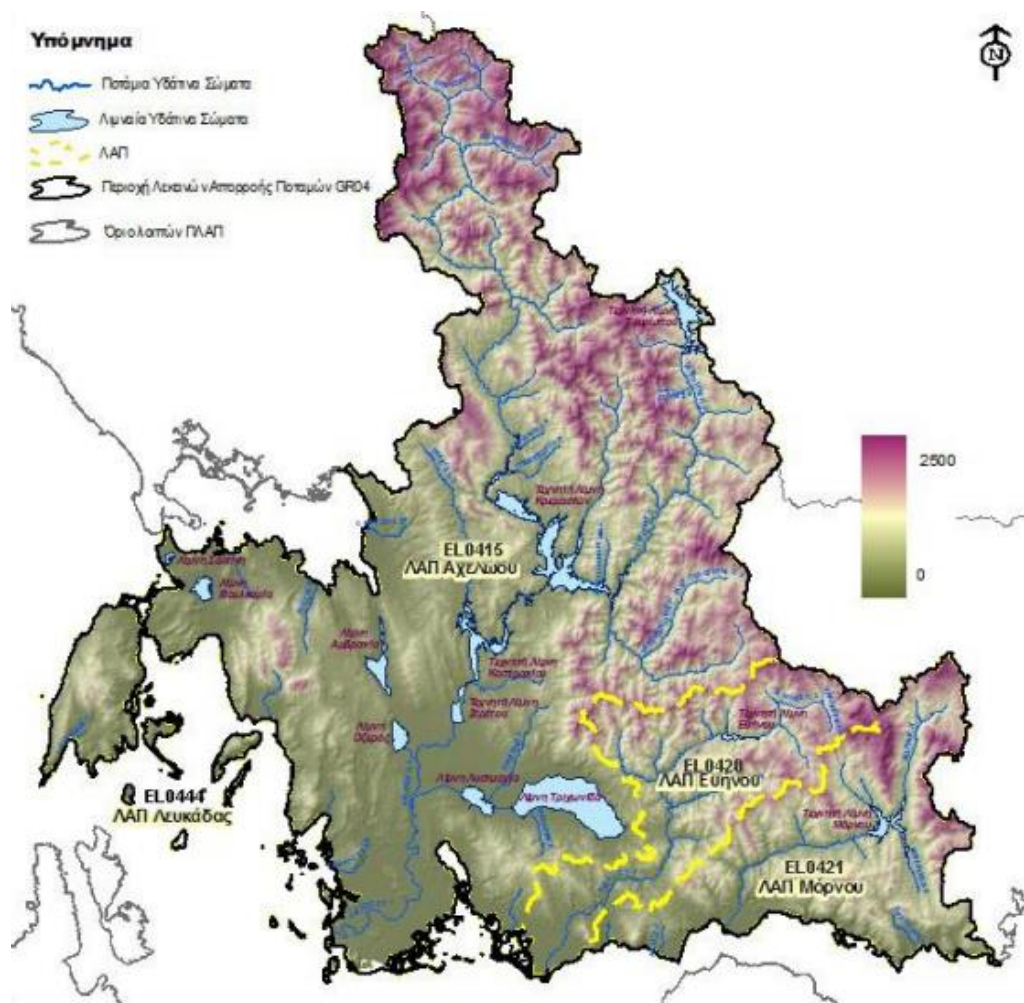
3.1 ΤΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΟΥ ΑΧΕΛΩΟΥ

Η λεκάνη απορροής (ΛΑΠ) του Αχελώου ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (EL04), το οποίο περιλαμβάνει επιπλέον τις υδρολογικές λεκάνες των ποταμών Μόρνου και Ευήνου, καθώς και τις περιοχές της Δυτικής Ακαρνανίας και της νήσου Λευκάδας. Η ΛΑΠ Αχελώου έχει έκταση 7526.22 km² και τα όριά της καθορίζονται από τις ακόλουθες οροσειρές: i) Δυτικά: Θύαμο, Μακρύ, Βάλτος, Αθαμάνια. ii) Βορειοδυτικά: Λάκμος και iii) Ανατολικά: Πίνδος, Τυμφρηστός, Οξιά, Παναιτωλικό. Το κλιματικό καθεστώς του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Στερεάς Ελλάδας χαρακτηρίζεται από μεγάλα ύψη ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (δεύτερο υψηλότερο στη χώρα μετά το Υδατικό Διαμέρισμα Ηπείρου- EL05). Η χωρική μεταβλητότητα των κατακρημνισμάτων είναι σημαντική, με μέση ετήσια τιμή της τάξης των 700-800 mm στα πεδινά τμήματα και 1500-2000 mm στα ορεινά. Ειδικότερα, στον Άνω ρου του Αχελώου, οι τιμές υπερβαίνουν τα 2000 mm ετησίως (Σχέδια Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών -ΣΔΛΑΠ, 2023). Οι κύριες χρήσεις των επιφανειακών νερών στο υδατικό διαμέρισμα Δ. Στερεάς Ελλάδας είναι αρδευτική και η παραγωγή ενέργειας και δευτερευόντως η οικιακή. Επίσης, η βιομηχανική και κτηνοτροφική χρήση ύδατος είναι αρκετά περιορισμένες. Στον Πίνακα 3.1, παρουσιάζονται η κατανομή της ζήτησης ανά χρήση ύδατος για το σύνολο του υδατικού διαμερίσματος και στην Εικόνα 3.1 ο μορφολογικός χάρτης της περιοχής με τα όρια των λεκανών απορροής και τα κύρια υδατικά σώματα.

Πίνακας 3.1: Ζήτηση ανά χρήση ύδατος για το Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Στερεάς Ελλάδας. (Πηγή: ΣΔΛΑΠ)

Χρήση	Ετήσια Ζήτηση (hm ³)
Ζήτηση για άρδευση για τις εκτάσεις που αρδεύτηκαν το 2020	508.8
Ζήτηση σε πόσιμο νερό (ύδρευση και τουρισμός)	34.4
Ζήτηση για κτηνοτροφικό νερό	3.9
Ζήτηση για βιομηχανικό νερό	2.9

Όσον αφορά στον ποταμό Αχελώο, το μήκος του είναι 220 km και το πλάτος του φτάνει τα 90 m. Οι πηγές του βρίσκονται στο όρος Λάκμος της οροσειράς της Πίνδου, στην περιοχή του Μετσόβου και ρέει δυτικά της δυτικής Θεσσαλίας με κατεύθυνση προς νότο. Στη συνέχεια, εισέρχεται στη Στερεά Ελλάδα, όπου εμπλουτίζεται με νερά της οροσειράς της Πίνδου από τους διάφορους παραποτάμους του, κυριότεροι από τους οποίους είναι ο Αγραφιώτης ή Αγραφιώτικος, ο Ταυρωπός ή Μέγδοβας, ο Τρικεριώτης και ο Ίναχος ή Μπιζάκος. Οι τρεις πρώτοι, που είναι και οι κυριότεροι, χύνονται στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών και ο τέταρτος στον ταμιευτήρα του Καστρακίου. Η μέση κλίση των ορεινών λεκανών των ποταμών αυτών κυμαίνεται από 18 έως 30%. Κοντά στο Αγρίνιο, ο Αχελώος στρέφεται δυτικά προς την Αιτωλική λεκάνη και ακολουθεί πάλι κατεύθυνση προς το νότο, όπου εμπλουτίζεται με τα νερά των λιμνών Λυσιμαχίας και Τριχωνίδας. Τέλος, στρέφεται δυτικά προς την περιοχή Νεοχωρίου και εκβάλλει στο Ιόνιο Πέλαγος απέναντι από τα νησιά Εχινάδες (Μπαλτάς, 2009). Η ΛΑΠ Αχελώου περιλαμβάνει, επίσης, τις φυσικές λίμνες Τριχωνίδα, Λυσιμαχία, Οζερό, Βουλκαριά, Αμβρακία, Σαλτίνη και τις τεχνητές λίμνες Κρεμαστών, Ταυρωπού, Καστρακίου και Στράτου. Σημειώνεται ωστόσο ότι η υπολεκάνη του Ταυρωπού, ανάντη του φράγματος Πλαστήρα, έκτασης 161 km², αν και υδρολογικά ανήκει σε αυτή του Αχελώου, από διαχειριστική σκοπιά εντάσσεται στη λεκάνη του Πηνειού, δεδομένου ότι οι υδατικοί της πόροι εκτρέπονται προς τη Θεσσαλία (ΣΔΛΑΠ, 2023).



Εικόνα 3.1: Γεωμορφολογικός χάρτης Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (Πηγή: ΣΔΛΑΠ, 2023)

Η λεκάνη απορροής (ΛΑΠ) του Αχελώου διακρίνεται στις υπολεκάνες του Άνω, Μέσου και Κάτω Ρου, οι οποίες έχουν εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά όσον αφορά στις χρήσεις γης, τις χρήσεις νερού και το διαχειριστικό καθεστώς. Ο Άνω Αχελώος περιλαμβάνει τα έργα που αφορούν στην εκτροπή μέρους της χειμερινής απορροής των νερών του ποταμού προς την Θεσσαλία, καθώς και τα υδροηλεκτρικά της Μεσοχώρας, της Συκιάς και της Δαφνοζωνάρας (Ζάρρης κ.α., 1999). Το φράγμα της Μεσοχώρας, όπως και το φράγμα της Συκιάς του οποίου η κατασκευή έχει διακοπεί, αποτέλεσαν πηγή αντιδράσεων των περιβαλλοντικών οργανώσεων, καθώς και των κατοίκων της περιοχής, οι οποίες οδήγησαν σε πολιτικές αποφάσεις παροπλισμού των δύο έργων.

Ο μέσος Αχελώος περιλαμβάνει τα έργα που αφορούν κυρίως την εκμετάλλευση των νερών για παραγωγή ενέργειας (Υδροηλεκτρικός Σταθμός (ΥΗΣ) Κρεμαστών, Καστρακίου και Στράτου):

- Ο ταμιευτήρας του έργου Κρεμαστών είναι ο μεγαλύτερος της χώρας και έχει συνολική ωφέλιμη χωρητικότητα 3300 hm³ και εγκατεστημένη ισχύ 437.2 MW. Σκοπός του έργου είναι η υδροηλεκτρική παραγωγή και η αντιπλημμυρική προστασία της περιοχής.
- Ο σταθμός του Καστρακίου εκμεταλλεύεται τις εκροές του υδροηλεκτρικού σταθμού των Κρεμαστών, καθώς επίσης και τα νερά του παραπόταμου Ινάχου, ο οποίος εκβάλλει μέσα στον ταμιευτήρα του έργου, ωφέλιμης χωρητικότητας 97 hm³.

- Ο σκοπός του έργου, πέραν της υδροηλεκτρικής παραγωγής, είναι η άρδευση και ύδρευση του δήμου Αγρινίου και των γειτονικών δήμων. Οι ΥΗΣ Στράτου I και II, με ταμιευτήρα ωφέλιμης χωρητικότητα 13 hm³ και εγκατεστημένη ισχύ 150 MW και 6.2 MW αντίστοιχα, είναι έργα διπλού σκοπού, που παράγουν ενέργεια και αποθηκεύουν νερό για ρύθμιση των αρδεύσεων σε ημερήσια βάση, ικανοποιώντας έτσι τις αρδευτικές ανάγκες της εύφορης πεδιάδας του Κάτω Αχελώου. (ΔΕΗ Α.Ε, 2008)

Το σύστημα του Κάτω Αχελώου, για το οποίο η άρδευση αποτελεί την κυριότερη χρήση νερού, περιλαμβάνει εκτός από τον ποταμό και τις λίμνες Τριχωνίδα, Λυσιμαχία και Οζερός και τις πηγές Λάμπρας (Ζάρρης κ.α 1999).

3.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ

Ο ΥΗΣ Καστρακίου βρίσκεται σε απόσταση 35 km κατάντη του φράγματος Κρεμαστών και βόρεια της πόλης του Αγρινίου. Ανήκει εξ ολοκλήρου στο νομό Αιτωλοακαρνανίας και λειτουργεί ως έργο πολλαπλής σκοπιμότητας. Αξιοποιείται για παραγωγή ενέργειας, άρδευση και ύδρευση της ευρύτερης περιοχής του Αγρινίου. Η κατασκευή του έργου ξεκίνησε το Μάιο του 1966 και ο σταθμός εντάχθηκε στο σύστημα το Μάιο του 1969.

Κατά τη διάρκεια κατασκευής του φράγματος, διανοίχθηκε υπογείως σήραγγα εκτροπής, ώστε να μη διακόπτεται η ροή του ποταμού. Η σήραγγα έχει μήκος 393 m, ολική παροχετευτική ικανότητα 2900 m³/s και η διατομή της είναι πεταλοειδής ύψους και πλάτους 8 m. Με το πέρας της κατασκευής, έχει τοποθετηθεί μόνιμη έμφραξη με πώμα από σκυρόδεμα. Το φράγμα είναι χωμάτινο με αργιλικό πυρήνα και φίλτρο από αμμοχάλικο. Έχει ύψος 96 m, μήκος στέψης 547 m και όγκο 5.2 hm³.

Στο υδροηλεκτρικό έργο περιλαμβάνεται κατακόρυφη υδροληψία με τέσσερα ανοίγματα και τέσσερις ελεύθερους αγωγούς πτώσης, διαφορετικού μήκους και διαφορετικής διαμέτρου για να εξασφαλίζουν την ίδια παροχή στην έξοδο. Η συνολική παροχή (εκφόρτιση) των μονάδων που λειτουργούν στη μέγιστη στάθμη ανέρχεται στα 499 m³/s. Ο σταθμός παραγωγής ενέργειας είναι ημιυπαίθριος και διαθέτει τέσσερις στροβίλους τύπου Francis, κατακόρυφου άξονα, εγκατεστημένης ισχύος 80 MW ο καθένας.

Στο έργο περιλαμβάνεται επίσης πλευρικός υπερχειλιστής (πλάτος b = 120 m, υψόμετρο στέψης +144.2 m), με κεκλιμένη διώρυγα από οπλισμένο σκυρόδεμα και έργο αναπήδησης για καταστροφή ενέργειας. Στον υπερχειλιστή του φράγματος Καστρακίου, που μέχρι πρότινος λειτουργούσε ως ελεύθερος υπερχειλιστής, έχουν τοποθετηθεί από τον Ιούνιο του 2010, 20 ανατρεπόμενα θυροφράγματα, κυμαινόμενου ύψους (από 1.80 έως 1.93 m), εξασφαλίζοντας επιπλέον ωφέλιμο όγκο της τάξης των 50 hm³ και μεγαλύτερο ύψος πτώσης. (Ειδική γραμματεία υδάτων - Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας, 2016)

Ο σταθμός του Καστρακίου εκμεταλλεύεται τις εκροές του ΥΗΣ των Κρεμαστών και τα νερά του ποταμού Ινάχου, ο οποίος εκβάλλει μέσα στον ταμιευτήρα του έργου. Η ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα του Καστρακίου αρχικά ανέρχονταν στα 53 hm³, ενώ με την κατασκευή των θυροφραγμάτων έφτασε στα 98 hm³.

Η σχέση στάθμης-αποθέματος του ταμιευτήρα προκύπτει από ζεύγη τιμών, όπως αυτά παραχωρήθηκαν από την ΔΕΗ Α.Ε. Στη συνέχεια, γίνεται προσαρμογή κατάλληλης σχέσης, εκθετικής μορφής, στα εν λόγω δεδομένα, μέσω διαδικασίας βαθμονόμησης, με σκοπό την χρήση της στο μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος. Η σχέση που προκύπτει είναι η ακόλουθη:

$$s = 21.735(z - 144)^{1.091} \quad (3.1)$$

Όπου $s(z)$ το απόθεμα σε hm³ και z η στάθμη σε m.

Πίνακας 3.2: Λειτουργικά χαρακτηριστικά Σταθμού Παραγωγής (Πηγή: ΔΕΗ Α.Ε)

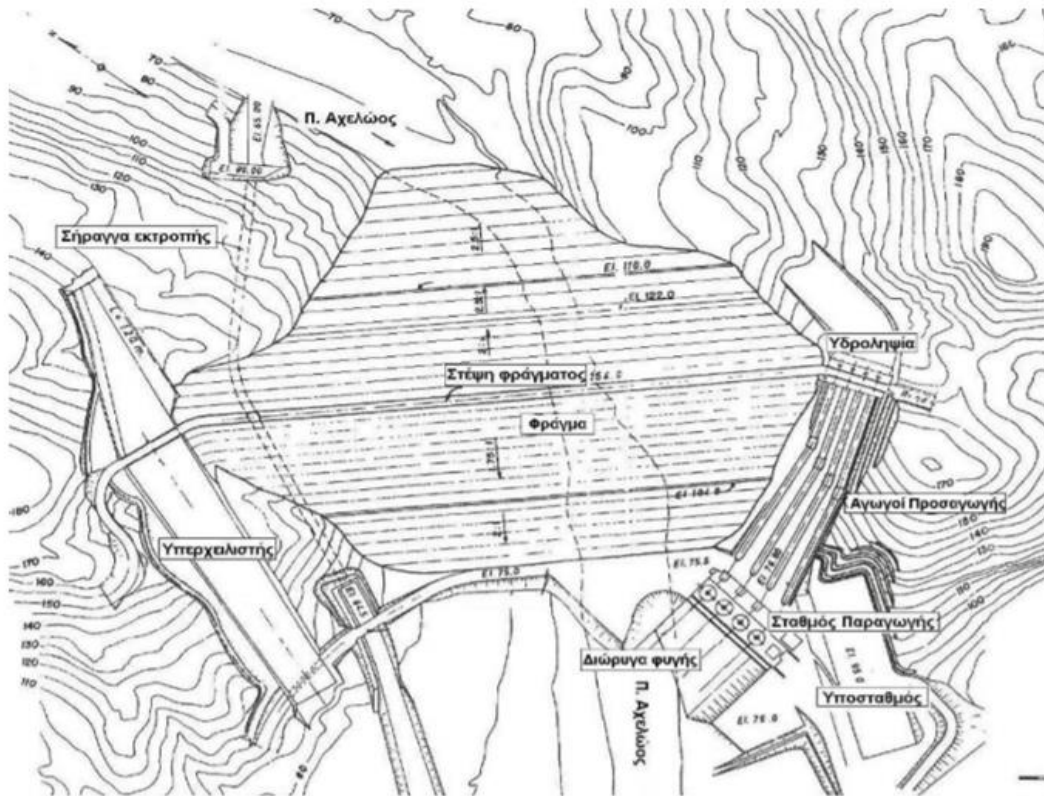
ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ						
Αριθμός μονάδων	Ονομαστική ισχύς μονάδας (MW)	Συνολική ισχύς (MW)	Ύψος υδατόπτωσης (m)	Παροχή μονάδων, λειτουργία στη μέγιστη στάθμη (m ³ /sec)	Ετήσια Παραγωγή (GWh)	Ειδική Κατανάλωση πραγματικής λειτουργίας στη μέγιστη στάθμη (m ³ /kWh)
4	80	320.0	75	499	580	5.6

Πίνακας 3.3: Λειτουργικά χαρακτηριστικά Ταμιευτήρα (Πηγή: ΔΕΗ Α.Ε)

ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ				
Ελάχιστη Στάθμη Λειτουργίας (m)	Μέγιστη Στάθμη Λειτουργίας (m)	Ωφέλιμη Χωρητικότητα (hm ³)	Περιεχόμενο εκμεταλ. όγκου σε ενέργεια (GWh)	Επιφάνεια στην ανώτατη στάθμη (km ²)
142.0	146.0	98	25	24



Εικόνα 3.2: Φράγμα Καστρακίου. Στο μπροστινό μέρος διακρίνεται ο υπερχειλιστής και στο βάθος οι αγωγοί πτώσης και ο σταθμός παραγωγής ενέργειας



Εικόνα 3.3: Γενική Διάταξη Έργων Καστρακίου (Πηγή: Ευστρατιάδη κ.α., 2020)

3.3 ΕΙΚΟΝΙΚΟΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ

Για τη διαμόρφωση του συστήματος αντλησιοταμίευσης έχει χωροθετηθεί, στο πλαίσιο της προπτυχιακής μου διπλωματικής (Μανίκας, 2021), δεύτερος εικονικός ταμιευτήρας ανάντη του ταμιευτήρα Καστρακίου. Τα κριτήρια για την χωροθέτηση είναι τα ακόλουθα:

- Η εύρεση κάποιου φυσικού κοιλώματος ή κοιλάδας ή η εύρεση κατάλληλης επιφάνειας για εκσκαφή, ώστε να διαμορφωθεί ο δεύτερος ταμιευτήρας.
- Χωροθέτηση του δεύτερου ταμιευτήρα σε κατά τον δυνατόν πλησιέστερη οριζόντια απόσταση από τον ήδη υπάρχων.
- Εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής υψομετρικής διαφοράς μεταξύ των δύο ταμιευτήρων.

Όσον αφορά στη χωρητικότητα του νέου ταμιευτήρα, αυτή πρέπει να είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με αυτή του υπάρχοντος και για αυτό το λόγο επιλέγεται χωρητικότητα περίπου 10 hm³.

Με τη βοήθεια του λογισμικού ArcGIS Pro, η τελική θέση του ταμιευτήρα επιλέγεται σε απόσταση 1.9 km βόρεια του ταμιευτήρα Καστρακίου και εξασφαλίζεται μέγιστο ύψος πτώσης ύδατος 265 m και ελάχιστο 217 m. Στη συγκεκριμένη θέση, διαμορφώνεται μικρή κοιλάδα που με την κατασκευή φράγματος δημιουργείται ο νέος ταμιευτήρας. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4 και η θέση στην Εικόνα 3.5.

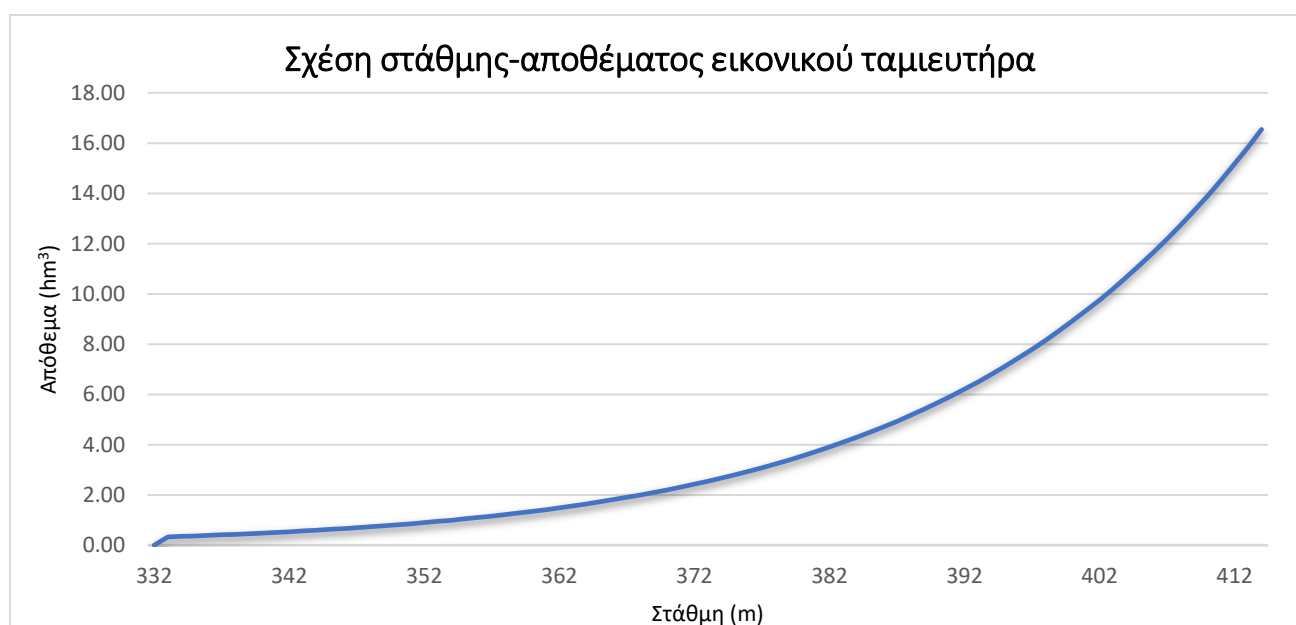
Πίνακας 3.4: Τεχνικά Χαρακτηριστικά εικονικού ταμιευτήρα

Τεχνικά Χαρακτηριστικά εικονικού ταμιευτήρα		
ΚΣΛ (m)	ΑΣΛ (m)	Ωφέλιμη χωρητικότητα (hm ³)
363	407	10.62

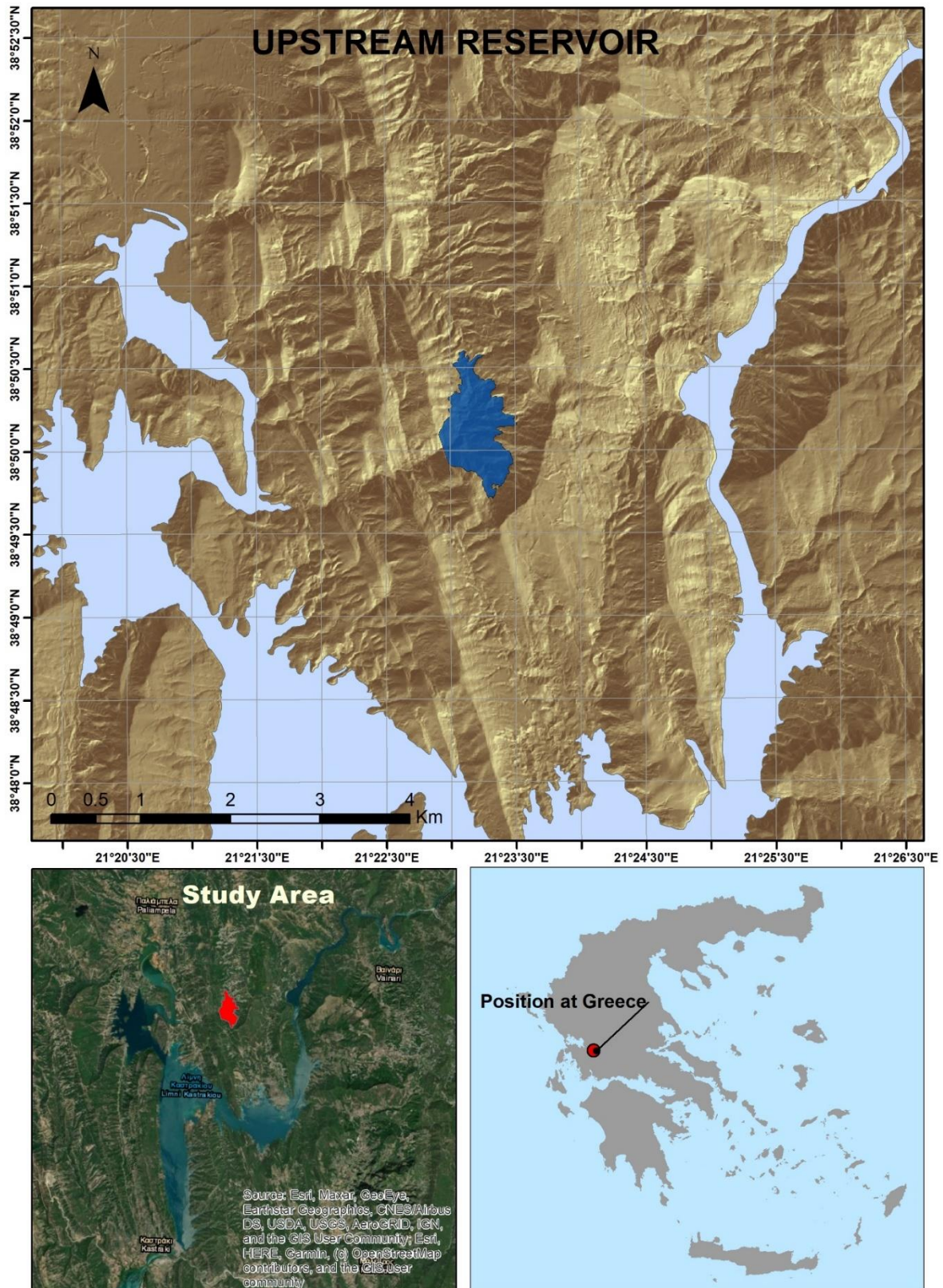
Επιπλέον υπολογίζεται η σχέση στάθμης-αποθέματος του νέου ταμιευτήρα, η οποία δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$s(z) = 0.315 \left(\frac{z}{332} \right)^{17.951} \quad (3.2)$$

Όπου $s(z)$ το απόθεμα σε hm³ και z η στάθμη σε m. Στην Εικόνα 3.4 παρουσιάζεται η συγκεκριμένη σχέση γραφικά.



Εικόνα 3.4: Γραφική παράσταση σχέσης στάθμης-αποθέματος εικονικού ταμιευτήρα



Εικόνα 3.5: Περιοχή μελέτης και ανάντη ταμιευτήρας (παραγωγή χάρτη στο ArcGIS Pro)

4 ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα βασικά δεδομένα τα οποία χρησιμοποιούνται στο μοντέλο είναι οι εισροές και οι εκροές του ταμιευτήρα Καστρακίου, η ηλιοφάνεια, η μέση ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου καθώς και οι ενεργειακές ζητήσεις. Οι εισροές, οι εκροές και οι ενεργειακές ζητήσεις έχουν μηνιαίο χρονικό βήμα, μήκος 23 ετών και η λήψη τους έγινε από τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ). Η παροχή των δεδομένων ηλιοφάνειας και ανέμου έγινε από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ.). Η ιστορική χρονοσειρά των ωρών ηλιοφάνειας έχει ημερήσιο χρονικό βήμα, μήκος 9 έτη και ο σταθμός μέτρησης βρίσκεται στο Αγρίνιο (κωδικός σταθμού: 672, γεωγραφικό πλάτος: 38 37N, γεωγραφικό μήκος: 21 23E, υψόμετρο: 24 m). Όσον αφορά τα ανεμολογικά δεδομένα έγινε λήψη από δύο σταθμούς από τον σταθμό στο Αγρίνιο και από το σταθμό στο Μεσολόγγι (κωδικός σταθμού: 655, γεωγραφικό πλάτος: 38 22N, γεωγραφικό μήκος: 21 25E, υψόμετρο: 2 m) και επιλέχθηκαν τα δεδομένα του σταθμού στο Μεσολόγγι για τα έτη 2012-2022, για λόγους πληρότητας των μετρήσεων. Το χρονικό βήμα της ιστορικής χρονοσειράς των ανεμολογικών δεδομένων είναι τρεις ώρες. Στον Πίνακα 4.1, παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά στοιχεία των δεδομένων που χρησιμοποιούνται.

Πίνακας 4.1: Συνοπτικός πίνακας με τα βασικά χαρακτηριστικά των διαθέσιμων ιστορικών χρονοσειρών

Στοιχεία διαθέσιμων δεδομένων				
Χρονοσειρά	Χρονικό Βήμα	Μήκος	Σταθμός	Πηγή
Εισροές	Μηνιαίο	23 έτη	ΥΗΣ Καστρακίου	ΔΕΗ
Εκροές	Μηνιαίο	23 έτη	ΥΗΣ Καστρακίου	ΔΕΗ
Ηλιοφάνεια	Ημερήσιο	9 έτη	Αγρίνιο	ΕΜΥ
Άνεμος	3ώρο	11 έτη	Μεσολόγγι	ΕΜΥ
Ενεργειακή ζήτηση	Μηνιαίο	23 έτη	ΥΗΣ Καστρακίου	ΔΕΗ

Η επεξεργασία των δεδομένων περιλαμβάνει την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών μέσω στοχαστικών μοντέλων. Το μήκος των χρονοσειρών αυτών είναι ίσο με 40 έτη (προσομοίωση του συστήματος σε βάθος 40ετίας) και το χρονικό βήμα τους χρειάζεται να μετατρέπεται σε ωριαίο για τις ανάγκες του μοντέλου.

4.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Τα στοχαστικά μοντέλα αποτελούν ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο προκειμένου να επιλυθούν μια σειρά ζητημάτων κατά την προσομοίωση ενός συστήματος. Καταρχάς, η χρήση στοχαστικών μοντέλων επιτρέπει την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών με δυνατότητα επιλογής του μήκους αυτών. Δεδομένου ότι οι διαθέσιμες ιστορικές χρονοσειρές δεν έχουν το ίδιο μήκος μεταξύ τους, αλλά ούτε και με το αναγκαίο μήκος προσομοίωσης για τις ανάγκες της μελέτης, η χρησιμότητα των στοχαστικών μοντέλων μπορεί να γίνει άμεσα αντιληπτή. Παράλληλα, ο σημαντικότερος λόγος χρήσης των συγκεκριμένων μοντέλων έγκειται στην αναγκαιότητα να συμπεριληφθεί η τυχαιότητα που διέπει τις διάφορες φυσικές διεργασίες. Η πιθανότητα εμφάνισης ίδιας χρονοσειράς με αυτή της ιστορικής είναι μηδενική και επομένως συνίσταται η παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών και η πραγματοποίηση ενός πλήθους προσομοιώσεων.

Οι βασικές συνιστώσες μιας χρονοσειράς, που πρέπει να μελετηθούν και να ληφθούν υπόψιν κατά την παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών, είναι η τάση, η περιοδικότητα και η εμμονή. Ως τάση ορίζεται η μεταβολή της μέσης τιμής για διαδοχικά διαστήματα. Η περιοδικότητα σχετίζεται με διακυμάνσεις, συνήθως εποχιακές, στα μεγέθη μιας χρονοσειράς (προσδιοριστικού χαρακτήρα διακυμάνσεις). Η εμμονή διακρίνεται σε βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη. Η βραχυπρόθεσμη σχετίζεται με την εξάρτηση διαδοχικών τιμών

μιας χρονοσειράς. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η απορροή σε ένα ποτάμι από μήνα σε μήνα. Η μακροπρόθεσμη εμμονή αφορά υψηλότερες χρονικές κλίμακες (ετήσιες). Παράδειγμα μακροπρόθεσμης εμμονής αποτελούν τα συνεχόμενα υγρά ή ξηρά έτη που παρατηρούνται στην υδρολογική δίαίτα ορισμένων ποταμών (π.χ. Νείλος) (Koutsoyannis, 2004; Hurst, 1951).

Βασικό εργαλείο για την παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών αποτελούν οι Μαρκοβιανές στοχαστικές διαδικασίες. Ως Μαρκοβιανή ορίζεται μία στοχαστική διαδικασία, της οποίας η μελλοντική συμπεριφορά, δεδομένης της παρούσας και της παρελθοντικής κατάστασης, εξαρτάται μόνο από το παρόν και όχι από το παρελθόν (Koutsoyannis, 2022). Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης, χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα μοντέλα Μαρκόφ διακριτού χρόνου:

1. Το AR(1): Μοντέλο Μάρκοφ δειγματοσιμμένο σε διακριτό χρόνο ή αλλιώς μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης (autoregression) τάξης 1.

$$x_t = ax_{t-1} + v_t \quad (4.1)$$

2. Το AR(2): Μοντέλο Μάρκοφ δειγματοσιμμένο σε διακριτό χρόνο ή αλλιώς μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης (autoregression) τάξης 2.

$$x_t = a_1x_{t-1} + a_2x_{t-2} + v_t \quad (4.2)$$

3. Το ARMA (1,1): Μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1- κινούμενου μέσου τάξης 1 (first-order autoregressive - first-order moving average)

$$x_t = ax_{t-1} + v_t + bv_{t-1} \quad (4.3)$$

Όπου x_t είναι μία στοχαστική διαδικασία σε διακριτό χρόνο, v_t λευκός θόρυβος διακριτού χρόνου και a, a_1, a_2, b παράμετροι των μοντέλων

Ο υπολογισμός των συγκεκριμένων παραμέτρων γίνεται με βάση τις εξισώσεις Yule-Walker equations, οι οποίες περιγράφονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$c_0 = ac_1 + (1 + ab + b^2)\sigma_v^2 \quad (4.4)$$

$$c_1 = ac_0 + b\sigma_v^2 \quad (4.5)$$

$$c_\eta = ac_{\eta-1} = a^{\eta-1}c_1 \text{ για } \eta > 1 \quad (4.6)$$

Όπου c_η αυτοσυνδιασπορά με υστέρηση η και σ_v^2 η διασπορά του λευκού θορύβου. Αφού υπολογιστούν με βάση τα ιστορικά δεδομένα οι αυτοδιασπορά c_0, c_1, c_2 , μπορούν εύκολα να προκύψουν οι παράμετροι, a, b και σ_v^2 , καθώς το σύστημα των τριών παραπάνω εξισώσεων είναι γραμμικό. Ειδικότερα για το μοντέλο AR(1) τίθεται $b=0$, ενώ για το μοντέλο AR(2) οι Yule-Walker εξισώσεις τροποποιούνται ως εξής:

$$c_0 = a_1c_1 + a_2c_2 + \sigma_v^2 \quad (4.7)$$

$$c_1 = a_1c_0 + a_2c_1 \quad (4.8)$$

$$c_\eta = a_1c_{\eta-1} + a_2c_{\eta-2} \text{ για } \eta > 1 \quad (4.9)$$

Τα μοντέλα AR και ARMA μπορούν να αναπαράγουν τις συνιστώσες της τάσης και της περιοδικότητας, δεν μπορούν όμως να εντοπίσουν και να διατηρήσουν την μακροπρόθεσμη εμμονή που μπορεί να υπάρχει σε μια χρονοσειρά.

Για επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου προσομοίωσης, πραγματοποιείται έλεγχος με τεστ Anderson. Με βάση το τεστ Anderson, για να γίνει αποδεκτό το μοντέλο προσομοίωσης πρέπει οι εκτιμημένες αυτοσυσχετίσεις για ένα σύνολο χρονικών υστερήσεων η , να ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή μηδέν και σκέδαση $1/n$, δηλαδή με τυπικό στοχαστικό σφάλμα $(1/n)^2$, όπου n το μήκος προσομοίωσης (Μιμίκου, 2006). Ως στοχαστικό σφάλμα ορίζεται η πιθανότητα να μην είναι το αποτέλεσμα το αναμενόμενο, με δεδομένο ότι τόσο το μοντέλο, όσο και οι παράμετροί του, είναι σωστές (Walker, 1996).

Ένα ακόμα βασικό εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται για την παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών του ανέμου είναι οι Μαρκοβιανές Αλυσίδες. Ως Μαρκοβιανή Αλυσίδα ορίζεται μία ανέλιξη με διακριτό χώρο καταστάσεων $S=\{S1, S2, \dots\}$ και διακριτό παραμετρικό χώρο $T=\{0, 1, 2, \dots\}$. Ως συνέπεια της Μαρκοβιανής ιδιότητας, η πιθανότητα με την οποία μία Μαρκοβιανή Αλυσίδα βρίσκεται σε μία κατάσταση σε μία χρονική στιγμή t , δεν εξαρτάται από όλες τις παρελθοντικές καταστάσεις, αλλά από την αμέσως προηγούμενη κατάσταση και μόνο (Κοκολάκης, 2007). Η πιθανότητα μετάβασης από μία κατάσταση i σε μία κατάσταση j , συμβολίζεται ως p_{ij} και η μαθηματική σχέση που περιγράφει την Μαρκοβιανή Αλυσίδα είναι η ακόλουθη (Paradopoulos, Giovanis, 2018) :

$$P(X_n = j | X_{n-1} = i) = p_{ij} \quad (4.10)$$

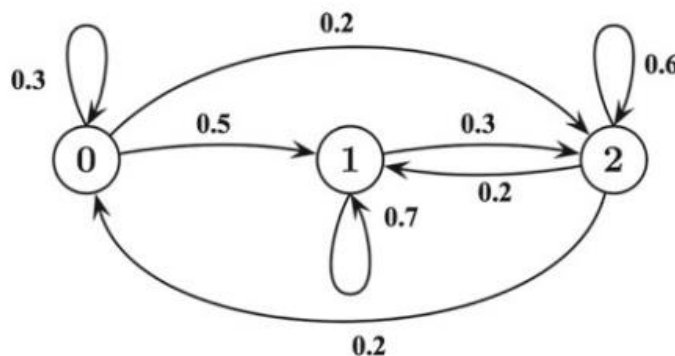
Το μητρώο P με στοιχεία p_{ij} ονομάζεται μητρώο πιθανότητας μετάβασης και δίνεται από τη σχέση:

$$P = \begin{bmatrix} p_{00} & \dots & p_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n0} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Για όλα τα i , ισχύει η παρακάτω σημαντική ιδιότητα:

$$\sum_{j=1 \dots n} p_{ij} = 1 \quad (4.12)$$

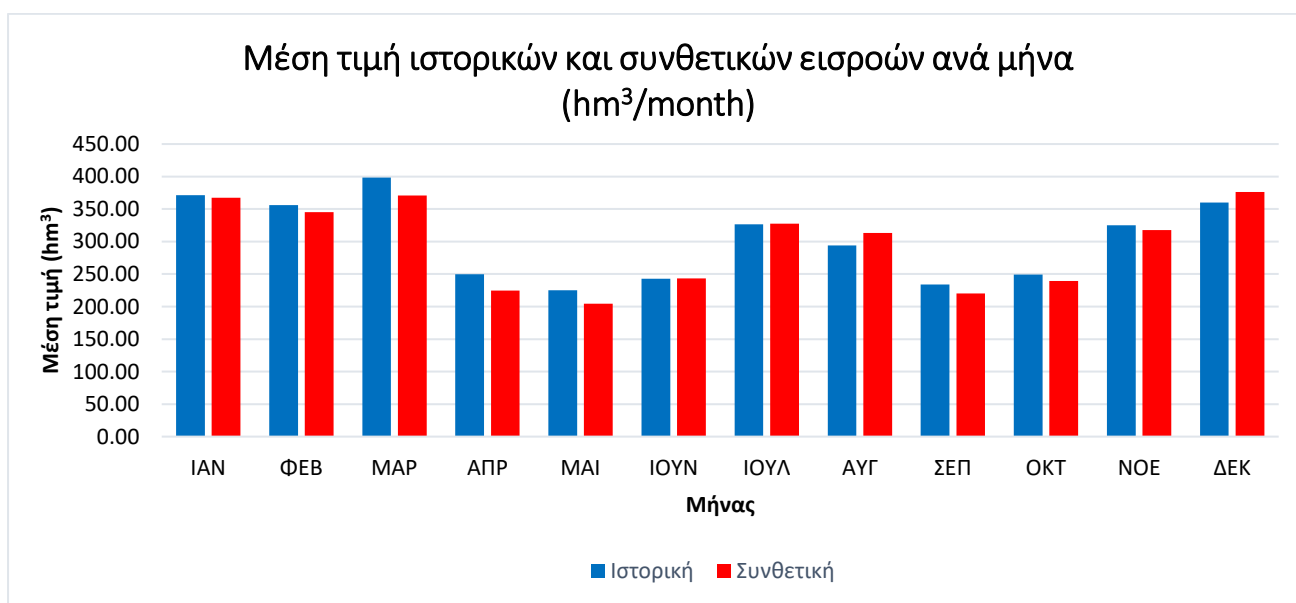
Στην Εικόνα 4.1, παρουσιάζεται σχηματικά ένα παράδειγμα μίας Μαρκοβιανής Αλυσίδας. Στο διάγραμμα (Εικόνα 4.1), διαφαίνονται οι διακριτές καταστάσεις, καθώς και η πιθανότητες μετάβασης από μία κατάσταση σε επόμενη.



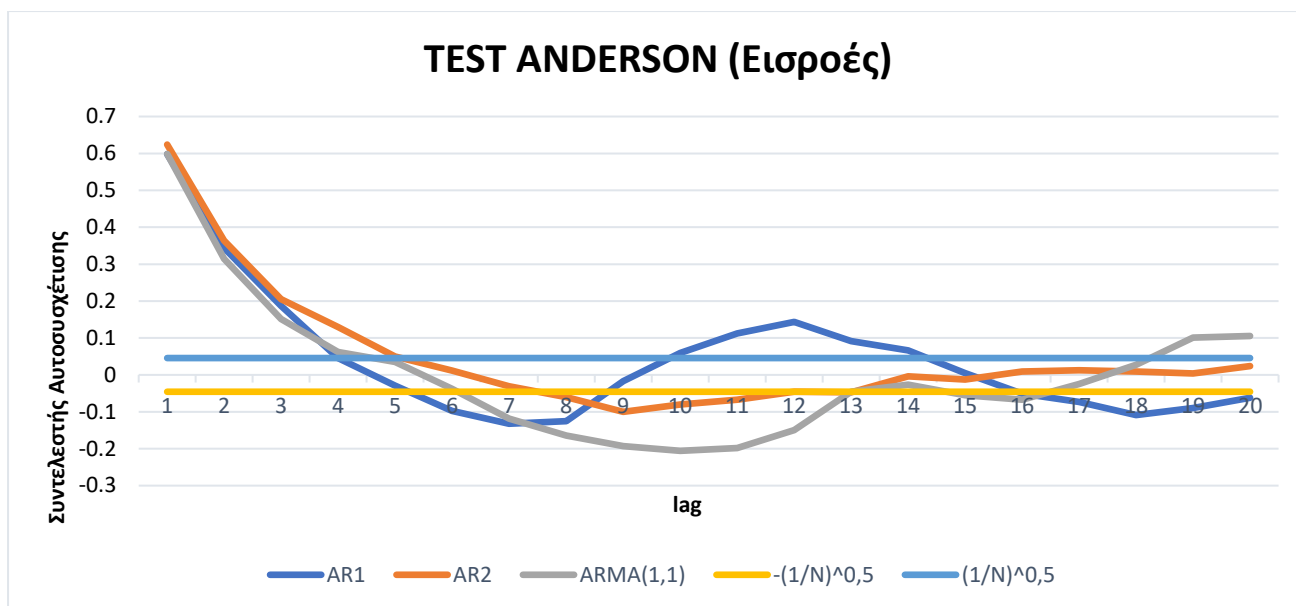
Εικόνα 4.1: Παράδειγμα διαγράμματος κατάστασης μίας Μαρκοβιανής Αλυσίδας (Πηγή: Paradopoulos, Giovanis, 2018)

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ AR(1), AR(2) ΚΑΙ ARMA(1,1)

Οι εισροές στον ταμιευτήρα Καστρακίου, στο μεγαλύτερο ποσοστό τους, προέρχονται από τις εκροές του ταμιευτήρα Καστρακίου και για αυτό δεν ταυτίζονται με τις εποχιακές μεταβολές στις απορροές του Αχελώου, αλλά τα μεγέθη τους είναι αποτέλεσμα ρύθμισης. Συνεπώς, παρατηρούνται σημαντικές εισροές κατά τους θερινούς μήνες, γεγονός που σχετίζεται με τις αυξημένες ανάγκες άρδευσης. Για τις ανάγκες διαμόρφωσης του μοντέλου προσομοίωσης, χρειάζεται η παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών για 40 έτη, η οποία γίνεται με τη χρήση των στοχαστικών διαδικασιών AR(1), AR(2) και ARMA(1,1). Παρά το γεγονός ότι στην προκειμένη περίπτωση η εισροές δεν είναι φυσικοποιημένες, διαπιστώνεται ότι τα στοχαστικά ομοιώματα μπορούν να λειτουργήσουν ικανοποιητικά. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.2, οι μέσες τιμές ιστορικών και συνθετικών χρονοσειρών εισροών έχουν πολύ μικρές αποκλίσεις. Ο έλεγχος καταλληλότητας για την εφαρμογή του στοχαστικού μοντέλου με την εφαρμογή του τεστ Anderson παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.3. Καλύτερη προσαρμογή φαίνεται να προκύπτει με τη χρήση με το μοντέλο AR(2).



Εικόνα 4.2: Μέσες τιμές ανά μήνα ιστορικών και συνθετικών χρονοσειρών εισροών



Εικόνα 4.3: Τεστ Anderson για συνθετικές χρονοσειρές εισροών

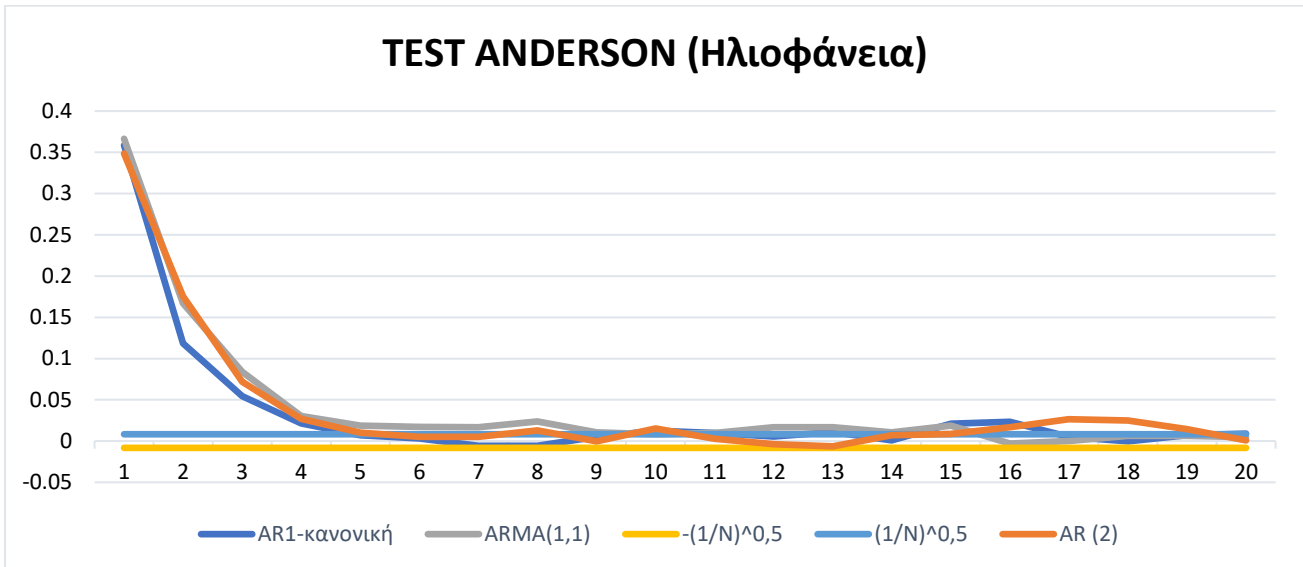
Οι εκροές, δεδομένου ότι είναι ελεγχόμενη παράμετρος του συστήματος και δεν ακολουθούν τη στοχαστικότητα των φυσικών διεργασιών, δεν υπολογίζονται με τη χρήση των στοχαστικών μοντέλων AR και ARMA. Αντίθετα, λαμβάνονται ως ποσοστό των εισροών, το οποίο ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή και τυπική απόκλιση ίση με τα αντίστοιχα ποσοστά των ιστορικών χρονοσειρών. Οι συνθετικές χρονοσειρές των εισροών και των εκροών έχουν παραχθεί με μηνιαίο χρονικό βήμα. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, χρειάζεται να πραγματοποιηθεί η μετατροπή τους σε χρονοσειρές ωριαίου χρονικού βήματος. Κατά τη μετατροπή αυτή, γίνεται η παραδοχή της σταθερής κατανομής σε επίπεδο μήνα, αλλά και εικοσιτετράωρου σταθερών εισροών και εκροών.

Όσον αφορά στα δεδομένα ωρών ηλιοφάνειας, αυτά δίνονται για ημερήσιο χρονικό βήμα. Κατά την παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών, λαμβάνονται υπόψιν οι εποχιακές διακυμάνσεις, ενώ παράλληλα τίθεται ως άνω όριο για κάθε μήνα η αστρονομική διάρκεια ημέρας (Πίνακας 4.2). Με βάση τα αποτελέσματα του τεστ Anderson, όπως αυτά παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.4, προκύπτει ότι καταλληλότερο είναι το μοντέλο ARMA (1,1). Στην Εικόνα 4.5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στοχαστικής προσομοίωσης για ένα τυπικό έτος, από τα οποία προκύπτει ότι το μοντέλο ανταποκρίνεται ικανοποιητικά, δεδομένου ότι κατά τους θερινούς μήνες οι τιμές ηλιοφάνειας είναι υψηλές σε αντίθεση με τους χειμερινούς, όπως είναι αναμενόμενο.

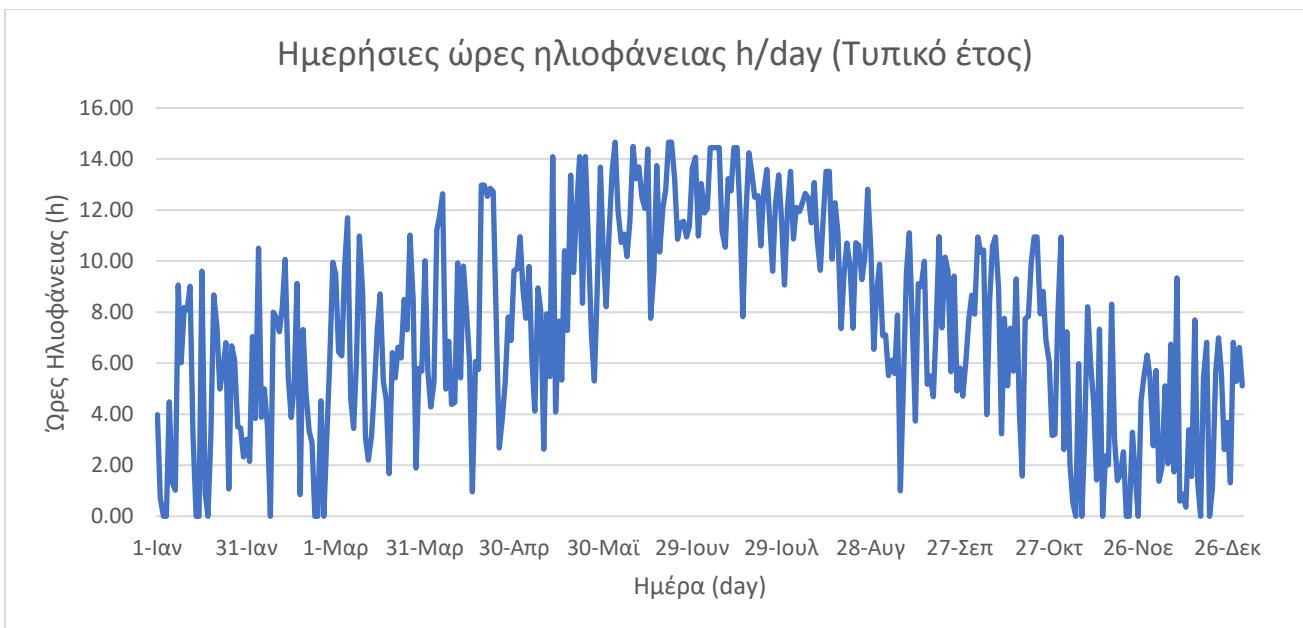
Πίνακας 4.2: Αστρονομική διάρκεια ημέρας στην περιοχή μελέτης

Καστράκι-Αστρονομική διάρκεια ημέρας		
Μήνας	μ (days)	Αστρονομική διάρκεια ημέρας N(h)
Ιανουάριος	31	9.6
Φεβρουάριος	28	10.51
Μάρτιος	31	11.7
Απρίλιος	30	12.98
Μάιος	31	14.09
Ιούνιος	30	14.66
Ιούλιος	31	14.44
Αύγουστος	31	13.51
Σεπτέμβριος	30	12.27

Οκτώβριος	31	10.95
Νοέμβριος	30	9.87
Δεκέμβριος	31	9.34



Εικόνα 4.4: Τεστ Anderson για τις συνθετικές χρονοσειρές ηλιοφάνειας



Εικόνα 4.5: Κατανομή ημερήσιων ωρών ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια ενός τυπικού έτους

4.3 ΣΥΝΘΕΤΙΚΕΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΑΝΕΜΟΥ

Το μοντέλο παραγωγής των συνθετικών χρονοσειρών του ανέμου βασίζεται στη μεθοδολογία που αναπτύσσεται από τους Negra et al. (2007). Το συγκεκριμένο μοντέλο προκύπτει με τη χρήση μιας Μαρκοβιανής αλυσίδας γέννησης και θανάτου (birth-and-death Markov chain), όπου χρησιμοποιούνται μητρώα ρυθμού μεταβολής μίας κατάστασης, αντί για μητρώα απλής μετάβασης σε μία κατάσταση. Η διαδικασία βασίζεται σε δύο βήματα. Στο πρώτο, με βάση την πληροφορία που αντλείται από τα ιστορικά δεδομένα, προσδιορίζεται ο πίνακας πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου. Στο δεύτερο βήμα, με βάση τον πίνακα πιθανότητας, η συνθετική χρονοσειρά της ταχύτητας του ανέμου παράγεται. Το μοντέλο έχει προσαρμοστεί, ώστε να λαμβάνει υπόψιν τις ακόλουθες στατιστικές παραμέτρους: την εποχιακή μεταβλητότητα, τις συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης, τις μέσες τιμές και τις συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας.

Τα βήματα της μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται είναι τα παρακάτω:

- Αρχικά, πραγματοποιείται κατάταξη των ανεμολογικών δεδομένων σε κλάσεις, ανάλογα με την τιμή της ταχύτητας του ανέμου.
- Στην συνέχεια, υπολογίζεται η πιθανότητα εμφάνισης κάθε κλάσης (State probability) $p_{ws,i}$

$$p_{ws,i} = \frac{\sum_{j=1}^{M_{ws}} D_{ws,ij}}{\sum_{k=1}^{M_{ws}} \sum_{j=1}^{M_{ws}} D_{ws,kj}} \quad (4.13)$$

Όπου, $D_{ws,kj}$ η διάρκεια παραμονής σε μία κλάση πριν μεταβεί στην επόμενη ή την προηγούμενη.

- Έπειτα, υπολογίζεται για κάθε κλάση η συχνότητα εμφάνισης Freq, με μονάδα μέτρησης συμβάντα ανά έτος και υποδηλώνει πόσο συχνά μετακινείται ο άνεμος από μία προηγούμενη ή επόμενη κλάση στην κλάση που εξετάζεται κάθε φορά. Η συχνότητα εμφάνισης υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$f_{ws,i} = N_{ws,i,i+1} + N_{ws,i,i-1} \quad (4.14)$$

- Για κάθε κλάση, υπολογίζεται η συχνότητα που ο άνεμος μετακινείται από προηγούμενη κλάση στην υπό εξέταση κλάση, Up συμβάντα ανά έτος,. Υπολογίζεται επίσης η συχνότητα μετακίνησης του ανέμου από επόμενη κλάση στην υπό εξέταση κλάση, $Down$ συμβάντα ανά έτος.
- Για κάθε κλάση υπολογίζεται η μέση διάρκεια παραμονής σε αυτή ($d_{ws,i}$), με βάση την παρακάτω σχέση:

$$d_{ws,i} = \frac{p_{ws,i}}{f_{ws,i}} \quad (4.15)$$

- Υπολογίζονται οι τιμές των συντελεστών $\lambda_{ws,i+}$ και $\lambda_{ws,i-}$, οι οποίοι σχετίζονται με την πιθανότητα να υπάρξει μετακίνηση στην αμέσως επόμενη ή προηγούμενη κλάση αντίστοιχα, από μία συγκεκριμένη κλάση. Οι συντελεστές δίνονται από την ακόλουθη σχέση:

$$\lambda_{ws,i\pm} = \frac{N_{ws,i\pm}}{p_{ws,i}} \quad (4.16)$$

Οι παράμετροι που ορίζονται στις σχέσεις (4.13 – 4.16). υπολογίζονται για κάθε μήνα ξεχωριστά και ταξινομούνται σε πίνακες (Πίνακας 4.3 - Πίνακας 4.5).

Πίνακας 4.3: Συχνότητα εμφάνισης κάθε κλάσης ανά μήνα

Συχνότητα κάθε κλάσης ανά μήνα												
Κλάσεις	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
(0,1]	0.14	0.13	0.10	0.08	0.09	0.13	0.15	0.15	0.13	0.14	0.13	0.17
(1, 2]	0.31	0.29	0.34	0.40	0.40	0.37	0.36	0.33	0.37	0.41	0.37	0.46
(2, 3]	0.36	0.30	0.23	0.18	0.18	0.13	0.17	0.20	0.17	0.21	0.28	0.19
(3, 4]	0.09	0.15	0.16	0.13	0.12	0.13	0.13	0.12	0.13	0.13	0.10	0.08
(4, 5]	0.04	0.05	0.07	0.11	0.10	0.11	0.10	0.12	0.11	0.05	0.05	0.04
(5, 6]	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03
(6, 7]	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02
(7, 8]	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
(8, 9]	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
(9, 10]	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(10, 11]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(11, 12]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(12, 13]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(13, 14]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(14, 15]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(15, 16]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(16, 17]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(17, 18]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(18+]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Πίνακας 4.4: Συντελεστής λ_{up} για κάθε μήνα

Συντελεστής λ _{up}												
Κλάσεις	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
(0,1]	0.14	0.13	0.10	0.08	0.09	0.13	0.15	0.15	0.13	0.14	0.13	0.17
(1, 2]	0.31	0.29	0.34	0.40	0.40	0.37	0.36	0.33	0.37	0.41	0.37	0.46
(2, 3]	0.36	0.30	0.23	0.18	0.18	0.13	0.17	0.20	0.17	0.21	0.28	0.19
(3, 4]	0.09	0.15	0.16	0.13	0.12	0.13	0.13	0.12	0.13	0.13	0.10	0.08
(4, 5]	0.04	0.05	0.07	0.11	0.10	0.11	0.10	0.12	0.11	0.05	0.05	0.04
(5, 6]	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03
(6, 7]	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02
(7, 8]	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
(8, 9]	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
(9, 10]	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(10, 11]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(11, 12]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(12, 13]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(13, 14]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(14, 15]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(15, 16]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(16, 17]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(17, 18]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(18+]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Πίνακας 4.5: Συντελεστής λ_{down} για κάθε μήνα

Συντελεστής λ_{down}												
Κλάσεις	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
(0,1]	0.14	0.13	0.10	0.08	0.09	0.13	0.15	0.15	0.13	0.14	0.13	0.17
(1, 2]	0.31	0.29	0.34	0.40	0.40	0.37	0.36	0.33	0.37	0.41	0.37	0.46
(2, 3]	0.36	0.30	0.23	0.18	0.18	0.13	0.17	0.20	0.17	0.21	0.28	0.19
(3, 4]	0.09	0.15	0.16	0.13	0.12	0.13	0.13	0.12	0.13	0.13	0.10	0.08
(4, 5]	0.04	0.05	0.07	0.11	0.10	0.11	0.10	0.12	0.11	0.05	0.05	0.04
(5, 6]	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03
(6, 7]	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02
(7, 8]	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
(8, 9]	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
(9, 10]	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(10, 11]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(11, 12]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(12, 13]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(13, 14]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(14, 15]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(15, 16]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(16, 17]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(17, 18]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(18+]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Στην συνέχεια, παράγονται οι συνθετικές χρονοσειρές του ανέμου. Η παραγωγή των συνθετικών πραγματοποιείται με βάση τα βήματα, που περιγράφονται ακολούθως:

- Ορίζεται διάνυσμα ταχυτήτων ανέμου με αρχική τιμή $ws(h) = ws^1$ για τη χρονική στιγμή $t = 0$. Η αρχική ταχύτητα επιλέγεται ίση με τη μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου.
- Για κάθε χρονικό βήμα, παράγονται δύο τυχαίοι αριθμοί U_1^i και U_2^i , οι οποίοι αντιπροσωπεύουν την πιθανότητα να μεταβεί το διάνυσμα της ταχύτητας στην επόμενη ή την προηγούμενη κλάση. Οι τυχαίοι αριθμοί ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα (0,1).
- Υπολογίζεται το χρονικό βήμα μετάβασης από την παρούσα κλάση στην επόμενη (TTU) ή την προηγούμενη (TTD) με βάση τις εξισώσεις:

$$TTU^i = \frac{h}{\lambda_{up}} \ln(U_1^i) \quad (4.17)$$

$$TTD^i = \frac{h}{\lambda_{down}} \ln(U_2^i) \quad (4.18)$$

Όπου h η περίοδος προσομοίωσης σε τρίωρα, δηλαδή στο χρονικό βήμα για το οποίο υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα). Η κατάσταση στην οποία θα βρεθεί το νέο διάνυσμα του ανέμου καθορίζεται από τη μικρότερη εκ των δύο τιμών, όπως αυτές υπολογίζονται από τις σχέσεις (4.5) και (4.6).

- Εξαιρέση αποτελεί η περίπτωση που μία από τις δύο παραμέτρους TTU και TTD λαμβάνει τη μηδενική τιμή. Αν $TTU=0$, τότε ο άνεμος δεν μπορεί να ανέβει σε μεγαλύτερη κλάση και μετατοπίζεται σε αμέσως χαμηλότερη σε χρονικό διάστημα TTD . Αντίστοιχα αν $TTD=0$, τότε ο άνεμος δεν μπορεί να μετατοπιστεί σε χαμηλότερη κλάση και μεταβαίνει στην αμέσως υψηλότερη σε χρονικό διάστημα TTU . Επιπλέον, όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μηδενική πραγματοποιείται

μετατόπιση σε υψηλότερη κλάση, ενώ παράλληλα δεν μπορεί να λάβει τιμές μεγαλύτερες από αυτές που έχουν καταγραφεί στην ιστορική χρονοσειρά

- Σε περίπτωση που $TTU < TTD$, το διάστημα της ταχύτητας μεγαλώνει κατά μία μονάδα και παράλληλα το χρονικό διάστημα αυξάνεται κατά TTU , όπως περιγράφεται και από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$ws(t^{i-1}:t^i) = ws^{i-1} + 1 \quad (4.19)$$

$$t^i = t^{i-1} + TTU^i \quad (4.20)$$

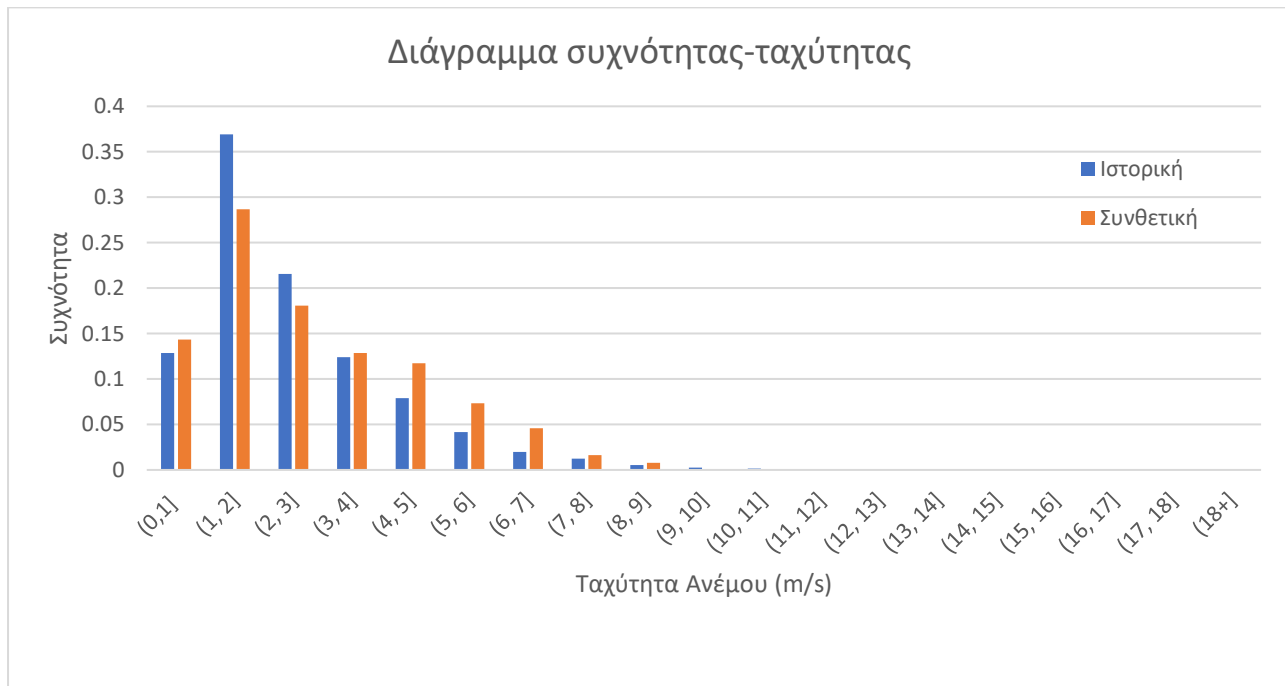
- Σε περίπτωση που $TTD < TTU$, το διάστημα της ταχύτητας μικραίνει κατά μία μονάδα και παράλληλα το χρονικό διάστημα αυξάνεται κατά TTD , όπως περιγράφεται και από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$ws(t^{i-1}:t^i) = ws^{i-1} - 1 \quad (4.21)$$

$$t^i = t^{i-1} + TTD^i \quad (4.22)$$

- Η παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών ανέμου πραγματοποιείται με τη χρήση του προγράμματος MATLAB και ο κώδικας αναπτύσσεται με τέτοιο τρόπο, ώστε οι ετήσιες συνθετικές χρονοσειρές να παράγονται ταυτόχρονα για όλα τα χρόνια διάρκειας ζωής του συστήματος της μελέτης. Οπότε, η διαδικασία, που αναλύεται παραπάνω, λαμβάνει χώρα μόνο μία φορά.

Τέλος, γίνεται σύγκριση της συνθετικής χρονοσειράς με την ιστορική, για να ελεγχθεί η αξιοπιστία του μοντέλου που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών. Στην Εικόνα 4.6: Σύγκριση ιστορικής – συνθετικής χρονοσειράς, φαίνεται η σύγκριση συχνότητας-ταχύτητας των δύο χρονοσειρών και είναι εμφανές ότι η αξιοπιστία του μοντέλου είναι αρκετά υψηλή.

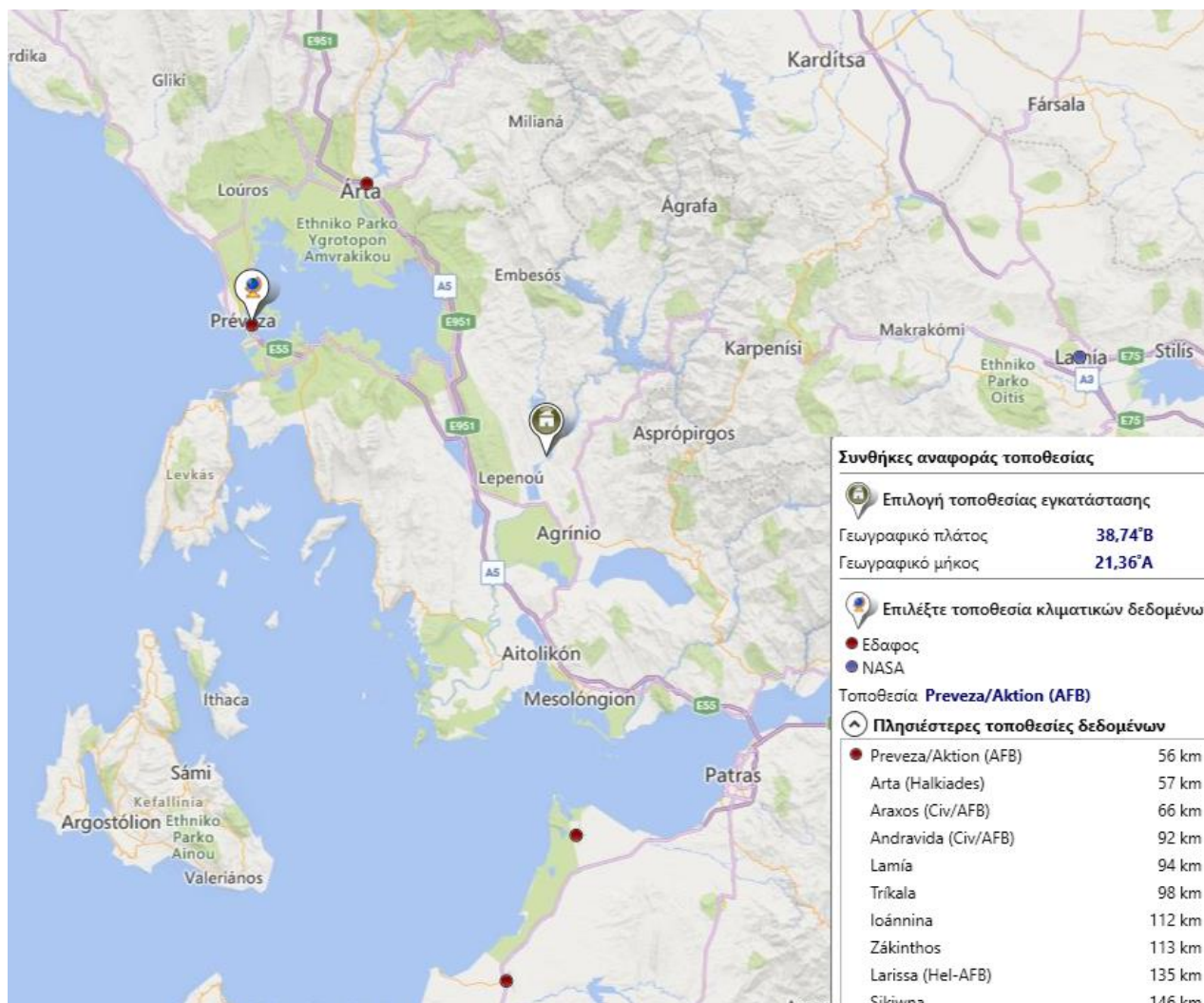


Εικόνα 4.6: Σύγκριση ιστορικής – συνθετικής χρονοσειράς

4.4 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στηρίζεται στις συνθετικές χρονοσειρές της ηλιοφάνειας, αλλά και στη μέση μηνιαία ένταση της ηλιακής ακτινοβολία, όπως αυτή προκύπτει από τη χρήση του προγράμματος RETScreen.

Το Λογισμικό Διαχείρισης Καθαρής Ενέργειας RETScreen (συνήθως συντομευμένο σε RETScreen) είναι ένα πακέτο λογισμικού που δημιουργήθηκε από την Κυβέρνηση του Καναδά. Το λογισμικό επιτρέπει την ολοκληρωμένη αναγνώριση, αξιολόγηση και βελτιστοποίηση της τεχνικής και οικονομικής βιωσιμότητας δυνητικών έργων ανανεώσιμης ενέργειας και ενεργειακής απόδοσης, καθώς επίσης και τη μέτρηση και επαλήθευση της πραγματικής απόδοσης των εγκαταστάσεων και την αναγνώριση των ευκαιριών εξοικονόμησης και παραγωγής ενέργειας (<https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>). Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιείται η λειτουργία προβολής του λογισμικού, για τη λήψη δεδομένων της οριζόντιας ακτινοβολίας που προσπίπτει στην περιοχή μελέτης. Στην Εικόνα 4.7, παρουσιάζεται στο περιβάλλον του RETScreen η περιοχή εγκατάστασης και οι πλησιέστεροι μετεωρολογικοί σταθμοί από τους οποίους μπορούν να ληφθούν δεδομένα.



Εικόνα 4.7: Περιοχή εγκατάστασης και πλησιέστεροι μετεωρολογικοί σταθμοί (χάρτης από RETScreen)

Τα δεδομένα που απαιτούνται για τις ανάγκες της εργασίας είναι η οριζόντια ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία, η οποία δίνεται από το πρόγραμμα ως μία μέση τιμή για κάθε μήνα του έτους. Δεδομένου, ότι τιμές δίνονται μόνο για τους μετεωρολογικούς σταθμούς και όχι για την περιοχή εγκατάστασης, πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή των δεδομένων από τους σταθμούς Πρέβεζας (57 km από Καστράκι) και Αράξου (66 km από Καστράκι), προκειμένου να υπολογιστεί η προσπίπτουσα ακτινοβολία στην περιοχή του Καστρακίου. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης διαδικασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6: Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία

Ημερήσια Ηλιακή ακτινοβολία Οριζόντια (kWh/m ² /day)			
	Πρέβεζα - 57 km	Άραξος - 66 km	Καστράκι
Ιαν	2.27	2.16	2.21
Φεβ	3.15	2.83	2.98
Μαρ	4.54	3.97	4.23
Απρ	5.88	4.95	5.38
Μαϊ	7.07	6.03	6.51
Ιουν	8.07	7.27	7.64
Ιουλ	8.11	7.15	7.59
Αυγ	7.16	6.3	6.70
Σεπ	5.6	4.91	5.23
Οκτ	3.86	3.41	3.62
Νοε	2.38	2.14	2.25
Δεκ	1.85	1.72	1.78

Για τις ανάγκες του μοντέλου προσομοίωσης χρειάζεται να παραχθεί η χρονοσειρά της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην περιοχή μελέτης. Για το σκοπό αυτό, η μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία κατανέμεται ισόποσα στο χρονικό διάστημα μεταξύ ανατολής και δύσης του ήλιου, με βάση τις διαθέσιμες ώρες ηλιοφάνειας, όπως αυτές προκύπτουν από τη στοχαστικά ομοιώματα.

4.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ

Ο υπολογισμός των ενεργειακών ζητήσεων βασίζεται στα ιστορικά δεδομένα της παραγόμενης ενέργειας από τον ΥΗΣ Καστρακίου. Με βάση τα συγκεκριμένα δεδομένα, υπολογίζονται οι μέσες τιμές της ενεργειακής ζήτησης για κάθε μήνα και στην συνέχεια, υπέρ της ασφαλείας, γίνεται η θεώρηση αύξησης των ενεργειακών ζητήσεων κατά 2% ανά έτος. Υπολογίζονται με αυτόν τον τρόπο οι ενεργειακές ζητήσεις για κάθε μήνα και για κάθε έτος για το διάστημα προσομοίωσης. Στον Πίνακα 4.7, παρουσιάζονται οι μέσες ενεργειακές ζητήσεις όπως προκύπτουν από τα ιστορικά δεδομένα, καθώς και οι ενεργειακές ζητήσεις όπως αυτές έχουν υπολογιστεί για το πρώτο και το τελευταίο έτος του μοντέλου προσομοίωσης.

Στην συνέχεια, για τις ανάγκες του μοντέλου, χρειάζεται να υπολογιστεί η ενεργειακή ζήτηση με ωριαίο χρονικό βήμα. Για το σκοπό αυτό γίνονται δυο βασικές παραδοχές:

- Θεωρείται ότι για κάθε μήνα η ημερήσια ενεργειακή ζήτηση είναι σταθερή.

- Για την κατανομή της ενεργειακής ζήτησης κατά τη διάρκεια ενός τυπικού εικοσιτετράωρου λαμβάνονται κατάλληλοι συντελεστές, με βάση σχετική μελέτη για οικισμούς παρόμοιων χαρακτηριστικών. Οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8.

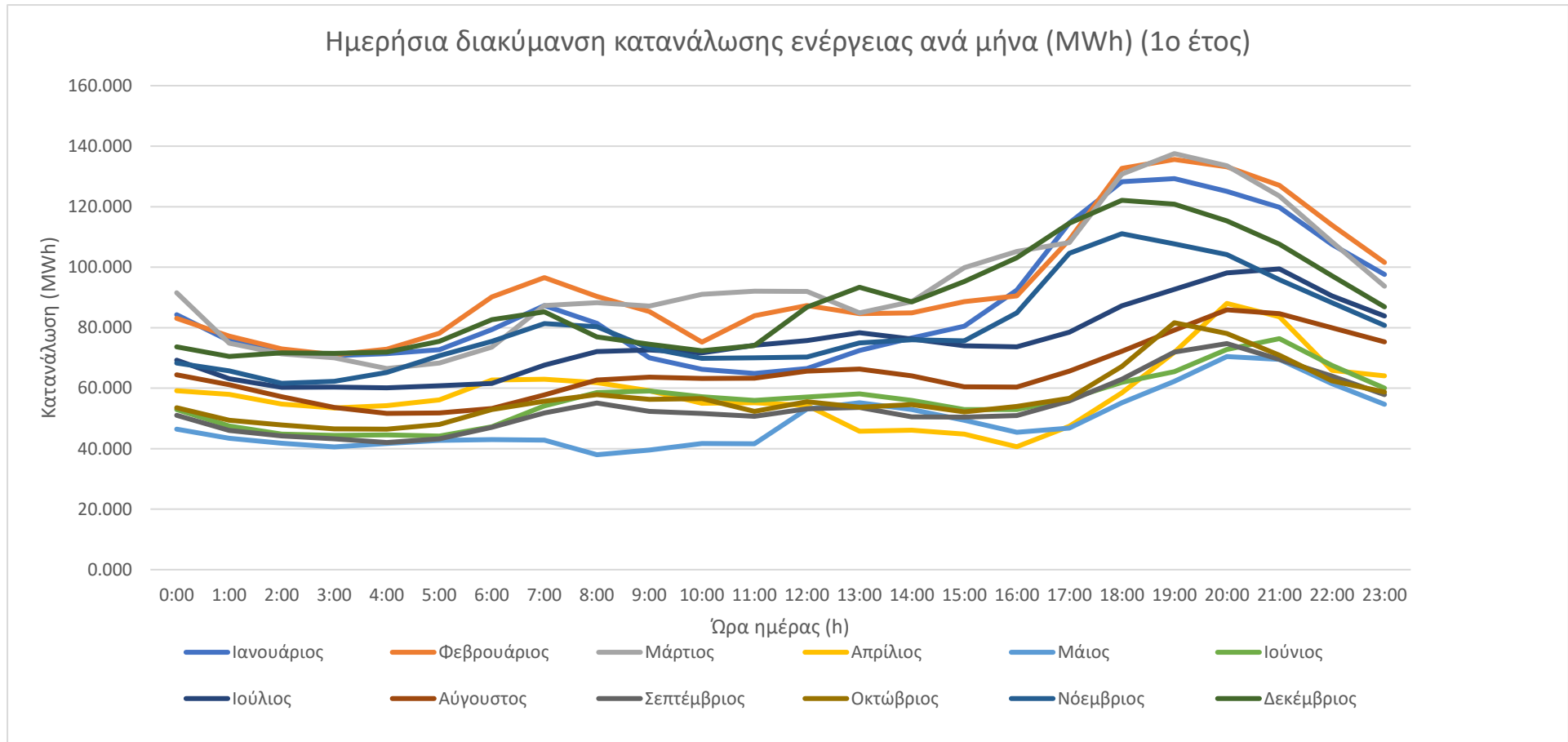
Στην Εικόνα 4.8, παρουσιάζεται η κατανομή των ενεργειακών ζητήσεων για ένα τυπικό εικοσιτετράωρο για κάθε μήνα του έτους. Με βάση τα συγκεκριμένα αποτελέσματα προκύπτει ότι εμφανίζονται διαστήματα χαμηλής ενεργειακής ζήτησης μέσα στη μέρα (κυρίως τις βραδινές ώρες) και διαστήματα υψηλής ζήτησης (κυρίως τις απογευματινές ώρες).

Πίνακας 4.7: Πίνακας μηνιαίων ενεργειακών ζητήσεων

Μηνιαίες Ενεργειακές Ζητήσεις (GWh)			
	Μέσες τιμές ιστορικών δεδομένων	2024	2063
ΙΑΝ	63.90	64.80	68.83
ΦΕΒ	62.06	62.93	66.85
ΜΑΡ	68.76	69.73	74.07
ΑΠΡ	41.17	41.75	44.35
ΜΑΙ	35.77	36.27	38.53
ΙΟΥΝ	39.55	40.11	42.60
ΙΟΥΛ	54.64	55.40	58.85
ΑΥΓ	47.40	48.07	51.06
ΣΕΠ	37.97	38.50	40.90
ΟΚΤ	41.51	42.09	44.72
ΝΟΕ	56.29	57.08	60.63
ΔΕΚ	64.65	65.56	69.64

Πίνακας 4.8: Συντελεστές ωριαίας διακύμανσης ενεργειακής ζήτησης (Πηγή: Σκρουφούτα, 2020)

Ποσοστά ωριαίας διακύμανσης ενεργειακής ζήτησης ανά μήνα												
ΩΡΑ\ΜΗΝΑΣ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0:00	-0.04	-0.12	-0.03	0.01	-0.06	-0.06	-0.08	-0.01	-0.05	-0.06	-0.14	-0.17
1:00	-0.14	-0.18	-0.21	-0.01	-0.12	-0.15	-0.16	-0.06	-0.15	-0.13	-0.18	-0.21
2:00	-0.17	-0.23	-0.25	-0.06	-0.15	-0.20	-0.20	-0.12	-0.18	-0.16	-0.23	-0.19
3:00	-0.19	-0.25	-0.26	-0.09	-0.18	-0.21	-0.20	-0.18	-0.20	-0.18	-0.22	-0.20
4:00	-0.19	-0.23	-0.30	-0.07	-0.15	-0.21	-0.20	-0.21	-0.22	-0.19	-0.18	-0.19
5:00	-0.17	-0.17	-0.28	-0.04	-0.13	-0.21	-0.19	-0.20	-0.20	-0.16	-0.12	-0.15
6:00	-0.10	-0.05	-0.22	0.07	-0.12	-0.16	-0.18	-0.18	-0.13	-0.07	-0.06	-0.07
7:00	-0.01	0.02	-0.08	0.08	-0.13	-0.04	-0.10	-0.11	-0.04	-0.02	0.02	-0.04
8:00	-0.07	-0.04	-0.07	0.06	-0.23	0.04	-0.04	-0.04	0.02	0.01	0.01	-0.13
9:00	-0.20	-0.10	-0.08	0.01	-0.20	0.05	-0.03	-0.02	-0.03	-0.01	-0.08	-0.16
10:00	-0.25	-0.20	-0.04	-0.06	-0.15	0.02	-0.05	-0.03	-0.04	-0.01	-0.13	-0.19
11:00	-0.26	-0.11	-0.03	-0.06	-0.15	0.00	-0.01	-0.03	-0.06	-0.08	-0.12	-0.17
12:00	-0.24	-0.08	-0.03	-0.07	0.08	0.02	0.01	0.01	-0.01	-0.03	-0.12	-0.02
13:00	-0.17	-0.10	-0.10	-0.22	0.12	0.03	0.04	0.02	-0.01	-0.06	-0.06	0.05
14:00	-0.13	-0.10	-0.06	-0.21	0.08	0.00	0.02	-0.02	-0.06	-0.04	-0.05	0.00
15:00	-0.08	-0.06	0.06	-0.23	0.01	-0.06	-0.01	-0.07	-0.06	-0.09	-0.05	0.07
16:00	0.05	-0.04	0.11	-0.31	-0.08	-0.06	-0.02	-0.07	-0.05	-0.05	0.06	0.16
17:00	0.30	0.16	0.14	-0.19	-0.05	0.01	0.05	0.01	0.04	-0.01	0.31	0.29
18:00	0.46	0.41	0.38	0.00	0.12	0.10	0.16	0.11	0.17	0.18	0.39	0.37
19:00	0.47	0.44	0.46	0.23	0.27	0.17	0.23	0.22	0.33	0.43	0.35	0.36
20:00	0.42	0.41	0.41	0.51	0.43	0.30	0.31	0.32	0.39	0.37	0.30	0.30
21:00	0.36	0.35	0.31	0.43	0.41	0.36	0.32	0.30	0.29	0.24	0.20	0.21
22:00	0.22	0.21	0.15	0.13	0.25	0.20	0.21	0.23	0.19	0.09	0.10	0.09
23:00	0.11	0.08	-0.01	0.10	0.11	0.07	0.12	0.16	0.07	0.03	0.01	-0.02
AVERAGE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



Εικόνα 4.8: Ημερήσια κατανάλωση ενέργειας ανά μήνα για το 1^ο έτος προσομοίωσης

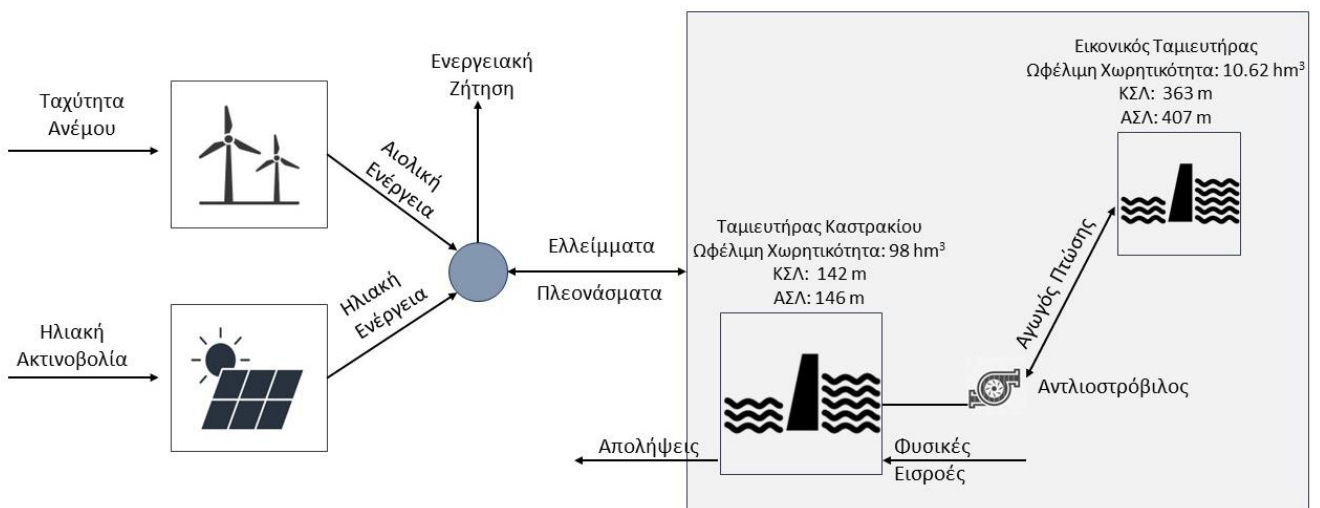
5 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

5.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ

Το υπό μελέτη σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας, συνδυάζεται με τον υπάρχοντα ταμιευτήρα Καστρακίου και αποτελείται από ένα αιολικό πάρκο, μια εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ, καθώς και μία μονάδα αντλησιοταμίευσης. Βασικό στοιχείο της μεθοδολογίας που αναπτύσσεται είναι η διαμόρφωση κατάλληλου μοντέλου προσομοίωσης, μέσα από το οποίο πραγματοποιείται διαστασιολόγηση των αιολικών και φωτοβολταϊκών πάρκων καθώς και η αξιολόγηση της αξιοπιστίας και της βιωσιμότητας του συστήματος.

Οι βασικές είσοδοι στο μοντέλο είναι η ταχύτητα ανέμου και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, δεδομένα που καθορίζουν την παραγόμενη, από τα συστήματα ΑΠΕ, ενέργεια. Η ενέργεια αυτή αξιοποιείται για την κάλυψη των ενεργειακών ζητήσεων, οι οποίες αποτελούν μέρος των ζητήσεων του διασυνδεδεμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η μονάδα αντλησιοταμίευσης αξιοποιείται για τη διαχείριση των ενεργειακών πλεονασμάτων και ελλειμμάτων. Στην Εικόνα 5.1 παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση του συστήματος.

Στόχος του συστήματος είναι η μέγιστη δυνατή διείσδυση των ΑΠΕ στο δίκτυο και η επίτευξη της μέγιστης κάλυψης των ενεργειακών αναγκών. Επομένως, η διαδικασία διαστοσιολόγησης του αιολικού και φωτοβολταϊκού πάρκου, πραγματοποιείται με κριτήριο την επίτευξη αυτού του στόχου. Σε περίπτωση αδυναμίας κάλυψης της ενεργειακής ζήτησης από το σύστημα, το έλλειμμα καλύπτεται από το κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης, του οποίου ποσοτικοποιείται η συνεισφορά.



Εικόνα 5.1: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος

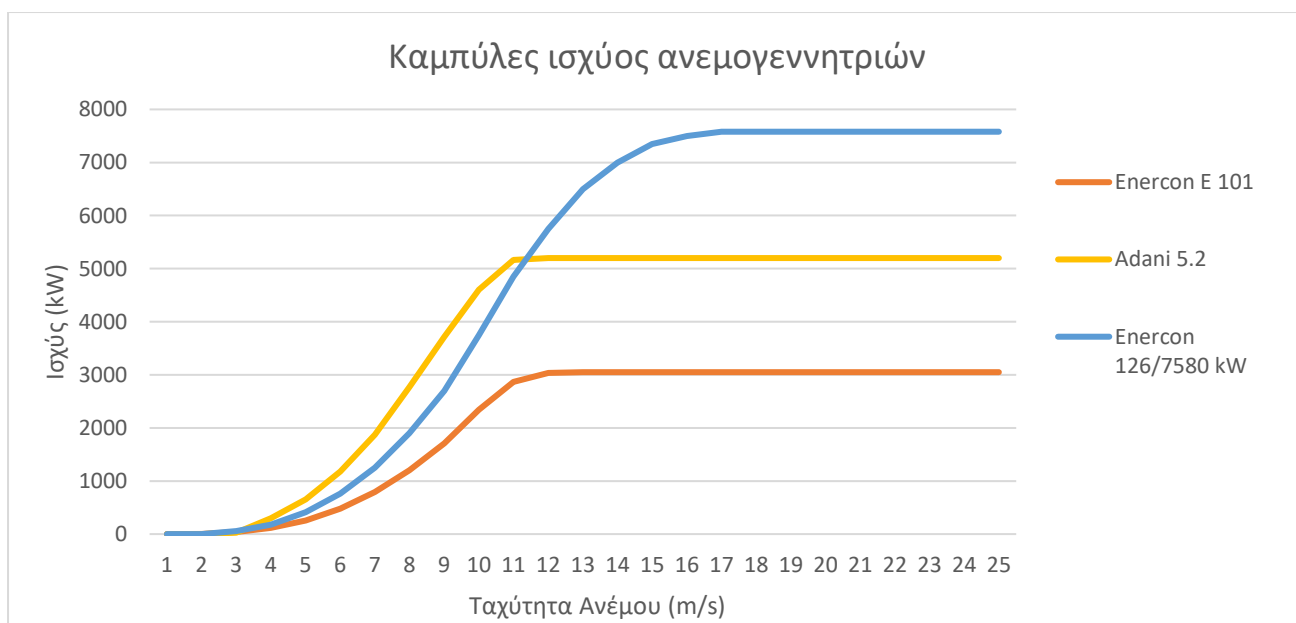
5.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.2.1 Αιολικό Πάρκο Υπολογισμός

Για τη διαμόρφωση του αιολικού πάρκου επιλέγονται τρεις διαφορετικοί τύποι ανεμογεννητριών, και αξιολογούνται τα αποτελέσματα που δίνουν ως προς την παραγόμενη αιολική ενέργεια. Συγκεκριμένα, επιλέγονται οι ανεμογεννήτριες Adani 5.2-160, Enercon 126/7580 και Enercon E101. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1, ενώ στην Εικόνα 5.2 παρουσιάζονται οι καμπύλες ισχύος, όπως αυτές δίνονται από τον κατασκευαστή του κάθε μοντέλου. Με βάση τα στοιχεία αυτά, προκύπτει ότι η ανεμογεννήτρια Enercon E 101 έχει τη χαμηλότερη ταχύτητα κατωφλίου (2 m/s) και επομένως τίθεται σε λειτουργία για ανέμους μικρότερους σε σχέση με τους άλλους δύο τύπους. Με δεδομένο ότι οι άνεμοι της τάξης των 2 m/s εμφανίζονται με μεγάλη συχνότητα στην περιοχή, η Enercon E101 επιλέγεται να εξεταστεί κατά τη διαστασιολόγηση του συστήματος. Παράλληλα, η επιλογή των ανεμογεννητριών Adani 5.2-160 γίνεται με κριτήριο την υψηλή ισχύ που μπορούν να αποδώσουν σε ενδιάμεσες ταχύτητες ανέμου, ενώ οι ανεμογεννήτριες Enercon 126/7580 μπορούν να λειτουργήσουν ιδιαίτερα αποδοτικά σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου.

Πίνακας 5.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών

Τεχνικά Χαρακτηριστικά Ανεμογεννητριών			
	Adani 5.2-160	Enercon 126/7580	Enercon E 101
Όνομαστική Ισχύς (MW)	5.2	7.58	3.05
Ταχύτητα κατωφλίου (m/s)	3	3	2
Όνομαστική ταχύτητα (m/s)	12	16.5	13
Ταχύτητα παύσης λειτουργίας (m/s)	25	34	25
Διάμετρος πτερωτής (m)	160	127	101
Ύψος πύργου (m)	200	135	124



Εικόνα 5.2: Καμπύλες ισχύος ανεμογεννητριών

Ο υπολογισμός της παραγόμενης αιολικής ενέργειας πραγματοποιείται με βάση τη συνθετική χρονοσειρά της ταχύτητας του ανέμου και των καμπυλών ισχύος των ανεμογεννητριών που πρόκειται να εγκατασταθούν. Αρχικά οι συνθετικές χρονοσειρές που έχουν παραχθεί, βασίζονται στα ανεμολογικά δεδομένα στο υψόμετρο του σταθμού από όπου μετρήθηκαν. Απαιτείται να γίνει αναγωγή των ταχυτήτων στο υψόμετρο του ρότορα των ανεμογεννητριών. Με την χρήση GIS, το μέσο υψόμετρο τοποθέτησης των ανεμογεννητριών υπολογίζεται στα 600 m. Κριτήριο χωροθέτησης των ανεμογεννητριών είναι η τοποθέτηση τους σε περιοχές υψηλού αιολικού δυναμικού και για αυτό το λόγο επιλέγονται σημεία με τα υψηλότερα υψόμετρα. Στην προκειμένη περίπτωση, οι θέσεις χωροθέτησης των αιολικών μηχανών είναι οι κορυφογραμμές, που διαμορφώνονται στην περιοχή γύρω από τον εικονικό ταμιευτήρα. Η τελική διάταξη του συστήματος παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 6. Ο σταθμός, από όπου λαμβάνονται τα ανεμολογικά δεδομένα, (Μετεωρολογικός σταθμός Μεσολογγίου) είναι τοποθετημένος σε υψόμετρο 2 m. Με την θεώρηση χρήσης ενός πρότυπου οργάνου ύψους 10 m, το υψόμετρο των ανεμολογικών δεδομένων λαμβάνεται ίσο με 12 m. Η αναγωγή σε κατάλληλο υψόμετρο δίνεται από την ακόλουθη σχέση (Κουτσογιάννης, Ξανθόπουλος, 1999):

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{\ln \frac{z_2}{z_0}}{\ln \frac{z_1}{z_0}} \quad (5.1)$$

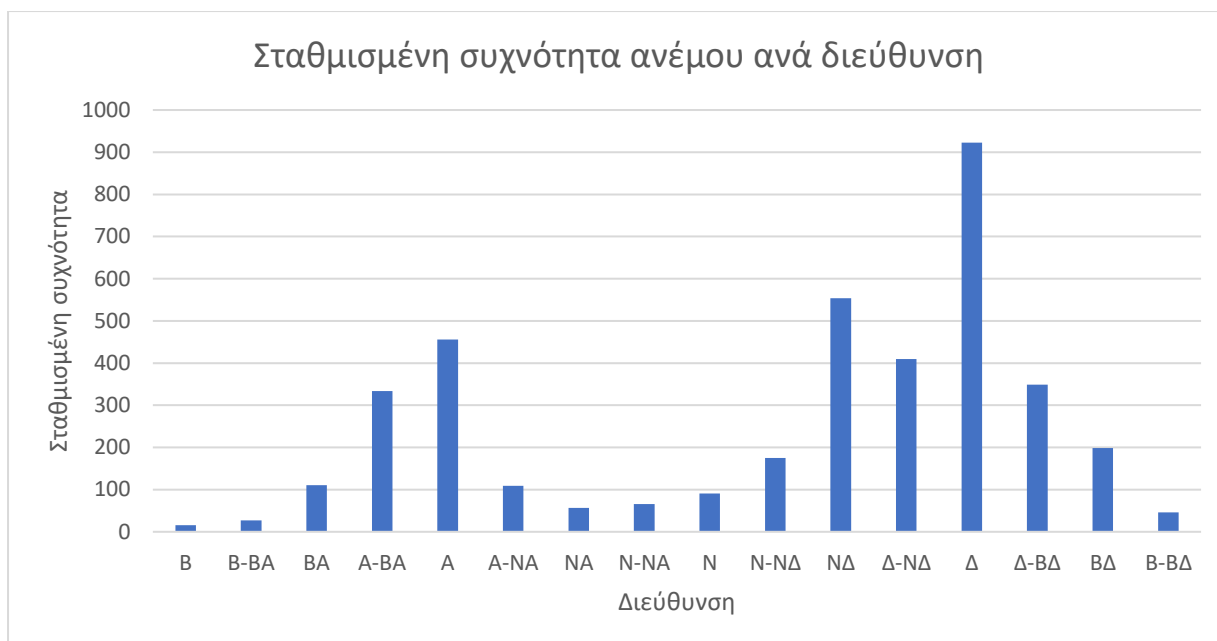
Όπου:

- u_1 και u_2 οι ταχύτητες ανέμου στο υψόμετρο του ρότορα της ανεμογεννήτριας και στο υψόμετρο μέτρησης των ανεμολογικών δεδομένων αντίστοιχα.
- z_0 η παράμετρος τραχύτητας του εδάφους που στην συγκεκριμένη περίπτωση λαμβάνεται ίση με 4 cm με την θεώρηση ύπαρξης χαμηλής βλάστησης της τάξεως των 10-50 cm. Η επιλογή της τιμής z_0 γίνεται με βάση τον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Τυπικές τιμές των παραμέτρων z_0 για διάφορες φυσικές επιφάνειες (Πηγή: Κουτσογιάννης, Ξανθόπουλος, 1999)

Τυπικές τιμές της παραμέτρου τραχύτητας z_0 για διάφορες φυσικές επιφάνειες (cm)	
Πάγος	0.001
Ασφαλτοστρωμένη επιφάνεια	0.002
Υδάτινη επιφάνεια	0.01-0.06
Χλόη ύψους μέχρι 1 cm	0.1
Χλόη ύψους 1-10 cm	0.1-0.2
Χλόη-σιτηρά κλπ ύψους 10-50 cm	2.0-5.0
Φυτοκάλυψη ύψους 1-2 m	20
Δένδρα ύψους 1-2 m	40-70

Επιπλέον, για την τοποθέτηση των ανεμογεννητριών απαιτείται και η επιλογή του καταλληλότερου προσανατολισμού, προκειμένου να αξιοποιηθεί στο μέγιστο η αιολική ενέργεια που παρέχεται από τον άνεμο. Για αυτό το λόγο είναι αναγκαίο να βρεθεί η επικρατέστερη διεύθυνση του ανέμου. Δεδομένου, όμως ότι οι ανεμογεννήτριες εμφανίζουν τη μέγιστη απόδοσή τους, για συγκεκριμένο εύρος ταχυτήτων ανέμου, δεν συνεισφέρει κάθε κλάση ταχύτητας με τον ίδιο τρόπο στην τελική παραγόμενη ενέργεια. Με βάση τις καμπύλες ισχύος των ανεμογεννητριών παράγονται συντελεστές βαρύτητας, με σκοπό οι κλάσεις που οδηγούν σε μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας να είναι οι καθοριστικές, ως προς την επιλογή της επικρατέστερης διεύθυνσης. Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.3, από όπου προκύπτει ότι οι δυτικοί άνεμο εμφανίζονται με την μεγαλύτερη συχνότητα.



Εικόνα 5.3: Εύρεση της επικρατέστερης διεύθυνσης του ανέμου

5.2.2 Φωτοβολταϊκά

Ο υπολογισμός της ενέργειας που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ πραγματοποιείται με βάση τις συνθετικές χρονοσειρές της ωριαίας ακτινοβολίας που φτάνει στην περιοχή μελέτης. Για κάθε χρονικό βήμα η παραγόμενη ενέργεια προκύπτει ως γινόμενο της ηλιακής ακτινοβολίας, της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού πάρκου και της απόδοσης των πάνελ. Η παραγόμενη ενέργεια δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που παράγουν τα φωτοβολταϊκά, όταν λειτουργούν στην πλήρη ισχύ τους. Το μοντέλο των φωτοβολταϊκών πάνελ που χρησιμοποιείται είναι το Tiger Neo και τα τεχνικά και λειτουργικά του χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά Tiger Neo.

Tiger Neo-Φ/Β πάνελ	
Μήκος (m)	1.134
Πλάτος (m)	2.465
Εμβαδόν (m ²)	2.79531
Απόδοση	0.2254
Εγκατεστημένη Ισχύς (Wp)	630

5.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ

Όταν η παραγωγή ενέργειας είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση, τότε το σύστημα αντλησιοταμίευσης αξιοποιεί το πλεόνασμα που προκύπτει και μέσω αντλιών μεταφέρει νερό από τον κατάντη ταμιευτήρα στον ανάντη. Όταν η παραγωγή ενέργειας είναι μικρότερη από την ζήτηση, τότε αξιοποιείται ο αποθηκευμένος όγκος νερού στον ανάντη ταμιευτήρα και καλύπτεται το ενεργειακό έλλειμμα.

Η παραγόμενη υδροηλεκτρική ενέργεια που προκύπτει από την πτώση ενός όγκου νερού από συγκεκριμένο ύψος, υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$E (KWh) = \frac{g*n*H(m)*V(m^3)}{3600} \quad (5.2)$$

Όπου:

E : η παραγόμενη ενέργεια,

g : επιτάχυνση της βαρύτητας,

n : συνολικός βαθμός απόδοσης ($n < 1$, για υδροηλεκτρικά έργα συνήθως $n = 0.80-0.90$),

H : υψομετρική διαφορά,

V : όγκος νερού που διέρχεται από τους στροβίλους.

(Μαμάσης κ.α., 2018)

Η ενέργεια που απαιτεί μια αντλία για να ανεβάσει έναν όγκο νερού σε συγκεκριμένο ύψος δίνεται από την σχέση:

$$E (KWh) = \frac{g*H(m)*V(m^3)}{n*3600} \quad (5.3)$$

(Tarek et al., 2007)

Με βάση και τις Σχέσεις 4.2 και 4.3 προκύπτει άμεσα το συμπέρασμα ότι η ενέργεια που καταναλώνεται για την άνοδο μιας συγκεκριμένης ποσότητας νερού σε κάποιο ύψος είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που αποδίδεται από την πτώση του ίδιου όγκου νερού από το ίδιο ύψος. Παρόλα αυτά, το κόστος ενέργειας κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης είναι σημαντικά μικρότερο από το κόστος ενέργειας τις ώρες αιχμής και επομένως από το σύστημα αντλησιοταμίευσης μπορεί να υπάρξει οικονομικό όφελος.

5.4 ΤΕΛΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Το μοντέλο προσομοιώνει τόσο το σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας όσο και το υδατικό ισοζύγιο των δύο ταμιευτήρων. Η προσομοίωση του δευτέρου επιτρέπει να ληφθούν υπόψιν περιορισμοί που αφορούν στη διαθεσιμότητα νερού. Η προσομοίωση του συστήματος έχει διάρκεια 40 έτη (2024-2063) και το χρονικό βήμα είναι ωριαίο.

Τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου είναι τα ακόλουθα:

- Οι συνθετικές χρονοσειρές των εισροών στον ταμιευτήρα του Καστρακίου με ωριαίο χρονικό βήμα,
- οι συνθετικές χρονοσειρές των εκροών από τον ταμιευτήρα του Καστρακίου με ωριαίο χρονικό βήμα,
- οι συνθετικές χρονοσειρές των ταχυτήτων του ανέμου με ωριαίο χρονικό βήμα
- οι συνθετικές χρονοσειρές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας και ανά ώρα στην περιοχή μελέτης,
- η χρονοσειρά ενεργειακών ζητήσεων με ωριαία χρονικό βήμα,
- οι καμπύλες ισχύος των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται,

- τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πάνελ που χρησιμοποιούνται (εμβαδόν πάνελ, εγκατεστημένη ισχύς, βαθμός απόδοσης),
- η απόδοση των αντλιοστροβίλων,
- τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των υπό μελέτη ταμιευτήρων (χωρητικότητα, σχέση στάθμη-αποθέματος, ανώτερη-κατώτερη στάθμη λειτουργίας, υψόμετρο αγωγού φυγής),
- η παροχετευτικότητα των αγωγών προσαγωγής.

Βάση των προηγούμενων στοιχείων εισόδου του μοντέλου, προκύπτουν τα ακόλουθα στοιχεία εξόδου:

- Ο αριθμός των ανεμογεννητριών όπως αυτές προκύπτουν από την βελτιστοποίηση του συστήματος,
- η επιφάνεια και ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πάνελ,
- το ποσοστό κάλυψης των ενεργειακών αναγκών, με και χωρίς αντλησιοταμίευση, για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης,
- η ετήσια παραγωγή ενέργειας,
- η παραγόμενη ενέργεια από κάθε πηγή (αιολικά, φωτοβολταϊκά, αντλησιοταμίευση) καθώς και η συνεισφορά του δικτύου για την κάλυψη πιθανόν ελλειμάτων,
- το μέσο ποσοστό κάλυψης των ενεργειακών αναγκών ανά μήνα χωρίς την εφαρμογή συστήματος αντλησιοταμίευσης,
- το μέσο ποσοστό κάλυψης των ενεργειακών αναγκών ανά μήνα με την εφαρμογή συστήματος αντλησιοταμίευσης,
- η παραγόμενη και η ζητούμενη ενέργεια για ένα τυπικό 24ωρο,
- οι διακυμάνσεις των αποθεμάτων των δύο ταμιευτήρων.

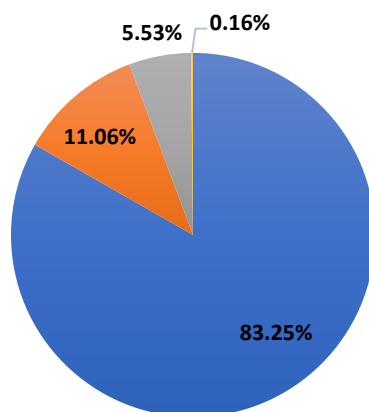
6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Μέσα από τη διαμόρφωση του μοντέλου επιλέγεται ο αριθμός των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών πάνελ, με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του ποσοστού κάλυψης των ενεργειακών αναγκών. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1. Επιπλέον, στην Εικόνα 6.1 παρουσιάζεται το ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας, για κάθε τύπο ανεμογεννήτριας και για τα φωτοβολταϊκό πάρκο, ως προς την συνολική ενέργεια που παράγουν. Οι ανεμογεννήτριες Adani 5.2-160 είναι οι επικρατέστερες, διότι αποδίδουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας για το εύρος ταχυτήτων που κυριαρχούν στην ανεμολογική δίαιτα της περιοχής. Με βάση την προσομοίωση του συστήματος το ποσοστό κάλυψης των ενεργειακών αναγκών ανέρχεται στο 50.47% χωρίς την εφαρμογή κάποιου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, ενώ με την λειτουργία της μονάδας αντλησιοταμίευσης, αυτό ανέρχεται στο 70.08%.

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα διαστασιολόγησης αιολικού και φωτοβολταϊκού πάρκου

Αποτελέσματα ενεργειακής παραγωγής				
Πηγή Ενέργειας	Εγκατεστημένη Ισχύς μονάδας (MW)	Αριθμός μονάδων	Συνολική εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Συνεισφορά επί της συνολικής παραγόμενης ενέργειας
Adani 5.2-160	5.20	40	208	83.30%
Enercon 126/7580	7.58	5	37.9	11.08%
Enercon E 101	3.05	5	15.25	5.54%
Solar panels	$630 \cdot 10^{-6}$	1000 (2735 m ²)	0.63	0.08%
		Σύνολο	261.47	100%

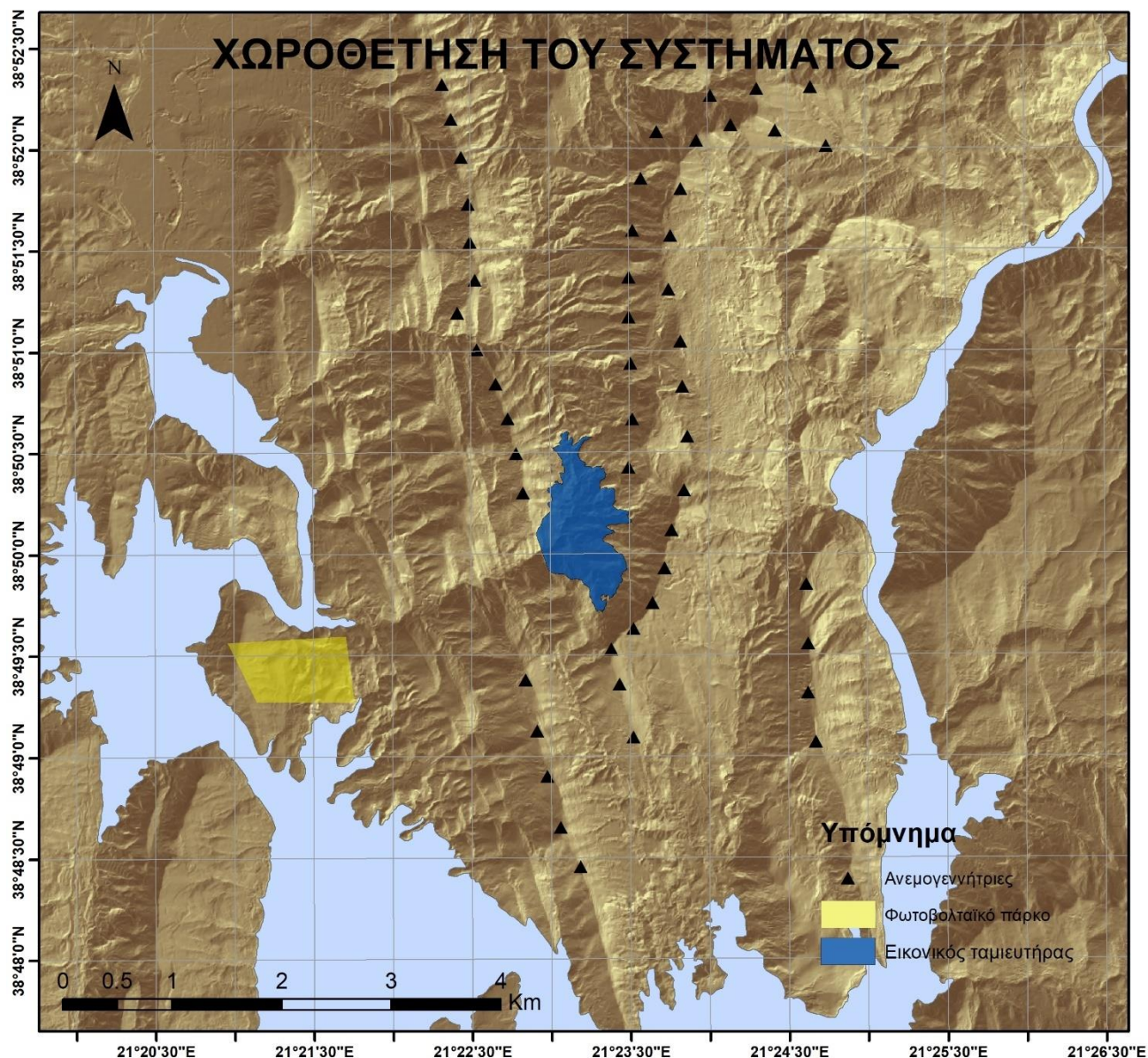
Συνεισφορά κάθε τεχνολογίας στο μίγμα των ΑΠΕ



■ Adani 5.2-160 ■ Enercon 126/7580 ■ Enercon E 101 ■ Solar panels

Εικόνα 6.1: Συνεισφορά της κάθε τεχνολογίας στην παραγόμενη από ΑΠΕ ενέργεια

Παράλληλα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.2 προτείνεται η χωροθέτηση του αιολικού και φωτοβολταϊκού πάρκου. Για την τοποθέτηση των ανεμογεννητριών, επιλέγονται οι κορυφογραμμές που διαμορφώνονται στην περιοχή, προκειμένου να εξασφαλιστεί το μέγιστο δυνατό υψόμετρο και παράλληλα να αποφευχθεί η ύπαρξη εμποδίων, που θα μειώσουν την ταχύτητα του ανέμου. Για την επιλογή της θέσης του φωτοβολταϊκού πάρκου, βασικό κριτήριο είναι η αποφυγή πιθανών εμποδίων που ενδέχεται να δημιουργούν σκιά και να αποτρέπουν μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας να φτάσει στο σημείο. Επιπλέον εξετάζεται και η προσβασιμότητα στην περιοχή, η οποία είναι εύκολη λόγω της ύπαρξης οδικού δικτύου, ενώ παράλληλα δεν υπάρχει κάποιος κοντινός οικισμός, με αποτέλεσμα η όποια οπτική όχληση να είναι περιορισμένη.

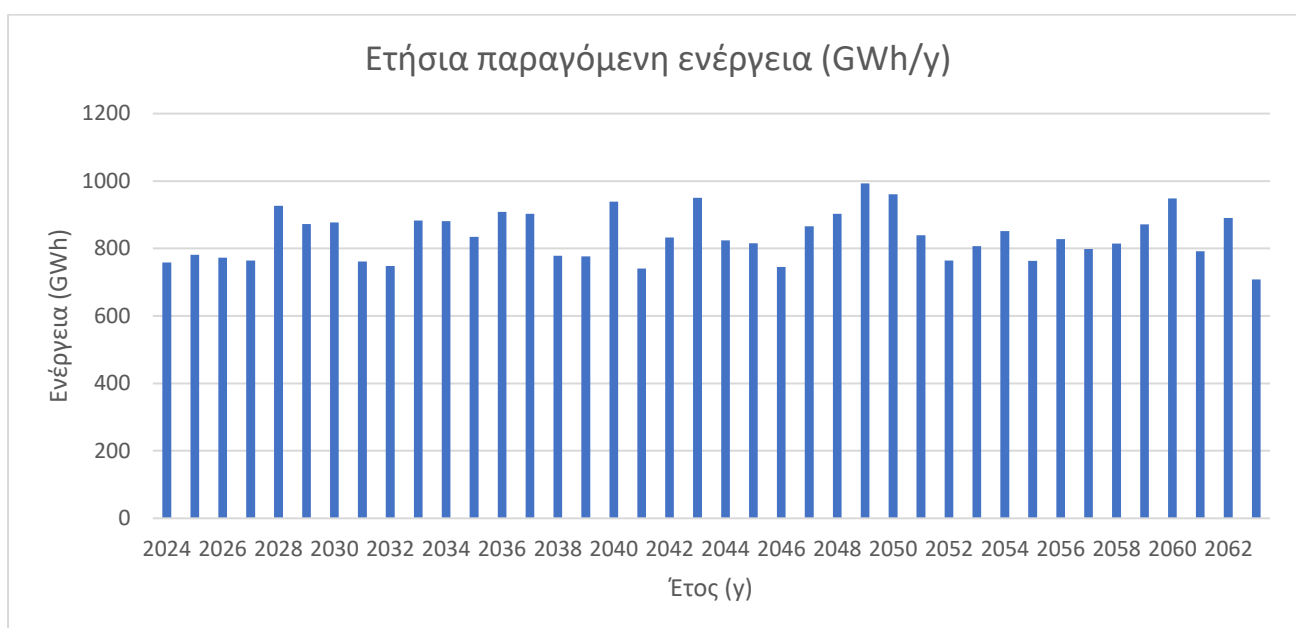


Εικόνα 6.2: Χωροθέτηση αιολικού και φωτοβολταϊκού πάρκου

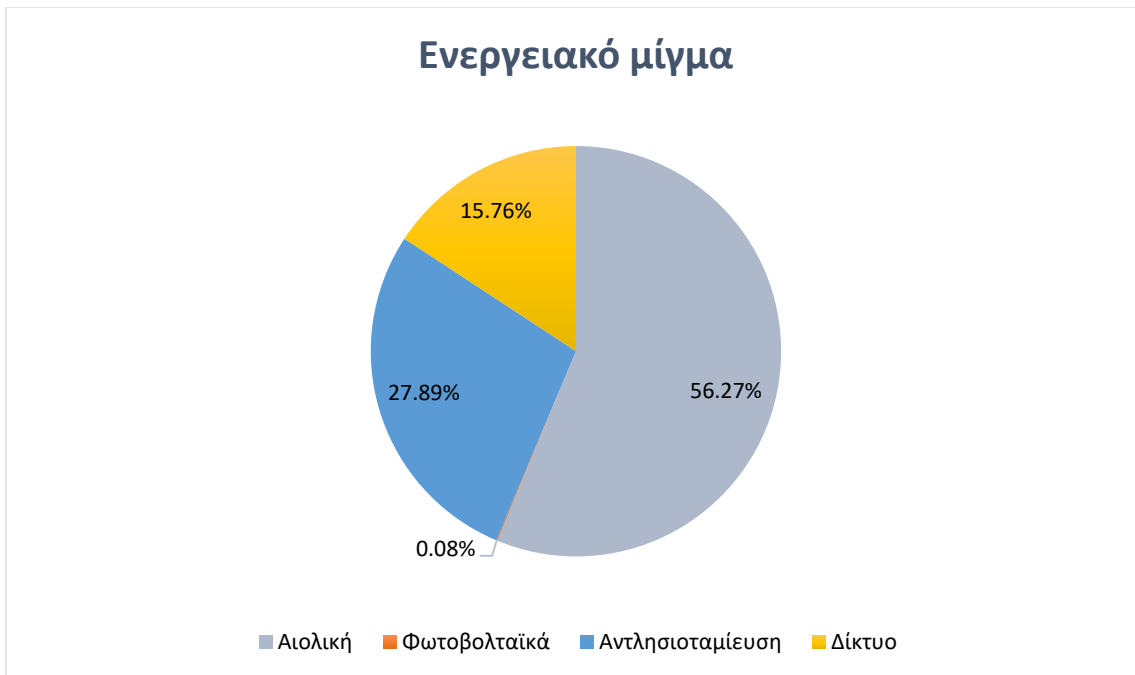
Στην Εικόνα 6.3, γίνεται παρουσίαση της συνολικής παραγόμενης ενέργειας από το αιολικό και φωτοβολταϊκό πάρκο για κάθε έτος της προσομοίωσης. Η μέση τιμή της παραγόμενης ενέργειας ανέρχεται

στις 649.8 GWh και παρουσιάζει σχετικά μικρές διακυμάνσεις, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες του κάθε έτους.

Βασικός στόχος του συστήματος είναι η επίτευξη της μέγιστης δυνατής διείσδυσης των ΑΠΕ στο δίκτυο. Ωστόσο, το σύστημα εξαιτίας της στοχαστικότητας που διέπει τις βασικές παραμέτρους εισόδου (άνεμος, ηλιακή ακτινοβολία) δεν μπορεί να καλύψει πλήρως τις ενεργειακές ανάγκες της περιοχής. Δεδομένου ότι η περιοχή μελέτης αποτελεί μέρος του διασυνδεδεμένου δικτύου, τα ελλείμματα που δεν μπορούν να καλυφθούν ούτε και με την εφαρμογή της αντλησιοταμίευσης, καλύπτονται από το ίδιο το δίκτυο. Στην Εικόνα 6.4, παρουσιάζεται το ποσοστό της παραγόμενης από κάθε πηγής ενέργειας ως προς τη συνολική παραγόμενη ενέργεια. Στην συνολική παραγόμενη ενέργεια, περιλαμβάνονται και πλεονάσματα, τα οποία λόγω περιορισμών που προκύπτουν από το υδατικό ισοζύγιο των δύο ταμιευτήρων (μικρό διαθέσιμο απόθεμα στον ταμιευτήρα Καστρακίου ή πλήρης εικονικός ταμιευτήρας) δεν μπορούν άμεσα να αξιοποιηθούν.

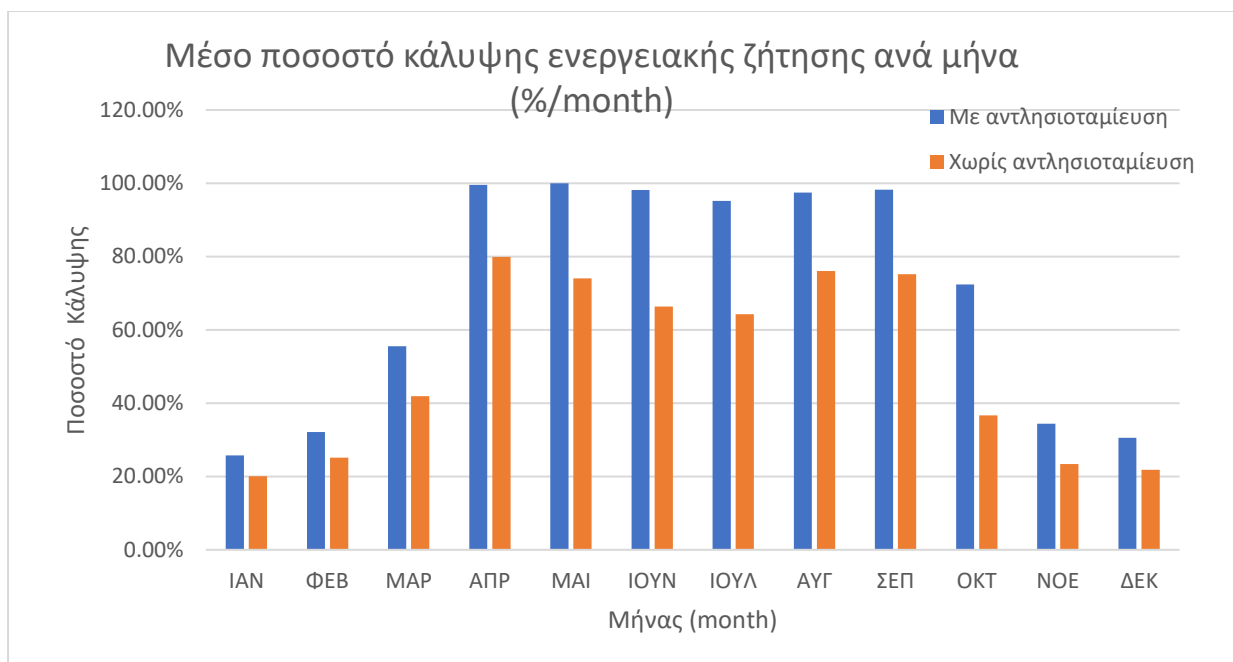


Εικόνα 6.3: Παραγόμενη ενέργεια για κάθε έτος προσομοίωσης

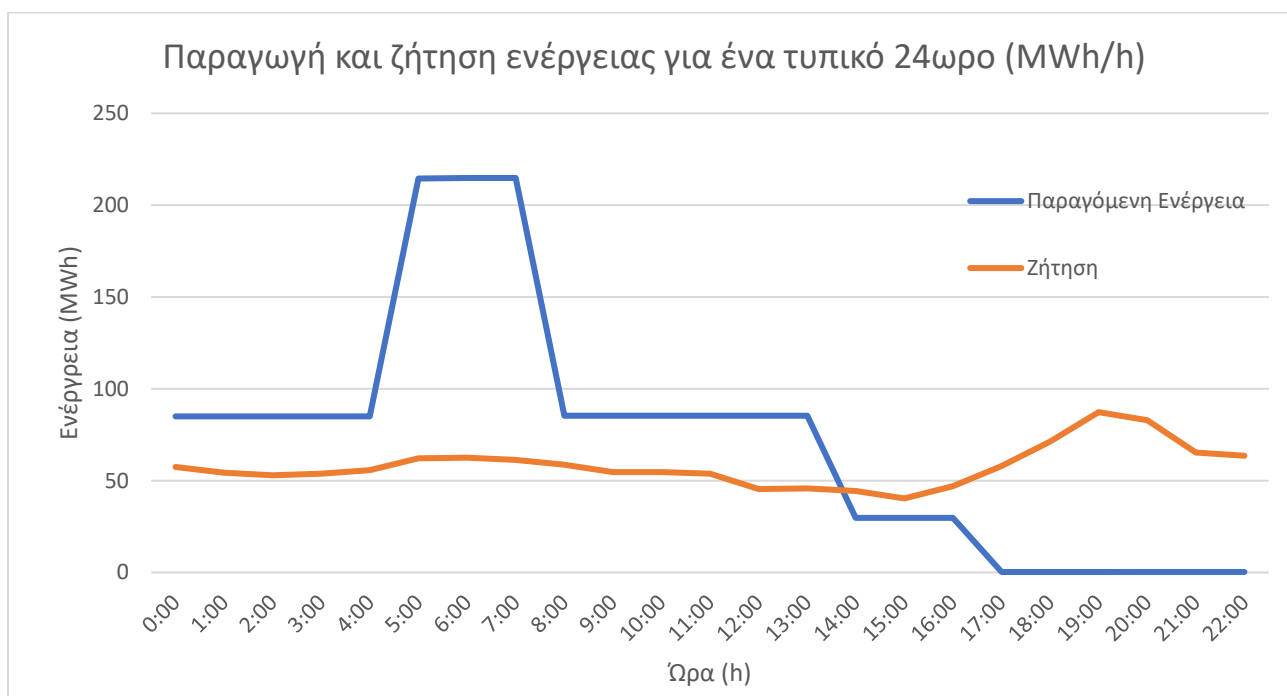


Εικόνα 6.4: Το ενεργειακό μίγμα όπως διαμορφώνεται με βάση τη λειτουργία του συστήματος

Στην Εικόνα 6.5, παρουσιάζεται το μέσο ποσοστό κάλυψης των ενεργειακών αναγκών για κάθε μήνα του έτους και για δύο σενάρια. Το πρώτο σενάριο αφορά στην παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ χωρίς τη λειτουργία του συστήματος αντλησιοταμίευσης και το δεύτερο με τη λειτουργία. Οι κάλυψη των ενεργειακών αναγκών είναι ιδιαίτερα μικρή κατά τους χειμερινούς μήνες, γεγονός που σχετίζεται άμεσα με τις αυξημένες ενεργειακές ανάγκες. Επιπλέον, με βάση την Εικόνα 6.5, γίνεται εμφανής η συνεισφορά της αντλησιοταμίευσης στην κάλυψη των αναγκών και την περαιτέρω διείσδυση των ΑΠΕ στο δίκτυο. Η σημασία των έργων αποθήκευσης ενέργειας φαίνεται και από την Εικόνα 6.6, στην οποία παρουσιάζεται η διακύμανση της ενεργειακής ζήτησης και παραγωγής για ένα τυπικό 24ωρο. Όπως διαπιστώνεται, η ενεργειακή παραγωγή δεν ταυτίζεται με την ενεργειακή ζήτηση, αλλά υπάρχουν χρονικά διαστήματα εντός της ημέρας, κατά τα όποιο εμφανίζονται ενεργειακά πλεονάσματα και διαστήματα, στα οποία δεν μπορεί να καλυφθεί η ενεργειακή ζήτηση. Χωρίς τη αντλησιοταμίευση, η πιθανότητα μη κάλυψης των ενεργειακών αναγκών, κυρίως τις ώρες αιχμής, είναι ιδιαίτερα αυξημένη. Με την εφαρμογή αντλησιοταμίευσης, γίνεται διαχείριση των πλεονασμάτων, με σκοπό την αποθήκευση τους στον ανάντη ταμιευτήρα και την χρησιμοποίησή τους, όταν υπάρχουν ελλείματα στην ενεργειακή παραγωγή. Σαν αποτέλεσμα, μετά την λειτουργία των μονάδων αντιστρεπτής λειτουργίας, καθίσταται εφικτή η πλήρης κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης για τις περισσότερες μέρες του έτους.



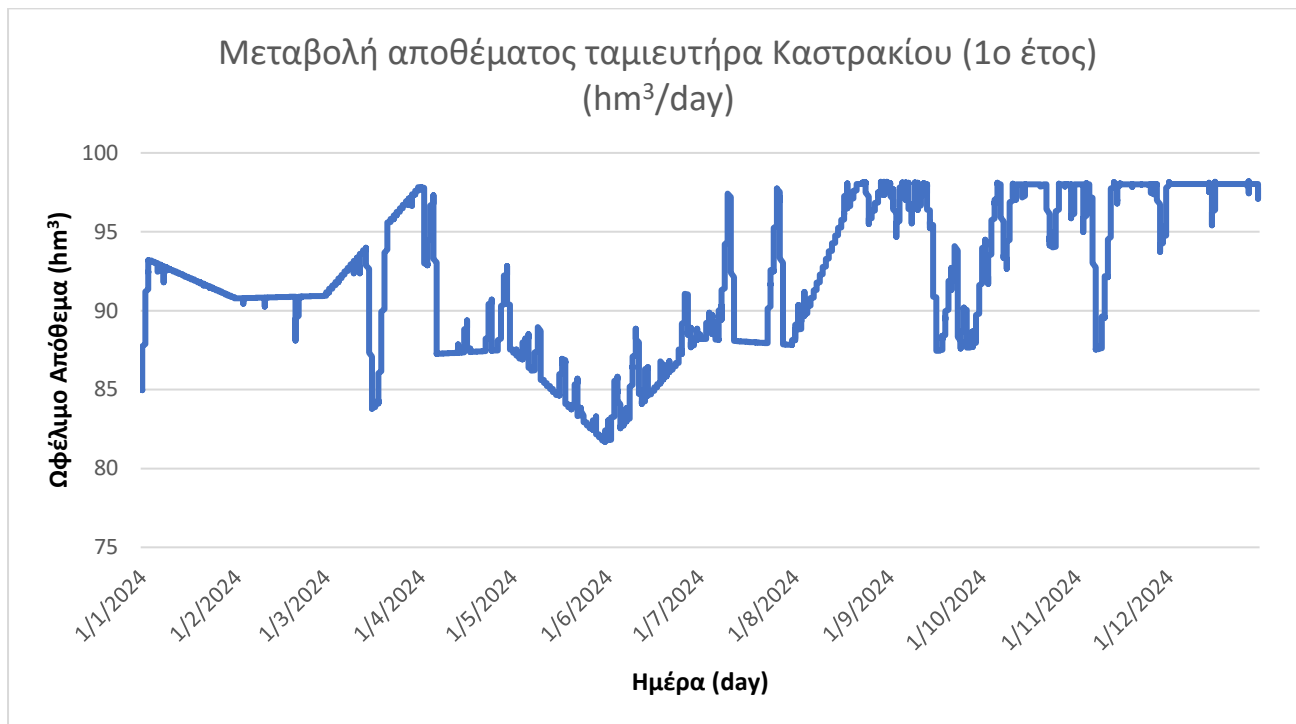
Εικόνα 6.5: Μέσο κάλυψη ενεργειακής ζήτησης ανά μήνα με την εφαρμογή και χωρίς την εφαρμογή αντλησιοταμίευσης



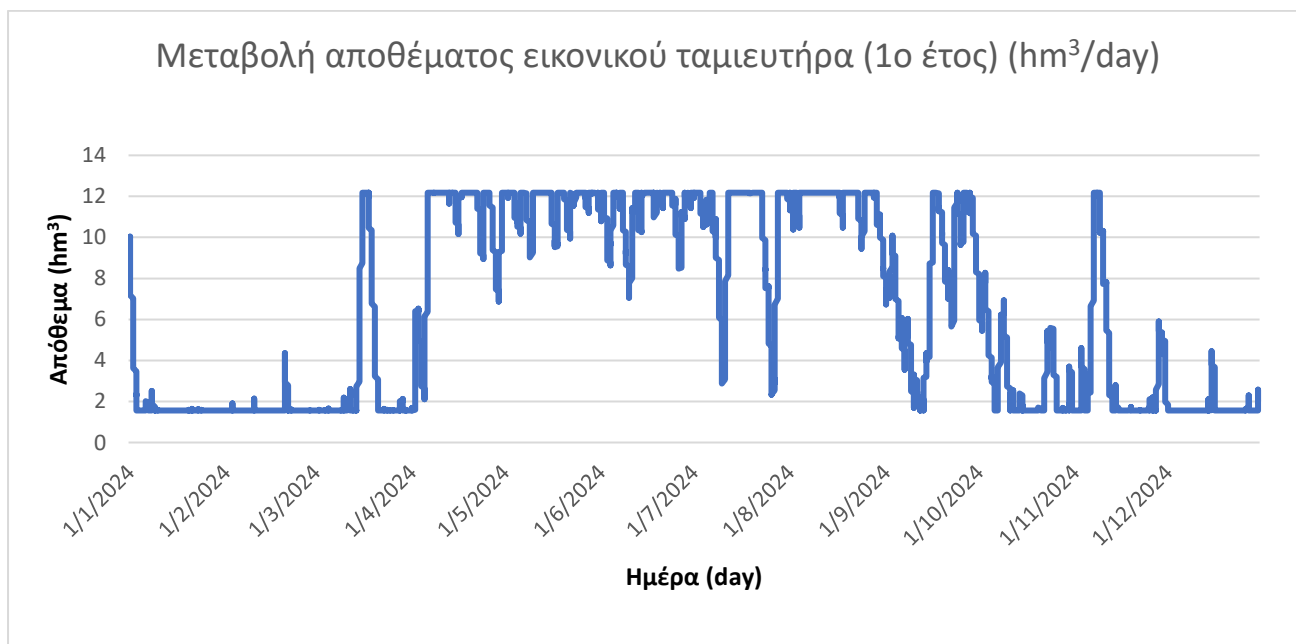
Εικόνα 6.6: Ημερήσια διακύμανση της ενεργειακής παραγωγής και ζήτησης για ένα τυπικό 24ωρο

Στην Εικόνα 6.7 και στην Εικόνα 6.8, παρουσιάζεται η εξέλιξη αποθεμάτων για τους δυο ταμιευτήρες για το πρώτο έτος προσομοίωσης. Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα και για τα υπόλοιπα έτη. Στον ταμιευτήρα Καστρακίου, παρατηρείται τάση μείωσης του αποθέματος κατά τους θερινούς μήνες, η οποία οφείλεται στο συνδυασμό μειωμένων εισροών και αυξημένων αρδευτικών αναγκών σε αυτό το διάστημα. Παράλληλα παρατηρούνται μικρές διακυμάνσεις και ένα σύνολο τοπικών ακροτάτων σε μικρότερη χρονική κλίμακα, τα

οποία σχετίζονται άμεσα με τη λειτουργία της αντλιοσταμείωσης. Όσον αφορά στον εικονικό ταμιευτήρα, αυτός παρουσιάζει σημαντικά ελλείματα κατά τους χειμερινούς μήνες, λόγω των αυξημένων ενεργειακών αναγκών και των περιορισμένων πλεονασμάτων που διατίθενται για την άντληση και αποθήκευση ύδατος.



Εικόνα 6.7: Μεταβολή του αποθέματος του ταμιευτήρα Καστρακίου για το πρώτο έτος της προσομοίωσης



Εικόνα 6.8: Μεταβολή του αποθέματος του εικονικού ταμιευτήρα για το πρώτο έτος της προσομοίωσης

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιγράφει τον τρόπο λειτουργίας ενός συστήματος παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, με παράλληλη εφαρμογή συστήματος αντλησιοταμίευσης για την αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται μεθοδολογία εφαρμογής και προσομοίωσης ενός τέτοιου συστήματος στην περιοχή του ταμιευτήρα Καστρακίου, αξιοποιώντας το ήδη υπάρχον τεχνικό έργο της περιοχής και τους υδατικούς πόρους που αυτό προσφέρει. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει την ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης με σκοπό αφενός τη διαστασιολόγηση των μονάδων ΑΠΕ και αφετέρου τη μελέτη της βιωσιμότητας και της αξιοπιστίας του συστήματος, καθώς και τις δυνατότητες που προσφέρει στην μέγιστη διείσδυση των ΑΠΕ στο δίκτυο. Παράλληλα, εξετάζεται η συνεισφορά των έργων αποθήκευσης ενέργειας στην αποτελεσματικότερη διαχείριση της ενεργειακής παραγωγής. Για την προσομοίωση του συστήματος, πραγματοποιείται συλλογή και επεξεργασία δεδομένων ανέμου, ηλιακής ακτινοβολίας και εισροών στον ταμιευτήρα Καστρακίου, καθώς και εκτίμηση των ενεργειακών ζητήσεων.

Γενικότερα, συμπεραίνεται ότι η περιοχή μελέτης ενδείκνυται για τη διαμόρφωση του υπό μελέτη συστήματος. Αρχικά, οι περιοχές της δυτικής Ελλάδας και εν προκειμένω η λεκάνη απορροής του Αχελώου, χαρακτηρίζονται από σημαντικά αποθέματα υδατικών πόρων, λόγω των σημαντικών βροχοπτώσεων στην περιοχή. Παράλληλα το ανάγλυφο, το οποίο χαρακτηρίζεται από έντονες κλίσεις, έχει ως αποτέλεσμα το υδροδυναμικό της περιοχής να είναι ιδιαίτερα υψηλό και η εγκατάσταση ενός δεύτερου ταμιευτήρα, για τη διαμόρφωση του συστήματος αντλησιοταμίευσης, να είναι εφικτή και βιώσιμη. Επιπλέον, το αιολικό δυναμικό της περιοχής είναι εκμεταλλεύσιμο και επομένως υπάρχει δυνατότητα εγκατάστασης αιολικού πάρκου. Οι διαθέσιμες ώρες ηλιοφάνειας και το ποσό της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας καθιστούν βιώσιμη την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ. Οι βασικές εισοδοί του μοντέλου είναι ο άνεμος και η ηλιακή ακτινοβολία, οι οποίες χαρακτηρίζονται από σημαντική αβεβαιότητα. Η αβεβαιότητα αυτή μεταφέρεται και στην παραγόμενη ενέργεια του συστήματος, με αποτέλεσμα η κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης να μην είναι εφικτή για κάθε χρονικό βήμα. Η επίδραση της αβεβαιότητας μειώνεται μέσω της αντλησιοταμίευσης και των δυνατοτήτων που αυτή προσφέρει στην αποτελεσματικότερη ρύθμιση και διαχείριση της ενεργειακής παραγωγής.

Από τη διαδικασία διαστασιολόγησης, προτείνεται η εγκατάσταση 40 ανεμογεννητριών Adani 5.2-160, 5 ανεμογεννητριών Enercon 126/7580 και 5 ανεμογεννητριών Enercon E 101. Το αιολικό πάρκο έχει εγκατεστημένη ισχύ 258.15 MW. Το φωτοβολταϊκό πάρκο, διαθέτει εγκατεστημένη ισχύ 0.63 MW και η συνολική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πάνελ ανέρχεται 2735 m². Η μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια από τις συγκεκριμένες εγκαταστάσεις ανέρχεται στις 649.8 GWh. Με βάση τα αποτελέσματα, καθίσταται σαφής η συνεισφορά της αντλησιοταμίευσης στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών και την περεταίρω διείσδυση των ΑΠΕ στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, η μονάδα αντιστρεπτής λειτουργίας συνεισφέρει σε ποσοστό 27.89% στη συνολική παραγόμενη ενέργεια, ενώ αυξάνει σημαντικά το ποσοστό κάλυψης των ενεργειακών αναγκών. Χαρακτηριστικά, για το σύνολο των ετών προσομοίωσης το ποσοστό από 50.47% ανέρχεται, λόγω της αντλησιοταμίευσης, σε ποσοστό 70.08%. Το σύστημα παρουσιάζει ευαισθησία στις κλιματολογικές συνθήκες, με αποτέλεσμα τους χειμερινούς μήνες, κατά τους οποίους αυξάνονται οι ενεργειακές ζητήσεις, το ποσοστό κάλυψης των ενεργειακών αναγκών να είναι μικρό.

7.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

- Αρχικά, αξίζει να σημειωθεί ότι η προσέγγιση που ακολουθείται στην παρούσα εργασία μπορεί να βρει εφαρμογή και σε άλλους ταμειυτήρες και να διερευνηθούν τα οφέλη και οι δυνατότητες που μπορεί να προσφέρει η συνδυασμένη εγκατάσταση μονάδων ΑΠΕ και μονάδων αντλησιοταμίευσης.
- Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξέταση εναλλακτικών μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας, όπως τεχνολογιών παραγωγής πράσινου υδρογόνου και συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων σε σχέση με το σύστημα αντλησιοταμίευσης.
- Επίσης, μπορεί να πραγματοποιηθεί οικονομικοτεχνική ανάλυση του έργου και να αξιολογηθεί η βιωσιμότητά του και το οικονομικό όφελος που μπορεί να αποφέρει.
- Επιπλέον, είναι ενδιαφέρον να εξεταστούν οι αλλαγές που υφίσταται το σύστημα, αν κατά την διαδικασία διαστασιολόγησης των μονάδων ΑΠΕ, τεθούν εναλλακτικοί στόχοι πέρα από την μεγιστοποίηση της ενεργειακής κάλυψης. Ενδεικτικά, τέτοιοι στόχοι μπορεί να είναι το οικονομικό όφελος ή η ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.
- Παράλληλα, μπορεί να διερευνηθεί η συνεισφορά του συστήματος στην μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα.
- Τέλος, υπάρχει δυνατότητα να εφαρμοστούν εργαλεία πολυκριτηριακής θεωρητικής ανάλυσης, καθώς και στοχαστικής ανάλυσης, για την μελέτη των αλλοιώσεων που μπορεί να προκαλέσει η εγκατάσταση των μονάδων ΑΠΕ στο περιβάλλον.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αγαπητίδου Αναστασία-Αλκμήνη, 2021, «Ανάπτυξη μεθοδολογίας υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ με αντλησιοταμίευση και δεξαμενή υδρογόνου στο νησί της Λήμνου», Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα
- Βουράκης Θεόδωρος, 2022, «Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Εφαρμογής Υβριδικού Συστήματος για την Κάλυψη Υδατικών και Ενεργειακών Αναγκών στη Νήσο Ιθάκη», Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα
- Διαλυνάς Ε., Χατζηαργυρίου Ν., Παπαθανασίου Σ., και Βουρνάς Κ. , 2007, Μελέτες ορίων αιολικής διεύθυνσης, Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Ευστρατιάδης Α., Παπανικολάου Π. και Μίχας Σ, 2020, Υδραυλικές Κατασκευές-Φράγματα, Σημειώσεις Μαθήματος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Αθήνα
- Κοκολάκης, Γ.Ε., 2007, «Σημειώσεις Στοχαστικών Ανελιξεων», Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, ΕΜΠ, Αθήνα
- Κουτσογιάννης Δ., Ξανθόπουλος Θ., 1999, Τεχνική Υδρολογία, Έκδοση 3, ΕΜΠ, Αθήνα
- Μπαλάρας Κ., Αργυρίου Α., Καραγιάννης Φ., 2006, «Συμβατικές και ήπιες μορφές ενέργειας», Αθήνα ,ΤεΚΔΟΤΙΚΗ
- Μανίκας Κ., 2021, «Προσομοίωση και αξιολόγηση συστήματος αντλησιοταμίευσης στον ταμιευτήρα Καστρακίου», Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα
- Μαντά Ελένη, 2021, «Αισθητική των Ανεμογεννητριών», Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα
- Μάρκου Αγγέλου, 2014, «Παραγωγή συνθετικού φυσικού αερίου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας», Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα
- Μπαλτάς Ε., 2009, Υδρολογικός Σχεδιασμός Ταμιευτήρα για την Παραγωγή Υδροηλεκτρικής Ενέργειας στη Θέση Αυλάκι του Αχελώου, Υδρογαία, Τιμητικός τόμος στον καθηγητή Χρήστο Δ. Τζιμόπουλο, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη
- Μπαλτάς Ε., 2021, «Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στην Ελλάδα και Χωροταξική τους Διάσταση», Υδρομετεωρολογία, Σημειώσεις Μαθήματος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων
- Μιμίκου Μ.Α., 2006, Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, 3^η έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα
- Νικολόπουλος Τάκης, 2021, «Σκιές από το μέλλον, Δυσδιάκριτες πτυχές της οικοκλιματικής κρίσης», Αθήνα, Εκδόσεις των συναδέλφων.
- Σκρουφούτα Σοφία, 2020, «Διερεύνηση Διαστασιολόγησης Υβριδικού Συστήματος ΑΠΕ για τη Διασφάλιση των Ενεργειακών και Υδατικών Αναγκών στο Νησί της Καρπάθου», Διπλωματική εργασία, ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ, Αθήνα
- Τσικνάκου Π.Ι, Μαυρονικολάου Ν.Π., Μουτάφης Ν.Ι., Στεφανάκος Ι.Π, 2017, Σύστημα Αντλησιοταμίευσης στην Αμφιλοχία. Γενική Διάταξη έργων- Άνω Ταμιευτήρες- Φράγματα και συναφή έργα, 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Φραγμάτων και Ταμιευτήρων : Διαχείριση Έργων και Προοπτικές Ανάπτυξης, Αθήνα
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας-Γενική Διεύθυνση Υδάτων, 2023, «Σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών, 2^η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (ΕΛ04), Προσχέδιο», http://wfdver.ypeka.gr/wp-content/uploads/2023/05/EL04_2REV_P4.9_Proxedia_LAP.pdf

- Φελώνη Ελισάβετ, 2021, «Υδρομετεωρολογία: Ατμόσφαιρα-Ακτινοβολία και Ηλιακή Ενέργεια Θερμοκρασία-Βαρομετρική πίεση-Άνεμος-Εξατμισοδιαπνοή», Σημειώσεις Μαθήματος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Adams, Timothy Breckner. "Feasibility of Retrofitting Existing Hydropower Infrastructure for Use in Renewable Energy Storage." Submitted to the Department of Civil and Environmental Engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree of Masters of Engineering in Environmental Engineering Science. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology (2018).
- Alnaqbi, Shaima A., Shamma Alasad, Haya Aljaghoub, Abdul Hai Alami, Mohammad Ali Abdelkareem, and Abdul Ghani Olabi. "Applicability of Hydropower Generation and Pumped Hydro Energy Storage in the Middle East and North Africa." *Energies* 15, no. 7 (2022): 2412.
- Amankwa, Mark Opoku, Justice Issah Musah-Surugu, Gershon Dagba, and Prince Opoku. "Scaling-up Renewable Energy Share of Global Energy Mix: Analysis of Spatial Variability." *Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*, 2020, 1–14.
- Bitew, Girmaw Teshager, Minxiao Han, Sifrash A. Mekonnen, Simiyu Patrobers, Zmarrak W. Khan, and Luu K. Tuan. "Pumped Energy Storage System Technology and Its AC–DC Interface Topology, Modelling and Control Analysis: A Review." *The Journal of Engineering* 2019, no. 16 (2018): 705–10.
- Deane, J.P., B.P. Ó Gallachóir, and E.J. McKeogh. "Techno-Economic Review of Existing and New Pumped Hydro Energy Storage Plant." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, no. 4 (2010): 1293–1302.
- Fu, Yichuan, Zhiwei Gao, Yuanhong Liu, Aihua Zhang, and Xiuxia Yin. "Actuator and Sensor Fault Classification for Wind Turbine Systems Based on Fast Fourier Transform and Uncorrelated Multi-Linear Principal Component Analysis Techniques." *Processes* 8, no. 9 (2020): 1066.
- Gilfillan, Daniel, and Jamie Pittock. "Pumped Storage Hydropower for Sustainable and Low-Carbon Electricity Grids in Pacific Rim Economies." *Energies* 15, no. 9 (2022): 3139.
- Hadjipaschalis, Ioannis, Andreas Poullikkas, and Venizelos Efthimiou. "Overview of Current and Future Energy Storage Technologies for Electric Power Applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, no. 6-7 (2009): 1513–22.
- Hannah Ritchie and Max Roser (2013) - "Indoor Air Pollution". Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/indoor-air-pollution>' [Online Resource]
- Hurst, H. E. Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116, (1951): 770-799.
- Katsaprakakis, Dimitris Al., Dimitris G. Christakis, Ioannis Stefanakis, Petros Spanos, and Nikos Stefanakis. "Technical Details Regarding the Design, the Construction and the Operation of Seawater Pumped Storage Systems." *Energy* 55 (2013): 619–30.
- Khzouz, Martin, and Evangelos I. Gkanas. "Hydrogen Technologies for Mobility and Stationary Applications: Hydrogen Production, Storage and Infrastructure Development." *Renewable Energy - Resources, Challenges and Applications*, 2020.
- Komatsu, T., J. Sakata, and M. Takezawa. "Environmental Conservation Measures For Construction Of A Power Plant." *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 85 (2005): 389-98
- Koutsoyiannis, Demetris. "Hydrologic Persistence and the Hurst Phenomenon." *Water Encyclopedia*, 2004, 210–21.
- Koutsoyiannis, Demetris. 2022. *Stochastics of Hydroclimatic Extremes, a cool look at risk*. Edition 2. Athens: Kallipos, Open Academy Edition, doi.org/10.57713/kallipos-1.

- Krajačić, Goran, Dražen Lončar, Neven Duić, Mladen Zeljko, Roberto Lacal Arántegui, Rodica Loisel, and Igor Raguzin. "Analysis of Financial Mechanisms in Support to New Pumped Hydropower Storage Projects in Croatia." *Applied Energy* 101 (2013): 161–71.
- Kucukali, Serhat. "Finding the Most Suitable Existing Hydropower Reservoirs for the Development of Pumped-Storage Schemes: An Integrated Approach." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37 (2014): 502–8.
- Lu, Xu, and Siheng Wang. "A GIS-Based Assessment of Tibet's Potential for Pumped Hydropower Energy Storage." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69 (2017): 1045–54.
- Nikolaou, Triantafyllia, George S. Stavrakakis, and Konstantinos Tsamoudalis. "Modeling and Optimal Dimensioning of a Pumped Hydro Energy Storage System for the Exploitation of the Rejected Wind Energy in the Non-Interconnected Electrical Power System of the Crete Island, Greece." *Energies* 13, no. 11 (2020): 2705.
- Manikas, Konstantinos, Sofia Skroufouta, and Evangelos Baltas. Simulation and evaluation of Pumped Hydropower Storage (Phps) system at Kastraki Reservoir, 2023.
- Max Roser (2020) - "The world's energy problem". Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/worlds-energy-problem>' [Online Resource]
- Mensah, Johnson Herlich, Ivan Felipe Santos, Danielle Rodrigues Raimundo, Maria Cláudia Costa de Oliveira Botan, Regina Mambeli Barros, and Geraldo Lucio Tiago Filho. "Energy and Economic Study of Using Pumped Hydropower Storage with Renewable Resources to Recover the Furnas Reservoir." *Renewable Energy* 199 (2022): 320–34.
- Oke, T. R. *Boundary layer climates*, 1987. <https://doi.org/10.4324/9780203407219>.
- Papadopoulos, Vissarion, and Dimitris G. Giovanis. "Stochastic Finite Element Methods." *Mathematical Engineering*, 2018.
- Pérez-Díaz, Juan I., M. Chazarra, J. García-González, G. Cavazzini, and A. Stoppato. "Trends and Challenges in the Operation of Pumped-Storage Hydropower Plants." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44 (2015): 767–84.
- Saygin, Deger, Ruud Kempener, Nicholas Wagner, Maria Ayuso, and Dolf Gielen. "The Implications for Renewable Energy Innovation of Doubling the Share of Renewables in the Global Energy Mix between 2010 and 2030." *Energies* 8, no. 6 (2015): 5828–65.
- Skroufouta S., Baltas E., 2021, Investigation of hybrid renewable energy system (HRES) for covering energy and water needs on the island of Karpathos in Aegean Sea, article, ELSEVIER, Athens
- Tarek Mohamed Abdel-Aziz, and Nadia Mohamed. "Characteristic equations for hydropower stations of main barrages in Egypt." *Eleventh International Water Technology Conference, IWTC11 2007 Sharm El-Sheikh, Egypt, March (2007): 461-70.*
- Walker, Stephen. "Workshop on stochastic error, parameter error and model error." *General Indurance Study Group-1996 General Insurance Convention (1996): 461-469.*
-

Ιστοσελίδες

- Εθνικό Σχέδιο για την ενέργεια και το κλίμα, Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Αθήνα, Ιανουάριος 2019, https://www.depa.gr/wp-content/uploads/2020/02/esek_ian.-2019.pdf
- Ευρωπαϊκό Συμβούλιο-Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, Φεβρουάριος 2023, <https://www.consilium.europa.eu/el/infographics/eu-gas-supply/>
- <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
- <https://ourworldindata.org/energy>
- <http://www.cres.gr/kape/datainfo/maps.htm>
- <http://www.estiaconsulting.gr/el/FFC02B0E>

- <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>
- <https://www.atmosphere-upatras.gr/solarmaps>
- [https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465\)](https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465)
- [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Tonnes of oil equivalent \(toe\)](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Tonnes_of_oil_equivalent_(toe))
- [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Carbon dioxide equivalent](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Carbon_dioxide_equivalent)